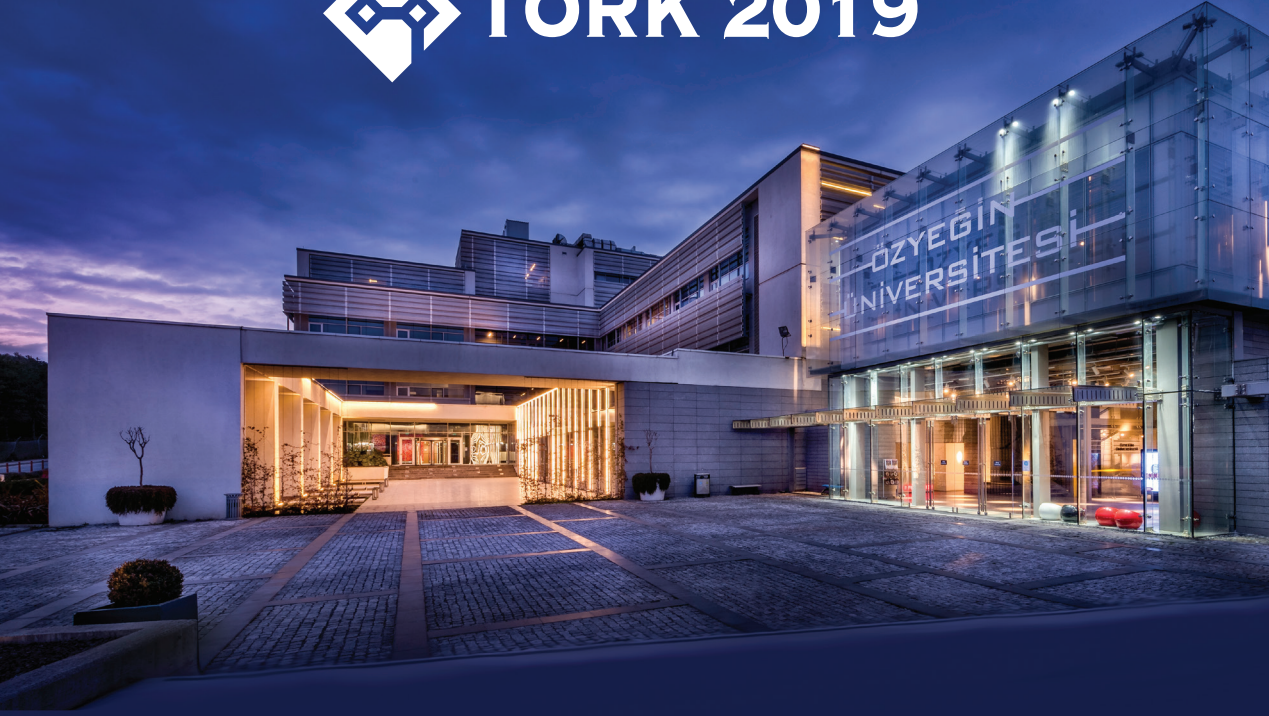




Türkiye Robotbilim Konferansı Bildiriler Kitabı

26-28 Haziran 2019, Özyeğin Üniversitesi, İstanbul

Editörler

Özkan Bebek • Barkan Uğurlu • Ramazan Ünal • Erhan Öztop



5. TÜRKİYE **ROBOTBİLİM KONFERANSI**

BİLDİRİLER KİTABI

26-28 Haziran 2019
Özyeğin Üniversitesi, İstanbul

Editörler

Dr. Özkan Bebek - Dr. Erhan Öztop
Dr. Barkan Uğurlu - Dr. Ramazan Ünal

TORK 2019

5. Türkiye Robotbilim Konferansı

26-28 Haziran 2019, Özyeğin Üniversitesi

Düzenleyen

Özyeğin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul

Editörler

Özkan Bebek, Erhan Öztop, Barkan Uğurlu, Ramazan Ünal

Düzenleme Kurulu

Dr. Öğr. Üyesi Özkan Bebek, Özyeğin Üniversitesi

Doç. Dr. Erhan Öztop, Özyeğin Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Barkan Uğurlu, Özyeğin Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Ünal, Özyeğin Üniversitesi

Kapak Tasarımı

Begüm Sunal

İç Tasarım

Gülcem Oflaz Mırık

ISBN: 978-605-5625-16-0

©2019

Baskı: Pasifik Ofset

Sertifika No: 12027

© Özyeğin Üniversitesi Yayınları

Nişantepe Mh. Orman Sk. No: 34-36

34794 Alemdağ, Çekmeköy, İstanbul

<http://yayinevi.ozyegin.edu.tr>

yayinevi@ozyegin.edu.tr

Web ve Sosyal Medya



tork2019.ozyegin.edu.tr



<http://twitter.com/tork2019ozu>



<http://instagram.com/tork2019ozu>

Etiketimiz: #tork2019

İÇİNDEKİLER

Önsöz.....	vii
Konferans Sponsorları.....	viii
Özyeğin Üniversitesi'ndeki Toplantı Yerleri	x
ToRK 2019 Organizasyon Kurulları	xii
Konferans Düzenleme Kurulu	xii
Konferans Danışma Kurulu	xii
Konferans Bilim Kurulu	xii
Konferansta Görevli Özyeğin Üniversitesi Öğrencileri	xiv
Değerlendirme Yapan Hakemler	xiv
ToRK 2019 Programı.....	xvi
Davetli Konuşmacılar	xix
Çalıştay ve Eğitim Oturumları	xxvi
Ayrıntılı Bildiri Sunum Programı	xxxı
Ayrıntılı Poster Sunum Programı	xxxviii
Özel Oturumlar	xl
BİLDİRİLER	xli
Optimization of Workspace and Manipulability of a 5 DoFs Surgical Robot	1
Hafif İşbirlikçi Robotlarda Kullanılacak Eyleyici Sistem Parametrelerinin Doğrulanması İçin Sistem Parametrelerinin Doğrulanması İçin Oluşturulan MRS Fren Tabanlı Test Düzenegi	8
Holonomik Robot ile Dar Alanlarda Gezinim	16
Katlanabilir Modüler Minyatür Robotlar İçin Esnek Omurga Modülü Tasarımı	22
Katlanabilir Robotlarda Üretim Kaynaklı Boyutsal Kaçıklıkların Bacak Yörünçesine ve Robot Dinamiklerine Etkileri	27

İnsansı Robot Kafası Mekatronik Tasarımı: MUDA	32
İki Eksenli Gimbal Sistemlerinin Benzetiminde Doğrusal Olmayan Sürtünme Etkilerinin Tanılanması	40
UGB 1B Konumlandırma Sistemi İçin İteratif Çözüm	47
Yansıtma Tabanlı Artırılmış Gerçeklik Destekli Uyarı ve Bilgilendirme Sistemi Geliştirilmesi	53
Yüksek Tork Çıkışlı Seri Elastik Eyleyiciler İçin Burulma Yayı Tasarımı ve Topoloji Eniyileştirmesi	59
Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Çoklu Serbestlik Dereceli Pnömatik Rehabilitasyon Ortezi	64
Origami Tabanlı Paralel Robotların Geliştirilmesi ve Sensör Entegrasyonu	70
Etkili Manipülasyon İçin 9 Serbestlik Dereceli Cerrahi Robotun Uyarlamalı Ters Kinematigi	78
Çoklu Robot Sistemlerinde Taklit ile Öğrenme	84
Günlük Hayat Aktivitelerine Uygun 4 Serbestlikli Bir Üst Uzun Dış İskeleti İçin Tork Gereksinimi.....	92
Aktif Ortezde Kullanılan Yapay Kasın Veri Güdümlü Öngörülü Kontrolü	98
İHA ile GPS Kullanmadan Kapalı Alanların Haritasının Çıkartılması	105
Elektrikli Araçlarda Enerji Optimizasyonu ve Model Parametrelerinin Kestirimi...	112
Hesaplanmış-Tork Kontrolcüsü (Computed-Torque Controller) Tabanlı ve Bilek Fleksiyon-Ekstansiyon Hareketlerini Gerçekleştirebilen Dirsek Altı Protez Kol Tasarımı ve Gerçeklenmesi	119
Derin Pekiştirmeli Öğrenme Kullanarak Konum Denetimli Robotlarda Kuvvet Denetimi	127
Yarı Otonom İnsansız Sualtı Robot Sisteminin Mekatronik Sistem Tasarımı	132
3B Nokta Bulutu Verisi ile Bölge Büyütme Tabanlı Kapı Bulma Uygulaması	139
Farklı Morfolojilere Sahip Robotlar Arasında Öğrenme Aktarımı.....	146
5 Serbestlik Derecesine Sahip Ameliyat Robotunun Kinematigi	154
Faydalı Frenleme Altında Fren Pedal Hissiyatının Korunabilmesi İçin	

Aktif Fren Pedalı Geliştirme Sistemi	159
Gezegen Gezginleri İçin Külbütör-Boji ve Çift Salıncaklı Süspansiyon Mekanizmalarının Titreşim Analizi	165
Çok-Etmenli Yörünge Bulma Probleminin Lego Robotlarında Uygulanması: Bir Eğitsel Robotik Çalışması.....	172
Açık Kaynak Sürü İHA Benzetim Ortamı	178
Rotation-invariant Object Recognition by Spatial Feature Extraction on a Humanoid Robot	184
Robot Kontrollü Bir Eklemeli İmalat Sisteminin Geliştirilmesi	190
Yazar Dizini	195

ÖNSÖZ

Değerli ToRK 2019 Katılımcıları,

Özyeğin Üniversitesi ve konferans organizasyon komitesi olarak, üniversitemizin kuruluşunun 10. yılında Türkiye Robotbilim Konferansı'na (ToRK 2019) ev sahipliği yapmaktan büyük bir mutluluk ve onur duymaktayız.

Bu yıl konferansımıza 5 ülkeden bildiriler gönderildi. Program komitesi bildirilerin uzmanlar tarafından değerlendirilmesi için uygun hakemler bulmak için bizlere destek verdiler. Her makalenin en az iki anlamlı ve yapıcı değerlendirme alması için hassas bir yaklaşım izlendi. Program komitesi ve hakemlerimize çok teşekkür ediyoruz. Bu süreçte bazı bildiriler kabul edilmediğinden dolayı üzgünüz. Bu bildirilerden 39 tanesi özgün, 12 tanesi derleme ve 21 tanesi ise poster olarak sizlere sunulacaktır. Özgün bildirileri bu kitapçıkta bulabilir ve okuyabilirsiniz. Bu kitapçıkla amacımız konferans çıktılarının kalıcılığını arttırmak oldu.

ToRK 2019'da teknik oturumların yanı sıra üç dünya uzmanının özel konuşmalarına da yer verildi ve konuşmalarında çalışmalarının gerçek dünyayla olan yakın etkileşimini paylaşmaları planlandı.

Başlangıcından bugüne amacı, robotbilim alanında faaliyet gösteren araştırmacıları ve endüstri çalışanlarını bir araya getirmek olan ve Türkiye'de robotbilim sektörünün bu birlikle, daha hızlı ve etkili olarak gelişmesine katkı sağlamak olan konferansımız, bu yıl da hızla büyüyen kitlesi ile, robotiğin çok farklı alt alanlarındaki son bilimsel ve teknolojik gelişmeleri, davetli konuşmacılar, çalıştaylar ve özgün bildiri sunumları aracılığıyla paylaşacaktır. Bu organizasyonu gerçekleştirmemizi mümkün kılan ve katılımları ile anlamlandıran tüm yazarlarımıza, katılımcılarımıza, hakemlerimize ve organizasyon ekibimize gayretleri için teşekkür ederiz. Umarız ki okulumuzda verimli bir konferans ve güzel bir zaman geçirirsiniz.

Düzenleme Kurulu, ToRK 2019



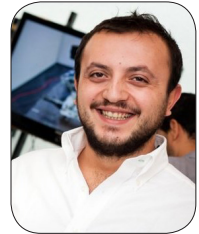
Dr. Özkan Bebek



Dr. Erhan Öztıp



Dr. Barkan Uğurlu



Dr. Ramazan Ünal

KONFERANS SPONSORLARI

Altın Sponsor

aselsan

<http://www.aselsan.com.tr>

Gümüş Sponsorlar

hktm | İyi Mühendislik
444 4580

<http://www.hktm.com.tr>

ROBOT SEPETİ.COM

<http://www.robotsepeti.com>

alpmed
Healthcare Technologies & Solutions

<http://www.alpmed.com.tr>

Bronz Sponsorlar



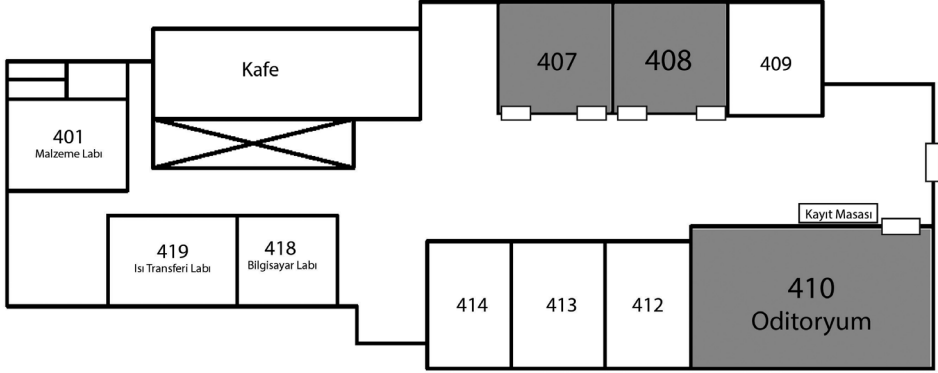
<http://www.ieee.org>



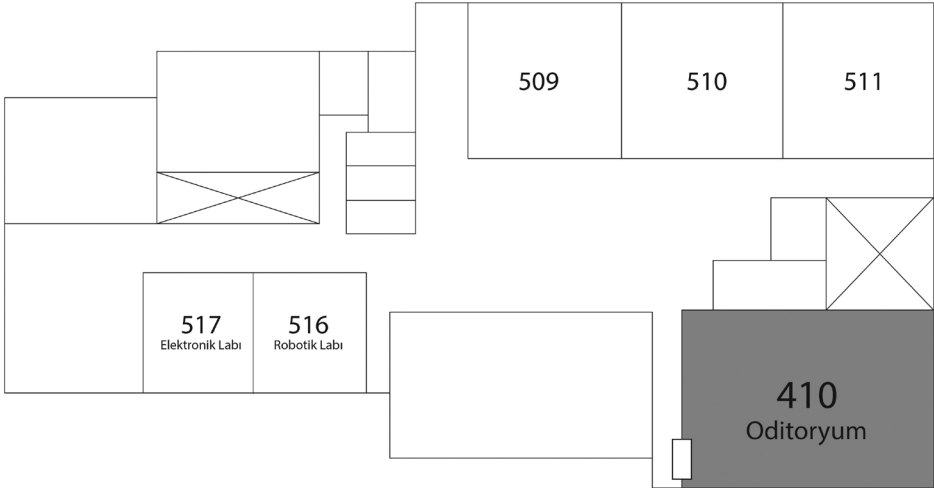
<http://intecro.com.tr>

ÖZYEGİN ÜNİVERSİTESİ'NDEKİ TOPLANTI YERLERİ

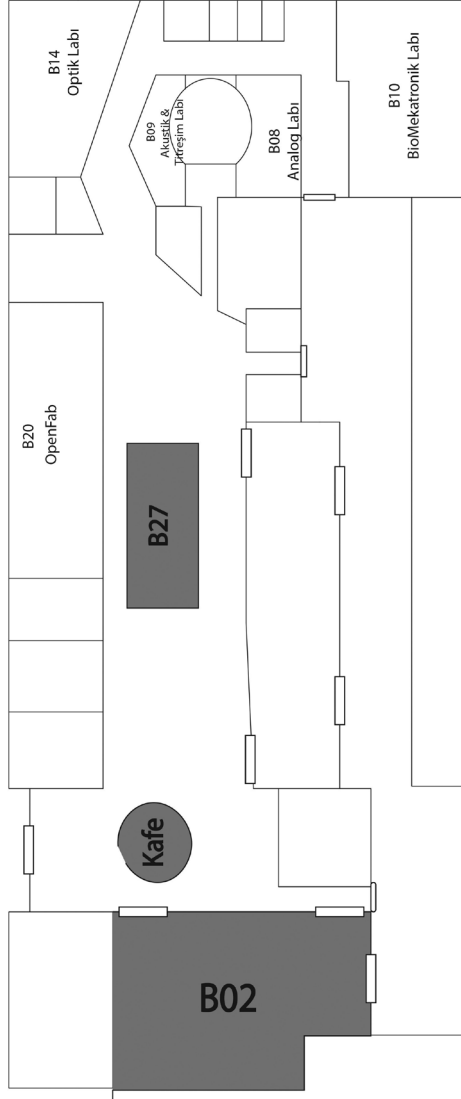
Mühendislik Fakültesi (MF) Binası 4. Kat Planı



Mühendislik Fakültesi (MF) Binası 5. Kat Planı



ÖzÜ-X Binası Kat Planı



TORK 2019 ORGANİZASYON KURULLARI

Konferans Düzenleme Kurulu Başkanı

Özkan Bebek, Özyeğin Üniversitesi

Konferans Düzenleme Kurulu

Erhan Öztop, Özyeğin Üniversitesi

Barkan Uğurlu, Özyeğin Üniversitesi

Ramazan Ünal, Özyeğin Üniversitesi

Konferans Danışma Kurulu

Levent Akın, Boğaziçi Üniversitesi

Çağatay Başdoğan, Koç Üniversitesi

Savaş Dilibal, İstanbul Gedik Üniversitesi

Veysel Gazi, Marmara Üniversitesi

Sinan Kalkan, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Erhan Öztop, Özyeğin Üniversitesi

Volkan Patoğlu, Sabancı Üniversitesi

Uluç Saranlı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Sinem Sarıel, İstanbul Teknik Üniversitesi

Erol Şahin, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Konferans Bilim Kurulu

Günyaz Ablay, Abdullah Gül Üniversitesi

Merve Acer, İstanbul Teknik Üniversitesi

Barış Akgün, Koç Üniversitesi

İbrahim Akgün, Abdullah Gül Üniversitesi

Levent Akın, Boğaziçi Üniversitesi

Eren Erdal Aksoy, Halmstad University

Kerem Altun, Işık Üniversitesi

Mert Ankaralı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Yunus Ziya Arslan, İstanbul Üniversitesi

Zafer Aydın, Abdullah Gül Üniversitesi

Reyhan Aydoğan, Özyeğin Üniversitesi

Çağatay Başdoğan, Koç Üniversitesi

Zeki Yağız Bayraktaroğlu, İstanbul Teknik Üniversitesi
Haluk Bayram, İstanbul Medeniyet Üniversitesi
Özkan Bebek, Özyeğin Üniversitesi
Işıl Bozma, Boğaziçi Üniversitesi
Hande Çelikkanat, University of Helsinki
Can Dede, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Savaş Dilibal, İstanbul Gedik Üniversitesi
Mehmet Doğar, University of Leeds
Esra Erdem, Sabancı Üniversitesi
Özgür Erkent, INRIA
Duygun Erol Barkana, Yeditepe Üniversitesi
Veysel Gazi, Marmara Üniversitesi
Fatih Gökçe, Süleyman Demirel Üniversitesi
Kutay İçöz, Abdullah Gül Üniversitesi
Gökhan İnce, İstanbul Teknik Üniversitesi
Esra Kadioglu, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Sinan Kalkan, Orta Doğu Teknik Üniversitesi
İlhan Konukseven, Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Hatice Köse, İstanbul Teknik Üniversitesi
Ayşe Küçükylmaz, The University of Lincoln
Onur Özcan, Bilkent Üniversitesi
Erhan Öztıp, Özyeğin Üniversitesi
Volkan Patoğlu, Sabancı Üniversitesi
Evren Samur, Boğaziçi Üniversitesi
Afşar Saranlı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Uluç Saranlı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Sanem Sariel, İstanbul Teknik Üniversitesi
Emre Sarıyıldız, University of Wollongong
Erol Şahin, Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Enver Tatlıcıoğlu, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Boray Tek, Işık Üniversitesi
Ali Emre Turgut, Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Emre Uğur, Boğaziçi Üniversitesi
Barkan Uğurlu, Özyeğin Üniversitesi
Ramazan Ünal, Özyeğin Üniversitesi
Evsen Yanmaz Adam, Özyeğin Üniversitesi
Yıldıray Yıldız, Bilkent Üniversitesi
Bülent Yılmaz, Abdullah Gül Üniversitesi

Konferansta Görevli Özyeğin Üniversitesi Öğrencileri

Emir Arditi
Cansu Başaran
Berkay Bayram
Umut Çakan
Atahan Çaldır
Ceren Cengiz
Sinan Coruk
Mustafa Derman
Sinan Emre
Tolga Arda Eraslan

Selen Erman
Onur Ersoy
Hüseyin Gökay
Gökçe Güven
Atakan Kala
Ahmet Burhan Kara
Murat Özvin
Muhammad Sarmad Qureshi
Begüm Sunal
Ayhan Yağcı
Suavi Yıldırım

Değerlendirme Yapan Hakemler

Suzan Ece Ada
Emre Akbaş
Mete Tuluhan Akbulut
H. Levent Akın
Doğan Altan
Erdoğan Altuğ
Emir Arditi
Özlem Armağan
Ömür Arslan
Selçuk Arslan
Tuğrul Artuğ
Taylan Atakuru
Ahmet Atasoy
Yusuf Aydın
Cem Aygöl
Furkan Ayhan

Barış Balcı
Barış Bayram
Abdülkerim Benli
Serkan Buğur
Hüseyin Büyükeşmeli
Sinan Coruk
Umut Çakan
Ozan Çaldıran
Umut Çalışkan
Abdul Rahman Dabbour
Osman Darıcı
Kadir Alpaslan Demir
Onur Demiray
Çağatay Demirel
Serhat Demirtaş
Levent Dilaveroğlu

Fethiye Irmak Doğan
Suzan Cansel Doğru
Sinan Emre
Emre Eraslan
Kemalettin Erbatur
Utku Erdem
Can Erhan
Onur Ersoy
Cem Eteke
Tansu Filik
Selçuk Gören
Hakan Gültekin
Gökhan Koray Gültekin
Elif Hocaoglu
Mert İmre
Arda İnceoglu
Yusuf İzmirlıoglu
Kübra Kalkan
Doğay Kamar
Erkan Kaplanoğlu
Umut Karagüzel
Cem Karakadıoglu
Nedime Karakullukçu
Emre Kaya
Mert Kaya
Doğancan Kebude
Tarık Kelestemur
Gökhan Kiper
Muhammed Kocabaş
Burak Kula
Fatih Can Kurnaz
Rico Morasata
Rahim Mutlu
Nahid Nasiri

Ahmed Nouman
Barış Özcan
Melih Özcan
Barış Özyer
Muhammad Sarmad Qureshi
Momina Rizwan
Orkunt Sabuncu
Mehmet Ali Sarıkaya
Ercan Serteli
Begüm Sunal
Rıfat Sipahi
Murat Şahin
Yusuf Hüseyin Şahin
Osman Berkay Şahinoğlu
Yunus Seker
Melisa İdil Şener
Yener Taşkın
Ahmet Tekden
Yunus Terzioğlu
Osman Tursun
Cem Tutcu
Uğur Tümerdem
Kemal Uçak
H. Fatih Uğurdağ
Hüseyin Üvet
Ali Cem Ünal
Mehmet Kürşat Yalçın
Mustafa Yalçın
Yiğit Yazıcıoğlu
Ece Yener
Mehmet Can Yıldırım
Osman Doğan Yirmibeşoğlu
Tansel Yücelen
Günay Züngör

ToRK 2019 Programı

26 Haziran 2019 - Çarşamba

	410 (Oditoryum)	407 (Sınıf)	408 (Sınıf)	418 (Lab)
8:00-9:00	Kayıt			
9:00-10:30	Çalıştay 1: Fiziksel İnsan Robot Etkileşimi ve Uygulamaları	Çalıştay 2: Otonom Taşıyıcı Araç Teknolojilerinde Yeni Eğilimler ve Uygulamalar		
10:30-11:00	Kahve Molası			
11:00-12:30	Çalıştay 1: Fiziksel İnsan Robot Etkileşimi ve Uygulamaları	Çalıştay 2: Otonom Taşıyıcı Araç Teknolojilerinde Yeni Eğilimler ve Uygulamalar		
12:30-13:30	Öğle Yemeği			
13:30-15:30	Çalıştay 1: Fiziksel İnsan Robot Etkileşimi ve Uygulamaları	Çalıştay 2: Otonom Taşıyıcı Araç Teknolojilerinde Yeni Eğilimler ve Uygulamalar	Çalıştay 3: Suüstü / Sualtı Robotları ve Uygulamaları	Eğitim Oturumu 1: Optimal Kestirim, Kalman Filtresi ve Saklı Markov Modellerinin Matematiksel Temelleri
15:30-16:00	Kahve Molası			
16:00-17:00		Eğitim Oturumu 2: IEEE eLearning Courses	Çalıştay 3: Suüstü / Sualtı Robotları ve Uygulamaları	Eğitim Oturumu 1: Optimal Kestirim, Kalman Filtresi ve Saklı Markov Modellerinin Matematiksel Temelleri
17:00-18:00		Eğitim Oturumu 3: İnsan Makine Etkileşimi Gösterimi	Çalıştay 3: Suüstü / Sualtı Robotları ve Uygulamaları	Eğitim Oturumu 1: Optimal Kestirim, Kalman Filtresi ve Saklı Markov Modellerinin Matematiksel Temelleri

ToRK 2019 Programı

27 Haziran 2019 - Perşembe

	410 (Oditoryum)	407 (Sınıf)	408 (Sınıf)
8:00-9:00	Kayıt		
9:00-9:30	Açılış töreni		
9:30-10:30	Davetli Konuşmacı: Prof. Dr. Işıl H. Bozma Robotlarda Görünüş Temelli Uzamsal Biliş		
10:30-11:00	Kahve Molası		
11:00-13:00	Bacaklı Lokomasyon	Sağlık robotları-1	Yöngüdüm
13:00-14:00	Öğle Yemeği		
14:00-15:00	Davetli Konuşmacı: Dr. Oktay Arslan Gerçek Dünya Uygulamaları için Otonom Araç Geliştirmenin Zorlukları		
15:00-15:30	Kahve Molası		
15:30-17:30	Robotlarda Görme ve Algılama	Sağlık robotları-2	Kontrol
19:00-22:00	Gala yemeği (Swissôtel The Bosphorus)		

ToRK 2019 Programı

28 Haziran 2019 - Cuma

	410 (Oditoryum)	407 (Sınıf)	408 (Sınıf)
8:30-9:30	Kayıt		
9:30-10:30	Davetli Konuşmacı: Dr. Alper Aydemir Gerçek dünyada bilgisayar görüşü: NASA/JPL Robosimian, Google Proje Tango, ve Girişimcilik		
10:30-11:00	Kahve Molası		
11:00-13:00	Bilişsel Robotbilim	İnsan-Robot Etkileşimi	Robot tasarım ve Dinamiği
13:00-14:00	Öğle Yemeği		
	ÖZÜ-X B27		ÖZÜ-X B02
14:00-15:00	Sanayi Oturumu		Poster Sunumları
15:00-15:30	Kahve Molası		
15:30-17:30	Yeni Nesil Robotik Teknolojileri		Poster Sunumları
17:30-18:30	Kapanış		
18:30-20:00	Kokteyl		

DAVETLİ KONUŞMACILAR



PROF. DR. IŞIL H. BOZMA
Boğaziçi Üniversitesi

Robotlarda Görünüş Temelli Uzamsal Biliş

27 Haziran 2019 Perşembe / 9:30-10:30
410 (Oditoryum)

Robotlarda uzamsal biliş, bulunulan ortamlarla ilgili olarak mümkün olduğunca kapsamlı olarak muhakame yapabilmeyi amaçlamaktadır. Dolayısıyla, otonom olabilmek için son derece önemli bir özelliktir. Böylece, robotlar, kendi başlarına güvenilir bir şekilde hareket ederek verilen görevleri yapabilmeleri ve etrafları ile daha rahatça etkileşimde bulunabilmeleri için gerekli uzamsal farkındalığı oluşturulabilirler. Bilindiği üzere, uzamsal biliş biyolojik sistemler açısından son derece karmaşık bir özellik olarak tanımlanmaktadır. Sistemsel açıdan incelendiğinde, uzamsal bilgilerin temin edilmesi, organize bir şekilde saklanması, gerektiğinde kullanılması ve gerektiğinde de güncellenmesi gibi işlemlerin hem tek başına, hem de birbirleriyle bağlantılı olarak çalışmasını gerektirmektedir. Bu çerçevede, görünüşe ait bilgiler çok büyük bir rol oynamaktadır - zira metrik verilerin mevcut/güvenilir olmadığı veya kullanılmaları için gerekli hesapsal karmaşıklığın çok fazla olduğu çok durum olabilmektedir. Bu konuşmada, görünüş temelli uzamsal bilişe yönelik olarak, bu işlemlerin oluşturulmasına temel oluşturan mekansal tanımlama ve öğrenme, haritalama, konumlama, bakarak ve hareket ederek ortam keşfi ve bilgi tümleşimi gibi ileri seviye yetiler üzerinde durulacak ve bunların oluşturulmasına yönelik olarak geliştirdiğimiz yaklaşımlardan bahsedilecektir.

Biyografisi:

H. Işıl Bozma Boğaziçi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde profesör olarak görev yapmaktadır. Lisans derecesini 1983 yılında Boğaziçi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde aldı. Yüksek lisans derecelerini, sırasıyla Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Case Western Reser-

ve Universitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde 1985 yılında, Yale Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde 1986 yılında, doktora derecesini Yale Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde 1992 yılında tamamladı. Halen bulunduğu bölümde, yardımcı doçent olarak çalışmaya başladıktan sonra, 1996 yılında Akıllı Sistemler Laboratuvarını kurulmasında çalıştı ve kuruluşundan itibaren bu laboratuvarın yöneticisi olarak görev aldı. 1994 - 2000 yılları arasında, University of Michigan Ann Arbor'da ve 2000 - 2007 yılları arasında da University of Pennsylvania'da misafir araştırmacı olarak araştırmalarda bulundu. Ödülleri içinde 2004 TESID Yenilikçilik ödülü, 2015 ICAR En iyi Özgün Makale ödülü bulunmaktadır. Dr. Bozma'nın araştırmaları, uzamsal biliş ve ortam anlamlandırma, çoklu robotlar ve kooperasyon ve oyun kuramı konularını kapsamaktadır. Uluslararası etkin dergi ve konferanslarda yayınlanmış çok sayıda yayını bulunmaktadır.



DR. OKTAY ARSLAN

Gerçek Dünya Uygulamaları için Otonom Araç Geliştirmenin Zorlukları

**27 Haziran 2019 Perşembe / 14:00-15:00
410 (Oditoryum)**

Günümüzde otonomi yeni gelişen bir disiplin olarak günlük yaşamın pek çok alanında yaygınlaşmaya başlamıştır. Bugünün toplumu, insanlarla etkileşime giren otonom araçların kullanımına doğru hızla ilerlemektedir. Birçok farklı uygulama için tasarlanan ve çeşitli yeteneklere sahip olan bu otonom araçların (insansız hava sistemleri, uzay robotları, sürücüsüz arabalar vb) geliştirilmesinde önemli ilerlemelere şahit oluyoruz. Bu sistemlerin güvenlik açısından kritik niteliğinde olması, bazen performans açısından en iyisi olmayan fakat basit, anlaşılır ve test edilmesi kolay algoritmaların ve metotların tercih etmemizi gerektirmektedir.

Bu konuşmada, tam ölçekli otonom Boeing helikopterinden, Mars Rovers'a ve sürücüsüz araçlara kadar çeşitli otonomi projelerinin geliştirilmesi sırasında edindiğim dersleri ve deneyimlerimi paylaşacağım. Bu otonom araçlar, hava, uzay ve şehirler gibi farklı çevresel koşullar yelpazesinde çalışmaktadır ve dolayısıyla farklı kapasitede ve yetenekte donanımlara sahiptir. Bu donanımlar üzerinde gerçek-zamanda çalışabilecek yöntemlerin belirlenmesi ve geliştirilmesi otonomi projelerindeki zorlukların başında gelir. Konuşmamı, başarılı demolar sırasında elde ettiğimiz sonuçlar ve videolar ile bitireceğim.

Biyografi:

Dr. Oktay Arslan Tesla, Inc.'da Autopilot Bölümü'nde otopilot planlama ve kontrol mühendisi olarak görev yapmaktadır. Lisansını İTÜ Kontrol Mühendisliği Bölümü'nden 2006 yılında, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden 2007 yılında (çift anadal), yüksek lisansını İTÜ Savunma Teknolojileri Bölümü'nden 2009 yılında almıştır. Daha sonrasında eğitimine ABD'nde devam ederek yüksek lisansını Georgia Tech Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nden 2012'de, Bilgisayar Bilimi Bölümü'nden 2015'de ve doktora derecesini Robotik Bölümü'nden 2015'de almıştır. Doktorada, Aurora Flight Sciences'da 2014-2015'de tam-ölçekli otonom he-

likopter geliştirme projesinde güdüm, seyrüsefer ve kontrol mühendisi olarak ve Mitsubishi Electric Research Labs'ta 2015 yılında Mekatronik Grubu'nda otonom yer araçları projesinde araştırmacı olarak çalışmıştır. Aynı yıl MIT'de misafir araştırmacı olarak çalışmıştır. Doktoradan sonra, NASA/Caltech JPL'de, Mobilitte ve Robotik Sistemler Bölümü'nde 2015-2017'de derin uzay keşif görevlerine yönelik araştırma ve çeşitli robotik projelerinde görev almıştır. Başlıca ilgi alanları kontrol teorisi, robotik, hareket planlama, makine öğrenmesi, insansız hava araçları, sürücüsüz araçlar ve otonom robotik sistemler için planlama ve kontrol yazılımlarının geliştirilmesidir.



DR. ALPER AYDEMİR

Volumental, CTO

Gerçek Dünyada Bilgisayar Görüşü: NASA/JPL Robosimian, Google Proje Tango ve Girişimcilik

**28 Haziran 2019 Cuma / 9:30-10:30
410 (Oditoryum)**

Bu konuşmada, araştırmadan ticarileşmeye kadar katkıda bulunduğum üç farklı görüntü işleme uygulaması sunacağım. Bunların ilki NASA/JPL'nin DARPA Robotics Challenge'daki robotu Robosimian. Algı ve mobilite dahil olmak üzere Robosimian'ın çeşitli alt sistemlerini yönlendiren mimari ilkelerle başlayacağım. Daha sonra kurumsal bir araştırma projesine, Google'ın Google'ın 3B yetenekli ilk tüketici telefonu olan Proje Tango'suna ve bilgisayarlı görü sistemleri oluşturma konusundaki deneyimlerimi paylaşacağım. Son olarak bilgisayar görüşü alanında bir girişimci olarak bu projelerde edindiğim deneyimlerimi paylaşacağım.

Biyografi:

Alper Aydemir Sabancı Üniversitesinde Mekatronik Mühendisliği bölümünde 2006'da mezun oldu. Daha sonra Stockholm Kraliyet Teknik Üniversitesinde robotik ve görüntü işleme konularında doktorasını 2012'de bitirdi. Doktora sonrası Los Angeles, NASA/JPL'de robotik ve görüntü işleme laboratuvarında sürücüsüz arabalar, DARPA Robotics Challenge, ve çeşitli NASA projelerinde görev aldı. NASA sonrası, Google X laboratuvarında cep telefonlarında 3D haritalama, obje tanıma ve tarama ve sanal gerçeklik üstüne bir proje olan Project Tango üstüne çalıştı. Dr. Aydemir daha sonra Volumental isimli görüntü işleme üzerine faaliyet gösteren bir teknoloji şirketi kurdu. Dr. Aydemir hala Volumental'da çalışmakta. Stockholm merkezli Volumental bugün 45 kişilik ekibiyle 35 ülkede ürünleriyle faaliyet göstermekte.

ÇALIŞTAY VE EĞİTİM OTURUMLARI

Çalıştay 1: Fiziksel İnsan Robot Etkileşimi ve Uygulamaları

Zaman: 26 Haziran 2019 Çarşamba / 9:00-14:50

Yer: MF 410 (Oditoryum))

Düzenleyenler:

- Yusuf Aydın, Koç Üniversitesi
- Dr. Ozan Tokatlı, UKAEA
- Doç. Dr. Volkan Patoğlu, Sabancı Üniversitesi
- Prof. Dr. Çağatay Başdoğan, Koç Üniversitesi

İçerik: Çalıştay kapsamında, insan-robot etkileşimi alanında cihaz ve kontrolcü tasarımı ve uygulamaları üzerinde çalışan araştırmacıları bir araya getirmek ve ülkemizde bu alanda yapılan araştırmalar arasındaki etkileşimi artırmak hedeflenmektedir.

Fiziksel İnsan Robot Etkileşimi ve Uygulamaları Çalıştay Programı

26 Haziran 2019 - Çarşamba

410 (Oditoryum)

8:00-9:00	Kayıt	
9:00-9:15	Tanıtım	Çağatay Başdoğan, Koç Üniversitesi
9:15-9:45	Etkileşim Kontrolcüsünün Temelleri	Ozan Tokatlı, UKAEA
9:45-10:15		Yusuf Aydın, Koç Üniversitesi
10:30-11:00	Kahve Molası	
11:00-11:30	Uygulamalar: Rehabilitasyon Robotları	Volkan Patoğlu, Sabancı Üniversitesi
11:30-12:00		Polat Sendur, Özyeğin Üniversitesi
12:30-13:30	Öğle Yemeği	
13:30-14:00	Uygulamalar: Medikal Robotlar:	Evren Samur, Boğaziçi Üniversitesi
14:00-14:30		İsmail Can Dede, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
14:30-15:30	Açık oturum	Tüm katılımcılar
15:30-16:00	Kahve Molası	

Çalıştay 2: Otonom Taşıyıcı Araç Teknolojilerinde Yeni Eğilimler ve Uygulamalar

Zaman: 26 Haziran 2019 Çarşamba / 9:00-15:30

Yer: MF 407 (Sınıf)

Düzenleyenler:

- Doç. Dr. Berke Gür, Bahçeşehir Üniversitesi
- Doç. Dr. Ahmet Yazıcı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

İçerik: Endüstri 4.0 yaklaşımının getirdiği akıllı fabrika mimarisinde özellikle otonom robotlar kritik bir yere sahiptir. Özellikle GPS teknolojisinin kullanımının mümkün olmadığı, karmaşık ve yarı-düzenli fabrika ve depo içerisi kapalı alanlarda Otonom Taşıyıcı Araçları (OTA) güvenli bir şekilde seyrüseferi için yeni teknolojik yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Buna ek olarak çoklu OTA sistemlerinin görev planlamasında yeni stratejilerin geliştirilmesi bu sistemlerin etkin kullanımı için bir zorunluluktur.

Bu çalıştayda fabrika, depo ve benzeri endüstriyel ortamlarda görev yapabilecek OTA konusunda yapılan ulusal Ar-Ge çalışmaları ve elde edilen teknolojik kazanımların paylaşılması planlanmaktadır.

Otonom Taşıyıcı Araç Teknolojilerinde Yeni Eğilimler ve Uygulamalar Çalıştay Programı		
26 Haziran 2019 - Çarşamba		
407 (Sınıf)		
8:00-9:00		Kayıt
9:00-9:10	Tanıtım	Berke Gür, Bahçeşehir Üniversitesi
9:10-9:20		Ahmet Yazıcı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
9:20-9:40	Akıllı Fabrikalarda Farklı OTA Uygulamaları ve Güncel Beklentiler:	Uğur Yayan, İnovasyon Mühendislik
9:40-10:00		Burak Eruçar, Atlas Robotik
10:00-10:20		Halil İbrahim Doksanoğlu, Patika Robotics
10:30-11:00	Kahve Molası	

11:00-11:20	Akıllı Fabrikalarda Farklı OTA Uygulamaları ve Güncel Beklentiler:	Şamil Özden, Milvus Robotics
11:20-11:40	OTA'lar için Ar-Ge Çalışmaları ve Yenilikçi Uygulamalar:	Mahmoud Sabra, NAMLA Robotics
11:40-12:00		Hikmet Yücel, ACD Bilgi İşlem
12:00-12:20		Yongki Yoon, Bahçeşehir Üniversitesi
12:30-13:30	Öğle Yemeği	
13:30-13:50	OTA'lar için Ar-Ge Çalışmaları ve Yenilikçi Uygulamalar:	Hakan Temeltaş, İstanbul Teknik Üniversitesi
13:50-14:50		Kürşat Özdallı, Bahçeşehir Üniversitesi
14:50-15:30	Mini Panel - OTA Geliştirmede Standartlaşma ve İşbirliklerinin Getireceği Fırsatlar:	Yönetici: Ahmet Yazıcı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Katılımcılar: Çalıştay Katılımcıları
15:30-16:00	Kahve Molası	

Çalıştay 3: Suüstü / Sualtı Robotları ve Uygulamaları

Zaman: 26 Haziran 2019 Çarşamba / 13:30-17:40

Yer: MF 408 (Sınıf)

Düzenleyenler:

- *Dr. Haluk Bayram*, İstanbul Medeniyet Üniversitesi
- *Dr. Harun Yetkin*, Bartın Üniversitesi

İçerik: Otonom suüstü/sualtı robotları köprü bakımından (bridge inspection) arama kurtarma çalışmalarına, yeni petrol sahalarının bulunmasından çevresel faktörlerin tespitine kadar birçok askeri ve sivil alanda yaygınca kullanılmakta ve kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmaların hız kazanması amacıyla 2018’de XPRIZE tarafından \$7M ödüllü Shell Okyanus Keşfi XPRIZE yarışması düzenlenmiştir. Shell Okyanus Keşfi XPRIZE yarışması okyanusların otonom suüstü/sualtı robotları ile keşfini hedeflemiş ve küresel ölçekte bir farkındalık oluşturmayı amaçlamıştır. Günümüzde en hızlı gelişen araştırma konularından biri otonom suüstü/sualtı robotları üzerine yapılan çalışmalardır. Bu çalıştayın amacı suüstü / sualtı robotlarının mevcut ve muhtemel kullanım alanlarını tanıtmak, alana yeni katılacak araştırmacılara kılavuz oluşturmanın yanında halihazırda bu alanda çalışan araştırmacıları gelişen araştırma konuları hakkında bilgilendirmektir. Çalıştay konuşmacıların yapacağı sunumlar ve sunumların ardından gerçekleştirilecek bir panelden oluşmaktadır. Sunumlar aracılığıyla dinleyicilere otonom suüstü/sualtı robotların sivil ve askeri alandaki mevcut kullanım alanları örneklerle açıklanacak ve önümüzdeki yıllarda bu çalışmaların nasıl bir seyir izleyeceğine dair öngörüler paylaşılacaktır. Bunun yanında otonom suüstü robotlarının tasarımı ve üretimi üzerine bilgiler verilecek, çevresel faktörlerin otonom suüstü robotları ile tespitinin nasıl yapılabileceği gösterilecektir. Ayrıca otonom sualtı robotlarla gerçekleştirilen arama çalışmalarına değinilecek, bu çalışmalarda yaygınca kullanılan yöneylem metodları ve gerçek zamanlı hesaplama algoritmaları tanıtılacaktır. Çalıştayın son bölümünde ise suüstü / sualtı robotlarla ülkemizde yapılan çalışmaların sayısının artırılması için yapılması gerekenler tartışmaya açılacaktır.

Suüstü / Sualtı Robotları ve Uygulamaları Çalıştay Programı

26 Haziran 2019 - Çarşamba

408 (Sınıf)

8:00-9:00	Kayıt	
12:30-13:30	Öğle Yemeği	
13:30-13:40	Tanıtım	Haluk Bayram, İstanbul Medeniyet Üniversitesi
13:40-14:00	TBA	Özlem Sayın, SSB, Deniz Araçları Daire Başkanlığı
14:00-14:20	Aselsan İnsansız Suüstü Çalışmaları	Uğur Güngör, Aselsan İnsansız Sistemler Sistem Mühendisliği
14:20-14:40	TÜBİTAK MAM'da Sualtı Robotiğinin 10 Yılı	Onur Canbak, TÜBİTAK MAM Ufuk Altunkaya, TÜBİTAK MAM
14:40-15:00	Desistek Hibrid Su Robotu	Emre Ege, Desistek Robotik ArGe Müdürü
15:00-15:20	Otonom Sualtı Robotları ile Arama Çalışmaları	Harun Yetkin, Bartın Üniversitesi
15:30-16:00	Kahve Molası	
16:00-16:20	Otonom Suüstü/Sualtı Robotlarının Bazı Kullanım Örnekleri	Daniel Stilwell, Virginia Tech
16:20-16:40	Computational Approaches to Underwater Human-Robot Collaboration	Junaaed Sattar, University of Minnesota
16:40-17:40	Çalıştay Paneli	Yönetici: Haluk Bayram Katılımcılar: Çalıştay Katılımcıları

Eğitim Oturumu 1: Optimal Kestirim, Kalman Filtresi ve Saklı Markov Modellerinin Matematiksel Temelleri

Zaman: 26 Haziran 2019 Çarşamba / 13:30-18:00

Yer: 418 Bilgisayar Labı

Eğitmen: Dr. Öğr. Üyesi Kerem Altun, Işık Üniversitesi

İçerik: Bu eğitim oturumunda öncelikle statik kestirim kuramı kapsamında parametre kestirimi için optimal (eniyi) yöntemlerden bahsedilecek ve matematiksel temelleri açıklanacaktır. Sonrasında Markov zincirleri konusuna örneklerle giriş yapılacaktır. Daha sonra saklı Markov modellerinden bahsedilecek, dinamik sistemlerde durum kestirimi problemi ele alındıktan sonra statik kestirim yöntemleri genişletilerek ayrık doğrusal dinamik sistemler için Kalman filtresi denklemleri verilecek ve bu denklemlerin sezgisel olarak yorumu ve türetimi tartışılacaktır. Öğrencilere ilk karşılaşmalarında oldukça zor ve karmaşık gelen bu iki yöntem gerçek fiziksel sistemlerden örnekler ile berraklaştırılacak ve iki yöntemin birbirine benzerliği tartışılacaktır. Doğrusal olmayan modeller için temel Kalman filtresi modeli üzerine önerilmiş Genişletilmiş Kalman Filtresi (Extended Kalman Filter) ve Parçacık Filtresi (Particle Filter) yöntemlerine en temel seviyede giriş yapılacaktır.

Oturumun hedef kitlesi robotlarda konumlandırma, haritalama, gezinim, ya da bilgisayarla görme ve iz sürme uygulamaları gibi, dinamik sistemlerde optimal kestirim uygulamalarını içeren konularda çalışan/çalışacak doktora öğrencileri ve akademisyenlerdir. Matematiksel altyapısı sağlam yüksek lisans öğrencileri de hedef kitleye dahil edilebilir. Katılımcıların doğrusal sistem kuramı, dinamik sistemlerin durum uzayı modelleri ve olasılık kuramı konularında daha önce dersler almış ya da/ve de belli bir matematiksel olgunluk seviyesinde olmaları beklenmektedir.

Eğitim Oturumu 2: IEEE eLearning Courses

Zaman: 26 Haziran 2019 Çarşamba / 16:00-17:00
Yer: 408 Sınıf

Eğitmen: *Eszter Lukács*, IEEE Client Services Manager

İçerik: The IEEE eLearning Library

The premier collection of online continuing education courses for technical professionals.

Why Universities Need the IEEE eLearning Library

- Guide students into specialty engineering fields
- Introduce emerging technologies and engineering terminology
- Allow distance learners to access the same content as on-site users
- Incorporate materials into a classroom lecture, or use as a supplement
- Help students prepare for more advanced coursework
- Build awareness of converging technologies
- Keep faculty up-to-date on the latest trends in related technologies

Eğitim Oturumu 3: İnsan Makine Etkileşimi Gösterimi

Zaman: 26 Haziran 2019 Çarşamba / 17:00-18:00
Yer: 408 Sınıf

Eğitmen: *Fzt. Cengiz Demirkundak*, Alpmed Genel Müdürü

İçerik: Bu eğitimin içeriğinde insan etkileşimli denetim üzerine kurulu Xsens Full Body Hareket Analiz sisteminin yapısı ve bileşenleri anlatılacaktır. Kullanıcının bir robot ile eş zamanlı etkileşimi üzerine örnek çalışmalar gösterilecektir. Kullanıcı üzerine sensörlerin yerleştirilmesi ve sonrasında kalibrasyon süreci, ve insan hareketleri ile robot etkileşimli hareketler gösterilecektir. Biyomekanik alanında genel bu sensörlerin kullanımı örneklerle açıklanacaktır. Eğitimin ikinci kısmında Emotiv EEG ile insan etkileşimi kontrolü gösterimi yapılacaktır. Benzer şekilde robot etkileşimli sistem örnekleri gösterilecektir.

AYRINTILI BİLDİRİ SUNUM PROGRAMI

Oturum: Bacaklı Lokomasyon 27 Haziran 2019 Perşembe / 11:00-13:00 Yer: MF 410 (Oditoryum)	
11:00-11:20	Katlanabilir Modüler Minyatür Robotlar İçin Esnek Omurga Modülü Tasarımı Nima Mahkam, Ömer Başar Özgüven, Onur Özcan <i>Bilkent Üniversitesi</i>
11:20-11:40	Katlanabilir Robotlarda Üretim Kaynaklı Boyutsal Kaçıklıkların Bacak Yörüngesine ve Robot Dinamiklerine Etkileri Mohammad Askari, Alper Yeldan, Onur Özcan <i>Bilkent Üniversitesi</i>
11:40-12:00	Origami Tabanlı Paralel Robotların Geliştirilmesi ve Sensör Entegrasyonu Hasan Sevinç, Shahrad Samankan, Atakan Altınkaynak, Zeynep Temel, Merve Acer <i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>
12:00-12:20	Yaylı Ters Sarkaç Modellerinde Ayarlanabilir Sönümleme ile Koşma Senkronizasyonunun Sonlu Zaman Denetimi Abdullah Cem Önem, Uluç Saranlı <i>Orta Doğu Teknik Üniversitesi</i>
12:20-12:40	Sanal Bağlantı Noktası Modeli'nin Sabit Noktalarının Karakteristiği Osman Kaan Karagöz, Görkem Seçer, Mustafa Mert Ankaralı, Uluç Saranlı <i>Orta Doğu Teknik Üniversitesi</i>
12:40-13:00	Farklı Morfolojilere Sahip Robotlar Arasında Öğrenme Aktarımı Ece Ada, Levent Akın <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>

Oturum: Sağlık Robotları-1
27 Haziran 2019 Perşembe / 11:00-13:00
Yer: MF 407

11:00-11:20	Etkili Manipülasyon için 9 Serbestlik Dereceli Cerrahi Robotun Uyarlamalı Ters Kinematiki Begüm Sunal, Erhan Öztop, Özkan Bebek <i>Özyeğin Üniversitesi</i>
11:20-11:40	Co-Ex: 3B Yürüme Desteği Sağlayabilen Özdengelemeli Alt Gövde Dış İskelet Mehmet Can Yıldırım, Ahmet Talha Kansızoglu, Sinan Emre, Mustafa Derman, Sinan Coruk, Ahmed Fahmy Soliman, Polat Şendur, Barkan Uğurlu <i>Özyeğin Üniversitesi</i>
11:40-12:00	Aktif Ortezde Kullanılan Yapay Kasın Veri Güdümlü Öngörülü Kontrolü Osman Ülkar, Gazi Akgün, Erkan Kaplanoğlu <i>Muş Alparslan Üniversitesi</i>
12:00-12:20	Endoskopik Mikrocerrahi için Manyetik Lazer Tarayıcı Tasarımı ve Kontrolü Alperen Acemoğlu, Leonardo Mattos <i>Istituto Italiano di Tecnologia</i>
12:20-12:40	Laparoskopik Cerrahi Asistanı Ayşan Dibekçi, Murat Özvin, Özkan Bebek <i>Özyeğin Üniversitesi</i>
12:40-13:00	Pozisyon Geri Bildirimli Minimal İnvaziv Aktif Katater Sistemi İçin Gürbüz Kontrol Tasarımı Görkem Muttalıp Şimşek, Ali Vahidyeganeh, Saher Jabeen, Özkan Bebek, Güney Güven Yapıcı <i>Özyeğin Üniversitesi</i>

Oturum: Yöngüdü
27 Haziran 2019 Perşembe / 11:00-13:00
Yer: MF 408

11:00-11:20	Holonomik Robot ile Dar Alanlarda Gezinim Fatih Baygöl, Erkan Uslu, Furkan Çakmak, Nihal Altuntaş, Mehmet Fatih Amasyalı, Sırma Yavuz <i>Polonom Teknoloji</i>
11:20-11:40	UGB 1B Konumlandırma Sistemi için İteratif Çözüm Hikmet Yücel, Elçin Erdoğan <i>İnovasyon Mühendislik</i>

11:40-12:00	IHA ile GPS Kullanmadan Kapalı Alanların Haritasının Çıkartılması Ömer Oral, Ali Emre Turgut, Kutluk Bilge Arıkan <i>Orta Doğu Teknik Üniversitesi</i>
12:00-12:20	Bulunulan Ortama Ait 3-Boyutlu Derinlik Verisi İçin Yeni Bir Bölütleme Yaklaşımı Meriç Durukan, Işıl Bozma <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>
12:20-12:40	Mobil Robotlarda Navigasyon Problemi için Pekiştirmeli Öğrenme Nursena Bölük, Özdenur Uçar, Burak Inner <i>Kocaeli Üniversitesi</i>
12:40-13:00	Topolojik Haritalar Üzerinde Algılayıcı Temelli Tepkin Yöngüdümlü Kadir Türksoy, H. Işıl Bozma <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>

Oturum: Robotlarda Görme ve Algılama 27 Haziran 2019 Perşembe / 15:30-17:10 Yer: MF 410 (Oditoryum)	
15:30-15:50	ALET: Gerçek Ortamlarda Aletlerin Tespiti için Veri Kümesi, Baz Sonuçlar ve Bir Uygulama Fatih Can Kurnaz, Burak Hocaoglu, Mert Kaan Yılmaz, İdil Sülo, Sinan Kalkan <i>Orta Doğu Teknik Üniversitesi</i>
15:50-16:10	Bir Robotun RGB-D Algılayıcı ile Görüş Alanındaki Bir İnsanı Gerçek Zamanlı Olarak Takibi Serhat İşcan, H. Işıl Bozma <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>
16:10-16:30	3-Boyutlu Derinlik Algılayıcılarında Sahne Tarama Alanının Arttırılması Rüya Karagülle, Meriç Durukan, Işıl Bozma <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>
16:30-16:50	3B Nokta Bulutu Verisi ile Bölge Büyütme Tabanlı Kapı Bulma Uygulaması Kadir Bayram, Berk Kolaylı, Ali Solak, Barış Tatar, Kaya Turgut, Burak Kaleci <i>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi</i>
16:50-17:10	Rotation-invariant Object Recognition by Spatial Feature Extraction on a Humanoid Robot Ugo Albanese, Murat Kırtay, Lorenzo Vannucci, Cecilia Laschi, Egidio Falotico <i>Scuola Superiore Sant'Anna</i>

Oturum: Sağlık Robotları-2
27 Haziran 2019 Perşembe / 15:30-17:10
Yer: MF 407

15:30-15:50	Optimization of Workspace, Manipulability of a 5 DOF Surgical Robot Muhammad Sarmad Qureshi, Murat Özvin, Ayşan Dibekçi, Özkan Bebek <i>Özyeğin Üniversitesi</i>
15:50-16:10	Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Çoklu Serbestlik Dereceli Pnömatik Rehabilitasyon Ortezi Emre Tuğberk Gülnergiz, Ayşe Asena Yekdanek, Savaş Dilibal, Haydar Şahin <i>İstanbul Gedik Üniversitesi</i>
16:10-16:30	Günlük Hayat Aktivitelerine Uygun 4 Serbestlikli Bir Üst Uzun Dış İskeleti için Tork Gereksinimi Sinan Coruk, Barkan Uğurlu <i>Özyeğin Üniversitesi</i>
16:30-16:50	Hesaplanmış-Tork Kontrolcüsü Tabanlı ve Bilek Fleksiyon-Ekstansiyon Hareketlerini Gerçekleştirebilen Dirsek Altı Protez Kol Tasarımı ve Gerçeklenmesi Hürkan Şahin, Şebnem Sarıözkan, Caner Emeç, Aydın Yeşildirek <i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>
16:50-17:10	5 Serbestlik Derecesine Sahip Ameliyat Robotunun Kinematikliği Onur Ersoy, Mehmet Can Yıldırım, Özkan Bebek <i>Özyeğin Üniversitesi</i>

Oturum: Kontrol
27 Haziran 2019 Perşembe / 15:30-17:10
Yer: MF 408

15:30-15:50	Yansıtma Tabanlı Artırılmış Gerçeklik Destekli Uyarı ve Bilgilendirme Sistemi Geliştirilmesi Serhat Demirtaş, Tolga Cankurt, Evren Samur <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>
15:50-16:10	Elektrikli Araçlarda Enerji Optimizasyonu ve Model Parametrelerinin Kestirimi Mehmet Ali Gözüküçük, Hasan Fatih Uğurdağ, Taylan Akdoğan <i>Özyeğin Üniversitesi</i>
16:10-16:30	Rastgele Sıralı Ardışık Bileşim Kullanarak Hareket Planlama Ferhat Gölbol, Emre Ege, Afşar Saranlı, Mert Ankaralı <i>Orta Doğu Teknik Üniversitesi</i>

16:30-16:50	A Survey of ROS Security Sheme Hamitaj, Burak İner <i>Kocaeli Üniversitesi</i>
16:50-17:10	Robot Kontrollü bir Eklemeli İmalat Sisteminin Geliştirilmesi M.Enes Gebel, A. Ali Şen, Oğuzhan Yılmaz <i>INTECRO Robotik</i>

Oturum: Bilişsel Robotbilim 28 Haziran 2019 Cuma / 11:00-13:00 Yer: MF 410 (Oditoryum)	
11:00-11:20	Nesne-Odaklı Eylem Tahmini Gelişimi İçin Hesaplamalı Model Serkan Buğur, Emre Uğur, Erhan Öztö <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>
11:20-11:40	Çoklu Robot Sistemlerinde Taklit ile Öğrenme Mehmet Dinçer Erbaş <i>Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi</i>
11:40-12:00	Robot Nesne Etkileşiminde Çok Kipli Hata Sezme Arda İnceoğlu, Gökhan İnce, Yusuf Yaslan, Sanem Sarıel <i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>
12:00-12:20	Zaman Algısına İlişkin Hesaplamalı Modeller ve Bilişsel Robotbilim Modelleri Hamit Başgöl, Emre Uğur <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>
12:20-12:40	Derin Pekiştirmeli Öğrenme Kullanarak Konum Denetimli Robotlarda Kuvvet Denetimi Emir Arditi, Erhan Öztö <i>Özyeğin Üniversitesi</i>
12:40-13:00	Çok-Etmenli Yörünge Bulma Probleminin Lego Robotlarında Uygulanması: Bir Eğitsel Robotik Çalışması Emre Hilmi Soğur, Aysu Bogatarkan, Farukhzhon Barotov, Batuhan Yıldırım, Gökay Çoruhlu, Esra Erdem, Volkan Patoğlu <i>Sabancı Üniversitesi</i>

Oturum: İnsan-Robot Etkileşimi
28 Haziran 2019 Cuma / 11:00-13:00
Yer: MF 407

11:00-11:20	Haptik Cihaz için İyileştirilmiş Performansa Sahip Robot Tasarımı İbrahimcan Görgülü, Mehmet Görkem Karabulut, Mehmet Veysel Sekendiz, Gökhan Kiper, Mehmet İsmet Can Dede <i>İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü</i>
11:20-11:40	Hafif İşbirlikçi Robotlarda Kullanılacak Eyleyici Sistem Parametrelerinin Doğrulanması için Oluşturulan MRS Fren Tabanlı Test Düzeneği Mert Yılmaz, Mehmet Görkem Karabulut, Mehmet İsmet Can Dede <i>İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü</i>
11:40-12:00	Karakter Animasyonu Prensiplerinin Endüstriyel İnsan-Robot Etkileşimlerinde Değerlendirilmesi Yunus Terzioğlu, Bilge Mutlu, Erol Şahin <i>Orta Doğu Teknik Üniversitesi</i>
12:00-12:20	Faydalı Frenleme Altında Fren Pedal Hissiyatının Korunabilmesi için Aktif Fren Pedalı Geliştirme Sistemi Umut Çalışkan, Ardan Apaydin, Volkan Patoğlu <i>Sabancı Üniversitesi</i>
12:20-12:40	Classification of Interactive Behaviors in Physical Human-Human Collaboration via Haptic Features Zaid Alsaadi, Ayşe Küçükylmaz, Çağatay Başdoğan <i>Koç Üniversitesi</i>
12:40-13:00	Konuşmaya Dayalı İnsan-Robot Müzakereleri Umut Çakan, Onur Keskin, Reyhan Aydoğan <i>Özyeğin Üniversitesi</i>

Oturum: Robot Tasarım ve Robot Dinamiği
28 Haziran 2019 Cuma / 11:00-13:00
Yer: MF 408

11:00-11:20	İnsansı Robot Kafası Mekatronik Tasarımı: MUDA Atakan Zeybek, Mert Can Olgar, Umut Can Salman, Doğan Oruç, Bülent Bölüt, Şeniz Ertuğrul <i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>
11:20-11:40	İki Eksenli Gimbal Sistemlerinin Benzetiminde Doğrusal Olmayan Sürtünme Etkilerinin Tanımlanması Ahmet Furkan Güç, Zafer Yumrukçal, Onur Özcan <i>ASELSAN</i>
11:40-12:00	Yüksek Tork Çıkışlı Seri Elastik Eyleyiciler için Burulma Yayı Tasarımı ve Topoloji Eniyileştirilmesi Sinan Emre, Polat Şendur, Mehmet Can Yıldırım, Barkan Uğurlu <i>Özyeğin Üniversitesi</i>
12:00-12:20	Sualtı Arama ve Mayın İmhada Kullanılabilecek Yarı Otonom İnsansız Sualtı Robot Sisteminin Mekatronik Sistem Tasarımı Esra Yuğuran, Savaş Dilibal, Devkan İçli, Furkan Çetinkaya, Umut Macit, Enes Sönmez, Esat Karakaya, Burak Lale <i>İstanbul Gedik Üniversitesi</i>
12:20-12:40	Gezegen Gezginleri için Külbütör-Boji ve Çift Salıncaklı Süspansiyon Mekanizmalarının Titreşim Analizi Suavi Yıldırım, Selen Erman, Mehmet Emil, Ali Yaşar, Özkan Bebek <i>Özyeğin Üniversitesi</i>
12:40-13:00	Açık Kaynak Sürü İHA Benzetim Ortamı Okan Aşık, Gökçe Uludoğan, Hatice Kübra Eryılmaz <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>

AYRINTILI POSTER SUNUM PROGRAMI

Poster Sunumları

28 Haziran 2019 Cuma / 14:00-17:30

Yer: ÖZÜ-X B02

Sürücü Taklitine Dayalı Otonom Sürüş,
Ali Demir, Burak Atmaca, Talat Büyükkın
TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası

Miyoelektrik Transhumeral Protez Kol Tasarımı
Ece Yener, Burak Kula, Yiğit Aksoy, Kerem Altun, Ümit Güz
Işık Üniversitesi

Otonom Taşıyıcı Araçlar için Akıllı Fabrika Test Ortamı
Didem Özüpek Taş, Özlem Örnek, Ahmet Yazıcı
Inovasyon Mühendislik

Bir Dört döner Pervaneli Uçan Robot için MATLAB/Simulink Bazlı Benzetim Programı
Erim Can Özçınar, Eyüp Turan Karasu, Altuğ Başol, Barkan Uğurlu
Özyeğin Üniversitesi

Engel Üzerinden Zıplayan Zıpzıp Robot,
Yunus Emre Aydın, Gülşah Tümüklü Özyer, Barış Özyer
Atatürk Üniversitesi

Otonom Taşıyıcı Araç Tasarımı ve Geliştirilmesi,
Enes Sarıkahya, Yasin Canbaz, Erol Çıracı
Inovasyon Mühendislik

3B Yürüme Desteği Sağlayabilen bir Alt Gövde Dış İskelet için Ayak Ünitesi Tasarımı
Mustafa Derman, Mehmet Can Yıldırım, Polat Şendur, Barkan Uğurlu
Özyeğin Üniversitesi

UR5 Robot Kol Fiziksel İnsan-Robot Etkileşimi İçeren Uygulamalar için Ne Kadar Uygun?
Sara Hamdan, Barkan Uğurlu
Özyeğin Üniversitesi

DQN Kullanarak Denge Kurmak
Berkay Bayram, Erhan Öztop
Özyeğin Üniversitesi

Düşük Seviye Denetleyici Tasarımı ve Gerçeklenmesi
Yasin Canbaz, Yongki Yoon
Inovasyon Mühendislik

HandMECH: Mekanik El Protezi - El Kısımının Konsept Tasarımı

Barış Baysal, Ramazan Ünal
Özyeğin Üniversitesi

HandMECH: Mechanical Hand Prosthesis- Conceptual Design of a Compliant Wrist

Ahmed Elsayed, Ramazan Ünal
Özyeğin Üniversitesi

Yarı-Pasif Eyleyicileri Matlab SimMultibody’de Modelleme

Yusuf Karabacakoglu, Yunus Emre İkiz, Jean Piere Demir, Mustafa Mert Ankaralı
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Toprak Örneği Toplamak İçin Tasarlanmış Gezegen Gezgini Yerüstü Delik Açma Elemanı

Ahmet Burhan Kara, Cansu Başaran, Özkan Bebek
Özyeğin Üniversitesi

Gezegen Gezginlerinde Kullanılan Özerk Lokomasyon Stratejilerinin Karşılaştırmalı Analizi

Hüseyin Gökay, Nebi Peker Çelik, Ahmet Çağatay Savaşlı, Atahan Çaldır, Suavi Yıldırım and Özkan Bebek
Özyeğin Üniversitesi

Characteristics of Human Whole Body Motor Learning

Tjasa Kunavar, Jernej Camernik, Jan Babic, Erhan Öztop
Jozef Stefan Institute

Haritalama ve Otonom Navigasyon Çalışmaları İçin Robotik Platform Tasarımı

Oğuz Özdemir, Sami Alperen Akgün, Uğur Açıkgöz
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Kinect Sensörü ile Robot Manipulator Kontrolü

Şeyma Kurtbaş, Emrah Şimşek, Gülşah Tümüklü Özyer, Barış Özyer
Atatürk Üniversitesi

Şartlı Sinirsel Motor Primitifleri ile Obje Manipülasyonu Öğrenimi

Mert İmre, Muhammet Yunus Şeker, Emre Uğur
Boğaziçi Üniversitesi

Robotic Object Placement on Cluttered Surfaces

Abdul Rahman Dabbour, Esra Erdem, Volkan Patoğlu
Sabancı Üniversitesi

BİDR: Boru İç Denetleme Robotu

Yusuf Engin Tetik, Hüseyin Ayhan Yavaşoğlu, Onur Canbak, Ufuk Altunkaya, Kürşad Gökçe, Fatih Sonkaya, Mustafa Hakan Balaman, Erkan Sunan, Latif Anıl Büyükbaskın, Hidayet Aydın, Yasin Taşan, Mustafa Güner, Mehmet Yılmaz, Yusuf Arpat, Uğur Usta
TÜBİTAK MAM

ÖZEL OTURUMLAR

28 Haziran 2019 Cuma / 14:00-15:00
ÖzÜ-X B27

14:00-14:20	Sanayi Oturumu	Tunç Taner Gürlek, ASELSAN, Müdür
14:20-14:40		Mehmet Halit Calayır, Gilbo, Kurucu ve Genel Müdür
15:00-15:30	Kahve Arası	
15:30-17:30	Yeni Nesil Robotik Teknolojileri Oturumu	Modaratör: Doç. Dr. Erol Şahin, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

BİLDİRİLER

Optimization of Workspace and Manipulability of a 5 DoFs Surgical Robot

Muhammad Sarmad Qureshi, Murat Ozvin
Department of Electrical and Electronics Engineering
Ozyegin University, Istanbul, Turkey
sarmad.qureshi@ozu.edu.tr, murat.ozvin@ozu.edu.tr

Aysan Dibekci, Ozkan Bebek
Department of Mechanical Engineering
Ozyegin University, Istanbul, Turkey
aysan.dibekci@ozu.edu.tr, ozkan.bebek@ozyegin.edu.tr

Abstract—Considering the design methodology for developing a lightweight and compact minimally invasive surgical (MIS) robotic manipulator, the goal of the study is to move the first step in the design configuration of a surgical robotic manipulator that will be used in surgical theatres for holding surgical tools as scissors, graspers, needle drivers, tissue holders and many of the other surgical equipment, so for to assist surgeons inside an surgical room to perform MIS with greater control and ease. Four different robotic configurations have been proposed and the optimum configuration amongst the four was selected. The selection is based on three factors, the first one discusses the maximum workspace volume of the robotic manipulator, the second one discusses the largest velocities w.r.t. the manipulability, of the under consideration 5 DOFs robotic manipulator and the third one relates to the maximum manipulability measure amongst all. Results show that for the subjected robotic manipulator translational-roll-yaw-pitch-roll configuration is the optimal design configuration to be used for the minimal invasive surgery.

Index Terms—Minimal Invasive Surgery (MIS), workspace, manipulability.

I. INTRODUCTION

Nowadays, inside an operation theatre both the surgeons and robots work hand in hand to achieve surgical task of a patient [1]. However, due to minimal invasion or incision robotic arms are preferred over a human being to minimize the tissue or muscle damage, consequently reducing the recovery time and greatly enhancing the outcomes of the surgery [2]–[5]. Despite of the advantages of the Minimal Invasive surgery (MIS) in terms of lower recovery time, aftereffects, reducing the trauma of surgery and minimizing the hospitalization cost [6], [7], it has certain disadvantages as lack of any feedback from the organs and limited motion of the surgeon [8]. Presently robotic manipulators play a vital role in achieving a MIS of a living being, inside the operating room. Robotic manipulators are beneficial in reducing the hand tremor, workspace scaling and the navigation. The requirements for the minimal invasive surgery applications are presented by Collen, in [9]. Taylor, in 1996 pointed out the pros and cons of using a robotic manipulator for the surgical applications, which lead to the enhancement and development of robotic surgical systems [10].

Minimal Invasive Surgery (MIS) is unconventional surgical procedure in which thin and long surgical tools called as laparoscopic instruments are introduced inside the patient's body through small holes, called incisions [11]. Due to its minimal invasive nature and various advantages over the conventional operational techniques, MIS is widely practiced in modern operation theaters. Since, 1980s after the invention of surgical robots for MIS, many robots have been developed by scientists and researchers that are known worldwide for their efficiency and versatility. A famed example is the da Vinci surgical robot [12]–[14], that has successfully been used in various MIS procedures around the world. Fig. 1 depicts the robotic assisted surgery, in which a patient is lying on the surgery table and the robots are assisting in the surgical process to achieve a MIS. Inside a surgical room the medical robotic manipulators provide guided assistance to the human surgeons [15], which greatly increases the strength and decreases the limitations of the surgical operations.

Considering the kinematics of the robot, at the incision point MIS needs at least 3 DOFs i.e. pitch, yaw and translation. Whereas, pitch and translational movements are considered as most important DOFs [16], consequently needing a higher resolution and more execution forces of the surgical tool movement. Also the workspace [17] and the manipulability [18] of the robotic manipulator has to be optimized for the easy moving of the end effector and the velocity and forces are up to the required mark while the surgery is in process.

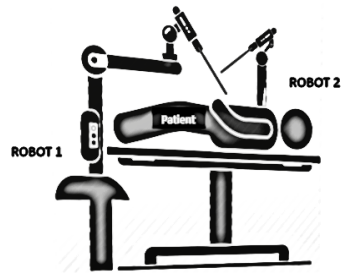


Fig. 1. The surgical scene shown in the figure depicts two surgical robots during operation. The robots are teleoperated.

This paper addresses the problem of optimal motion control of a 5 DOF surgical robotic manipulator designed especially for the holding of the surgical tools as scissors, graspers, endoscopic cameras, needle drivers, tissue holders and many, inside the surgical theatres so for to help surgeons perform MIS with greater control and ease. As, in some cases the surgeons find MIS challenging to perform due to the uncomfortable posture required to hold the surgical tools and the irregular tool movements inside the patient's body [19]. Furthermore, in some cases an additional surgeon is required in the operation theatre just for holding the laparoscopic tools for the surgery, the robotic manipulators inside an operation theatre may reduce the number of surgeons by holding the tools used for MIS. This paper addresses the optimal design constraints of a robotic manipulator to be used inside an operation theatre, an optimal design or configuration of a robotic manipulator refers to the best configuration having the minimum number of singularity points, large velocity and force outputs at the end effector, high accuracy and many more. To maximize the workspace volume along with the large velocities that corresponds to the highest manipulability are the main goals of the optimal design. The optimal motion control is achieved by optimizing the workspace and manipulability of the 5 DOF robotic manipulator used for holding the various surgical instruments along with the different human tissues as directed by the human surgeon inside an operation theatre. While much of the discussion applies more generally that in which configuration the robotic arm should be assembled to achieve the optimal workspace and manipulability without reaching the singularity limits of the robotic manipulator during a minimally invasive surgery. As MIS procedures are characterized by the restriction of workspace volume and the manipulability of the robotic manipulator inside that volume. The orientation and design of the robotic manipulator is of the utmost importance to decide the aforementioned characteristics, so for to opt the robotic manipulator configuration for the desired surgical application. In this paper, four different configurations i.e. 'Configuration 1' (Translational-Roll-Pitch-Yaw-Roll), 'Configuration 2' (Translational-Roll-Yaw-Pitch-Roll), 'Configuration 3' (Translational-Roll-Pitch-Pitch-Roll) and 'Configuration 4' (Translational-Roll-Yaw-Yaw-Roll) of the robotic manipulator have been compared to find the optimum configuration having the largest workspace volume and has the highest manipulability. Fig. 2, 3, 4 and 5 shows the schematics of the four different proposed configurations.

II. PROPOSED MECHANICAL DESIGNS

To solve the problem of the optimum workspace volume and manipulability of a 5 DOFs robotic manipulator under consideration, four different designs configurations of the robotic manipulator were proposed i.e. Configuration 1, Configuration 2, Configuration 3 and Configuration 4, having the first joint as a prismatic joint and the other four joints as the revolute joints. The main design requirement criterion was the first joint should has to be a prismatic so to adjust the height of the robot according to the surgical table and the second and the

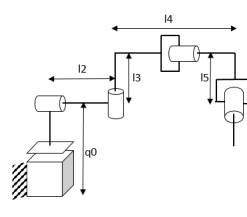


Fig. 2. Robot Proposed 'Configuration 1' (TRANSLATIONAL-ROLL-PITCH-YAW-ROLL)

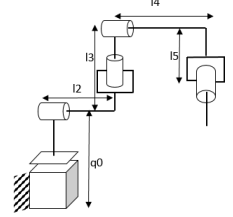


Fig. 3. Robot Proposed 'Configuration 2' (TRANSLATIONAL-ROLL-YAW-PITCH-ROLL)

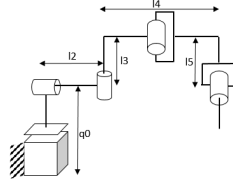


Fig. 4. Robot Proposed 'Configuration 3' (TRANSLATIONAL-ROLL-PITCH-PITCH-ROLL)

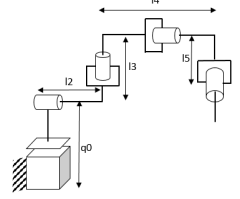


Fig. 5. Robot Proposed 'Configuration 4' (TRANSLATIONAL-ROLL-YAW-YAW-ROLL)

last joints have to be in 'roll' configuration as the general surgical robotic manipulators are designed this way. Hence, considering the design requirements the above four possible permutations were selected. Out of these four configurations the configuration with the optimum results has to be selected to design a robotic arm, as in search of the configuration most beneficial inside the operation theatres while performing the MIS. The measurement of optimization is the maximum workspace volume and the configuration having the maximum manipulability amongst the aforementioned stated configurations.

III. KINEMATICS OF THE ROBOTIC MANIPULATOR

A. Forward Kinematics

As the robotic arm has to be a 5 DOFs structure having first joint as a translational joint and the other four joints to be revolute joints. The revolute joints configurations have to be decided after the optimization process. So, Denavit-Hartenberg method was used to develop the forward kinematics of the robot manipulator for the four different configurations stated above and the position of the end effector was calculated from the aforementioned method. Appendix 'A', 'B', 'C' and 'D' show the transformation matrices of the four different configurations i.e. Configuration 1, Configuration 2, Configuration 3 and Configuration 4. The link lengths taken for the robotic manipulator under consideration are given in TABLE I. These link lengths are taken for the initial study, and can be changed

in the implementation phase as per the design requirements. As this study discusses only the workspace and the manipulability requirements.

TABLE 1
LINK LENGTH OF THE UNDER CONSIDERATION 5 DOF ROBOTIC MANIPULATOR

Link Length $q_0(m)$	Link Length $l_2(m)$	Link Length $l_3(m)$	Link Length $l_4(m)$	Link Length $l_5(m)$
0.300	0.100	0.156	0.156	0.042

Here, ' q_0 ' is the translational or the prismatic joint length and was taken as 0.3m for all the four different configurations. Whereas, ' l_2 ', ' l_3 ', ' l_4 ' and ' l_5 ' are the link lengths of the revolute joints, and the ' q_1 ', ' q_2 ', ' q_3 ' and ' q_4 ' are respective joint angles. The forward kinematics for the four different configurations are given by the transformation matrices ' T_1 ', ' T_2 ', ' T_3 ' and ' T_4 ' for configurations '1', '2', '3' and '4' in Appendix A, Appendix B, Appendix C and Appendix D respectively, due to the longer lengths of the equations.

B. Inverse Kinematics

Inverse kinematics is calculated using the Jacobian method. The computation of the vector of joint DOFs that will cause the end effector to reach a desired goal state, is the goal of inverse kinematics. Jacobian method is an iterative method to calculate the joint angles. Usually we represent the configuration of the end effector as a transformation matrix and the velocity as a twist. Configuration of the end effector is represented as in (1) and the velocity as the time derivative of those coordinates.

$$P_{endeffector} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

Then the forward kinematics can be written as,

$$P_{endeffector} = f_{FK}(\theta)$$

Where, " θ " is an n-vector of joint coordinates. Now, to find the relationship between joint velocities and the end effector velocities, we have to take the time derivative of the forward kinematics (FK). Applying the chain rule for differentiation and dropping the dependence on time, we get (2)

$$\frac{P_{endeffector}}{dt} = \frac{\partial f_{FK}\theta}{\partial \theta} \cdot \frac{dq}{dt} \quad (2)$$

Where, $\frac{\partial f_{FK}\theta}{\partial \theta}$ is the Jacobian matrix. The Jacobian matrix is a joint state dependent matrix and it maps the joint velocities to the Cartesian velocities, giving us (3)

$$\dot{P}_{endeffector} = J(\theta) \cdot \dot{\theta} \quad (3)$$

Now using the Backward Euler method of differentiation to obtain the joint angles, we get (4)

$$\theta_{i+1} = \theta_i + J^{-1}(\theta) \cdot (P_{i+1} - P_i) \quad (4)$$

For our 5 DOFs robotic manipulator, the jacobian matrix is given as in (5):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ex}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_{ex}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_{ex}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_{ex}}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_{ex}}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial P_{ey}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_{ey}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_{ey}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_{ey}}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_{ey}}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial P_{ez}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_{ez}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_{ez}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_{ez}}{\partial \theta_4} & \frac{\partial P_{ez}}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial W_{ex}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial W_{ex}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial W_{ex}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial W_{ex}}{\partial \theta_4} & \frac{\partial W_{ex}}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial W_{ey}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial W_{ey}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial W_{ey}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial W_{ey}}{\partial \theta_4} & \frac{\partial W_{ey}}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial W_{ez}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial W_{ez}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial W_{ez}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial W_{ez}}{\partial \theta_4} & \frac{\partial W_{ez}}{\partial \theta_5} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Here, P_{ex} , P_{ey} and P_{ez} are the position of the end effector of the robotic manipulator in xyz plane and the W_{ex} , W_{ey} and W_{ez} are the angular velocities. W_{ex} , W_{ey} and W_{ez} are calculated by. Generally a transformation 'Tr' matrix is given as follows:

$$T_r = \begin{bmatrix} R_{3*3} & P_{ex} \\ & P_{ey} \\ & P_{ez} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

and,

$$\dot{R}_{3*3} \cdot \dot{R}_{3*3}^T = \begin{bmatrix} 0 & -W_{ez} & W_{ey} \\ W_{ez} & 0 & -W_{ex} \\ -W_{ey} & W_{ex} & 0 \end{bmatrix}$$

IV. OPTIMIZATION CONSTRAINTS

A. Workspace Optimization

The workspace is a specification of the configurations that the end-effector of the robot can reach. The workspace is often defined in terms of the Cartesian points that can be reached for a given robotic manipulator arm. Considering the design requirements, the comparison of the four different workspace configurations i.e. Configuration 1, Configuration 2, Configuration 3 and Configuration 4 of the given 5 DOFs robotic manipulator has been calculated and the optimal has been selected for the future implementation, i.e. the configuration having the maximum workspace volume. The results of the maximum workspace are discussed in the results and discussions section. Lenarcic method was used to calculate the forward kinematics of the robotic manipulator for the four different configurations '1', '2', '3', '4', and the workspaces are drawn accordingly. For this study all the revolute joints were rotated 360°. The different discrete points for each workspace were connected using 'Delaunay triangulation' technique and afterwards an ellipsoid has been inserted optimally inside the total workspace area for each configuration, so for to estimate the volumes of the ellipsoids as in fig. 6, 7, 8 and 9. The emphasis on the maximum volume of the enclosed ellipsoid is because the

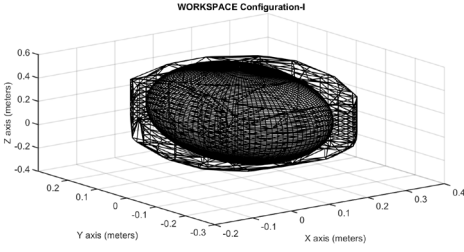


Fig. 6. Workspace of 'Configuration 1' (the workspace of the 5-DOF robot is shown. An ellipsoid having a volume of $0.0637m^3$ can be fitted into the workspace.)

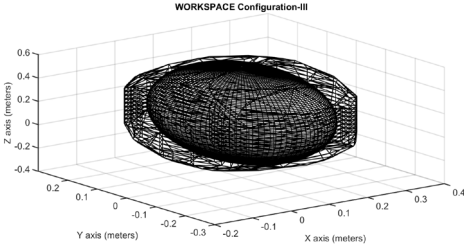


Fig. 8. Workspace of 'Configuration 3' (the workspace of the 5-DOF robot is shown. An ellipsoid having a volume of $0.0657m^3$ can be fitted into the workspace.)

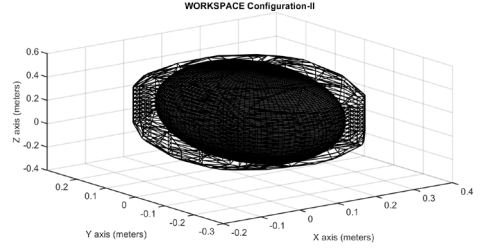


Fig. 7. Workspace of 'Configuration 2' (the workspace of the 5-DOF robot is shown. An ellipsoid having a volume of $0.0659m^3$ can be fitted into the workspace.)

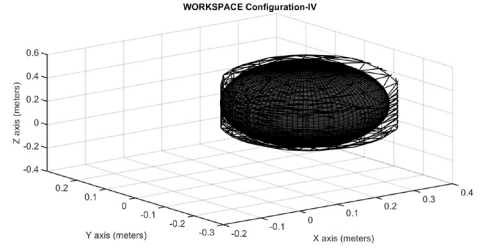


Fig. 9. Workspace of 'Configuration 4' (the workspace of the 5-DOF robot is shown. An ellipsoid having a volume of $0.0438m^3$ can be fitted into the workspace.)

workspace should cover the torso of the human body subjected on the surgical table.

B. Manipulability Optimization

Manipulability is the most important parameter in the functionality of a robotic manipulator. It is the measure of the capacity of change in orientation and position of the end-effector of the robotic manipulator given a joint configuration. A robot manipulator configuration is either singular or it's not. But even if a configuration is nonsingular it still may be close to being singular. So, the manipulability ellipsoids helps to visualize how close a robot is to being singular. Manipulability of a robotic manipulator inside a workspace is generally given by a two dimensional ellipsoid. If we apply unit angular velocity (ω) to a given joint, resulting linear velocities are given at the principal axis, hence the manipulability ellipsoid for the angular velocities can also be calculated. Manipulability ellipsoid gives the instantaneous velocity at the end effector at every change in the joints angles, but the bounds of the manipulability ellipsoids are not the limit of the workspace. However, if the magnitude velocity vector of the end effector is not zero in a direction, then motion of the end effector in that direction is not possible.

Consider a generic equation

$$x^T A^{-1} x = 1$$

$$A \in R^{m \times m} \text{ (symmetric, positive definite)}$$

Here, eigenvalues of ' A ' = $\lambda_1 \cdots \lambda_m$.

And, the eigenvectors of ' A ' = $v_1 \cdots v_m$.

The principal axes of the ellipsoid are aligned with the eigenvectors of ' A ' and the half-lengths of the ellipsoid along the principal axes are the square roots of the eigenvalues. And if we choose ' A ' equals to $J \cdot J^T$ then, the x-vector will show the velocity ellipsoids resulting from the unit sphere of joint velocities. If instead we set A to the inverse of ' $J \cdot J^T$ ', then the x-vector can be interpreted as the end-effector forces and the ellipsoids are called the force ellipsoids. The principal axes length and the half length of the velocity ellipsoids and the force ellipsoids are just the opposites of each other. Here also the Jacobian of the robot is given by (A): In order to calculate the manipulability ellipsoids, principal axes vectors are defined by the eigenvectors of ' J_{bv} ', where ' J_{bv} ' is the bottom three rows of the main Jacobian matrix. The measure of manipulability is done by the factor known as the manipulability measure ' K ', and is defined as.

$$K = \frac{\lambda_{Min}}{\lambda_{Max}}$$

where λ_s are the minimum and the maximum eigenvalues.

If manipulability measure ' K ' equals 1, then the robot reaches its singularity limits. If the value of ' K ' is less than one the robot manipulator is likely to move in all possible

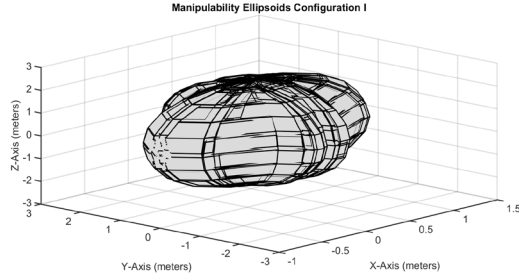


Fig. 10. Manipulability Ellipsoids for 'Configuration 1' (the manipulability ellipsoids of the 5-DOF robot is shown. Ellipsoids having a total volume of $4.72e + 03m^3$ show the total manipulability volume)

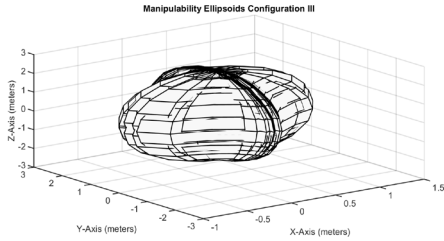


Fig. 12. Manipulability Ellipsoids for 'Configuration 3' (the manipulability ellipsoids of the 5-DOF robot is shown. Ellipsoids having a total volume of $1.01e + 03m^3$ show the total manipulability volume)

directions. Hence, the manipulability for the four different aforementioned configurations was studied, so for to select an optimum configuration for the robotic manipulator that gives the most freedom to the position and the orientation of end-effector and having the least number of non-singularities for various joint configurations, while assisting the MIS. The criterion of the optimal configuration was defined by a cost function that integrates the volume of each and every manipulability ellipsoid for a particular configuration for numerous joint configurations. And, the manipulability measure 'K' was summed for every joint configuration giving us the optimum configuration.

V. RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Workspace Volume

Fig. 6, 7, 8 and 9 shows the various workspace configurations for the different four configuration i.e. Configuration 1, Configuration 2, Configuration 3 and Configuration 4 of a 5 DOFs robotic manipulator to be used for the MIS. Initially for the optimum workspace that is the workspace with the largest volume, all the joints of the robots were set to 360° rotation and the initial translational joint was help constant at 0.3m, to compare the volumes of the workspaces of the four different configurations stated above. The discrete data points were interpolated using "Delaunay triangulation" procedure and an

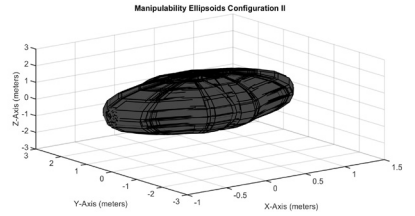


Fig. 11. Manipulability Ellipsoids for 'Configuration 2' (the manipulability ellipsoids of the 5-DOF robot is shown. Ellipsoids having a total volume of $5.47e + 03m^3$ show the total manipulability volume)

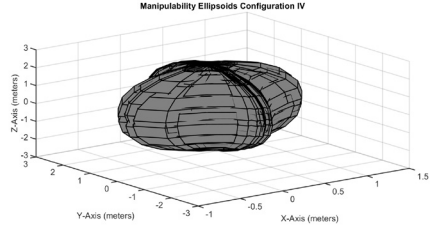


Fig. 13. Manipulability Ellipsoids for 'Configuration 4' (the manipulability ellipsoids of the 5-DOF robot is shown. Ellipsoids having a total volume of $3.94e + 03m^3$ show the total manipulability volume)

ellipsoid of the appropriate dimensions was optimally inserted inside the workspace to find the maximum volume covered by the ellipsoid. TABLE II, shows the results of volume for the four different configurations and can be decided from the results that the Configuration 2 encloses the maximum volume.

B. Sum of Manipulability Ellipsoids Volume in Workspace

Fig. 10, 11, 12 and 13 shows the various manipulability ellipsoids for the different four configuration i.e. Configuration 1, Configuration 2, Configuration 3 and Configuration 4 of a 5 DOFs robotic manipulator to be used for the MIS. Due to the computational limitations the resolution of the angles of the four rotational joints was taken as 0.5 rads. Similarly for the manipulability ellipsoids the first translational joint was restricted to the 0.6m. Here, for every possible joint configurations an ellipsoid has been made and a cost function which sums the volume of each ellipsoid has been defined, leading us to the conclusion in TABLE II. Results in TABLE II, also proves that the manipulability is achieved maximum for the Configuration 2.

C. Sum of Manipulability Measure

Here the manipulability measure i.e. 'K' has been calculated for the different four configuration i.e. Configuration 1, Configuration 2, Configuration 3 and Configuration 4 of a 5 DOFs robotic manipulator to be used for the MIS. Due to the

computational limitations the resolution of the angles of the four rotational joints was taken as 0.5 rads. Similarly, as for the manipulability ellipsoids the first translational joint was restricted to the 0.3m. Here, the manipulability measure 'K' is calculated by dividing the minimum eigenvalue of the last three rows of the jacobian matrix by the maximum eigenvalue. Table II shows the results of a cost function defined that sums the 'K' value for every non-singular joint configuration of the given configuration, hence leading us to the conclusion that Configuration 2 is best amongst all the tested configurations.

TABLE II
SHOWING THE WORKSPACE VOLUME, SUMMATION OF VOLUME OF THE MANIPULABILITY ELLIPSOIDS AND SUMMATION OF MANIPULABILITY MEASURE FOR ALL THE FOUR DIFFERENT CONFIGURATIONS.

Configuration	Workspace Volume (m ³)	Sum of Manipulability Ellipsoids Volume (m ³)	Sum of Manipulability Measure
Configuration 1	0.0637	4.72e+03	223.52
Configuration 2	0.0659	5.47e+03	261.72
Configuration 3	0.0657	1.01e+03	42.42
Configuration 4	0.0438	3.94e+03	169.91

VI. SUMMARY

The main purpose of this paper was to obtain an optimum joint configuration of a 5 DOFs robotic manipulator which is to be designed for the MIS. Four different robotic arm configurations i.e. Configuration 1, Configuration 2, Configuration 3 and Configuration 4 were tested to obtain an optimum configuration for the robotic manipulator. Results show that the Configuration 2 configuration shows better and improved results compared to the other three configurations when the workspace volume of all the four configurations were compared, as the maximum workspace volume was the desired objective as discussed in the optimization constraints section. Moreover, the configuration 2 also showed the maximum manipulability, as shown by the maximum volume achieved by the cost function, as the volume of manipulability ellipsoids were added. In addition to the constraints discussed above, the cost function of the manipulability measure 'K' also showed that the summation of the manipulability measure for the Configuration 2 gives the best results. Hence, for the subjected 5 DOFs robotic manipulator Configuration 2 is optimal, if the constraints above discussed are considered.

REFERENCES

- [1] S. Bann, M. Khan, J. Hernandez, Y. Munz, K. Moorthy, V. Datta, T. Rockall, and A. Darzi, "Robotics in surgery," *Journal of the American College of Surgeons*, vol. 196, no. 5, pp. 784–795, 2003.
- [2] P. Puangmalai, K. Althoefer, L. D. Seneviratne, D. Murphy, and P. Dasgupta, "State-of-the-art in force and tactile sensing for minimally invasive surgery," *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 371–381, 2008.
- [3] M. J. Mack, "Minimally invasive and robotic surgery," *Jama*, vol. 285, no. 5, pp. 568–572, 2001.
- [4] J. H. Palep, "Robotic assisted minimally invasive surgery," *Journal of Minimal Access Surgery*, vol. 5, no. 1, p. 1, 2009.
- [5] J. Rosen, B. Hannaford, M. P. MacFarlane, and M. N. Sinanan, "Force controlled and teleoperated endoscopic grasper for minimally invasive surgery-experimental performance evaluation," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 46, no. 10, pp. 1212–1221, 1999.
- [6] D. Gerhardus, "Robot-assisted surgery: the future is here," *Journal of Healthcare Management*, vol. 48, no. 4, p. 242, 2003.
- [7] E. Wilson, "The evolution of robotic general surgery," *Scandinavian Journal of Surgery*, vol. 98, no. 2, pp. 125–129, 2009.
- [8] P. Francis and H. N. Winfield, "Medical robotics: the impact on perioperative nursing practice," *Urologic Nursing*, vol. 26, no. 2, p. 99, 2006.
- [9] M. F. Collen, "General requirements for a medical information system," *Computers and Biomedical Research*, vol. 3, no. 5, pp. 393–406, 1970.
- [10] R. Taylor and S. Stulberg, "Medical robotics working group section report," in *Proc. NSF Workshop Medical Robotics and Computer-Assisted Medical Interventions (RCAMI)*, 1996.
- [11] G. Melich, Y. K. Hong, J. Kim, H. Hur, S. H. Baik, N. K. Kim, A. S. Liberman, and B. S. Min, "Simultaneous development of laparoscopy and robotics provides acceptable perioperative outcomes and shows robotics to have a faster learning curve and to be overall faster in rectal cancer surgery: analysis of novice mis surgeon learning curves," *Surgical endoscopy*, vol. 29, no. 3, pp. 558–568, 2015.
- [12] R. Cichon, U. Kappert, J. Schneider, I. Schramm, V. Gulielmos, S. M. Tugtekin, and S. Schüller, "Robotic-enhanced arterial revascularization for multivessel coronary artery disease," *The Annals of thoracic surgery*, vol. 70, no. 3, pp. 1060–1062, 2000.
- [13] G. H. Ballantyne and F. Moll, "The da vinci telerobotic surgical system: the virtual operative field and telepresence surgery," *Surgical Clinics*, vol. 83, no. 6, pp. 1293–1304, 2003.
- [14] U. Kappert, J. Schneider, R. Cichon, V. Gulielmos, K. Matschke, S. M. Tugtekin, and S. Schüller, "Wrist-enhanced instrumentation: moving toward totally endoscopic coronary artery bypass grafting," *The Annals of thoracic surgery*, vol. 70, no. 3, pp. 1105–1108, 2000.
- [15] J. Troccaz, Y. Delnondedieu, and A. Poyet, "Safety issues in surgical robotics," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 28, no. 20, pp. 19–26, 1995.
- [16] S. Nisar, T. Endo, and F. Matsuno, "Design and kinematic optimization of a two degrees-of-freedom planar remote center of motion mechanism for minimally invasive surgery manipulators," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 9, no. 3, p. 031013, 2017.
- [17] R. E. Stamper, L.-W. Tsai, and G. C. Walsh, "Optimization of a three dof translational platform for well-conditioned workspace," in *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4. IEEE, 1997, pp. 3250–3255.
- [18] L. Guilamo, J. Kuffner, K. Nishiwaki, and S. Kagami, "Manipulability optimization for trajectory generation," in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006. ICRA 2006. IEEE, 2006, pp. 2017–2022.
- [19] A. Park, G. Lee, F. J. Seagull, N. Meenaghan, and D. Dexter, "Patients benefit while surgeons suffer: an impending epidemic," *Journal of the American College of Surgeons*, vol. 210, no. 3, pp. 306–313, 2010.

APPENDIX A
TRANSFORMATION MATRIX FOR CONFIGURATION 1

The transformation matrix for Transnational-Roll-Pitch-Yaw-Roll is given by:

$$T_1 = \begin{bmatrix} c_2c_3 & s_2s_4 - c_2c_4s_3 & c_4s_2 + c_2s_3s_4 & l_2 + l_4s_2 + l_5c_2c_3 \\ c_1s_3 + c_3s_1s_2 & c_4(c_1c_3 - s_1s_2s_3) - c_2s_1s_4 & -s_4(c_1c_3 - s_1s_2s_3) - c_2c_4s_1 & l_5(c_1c_3 - c_3s_1s_2) + l_3c_1 - l_4c_2s_1 \\ s_1s_3 - c_1c_3s_2 & c_4(c_3s_1 + c_1s_2s_3) + c_1c_2s_4 & c_1c_2c_4 - s_4(c_3s_1 + c_1s_2s_3) & q_0 + l_5(s_1s_3 - c_1c_3s_2) + l_3s_1 + l_4c_1c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

APPENDIX B
TRANSFORMATION MATRIX FOR CONFIGURATION 2

The transformation matrix for Transnational-Roll-Yaw-Pitch-Roll is given by:

$$T_2 = \begin{bmatrix} c_2c_3 & c_2s_3s_4 - c_4s_2 & s_2s_4 + c_2c_4s_3 & l_2 - l_4s_2 + l_5c_2c_3 \\ s_1s_3 + c_1c_3s_2 & c_1c_2c_4 - s_4(c_3s_1 - c_1s_2s_3) & -c_4(c_3s_1 - c_1s_2s_3) - c_1c_2s_4 & l_5(s_1s_3 + c_1c_3s_2) - l_3s_1 + l_4c_1c_2 \\ c_3s_1s_2 - c_1s_3 & s_4(c_1c_3 + s_1s_2s_3) + c_2c_4s_1 & c_4(c_1c_3 + s_1s_2s_3) - c_2s_1s_4 & q_0 - l_5(c_1s_3 - c_3s_1s_2) + l_3c_1 + l_4c_2s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

APPENDIX C
TRANSFORMATION MATRIX FOR CONFIGURATION 3

The transformation matrix for Transnational-Pitch-Pitch-Yaw-Roll is given by:

$$T_3 = \begin{bmatrix} c_{(2+3)} & s_{(2+3)}s_4 & s_{(2+3)}c_4 & l_2 + l_5c_{(2+3)} \\ s_{(2+3)}s_1 & c_1c_4 + s_4(s_1s_2s_3 - c_2c_3s_1) & c_4(s_1s_2s_3 - c_2c_3s_1) - c_1s_4 & l_5(c_2s_1s_3 + c_3s_1s_2) + l_3c_1 + l_4c_1 \\ -s_{(2+3)}c_1 & c_4s_1 + s_4(c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3) & c_4(c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3) - s_1s_4 & q_0 - l_5(c_1c_2s_3 + c_1c_3s_2) + l_3s_1 + l_4s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

APPENDIX D
TRANSFORMATION MATRIX FOR CONFIGURATION 4

The transformation matrix for Transnational-Roll-Yaw-Yaw-Roll is given by:

$$T_4 = \begin{bmatrix} c_{(2+3)} & -s_{(2+3)}c_4 & s_{(2+3)}s_4 & l_2 + l_5c_{(2+3)} \\ s_{(2+3)}c_1 & c_4(c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3) - s_1s_4 & -c_4s_1 - s_4(c_1c_2c_3 - c_1s_2s_3) & l_5(c_1c_2s_3 + c_1c_3s_2) - l_3s_1 - l_4s_1 \\ s_{(2+3)}s_1 & c_1s_4 - c_4(s_1s_2s_3 - c_2c_3s_1) & c_1c_4 + s_4(s_1s_2s_3 - c_2c_3s_1) & q_0 + l_5(c_2s_1s_3 + c_3s_1s_2) + l_3c_1 + l_4c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Hafif İşbirlikçi Robotlarda Kullanılacak Eyleyici Sistem Parametrelerinin Doğrulanması için Oluşturulan MRS Fren Tabanlı Test Düzenegi

Mert Yılmaz, Mehmet Görkem Karabulut, Mehmet İsmet Can Dede

Makina Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
İzmir, Türkiye

Email: {mertylmaz, gorkemkarabulut, candede}@iyte.edu.tr

Özetçe —Bu çalışma kapsamında, bir hafif işbirlikçi robotun eyleyici sistemi temel alınarak bir eyleyici sistem oluşturulmuştur. Fırçasız doğru akım motoru ve planet dişliden oluşan eyleyici sistem için, doğru akım motoruna indirgenmiş bir model ile kapsamlı fırçasız doğru akım motoru benzetim modelleri geliştirilmiştir. Bu modelleri doğrulamak için geliştirilen test düzeneginde eyleyici sisteme değişken yükler uygulanması gerekmektedir. Manyeto-reolojik sıvı tabanlı fren sistemi bu değişken yükleri uygulaması için test düzenegine eklenmiştir ve bu anlamda bilimsel yazında yeni bir tip test düzenegi oluşturulmuştur. Deney düzeneginin bir diğer önemli unsuru ise yeni geliştirilen bir manyeto-reolojik frenin de model doğrulama çalışmaları aynı test düzenegi kullanılarak yapılabilmesidir.

Anahtar Kelimeler—Fırçasız doğru akım motoru, sistem modelleme, model doğrulama, manyeto-reolojik sıvı tabanlı fren

1. GİRİŞ

İşbirlikçi robotlar endüstriyel otomasyonda yeni bir yaklaşımdır. Eyleyici sistem tasarımı, işbirlikçi robotların tasarımında önemli bir yer tutmaktadır ve halihazırda aktif bir araştırma alanıdır. Elektriksel eyleyici sistemler hafif işbirlikçi robotlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Fırçasız doğru akım motoru (FDAM) ve yüksek hız reduksiyon oranına sahip harmonik, sikloid veya planet dişlisi ikilisi işbirlikçi robotlarda eyleyici sistem olarak tercih edilmektedir. Bunun nedeni bu eyleyici sistem kombinasyonunun sıfıra yakın dişli boşluğuna ve düşük hacimlerde yüksek tork yoğunluğuna sahip olmasıdır.

Bu çalışmada, hafif işbirlikçi robotlarda kullanılabilecek bir eyleyici sistemin parametrelerinin deneysel doğrulanması için geliştirilmiş bir test düzenegi sunulmuştur. Parametrelerin doğrulanması için aşağıdaki akış takip edilmiştir:

- İşbirlikçi robotlarda kullanılan bir eyleyici sistem oluşturulmuştur
- Oluşturulan eyleyici sistemin modeli geliştirilmiştir
- Geliştirilen model test düzenegi üzerinde doğrulanmıştır.

Geliştirilen test düzeneginden beklenti eyleyici sisteme çalışma esnasında önceden belirlenmiş değişken yükleri uygulayabilmesidir. Bu tip deney düzeneklerinde eyleyici sisteme sağlanacak değişken yük çeşitli yöntemlerle

oluşturulabilmektedir. Bilimsel yazınlar incelendiğinde, sisteme yük sağlayan bu yöntemlerin jeneratör, fren, ağırlık v.b. araçlarla geliştirildiği görülmektedir. En çok uygulanan yöntemlerden biri, motor miliyle aynı eksen kaplin v.b. araçlarla bağlanan doğru akım (DA) jeneratörlerdir. Jeneratörler direnç gösteren elemanlarla (yük hücreleri, reosta v.b.) birlikte FDAM'ye karşı yük oluştururlar [1]–[7]. Yazında sık rastlanan bir diğer yöntem ise kullanıldığı uygulamaya göre değişkenlik gösteren frenleme yöntemidir. Bir çalışmada, yük olarak sıkıştırılmış hava soğutmalı ve gecikmeli (hysteresis) fren kullanılmıştır [8]. Yazında kendisine yer bulan bir diğer frenleme aracı ise Fuko frenidir. Bu frenin DA besleme gerilimi değiştirilerek FDAM'ye karşı ayarlanabilir yük uygulanan deney düzenekleri mevcuttur [9], [10]. Eddy akımı ya da girdap akımı olarak bilinen akım ile manyetik alan oluşturarak yük uygulamayı sağlayan frenler ise diğer sıklıkla kullanılan araçlardan biridir. Bazen yukarıda bahsi geçen araçlardan bazıları birlikte karşı yük oluşturmak için kullanılmıştır. Bu çalışmalardan ikisinde değişken yük olarak hem jeneratör hem de Eddy akımı freni kullanılmıştır [11], [12].

Buraya kadar bahsedilen çalışmalarda, yük ölçümü genellikle tork algılayıcılarıyla yapılmaktadır. Bazı çalışmalarda ise bu ölçümler dinamometreler aracılığıyla yapılmıştır. Bir çalışmada kuvvet koluna ağırlıklar asılarak yük yaratılmış ve bu yük ilk dinamometre olarak kabul edilen Proni fren dinamometresiyle ölçülmüştür [14].

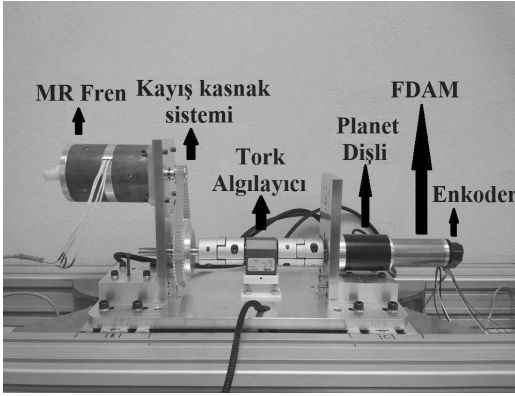
Yapılan incelemeler sonucunda deney sistemlerinde kullanılan yük oluşturma mekanizmaları arasında manyeto-reolojik sıvı (MRS) tabanlı bir fren sistemine rastlanmamıştır. Buna karşın, bu bildiride tanıtılan test düzenegi MRS tabanlı bir fren sistemi, tork algılayıcısı ve akım algılayıcılarından oluşmaktadır. Bu test düzenegini muadillerinden ayıran en önemli özellik, hem eyleyici sistem hem de MRS tabanlı fren sisteminin modellenmesine imkan sağlamasıdır. Eyleyici sistemin modellenmesi sırasında MRS tabanlı fren sistemi değişken yükleri uygulamak için kullanılırken, MRS tabanlı fren sisteminin modellenmesinde değişken yük, eyleyici sistem tarafından sağlanmaktadır. Bu iki sistemin arasına konumlandırılan tork algılayıcısı sayesinde, iki sistem arasında uygulanan anlık tork değerleri hızlı bir şekilde ölçülerek modelleme safhasında hesaba katılır. Tasarlanan test düzenegi

kullanılarak FDAM ve planet dişliden oluşan işbirlikçi robot eyleyici sisteminin model doğrulanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, eyleyici sistemin iki farklı benzetim modeli oluşturulmuştur. İlk model, eyleyici sistemin DA motoruna indirgenmiş modeldir ve nispeten daha basit yapıdadır. İkinci model ise eyleyici sistemin tüm parametrelerini kapsamlı bir şekilde ele alan bir modeldir. Bu benzetim modellerinin doğrulanması sırasında denetleyici etkilerden kaçınmak için ilgili parametreler devre dışı bırakılmıştır. Bu sayede, oluşturulan benzetim modellerinin doğruluğu artırılmıştır.

Bu bildirinin ikinci kısmında tasarlanan test düzeneği tanıtılmıştır. Test düzeneğinin tanıtılmasının ardından eyleyici sistemin benzetim modelleri detaylı olarak verilmiştir ve ilgili parametreleri tanıtılmıştır. Bunu takiben test düzeneği ile birlikte yapılan model doğrulama testlerinin sonuçları paylaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar tartışılarak bildiri sonlandırılmıştır.

II. DENEY DÜZENEGİ YAPISI

Eyleyici sistemin testleri ve doğrulanması için oluşturulan test düzeneği birer FDAM, planet dişi, enkoder ve döner tip tork algılayıcısından oluşmaktadır. Bu bileşenlere ek olarak yük testlerini gerçekleştirmek amacıyla sisteme MRS tabanlı bir fren ve kayış kasnak sistemi eklenmiştir. Test düzeneğindeki bileşenlerden veri toplanması, motor ve MRS tabanlı frenin sürülmesi, veri toplama kartları ve harici servo sürücü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ve sistemdeki bilgileri ve sinyallerin akış diyagramı sırasıyla Şekil 1 ve 2'de verilmiştir.



Şekil 1: Deney düzeneği

Deney düzeneğini oluşturmanın temel amacı eyleyici sistem hakkında veri toplamak için testler yapmaktır. Toplanan bu veriler aracılığıyla bir işbirlikçi robotun eyleyici sistemi için oluşturulan modeller ve eyleyici sistemin parametreleri doğrulanacaktır. Eyleyici sistemde Maxon marka 393023 parça numaralı FDAM eyleyici olarak kullanılmıştır [15]. Bu motor sisteminde 3 adet Hall algılayıcısı ve motor rotorunun arka tarafında rotor pozisyonunu algılayan bir enkoder mevcuttur. FDAM özellikleri Tablo I'de verilmiştir.

Tablo I: Maxon EC 40, 170 Watt FDAM Özellikleri

Maxon Motor Verileri	Değeri	Birimi
Nominal voltaj değerleri		
Nominal Voltaj	24	V
Yüksüz hız	9840	rpm
Yüksüz akım	386	mA
Nominal hız	9120	rpm
Nominal tork	165	mNm
Nominal akım	7.39	A
Anma torku	2660	mNm
Anma akımı	115	A
Maksimum verim	89	%
Özellikler		
Fazlar arası terminal direnci	0.209	Ω
Fazlar arası terminal endüktansı	0.0843	mH
Tork sabiti	23.2	mNm/A
Hız sabiti	412	rpm/V
Hız/Tork değişim ölçüsü	3.71	rpm/mNm
Mekanik zaman sabiti	2.09	ms
Rotor eylemsizlik momenti	53.8	gcm ²
Kutup çifti sayısı	1	-
Faz sayısı	3	-

FDAM'nin ön tarafına Maxon marka 223095 parça numaralı planet dişi eklenmiştir. 3 kademeye ve yüksek aktarım oranına sahip olan bu dişi aktarma organı olarak kullanılmış ve dişlinin özellikleri Tablo II'de verilmiştir.

Tablo II: Maxon GP 52 C, 4–30 Nm Planet Dişli Özellikleri

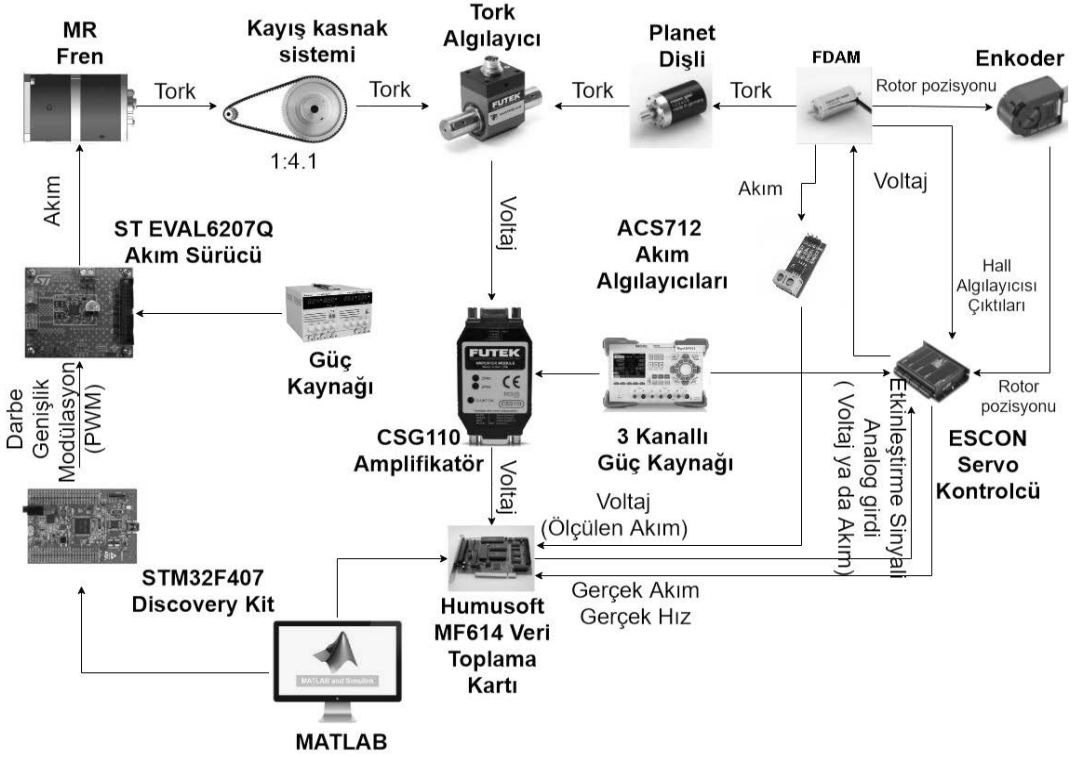
Maxon Dişli Verileri	Değeri	Birimi
Dişli verileri		
Aktarma oranı	113:1	-
Maksimum motor mili çapı	8	mm
Kademe sayısı	3	-
Maksimum devamlı tork	30	Nm
Dişli çıkışındaki maksimum kesikli tork	45	Nm
Maksimum verim	75	%
Yüksüz ortalama geri tepme	1.0	σ
Kütle eylemsizlik momenti	9.3	gcm ²

FDAM'yi sürmek için kullanılan Maxon marka 409510 parça numaralı ESCON 50/5 servo kontrolcü aynı zamanda motora ait bazı özellikleri (motor hızı ve motorun çektiği akım v.b.) anlık olarak çıktı verme özelliğine de sahiptir. Bu servo kontrolcü Hall algılayıcı ve enkoder sinyal kanallarına ek olarak 12-bit çözünürlüklü iki adet analog girdi kanalına sahiptir. Ayrıca, motor parametreleri (motor hızı ve motorun çektiği akım) servo kontrolcüyle birlikte çalışan ESCON Studio yazılımı aracılığıyla ayarlanabilmektedir.

Humusoft MF614 kartı sistemde veri toplama kartı olarak kullanılmıştır. MATLAB yazılımındaki Gerçek Zamanlı Araç Kutusu (İng: Real-Time Windows Target) ile uyumlu çalışabilen bu kart bilgisayara PCI kartı olarak bağlanmıştır. Veri toplama kartının özellikleri Tablo III'te verilmiştir [16].

Sistemde tork algılayıcı bileşeni olarak Futek marka TRS300 kodlu tork sensörü kullanılmıştır. Döner tipte olan çift mil çıkışlı bu tork algılayıcısı, 10 Nm'ye kadar tork değeri ölçülebilen ve 955 Nm/rad burkulma direngenliği değerine sahip bir sensördür. Bu sensör gerinim ölçer teknolojisiinden faydalanmaktadır ve iletişim bileziği aracılığıyla 3000 rpm değerine kadar çalışmaktadır [17].

Futek marka CSG110 kodlu amplifikatör, genel amaçlı bir



Şekil 2: Sistemin akış diyagramı

Tablo III: Humusoft MF614 veri toplama kartı özellikleri

Humusoft MF614 Veri Toplama Kartı Özellikleri
Seçilen 4 farklı girdi aralığında ($\pm 10V$, $\pm 5V$, $0-10V$, $0-5V$) 100 kHz'e kadar 12 bit A/D dönüştürücü
8 kanallı çoklu girdi birleştirici ve örnekleme/tutma devresi
$\pm 10V$ çıktı aralığında 12 bit D/A dönüştürücü
8 bit dijital girdi ve çıktı portları
4 adet dört evreli enkoder ile 5'er adet zamanlayıcı ve sayaç

yükseltici olmasına ek olarak döner tip tork algılayıcısı için bir kalibrasyon aracıdır. Bu yükseltici ilgili uygulamaya göre kullanıcıya çoklu çıktılar sağlar. Çıktı seçenekleri voltaj olarak ± 5 VDC, ± 10 VDC, akım olarak ise 0 – 20 mA, 4 – 20 mA, 0 – 16 mA, 5 – 25 mA şeklindedir. Test düzeneğinde çıktı seçeneği ± 5 VDC olarak belirlenmiştir. CSG110 kodlu amplifikatör 2 mV/V değerindeki sinyali $\pm 5V$ değerinde bir analog sinyale yükseltir. Bu yükseltici aynı zamanda alçak geçiren bir filtreye sahiptir. Tork algılayıcısı, yükseltici üzerinde bulunan Wheatstone köprüsü ve değişebilen dirençlere göre kalibre edilebilmektedir [17].

Deney düzeneğinde yer alan 3 adet ACS712 model akım algılayıcı modül FDAM'nin faz akımlarını doğrulamak için

deney düzeneğinde kullanılmışlardır. Hall etkisi kaynaklı bu doğrusal akım algılayıcıları alternatif ve doğru akımları algılayabilirler. Bu sensörler, bir Hall algılayıcılı devre ile uygulanan akımın meydana getirdiği manyetik alanın iletildiği bakır bir iletim yolundan oluşmaktadır. Algılayıcı içine entegre edilen Hall devreleri akımı algılar ve onu orantılı bir voltaj değerine dönüştürür. 5 A, 20 A, ve 30 A akım değerine kadar ölçüm yapabilen bu algılayıcı modüllerden 5 A kapasiteli olanı her fazda faz sargısına seri olarak bağlanmıştır [18].

DeneySEL testler yük altında sisteme verilen voltaj ya da akım girdi sinyaline göre sırasıyla voltaj ve akım modlarında eyleyici sistemi çalıştırmak için tasarlanmıştır. Böylece motorun çektiği akım, rotor konumu ve hızı gibi birçok bilgi bu testlerden edinilmiştir. Bu bilgilerin akış diyagramı Şekil 2'de gösterilmiş ve bundan sonraki kısımda detaylı olarak anlatılmıştır.

Sistem, ESCON kontrolcünün özelliği olan voltaj ve akım modlarında sürülmüştür. Seçilen moda göre, referans girdi olarak seçilen voltaj ya da akım sunucu bilgisayarda kullanılan MATLAB programı aracılığıyla Humusoft veri toplama kartından servo kontrolcüyü gönderilir. Akım algılayıcılar, ESCON sürücü ve Humusoft veri toplama kartı, eyleyici sistemin üzerindeki akımı ölçmek için testlerde kullanılmıştır. Her iki

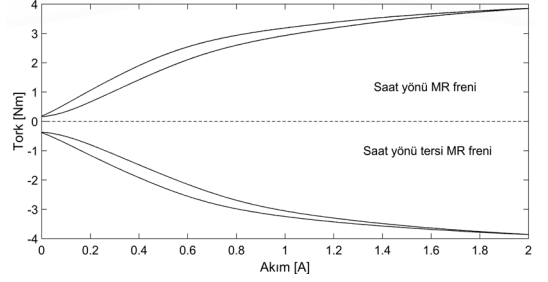
çalışma yönteminde de (voltaj veya akım) Humusoft veri toplama kartından servo kontrolcüye bir dijital etkinleştirme sinyali ve referans girdi olan voltaj ya da akım isteğine göre kalibre edilmiş analog voltaj gönderilmektedir.

Deney düzeneği kurulumunun ilk adımı olarak motor parametreleri ESCON servo kontrolcüye ESCON Studio Başlangıç Sihirbazı aracılığıyla kaydedilmektedir. Planet dişlinin maksimum sürekli hız değeri 6000 rpm olduğu için, motorun maksimum izin verilen hızı bu değer olarak ayarlanmıştır. Dijital artımlı enkoderin çözünürlüğü her dönüş için 500 sayım olarak belirlenmiştir. Hız kontrol modu, durağan akım-direnç kompanzasyonu seçilse de modelde kontrol etkilerinden kaçınmak için kompanzasyon katsayısı sıfırına ayarlanmıştır. Öte yandan her iki çalışma yönteminde iki analog çıktı vardır. Bu çıktılardan biri ölçülen hız değeri olup ± 4 V'luk hız sinyali değeri ± 6000 rpm değeriyle eşleştirilmiştir. Diğer çıktı ise ölçülen akım değeridir ve ± 4 V'luk akım sinyali değeri ± 4 A değeriyle eşleştirilmiştir. Rotor konum bilgisi rotorun arka tarafına eklenen enkoder ile elde edilmektedir. Bu ölçüme göre ESCON servo kontrolcü tarafından motorun hızı hesaplanmaktadır. Motorun hız ve akım ölçümleri kontrolcüde işlenir ve analog kanallar vasıtasıyla veri toplama kartına gönderilmektedir. Bunlara ek olarak, motorun faz sarğı akımları, her faz sarğına seri olarak bağlanan özdeş akım algılayıcıları aracılığıyla ölçülmekte ve ölçülen akımlar kontrolcüde olduğu gibi analog kanallara ile veri toplama kartına gönderilmektedir. Böylece, iki ölçüm tekniği kıyaslanarak mevcut akım değerlerini doğrulama imkanı sağlanmaktadır.

Eyleyici sistemini değişken yükler altında gözlemlemek için ise test düzeneğine bir MRS tabanlı fren eklenmiştir. Söz konusu fren her iki yönde bağımsız şekilde ve kontrol edilebilen değişken seviyelerde direnç torqu uygulayabilen bir yapıya sahiptir. MRS tabanlı fren sisteminin çalışma prensibi manyeto-reolojik sıvının manyetik alan etkisi altında viskozitesinin değişmesine dayanır. Bu özellik sayesinde MRS tabanlı fren sistemi elektrik akımı ile kontrol edilebilen direnç torqu oluşturabilmektedir. Test düzeneğinde kullanılan MRS tabanlı fren sistemi tek yönde direnç torqu oluşturabilen çoklu silindirik yapıya sahip iki adet MRS tabanlı fren den oluşmaktadır. Silindirik frenler güç aktarım miline birbirine ters yönde çalışacak şekilde tek yönlü rulmanlarla yataklanmıştır. Bu sayede fren milinin hareket yönüne bağlı olarak o yöndeki harekete direnç oluşturacak şekilde tek bir MRS freni ile kavrama gerçekleştirilebilmektedir [19]. MRS fren özellikleri Tablo IV'te verilmiştir. Çift yönlü MRS tabanlı frenin akım-tork ilişkisi Şekil 3'te gösterilmiştir.

Tablo IV: MRS tabanlı fren özellikleri

Kategori	Özellikler
Ürün ağırlığı	3.57 kg
Maksimum tork (2 A değerinde)	3.8 Nm
Minimum tork (0 A değerinde)	0.15 - 0.4 Nm
Bant genişliği	63 rad/s
Dış çap	80 mm
Uzunluk	124 mm
Sarğı tel çapı	0.5 mm
Maksimum akım	2 A
Sarğı sayısı	450
Manyeto-reolojik malzeme	MRF-122EG
Manyetik malzeme	AlSi 1008 çeliği
Anti-manyetik malzeme	SS 304, AA 2204



Şekil 3: Çift yönlü MRS tabanlı frenin akım-tork ilişkisi

Fren sisteme 3.84 Nm değerine kadar yük sağlasa da daha önce yapılan ölçümlere göre ve Şekil 3'te görüldüğü gibi ancak 2.5 Nm değerine kadar uygulanan akıma karşı oluşturduğu yük doğrusala yakın değerlerdedir. Doğrusal çalışma aralığı baz alınarak MR fren çıkış miline 4.1 aktarma oranlı bir kayış kasnak sistemi eklenmiş ve eyleyici sisteme direnç gösteren tork değeri yaklaşık 10 Nm mertebesine kadar yükseltilmiştir. Bunun nedeni ise tork algılayıcısının, giriş ve çıkış mili arasında en fazla 10 Nm değerinde bir burulmayı ölçebilmesidir. Kayış kullanılmasıyla dolaylı sisteme esneklik eklenmiştir. Ancak, eyleyici sistemin modellenmesine yönelik testler sırasında, eyleyici sistemin uyguladığı torklar motorun çıkış miline direkt bağlanmış olan tork algılayıcısından ölçüldüğü için söz konusu esneklikle ilgili bozucu etkiler ölçümleri etkilememiştir. ST L6207Q devresi akım sürücü olarak kullanılmıştır ve frenin uyguladığı direnç tork değeri bu şekilde kontrol edilmiştir. Bu akım sürücüsü, sunucu bilgisayardan gelen isteklerin STM32F407 Discovery kartı tarafından işlenerek darbe genişlik modülasyonu (PWM) girdi sinyalleri şeklinde sürücü devreye gönderilmesiyle kontrol edilmektedir. Tork algılayıcısı, geniş çaplı kasnağın çıkış mili ile planet dişlinin çıkış mili arasındaki burulmayı yani tork değerini ölçmektedir. Tork algılayıcısının çıkış voltajı CSG110 amplifikatörü aracılığıyla ± 5 VDC değerine yükseltilmektedir. Amplifikatörün çıktısı veri toplama kartının analog kanalı aracılığıyla sunucu bilgisayarda gözlemlenmiştir.

III. BENZETİM MODELLERİ

Bu kısımda, yük altındaki sistem için önerilen sisteme sağlanan voltaj girdisine göre elde edilen hız çıkışını araştırmak için kullanılan iki farklı benzetim modeli oluşturma tekniğine değinilmiştir. Bu modelleme yöntemleri şöyledir:

- DA motoru eşdeğer modeli
- Kapsamlı FDAM modeli

A. DA Motoru Eşdeğer Modeli

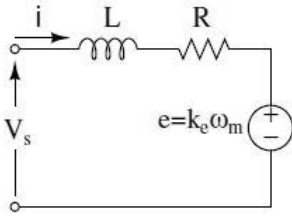
DA motoru eşdeğer modelinde, FDAM'nin 3 fazlı yapısı tek fazlı yapıya indirgenmiştir. Bu nedenle, DA motoru eşdeğer modelinde aşağıda verilen (1)'den (8)'e kadar olan DA motor denklemleri temel alınmıştır. Bir DA motorunun eşdeğer devresi Şekil 4'te verilmiştir. V_s , i , R ve L sırasıyla DA besleme voltajı, armatür akımı, armatür direnci ve armatür endüktansdır. Motora ters elektromotor kuvvet ise e harfi

ile belirtilmiştir. Motor (1) ve (2) numaralı denklemlere göre matematiksel olarak modellenebilir.

$$V_s = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemlerde, T_e , k_f , J , T_L terimleri sırasıyla elektrik motorunun oluşturduğu torku, viskoz sürtünme sabitini, rotor eylemsizlik momentini ve yük torkunu belirtmektedir.



Şekil 4: DC motor eşdeğer devresi

Ters elektromotor kuvvet ve elektrik motorunun oluşturduğu tork sırasıyla (3) ve (4)'teki denklemlerde gösterildiği şekilde elde edilir.

$$e = k_e \omega_m \quad (3)$$

$$T_e = k_t \omega_m \quad (4)$$

k_e ve k_t terimleri sırasıyla motorun ters elektromotor sabiti ile tork sabitini temsil eder. DA motorunu modellemek için (1) ve (2) numaralı denklemler aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenir.

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{k_e}{L}\omega_m + \frac{1}{L}V_s \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{k_t}{J}i - \frac{k_f}{J}\omega_m - \frac{1}{J}T_L \quad (6)$$

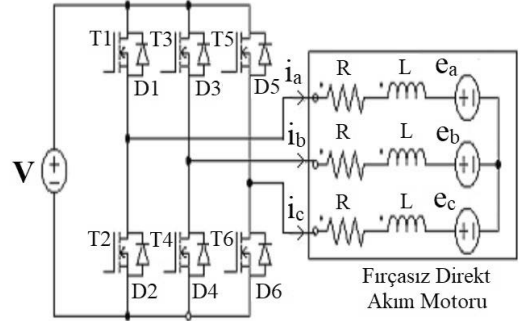
DA motorunun matematiksel modeli durum uzayı yaklaşımıyla (7) ve (8) numaralı denklemlerde olduğu gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} & 0 \\ \frac{k_t}{J} & -\frac{k_f}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ T_L \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_m \\ T_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ k_t & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

B. Kapsamlı FDAM Modeli

Kapsamlı modelde, FDAM'nin 3 fazlı yapısı ve planet dişlisi detaylı olarak modellenmiştir. Bu model akım üretme, ters elektromotor kuvvet üretme, mekanik, komütasyon ve evirici alt sistemlerinden oluşmaktadır. Akım üretme alt sisteminde, faz akımları (9)'dan (11)'e kadar olan denklemlere göre edilmiştir. Motorun hızı (12) ve (16) numaralı denklemlere göre mekanik altsistem içinde belirlenmiştir. Sonrasında ise ters elektromotor kuvveti (13)'ten (15)'e kadar olan denklemlere göre üretilmiştir. Komütasyon ve evirici altsistemlerinde ise faz voltajları (20)'den (22)'ye kadar olan denklemlere ve rotor konum açısına göre belirlenmiştir. FDAM'nin akım komütasyonu için kullanılan 6 adımlı evirici devresi ve FDAM'nin eşdeğer devresi Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5: FDAM eşdeğer devresi

Şekil 5'te sol kısımda görülen T1 ve D1'den T6 ve D6'ya kadar görülen elektronik bileşenler, FDAM'nin sürülmesini sağlayan 6 adımlı evirici devresidir. T ve D ile simgelenen bileşenler sırasıyla mosfetleri ve diyotları temsil etmektedir. i_a , i_b ve i_c faz akımlarını, e_a , e_b ve e_c FDAM'nin ters elektromotor kuvvet voltajlarını, R ve L ise FDAM'nin faz direncini ve endüktansını simgelemektedir. V ise FDAM'ye sağlanan besleme voltajıdır.

3 fazlı FDA motorunun eşdeğer devresinin matematiksel modeli aşağıdaki denklemlere göre elde edilir:

$$V_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{di}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (9)$$

$$V_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{di}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c \quad (10)$$

$$V_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{di}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a \quad (11)$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (12)$$

Denklemlerde a, b, ve c fazları belirtirken, V, i, ve e simgeleri sırasıyla fazlar arası voltajı, faz akımlarını ve faz ters elektromotor kuvvet voltajlarını belirtmektedir. T_e ve T_L ise elektrik motorunun oluşturduğu tork ve yük torkunu ifade etmektedir. R ve L simgeleri sırasıyla faz dirençlerini ve endüktanslarını belirtmektedir. J rotorun eylemsizlik momenti, k_f viskoz sürtünme sabiti ve ω_m rotor hızıdır. Faz ters elektromotor

kuvvet voltajları ve elektrik motorunun oluşturduğu tork şu şekilde yazılır:

$$e_a = \frac{k_e}{2} \omega_m Tr(\theta_e) \quad (13)$$

$$e_b = \frac{k_e}{2} \omega_m Tr(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \quad (14)$$

$$e_c = \frac{k_e}{2} \omega_m Tr(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \quad (15)$$

$$T_e = \frac{k_t}{2} [Tr(\theta_e)i_a + Tr(\theta_e - \frac{2\pi}{3})i_b + Tr(\theta_e - \frac{4\pi}{3})i_c] \quad (16)$$

k_e ve k_t motorun ters elektromotor kuvvet ve tork sabitleridir. θ_e elektriksel açı değeri olmakla beraber rotor açısı ve motor kutup çifti sayısının çarpımı ile elde edilir ($\theta_e = \frac{p}{2}\theta_m$). $Tr(\cdot)$ fonksiyonu ters elektromotor kuvvetin testere dişi biçimli dalgasıdır. Testere dişi biçimli dalganın detaylı formülü şu şekilde yazılır:

$$e_a = \begin{cases} (6E/\pi)\theta_e & 0 < \theta_e < \pi/6 \\ E & \pi/6 < \theta_e < 5\pi/6 \\ -(6E/\pi)\theta_e + 6E & 5\pi/6 < \theta_e < 7\pi/6 \\ -E & 7\pi/6 < \theta_e < 11\pi/6 \\ (6E/\pi)\theta_e - 12E & 11\pi/6 < \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (17)$$

$$e_b = \begin{cases} -E & 0 < \theta_e < \pi/2 \\ (6E/\pi)\theta_e - 4E & \pi/2 < \theta_e < 5\pi/6 \\ E & 5\pi/6 < \theta_e < 9\pi/6 \\ -(6E/\pi)\theta_e + 10E & 9\pi/6 < \theta_e < 11\pi/6 \\ -E & 11\pi/6 < \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (18)$$

$$e_c = \begin{cases} -E & 0 < \theta_e < \pi/6 \\ -(6E/\pi)\theta_e + 2E & \pi/6 < \theta_e < \pi/2 \\ -E & \pi/2 < \theta_e < 7\pi/6 \\ (6E/\pi)\theta_e - 8E & 7\pi/6 < \theta_e < 9\pi/6 \\ E & 9\pi/6 < \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (19)$$

(9)'dan (11)'e kadar olan voltaj denklemleri birbirinin kombi-nasyonu şeklindedir. (20) numaralı denklemde belirtilen akım ilişkisinin yardımıyla voltaj denklemleri (21) ve (22) numaralı denklemlerde görüldüğü gibi 2 denkleme indirgenebilir.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (20)$$

$$V_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{di}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (21)$$

$$V_{bc} = R(i_a + 2i_b) + L \frac{di}{dt}(i_a + 2i_b) + e_b - e_c \quad (22)$$

Buraya kadar ifade edilen denklemler baz alınarak FDAM'nin durum uzay modeli, durum denklemleri olarak (23) numaralı denklem şeklinde ve çıktı denklemleri (24) numaralı denklem şeklinde yazılır.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_t}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ -\frac{1}{3L} & \frac{2}{3L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} - e_{ab} \\ V_{bc} - e_{bc} \\ T_e - T_L \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (24)$$

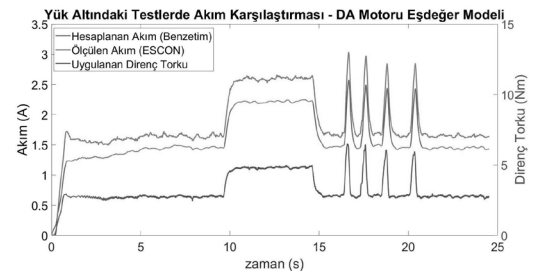
IV. MODEL DOĞRULAMA SONUÇLARI

Önceki bölümde, belirlenen eyleyici sistem için hazırlanan iki benzetim modeli hakkında bilgi verilmişti. Eyleyici sistem benzetim modellerini doğrulamak için bazı testler yapılmıştır. Bu kapsamda, önceden belirlenen sabit voltaj girdisine rampa fonksiyonu ile çıkan bir girdi FDAM için belirlenmiştir. FDAM girdisi sabit voltaj seviyesine ulaştıktan sonra hem MRS tabanlı fren ile hem de fren ile tork algılayıcısı arasındaki kaplin kısa zaman aralıklarında tutulup serbest bırakılarak FDAM'nin hareketine karşı direnç torku uygulanmış ve sistemin yük altında çalışması sağlanmıştır. Kaplinin tutularak yük uygulanmasının sebebi insan robot etkileşiminde gerçekleştirilecek olası yük etkilerini benzetime dahil etmektir.

Deneylerde eyleyici sistemin çektiği akım, servo kontrolcü ve ayrıca motor sargılarına seri olarak bağlanan akım algılayıcıları ile elde edilmiştir. Buna ek olarak motorun çıkış milinin hızı servo kontrolcü tarafından hesaplanarak kayıt altına alınmıştır. Sisteme uygulanan girdiler ile deneysel sonuçlar kaydedilmiş ve aynı girdiler benzetim modellerine verilerek deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar, ilerleyen kısımlarda paylaşılmıştır.

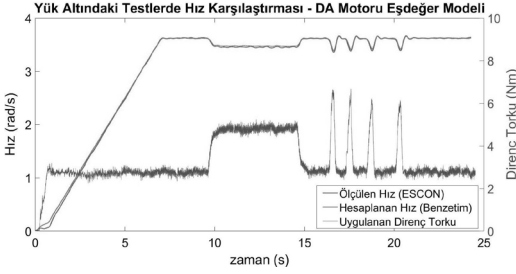
A. DA Motoru Eşdeğer Modeli Test Sonuçları

Benzetim çalışmaları, Matlab 9.1 (R2018A) ve Simulink programında *ode4(Runge - Kutta)* çözücüsü kullanılarak 0.001 saniyelik adımlarla gerçekleştirilmiştir. Benzetim çıktılarında uygulanan direnç torkuna göre akım ve hız değerlerinin değişimi incelenmiştir. Aynı girdi için deneysel ve benzetim testlerinde elde edilen akım değişimleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Sisteme uygulanan ve tork algılayıcısı aracılığıyla ölçülen direnç torku Şekil 6'da sağ tarafta yer alan y-ekseninde gösterilmiştir. Sisteme uygulanan voltaj girdi sinyali yerine direnç torkunun verilme sebebi, hız ve akım değişimlerinin direkt olarak direnç torkuyla alakalı olmasından kaynaklanmaktadır. MRS tabanlı fren aracılığıyla direnç torku sisteme 9. ve 15. saniyeler arasında, ve kaplin tutularak ise 15. saniyeden sonra 4 kere direnç torku uygulanmıştır. Bu süreçler haricinde gözlemlenen akım değeri, MRS tabanlı frenin boşta ki sürtünme karakteristiğinden kaynaklanmaktadır. Servo kontrolcünün akım ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları arasındaki hatalarının karesinin ortalamasının karekökü (RMSE) 0.2737 A mertebesindedir. Bu hata büyük ölçüde servo kontrolcünün akım sinyal değerinin ortalama değerini vermesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6: DA motoru eşdeğer modeli yüklü test akım sonuçları

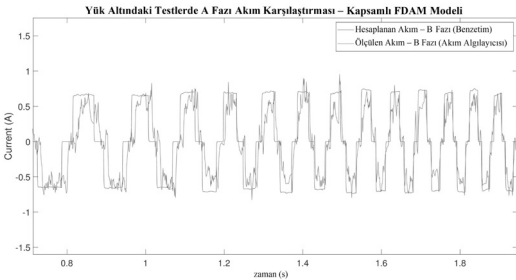
Yük altında yapılan deneysel testler ile benzetim testleri sonucunda elde edilen hız çıktıların karşılaştırması Şekil 7'de gösterilmiştir. İstemli olarak sisteme uygulanan direnç torkuna ek olarak benzetim modeline verilse de, sistemin dinamiğinden kaynaklı bir gecikme geçici rejim tepkisi kısmında gecikmeye neden olmuştur. Öte yandan, uygulanan torktaki değişime bağlı olarak görülen sistem hızındaki değişimler birbirine benzerlik içermektedir. Servo kontrolcü aracılığıyla ölçülen hız sonuçları ile benzetim sonuçları arasındaki hatalarının karesinin ortalamasının karekökü (RMSE) 0.0249 rad/s mertebesindedir.



Şekil 7: DA motoru eşdeğer modeli yüklü test hız sonuçları

B. Kapsamlı FDAM Modeli Test Sonuçları

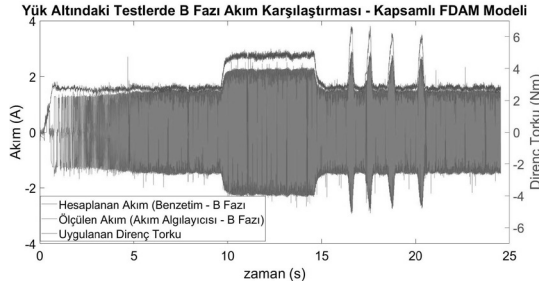
Kapsamlı FDAM modeli benzetim çalışmaları, Matlab 9.1 (R2018A) ve Simulink programında *ode4(Runge – Kutta)* çözücü kullanılarak 0.000001 saniyelik adımlarla gerçekleştirilmiştir. Aynı deney girdileri bu benzetim testinde de aynı şekilde kullanılmıştır. Yapılan testlerde elde edilen akım değişimleri Şekil 8 ve 9'da gösterilmiştir. Şekil 8'de A fazı sarısında, akım algılayıcısı ile ölçülen ve benzetim sonuçlarıyla elde edilen akım değerleri karşılaştırılmıştır ve bu akımların aynı fazda oldukları tespit edilmiştir. Eyleyici sisteme uygulanan direnç torkuna karşı deneylerde ve benzetim testlerinde elde edilen akım değişimleri B fazı sarğısı için Şekil 9'da verilmiştir. Motorun tüm faz sarğıları için elde edilen test ve benzetim sonuçları Şekil 10'da görülmektedir.



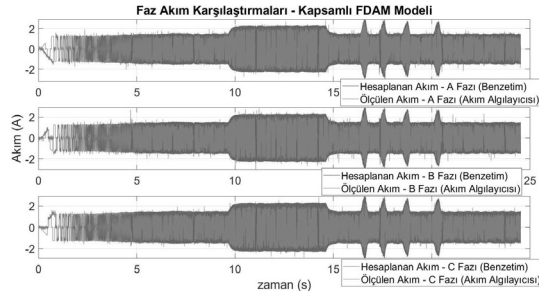
Şekil 8: Kapsamlı FDAM modeli yüklü testte motor A sarğısı aynı fazlı akım sonuçları

Yük altında yapılan deneysel testler ile benzetim testleri sonucunda elde edilen motor hızlarının karşılaştırması Şekil

11'de gösterilmiştir. İstemli olarak sisteme uygulanan direnç torkuna ek olarak eyleyici sistemin sabit bir yüke sahip olduğu Şekil 11'de de görülmektedir. Tüm bu yüklerin toplamı tork girdisi olarak benzetim modeline verilse de, sistemin dinamiğinden kaynaklı bir gecikme geçici rejim tepkisi kısmında gecikmeye neden olmuştur. Öte yandan, uygulanan torktaki değişime bağlı olarak görülen sistem hızındaki değişimler birbirine benzerlik içermektedir. Servo kontrolcü aracılığıyla ölçülen hız sonuçları ile benzetim sonuçları arasındaki hatalarının karesinin ortalamasının karekökü (RMSE) 0.0217 rad/s mertebesindedir. Bu modelleme yöntemiyle indirgenmiş modele göre hızlar açısından daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir.



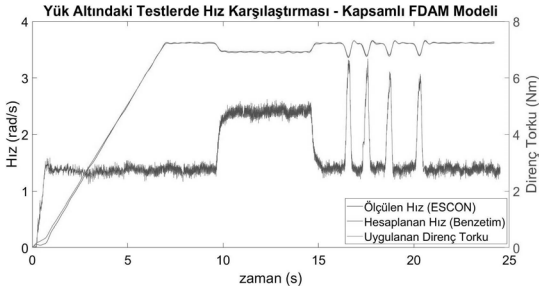
Şekil 9: Kapsamlı FDAM modeli yüklü testte motor B fazı akım sonuçları



Şekil 10: Kapsamlı FDAM model yüklü testlerde tüm fazların akım sonuçları

V. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada hafif işbirlikçi robotlarda kullanılacak bir eyleyici sistemin modelinin doğrulanması amacıyla geliştirilmiş bir test düzeneği tanıtılmıştır. Test düzeneğinin eyleyici sisteme uygulanacak değişken yükleri uygulayabilmesi beklenmektedir. Bilimsel yazın incelendiğinde, sisteme çeşitli yük sağlama yöntemlerine rastlanılmıştır ancak MRS tabanlı bir fren sistemine rastlanılmamıştır. Çalışmada kullanılan MRS tabanlı fren her ne kadar fren çift yönlü olarak yük sağlama işini görsün de, büyük çaplı kasnağın kışık mili ile tork algılayıcısının milini bağlayan kaplinin elle tutulup bırakılması vasıtasıyla sisteme direnç torku uygulanmıştır. Böylece, olası



Şekil 11: Kapsamlı FDAM modeli yüklü testlerde hız sonuçları

insan-robot etkileşimini yansıtacak istemsiz yüklerin benzetimi de yapılmıştır.

Eyleyici sistemi analiz etmek için iki benzetim modeli kullanılmıştır. Bir test prosedürü belirlenmiş ve sisteme yük uygulanarak bu test deney düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sisteme verilen girdiler ve sistemin ölçülen çıktıları kaydedilip aynı girdiler benzetim modellerine verilmiş ve benzetim sonuçlarıyla ölçüm sonuçları karşılaştırılarak model doğrulaması çalışması yapılmıştır.

Önceden değinildiği üzere testler, değişken yük altında yapılmıştır. DA eşdeğer motor modelinin akım sonuçları incelendiğinde ölçüm sonuçları ve benzetim testi sonuçları arasında farklar olduğu görülmektedir. Bu farklar, servo kontrolcünün akım sinyalinin ortalama değerini vermesinden kaynaklanmaktadır. Kapsamlı FDAM modelinde ise motorun besleme kabloları üzerine yerleştirilen akım algılayıcı ölçümleri ile benzetim sonuçları birbirine yakındır. Eyleyici sistemin hız çıktıları incelendiğinde iki modelin de değişken yük altındaki hız karakteristikleri birbirine benzerdir. Buna karşın, iki modelin hızlarının hatalarının karesinin ortalamasının karekök (RMSE) değerleri karşılaştırıldığında bu değer in kapsamlı FDAM modelinde daha az olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak bir çıkarım yapmak gerekirse her iki modelin de kendilerine göre tercih edilebilir yanları mevcuttur. DA motoru eşdeğer modeli, indirgenmiş bir model olup uygulaması kolay ve az zaman olan bir yöntemdir. Öte yandan, kapsamlı FDAM modeli, isminden de anlaşılacağı üzere 3-fazlı FDAM'nin detaylı modellenmesini içermektedir. Bu benzetim modeli, deneysel ölçümlere en yakın sonuçları vermesinin yanında sistem hakkında ek bilgileri de (faz akımları ve statorun ters elektromotor kuvvet voltajları v.b.) sağlamaktadır. Test düzeneğine açısından, bu tarz eyleyici sistem doğrulama test düzeneklerinde daha önce değişken yük sağlamak için kullanılmamış bir sistem olan MRS tabanlı fren kullanılarak yazına yeni bir yöntem sunulmuştur. Bir diğer önemli nokta ise, MRS tabanlı fren eyleyici sistemin modelinin doğrulanmasında kullanıldığı gibi bir eyleyici sistem kullanılarak da aynı test düzeneği ile yeni bir MRS tabanlı frenin modelinin doğrulanması gerçekleştirilebilir. Bunlara ek olarak, bu çalışmada elde edilen modeller sayesinde gelecek çalışmalarda, insan-robot etkileşimi senaryolarında kullanılabilecek uyumlu bir denetleyici tasarımı yapılması hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] S.M. Ramesh Balaji and C. Muniraj, "Implementation of PI Controller for 3Phi BLDCM Drive Using FPGA," Int. J. Rec. Emb. Sys (IJRES), vol. 4, No. 1, pp. 42-54, March 2015.
- [2] C. M. Pawel, D. Ignacy, and P. Marcin, "Laboratory tests of a PM-BLDC motor drive," Sel. Prob. of Elec. Eng. Elec. (WZEE), pp. 1-6, September 2015.
- [3] A. V. den Bossche, D. V. Bozalakov, T. Vyncke, and V. C. Valchev, "Programmable Logic Device Based Brushless DC Motor Control," Proc. 14th Eur. Conf. Pow. Elec. App., 1-10, August 2011.
- [4] S. Chen and C. Kuo, "Design and implementation of double-integral sliding-mode controller for brushless direct current motor speed control," Sage J. Adv. Mech. Eng., vol. 9, pp. 11, 2011.
- [5] W. Abed, S. Sharma, R. Sutton, and A. Motwani, "A Robust Bearing Fault Detection and Diagnosis Technique for Brushless DC Motors Under Non-stationary Operating Conditions," J. Cont., Auto. Elec. Sys., vol. 26, pp. 241-254, June 2015.
- [6] E. Çelik and N. Öztürk, "Attenuating saturated-regulator operation effect of brushless DC motors through genetic-based fuzzy logic estimator," Turkish J. Elec. Comp. Sci., vol. 26, pp. 3208-3224, November 2017.
- [7] Ö. Üstün, Ö. C. Kivanc, S. Senol, and B. Fincan, "On Field Weakening Performance of a Brushless Direct Current Motor with Higher Winding Inductance: Why Does Design Matter?," Energies J., vol. 11, pp. 3119, November 2018.
- [8] M. V. Ramesh , J. Amarnath, S. Kamakshiah, B. Jawaharlal, and G. S. Rao, "Speed Torque characteristics of Brushless DC motor in either direction on load using ARM controller," Book: ISGT2011-India, pp. 217-222, December 2011.
- [9] H. Erdal and B. Doğan, "DC Motor Parametrelerinin Deney Tabanlı Belirlenmesi ve Parametre Belirleme Sonuçlarının İyileştirilmesi," J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ., vol. 3, pp. 589-598, 2012.
- [10] Y. Bektaş and N. F. O. Serteller, "Brushless direct current (BLDC) motor driving experimental set," J. Energy Edu. Sci. Tech. Part A: Energy Sci. Res., vol. 2011, pp. 455-466, February 2011.
- [11] A. Kurdoglu, "Brushless DC Motor Speed Control Circuit Design," MSc Thesis 2007.
- [12] A. S. Çabuk, Ş. Sağlam, and Ö. Üstün, "Impact of Various Slot-Pole Combinations on an In-Wheel BLDC Motor Performance," Electrica J., vol. 17, pp. 3369-3375, June 2017.
- [13] O. Mohammed, "A Study of Control Systems for Brushless DC Motors," MSc Thesis, 2014.
- [14] M. Yılmaz, "Analysis and Modeling of an Actuation System to be used in Light-weight Collaborative Robots," MSc Thesis, 2019.
- [15] "Maxon Motor Catalog, Maxon Motor AG Product Catalog website - <https://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog/>," 2019.
- [16] "Humusoft website - <https://www.humusoft.cz/datacq/>," 2019.
- [17] "Futek website - <http://www.futek.com/index.aspx>," 2019.
- [18] "Allegro MicroSystems, LLC - <https://www.allegromicro.com/>," 2019.
- [19] M. G. Karabulut and M. İ. C. Dede, "Design and experimental validation of an MR-fluid based brake for use in haptics," Actuator 2018, 16th Int. Conf. on New Act., pp. 1-5, June 2018.

Holonomik Robot ile Dar Alanlarda Gezinim Holonomic Robot Navigation in Narrow Spaces

Fatih BAYGÜL
Polonom Teknoloji Sanayi ve Ticaret A.Ş.,
İstanbul, Türkiye
fatih.baygul@polonom.com

Erkan USLU, Furkan ÇAKMAK, Nihal ALTUNTAŞ,
M. Fatih AMASYALI, Sırma YAVUZ
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,
Yıldız Teknik Üniversitesi,
İstanbul, Türkiye
{euslu, fcakmak, nihaltun, amasyali, smyavuz}@yildiz.edu.tr

Özetçe —Çalışmanın amacı ROS işletim sistemi bulunduran holonomik sürüş dinamiğine sahip bir robotun dar alanlarda otonom navigasyonunu sağlayacak sistemi geliştirmektir. Çalışma kapsamında literatür araştırmaları yapılmış ve holonomik navigasyon ve engel kaçınımı paketlerine rastlanmıştır. Fakat mekanum teker ile navigasyon yapan bir pakete ve aynı anda dar alanlarda holonomik navigasyon yapan bir metod olmadığı görülmüştür. Bu çalışmanın avantajları holonomik bir robot ile daha serbest hareket edebilmek ve aynı anda dar alanlarda holonomik navigasyon yapabilmektir.

Anahtar Kelimeler—Holonomik sürüş, mekanum teker, navigasyon, dar alan, engel kaçınımı

Abstract—The main purpose of this study is to develop a ROS compatible system that will enable a holonomic robot to navigate in narrow spaces. In addition the robot can generate 2D map of the environment simultaneously while navigating. Literature review reveals several holonomic navigation packages and obstacles avoidance packages. Implementation of holonomic navigation in narrow space with use of mecanum wheels is rarely studied. The advantage of this study is to make more flexible movements by increasing the degree of freedom by using a holonomic robot and navigation in narrow spaces at same time.

Keywords—Holonomic drive, mecanum wheel, navigation, narrow spaces, obstacle avoidance

I. GİRİŞ

Günümüzde otonom mobil robotlar tüketici elektroniği, ev kullanımı, fabrikalar ve askeri alan gibi geniş bir yelpazede kullanım bulmaktadır. Bu alanlarda kullanılan robotlar genelde holonomik olmayan (skid-steering, ackerman, diferansiyel sürüş vb.) sürüş dinamiklerine sahiptirler. Kısıtlı hareket kabiliyeti dolayısıyla bu robotların dar alanlarda kullanımı mümkün olmamaktadır. Bir robot için kontrol edilebilir serbestlik derecesi, toplam serbestlik derecesine eşit ise bu tür robotlar holonomik robotlar olarak isimlendirilmektedir.

Çalışma ile holonomik bir robot platformu için dar alanlarda gezinim sağlayabilecek kinematik çözüm içeren ROS uyumlu bir gezinim paketi geliştirilmiştir. Kullanılan mekanik platform hareketini 4 adet mekanum tekerlekle sağlamaktadır.

Otonom gezinim ile birlikte platform üzerinde 2B Eşanlı Haritalama ve Konum Belirleme (SLAM)'de çalıştırılarak,

ortama ilişkin bir ön bilginin olmadığı durumlarda da otonom gezinim yapılabilmesi sağlanmıştır.

Literatürde engel kaçınımı ile ilgili çalışmalar incelendiğinde Artificial Potential Field (APF) [1], Dynamic Window Approach [2], Curvature Velocity (CV) [3], Velocity Obstacles [4], Nearness-Diagram Navigation (ND) [5] ve Smooth Closest Gap (SCG) [6] metodlarının kullanıldığı görülmüştür. Verilen metodlar arasında Smooth Closest Gap (SCG) yöntemini dar alanlarda çalışmak üzere geliştirilmiş bir engel kaçınımı yöntemidir.

SCG yöntemi En Yakın Boşluk (Closest Gap-CG) yönteminden hareketle geliştirilmiştir. Bu yöntemde engel kaçınımı seçilen boşluk ve robot konumu arasındaki engellerin yerleşimine göre, her bir engelin etkisi eşanlı hesaplanarak yapılmaktadır. SCG yöntemi ayrıca hedef kafa açısını da dikkate alarak gereksiz boş alanların seçimini azaltmaktadır.

Yerel gezinim yöntemleri olan Base Local Planner [7], DWA(Dynamic Window Approach) Local Planner [8], EBAND Local Planner [9] ve TEB Local Planner [10] yöntemleri ise holonomik robotlar için uygun olsa da dikdörtgen şekilli bir robotun kısa kenarının uzunluğu olarak tanımlanan dar alanlarda gezinimi hedeflememektedir. EBAND yöntemi yerel yolun iç ve dış kuvvetler etkisi ile oluşturulmasına dayanır. Ayrık yol ara hedef noktaları ve bunlar etrafındaki boşlukları ifade eden baloncuklar ile gerçekleşir. TEB yöntemi ise temelde araba benzeri sürüş dinamiğine sahip mobil platform verilen hedefe en kısa sürüde ulaşabilmesini sağlayacak en iyileme adımları içerir.

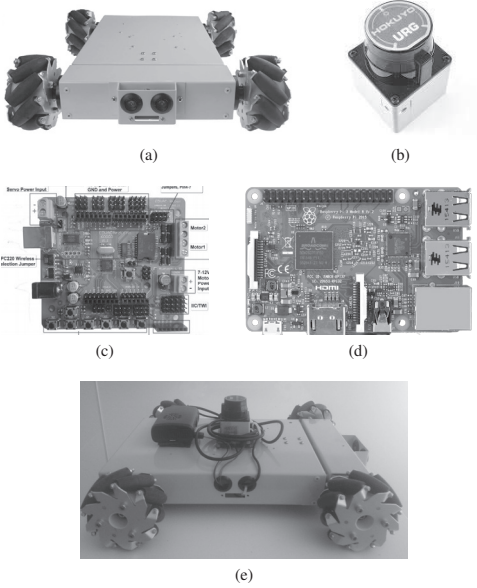
Çalışma ile gömülü bir sistem üzerinde ROS uyumlu olarak SLAM ile birlikte holonomik bir robot platformu için dar alanlarda gezinim yapılabilmesi sağlanmıştır. Bildiride Bölüm II ile sistem tasarımı; platform donanım özellikleri, sürüş dinamiği ve yazılım özellikleri verilmiştir. Bölüm III ile gerçekleştirilen SLAM, global gezinim ve yerel gezinim açıklanmıştır. Bölüm IV ile uygulama sonuçlarına yer verilmiştir. Bölüm V ile de çalışmanın sonuçları değerlendirilmiştir.

II. SİSTEM TASARIMI

A. Robot Platformu

Çalışma kapsamında 4 teker sürürlü, mekanum tekerlekli, Arduino uyumlu robotik platform¹ modifiye edilerek kul-

¹ <https://tinyurl.com/y85m9n2>



Şekil 1. Robot Platformu: a) 4 Teker Sürüşlü Mekanum Tekerlekli Mobil Robot, b) Hokuyo URG-04LX-UG01 Lazer Mesafe Sensörü, c) Arduino Kontrol Kartı, d) Rapsberry Pi 3, e) Bağlantılar ve Yerleşim

lanılmıştır. Şekil 1a çalışmada kullanılan mekanik platformu göstermektedir.

Platform üzerinde 100mm alüminyum mekanum tekerlekleri, optik enkoderli Faulhaber 12V motorları, uygun motor sürücü ve kontrol kartlarını barındırmaktadır. Çalışma kapsamında Arduino kontrol yazılımı ROS ile uyumlaştırılmış ve holonomik bir robotun tüm hareket kabiliyetini içerecek şekilde yeniden düzenlenmiştir.

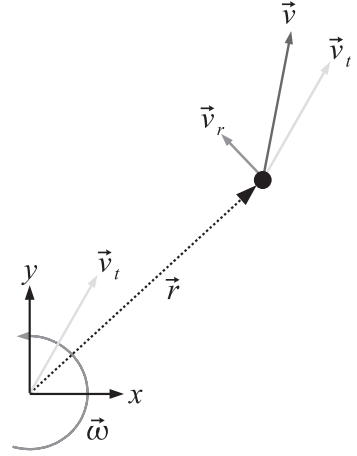
Robot platformu üzerinde Hokuyo URG-04LX-UG01 model lazer mesafe sensörü kullanılmıştır. Sensör 20mm ile 5600mm arasındaki (1mm çözünürlükte) uzaklık değerlerine ilişkin 240° ’lik (0.36° açısal çözünürlükte) ölçüm yapabilmektedir. Kullanılan lazer mesafe sensörü Şekil 1b ile verilmektedir.

Düşük seviyede hız ve hareket kontrolü için ATmega328 mikrodenetleyicisi temelli bir arduino kart kullanılmıştır. Kart üzerindeki 2 adet ve harici olarak 2 adet daha motor sürücü kullanılarak 4 teker sürüş elde edilmiştir. Kullanılan Arduino kontrol kartı Şekil 1c ile verilmektedir.

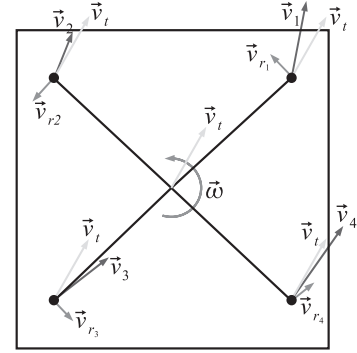
Yüksek seviye kontrol, haritalama, konum belirleme, gezinim, engel kaçınımı, sensör okuma, düşük seviye kontrol kartı ile haberleşme işlerinde ise ARM temelli bir işlemciye sahip olan Raspberry Pi 3 gömülü kartı kullanılmıştır. Şekil 1d ile kullanılan gömülü karta yer verilmiştir.

B. Sürüş Dinamikleri

4 teker sürüşlü mekanum tekerlekli bir robotik platform yerine getirebileceği hareketler Şekil 3e ile verilmektedir. Robotik platform X ve Y eksenlerinde doğrusal hızlar



(a)



(b)

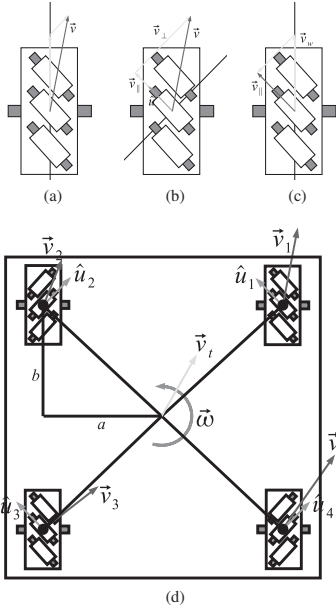
Şekil 2. Gövde Hızından Tekerlek Hızına Geçiş: a) Tek Tekerlek Çizgisel Hızına Geçiş, b) Tüm Tekerlek Çizgisel Hızlarına Geçiş

oluşturarak herhangi bir doğrultuda hareket edebilmekte ve teker hızlarını uygun şekilde ayarlayarak dönüş hareketi yapabilmektedir. Dönüş hareketi için merkez olarak orta nokta, herhangi bir teker veya kenar ortası verilebilmektedir.

Genel bir mobil platformun gövde doğrusal ve açısal hızlarından hareketle tekerlek çizgisel hızlarının hesabı Şekil 2a ile verilmiştir. $\vec{v}_t$ doğrusal gövde hızı, $\vec{\omega}$ gövde açısal hızını göstermek üzere, mobil platformun merkezinden $\vec{r}$ uzaklığındaki tekerlek için çizgisel hızı $\vec{v}$ Denklem 1 ile verilmektedir [11].

$$\begin{aligned}\vec{v}_r &= \omega \times \vec{r} \\ \vec{v} &= \vec{v}_t + \vec{v}_r\end{aligned}\quad (1)$$

Bir tekerlek için hesaplanan $\vec{v}$ çizgisel hızından hareketle ana ve yardımcı tekerlekler için paralel yönlü çizgisel hızlar hesaplanabilir (Şekil 3). Burada $\vec{v}_\perp$ yardımcı tekerlek eksenine dik yöndeki çizgisel hızı, $\vec{v}_\parallel$ ise eksene paralel yöndeki

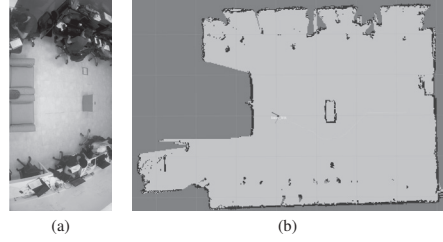


Şekil 3. Mekanum Tekerlekli Holonomik Robot Kinematığı: a) Gövde Hızlarına Göre Ana Teker Hızı, b) Yardımcı Teker Paralel Çizgisel Hızı, c) Aa Teker Paralel Çizgisel Hızı, d) Tekerlek Konfigürasyonu ve Yardımcı Teker Paralel Yön Bim vektörleri, e) 4 Teker Sürüşlü Mekanum Tekerlekli Mobil Robotun Sürüş Dinamikleri

çizgisel hızı ifade etmektedir. $\hat{u}$ yardımcı tekerlek eksenine paralel yöndeki birim vektörü, $\vec{v}_\omega$ ise ana tekerlek çizgisel hızını belirtmektedir. Ana ve yardımcı tekerlekler 45 derece açıyla yerleştirilmiş olduklarından bu değerler arasındaki ilişki Denklem 2 ile verilebilir.

$$\begin{aligned} |\vec{v}_\parallel| &= \vec{v} \cdot \hat{u} \\ &= -\frac{1}{\sqrt{2}}\vec{v}_x + \frac{1}{\sqrt{2}}\vec{v}_y \\ |\vec{v}_\omega| &= \frac{|\vec{v}_\parallel|}{\cos 45^\circ} \\ &= -\vec{v}_x + \vec{v}_y \end{aligned} \quad (2)$$

Her ana tekerlek için yardımcı teker eksenini farklı yönde



Şekil 4. a) Otonom Gezinim Test Ortamı, b) SLAM Sonucu

olduğundan $\hat{u}$ birim vektörleri her tekerlek için farklıdır. Bu durumda Ana tekerleklerin yere değdiği noktalardaki çizgisel hızları, tekerlerin gövde merkezinden yataydaki (a) ve dikeydeki (b) mesafeleri cinsinden Denklem 3 ile verilebilir.

$$\begin{aligned} |\vec{v}_{\omega 1}| &= \vec{v}_{t_y} - \vec{v}_{t_x} + \omega(a+b) \\ |\vec{v}_{\omega 2}| &= \vec{v}_{t_y} + \vec{v}_{t_x} - \omega(a+b) \\ |\vec{v}_{\omega 3}| &= \vec{v}_{t_y} - \vec{v}_{t_x} - \omega(a+b) \\ |\vec{v}_{\omega 4}| &= \vec{v}_{t_y} + \vec{v}_{t_x} + \omega(a+b) \end{aligned} \quad (3)$$

Gövde doğrusal ve açısal hızlarından hareketle Denklem 3 ile hesaplanan tekerlek çizgisel hızlarının düşük seviye kontrolü Arduino, motor sürücüler ve enkoderler ile sağlanmıştır.

C. Yazılım

Çalışma gömülü bir sistemde ROS uyumlu olarak geliştirilmiştir. Bu sebeple gömülü kart üzerinde uygun Ubuntu Linux işletim sistemine ROS kurularak çalıştırılmıştır. ROS gerçek bir işletim sistemi olmayıp paket yönetimi, donanım soyutlama, düşük seviye cihaz kontrolü, dağıtık programlama, prosesler arası veri aktarımı ve çeşitli uygulamalar ile birlikte sunulan bir çerçeve sağlamaktadır.

III. METODLAR

A. Eşanlı Haritalama ve Konum Belirleme

SLAM yöntemi olarak GMapping yönteminin optimizasyon ve kayıtlama adımları iyileştirilmiş bir versiyonu kullanılmaktadır [12]. Yöntem ile bahsi geçen adımlar farklı thread'lere ayrılmış olup, başlangıç konumlarına kabaca bilinen çoklu robot haritalama için yöntem genişletilmiştir. Optimizasyon adımının daha hızlı yakınsayabilmesi için ise arama uzayının başlangıç Laser Scan Matcher yöntemi ile belirlenmiştir. Holonomik robot platformunun otonom gezinim sırasında oluşturduğu test ortamı haritası ile test ortamı Şekil 4 ile verilmektedir.

B. Gezinim

Mobil platformun gezinimi için ROS Gezinim Yığını alt yapısı kullanılmıştır [13].

1) *Global Planlayıcı*: Global planlayıcı robot başlangıç konumunu, hedef noktayı ve harita bilgisini girdi olarak kabul ederek başlangıçtan hedefe gezilebilir yol hesaplamaktadır. Uygulamada global planlayıcı olarak Dijkstra algoritması [14] kullanan Navfn [15] global planlayıcı kullanılmıştır.

2) *Yerel Planlayıcı*: Çalışmanın temel konusu yerel planlamadır. Yerel planlama kendi içerisinde yol takibi, engel kaçınımı, kinematik çözümleme alt problemlerinin eşanlı çözümünü gerektirmektedir. Yerel planlayıcı ROS Gezinim Yığını ile uyumlu olacak şekilde bir eklenti (plug-in) olarak gerçekleştirilmiştir. ROS yerel planlayıcı eklentisi SetPlan, ComputeVelocityCommand ve IsGoalReached sanal fonksiyonlarını gerçekleştirmeyi gerektirir. Yerel planlayıcıya ilişkin akış Algoritma 1 ile verilmiştir.

Algoritma 1 ile ilgili bazı önemli adımları şöyle özetlenebilir:

Algoritma 1 girdiler olarak Navfn Global planner'dan global plan, ROS Gezinim Yığını alt yapısı tarafından hesaplanan yerel maliyet haritası ve dışarıdan parametrik olarak verilen robot boyutları, varış hata payları ve varış açısız düzeltme hızı verilerini almaktadır.

Algoritma 1 çıktıları olarak robot doğrusal x , robot doğrusal y ve robot açısız z hızlarını üretmektedir.

Algoritma 1 satır 6 ile verilen isGlobalGoalReached() fonksiyonu, global hedefe ulaşıp ulaşılmadığını kontrol eder ve hedefe ulaşılan kadar robot doğrusal x , robot doğrusal y ve robot açısız z hızları üretilir. Algoritmada global plan daha küçük parçaya yerel hedeflere bölünmüştür ve satır 8'de isLocalGoalReached() fonksiyonu ile robotun lokal hedefe ulaştığı kontrol edilir eğer ulaşılmış ise bir sonraki lokal hedefe geçilir. Yerel planlayıcı algoritması robotun az miktarda dönüş hareketi ile hareket etmesini hedeflemektedir. Bu yüzden ilk olarak robot x ve y konumlarına ulaşılan kadar yalnızca doğrusal x ve y hızları üretilmektedir. Satır 15-18 robotun x ve y doğrusal hız üretim formülleri verilmiştir. Satır 29 ile robotun x ve y konumlarına ulaştığı fakat açısız olarak hedefe ulaşmadığı durum kontrol edilmektedir. Bu durumda GoalFaceYawError() fonksiyonu ile hesaplanan goalFaceError değeri satır 30 ile verildiği gibi robotun hedefe döneceği en yakın yönü tespit eder ve satır 31 ve satır 33 ile verildiği gibi robot açısız z hızları üretilir.

Algoritmada geliştirilen diğer bir özellik olan dar alan özelliği satır 19 ile verilen checkRobotNarrowSpace() fonksiyonu, robotun gideceği bir sonraki hedefte robotun engel alanı içerisinde olup olmadığı kontrol edilir ve robot bu alandan kurtarılan kadar x ve y doğrusal hızları sıfırlanır ve yalnızca z açısız hızı ile robot dar alandan geçebilecek pozisyona getirilir.

Temel olarak yerel planlayıcı üç görevi yerine getirmektedir. Bu görevler: birincisi hedef noktasına başlangıç kafa açısı ile ilerleme (Şekil 5a), ikincisi hedefe ulaşıldığında kafa açısının hedef kafa açısına döndürülmesi (Şekil 5b) ve üçüncüsü ise lazer mesafe sensöründen faydalanarak ileri bakış mantığında dar alanların tespit edilerek uygun gezinim hareketinin yerine getirilmesidir.

IV. DENEYSEL SONUÇLAR

Kullanılan mobil holonomik platforma ilişkin bağlantılar ve yerleşim Şekil 1e ile verilmiştir. Holonomik robot üzerindeki gömülü kart yardımı ile sensör okuma, SLAM, global planlama ve yerel planlama üst seviye görevleri yerine getirebilmektedir. Platform haritalama, konum belirleme, gezinim görevlerini verilen bir hedef nokta için otonom olarak yerine getirebilmektedir. Mobil platformun dar bir alan için otonom gezinim

Algoritma 1: Holonomik Robot Yerel Planlayıcısı

Girdi: Robot Pozisyonu: *robotPose*

Yerel Maliyet Haritası: *localCostMap*

Global Plan: *globalPlan*

Robot Boyutları: *robotLength*

Varış Hata Payları: *goalFaceTolerance*

Varış Açısız Düzeltme Hızı: *velTheta*

Çıktı: Robot Doğrusal X Hızı: *cmdVelX*

Robot Doğrusal Y Hızı: *cmdVelY*

Robot Açısız Z Hızı: *cmdVelZ*

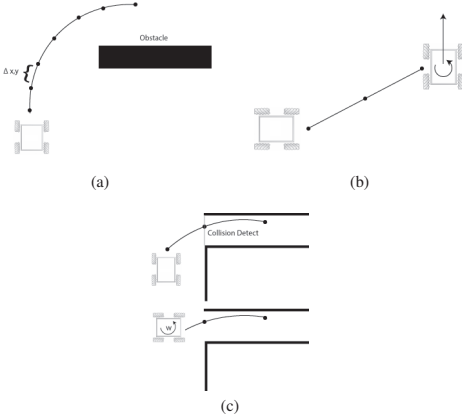
```

1 function holonomicLocalPlanner;
2 currentGoalIndex = 0
3 goalIndex = globalPlan.size() - 1
4 goalPose = getGoalPose()
5 goalFaceError = GoalFaceYawError()
6 while !isGlobalGoalReached() do
7     if !xyGoalReached() then
8         if isLocalGoalReached() then
9             | currentGoalIndex += 1
10        end
11        nextLocalGoal =
12            | globalPlan[currentGoalIndex]
13        if checkCollision(nextLocalGoal) then
14            | "There is a collision ahead"
15        end
16        linX = goalPose.x - robotPose.x
17        linY = goalPose.y - robotPose.y
18        cmdVelX = cos(robotPose.z) × linX +
19            | sin(robotPose.z) × linY
20        cmdVelY = -sin(robotPose.z) × linX +
21            | cos(robotPose.z) × linY
22        if checkRobotNarrowSpace() then
23            | cmdVelX = 0
24            | cmdVelY = 0
25        end
26        if goalFaceError > 0 then
27            | cmdVelZ = velTheta
28        else
29            | cmdVelZ = -velTheta
30        end
31    end
32    if xyGoalReached() && !yawGoalReached() then
33        if goalFaceError > 0 then
34            | cmdVelZ = velTheta
35        else
36            | cmdVelZ = -velTheta
37        end
38    end
39 end

```

adımları Şekil 6 ile verilmektedir. Şekil 6a ile verilen başlangıç konumuna sahip robot, koridorun sonuna verilen hedef ile gezinimine başlar. Şekil 6b ile dar alan tespit edilir ve uygun dönüş hareketi yerine getirilir. Şekil 6c ve 6d ile verilen hedefe ulaşılır. Şekil 6e ile ise robotun bu hareketi boyunca konumları üstüste basılarak verilmiş bunula birlikte SLAM sonucu da görülmektedir.

Gerçekleştirilen yerel planlayıcı performansı iki farklı durum için değerlendirilmiştir. İlk test engeller arası mesafenin ($> 2 \times$ robot köşegen genişliği) geniş olduğu, ikinci test ise



Şekil 5. Gezinim Adımları: a) Hedefe Başlangıç Kafa Açısını İlerleme, b) Hedef Kafa Açısına Dönüş, c) Dar Alanlar için İleri Bakışlı Gezinim

TABLO I. HOLONOMİK ROBOT İLE GEZİNİM BAŞARI ORANLARI

Hedef Uzaklığı	Geniş Alan	Dar Alan
Kısa	%100	%100
Orta	%100	%80
Uzun	%86	%53

engeller arası mesafenin ($> 1 \times \text{robot köşegen genişliği}$) dar olduğu durum için yapılmıştır. Her iki test ortamı için de Kısa: $< 0.15m$, Orta: $< 1m$, Uzun: $> 1m$ mesafelerde 15'er deneme yapılmıştır. Elde edilen başarı sonuçları Tablo I ile verilmiştir.

Yapılan deneylerde ROS Gezinim Yığını alt yapısı'nın temel planlayıcıları olan Base Local Planner, DWA Local Planner, TEB Local Planner ve Eband Local planner'in dar alanlarda denemeleri yapılmış ve robot şeklinin dikdörtgen olması dolayısı ile maliyet haritaları robotun uzun kenarına göre hesaplanmıştır. Bu yüzden bu planlayıcılar dar alanlara herhangi bir yol oluşturamamıştır.

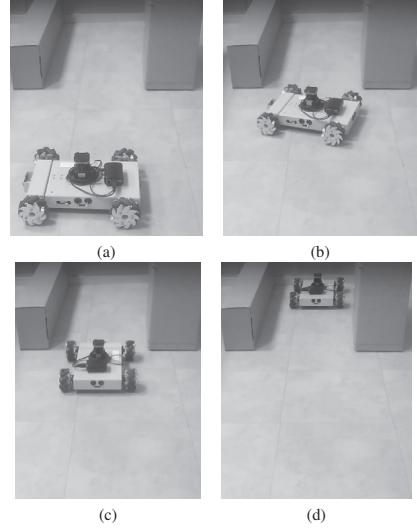
Gerçekleştirilen yerel planlayıcı, ROS Gezinim Yığını alt yapısı'nın temel planlayıcıları olan base local planner ve DWA local planner ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada 2.4 metrelik bir yolun planlayıcılar tarafından nasıl takip edildiği gözlemlenmiştir.

Şekil 7'de görüleceği üzere Base Local Planner, Global plan'i sapma ile takip etmiş ve yol alırken rotasyon hareketlerinde bulunmuştur. DWA Local Planner, Global plan'i takip etmiş ancak yol alırken rotasyon hareketlerinde bulunmuştur. Yazılan yerel planlayıcı ise istenildiği üzere, Global plan'i takip etmiş ve rotasyon hareketleri yapmamıştır.

V. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Çalışma ile mekanum tekerlekli 4 çeker bir mobil platform ile dar alanlarda gezinim ROS Gezinim Yığını uyumlu olarak bir eklenti şeklinde gerçekleştirilmiştir. Platform üzerindeki gömülü kart ile sensör okuma, SLAM, global gezinim planlama, yerel gezinim planlama görevlerini eşanlı olarak yürütebilmektedir. Sistemin örnek çalışma videosuna dipnot ile verilen adresten erişilebilir.²

²<https://youtu.be/LePubv8N1Ck>



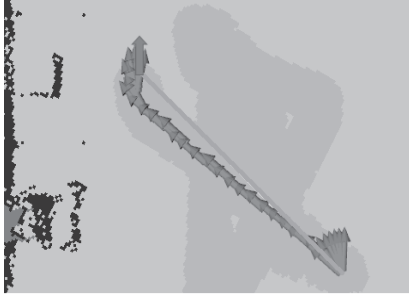
Şekil 6. Dar Alan Gezinimi Adımları: a) Başlangıç Konumu, b) İleri Bakışlı Dar Alan Tesbiti, c) Dar Alan için Uygun Gezinim Hareketi, d) Hedefe Varış, e) Dar Alan Geziniminin Zamana Bağlı İzleri

BİLGİLENDİRME

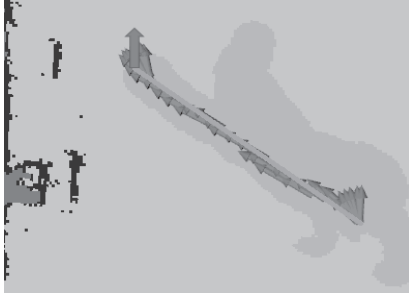
Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TÜBİTAK (EEEAG-118E215 Projesi ve BİDEB-2211/E Programı) ve Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü YTÜ-BAPK (FDK-2017-3044 ve FDK-2017-3125) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] C. W. Warren, "Global path planning using artificial potential fields," in *Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation*, May 1989, pp. 316–321 vol.1.
- [2] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 23–33, March 1997.
- [3] C. de'Sperati and P. Viviani, "The relationship between curvature and velocity in two-dimensional smooth pursuit eye movements," *Journal of Neuroscience*, vol. 17, no. 10, pp. 3932–3945, 1997.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7. Yerel Planlayıcı Testleri; a) Base Local Planner, b) DWA Local Planner, c) Yazılan Yerel Planlayıcı, Yeşil: Global plan, Kırmızı: Robot pozisyonu, Mavi: Verilen Hedef

- [4] J. Van den Berg, M. Lin, and D. Manocha, "Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation," in *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 1928–1935.
- [5] J. Minguez and L. Montano, "Nearness diagram (nd) navigation: collision avoidance in troublesome scenarios," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 20, no. 1, pp. 45–59, Feb 2004.
- [6] M. Mujahad, D. Fischer, B. Mertsching, and H. Jaddu, "Closest gap based (cg) reactive obstacle avoidance navigation for highly cluttered environments," in *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct 2010, pp. 1805–1812.
- [7] (2018) Base local planner. [Online]. Available: <http://wiki.ros.org/base>
- [8] (2018) Dwa local planner. [Online]. Available: <http://wiki.ros.org/dwa>
- [9] S. Quinlan and O. Khatib, "Elastic bands: Connecting path planning and control," in *Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on*. IEEE, 1993, pp. 802–807.
- [10] C. Rösmann, F. Hoffmann, and T. Bertram, "Kinodynamic trajectory optimization and control for car-like robots," in *Intelligent Robots and*

Systems (IROS), 2017 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2017, pp. 5681–5686.

- [11] I. Mackenzie, "Omnidirectional drive systems," in *2006 FIRST Robotics Conference*, 2006.
- [12] E. Uslu, F. Çakmak, N. Altuntaş, S. Marangoz, M. F. Amasyalı, and S. Yavuz, "An architecture for multi-robot localization and mapping in the gazebo/robot operating system simulation environment," *SIMULATION*, vol. 93, no. 9, pp. 771–780, 2017.
- [13] (2018) Ros navigation stack. [Online]. Available: <http://wiki.ros.org/navigation>
- [14] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische matematik*, vol. 1, no. 1, pp. 269–271, 1959.
- [15] (2018) Navfn. [Online]. Available: <http://wiki.ros.org/navfn>

Katlanabilir Modüler Minyatür Robotlar İçin Esnek Omurga Modülü Tasarımı

Nima Mahkam, Ömer Başar Özgüven, Onur Özcan
Makine Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
Ankara, Türkiye
Email: unurozcan@bilkent.edu.tr

Özetçe —Her modülün ayrı ayrı üretilip kontrol edildiği karmaşık modüler yapılar, modüler robot olarak tanımlanan robotik sistem konseptini oluşturur. Elverişsiz yol koşullarındaki manevra kabiliyetleri, çeşitli adımlama biçimleriyle uyumlu olmaları ve kolayca değiştirilebilen parçalara sahip olmaları bu robotların arama kurtarma görevleri için ideal olmalarını sağlar. Modüller arasındaki bağlantılar, modüler robotların hareket etme biçimlerinde önemli bir rol oynar. Omurgaya esneklik verilerek elde edilecek yumuşaklık ve ilave serbestlik derecesi düz olmayan yüzeylerde robotun hareket performansına katkı yapabilir. Bu çalışmada açıklanan, üretilen ve üzerlerinde deney yapılan katlanabilir omurgalar, bu omurga bağlantılarının bir türüdür. Her modül ve omurga bir asetat kağıdını lazer yardımı ile kesip katlayarak üretilmiştir. Değişik şekillerdeki omurga tasarımları üretilmiş ve performansları test edilmiştir. Her omurga tasarımı farklı sertlik katsayısına ve değişik eksenlerde esnekliğe sahiptir. Omurgalar üzerinde yüksek doğruluklu bir çalışma gerçekleştirme amacı ile, iki modül ve bir omurgadan oluşan sistemlerin farklı eksenlerdeki sertlik katsayıları kendimizin tasarladığı bir deney düzeneği yardımı ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, omurga modüllerinin tasarlandıkları gibi, istenilen eksenlerde daha esnek veya daha sert/bükülmez yapılabildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler—Modüler Robotlar, Katlanabilir Robotlar, Biyolojik İlhamlı Robotlar, Minyatür Robotlar.

1. GİRİŞ

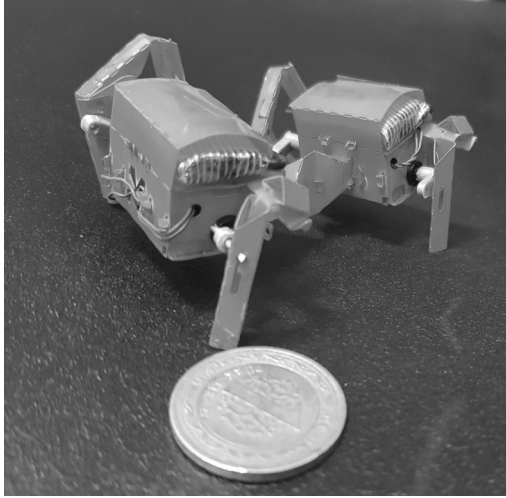
Piyasadaki hareketli robotların çoğunluğu, pahalı ve fiziksel olarak büyük oldukları için elverişsiz arazi koşullarında, özellikle ulaşımı zor yıkılmış bina tarzı küçük açıklıklardan geçilmesi gereken arama uygulamalarında tercih edilmezler. Tam tersine küçük ölçekli robotlar inceleme ve şehrsel aramalara daha uygun olduğu düşünülmektedir. Bu tarz ortamlarda kolaylıkla hareket edebilen canlılara bakıldığında, bu canlıların küçük boyutlu, çok bacaklı ve omurga esnekliğine sahip olduğu gözlemlenebilir. Esnek bir omurgaya sahip küçük ölçekli böceklerin incelenmesi, esnek omurgalarının elverişsiz arazi koşullarında hareket performansları üzerindeki etkisini gösterir. Benzeri şekilde, esnek bağlantılara sahip modüler robotlar, yüksek manevra kabiliyetleri ve değişik adımlama biçimlerini gerçekleştirebilmeleri sebebi ile elverişsiz arazi koşulları için daha iyi bir seçim olabilir. Manevra kabiliyetleri ve çeşitli adımlama biçimlerine sahip olmaları, esnek bağlantıları ile ortaya çıkan daha fazla eksenlerde hareket edebilme özelliğinin bir sonucudur. Bu da, küçük ölçekli modüler robotlarda esnek bağlantı kullanımının, bu robotların performansını artırabileceği izlenimini oluşturmuştur.

Tasarım konseptleri sebebi ile modüler robotlar, daha küçük alt modüllerden oluşurlar. Emekleme hareketinin kinematik analizinin yapılmasında kullanılan, Wei Wang *et al.* tarafından, tırtıllardan esinlenerek yapılmış tırmanabilen minyatür modüler robotlar, bu minyatür modüler robotlara bir örnektir [1]. Modüler robotların sualtı araştırmalarında da kullanışlı olduğu görülmüştür. Bununla ilgili hem teorik hem pratik alanda çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Key Labaratuvarı'nın minyatür robotları toplu halde kullanarak su altında yaptığı keşifler ve operasyonlar (Horsesho Crab) buna örnek olarak gösterilebilir [2]. Bunun yanında, minyatür robotlarla ilgili en temel sorunlardan biri bu robotların üretiminin zorluğudur. Buna bir çözüm olarak origami sanatından ilham alan katlanabilir robotlar tekniği ortaya çıkmıştır.

Origami sanatından esinlenen modüler robotlar, kendi türünden diğer modüllerle bağlantı kurup hareket sağlayabilir ve görevi uygun üç boyutlu yapılar kurabilir. Çok yönlülük, katlanabilirlik, modülerite, ve hareketlilik yönünden kullanışlı ve avantajlı olduklarını göstermişlerdir. Christoph H. Belke ve meslektaşları tarafından sunulan katlanabilir Mori modüler robutu, katlanan ve sonrasında birbirine bağlanan birbirinden bağımsız modüllerden oluşur [3]. Shiqi Yu, *et al.* insan omurgasından esinlenen robot bağlantıları üzerine bazı çalışmalar yapmaktadır [4]. Modüller, omurga adı verilen bağlantı yapıları ile birbirlerine bağlanır. Bu omurgalar, tasarımlarına ve sertlik katsayılarına göre farklı eksenlerde farklı şekilde hareket edebilirler. Ian D. Walker, *et al.* tarafından, yılan gibi zincirleme robotların kinematik analizi, modellemesi ve bağlantı yapıları yoğun bir şekilde araştırılmıştır [5].

Minyatür robotlarda eksik olan ana özelliklerden biri; modüler robotlar ve onların esnek omurgaları üzerine yapılan araştırmaların oldukça sınırlı sayıda olmasıdır. Esnek omurgaların sertlik katsayılarının minyatür modüler robotların dinamiklerini nasıl etkilediği konusunda bilgi eksikliği vardır. Tasarımda kullanılan teknikler ve üretimde kullanılan materyal, omurgaların sertlik katsayısını etkiler. Farklı eksenlerdeki sertlik katsayıları robotun elverişsiz yol koşullarında farklı performanslar sergilemesine sebep olur. Bağlantı yapılarının sertlik katsayılarını değerlendirip belirlemek, robotun çeşitli durumlardaki performansının analiz edilmesine yardımcı olabilecektir.

Bu çalışmada öncelikle Şekil 1'de görülen katlanabilir minyatür modüler robot için yaptığımız omurga tasarımları tanıtılacaktır. Bu robot için hem bükülmez hem de bir ya da iki eksende esnek omurga modülleri tasarlanmıştır.



Şekil 1. Omurga esnekliğine sahip, iki modülden oluşan, dört bacaklı, katlanabilir, minyatür robot.

Daha sonra, modüler robotun hareket analizinin daha hassas bir şekilde yapılmasını sağlayan, robotun farklı eksenlerdeki sertlik katsayılarının değerlendirilmesinde kullanılan deneysel düzenek açıklanacaktır. Bu düzenek kullanılarak, tasarlanmış olan omurga modüllerinin dönüşel yay sabitleri ölçülmüş ve raporlanmıştır. Deney sonuçları farklı tasarımlarla omurga modüllerinin değişik eksenlerdeki sertlik katsayılarının bir seviyeye kadar kontrol edilebildiğini göstermiştir. Bu çalışmada sunulan omurga modülleri benzer minyatür robotların tasarımlarında, robotlara omurga esnekliği kazandırmak için kullanılabilir.

II. KATLANABİLİR OMURGA TASARIMLARI

Bu çalışmada tasarlanan modüler robotlar, iki bacaklı iki ya da daha fazla robot modülünün bir araya getirilmesi ile oluşturulur. Modüller birbirlerine, omurga modülleri ile bağlanırlar. Bütün modüller ve omurgalar, asetat kağıtlarının farklı şekillerde kesilip, sonrasında katlanması ile yapılır. Robot modülleri birbirleri ile aynıdır, modülleri birbirlerine bağlayan omurga modüllerinin ise değişik eksenlerde esnek veya bükülmez olan dört farklı tasarımı bulunmaktadır. Robot modülleri değişik omurga modülleri ile bağlanıp farklı modüler robotlar elde edilebilir.

Proje tasarımının temel amacı doğrultusunda modüllerin boyutları mümkün olan en küçük değerlerde tutulmuştur. Tablo I'de görülen bu değerler modüllerde kullanılan motorların boyutlarına ve elektrik elemanlarına göre belirlenmiştir. Her modüle, modülün iç hacminin neredeyse tamamını kaplayan, iki adet motor ve bir adet 5 Voltajlık Li-Po pil bulunmaktadır. Tasarlanan omurgaların boyutları ise hedeflenen sertlik katsayısı değerine, modüllerin birbirine temas etmesini engellemek için gerekli olan mesafeye ve kullanılan üretim yöntemlerine göre belirlenmiştir. Omurgaların katlanmamış durumdaki boyutları Tablo II'de, katlanmış durumdaki boyutları ise Tablo

III'de bulunmaktadır. Omurgalar, rotasyonel yay görevi görmeleri amacıyla ile tasarlanmıştır. Bu amaca birçok farklı tasarım ile ulaşılabilir. Bu projede kullanılan omurga tasarımlarının seçilme sebebi bu tasarımların, modüllerin bacakları ile aynı topolojiye sahip olması ve bu sebele üretimlerinin daha kolay olmasıdır. Yapılan deneylerde, omurgaların esnek kısımlarına bağlı olan bükülmez kısımların, omurgaların istenmeyen eksenlerde hareket etmesini engellediği görülmüştür.

Tablo I. MODÜL BOYUTLARI

X Eksenindeki Boyutu (mm)	Y Eksenindeki Boyutu (mm)	Z Eksenindeki Boyutu (mm)
16.75	25.50	19.98

Tablo II. KATLANMAMIŞ OMURGA BOYUTLARI

Omurga Tasarımı	X Eksenindeki Boyutu (mm)	Y Eksenindeki Boyutu (mm)
İki Eksenli	46.15	43.86
Tek Eksenli	36.13	43.76
Bükülmez	35.16	33.54

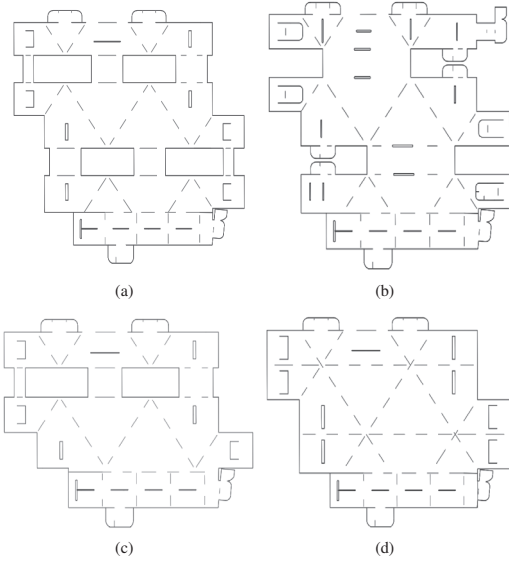
Tablo III. KATLANMIŞ OMURGA BOYUTLARI

Omurga Tasarımı	X Eksenindeki Boyutu (mm)	Y Eksenindeki Boyutu (mm)	Z Eksenindeki Boyutu (mm)
İki Eksenli	46.15	15.05	15.05
Tek Eksenli	36.13	15.68	15.68
Bükülmez	35.16	6	6

Omurgalar öncelikle AutoCAD kullanılarak iki boyutlu olarak çizilirler. Daha sonra yapılan çizimler doğrultusunda, asetat kağıdından kesilir. Bu çizimlerde düz çizgiler lazer kesicinin tamamen kesmesi gereken yerleri temsil eder, kesikli çizgiler ise iki boyutlu omurga çizimini üç boyutlu hale getirirken omurganın katlanması gereken yerleri temsil eder. Son olarak da kesilmiş olan asetat kağıdı, üzerindeki kesikli çizgilerden katlanarak üç boyutlu hale getirilir. Aynı maddeden yapılmalarına rağmen, tasarımları birbirinden farklı olan omurgaların sertlik katsayıları da, bu sebeple, birbirinden farklıdır.

Omurga tasarımları, x eksenli robotun ilerlediği yönü temsil edecek şekilde, sağ el koordinat sistemi kullanılarak yapılmıştır. Şekil 2(a) ve şekil 2(b) y ve z eksenlerinde esnekliğe sahip olan omurga tasarımlarıdır. Şekil 2(c), bağlanma şekline bağlı olarak, y ekseninde esnek ve z ekseninde bükülmez, veya z ekseninde esnek ve y eksenine bükülmez olan bir omurga tasarımıdır. Şekil 2(d) ise bütün eksenlerinde bükülmez olan bir omurga tasarımıdır. Bükülmez omurgada da dahil olmak üzere, omurgaların her biri, birer dönüşel yay olarak modellenebilir.

Şekil 3 iki eksenli omurgalardan birinin tasarımıdır. Omurga katlanırken, 1 ve 2 numaralı kesik çizgilerden içe doğru katlanır, ardından 3 ve 4 numaralı kesik çizgilerden içe doğru katlanır, sonrasında ise 5 ve 6 numaralı kesik çizgilerden içe doğru katlanır. Bu katlamaların bu sıra ile yapılması, omurganın doğru birleştirilebilmesi için önemlidir. Sonuç olarak ortaya çıkan omurga modülü tab şeklindeki uzantılar kilit olarak kullanılarak sabitlenir. Böylelikle 7 ve 8 numaralı bölgeler omurgaya y ve z eksenlerinde esneme özelliğini kazandırır. 9, 10 ve 11 numaralı bölgeler hareket



Şekil 2. Değişik omurga tasarımlarının AutoCAD ortamında hazırlanmış lazer kesim dosyaları: (a) Birinci iki eksenli esnek omurga modülü, (b) ikinci iki eksenli esnek omurga modülü, (c) Tek eksenli esnek omurga modülü, (d) Bükülmez omurga modülü.

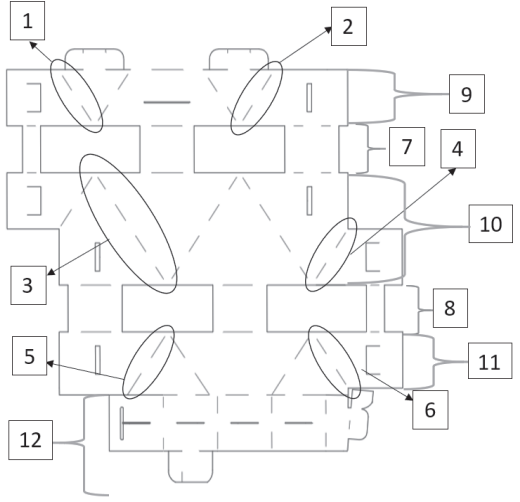
etme özelliğine sahip değildir. 12 numaralı bölge ise omurganın modüllere bağlanmasını sağlayan bir soket görevi görür.

Yukarıda açıklanan katlama işlemi yapıldığında birinci iki eksenli omurga, şekil 4(a)'daki üç boyutlu şekli alır. Benzer katlama işlemleri ikinci iki eksenli omurganın, tek eksenli omurganın ve bükülmez omurganın lazerle işlenmiş iki boyutlu asetat kağıdı tabakalarına uygulanarak sırası ile şekil 4(b), şekil 4(c) ve şekil 4(d)'de görülen üç boyutlu omurgalar elde edilir.

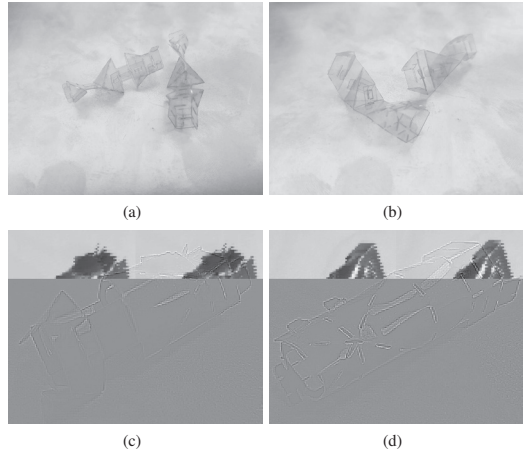
III. SERTLİK KATSAYISI DENEY DÜZENEGİ

Önceki bölümde tasarımları açıklanan omurga tasarımlarının, gerek bükülmez oldukları gerek esnek tasarlandıkları eksenlerde sertlik katsayılarının ölçülmesi ve karakterizasyonunun yapılması gereklidir. Bunun için omurga modülleri, şekil 5'de görüldüğü gibi, bacakları çıkarılmış/kesilmiş iki robot modülü arasına bağlanmıştır. Bu sayede ölçülecek sertlik katsayıları, bacaklar arası sistemin sertlik katsayılarını verecek ve içinde hem omurganın hem de omurga ve robot modülleri arasındaki bağlantıların esnekliklerini içerecektir, dolayısıyla robotun modelleme aşamalarında bu katsayılar direkt kullanılabilir.

İki robot modülü ve omurga modülünden oluşan sistemlerin sertlik katsayılarını ölçmek için bir deney düzeneği tasarlanmış ve kurulmuştur. Bu deney düzeneği şekil 6'da gösterilmiştir. Bu düzende ortasında omurga modülünü bulunduran sistemler bir tarafından hassas ve yüksek doğruluklu, maksimum 50N kuvvet ölçebilen bir adet minyatür yük hücresine (HBM U9C), diğer tarafından ise bir açısal pozisyonlama parçasına bağlanmıştır. Bu parça SolidWorks ile tasarlanmış

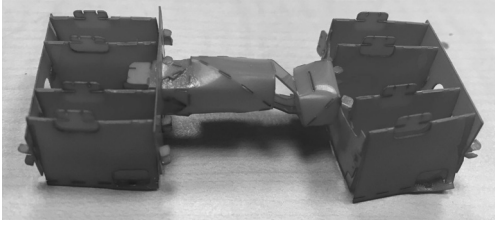


Şekil 3. Birinci iki eksenli esnek omurganın AutoCAD çizimi. Esnekliği sağlayan eklemler 7 ve 8 numara ile gösterilmiş kısımlardır. 9, 10 ve 11 numaralı kısımlar ise katlanarak eklemler arası bükülmez uzuvları oluştururlar. 12 numaralı bölge omurganın bağlantı bölgesidir.

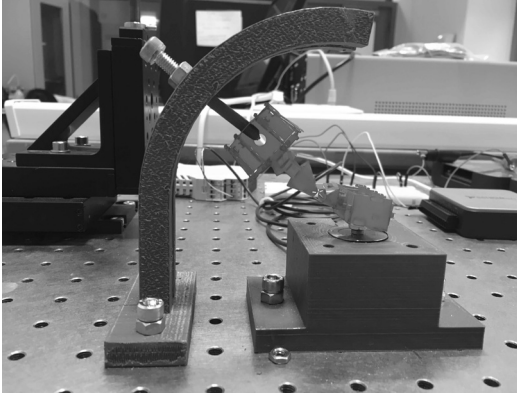


Şekil 4. Katlanmış omurga tasarımları: (a) Birinci iki eksenli esnek omurga modülü, (b) ikinci iki eksenli esnek omurga modülü, (c) Tek eksenli esnek omurga modülü, (d) Bükülmez omurga modülü.

ve üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Tasarlanan parça ray vagon prensibi ile çalışmaktadır ve biri ray diğeri vagon görevini görmek üzere iki ayrı alt parçadan oluşmaktadır. Ray görevini gören alt parça, dönüşsel bir yörüngeye sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Vagon görevini gören alt parça ise rayın içerisinde rahatlıkla hareket edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi, deneyde modüllerden birisi yük hücresine diğeri de vagon görevi gören alt parçaya ve bu iki modül de birbirlerine omurga aracılığı ile bağlanır. Daha



Şekil 5. Bacakları olmayan iki robot modülü ve bir omurgadan oluşan sistem. Deneyler, belirli bir ekseninde sadece omurganın değil, bütün bu sistemin dönüştürücü yay sabitini ölçmektedir.



Şekil 6. Deney düzeneği. Mavi parça omurga sisteminin belirli bir açıya kadar esnetildiği ray vagon parçasıdır. Yeşil parçanın içinde yük hücresi vardır. Omurga sistemi yüksek açılarda yük hücresi tarafında bir miktar bükülmektedir, bu bükülmeler sistemin üzerinde ölçülüp sonuçlar düzenlenmiştir.

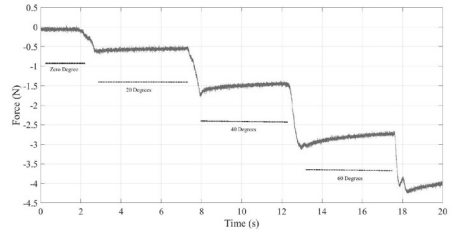
sonra, vagon görevi gören parça, ray görevi gören parçanın içinde hareket ettirilir ve bir vida yardımı ile 20, 40, 60, 80 ve 90 derecelik açılarda sabitlenerek, bu açılarda sistemin yük hücresine uyguladığı kuvvete bakılır.

Robotun hareket ettiği zemin her zaman düz ve eğimsiz olmayabilir. Robotun bazen aşırı pürüzlü yüzeylerde hareket etmesi gerekebilir ki bu da omurgalarda ani ve keskin açı değişimlerine ve omurga modülünde sıkışmalara, yani iki robot modülünün birbirlerine yaklaşmalarına sebep olabilir. Bu tarz senaryolar için ray vagon sisteminin yörüngesi eliptik olarak seçilebilir. Ancak eliptik yörünge tasarlanırken omurgada oluşacak sıkışma miktarları belirli sınırlar arasında kalacak şekilde ayarlanmalıdır, aksi takdirde deney düzeneğinde takılmalar oluşabilir. Şekil 6'daki mavi parça olan ray vagon sistemi, çembersel bir yörünge ile tasarlanmıştır. Omurgalar-daki olası sıkışmaları deneysel olarak oluşturmamıza imkan vermez, ancak deney düzeneğinde herhangi bir takılma olmadan deneyler gerçekleştirilebilir.

Yük hücresinden veri almak için bir adet veri toplama kartı (NI-PCIE6353) ve MATLAB yazılımından oluşan bir veri alma sistemi kullanılmıştır. Bu sistem sayesinde, deneyler sırasında yük hücresinden 100 Hz frekansında veri alınmıştır.

IV. SERTLİK KATSAYISI DENEY SONUÇLARI

Yük hücresi her deneyden önce kalibre edilmiştir. Bu kalibrasyon işleminde öncelikle yük hücresi üzerine 1 kilogramlık bir ağırlık yerleştirilip yük hücresinden tablo IV'de örneği görülen veri alınmıştır. Daha sonra, birim kuvvete karşılık gelen voltaj değeri, yani yük hücresinin hassasiyeti hesaplanmıştır. Gerçek omurgalarla kalibrasyon sonrasında yapılan deneyler, omurga belirli bir açıda sabit tutularak yapılmıştır. Şekil 7'de görülen grafik ise bükülmez omurga deney düzeneğine yerleştirilip 20 saniyelik bir zaman diliminde 0 dereceden 60 dereceye, 0, 20, 40 ve 60 derecelerde birkaç saniye bekletilerek, hareket ettirilirken yük hücresinden alınan veri setini göstermektedir.



Şekil 7. Bükülmez omurga 0 dereceden 60 dereceye hareket ettirilirken yük hücresinden alınan veri grafiği

Tablo IV. KALIBRASYON DENEYLERİ SIRASINDA YÜK HÜCRESİNDEN ALINAN VERİ GRAFİĞİNİN EN KÜÇÜK, EN BÜYÜK VE ORTALAMA DEĞERLERİ

Min. Voltaj Değeri (V)	Maks. Voltaj Değeri (V)	Ort. Voltaj Değeri (V)
0.245230	0.245488	0.245420

Yük hücresinin hassasiyeti hesaplandıktan sonra, değişik omurga sistemleri düzeneğe monte edilmiş ve ray vagon sistemi yardımıyla omurgalar belirli açılara esnetilmiştir. Bu deneyler sırasında elde edilen kuvvet sensörü verileri önce voltajdan hassasiyet yardımıyla kuvvete, daha sonra ise omurganın merkezine uygulanan momente dönüştürülmüştür. Bu elde edilen moment, deneyin yapıldığı esnetilme açısına bölündüğünde dönüştürücü yay sabiti ya da sertlik katsayısı (κ) elde edilir. Tablo V, VI, VII ve VIII'de dört farklı omurga kullanılarak oluşturulmuş sistemlerin dönüştürücü yay sabitlerinin deneysel elde edilmiş değerleri bulunmaktadır. Yapılan deneylerde tek eksenli omurga kullanılarak oluşturulan sistemler, y ekseninde esneyebilecek ve z ekseninde hareket edemeyecek şekilde bağlanmıştır.

Tablo V. BİRİNCİ TİP İKİ EKSENDE ESNEYEBİLEN OMURGA KULLANILAN SİSTEMİN DENEYSEL VERİLERİ

Açı (°)	Y Eksenli Sertlik Katsayısı (mN.m/rad)	Z Eksenli Sertlik Katsayısı (mN.m/rad)
20	25.287	54.106
40	19.187	41.456
60	13.500	31.677

Değişik omurgalardan oluşan sistemlerin sertlik katsayılarını incelemek için yapılan, yukarıda bahsedilen deneylerden elde edilen özet sonuçlar tablo IX'de gösterilmiştir. Buradaki özet sonuçlar her bir omurganın değişik açılarda ölçülen dönüştürücü yay sabitinin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Tablo VI. İKİNCİ TIP İKİ EKSENDE ESNEYEBİLEN OMURGA KULLANILAN SİSTEMİN DENEYSEL VERİLERİ

Açı (°)	Y Eksenli Sertlik Katsayısı (mN.m/rad)	Z Eksenli Sertlik Katsayısı (mN.m/rad)
20	11.259	7.174
40	3.329	7.176
60	1.584	5.549

Tablo VII. TEK EKSENDE ESNEYEBİLEN OMURGA KULLANILAN SİSTEMİN DENEYSEL VERİLERİ

Açı (°)	Y Eksenli Sertlik Katsayısı (mN.m/rad)	Z Eksenli Sertlik Katsayısı (mN.m/rad)
20	66.208	157.178
40	47.313	119.545
60	28.284	83.528

Sonuçlardan ilk yapabileceğimiz çıkarım, istenilen eksenlerde bükülmezliğin veya esnekliğin belirli ölçüde sağlanabildiğidir. Özellikle tek eksende esnek olan omurgadan elde edilen sonuçlar, bükülmez olarak tasarlanan eksendeki dönüşsel yay sabitinin esnek tasarlanan eksendeki yay sabitinin üç katı olduğunu göstermektedir. Bunun yanında bükülmez olarak tasarlanan modül, esnek modüllere oranla oldukça yüksek bir yay sabitine sahiptir. Bunun yanında sonuçlarla ilgili belirtilmesi gereken bir olası problem, bükülmez ve esnek eksenler arası yay sabitlerinin yakınlığıdır. Deneyler sırasında bunun temel nedeni olarak bağlantı noktalarının esnekliği gözlenmiştir. Bükülmez modüller, ya da omurganın bükülmez eksenindeki hareketler, omurgadan çok omurganın robot modülü ile bağlandığı noktayı esnetmektedir. Gerçek sistemde de (yani modüler minyatür robotta da) benzer problem olacağından bu veriler olduğu haliyle bırakılmış, ama deneylerin sadece omurganın değil, omurga ve bağlantılarından oluşan sistemin yay sabitini verdiğini vurgulamak gerekliliği doğmuştur.

V. SONUÇ

Omurga modülleri modüler robotları bükülmez bir robottan hareket anlamında ayıracak en önemli özelliklerden biridir. Omurgaların sertlik katsayılarındaki farklılıklar, robotlara değişik yüzey koşullarında çeşitli manevraları gerçekleştirme özelliğini kazandırabilir. Bu nedenle bu katsayıların kestirilmesi veya ölçülmesi robotların hareket analizini ve modellemelerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada, katlanabilir minyatür robotumuz için tasarladığımız değişik omurga modüllerinin tasarımları açıklanmıştır. Daha sonra

bu modüllerin değişik eksenlerdeki dönüşsel yay sabitleri ölçülmüştür. Bu ölçümler için kullanılan deney düzeneği de detaylı olarak anlatılmıştır. Elde edilen sonuçlar omurga modüllerinin farklı eksenlerdeki esnekliklerinin belirli bir ölçüde değiştirilebildiğini göstermektedir.

Robot modüllerinin tasarımları, modellenmeleri ve kontrolü üzerindeki çalışmalar devam etmektedir. Robot modülleri tamamlandığında, omurga modülleri ile birleştirilerek istenilen bacak sayısına sahip modüler minyatür robotlar oluşturulacaktır. Bu robotun ve esnek omurgaların temel amacı, omurga esnekliğinin minyatür robotların hareketine olabilecek etkisini incelemektir. Robot modülleri tamamlandığında değişik omurga esnekliklerine sahip, farklı sayıda bacaklı robotlar yapılacak ve bu değişkenlerin robotun hareket yeteneğine olan etkileri analiz edilecektir. Bu çalışmaların yanında, omurga modüllerinin de dönüşsel yay sabitlerinin nasıl daha kontrollü olarak değiştirilebileceği üzerine de çalışmalarımız devam etmektedir. Proje tamamlandığında elde edilecek sonuçlar, bacaklı minyatür robotlarla uğraşan araştırmacılara, omurga esnekliğinin nasıl sağlanabileceği ve bu esnekliğin minyatür robotların hareketini nasıl etkileyebileceği konusunda fikir sağlayacaktır.

TEŞEKKÜRLER

Yazarlar Talip Batuhan Yılmaz ve Alihan Bakır'a robot tasarımı ve deneyler üzerindeki kıymetli yardımları için teşekkürlerini sunarlar. Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 3501 Kariyer Geliştirme Programı çerçevesinde desteklenmiştir (Araştırma Proje Numarası: 116E177).

KAYNAKLAR

- [1] W. Wang, K. Wang, and H. Zhang, "Crawling gait realization of the mini-modular climbing caterpillar robot," *Progress in Natural Science*, vol. 19, pp. 1821–1829, dec 2009.
- [2] G. Li, T. Gao, L. Dong, S. Liu, H. Xu, Y. Lin, and Q. Jia, "A modular miniature underwater robot design scheme for swarm operations," in *OCEANS 2016 - Shanghai*, IEEE, apr 2016.
- [3] C. H. Belke and J. Paik, "Mori: A modular origami robot," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, pp. 2153–2164, oct 2017.
- [4] S. Yu, Y. Nakata, Y. Nakamura, and H. Ishiguro, "A design of robotic spine composed of parallelogram actuation modules," *Artificial Life and Robotics*, vol. 22, pp. 477–482, aug 2017.
- [5] I. D. Walker, H. Choset, and G. S. Chirikjian, "Snake-like and continuum robots," in *Springer Handbook of Robotics*, pp. 481–498, Springer International Publishing, 2016.

Tablo VIII. BÜKÜLMÜZ OMURGA KULLANILAN SİSTEMİN DENEYSEL VERİLERİ

Açı (°)	Y Eksenli Sertlik Katsayısı (mN.m/rad)
20	253.488
40	164.725

Tablo IX. OMURGA TASARIMLARININ Y VE Z EKSENLERİNDEKİ SERTLİK KATSAYILARI

Omurga Tasarımı	Y Eksenli Sertlik Katsayısı (mN.m/rad)	Z Eksenli Sertlik Katsayısı (mN.m/rad)
İki Eksen-1	19.325	42.413
İki Eksen-2	5.391	6.633
Tek Eksen	47.268	120.084
Bükülmez	209.107	209.107

Katlanabilir Robotlarda Üretim Kaynaklı Boyutsal Kaçıklıkların Bacak Yörüngesine ve Robot Dinamiklerine Etkileri

Mohammad Askari, Alper Yeldan, Onur Özcan

Makine Mühendisliği Bölümü

Bilkent Üniversitesi

Ankara, Türkiye

Email: onurozcan@bilkent.edu.tr

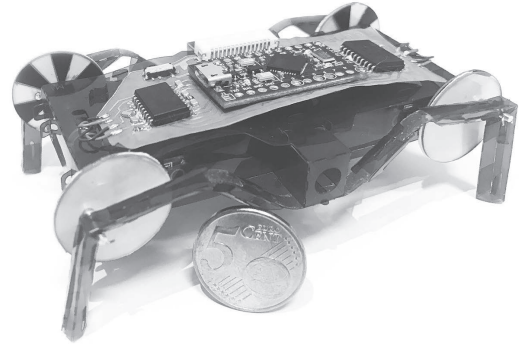
Özetçe —Uzun zamandır bilinen basit ama yaratıcı bir sanat olan origami ve katlama teknikleri yakın zamanlarda minyatür robotların tasarımı ve üretimine ilham olmuştur. Bu çalışmada kullanılan MinIAQ-II robotu origamiden esinlenmiş, katlanabilir, bağımsız bacak aktüatörlü dört bacaklı minyatür bir robottur. MinIAQ-II robotunun en önemli parçası olan bacaklarının tasarımı mekanizmanın iskelet şeması üzerinden yapılır. Üretim sırasında, bacaklar belirli bir kalınlığa sahip olurlar ve robotların katlanma tekniğinden kaynaklanan nedenlerden eklem pozisyonları az miktarda kayar. Üretim aşamasında ortaya çıkan bu geometrik parametreler, mekanizma analizine değişik geometrik parametreler olarak girdi şeklinde kullanılmış ve bu parametrelerin ayak yörüngesi üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Bu şekilde güncellenen ayak yörüngeleri, robotun dinamik modellenmesinde de kullanılmıştır ve ideal yörüngeden elde edilen robotun dinamik tavrı ile güncellenmiş yörüngeden elde edilen robotun dinamik tavrı karşılaştırılmıştır. İki model arası farklılıklar çok olmasa da, deney verilerine daha yakın olan sonucun geometrik parametreler kullanılarak güncellenmiş benzetimler olduğu gözlenmiştir. Burada sunulan model değişikliği benzer katlanabilir robotların modellenmesinde de uygulanabilir ve robot dinamiklerinin daha iyi tahmin edilmesinde araştırmacılara yardımcı olabilir.

Anahtar Kelimeler—Bacaklı robotlar, katlanabilir robotlar, minyatür robotlar, mekanizmalar, robot dinamiği.

I. GİRİŞ

Minyatür robotların geleneksel boyutlara sahip robotların sıkıntılarından olan yüksek maliyet ve modüler yapı eksikliğine alternatif çözüm olabilecekleri düşünülmektedir, bu sayede de kullanımları yaygınlaşmaya başlamıştır. Minyatür robotların maliyet ve modülerlik yanında da klasik robotlara karşı avantajları vardır. Minyatür robotlar, küçük boyutlar dinamikleri hızlandırdığı için, daha atik hareket yeteneğine sahiptirler, dolayısıyla manevra kabiliyetleri yüksektir. Minyatür robotlar dar ve tehlikeli alanlara girebilir, bölgenin keşfedilmesini sağlayabilirler [1]. Bu ve benzeri avantajları olmasına rağmen çalışan boyutlar nedeniyle minyatür robotların tasarımı, üretimi ve hareketi hala tam çözülmemiştir ve aktif araştırma konularındandır.

Minyatür tasarım ve üretim için üç boyutlu baskı [2], MEMS'ten esinlenilmiş üretim teknikleri [3], [4] ve lazer kesme ile yapılan akıllı kompozit üretimi (SCM) gibi değişik



Şekil 1. MinIAQ-II: Bağımsız aktüatörlü bacaklara sahip katlanabilir minyatür robot.

teknikler ve bunlarla üretilen RoACH [5] ve HAMR [6] robotları gibi değişik minyatür bacaklı robotlar bulunmaktadır. Bu üretim tekniklerinin yanında minyatür robotik alanında son 10 yıldır kullanılmaya başlanan, origami/kirigami ilhamlı katlanabilir robotlar ya da yazdırılabilir robotlar gibi isimlerle de anılan teknikler de mevcuttur.

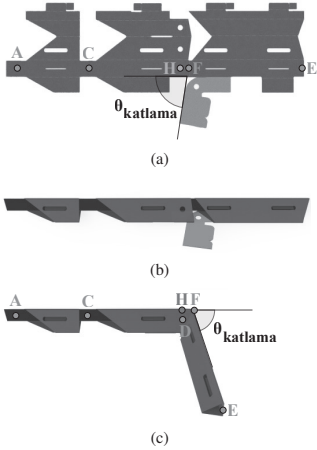
Kirigami, kesilmiş yüzey parçalarının ilk düzlemlerinden çıkartılarak üç boyutlu şekiller elde edilmesidir. Kirigami katlanabilir, yazdırılabilir mikro robotik sistemlere ilham vermiştir [7]. Bu bağlamda yazdırılabilirlik lazer yazıcıda aseptat kağıdına katlama desenleri işlenmesidir [8]. Katlanabilir robotiğin önemli artlarından biri tüm esnek bağlantıların ve uyarlamaların iki boyutlu tasarıma aktarılabilmesidir. Bu yöntem sadece üretimi ucuzlatıp zaman kazandırmamış, ayrıca gelecekteki tasarım değişikliklerinin kolaylıkla uygulanmasını mümkün kılmıştır.

Bu bildiride bahsi geçen MinIAQ-II robotu (Şekil 1) iki boyutlu kağıdı üç boyutlu fonksiyonel yapılara dönüştüren geleneksel Japon sanatı olan origamiden ilham alınarak tasarlanmıştır. Katlama, esnek düzlemsel yapıların üretiminde basit ve etkili bir yöntem olup talaşlı imalat yerine alternatif metot olarak kullanılabilir. Fakat düzlemsel tasarım sınırlamaları, malzeme seçimindeki kısıtlamalar, karmaşık katlama ve birleştirme geometrisi sebepleriyle mühendislik alanlarında

Katlanabilir robotik alanında gelişmeler olmasına rağmen standartlaşmış tasarım süreci ya da katlama ile rijit yapı elde etme yöntemi bulunmamaktadır. Fazla kompleks katlanabilir robot örneği olmadığı için önceden yapılmış çalışmaların çoğu basit tasarımlardan öteye gitmemiştir. Katlanabilir robotların bacakları tasarlanırken, rijit uzuvlar, ideal pimli eklemleri birbirlerine bağlayan çizgiler olarak düşünülerek tasarım yapılır. Ancak bu tasarım üretiminde rijit kesim laserli dönüşürülürken eklem bölgelerinde kaymalar yaşanır ve rijit uzuvların merkez çizgileri eklemlere denk gelmezler. Bu tarz problemler analize geometrik olarak hesaba katılmış ve MinIAQ-II robotunun bacak tasarımı kullanılarak bu tarz üretim tekniği kaynaklı geometrik parametrelerin ayak yürünme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buradaki metodun ileride daha karmaşık robotlar için bir örnek olması amaçlanmıştır.

II. KATLANABİLİR ROBOT BACAĞI TASARIMI

Bacaklı robotlarda bacak tasarımları ayak yürüme hızı ve yere mümkün olduğu kadar paralel olacak şekilde yapılmıştır. Bu sayede robot hızlı hareket edebilecek ve gövdesi mümkün olduğu kadar yere paralel kalacaktır. Fakat katlama zorlukları ve robotun boyutu bu gerekliliğin yerine getirilmesini zorlaştırmaktadır. MinIAQ robotlarının bacak tasarımlarında katlanma ve bir araya getirilmiş olan bacakların ana robota her zaman paralel bir düzlemde olduğu varsayılmıştır. MinIAQ robotlarının normalde kullanılan esnek bağlantılar yerine basitleştirilmiş ideal eklemler ve rijit bağlantılar varsayılmıştır. Bu varsayım ile mekanizmanın kinematik analizi yapılmıştır.



Şekil 2. (a) MinIAQ-II robotunun esnek bağlantılı bacak şeması. (b) Robot bacağının katlanmış hali. (c) Robot bacağının ana gövdeye bağlanmış hali.

Esnek bağlantılı mekanizmalar minyatür katlanabilir robotlarda genellikle rijit bağlantılar ve esnek eklemlelere sahip olup kinematik zincir oluşturur. Şekil 2(a)'da görüldüğü üzere katlanmamış bacak şeması ilk olarak iki boyutta çizilir. Sonra esnek asetat kağıdından lazer kullanılarak üretilir. Çizim katlanarak üç boyutlu şeklini elde eder. Rijit bir yapıda kalması için şekil üzerindeki boşluklar kilit olarak kullanılır. Şekil 2(b)'de

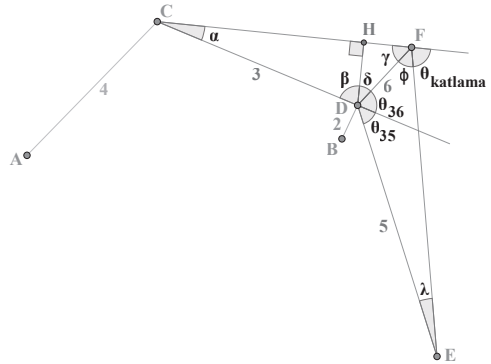
robot ayağının katlanmış hali bulunmaktadır. Kırmızı renkteki parça katlama açısını sabit tutmak için yapılmış bir kilitler. Şekil 2(c) robot ayağının bahsedilen kilidin katlanmasından sonraki halidir. D noktası bir mil yardımıyla optik sensör için tasarlanmış çarka bağlıdır. E noktası robot ayağının uç noktasıdır. C ve D eklemler noktasıdır.

Bu çalışmada esnek bağlantı yerine ideal bağlantı varsayımı yapıldığı için Şekil 2(a)'da görüldüğü üzere ideal eklemler esnek eklemlerin orta noktaları olarak belirlenmiştir. İdeal eklemler noktaları belirlendikten sonra optimal ayak yürünge hesabı yapılmıştır. Optimal yürüngeyi bulmak için optimal bağlantı uzunluklarına ve sabit katlama açısına ihtiyaç vardır. Bunun için eklemlere kısıtlı bölgeler tanımlanmış ve optimizasyon algoritması kullanılarak parametreler elde edilmiştir [9]. Böylece yürünenin mümkün olduğunca yere paralel ve uzun adımlar atması sağlanmıştır.

Katlanabilir robot ayağı tasarımında gerekli yörünge hesaplamaları yapılırken mekanizmanın iki boyutlu sistemden üç boyutlu sisteme geçildiği unutulmamalıdır. Sistemler arası geçişte gerekli geometrik hesaplamalar yapılmadığı takdirde elde edilen yörünge doğru sonucu vermeyebilir. Hataya sebep olan parametreler bu bildiride "Geometrik Faktör" olarak adlandırılmıştır. Bir sonraki bölümde geometrik faktörün nereden geldiği ve hatanın nasıl çözüleceği anlatılacaktır.

III. KATLANABİLİR MEKANİZMA TASARIMINDA GEOMETRİK FAKTÖR

Katlanabilir robot tasarımı yapılırken iki boyutlu katlanmamış yapı ile üç boyutlu katlanmış robot ayağı arasındaki geometrik ilişkinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu ilişkiler dikkate alınmadığı, iki boyuttan üç boyuta geçiş doğru yapılamadığı takdirde başarısız bir tasarım elde edilebilir [9]. Şekil 3'te gösterilen A noktası robotun ana gövdesine bağlanıp sabit olarak durmaktadır. B noktası robot ayağının motor ile birleştiği nokta olup sabit yerdedir. E noktası ayağın ucu olup yörüngeyi göstermektedir.



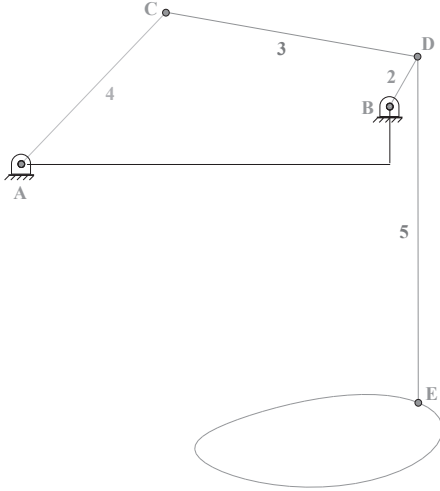
Şekil 3. MinIAQ-II robot bacağının geometrik faktörün dikkate alınmış genel dört-çubuk mekanizmasının şeması. Bağlama kolu görselin daha iyi anlaşılması için gerçek boyutunda çizilmemiştir.

Bu bölümde ilk olarak MinIAQ-II robotunda bahsedilen geometrik faktörün nasıl oluştuğu anlatılacaktır. Devamında

geometrik faktörün göz önüne alınarak nasıl modelleme yapılacağı iki farklı durum için analiz edilecektir. İlk durumda optimize edilmiş dört-çubuk mekanizmasının nasıl iki boyutlu katlanmamış tasarıma dönüştürüleceği anlatılmıştır. İkinci durumda iki boyutlu katlanmamış robot tasarımının nasıl dört-çubuk mekanizmasına çevrileceği anlatılmıştır. İki yöntemin de analizi için Şekil 3'te görülen şema kullanılmıştır.

A. Geometrik Faktör

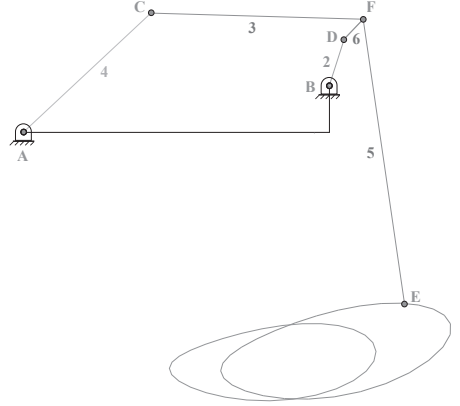
Robotun bacak mekanizmasının tasarımı öncelikle kinematik analizler kullanılarak yapılır. Düzlemsel bir dört-çubuk mekanizmasında uzuvlar AC , CD ve BD alındığı takdirde ayağın yörüngesi Şekil 4'te verilen kırmızı çizgi olacaktır. Bu ayak yörüngesi kinematik optimizasyon sonucu ile elde edilmiştir. Bu şekildeki DE uzvu ile CD arasında sabit bir açı vardır. Bu sabit açı da optimizasyon ile belirlenir.



Şekil 4. MinIAQ-II robot bacağındaki kinematik optimizasyon algoritması kırmızı çizgili yörüngenin elde edildiği bir bacak tasarımını ortaya çıkarır.

Robot bacağının tasarımının tamamlanması için düzlemsel, üç boyutlu iskelet şemasından lazerli işleme dosyalarının oluşturulması gerekmektedir. Geometrik faktörlerle ilgili esas problem, Şekil 4'te görülen optimize dört çubuk mekanizmasının Şekil 2(c)'de görülen katlanabilir hale dönüştürülmesinde ortaya çıkar. Bu işlem için dört-çubuk mekanizmasının rijit uzuvlarının boyutları ve sabit katlama açısının $\theta_{katlama}$ bilinmesi gerekmektedir. Fakat robot bacağı iki boyutlu yüzeyde üretilip katlanarak üç boyutlu sisteme geçtiği için gerekli parametreler yanlış seçilebilir. Şekil 2(c)'de görüldüğü üzere D robot bacağının ana vücuda bağlandığı nokta olup bacak katlamasından sonra üç boyutlu düzlemde belirlenmiştir.

Uzuv kalınlıkları ve eklemler pozisyonları dikkate alınmadan, D noktasının kesim dosyasına göre katlandıktan sonra üçüncü boyutta olacağı göz önünde bulundurulmadan ve $\theta_{katlama}$ ile θ_{35} 'in farklı olduğu düşünülmeden oluşturulan tasarımlar ile optimize yörünge arasında Şekil 5'te görüldüğü gibi farklılıklar olacaktır. Burada yapılan hata, θ_{35} 'in optimizasyondan gelen



Şekil 5. MinIAQ-II robot bacağındaki optimizasyon algoritması kırmızı kesik çizgili yörüngeyi ortaya çıkarsa da, D noktası üçüncü boyutta olduğundan ve tasarım iki boyutta yapıldığından, üretim sonrası bacağın kinematik ilişkileri siyah düz çizgi ile gösterilen yörüngeye sahip olmuştur.

açı değeri iken, $\theta_{katlama}$ 'nın katlamada gerekecek tasarıma konulan açı olması ve D noktasının genelde üçüncü boyut düşünülmeden tasarımda H noktası gibi değerlendirilmesi ile oluşur.

B. İdeal Mekanizmadan Robot Bacığı Tasarımına Geçiş

Bu bölümde katlanmamış robot bacağı tasarımı için gereken katlama açısını önceden optimize edilmiş uzunlukları ve açısı bilinen dört-çubuk mekanizması kullanılarak bulunacaktır. BD , AC , CD ve DE bilinen bağlantı uzunluklarıdır. Buna ek olarak 3. uzuv ile 5. uzuv arasındaki sabit θ_{35} açısı da bilinmektedir. Ayrıca esnek bağlantılı bacak tasarımında tasarımcı DH ve HF uzunluklarını kendisi seçebilir. MinIAQ-II'de bu değerler sırasıyla 2.5 mm ve 2.0 mm olarak seçilmiştir. Amaç sahip olunan bilgilerle Şekil 3 üzerindeki sabit katlama açısı $\theta_{katlama}$ 'yı elde etmektir.

İlk olarak $\triangle DHF$ üçgeninde,

$$DF = \sqrt{DH^2 + HF^2} \quad (1)$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{HF}{DH}\right) \quad (2)$$

$$\gamma = 90^\circ - \delta \quad (3)$$

Devamında $\triangle DCH$ üçgenini kullanarak,

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{DH}{CD}\right) \quad (4)$$

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (5)$$

Bütünler açı özelliği kullanarak,

$$\theta_{36} = 180^\circ - \beta - \delta \quad (6)$$

Sinüs ve kosinüs kuralını $\triangle DEF$ üçgeninde kullanarak,

$$FE^2 = DE^2 + DF^2 - 2 \cdot DE \cdot DF \cdot \cos(\theta_{35} + \theta_{36}) \quad (7)$$

$$\frac{DE}{\sin(\phi)} = \frac{FE}{\sin(\theta_{35} + \theta_{36})} = \frac{DF}{\sin(\lambda)} \quad (8)$$

Buradan (7)'nin karekökü alınıp (8)'e koyulduğunda,

$$FE = \sqrt{DE^2 + DF^2 - 2 \cdot DE \cdot DF \cdot \cos(\theta_{35} + \theta_{36})} \quad (9)$$

$$\phi = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta_{35} + \theta_{36})}{FE} \cdot DE\right) \quad (10)$$

Son olarak bütünlük açısı özelliği ile,

$$\theta_{katlama} = 180^\circ - \phi - \gamma \quad (11)$$

olarak elde edilebilir.

Yukarıda yapılan işlemlerle ihmal edilmiş geometrik faktör artık hesaplamalara dahil edilmiş ve gerçek dört-çubuk mekanizması için gerekli olan sabit katlama açısı bulunmuştur.

C. Robot Bacığı Tasarımından İdeal Mekanizmaya Geçiş

Bu bölümde geometrik faktör kullanılmadan katlanmamış bacak tasarımına sahip olunduğu varsayılmıştır. Bu sebepten dolayı robot bacağının kinematik modellemesinde hata oluşacaktır. Aşağıda açıklanan yöntem kullanılarak kişi dört-çubuk mekanizmasını geometrik faktör göz alınmış şekilde bulabilir. Bu durum önceki bölümde (III-B) açıklanan yöntemin tersidir. Burada esnek bağlantılı mekanizmanın uzunlukları AC , CF , FE , DH , HF bilinmektedir. Ayrıca krank bağlantı uzunluğu BD ve sabit katlama açısı $\theta_{katlama}$ da bilinenler arasındadır. Amaç sahip olunan bilgilerle asıl dört-çubuk bar mekanizmasının boyutlarını bulmaktır.

İlk olarak $\triangle CDH$ üçgeninde,

$$\alpha = \arctan\left(\frac{DH}{CF - HF}\right) \quad (12)$$

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (13)$$

Devamında $\triangle DHF$ üçgenini kullanarak,

$$DF = \sqrt{DH^2 + HF^2} \quad (14)$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{HF}{DH}\right) \quad (15)$$

$$\gamma = 90^\circ - \delta \quad (16)$$

Bütünlük açısı özelliği kullanarak,

$$\theta_{36} = 180^\circ - \beta - \delta \quad (17)$$

$$\phi = 180^\circ - \theta_{fold} - \gamma \quad (18)$$

Sinüs ve kosinüs kuralını $\triangle DEF$ üçgeninde kullanarak,

$$\frac{DE}{\sin(\phi)} = \frac{FE}{\sin(\theta_{35} + \theta_{36})} = \frac{DF}{\sin(\lambda)} \quad (19)$$

$$DE = \sqrt{DF^2 + FE^2 - 2 \cdot DF \cdot FE \cdot \cos(\phi)} \quad (20)$$

(14), (18), (20)'de bulunanları (19)'nin içine konulduğunda,

$$\lambda = \arcsin\left(\frac{\sin(\phi)}{DE} \cdot DF\right) \quad (21)$$

Son olarak bütünlük açısı özelliği ile,

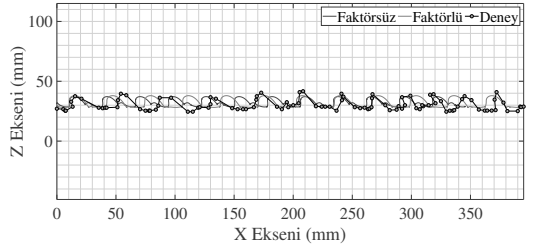
$$\theta_{35} = 180^\circ - \phi - \gamma - \theta_{36} \quad (22)$$

olarak elde edilebilir.

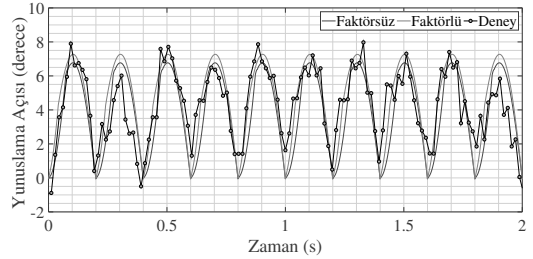
Yukarıdaki işlemler yapılarak asıl dört-çubuk mekanizmasının eksik olan CD , DE ve θ_{35} bulunmuştur. Bu işlem var olan bir miniyatür robot bacağının kinematik modellemesinde araştırmacılara yardımcı olabilir.

IV. GEOMETRİK FAKTÖRÜN HAREKETTEKİ ETKİSİ

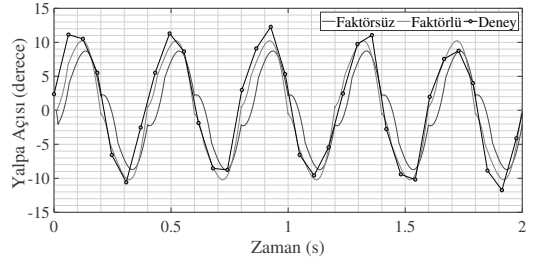
Bu bölümde geometrik faktörün kinematik yörünge üzerindeki önemini daha iyi göstermek için MinIAQ-II robotunun sistem dinamiği incelenecektir. Robotun dinamik simülasyonları için MATLAB platformunda altı serbestlik derecesine sahip, üç boyutlu rijit robot modeli oluşturulmuştur [10]. Model katlanmış bacak kinematikini, rijit robot dinamikini ve zemin-ayak etkileşimine dayanan temas kuvvetini birleştirip kullanmaktadır. Yapılan modellemede referans koordinat sistemi robotun geometrik merkezinde olup X eksen ileri ve geri yönü, Y eksen sağ ve sol yönü göstermektedir. Z eksen ise hareket yüzeyine dik olup yükseklik olarak tanımlanmıştır. Referans sistem ayrıca oryantasyonu gösteren euler açıları için de kullanılmıştır. Uzunlamasına eksen X eksen etrafında, enlemesine eksen Y eksen etrafında ve düşey eksen Z eksen etrafındadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6. (a) MinIAQ-II'nin ağırlık merkezinin X ve Z eksenindeki yörünge. Benzetim 2.5 Hz hızında, tırs türlü ilerleme ile beş saniye boyunca yapılmıştır.(b) Robotun iki saniyelik hareketi boyunca yaptığı yunuslama açısı. (c) Robotun iki saniyelik hareketi boyunca yaptığı yalpa açısı.

Yapılan deneyler ve benzetimlerde MinIAQ-II'nin ağırlık merkezinin yörüngesi, yunuslama açısı ve yalpa açısı kaydedilmiştir. Tüm deneyler ve benzetimlerde robot ileriye doğru 2.5 Hz hızında tırs ilerleme yapmaktadır. Robot üzerinde jiroskop veya akselometre gibi pozisyon/oryantasyon belirten sensörler olmadığı için deneysel sonuçlar çoklu kamera çekimlerinden elde edilmiştir.

MinIAQ-II'nin dinamik benzetimleri ve deney sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Her grafikte geometrik faktörün ihmal edildiği sistem, geometrik faktörün göz önüne alındığı sistem ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 6(a) robotun beş saniye boyunca ağırlık merkezinin yörüngesinin benzetimini göstermektedir. Yalpa ve yunuslama açıları (Şekil6(b) ve 6(c)) daha kolay okunabilmeleri için iki saniyelik sonuçları göstermektedir. Mavi renk ile gösterilen sonuçlar geometrik faktörün dikkate alınmadığı durumu, kırmızı renk ile gösterilen sonuçlar geometrik faktörün dikkate alındığı durumu ve yeşil noktalar kesiklik çizgiler deneysel sonuçları göstermektedir.

Şekil6'da elde edilen veriler kullanılarak faktörlü ve faktörsüz benzetim ile deney sonuçları karşılaştırılmış ve ortalama hatalar hesaplanmıştır. Faktörsüz benzetimde yunuslama açısının ortalama hatası %14.38 olup faktörlü benzetim için bu değer %13.35 bulunmuştur. Yalpa açısının faktörsüz benzetim için ortalama hata değeri %27.94 olup faktörlü benzetim için %11.91 olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere yalpa ve yunuslama açılarının ortalama hataları faktörlü benzetimde daha az çıkmıştır.

Sonuçlar üç durum için de geometrik faktörün dikkate alınmasıyla elde edilen benzetim sonucunun geometrik faktörün ihmal edilmesiyle elde edilen sonuçtan daha iyi şekilde deneysel sonuca uyduğuna göstermektedir.

Görüldüğü üzere modellerden elde edilen özellikle yunuslama ve yalpa açıları deney verilerine oldukça yakın olsa da iki model de tam olarak robotun ağırlık merkezinin konumunu ve hızını tam olarak belirleyememiştir. Bunun sebebi minyatür robotların dinamiklerini etkileyen hataların ve belirsizliklerin daha çok olmasıdır. Bu durum robotun deneylerdeki ortalama hızının deney süresince devamlı değişmesinden fark edilebilir. İdeal koşullarda hızın sabit olması beklenmektedir. Sürtünmenin yetersiz hesaplanması, kontrolörlerin yavaş tepkisi, robot üstünde sensör bulunmaması simülasyonların deneyle uyuşmama sebepleri olarak gösterilebilir.

V. SONUÇ

Bu çalışmada iki boyutlu bir tabaka olarak üretilip üç boyutlu geometriye katlanarak ulaşan MinIAQ-II robot bacağındaki üretim metodu sebebiyle oluşan geometrik parametrelerin bacak kinematiklerine ve robot dinamiklerine olan etkisi incelenmiştir. Parametrelerin ayak yörüngesi üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Sorununa çözüm yöntemleri ve nasıl robot bacağına uygulanacağı açıklanmıştır. Geometrik faktörün dikkate alındığı ve ihmal edildiği sistemlerin dinamik modelleri karşılaştırılmıştır. Modeller arasında fark fazla olmasa da geometrik faktörün kullanıldığı modelin deney sonuçlarına daha yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Geometrik faktörün robot modeline eklenmesi ile robot dinamik modellemesinin daha iyi tahmin edilmesini sağlamıştır. Yapılan deneylerde ve benzetimlerde robot düzgülü yüzeylerde

yürütülmüştür. Dinamik modellemenin bir sonraki aşaması olarak robotun pürüzlü yüzeylerdeki yürüyüşü incelenecektir. Bunun yanında değişen yüzey-ayak ilişkisinin harekete olan etkisinin de incelenmesi planlanmaktadır.

TEŞEKKÜRLER

Yazarlar Cem Karakadioğlu'na robot tasarımı ve deneyler üzerindeki kıymetli çalışmaları için teşekkürlerini sunarlar. Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından kısmen finanse edilmiştir (Araştırma Proje Numarası: 116E177).

KAYNAKÇA

- [1] O. Ozcan, A. T. Baisch, D. Ithier, and R. J. Wood, "Powertrain selection for a biologically-inspired miniature quadruped robot," in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2398-2405, IEEE, 2014.
- [2] R. S. Pierre and S. Bergbreiter, "Gait exploration of sub-2 g robots using magnetic actuation," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, pp. 34-40, Jan 2017.
- [3] J. M. Bustillo, R. T. Howe, and R. S. Muller, "Surface micromachining for microelectromechanical systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1552-1574, 1998.
- [4] J. Whitney, P. Sreetharan, K. Ma, and R. Wood, "Pop-up book mems," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 21, no. 11, p. 115021, 2011.
- [5] A. M. Hoover, E. Steltz, and R. S. Fearing, "Roach: An autonomous 2.4 g crawling hexapod robot," in *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 26-33, IEEE, 2008.
- [6] R. Wood, S. Avadhanula, R. Sahai, E. Steltz, and R. Fearing, "Micro-robot design using fiber reinforced composites," *Journal of Mechanical Design*, vol. 130, no. 5, p. 052304, 2008.
- [7] C. D. Onal, R. J. Wood, and D. Rus, "Towards printable robotics: Origami-inspired planar fabrication of three-dimensional mechanisms," in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 4608-4613, IEEE, 2011.
- [8] R. MacCurdy, R. Katzschmann, Y. Kim, and D. Rus, "Printable hydraulics: a method for fabricating robots by 3d co-printing solids and liquids," in *Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on*, pp. 3878-3885, IEEE, 2016.
- [9] M. Askari, C. Karakadioğlu, F. Ayhan, and O. Özcan, "MinIAQ-II: A miniature foldable quadruped with an improved leg mechanism," in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE, 2017.
- [10] M. Askari and O. Özcan, "Dynamic modeling and gait analysis for miniature robots in the absence of foot placement control," in *2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, Accepted.

İnsansı Robot Kafası Mekatronik Tasarımı: MUDA

Atakan Zeybek, Mert Can Olgar, Umut Can
Salman, Doğan Oruç, Bülent Bölalt
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye

atakanzeybek90@gmail.com, olgarmert@gmail.com,
salmanumutcan@gmail.com, doganoruc98253@gmail.com,
bolatbu@itu.edu.tr

Şeniz Ertuğrul
İzmir Ekonomi Üniversitesi
İzmir, Türkiye
sertugrul@ieu.edu.tr

Öz — Bu belgede, insansı robot için kafa tasarımı anlatılmaktadır. Bu tasarımda, bir kadına ait kafa boyutlarının ortalamasından yararlanılmıştır. Ayrıca I-TECH insansı robotunun işlevini yerine getirebilmesi için MUDA'nın sahip olması gereken en düşük serbestlik derecesi belirlenerek tasarım gerçekleştirilmiştir. MUDA'nın tasarımında göz önüne alınan en önemli parametre kompakt olmasıdır. İnsansı robot kafasının elektronik ve kontrol sistemlerinin tasarımı robotun görevlerini uygun biçimde yerine getirebilmesi için tasarlanmıştır. Ayrıca bunlara ek olarak iş parçasının asarlanması, takibinin yapılması ve kamera eksenine olan mesafesinin belirlenmesi üzerine de çalışma yapılmıştır.

Yapılan kafa tasarımının prototipi düşük maliyetli olacak şekilde üretilmiştir. Üretim yöntemi olarak üç boyutlu yazıcı ve hazır malzemeler kullanılmıştır. Üretilen prototip üzerinde gerekli testler yapılarak tasarımın uygunluğu sınanmıştır.

Anahtar Kelimeler— insansı robot kafası, eş zamanlı hareket kontrolü, makine görüşü, nesne takibi.

I. GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar birçok insansı robot geliştirilmiştir. Bu robotlar birbirinden farklı görevlere ve dolayısıyla da farklı teknolojilere sahiptirler. Geçmişte yapılan insansı robot çalışmaları WABOT-2 [1] gibi piyanist robotlar görülürken günümüz çalışmalarında daha çok insan-robot etkileşimi önem kazanmaktadır. Yakın dönemdeki çalışmalarda, insansı robotlar üst düzey etkileşim yeteneği kazanmışlardır. Karşımıza çıkan bu çalışmalardan biri de NADINE [2] isimli sosyal insansı robottur.

Bu çalışmada, işçi olarak kullanılması planlanan insansı robot I-TECH için kafa tasarımı üzerinde durulmaktadır. Bu kafa tasarımı insan anatomisinin [3] genel özelliklerinden kopmadan ve aynı zamanda verilen görevleri yerine getirebilecek minimum mekanik kısıtlara göre tasarlanıp, üretilmiştir. Kafa boyutlarının belirlenmesi için de bir kadının kafa boyutlarının ortalamasından [4][5] yararlanılmıştır. Bir kadının kafa boyutlarının temel alınmasının sebebi psikolojik etkilerdir.[6]

Mekanik tasarımının yapılabilmesi için geniş bir literatür taraması yapılmıştır. NAO[7], iCub[8] ve WE-4[9] gibi önceden yapılmış olan projeler incelenmiştir. Buradan elde edilen bilgiler ve robotumuzun isterileri ışığında MUDA'nın mekanik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımın en önemli amacı görüş sistemini taşıyacak ve görüntü takibi yapabilecek en az serbestlik derecesine sahip olması ve kontrolünün kolay olmasıdır. Yapılan tasarımın hafif olması ve imalatının kolay olması da önem taşımaktadır.

Yapılan tasarımın prototipin üretilmesinden önceki adım yapısal analizdir. Yapısal analiz kısmında ABAQUS programından yararlanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda gerekli düzenlemeler ile prototip imalatı safhasına geçilmiştir. İmalat safhasında üretimin hızlanması ve aynı zamanda maliyetlerin azaltılması esas alınmıştır. Bu sebeple parçaların bir kısmında üç boyutlu yazıcı ile üretim yapılmış bazı parçalarda ise hazır plakalar uygun boyutlarda kesilerek montajları yapılmıştır.

İnsansı robot kafasının en önemli görevlerinden biri görüş ve diğer algılayıcı sistemleri taşımasıdır. Bunun yanı sıra insansı robotun kontrol sistemine de uygunluğu göz önünde tutulmuştur.

Kontrol sistemi tasarımında MATLAB programından yararlanılmıştır. İlk olarak insansı robot kafasının modeli [10][11] çıkarılmıştır. Sonrasında kontrol sistemi tasarımı yapılmış ve robot kafasının istenilen konumlara hareketi sağlanmıştır. Buna ek olarak yörünge planlaması [12][13] yapılarak kafa hareketlerinin daha gerçekçi olması hedeflenmiştir. İş uzayına giren parçaların algılanabilmesi, takibinin yapılabilmesi için belirlenen elektronik elemanlar ile çalışmalar yapılmıştır. İleriki çalışmalarda iş parçalarının kamera eksenine olan mesafesinin tayini yapılacak [14] ve homojen dönüşümler [15] ile kolun kontrol edilebilmesi kol eksenlerine gerekli olan parça koordinatlarının elde edilmesi sağlanacaktır.

Tüm tasarımlar ve prototip imalatı tamamlandıktan sonra test aşamasında kafa tasarımı uygun görülen konumlar için sınanmıştır.

Bu bildirinin devamında şu konular anlatılacaktır: Bölüm II: Tasarım, Bölüm III: Analizler, Bölüm IV: Kontrol Sistem Tasarımı, Bölüm V: Prototip, Bölüm VI: Sonuç.

I. TASARIM

A. Tasarım Parametreleri

Kafanın dış boyutlarını belirlemek için çeşitli kaynaklardan alınan veriler derlenmiş ve bu bilgiler doğrultusunda gerekli tasarım parametreleri oluşturulmuştur. Bu parametrelerden en önemlisi, MUDA'nın kullanılması amacının endüstriyel uygulamalar olması sebebiyle, kafanın kaç serbestlik derecesine sahip olması gerektiğidir. Bahsedildiği üzere insansı robot boyun eklemi için küresel mafsallı benzetimi yapılırsa, boyunda üç adet serbestlik derecesi mevcuttur. Bu serbestlik dereceleri de üç eksendeki dönmeyle temsil etmektedir. MUDA'nın, görüş alanı içindeki

nesnelerin koordinatlarını kendi sabit eksen takımına göre belirlemesi beklendiği için boyun ekleminde dönme eksenini ihmal edilerek tasarımın iki serbestlik derecesine göre yapılmasına karar verilmiştir (Şekil 1). Çünkü bahsedilen eksenin, ne robotun görüş alanına ne de cisimlerin uzaklığını algılamada bir etkisi vardır.

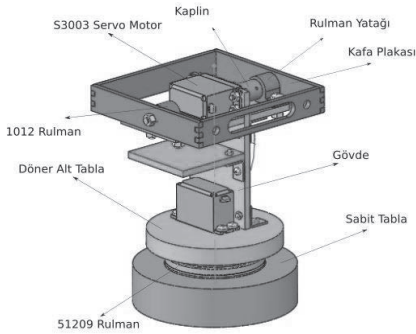


Şekil 1: MUDA Serbestlik Eksenleri

Bahsedilen tasarım kistaslarının dışında, robotun kafa açısının hassas bir şekilde bilinmesi ve kontrol edilmesi, koordinatı öğrenilmek istenen cisimden alınacak bilginin doğruluğunu etkileyeceği için tasarımda buna uygun bir motor seçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, hassas açısal konum değerlerini sağlayacak motor, doğru akım servo motor olarak seçilmiştir. Bahsedilen motorun spesifik değerleri için ileriki bölümlerdeki dinamik analizlere bakılabilir.

B. Genel Konstrüksiyon

MUDA'nın genel dış görünüşü Şekil 2'de görülebilir. Temel boyutlar olarak ortalama bir insanın kafa boyutlarında olması gerektiği için bütün konstrüksiyon buna göre tasarlanmıştır.

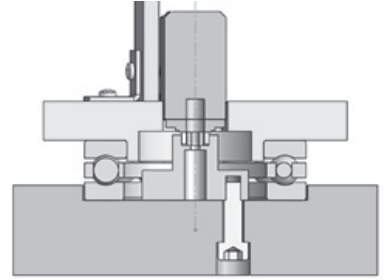


Şekil 2: MUDA Perspektif Görünümü

Motorların dönme eksenleri, ortalama bir insanın kafasındaki dönme eksenleriyle çakışacak şekilde yerleştirilmiştir. Hali hazırda iş tanımına uygun bir kamera bulunmadığı için, üst kısımdaki uç eyleyicinin tasarımı herhangi bir kameranın oturtulmasına uygun olacak şekilde boş bırakılmıştır. Şekil 2'de görüldüğü üzere MUDA'nın dış doku giydirmesi yapılmamış, gerekli kameralar takıldıktan sonraki son hali için bir tasarım yapılarak tasarıma eklenecektir.

C. Tasarım Detayları

Boyundaki ilk dönme eksenini (sapma), yer çekimi ivme vektörüne çakışık bir eksen olduğu için ve herhangi bir radyal yüklem altında olmadığı için buranın yataklamasında 51209 eksenel rulmanı kullanılmıştır. Üst taraftaki yunuslama eksenini döndürecek olan motorun milleri için ise, yer darlığı ve yalnızca radyal yataklama gereksiniminden dolayı HK 1012 rulmanı kullanılmıştır. Buradaki gerekli mil-motor bağlantıları geleneksel kaplin parçası ile sağlanmıştır. Tasarıma rijitlik ve montaj kolaylığı sağlaması amacıyla Şekil 3'te görülen detay kesit görünümünde, kafanın gövdeye kolayca bağlanmasını ve motorun en uygun pozisyonda kalmasını sağlamak amacıyla tek bir bağlantı parçası tasarımı yapılmıştır.



Şekil 3: Sapma Hareket Bağlantısının Kesit Görünümü

Bu parça için, ayrı ayrı makine elemanı olan flanş ve kaplinden oluşan bir yapı olduğu söylenebilir. Bahsedildiği üzere, MUDA'nın üzerinde iki adet motor ve bu motorların kontrol edildiği bir sistem mevcuttur. Kafanın ilerideki amaçları sağlayabilmesi adına, mobil bir sistem olacağı söylenebilir. Böyle bir sistem için herhangi bir sabit sisteme kablo ile bağlantı söz konusu olamayacaktır. Bu nedenle motorların ve genel sistemin kontrolü yine kafanın kendi içerisinde yer alması gerektiği için gömülü elektronik bir sisteme ihtiyaç vardır. Bu ihtiyacın konstrüksiyona yansıyan yanı ise gerekli kontrol ve sürücü kartlarının (hatta ileride eklenme ihtimaline karşılık diğer çevre birimlerin) bağlanmasını ve sabit durmasını sağlayacak bir yuva tasarımıdır. Alt taraftaki motorun hemen üstünde yer alan raf, bu amaca hizmet etmesi amacıyla tasarıma eklenmiştir. İleride çeşitli çevre birimlerinin eklenme ihtimaline karşılık bu aşamada gerekli yuva ve bağlantılar tasarıma eklenmemiş, yalnızca yerleri belirlenmiştir. Bunların dışında, üst kısımdaki motorun eksenini ve uç eyleyicinin dönme eksenini çakıştırmak amacıyla gerekli rulman yatağı tasarımı yapılmıştır.

II. ANALİZLER

A. Yapısal Analiz

MUDA sistemi CAD/CAE tabanlı programlar yardımıyla tasarlanmıştır. CAD destekli olan bu programlardan SOLIDWORKS kullanılmış ve Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), ABAQUS programı üzerinden yapılmıştır. Analizler esnasında parçalara gelebilecek en yüksek yükler düşünülmüş ve emniyet katsayısı 1.8 seçilmiştir. Analizlerde

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\cos\theta_2\sin\theta_1 & \sin\theta_1\sin\theta_2 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1\cos\theta_2 & -\cos\theta_1\sin\theta_2 \\ 0 & \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}$$

olarak belirtilmiştir.

İleri geometrik modelin eldesinden sonra, kontrol sürecinde kullanılmak üzere ters geometrik modele ihtiyaç vardır. Ters geometrik modelin elde edilmesi için, uç eyleyicinin sabit referans eksen takımına göre açılal konumunun benzetimi olarak Euler dönme matrisi kullanılmıştır. Bu benzetimin sonucu olarak;

$$\cos\theta_2 = \cos\theta \Rightarrow \theta = \theta_2$$

$$\sin\theta_1\sin\theta_2 = \sin\theta\sin\varphi \Rightarrow \varphi = \theta_1$$

denklemleriyle ifade edilmiştir.

Gerekli geometrik modellerden sonra Jacobian matrisinin ilk hali elde edilmiştir. Türetilen bu Jacobian matrisi 6x2 dir. Robotun iki dönme eksenine olan w_x ve w_z açılal hız eksenleri dışındaki eksenler elenip, Jacobian matrisi 2x2 şekline getirilmiştir. İleri kinematik modelin ifadesi olarak jacobian ifadesi MUDA için;

$$J = \begin{bmatrix} l_2 \cos\theta_1 \sin\theta_2 & l_2 \cos\theta_2 \sin\theta_1 \\ 0 & -l_2 \sin\theta_2 \end{bmatrix}$$

olarak verilebilir. Jacobian matrisinin 2x2 matrise düşürülmesinden sonra artık ters kinematik model için tersi alınabilir. Ters kinematik modeli temsil eden ters Jacobian matrisi;

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} 1/(l_2 \cos\theta_1 \sin\theta_2) & (\cos\theta_2 \sin\theta_1)/(l_2 \cos\theta_1 \sin\theta_2)^2 \\ 0 & -1/(l_2 \sin\theta_2) \end{bmatrix}$$

şeklinde ifade edilebilir.

III. KONTROL SİSTEM TASARIMI

MUDA insansı robot kafasının yunuslama ve sapma hareketleri, tasarım içerisinde bulunan iki ayrı servo motor ile sağlanmaktadır. Birinci servo motor yunuslama hareketinin yapılmasında görevli olup, motor destek ve kafa plakası arasında bulunmaktadır. Kafa plakasının yere paralel hali 0° derece olarak kabul edildiği takdirde +30° ve -30° arasında hareket edebilmektedir. İkinci servo motoru ise sapma

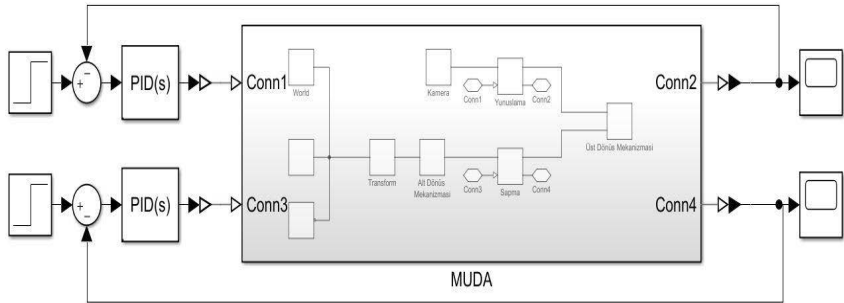
hareketinin yapılması için kullanılmış olup, alt tertibat ile temel parça arasında bulunmaktadır. MUDA'nın karşıya bakan hali 0° olarak kabul edilirse +90° ve -90° dereceleri arasında hareket edebilmektedir. Tasarım esnasında MUDA'nın hareket aralıkları ortalama bir insanın boyun hareketlerine dayandırılarak saptanmıştır.

Servo motorların hareketlerinin düzgün bir şekilde kontrol edilebilmesi için PID kontrol sistemi kullanılmıştır. Sistemin kalanından bağımsız olarak, servo motorlar üzerinde oluşacak sürekli hatayı azaltmak için I terimi, insansı hareketin doğasından çıkmamak için de aşmayı azaltmak amaçlı D terimi kullanılmıştır.

Kontrol sisteminin tasarlanması için MATLAB bağlantılı çalışan ve simülasyon programı olan SIMULINK kullanılmıştır. Kontrol sisteminin tasarımı için öncelikle MUDA'nın blok diyagramının elde edilmesi gereklidir ancak sistemin fazla karmaşık olması sebebiyle manuel bir şekilde blok diyagramları oluşturulamamaktadır. Bu nedenle SOLIDWORKS ve SIMULINK arasında bağlantı sağlanarak, blok diyagramının doğru bir şekilde elde edilmesi sağlanmıştır. Bu bağlantı MATLAB'ın bir alt programı olan SIMSCAPE MULTIBODY sayesinde oluşturulmuş ve CAD tasarımı sistemi temsil eden blok diyagramına dönüştürülmüştür.

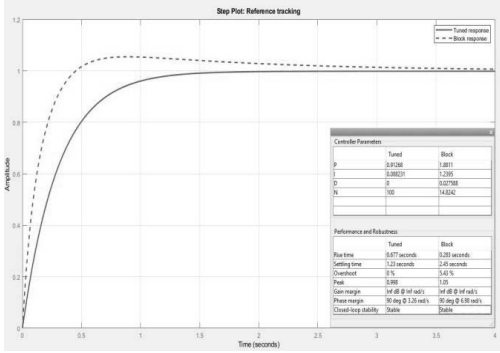
Şekil 7'de belirtildiği üzere sapma ve yunuslama blokları servo motorları temsil etmektedir. Servo motorun içerisinde bulunan optik kodlayıcı sayesinde motorun anlık konumları okunarak kapalı çevrim içerisinde PID kontrol ile konum kontrolü yapılabilmektedir.

Bunlara ek olarak mekanizmanın hareketlerinin bir bütün olarak sağlanabilmesi için yani kontrol edilen iki serbestlik derecesindeki hareketin eş zamanlı olması için yörünge planlaması da yapılmıştır. Yörünge kontrolü için üçüncü dereceden fonksiyon kullanılarak her iki hareketin senkronizasyonu sağlanmıştır.



Şekil 7: Kontrol Sistem Tasarım

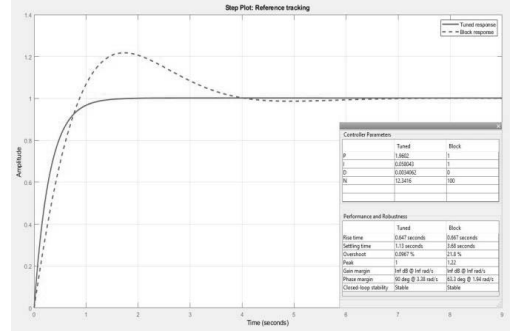
SIMULINK üzerinden doğru PID değerlerini bulmak için ayarlama yapılmıştır. İnsan bedeninin hareketine yakın bir hareket elde edilebilmesi için aşma minimumunda tutulmuştur. Aynı zamanda sinyal verildikten sonra sistem cevabının çok geç ortaya çıkmasına engel olmak için yükselme zamanı da olabildiğince düşük tutulmaya çalışılmıştır. Şekil 8'de görüldüğü üzere yunuslama hareketinin kontrolü için iki tane grafik bulunmaktadır. Blok cevabı grafiği PID değerlerinin sırasıyla 1,1,0 olarak alınmasıyla ortaya çıkan cevabı temsil etmektedir. Tune response ise PID katsayılarının sistemden beklenen çıktıya göre ayarlanmış halidir. Şekil 8'de görüldüğü üzere P katsayısı 0.9127, I katsayısı 0.0882, D katsayısı ise 0'dır. Yunuslama hareketini sağlayan servo motor için PI kontrollör uygun bir şekilde kullanılmaktadır. Aşma değeri istenildiği şekilde %0, yükselme zamanı 0.677 saniye ve oturma zamanı 1.23 saniye olarak bulunmuştur. Bu değerler şekildeki tabloda görüldüğü üzere blok cevabı değerlerinin çok daha iyi elde edilebilmektedir. Aynı zaman kapalı çevrim sistem kararlı durumdadır.



Şekil 8: Yunuslama Hareketi İçin PID Ayarlaması

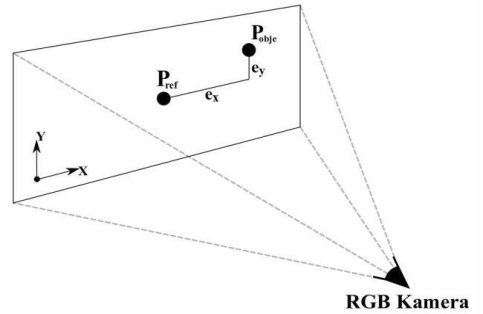
PID katsayıları ayarlama aşamaları, sapma hareketini sağlayan servo motor için de aynı şekilde uygulanmıştır. Görüldüğü üzere elde edilen Ayarlanmış cevap, blok cevabından daha iyi bir cevaptır. Sapma için uygun kontrollör PID olarak düşünülmüştür. Şekil 9'da görüldüğü üzere P katsayısı 1.96, I katsayısı 0.058 ve D katsayısı 0.0034 olarak elde edilmiştir. Aşma değeri istenildiği şekilde %0.1, yükselme zamanı 0.647 saniye ve oturma zamanı 1.13 saniye olarak bulunmuştur. Hareketin toplam yapılma süresi 2.5 saniye olarak düşünüldüğü için yükselme ve oturma zamanları sistem hareketine uygun olarak elde edilmiştir. Ayrıca sistem kapalı çevrimde kararlıdır.

Oturma zamanları ve şekilleri ayrıntılı şekilde simülasyon videosunda [16] görülebilmektedir. Sistem verilen basamak girişi için istenilen çıkışı yüksek bir doğrulukta sağlayabilmektedir.



Şekil 9: Sapma Hareketi İçin PID Ayarlaması

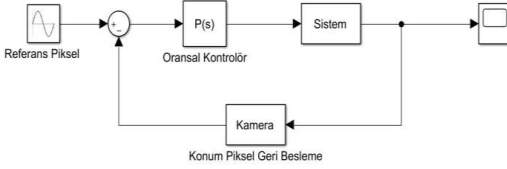
MUDA'ya eklenen RGB kamera ile robotun etrafındaki nesnelerin görsel bilgilerini alması sağlanmıştır. Kamera yerleşiminden sonra kafanın bir objeye takip etmesi denenmiştir. Bu çalışma, daha sonra sonra objelerin derinlik bilgilerini almak üzere kurulacak sisteme bir hazırlık olması amacıyla yapılmıştır. Görüntü ve mesafe algılama arasında trigonometrik hatalar oluşmaması için derinlik algılaması yapılmak istenen nesne, robotun görüş alanının ortasında olmalıdır. Bunu sağlamak üzere bahsedildiği gibi görüntü geribeslemeli bir kontrol sistemi kurulmuştur. Bu sistemin temelinde, P_{ref} görüş alanının iki eksenindeki orta referans noktası ve P_{obje} takip edilmek istenen o anki konumu olarak belirtilmiştir (Şekil 10). Objenin tamamını bir nokta olarak belirlemek üzere renk ayrımı algoritması kullanılmış ve benzer renk piksellerinin orta noktası cismin o anki konumunu belirteceği öngörüştü yapılmıştır.



Şekil 10: Makine Görü Şeması

Sistemde daha önce bahsedildiği gibi iki eksen takımında hareket olması nedeniyle, görüş alanı içindeki referans ve obje konumları arasındaki hata sinyali, x eksenindeki hata e_x ve y eksenindeki hata e_y olarak iki ayrı serbestlik derecesini eyleme amaçlı ikiye ayrılmıştır. Referans ve algılayıcı sinyallerinin farkından oluşan hata sinyali oransal katsayı ile çarpılarak sistemin girişine iletilmiştir (Şekil 11). Burada sadece oransal kontrollörün kullanılmasının nedenleri arasında, sistemin yavaş hareket etmesinden dolayı aşma olmaması ve sistemin sürekli hal hatası içerecek bir

bileşeninin bulunmaması sayılabilir. Yapılan bu kontrol sonucunda bilgisayarlı görü sistemi MUDA'ya kazandırılmıştır.[17]



Şekil 11: Makine Görüşü Kontrol Şeması

IV. PROTOTİP

A. Elektronik

İnsansı robot kafası MUDA oluşumunda kendi kartı üzerinde mikro denetleyici barındıran Arduino Nano kullanılmıştır. Arduino mikro denetleyicilerinin aynı işlevi sağlayabilecek birden fazla çeşidi olmakla beraber konstrüksiyon boyutlarına en uygun olan seçilmiştir. Konstrüksiyon üzerinde Arduino Nano için bir raf oluşturulmuş, bu sayede elektronik aksamı uygun bir yapı oluşturulmuştur. Arduino Nano kullanımının en önemli sebeplerinden biri mikro denetleyiciler için gerekli olan programlayıcıya ihtiyaç duymamasıdır. MUDA için gerekli olan PID kontrolcü Arduino derleyici içerisinde programlanabilir ve sisteme kolayca entegre edilebilir. İçinde bulundurduğu farklı kütüphaneler ile MUDA'nın kontrolü için oluşturulan algoritma, uyumluluğu sayesinde tasarımın programlanabilirliğini arttırmaktadır. Ayrıca hareket sağlayıcısı servo motorlar ile uyumlu çalışabilmesi de tasarım için uygunluğunu sağlamıştır. Prototip aşamasında denenmemiş olsa da farklı sensörlerle çalışmaya uygunluğu sayesinde tasarımın hayata geçirilirken gerekebilecek veya eklenebilecek modüler birimlerin tasarıma entegre edilebileceği göz önünde bulundurulmuştur. Arduino Nano'nun çevre birimlerle uyumlu çalışma durumu da göz önüne alındığında, tasarım kriterlerini yerine getirecek elektronik birim olarak prototipe ve devamında tasarımın son haline eklenmesi uygun bulunmuştur.

Yunuslama ve sapma hareketlerini oluşturmak için sisteme uyumlu servo motorların kullanılması uygun görülmüştür. Motor seçimi yapılırken dinamik benzetimde elde edilen verilerden yararlanılmıştır. İstenilen değerlerde birçok motor bulunmakla beraber bu seçenekler içinde kontrol sistemiyle uyumluluk, maliyet, konumun ve hız hassasiyetleri gibi hususlar göz önüne alınarak gerekli motor seçimi yapılmıştır. Benzer tork değerlerini sağlayabilecek servo motorlara göre konum ve hız hassasiyeti avantajına sahip olan Futaba S3003, prototip test aşamalarında da gözlemlendiği üzere insansı robot kafası MUDA'nın iki ekseninde aynı zamanlı hareketini sağlamakla beraber insan yapısına benzer şekilde yumuşak geçişlerin de ortaya konmasına olanak tanımıştır.

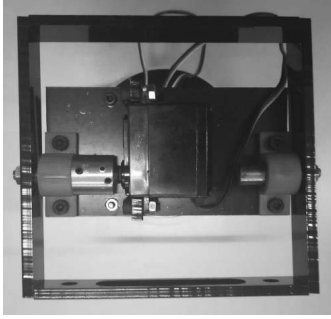
B. Üretim ve Montaj

İnsansı robot kafası MUDA'nın işlevini yerine getirip getiremediğini gerçeklemek ve üzerinde tasarım testlerini yapabilmek için bire bir boyutta prototip imal edilmiştir. Bu prototip, tasarımda kullanılması planlanan malzemeler yerine maliyet açısından daha avantajlı olacak ve istenilen sonuçların alınmasını engellemeyecek şekilde farklı malzemeler üretilmiştir. Prototip yapılımasının amacı tasarımın çıktısının alınmadan önce istenilen sonucun elde edilebileceğini görmektir. Prototipin perspektif görünümü Şekil 12'de yer almaktadır.



Şekil 12: MUDA Perspektif Görünümü

Hareket aktarımı gerçekleştirmesi için flanş, konstrüksiyona uygun olarak tasarlanıp üç boyutlu yazıcı ile oluşturulmuştur. Motorları üstünde barındıran ve konstrüksiyonun iskeletini oluşturan kısım mekanik dayanımı yüksek ve işlenebilir bir malzeme olan pleksiglas ile oluşturulmuştur. Tek parça halinde imal edilemeyeceği için lazer kesim yöntemiyle dört ayrı parçadan oluşturulup bağlantı elemanları ile birleştirilerek ortaya çıkarılmıştır. Şekil 13'te görüldüğü üzere yunuslama hareketinin sağlanabilmesi adına motor çıkış milinin uç kısmını sabitlemek için yeni bir kaplin tasarlanmış ve pirinç malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Yunuslama hareketini aktaracak miller ise alüminyum malzemeden işlenerek oluşturulup rulman ile sabitlenmiştir. Yunuslama hareketi için önemli unsurların başında gelen servo motor ve milin eksenlenmesi için rulmanın yerleştirileceği rulman yatağı tasarlanmış olup bu parça da üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. MUDA prototipinin üretim sürecinde birden fazla imalat metodu kullanılarak hayata geçirilmeye elverişli olduğu görülmüştür.



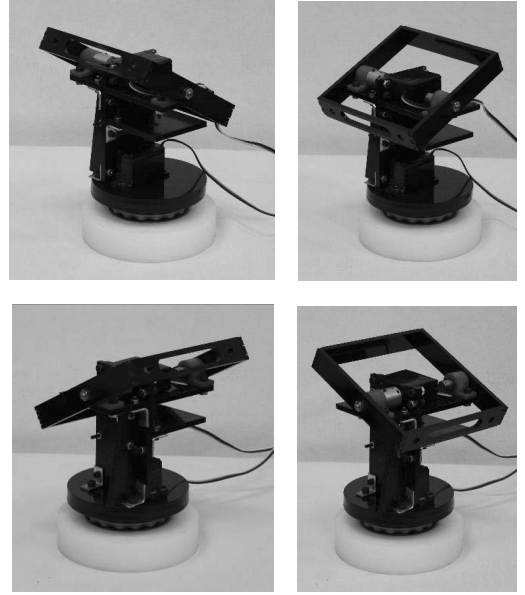
Şekil 13: MUDA Üst Görünüm

C. Test

MUDA'nın yunuslama ve sapma hareketlerini gerekli açı koşullarıyla gerçekleştirebilme yeteneğini görmek üzere prototip oluşturulduktan sonra test aşamasına geçilmiştir. Sınır değerleri de göz önünde bulundurularak rastgele belirlenen birçok açı değeri için prototip teste tabii tutulmuştur ve insansı robot kafası MUDA'nın iki eksende eş zamanlı hareketi yapabildiği gözlemlenmiştir.

Test aşamasında hareketlerin gerçekleştirilmesinin yanı sıra konstrüksiyonun çalışma sırasında fiziksel durumu da incelenmiştir. Prototipin çalışması sırasında sistemin kararlı olup olmadığı önem arz ettiğinden dikkatle gözlemlenip gerekli mekanik ayarlamalar yapılmıştır. Çeşitli test değerleriyle denemeler yapıldıktan sonra yunuslama hareketinin uç değerleri olan -30° ve $+30^\circ$ için sapma değeri 45° sabit tutularak prototip testi son aşamada yapılmıştır. Şekil 14'te prototipin test aşamasında yunuslama ve sapma sırasıyla sınır değerler $(-30^\circ, 45^\circ)$ $(-30^\circ, -45^\circ)$ $(30^\circ, 45^\circ)$ $(30^\circ, -45^\circ)$ sisteme giriş olarak verilerek elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.[18]

Bilgisayar üzerinden girilen farklı açı değerlerini sağladığı görülen insansı robot kafası MUDA'nın son olarak obje takibini yapabilme yeteneği teste tabii tutulmuştur. Renk algılama ile obje takibi için uygun algoritma oluşturulmuş ve entegre çalışabilen Processing programı ile işleme koyulmuştur. Bu noktada etrafına göre kolay ayırt edilebilmesi için testin yapıldığı ortamda bulunmayan renkte bir nesne seçilmesine karar verilmiştir. Ayrıca orta nokta takibi yapılması istenildiği için geometrisi düzgün ve sürekli bir nesne seçilmesi gerektiği de düşünülmüştür. Bu anlamda test kırmızı dikdörtgen bir levha ile yapılmıştır. Test aşaması için ayrıca harici kamera yerine bilgisayar kamerasından faydalanılmıştır.[17]



Şekil 14: Sınır Değer Görüntüleri - $(-30^\circ, 45^\circ)$
 $(-30^\circ, -45^\circ)$ $(30^\circ, 45^\circ)$ $(30^\circ, -45^\circ)$

V. SONUÇ

İnsansı robot kafası MUDA bütün detaylarıyla tasarlanıp prototipi üretilmiştir. Tasarım amaçları üstünde test edilmiştir ve görevler başarıyla yerine getirilmiştir. Gerekli yataklamalarla istenilen dönüş performansı göstermiştir. Kontrol sistemi tasarımı sayesinde rengi belli olan bir nesnenin açısal takibi gerçek zamanda yapılabilmiştir. Ayrıca oluşturulan kontrol sistemi sayesinde görüntü algılamadaki ve motor konumlarındaki geri besleme sistemleri birleştirilmiştir.

İleriki çalışmalarda, MUDA'nın sahip olduğu kameralara derinlik içeriği eklenip istenen nesnenin kendi sabit eksen takımına göre uzaydaki koordinatları çıkartması hedeflenmiştir. Yine bu sistem ile birlikte bir robot eyleyicisinin, MUDA'dan alınan koordinat bilgileriyle gerekli işlemleri yapması ve etrafıyla senkronize olması eklenecek özellikler arasında sayılabilir. Tasarımın statik ve dinamik rijitliğinin artırılması adına da gerekli parçaların değişimi yapılabilir. Bu parçalara daha yüksek tork ve hassasiyette motorlar ile yüksek çözünürlüklü kameralar örnek verilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK BİDEB 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri programı kapsamında destek almaya hak kazanmıştır. Sağlanan destek için TÜBİTAK'a ve sanayi desteği için Altınay Robot Teknolojileri AŞ.'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] Sugano, Shigeki, and Ichiro Kato. "WABOT-2: Autonomous robot with dexterous finger-arm--Finger-arm coordination control in keyboard performance." Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 4. IEEE, 1987.
- [2] Thalmann, Nadia Magnenat, Li Tian, and Fupin Yao. "Nadine: A social robot that can localize objects and grasp them in a human way." Frontiers in Electronic Technologies. Springer, Singapore, 2017. 1-23.
- [3] Hillenbrand, Karsten Berns, Carsten, and Krzysztof Mianowski. "The Mechatronic Design of a Human-like Robot Head."
- [4] Gordon, Claire C., et al. Anthropometric survey of US Army personnel: Summary statistics, interim report for 1988. ANTHROPOLOGY RESEARCH PROJECT INC YELLOW SPRINGS OH, 1989.
- [5] Lee, Wonsup, et al. "A 3D anthropometric sizing analysis system based on North American CAESAR 3D scan data for design of head wearable products." Computers & Industrial Engineering 117 (2018): 121-130.
- [6] Hashimoto, Takuya, et al. "Development of the face robot SAYA for rich facial expressions." 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. IEEE, 2006.
- [7] Gouaillier, David, et al. "Mechatronic design of NAO humanoid." 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2009.
- [8] Beira, Ricardo, et al. "Design of the robot-cub (icub) head." Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.. IEEE, 2006.
- [9] Miwa, Hiroyasu, et al. "Development of a new human-like head robot WE-4." IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Vol. 3. IEEE, 2002.
- [10] Mansuer, Rachid, "Robot Modelling and Kinematics", Da Vinci Engineering Press, Boston, 2006.
- [11] Bayraktaroğlu, Zeki Yağız, "Robot Teknolojisine Giriş: Matematiksel Modelleme", Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık, İstanbul, 2018.
- [12] Bingül, Zafer, Küçük, Serdar, "Robot Dinamiği ve Kontrolü", Birsan Yayınevi, İstanbul, 2008.
- [13] Lewis, Frank L., Dawson, Darren M., Abdallah, Chaouki T., "Robot Manipulator Control Theory and Practice, 2. Baskı, Marcel Dekker", USA, 2004.
- [14] Niku, Saeed Benjamin, "An Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications", 2. Baskı, John Wiley & Sons, USA, 2011.
- [15] Angeles, Jorge, "Fundamentals of Robotic Mechanical Systems", 4. Baskı, Springer, Switzerland, 2014
- [16] https://drive.google.com/drive/folders/1BMJgvgc1Bq9Aoh9VtvK_ekT4VV0iyjQm?usp=sharing
- [17] <https://youtu.be/TVQ1quEblg>
- [18] <https://drive.google.com/drive/folders/1bOlTltVi0Qbqx87P-B3WRRUd6-s8phD?usp=sharing>

İki Eksenli Gimbal Sistemlerinin Benzetiminde Doğrusal Olmayan Sürtünme Etkilerinin Tanılanması

A. Furkan Güç*†, Zafer Yumrukçal*, Onur Özcan†,

*Savunma Sistem Teknolojileri Sektör Başkanlığı, ASELSAN A.Ş., Ankara, Türkiye

Email: {afguc, zyumrukcal}@aselsan.com.tr

†Makine Mühendisliği Bölümü, Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Email: {furkan.guc, onurozcan}@bilkent.edu.tr

Özetçe—Hassas konumlandırma, hız takibi ve stabilizasyon gibi yeteneklere sahip olan iki eksenli gimbal sistemlerinin hareketleri esnasında doğrusal olmayan sürtünme etkileri nedeniyle, hareketin doğruluğu ve sistem performansı düşmektedir. Bu sistemlerde, yüksek performans gösterebilmek adına sürtünme etkilerinin yüksek doğrulukla modellenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Sistemler için uygun modelin ve tanılama metodunun seçilmesi, hem model doğruluğu hem de uygun kullanım senaryolarının bulunması için büyük öneme sahiptir. Bu bildiride, seçilen iki eksenli gimbal sistemi sürüş hattı için uygun model ve tanılama metodları karşılaştırılmıştır. Uygunluğu değerlendirilen modeller ve tanılama metodları kullanılarak gerçek sistem verileri üzerinde parametre kestirimi algoritmaları uygulanmış, elde edilen modeller sistemlerin benzetim ortamında gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılmıştır.

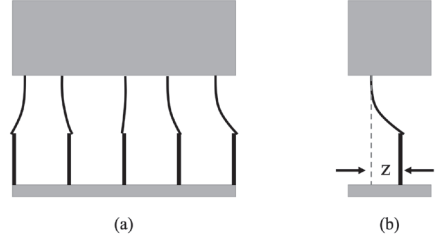
Anahtar Kelimeler—Benzetim, Bozucu Etki, Dinamik Sistemler, Gimbal, Kontrol, Modelleme, Sistem Tanılama, Sürtünme

I. GİRİŞ

İki eksenli gimbal sistemlerinin hassas konumlandırma ve stabilizasyon görevlerini yüksek performans ile gerçekleştirebilmeleri için, sistem üzerine etki eden bozucu etkilerin en aza indirilerek belirsizliklerin azaltılması gerekmektedir. Sistemlerin dinamik hareketleri esnasında sürtünme etkileri, iki eksenli gimbal sistemlerinin sürüş hatlarında karşılaşılan doğrusal olmayan bozucu etkiler arasında önde gelmektedir. Sadece gimbal sistemlerinde değil, çoğu dinamik sistemde, sürtünme parazitik bir etki olarak yer almaktadır [1]. Sürtünme modellenmesinin en genel amacı, dinamik sistem üzerinde etkisi olan bozucu etki kaynaklı belirsizliklerin en aza indirilmesidir. Bu bağlamda, sürtünme etkisini tanımlayacak modellerin oluşturulması ve model parametrelerini tanılamak adına iki eksenli gimballer üzerinde sistem tanılama prosedürlerinin yürütülmesi yüksek performans gerektiren sistemler için elzem hale gelmiştir.

Sürtünme modelleri oluşturulurken, "Kayma" (sliding) ve "Kayma Öncesi" (pre-sliding) bölgeleri birçok çalışmaya konu olarak derinlemesine incelenmiştir [2], [3]. Gerek kayma öncesi gerek kayma sırasında etkili olan, kimyasal ve yapısal birçok farklı mekanizma, mühendislik uygulamalarında artan hassasiyet istekleriyle de birleşerek halen alandaki çalışmalara kaynak sağlamaktadır [4]. Sürtünme modelleme çalışmaları arasında uzun yıllardır süregelen klasik yöntemler [5], [6] olduğu gibi, Sinir Ağı yöntemleri gibi görece yeni çalışmalar da [7] literatüre geçmiştir.

Sürtünme etkilerinin açıklanmasında tribolojik pürüzlü yüzey yaklaşımları büyük öneme sahiptir [8], [9]. Bu yaklaşımların temeline inildiğinde modeller; iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısı, temas alanı, kesme (shear) gerilimi ve kesite dikey (normal) kuvvet temel alınarak ifade edilmektedir. Bu bağlamda literatürde yer alan fırça (Bristle) modeli [10], kayan yüzeyde tanımlanan esnek fırçalar ile sabit yüzeydeki rijit fırçaların birbirleri ile olan etkileşimi ile açıklanır. Fırça modeli Şekil 1'deki gibi gösterilebilir. Bu modelde fırçalar arasındaki boşluk sürekli olarak rastgele değişmekte ve bu fırçaların etkileşimleriyle sürtünme etkisi oluşmaktadır. Fırça modeli makro seviyedeki sürtünme etkisini açıklamada faydalı olarak kontrol alanındaki birçok modelin de temelinin oluşturmıştır [4].



Şekil 1. Fırça Modeli, (a) Sabit ve kayan yüzey arasındaki N fırça, (b) Tek fırça

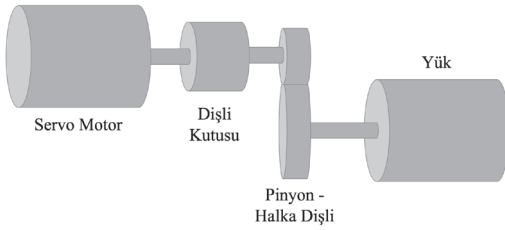
Farklı mühendislik uygulamaları çerçevesinde düşünüldüğü zaman sürtünmenin sistem dinamikleri üzerindeki etkisi, sürtünme modellenmesinin de kapsamını belirlemiştir. Sürtünme etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu sistemlerde basit modeller yeterli olurken, bu etkilerin büyük paya sahip olduğu yüksek performans gerektiren sistemlerde ise daha kompleks modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çerçevede, örnek iki eksenli gimbal sisteminin sürüş hattı için kullanılabilecek sürtünme modelleri ve tanılama metodları belirlenerek, tanılama prosedürü literatüre kazandırılmıştır. Bölüm II ile üzerinde çalışılan iki eksenli gimbal sisteminin sürüş hattı ile ilgili bilgi verilmiş, Bölüm III ile de sistem üzerinde gözlenen doğrusal olmayan sürtünme etkileri konu edilmiştir. Bölüm IV ve V ile seçilen sistem için uygunluğu değerlendirilen sürtünme modelleri ve tanılama

metotları tartışılmıştır. Klasik yöntemler olarak kabul gören metotlar ile, görece kısa sürede gerçekleştirilen ve özel tasarlanmış bir hız isteği sinyali içeren metotlar karşılaştırılmıştır. Bölüm VI ile farklı modeller ve yöntemlerin uygunluk ve uygulanabilirlik seviyeleri paylaşılmıştır.

II. SİSTEM DİNAMİKLERİ

Doğrusal olmayan sürtünme etkilerinin modellenmesi ve tanımlanması adına seçilen iki eksenli gimballerin tek bir eksen için kullanılan sürüş hattı şematiği Şekil 2 ile verilmiştir. Sistemde bir adet servo motor eyleyici görevi yaparken, dişli kutusu ve pinyon - halka dişli grubu ile yük üzerine sürüş aktarımı gerçekleşmektedir. Bunlara ek olarak, yük üzerinde dönölçer ve açı kodlayıcı algılayıcıları yer almaktadır. İki eksenli gimbale sistemlerinin kullanım amaçları doğrultusunda hassas açılmal konum ve hız isteklerini takip etmesi beklenmektedir.



Şekil 2. Testlerde kullanılan robotik sistem

Yük olarak şematikte verilen yapının hassas konum ve hız takibi yeteneklerine karşı gelen bozucu etkilerin en önemli etmenlerinden birisi sürüş hattındaki sürtünme karakteristiğinden kaynaklanmaktadır. Öte yandan bu karakteristik içerisinde birçok doğrusal olmayan davranış bulunmaktadır.

III. KARAKTERİSTİK DAVRANIŞLAR

Literatürdeki çalışmalarda, sürtünme modelleme çalışmaları kapsamında birçok farklı sürtünme karakteristiği, farklı davranış modelleri ile ifade edilmiştir [2]. Kapsayıcı ve yüksek doğruluklu bir sürtünme modeli için bu karakteristik davranışların hesaba katılması gerekmektedir. Bu kapsamda, giriş bölümünde bahsedilen pürüzlü yüzeylerin arasındaki etkileşimler, sistemin sürtünme karakteristiğini belirlemektedir. Bölüm II'de bahsedilen iki eksenli gimbale sisteminin sürüş hattı üzerinde doğrusal olmayan sürtünme karakteristik davranışları bu bölümde listelenmiştir.

A. Kayma Öncesi ve Kayma Bölgeleri

Sürtünme üzerine yapılan çalışmalarda, en genel şekilde sürtünme davranışı iki ana bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler, iki pürüzlü yüzeyin birbirini üzerindeki görelî konum ve hızlarına göre, "Kayma Öncesi" ve "Kayma" bölgeleri olarak tanımlanmıştır [11]. Klasik yöntemlerle düşünüldüğünde, sürtünme sadece yüzeye dik gelen kuvvete ve yüzeylerin birbirine göre hızlarına bağlıdır. Lakin bu durum, yalnızca kayma etkisinin

tamamıyla görüldüğü durumlarda geçerli olmaktadır. Pürüzlü yüzeylerin görelî hızlarının belli bir seviyenin üzerinde olduğu bu bölge, "Kayma" bölgesi olarak tanımlanmıştır. Bu bölge öncesinde, henüz bir kayma etkisi görülmemişken düşük kuvvetler ile mikroskopik seviyede oluşan yer değiştirmelerin görüldüğü bölge ise "Kayma Öncesi" bölgesi olarak tanımlanmıştır [11].

"Kayma Öncesi" bölgede görülen mikroskopik seviyedeki yer değiştirmeler "Kayma Öncesi Yer Değiştirmeler (Pre-Sliding Displacements)" olarak ifade edilmektedir. Bu bölgede pürüzlü yüzeylerin birbirini üzerindeki etkileri egemen olduğu için birbirini üzerinde kayan yüzeylerin yapışkanlık (adezyon) kuvvetleri baskın durumdadır. Bu pürüzlü yüzeylere uygulanacak teğet (tangential) kuvvet durumunda, pürüzlü yüzeylerdeki birleşme noktaları elastik ve plastik deformasyona uğrar. Bu kuvvet kaldırıldığında ise, deformasyona uğrayan yüzeylerin sadece belirli bir kısmı eski haline dönmektedir. Dolayısıyla, pürüzlü yüzeylerdeki bahsi geçen pürüzler, bu bölgede doğrusal olmayan histeretik yay etkileri göstermektedir. Dolayısıyla, "Kayma Öncesi" bölgede sürtünme, yer değiştirmelerin ve bu histeretik davranışın fonksiyonu olarak ifade edilmektedir.

B. Statik ve Kinetik Sürtünme - Kopma Noktası

"Kayma Öncesi" ve "Kayma" bölgeleri arasındaki geçiş, çoğu uygulamada kritik rol oynamakta ve birçok farklı dinamiği içerisinde barındırmaktadır [12]. Öte yandan, bu geçiş esnasında hareketin başlangıç noktası iyi tanımlanmış değildir. Bu bağlamda "Kopma Noktası" kuvveti, yüzeyler arasındaki sürtünme "Kayma" bölgesine geçmeden hemen önce karşılaşılan maksimum kuvvet olarak tanımlanmıştır. "Kopma Noktası" öncesinde "Kayma Öncesi" bölge özellikleri doğrultusunda yüzeyler arasındaki davranış, pürüzlü yüzeylerin arasında oluşmuş birden çok yay ile ifade edilebilir. Hareket gözlenene kadar mikroskopik yer değiştirmeler ile artan yay kuvvetleri, "Kopma Noktası" kuvvetini oluşturmaktadır. Hareket olduğu noktadan sonra ise "Kayma" bölgesine geçilmesi ve bu yayların ortadan kalkması ile, sürtünme kuvveti de azalmaktadır [13].

Literatürde "Kopma Noktası" kuvveti üzerine yapılmış çalışmalar ışığında, bu noktadaki sürtünme kuvveti, uygulanan kuvvetin zamanla değişimine (rate) bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki; uygulanan kuvvetin zamanla değişimi ne kadar düşük ise, "Kopma Noktası" kuvveti o kadar yüksek olmaktadır [13]. Bu davranış, ilk bölümde bahsi geçen "Fırça" modelini aklı getirmektedir. Uygulanan kuvvetin zamana göre değişimi küçüldükçe, fırça olarak tanımlanan pürüzlü yüzeyler birbirleri içerisine o denli geçerek "Kopma Noktası" için gereken kuvveti artırmaktadır.

Tüm bunların ışığında, "Kopma Noktası" esnasında oluşan maksimum kuvvet "Statik Sürtünme" olarak, devamında oluşan hareket ile hızla bağlı olarak değişen kuvvet ise "Kinetik Sürtünme" olarak tanımlanmaktadır [2].

C. Pozisyona ve Zamana Bağlı Sürtünme

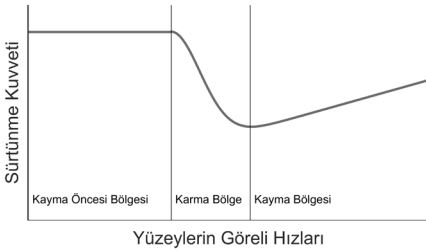
Önceki bölümlerde tanımlandığı üzere, sürtünme davranışı "Kayma Öncesi" bölgede pürüzlü yüzeyler arasında oluşan mikroskopik yer değiştirmelere bağlı olarak değişmektedir. Öte yandan sürtünme davranışı, "Kayma" bölgesinde de yüzeylerin

karakteristik özellikleri dahilinde pozisyona bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Sürtünme davranışı üzerindeki bir diğer etki ise, zamana bağlı oluşan doğrusal olmayan etkilerdir. Yapılan çalışmalar doğrultusunda, göreceli hareketleri olmayan iki pürüzlü yüzey arasındaki "Statik Sürtünme" kuvveti zamana bağlı olarak yükselmektedir [14].

D. Stribeck Etkisi

Yağlanmış yüzeyler üzerinde yapılan çalışmalar temel alındığında, pürüzlü yüzeyler arasındaki sürtünme davranışının "Kayma Öncesi" ve "Kayma" bölgeleri arasındaki geçişleri süresiz bir fonksiyon değil, yüzeylerin birbirlerine göreceli hızlarının sürekli bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir [15].



Şekil 3. Stribeck Etkisi

Şekil 3 ile verilen "Stribeck" eğrisinde, çok düşük göreceli hızlarda pürüzlü yüzeyler tamamıyla ince akışkan katman ile kaplı olmadığı için, pürüzler arasında oluşan "Kayma Öncesi" bölgesi etkileri gözlenmektedir. Göreceli hız yükseldikçe, bu pürüzler arasındaki etkiler baskınlığını yitirmekte, ve sürtünme kuvveti artan hıza ters olacak şekilde azalmaktadır. Göreceli hızın daha fazla artması ve yüzeylerin tamamen ince akışkan katman ile kaplanması ile, pürüzler arasında "Kayma Öncesi" bölgesi etkileri kaybolarak, davranış "Kayma" bölgesi etkileri altına girmektedir. Bu bölgede de etkili olan viskoz etkiler ile sürtünme kuvveti artan hız ile birlikte artmaktadır.

E. Tutma Brakma (Stick-Slip) Etkisi

Pürüzlü yüzeyler arasındaki sürtünme davranışında, yüzeylerin birbirlerine göreceli hızlarının belli bir seviyede tutulması ile birbirlerine yapışma (stick) ve hemen arkasından ise kayma (slip) davranışlarını sergiledikleri periyodik hareketler, "Tutma Brakma (Stick-Slip)" etkisi olarak tanımlanmaktadır [16]. Bu bağlamda bu etki sırasında "Kayma Öncesi" ve "Kayma" bölgeleri arasında periyodik salınımlar gözlemlenmektedir. "Tutma Brakma" etkisi mekanik sistemler üzerinde titreşim ve istenmeyen davranışlar ile hasarlara yol açabileceği gibi, iki eksenli gimbal sistemleri gibi yüksek hassasiyetli konumlandırma ve hız takibi yapılan sistemlerde de kontrolcü performansını düşürmektedir [17].

F. Histerezis

Stribeck eğrisi üzerinde sürtünme davranışı incelenirken, sürtünme gecikmesi ve histerezis etkisi kaynaklı, hızlanma

ve yavaşlama esnasında farklı sürtünme etkileri gözlenmektedir [18]. Sürtünme hafızası (Frictional Memory) olarak da tanımlanan bu etki ile, Stribeck eğrisi üzerinde bir döngü elde edilmektedir. Bu döngünün karakteristiği, hız değişimi fraksiyona, viskoz etkilere ve yüzeye dik oluşan kuvvete bağlı olarak farklılık göstermektedir [3].

IV. UYGUN SÜRTÜNME MODELLERİ

Literatürde sürtünme etkilerinin karakteristik davranış özellikleri ele alınarak oluşturulmuş birçok sürtünme modeli yer almaktadır [2]. Sürtünme etkilerinin en basit haliyle açıklanması ile başlayan klasik modellerden, doğrusal olmayan etkilerin dahil edilerek karmaşıklığın artırıldığı kompleks modellere kadar birçok model incelenmiş ve uygulanacak sistem tanımlama prosedürleri için uygun olan modeller detaylı incelenmiştir. Tüm modellerin ortak gereksinimleri değerlendirildiği takdirde, pozisyon ve hız gibi model girdilerinin ölçümlerinde yüksek sensör kalitesine ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bunların ışığında, sistem üzerinde uygulanabilecek modeller değerlendirilerek bu bölümde detayları verilmiştir.

A. Klasik Modeller

Sürtünme üzerine yapılan çalışmaların temeli olarak düşünülen ve en basit model yapısı olarak tanımlanan Coulomb modeli, Denklem 1 ile verildiği üzere, statik olarak pürüzlü yüzeylerin göreceli hızlarının yönüne bağlı olarak değişmektedir [19].

$$F_f = F_C * \text{sgn}(v) \quad (1)$$

Denklem 1'de F_C Coulomb Kuvveti'ni, v ise pürüzlü yüzeylerin göreceli hızını ifade etmektedir. Sürtünme davranışını kısmen basit ama etkili bir biçimde tanımlayan Coulomb sürtünme modeli, bu nedenle birçok uygulamada kullanılmaktadır. Coulomb modeli üzerine Denklem 2 ile gösterilen viskoz etkileri ekleyerek, kayma bölgesi tanımlı iyileştirilebilmektedir.

$$F_f = F_C * \text{sgn}(v) + \sigma_2 v \quad (2)$$

Denklem 2'de σ_2 viskoz sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Diğer yandan, bu modeller pürüzlü yüzeylerin göreceli hızlarının sıfır olduğu durumu açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle Coulomb modeli üzerine Denklem 3 ile verildiği gibi eklenen Stiction (Yapışma) modeli ile, sıfır göreceli hız geçişi daha iyi tanımlanmıştır [19].

$$F_f = \begin{cases} F_a & v = 0 \text{ ve } |F_a| < F_s \text{ ise,} \\ F_s * \text{sgn}(F_a) & v \neq 0 \text{ ve } |F_a| \geq F_s \text{ ise.} \end{cases} \quad (3)$$

Denklem 3'te F_a uygulanan dış kuvveti, F_s yapışma kuvvetini ifade etmektedir. Coulomb ve Stiction özelliklerinin süresiz fonksiyonlar içermesi ve model karmaşıklığının düşük kalması, Stribeck etkisinin de klasik modeller arasına katılmasında etkili olmuştur. Stribeck etkisinin modellere eklenmesi ile yüzeyler arasındaki sürtünme davranışın; "Kayma Öncesi" ve "Kayma" bölgeleri arasındaki geçişleri süresiz bir fonksiyon olmak yerine, yüzeylerin birbirlerine göreceli hızlarının sürekli bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Bu

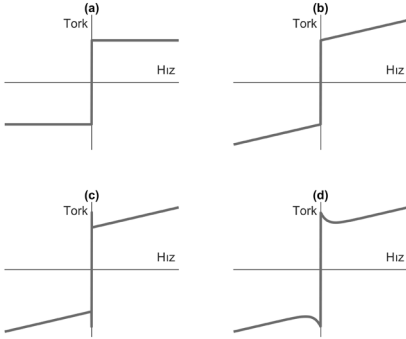
bağlamda Stribeck eğrisi ile sürtünme modeli Denklem 4 ile verilmiştir [19].

$$F_f = \begin{cases} s(v) + \sigma_2 v & v \neq 0 \text{ ise,} \\ F_a & v = 0 \text{ ve } |F_a| < F_s \text{ ise,} \\ F_s * \text{sgn}(F_a) & \text{aksi takdirde.} \end{cases} \quad (4)$$

Denklem 4'de $s(v)$, Denklem 5 ile verilen Stribeck eğrisini ifade etmektedir.

$$s(v) = (F_c + (F_s - F_c)e^{-\left|\frac{v}{v_s}\right|^\delta}) * \text{sgn}(v) \quad (5)$$

Denklem 5'de v_s Stribeck hızı, δ ise Stribeck biçim çarpanını ifade etmektedir. Bahsi geçen klasik modellerin farklı kombinasyonları ile elde edilen modeller Şekil 4 ile verilmiştir [19].



Şekil 4. Farklı Kombinasyonlar ile Klasik Sürtünme Modelleri. (a) Coulomb, (b) Coulomb + Viskoz, (c) Coulomb + Viskoz + Stiction (d) Coulomb + Viskoz + Stiction + Stribeck

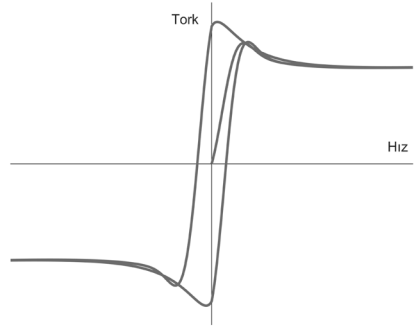
B. LuGre

Klasik modellerin ötesinde, "Kayma Öncesi" ve "Kayma" bölgeleri, Stribeck ve Tutma Bırakma (Stick-Slip) etkileri gibi karmaşık sürtünme davranışlarını içeren kapsayıcı bir model, LuGre sürtünme modeli olarak literatürde bulunmaktadır [20]. LuGre modeli ayrıca sürtünme gecikmesi ve histerezis özelliklerini ve "Kopma Noktası" davranışlarını da içermektedir. Birbiri üzerinde yer alan pürüzlü yüzeyler arasındaki sürtünme, LuGre modeli ile yay görevi yapan ve bükülebilen pürüzler ve fırçalar olarak modellenmiştir. Matematiksel temelleri fırçaların ortalama bükülmeleri üzerine kurulan LuGre modeli, Denklem 6 ve 7 ile ifade edilmiştir.

$$\frac{dz}{dt} = v - \sigma_0 \frac{|v|}{s(v)} z \quad (6)$$

$$F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (7)$$

Denklem 6 ve 7'de z iç sürtünme durumunu, σ_0 fırça katılığı, σ_1 fırça sönümlenmesini ifade etmektedir. Şekil 5 ile verilen LuGre sürtünme modeli literatüre girdiği zamandan bu yana birçok çalışmaya konu olmuş, sürtünme kestirimi [21], modelleme ve simülasyon [22], sürtünme giderme [20] gibi alanlarda kullanılmıştır.



Şekil 5. LuGre Sürtünme Modeli

V. TANILAMA

Sistemler üzerindeki belirsizlik etkilerinin en aza indirilmesi amacıyla ihtiyaç duyulan sürtünme modelleme prosedürünün bir diğer önemli adımını tanılama çalışmaları oluşturmaktadır. Sürtünme davranışının sistem performansına olan etki katsayısı hesaba katılarak, klasik methodlardan karmaşık modellere kadar olan paletten, sistem için uygun olan modellerin tanılama sürecine devam etmek amacıyla seçilmesi gerekmektedir [23].

Bu bağlamda, sistem tanılama prosedürü için sistemlerdeki doğrusal olmayan etkileri kapsayabilecek iki farklı sürtünme modeline karar verilmiştir.

- Coulomb + Viskoz + Stiction + Stribeck
- LuGre

Seçilen modellere ait parametrelerin belirlenmesi için, farklı tanılama ve parametre kestirimi metotları uygulanmış ve uygulanan metotlar sonuçları ile birlikte bu bölümde listelenmiştir.

A. Tanılama Metotları

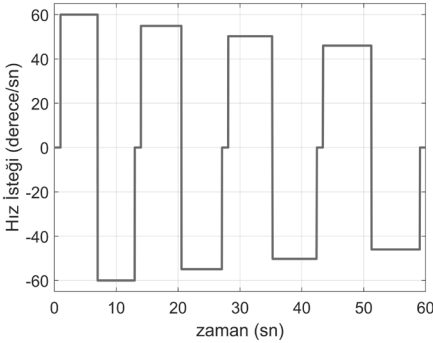
Sürtünme tanılama sürecine geçtikten sonra gerçekleştirilecek tanılama prosedürü için literatürde birçok farklı yöntem uygulanmış, uygulanan sisteme uygunlukları çerçevesinde farklı sonuçlar elde edilmiştir [24], [25]. Bunlar arasında "Kayma Öncesi" ve "Kayma" bölgelerini ayırarak görece uzun testler ile yüksek doğruluklu sistem tanılama prosedürleri [26] yoğunlukla kullanılırken, yeni ve akılcı yöntemler ile hem test süresini, hem de tanılama prosedürünü kolaylaştıran çalışmalar da [27], [28] literatürde yerini almaktadır. Bu bağlamda, her iki alandan da seçilen modeller için kapsayıcı olacak tanılama

metotları olarak seçilmiştir. Sistemden alınan akım ölçümü ve motor sabiti kullanılarak elde edilen motor torku ile tork dengesi Denklem 8 ile verilmiştir.

$$T_m = T_J + T_f + T_L \quad (8)$$

Denklem 8'de T_m motor torkunu, $T_J = J * a$ ataletsel ivmelenme torkunu, T_f sürtünme torkunu, T_L ise yük torkunu ifade etmektedir. Kullanılan yöntemlerde T_f sürtünme torkunu ayırarak, hız bilgisi ile T_f arasındaki ilişki incelenmiştir.

1) "Kayma Öncesi" ve "Kayma" Bölgeleri Testleri: Farklı hız isteği seviyeleri ile gerçekleştirildiği için görece uzun süren, lakin sistemin sürtünme karakteristiğinin yüksek doğrulukla elde edildiği, diğer yöntemler için referans kabul edilebilecek testler olarak tanımlanmıştır [26]. Sistemin sürtünme davranışında "Kayma" bölgesi, Şekil 6 ile verildiği üzere sabit hızla yapılan ve farklı hızlar için tekrarlanan birçok test ile tanımlanmıştır. Farklı hızlar için elde edilen ortalama sürtünme torklarının üzerinde gerçekleştirilecek eğri uydurma yöntemleri ile, kayma bölgesi modelinin tanımlanmasını amaçlamaktadır.

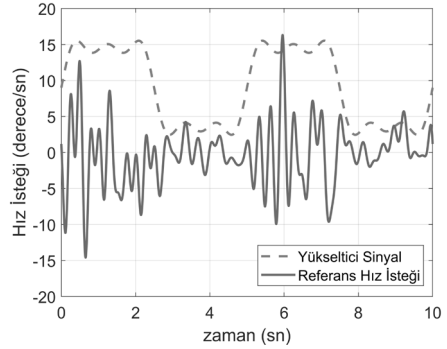


Şekil 6. "Kayma Öncesi" ve "Kayma" Bölgeleri Testlerinde Referans Sabit Hız İsteği

"Kayma Öncesi" bölgesi için ise, fırça modelinde belirtildiği gibi, farklı eğimlere sahip rampa istekler uygulanarak sistemin "Kopma Noktası" kuvvetini tanılamaya yönelik testler tanımlanmıştır. Kopma noktası için gereken torkun bulunması ile, farklı modeller için gerekli parametrelerin tanımlanması amaçlanmaktadır.

2) Değişken Hız İsteği Testleri: Önceki yöntemle göre çok daha hızlı gerçekleştirilen, değişken hız isteği yöntemi [27]. Şekil 7 ile verilen hız isteği ile sistem tanılama prosedürü yürütülmüştür. İçerisinde 4 Hz'e kadar farklı frekanslardaki sinyalleri içeren; ve 10 saniye periyoda sahip kare dalga için yazılan Fourier serisinin ilk üç teriminin oluşturduğu bir sinyal ile yükseltilen özel bir hız isteği sinyali hazırlanmıştır.

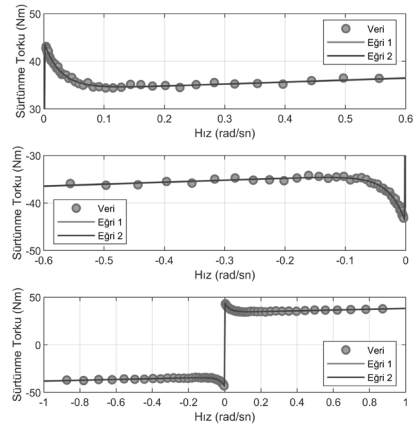
Bu özel hız isteği sinyalinin amacı, sistemin farklı genlik ve frekanslar ile birçok kez sıfır hız geçişini yaparak, "Kayma Öncesi" ve "Kayma" bölgelerinin karakteristiklerini tek bir test ile kapsamaktır.



Şekil 7. Referans Değişken Hız İsteği

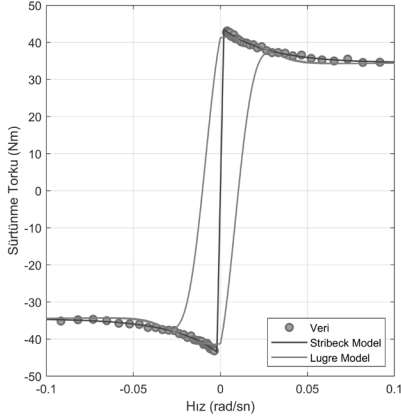
B. Parametre Kestirimi

Tanılama metodları bölümünde bahsi geçen "Kayma Öncesi" ve "Kayma" bölgeleri testleri ve değişken hız isteği testleri yöntemleri ile 1 kHz örnekleme zamanında gerçekleştirilen testler yapıldıktan sonra, uygun olduğu düşünülen Stribeck ve LuGre modelleri için parametre kestirimi aşamasına geçilmiştir. Bu kapsamda, sistem üzerinde yapılan sabit hızlı "Kayma Öncesi" ve "Kayma" Bölgeleri Testleri ile elde edilen tork bilgilerinin ortalamaları alınarak sistem tanılama verisi olarak kullanılmıştır. Sonrasında ilk adım olarak Stribeck modeli parametreleri kestirimi, klasik yöntemlerden doğrusal olmayan en küçük kareler (Non-linear Least Squares) yöntemi [29] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tanılama prosedürü sonucunda elde edilen eğri, sistem verisi ile birlikte Şekil 8 ile verilmiştir. Şekilde Eğri 1 pozitif hızlar kullanılarak, Eğri 2 negatif hızlar kullanılarak elde edilen sonucu göstermektedir.



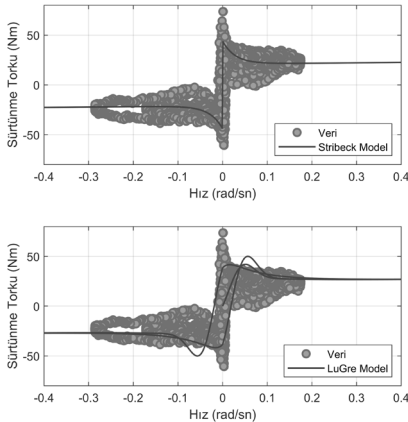
Şekil 8. "Kayma Öncesi" ve "Kayma" Bölgeleri Testlerinde Referans Sabit Hız İsteği ile Coulomb + Viskoz + Stiction + Stribeck Modeli Kestirimi

Devamında, aynı verilerin üzerine "Kopma Noktası" testlerinden alınan veriler de kullanılarak LuGre model parametreleri Stribeck modeli için kullanılan yöntemle benzer metot ile elde edilerek Şekil 9 ile verilmiştir.



Şekil 9. "Kayma Öncesi" ve "Kayma" Bölgeleri Testlerinde Referans Sabit Hız İsteği ile LuGre Modeli Kestirimi

Diğer yandan *Değişken Hız İsteği Testleri* yapıldıktan sonra elde edilen sürtünme torku ve hız bilgileri üzerinde, Nelder-Mead algoritması kullanarak seçilen sürtünme karakteristiği davranış modelleri için parametre kestirimi uygulamaları gerçekleştirilmiştir [30]. Stribeck ve LuGre modelleri için uygulanan tanılama prosedürleri sonucunda elde edilen eğriler, sistem verisi ile birlikte Şekil 10 ile verilmiştir.



Şekil 10. Referans Değişken Hız İsteği ile aynı hız bölgesinden birçok tork değeri alınarak elde edilen veri ile Coulomb + Viskoz + Stiction + Stribeck Modeli (üst) ve LuGre Modeli (alt) Kestirimi

Stribeck ve LuGre modellerinin farklı metotlar ile parametre kestirimi sonrası 10 farklı deneyden elde edilen ortalama sonuçlar Tablo 1 ile karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda tablodan da görüleceği üzere "*Kayma Öncesi*" ve "*Kayma*" Bölgeleri Testleri toplam test süresi olarak büyük farka sahiptir. Test süresi farkı bu derece büyük iken, model uygunluğu ise %95 seviyelerinin üzerindedir. Diğer yandan *Değişken Hız İsteği Testleri*, test süresini önemli ölçüde kısaltırken, model uygunluğu da halen kabul edilebilir seviyede kalmıştır. Bu bağlamda *Değişken Hız İsteği Testleri* ile elde edilen modellerde halihazırda yüksek standart sapmalara sahip verinin işlenerek kullanılmasının modellerin uygunluğunun artıracacağı düşünülmektedir.

Tablo 1. Farklı Model ve Tanılama Metodu Kombinasyonlarının Süre ve Uygunluk Karşılaştırmaları

Model + Tanılama Metodu	Toplam Test Süresi	Model Uygunluğu (%)
Stribeck Model + Bölge Testleri	9.35 saat	95.64 ± 0.27
LuGre Model + Bölge Testleri	9.35 saat	95.21 ± 0.31
Stribeck Model + Değişken Hız Testleri	5 saniye	88.41 ± 1.44
LuGre Model + Değişken Hız Testleri	5 saniye	83.79 ± 1.79

Bu kapsamda, "*Kayma Öncesi*" ve "*Kayma*" Bölgeleri Testleri iki eksenli gimbal sistemlerinde sürüş hattı modellemesi için referans kabul edilebilecek doğrulukta lakin uygulanabilirliği süre kısıtlamalarına takılan testlerdir. Benzer şekilde *Değişken Hız İsteği Testleri* ise çok hızlı sürelerde elde edilecek modeller ile performans iyileştirmesi sağlayabilecek prosedürler olarak tanımlanabilmektedir. Bu bağlamda, iki eksenli gimbal sisteminin benzetiminde doğrusal olmayan sürtünme etkileri tanımlanırken, iki tanılama prosedürünün de birlikte kullanılması, yüksek doğruluk ve performans gereksinimlerini sağlamanın önünü açacaktır.

VI. SONUÇ

Bu çalışmada, iki eksenli gimbal sistemlerinin hassas yönlenme performanslarını artırmak amacıyla performansı düşüren en önemli bozucu etkilere sürtünme davranışının modellenmesi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, sahip olunan sistemlerdeki sürüş hattı incelenmiş, sistemin sahip olduğu doğrusal olmayan sürtünme karakteristikleri listelenmiştir. Sonrasında sistemler için uygunluğu değerlendirilen Stribeck ve LuGre modelleri için sistem tanılama prosedürleri anlatılmıştır. Bu çerçevede, "*Kayma Öncesi*" ve "*Kayma*" Bölgeleri Testleri ve *Değişken Hız İsteği Testleri* için tanılama metotları uygulanmış ve modeller gerçek sistem verileri ile kıyaslanmıştır. Elde edilen modellerin tamamı, kullanım senaryosu, zaman ve doğruluk gereksinimleri doğrultusunda sistemlerin benzetim çalışmalarında ve sürtünme giderme algoritmalarının geliştirilme aşamalarında kullanılabilir hale gelmiştir. Yüksek doğruluk gerektiren ve zaman kısıtı olmayan çalışmalarda "*Kayma Öncesi*" ve "*Kayma*" Bölgeleri Testleri kullanılırken, zaman kısıtlı senaryolarda *Değişken Hız İsteği Testleri* kullanım için uygundur. Çalışmanın devamı olarak tanılama süreçlerinin otomatize edilmesi ve elde edilen modeller kullanılarak sistemlerde sürtünme giderme (friction compensation) algoritmaları uygulanarak çalışmaların sistem performansına etkilerinin gözlenmesi hedeflenmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Savunma Sanayii Başkanlığı (SSB) tarafından Savunma Sanayii için Araştırmacı Yetiştirme Programı (SAYP) kapsamında "2-Eksenli Taretlerin Kontrolü için Otomatik Sistem Tanılama Yöntemlerinin Geliştirilmesi" konulu, 82202625-130.10-E.2018-0-19739 numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Harnoy, Avraham, Bernard Friedland, and Simon Cohn. "Modeling and measuring friction effects." *IEEE Control Systems Magazine* 28.6 (2008): 82-91.
- [2] Armstrong-Hélouvy, Brian, Pierre Dupont, and Carlos Canudas De Wit. "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction." *Automatica* 30.7 (1994): 1083-1138.
- [3] Lampaert, Vincent. "Modelling and control of dry sliding friction in mechanical systems." (2003).
- [4] Al-Bender, Farid, Vincent Lampaert, and Jan Swevers. "A novel generic model at asperity level for dry friction force dynamics." *Tribology Letters* 16.1-2 (2004): 81-93.
- [5] Gomes, Sebastião CP, and J. P. Chretien. "Dynamic modelling and friction compensated control of a robot manipulator joint." *Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE*, 1992.
- [6] Bliman, Pierre-Alexandre, and Michel Sorine. "A system-theoretic approach of systems with hysteresis. Application to friction modelling and compensation." *Proceedings of the 2nd European control conference*. 1993.
- [7] Cihz, M. Kemal, and Masayoshi Tomizuka. "Friction modelling and compensation for motion control using hybrid neural network models." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 20.7 (2007): 898-911.
- [8] Bhushan, Bharat. "Modern tribology handbook, two volume set." CRC press, 2000.
- [9] Suh, Nam P. "Tribophysics." Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA, 1986.
- [10] Haessig, David A., and Bernard Friedland. "On the modeling and simulation of friction." 1990 American Control Conference. IEEE, 1990.
- [11] Parlitz, U., et al. "Identification of pre-sliding friction dynamics." *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 14.2 (2004): 420-430.
- [12] Al-Bender, F., and K. De Moerloose. "Characterization and modeling of friction and wear: an overview." *Sustainable Construction and Design* 2.1 (2011): 19.
- [13] Johannes, V. I., M. A. Green, and C. A. Brockley. "The role of the rate of application of the tangential force in determining the static friction coefficient." *Wear* 24.3 (1973): 381-385.
- [14] Rabinowicz, E. "The intrinsic variables affecting the stick-slip process." *Proceedings of the Physical Society* 71.4 (1958): 668.
- [15] Zhu, Dong, Jiaxu Wang, and Q. Jane Wang. "On the Stribeck curves for lubricated counterformal contacts of rough surfaces." *Journal of Tribology* 137.2 (2015): 021501.
- [16] Dieterich, James H. "Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip." *Rock Friction and Earthquake Prediction*. Birkhäuser, Basel, 1978. 790-806.
- [17] Olsson, Henrik, et al. "Friction models and friction compensation." *Eur. J. Control* 4.3 (1998): 176-195.
- [18] Yoon, Jun Young, and David L. Trumper. "Friction modeling, identification, and compensation based on friction hysteresis and Dahl resonance." *Mechatronics* 24.6 (2014): 734-741.
- [19] Akmeliawati, Rini, and Momoh Jimoh E. Salami. "Artificial intelligent based friction modelling and compensation in motion control system." *Advances in Mechatronics*. IntechOpen, 2011.
- [20] De Wit, C. Canudas, et al. "A new model for control of systems with friction." *IEEE Transactions on automatic control* 40.3 (1995): 419-425.
- [21] Olsson, Henrik. "Control systems with friction department of automatic control." *Lund Institute of Technology (LTH)* (1996).
- [22] De Wit, C. Canudas, and Pablo Lischinsky. "Adaptive friction compensation with partially known dynamic friction model." *International journal of adaptive control and signal processing* 11.1 (1997): 65-80.
- [23] Kermani, Mehrdad R., Rajnikant V. Patel, and Mehrdad Moallem. "Friction identification and compensation in robotic manipulators." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 56.6 (2007): 2346-2353.
- [24] Márton, Lőrinc, Szabolcs Fodor, and Nariman Sepehri. "A practical method for friction identification in hydraulic actuators." *Mechatronics* 21.1 (2011): 350-356.
- [25] Rizos, Demosthenis D., and Spiros D. Fassois. "Friction identification based upon the LuGre and Maxwell slip models." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 17.1 (2009): 153-160.
- [26] Sincar, E. Friction identification and compensation in stabilized platforms. Diss. MS thesis, Dept. Mech. Eng., Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2013.
- [27] Tjahjowidodo, Tegoeh, Farid Al-Bender, and Hendrik Van Brussel. "Friction identification and compensation in a DC motor." *IFAC Proceedings Volumes* 38.1 (2005): 554-559.
- [28] Worden, K., et al. "Identification of pre-sliding and sliding friction dynamics: Grey box and black-box models." *Mechanical systems and signal Processing* 21.1 (2007): 514-534.
- [29] Marquardt, Donald W. "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters." *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics* 11.2 (1963): 431-441.
- [30] Singer, Saša, and John Nelder. "Nelder-mead algorithm." *Scholarpedia* 4.7 (2009): 2928.

UGB 1B Konumlandırma Sistemi İçin İteratif Çözüm

Hikmet Yücel, PhD

Ar-Ge Bölümü

İnovasyon Mühendislik Ltd. Şti.

Eskişehir, TÜRKİYE

hikmet.yucel@inovasyonmuhendislik.com

Elçin Erdoğan

Ar-Ge Bölümü

İnovasyon Mühendislik Ltd. Şti.

Eskişehir, TÜRKİYE

elcin.erdogan@inovasyonmuhendislik.com

Öz — Günümüzde Ultra Geniş Bant (UGB) radyo sinyalleri ile iç ortamlarda konum tespiti sıcak bir konu olarak çalışılmaktadır. Ulaşma zamanı farkı (TDOA) ile konum hesaplama yöntemi, etiket ile altyapı arasında zaman senkronizasyonu gerektirmemekte ancak doğrusal olmayan görece komplike denklem sistemi içermektedir. Bu denklem sisteminin doğrusal hale getirilip kapalı form çözümü için ise gereğinden fazla denkleme dolayısı ile fazladan sabit düğüme ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada UGB 1 boyutlu konumlandırma kapalı form çözüm yerine, iteratif çözüm geliştirilmiştir. Sistemde etiketler 3 boyutta yer alan çizgiler üzerinde hareket etmektedir. Tüm etiketlerin konumlandırılması için kapalı form çözümde 3 sabit düğüm gerekli iken bu çalışmada önerilen iteratif çözümde 2 sabit düğüm yeterli olmaktadır.

Gerçeklenen testlerde, önerilen iteratif çözüm ile ortalama hatanın 4cm'nin, standart sapmanın 12cm'nin ve ortalama iterasyon sayısının 10'un altında kaldığı gözlenmiştir. Önerilen çözüm, minimum altyapı ile çalışan, hızlı yakınsamaya sahip düşük hesaplama maliyeti olan bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler— *1B iç ortam konumlandırma, ultra geniş bant, sabit düğümler, sınırsız sayıda etiket, iteratif çözüm*

I. GİRİŞ

Konum tespiti, gelişen teknoloji ile birlikte hem dış ortamlarda hem de iç ortamlarda güncelliğini devamlı koruyan bir çalışma konusu olmuştur. Dış ortamlar için geliştirilen uydu tabanlı konumlandırma sistemlerinde uydulardan gelen sinyaller fabrika, havaalanı gibi kapalı mekanlara nüfuz edemediklerinden, iç ortamlar için farklı teknolojiler ve yöntemler kullanarak konumlandırma sistemleri geliştirilmiştir.

İç ortamlar için geliştirilen konumlandırma sistemlerinin ekipman takibi [1], kişi navigasyonu [2], insansız otonom araçlar / robotlar [3], yaşlı ve engelli kişilerin takibi [4], konum tabanlı servisler [5] gibi pek çok uygulama alanı bulunmaktadır.

İç ortamlarda konum tespiti çeşitli sinyal tipleri kullanarak geliştirilebilmektedir. RF (Wi-Fi, Bluetooth, RFID vb.), ultrasonik, kızılötesi, lazer gibi sinyal teknolojileri ile yapılan pek çok çalışma literatürde yer almaktadır.

RF teknolojisi ile yapılan konumlandırma çalışmaları, sinyalin büyük bir miktarının engellerden geçebilmesi, uzak

mesafelere kadar yayılabilmesi gibi pek çok avantajı bünyesinde barındırdığından, günümüzde tercih edilen bir teknoloji haline gelmiştir. Ancak bu sinyallerin ortamdaki engellere bağlı olarak sönmülmesi ya da metal yoğunluğunun fazla olduğu ortamlarda yansımaya maruz kalması nedeni ile bazı durumlarda dezavantaja sahip olabilmektedir.

UGB sinyalleri nanosaniye (ns) mertebesinde kısa süreli RF darbeleri üretmekte ve 3,1–10,5 GHz arasında çok geniş bir frekans bandında çalışmaktadır. Yayınlanan UGB sinyali bu özelliklere sahip olduğundan pek çok engelden geçebilmektedir ve çok kısa süreli darbelerle yayın yaptığı için yansımalarla kolayca ayırt edilebilmektedir [6]. UGB teknolojisinin düşük maliyet, kurulum kolaylığı ve hassas ölçüm yapabilme özelliklerinden dolayı bu çalışmada tercih edilme sebebi olmuştur.

Bir iç ortam konumlandırma sisteminin kullanılacağı uygulama alanına göre bir boyutlu (1B), iki boyutlu (2B) ya da üç boyutlu (3B) konumlandırma yöntemleri geliştirilebilmektedir [7-10].

Daha önce geliştirilmiş olan iç ortam konum tespiti sisteminde [11], düz bir çizgi üzerinde hareket edebilen sınırsız sayıdaki etiket için UGB teknolojisi ve TDOA ölçümleri kullanılarak 1D konum tespiti yapılmıştır. 1D konum tespiti yapılırken 3 adet sabit düğüm kullanılmış ve ortaya çıkan doğrusal olmayan denklemlerin çözümü için kapalı form deterministik çözüm önerilmiştir. Bu çalışmada ise konum tespitinin yapılabilmesi için 2 adet sabit düğümün kullanılması yeterli olmuştur. Konum hesabı yapılırken hiperbol ve çizgi kesişimi yöntemi kullanılmış ve çıkan denklemlerin çözümü için yeni bir iteratif yöntem geliştirilmiştir.

Geliştirilen sistem Bölüm 2'de Önerilen Konumlandırma Sistemi başlığı altında, Geliştirilen Algoritmanın Sözde (Pseudo) Kodu Bölüm 3'te, yapılan testler ve gerçekleştirilen sistemin test sonuçları Bölüm 4'te Yapılan Testler ve Test Ortamı başlığı altında verilmiştir. Sonuç kısmı ise Bölüm 5'te yer almaktadır.

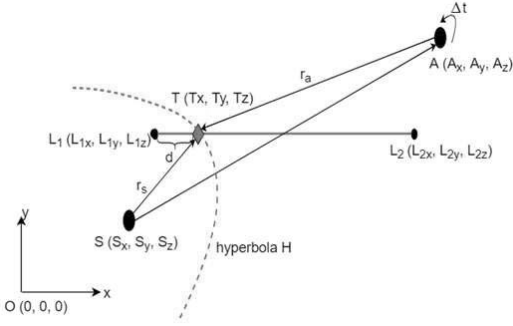
II. ÖNERİLEN KONUMLANDIRMA SİSTEMİ

Yapılan bu çalışmada, düz bir çizgi üzerinde hareket eden etiketlerin konumu tespit edilmektedir. Bu çalışmada, yalnızca TDOA ölçümleri kullanılmakta olup sabit düğümler verici, etiketler pasif alıcı durumundadır. Çalışılan bu metotta düğümler ve vericiler arasında zaman senkronizasyonuna gerek

duyulmamaktadır. Etiketler yayın yapmadıklarından dolayı, teorik olarak sistem tarafından konumu tespit edilecek etiket sayısında bir sınırlama bulunmamaktadır.

Düğümlerden yayılan sinyalleri alan etiketlerin konumlarını tespit edebilmek için sistemde 2 adet düğüm kullanımı yeterli olmuştur. Ortaya çıkan denklemler doğrusal değildir, dolayısıyla konum hesabının yapılabilmesi için iteratif yöntem uygulanmıştır.

Sistemin çalışma prensibi Şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Geliştirilen sistemin yapısı.

İki düğüm (S ve A) ve yalnız bir etiket (T) Şekil 1.'de gösterilmektedir. S düğümünün, sistemi senkronize etmesi için özel bir görevi vardır. Düğümler, bilinen (S_x, S_y, S_z) ve (A_x, A_y, A_z) sabit konumlarında bulunmaktadır. T etiketi, başlangıç ve bitiş noktaları (L_{1x}, L_{1y}, L_{1z}) - (L_{2x}, L_{2y}, L_{2z}) olarak bilinen düz bir çizgi üzerinde hareket etmektedir. Sistemin çıktısı, etiket ile çizginin başlangıç noktası arasındaki d mesafesidir.

A. Sistemin çalışma döngüsü

Sistemin konumlandırma döngüsü aşağıdaki gibidir:

- S düğümü, döngüyü, iletimi ile tetikler.
- S düğümünden yayılan sinyal, T etiketi ve A düğümü tarafından alınır.
- A düğümü, tetikleme sinyalinin alınmasından sonra, Δt_A olarak belirtilen gecikme ile yayın yapar.
- T etiketi, A düğümünün sinyalini alır ve sinyal alımları arasındaki zaman farkını hesaplar. ($TDOA S - A$).
- Bilinen 4 noktanın (S, A, L_1, L_2) ve $TDOA$ değerlerinin yardımı ile d mesafesi hesaplanır.

B. 1 boyutta mesafenin ölçülmesi

d mesafesi, H hiperbolünün ve L_1L_2 çizgisinin kesişimi ile hesaplanmaktadır. Probleme genel olarak bakıldığında, iki tane denklem (L_1L_2 çizgisinden ve H hiperbolünden) ve bir bilinmeyen (d mesafesi) bulunmaktadır. Ancak hiperbol denklemi lineer değildir. Bu çalışmada, hızlıca yakınsayan bir iteratif yöntem önerilmiştir.

d mesafesi, H hiperbolünün ve L_1L_2 çizgisinin kesişimi ile hesaplanmaktadır. Hiperbol denklemi:

$$d_{as} = r_a - r_s \quad (1)$$

Hiperbolün sabitleri, ölçülen TDOA değerlerinden elde edilebilir;

$$d_{as} = TDOA * c - |AS| - \Delta t * c \quad (2)$$

Denklem (1)'i yeniden düzenlersek;

$$r_a^2 = d_{as}^2 + 2d_{as}r_s + r_s^2 \quad (3)$$

r_a, r_s mesafeleri şu şekilde yazılabilir;

$$r_s^2 = (T_x - S_x)^2 + (T_y - S_y)^2 + (T_z - S_z)^2 \quad (4)$$

$$r_a^2 = (T_x - A_x)^2 + (T_y - A_y)^2 + (T_z - A_z)^2 \quad (5)$$

Denklem (4) ve (5)'i, denklem (3)'te yerine koyarsak ve yeniden düzenlersek;

$$2(A_x - S_x)T_x + 2(A_y - S_y)T_y + 2(A_z - S_z)T_z = (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2) - (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2) - 2d_{as}r_s - d_{as}^2 \quad (6)$$

L_1L_2 çizgisinin denklemi;

$$\frac{T_x - L_{1x}}{L_{2x} - L_{1x}} = \frac{T_y - L_{1y}}{L_{2y} - L_{1y}} = \frac{T_z - L_{1z}}{L_{2z} - L_{1z}} = m \quad (7)$$

$$T_x = L_{1x} + m(L_{2x} - L_{1x}) \quad (8)$$

$$T_y = L_{1y} + m(L_{2y} - L_{1y}) \quad (9)$$

$$T_z = L_{1z} + m(L_{2z} - L_{1z}) \quad (10)$$

L_1L_2 çizgisinin ve H hiperbolünün kesişimini elde edebilmek için, denklem (8), (9) ve (10), denklem (6)'da yerine koyularak yeniden düzenlenmelidir.

$$m = -\frac{N + 2d_{as}r_s}{Q} \quad (11)$$

Denklem (11)'deki bilinen değerler;

$$N = d_{as}^2 + 2(A_x - S_x)L_{1x} + 2(A_y - S_y)L_{1y} + 2(A_z - S_z)L_{1z} + (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2) - (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2) \quad (12)$$

$$Q = [2(A_x - S_x)(L_{2x} - L_{1x}) + 2(A_y - S_y)(L_{2y} - L_{1y}) + 2(A_z - S_z)(L_{2z} - L_{1z})] \quad (13)$$

Denklem (11)'deki bilinmeyenler r_s ve m değerleridir. Aslında burada tek bilinmeyen vardır çünkü bu değerler birbiri cinsinden yazılabilir. Ancak bu durumda, denklem doğrusal olmayan hale gelir.

Bu doğrusal olmayan denklemleri çözmek için, doğrusallaştırma ile uğraşmak yerine, çözüm için bir yinelemeli algoritma önerilmiştir. Geliştirilen algoritmanın sözde (pseudo) kodu bir sonraki bölümde verilmiştir.

III. GELİŞTİRİLEN ALGORİTMANIN SÖZDE KODU

Adım 1

$d_{as} = TDOA * c$ hesaplanır.

Burada $TDOA$, Ulaşma Zamanı Farkı'nı (Time Difference of Arrival), c ise ışık hızını belirtmektedir.

Adım 2

$N = d_{as}^2 + 2(A_x - S_x)L_{1x} + 2(A_y - S_y)L_{1y} + 2(A_z - S_z)L_{1z} + (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2) - (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2)$ değeri bilinen ankor koordinatları, çizginin koordinatları ve d_{as} ölçümü kullanılarak hesaplanır.

Adım 3

$Q = [2(A_x - S_x)(L_{2x} - L_{1x}) + 2(A_y - S_y)(L_{2y} - L_{1y}) + 2(A_z - S_z)(L_{2z} - L_{1z})]$ değeri bilinen çizgi ve ankorların koordinatları kullanılarak hesaplanır.

Adım 4

$k = 0$

Burada k , iterasyon sayısıdır.

$thr = 0.02$

Burada thr , yinelemeyi durdurmak için belirlenen eşik değeridir. Bu değer, yinelemenin sıralı adımlarının, metre cinsinden, çözümleri arasındaki farkı temsil eder.

Adım 5

$T_{x|0} = \frac{L_{2x} + L_{1x}}{2}$, $T_{y|0} = \frac{L_{2y} + L_{1y}}{2}$, $T_{z|0} = \frac{L_{2z} + L_{1z}}{2}$ değerleri hesaplanır.

Burada $T_{x|k}$, $T_{y|k}$, $T_{z|k}$ değerleri T etiketinin k . iterasyondaki koordinat değerleridir. Başlangıçta ilk etiket pozisyonu L_1L_2 çizgisinin orta noktası olarak seçilir.

Adım 6

$r_{s|k} = \sqrt{(T_{x|k} - S_x)^2 + (T_{y|k} - S_y)^2 + (T_{z|k} - S_z)^2}$ değeri hesaplanır.

Burada $r_{s|k}$ değeri S ankoru ve T etiketi arasındaki uzaklığın k . iterasyondaki değeridir.

Adım 7

$m_k = -\frac{N + 2d_{as}r_{s|k}}{Q}$ değeri hesaplanır.

Burada m_k değeri k . iterasyondaki benzerlik oranını belirtmektedir.

Adım 8

$$\begin{aligned} T_{x|k+1} &= L_{1x} + m_k(L_{2x} - L_{1x}) \\ T_{y|k+1} &= L_{1y} + m_k(L_{2y} - L_{1y}) \\ T_{z|k+1} &= L_{1z} + m_k(L_{2z} - L_{1z}) \end{aligned}$$

değerleri hesaplanır.

Burada $T_{x|k+1}$, $T_{y|k+1}$, $T_{z|k+1}$ değerleri sıradaki adımın T etiketi koordinatlarıdır.

Adım 9

$\Delta d_k = \sqrt{(T_{x|k+1} - T_{x|k})^2 + (T_{y|k+1} - T_{y|k})^2 + (T_{z|k+1} - T_{z|k})^2}$ değeri hesaplanır.

Burada Δd_k değeri, $(k + 1)$. ve k . iterasyon sonucunda bulunan T etiketinin koordinatları arasındaki mesafedir.

Adım 10

Eğer $\Delta d < thr$ ise;

Iterasyonu durdur. Etiket T 'nin çözülen koordinatları $(T_{x|k+1}, T_{y|k+1}, T_{z|k+1})$ 'dir.

Eğer $\Delta d > thr$ ise;

$k = k + 1$ değerini ata ve Adım 6'ya geri dön.

IV. YAPILAN TESTLER VE TEST ORTAMI

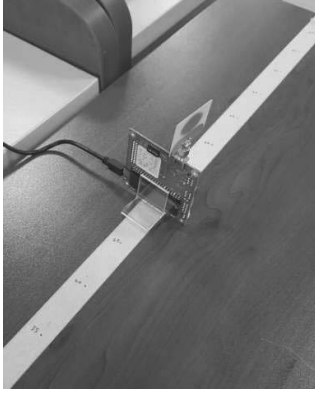
Önerilen 1B konumlandırma sistemi Şekil 2'de gösterilen ofis ortamında test edilmiştir. Test ortamı çalışma [11]'de yer alan ofis ortamı ile birebir aynı koşulları sağlamaktadır.

Kırmızı daire etiket T 'yi ve mavi daireler ise düğümleri göstermektedir. Normalde etiket ve düğümler LOS (Line of sight)'a sahip olmalarına rağmen, testler sırasında zaman zaman personellerin hareketlerinden dolayı LOS kaybolmaktadır. Bu nedenle testler LOS+NLOS (Non-LOS) karışık ortamda yapılmıştır.



Şekil 2. Ofis ortamı.

Testler sırasında, Şekil 3'te verilen ve [12] çalışmasında Ubisense, Be Spoon gibi diğer ürünlerden daha iyi bir performansa sahip olduğu gösterilen Decawave EVK1000 demonstrasyon kartları kullanılmıştır.



Şekil 3. Decawave EVK1000 Kit.

Koordinat sisteminin kurulmasında, orijin noktası ofis zemininde rastgele seçilen bir noktaya yerleştirilmiştir. Diğer noktaların koordinatları, bu orijine göre cm çözünürlüğünde ölçülerek tespit edilmiştir. Sırası ile başlangıç ve bitiş noktaları (L_{1x}, L_{1y}, L_{1z}) ve (L_{2x}, L_{2y}, L_{2z}) olan L_1L_2 çizgisi masanın üzerine kurulmuştur. Düşümler birbirine 10m'den uzak olmayan (S_x, S_y, S_z) ve (A_x, A_y, A_z) koordinatlarına yerleştirilmiştir. Önceki çalışmalarda, düşümlerin birbirlerinden 100 metre uzaklıkta olabileceği gözlenmiştir. Noktaların koordinat sistemindeki yerleri Tablo 1'de gösterilmektedir:

TABLE I. NOKTALARIN KOORDİNATLARI

Noktalar	$x(m)$	$y(m)$	$z(m)$
L_1	3.36	0.88	0.84
L_2	3.36	1.76	0.84
A	5.4	8.6	1.28
S	2.88	-1.69	1.28

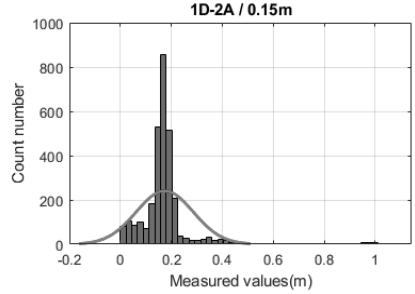
Testler, 0.15m, 0.30m, 0.45m, 0.60m, 0.75m ve 0.90m olan 6 farklı d mesafesinde yapılmıştır. Her bir mesafede 3000 adet ölçüm, herhangi bir aykırı değer çıkarma (outlier rejection), filtre veya kalibrasyon yapılmadan sıralı şekilde kaydedilmiştir. Yenileme hızı 25Hz olarak seçilmiştir. Teorik olarak yenileme hızı 100Hz'den fazla olabilmektedir. Yinelemenin durdurma kriterleri (limit değer) 1mm olarak seçilmiştir.

Her bir test için ortalama, ortalama hata, standart sapma ve ortalama iterasyon sayısı değerleri Tablo 2.'de verilmektedir.

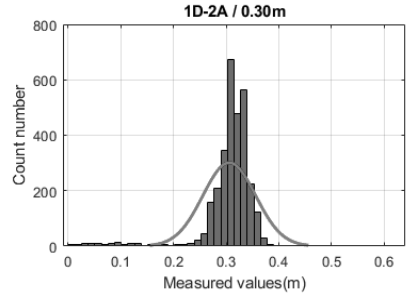
TABLE II. TEST SONUÇLARI

Mesafe(d)	Ortalama (μ) (m)	Ortalama Hata (μ_e) (m)	Standart Sapma (σ) (m)	Ortalama İterasyon Sayısı
Test1- 0.15m	0.174	0.024	0.112	9.68
Test2 - 0.30m	0.306	0.006	0.05	8.08
Test3 - 0.45m	0.443	0.007	0.028	5.13
Test4 - 0.60m	0.605	0.005	0.042	7.07
Test5 - 0.75m	0.710	0.04	0.024	7.99
Test6 - 0.90m	0.899	0.001	0.081	7.51

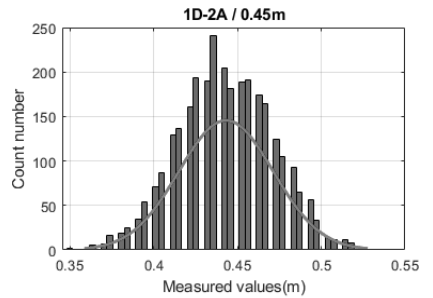
Test sonuçlarına ait histogram ve oturtulmuş olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri Şekil 4.'te verilmektedir.



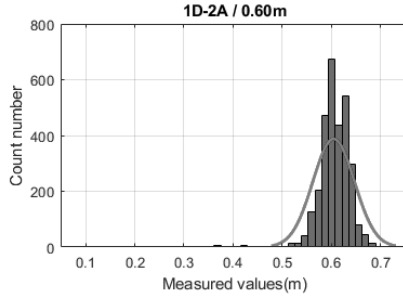
Şekil 4a. $d=0.15m$ noktasına ait test sonuçları



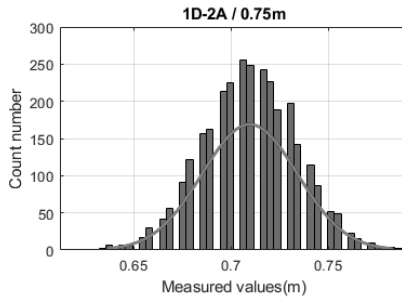
Şekil 5b. $d=0.30m$ noktasına ait test sonuçları



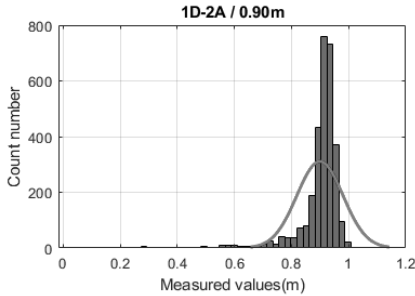
Şekil 6c. $d=0.45m$ noktasına ait test sonuçları



Şekil 7d. $d=0.60m$ noktasına ait test sonuçları



Şekil 8e. $d=0.75m$ noktasına ait test sonuçları



Şekil 9f. $d=0.90m$ noktasına ait test sonuçları

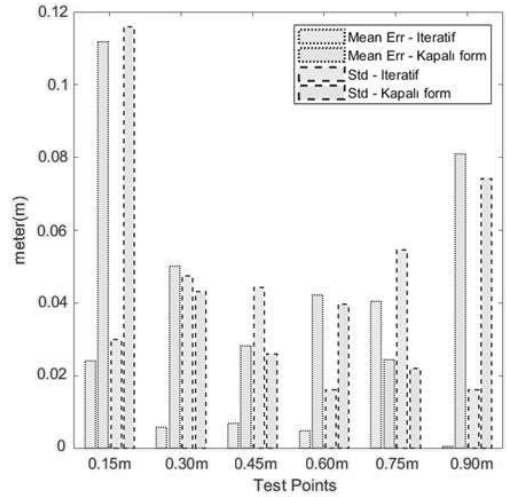
Önerilen yaklaşımda d mesafesinin hesaplanabilmesi için 2 adet sabit düğüm kullanılması yeterli olmuştur. d mesafesi L_1L_2 çizgisinin ve bir adet H hiperbolünün kesişimi ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada kapalı form deterministik çözüm yerine yeni bir iteratif yöntem geliştirilmiştir.

Kapalı form deterministik çözüm [11] ile iteratif çözüme ait test sonuçlarına ait karşılaştırma yapılarak, değerler Tablo 3.'te verilmektedir.

TABLE III. KAPALI FORM İLE İTERATİF ÇÖZÜM TEST SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

	Ortalama Hata (μ_e) (m)		Standart Sapma (σ) (m)	
	Kapalı Form Çözüm	İteratif Çözüm	Kapalı Form Çözüm	İteratif Çözüm
Test1	0.03	0.024	0.116	0.112
Test2	0.047	0.006	0.043	0.05
Test3	0.044	0.007	0.026	0.028
Test4	0.016	0.005	0.040	0.042
Test5	0.054	0.04	0.022	0.024
Test6	0.016	0.001	0.074	0.081

Bu değerlere ait grafik Şekil 5.'te gösterilmektedir.



Şekil 10. Karşılaştırma sonucuna ait grafik.

V. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TUBİTAK) 116E855 nolu "Akıllı fabrikalar için otonom taşıyıcılar ve gerekli insan-makine ve makine-makine arayüzlerinin geliştirilmesi" projesi tarafından desteklenmiştir.

VI. SONUÇ

İç ortamlarda konum tespitinin yapılması artan kullanım alanları ile birlikte büyük önem arz etmektedir. Bu alanda yapılmış pek çok çalışma olmasına rağmen, farklı yöntemler ve farklı teknolojiler ile birlikte bu alandaki çalışmalar büyük bir hızla devam etmektedir. UGB teknolojisinin, maliyet ve kurulum kolaylığı açısından verimli olması, son zamanlarda yapılan çalışmalara bakıldığında bu çözüm için en değerli araç olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada, TDOA ölçümleri kullanılarak iteratif yöntem ile UGB 1B konum hesaplama sistemi geliştirilmiştir. Sistemde etiketler pasif alıcı durumundadır. Önerilen sistem, yalnızca iki düğüm ile farklı 3B düz çizgiler üzerinde hareket eden sınırsız etiketlerin konumunu tespit etme yeteneğine sahiptir.

Deney sonuçlarına bakıldığında 6 farklı test noktası için ortalama hatanın 5cm'nin altında, standart sapmanın 12cm'nin altında ve ortalama iterasyon sayısının 10'dan küçük olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen yöntem, temel seviye bir mikroişlemci ile uygulanabilecek kadar düşük hesaplama maliyetine sahiptir.

and RFID Measurements," in IEEE T. Instrumentation and Measurement, vol. 61, no. 1, pp. 178-189, Jan 2012.

KAYNAKÇA

- [1] A. S. Paul and E. A. Wan, "RSSI-Based Indoor Localization and Tracking Using Sigma-Point Kalman Smoothers," in IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 3, no. 5, pp. 860-873, Oct. 2009.
- [2] M. Segura, V. Mut and C. Sisterna, "Ultra wideband indoor navigation system," in IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 6, no. 5, pp. 402-411, June 2012.
- [3] A. Yazıcı, A. Sipahioglu and O. Parlaktuna, "Heuristic-Based Dynamic Route Planning Method for a Homogeneous Multi-robot Team," in Advanced Robotics, vol. 23, pp. 269-287, Jan. 2009.
- [4] H. Ahn and K. H. Ko, "Simple Pedestrian Localization Algorithms Based on Distributed Wireless Sensor Networks," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 10, pp. 4296-4302, Oct. 2009.
- [5] E. de Lara, N. Davies, A. Dey and J. Hightower, "Location-Based Services," in IEEE Pervasive Computing, vol. 9, no., pp. 11-12, 2010.
- [6] A. Prorok and A. Martinoli, "Accurate indoor localization with ultra-wideband using spatial models and collaboration", in The International Journal of Robotics Research, vol. 33, no. 4, pp. 547-568, Apr 2013.
- [7] U. Yayan, H. Yucel, A. Yazıcı: A Low Cost Ultrasonic Based Positioning System for the Indoor Navigation of Mobile Robots, Journal of Intelligent & Robotic Systems, Volume 78, Issue 3 (2015), Page 541-552
- [8] H.Yucel,R.Edizkan,T. Ozkir,A. Yazıcı, Development of indoor positioning system with ultrasonic and infrared signals, Proceedings of the IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA 2012), pp.1-4, Trabzon, July 2-4, 2012.
- [9] K. Özsoy, A. Bozkurt and I. Tekin, "2D Indoor positioning system using GPS signals," 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, pp. 1-6, Zurich, 2010.
- [10] A.A. Savochkin, Y.P. Mikhayluch, V.M. Iskiv, A.A. Schekaturin, A.V. Lukyanchikov, D. Savochkin and E.A. Levin, "Passive RFID system for 2D indoor positioning," in MIKON 2014, June 2014.
- [11] H. Yücel and B.E. Erdoğan, "Sınırsız sayıdaki etiket için kapalı form çözümü ile UWB 1B konumlandırma sistemi," in 12. İstanbul Bilişim Kongresi, Dec 2018.
- [12] A. R. Jimenez, F. Seco, C. P. Honorato and I. G. Rosas, "Accurate Pedestrian Indoor Navigation by Tightly Coupling Foot-Mounted IMU

Yansıtma Tabanlı Artırılmış Gerçeklik Destekli Uyarı ve Bilgilendirme Sistemi Geliştirilmesi

Serhat Demirtaş

Makina Mühendisliği Bölümü

Boğaziçi Üniversitesi

İstanbul, Türkiye

Email: serhat.demirtas@boun.edu.tr

Tolga Cankurt

Ar-Ge Birimi

Hidropar Hareket Kontrol Teknolojileri Merkezi A.Ş.

Kocaeli, Türkiye

Email: tolga.cankurt@hktm.com.tr

Evren Samur

Makina Mühendisliği Bölümü

Boğaziçi Üniversitesi

İstanbul, Türkiye

Email: evren.samur@boun.edu.tr

Özetçe —Endüstriyel alanda robot kullanımının artması, insanların robotlar ile işbirliği içinde çalışması gerekliliğini doğurmuştur. Endüstride kullanılan birçok robot bu işbirliğine uygun özellikler barındırmamaktadır. Günümüzde, endüstriyel robot hücrelerinde güvenlik, robotun etrafına örülen fiziksel bariyerler, robotun çalışma alanına yapılan herhangi bir ihlali algılayan sensörler ve robotu ani bir şekilde durduran kontrol algoritmalarıyla sağlanmaktadır. Ancak bu durum, endüstri 4.0'ın en önemli faktörlerinden olan insan-robot işbirliğine engel teşkil etmektedir. Bu bildiride, operatörlerin robotlar ile yakın mesafede çalışabilmesine olanak sağlayacak bir robot hücresi için artırılmış gerçeklik destekli bir uyarı ve bilgilendirme sistemi anlatılmıştır. İlk olarak, üretim sahalarında insan-robot işbirliğine olanak sağlayacak özellikleri barındıran konsept bir hücre tasarımı paylaşılmıştır. Daha sonra, bu hücre tasarımına entegre etmek amacıyla geliştirilen yansıtma tabanlı artırılmış gerçeklik sistemi için gerçek zamanlı bir görsel sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler—İnsan-Robot Etkileşimi, İnsan-Robot İşbirliği, Artırılmış Gerçeklik.

1. GİRİŞ

Günümüzde birçok farklı alanda kullanılmakta olan robotik donanımların ve yazılımların sayısı giderek artmaktadır. Robot uygulamalarının en çok kullanıldığı alanların başında endüstriyel üretim sahaları gelmektedir. Endüstride kullanılan robotlar uzanma mesafesi ve hareket edebildikleri eksen sayısı gibi ayırt edici özelliklere sahiptir ve kaynak, paketleme ve malzeme taşınması gibi birçok farklı alt görevde kullanılmaktadır. Endüstriyel robotların bu görevleri gerçekleştirirken gösterdikleri hassasiyetin ve doğruluğun yüksek olması, sürekli bir biçimde uzun süre çalışabilmeleri ve insanlar için tehlike içerebilecek görevlerde de kullanılabilmeleri nedeniyle üretimde robotlar giderek daha çok tercih edilmektedir. Endüstriyel robot kullanımının artışı en büyük paya sahip olan sektörler metal ve elektrik/elektronik sanayileridir [1].

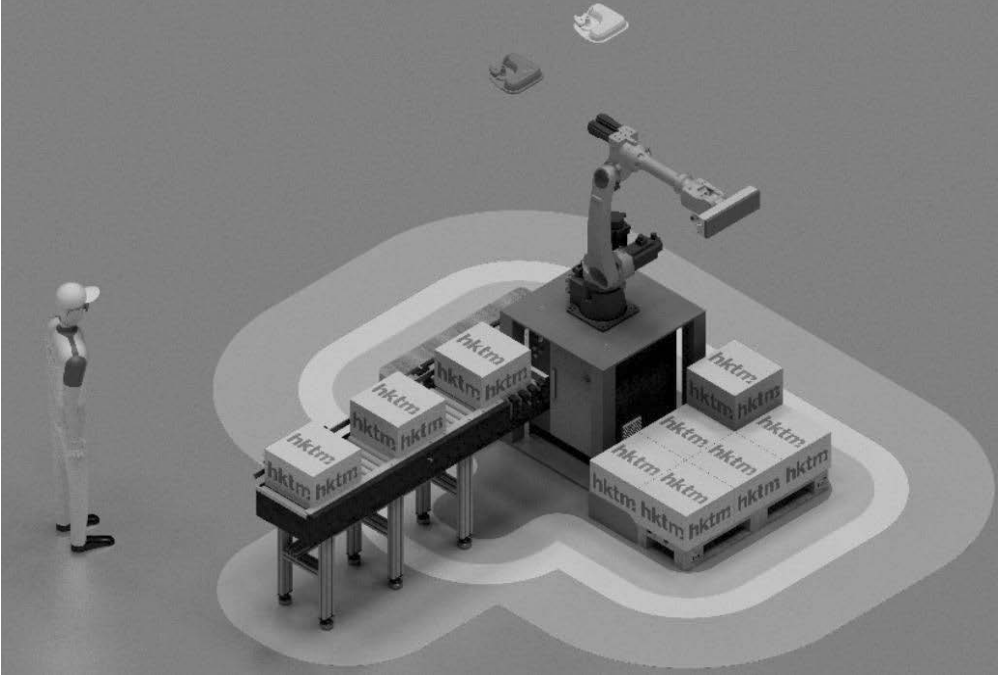
Endüstriyel robotların sağladığı avantajlar ve yakın zamandaki teknik ilerlemeler nedeniyle fabrikalarda otonom sistemler yaygınlaşsa da, robotik uygulamalar içeren üretim sahalarında hala insanlara ihtiyaç duyulabilmektedir. Robotların geniş bir alanda hızlı ve güçlü hareketlerde bulunması, bu robotlarla aynı ortamda çalışan insanlar için tehlike oluşturmaktadır. Gerçekleşebilecek herhangi bir iş kazasının insan sağlığı açısından ciddi sonuçları olabilir. Bu yüzden, endüstriyel robotların üretim sahalarına entegre edilmesi sırasında insan güvenliği en çok önem verilen konulardan

birisidir. Bu güvenliği sağlamak için en çok kullanılan yöntemlerden bir tanesi robotun çalışma alanının çevresine insanların girişini engelleyecek fiziksel bir güvenlik bariyeri kurmaktır. Sınırları belirlenen bu bölgenin bir kişi tarafından ihlal edilmesi durumunda ilgili algılayıcılardan bilgi alan robot, hareketini anında keser ve bu şekilde muhtemel kazaların önüne geçilmiş olur [2].

Çalışma halindeki robotun çevresine güvenlik bariyerleri kurmak her ne kadar yeterli güvenliği sağlasa da, bu fiziksel bariyerler insan-robot etkileşimi ve işbirliğini kısıtlayıcı bir etkiye sahiptir. Bu etkileşim ve işbirliğinin geleceğin üretim sistemlerinde büyük rol oynayacağı göz önüne alınırsa, işbirliğini artıracak yeni güvenlik önlemlerinin geliştirilmesinin zorunlu hale geldiği görülmektedir. Uluslararası Standartlar Teşkilatı (ing. International Organization for Standardization, ISO) tarafından 2011 yılında çıkarılan ISO 10218 standartları endüstriyel robot içeren sistemlerde meydana gelebilecek temel risk ve tehlikeleri tanımlamaktadır ve bu tehlikeli durumların oluşmasının azaltılması için endüstriyel robotların kurulumu ve kullanımı esnasında dikkat edilmesi gereken güvenlik gereksinimlerini içermektedir. Teknolojik gelişmelerle, insan-robot etkileşiminin artması sonucunda 2016 yılında 10218 standartlarına ek olarak 15066 standartları yayınlanmıştır [3]. İnsan-robot etkileşimi içeren çalışmalar bu standartlar göz önünde bulundurularak gerçekleştirilir. Bu standartlar belli gereklilikleri ortaya koysa da güvenliği kesin olarak sağlayacak çözümler sunmamaktadır.

Herhangi bir fiziksel bariyer olmadan insanlarla işbirliği içinde çalışabilen robot sistemlerinin bir örneği işbirliği (ko-laboratif) robotlarıdır (ing. cobot). İşbirliği robotları, işbirliği özelliklerini sahip oldukları kuvvet ve tork sensörleri sayesinde herhangi bir olağandışı teması veya darbeyi algılama ve bu veriyi göre hareket planını değiştirme veya hareketi tamamen durdurma özelliklerinden almaktadır [4]. Günümüzde birçok farklı firma kendi işbirliği robotlarını geliştirmiş olsa da, hala birçok firma insanlarla işbirliği içinde çalışma özelliğine sahip olmayan endüstriyel robotları üretmeye devam etmektedir ve bu robotlar üretim sahalarında kullanılmaktadır.

Geleneksel endüstriyel robotların bulunduğu çalışma ortamlarını robotla yakın mesafede çalışan insanlar için de uyumlu hale getirmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda genel olarak robotların donanımlarında veya yazılımlarında yapılan değişiklikler söz konusudur [5]–[7]. Güvenlik çalışmalarının yanı sıra, literatürde robot ve insan arasında işbirliğini güçlendirmek amacıyla yapılan çalışmalar



Şekil 1: Konsept hücre tasarımı.

da mevcuttur. Bu amaçla, Petersen et. al. artırılmış gerçeklik metodunu robotun izleyeceği yörüngeyi planlamada yardımcı bir özellik olarak kullanmışlardır [8]. Artırılmış gerçeklik (ing. Augmented Reality, AR) kavramı, bilgisayarda üretilmiş sanal verilerin gerçek dünyadaki bir ortamla birleştirilmesini ifade eder [9]. Yani bir artırılmış gerçeklik sistemi gerçek ve sanal nesneleri gerçek dünyada bir araya getirir [10]. Artırılmış gerçeklik endüstride dizayn, montaj, bakım ve onarım gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Örneğin; artırılmış gerçeklik, kağıt veya elektronik ekipman üzerinde olan montaj verisinin gerçek zamanlı yönergelerle dönüştürülüp görsel hale getirilmesini sağlayarak montaj işlemi sırasında harcanan zamanı ve oluşan hataları ciddi şekilde azaltabilir [11] veya sağladığı "X-ray görüşü" sayesinde bakım personelinin dikkatini makinede problemin yaşandığı bölgeye çekerek karmaşık makinelerin bakım işlemini kolaylaştırabilir [12]. Artırılmış gerçeklik tiplerini şu şekilde sınıflandırmak mümkündür [13]:

- 1) Konum Tabanlı AG Sistemleri
- 2) Görüntü Tabanlı AG Sistemleri
 - a) İşaretçi Tabanlı AG Sistemleri
 - b) İşaretçi Tabanlı Olmayan Sistemler (Nesne Hareketi veya Yansıtma Tabanlı AG)

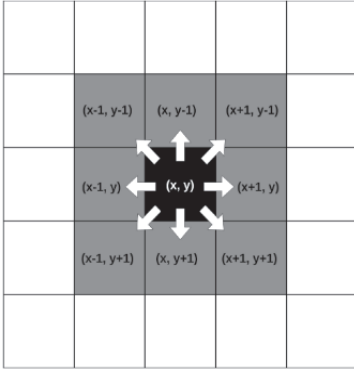
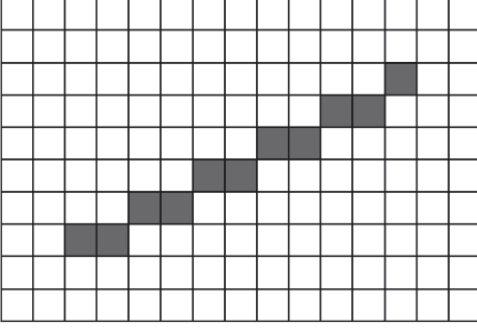
Bu çalışmada, üretim sektöründe yaygın olarak kullanılmakta olan geleneksel endüstriyel robotları barındıran ve işbirliği özelliklerine sahip bir robot hücresine uygulanması plan-

lanan bir görsel sistem sunulmuştur. Bu sistemin uygulanması ile robotun çalışma bölgesinde zeminin robota yakın mesafede iş yapan insanlar için görsel bir alana çevrilmesi amaçlanmaktadır. Robotun yörüngesine ve anlık pozisyonuna bağlı olarak oluşturulacak görsel alanın dinamik olarak değişmesiyle robotların çalıştığı bölgede güvenliği artırmak ve bu sayede endüstride insan-robot işbirliğinin gelişmesine katkıda bulunmak hedeflenmektedir. Bildirinin ikinci bölümünde, bahsedilen sistemin uygulandığı konsept bir hücre tasarımı paylaşılmaktadır. Bölüm III'te dinamik görsel yaratılırken yararlanılan algoritmalar ve son yazılımın oluşturulması, sistemin çalışma prensibi ve geliştirildiği yazılım ortamları anlatılmaktadır. Bölüm IV'te ise bildiride bahsedilen çalışmanın sonuçlarından ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalardan bahsedilmektedir.

II. HÜCRE TASARIMI

Endüstride gün geçtikçe yaygınlaşan robotik uygulamalarda insan-robot işbirliğinin artırılması amacıyla yenilikçi bir hücre tasarımı fikri geliştirilmesi gerekmektedir. Robot hücrelerine eklenecek özelliklerle robotların etrafına çekilen çitlerin kaldırılıp insanların ve endüstriyel robotların işbirliği içerisinde çalışabilmeleri hedeflenmektedir.

Örnek olarak, konsept bir hücre tasarımı Şekil 1'de görülmektedir. Görselde belirtilen hücre tasarımına uygulanması planlanan işbirliği özellikleri şunlardır:



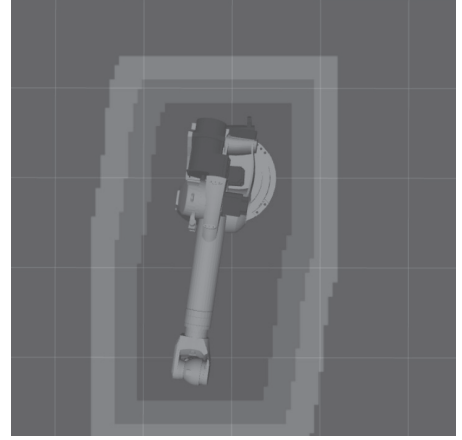
Şekil 3: Kafes görselinde iki nokta arasında Bresenham Line Algorithm kullanarak çekilen çizgi (üst), taşıma algoritması ile etrafı doldurulan bir nokta (alt).

için geliştirilen bir algoritmadır. Bu işlem ardışık her iki eksen için gerçekleştirildikten sonra robotun iki boyutlu kafes görseli elde edilmiştir. Örnek bir Bresenham çizgi algoritması uygulaması Şekil 3'te görülebilir. Bu görsel için algoritmaya girdi olarak çizginin başlayacağı ve biteceği iki nokta ((3,3) ve (13,8)) verilmiştir ve çıktı olarak bu iki noktayı kafes görselinde birleştiren noktalar elde edilmiştir.

Yatay düzlemde Bresenham çizgi algoritması ile oluşturulan çizgilerin etrafına taşıma algoritması kullanılarak robotun çalışma alanını ifade eden alanlar belirtilmektedir. Bahsedilen yöntemin iki nokta için gerçekleştirilen bir örneği Şekil 6'da görülebilir. Oluşturulan görselde kırmızı, turuncu, sarı ve yeşil olmak üzere toplam 4 adet bölge bulunmaktadır:

- **Kırmızı Bölge:** Robotun faaliyeti süresince yatay düzlemde anlık olarak kapladığı alanı belirtmektedir. Robotun hareketlerine göre anlık olarak güncellenmektedir. Operatörler tarafından ihlal edilmemesi gereken üç alandan biridir.
- **Turuncu Bölge:** Robotun yatay düzlemde anlık olarak kaplamadığı ancak herhangi bir hareketi sonucunda ilk olarak kaplayabileceği alanı göstermektedir. Operatörler tarafından ihlal edilmemesi gereken üç alandan biridir.

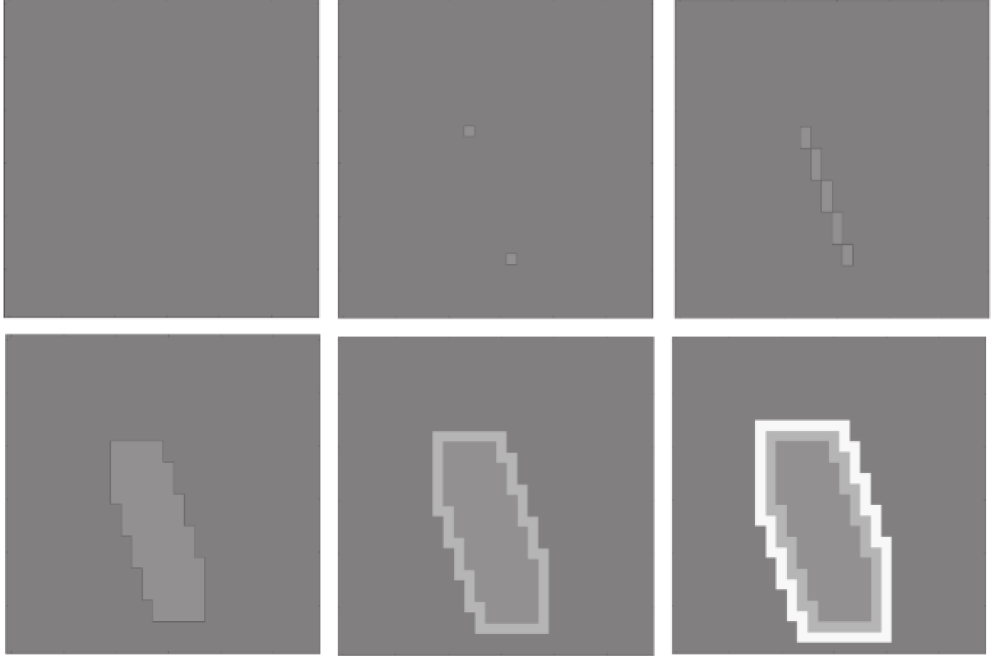
- **Sarı Bölge:** Robotun planlanan çalışma sahasından yeşil bölgeye olan geçiş alanını göstermektedir. Robot hücresine eklenmesi planlanan sensörlerle yapılacak engel algılama işlemi ile tetiklenecek robot kaçınma yazılımının bu alandan itibaren devrede olması planlanmaktadır. Operatörler tarafından ihlal edilmemesi gereken üç alandan biridir.
- **Yeşil Bölge:** Robotun planlanmış çalışma alanının yatay düzlemde kapladığı alanın dışında kalan bölümdür. Alanda bulunan operatörlerin robotun faaliyetleri sırasında çalışabileceği alanı belirtmektedir.



Şekil 4: Robotun bir rastgele bir konfigürasyonda, oluşturulan görsel ile durumu.



Şekil 5: Robotun rastgele bir konfigürasyonda, oluşturulan görsel ile durumu.



Şekil 6: Görsel oluşturma uygulamasında takip edilen yöntemin iki nokta için gösterilen hali. Sırasıyla, eksen pozisyonları iki nokta şeklinde boş kafes görselinde işaretlenir, aralarına Bresenham çizgi algoritması ile çizgi atanır, daha sonra taşıma algoritması ile sarı, turuncu ve kırmızı alanlar belirtilir.

Görsel için oluşturulan yazılım, robotun eksen sayısına, eksen uzunluklarına, istenilen çözünürlüğe, uygun görülen güvenlik alanları boyutlarına göre matrisin boyutlarını kolayca değiştirebilir ve algoritmayı da buna uygun şekilde düzenleyebilir durumdadır. Bu sayede, bu bildiride bahsedilen görsel oluşturma tekniği farklı robot ve hücre konfigürasyonlarına da uygulanabilir hale getirilebilmektedir.

IV. SONUÇ

Bu bildiride, endüstride insan-robot işbirliğinde güvenliği artırılması amacıyla geliştirilen bir robot hücresine entegre edilmesi planlan, yansıtma tabanlı artırılmış gerçeklik özellikleri içeren bir uyarı ve bilgilendirme sisteminden bahsedilmiştir. Şekil 6'da bir örneği sunulan algoritmayı kullanarak Şekil 4 ve Şekil 5'te görüldüğü gibi robotun zeminine yansıtılacak bir görsel elde edilmiştir.

Robot ve insan işbirliği, endüstri 4.0'ın en önemli unsurlarındandır. Bu işbirliğinde insan güvelliği, üzerine en çok çalışılan konuların başında gelmektedir. Bu çalışma, insan robot işbirliğine uygun bir robotik hücre tasarımının özelliklerinden biri olarak düşünülmüştür. ROS tabanlı simülasyon araçları kullanılarak gerçek endüstriyel üretim senaryolarına uygun hareket komutlarıyla simülasyonu yapılan bir endüstriyel robotun paylaştığı anlık eksen pozisyonlarını temel alan, dinamik olarak değişen ve Bresenham'ın çizgi algoritması, taşıma algoritması gibi algoritmalar yardımıyla

kafes yapısına getirilen iki boyutlu bir görsel oluşturulmuştur. Görsel, içerdiği dört farklı renkteki alan bilgileriyle robotun etrafında çalışan operatörlere güvenli ve güvensiz bölgeler hakkında bilgi sağlamaktadır. Çalışmanın devamında, oluşturulan görselin en az iki projeksiyon yardımıyla deneysel amaçla oluşturulan bir robot hücresinin zeminine yansıtılması planlanmaktadır. Robotik hücreye ileriki zamanlarda insan-robot işbirliğini geliştirmek amacıyla eklenmesi düşünülen diğer özellikler olan robot tarafından nesne algılama ve kaçınma, insan odaklı tanılama tabanlı artırılmış gerçeklik gibi özelliklerle beraber, bu bildiride bahsedilen sistemin insanların robotlarla birlikte güvenli bir biçimde çalışabilmeleri hedeflenmektedir.

V. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 1511 Öncelikli Alanlar Araştırma Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Projeleri Destekleme Programı kapsamında 1170213 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] I. F. R., "Executive Summary: World Robotics 2018 Industrial Robots", Available online on <http://www.worldrobotics.org>. Accessed in March 2019.
- [2] M. Vasic and A. Billard, "Safety issues in human-robot interactions," 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, 2013, pp. 197-204.

-
- [3] M. J. Rosenstrauch and J. Krüger, "Safe human-robot-collaboration-introduction and experiment using ISO/TS 15066," 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Nagoya, 2017, pp. 740-744.
 - [4] J. E. Colgate, W. Wannasupphoprasit and M. A. Peshkin, "Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators," (1996).
 - [5] A. Csizsar, M. Drust, T. Dietz, A. Verl, C. Brisan, "Dynamic and interactive path planning and collision avoidance for an industrial robot using artificial potential field based method," in *Mechatronics*, pp. 413-421, 2012.
 - [6] P. A. Lasota, G. F. Rossano and J. A. Shah, "Toward safe close-proximity human-robot interaction with standard industrial robots," 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Taipei, 2014, pp. 339-344.
 - [7] N. Pedrocchi, M. Malosio and L. M. Tosatti, "Safe obstacle avoidance for industrial robot working without fences," 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO, 2009, pp. 3435-3440.
 - [8] T. Pettersen, J. Pretlove, C. Skourup, T. Engedal and T. Lokstad, "Augmented reality for programming industrial robots," The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2003. Proceedings., Tokyo, Japan, 2003, pp. 319-320.
 - [9] V. Paelke, "Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an industry 4.0. environment," Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), Barcelona, 2014, pp. 1-4.
 - [10] R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier and B. MacIntyre, "Recent advances in augmented reality," in *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 21, no. 6, pp. 34-47, Nov.-Dec. 2001.
 - [11] S. K. Ong, M. L. Yuan and A. Y. C. Nee "Augmented reality applications in manufacturing: a survey," *International Journal of Production Research*, vol. 46, no. 10, pp. 2707-2742, 2008.
 - [12] D. W. F. Van Krevelen and R. Poelman, "A survey of augmented reality technologies, applications and limitations," *International Journal of Virtual Reality*, 9(2):1, 2010.
 - [13] T. İçten G. Bal "Artırılmış gerçeklik üzerine son gelişmelerin ve uygulamaların incelenmesi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 5 no. 2, pp. 111-136, 2017.
 - [14] J. E. Bresenham, "Algorithm for computer control of a digital plotter," in *IBM Systems Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 25-30, 1965.

Yüksek Tork Çıkışlı Seri Elastik Eyleyiciler için Burulma Yayı Tasarımı ve Topoloji Eniyileştirmesi

Sinan Emre, Polat Şendur, Mehmet C. Yıldırım, Barkan Uğurlu

Makina Mühendisliği Bölümü

Özyeğin Üniversitesi

34794 İstanbul, Turkey

E-posta: {sinan.emre,mehmet.yildirim}@ozu.edu.tr, {polat.sendur, barkan.ugurlu}@ozyegin.edu.tr

Özet—Bu bildiride yüksek tork çıkışlı seri elastik eyleyiciler için burulma yayı tasarımı ve topoloji optimizasyonu süreçleri sunulmuştur. Daha önceden üretilen yaylar topoloji optimizasyonu yöntemi uygulanmadan sonlu elemanlar analizi ve burulma deneyleri yapılarak tasarlanmıştır. Bu bağlamda yaylar üzerinde uygulanan deneyler sonucunda bir katılık formülü oluşturulmuştur. Üretilen yayın şeklini, basit bir geometri üzerinden topoloji optimizasyonu yöntemi uygulanarak tekrar elde edilmeye çalışılmıştır. Topoloji optimizasyonundan elde edilen sonuçlar, üretilen yay ile karşılaştırılıp doğrulanması yapılmıştır. Buna göre üretilen yayın geometrisi, istenilen koşulları karşılayabilen en uygun geometri olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler—topoloji optimizasyonu, gerilme, eğilme gerinin enerjisi, enerji katılık ölçüsü, seri elastik eyleyiciler

I. GİRİŞ

Günümüzde insanlar, robotik sistemler ile daha fazla fiziksel etkileşim halindedirler. Bunların en çarpıcı örneği, hem rehabilitasyon hem de deneysel amaçlı kullanılan dış iskelet sistemleridir. Özellikle sağlık alanında yaygınlaşan ve kullanılan bu sistemler, birebir insanlarla fiziksel etkileşim halinde olduğu için çeşitli güvenlik sorunları oluşturabilmektedir [1]. Literatürde bu problem için kullanılan çözümlerden biri; robotu, uzuvlarına uygulanan kuvvetler üzerinden kontrol etmeyi amaçlayan eyleyicilerdir. Seri Elastik Eyleyiciler (SEE), bu bağlamda robotik veya mekanik sistemler üzerinde yük kontrolü yapıp ve buna bağlı olarak sistemin hareketini sağlayan mekanik elemandır.



Şekil 1: Seri Elastik Eyleyici blok şeması [2]

Şekil 1’de SEE’nin blok şeması verilmiştir. Görüldüğü üzere yük SEE üzerindeki yaya uygulanmaktadır. Yay üzerinde gerçekleşen uzanım değişimine göre yük hesaplanmaktadır ve kontrol algoritması, hesaplanan yük üzerinden kurulmaktadır. Böylece hem sistemin kontrol hassasiyeti artarmaktadır hem de mekanik sistemin daha verimli hareket etmesi sağlanmaktadır. Bu nedenle SEE tasarımları robotik sistemlerde önemli bir

rol oynamaktadır. Yaylar, burulduğu açı veya uzadığı/sıkıştığı yönde enerjiyi depolayan ve serbest kaldığında eski konumuna dönen makina elemanlarıdır. Genellikle çeki-baskı, eğilme ve burulma olarak sınıflandırılmışlardır.

Kashiri ve arkadaşlarının [3] yaptığı çalışmada; tork sensörleri yardımıyla bağdaşım noktalarından yapılan tork kontrolünün, fiziksel etkileşimlerde daha hassas sonuçlar verdiğini belirtilmektedir. Özellikle insan robot etkileşiminde önemli olan bu faktör, dış iskelet tasarımlarında tork kontrollü SEE ünitelerinin kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. Bu bilgiler ışığında, Özyeğin Üniversitesi Biyomekatronik Laboratuvar’ında tasarlanmış olan dış iskelet ünitelerinde, bağdaşım noktalarından tork kontrollü SEE mekanizmaları kullanılmaktadır [4].

SEE ünitelerinde tork kontrolü yapılması, beraberinde bir burulma yayı ihtiyacını doğurmaktadır. Burulma yayları üzerine uygulanan burulma kuvveti (tork) yardımıyla açılabilir olarak burulurlar. Literatürde bu tip yayların tasarımı ihtiyaca göre değişmektedir. Carpino ve arkadaşları [5] burulma açısının katılık değeri ve yayın şekline bağlı olduğu topolojik bir tasarım kullanmışlardır; Yoon ve arkadaşları [6] konvansiyonel hiposikloid mekanizmalı burulma yayı sistemi ile uysallık ve yüksek kuvvet kontrol bant genişliğini aynanda elde etmeyi hedeflemişlerdir; Giovacchini ve arkadaşları [7] ise silindirik yapılu burulma yayı kullanarak yüksek torklara erişim imkanı vermişlerdir. Hem tork değerinin, yayın burulma açısı üzerinden okunup kontrolünün yapılması, hem de yay yüksek katılık değerine ihtiyaç duyulmasından dolayı Özyeğin Üniversitesi Biyomekatronik Laboratuvar’ında geliştirilen SEE üniteleri için topolojik burulma yayı tasarlanmıştır [8]. Yayın tasarlanma sürecinde statik ve yorulma analizlerinin yanı sıra üretilen yaylar üzerinde deneyler de yapılmıştır. Bu süreçte yayın son geometrisi oluşturulmuştur. Bu bağlamda üretilen son yayın geometrisinin, belirli sınırlandırmalar altında en doğru geometri olup olmadığını test etmek için topoloji optimizasyonu yapılmıştır.

Topoloji optimizasyonu; parçalar üzerindeki tasarım alanlarının malzeme dağılımını, istenilen koşullar altında belirleyen ve ona göre bir geometri çıkaran optimizasyon yöntemidir. Genellikle tasarım alanı sınırının olduğu, ağırlık olarak hafif olması istendiği, uzun ömürlü tasarım ihtiyacı olduğu veya malzemenin uysallık değerinin minimum olması istendiği durumlarda tercih edilir. Bu yöntemin en büyük avantajı mevcut tasarımları daha hafif hale getirebilmesi ve tasarım sürecini hızlandırmasıdır. Topoloji optimizasyonu

problemlerinin çözümü için bir tane hedef fonksiyonuna ve tasarım limit fonksiyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Sonrasında, topoloji optimizasyonu, malzemenin belirlenen amaç fonksiyonu ve sınır koşullarını sağlayacak malzeme dağılımını belirler. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) yöntemi diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır. Rozvany [10] yaptığı çalışmada NOM (Non-Optimal Microstructures) yöntemi, OMP (Optimal Microstructure with Penalization) yöntemi ve SIMP yöntemini karşılaştırmıştır. SIMP yönteminin diğer yöntemlere göre en büyük avantajı; her tasarım şartı için uygun olması, matematiksel olarak daha hızlı çözüme ulaşabilmesi ve değişkenleri her element üzerine tek tek yayabilmesidir. Bu nedenle optimizasyon sürecinde SIMP yöntemi kullanılmıştır.

Bu bildiride, dış iskelet sisteminde kullanılan SEE'lerdeki burulma yaylarının topoloji optimizasyon süreci açıklanmıştır. Optimizasyon sürecinin matematiksel formülasyonu oluşturulduktan sonra gerekli simülasyon programları yardımıyla topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyondan elde edilen geometri, üretilmiş olan burulma yayı ile karşılaştırılmıştır.

II. PROBLEM FORMÜLASYONU

Burulma yayı için hedeflenen maksimum burulma açısı $2^\circ(0.035 \text{ rad})$ olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi 2° 'den fazla açı veildiğinde sistemi çok yumuşak yapmaktadır. Malzeme olarak alüminyum 7075-T6 seçilmiştir. Bu sebeble Tablo I'de verilen limit koşulları, bu özellikler etrafında şekillenmiştir.

Tablo I: Limit koşulları

Katılık	5200 Nm/rad
Maksimum Açı	0.035 rad
Eğilme Gerinim Enerjisi	3185 J/m ³
Yorulma Gerinimi	159 MPa

Yıldırım ve arkadaşları [11], önceden modelledikleri burulma yayına, FEM (Finite Element Method) analizi yapıp katılık değerini, denklem (1)'deki gibi formüle etmişlerdir. ST değeri yay kalınlığını, FT değeri ise feder kalınlığını vermektedir. Topoloji optimizasyonu sonucunda elde edilen şeklin parametreleri ve katılık değeri sabit tutularak; denklem (1) yardımıyla elastik bölgenin kalınlığı hesaplanabilmektedir.

$$K_{emp} = -60.82 - 0.14ST^2 + 0.33FT^2 + 8.86ST + 7.01FT + 0.0STFT \quad (1)$$

Daha sonra üretilen gerçek yaylar üzerinden katılık testi uygulanarak tam katılık değeri elde edilmiştir. Aynı şekilde yorulma analizi yapıp yayın maksimum dayanabildiği tork değeri elde edilmiştir [11]. Eğilme gerinim enerjisi denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$U = \int_0^\theta \frac{T}{2} d\theta \quad (2)$$

U eğilme gerinim enerjisini, T tork değerini ve θ açı değerini vermektedir. Hesaplamalar yapılırken tork değeri 182Nm olarak verilmiştir. Verilen tork değeri malzemenin

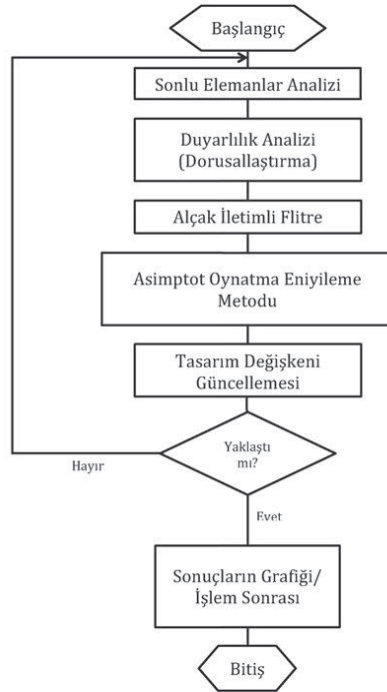
katılık değerine ve maximum burulma açısına göre seçilmiştir. Topoloji analizi bu değerler çerçevesinde yapılmıştır. Aşağıda topoloji optimizasyonu için problem formülasyonu verilmiştir.

$$\text{amaç fonksiyonu : } \begin{cases} \min_p U(p, \theta(p)) = \sum_0^m \int_0^\theta \frac{T}{2} d\theta \\ m = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{koşulu ile: } \begin{cases} \frac{V(p)}{V_0} < f \\ \theta K = T \\ E_i < E \quad E = \frac{T^2}{2K} \\ 0 < p_{min} \leq p \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

Model üzerinden her döngüde hacim ($V(p)$), katılık enerji ölçüsü ve eğilme gerinim enerjisi (U) değerleri elde edilmiştir. Amaç fonksiyonu eğilme gerinim enerjisi üzerinden kurulmuştur. Bağlı koşullar ise sırasıyla hacim kesiri f , tork T , enerji katılık ölçüsü E ve yoğunluk p olarak belirlenmiştir. E_i değeri 3185 Nm olarak belirlenmiştir. U ve E değerleri bizim durumumuzda aynı değeri vermektedir. Böylece optimizasyon denklemi kurulurken U değerini belirlediğimiz E_i değerine kadar minimize edebiliyoruz. V_0 ise başlangıç hacmini vermektedir.

III. OPTİMİZASYON

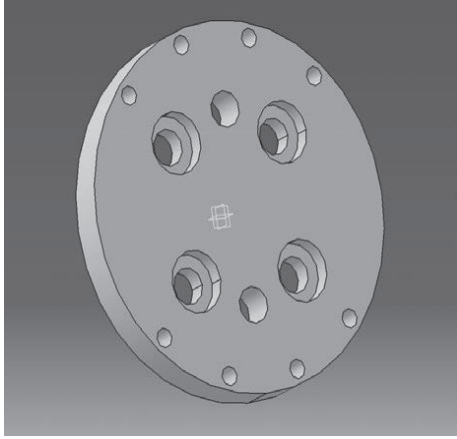


Şekil 2: Topoloji optimizasyonu süreci [9]

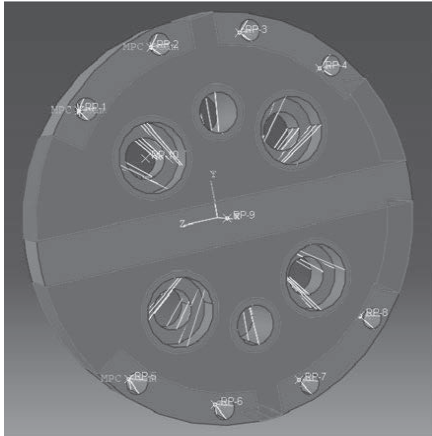
Şekil 2'de topoloji optimizasyon süreci verilmiştir. Kullanılan yazılımlar, istenilen sonuca ulaşmaya kadar bu döngüyü devam ettirirler. Ancak bu döngü bittikten sonra sonuçlar gözlemlenebilir. Optimizasyondan elde edilen şekil üzerinden son tasarım elde edilir.

A. Modelin Oluşturulması

Topoloji optimizasyonu, ANSYS yazılımı aracılığıyla yapılmıştır. İlk olarak CATIA yazılımı üzerinden Şekil 3a'daki gibi basit bir model oluşturulmuştur. Şeklin çapı 80 mm olup kalınlığı 10 mmdir. Kenarlara yakın 8 adet 4 mm çapında delikler bulunmaktadır. Merkeze yakın olan delikler ise 8 mm çapındadır. Yayların motor bağlantısı, iç delikler üzerinden yapılacaktır.



(a) Optimizasyon öncesi şekil



(b) Optimizasyon modeli

Şekil 3: Topoloji öncesi yay modeli

Yazılım üzerinden araç çubuğu kullanılarak yayın gerçekte maruz kalacağı statik koşullar oluşturulmuştur. Öncelikle ilk model Şekil 3b'deki gibi iki ayrı bölgeye ayrılmıştır. Kırmızı alanlar, topoloji optimizasyonunun uygulanacağı bölge olarak seçilmiştir. Ortada topolojiye katılmayan hacim, 8mm genişliğindedir. Bu hacmin topoloji optimizasyonuna katılmama sebebi yayın merkezden 2° burulmasını sağlamaktır. Malzeme özellikleri belirlenirken alüminyum 7075-T6 referans alınmıştır. Modelin bir yay olmasından dolayı malzemenin hem elastik, hem plastik özellikleri hesaba katılmıştır. Tablo II'de malzemenin özellikleri gösterilmiştir. Bu özellikler şekilde bölünmüş olan bölgelere ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Tablo II: Alüminyum 7075-T6 malzeme özellikleri [12]

Mekanik Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2.81
Mekanik Özellikler	
Kopma Dayanımı (MPa)	572
Akma Sınırındaki Gerilme Direnci (MPa)	503
Elastiklik Katsayısı (GPa)	71.7
Poisson Oranı	0.33
Yorulma Dayanımı (MPa)	159
Makaslama Modülü (GPa)	26.9
Makaslama Dayanımı (MPa)	331

Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra şekil üzerinde referans noktaları belirlendi. Dıştaki deliklerin merkez noktaları ile şeklin merkez noktası referans olarak alındı. Model oluşturulurken bu merkezler üzerinden sabitleme ve yük uygulama işlemleri yapılmıştır. İçteki 8mm'lik delikler şeklin merkezindeki referans noktasına çoklu nokta sınırlandırma tekniği ile bağlanmıştır. Böylece merkezdeki referans noktasına uygulanacak herhangi bir kuvvet ilk olarak içteki delikleri etkileyecektir. 4mm çapındaki dış delikler ise kendi merkezlerindeki referans noktalarına, çoklu nokta sınırlandırma tekniği ile sabitlenmiştir.

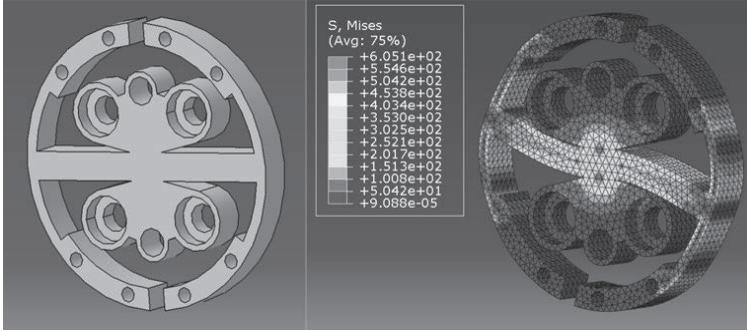
Referans noktaları ile şekil arasındaki ilişkilendirmeler yapıldıktan sonra şekil, kenardaki 8 delikten 6 hareket açısında sabitlenmiştir. Şeklin merkezindeki referans noktasına ise 182 Nm tork verilmiştir. Tork değeri, denklem (5) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\theta K = T \quad (5)$$

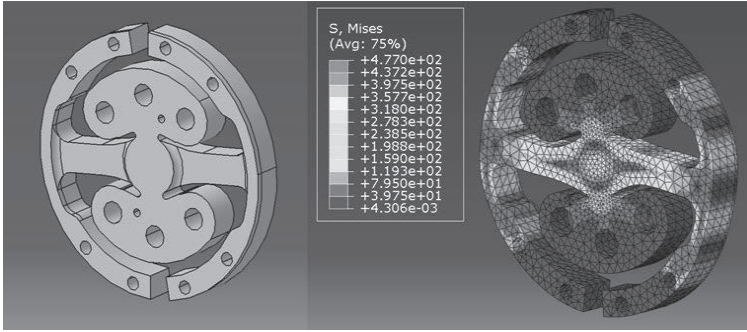
B. Optimizasyon Kurulumu

İlk model üzerinde çözüm ağı oluşturulmuştur. Şekil, silindirik olduğu için dörtüzlü çözüm ağı yöntemi uygulanmıştır. Topoloji optimizasyon uygulaması bu şekilde oluşturulan 98190 eleman üzerinden gerçekleştirilecektir. İlk olarak model üzerinde statik analiz yapılmıştır. Bunun yapılma sebebi topoloji optimizasyonu öncesi oluşturulan FEM modelinin hatasız bir şekilde koştuğuna emin olmaktır.

Topoloji optimizasyonu, denklem (3) ve (4) kullanılarak oluşturulmuştur. Buna göre şekil üzerinden hacim, enerji katılık ölçüsü ve eğilme gerinim enerjisi tasarım yanıtı olarak alınmıştır. $U(p, \theta(p))$, amaç fonksiyonu içine tanımlanmıştır.



(a) Optimizasyondan elde edilen tasarım



(b) Son yay tasarımı

Şekil 4: Statik analiz sonuçları

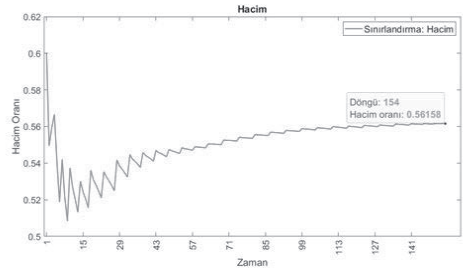
Amaç fonksiyonu eğilme gerinim enerjisini minimize etmeye çalışacaktır. $V(p)$ ve E koşul denklemi (4) baz alınarak sınırlandırma olarak belirlenmiştir. f değeri 0.9 ile 0.65 arasında bir değer seçilmiştir. Buna göre hedeflenen hacim ile ilk hacim oranı f değerinden küçük olmak zorundadır. Aynı şekilde E değeri de 3185 Nm^3 'den büyük olacak şekilde sabitlenmiştir. Böylece $U(p, \theta(p))$ değeri minimum 3185 Nm^3 'ye kadar minimize edilebilecektir. Optimazyon alanı olarak Şekil 3b'deki kırmızı bölge seçilmiştir. Optimizasyon döngüsü için üst sınır 200 döngü olarak belirlenmiştir.

IV. OPTİMİZASYON SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

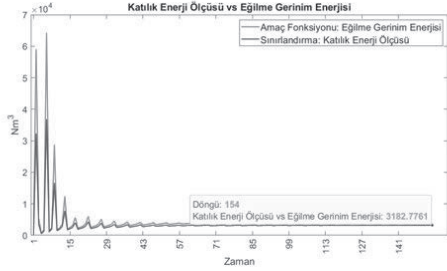
Topoloji optimizasyonu 154 döngüde yakınsamıştır. Gerçekleşen her döngüde sınırlandırma değerleri, belirlenen limit koşullarına yaklaştırılmıştır.

Şekil 5'de $V(p)/V_0$ değerinin 154 tane döngü içindeki oranları verilmiştir. İstenilen eğilme gerinim enerjisine ulaşmak için çıkan son hacim, ilk hacmin 0.56 katı kadardır. Şekil 6'da $U(p, \theta(p))$ ve E değerlerinin 154 döngü içindeki değişimleri verilmiştir. Bu modelde $U(p, \theta(p))$ ve E değerleri aynı olduğundan dolayı $U(p, \theta(p))$ değeri 3185 Nm^3 değerine kadar inebilmiştir. Böylece elde edilen şeklin istenilen koşullara yaklaşması sağlanmıştır.

Şekil 7'de topoloji optimizasyonundan çıkan şekil verilmiştir. Orta kısımda dar bir boğaz oluşmuştur. Yay, burulmasını bu bölgede gerçekleştirmektedir. Yani bu bölgedeki geometrik değişim yayın burulma açısını ve dolaylı olarak K_{emp} değerini etkilemektedir. Böylece yay için belirlenen denklem 1 topoloji optimizasyonu ile doğrulanmıştır. Şekil 5'de görüldüğü üzere 154 döngü sonunda hacim ilk hacmin %56'sına kadar azalmıştır.

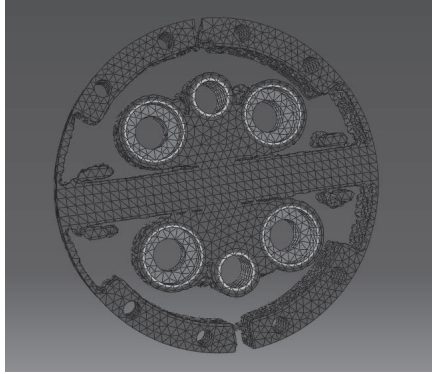


Şekil 5: Her döngü için hacim



Şekil 6: Her döngü için katlık enerji ölçüsü ve eğilme gerinim enerjisi karşılaştırılması

Elde edilen tasarımın, sonuçları doğrulamak için CATIA ortamında modellendikten sonra statik analizi tekrarlanmıştır. Şekil 4'de iki statik analizlerin karşılaştırmaları gösterilmiştir. Statik analizden çıkan sonuca göre optimizasyondan çıkan yay 1.7° burulmaktadır. 2° ile arasındaki 0.3° 'lik fark şekle bağlı olarak değişkenlik gösteren atalet değerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4a'daki kırmızı bölgeler, Von Mises geriliminin en yüksek olduğu bölgelerdir. Burdaki gerilim değerinin, malzemenin 503 MPa olan akma gerilmesi değerini geçtiği gözlemlenmiştir. Bunu önlemek için model üzerinde iyileştirmeler yapıp Şekil 4a modeli elde edilmiştir. Yapılan statik analizde 2° 'lik burulma açısına ulaşılabilmiştir. Ayrıca kırmızı bölgelerde, von mises geriliminin akma geriliminden daha küçük olduğu saptanmıştır. Bu sebeple yayda plastik bozulma olmamaktadır.



Şekil 7: Yay topolojisi

V. SONUÇ

Bu çalışmada, dış iskelet SEE'leri için üretilen burulma yaylarına topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon modeli oluşturulurken SIMP yöntemi uygulanmıştır. Ancak en yakın sonuca varabilmek için eğilme gerinim enerjisi amaç fonksiyonu olup, aynı değeri veren enerji katlık ölçüsü sınırlandırma olarak tanımlanmıştır. Yapılan optimizasyon, belirli statik koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlara bakıldığında istenilen eğilme gerinim enerjisine 154 döngüde ulaşıldığı ve hacmin 0.56 katına düştüğü gözlemlenmiştir. Çıkan geometri, CATIA ortamında tekrardan modellenip statik analiz yardımıyla şekil üzerindeki kritik bölgeler belirlenmiştir. Üretilen yayın modeli ile karşılaştırıldığında bu bölgelerin giderildiği gözükmemektedir. Dolayısıyla çıkan yay topolojisinin, üretilen yay topolojisiyle benzer olduğu ve kritik bölgeler giderildiğinde bu yay için önceden çıkarılmış olan denklem 1 ile bağdaştığı sonucuna varılmıştır. Buna göre üretilen burulma yayı, istenilen koşulları sağlayan en uygun yay geometrisine sahiptir. Simülasyon araçlarının, robotik sistemlerde sıklıkla kullanılan seri elastik eyleyicilerin mekanik gerekliliklerini, tasarım hafif olacak şekilde sağlamak konusunda önemini göstermektedir.

VI. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 215E138 numaralı proje kapsamınca desteklenmektedir. Yazarlar G. Tunusoğlu ve Sinan Coruk' a teşekkür eder.

KAYNAKÇA

- [1] M. Zinn, O. Khatib, B. Roth and J. K. Salisbury, "Playing it safe [human-friendly robots]," in IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 11, no. 2, pp. 12-21, June 2004.
- [2] G. A. Pratt and M. M. Williamson, "Series elastic actuators," Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots, Pittsburgh, PA, USA, 1995, pp. 399-406 vol.1.
- [3] N. Kashiri, J. Malzahn, and N. G. Tsagarakis, "On the Sensor Design of Torque Controlled Actuators: A Comparison Study of Strain Gauge and Encoder-Based Principles," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 2, no. 2, pp. 1186-1194, 2017.
- [4] M. C. Yıldırım, A. T. Kansizoglu, P. Sendur, and B. Ugurlu, "High Power Series Elastic Actuator Development for Torque-Controlled Exoskeletons," Biosystems and Biorobotics Wearable Robotics: Challenges and Trends, pp. 70-74, 2018.
- [5] G. Carpino, D. Accoto, F. Sergi, N. L. Tagliamonte, and E. Guglielmelli, "A Novel Compact Torsional Spring for Series Elastic Actuators for Assistive Wearable Robots," Journal of Mechanical Design, vol. 134, no. 12, p. 121002, 2012.
- [6] J. H. Yoon and D. Hong, "Design of a Novel Torsional Spring for the Next Generation Compliant Actuators," Volume 5B: 42nd Mechanisms and Robotics Conference, 2018.
- [7] F. Giovacchini, M. Cempini, N. Vitiello, and M. C. Carrozza, "Torsional Transmission Element With Elastic Response," 24-Apr-2018.
- [8] M. C. Yıldırım, P. Sendur, and B. Ugurlu, "Mechanical Design Procedures for Series Elastic Actuators," Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, vol. 25, no. 1, pp. 34-42, 2019.
- [9] M. P. Bendsoe and O. Sigmund, Topology optimization: theory, methods and applications. Berlin: Springer, 2003.
- [10] G. Rozvany, "The SIMP method in topology optimization - Theoretical background, advantages and new applications," 8th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, 2000.
- [11] M. C. Yıldırım, P. Sendur, O. Bilgin, B. Gulek, G. G. Yapici, and B. Ugurlu, "An integrated design approach for a series elastic actuator: Stiffness formulation, fatigue analysis, thermal management," 2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids), 2017.
- [12] ASM Material Data Sheet. [Online]. Available: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma7075t6>. [Accessed: 02-Mar-2019]. Information provided by The Aluminum Association, Inc. from Aluminum Standards and Data 2000 and/or International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys (Revised 2001).

Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Çoklu Serbestlik Dereceli Pnömatik Rehabilitasyon Ortezi

E. Tuğberk GÜLNERGİZ
Mekatronik Mühendisliği,
İstanbul Gedik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
tugberk.gulnergiz
@gedik.edu.tr

A. Asena YEKDANEH
Physical Therapy and
Rehabilitation
Yeditepe University
ayseasena.yekdaneh
@std.yeditepe.edu.tr

Savaş DİLİBAL
Mekatronik Mühendisliği,
İstanbul Gedik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
savas.dilibal
@gedik.edu.tr

Haydar ŞAHİN
Mekatronik Mühendisliği,
İstanbul Gedik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
haydar.sahin
@gedik.edu.tr

Öz — Robotik sistemlerin rehabilitasyon alanında kullanılması son yıllarda üzerinde çalışılan araştırma alanlarından birini oluşturmaktadır. Özellikle uygulanan kuvvet ve moment değerlerinin kontrollü olarak üst ve alt ekstremitelere uygulanabilmesi; ölçüm ve tekrar kolaylığı sağlamaktadır. Esnek robotik sistem konsepti, rehabilitasyon ortezlerinin geliştirilmesinde farklı tasarımların ortez olarak kullanılmasının önünü açmıştır. Bu çalışmada, katmanlı imalat yöntemiyle iki ayrı geometride üretilmiş çoklu serbestlik dereceli pnömatik rehabilitasyon ortezleri sonlu elemanlar analizi vasıtasıyla incelenmiş, gerilme ve yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Ek olarak içerisinde kullanılması planlanan robotik sistem hakkında bilgi verilmiş ve gelecek çalışmaların kısa tasviri yapılmıştır.

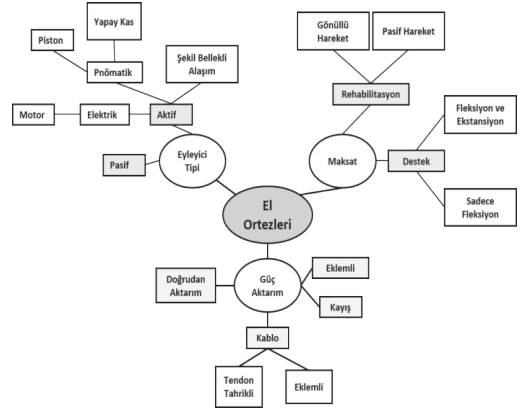
Anahtar Kelimeler— *El Rehabilitasyonu, Aktif Pnömatik Ortez, Esnek Robotik, Eklem Hareket Açıklığı, Doğrudan Güç Aktarımı*

1. GİRİŞ

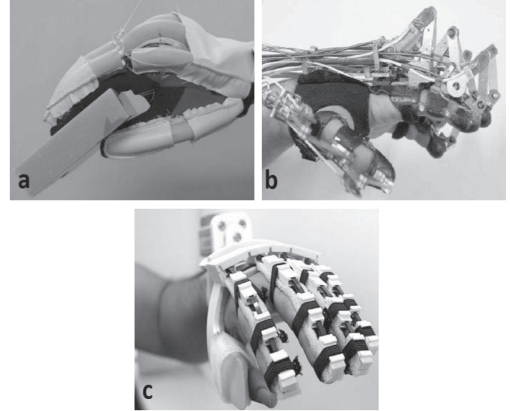
Motor fonksiyonlarında azalma veya tümüyle kaybolma, nörolojik ve ortopedik hastalıkların yaygın sonuçlarından biridir. Özellikle üst ekstremiteye yönelik çalışmalar başta olmak üzere, motor fonksiyonların rehabilitasyonuna yönelik araştırmalar incelendiğinde, özellikle robotik rehabilitasyon alanında yapılan çalışmaların artışı dikkat çekmektedir. Bunun sebebi, yüksek güç isteyen, uzun süreli ve tekrar gerektiren uygulamalarda, robotik rehabilitasyonun sağladığı kolaylıklar olarak gösterilebilir. [1] Buna ilave olarak, hasta sayısındaki artış ve görülen hastalıkların varyasyonları nedeniyle geleneksel rehabilitasyon uygulamalarına yardımcı cihazların kullanımı oldukça önem kazanmıştır.

Tüm vaka grupları ile tamamen uyumlu bir egzersiz uygulaması söz konusu değildir. Bu nedenle, özellikle rehabilitasyon egzersizlerinin vakaya göre özelleştirilmesi önemli parametrelerden birini oluşturmaktadır. Örneğin, akut hemipleji, brakial plexus vb. nörolojik hastalıklarla kaybolabilen el fonksiyonları, kendini flask (gevşek) parmak kasları ile gösterebilirken; Spastik Serebral Palsi veya Kronik Hemiplejide parmak kaslarında flastisite yerine spastisite (katılaşma) görülür. Hastalığa özel bu semptomların hangi seviyede görülebileceği ise kişiden kişiye değişkenlik göstermektedir. [2] Ayrıca, hastanın yaşı ve tıbbi geçmişi gibi üçüncü dereceden faktörler de izlenecek olan egzersiz uygulamalarını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle kullanılan

tedavi yöntemlerinin ve gereçlerinin hasta durumuna göre seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 1. El Ortezlerinin Sınıflandırılması



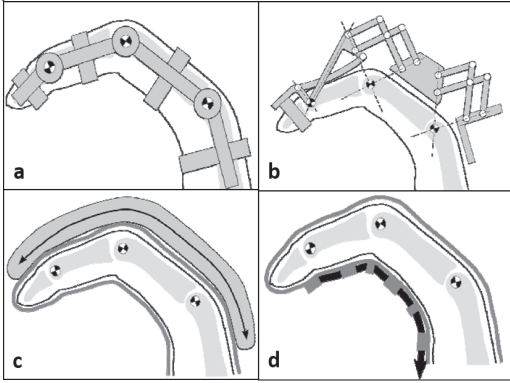
Şekil 2. Bazı Aktif El Ortezleri [(a)Toya ve ark.'ın Pnömatik Yapay Kaslı Yardım Ortezi^[3]; (b)Wege ark.'ın Elektrik Motorlu Yardım Ortezi^[4]; (c) Arata ve ark.'ın Lineer Elektrik Motorlu Yardım Ortezi^[5]

Ancak robotik el rehabilitasyonu alanında yapılan derlemeler incelendiğinde; çalışmaların çok büyük bir bölümünün, benzer metotların farklı biçimlerde uygulanması olduğu görülmüş; özellikle güç aktarım ve tahrik tekniği açısından birkaç farklı komplike yöntemin benimsendiği tespit edilmiştir. Bu yöntemlerin birbirlerine ve geleneksel fizik tedavi tekniklerine olan avantaj ve dezavantajları farklı çalışmalarda birçok kez incelenerek ortaya konulmuştur.

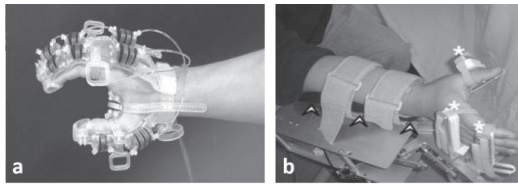
Şekil 1’de görülebileceği üzere el ortezleri, eyleyici tipine, maksadına ve güç aktarım tekniğine göre 3 ana başlık altında sınıflandırılabilir. Aktif el ortezleri sınıfına giren bazı tasarımlar Şekil 2’de sunulmuştur.

Yapılan taramalarda sıklıkla karşılaşılan güç aktarım mekanizmalarından bazıları Şekil 3’de sunulmuştur. Görülebileceği üzere, bu mekanizmaların ortak noktaları, oldukça komplike yapılara sahip olmalarıdır.

Pnömatik eyleyicili ortez alanında yapılan çalışmalara özel olarak bakıldığında da durumun çok farklı olmadığı dikkat çekmektedir.



Şekil 3. Sıklıkla Kullanılan Güç Aktarım Mekanizmalarından Bazıları [(a) Eklem Merkezlerinden Tahrik^[6]; (b) Uzak Dönel Merkez Bağlantılı Tahrik^[7]; (c) Eklem Bağlı Bükümlü Eyleyici^[8]; (d) Tendon Tahrik Mekanizması^[9]



Şekil 4. Pnömatik Eyleyicili Ortez Örnekleri

Rehabilitasyon maksatlı tasarımlardan HWARD^[10] isimli çalışma 4/b’de gösterilmiştir. Eklemli güç aktarım tekniği kullanan bu tasarım toplam üç serbestlik derecesine sahiptir. Şekil 4/a’da gösterilen Exo-Glove PM^[11] isimli çalışma ise yardım maksatlı bir dış iskelet tasarımıdır ve çoklu serbestlik derecesine sahiptir.

Yukarıda anlatılan rehabilitasyon ihtiyaçlarının değişkenliği nedeniyle robotik rehabilitasyon sistemleri, geleneksel rehabilitasyon tekniklerinin yerini alıcı olmaktansa destekleyicisi olduğu görülmüştür. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda ve yapılan çalışmalar incelendiğinde, el ve parmak kaslarında spastisite veya eklemlerinde kontraktür bulunan hastalar için geliştirilmiş, klasik rehabilitasyon tekniklerini destekleyici, kullanışlı, adaptasyonu kolay ve sade bir sistem geliştirilmesi fikri doğmuştur.

II. METOT

Daha önce bahsedilen çalışmalarda kullanılan tahrik mekanizmaları elektronik ve Pnömatik tahrik yöntemleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Pnömatik olarak tahrik edilen sistemlerin bazılarında “yapay kas” sistemlerinin kullanıldığı görülse de bu sistemlerde de görece komplike güç aktarım mekanizmaları kullanılmıştır.

Yapılan taramalarda, katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş yapay kasların, direkt güç aktarım tekniğiyle fizik tedavi ve rehabilitasyon alanında kullanımıyla alakalı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada tahrik yöntemi olarak pnömatik yapay kas tercih edilmiş olup, hiçbir güç aktarım mekanizmasına yer verilmemiştir.

A. Tasarım

Pnömatik yapay kas denildiğinde en çok kullanılan yöntemlerden biri olan lateks tüp yöntemi, oldukça işlevsel ve faydalı bir yöntemdir. Özellikle doğru tasarlandığında ve iyi bir güç aktarım mekanizması ile kullanıldığında, oldukça verimli çalışan ve çok yüksek güç/ağırlık oranları sunan sistemlerdir. Ancak insan eli gibi kompleks şekillere doğrudan güç aktarımı istendiğinde, lateks tüp yöntemi ile üretilen yapay kasların geleneksel yapıları istenilen verimi sunmamaktadır ve genellikle çok yüksek uzama-kısalma davranışı gösterse de genişleme-daralma oranları istenilen seviyelerde değildir.



Şekil 5. Çoklu Serbestlik Dereceli Pnömatik Rehabilitasyon Ortezi

Öte yandan, katmanlı imalat yöntemini ile yapay kas üretilmesi oldukça özelleştirilebilir bir konsepttir. Farklı amaçlar için farklı tip ve ebatlarda üretilen bu kasların üretimi için herhangi bir kılavuz söz konusu değildir. Doğru iş için doğru tasarımın belirlenmesi; o tasarımın üretilmesi, denenmesi ve eksiklerin giderilerek tekrar üretilmesi yoluyla mümkün olmaktadır. Bu bağlamda üç farklı tasarım üzerinde yapılan incelemeler ardından, Şekil 5'de gösterilen tasarımda karar kılınmıştır.

El açma egzersizlerinde doğrudan güç aktarım yöntemi seçildiğinde, dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, tahrik mekanizmasının istenilen eklem hareket açıklığına (EHA) uygun olmasıdır. Bu bağlamda tasarımın şekilsel ve yapısal açıdan istenilen kavrama, duyu ve hareket fonksiyonlarına sahip olması önemlidir.

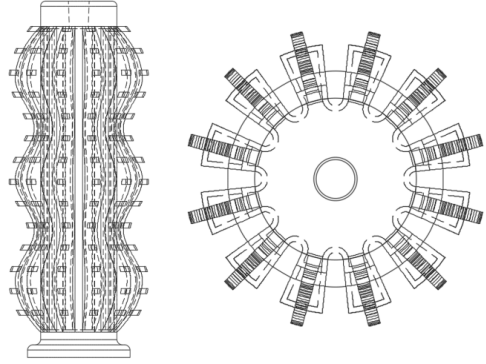
Toplam on iki kanatçıga sahip olan tasarımın yatay kesiti ve teknik çizimi sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur. 1 mm et kalınlığına sahip tasarımın etrafı, duyu girdisini artırmak amacıyla, yüzey alanı 18mm² den 22mm²'ye kadar olan 180 adet kübik çıkıntı ile çevrelenmiştir.

Kavrama alanını ve ergonomiyi artırmak maksadıyla üç boğumlu olarak tasarlanan kasın tam boyu 142mm, sönük çapı ise en kalın ve en ince noktalarda (çıkıntılar hariç) sırasıyla 50mm ve 30mm'dir.

Tasarıma, ek olarak katmanlı imalatı kolaylaştırması ve kullanım sırasında destek sağlaması maksadıyla bir ayak bölümü ve pnömatik rakor bağlantısına uygun tepe deliği eklenmiştir.



Şekil 6. Tasarımın Yatay Kesit Görünümü



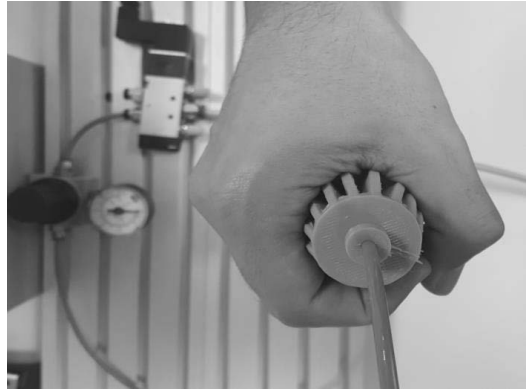
Şekil 7. Ortezın İskelet Görünümü

B. Biyo-Mekatronik Yöntem

Hemipleji, Serebral Palsi gibi çok sık karşılaşılan nörolojik hastalıkların sebep olduğu, kas kasılma bozuklukları nedeniyle bu hastalıklara sahip popülasyonun büyük bir çoğunluğunda el ve parmak fonksiyonlarında kayıplar görülmektedir.

Örneğin akut durumdaki hemiplejide kas tonusundaki azalmadan kaynaklı flask el durumu ortaya çıkmaktadır. Bu durum için önlem alınmadığı takdirde ise hastalığın ilerleyişine bağlı olarak, kas tonusunda kademeli bir artışı takiben, genellikle fleksör kas gruplarındaki anormal tonus artışı olarak adlandırılan "spastise" ortaya çıkmaktadır.

Bireyin eli flask durumdayken avuç içine yerleştirilerek kullanılabilen akif-pnömatik el ortezi içerisindeki hava basıncının değişimi sayesinde; kişinin fleksör kas gruplarında pasif germe ve parmaklarında ki bütün eklemlerde ekstansiyon hareketlerinin tekrarını sağlayarak, eklem hareket açıklığının artırılmasına yardımcı olur. [12] Uygulanan bu germe ile kişinin parmaklarının istenilen EHA derecesinde kalması sağlanır ve hastalığın ilerleyen dönemlerinde görülebilecek eklem kontraktürlerinin oluşması engellenir. Ek olarak görsel biyofeedback etkisi sağlayan devamlı pasif eklem açıklığı egzersizleri kişide motor öğrenmenin uyandırılmasını sağlar. [13]



Şekil 8. Pnömatik Rehabilitasyon Ortezinin Başlangıç Görünümü



Şekil 9. Pnömatik Rehabilitasyon Ortezinin Aktif Görünümü

Parmak fleksör kas gruplarında spastisite görülen durumlarda ise, spastisitenin ciddiyeti ise kişiden kişiye göre değişmektedir.

Örneğin, aktif olarak parmak fleksiyonu ve ekstansiyonu yapamayan bir kişinin parmaklarının açılması için ekstansiyon yönünde bir germe sağlanması gerekmektedir. Bu germelerin yapılması oldukça güç ve tekrar gerektiren egzersizler olduğundan bu tip durumlarda da tasarlanan el ortezine başvurulması oldukça yarar sağlamaktadır.

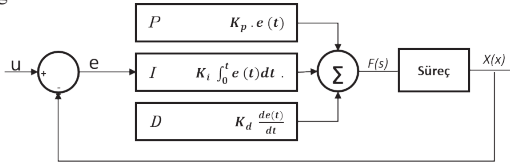
Ciddi bir spastisite görülmeyen ve aktif fleksiyon hareketini yapabilen hastalarda ise, parmak fleksör kas gruplarının güçlendirilmesi amacıyla, ortezin fleksiyon yönünde gösterdiği direnç ile dirençli egzersizler yapılabilir.

Aktif olarak ekstansiyon yapabilen hasta gruplarında ise, ekstansiyon hareketine yardımcı, sık tekrarlı veya devamlı egzersiz yapılması sağlanabilmektedir.

Ek olarak, tasarıma eklenen keskin kenarlı çıkıntılar ise, nörolojik bir semptom olan duyu kayıplarının azaltılması amacıyla; el ve parmaklardaki yüzeyel basınç ve taktıl duyusunu uyarır, böylece duyu girdisi sağlayarak hastanın farkındalığının artmasına yardımcı olur.

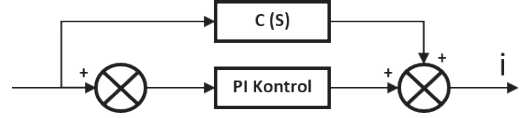
C. Robotik Yöntem ve Kontrol

Ortez aktif kullanımı için, kapalı çevrim kontrol mekanizmalı bir mekatronik sistem planlanmaktadır. Sektörde “Flex Sensor” olarak da bilinen, şekil değiştirmeye duyarlı esnek algılayıcının bu maksatla kullanımı uygun görülmektedir.

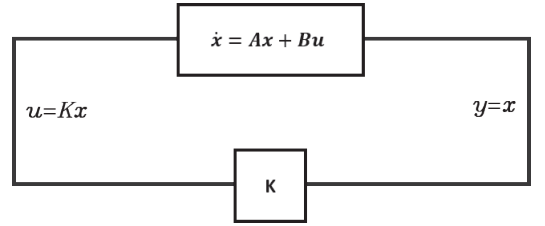


Şekil 10. PID Kontrol Şeması

Elektro-pnömatik sistem ile aktive edilecek olan tasarım, Şekil 10, 11 ve 12’de örneklenen temel PID kontrolden başlamak üzere PI Kuvvet ileri besleme ve optimizasyona dayalı durum geri besleme kontrolü gibi farklı kontrolcü algoritmalarıyla deneyerek, en başarılı sonucun hangi şekilde elde edildiği tespit edilecektir.



Şekil 11. PI Kuvvet İleri Besleme Kontrol Şeması



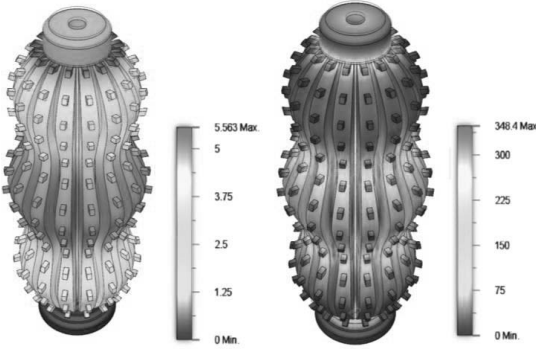
Şekil 12. Optimizasyona Dayalı Durum Geri Besleme Kontrol Şeması

Bunlara ek olarak, rehabilitasyon başarısını artırmak maksadıyla sistem, kolaboratif olarak, fizyoterapistle birlikte ve uyumlu çalışabilecektir. Bu kapsamda sistem, kullanılacak olan kapalı çevrim kontrolü sayesinde yüksek doğruluk ve hassasiyet ile gerek direkt konum komutuyla gerek ise fizyoterapistin manuel yönlendirmeleri ile çalışabilecektir.

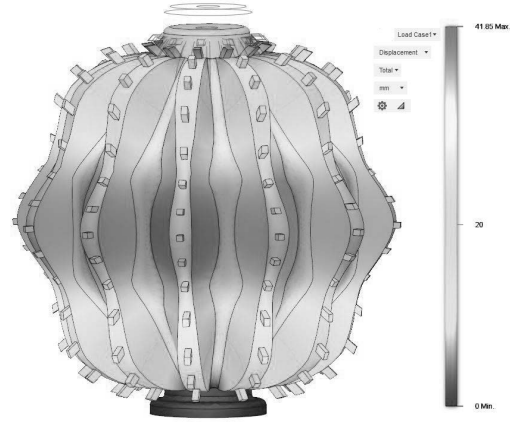
D. Analiz

Tasarımı tamamlanan 12 ve 16 kanatçıklı iki farklı orteze ait VonMises gerilme analiz sonuçları Şekil 13’de gösterilmiştir. Katmanlı imalat yönteminde kullanılan TPU malzemenin mekanik özellikleri analiz parametrelerine eklenerek ortezin iç çeperine 0,6 MPa statik iç basınç uygulanmıştır. İç basınç miktarı, planlanan kullanım senaryosuna uygun olarak, aşırı yüksek olmayacak ve küçük ebatlardaki kompresörlerle dahi elde edilebilecek şekilde seçilmiştir. Esnek robotlarda eğilme ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalarda uygulanan farklı basınç değerlerine göre oluşan kuvvet değerleri analiz sonucu bulunmuştur [14].

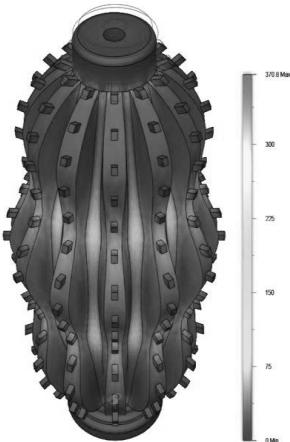
Ek olarak tercih edilen TPU malzemenin, tasarımın şekline de bağlı olarak, 0,6 MPa’nın üzerindeki basınçlarda gösterdiği şekil değiştirme oranı oldukça azalmakta ve tasarımın güvenlik faktörü kabul edilir sınırların altına düşmektedir. 0,6 MPa’nın altındaki basınçlarda ise istenilen şekil değiştirme miktarı yakalanılamamıştır. Tasarımın şekil değiştirme ve güvenlik faktörü eğrileri, farklı çalışmalarda detaylarıyla incelenecek olsa da elde edilen yer değişimi, gerilme ve güvenlik faktörü analizleri Şekil 13,14,15 ve 16’da sunulmuştur.



Şekil 13. 1mm Et Kalınlığına Sahip 16 Kanatçıklı Modelin Yer Değişimi ve Vonmises Gerilme Analiz



Şekil 14. 1mm Et Kalınlığına Sahip 12 Kanatçıklı Modelin Yer Değişimi



Şekil 15. 1mm Et Kalınlığına Sahip 12 Kanatçıklı Modelin Vonmises Gerilme Analizi



Şekil 16. 1mm Et Kalınlığına Sahip 12 Kanatçıklı Modelin Güvenlik Faktörü Analizi

Elde edilen sonuçlara göre; 16 kanatçıklı model 348.4 MPa 12 kanatçıklı model ise 370.1 MPa maksimum gerilme değerlerine ulaşmıştır. Anlaşılabacağı üzere, 16 kanatçıklı model 12 kanatçıklı modele göre 0.6 MPa basınç altında daha az gerilme göstermiştir. Ancak 16 kanatçıklı model ile elde edilen bu nispeten daha az gerilme miktarı karşılığında elde edilen şekil değiştirmenin önemli derecede az olması, tasarımın daha rijit bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

Ek olarak Şekil 16 incelendiğinde; 12 kanatçıklı tasarımın, daha yüksek gerilme altında çalışsa da malzemenin yapısı sebebiyle kabul edilir güvenlik faktörüne sahip olduğu görülmüştür.

III. SONUÇ

El rehabilitasyonu için TPU malzeme kullanılarak geliştirilen iki ayrı tasarım prototip aşamasına getirilerek numerik olarak analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında 12 kanatçıklı tasarımın 16 kanatçıklı tasarıma göre daha yüksek şekil değişimi gösterdiği tespit edilmiştir. El eklemlerinin istenilen oranda olması için yüksek şekil değiştirme önemli olduğundan, yapılan analizler neticesinde 12 kanatçıklı tasarımın kullanılmasında karar kılınmıştır.

Ancak tasarımın TPU (Termoplastik Poliüretan) malzeme kullanılarak katmanlı imalat yöntemi ile üretimi aşamasında bazı sorunlarla karşılaşmıştır. Özellikle FDM (Fused Deposition Modeling) tekniği ile esnek tasarımların üretilmesinde baskı cihazının yapısı, kullanılan filamentin uygunluğu, baskı ayarları gibi birçok parametre yüksek hassasiyet kazanmaktadır. Bunlara ek olarak tasarımın iç bükey yapısı ile etrafındaki kübik çıkıntılar ve tasarımdan beklenen yüksek elastisite, FDM tekniğinin yetersiz kalmasına ve mamulün istenilen fiziki kalitede üretilmemesine sebep olmuştur.

Oldukça ince bir et kalınlığında hem esnek hem de dayanıklı bir yapıya sahip olması istenen ortez için tercih edilen üretim teknolojisi, ilerleyen çalışmalarda SLA (Stereolithography) veya Polijet eklemeli imalat teknikleri ile değiştirilecektir.

Esnek tasarımların katmanlı imalat ve özellikle FDM yöntemi ile üretilmesinde sıklıkla karşılaşılan diğer bir sorun da katmanlar arası bağların, uygulanan çekme gerilimine dayanamamaları ve esneme göstermeden önce ayrılmaları olarak bilinmektedir. Ortezin çalışma prensibi itibarıyla, kullanım sırasında fazla bir çekme gerilimine maruz kalmasa da dış çeperin ince olması ve iç basınçtan kaynaklı gerilmenin fazlalığı sebebiyle, katmanlar arası bağlantı noktalarında yırtılmalar tespit edilmiştir. Bu durum da yine üretim teknolojisinde, materyalde ve tasarımın et kalınlığında revizyona gidilerek düzeltilebilir.

İleriki çalışmalarda, geliştirilen el rehabilitasyon ortezi hastalar üzerinde denenerek alınan sonuçlara göre tasarımın tekrar iyileştirilmesi sağlanacaktır. Ek olarak bölüm 2-C'de tarif edilen kontrol yöntemleri ile, tasarım komple bir mekatronik sistem içerisine gömülecek ve tam performans değerlendirmeleri yapılacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Rodgers, H., Shaw, L., Bosomworth, H., Aird, L., Alvarado, N., Andole, S., et al. (2017). "Robot assisted training for the upper limb after stroke (ratuls): study protocol for a randomised controlled trial," *Trials*, 18, 340
- [2] Peveler, R., Carson, A., Rodin, G. (2002). "Depression in medical patients," *British Medical Journal*, 325(7356), 149-52.
- [3] Toya, K., Miyagawa, T., Kubota, Y. (2011). "Power-assist glove operated by predicting the grasping mode," *Journal of System Design and Dynamics*, 5(1), 94-108.
- [4] Wege, A., Zimmermann, A. (2007). "Electromyography sensor based control for a hand exoskeleton," *International Conference on Robotics and Biomimetics*, December 15 -18.
- [5] Arata, J., Ohmoto, K., Gassert, R., Lambercy, O., Fujimoto H., Wada, I. (2013). "A new hand exoskeleton device for rehabilitation using a three-layered sliding spring mechanism," *International Conference on Robotics and Automation*, May 6-10.
- [6] Worsnopp, T.T., Peshkin, M.A., Colgate, J.E., Kamper, D.G. (2007). "An actuated finger exoskeleton for hand rehabilitation following stroke," *International Conference on Rehabilitation Robotics*, June 12-15.
- [7] Fontana, M., Dettori, A., Salsedo F., Bergamasco, M. (2009). "Mechanical design of a novel hand exoskeleton for accurate force displaying," *International Conference on Robotics and Automation*, 1704-1709.
- [8] Kadowaki, Y., Noritsugu, T., Takaiwa, M., Sasaki, D., Kato, M. (2011). "Development of soft power-assist glove and control based on human intent," *Journal of Robotics and Mechatronics*, 23(2), 281-291.
- [9] In, H., Cho, K.J., Kim, K., Lee, B. (2011). "Jointless structure and under-actuation mechanism for compact hand exoskeleton," *International Conference on Robotics and Automation*, 1-6.
- [10] Takahashi, CD., Der-Yeghiaian, L., Le, V., Motiwala RR., Cramer, SC. (2008). "Robot-based hand motor therapy after stroke," *Brain*, 131, 425-437.
- [11] Yun, S., Kang, B.B., Cho, K. (2017). "Exo-glove pm: an easily customizable modularized pneumatic assistive glove," *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.5. February.
- [12] O'Driscoll, SW., Giori, NJ. (2000). "Continuous passive motion (CPM): theory and principles of clinical application," *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, 37(2), 179-88.
- [13] Krakauer, JW. (2006). "Motor learning: its relevance to stroke recovery and neurorehabilitation," *Current Opinion in Neurology*, 19(1), 84-90
- [14] Dilibal, S., Sahin, H., Celik, Y., "Experimental and numerical analysis on the bending response of the geometrically gradient soft robotics actuator", *Archives of Mechanic*, Vol 70, Issue 5, Pages 391-404, 2018.

Origami Tabanlı Paralel Robotların Geliştirilmesi ve Sensör Entegrasyonu

Hasan Sevinç, Shahrad Samankan, Atakan Altıncaynak, Zeynep Temel*, Merve Acer

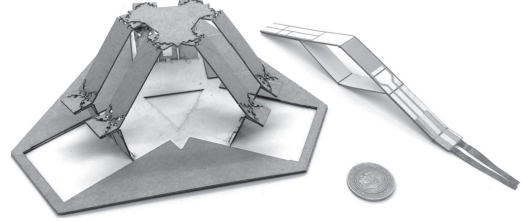
Makina Mühendisliği, Makina Fakültesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye

Email: sevincha,samankan,altıncaynak,acerm@itu.edu.tr

*The Robotics Institute
Carnegie Mellon University
Pittsburgh, USA
Email: ztemel@cs.cmu.edu

Özetçe —Yapılan çalışmada, katmanlı üretim yöntemi kullanılarak origami tabanlı paralel mekanizmalar elde edilmiştir. Ayrıca bu mekanizmalara gömülebilen sensör tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, iki serbestlik dereceli paralel mekanizma olan pantograf mekanizmasının üretimi tamamlanmıştır. Mekanizmanın pozisyon takibini yapabilmek için rezistif tabanlı gerinim ölçer basımlı gerçekleştirilerek mekanizmaya entegrasyonu sağlanmıştır. Sensörler yardımıyla mekanizma hareketinin takibi yapılarak ampirik bir model oluşturulmuştur. Geliştirilmiş olan tekniğin daha kompleks paralel mekanizmalarda kullanımı üzerine çalışmalar yapılarak üç serbestlik dereceli delta mekanizmasının tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler—paralel mekanizmalar, esnek mekanizmalar, katmanlı üretim, origami tabanlı tasarım, uzama ölçer.



Şekil 1. Origami tabanlı, sensör entegre edilmiş pantograf (sağ) ve delta (sol) mekanizmaları.

I. GİRİŞ

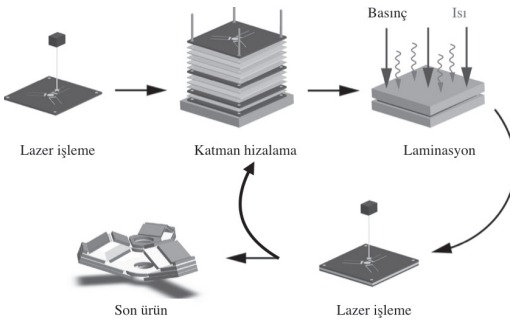
Günümüzde robotik sistemler sadece endüstriyel uygulamalarda kullanılan, büyük ölçekli ve tek bir görev için tasarlanmış mekanik yapılar olmaktan çıkmaktadır. Tıp, savunma, uzay ve hizmet gibi farklı sektörlerde kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmakta olan robotlar, günlük yaşamımızda daha yer bulmaya başlamaktadır. Uygulama alanındaki çeşitliliğin artmasıyla, robotik sistemlerin farklı ölçeklerde ve farklı malzemeler kullanılarak geliştirilmesi ve üretilmesi, ayrıca farklı çalışma şartlarına adapte olabilmesi gerekliliği doğmuştur. Robot bilimindeki araştırma konuları; asgari temas içeren (minimal invasive) milimetre mertebesinde cerrahi cihazlar [1] ya da santimetre mertebesinde insansız otonom hava araçları [2] örneklerinde olduğu gibi, boyutları gittikçe küçülen robotik sistemler üzerine yoğunlaşmaktadır [3]. Ayrıca, çoğu robotik sistem, boyutları küçüldükçe daha verimli hale gelmekte, performansı artmakta ve bu sayede farklı uygulama alanları bulabilmektedir [4]. Örneğin hızlı, kesin ve rijit olma özellikleriyle bilinen ve özellikle büyük boyutta hareket benzetimi, tut-bırak (pick-and-place) operasyonları, kaynak ve işleme, gıda paketleme gibi çok çeşitli alanlarda kullanılan paralel mekanizmalı robotlar, boyutlarının küçültülmesi ile son yıllarda üç boyutlu yazıcılarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [5]. Özellikle endüstride yaygın olarak kullanılan büyük ölçekli paralel mekanizmalı robotik sistemlerin minyatürleştirilerek (santimetre ve altı ebatlarda) yeni uygulama alanlarında kullanımı mümkün görünmektedir.

Küçük ölçekli robotların tasarımı ve üretimindeki en büyük zorluk olan üretim yöntemi, yekpare üretim tekniğinin geliştir-

ilmesiyle büyük ölçüde yenilmiştir [4]. Karakteristik boyutu santimetre ve altında olan robotik sistemlerin üretiminde geleneksel üretim yöntemlerinin yerine geçen yekpare üretim teknolojisi, verimli seri üretime olanak sağlarken, bileşenlerin zahmetli birleştirilmesi ve montaj işlemlerini de bertaraf etmiştir [4]. Bunların yanı sıra, yekpare üretim teknolojisiyle, yüksek performansa sahip, dayanıklı, karmaşık, ve eklemli yapılar ve sistemler oldukça ucuz, hızlı ve ölçeklenebilir şekilde üretilmektedir [6]. Yekpare üretim teknolojisi iki-boyutlu origami yönteminden esinlenerek geliştirilmiştir ve temel olarak çok sayıda farklı katman malzemenin ayrı ayrı işlenip birleştirilerek, tek bir kompozit yapı oluşturulması esasına dayanmaktadır [4]. Origami tabanlı yekpare üretim yöntemi halen gelişmekte olan bir teknolojidir. Literatürde bu teknikte gerçekleştirilmiş mekanik yapılardan bazıları doğadaki böcekleri taklit eden mobil robotlar olup; altı ayaklı, uzunluğu 10 cm, ağırlığı 16 gr olan DASH robotu [7], dört ayaklı uzunluğu 4 cm, ağırlığı 1.27 gr olan HAMR [8] ve 60 mg ağırlığındaki, kanat açıklığı 30 mm olan RoboBee [9] bu robotlara örnek olarak gösterilebilir. Bu yöntemin hızlı, ucuz ve dayanıklı robotik sistemlerin üretimindeki potansiyelinin yüksek olmasından dolayı, bu yöntem kullanılarak endoskopik medikal cihazlar da tasarlanmaya başlanmıştır [10]–[12]. Bunların yanı sıra, yekpare üretim teknolojisi ile geliştirilen robotların uygun mekanizma tasarımları yapılarak mikromanipulasyon ve mikromontaj işlemleri için kullanılması mümkün görünmektedir. Bu amaçlar için literatürde tasarım ve üretimi gösterilmiş origami tabanlı Delta mekanizma örnekleri mevcuttur [13]–[15].

Ancak, yöntemin çok yeni olmasından dolayı fonksiyonel yapı ve mekanizmalarda kullanımı halen araştırmaya açıktır. Ayrıca, robotik sistemlerin boyutları küçüldükçe, hâlihazırda kullanılan eyleyici, sensör ve kontrolcü gibi sistem unsurlarının da boyutlarının küçültülmesi ve hatta yekpare üretim yöntemi ile imal edilmiş robotik sistemlere entegre olacak şekilde tamamen yenilikçi bir bakış açısıyla tasarlanması gerekliliği doğmuştur. Yekpare üretim yöntemi kullanılarak üretilcek mekanizmaların konum ölçümleri için literatürde esnek algılayıcılar önerilmiştir. Örneğin, iletken mürekkep ile piezorezistif açılı algılayıcıları üretilerek menteşelerdeki bükülme açıları tespit edilmiştir [16] ya da kauçuk malzemeden yapılmış ince kanallı esnek yapı içine sıvı metalin enjeksiyonu ile üretilmiş gerilebilir, bükülme açısını ölçen esnek sensörler üretilmiştir [17]. Sıvı iletken kullanılarak üretilen algılayıcılarla, mikro kanallardan kesit alanlarındaki değişimin oluşturduğu direnç [18], [19] veya kapasitans [20], [21] değerlerini ölçerek kuvvet verisi de elde edilmiştir.

Bu çalışmada, origami tabanlı katmanlı üretim tekniği kullanılarak paralel mekanizmaların tasarımı için bir metodoloji geliştirilmiş ve katmanlı yapı içerisine eklem açılarının ölçülebilmesi için sensör katmanı eklenmiştir. Çalışmada öncelikle iki serbestlik dereceli pantograf mekanizmasının üretimi gerçekleştirilmiş, eklem açılarının ölçülebilmesi için katmanlı yapıya gömülebilir rezistif gerinim sensörü geliştirilmiş ve mekanizma çalıştırılarak sensörden elde edilen sinyaller değerlendirilmiştir. Bunun yanında, iki serbestlik dereceli mekanizma için geliştirilen yöntem kullanılarak üç serbestlik dereceli Delta paralel mekanizmasının tasarımının ilk sonuçları sunulmuştur (Şekil 1). Bu çalışma ile sadece literatürde daha önce sunulmuş olan origami tabanlı paralel mekanizmalar için değil, kısmi ya da tamamen origami tabanlı yekpare üretim teknolojisi kullanılarak üretilmiş robotların kontrolü için gerekli olan eklem pozisyon ölçümlerine olanak sağlayacak teknoloji gelişimi üzerinde durulmuştur. Yekpare üretim tekniği ile üretilen robotların en büyük eksiği henüz yapıya entegre sensör teknolojisinin yaygın kullanıma olanak sağlayacak şekilde geliştirilmemiş olmasıdır. Bu çalışmada, origami tabanlı robotlar için sensör tasarımı ve enegrasyonu, pantograf ve delta paralel mekanizmalarında gösterilmiştir.



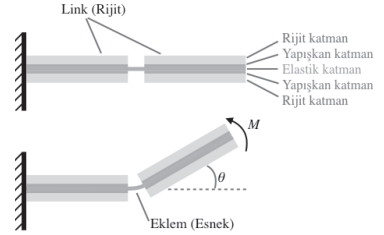
Şekil 2. Katmanlı üretim metodolojisinin aşamaları lazer işleme, katman hizalama, laminasyon süreçlerinin kendi içinde tekrarlanmasından oluşmaktadır [22].

II. METODOLOJİ

A. Katmanlı Üretim Metodolojisi

Minyatür paralel robotların üretimi iki boyutlu fabrikasyon teknikleri kullanılarak katmanlı üretim metodu ile yapılmaktadır. Paralel mekanizmaların tasarımında yekpare üretim ve origamiden esinlenmiş tasarım esasları kullanılmaktadır. Bu üretim yöntemi birbiri ardına tekrar edilen birkaç aşamadan oluşmaktadır (Şekil 2) [22]. İlk adımda, her kat lazer kesim tezgahında işlenmekte ve sonraki adımda yapıyı oluşturan katlar üst üste hizalanarak birleştirilmektedir. Gerekli takdirde lazer kesim ve birleştirme işlemi tekrarlanmaktadır. Mekanizmaların geometrileri, statik ve dinamik özelliklerini etkilediğinden dolayı bu yöntemde boyutsal toleranslar ve hizalama çok önemli bir hal almaktadır.

Bu çalışmada sunulan mekanizmalardan biri olan pantograf mekanizması için toplam 11 kat kullanılmıştır. Üretim, iki tane beş kattan oluşan kolun, bir kat yapışkan malzeme ile birleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te bir kolun katmanlı yapısının şematini gösterilmektedir. Kollar, esnek malzemeden oluşan eklem noktasına göre nispeten rijit katmanlardan oluşmaktadır ve esnek eklem noktası vasıtasıyla kolların birbirine göre izafi hareketi sağlanmaktadır. Bu izafi hareketin serbestlik derecesi, eklem noktasının geometrisi ile belirlenebilmektedir. Şekil 2 ve 3'te gösterilen katmanların üretimi lazer kesme/kazıma ve laminasyon makineleri kullanılmak vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Katmanlı üretim metodolojisi ile üretilen tek serbestlik dereceli link, bu linki oluşturan rijit, yapışkan ve elastik malzemeler ve M momentinin etkimesi sonucunda eklemün çalışma prensibi.

B. Katmanlı Üretimde Eklem Tasarımı ve Çeşitleri

Kağıt katlama sanatı origamiden esinlenerek geliştirilmiş ve katmanlı üretim tekniği ile üretilen robotların geniş bir özeti 2018 yılında Rus ve Tolley tarafından sunulmuştur [23]. Bu teknikle üretilen robotların eklem tasarımları Şekil 3'te gösterildiği gibi döner bir eklem etrafında gerçekleştirilmektedir. Geleneksel yöntemlerle üretilen mekanizmalarda temel olarak döner, üniversal, prizmatik, silindirik, helisel, küresel, düzlem, eş dişli gibi farklı serbestlik derecelerine sahip eklemler bulunmaktadır. Katmanlı üretimde ise rijit malzemelerin düz bir çizgi etrafında kesilmesi ile elde edilen tek serbestlik dereceli döner eklemün farklı kombinasyonları ve uygun katlama ile iki ve üç serbestlik dereceli eklemler elde etmek mümkündür. Bu şekilde üretilmiş iki döner serbestlik dereceli üniversal ve üç döner serbestlik dereceli küresel eklemlerin serbestlik dereceleri ve şematik gösterimleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Pantograf mekanizması tek döner serbestlik dereceli eklemlerden oluştuğundan, katmanlı üretim metodolojisi kolaylıkla

Eklem Tipi	Serbestlik Derecesi	Hareket
Döner	1	
Üniversal	2	
Küresel	3	

Tablo I. KATMANLI ÜRETİM TEKNİĞİ İLE ÜRETİLEN EKLEM ÇEŞİTLERİ

uygulanabilmektedir. Ancak, Delta mekanizmasında bulunan iki döner serbestlik dereceli üniversal eklemün katmanlı üretimle gerçekleştirilmesi, lazer kesme işleminden sonra montaj gerektirmektedir. İkinci düzlemdeki döner hareket, bazı linklerin birbirlerine dik olarak katlanması ve sabitlenmesi (yapıştırılması) ile yapılmaktadır. Genellikle elle yapılan bu işlem, üretim hatalarına ve dolayısıyla mekanizmanın beklenenden farklı şekilde çalışmasına neden olabilmektedir. Bu sebeple Delta robotu için literatürde bulunan üniversal eklem tasarımları yerine, üretim sonrası manuel katlama ve montaj gerektirmeyecek alternatif çözümlere gereksinim duyulmaktadır. Bundan dolayı, mekanizmadan istenilen serbestlik derecesini sağlaması ve katmanlı üretim yöntemine uygun bir tasarım metodolojisi geliştirilerek, Delta mekanizmasının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu yeni tasarım metodolojisi ile, iki boyutlu üretim metodları kullanılarak üretilen ve üç boyutta hareket edebilen mekanizmalar için tepeden tabana tasarım anlayışını, yani istenen mekanizma hareketine göre uygun döner eklem kombinasyonlarının tasarlanıp mekanizmaya yerleştirilmesini, katmanlı üretimin bir parçası haline getirmek amaçlanmaktadır.

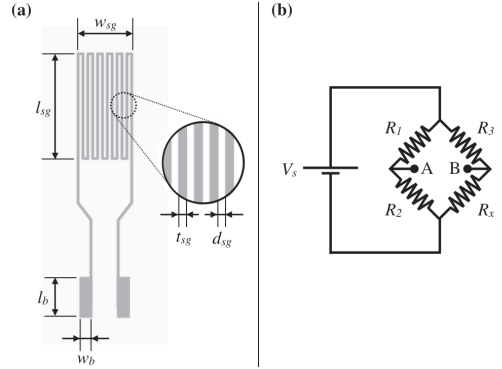
C. Sensör Tasarımı

Katmanlı üretim metodu ile üretilmiş mekanizmadaki esnek bağlantı elemanı serbest bir şekilde eğilme sağlayabildiği için hem iki kol arasında izafi hareket oluşmasını sağlamakta hem de iki kolu birbirine bağlamaktadır. Buna karşılık, esnek bağlantı elemanının eğilme noktasında alt ve üst yüzeylerde uzama ve kısalmalar, buna bağlı olarak da çekme ve basma gerilmeleri oluşmaktadır. Esnek bağlantı elemanı iki kola, parçalar arasında hareket etmeyecek şekilde konumlandırılırsa oluşan bu gerilmelerin iki kol arasındaki açığa bağlı olarak gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu gerilmelerden yararlanarak parçalar arasındaki açı belirlenebilmektedir.

Malzemelerde oluşan birim uzamala uzama ölçer (strain gauge) ile ölçülmektedir. Literatürde “inkjet teknolojisi”ne sahip yazıcılar ile polietilen tereftalat (PET) malzemelerinin üzerine, iletkenlik özelliği olan gümüş nano parçacıklı

mürekkepler kullanılarak, uzama ölçer basılmış olan çalışmalar bulunmaktadır. [24]. PET malzemesi kullanılarak kollar arasındaki esnek bağlantı sağlanabildiği gibi üzerine basılan uzama ölçerler ile gerekli birim uzama değerleri de ölçülebilmektedir. Bu sayede, iki kol arasındaki açı ve birim uzama arasındaki ilişki belirlenebilmektedir.

Uzama ölçer tasarımında en önemli faktörler; bacak uzunluğu, l_{sg} , bacak kalınlığı, t_{sg} , bacak sayısı, n_{sg} , ve bacakların arasındaki mesafedir, d_{sg} (Şekil4). Üretilmek istenen mekanizmanın kalınlığına göre bacak sayısı ayarlanabilmektedir. Bacak uzunluğu ve sayısı genel olarak sensörlerin durağan haldeki direnç değerlerini belirlemektedir. Bacaklar arasındaki mesafe ve bacak kalınlığı ise kullanılacak olan yazıcının baskı kalitesine bağlı olmaktadır. Yazıcının çözünürlüğünden daha düşük bir baskı yapılması mümkün olmamaktadır. Bacaklar arası mesafe, hareket boyunca bacak teması olmayacak şekilde, bacak kalınlığını ise basım sırasında bacaklar arası süresizlik ve kopukluk olmayacak şekilde belirlenmiştir. Bu hususlar göz önüne alındığında, bacak kalınlığı, t_{sg} , ve bacaklar arası bırakılan aralığın, d_{sg} , 0.4 mm olmasına karar verilmiştir.



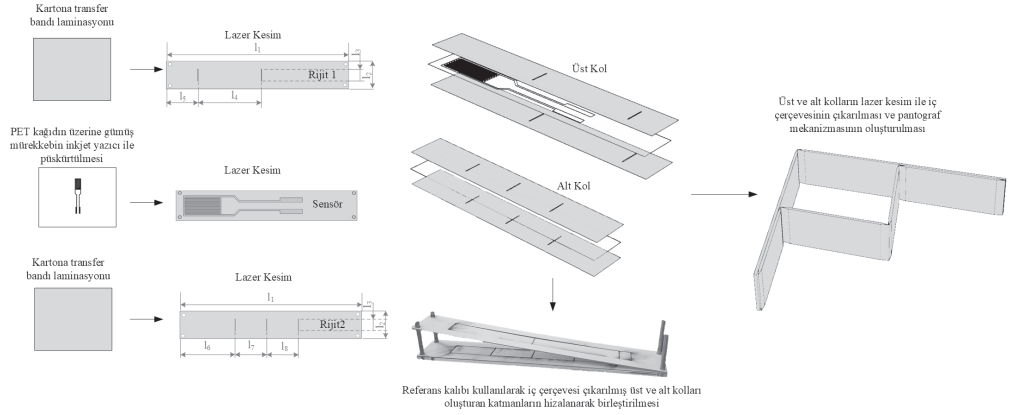
Şekil 4. Esnek katman üzerine basılmış uzama sensörü şeması (a) ve sensör üzerindeki direnç değişimlerinin voltaj ölçümü ile belirlenebilmesi için kullanılan Wheatstone köprüsü (b).

Şekil 4'te esnek katman üzerine basılmış uzama-ölçer sensörü ve bu sensöre ait Wheatstone köprüsü gösterilmektedir. Sensörün alt tarafında bulunan boşluklar, kablo bağlantıları için bırakılmıştır. Sensörden veri toplamak için ise gerinin ölçerlerde yaygın olarak kullanılan Wheatstone köprüsü kullanılmıştır. Bu köprü, sensörde oluşan direnç değişimlerini, yapısı sayesinde iki farklı kolundan voltaj ölçümü ile tespit edilmesini sağlamaktadır.

Wheatstone çeyrek köprüsündeki voltaj değişimi, sensörde oluşan direnç değişimleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$V_{ab} = V_s \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_x}{R_x + R_3} \right) \quad (1)$$

Burada R_1 , R_2 ve R_3 dirençleri üretilmiş olan sensörün yüksüz haldeki direnci ile aynı seçilir ise V_{ab} gerilim farkı yüksüz halde sıfır olmaktadır. Sensör uyarıp direnci



Şekil 5. Mekanizma tasarımındaki kolların rijit, yapışkan ve esnek katmanlı olarak üretim adımları: (1) katmanların ayrı ayrı lazer kesme makinesi ile işlenmesi, (2) sensör entegre edilecek elastik katmana uzama-ölçer basımı, (3) katmanların bir kalıp yardımı ile üst üste hizalanarak laminasyon makinesi ile birleştirilmesi, (4) mekanizmanın kendisini çerçeveleyen destek malzemeden kesilerek çıkarılması.

değiştikçe V_{ab} arasında gerilim farkı oluşmaya başlar. Bu fark uygun bir analog ölçüm cihazı ile ölçülerek sensörün çıkış sinyali olarak kullanılarak, karakterizasyon ile pozisyon verisine dönüştürülmektedir. Dirençlerin farklı kombinasyonlarında ise yüküzlü haldeki gerilim farkı sıfırdan farklı olacaktır ve bu referans değere göre olan değişimlerin dikkate alınması gerekmektedir.

D. Sensör Entegre Edilmiş Mekanizmanın Üretimi

1) *Pantograf üretimi:* Pantograf mekanizmasının kolları iki rijit katman ve bir esnek katmandan oluşmaktadır (Şekil 5). 0.5 mm kalınlığında kartondan oluşan rijit katmanlar arası birleşim, laminasyon makinesi (Olympia A3048) kullanılarak kaplanan transfer bantı ile sağlanmıştır. Yapışkan ile kaplanmış olan rijit katmanlar, universal bir lazer kesme/kazıma makinesi kullanılarak destek bir çerçeve içerisinde kesilmiştir (Şekil 6). Rijit katman üzerinde, üst kolda iki adet ve alt kolda üç adet olmak üzere toplam beş adet döner eklem bulunmaktadır. Kolların geometrisi Şekil 5'te Rijit 1 ve Rijit 2 katmanlarında belirtilen parametrelere göre Tablo 2'de sunulmuştur. Ayrıca lazerle kesilmiş açıklıklarda bulunacak ve eklem yerlerini oluşturacak olan 0.12 mm kalınlığında PET malzeme de lazer ile rijit tabakaların destek çerçevesi boyutunda kesilmiştir. Üst kol için kullanılan Rijit 1 katmanlarının arasındaki esnek katman aynı zamanda sensör katmanı olarak da kullanılmıştır.

Destek çerçevesi ve köşelerden delikli olarak hazırlanmış olan rijit, esnek ve sensör katmanları üzerinde bulunan deliklere girecek şekilde referans birleştirme kalıbı oluşturulmuştur. Bu kalıp kullanılarak katmanlar hizalanarak katmanlar arası birleştirme gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Üst ve alt kolu oluşturan katmanlar lazer kesme işleminden geçirilerek kolların ana çerçeve çizgileri belirli olacak ve çerçeveden çıkartılamayacak şekilde kesilmiştir. Sonraki aşamada, kolların birleşme kısımlarına ek transfer bantı yapıştırılarak alt ve üst kollar referans kalıba tekrar yerleştirilmiştir. Böylece alt ve üst kolların montajı tamamlanmıştır. Son olarak, mekanizma lazer



Şekil 6. Lazer kesim tekniği kullanılarak pantograf mekanizmasındaki üst kolu oluşturan Rijit 1 katmanının eklem yerleri ve destek çerçevesi olacak şekilde üretimi.

kesimde kesilmiş olan kolların ana çerçeve çizgilerinden el ile çıkartılmıştır.

2) *Sensör üretimi:* Sensör katmanı mürekkep püskürtmeli yazıcı (Epson L382), lazer makinesi, nano gümüş partiküllü iletken mürekkep (Novacentrix-metalon JS-B25P), üzerine iletken malzemenin yazdırılabildiği PET kağıt (Novacentrix-Novelle Printing Media) ve bakır-kapton (Pyrallux) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4a'da gösterilen ve Tablo 2'de sunulan değerlere göre oluşturulan sensör, PET kağıdın üzerine mürekkep püskürtmeli yazıcı ile basılmıştır. Bu yöntem, esnek, ince devre ve iletken katman üretimi sağlanmaktadır. Üzerine sensör basılmış olan PET kağıt, lazer kesim makinesi kullanılarak rijit katmanların çerçevesi boyutlarında kesilmiştir. Sensörün gümüş iletken yollarının, üretimden itibaren ilk iki saat içinde iletken özelliğini kaybettiği gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeninin eşit dağılımlı baskının elde edilememesi yada gümüş iletken yolların oksijen ile kimyasal tepkimeye girdiğinden oluştuğu düşünülmektedir. Bu durumu önlemek için sensör, üretimi takiben laminasyon makinesi ve yapıştırıcı ile kaplanmıştır. Üretilmiş olan esnek sensör katmanının

pantografin koluna montajı referans kalıbı kullanılarak yapılmış ve rijit katmanların arasına veya üzerine entegrasyonu gerçekleştirilmiştir.

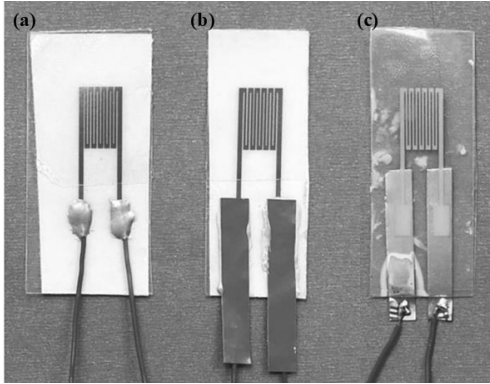
Katman	Geometrik Parametre	Değer [mm]
Pantograf	l_1	97,5
	l_2	35
	l_3	15
	l_4	80
	l_5	25
	l_6	65
	l_7	40
	l_8	40
Sensör	$w_{s,g}$	13,6
	$l_{s,g}$	25
	l_b	15
	w_b	3
	$t_{s,g}$	0,4

Tablo II. RIJIT VE SENSÖR KATMANLARININ GEOMETRİK PARAMETRELERİ

III. SONUÇLAR

A. Sensör Üretimi Problemleri ve Çözümleri

1) *Sensör ve kablo bağlantısı:* Basılmış olan sensörlerde dikkat edilmesi gereken hususlardan bir tanesi kullanılacak olan kablolar ile yapılacak bağlantı çeşididir. Mürekkep, PET üzerine yazıcı ile basılmış olsa bile kuruduktan sonra katılaşmaktadır. Bu durum mürekkebin PET yüzeyinden ayrılmasına sebep olabilmektedir. Bu durumun önlenmesi için üç farklı yaklaşım geliştirilmiştir.



Şekil 7. Sensör üretimi için geliştirilen üç farklı yöntem: (a) Sensör - kablo bağlantısı için iletken epoksi, (b) kapton bakır ve iletken epoksi beraber, (c) sadece kapton bakır ve yapışkan katman

İlk yöntemde iletken epoksi ile kablolar, doğrudan sensör üzerinde bırakılan alanlara ve aynı zamanda kağıda yapıştırılmaktadır (Şekil 7a). Bu yöntemde en büyük problem, kabloların ufak hareketlerinde dahi PET yüzeyde bulunan mürekkepte kopmaların yaşanmasıdır. Bunun yanı sıra, oluşan iletken epoksi çıkıntısı katmanlı üretim yönteminde kullanılmak için ideal değildir. İkinci yöntem ise kabloları doğrudan sensör üzerine bağlamak yerine üzerlerini kapton bakır levhalar ile kapatmak ve daha sonra kabloları bu kapton bakır tellere lehim ile yapıştırmaktır (Şekil 7b ve c). Bu kaplama işlemi iki şekilde

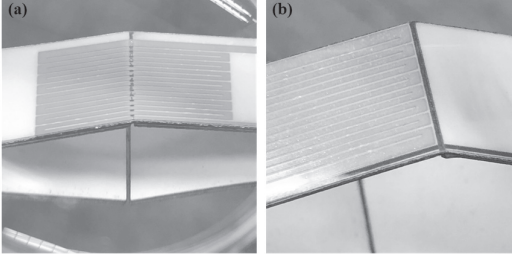
yapılmıştır. İlk durumda, kapton bakır ile sensör, daha geniş yüzeye yayılmış iletken epoksi kullanılarak yapılandırılmıştır (Şekil 7b). Bu çözümün, ilk yöntemde karşılaşılan problemleri azaltmasına karşın tamamen ortadan kaldıramadığı gözlemlenmiştir. İkinci kaplama işleminde ise kapton bakır ile sensör üçüncü bir malzeme kullanılmadan katmanlı üretimden faydalanılarak doğrudan birbirine bastırılmışlardır. Bahsi geçen yöntemler arasında üretime en uygun ve en hassas yöntemin bu olduğu belirlenmiştir (Şekil 7c).

Şekil 7c'de gösterilen bağlantı şekli ile üretilmiş esnek sensör pantograf mekanizmasının bir katmanı olacak şekilde üretilmiştir. Yapılan incelemelerde ve deneylerde, mekanizmanın katmanları ve bakır arasında herhangi bir ayrılma ya da sensör ve bakır arasında bir temassızlık gözlemlenmemiştir. Mekanizmadaki katmanlar birbirine iyi bir şekilde yapışmaktadır. Bu sayede katmanlar arasında oluşan basma ve sürtünme kuvvetleri bakır levhayı yerinde tutmaktadır. Ayrıca sensör katmanlar arasında iyi bir şekilde ortamdaki yalıtıldığı için iletkenlik özelliğini kaybetmemektedir. Mekanik sebeplerden dolayı bacaklar üzerinde bir kırılma olmadığı sürece üretilen sensör ömrünü uzun bir süre koruyabilmektedir. Ancak bu konu üzerine daha detaylı bir çalışması yapılması gerekmektedir.

2) *Sensör yerleşimi:* Üretilen sensörün açılı değişiminden kaynaklı oluşan şekil değişiminin ölçümünü yapmasını istendiğinden dolayı, sensörün eklem üzerindeki yerleşimi büyük önem arz etmektedir. Sensörün yerleşimi, iki farklı katman ve iki farklı konum olmak üzere toplamda dört farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk yerleşim yeri eklem yerinin tam ortasıdır. Şekil 8a'da görüldüğü gibi sensör, eklem üzerine simetrik bir şekilde, ve iki kol ile de temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu durumda karşılaşılan en önemli problem eklem ile birlikte sensörde bulunan gümüş mürekkebin de eğilmesidir. Sürekli hareket durumunda sensörün bacakları arasında temas kaybolmakta ve sensör işlevsiz hale gelmektedir. Dolayısıyla bu yerleşim yöntemi tercih edilmemiştir. Sensörün ikinci yerleşim seçeneği ise eklem hemen alt kısmıdır. Şekil 8b'de görüldüğü gibi sensör sadece bir kol ile temas etmektedir. Böylece bir önceki yerleşimde karşılaşılan problem ortadan kaldırılmıştır. Fakat bu yerleşim durumunda, sensörün bulunduğu katmanda kolların izafi hareketinden dolayı meydana gelen şekil değişimi kısıtlı olduğundan dolayı rijit kollarla meydana gelen şekil değişimleri ölçüm değerlerini etkilediği görülmüştür. Kolların rijitliği artırılarak bu problemin azaltılabileceği düşünülmektedir.

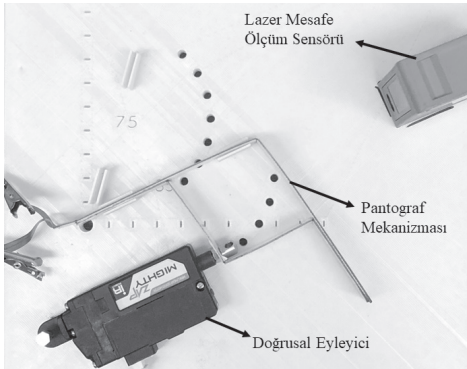
Yerleşim yeri dışında sensörler katman olarak da farklı konumlandırılabilir. İlk durumda sensör üst kolun esnek malzemesinin bulunduğu orta katman yerleştirilmiştir. İkinci durumda ise üst kol üzerine yeni bir esnek katman yerleştirilerek sensör bu esnek katmana basılmıştır. Yapılan deneyler sonucu, mekanizmanın içine gömülü olan birinci yöntemin daha yüksek çıkış voltajı verdiği görülmüştür. Dolayısıyla, sensörün konumu olarak eklem hemen altında bulunan orta esnek katman belirlenmiştir. Birinci yöntem ile üretilen mekanizmalarda sensörler dışarıdan görülmediğinden dolayı Şekil 8'de ikinci durum için üretilmiş sensör yerleşimleri gösterilmiştir.

3) *Sensör entegreli pantograf mekanizmasının sonuçları:* Gömülü olan sensör deneylerini gerçekleştirmek için entegre olarak sensör yerleştirilmiş yeni bir pantograf



Şekil 8. Sensörlerin katman üzerindeki yerleşimi. (a) Sensör eklemine üzerine gelecek şekilde hareketli kollar üzerine simetrik bir biçimde yerleştirilmesi, (b) Sensörün bir hareketli kol üzerinde eklemeye yakın konumlandırılması.

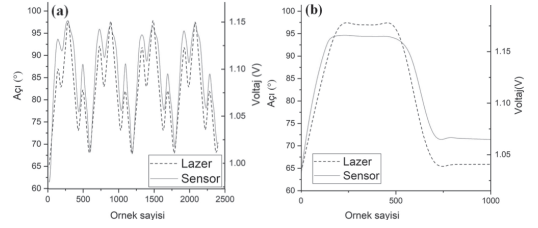
mekanizması üretilmiş ve Şekil 9'da gösterilen deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu düzende üst kolda oluşan açıyı ölçmek için bir tane lazer mesafe sensörü ve mekanizmaya hareket vermesi için bir doğrusal eyleyici bulunmaktadır. Pantograf mekanizması sabitlenmiş ve böylece sadece istenen yerde, yani sensörün üzerinde bulunduğu kolda bir hareket olması sağlanmıştır. Bu deneylerde kullanılan sensörün üzerinde yük olmadığı haldeki direnç miktarı 97.5Ω olarak ölçülmüştür. Yapılan deneyler tek bir sensörün entegre edildiği bir mekanizma üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9. Sensör entegreli pantograf mekanizmasının hareketinin sensör ile izlenmesi için hazırlanmış olan deney düzeneği.

Şekil 10a'da pantograf alt koluna bağlanmış olan lineer motordan sağlanan periyodik hareket sonucunda lazer mesafe sensörü ve üretilen sensörden alınan voltaj sinyallerin karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekil 10a'da verilen sonuçlarda üretilen sensörün, motordan sağlanan farklı sinüs dalgalarının toplamı şeklindeki periyodik hareketi takip edebildiği görülmektedir. Ek olarak, Şekil 10b'de görüldüğü üzere, ürettiğimiz sensör mekanizmanın yaptığı git-bekle-gel hareketindeki kısa süreli beklemlerde değerini korumakta, ancak başlangıç noktasına aynı şekilde geri dönmektedir. Bunun yanı sıra sensörde histeresiz bulunduğu bu grafiklerden de anlaşılabılır.

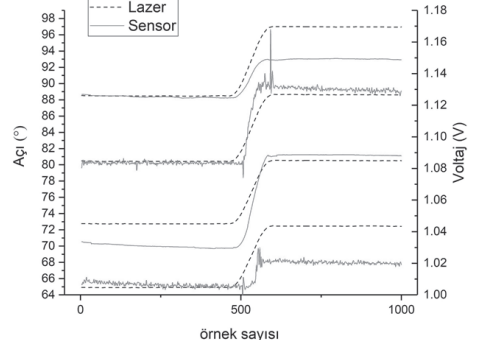
Sensörün durgun haldeki davranışını belirlemek için mekanizmanın kolu Şekil 11'deki derece açılara getirilerek



Şekil 10. Pantograf mekanizmasının üst kolunun periyodik (a) ve git-bekle-gel hareketi (b) için lazer sensöründen elde edilen açı değeri (siyah parçalı çizgi) ve mekanizma üzerindeki sensörden alınan sinyallerin (kırmızı yeckpare çizgi) karşılaştırılması.

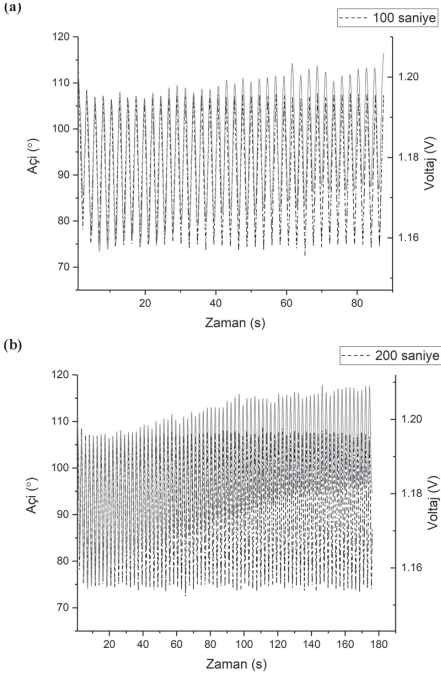
zamana bağlı ölçüm alınmıştır. Şekil 11'de görüldüğü gibi üretilen sensörün davranışı ölçüm yapılan açı aralığında benzerlik göstermektedir ve bu davranışın doğrusal olmadığı görülmektedir. Açı ölçümlerinde sinyal üzerindeki gürültünün etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Filtre tasarımı yapılrken bu hususun göz önüne alınması gerekmektedir.

Sensörün doğrusal olmayan davranışının belirlenebilmesi için Şekil 12'de gösterildiği gibi 100 s ve 200 s boyunca mekanizmaya sinüs dalgası uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, üretilen sensörden elde edilen değerlerin yaklaşık 20 s'den sonra lazerden elde edilen sonuçlarla farklılık gösterdiği, kuvvet kaldırıldığında ise sensörün referans değerine geri döndüğü belirlenmiştir. Bu durumun, esnek PET tabakanın hareketten dolayı ısınarak rijitliğinde meydana gelen azal-madan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 11. Pantograf mekanizmasının üst kolunun lazer sensörü ile ölçülen 65° - 73° - 81° - 89° açılarından sırasıyla 72° - 80° - 88° - 97° açılara getirilip bekletilmesi sonucu (siyah parçalı çizgi) üretilen sensörden alınan sinyaller (kırmızı yeckpare çizgi).

Sensörden ölçülen voltaj değeri ile lazer ile ölçülen açı değerinin tekrarlı hareket sonucu, sinyallerin stabil olduğu ilk 20 s için karşılaştırılması Şekil 13'te gösterilmiştir. Esnek malzemenin zamanla oluşan direnç üzerindeki etkisini azaltmak için bir önceki deneylere bakarak yeni deney yapılarak veri toplanmıştır. Bu veriler, lineer regresyon kullanılarak Şekil 13'te görüldüğü gibi ürettiğimiz sensörden ölçülen voltaj ile lazer ölçüm sensörünün verdiği açı değerleri arasında Denklem 2 eğrisi uydurulmuştur. Daha iyi sonuç verdiği için ikinci

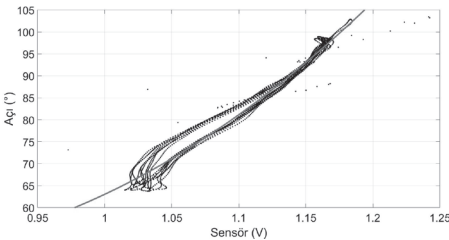


Şekil 12. Pantograf mekanizmasına 100 s (a) ve 200 s (b) boyunca periyodik hareket uygulayarak lazer (siyah parçalı çizgi) ve üretilen sensörden (kırmızı yekpare çizgi) alınan sinyallerin karşılaştırılması.

dereceden polinom denklemi kullanılmıştır.

$$f(x) = 376.7x^2 - 609.8x + 296.2 \quad (2)$$

Buradaki x değeri sensörden ölçülen voltaj değerini göstermektedir. Elde edilen bu denklem sadece kullanılmış olan sensör için geçerlidir. Hem sensör üretiminden hem de mekanizma üretiminden kaynaklı sebeplerden dolayı basılmış sensörlerin karakteristiği birbirinden farklı olabilmektedir. Bu yüzden yapılan bu kalibrasyon çalışması her sensör için ayrı ayrı yapılması gerekmektedir.

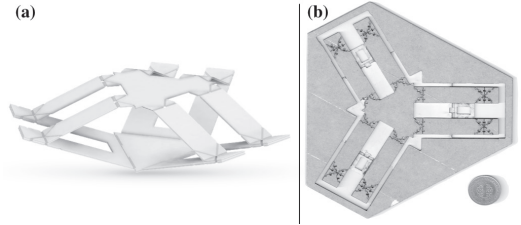


Şekil 13. Lazer sensöründen alınan açı değerlerine karşılık üretilen sensörden alınan sinyal çıkışları (siyah nokta) ve sonuçlara göre uydurulan eğri (mavi yekpare çizgi).

4) Delta paralel mekanizmasının tasarımı ve üretilmesi:
Pantograf mekanizması gibi düzlemde çalışan robotların yanı sıra, delta mekanizması gibi üç boyutlu hacim içerisinde çalışan paralel robotlar da mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu robotların katmanlı üretim yöntemine uygun olarak yeniden tasarımı, mekanizmada bulunan universal eklemlerin tasarımı ile doğrudan ilişkilidir [15]. Bu eklemlerin katmanlı üretimdeki karşılıkları lazer kesim işlemi sonrası elle montaj gerektirdiğinden üretim hatalarına yol açmaktadır. Bu sebeple delta mekanizmasının tasarımı, mekanizmanın uç elemanının üç boyutta öteleme hareketini yapacak şekilde tepeden tabana tasarım yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir.

Delta mekanizmasında üç adet kinematik zincir bulunmaktadır. Her bir zincirde, eyleyiciye bağlı bir aktif kol ve bu kolla uç eleman arasında bir pasif kol bulunmaktadır. Kollar ve uç eleman arasındaki bağlantıların döner eklemler hareketine sahip olması ve üç aktif kolun senkronize çalışması dikey eksenlerdeki hareket ile sonuçlanmaktadır. Bu hareketin yanı sıra, yatay iki eksenlerdeki hareketi de sağlamak için, pasif kollar üzerinde farklı döner eklemler kombinasyonları denenmiştir. Bu kombinasyonlardan bir tanesinin 3D CAD modeli ve üretilmiş hali Şekil 14'te gösterilmiştir. Bu prototipin, dikey eksenlerde istenen hareketi yapmasına rağmen, yatay iki eksenlerde istenen hareketi yapmadığı ve uç elemanda, neredeyse Stewart mekanizma hareketine yaklaşan, ek serbestlik derecelerine bağlı dönmeler gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Gelecekte yapılan çalışmalarımız, bu tepeden tabana tasarım yaklaşımını geliştirerek bu mekanizmaların tasarım ve üretimi üzerine olacaktır.

Bu aşamada üretilen sensörün Delta mekanizmasına entegrasyonu da düşünülmektedir. Delta mekanizmasını için en uygun sensör yerleşim yeri sabit taban ile aktif kol arasında olan döner eklemlerdir. Pantograf mekanizmasında gösterildiği gibi bir üretim, bağlantı ve yerleşim şekli kullanılarak aktif kolların taban ile yaptığı açının ölçülmesi hedeflenmektedir. Bu sayede kinematik analizler kullanılarak uç elemanın pozisyonu bulunabilecektir.



Şekil 14. Delta paralel mekanizmasının 3D CAD modeli (a) ve katmanlı üretim metoduyla üretilmiş prototip (b).

IV. TARTIŞMA VE KAPANIŞ

Endüstriyel ve büyük boyuttaki robotik sistemlerde kullanılan geleneksel makina elemanlarının (dişli, çark, vida, somun ve profil gibi) ve malzemelerin (çelik ve alüminyum gibi), santimetre ve altı boyuttaki minyatür robotik sistemler için kullanılması neredeyse imkansızdır. Halbuki küçük boyutlu robotların mikromanipülasyon, mikrocerrahi, dar alanlarda inceleme gibi farklı alanlarda kullanıma potansiyeli vardır. Bu

çalışmada, geleneksel mühendislikte yaygın olarak kullanılan paralel mekanizmaların, küçük boyutlarda katmanlı üretim metodolojisine uygun olarak yapılan tasarımları sunulmuştur. Ek olarak, bu mekanizmaların robotik sistemlere dönüştürülüp kapalı çevrim kontrol algoritmalarının uygulanabilmesi için gömülü sensör çözümü geliştirilmiştir.

Üretimini gerçekleştirdiğimiz düşük profilli sensörler katmanlı üretim metodolojisine kolaylıkla entegre olarak mekanizmanın hareketli kollarının açılı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, üretilen gömülü sensörlerin periyodik hareketleri takip edebildiği, ancak ölçümlerin uzun süreli hareketlerde esnek tabakanın gevşemesinden dolayı değiştiği gözlemlenmiştir. Gelecek çalışmalarda, robotun kapalı çevrim kontrolünde, belirlenen görevlerin gerçekleştirilmesi için yapılan çalışmada elde edilen veriler kullanılacaktır.

Son olarak, ürettiğimiz esnek ve ince sensörlerin delta mekanizması gibi üretilen farklı paralel mekanizmalarda kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk aşamada pantograf mekanizmasına göre daha karmaşık olan bu yapıların tasarımına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu yapıların üretiminde lazer kesme işlemi sonrası montaj gerektirmemesi için tasarım tepeden tabana yaklaşımı benimsenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, tepeden tabana tasarım yaklaşımının geliştirilmeye ihtiyaç duyduğu ve bu yaklaşımın farklı mekanizmalarda kullanılabilmesi için 3D CAD ve kinematik modellerin oluşturularak kinematik simülasyonların yapılması gerekliliği ortaya konulmuştur. Gelecek çalışmalar bu problemlere çözüm aramak doğrultusunda olacaktır.

V. TEŞEKKÜR

Bu çalışma 216M193 no'lu TÜBİTAK 1003 Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] L. Phee, D. Accoto, A. Menciassi, C. Stefanini, M. C. Carrozza, and P. Dario, "Analysis and development of locomotion devices for the gastrointestinal tract," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 49, no. 6, pp. 613–616, 2002.
- [2] J. Yan, R. J. Wood, S. Avadhanula, M. Sitti, and R. S. Fearing, "Towards flapping wing control for a micromechanical flying insect," in *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164)*, vol. 4, IEEE, 2001, pp. 3901–3908.
- [3] R. Sahai, S. Avadhanula, R. Groff, E. Steltz, R. Wood, and R. S. Fearing, "Towards a 3g crawling robot through the integration of microrobot technologies," in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006*, IEEE, 2006, pp. 296–302.
- [4] J. P. Whitney, P. S. Sreetharan, K. Y. Ma, and R. J. Wood, "Pop-up book mems," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 21, no. 11, p. 115021, 2011.
- [5] M. López, E. Castillo, G. García, and A. Bashir, "Delta robot: inverse, direct, and intermediate jacobians," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 220, no. 1, pp. 103–109, 2006.
- [6] R. J. Wood, "Design, fabrication, and analysis of a 3dof, 3cm flapping-wing mav," in *2007 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, IEEE, 2007, pp. 1576–1581.
- [7] P. Birkmeyer, K. Peterson, and R. S. Fearing, "Dash: A dynamic 16g hexapedal robot," in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2009, pp. 2683–2689.
- [8] A. T. Baisch, O. Ozcan, B. Goldberg, D. Ithier, and R. J. Wood, "High speed locomotion for a quadrupedal microrobot," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 33, no. 8, pp. 1063–1082, 2014.
- [9] R. J. Wood, B. Finio, M. Karpelson, K. Ma, N. O. Pérez-Arancibia, P. S. Sreetharan, H. Tanaka, and J. P. Whitney, "Progress on 'pico' air vehicles," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 31, no. 11, pp. 1292–1302, 2012.
- [10] S. Russo, T. Ranzani, J. Gafford, C. J. Walsh, and R. J. Wood, "Soft pop-up mechanisms for micro surgical tools: Design and characterization of compliant millimeter-scale articulated structures," in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2016, pp. 750–757.
- [11] M. Salerno, K. Zhang, A. Menciassi, and J. S. Dai, "A novel 4-dofs origami enabled, sma actuated, robotic end-effector for minimally invasive surgery," in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2014, pp. 2844–2849.
- [12] J. Gafford, T. Ranzani, S. Russo, H. Aihara, C. Thompson, R. Wood, and C. Walsh, "Snap-on robotic wrist module for enhanced dexterity in endoscopic surgery," in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2016, pp. 4398–4405.
- [13] J. E. Correa, J. Toombs, N. Toombs, and P. M. Ferreira, "Laminated micro-machine: Design and fabrication of a flexure-based delta robot," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 24, no. 2, p. 370–375, 2016.
- [14] M. Salerno, F. A., and P. J., "A low profile electromagnetic actuator design and model for an origami parallel platform," in *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 9, no. 4, ASME, May 2017, pp. 041005–041005.
- [15] H. McClintock*, F. Z. Temel*, N. Doshi, J.-s. Koh, and R. J. Wood, "The millidelta: A high-bandwidth, high-precision, millimeter-scale delta robot," *Science Robotics*, vol. 3, no. 14, 2018. [Online]. Available: <http://robotics.sciencemag.org/content/3/14/ear3018>
- [16] X. Sun, S. M. Felton, R. J. Wood, and S. Kim, "Printing angle sensors for foldable robots," in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sep. 2015, pp. 1725–1731.
- [17] D. M. Vogt and R. J. Wood, "Wrist angle measurements using soft sensors," in *SENSORS, 2014 IEEE*, Nov 2014, pp. 1631–1634.
- [18] H. Wang, D. Zhou, and J. Cao, "Development of a skin-like tactile sensor array for curved surface," *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 55–61, Jan 2014.
- [19] F. L. Hammond, R. K. Kramer, Q. Wan, R. D. Howe, and R. J. Wood, "Soft tactile sensor arrays for force feedback in micromanipulation," *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 5, pp. 1443–1452, May 2014.
- [20] D. M. Vogt, Y. Park, and R. J. Wood, "Design and characterization of a soft multi-axis force sensor using embedded microfluidic channels," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 10, pp. 4056–4064, Oct 2013.
- [21] K. Noda, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Stretchable tri-axis force sensor using conductive liquid," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 215, pp. 123–129, 2014.
- [22] F. Z. Temel, H. McClintock, C. J. Payne, I. Wamala, C. J. Walsh, N. V. Vasilyev, and R. J. Wood, "Pop-up-inspired design of a septal anchor for a ventricular assist device," in *Proceedings 2017 Design of Medical Devices Conference (Cat. No. DMD2017-3458)*, ASME, 2017, p. V001T07A002.
- [23] D. Rus and M. T. Tolley, "Design, fabrication and control of origami robots," *Nature Reviews Materials*, vol. 3, p. 101–112, 2018.
- [24] V. Correia, C. Caparros, C. Casellas, L. Francesch, J. G. Rocha, and S. Lancers-Mendez, "Development of inkjet printed strain sensors," *Smart Materials and Structures*, vol. 22, no. 10, p. 105028, sep 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/22/2F02>

Etkili Manipülasyon için 9 Serbestlik Dereceli Cerrahi Robotun Uyarlamalı Ters Kinematığı

Begüm Sunal, Erhan Öztop
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Özyeğin Üniversitesi
İstanbul, Türkiye

Email: begum.sunal@ozu.edu.tr, erhan.oztop@ozyegin.edu.tr

Özkan Bebek
Makina Mühendisliği Bölümü
Özyeğin Üniversitesi
İstanbul, Türkiye

Email: ozkan.bebek@ozyegin.edu.tr

Özetçe —Robot yardımı ile yapılan bir cerrahi operasyonda hassas ve kesin hareket esastır. Bununla birlikte, cerrah, uzaktan komutalı denetleme ile robotu kullanırken daha geniş bir alanı kapsamak istediğinde, hassas hareket için tasarlanan konfigürasyon, kullanıcıyı kısıtlayabilir ve/veya sistemin çalışmasını yavaşlatabilir. Bu bildiride kullanıcının hem hızlı hem de kesin hareketler yapmasını ve kullanıcı üzerindeki yükün azaltılmasına izin verecek indirgenebilir manipülatörlere uygulanabilir kinematik tabanlı bir yöntem önermektedir.

Önerilen yöntemde, robotun uç elemanının hızını haptik cihazın hızına göre ayarlamak için gerçek zamanlı olarak farklı kinematik konfigürasyonlar otomatik olarak seçilir. Önerilen yöntem, 3 serbestlik dereceli servo tahrikli bir cerrahi aletin 6 serbestlik dereceli manipülatöre özel bir arabirim vasıtasıyla tutturulmasıyla gerçekleştirilen 9 serbestlik dereceli bir sistemde test edilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin fiili operasyonlarda benimsenmesinin cerrahi zamanın ve cerrahın çabalarının azalmasını kolaylaştırabileceğini ve böylece hastadaki doku deformasyonları ve diğer komplikasyon riskini azaltmaya yardımcı olabileceğini göstermektedir.

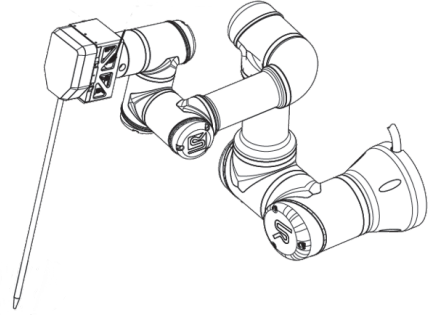
Anahtar Kelimeler—Ters Kinematik, Manipülasyon, Cerrahi Robotik, İndirgenebilirlik

I. GİRİŞ

Son yıllarda robot yardımı minimal invaziv cerrahi gittikçe daha popüler hale gelmiştir ve geleneksel laparoskopik cerrahiye daha iyi bir alternatif olarak kabul edilmiştir [1]–[3]. Cerrahide robotik asistanlarla hasta kayıplarını ve ameliyat maliyetlerini düşürmek amaçlanmaktadır. Geleneksel ameliyatlara kıyasla, robotik asistanlar hastalar için daha az ağrı, ameliyat sonrası daha nadir komplikasyon ve enfeksiyon riski ve daha hızlı iyileşme süreci vaat etmektedirler [4], [5]. Ayrıca, küçük alanlarda cerrahın el becerisini ve manipülasyon kabiliyetini arttırmaktadırlar [6].

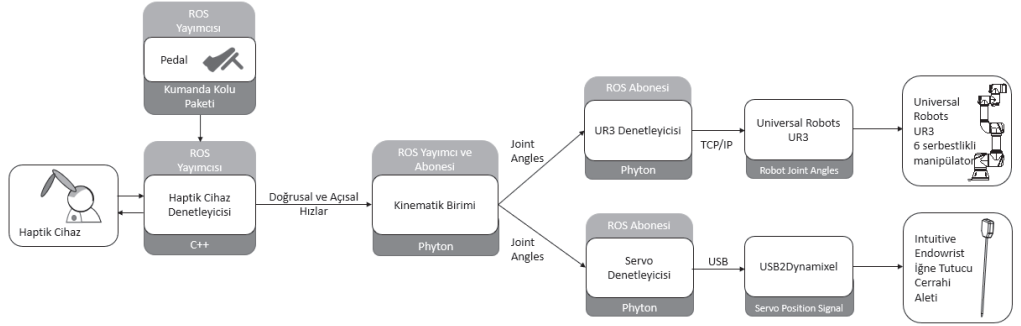
Güvenlik ve hassasiyet, bir robotik cerrahi sistemdeki en önemli konulardan ikisidir [7]. Hassasiyet gereksinimi, toplam ameliyat süresi uzatmak pahasına, manipülatör hızını yavaşlatarak yerine getirilebilir. Bu soruna kısmi bir çözüm, robot uç elemanının hızını operatörün amaçladığı hedef pozuna göre değiştirmektir, ancak bunu yapmak için kullanıcının hedefi önceden tahmin edilmelidir. Buna yönelik, kullanıcının hedefini tahmin etmek ve hareket ölçeklendirmesini buna göre düzenlemek için göz takibini, el hareketi ile birleştirerek uyarlamalı bir hareket ölçeklendirmesinin gerçekleştirildiği çalışma Gras vd. tarafından sunulmuştur [8].

Altıdan fazla serbestlik derecesine sahip olan cerrahi sistemlerdeki bir problem indirgenebilirliktir. Robotik bir sistemde indirgenebilirlik, robot uç elemanının konumunu ve yönelimini sağlamak için gerekenden daha fazla özgürlüğe sahip olmak olarak tanımlanır. Bir sistem indirgenebilir olduğunda, manipülatör hedefe bir çok farklı konfigürasyonda ulaşabildiğinden, sistemin ters kinematığı sonsuz sayıda çözüme sahiptir [9], [10]. Ping vd. tekillik sorunlarını önlemek için indirgenebilir bir manipülatörün ters kinematığı için bir optimizasyon önerisinde bulunmuştur [11].



Şekil 1: Üç serbestlik dereceli cerrahi alet ve altı serbestlik dereceli manipülatörden oluşan cerrahi robotik sistem

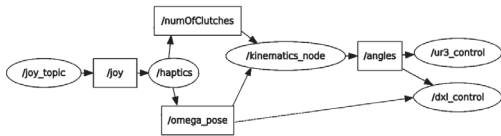
Her ne kadar basit bir matematiksel açıdan indirgenebilirlik bir sorun gibi görünse de, doğru bir şekilde işlenmesi halinde çok faydalı olabilir. Bu bildiride, indirgenebilirlik manipülatörün hızını uyarlamalı olarak değiştirmek için kullanılmaktadır. Manipülatörü 6 serbestlik derecesi ile sınırlamak için belirli zamanlarda bazı eklemleri kilitlenmektedir. Manipülatörün komutası da sadece 6 serbestlik dereceli girdi ile yapılmaktadır. Ayrıca, sınırlandırılan eklemler sayesinde ters kinematik probleminin çözümü kolaylaşacaktır. Tolani vd. bir insan kolunun eklemlerini tek tek sabitleyerek ters kinematığını çözmek için kapalı yapıda denklemler oluşturmaya odaklanmış. Metod verimli, doğru ve gürbüz olmasına rağmen modelin gerçekçi duruşlar üretmediğini ve ulaşılabilir çalışma alanının azaldığını bildirmiştir [12]. Chen vd. ve Zaplana vd. indirgenebilir bir manipülatörün ters kinematığını çözerken



Şekil 2: Cerrahi robotik sistemin veri akış şeması. Haptik cihazdan doğrusal ve açısal hızlar, haptik denetleyici birimi vasıtasıyla kinematik birimine gönderilir. Kinematik birimi dokuz eklem için çıkış açılarını hesaplar ve bu açıları hem UR3 denetleyicisi hem de Servo denetleyicisi birimlerine gönderilir. Son olarak, tüm eklemeler USB ve TCP/IP bağlantıları ile istenilen açılara getirilir.

sabitlenecek olan eklemleri seçmek için optimizasyon yöntemleri sunmaktadırlar [13], [14]. Her iki çalışma da, indirgenebilir bir manipülatörün eklemine sabitleme nedeniyle ortaya çıkan küçülmüş çalışma alanını genişletmeye odaklanırlar. 7 serbestlik dereceli sistemler için, parametrelili hale getirilmiş kesin çözümler mevcuttur [15]; ancak, yazarlar tarafından daha yüksek serbeslik derecesi için doğrudan genelleme bilinmemektedir.

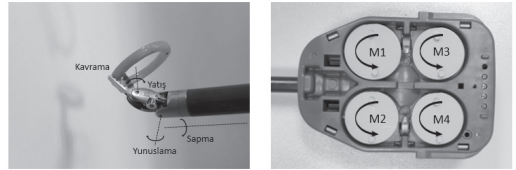
Bu çalışmanın amacı, manipülatördeki mevcut indirgenebilirliğin kullanılmasıyla manipülatörün hızını ve manipüle edilebilirliğini artırarak robotik ameliyatlara yararını geliştirmektir. Öneri, Şekil 1’de gösterildiği gibi 9 serbestlik dereceli bir cerrahi manipülatöre uygulanmaktadır. Herhangi bir zamanda, dokuz ekleminden sadece altısının aktif olmasına izin verilir, böylece ters kinematik her zaman sınırlı bir manipülatör için yegane bir çözüme sahiptir. Hangi eklemlerin aktif veya inaktif olduğu kararı kullanıcı müdahalesi olmadan otomatik olarak yapılır. Bu bildirinin düzeni şu şekildedir: bir sonraki bölümde sistem ve tasarım tanıtılmaktadır. İlerleyen bölümlerde sistemlerin kontrolü ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Bölüm IV, izlenen yöntemin doğruluğunu sunar. Son olarak, son bölüm, bildiriyi sonuca bağlamaktadır.



Şekil 3: Tüm sistemin rosnode ve rostopic haritası. Oval şekiller node’ları temsil eder ve dikdörtgen şekiller topic’leri temsil eder.

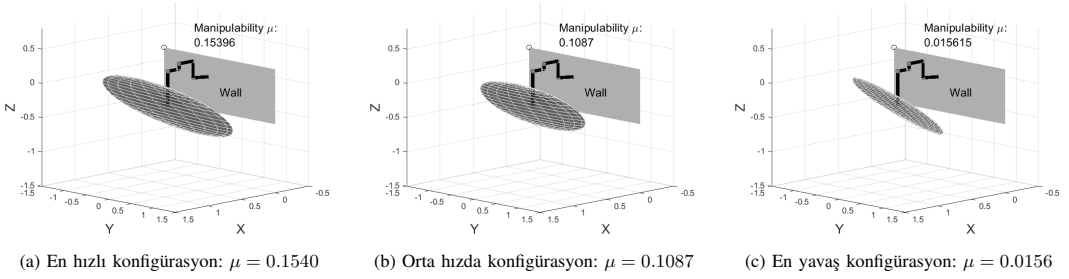
II. SİSTEME GENEL BAKIŞ VE TASARIM

Bu çalışmadaki robotik sistem, bir 6 serbestlik dereceli seri manipülatör, Universal Robots UR3 robot kolu [16] ve uç elemanına takılımsız 3 serbestlik dereceli servo tahrikli bir cerrahi aletten, Intuitive Surgical Endowrist İğne Sürücüsü [17], oluşmaktadır. İğne sürücüsünün 3 serbesliği dört adet Dynamixel XL-320 servo motor tarafından tahrik edilmektedir. Sistem, 6 serbestlik dereceli Force Dimension Omega.6 haptik cihaz ve kumanda kolu birimi olarak bağlı bir pedal yardımıyla manipüle edilir. Aletler arasındaki iletişim, Robot İşletim Sistemi (ROS) yardımı ile RS232 ve TCP/IP ile sağlanır. Veri akışının ayrıntılı haritası, Şekil 2’de gösterilmiş ve rostopic ve rosnode haritası Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 4: Sol: 3 serbestlikte hareket edebilen ve kavrayabilen Endowrist iğne sürücüsünün bileği. Sağ: Cerrahi aletin dört tahrik giriş şaftı. Üçüncü motorun (M3) dönmesiyle sapma hareketi, birinci ve ikinci motorun (M1 & M2) bütünlüklük hareketleriyle saf yatış hareketi ve kavrama hareketi, bir, iki ve dördüncü motorun (M1 & M2 & M3) bütünlüklük hareketi ile saf yunuslama hareketi elde edilir.

Pedal, haptik cihazdan gelen girdiyi etkinleştirmek ve devre dışı bırakmak için ana bilgisayara bir kumanda kolu birimi olarak bağlanmıştır. Haptik aygıttan elde edilen doğrusal ve açısal hızlar, kinematik birimine yalnızca pedala basıldığında gönderilir. Böylece pedala basılmadığında haptik cihaz serbestçe hareket edebilir ve şalterleme sağlanır. Haptik cihazın



Şekil 5: Seçilen üç konfigürasyonun, robotun başlangıç pozundaki manipüle edilebilirlik elipsoid ve sabitleri. Elipsoidlerin uzun eksenleri, robotun uç elemanın en hızlı şekilde hareket edebileceği yöndür.

hızları, kinematik birime gönderildiğinde, birim ilk önce hangi konfigürasyonun (yani aktif eklemler kümesi) verilen hız için en iyi olacağını belirler (Algoritma 1). Seçilen kinematik konfigürasyonunun çözümünde teklik olması durumunda, konfigürasyon bir doğrulama algoritması ile değiştirilir (Algorithm 2). Eklem açıları, seçilen konfigürasyonun ters kinematiği ile hesaplanır. Çıktı açıları, cerrahi alet ve seri manipülatörü tahrik etmek için kullanılır. Cerrahi alettaki bağlantı nedeniyle, çıkış açıları III-A bölümünde açıklandığı gibi bir ayrıştırma dönüşümü ile servo açlarına eşlenir. Servo motorlar, servo denetleyici yardımı ile (USB2Dynamixel [18]) istenen açılara getirilir. İlk altı eklemin açıları, yani seri manipülatör eklemleri, manipülatöre TCP/IP bağlantısı aracılığıyla UR3 Komut Dosyası Dili [19] komutları gönderilerek kontrol edilir.

III. CİHAZ VE SİSTEM DENETLEMESİ

A. Cihaz Denetlemesi

Bölüm II'de belirtildiği gibi, 3 serbestlik dereceli cerrahi aletini denetlemek için dört adet servo motor kullanılır (Şekil 4). Endowrist cerrahi aletler, insan bileğinin el becerisini taklit etmek için kasnaklar ve kablolarla üretilmiştir. Sonuç olarak, 4 dönüş ile sapma-yunuslama-yatış hareketleri gerçekleştirilir ve bu da sisteme bir ayrılma problemi yaratır. Bu durum da bu takımların kontrolünü zorlaştırır [20]. İstenilen yunuslama ve yatış hareketlerini elde etmek için birkaç eyleyici farklı açılarda döndürülmelidir. Örneğin, cerrahi aletin diğer açıları sabit tutulurken belirli bir yunuslama açısını elde etmesini sağlamak için bir, iki ve dördüncü motorlar aynı anda döndürülmelidir. Kinematik birimi tüm sapma, yunuslama ve yatış hareketlerini aynı anda servo denetleyicisine gönderir, bu yüzden her hareket için ayrı ayrı fonksiyonlar oluşturmak işe yaramaz; tüm hareketler aynı anda hesaplanmalıdır. Bu nedenle, bu dönüşlerin katsayıları hesaplanmıştır ve bulunan denklemlerden bir dönüşüm matrisi oluşturulmuştur. (1) denkleminde, k 'lar ölçeklendirme sabitleridir, θ_{Mi} eyleyicilerin açılarını temsil eder ve $\theta_7, \theta_8, \theta_9$ istenen bilek dönüş açılarını ifade eder.

$$\begin{bmatrix} 0 & k_{p1} & k_{y1} & \theta_{M1\text{hatapayı}} \\ 0 & k_{p2} & k_{y2} & \theta_{M2\text{hatapayı}} \\ k_r & 0 & 0 & \theta_{M3\text{hatapayı}} \\ 0 & k_{p3} & 0 & \theta_{M4\text{hatapayı}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_7 \\ \theta_8 \\ \theta_9 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{M1} \\ \theta_{M2} \\ \theta_{M3} \\ \theta_{M4} \end{bmatrix} \quad (1)$$

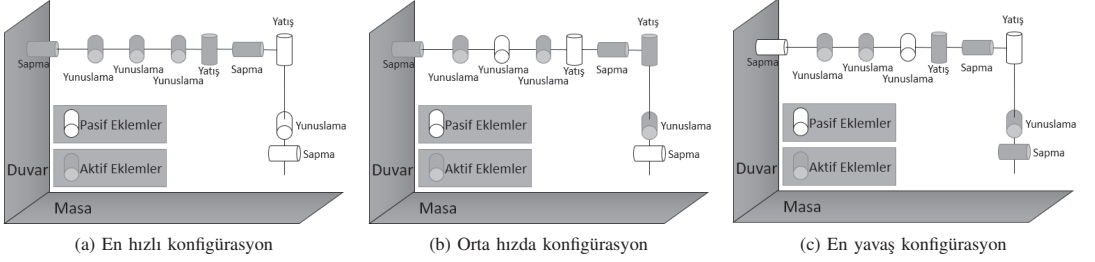
B. Kinematik

Sistem bir haptik cihaz tarafından kontrol edilen bir cerrahi asistan olarak tasarlanmıştır. Böylece kinematik, haptik cihazdan alınan hız değeri ile hesaplanır ve elde edilen açılar, önceki bölümde belirtilen dönüşüm matrisi (1) ile çarpıldıktan sonra UR3 denetleyicisi ve servo denetleyicisine gönderilir.

Sistemin hızını değiştirmek için, her kinematik konfigürasyonda dokuz eklemden altısı seçilir, böylece sistem indirgenebilir olmayan bir şekilde çalışır. Farklı hız gereksinimleri için farklı eklem setleri, eklemlerin dönme eksenlerine göre ampirik olarak seçilmiştir.

Basit bir anlamda manipüle edilebilirlik analizi, bir robotun verilen bir durumda manipülasyon yeteneğinin ölçüsü olarak açıklanabilir [21]. Hareket ölçeklendirme için kullanılacak konfigürasyonları seçmeden önce, birçok farklı konfigürasyon uygulanmış ve simüle edilmiştir. Uç eleman hızını en iyi ölçekleyen üç konfigürasyon, denklem (2) kullanılarak her bir konfigürasyonun manipüle edilebilirlik elipsoidleri ve sabitleri hesaplanarak seçilmiştir. Robot başlangıç konumundayken seçilen konfigürasyonların manipüle edilebilirlik elipsoidleri, Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu şekillerde, elipsoidlerin uzun eksenleri, uç elemanın en hızlı hareket edebileceği yönü temsil eder. Manipüle edilebilirlik sabiti sıfır ile bir arasında bir değer olabilir. Manipüle edilebilirlik sabitininin sıfır olması, robotun tekil konumda olduğunu ve manipüle edilebilirlik sabitininin bir olması, robotun çalışma alanının maksimum kapasitede olduğunu gösterir. Seçilen konfigürasyonların başlangıç konumundaki manipüle edilebilirlik sabitleri, en hızlı konfigürasyondan en yavaşına kadar sırasıyla 0.1540, 0.1087 ve 0.0156'dır.

$$\mu = \sqrt{\det(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)} \quad (2)$$



Şekil 6: Seçilen konfigürasyonların aktif ve pasif eklemleri

Şekil 6a'de, tüm UR3 bağlantılarının aktif ve tüm cerrahi alet bağlantılarının pasif olduğu en hızlı konfigürasyon gösterilir. Diğer iki konfigürasyon, şekil 6b ve 6c'te gösterilmiştir.

Sistemin ters kinematik çözümü, ters Jacobian yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Robotun dönüşümü, sabit eklemlerin sabitlendiği andaki pozuna göre değişiklik gösterdiğinden, dönüşüm matrisleri ve robotun ileri kinematiği her zaman dokuz eklemin tümü için hesaplanır. Ancak, Jacobian matrisleri farklı eklem konfigürasyonlarına göre hesaplanır. Örneğin, 1, 2, 4, 6, 7 ve 8 numaralı eklemlerin değişkenleri, orta hızlı kinematik konfigürasyonunun Jacobian matrisini hesaplamak için göz önünde bulundurulur (şekil 6b).

Jacobian matris yinelemelerindeki hatanın neden olduğu sistemdeki sürüklenmeyi azaltmak için, sonuçlar her adımda bir geri besleme kontrol mekanizması ile doğrusallaştırılır. Hata, sonuçların ileri kinematiğini verilen yörengeden çıkarmak ve k_e sabitiyle çarpmak suretiyle hesaplanır. Poztaki bu hatalar, Jacobian matrisinin tersiyle çarpılarak açılara yansıtılır. Ardından, açılar arasındaki hata payı sonuca eklenir:

$$e = k_e(M_{girdi} - T_9^0) \quad (3)$$

M_{girdi} verilen yöreng ve e pozdaki hata payıdır.

$$\theta_e = J^{-1}e \quad (4)$$

θ_e hatanın açılara yansıdığı halidir.

$$\theta_{final} = \theta_{çıktı} + \theta_e \quad (5)$$

C. Konfigürasyonu Değiştirme

Üç kinematik konfigürasyon arasındaki geçiş otomatikleştirmek için bir karar verme algoritması uygulanır. Bu algoritma, haptik cihazdan doğrusal ve açılal hızları girdi olarak alır ve alternatifler arasındaki en iyi kinematik konfigürasyonu seçer fakat bu algoritma tekilliği dikkate almaz ve bu nedenle seçilen konfigürasyon, robot başka bir konfigürasyondayken tekillikten arınmış olsa da, tekilliğe yakın bir konfigürasyonda kalabilir. Bu yüzden, başka bir algoritma, yani konfigürasyon doğrulama algoritması, tekillik durumunu kontrol etmek için kullanılmaktadır. Bu algoritma, robotun hedef pozunu ve Algoritma 1 tarafından seçilen konfigürasyonu alır ve eğer robot (seçilen aktif eklemlere

göre) tekil bir konfigürasyonda ise aktif eklem grubunu değiştirir. Eğer robot olası tüm aktif eklem grupları için tekillik durumunda ise, kullanıcının herhangi bir hareket yapması önerilir.

Algoritma 1 Konfigürasyon Karar Verme Algoritması

Require: $v_x, v_y, v_z, \omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma$: Haptik cihazdan gelen doğrusal ve açılal hızlar

```

0: procedure KARARVERICI( $v_x, v_y, v_z, \omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma$ )
1:  $\bar{v} \leftarrow v_x, v_y, v_z$  ortalaması
2:  $\bar{\omega} \leftarrow \omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma$  ortalaması
3:  $pos_{decision} \leftarrow true$ 
4: if ( $\bar{v} < K_{lower}$ ) or ( $\bar{\omega} > K_{upper}$ ) then
5:    $pos_{decision} \leftarrow false$ 
6: end if
7: if  $pos_{decision}$  then
8:    $dominant \leftarrow v_x, v_y, v_z$  icinden baskin olanı bul
9:   if  $dominant > v_{conf1}$  then
10:    En hızlı konfigürasyonu seç
11:   else if  $dominant > v_{conf2}$  then
12:    Orta hızlıdaki konfigürasyonu seç
13:   else
14:    En yavaş konfigürasyonu seç
15:   end if
16: else
17:    $dominant \leftarrow \omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma$  icinden baskin olanı bul
18:   if  $dominant > \omega_{conf1}$  then
19:    En hızlı konfigürasyonu seç
20:   else if  $dominant > \omega_{conf2}$  then
21:    Orta hızlıdaki konfigürasyonu seç
22:   else
23:    En yavaş konfigürasyonu seç
24:   end if
25: end if
25: end procedure

```

Algoritma 1 ve 2, haptik cihazdan her veri alındığında kontrol edilir. Algoritma 1'in yaptığı ilk şey, kullanıcının konumu mu yoksa yönelimi mi değiştirmek istediğine karar vermektir. Daha sonra, kullanıcının hem konum hem de yönelim durumu için hareket etmek istediği baskın eksen bulunur. Bu kararlardan sonra, egemen eksenin doğrusal veya açılal hızını alır ve bu hız için en uygun olan konfigürasyona karar verir. Bazı durumlarda robotun manipüle edilebilirliği, daha yavaş konfigürasyonlar için önemli ölçüde azalmaktadır.

Algoritma 2 Konfigürasyon Doğrulama Algoritması

Require: *goalPose* : Robotun hedef pozu, *case* : Algoritma 1 tarafından seçilen konfigürasyon

0: **procedure** TEKİLLIKTENKAÇINMA(*goalPose*, *case*)

1: $\mu \leftarrow \text{case}$ için *goalPose*'daki manipüle edilebilirlik katsayısı

2: **while** $\mu < 0.015$ **do**

3: **if** *case* == *en yavaş* **then**

4: Orta hızdaki konfigürasyonu seç

5: μ 'yu orta hızdaki konfigürasyon için güncelle

6: **else if** *case* == *orta* **then**

7: En hızlı konfigürasyonu seç

8: μ 'yu en hızlı konfigürasyon için güncelle

9: **else**

10: Robot bütün konfigürasyonlar için tekil pozdadır

11: Break

12: **end if**

13: **end while**

13: **end procedure**=0

Bu nedenle, algoritma 2, hedef pozun seçilen konfigürasyon ile gerçekten erişilebilir olduğundan emin olarak seçilen konfigürasyonu doğrulamak zorundadır. Dolayısıyla, seçilen konfigürasyon için manipüle edilebilirlik sabiti hesaplanır ve eğer 0.015'ten küçükse daha hızlı bir konfigürasyona geçilir. Bu işlem, manipüle edilebilirlik sabiti kabul edilebilir olana veya bütün konfigürasyonlarda tekillik olması durumuna kadar tekrarlanır. Böylece kullanıcının tekil pozlardan kaçınması sağlanır.

IV. YÖNTEM DOĞRULAMA

A. Benzetim

Önerilen yöntemi fiziksel sisteme uygulamadan önce, potansiyel aktif eklemler kümesi olarak kullanılacak uygun konfigürasyonlarını bulmak için benzetim ortamında deneysel araştırmalar yapılmıştır. İlk olarak, konfigürasyonun verilen yörüngeleri takip etmek için uygun olup olmadığını görmek için çeşitli eklemler konfigürasyonlarının ters kinematiği hesaplanır ve rastgele yörüngelerle test edilir. Bu yapılandırılmaların manipüle edilebilirliği, hızları ölçeklendiren en iyilerini seçmek için de hesaplanır. Bu deneysel çalışmaların sonucu olarak, bölüm III.B'de sunulan üç konfigürasyon (bkz. Şekil 6) deneylere devam etmek için seçilmiştir. Konfigürasyonlar arasında geçiş yapmanın poz üzerinde ve/veya açı değerlerinde herhangi bir ani artış veya azalışa neden olmadığından emin olmak için başka deneysel testler uygulanmıştır.

B. Fiziksel Sistem

Yöntemin planlandığı gibi simülasyonda çalıştığı doğrulandıktan sonra, gerçek fiziksel sistem üzerinde testler yapılmıştır. Fiziksel sistemin deney ortamı örneği Şekil 7'de gösterilmektedir. Robotu kontrol etmek için kalem şeklindeki 6 serbestlik dereceli haptik cihaz ve bir pedal kullanılmıştır. Haptik cihazın eksen hızları, pedala basıldığında kinematik birimine gönderilir. Kinematik birimi daha sonra hangi kinematik konfigürasyonunun haptik cihazdan verilen hız için uygun olacağına karar verir ve tekillik durumunu kontrol eder.

Kinematik birimi, UR3 denetleyicisi ve servo denetleyicisine istenen açıları ROS üzerinden soket ve USB iletişimi yoluyla gönderir.



Şekil 7: Fiziksel deney ortamı: 9 serbestlik dereceli cerrahi robot ve 6 serbestlik dereceli haptik cihaz

Benzetim ortamına benzer deneyler gerçek hayat sistemine uygulanmıştır. Haptik cihazdan farklı hızlar uygulandığında robotun davranışı gözlemlenmiştir. Fiziksel sistem üzerinde yapılan deneyler sonucunda, robotun beklenti dışında hiçbir davranışı gözlemlenmiştir ve son eleman hızını kullanıcı girişine göre ayarlanabilmesi yöntemi doğrulanmıştır.

V. SONUÇ

Bu çalışmada, dokuz eklemlerli bir robotun üç eklemlerli otomatik olarak sabitlenerek indirgenebilir bir cerrahi sistemin manipüle edilebilirliği ve hız ölçeklendirmesi için bir yöntem sunulmuştur. Önerilen karar verme algoritmasıyla, en avantajlı kinematik konfigürasyonu sağlanan hızla seçilir ve cihazların kontrolü elde edilir. Bu çalışma aynı zamanda sapma, yunuslama ve yatış hareketlerinin temiz kontrolünü sağlayan, tendonla çalışan cerrahi aletin birleştirilmesini sağlayan bir dönüşüm matrisi sunar. Genel sonuçlar, uyarlamalı kinematiğin, şalterleme sayısını ve verilen görevin süresini azaltmayı başardığını göstermektedir.

KAYNAKÇA

- [1] D. B. Camarillo, T. M. Krummel, and J. Salisbury, "Robotic technology in surgery: Past, present, and future," *The American Journal of Surgery*, vol. 188, no. 4, pp. 2–15, oct 2004.
- [2] M. Daouadi, A. H. Zureikat, M. S. Zenati, H. Choudry, A. Tsung, D. L. Bartlett, S. J. Hughes, K. K. Lee, A. J. Moser, and H. J. Zeh, "Robot-assisted minimally invasive distal pancreatectomy is superior to the laparoscopic technique," *Annals of surgery*, vol. 257, no. 1, pp. 128–132, 2013.
- [3] S. Maeso, M. Reza, J. A. Mayol, J. A. Blasco, M. Guerra, E. Andrades, and M. N. Plana, "Efficacy of the da vinci surgical system in abdominal surgery compared with that of laparoscopy: a systematic review and meta-analysis," 2010.
- [4] P. C. Giulianotti, "Robotics in general surgery," *Archives of Surgery*, vol. 138, no. 7, p. 777, July 2003.

- [5] G. Martel and R. P. Boushey, "Laparoscopic colon surgery: Past, present and future," *Surgical Clinics of North America*, vol. 86, no. 4, pp. 867 – 897, 2006, recent Advances in the Management of Benign and Malignant Colorectal Diseases.
- [6] V. Vitiello, S. Lee, T. P. Cundy, and G. Yang, "Emerging robotic platforms for minimally invasive surgery," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 6, pp. 111–126, 2013.
- [7] J. Troccaz, Y. Delnondedieu, and A. Poyet, "Safety issues in surgical robotics," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 28, no. 20, pp. 19 – 26, 1995, iFAC Workshop on Human-Oriented Design of Advanced Robotics Systems, Vienna, Austria, 19-20 September.
- [8] G. Gras, K. Leibrandt, P. Wisanuvej, P. Giataganas, C. A. Seneci, M. Ye, J. Shang, and G. Yang, "Implicit gaze-assisted adaptive motion scaling for highly articulated instrument manipulation," in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2017, pp. 4233–4239.
- [9] S.-Y. Oh, D. Orin, and M. Bach, "An inverse kinematic solution for kinematically redundant robot manipulators," *Journal of Robotic Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 235–249, 1984.
- [10] M. Vande Weghe, D. Ferguson, and S. S. Srinivasa, "Randomized path planning for redundant manipulators without inverse kinematics," in *2007 7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Nov 2007, pp. 477–482.
- [11] Y. Ping, S. Hanxu, and J. Qingxuan, "Study on kinematics optimization of redundant manipulators," in *2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, June 2006, pp. 1–6.
- [12] D. Tolani and N. I. Badler, "Real-time inverse kinematics of the human arm," *Presence (Camb)*, vol. 5, no. 4, pp. 393–401, 1996.
- [13] Y. Chen, Y. Chen, and J. Guo, "An optimization algorithm to expand the reduced workspace with fixed-joint method for redundant manipulator," in *2016 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, July 2016, pp. 116–120.
- [14] I. Zaplana and L. Basanez, "A novel closed-form solution for the inverse kinematics of redundant manipulators through workspace analysis," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 121, pp. 829–843, March 2018.
- [15] B. Moore and E. Oztop, "Redundancy parameterization for flexible motion control," in *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2010, pp. 1309–1316.
- [16] Universal Robots. (2019) UR3 technical details. [Online]. Available: https://www.universal-robots.com/media/1801288/eng_199901_ur3_tech_spec_web_a4.pdf
- [17] Intuitive Surgical. (2015, May) da Vinci Xi Instrument and accessory catalog. [Online]. Available: https://www.intuitivesurgical.com/images/on-site-banners/1008471rB-EU_Xi_IA_Catalog.pdf
- [18] ROBOTIS. e-manual v1.29.00 USB2Dynamixel. [Online]. Available: http://support.robotis.com/en/product/auxdevice/interface/usb2dxl_manual.htm
- [19] Universal Robots. (2018, April) URScript Programming Language. [Online]. Available: <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/32554/scriptManual-3.5.4.pdf>
- [20] C. Y. Kim, M. Lee, and S. J. Go, "The workability of sliding perturbation observer as haptic signal at the surgical robot instrument," in *Proc. of SICE Annual Conference*, Aug 2010, pp. 465–470.
- [21] A. Bicchi and D. Prattichizzo, "Manipulability of cooperating robots with unactuated joints and closed-chain mechanisms," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 4, pp. 336–345, Aug 2000.

Çoklu Robot Sistemlerinde Taklit ile Öğrenme

Mehmet Dinçer Erbaş
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Bolu, Türkiye
Email: dincer.erbas@ibu.edu.tr

Özetçe —Taklit veya imitasyon, davranış ve yeteneklerin aynı gruba paylaşılan bireyler arasında geçişine olanak veren bir sosyal öğrenme metodudur. Bu çalışmada öncelikle, taklit ile öğrenmenin diğer uyarlanabilir öğrenme algoritmaları ile birlikte kullanılabilmesine olanak veren bir kontrol mimarisi tanımlanmıştır. Daha sonra bu kontrol mimarisi ile yönlendirilen gerçek robotlar üzerinde iki farklı taklit metodu karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan iki taklit metodu, sadece davranışları taklit etme ve davranışlar ile algıları taklit etmedir. Yapılan deneylerde, başarı getiren davranışların yüksek oranda çevresel faktörlerin etkisi ile şekillendiği çevrelerde, aksiyonlar ile algıları taklit etmenin bireylerin öğrenme hızını artırdığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler—Taklit ile öğrenme, pekiştirmeli Q öğrenme, çoklu robot sistemleri.

I. GİRİŞ

Taklit veya imitasyon, davranış ve yeteneklerin bireyler arasında geçişine olanak veren bir sosyal öğrenme yöntemidir. Taklit yeteneğinin bireylerin çevrelerine olan adaptasyonlarına etkisi uzun yıllardır biyologlar tarafından incelenmektedir [1], [2]. Bu konuda yapılan çalışmalarda, taklit sayesinde bireylerin karmaşık sosyal çevrelerin bir parçası haline gelebildiği belirtilmiştir [3]. Bu noktadan hareketle, taklit yeteneği, sosyal hayvanlar ve insanlar için kümülatif bir kültürün oluşması için gerekli bir araç olarak görülmüştür [4], [5].

Robotik alanında taklit edebilen robotların kullanımı son dönemde oldukça fazla ilgi gören bir araştırma konusu haline gelmiştir [6]. Bunun sebebi, robotik sistemlerde taklit ile öğrenme yöntemi ile belli başlı faydaların elde edilebilmesidir. Etrafındaki robot veya insanları taklit edebilen bir robot, kopyalama sayesinde yeni davranışları, bu davranışların tatbiki sırasında öğrenebilir. Bu sayede robotların ifa yeteneğine sahip olmaları gereken her türlü davranışın önceden planlanmasına ve programlanmasına gerek kalmaz; çünkü taklit yeteneğine sahip robotlar etraflarından öğrenebilir. Bu durum özellikle, her özelliği tahmin edilemeyen değişken ve dinamik çevrelerde görevlerini ifa eden robotlar için önemlidir. Ayrıca taklit ile birbirinden öğrenen robotlar için ayrıca bir iletişim yöntemi geliştirilmesine gerek yoktur. Robotlar arası bilgi transferi ifa edilen aksiyonların gözlenilmesi ile yapılabilir. Bu önemli olası faydaların ışığında, robotları taklit yöntemiyle eğitmeyi amaçlayan araştırmalarda başka robotlar veya insanlar kullanılmıştır. Taklit ile öğrenme konusunda yapılan araştırmalardan bazıları şunlardır: [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14].

Taklit ile öğrenme yönteminin bir başka önemli özelliği diğer uyarlanabilir öğrenme algoritmalarından farklılık

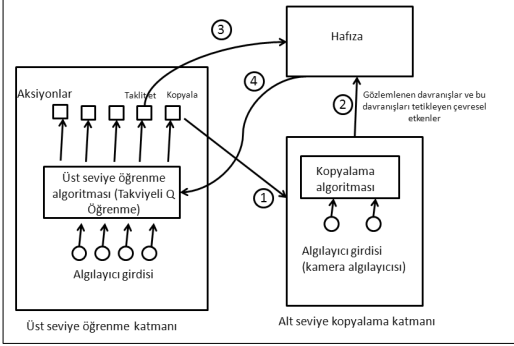
göstermesidir. Taklit ile öğrenme, diğer bireysel öğrenme algoritmalarının aksine, sosyal etkileşimlerden yararlanır. Aynı çevrede ifa edilen davranışları taklit eden bir robot, bulunduğu çevrede anlamlı olan model davranışlara erişim sahibi olur. Ancak, gözlemlenen davranışların hangi durum ve şartlar altında anlamlı olduğu robot tarafından tespit edilmeli ve mümkünse bu davranışlar benzer durum ve şartlar altında çoğaltılmalıdır. Ayrıca robotun bulunduğu çevrede birden fazla bireyin bulunma ihtimali mevcuttur; öyleyse hangi bireyin hangi davranışının taklit edilmesinin en yüksek getiriyi sağlayacağı tespit edilmelidir. Sadece yeni davranışların gözlemlenmesi yeterli değildir. Gözlemlenen davranışların taklitçi tarafından farklı durumlarda ifa edilemesi ve bu sayede taklit edilen davranışların robotun bireysel öğrenme sürecinin bir parçası haline gelmesi gerekmektedir. Bu gözlemler ışığında denilebilir ki, taklit ile öğrenme başlı başına bir öğrenme algoritması olarak kullanılabilmekle birlikte, diğer öğrenme algoritmalarını iyileştiren ve bu algoritmalara model davranışlar sağlayan bir destekleyici yöntem olarak görülebilir.

Şekil 1’de taklit yeteneğini kişisel öğrenme sürecini hızlandırmak amacıyla kullanan bir robotun kontrolör yapısı görülmektedir. Belirtilen kontrolör iki katmandan oluşan melez bir yapıya sahiptir. Alt katmanda davranış odaklı, imitasyon aktivitesini biçimlendiren sistem bulunmakta, üst katmanda ise robotun gerçekleştirmeye çalıştığı görev doğrultusunda eğitilen öğrenen sistem görülmektedir. Robot, üst katmanda kullanılan uyarlanabilir öğrenme algoritmasına göre aksiyonlarını belirlemektedir. Üst katman tarafından etkinleştirilen aksiyonlardan biri "kopyala" aksiyonudur. Bu aksiyon etkinleştildiğinde, alt seviyedeki taklit süreci başlatılmaktadır. Taklit sürecinde robot, etrafında bulunan bir başka robotun davranışlarını gözlemlemekte ve bu davranışları hafızasına kaydetmektedir. Üst katman tarafından etkinleştirilebilen bir başka aksiyon "taklit et" aksiyonudur. Bu aksiyon robotun daha önce gözlemediği ve hafızasına kaydettiği davranışların ifa edilmesini sağlamaktadır. Bu kontrolör tarafından yönetilen robot, taklit sayesinde etrafından model davranışlar elde etmekte, bu davranışları belli durumlarda ifa ederek kişisel öğrenme sürecine yön vermektedir.

Belirtilen şekilde imitasyonu bir destekleyici öğrenme algoritması olarak kullanabilmek için, ayrıca aşağıdaki konularda çözüm üretilmesi gerekmektedir:

- Gözlemlenen davranışların taklitçinin davranışlarına çevrilmesi
- Kopyalama sırasında alınacak bilginin içeriğinin belirlenmesi

İlk konu birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve



Şekil 1. Robotların kontrol sistemi. Öğrenme algoritması çevreden aldığı duyuları belli aksiyonları alma olasılıklarına eşler. Bu aksiyonlardan biri "kopyala" davranışdır. Bu davranış aktif olduğunda (1), robot diğer ajanların davranışlarını gözlemler ve kopyalanan davranışları hafızaya kaydedilir (2). Üst seviye kontrol sisteminin bir başka aksiyonu "Taklit et" davranışdır. Bu davranış aktif olduğunda (3), robotun önceden kopyalamış olduğu davranışlar hafızadan alınır ve üst seviye öğrenme algoritmasına (4) gönderilir.

karşılık gelme problemi [15] ismiyle formüle edilmiştir. Bu problemin tanımına göre, taklit yöntemini bir robotik sistemde kullanabilmek için gözlemlenen davranış kümesini, taklitçi tarafından uygulanabilir aksiyonlar kümesine çeviren prosedürler geliştirilmelidir. Karşılık gelme probleminin çözümü ve bahsedilen prosedürlerin geliştirilmesi, farklı morfolojik yapıya sahip robotlar arasında taklit yapıldığında oldukça karmaşıktır [16]. Birçok araştırmada bu çeviri işlemi, bir seri dönüşüm ile otomatik olarak yapılmaktadır. Bu bildiride tanıtılan çalışmada benzer bir yaklaşım kullanılmıştır.

İkinci konu ise taklitçinin gözlem sırasında elde ettiği bilginin içeriği üzerinedir. Taklit sırasında kopyalanan davranışların tipine göre en az üç farklı kopyalama metodu tanımlayabiliriz [17]:

- *Sadece aksiyonların taklit edilmesi:* Taklitçi robot göstericinin ifa ettiği aksiyonları algılayıcılarını kullanarak kopyalar. Bu taklit metodu ile robotlar arası geçiş gösteren bilgi sadece ifa edilen motor komutlarıdır.
- *Aksiyonlar ile algıların taklit edilmesi:* Taklitçi robot göstericinin ifa ettiği aksiyonlar ile bu aksiyonları tetikleyen çevresel durum ve şartları kopyalar.
- *Hedeflerin taklit edilmesi:* Taklitçi robot göstericinin aksiyonlarının sonuçlarını kopyalar. Bu taklit metodu ile taklitçi robot, aynı sonuçlara ulaşabilmek için tamamiyle farklı aksiyonları ifa edebilir.

Bu çalışmada, daha önce simülasyon üzerinde incelenmiş olan iki farklı taklit metodu [18], sadece aksiyonları taklit etme ve aksiyonlar ile algıları taklit etme, gerçek robotlar üzerinde karşılaştırılmıştır. Yapılan deneylerde, gerçek robotlar üzerinde taklit yapıldığında kopyalanan davranışların bir miktar hata ile kopyalanabildiği ve bu hataların robotların öğrenme hızına etki ettiği gözlemlenmiştir. Özellikle darboğaz durumları içeren çevrelerde, aksiyonlar ile algıları taklit etmenin yüksek katkı sağladığı görülmüştür.

II. ROBOTLAR ÜZERİNDE TAKLİT

Simülasyon üzerinde ajanlar arası taklit üzerine yapılan araştırmalarda gözlemlenen en önemli basitleştirme taklit işleminin içeriği üzerinedir. Bu araştırmalarda ajanlar fiziksel bir yapıya sahip değildir. Bu sebeple aralarındaki etkileşim soyut, mükemmel taklit işlemi üzerinedir. Bu yöntem ile kopyalama süresince bir ajanın ifa ettiği motor komutları taklitçi ajana transfer edilir. Halbuki doğada, yani fiziksel sistemler üzerinde, taklit sırasında kopyalanan davranışlarda varyasyonlar oluşabilir. Bu varyasyonlar sonucunda taklit eden davranışlar değişime uğrayabilir ve yeni davranışlar ortaya çıkabilir [19]. Bu sebeple robotlar arası taklit üzerine yapılan deneylerin gerçek robotlar üzerinde tekrarlanmasında ve sonuçların simülasyonda elde edilen bulgular ile karşılaştırılmasında yüksek yarar mevcuttur.

Bu çalışmada, taklit yeteneğinin robotların öğrenme hızlarına etkisini incelemek amacıyla, önceki bölümde tasvir edilen kontrol sistemi ile yönetilen bir robot topluluğu oluşturulmuştur. Bu amaçla *e-puck* minyatür robotları kullanılmıştır [20]. Kullanılan robotlar 7 cm çapında ve 5 cm yüksekliğindedir. Robotların iki adet adımli motoru, bir CMOS görüntü algılayıcısı, etrafını çevreleyen renkli LED halkası ve kızıl-ötesi mesafe algılayıcıları bulunmaktadır. Robotlara, görüntü işleme sırasında gereken yüksek hafıza ve işlem gücü için, bir Linux artırım kartı eklenmiştir [21]. Sahip oldukları eyleyici ve algılayıcılar ile robotlar, taklit için gerekli donanımına sahiptir. Ayrıca robotların üst kısmına yerleştirilmek üzere renkli bir şapka dizayn edilmiştir (bkz. şekil 2). Belirtilen şapkanın belirgin rengi ve büyüklüğü sayesinde robotların birbirlerini *görmesi* mümkün kılınmıştır.



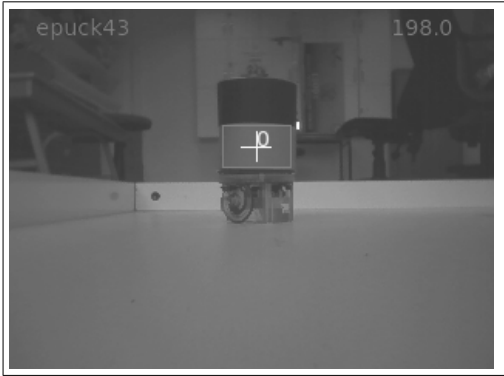
Şekil 2. Renkli başlık ile e-puck robot. Robotların birbirlerini görebilmeleri için geliştirilen renkli başlık robotların üzerine yerleştirilmiştir. Renkli başlığın yan yüzü yeşil renk karton ile kaplanmıştır. Robotlar bu renkli yüzeyin görüntü üzerindeki büyüklüğünden birbirleri aralarındaki mesafeyi ve görece pozisyonlarını hesaplayabilmektedir.

Robotlar arası hareket taklidi amaçlı bir gömülü kopyalama algoritması geliştirilmiştir. Robotlar bu algoritmayı kullanarak çevrelerinde bulunan diğer robotların hareketlerini, sahip oldukları görüntü algılayıcıları kullanarak taklit edebilmiştir. Robotlar arasında görüntü tabanlı kopyalama dışında herhangi bir iletişim yoluna izin verilmemiştir. Bu sebeple kopyalama gömülüdür, yani sadece robotların sahip oldukları görüntü algılayıcısından gelen bilgiye dayanmaktadır.

Kopyalama algoritmasına göre robotlar, her saniye çoklu fotoğraf karesi elde etmekte (bkz: şekil 3) ve her fotoğraf karesi üzerinde işlem yaparak gösterici robotun hareketini tespit etmektedir. Bu işlem sırasında aşağıda belirtilen adımlar uygulanır:

- 1) Taklitçi robot görüntü algılayıcısından çoklu fotoğraf karesi alır.
- 2) Her bir fotoğraf karesinde gösterici robotun üzerine yerleştirilmiş olan renkli başlığın büyüklüğü ve görece uzaklığı hesaplanır. Bu bilgi bir görece pozisyon listesinde saklanır.
- 3) Gösterim tamamlandığında, görece pozisyon listesi işleme alınır ve elde edilen görece pozisyonlar çizgi üzeri hareketler ve bu hareketler arasında dönüşlerden oluşan bir hareket güzergahına çevrilir.
- 4) Önceki aşamada oluşturulan çizgi üzerinde hareketler ve dönüşler, taklitçi robotun ifa edebileceği motor komutlarına çevrilir.

Böylece, önceki bölümde bahsedilen *karşılık gelme problemi* bu çalışmada tanıtılan deneyler için çözülmüş olur.

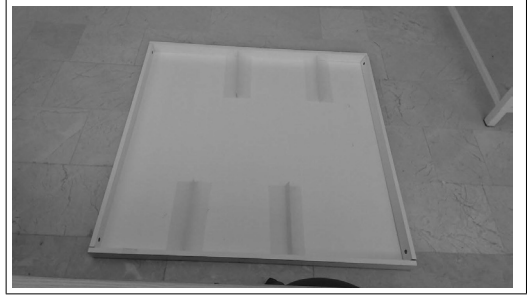


Şekil 3. Robotların görüntü algılayıcılarından elde ettikleri bir fotoğraf karesi örneği. Şekilde görüldüğü üzere taklitçi robot gösterici robotun renkli başlığının pozisyonunu tespit etmiş ve başlığın etrafını kırmızı ile işaretlemiştir.

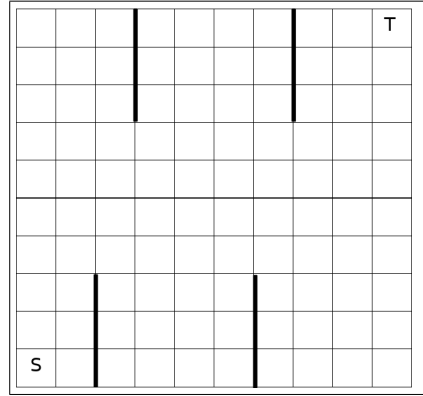
III. FARKLI TAKLİT METOTLARININ OLUŞTURULMASI

Farklı taklit metotlarını karşılaştırabilmek için, önceki bölümde tasvir edilen kontrol sistemi ile yönetilen ve bir arama görevini başarmaya çalışan bir robot grubu oluşturulmuştur. Robotlar üst seviye öğrenme algoritması olarak *Pekiştirmeli Q Öğrenme algoritmasını* kullanmıştır [22]. Bu algoritma deneme-yanılma tabanlı yapısı ve aralıklı aksiyon kümelerinin denenmesine imkan vermesi sebebiyle seçilmiştir. Robotlar

belirtilen algoritmayı kullanarak deney arenasında bulunan bir hedef noktaya en kısa yolu keşfetmeye çalışmaktadır. Robotların hareket ettikleri arena şekil 4'de gösterilmiştir. Deneyler 120 cm × 120 cm büyüklüğünde bir robot arenasını üzerinde yapılmıştır. Arena, kenar uzunluğu 12 cm olan 10 × 10 hücreye ayrılmıştır (bkz: şekil 5). Robotlar her birim zamanda bulundukları hücrenin komşusu olan 8 hücreden birine hareket edebilmektedir. Ayrıca arena üzerinde robotların hareketini fiziksel olarak kısıtlayan, 3 cm yüksekliğe sahip rastgele yerleştirilmiş 4 engel bulunmaktadır. Bu engeller robotların hareketlerini kısıtlamakla birlikte, robotların sahip oldukları görüntü algılayıcıları ile arenanın herhangi bir pozisyonunda bulunan başka bir robotun renkli şapkasını görüntülemesine mani olmamaktadır.



Şekil 4. Gerçek robotlar üzerinde tecrübeli robotu kopyalama deneylerinin gerçekleştirildiği robot arenası. Robotlar sol alt köşeden başlamış ve sağ alt köşede bulunan hedef noktasına ulaşmaya çalışmıştır.



Şekil 5. Şekil 4'de gösterilen robot arenası belirtildiği üzere 10 x 10 hücreye ayrılmıştır. Robotlar her zaman biriminde bulundukları hücrenin komşusu olan hücrelerden birine hareket etmiştir.

Sistemin durum uzayı robotların arena üzerinde bulundukları pozisyon olarak tanımlanmıştır. Pekiştirmeli Q öğrenme algoritması, robotun bulunduğu pozisyonu girdi olarak almakta ve robotun bulunduğu pozisyonunda ifa edilmesi mümkün olan aksiyonlardan birini gerçekleştirilmek üzere seçmektedir. Buna göre robotlar, pekiştirmeli Q öğrenme algoritması ve ϵ -ağzölü bir yaklaşımla aksiyon seçimini şu şekilde yaparlar:

- Herhangi bir zaman biriminde $1 - \epsilon$ olasılıkla bulunduğları pozisyonda en yüksek Q değerine sahip aksiyonu seçerler.
- ϵ olasılıkla ise, bulunduğları pozisyonda ifa edilmesi mümkün olan aksiyonlardan rastgele birini seçerler.

Robotlar, ifa edecekleri aksiyonu seçtikten sonra, bulunduğları pozisyon ve seçilen aksiyon çifti için Q değerini şu şekilde hesaplar:

$$Q(s_t, a_c) = Q(s_t, a_c) + \alpha[r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_c)] \quad (1)$$

Formülde s_t bulunulan pozisyonu, s_{t+1} ifa edilecek aksiyon sonrası geçilecek bir sonraki pozisyonu, a_c seçilen aksiyonu, r bu aksiyon sonrası elde edilecek ödülü, α öğrenme oranını, ve son olarak γ indirim oranını temsil etmektedir. Ulaşıldığında ödül kazanılan tek pozisyon, arenanın sağ üst köşesinde bulunan hedef noktasıdır. Yukarıda belirtilen ϵ -açgözlü yaklaşım ile pekiştirmeli Q öğrenme algoritması, yeni keşif ile elde edilen tecrübelerden yararlanma arasında bir denge oluşturmaktadır. Her zaman biriminde robotlar, dikey/yatay geçişlerde 12 cm, çapraz geçişlerde ise yaklaşık 17 cm yol olarak komşu bir hücreye fiziksel olarak hareket etmektedir. Bir deney koşusu 100.000 zaman birimi süre almakta ve bu süre zarfında her pozisyon-aksiyon çiftinin Q değeri final değerlerine ulaşmaktadır. Deney süresince robotlar, sol alt köşede bulunan başlangıç pozisyonundan başlayarak, hedef noktasına ulaşmaya çalışmaktadır. Hedef noktasına ulaşan robot başlangıç noktasına dönmekte ve tekrar hedefe doğru hareket etmektedir. Her 100 zaman biriminde robotların sahip olduğu Q değerleri üzerinde açgözlü aksiyon seçimi uygulanarak, robotun hedef noktasına doğru elde ettiği en kısa yol tespit edilmektedir. Taklit yapmayan, sadece pekiştirmeli Q öğrenme ile öğrenen robot bu şekilde hareket etmekte ve bu robotun öğrenme performansı taklitçi robotlar ile karşılaştırılmaktadır.

Taklitçi robotlar şekil 1'de görülen iki katmanlı kontrol sistemi ile yönetilmektedir. Bu robotlar diğer robotların hareketlerini gözlemleyebilmekte ve gözledikleri davranışları ifa edebilmektedir. İlk bölümde bahsedilen iki farklı taklit metodu şu şekilde oluşturulmuştur:

A. Sadece Aksiyonları Taklit

Sadece davranışları taklit eden robotlar, etraflarındaki robotların sergiledikleri hareketleri gözlemleyebilmektedir. Bu metodu kullanan robotlar, her birim zamanda aşağıda açıklanan üç halden birinde bulunurlar:

- *Hareket hali:* Robot yukarıda açıklandığı şekilde ϵ -açgözlü Q öğrenme algoritmasına göre hareket eder.
- *Gözlem hali:* Robot hareket halindeyken, % 0.01 olasılıkla gözlem haline geçer ve 5 birim zaman süresince bulunduğu pozisyonda kalır. Bu süre zarfında robot, etrafında bulunan bir robotu seçer ve bu robotun gerçekleştirdiği aksiyonları gömülü kopyalama algoritmasını kullanarak kopyalar. Bu süre zarfının sonunda robot, yeni gözlemlendiği aksiyon listesini hafızasına kayıt eder ve tekrar hareket haline

geçer. Gözleme aşamasında robotlar hareketsiz kaldığı için kopyalamanın bedeli vardır.

- *Taklit hali:* Robot hareket halindeyken, p_{taklit} olasılıkla taklit haline geçer ve daha önce kayıt ettiği aksiyon listelerinden birini seçerek seçilen listedeki aksiyonları birer birer uygular. Uygulanan aksiyonlara ve değişen durumlara bağlı olarak ziyaret edilen durum aksiyon çiftlerine ait Q değerleri yeniden hesaplanır. Seçilen listedeki aksiyonlar robotun sahip olduğu Q değerleri ile çelişiyorsa; yani robotun bulunduğu durumda daha yüksek Q değerine sahip bir aksiyon var ise, veya robot aksiyonu engeller nedeniyle gerçekleştiriyorsa, robot seçili listeyi uygulamayı bırakır ve hareket haline geri dönerken ϵ -açgözlü algoritmaya göre hareketini belirler.

Robotlar taklit haline geçtiklerinde daha önce kopyalamış oldukları listedeki aksiyonları, bu aksiyonların robotun sahip olduğu Q değerleriyle çelişmesi durumunu kontrol ederek, uygulamaktadır. Robotun bulunduğu pozisyonda daha yüksek Q değerine sahip bir aksiyona sahip olması durumunda, seçilen aksiyon listesi reddedilmekte ve robot hareket haline geri dönmektedir. Bu nedenle taklit etme, robotun bulunduğu durumda tecrübe sahibi olmaması ve buna bağlı olarak bulunduğu durumda yüksek Q değerine sahip bir aksiyona sahip olmaması durumunda robota tavsiye edilbilmektedir. Bu durum ancak durum-aksiyon uzayının henüz robot tarafından keşfedilmemiş kısımlarında mümkündür. Robot, kopyalama sayesinde elde edilen aksiyon listelerini uyguladığında, uygulanan aksiyonlar robotun bireysel öğrenme aktivitesinin parçası haline gelmektedir.

Taklit haline geçme olasılığı, p_{taklit} , Q değer testi [19] ile uyarlanabilir şekilde hesaplanır. Bu yöntem her taklit aktivitesini bir bölüm olarak ele alır ve taklitçi robotun Q değerlerinin zaman içerisindeki değişimini kontrol eder. Taklitçi robotun Q değerlerinde artış gözlenmesi durumunda, robotun gözlemlenen davranışları taklit ederek hedef noktasına yaklaştığı belirlenir. Bu durumda taklit edilen davranışın gelecekte tekrar taklit edilme olasılığı artış gösterir. Herhangi bir artış olmaması durumunda ise robotun taklit sonucu durum-aksiyon uzayının hedeften uzak noktalarına yönlendiği belirlenir. Bu durumda taklit edilen davranışın tekrar edilme ihtimali düşer. Bu şekilde $p_{imlitate}$ değeri robotun elde ettiği algılar sonucu uyarlanabilir şekilde hesaplanır.

Yukarıda açıklanan yöntemle göre, her kopyalanan aksiyon listesi i için, Q değerinde artış olma oranı, R_i şu şekilde hesaplanır:

$$n_{Q+}^i = \text{Aksiyon listesi } i\text{'nin taklit edildiğinde } Q \text{ değerinde artış olan bölüm sayısı}$$

$$n_{taklit}^i = \text{Aksiyon listesi } i\text{'nin taklit edildiği bölüm sayısı}$$

$$R_i = \frac{n_{Q+}^i + 1}{n_{taklit}^i + 1} \quad (2)$$

Kopyalanan her aksiyon listesi için R_i değerleri hesaplanır. Bu değerler taklit haline geçiş ihtimalinin hesaplanmasında ve taklit edilecek aksiyon listesinin seçiminde kullanılır. Buna göre, robot hafızasında n farklı aksiyon listesine sahipse, i sayılı aksiyon listesinin seçilme ihtimali şu şekilde hesaplanır:

$$P_{secim}^i = \frac{R_i}{\sum_{k=1}^n R_k} \quad (3)$$

Son olarak, i numaralı aksiyon listesi seçildiğinde bu aksiyon listesinin taklit edilme olasılığı şu şekilde hesaplanır:

$$P_{taklit}^i = \beta R_i \quad (4)$$

Formüldeki β değeri başlangıçtaki taklit olasılığını belirler. Robotlar toplam 10 tane aksiyon listesini hafızalarında saklayabilmektedir. Hafızaları dolduğu durumda eğer yeni bir aksiyon listesi kopyalanır ise, hafızada bulunan aksiyon listeleri arasında en düşük R_i değerine sahip olan silinir ve onun yerine yeni aksiyon listesi kaydedilir.

B. Aksiyonlar ile Algıları Taklit

Önceki bölümde anlatıldığı üzere, davranışlar ile birlikte algıları taklit eden robotlar gösterilen aksiyonlar ile birlikte bu aksiyonların hangi çevresel durum ve şartlar altında sergilendiğini gözlemlemektedir. Bu amaç ile robotlar, gözlemlenen her aksiyon listesi için, aksiyon listesinin başlangıç noktasını kaydeder. Her aksiyon için başlangıç noktası, aksiyon listesindeki ilk aksiyon uygulanırken gösterici robotun bulunduğu pozisyon olarak tanımlanmıştır. Göstericinin bulunduğu pozisyon ve bu pozisyonu çevreleyen sekiz komşu hücre, aksiyon listesinin ilgi alanı olarak belirlenir. Bu bilgi doğrultusunda (3) numaralı formül aşağıdaki şekilde güncellenir:

Taklitçi aksiyon listesi i'nin ilgi alanında ise

$$P_{secim}^i = \frac{R_i}{\sum_{k=1}^n R_k} \quad (5)$$

aksi takdirde

$$P_{secim}^i = 0 \quad (6)$$

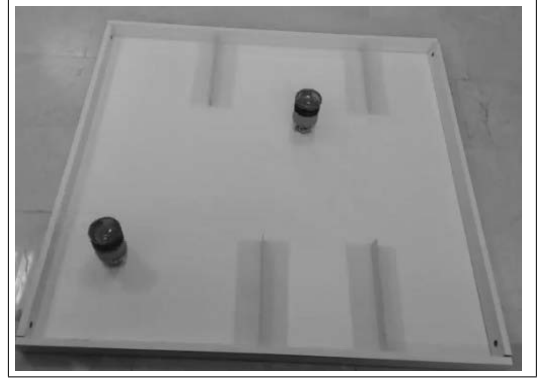
Böylece, robot taklit haline geçtiğinde, sadece kendi bulunduğu pozisyonun çevresinde sergilenmiş olan aksiyon listelerini uygulamaktadır. Deney alanının başka bölgelerinde sergilenmiş olan aksiyon listelerini görmezden gelir. Bu güncelleme dışında davranışlar ile algıları taklit eden robotun kontrol sistemi ile sadece davranışları taklit eden robotun kontrol sistemi aynıdır.

IV. GERÇEK ROBOTLAR ÜZERİNDE TAKLİT DENEYLERİ

İlk deneyler şekil 4'de gösterilen robot arenasını üzerinde gerçekleştirilmiştir (bkz şekil 6). Her deney koşusu öncesi 4 adet engel rastgele belirlenmiş noktalara şekilde görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Daha önce belirtildiği üzere her robot arena üzerinde 100.000 zaman birimi süresince hareket etmektedir. Öncelikle kopyalama yapmayan bir robot 90.000 aksiyon süresi boyunca arena üzerinde eğitilmiştir. 90.000. adımda bir tane sadece davranışları taklit eden bir tane ise davranışlar ile birlikte algıları taklit eden robot arenaya yerleştirilmiştir. Taklit eden robotlar gözlem haline geçtiklerinde kopyalama yapmayan robotun hareketlerini kopyalamışlardır. Davranışlar ile birlikte algıları taklit eden robot, gerçekleştirilen aksiyonlar ile birlikte bu aksiyonların arenanın hangi bölgesinde

gerçekleştirildiği, aksiyon sonrası engellere uzaklaşma veya yaklaşma gibi durumları kayıt etmekte ve gözlemlenen davranışları benzer çevresel durumlarda denemektedir.

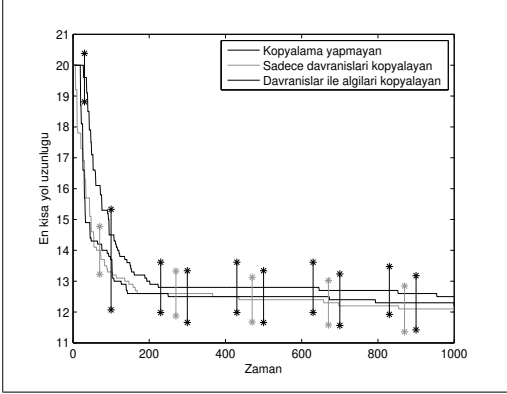
Her bir deney koşusu için şekil 5'de görüldüğü gibi, aynı özelliklere sahip deney arenasını simülasyonda oluşturulmuştur. Robotların bir hücreden diğerine deterministik olarak geçişleri simülasyon üzerinde gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir robotun gözlem haline geçmesi durumunda, gösterici robot ve taklitçi robot, robot arenasına yerleştirilmiş, kopyalama işlemi gerçek robotlar üzerinde yapılmış ve hesaplanan aksiyon listeleri ilgili simülasyona yüklenmiştir. Bu sayede hem robotlar arası her türlü etkileşimin gerçek robotlar üzerinde gömülü kopyalama ile yapılması mümkün olmuş hem de deneylerin kabul edilebilir sürelerde tamamlanması sağlanmıştır.



Şekil 6. Öğrenme deneyleri esnasında arena üzerinde robotlar.

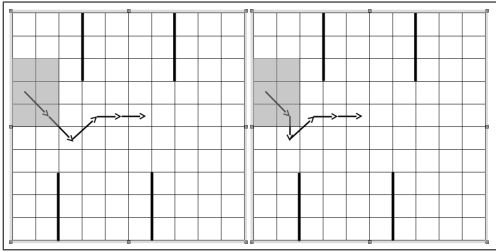
Şekil 7'da bu deneye ait sonuçlar görülmektedir. Belirtilen özellikler içeren robot arenasında taklit eden robotlar, kopyalama yapmayan robota göre daha hızlı öğrenebilmişlerdir. Her iki taklitçi robot ile kopyalama yapmayan robot karşılaştırıldığında, taklitçi robotların istatistiksel öneme sahip farkla daha hızlı öğrendiği görülmektedir. Taklitçi robotlar, kopyaladıkları aksiyon listelerinin hangilerinin yararlı olduğunu Q değeri testi ile tespit edebilmekte ve bu sayede öğrenme hızlarını artırmaktadırlar. İki taklit metodu karşılaştırıldığında, sadece aksiyonları taklit eden robot ile aksiyonlar ile algıları taklit eden robotun benzer performansa sahip olduğu görülmektedir. Aksiyonlar ile algıları taklit eden robotun sadece aksiyonları taklit eden robota göre başlangıçta bir miktar hızlı öğrendiği, ancak iki taklit metodu arasında öğrenme hızı açısından istatistiksel öneme sahip bir fark olmadığı tespit edilmiştir.

Yukarıda belirtildiği üzere robotlar arası taklit yoluyla gerçekleşen etkileşimler gerçek robotlar üzerinde bulunan algılayıcılar kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sırasında algılayıcı kaynaklı kopyalama hataları gözlemlenmiştir. Tüm deney koşulları incelendiğinde taklit edilen aksiyonların %81,6 oranında doğru kopyalandığı, %18,4 oranında ise yanlış kopyalandığı hesaplanmıştır (standart sapma %4,4). Kopyalama hatalarının büyük çoğunluğunun dönüş açıları hesaplanması sırasında oluşan hata miktarı nedeniyle ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple, örneğin, güney yönünde gerçekleşmiş bir



Şekil 7. Gerçek robotlar üzerinde tecrübeli bir robotu kopyalama deneyleri. Sonuçlar 10 deney koşulunun ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Belli noktalarda % 95 güvenilirlik aralığı gösterilmiştir. Başarılan en kısa yol her 100 birim zamanda sahip olunan Q değerleri incelenerek hesaplanmıştır. Deney sırasında kullanılan parametrelerin değerleri şu şekildedir: $\epsilon = 0.1, \beta = 0.5, \alpha = 0.2, \gamma = 0.2$. Şekilde zaman 100 zaman biriminde gösterilmiştir.

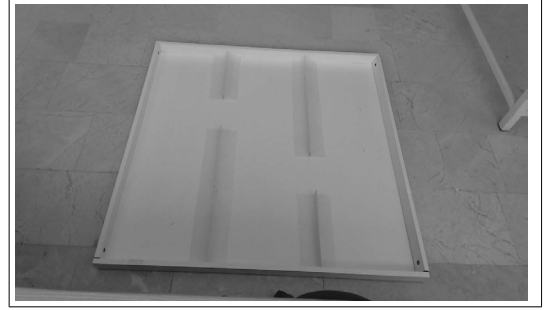
hareket, güneydoğu veya güneybatı yönünde olarak kopyalanmıştır. Bu kopyalama hataları nedeniyle robotların elde ettikleri aksiyon listeleri farklılaşmakta ve çeşitlilik kazanmaktadır. Robotlar tarafında kopyalanan ve en çok sayıda sergilenen aksiyon listeleri incelendiğinde, bu aksiyon listelerinin bazı hatalar içerdiği görülmüştür. Örneğin şekil 8'de bir deney koşusu sırasında gösterici robot tarafından sergilenmiş bir aksiyon listesi ile bu aksiyon listesinin taklitçi robot tarafından oluşturulmuş bir kopyası görülmektedir. Bu aksiyon listesi sadece davranışları kopyalayan robot tarafından en yüksek sayıda sergilenmiş ve robotun öğrenme hızını artırmıştır. Sergilenen aksiyon listesi ile kopyasının karşılaştırılması durumunda, 1. 3., 4. ve 5. aksiyonların doğru kopyalandığı, 2. aksiyonun ise hatalı kopyalandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Robotlar tarafından sergilenmiş bir aksiyon listesi ve bu aksiyon listesinin kopyası. Sergilenen aksiyon listesi, sırasıyla, güneydoğu yönünde 2 hareket, kuzeydoğu yönünde bir hareket ve doğu yönünde iki hareketten oluşmaktadır. Aksiyon listesinin kopyası ise, sırasıyla, güneydoğu yönünde hareket, güney yönünde hareket, kuzeydoğu yönünde bir hareket ve doğu yönünde iki hareketten oluşmaktadır.

Yapılan deneylerde görüldüğü üzere, davranışlarla birlikte algıları taklit eden robot, kopyaladığı aksiyonları benzer durumlarda denemektedir. Bu gözlemin ışığında, şu öngöründe bulunulabilir: robotların hareket ettikleri çevre farklı özel-

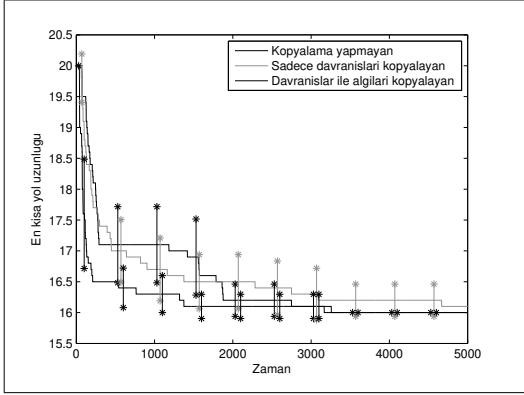
liklere sahip bölgelerden oluşur ise, aksiyonlar ile birlikte algıları taklit sonucu elde edilecek fayda artabilir. Bu öngörüü test edebilme amacıyla yapılan ikinci deney seti, şekil 9'de görülen robot arenasında gerçekleştirilmiştir. Görüleceği üzere yeni oluşturulan arenanın üzerinde iki adet darboğaz noktası bulunmaktadır. Belirtilen dar boğazlar deney alanını üç farklı özellikte bölgeye ayırmaktadır ve robotlar farklı bölgeler arasında geçiş yapabilmek için bu darboğaz noktalarına uğramalıdır. Bu üç bölge farklı özellikler taşımaktadır; çünkü hedefe yönelebilmek için birinci ve üçüncü bölgelerde uygulanması gereken aksiyonlar ile ikinci bölgede sergilenmesi gereken aksiyonlar farklılık göstermektedir. Bu arena üzerinde robotlar 500.000 zaman birimi süresince eğitilmiştir. Öncelikle kopyalama yapmayan bir robot 490.000 aksiyon süresi boyunca eğitilmiş ve 490.000. adımda bir tane sadece davranışları taklit eden, bir tane ise davranışları ile birlikte algıları taklit eden robot arenaya yerleştirilmiştir. Taklit eden robotlar gözlem haline geçtiklerinde kopyalama yapmayan robotun hareketlerini kopyalamışlardır. Gözlem halindeki kopyalama ve her türlü robotlar arası etkileşim gerçek robotlar üzerinde yapılmış ve böylece gömülü kopyalama sırasında ortaya çıkan davranış çeşitlilikleri incelenmiştir.



Şekil 9. Gerçek robotlar üzerinde darboğazlı arena da tecrübeli robotu kopyalama deneylerinin gerçekleştirildiği robot arenası.

Şekil 10'de ikinci deney setine ait sonuçlar görülmektedir. Bu deneylerde aksiyonlar ile algıları taklit eden robot, sadece aksiyonları taklit eden robot ile kopyalama yapmayan robota göre yüksek öğrenme hızına sahip olmuştur. Yukarıda bahsedilen öngörüye uygun olarak, farklı bölgelerde farklı aksiyonların anlamlı olduğu bir robot arenası oluşturulmuştur. Böyle bir ortamda, aksiyonlar ile onları tetikleyen çevresel durum ve şartların taklit edilmesi robotların öğrenme hızını fazlasıyla artırmaktadır. Önceki deney senaryosunda olduğu gibi, robotların algılayıcı kaynaklı bir miktar hata yapılmaktadır; ancak bu hatalar ile ortaya çıkan davranışları, davranışların ifa edildiği bölgelerde deneyen robot, daha hızlı öğrenebilmiştir. Öte yandan, sadece davranışları taklit eden robot için taklit ile öğrenme aktivitesi büyük oranda sekteye uğramıştır. Bir bölgede anlamlı ve yararlı olan aksiyon, diğer bölgede yararsızdır; bunun ayırıcılığına varamayan taklitçi robot, ancak taklit yapmayan robot kadar hızlı öğrenebilmiştir. Bu bulgular ışığında şu tespiti yapabiliriz: darboğazlar ve buna bağlı olarak farklı özellikte bölgeler içeren çevrelerde taklit edilen aksiyonların yanı sıra bu aksiyonların ifa edildiği çevresel faktörlerin kopyalanması, taklit yöntemi ile öğrenme hızını geliştirmek için önem arz etmektedir. Sadece aksiyonları taklit

ederek bu tür çevrelerde taklit yeteneğinden yüksek oranda yarar sağlamak mümkün değildir.

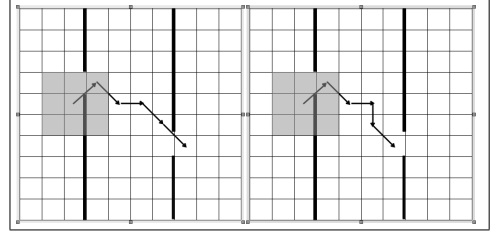


Şekil 10. Gerçek robotlar üzerinde darboğaz içeren arenada tecrübeli bir robotu kopyalama deneyleri. Sonuçlar 10 deney koşusunun ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Belli noktalarda % 95 güvenlilik aralığı gösterilmiştir. Başarılan en kısa yol her 100 birim zamanda sahip olunan Q değerleri incelenerek hesaplanmıştır. Deney sırasında kullanılan parametrelerin değerleri şu şekildedir: $\epsilon = 0.1$, $\beta = 0.5$, $\alpha = 0.2$, $\gamma = 0.2$. Şekilde zaman 100 zaman biriminde gösterilmiştir.

Bu deneye ait deney koşulları incelendiğinde kopyalanan aksiyonların %74,2 oranında doğru kopyalandığı, %25,8 oranında ise kopyalama hatası yapıldığı görülmüştür (standart sapma %8,5). Önceki deney seti ile karşılaştırıldığında hata oranının bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. Bunun önemli bir nedeni, darboğaz içeren arenada bölge özelliğine göre farklı ve belli yönlere sahip aksiyonlardan oluşan davranışların kopyalanmasıdır. Sonuç olarak kopyalama hataları bir miktar artmıştır. Bununla birlikte önceki deneylerde olduğu gibi, bu deneylerde de çok sayıda taklit edilen aksiyon listelerinin bazılarının kopyalama hataları içermekte olduğu görülmüştür. Şekil 11'da bir deney koşusu sırasında gösterici robot tarafından sergilenmiş bir aksiyon listesi ile bu aksiyon listesinin taklitçi robot tarafından oluşturulmuş bir kopyası görülmektedir. Bu aksiyon listesi davranışlar ile birlikte algıları taklit eden robot tarafından en yüksek sayıda sergilenmiş ve robotun öğrenme hızını artırmıştır. Görüleceği üzere, kopyalanan aksiyon listesi, bir miktar hatalı kopyalanmakla birlikte, robotun bulunduğu bölgede darboğaza yönelmesine ve bir sonraki bölgeye geçmesine olanak vermektedir.

Daha önce belirtildiği üzere, başka bir çalışmada [18] benzer deneyler simülasyon üzerinde yapılmıştır. Simülasyon ile gerçek robotlar üzerinde yapılan deneyler arasındaki en önemli fark, robotlar üzerinde gerçekleştirilen gömülü kopyalama sonucunda kopyalanan davranışlarda oluşan varyasyonlardır. Oluşan varyasyonların taklitçi robotların öğrenme hızlarına etkisini tespit etmek amacıyla simülasyon sonuçları ile gerçek robotlar üzerinde yapılan deneylerin sonuçları karşılaştırılmış ve aşağıda listelenen bulgular elde edilmiştir:

- İlk deney seti olan rastgele engeller yerleştirilmiş arenada tecrübeli robotu kopyalama deneylerinde simülasyon ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Her iki taklitçi robot, kopyalama yapmayan robota göre



Şekil 11. Robotlar tarafından sergilenmiş bir aksiyon listesi ve bu aksiyon listesinin kopyası. Sergilenen aksiyon listesi, sırasıyla, kuzeydoğu yönünde hareket, güneydoğu yönünde bir hareket, doğu yönünde hareket ve güneydoğu yönünde iki hareketten oluşmaktadır. Aksiyon listesinin kopyası ise, sırasıyla, kuzeydoğu yönünde hareket, güneydoğu yönünde hareket, doğu yönünde hareket, güney yönünde hareket ve güneydoğu yönünde hareketten oluşmaktadır.

daha yüksek hızda öğrenebilmiştir. İki taklit metodu karşılaştırıldığında, aksiyonlar ile birlikte algıları taklit eden robotun sadece aksiyonları taklit eden robota göre başlangıçta bir miktar hızlı öğrendiği, ancak iki taklit metodu arasında öğrenme hızı açısından istatistiksel öneme sahip bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, simülasyon üzerinde elde edilen sonuçlar ile yüksek benzerlik göstermektedir. Gömülü kopyalama kaynaklı kopyalama hataları oluşmakta ancak oluşan hatalar taklitçi robotların öğrenme hızına fazla etki etmemektedir.

- İkinci deney setinde, simülasyonda olduğu gibi, aksiyonlar ile birlikte algıları taklit eden robot, kopyalama yapmayan ve sadece davranışları kopyalayan robotlara göre daha hızlı öğrenebilmiştir. Sadece davranışları taklit eden robotun, önceki deney seti ile karşılaştırıldığında, darboğaz içeren arenada performans kaybı oldukça yüksek olmuştur. Darboğazlar ile farklı özelliklerde bölgelere ayrılan arenada kopyalanan davranışların benzer durum ve şartlarda taklit edilmesi önem kazanmıştır. Ayrıca, gömülü kopyalama sonucu ortaya çıkan varyasyonlar taklit edilen davranışların yapısını bir miktar değiştirmiş ve bu davranışların birçoğu farklı bölgelerde denendiğinde robotun performansını artırıcı etki göstermemiştir. Sonuç olarak aksiyonlar ile algıları taklit eden robot ile sadece aksiyonları taklit eden robot arasındaki fark, simülasyona göre bir miktar artış göstermiştir.

V. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada bir çoklu robot grubu üzerinde taklit ile öğrenmenin farklı özellikleri incelenmiştir. Öncelikle, taklit ile öğrenmenin diğer uyarlanabilir öğrenme algoritmaları ile birlikte kullanılabileceği olarak sağlayan bir kontrol mimarisi tanımlanmıştır. Daha sonra, tanımlanan kontrol mimarisi ile yönetilen robotlar üzerinde iki farklı taklit metodu karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan bu iki taklit metodu, sadece davranışları taklit etme ile davranışlar ile algılar taklit etmedir. Yapılan deneylerde, başarıya götüren aksiyonların çevresel faktörlerin ışığında şekillendiği çevrelerde aksiyonlar ile algıları taklit etmenin yüksek yarar sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca, gömülü kopyalama esnasında taklit edilen davranışlarda al-

gılayıcı kaynaklı bir miktar hata gözleendiği ve bu hataların sonucu olarak taklit edilen davranışlarda varyasyonların oluştuğu gözlemlenmiştir. Özellikle çevresel faktörlerin etkisinin fazla olduğu çevrelerde, varyasyonlar içeren davranışların, bu davranışların gözlemlendiği çevresel durum ve şartlarda taklit edilmesi robotların öğrenme hızına katkı vermektedir.

Bu çalışmada tanıtılan mimari ile yönetilen robotlar pekiştirmeli Q öğrenme algoritması kullanmıştır. İlgili mimari, genetik algoritmalar veya güdümlü öğrenme gibi başka uyarlanabilir öğrenme algoritmaları ile test edilebilir. Böylece taklit ile öğrenmenin farklı öğrenme algoritmalarına etkisi ölçülebilir. Ayrıca deneylerde robotlar basit bir yön bulma problemi ni çözmüştür. Bu problem, robotlar arası herhangi bir etkileşime gerek duymadan çözülebilmektedir. Robotlar arası etkileşim gerektiren, daha karmaşık bir görev üstelenen robotlar üzerinde yapılan araştırmanın tekrar edilmesi, aksiyonlar ile algıları kopyalamanın robotların öğrenme hızına birer öğrenen robot kullanılmıştır. Farklı taklit metodlarının birçok robottan oluşan gruplar üzerinde incelenmesi, taklit ile öğrenmenin robotların kolektif öğrenme hızına etkisinin incelenmesine ve gömülü kopyalama sonucu oluşan varyasyonların etkisiyle şekillenen davranışların değişiminin belirlenmesine olanak sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir, proje numarası: 113E588.

KAYNAKÇA

- [1] T. R. Zentall, Imitation in Animals: Evidence, Function, and Mechanisms, in *Cybernetics and Systems*, vol. 32, pp. 63-96, 2001.
- [2] T. R. Zentall, Social learning mechanisms: Implications for a cognitive theory of imitation, in *Interaction Studies*, vol. 12, pp. 233-261, 2011.
- [3] A. N. Meltzoff, The human infant as homo imitans. In Zentall, T. R. and Galef, B. G. J., editors, *Social Learning: Psychological and biological perspective*, pp. 319-341, Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1988.
- [4] M. Tomasello, A. C. Kruger, and H. H. Ratner, Cultural Learning, in *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 16(3), pp. 495-552, 1993.
- [5] M. Tomasello, Cultural Learning Redux, *Child Development*, vol. 87, pp. 643-653, 2016.
- [6] K. Dautenhahn, C.L. Nehaniv (Eds.), *Imitation in Animals and Artifacts*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2002.
- [7] P. Gaussier, S. Moga, J. P. Banquet, and M. Quoy, From Perception-Action Loop to Imitation Process: A Bottom-Up Approach of Learning by Imitation, *Applied Artificial Intelligence*, vol. 7(1), pp. 701-729, 1998.
- [8] R. Dillmann, Teaching and Learning of Robot Tasks via Observation of Human Performances, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, vol. 47(2-3), pp. 109-116, 2004.
- [9] M. Niclescu, and M. J. Mataric, Task Learning through Imitation and Human-Robot Interaction, in C. L. Nehaniv and K. Dautenhahn, editors, *Imitation and Social Learning in Robots, Humans and Animals*, pp. 407-424, Cambridge University Press, 2007.
- [10] S. Calinon, and A. Billard, Incremental Learning of Gestures by Imitation in a humanoid robot, in *Proceedings of ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 255-262, 2007.
- [11] J. Kober, and J. Peters, Imitation and Reinforcement Learning, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 17 (2), pp. 55-62, 2010.
- [12] P. Kormushev, S. Calinon, and D. G. Caldwell, Imitation Learning of Positional and Force Skills Demonstrated via Kinesthetic Teaching and Haptic Input, *Advanced Robotics*, vol. 25 (5), pp. 581-633, Taylor & Francis, 2011.
- [13] K. Lee., Y. Su., T. K. Kim., and D. Yiannis, A syntactic approach to robot imitation learning using probabilistic activity grammars, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61 (12), pp. 1323-1334, 2013.
- [14] B. D. Argall, S. Chernova, M. Veloso, and B. Browning, A Survey of Robot Learning From Demonstration, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 57, pp. 469-483, 2009.
- [15] C. L. Nehaniv, and K. Dautenhahn, The Correspondence Problem, In Nehaniv, C. L. and Dautenhahn, K., editors, *Imitation and Social Learning in Robots, Humans and Animals*, pages: 35-46. Cambridge University Press, 2007.
- [16] A. Alissandrakis, C. L. Nehaniv, K. Dautenhahn, Towards Robot Cultures? Learning to Imitate in a Robotic Arm Test-Bed with Dissimilar Embodied Agents, *Interaction Studies: Social Behaviour and Communication in Biological and Artificial Systems*, vol. 5 (1), pp. 3-44, 2004.
- [17] A. F. T. Winfield, and M. D. Erbas, On Embodied Memetic Evolution and the Emergence of Behavioural Traditions, *Memetic Computing*, vol. 3(4), pp. 261-270, 2011.
- [18] M. D. Erbas, On the Mechanisms of Imitation in Multi-Agent Systems, *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, pp. 1-8, 2016.
- [19] M. D. Erbas, A. F. T. Winfield, and L. Bull, Embodied Imitation-enhanced Reinforcement Learning in Multi-agent Systems, *Adaptive Behavior*, vol. 22(1), pp. 31-50, Sage publications, 2014.
- [20] F. Mondada, M. Bonani, X. Raemy, J. Pugh, C. Cianci, A. Klaptocz, S. Magnenat, J. C. Zufferey, D. Floreano, and A. Martinoli, The e-puck, a robot designed for education in engineering, 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, 9th Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, 59:65, 2009.
- [21] W. Liu, and A. F. T. Winfield, Open-hardware e-puck Linux extension board for experimental swarm robotics research, *Microprocessors and Microsystems*, 35:1,2011.
- [22] A. Barto, and R. S. Sutton, *Reinforcement Learning: An Introduction*, MIT Press, 1998.

Günlük Hayat Aktivitelerine Uygun 4 Serbestlikli Bir Üst Uzuv Dış İskeleti için Tork Gereksinimi

Sinan Coruk, Barkan Uğurlu

Makina Mühendisliği Bölümü

Özyeğin Üniversitesi

İstanbul, Türkiye

Email: (sinan.coruk@ozu.edu.tr; barkan.ugurlu@ozyegin.edu.tr)

Özet—Bu makale, çeşitli Günlük Yaşam Aktiviteleri'nin (GYA), robot destekli rehabilitasyon çalışmalarında potansiyel olarak kullanılabilir tork kontrollü bir üst uzuv dış iskelet prototipi üzerinde uygulanabilme gerekliliklerini incelemektedir. Robot yapısı, 3'ü yüksek güç-ağırlık oranına ve gerçek zamanlı tork kontrol kabiliyetine sahip özel seri elastik eyleyicilerle çalışan 4 serbestlik derecesinden oluşmaktadır. Prizmatik bir eklem olan dördüncü eklem, sistemin GYA görevleri için daha uygun bir çalışma alanına ulaşmasını sağlamak için glenohumeral kafa yükselmesine uyum sağlamak için eklenmiştir. İnsan kolunun sahip olduğu serbestlikler ve kısıtlamalar göz önüne alınarak, GYA'nın yürütülmesi için birkaç optimal yörünge üretilmiştir. Sonuç olarak, robot destekli rehabilitasyon alanında kullanılabilir bir üst uzuv dış iskelet sisteminin yetkinliği, bu sistem için oluşturulan çeşitli GYA ile benzetim ortamında test edilmiştir.

I. GİRİŞ

Günümüzde insan kolunu etkileyen kas ve sinirsel sakatlanmaların iyileştirilmesinde görev alan rehabilitasyon ve fiziksel terapi sektörlerinde robotik cihazların kullanımı git gide artmaktadır. Bahse konu cihazlar hasar gören uzuvların tedavisi için gerekli hareketleri hassas ve tekrarlı mümkün bir şekilde gerçekleştirebildikleri için tercih edilmektedir [1] [2]. Bu bağlamda bu sektöre destek sağlamak adına rehabilitasyon robotiği altında bir çok gelişme meydana gelmiştir.

Robotiğin bu sektörde gelişme gösteren alanlarından bir tanesi de rehabilitasyon ve güç artırımı/geri kazanımı hedefleyen dış iskelet sistemleridir. Bu alanda geçmişte ve günümüzde pek çok çalışma yapılmıştır [3] [4] [5] [6] [7].

Bahse konu sistemler "Günlük Yaşam Aktivitelerini" (GYA) kişiye destek olarak tekrarlı bir şekilde yaptırarak hasar gören kas ve sinir sisteminin bu pekişme ile güçlenmesini ve bu doğrultuda iyileşmesini amaçlar [2].

GYA, bir rehabilitasyon ve / veya güç artırma robotunun uygunluğunun belirlenmesinde en önemli parametrelerden biridir. Hastanın hasarlı uzuvları, günlük faaliyetler yürütülerek rehabilite edileceğinden, hasarlı kasların nasıl çalışacağını öğrenmesi için, herhangi bir rehabilitasyon robotu, hedeflenen uzuv ve eklemler için söz konusu GYA'ları gerçekleştirebilmelidir. Güç artırma durumunda, kişi kolunu verimli bir şekilde kullanabilmesine rağmen, robotun insan kolunun

önemli olduğu kısıtlamalarına uyumu. Gerekli yörüngeler kötü bir şekilde planlandıysa ve söz konusu kısıtlamalarla uyumlu değilse, dış iskelet kişiye zarar verebilir [8] [9] .

Bundan ötürü tasarlanan bir dış iskelet sisteminin hitap ettiği uzvun/uzuvların GYA'larını destekleyebilmesi sistemin etkinliği açısından önem taşır.

Bu çalışmada, ters kinematik kullanılarak dinamiği modellenen bir üst kol dış iskelet sisteminin çeşitli GYA için tork gereksinimleri hesaplanmıştır.

Makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: II. Kısımda daha önceden Özyeğin Üniversitesi Biomekatronik Laboratuvarı tarafından mekanik tasarımı gerçekleştirilen üst uzuv dış iskeletinin yapısal özellikleri ve eyleyici yapısından bahsedilmiştir. Bunu takip eden bölümde GYA konsepti daha derin bir şekilde tanıtılmış, benzetim ortamında çalışılacak GYA seçilmiş, seçilen GYA için yörüngeler planlanmış ve dış iskeletin kinematik ve dinamik yapısı tanıtılmıştır. IV. Bölüm olan Benzetim Sonuçları'nda hesaplanan tork değerleri sunulmuştur. Bunu takip eden V. bölümde bu sonuçlar tartışılmış ve makale VI. bölümde sonlanmıştır.

II. DIŞ İSKELET YAPISI

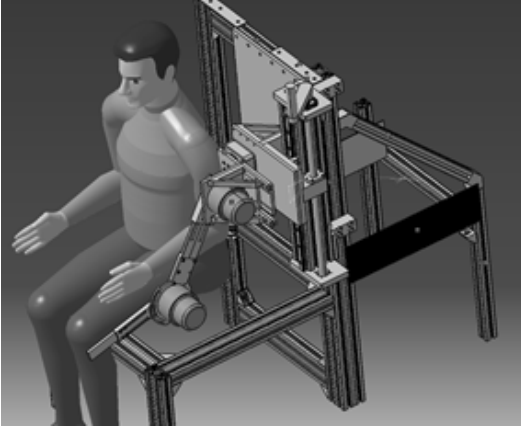
A. Sistem Prensipleri

Yukarıda sözü edilen dış iskelet, çeşitli kol boyutları için ayarlanabilir. Bu ayar, uzuvların yapısı ile sağlanır. Her uzuv, biri erkek, biri sürgü özelliği gösteren bağlantı ekipmanı ve uzuvdaki motoru taşıyan bir dişi parça olmak üzere üç parçadan oluşur. Erkek kısım doğrudan önceki uzuvdaki motor tutucusu tarafından taşınan ve civatalarla tutturulmuş olan motor eyleyici kapağına takılmıştır. Daha sonra dişi kısım, erkek kısımda amaçlanan uzuv boyutuna bağlı olarak sürgü rayının içine yerleştirilir ve bu bölgeye vidalarla sabitlenir.

Sistemin güvenliğini sağlamak için uzuv hareket alanı mekanik olarak kısıtlanmıştır. Bu kısıtlamalara bağlı olarak uzuvların hareket alanı Tablo I'de verilmiştir. Verilen değerler sistemin başlangıç pozisyonu olarak kabul edilen kolun yere paralel bir şekilde ileri ve avuç içinin yukarıya doğru baktığı konfigürasyona göredir.

Sürgü aralığı, en uzun erkeğin kol uzunluğu ile en kısa kişinin kol uzunluğu arasındaki tüm olası kol boyutlarını kapsayacak şekilde ayarlanmıştır [10].

Sistemin CAD ortamında oluşturulan mekanik tasarımı Şekil 1'de verildiği gibidir.



Şekil 1: Sistemin CAD Modeli

B. Eyleyici Yapısı

Bahse konu dış iskelet sistemi iki tip eyleyici içerir. Bunlardan ilki literatürde seri elastik eyleyici (SEE) olarak adlandırılır. Bu eyleyici türü içinde bulunduğu sistemin tork ve empedans vasıtasıyla kontrol edilebilmesini mümkün kılar. Sistemde bulunan dönel eyleyiciler bu yapıdadır [11]. Sistemde bulunan dördüncü eyleyici ise pozisyon kontrolü prensibi ile çalışır ve omuzdaki humeral kafa yükselmesini ayarlayarak kol hareketine destek sağlar [12]. İlgili eyleyici Şekil 3'deki gibidir.

Dönel ve prizmatik eyleyicilerin değerleri Tablo II ve Tablo III 'deki gibidir.

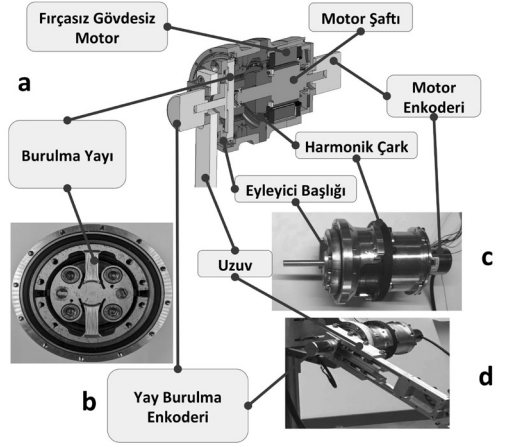
Sistemin prizmatik hareketi, dairesel hareketi doğrusal harekete çeviren bir doğrusal hareket modülü (Ing: Linear Stage) ve ona bağlı bir doğru akım motoru (Maxon Motor 323890; Gearhead 203134) ile sağlanır.

Tablo I: Uzun Açılma Hareket Limitleri

	Alt Limit (derece)	Üst Limit (derece)
Uzun 1 (Omuz A-A)	-85	+35
Uzun 2 (Omuz F-E)	+90	-90
Uzun 3 (Dirsek F-E)	0	+85

Tablo II: Sistemin Kinematik Serbestlik Dereceleri

Özellik	SEE (A)	SEE (B)
Max. Açılma Hız (rpm)	26.33	26.33
Max. Sürekli Tork (Nm)	96	164
Ağırlık (kg)	2.87	3.09
Sertlik (Nm/derece)	91	91
Tork Çözünürlüğü (mNm)	3.90	3.90



Şekil 2: SEE Yapısı

a. SEE'nin CAD Modeli b. Burulma Yayı c. SEE Modülü d. SEE Modülünün Uzuva Monte Edilmiş Hali

Sistem, omuz A-A eklemi için SEE A ve omuz F-E ve dirsek F-E eklemlerini hareket ettirmek için SEE B olarak adlandırılan SEE'yi kullanır.



Şekil 3: Dış İskelet'i Kullanan Sağlıklı Birey

III. YÖNTEM

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi için öncelikle robottan yapılması istenen GYA seçilmiştir. Ardından Seçilen GYA için

Tablo III: Prizmatik Hareket Motoru Özellikleri

Özellik	Prizmatik Hareket Motoru
Çalışma Voltajı (V)	24
Max. Sürekli Tork (Nm)	33.5
Max. Açılma Hız (rpm)	22

robotun kinematik yapısı doğrultusunda bir yörünge planlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından robotun dinamik yapısı baz alınarak seçilen GYA'nın tork gereksinimi hesaplanmıştır.

A. Günlük Yaşam Aktiviteleri

Günlük Yaşam Aktiviteleri, kişinin gün içinde vücudun iskelet ve kas sistemlerini kullanarak rutin olarak tek başına gerçekleştirebildiği hareketlerin tümünü kapsamaktadır. GYA kendi içinde Hayatın Devamı için Gerekli GYA (H-GYA,İng: Essential Activities of Daily Living, ADL) ve Yarar Amaçlı GYA olarak sınıflandırılır. (Y-GYA,İng: Instrumental Activities of Daily Living, IADL) [13] .

Temel GYA kişinin hayatını devam ettirmesini sağlayan tür hareketleri kapsar. Yemek yeme, su içme, tualeti kullanma gibi aktiviteler bu kategorinin içinde sınıflandırılabilir.

Yarar Amaçlı GYA kişilerin kendileri ve çevreleri ile olan etkileşimlerini kapsar. Kişisel bakım, çevreyle etkileşim ve ve sosyal amaçlı hareketler bu kategoriye ait GYA örnekleri olarak verilebilir.

Bu çalışmada bahse konu GYA türlerinden dört adet örnek seçilmiştir. Bunlar çorba içme (H-GYA), omuzu kaşımak (Y-GYA), yerden bir nesne alıp yukarıya kaldırma (Y-GYA) ve birinin dikkatini çekmek için el sallama (Y-GYA) hareketleridir [14] [15].

B. Robotun Kinematik Yapısı

Dış iskeletin dört serbestlik derecesi vardır. Bunlardan üçü dönel (omuz fleksiyon-ekstansiyon (Omuz F-E), omuz abduksiyon-adduksiyon (Omuz A-A) ve dirsek fleksiyon -ekstansiyon (Dirsek F-E)) eklemler, diğeri ise omuz humeral kafa yükselmesini gerçekleştiren prizmatik bir eklemdir (Omuz-H)[12]. Sistemin kinematik modeli Şekil 4'te verilmiştir. Sistemin çalışacağı uzay Omuz-H eklemindeki hareket doğrultusunu z, Omuz A-A ekleminin döndüğü eksenini x ve Omuz F-E ekleminin döndüğü eksenini ise y olacak şekilde tanımlanmıştır.

Bu çalışmanın amaçları doğrultusunda, ayarlanabilir sistemde belirli bir bağlantı uzunluğu seti seçilmiştir. Seçilen uzunluklar ve uzuvların başına kütle ve atalet değerleri aşağıda Tablo IV ve matrislerde. Formülde verilen değerler kgm^2 cinsindendir.

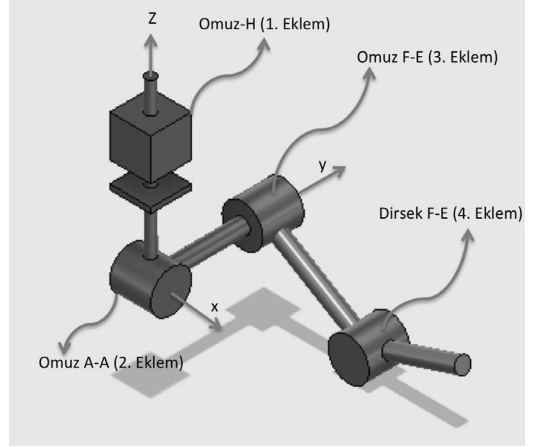
$$I_{OmuzA-A} = \begin{bmatrix} 17.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0.51 & 0 \\ 0 & 0 & 3.634 \end{bmatrix}$$

$$I_{OmuzF-E} = \begin{bmatrix} 0.0054 & 0 & 0 \\ 0 & 11.153 & 0 \\ 0 & 0 & 0.23 \end{bmatrix}$$

$$I_{DirsekF-E} = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0 & 0 \\ 0 & 4.115 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 \end{bmatrix}$$

Tablo IV: Seçilen Parametreler

Uzuv	Uzunluk (m)	Ağırlık (kg)
Uzuv 1 (Omuz)	0.04	7.77
Uzuv 2 (Üst Kol)	0.23	6.48
Uzuv 3 (Alt Kol)	0.26	2.83



Şekil 4: Robotun Kinematik ve Dinamik Modeli

Sistem insan ve dış iskeletin beraber hareket ettiği ve ortak kütle merkezleri ve ataletleri olduğunu varsayan parçalı bir kütle sistemidir. İlgili değerler P. de Leva vd.'nin çalışmasındaki datalardan çıkarılmıştır [10].

Sistemin düz kinematik değerlerini gösteren D-H Parametreleri, Tablo V'ta gösterildiği gibidir.

Tablo V: D-H Parametreleri

Uzuv	Tür	b (m)	q (derece)	a (m)	w (derece)
Omuz-H	Prizmatik	0	90	d	90
Omuz A-A	Dönel	0.02	q1	0.04 (d_1)	90
Omuz F-E	Dönel	0.04	q2	0.23 (d_2)	0
Dirsek F-E	Dönel	0.05	q3	0.26 (d_3)	0

Sistemin ters kinematik çözümünü aşağıda verilmiştir. İlk adım olarak sistem GYA yörüngesinde bulunan noktaların, dış iskeletin çalışma uzayında olup olmadığını kontrol eder. Eğer çalışma uzayı dışında bir nokta tespit edilirse Omuz-H eksenini o noktaya yaklaşıp şekilde harekete geçer.

İkinci adım olarak q_0 olarak adlandırılan Omuz A-A değeri 1. Formül 'deki gibidir.

$$q_0 = \frac{\arctan2(\gamma Y_f)}{Z_f - d\alpha} \quad (1)$$

Bu formülde γ kolun saat yönü veya saatin tersi yönünde hareket etmesine bağlı olarak 1 ya da -1 değerini alırken α 'da benzer bir şekilde Omuz-H ekleminin z yönünde artı ya da eksi değerlerine göre 1 ya da -1 değerini alır. Eğer bu eklemler hareketsiz kalmışsa bu değer 0 olarak kalır. Z_f ve Y_f değerleri ise sırasıyla uç efektörün z ve y eksenlerindeki son pozisyonlarını gösterir. d değişkeni ise prizmatik eklemin yer değiştirme miktarıdır.

Bu adımdan sonra q_2 olarak adlandırılan Dirsek F-E değerinin hesaplanması yapılabilir. Bu hesaplama için H_a adında ekstra bir parametre tanımlanmalıdır. Bu parametre uç efektörün y ve z eksenlerindeki son pozisyonlarına (Y_f ve Z_f)

ve Omuz A-A eklemine olan uzaklığına bağlıdır d1. Bu değişkenler ile ilgili dönel eklem açısının kosinüs değeri uç efektörün uzaydaki pozisyonuna bağlı olarak ifade edilebilir.

Bu bilgi ve ψ olarak tanımladığımız ve hareketin x eksenine göre yönünü belirten bir değişken ile açının sinüs değerini buradan da açının kendi değerini elde edebiliriz (Bkz. Formül 2-5).

$$H_a = \sqrt{(Yf)^2 + (Zf)^2} - d_1 \quad (2)$$

$$\cos(q_2) = \frac{\sqrt{(H_a)^2 + (Xf)^2 - (d_2)^2 - (d_3)^2}}{(2d_1d_2)} \quad (3)$$

$$\sin(q_2) = \psi \sqrt{1 - \cos(q_2)^2} \quad (4)$$

$$q_2 = \arctan2(\sin(q_2), \cos(q_2)) \quad (5)$$

Bu adımdan sonra q_1 olarak adlandırılan Omuz F-E değerinin hesaplanması yapılabilir. Bu hesaplama için de G_a ve G_b adında ekstra parametreler tanımlanmıştır. Yeni parametreler ile q_1 açısının kosinüs değeri hesaplanır. Ardından yine 2. denklemdaki adımlarla q_1 açısının sinüs değeri ve q_1 açısı bulunur (Bkz. Formül 6 - 10).

$$G_a = d_3 \cos(q_2) + d_2 \quad (6)$$

$$G_b = d_2 \sin(q_2) \quad (7)$$

$$\cos(q_1) = \frac{(G_a H_a + G_b Xf)}{G_a^2 + G_b^2} \quad (8)$$

$$\sin(q_1) = -\psi \sqrt{1 - \cos(q_1)^2} \quad (9)$$

$$q_1 = \arctan2(\sin(q_1), \cos(q_1)) \quad (10)$$

Belirlenen GYA'lar doğrultusunda sistemin uygulaması gereken torkun hesaplanabilmesi için ters dinamik yönteminden yararlanılmıştır. Yöntemin formülü Formül 11 gibidir.

$$\tau = M(q_i)\ddot{q}_i + C(q_i, \dot{q}_i) + G(q_i) \quad (11)$$

İlgili formülde (q_i) terimindeki i hangi eklem üzerinde çalışıldığı (1, 2, 3 veya 4) çalışılan eklem açısı pozisyonunu, $M(q_i)$ terimi ise ilgili eklem atalet matrisini, $\dot{q}_i$ terimi ise bu eklem uzayda kazandığı ivme değerini temsil eder. $C(q, \dot{q}_i)$ terimi korioli terimidir ve ilgili eklemdeki merkezci ve kütlesi olan uzun belirlenen bir yörüngede olan hareketinden dolayı doğan korioli kuvvetlerini temsil eder. Son olarak $G(q_i)$ ise yerçekiminin etkisinden doğan kuvvetleri kapsar.

Benzetim için gerekli yörüngeler, pozisyon, hız ve ivmedeki değişiklikleri dikkate alan 5. derece polinom yörünge yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bu amaçla robotun ters dinamiği için 11. formül uygulanarak, 0.01 saniyelik adımlarla ve yukarıdaki ters kinematik bağıntılarına sadık kalınarak uzuvların hareket süresince konum, hız ve ivmeleri bulunmuştur. Bu bilgiler doğrultusunda da hareket süresinceki Tork gereksinimleri hesaplanmıştır.

C. GYA Bazlı Yörünge Planı

Seçilen GYA, omuzlu humeral kafa yüksekliği ihtiyacına bağlı olarak iki gruba ayrılabilir. İlk grup, çorba içmek ve omzun silkelmesi hareketlerini içerir. Bu GYA, Z yönünde, zemine dik yönde önemli miktarda hareket gerektirmez, bu nedenle bu durumlarda prizmatik eklem hareketi zorunlu değildir ve göz ardı edilmiştir. Bu kısımda seçilmiş olan aktiviteler sırasıyla temel ihtiyaçları giderme ve kişisel bakım kategorilerinden seçilmiş örnek GYA'lardır.

Çorba içme olan ilk GYA için gerekli hareketler şu şekildedir; Önceki uzva (ön kol) dik olan uç efektörün (kaşık) kasesinin içine yerleştirilmesi; Dönel uzvun kaşığı yükseltmesi (Z yönünde); Çorbayı ağzın önünde konumlandırmak için dirsek fleksiyonu ve omuz abdüksiyonu; Çorbayı içmek için omuz fleksiyonu;

Karşı omzunu silkeleyen ikinci GYA için gerekli hareketler şu şekildedir; Gövdeye doğru dirsek fleksiyon; Gövdeye doğru omuz fleksiyonu; Omuzla ulaşmak için dirsek fleksiyonu; Omuzu kaşımak için sinüzoid omuz abdüksiyonu;

İkinci grup yerden bir nesne almak ve dikkat çekmek için birine el sallamak hareketlerini inceler. Bu hareketlerin her ikisi de, hareketin Z yönünde önemli miktarda yer değiştirme ihtiyacının olması nedeniyle humeral kafa yükseltmesi kullanımına ihtiyaç duyar. Bu kısımda seçilmiş olan aktiviteler sırasıyla destek hareketleri ve sosyal etkileşim hareketleri kategorilerinden seçilmiş örnek GYA'lardır.

Yerden bir nesne alıp yukarıya kaldırmak olan üçüncü GYA için gerekli hareketler şu şekildedir; Dirsek ve omuz ekstensiyonu (zemine doğru); Eşzamanlı humeral kafa alçalması; Nesneyi seçme; Humeral kafa yükselmesi; İlk konfigürasyona ulaşmak için eş zamanlı dirsek ve omuz fleksiyonu; Omuz abdüksiyon ve fleksiyonu; Dirsek ekstensiyonu;

Birine el sallamak olan dördüncü GYA için gerekli hareketler şu şekildedir; Dirsek ve omuz uzatma; Eşzamanlı humeral kafa yükselmesi; Eşzamanlı omuz addüksiyon; Sinüzoid omuz abdüksiyon-addüksiyon;

IV. BENZETİM SONUÇLARI

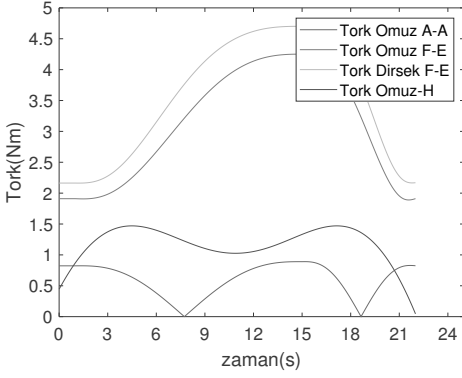
A. Benzetim Ortamı

Benzetim MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetimler Intel Core TM i7 8550 CPU 1.8 GHz işlemciye ve 16 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

B. Benzetim Sonuçları

Seçilen GYA'ların gerçek zamanlı tork gereksinimlerini gösteren sonuçlar bu kısımda sunulmuştur. Benzetim sonuçlarına göre bu hareketleri gerçekleştirmek için gerekli en yüksek tork değeri 38.9 Nm civarındadır. İlgili harekette dış iskelet ve kullanıcının koluna ek olarak aynı zamanda yerden kaldırılan 15 kg'lık yükün de etkisi vardır. Eyleyicilerin maksimum tork uygulama kapasiteleri göz önüne alındığında bu değer kıyasla düşük olarak kabul edilebilir. Dış iskelette maksimum torku

yüksek eyleyicilerin kullanılma sebebi dış iskeletin rehabilitasyona ek olarak aynı zamanda kuvvet arttırımı uygulamalarında da kullanılabilecek şekilde tasarlanmış olup, çok amaçlı olmasından ötürüdür..

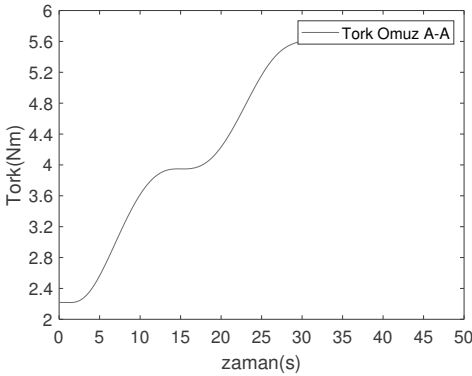


Şekil 5: El Sallama Hareketi için Gereken Tork

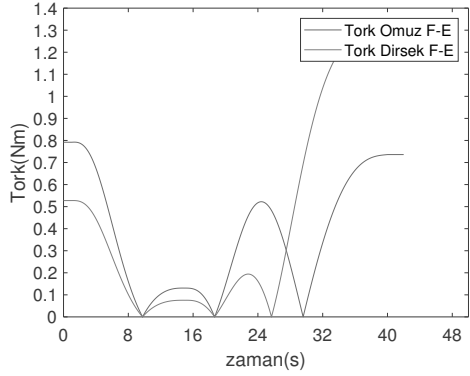
V. TARTIŞMA

Benzetim sonuçlarına göre çorba içme ve silkeleme hareketlerinde baskın olarak kullanılan eklem omuz A-A eklemidir. Bu, ilgili hareketin çalışma alanı içinde, z ekseninde (yere dik eksen) dönel hareket gerektirmesinden ötürü beklenen bir durumdur.

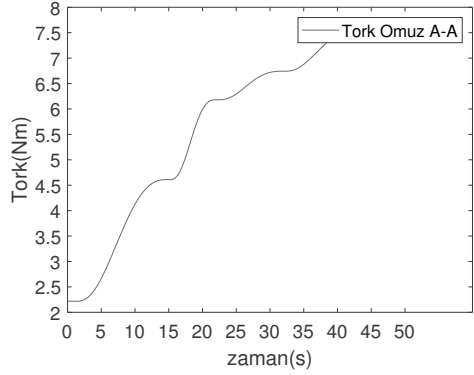
El sallama hareketinde ise omuz A-A eklemi en az kullanılan eklem olarak değerlendirilebilir. Bu hareketin gerçekleşmesinde Sırasıyla Dirsek F-E ve Omuz F-E eklemleri daha büyük önem taşır. Bu durum el sallama hareketinin omuz A-A eklemine tork yükünün bir kısmını Omuz-H eklemine aktarması ve eklem, F-E eklemleri el sallama hareketi için



Şekil 6: Çorba İçme Hareketi için Gereken Tork (Omuz A-A)



Şekil 7: Çorba İçme Hareketi için Gereken Tork (Omuz ve Dirsek F-E)

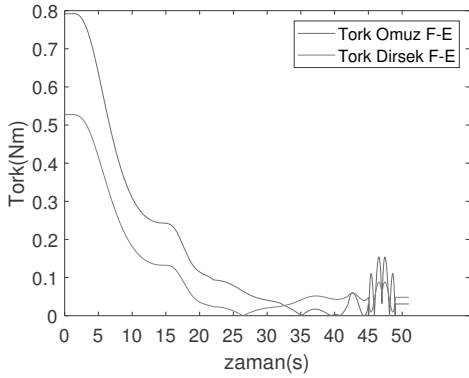


Şekil 8: Omuz Silkeleme Hareketi için Gereken Tork (Omuz A-A)

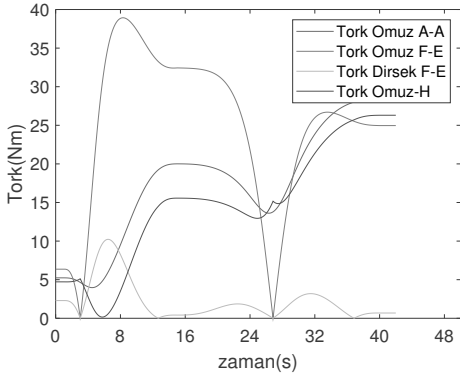
senkronize sinüzoidal hareketler sergilerken daha az hareket göstermesinden ötürüdür. Omuz F-E eklemi dirsek eklemine taşımaya rağmen daha az tork ihtiyacı duymaktadır. Bunun sebebi hareket süresince dirsek eklemi daha geniş bir yay çizmesidir.

Kaldırma hareketinde en aktif olarak Omuz F-E eklemi ardından sırasıyla Omuz A-A ve Omuz-H eklemleri kullanılmıştır. İlgili harekette omuzdaki humeral kafanın sıkça yer değiştirmesi gerekmektedir. Bunun sebebi yerde olan nesnenin bireyin etkileşim alanının dışında olmasıdır.

Hareketin ilk kısmında Omuz-H eklemi yer çekiminin de desteğiyle dönel eklemleri aşağı doğru indirir, aynı anda Omuz ve dirsek F-E eklemleri yerdeki objeye doğru hareket eder. Hareketin geri kalanında ise bahse konu eklem tüm sistemi başlangıç noktasından daha yüksek bir noktaya kaldırmak durumundadır. Bu kaldırma işlemi ağırlıklı olarak y ekseninde



Şekil 9: Omuzu Silkeleme Hareketi için Gereken Tork (Omuz ve Dirsek F-E)



Şekil 10: Yerden Bir Nesneyi Kaldırmak için Gereken Tork

hareket eden Omuz F-E eklemi ile gerçekleştirilir. Cismin kavrandığı beşinci saniyedeki Omuz F-E eklemindeki tork artışı bundan ötürüdür. 6. saniyeden itibaren ise Omuz-H eklemi z yönünde yükselme hareketini gerçekleştirirken, Omuz A-A eklemi de adüksiyon hareketi ile nesneyi ilk önce kişinin vücuduna doğru, sonrasında ise vücutundan uzağa çevirerek yukarıya doğru bir yay çizer. Geriye kalan Dirsek F-E eklemi ise kolun başlangıç pozisyonundan nesneyi almaya uygun yere dik pozisyona geçme ve hareketin son evresinde nesneyi yukarı doğru kaldırma işlemlerinde aktif.

VI. SONUÇ

Bu çalışmada bir üst kol dış iskelet sisteminin çeşitli GYA'ya uygulaması için yörüngeler üretilmiş, gereken tork çıkışları hesaplanmış ve benzetim yoluyla gösterilmiştir. Sonuç olarak, robot destekli rehabilitasyon, amacı ile kullanılabilir olan sistemin ve insan kolunun serbestlik derecelerine uyumluluğu

ve günlük yaşam aktivitelerinde destek sağlayabilme yetisi kontrol edilmiştir.

Şu anda bu çalışmada bahsedilen dış iskelet kontrolcü yapısı tasarlanmaktadır. Bundan ötürü deneysel doğrulamayı gelecek çalışma alanı olarak görmekteyiz.

VII. TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmada kendilerine destek veren Ahmed Fahmy Soliman ve Ahmet Talha Kansızoglu'na teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Huang VS, Krakauer JW, "Robotic neurorehabilitation: a computational motor learning perspective", *Journal of Neuro-Engineering and Rehabilitation*. 2009;6.
- [2] B. Johansson, "Current trends in stroke rehabilitation. A review with focus on brain plasticity", *Acta Neurol. Scand.*, vol. 123, no.3, pp.147-159, 2011.
- [3] J. C. Perry, J. Rosen, and S. Burns, "Upper-limb powered exoskeleton design", in *IEEE Trans. on Mechatronics*, vol. 12, no. 4, pp. 408-417, Aug. 2007.
- [4] T. Nef, M. Guidali, and R. Riener, "ARMin III-armtherapyexoskeleton with an ergonomic shoulder actuation," in *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 6, no. 2, pp. 127-142, Jul. 2009.
- [5] H. I. Krebs, N. Hogan, M. L. Aisen, B. T. Volpe, "Robot-aided neurorehabilitation," in *IEEE Trans. on Rehabilitation Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 75-87, Mar. 1998.
- [6] G. Rosati, P. Gallina, and S. Masiero, "Design, implementation and clinical tests of a wire-based robot for neurorehabilitation," in *IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 560-569, Dec. 2007.
- [7] K. Bongsu and D. D. Ashish; "An upper-body rehabilitation exoskeleton Harmony with an anatomical shoulder mechanism: Design, modeling, control, and performance evaluation", *The International Journal of Robotics*, vol. 36, issue 4, pp. 414 -435; May, 2017.
- [8] Investigation of Internal Properties of the Human Body, DOT HS-801 430, 1975
- [9] B. F. Morrey and K. N. An, "Biomechanics of the shoulder", in *The Shoulder*, vol. 1, C. A. Rockwood and F. A. Matsen, Eds. Philadelphia, PA: Saunders, 1990, ch. 6.
- [10] P. de Leva, "Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's Segment Inertia Parameters", in *Journal of Biomechanics*, vol. 29, no. 9, pp. 1223- 1230, 1996.
- [11] M. C. Yildirim, P. Sendur, O. Bilgin, B. Gulek, G. G. Yapici and B. Ugurlu, "An integrated design approach for a series elastic actuator: Stiffness formulation, fatigue analysis, thermal management", in *IEEE Int. Conf. on Humanoid Robotics*, Birmingham, UK, Nov. 2017.
- [12] S. Hamdan, E. Oztup, J. Furukawa, J. Morimoto, and B. Ugurlu, "Shoulder Glenohumeral Elevation can be Estimated via Gaussian Regression with Upper Arm Orientation", in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Engineering in Medicine and Biology Society*.
- [13] M.P. Lawton, E.M. Brody, "Assessment of older people: self-maintaining and instrumental activities of daily living", *Gerontologist*.179-86.1969
- [14] J. Rosen, J. C. Perry, N. Manning, S. Burns, and B. Hannaford, "The human arm kinematics and dynamics during daily activities- toward a 7 DOF upper limb powered exoskeleton", in *Proc. 12th Int. Conf. Adv. Robot. (ICAR 2005)*, Jul., pp. 532-539.
- [15] D.P. Romilly, C. Anglin, R.G. Gosine, C. Hershler, S.U. Raschke, "A functional task analysis and motion simulation for the development of a powered upper-limb orthosis", *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 2(3), pp. 119-129

Aktif Ortezde Kullanılan Yapay Kasın Veri GÜdümlü Öngörülü Kontrolü

Osman Ülkir

Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Mus Alparslan Üniversitesi
Muş, Türkiye
o.ulkir@alparslan.edu.tr

Gazi Akgün

Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Marmara Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
gaziakgun@gmail.com

Erkan Kaplanoğlu

Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Marmara Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
ekaplanoglu@marmara.edu.tr

Öz — Bu çalışmada, pnömatik yapay kasın (PAM) hassas konum kontrolü, veri güdümlü öngörülü kontrol (DDPC) algoritmasıyla gerçekleştirilmiştir. DDPC yöntemi alt-uzay identifikasyon ve model öngörülü kontrol (MPC) algoritmasının bir araya getirilmesi sonucunda tasarlanmaktadır. Bu algoritma ile geleceğe dair sistem çıkışı tahmin edilebilmekte ve her durumda sistem modeli güncellenmektedir. Sistemin açık çevrim cevabı üzerinden alt-uzay identifikasyon matrisleri hesaplanmaktadır ve bu matrisler kontrolörün tasarlanmasında kullanılmıştır. Önerilen kontrol algoritması tamamen veri tabanlıdır ve sistem modeline ihtiyaç duymamaktadır. Bu yapı sayesinde kasın doğrusal olmayan hareketleri ve belirsizlikleri telafi edilebilmektedir. Sonuç olarak farklı test ve yükleme şartları altında pnömatik kasın konum takip performansı gözlemlenmiştir. Gerçek zamanlı deney sonuçları, doğrusal olmayan sistemlerde önerilen kontrolörün uygulanabilirliğini ve verimliliğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler— pnömatik yapay kas, veri güdümlü öngörülü kontrol, alt-uzay identifikasyon, doğrusal olmayan sistem.

I. GİRİŞ

Pnömatik kas aktüatörü veya akışkan kas olarak bilinen PAM, basınçlı havanın membranı doldururken uzun süre kasılma veya uzamanın meydana geldiği bir aktüatörü olarak tanımlanmaktadır. Sıkıştırılmış hava kas'a girdiğinde, eksenel yönde bir gerilme kuvveti oluşturmaktadır ve kas artan iç basıncın yardımıyla eksenel yönde kısalır ve açılma yönünde genişler. Bu yapı ile yapay kas, eksenel yönde büyük bir kasılma kuvveti oluşturur. Kasılma ve ortaya çıkan kuvvet, uygulanan basıncın gücüne bağlıdır. Maksimum kasılma, kas uzunluğunun yaklaşık %25'i kadardır. Doğrusal olmayan yapısı ve hareketindeki belirsizlikler nedeniyle, kasın davranışlarını modelleme ve yüksek performanslı konum izleme sistemi için bir kontrolör tasarlamada zorluk çekilmektedir [1-3].

Pnömatik kasların geleneksel elektrik motorları ve hidrolik-pnömatik aktüatörlere göre birçok avantajı vardır. Bunlar; hafiflik, düşük maliyet, büyük bir kuvvet, yüksek güç/ağırlık oranı ve yüksek güç/hacim oranıdır. PAM biyolojik sistemlerde olduğu gibi karşılıklı çiftler halinde de (antagonist) çalışırlar. Bu durum, yapay kasın gerçek kas özellikleri kazanmasına, sertliğinin kontrol edilebilmesine olanak sağlar. Yapay kasların yapıları itibarıyla insan kasına benzemesi aktif orteز-protez uygulamalarında, tedavi ve rehabilitasyon robotları, alt-üst ekstremiteler dış iskelet robotlarında ve insansı robotlarda uygulanabilirliğini her geçen gün artırmıştır [4-6].

Birçok avantajı olmasına rağmen, PAM yüksek doğrusal olmayan yapısı, histerezis ve zamana göre değişen özelliklere sahiptir. Bu yapı, basınç kaynağının hava olması, örgülü ağız içerisindeki sürtünme ve geometrik yapısından dolayı ortaya çıkmaktadır. Bu yapısı nedeniyle, PAM'ın modellenmesinde ve kontrolünde sorunlar ortaya çıkabilmektedir.

Pnömatik kasın dinamik ve statik yapısını tanımlamak için birçok matematiksel model önerilmiştir [7-8]. Bu modellerde, PAM'ın karakteristiği, basınç-kuvvet ilişkilerinin fiziksel analizinden, büzülme oranlarından veya geometrik yapıdan ortaya çıkarılmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalar PAM'ın davranışının bu yöntemleri kullanarak kesin bir şekilde tanımlamanın zor olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, daha doğru kas dinamikleri elde etmek için çeşitli deneysel yaklaşımlar uygulanmıştır [9-10]. Dinamiklerin pozisyon kontrolüne başarıyla uygulanan deneysel verilerden tahmin edilmesine rağmen, bu yöntemlerin uygulanabilirliği sınırlıdır. Bununla birlikte, hem matematiksel yöntemler hem de deneysel yaklaşımlar, zamanla değişen parametreleri ve kontrolör tarafından telafi edilmesi gereken belirsizlikleri içermektedir.

PAM'ın içindeki yüksek doğrusal olmayan davranışlar nedeniyle, pozisyon kontrolünü doğru şekilde uygulamak kolay değildir. Bu belirsizlikleri çözmek için birçok kontrol algoritması önerilmiştir. Bu kontrol algoritmaları iki kategoriye ayrılabilir. Bunlar model-tabanlı kontrol (MBC) teorisi ve veri güdümlü kontrol (DDC) metodudur. MBC teorisi uygulamalarında ilk adım, sistemin modellenmesi ve ardından sistem modeline göre kontrolörün tasarlanmasıdır. MBC teorisi uygulanarak PAM'ın konum kontrolü gerçekleştirilen literatür çalışmaları şunlardır: adaptive pozisyon kontrolü [11], sliding mode kontrol [12], cascade pozisyon kontrolü [13], adaptive backstepping kontrol [14], model-based nonlinear kontrol [15], switching model kontrol [16], nonlinear optimal predictive kontrol [17] ve active model-based kontrol [18]. DDC teorisi kontrol edilen sistemin matematiksel modelini kullanmadan, sistem üzerinden ölçülen giriş/çıkış verilerini kullanarak doğrudan tasarlanan kontrol yöntemleridir. DDC teorisi uygulanarak PAM'ın konum kontrolü gerçekleştirilen literatür çalışmaları şunlardır: PID kontrol [19], neural network nonlinear kontrol [20], fuzzy kontrol [21], model-free adaptive kontrol [22] ve veri güdümlü öngörülü kontrolüdür. MBC algoritmaları, PAM uygulamaları için DDC algoritmalarından daha yüksek bir konumlandırma hassasiyeti sağlasa da, tasarım prosedürleri, sistemin modellenmesini ve kontrol teorisi için yeterli bilgiyi

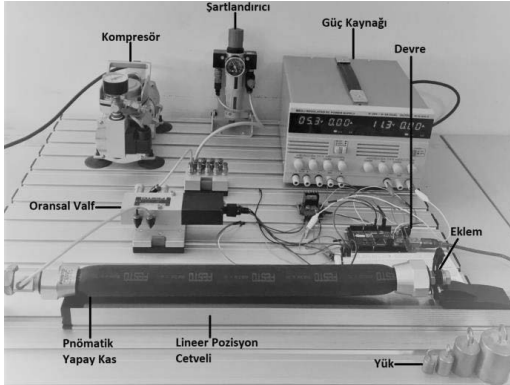
gerektirmektedir. Bu gibi durumlar, modelleme ve denetleyici tasarısına aşına olmayan mühendisler için tasarım yapmayı zorlaştırır ve denetleyiciyi gerçek zamanlı sistemler için olanaksız kılabilmektedir.

Bu çalışmanın en önemli yeniliği DDPC algoritmasının pnömatik kas sisteminde ilk defa uygulanacak olmasıdır. Bu algoritma, alt-uzay identifikasyon yöntemi ve MPC teorisinin kombinasyonu sonucu ortaya çıkmaktadır. MBC yöntemlerin aksine, alt-uzay identifikasyon sonuçlarına dayanan bir yaklaşım önermekteyiz. DDPC yöntemiyle gerçekleştirilen çalışmalar genellikle simülasyon temelli olmakla birlikte gerçek zamanlı olarak bazı endüstriyel ve akademik uygulamalar mevcuttur [23-24].

Bu çalışmada DDPC algoritması kullanılarak PAM'ın yüksek hassasiyet pozisyon kontrolü gerçekleştirilmiştir. İlk önce sistemin açık çevrim cevabı üzerinden alt-uzay matrisleri tahmin edilmiştir. Bu öngörü matrislerini elde etmek için QR ayrışması uygulanmıştır. Bu matrisler MPC algoritmasının maliyet fonksiyonuna adapte edilerek kontrol sinyali elde edilmiştir. DDPC algoritması altında PAM aktüatörün performansını çeşitli test ve yükleme koşullarında gözlemlemek ve analiz etmek için gerçek zamanlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Önerilen kontrol yöntemi PAM sistemi için hızlı yanıt ve yüksek gürbüzlük ile iyi konum izleme performansı sergilemiştir.

II. DENEY DÜZENEGİ

Bir eksenli PAM manipülatörün deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 1'de gösterilmiştir. Test düzeneğinin donanımı, bir kişisel bilgisayar, oransal valf 5/3 yollu (FESTO, MPYE-5-1/8-HF-010 B), pnömatik yapay kas (FESTO, MAS-20-N-500-AA-MCGK), lineer pozisyon cetveli (Novotechnik, iletken plastik potansiyometre, çözünürlük: 5 µm), mikrokontrolör (ATmega 2560) ve sürücü devreden (L298N) oluşmaktadır. Kompresör vasıtasıyla (6, bar, mutlak) hava enjekte edilir.



Şekil 1. PAM deney düzeneği

Bir eklemi sabitlenmiş ve lineer pozisyon cetveli üzerinde konumlandırılmış PAM'ın konum kontrolü için gerekli deney düzeneği oluşturulmuş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. PAM, lineer cetveli 0-50 mm çalışma aralığında hareketli yönde çekip itmek için çekme kuvvetli oluşturur. Dıştaki atalet yükü, çift etkili pnömatik silindir kullanılarak 2 kg yük ile test edilmiştir. Deneyler 6 bar basınç altında gerçekleştirilmiştir ve önerilen kontrol algoritması PC'de Matlab/Simulink programı ile

sağlanmıştır. Deneysel aşamada kullanılan cihazların detaylı teknik verileri Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Deneysel cihazların detaylı teknik verileri

Cihaz	Özellik
Pnömatik Yapay Kas	Model: (FESTO, MAS-20-N-500-AA-MCGK)
	Nominal Uzunluk: 500 mm
Oransal Valf	İç Çap: 20 mm
	Çalışma Basıncı: 0 ... 6 bar
	Maksimum Histerezis: %4
	Maksimum Kuvvet: 1500 N
Mikrokontrolör	Model: FESTO, MPYE-5-1/8-HF-010 B
	Maksimum Basınç: 10 bar
	Çalışma Gerilim Aralığı: 0 ... 10 V DC
	Maksimum Histerezis: %0.4
Lineer Pozisyon Cetveli	Model: ATmega 2560
	AI ve AO: 10 bit çözünürlük
	Model: Novotechnik TLH 0900
	Nominal direnç: 10 KΩ
	Direnç Toleransı: ±%20

III. KONTROL SİSTEM TASARIMI

Hava kaynağının sıkıştırılabilirliği ve PAM kuvvetin doğrusal olmayan yapısını kontrol etmek için yeni bir kontrol algoritması önerilmiştir. Bu algoritma alt-uzay identifikasyon yöntemine dayanan konum takip sisteminde uygulanmıştır. Geleceğe dair sistem çıkışı hakkında bilgi veren bu algoritmanın asıl amacı MPC maliyet fonksiyonunun minimumu seviyeye indirmektedir. Önerilen kontrolörün temel özellikleri aşağıdaki gibidir:

- 1) Sistemin modeli açık çevrim cevabı üzerinden alt-uzay identifikasyon yapılarak hesaplanmaktadır.
- 2) İdentifikasyon sonucu elde edilen matrisler MPC maliyet fonksiyonu içerisinde tanımlanmıştır.
- 3) Geleceğe dair sistem çıkışı hakkında öngörüde bulunabilmektedir.
- 4) Sistem için mevcut olan kısıtlamalar maliyet fonksiyonu içerisinde tanımlanabilmektedir.
- 5) Veriler sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyulmadan alınabilmektedir.

Bu çalışmada, açık çevrim cevabı üzerinden ölçülen giriş/çıkış verileri üzerinden alt-uzay identifikasyon yapılarak ve MPC algoritmasının maliyet fonksiyonu kullanılarak DDPC algoritması geliştirilmiştir. Kontrol algoritmasının ağırlık parametreleri, tahmin edilen alt-uzay matrisleriyle hesaplanmaktadır. Tanımlanan ufuk süresince sistem, önerilen referans girişini geçmiş giriş-çıkış verilerine ve izleme hatasına dayanan bir kontrol kuralıyla izleyebilir. Geçmiş verilere dayanan kural, ufkutaki tüm eylemleri takip ederek hızlı bir şekilde yanıt verebilir. Özellikle, yeni koşulların hızlı ve etkili bir şekilde tanımlanması hızlı bir şekilde uyum sağlanmasına izin verecektir.

A. Alt-uzay İdentifikasyon Yöntemi

Bu bölümde sistemin açık çevrim cevabı üzerinden alt-uzay identifikasyon matrislerin elde edilme sürecinin teorisini anlatılmaktadır. Bu matrisler, DDPC algoritması tasarlamak için kullanılacaktır.

Alt-uzay, durum uzayı modelini sistem model yapısı olarak kabul eder. Denklem 1-2'de gösterilen durum uzayı model gibi giriş ve çıkış sinyalleri ile durum vektörünü kullanarak birinci dereceden diferansiyel denklem formunda yazılabilir.

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Ke_k \quad (1)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + e_k \quad (2)$$

Burada, $u_k \in \mathbb{R}^m$, $y_k \in \mathbb{R}^l$ ve $x_k \in \mathbb{R}^n$ sırasıyla giriş, çıkış ve durum vektör değişkenleridir; $e_k \in \mathbb{R}^l$ ise beyaz gürültü bozucusudur. Sistem matrisleri $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{l \times n}$, $D \in \mathbb{R}^{l \times m}$ ve $K \in \mathbb{R}^{l \times l}$ sırasıyla durum, giriş, çıkış, geçiş ve kalman filtre kazanç matrisleridir.

Tanımlama için u_k girişlerinin ve y_k çıkışlarının $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ için mevcut olduğunu varsayıyoruz. Giriş verileri u_k bloğunun Hankel matris formaları U_p ve U_f olarak tanımlanmaktadır:

$$U_p \triangleq \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_{N-2M+1} \\ u_2 & u_3 & \dots & u_{N-2M+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_M & u_{M+1} & \dots & u_{N-M+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$U_f \triangleq \begin{bmatrix} u_{M+1} & u_{M+2} & \dots & u_{N-M+1} \\ u_{M+2} & u_{M+3} & \dots & u_{N-M+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{2M} & u_{2M+1} & \dots & u_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

Denklemlerdeki 'p' ve 'f' değişkenlerin geçmiş ve gelecek matrislerini temsil etmektedir. Benzer şekilde, y_k için Hankel matris formları Y_p ve Y_f olarak tanımlanmaktadır. Matrislerin boyutları sırasıyla $\{Y_p, Y_f\} \in \mathbb{R}^{M \times (N-2M+1)}$ ve $\{U_p, U_f\} \in \mathbb{R}^{M \times (N-2M+1)}$ dir.

$$Y_p \triangleq \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_{N-2M+1} \\ y_2 & y_3 & \dots & y_{N-2M+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_M & y_{M+1} & \dots & y_{N-M+1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Y_f \triangleq \begin{bmatrix} y_{M+1} & y_{M+2} & \dots & y_{N-M+1} \\ y_{M+2} & y_{M+3} & \dots & y_{N-M+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2M} & y_{2M+1} & \dots & y_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

Alt-uzay identifikasyon yönteminde, Hankel matris blokları dikkörtgen şeklinde yapılır, böylece gürültünün sistem üzerindeki istenmeyen etkileri en aza indirgenir. Bu durum N değişkeniyle gösterilen geniş bir veri setine sahip olarak elde edilir. Denklem (3)-(6) deki M , öngörü denklemin sırası olarak anlaşılmaktadır. Sistem davranışının başarılı bir şekilde tanımlanması için M sırasının, durum matrisi formunda tanımlanan gerçek sistem sırasından (n) daha büyük olması veya en azından eşit olması gerekir [25]. Sistemin geçmiş ve gelecek durum matrisleri şu şekilde yazılır:

$$X_p \triangleq [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{N-2M+1}] \quad (7)$$

$$X_f \triangleq [x_{M+1} \ x_{M+2} \ \dots \ x_{N-M+1}] \quad (8)$$

Denklem (1) ve (2)'nin türetilmesi sonucu, denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir. Bu denklemler, alt-uzay identifikasyon için kullanılan alt-uzay matris giriş-çıkış denklemleridir [26-27].

$$Y_f = \Gamma_M X_f + H_M^d U_f + H_N^s E_f \quad (9)$$

$$Y_p = \Gamma_M X_p + H_M^d U_p + H_N^s E_p \quad (10)$$

$$X_f = A^M X_p + \Delta_M^d U_p + \Delta_M^s E_p \quad (11)$$

$\Gamma_M \in \mathbb{R}^{M \times n}$ genişletilmiş gözlemlenebilir matrisi, $\Delta_M^d \in \mathbb{R}^{n \times Mm}$ ters uzatılmış kontrol edilebilirlik matrisi (deterministik) ve $\Delta_M^s \in \mathbb{R}^{n \times Ml}$ ters uzatılmış kontrol

edilebilirlik matrisi (stokastik) olarak tanımlanmaktadır [28-29]. Y_f Denklem (9)-(11) kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Y_f = [\Gamma_M A^M \Gamma_M^+ - A^M (H_M + \Delta_M)] \begin{bmatrix} Y_p \\ U_p \end{bmatrix} + H_M U_f + (\Delta_M^s - A^M \Gamma_M^+ H_M^s) E_p + H_M^s E_f \quad (12)$$

E_f 'nin etkisi sürekli beyaz bir gürültü olduğundan ve bir Kalman filtresinin kararlılığından dolayı bu değişken ihmal edilir. Denklem 12 de ulaşılan sonuç M ufku boyunca belirlenen giriş ve çıkış değerlerine bağlı olarak yine M ufku boyunca çıkışı belirleyen modeldir. Burada modeli daha iyi anlayabilmek için toparlayacak olursak;

$$\hat{Y}_f = L_w W_p + L_u U_f \quad (13)$$

Burada $W_p = [Y_p \ U_p]^T$, U_f sırasıyla geçmiş giriş-çıkışlardan ve gelecekte girişlerden oluşmaktadır. $L_w \in \mathbb{R}^{Ml \times M(l+m)}$, geçmiş giriş ve çıkış durumlarına karşılık gelen alt-uzay matrisidir ve $L_u \in \mathbb{R}^{Ml \times Mm}$ ise gelecekteki girişlere karşılık gelen alt-uzay matrisidir. Denklem (13)'teki gelecekteki çıkış değerlerine, sistemin gelecekteki girişinin yanı sıra geçmiş giriş ve çıkış durumlarının doğrusal bir kombinasyonu olarak yaklaşılabilir. Denklem (13) daha sonra, sistemin geleneksel transfer fonksiyonunu veya durum-uzayı tanımını veren identifikasyon yöntemlerine geri dönmeksizin sistemin davranışını belirlemek için kullanılabilir.

Kestirdiğimiz $\hat{Y}_f$ değer ile gerçek Y_f değeri arasındaki hatayı 0 'a çekecek olan L_w ve L_u alt uzay kestirim katsayılarını Hankel veri matrislerinden hesaplamak için en küçük kareler yöntemi kullanılmaktadır.

$$\min \left\| Y_f - [L_w \ L_u] \begin{bmatrix} W_p \\ U_f \end{bmatrix} \right\|_F^2 \quad (14)$$

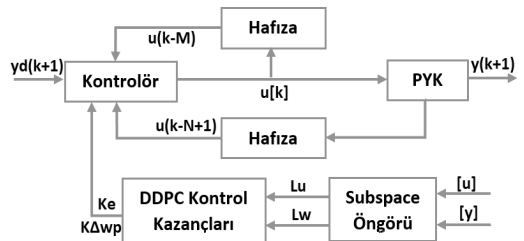
Bu problem Y_f satır alanının ortogonal çıktısından, matrislerin satır alanına dikey $W_p = [Y_p \ U_p]^T$ olarak çözülebilir. Bu durum Denklem (15) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\hat{Y}_f = Y_f / \begin{bmatrix} W_p \\ U_f \end{bmatrix} \quad (15)$$

B. Veri Güdümlü Öngörülü Kontrolör

Bu bölümde, bir önceki bölümde açıklanmış olan alt-uzay identifikasyon yöntemi model öngörülü kontrol algoritması ile birleştirilerek alt-uzay temelli model öngörülü kontrol algoritması anlatılacaktır. Önerilen kontrol yönteminin blok yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir.

Şekil 2'de M öngörü ufku ve N ise veri uzunluğudur. $y_d(k+1)$, $y(k+1)$ ve $u(k-M)$ ise sırasıyla istenilen çıkış, çıkış ve giriştir. Tüm giriş/çıkış verileri bir veri tabanında saklanır ve daha sonra kontrolde tekrar kullanılabilir.



Şekil 2. Sistemin kontrol blok şeması

MPC algoritması maliyet fonksiyonu formu f' 'ye eşit olan öngörü N_p ve kontrol N_c ufkı ile aşağıdaki gibi yazılır ise [30-31]:

$$J = \left(\sum_{k_p=1}^{N_p} (\hat{Y}_{t+k_p} - r_{t+k_p})^T W_Q (\hat{Y}_{t+k_p} - r_{t+k_p}) + \sum_{k_c=1}^{N_c} \Delta U_{t+k_c}^T W_R \Delta U_{t+k_c} \right) \quad (16)$$

Burada W_Q ve W_R ağırlık matrisleri, r_t referans sinyal, N_p ve $N_c = f$ model ve kontrol ufkudur. Kontrol ufkı, öngörü ufkuna eşit ya da daha az olmalıdır ($N_c \leq N_p$ or $N_c \leq f$).

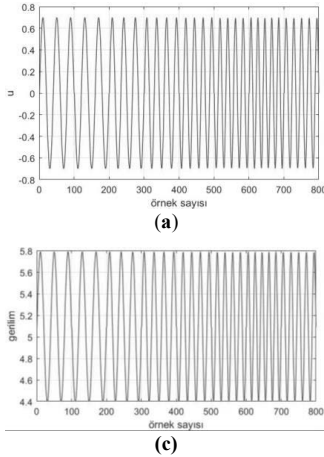
Genel MPC için maliyet fonksiyonunda çıkış değeri giriş ve çıkışın farkı olarak tanımladığımız alt-uzay değişkenleri ile birlikte yeniden yazılır ise aşağıdaki denkleme ulaşırız.

$$J = (L_w \Delta W_p + L_u^N \Delta U_{N_c} + Y_t - r_{t+1})^T W_Q \times (L_w \Delta W_p + L_u^N \Delta U_{N_c} + Y_t - r_{t+1}) + \Delta U_{N_c}^T W_R \Delta U_{N_c} \quad (17)$$

Bu denklemde ΔU_{N_c} 'ye göre türevsel minimum noktayı aradığımız için ΔU_{N_c} ile ilişkili olmayan değişkenleri silebiliriz. Maliyet fonksiyonunu çözersek, kontrol kuralı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} \Delta U_f &= - \left((L_u^N)^T W_Q (L_u^N) + W_R \right)^{-1} \\ &\quad \times (L_u^N)^T W_Q (L_w \Delta W_p \\ &\quad + (Y_t - r_{t+1})) \\ &= -K_{\Delta W_p, N_c} \Delta W_p - K_{e, N_c} (Y_t - r_{t+1}) \end{aligned} \quad (18)$$

Elde edilen denklem ΔW_p ve hata üzerinden kontrol sinyalinin değişiminin bir fonksiyonudur. Bu da kontrol ufkı boyunca sürekli kaydedilen geçmiş giriş ve çıkış değerleri ile çarpılan bir katsayı olan $K_{\Delta W_p}$ ve giriş-çıkış değerlerinin boyutları ile belirlenen bir K_e matrisi ile kontrol sinyali yazılabilecek demektir. Bu katsayılar kontrol katsayıları olup aşağıdaki gibi tanımlanabilir.



$$K_{\Delta W_p} = [I_m \quad 0_{m \times (M-1)m}] K_{\Delta W_p, N_c} \quad (19)$$

$$K_e = [I_m \quad 0_{m \times (M-1)m}] K_{e, N_c} \quad (20)$$

Sistemin alt-uzay modeli üzerinden elde edilen katsayılarına ulaşıldıktan sonra kontrol katsayılarını hesaplamak kolay olacaktır. Bu katsayılar giriş sinyalinin değişimini ve bir sonraki giriş sinyalini hesaplamak için kullanılacaktır.

$$\Delta U_{t+1} = -K_{\Delta W_p} \Delta W_p - K_e (Y_t - r_{t+1}) \quad (19)$$

$$U_t = U_{t-1} + \Delta U_t \quad (22)$$

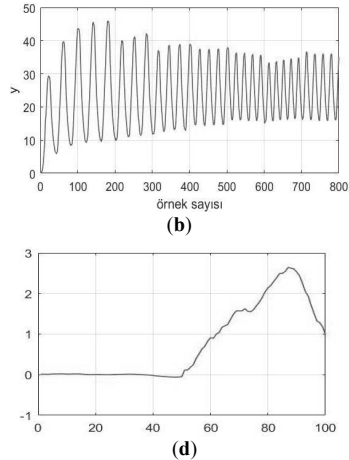
IV. DENEYSEL SONUÇLAR

Önerilen kontrol yöntemi gerçek zamanlı olarak pnömatis yapay kas sisteminde farklı deneysel şartlar altında doğrulandı. Kurulan deney düzeneği Bölüm 2 'de açıklanmıştır. Kontrol için gerekli olan pozisyon bilgisi lineer potansiyometre kullanılarak ölçüldü. Kontrol algoritması, Matlab/Simulink programı kullanılarak 10 ms örneklem zamanıyla uygulanmıştır. PAM sisteminin çalışma aralıkları şu şekilde tespit edilmiştir:

$$y \in [0;50] \text{ mm}, P \in [0;6] \text{ bar}, u \in [0;10] \text{ V}$$

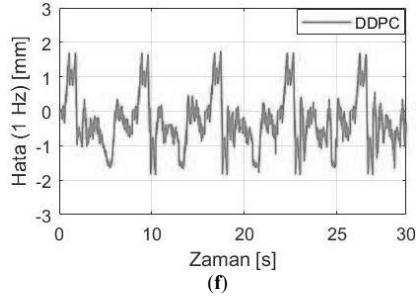
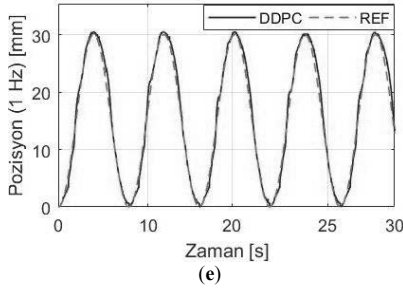
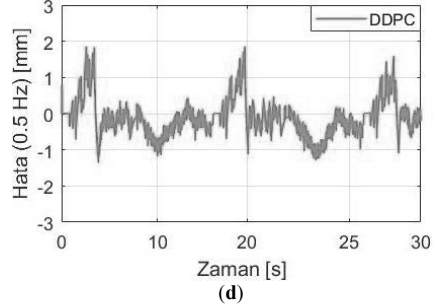
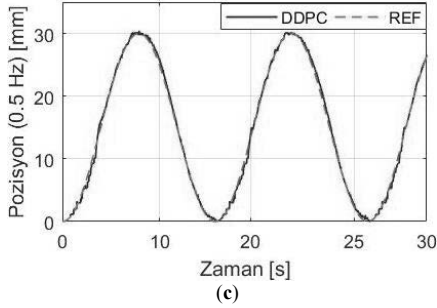
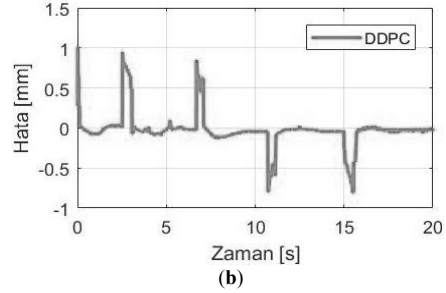
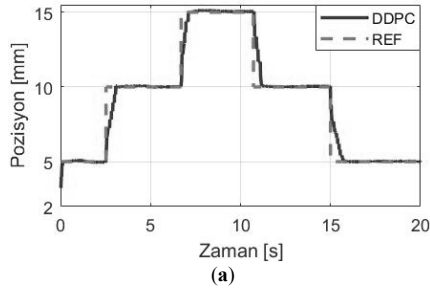
Burada y , P ve u sırasıyla PAM'ın konumu, basıncı ve oransal valfin sürüş voltaj aralığıdır. DDPC algoritmasını tasarlamak için gerekli olan alt-uzay matrisleri sistemin açık çevrim cevabı gözlemlenerek bulunmuştur. Bu deney, girişler için 0.7 büyüklüğündeki değişken frekanslı sinüzoidal sinyal ile gerçekleştirilmiştir. İdentifikasyon sonucu olarak öngörü matrisleri L_w (100×100), L_u (100×100) olarak belirlenmiştir. Hankel matrisler dizisi $N_c = 15$, $f = 100$ ve $p = 50$ olarak ayarlanmış, ağırlık matrisleri $W_Q = I_{f_l}$ ve $W_R = I_{f_m}$ dir.

Tasarlanan giriş sinyali, çıkış sinyali, oransal valfi çalıştırmak için uygulanan kontrol sinyali ve kontrol kazançları $K_{\Delta W_p}$ ve $K_e = 0.0518$ Şekil 3'de gösterilmiştir. İdentifikasyon verilerini kullanarak, kontrol kazançları denklem (19) ile hesaplanabilir. Kazançların hesaplanmasındaki önemli parametreler N_c, f, p, W_Q, W_R . Sistem için hesaplanan optimum parametreler yukarıdaki gibidir.



Şekil 3. İdentifikasyon verileri: (a) Sinüs giriş sinyali (b) Ölçülen çıkış sinyali (c) Kontrol giriş sinyali (d) Kontrol kazançları:

$$K_{\Delta W_p} \text{ ve } K_e = 0.0518.$$



Şekil 4. Deneysel çalışma 1-2 (a) Çok basamaklı referans takip sonuçları (b) Takip sonuçlarının 2.5 s ile 6.6 s arasında gözlemlenmesi. (c) Sinüs referans takip sonuçları 0.5 Hz (d) Sinüs referans takip hata sonuçları 0.5 Hz (e) Sinüs referans takip sonuçları 1 Hz (f) Sinüs referans takip hata sonuçları 1 Hz

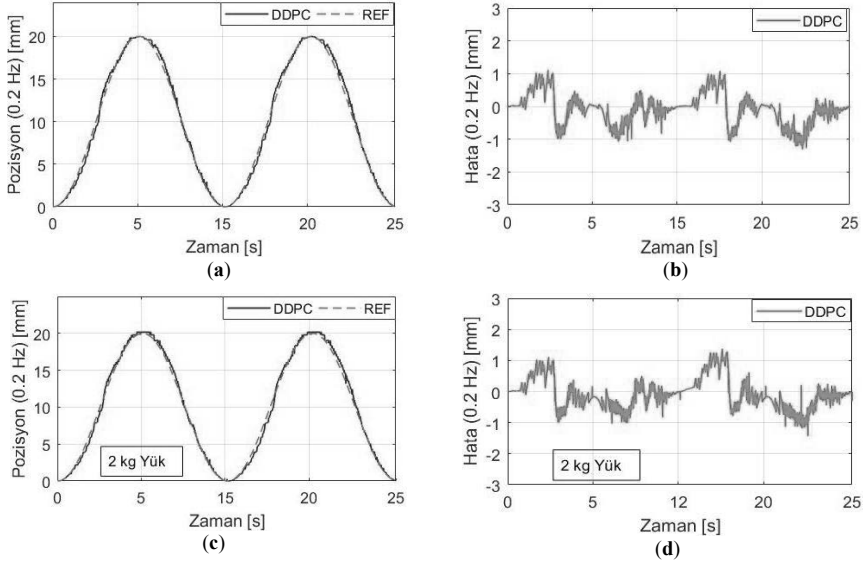
DDPC algoritması pnömatik kas sistemine Bölüm 3.2’de sunulan teoriye dayanarak pozisyon kontrolü için uygulanmıştır. Konum takip sinyalleri, çok basamaklı sinyal ve çeşitli frekanslarda sinüs sinyali (0.5, 1, 0.2 Hz) yüksüz ve yüklü olarak uygulanmıştır.

Deneyel çalışma 1: İlk deney çalışmasında PAM’ın çok basamaklı yörüngeyi takip etmesi performansı gözlemlenmiştir. Referans sinyali [5-15] mm aralığında ve yüksüz durumda uygulanmıştır. Sonuçlar Şekil 4’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, önerilen kontrolör sistemi farklı referans noktalarında doğru bir şekilde sürdü. Sistemin oturma zamanı yeteri kadar iyi olmamasından dolayı, referans yörünge değişikliği arasındaki hatalar yüksektir. Çok adımlı referans yörünge için ortalama kalıcı durum hatası 0.142 mm ve en büyük hata 1.012 mm’dir. Sonuç olarak, önerilen kontrol algoritması iyi bir referans takibine ve kalıcı durum performansına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Deneyel çalışma 2: İkinci deneyde PAM’ın sinüs sinyal yörüngeyi takip etmesi performansı gözlemlenmiştir. Referans

sinyal 30 mm genişliğinde, farklı frekanslarda (0.5 ve 1 Hz) ve yüksüz durumda uygulanmıştır. Deneyel sonuçlar Şekil 4’de gösterilmiştir. Sinüs sinyal takibindeki en büyük hata sırasıyla 0.5 Hz ve 1 Hz de 1.85 mm ve 2.04 mm’dir. Kontrol algoritmasının gürbüz olmasından dolayı, PAM’ın pozisyon takibi farklı frekanslarda yakın aralıklarla sağlandı [Kontrol hataları: 0.5 Hz $\rightarrow \pm 0.64$ mm ve 1 Hz $\rightarrow \pm 1.08$ mm]. Sonuç olarak, önerilen kontrolör iyi gürbüz ve histerezis performansına sahiptir.

Deneyel çalışma 3: Üçüncü deney çalışmasında PAM’ın 20 mm genlikli ve 0.2 Hz frekanslı sinüs sinyal yörüngeyi takip etmesi performansı dört koşul altında gözlemlenmiştir. Bu koşullar yüksüz ve yüklü durum (2 kg) dan meydana gelmektedir. Sinüs sinyal takibindeki büyük hatalar sırasıyla yüksüz ve 2 kg’da 0.98 mm ve 1.17 mm’dir. Sonuç olarak, önerilen kontrol algoritması kontrol hatasını her zaman kabul edilebilir bir aralıkta tutabildiği gözlemlenmiştir. [Kontrol hataları: yüksüz $\rightarrow \pm 0.34$ mm ve 2 kg $\rightarrow \pm 0.45$ mm].



Şekil 5. Deneysel çalışma 3 (a) Sinüs referans takip sonuçları 0.2 Hz-yüksüz (b) Sinüs referans takip hata sonuçları 0.2 Hz (c) Sinüs referans takip sonuçları 0.2 Hz-2 kg yüklü (d) Sinüs referans takip hata sonuçları 0.2 Hz-2 kg yüklü

Veri güdümlü öngörülü kontrolörün bütün deneyel çalışmalar için karekök ortalama (RMS) hataları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Deneyel çalışmaların performansı

Deney	Referans Sinyal	RMS Hata	
		DDPC	
Deney 1 Yüksüz	Çok Basamaklı Sinyal	0.278	
Deney 2 Yüksüz	Sin 30 mm	0.5 Hz	0.485
		1 Hz	0.848
Deney 3 Yüksüz	Sin 20 mm	0.2 Hz	0.357
Deney 3 Yük 2 kg	Sin 20 mm	0.2 Hz	0.408

V. SONUÇLAR

Geliştirilen veri güdümlü öngörülü kontrol algoritması ilk defa bir pnömatik sistem üzerinde uygulanmıştır. Veri güdümlü yapısıyla, önerilen kontrolör değişken değildir ve matematiksel modele ihtiyaç duymadan farklı tür sistemlere kolayca uyarlanabilmektedir.

PAM sisteminin pozisyon takip performansını gözlemlemek için deneyel bir kurulum geliştirilmiştir. Farklı referans sinyalleri ve yük koşulları gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Genel olarak referans sinyallerini takip performansı değerlendirildiğinde, önerilen kontrolör kabul edilebilir bir davranış sergilemiştir. Deneyel sonuçlar önerilen kontrolörün doğrusal olmayan sistemlerde iyi dinamik özellik, güçlü gürbüzlük ve verimlilik gösterdiğini onaylamıştır.

KAYNAKÇA

- [1] H. Schulte, "The characteristic of the McKibben artificial muscle," In The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics, 1961, 94-115.
- [2] G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, I. Arvanitakis, and S. Manesis, "Piecewise affine modelling and constrained optimal control for a pneumatic artificial muscle," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61, 904-916.
- [3] X. Shen, "Nonlinear model-based control of pneumatic artificial muscle servo systems," Control Engineering Practice 2010, 18, 311-317.
- [4] Y. Liu, X. Zang, X. Liu, and L. Wang, "Design of a biped robot actuated by pneumatic artificial muscles," Bio-Medical Materials and Engineering 2015, 26, 311-317.
- [5] Q. Ai, C. Zhu, J. Zuo, W. Meng, Q. Liu, S. Xie, and M. Yang, "Disturbance-estimated adaptive backstepping sliding mode control of a pneumatic muscles-driven ankle rehabilitation robot," Sensors 2018, 18, 66.
- [6] T. Takuma, S. Nakajima, K. Hosoda, and M. Asada, "Design of self-contained biped walker with pneumatic actuators," In SICE 2004 Annual Conference, Sapporo, Japan, 4-6 Aug. 2004; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2004.
- [7] N. Saga, and T. Saikawa, "Development of a pneumatic artificial muscle based on biomechanical characteristics," Advanced Robotics 2008, 22, 761-770.
- [8] D. Reynolds, D. Repperger, C. Phillips, and G. Bandry, "Modeling the dynamic characteristics of pneumatic muscle," Annals of Biomedical Engineering 2003, 31, 310-317.
- [9] K.C. Wickramatunge, and T. Leephakpreeda, "Empirical modeling of dynamic behaviors of pneumatic artificial muscle actuators," ISA Transactions 2013, 52, 825-834.
- [10] A. Pujana-Arrese, A. Mendizabal, J. Arenas, R. Prestamero, and J. Landa, "Modelling in Modelica and position control of a 1-DoF set-up powered by pneumatic muscles," Mechatronics 2010, 20, 535-552.
- [11] X. Zhu, G. Tao, B. Yao, and J. Cao, "Adaptive robust posture control of a parallel manipulator driven by pneumatic muscles," Automatica 2008, 44, 2248-2257.
- [12] J. Cao, S.Q. Xie, and R.Das, "MIMO sliding mode controller for gait exoskeleton driven by pneumatic muscles," IEEE Transactions on Control Systems Technology 2018, 26, 274-281.
- [13] A. Hildebrandt, O. Sawodny, R. Neumann, and A. Hartmann, "Cascaded control concept of a robot with two degrees of freedom driven by four

- artificial pneumatic muscle actuators," American Control Conference, Portland, OR, USA, 8-10 June 2005; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2005.
- [14] M.K. Chang, "An adaptive self-organizing fuzzy sliding mode controller for a 2-DOF rehabilitation robot actuated by pneumatic muscle actuators," *Control Engineering Practice* 2010, 18, 13-22.
 - [15] R.M. Robinson, C.S. Kothera, R.M. Sanner, and N.M. Wereley, "Nonlinear control of robotic manipulators driven by pneumatic artificial muscles," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2016, 21, 55-68.
 - [16] G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, and S. Manesis, "Pneumatic artificial muscles: A switching model predictive control approach," *Control Engineering Practice* 2013, 21, 1653-1664.
 - [17] E. Todorov, C. Hu, and A. Simpkins, "Movellan, J. Identification and control of a pneumatic robot," In 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, Tokyo, Japan, 26-29 Sept. 2010; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2010.
 - [18] A. Bleicher, M. Schlaich, Y. Fujino, and T. Schauer, "Model-based design and experimental validation of active vibration control for a stress ribbon bridge using pneumatic muscle actuators," *Engineering Structures* 2011, 33, 2237-2247.
 - [19] J. Fan, J. Zhong, J. Zhao, and Y. Zhu, "BP neural network tuned PID controller for position tracking of a pneumatic artificial muscle," *Technology and Health Care* 2015, 23, 231-238.
 - [20] C.J. Chiang, and Y.C., "Neural network fuzzy sliding mode control of pneumatic muscle actuators," *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2017, 65, 68-86.
 - [21] X. Jiang, Z. Wang, C. Zhang, and L. Yang, "Fuzzy neural network control of the rehabilitation robotic arm driven by pneumatic muscles," *Industrial Robot: An International Journal* 2015, 42, 36-43.
 - [22] S. Ahmed, H. Wang, and Y. Tian, "Model-free control using time delay estimation and fractional-order nonsingular fast terminal sliding mode for uncertain lower-limb exoskeleton," *Journal of Vibration and Control* 2018, 24, 5273-5290.
 - [23] J. Sun, G. Xing, and C. Zhang, "Data-driven predictive torque coordination control during mode transition process of hybrid electric vehicles," *Energies* 2017, 10, 441.
 - [24] F. Smarra, A. Jain, T. Rubeis, D. Ambrosini, A. D'Innocenzo, and R. Mangharam, "Data-driven model predictive control using random forests for building energy optimization and climate control," *Applied Energy*, 2018, 226, 1252-1272.
 - [25] P. Van Overschee, and B.L. De Moor, "Subspace Identification for Linear Systems: Theory—Implementation—Applications," Springer Science & Business Media, Belgium, 2012; pp. 1-197.
 - [26] P. Van Overschee, and B. De Moor, "Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems," *Automatica* 1994, 30, 75-93.
 - [27] R. Kadali, B. Huang, and A. Rossiter, "A data driven alt-uzay approach to predictive controller design," *Control Engineering Practice* 2003, 11, 261-278.
 - [28] N. Mardî, "Data-Driven Subspace-Based Model Predictive Control," Doctor of Philosophy, RMIT University, 2010.
 - [29] V. Meidanshahi, B. Corbett, T.A. Adams, and P. Mhaskar, "Alt-uzay model identification and model predictive control based cost analysis of a semi continuous distillation process," *Computers & Chemical Engineering* 2017, 103, 39-57.
 - [30] A.N. Venkat, I.A. Hiskens, J.B. Rawlings, and S.J. Wright, "Distributed MPC strategies with application to power system automatic generation control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 2008, 16, 1192-1206.
 - [31] E. Kaplanoglu, T. Arsan, and H. Varol, "Predictive control of a constrained pressure and level system," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Science* 2015, 23, 641-653.

İHA ile GPS Kullanmadan Kapalı Alanların Haritasının Çıkartılması

Ömer ORAL

Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Ankara, Türkiye
Email: omer.oral@metu.edu.tr

Dr. Ali Emre TURGUT

Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Ankara, Türkiye
Email: aturgut@metu.edu.tr

Dr. Kutluk Bİlge ARIKAN

Makine Mühendisliği Bölümü
TED Üniversitesi
Ankara, Türkiye
Email: kutluk.arikan@tedu.edu.tr

Özetçe —Bu çalışma, kapalı alanlarda engellere çarpmaksızın keşif ve haritalama yapabilen döner kanatlı bir insansız hava aracını konu edinmektedir. Söz konusu platform arama kurtarma operasyonlarında, kolluk kuvvetlerinin düzenleyeceği baskınlarda, insanların ulaşması mümkün olmayan kapalı alanlarda (mağaralar, radyoaktif tehdit bulunan kapalı alanlar vb.) kullanılabilen niteliktedir. Yazılım alt yapısı olarak birçok programlama dilinde kodlamaya elverişli, test platformuna ihtiyaç duymadan da çalışabilen ROS (Robot Operating System) kullanılmıştır. Üç boyutlu benzetim ortamı için hava araçları açısından uygun bir zemine sahip ROS tabanlı çalışan Gazebo simülatörü tercih edilmiştir. Bir keşif algoritması tasarlanarak paket haline getirilmiş ve diğer araştırmacıların faydalanabileceği şekilde Github ortamına yüklenmiştir. Bu algoritma, ileride test ortamına geçildiğinde rahatlıkla inşa edilebilecek bir harita tasarlanarak sinanmıştır. Hava aracı üzerinde ultrasonik mesafe ölçer (SONAR), lazer mesafe ölçer (LIDAR), atalet ölçüm sistemi (IMU) ve ultra geniş bant teknolojisini kullanan algılayıcı bulunmaktadır. Çalışmada daha sonraki çalışmalarda da kullanılacak olan performans metrikleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler—İnsansız hava aracı, haritalama, keşif, kapalı alan, lazer mesafe ölçer, ROS, Gazebo, hector quadrotor, hector slam, eş zamanlı konum tespiti ve haritalama.

I. GİRİŞ

Otonom çalışan hava araçları, robot dünyasındaki teknolojik gelişmeler ile birlikte araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiş durumdadır. Ucuz, küçük ve kolay elde edilebilir olan quadrotorlar, yüksek faydalı yük taşıyabilmeleri ve birçok temel fonksiyonu beraberinde getirmeleri sebebiyle tercih sebebi olmaktadır[1]. Otonom robotları konu alan haritalama ve keşif amaçlı birçok yaklaşım bulunmaktadır. Aracın ilk konumunun tespiti, hedefe yönelik en uygun rotanın belirlenmesi, rota üzerinde engellere çarpmadan ilerlenebilmesi ve ortamdaki hareketli-hareketsiz nesnelerin saptanması üzerinde çalışılma yapılmış yöntemlerde karşılaşılan başlıca zorluklardır. Bu yaklaşımların birçoğu açık alanlarda kullanılabilirken çok az sayıda yaklaşım kapalı alanlarda kullanılabilir. GPS (Global Positioning System) ve mikro elektrik-mekanik sistemlerle donatılmış insansız hava araçları ile dış ortamlarda uçuş ve haritalama mümkün olmaktadır[2], [3], [4], [5]. Kapalı ortamlarda GPS'in kullanılamaması bu alandaki çalışmaların kısıtlı ve zor olmasının başlıca sebebidir. Daha önce keşfedilmemiş kapalı alanların haritasını elde etme işlemi, arama-kurtarma operasyonları ve polis baskınları gibi

tehlikeli görevlerde ön plana çıkmaktadır[6], [7]. Geçmişte benzer hadiselerde karşılaşılan can kayıpları bu görevlerin önemini doğrular niteliktedir. Otonom bir şekilde haritalama yapmak amacıyla suda, yerde ve havada mesafe kateden birçok robot kullanılmaktadır. Su altı robotları kendi içerisinde sınıflara ayrılırken, yer ve hava robotları aynı kapalı alanda kullanılabilirliği sebebiyle birbirlerine rakip durumdadır. Yer robotları istikrarlı bir kontrole sahip olmaları nedeniyle tercih edilirken hava robotları yerdeki engellerden bağımsız bir şekilde yüksek hareket ve manevra kabiliyetine sahip oldukları için tercih edilmektedir.

Bu çalışmada ROS tabanlı çalışan üç boyutlu benzetim aracı Gazebo kullanılmıştır. Sistem, kablosuz işaretleyicilerin kapalı alana önceden yerleştirilmiş olduğu varsayımı ile kullanılmıştır. İlerideki çalışmalarda hava aracının, öncelikle UWB (Ultra Wide-Band) vericileri hassas bir şekilde alana yerleştirilmesi ve bu vericilerin yerlerini kayıt altına alması bu varsayımın hareket noktası olmuştur. Ayrıca Ros-Gazebo yapısına, yazılım mimarisine ve keşif algoritmasına da çalışma içerisinde yer verilmiştir. Özetle bu çalışmada, iki farklı algoritma ve tasarlanmış bir harita kullanılarak UWB teknolojisi yardımıyla simülasyon gerçekleştirilip ilerideki çalışmalarda da kullanılacak olan performans metrikleri incelenmiştir. Benzer çalışmalarda farklı olarak ultrasonik mesafe ölçer, lazer mesafe ölçer, atalet ölçüm sistemi ve ultra geniş bant teknolojisi ile çalışan alıcı-verici kombinasyonu kullanılarak iç mekanlarda haritalama işlemi yapılmıştır.

II. LİTERATÜR ÖZETİ

Günümüzde keşif, gözlem ve arama-kurtarma gibi zorlu ve tehlikeli görevler insansız ve otonom çalışabilen hava araçları ile yapılabilmektedir. Bu görevlerin kapalı bir alanda icra edilmesi durumunda GPS sinyali kullanılamayacağı için hava aracı üzerinde çalışan yazılım ve donanım sistemleri karmaşıklıklaştırmaktadır.

Aışıl gelmemiş sensörlerin kullanıldığı iç mekan haritalama işlemi için farklı yöntemler bulunmaktadır. Kapalı alanların keşfi için kontrol kolaylığı sebebiyle yer robotları sıklıkla kullanılmaktadır [8], [9]. Yer robotları ile yapılan araştırmalarda genellikle lazer mesafe ölçüm aygıtı ve atalet ölçüm aygıtı kullanılırken Omara ve arkadaşları lazer mesafe ölçüm aygıtı yerine daha ekonomik olması sebebiyle Kinect kullanmışlardır[10]. İnsansız hava robotları kullanılarak

yapılan iç mekan taramalarında daha farklı sensörler yer almaktadır. Johnson[11] tezinde bir quadrotorun kapalı alandaki kontrolünü kamera yardımıyla görüntü işleyerek sağlarken Ahrens ve arkadaşları[12] görüntü işleme sayesinde hem quadrotorun engellere çarpmasını önleyip hem de iç mekanın haritasını çıkartmayı başarmışlardır. Hava aracı üzerinde, kamera ek olarak ultrasonik sensör ve kızılötesi sensörün de kullanıldığı bir araştırma Roberts ve arkadaşları[13] tarafından yapılmıştır. Bu sensörler yardımıyla çarpışmadan kaçınarak insansız hava aracının kontrolünün sağlanması hedeflenmiş ve test ortamında başarılı sonuçlar alınmıştır. Ahtelika ve arkadaşları [14] stereo kamera ve lazer mesafe ölçüm cihazı kullanarak GPS'in çalışmadığı bir ortamda yer tespiti, obje tespiti ve keşif görevlerini gerçekleştirmişlerdir. Lazer mesafe ölçer, atalet ölçüm cihazı ve mikrokopter kullanarak bu çalışmaya paralel bir şekilde haritalama ve keşif yapan Grzonka ve arkadaşları[15] farklı olarak yükseklik ölçümünde bir ayna yardımıyla lazer ışınlarını yere yansıtmayı ve lazer izlerini takip etmeyi tercih etmişlerdir. Birçok çalışmada atalet ölçüm aygıtı ve lazer ölçüm aygıtı robotun kendisini konumlandırması için yeterli görülürken bazı araştırmalarda kablosuz yer tespit sistemlerine yer verilmiştir. RFID olarak adlandırılan ve aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılan bu kablosuz sistemler, RF (Radio Frequency) sinyallerini kullanarak robotun yerini tespit etmesini sağlamaktadır[16], [17]. Başka bir kablosuz yer tespit sistemi olan UWB(Ultra Wide-Band) teknolojisi ile de robot konumlandırması yapmak mümkündür. Oldukça maliyetli bir sistem olması nedeniyle çok tercih edilmeyen bu haberleşme için Kempke ve arkadaşları[18] yeterli bir performans gösteren ve ekonomik olan bir sistem kurmayı başarmışlardır.

Araştırmaların büyük çoğunluğunda ROS kullanılırken üç boyutlu benzetim aracı olarak Gazebo, USARSim, V-REP ve Webots kullanılmıştır[19], [20]. SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) algoritması olarak Hector Slam, GMap-ping ve Laser Scan Matcher kullanılmıştır[21].

III. HAVA ARACI VE GÖREV YÜKLERİ

A. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracı(Quadrotor)

Üç boyutlu benzetim programında kullanılmak üzere seçilen platform, "URDF" (Universal Robot Description Format) özel formatında "hector-quadrotor-urdf" ROS paketi şeklinde tanımlanmıştır. Bu detaylı model, robot uzuvlarının ve eklemlerinin görüntü bilgisiyle ve beraber konum ve yönelimlerini de içeren bir bilgiye sahiptir. Ayrıca robota ait çarpışma bölgesi tanımına da sahip olması sayesinde Gazebo üzerinde çeşitli algoritmalar sınanabilmektedir. Paket içerisinde hazır olarak bulunan ve şekil 1'de altında entegre edilmiş lazer mesafe ölçer ile birlikte gösterilen Hector Quadrotor modeline gerekli algılayıcılar ve sensörler eklenerek çalışma için elverişli hale getirilmiştir.

Hector-quadrotor paketini hazırlayan Meyer ve arkadaşları [22] uçuş dinamiğine ilişkin hesaplamaları yaparken aşağıdaki formulleri kullanmışlardır.

$$\dot{p}^n = v^n \quad (1)$$

$$\dot{v}^n = m^{-1} C_n^b F \quad (2)$$

$$\dot{w}^b = J^{-1} M \quad (3)$$



Şekil 1: Hector Quadrotor Model[22]

Denklemlerde platform üzerine etki eden tüm yükler F ve tüm torklar M ile gösterilirken, dünya referans merkezi baz alınarak hesaplanan ilgili pozisyon ve hız bilgisi p^n ve v^n ile gösterilmiştir. C_n^b robot referans sistemini dünya referans sistemine çeviren dönüşüm matrisidir. w^b robot referans sistemindeki açılal hızı işaret etmektedir. İtme gücü ve motor dinamiği gibi birçok hesaplama da yer verilen çalışmada [22] hız bilgisini temel alan bir kaskad PID kontrol sistemi kullanılmıştır.

B. Lazer Mesafe Ölçüm Aygıtı(LIDAR)

Lazer mesafe ölçüm aygıtı olarak "Hokuyo UTM-30LX LIDAR" seçilmiş ve platformun altına monte edilmiştir. Lazer mesafe ölçer, 40 Hz bandında bir tarama hızına ve 270° görüş açısına sahiptir. Detaylı bilgi ilgili adreste mevcuttur[23].

C. Atalet Ölçüm Aygıtı(IMU)

Atalet ölçüm aygıtı (IMU) hava aracının istikrarlı kontrolü ve hareketi için gerekli en önemli sensördür. Dünya referans sistemine göre hava aracının açılal hızının ve ivmelerinin ölçülmesinden sorumludur. Bu elektronik birim; içerisinde bulunan ivmeölçer sayesinde 3 eksenle ivme ölçerken jiroskop sayesinde 3 eksenle dönme kuvveti ölçebilmektedir. Platformun havadaki duruşu ve yönünü bilinmeden dünya referans sistemine göre ivmelerinin hesaplanması oldukça zor olduğu için atalet ölçüm aygıtları günümüzde birçok uzay aracının ve insansız hava aracının vazgeçilmez parçası konumundadır.

D. Sonik Mesafe Ölçüm Aygıtı(SONAR)

Sonik sensörler insanların duymayacağı düzeyde yüksek frekans ses dalgaları yayar ve bu dalgaların nesnelere çarpıp dönmesi arasındaki süreyi hesaplayarak mesafe ölçümü yapar. 30 metreye kadar ölçüm yapabilen çeşitleri mevcuttur. Bu çalışmada hava aracının altına yerleştirilerek aracın yerden yüksekliğinin kontrol edilmesi hedeflenmiştir. Yaygın bir şekilde kullanılan sonik sensöre ait görsel Şekil 3'te paylaşılmıştır.

E. Kablosuz Konum Tespit Sistemi(UWB)

Ultra geniş-bant tekniği hassas konumlandırma, veri toplama ve izleme gibi amaçlarla kullanılan bir radyo iletişim sistemidir. Geleneksel teknolojilere kıyasla belirli bir zaman içerisinde daha fazla veri alışverişi yapılmasına olanak tanır. Düşük güç spektral yoğunluğu olan UWB, haberleşmeler için ayrılan diğer frekans spektrumlarını hiç karışma olmaksızın kullanabilmektedir. Keşif robotları için 20 km/s gibi oldukça yüksek bir hızda bile 10 cm hassasiyetinde tespitler yapabilmektedir. Konumu yaklaşık olarak bilinen üç adet verici

aktif işaretleyici olarak alanda bulunurken bir adet alıcı ise konum tespiti için hava aracı üzerine yerleştirilmiş bulunmaktadır.

IV. YAZILIM ALTYAPISI

Çalışma esnasında basit, kullanışlı ve açık kaynak kodlu olan Linux dağıtımlarından Ubuntu 16.04 LTS (Xenial Xerus) kullanılmıştır. LTS(Long Term Support) versiyonu iki yıllık periyotlarla çıkartılmaktadır. Bu sayede kullanıcılara, daha önceki versiyonlardaki hataların düzeltildiği ve çıkabilecek sorunlara hızlı bir şekilde cevap verildiği bir sürüm sunmaktadır. Bu bölümde çalışma esnasında kullanılan yazılımların kabiliyetlerinden ve versiyonlarından bahsedilecektir. Zira aynı programlara ait farklı sürümlerin kullanılması zaman zaman uyumluluk sorunlarına yol açabilmektedir.

A. ROS(Robot Operating System)

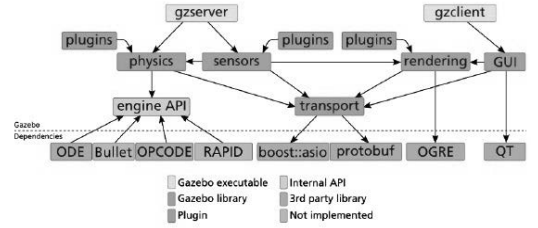
Türkçe karşılığı "Robot İşletim Sistemi" olan ROS akla gelen ilk çağırışının aksine robot ve robot bileşenlerini kontrol etmeye yarayan açık kaynak kodlu bir yazılımdır. Yakın bir zamana kadar sadece Linux tabanlı işletim sistemleri üzerinde çalışırken son zamanlarda MATLAB - Robotics System Toolbox içerisinde yer almaya başlamasıyla diğer platformlarda da kullanılır hale gelmiştir. Abone olma ve yayın yapma mantığıyla çalışan ROS, rosmaster ağ tabanlı sunucu sayesinde düğümler üzerinden haberleşmeyi sağlar. Birçok kütüphaneyi içinde barındırması, bilinen en yaygın programlama dillerinin çoğuyla entegre olabilen bir yapısının olması sebebiyle araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Ayrıca açık kaynak kodlu olması, farklı araştırmacıların çalışmalarını kendi projenizde kullanmaya da olanak tanımaktadır. Şu an daha güncel ve desteklenen bir dağıtımı olmasına rağmen bu çalışmaya yönelik araştırmaların başladığı esnada tavsiye edilen Ubuntu sürümüyle daha uyumlu olması sebebiyle ROS Kinetic Kame dağıtımı kullanılmıştır.

B. Gazebo

Üç boyutlu benzetim aracı olan Gazebo robotlar ve nesnelerin benzetimini gerçekleştirirken nesneler arası fiziksel etkileşimi de gösterebilen bir yazılımdır. Linux tabanlı çalışan bu sistemde sahneleme görevini açık kaynak kodlu grafik motoru olan OGRE üstlenmektedir. Fizik, sahneleme, sensör vb. gibi birçok kütüphane Gazebo içerisinde yer almaktadır. Bu kütüphaneler sensör verilerini üretip fizik döngülerini çalıştıran sunucu(gzserver) ve kullanıcı etkileşimi ile görselleştirmeyi sağlayan istemci(gzclient) tarafından kullanılır. İçerisinde gürlütlü eklenmiş sensörler barındırması, gerçek ortamlara yönelik robot tasarımında kolaylık sağladığı için araştırmacıların tercihi olmaktadır. Bu çalışmada Gazebo 7 sürümü kullanılmıştır. Gazebo kurulumu, ROS ile entegrasyonu, yer ve hava robotlarıyla çeşitli örneklemeler ilgili dökümanda detaylarıyla açıklanmıştır [24]. Gazebo yazılım mimarisi, içerisinde gerçekleşen haberleşmeler ve bağlantılar Şekil 2'te paylaşılmıştır.

C. Rviz(ROS Visualization Tool)

Rviz ROS'un görselleştirme aracıdır. Rviz paketi sayesinde ROS üzerinde aktif olan başlıklar ve mesajlar görselleştirilebilir. Bir robotun çıkarttığı harita ve arkasında bıraktığı



Şekil 2: Gazebo Yazılım Mimarisi[25]

iz gözlemlenebileceği gibi robota gerçekleştirmesi için çeşitli komutlar da verilebilir.

V. KONUM TESPİTİ VE HARİTALAMA

Bu çalışmanın en önemli ve en zorlu bölümü doğru bir şekilde konum ve harita bilgisi elde edebilmektir. Bu doğrultuda kullanılan teknolojiler ile donanım ve yazılım aşağıdaki alt başlıklarda açıklanmıştır. Robot, atalet ölçüm cihazı ve sensörleri vasıtasıyla aldığı verileri dev bir matrise işler. Matris; ilgili lokasyon hakkında bilgi yok ise "-1", ilgili lokasyon boş ise "0" ile doldurulur. Bunların dışındaki kalan alanlar, obje yoğunluğuna göre bir değer alır ve o değer matrise işlenir. Bu işlem haritanın tamamı elde edilene kadar tekrarlanır ve sürekli doğrulanır.

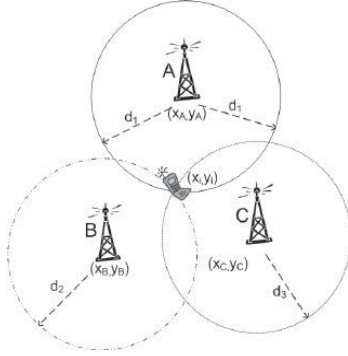
A. Ultra Geniş Band Teknolojisi ile Konum Tespiti

Ultra geniş band (UWB) teknolojisi kapalı alanların keşfi için kullanılabilen yenilikçi bir kablosuz aktif işaretleyici sensör sistemidir. Özellikle görevine başladığı ilk anda hava aracının konumunu tespit edebilmesini oldukça kolaylaştırmaktadır. Sonrasında ise diğer sensörlerden gelen veriler ile çapraz kontrol yapılarak elde edilecek haritanın güvenilirliği artırılmaktadır. Diğer kablosuz sistemlerle karşılaştırıldığında düşük enerji tüketimine sahip olması ve etrafındaki objelerin etkilerinden bağımsız çalışabilmesi gibi avantajları sebebiyle UWB teknolojisi öne çıkmaktadır. Buna karşın UWB teknolojinin konumlandırma görevinde kullanılabilmesi için en az 3 adet UWB vericinin haritalama başlamadan önce alana yerleştirilmesi gerekmektedir. Arama - kurtarma ve baskın türü operasyonlarda bu sistemin kullanımı zorlaştıran en önemli etkenlerden biri budur. Ancak hava aracı eş zamanlı konum tespiti ve haritalamaya başlamadan önce üzerinde bulunan vericileri hassas bir şekilde alana yerleştirebilir ve bu lokasyonları daha sonra kullanmak üzere kaydedebilir. Sistemin çalışma mantığı Şekil 3'te gösterilirken, UWB vericilerden gelen bilgi doğrultusunda konum tespitinde kullanılan çember denklemleri Denklem 4'teki gibidir.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = R_i^2, i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

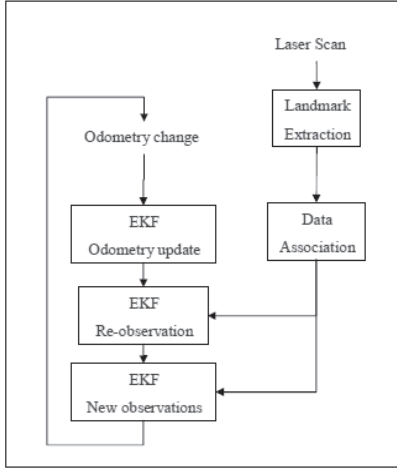
B. Eş Zamanlı Konum Tespiti ve Haritalama (SLAM)

SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) eş zamanlı olarak harita çıkartılması ve robot konumlandırılması



Şekil 3: Trilaterasyon Yöntemi ile UWB Haberleşmesi

işlemine verilen isimdir. Bu işlemin zorluğu tanımından rahatlıkla anlaşılabilir. Doğru bir konumlandırma için haritaya ihtiyaç duyulurken, harita çıkartmak için de doğru bir konumlandırma gereklidir. SLAM tamamiyle otonom olarak çalışan robotlarda çözülmesi gereken başlıca problemlerden biridir. 80'li yılların ortalarından bu yana birçok metod geliştirilmiştir. Farklı filtreler kullanılarak gerçekleştirilebilen bu işlemi Riisgard ve arkadaşları[26] EKF kullanarak Şekil 4'teki gibi açıklamıştır.



Şekil 4: Eş Zamanlı Konum Tespiti ve Haritalama Akış Şeması

İlk olarak robot, sadece hareket organlarından (tekerlek, pervane vb.) gelen bilgi ile konumunu yaklaşık olarak tespit eder. IMU (Atalet Ölçüm Aygıtı) bu odometri bilgisini sağlayan merkez konumundadır. Sonra diğer sensörler kullanarak (LIDAR (Lazer Ölçüm Aygıtı, kamera vb.) ve alandaki detaylar bir önceki konumla kıyaslanarak daha doğru bir konum bilgisi elde edilir. Bu işlem anlatılan sırayla sürekli olarak tekrarlanır ve eş zamanlı konum tespiti ve harita-

lama yapılır. Bu şekilde robotun gerçekte bulunduğu konuma oldukça yakın bir konum bilgisi sağlanmış olur.

Bu çalışmada ROS üzerinde çalışan ve özellikle arama-kurtarma operasyonları için geliştirilmiş "Hector SLAM" paketi kullanılmıştır. Bu paket altında yer alan ve eş zamanlı konum tespiti ve haritalama yapmaya yarayan "Hector Mapping, Hector IMU Tools ve Hector Nav Msgs" gibi birçok farklı paket bulunmaktadır.

VI. GEZİNİM ALGORİTMALARI

Bu çalışmada, daha sonra yapılacak olan çalışmalarda kullanılacak olan performans metriklerini belirlemek ve sınamak hedeflenmiştir. Bu sebeple bilinmeyen alanların keşfi için bilinen en basit algoritmalarından biri olan duvar takip algoritmasının yanında yeni bir algoritma sunulmuş ve kullanılmıştır.

A. Duvar Takip Algoritması

Duvar takip algoritması; genellikle labirent tipi kapalı alanların çözülmesi veya haritasının çıkartılması için kullanılan basit fakat yüksek başarıya sahip bir yöntemdir[27]. Robotun duvarı sağına veya soluna alarak ilerlediği iki farklı uygulaması mevcuttur. Bu çalışmada hava aracı, sol tarafında kalan duvarı kontrol ve takip ederek mesafe katetmektedir. Robotun karşılaştığı durumlara göre vereceği kararları gösteren tablo aşağıdaki gibidir,

Tablo I: Duvar Takip Algoritması Karar Tablosu

Sol	Sağ	Ön	Eylem
0	X	X	Saat yönünün tersine dön
1	0	X	Düz ilerle
1	1	X	Saat yönünde dön

Duvar takip algoritması karar tablosu incelendiğinde; herhangi bir duvar tespit edilemediyse "0", duvar tespit edildiyse "1" kullanıldığı görülmektedir. "X" sembolü ise ilgili alanın, diğer yönlerden gelen bilgi doğrultusunda dikkate alınmadığını göstermektedir.

B. Açıklık Bulma Algoritması

Açıklık bulma algoritması; sürekli yeni hedef noktaları belirleyerek ve bu hedeflere giderken yoluna çıkan engellerden kaçarak gezinim yapmaya olanak sağlar. Öncelikle tarama alanı içerisinde bir köşe noktası tespit edilir. Sonra bu noktanın sağında ve solunda kalan mesafelerin koordinatları kullanılarak bir ortalama alınır ve köşe noktasına belirli bir açı yapacak şekilde yeni hedef noktası belirlenir. Hedefe doğru ilerlemek için bir hız vektörü oluşturulur. Hava aracının önüne bir engel çıkması halinde engele olan mesafe ve doğrultu kullanarak kaçış amaçlı ters yönde bir hız vektörü daha oluşturulur. Robot gezinim esnasında bu hız vektörlerinin bileşkesi yönünde hareket eder. Yeni hedefler belirleyerek ve engellerden kaçınarak yapılan bu gezinim haritanın tamamı elde edilinceye kadar devam eder.

VII. PERFORMANS METRİKLERİ

Bu bölümde algoritmaların kıyaslanarak birbirlerine üstün geldikleri yönlerinin tespit edileceği performans kriterleri açıklanmıştır.

A. Mesafe

Robotun katettiği mesafe kullanılarak algoritmalar ve senaryolar arasında kıyaslama yapılabilir. Bu ölçüt ne kadar küçük ise algoritma o derece başarılı sayılır. Ek olarak bu ölçüt, haritası çıkartılan alan ile oranlanarak daha doğru bir kriter ortaya konabilir.

$$P_d = \frac{d[m]}{A[m^2]}$$

d robotun izlediği yola ait mesafeyi metre cinsinden değerini ifade eder. A keşfedilecek olan alanın m^2 cinsinden değerini belirtir. P_d ise robotun aldığı yolun haritanın toplam alanına oranlanmasıyla ortaya çıkan performans kriterine işaret etmektedir.

B. Zaman

Hava aracının keşfedilmemiş alanda haritalama işlemi yaparken geçirdiği toplam süredir. t ile gösterilen ve saniye cinsinden hesap edilecek bu performans kriteri üç boyutlu benzetim aracı vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir.

C. Entropi

Rastgele değişkenler ile ilgili belirsizliği ölçmeye yarayan Shannon Entropi bilgi kuramının en önemli kıstaslarından biridir. Bu konsept hesaplamaya ismini veren Claude E. Shannon tarafından 1948 yılında ortaya konulmuştur[28]. Shannon Entropi aşağıdaki gibi formüle edilmiştir,

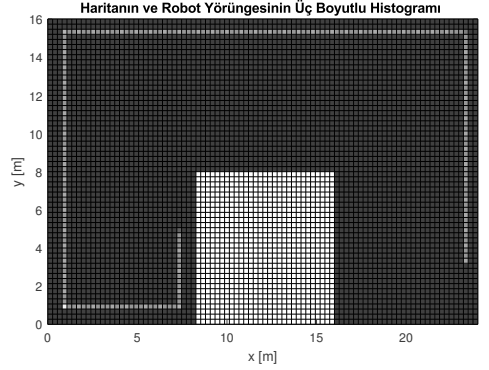
$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_b p(x_i) \quad (5)$$

Denklemden Shannon Entropi $H(x)$ ile ifade edilirken, kaynağa ait olasılık $p(x_i)$ ile gösterilmiştir. Logaritma tabanı olan b ise genellikle hesaplamalarda 2 olarak kabul edilmektedir.

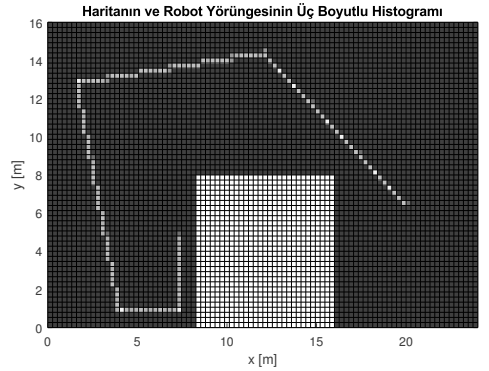
İki farklı algoritma kullanılarak otonom gezinim ve haritalama yapılmıştır. Haritaya ve robotun harita üzerinde bıraktığı ize dair üç boyutlu histogramlar aşağıdaki gibidir,

MATLAB üzerinde yazılan bir kod yardımıyla, histogramlar "hist3()" komutuyla elde edildikten sonra "entropy()" komutuyla ilgili entropileri hesaplanmıştır. Entropi değerinin büyük olması haritada daha fazla iz bırakarak haritalama yapıldığına işaret ettiği için entropi değeri küçük olan gezinim algoritması daha başarılı sayılmaktadır. İki farklı otonom gezinim algoritmasına ait entropi değerleri "Sonuçlar ve Değerlendirme" bölümünde paylaşılmıştır.

Lacivert renkli kısımlar kapalı alanın haritasını sembolize etmektedir. Farklı renge ait noktalar ise robotun otonom gezinimi sonrası arkasında bıraktığı ize işaret etmektedir. Farklı renkli karelerin olasılıksal olarak hesaplanmasıyla entropi bilgisi elde edilir. Bu bilgi odadaki düzensizliği ifade eder. Entropi değerinin yüksek çıkması odadaki farklı renge sahip karelerin miktarının fazlalığıyla mümkün olabilir. Bir başka deyişle robotun harita üzerinde bıraktığı iz ne kadar artarsa düzensizlik de o kadar artar. Dolayısıyla entropi değerinin düşük olması algoritmayı başarılı kılmaktadır.



Şekil 5: Örnek Haritanın Duvar İzleme Algoritmasıyla Keşfini Yansıtan Üç Boyutlu Entropi Grafiği



Şekil 6: Örnek Haritanın Açıklık Bulma Algoritmasıyla Keşfini Yansıtan Üç Boyutlu Entropi Grafiği

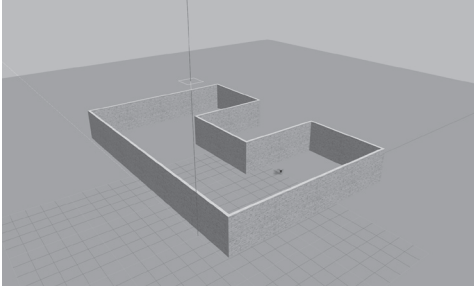
VIII. SİMÜLASYON

Üç boyutlu benzetim aracında tasarlanan kapalı alan üzerinde iki farklı keşif algoritması test edilmiştir. Kullanılan harita tasarlanırken ileride test ortamında oluşturulabilecek nitelikte olmasına dikkat edilmiştir. Otonom gezinim ve haritalama yapan hava robotuna ait üç boyutlu görselleştirme aracından alınan görüntüler aşağıdaki gibidir,

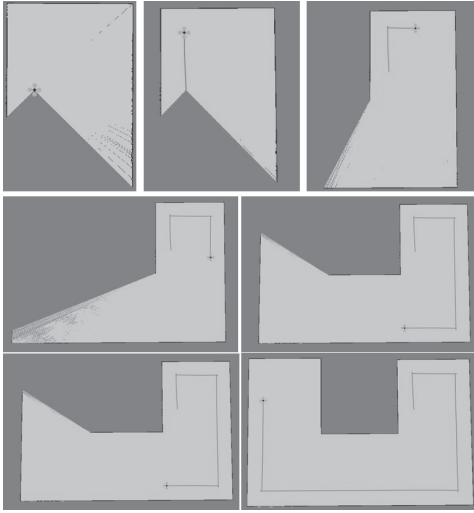
IX. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Gazebo üzerinde iki farklı otonom gezinim algoritmasıyla üç boyutlu benzetimi yapılan hava aracına ait performans metrikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Metriklerin ifade ettiği karşılıklar ilgili bölümlerde açıklanmıştır.

Metrikler kıyaslandığında açıklık bulma algoritmasının duvar takip algoritmasına göre daha başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir. Haritalama işlemi daha az yol alarak, daha kısa sürede ve daha düşük entropi değerleriyle tamamladığı için rakibi olan duvar takip algoritmasına üstün gelmiştir.



Şekil 7: Algoritmaları Test Etmek için Tasarlanmış Harita



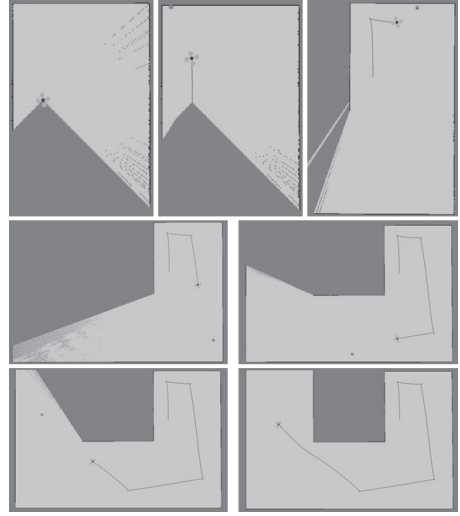
Şekil 8: Duvar Takip Algoritması ile Otonom Gezinim ve Haritalama

Tablo II: Algoritma Performans Kıyaslama Tablosu

	Duvar Takip Algoritması	Açıklık Bulma Algoritması
d [m]	55.7	36.6
P_d [1/m]	0.174063	0.114375
t [s]	155	116
H	0.2588	0.2139

KAYNAKÇA

- [1] J. M. Abatti, "Small power: The role of micro and small UAVs in the future," no. November, pp. 165–197, 2005. [Online]. Available: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a463472.pdf>
- [2] J. Stumpf, "On the Design and Use of a Micro Air Vehicle to Track and Avoid," 2016.
- [3] S. Scherer, S. Singh, L. Chamberlain, and M. Elgersma, "Flying fast and low among obstacles: Methodology and experiments," *International Journal of Robotics Research*, vol. 27, no. 5, pp. 549–574, 2008.
- [4] T. Templeton, D. H. Shim, C. Geyer, and S. S. Sastry, "Autonomous vision-based landing and terrain mapping using an MPC-controlled



Şekil 9: Açıklık Bulma Algoritması ile Otonom Gezinim ve Haritalama

unmanned rotorcraft," *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, no. May 2014, pp. 1349–1356, 2007.

- [5] I. Afanasyev, A. Sagitov, and E. Magid, "ROS-based SLAM for a gazebo-simulated mobile robot in image-based 3D model of Indoor environment," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 9386, pp. 273–283, 2015.
- [6] T. Tomic, K. Schmid, P. Lutz, A. Domel, M. Kassecker, E. Mair, I. Grix, F. Ruess, M. Suppa, and D. Burschka, "Toward a fully autonomous UAV: Research platform for indoor and outdoor urban search and rescue," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 19, no. 3, pp. 46–56, 2012.
- [7] Y. Nakagawa, B. Weiss, A. Jacoff, S. Tadokoro, and E. Messina, "Test arenas and performance metrics for urban search and rescue robots," no. October, pp. 3396–3403, 2004.
- [8] F. Çakmak, E. Uslu, M. Balçılar, S. Yavuz, and M. F. Amasyalı, "ROS Uyumlu Robot Platformu Gerçeklenmesi ROS Compatible Robot Platform Implementation," 2014.
- [9] A. Araújo, D. Portugal, M. S. Couceiro, and R. P. Rocha, "Integrating Arduino-Based Educational Mobile Robots in ROS," *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, vol. 77, no. 2, pp. 281–298, 2014.
- [10] H. I. M. A. Omara and K. S. M. Sahari, "Indoor mapping using kinect and ROS," *2015 International Symposium on Agents, Multi-Agent Systems and Robotics, ISAMSR 2015*, pp. 110–116, 2016.
- [11] N. Johnson, "Vision-Assisted Control of a Hovering Air Vehicle in an Indoor Setting," *Engineering and Technology*, no. August, 2008.
- [12] S. Ahrens, D. Levine, G. Andrews, and J. P. How, "Vision-based guidance and control of a hovering vehicle in unknown, gps-denied environments," *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2643–2648, 2009.
- [13] J. F. Roberts, T. S. Stirling, J.-C. Zufferey, and D. Floreano, "Indoor Flight," *European Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (EMAV2007)*, no. September, pp. 17–21, 2007.
- [14] M. Achtek, J. Williams, M. J. Owen, and M. C. O'Donovan, "A functional polymorphism in the succinate-semialdehyde dehydrogenase (aldehyde dehydrogenase 5 family, member A1) gene is associated with cognitive ability," *Molecular Psychiatry*, vol. 9, no. 6, pp. 582–586, 2004.

- [15] S. Grzonka, G. Grisetti, and W. Burgard, "A fully autonomous indoor quadrotor," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28, no. 1, pp. 90–100, 2012.
- [16] G. Mao, B. Fidan, and B. D. Anderson, "Wireless sensor network localization techniques," *Computer Networks*, vol. 51, no. 10, pp. 2529–2553, 2007.
- [17] H. Liu, J. Liu, P. Banerjee, and H. Darabi, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," *Ofthalmologia (Bucharest, Romania : 1990)*, vol. 35, no. 1, pp. 39–42, 1991.
- [18] B. Kempke, P. Pannuto, and P. Dutta, "SurePoint," pp. 318–319, 2016.
- [19] L. Pitonakova, M. Giuliani, A. Pipe, and A. Winfield, "Feature and performance comparison of the V-REP, Gazebo and ARGoS robot simulators," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 10965 LNAI, pp. 357–368, 2018.
- [20] F. M. Noori, D. Portugal, R. P. Rocha, and M. S. Couceiro, "On 3D simulators for multi-robot systems in ROS: MORSE or Gazebo?" *SSRR 2017 - 15th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, Conference*, pp. 19–24, 2017.
- [21] L. Fang, A. Fisher, S. Kiss, J. Kennedy, C. Nagahawatte, R. Clothier, and J. L. Palmer, "Comparative evaluation of time-of-flight depth-imaging sensors for mapping and SLAM applications," *Australasian Conference on Robotics and Automation, ACRA*, vol. 2016-Decem, pp. 285–291, 2016.
- [22] G. Biggs, N. Ando, and T. Kotoku, "Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots," *Lecture Notes in Computer Science/Lecture Notes in Artificial Intelligence*, vol. 6472, no. January, pp. 180–191, 2010. [Online]. Available: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-642-17319-6{\%}5Cnhttp://link.springer.com/10.1007/978-3-642-17319-6>
- [23] HOKUYO, "Scanning Rangefinder Distance Data Output/URG-04LX-UG01 Product Details | HOKUYO AUTOMATIC CO., LTD." [Online]. Available: <https://www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=166>
- [24] R. Sinekli, "Multi-Robot Simülâtörü," 2013.
- [25] "Gazebosim.Org." [Online]. Available: <http://gazebosim.org/>
- [26] S. Riisgaard and M. Blas, "SLAM for Dummies," *Massachusetts Institute of Technology Projects*, pp. 1–127, 2004. [Online]. Available: http://ocw.cupide.org/NR/rdonlyres/Aeronautics-and-Astronautics/16-412JSpring-2005/9D8DB59F-24EC-4B75-BA7A-F0916BAB2440/0/laslam{_}blas{_}repo.pdf
- [27] J. R. B. del Rosario, J. G. Sanidad, A. M. Lim, P. S. L. Uy, A. J. C. Bacar, M. A. D. Cai, and A. Z. A. Dubouzet, "Modelling and Characterization of a Maze-Solving Mobile Robot Using Wall Follower Algorithm," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 446–447, no. July, pp. 1245–1249, 2013.
- [28] S. P. T. Tripathy Amit Kar, Samarjit Pal, Tandra, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. April 1928, pp. 379–423, 1948.

Elektrikli Araçlarda Enerji Optimizasyonu ve Model Parametrelerinin Kestirimi

Mehmet Ali Gözüküçük
Özyeğin Üniversitesi / FEV Türkiye
İstanbul, Türkiye
ali.gozukucuk@ozu.edu.tr

H. Fatih Uğurdağ
Özyeğin Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
fatih.ugurdag@ozyegin.edu.tr

Taylan Akdoğan
Özyeğin Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
taylan.akdogan@ozyegin.edu.tr

Öz — Modern bir elektrikli aracın enerji verimliliğinin birincil belirleyicisi enerji yönetim algoritmasıdır. Dolu bir akü ile gidilebilecek maksimum mesafe (menzil), elektrikli araçların satış sırasında son kullanıcının en önem verdiği kriterler arasındadır. Menzilin artırılması için araç ağırlık optimizasyonu, aksesuarların enerji sarfiyatlarının azaltılması, akü kapasitesinin artırılması gibi yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada öncelikle lokasyon ve yol topolojisi içeren rota planlaması Google Maps üzerinden alınır. Alınan rota eşit sayıda bölümlere ayrılır. Araç ağırlık, yol sürtünme katsayısı ve hava sürtünme katsayısı parametrelerinin ilk tahmini değerlerine göre enerji optimizasyonu algoritması çalıştırılarak planlanan rota üzerinde tanımlanmış her bir bölüm için hız değerleri belirlenir. Oluşturulan hız matrisi araç kontrol ünitesine gönderilerek aracın sürülmesi için gerekli tork üretilir. Araç sürüşe başladığı andan itibaren rota üzerindeki ilk 20 bölüme ait harcanan gerçek zamanlı enerji kaydedilir. Bu ilk 20 bölümde alınan datalar parametre kestirim algoritmasında kullanılarak aynı anda gerçek araç ağırlığı, yol sürtünme katsayısı ve hava sürtünme katsayısı hesaplanır. Hesaplanan yeni parametreler ile enerji optimizasyon algoritması tekrardan çalıştırılarak hız matrisi oluşturulur ve araca gönderilir. Yeni hız matrisi araca gönderildikten sonra rota üzerindeki her bir bölümde gerçekleşen gerçek zamanlı enerji değerleri kaydedilmeye devam eder. Literatürde bulunan çalışmaların en fazla iki parametre kestirimi üzerine yapılmaktadır. Çalışmalar ağırlık ve yol eğimi ile yol yüzey durumu parametrelerinin kestirimi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak, üç farklı parametre (ağırlık, yol sürtünme katsayısı ve hava sürtünme katsayısı) değerlerini aynı anda tahmin ederek en küçük enerji sarfiyatı için gerekli hız profili oluşturulmaktadır. Enerji optimizasyon ve parametre kestirim algoritmaları Matlab ortamında geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler — Dinamik Programlama, Elektrikli Araçlar, Gradient Descent

1. GİRİŞ

Hava kirliliği ve dünya nüfusunun artışıyla orantılı olarak artan enerji talebi oluşan iklim değişikliğini direkt etkilemekte ve bu durum otomotiv sektörünün önündeki en büyük riski oluşturmaktadır. Bu bağlamda, hava kirliliğini şehir merkezlerinde azaltabilmek için kamu yönetimleri ve otomotiv üreticileri çözüm arayışı içerisinde bulunmaktadır. Bu açıdan elektrikli araçlar, özellikle şehir için toplu taşımadaki emisyon seviyesini düşürmek için kullanımı en hızlı çözümü sunmaktadır.

Shenzhen, Çin’de 2016 yılı içerisinde elektrikli otobüsler, dizel otobüslere göre %72,9 daha az enerji tüketimi

gerçekleştirmiştir. Ayrıca Shenzhen Belediyesi Ulaşım Komitesi raporuna göre, 2017 yılı içerisinde toplam 1.353 milyon ton CO₂ salınımı düşmüştür [1]. Çin’de otobüs üretici firmaları, Pazar talebini karşılamak için elektrikli otobüs üretimini arttırmış ve elektrikli araç yıllık üretim ve satış adetleri, geçmiş 5 yıllık addetlerin 101 kat fazlası olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca Çin merkezi hükümeti elektrikli araç üretimi ve kullanımını çok güçlü olarak destekleyerek, elektrikli araç geliştirme çalışmalarını teşvik edip öne çıkarma amacıyla bir grup sübvasyon teşvikleri ve vergi indirimleri yayınlamıştır.

Elektrikli araçlarda uygulanan enerji yönetimi CO₂ salınımının düşürülmesinde kritik rol oynamaktadır ve bu yüzden yüksek verimli güç aktarma organlarının tasarımı yapılmaktadır. Bu durumda optimize edilmiş sürüş sistemi enerji tüketiminin düşürülmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Bu bağlamda bazı çalışmalar araç hız profilinin belirlenmesi ile ilgili problemler üzerinde incelemelerde bulunmaktadırlar [2]-[4]. [2] aynı prblem üzerine çalışarak, problemi DC motor ile sürülen elektrikli araç konfigürasyonları için kapalı formda çözmüştür. Çözümleri tersine dayalı metodoloji ve biraz modelleme öngörülerine dayanmaktadır. [3] problem çözümü için, bizim projemizde de kullandığımız gibi sürekli mıknatıslı motor ile sürülen elektrikli araç konfigürasyonu üzerine çalışmış. [2] ve [3] bizim projemizde de olduğu gibi Dinamik Programlama yöntemini kullanarak enerji optimizasyon çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarda enerji minimizasyonu gerçekleştiren araç hız yörüngesi, sürüş bitiş zamanı ve mesafe kısıtları formülize edilerek ve çözümlenerek Optimal Kontrol Problemi ile belirlenmiştir.

Güç Yönetimi stratejileri teorik olarak en temelde, bulgusal kontrol tekniği [5][6], statik optimizasyon metodu [7][8] ve dinamik optimizasyon metodu olarak üç farklı şekilde sınıflandırılabilir. [5], konvansiyonel araç üzerinde optimizasyon problemi üzerine çalışmış ve verimli bir güç aktarma organı oluşturmak için aşağıda belirtilen üç yolun tanımlanması gerektiğini belirtmiştir:

- Mevcut güç aktarma sistemi bileşenlerinin optimizasyonu (örneğin, içten yanmalı motorlar için doğrudan enjeksiyon teknolojisi)
- Yeni güç aktarma sistemi bileşenlerinin geliştirilmesi (örneğin, yakıt hücre teknolojisi, volanlar ve ultrakapasitörler)
- Mevcut güç aktarma sistemi bileşenlerinin hibrit güç aktarma organları ile kombinasyonu.

[6]'da yapılan çalışmada ise paralel hibrit araçlar (PHV) için yakıt ekonomisini optimize edecek bir güç denetleyicisi geliştirmiştir. Geleneksel Paralel Hibrit Araç kontrolcüsü sadece içten yanmalı motor işlemini optimize eder ve Hibrit teknolojisinin potansiyelini kullanamaz. [6]'da sunulan güç denetleyicisi, İçten Yanmalı Motor, Elektrik Motoru ve Yüksek Voltaj Akü gibi tüm ana Paralel Hibrit Araç bileşenlerinin çalışmasını optimize eder.

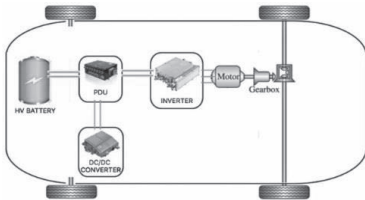
Referans [9]'da, ortak eksenli seri çift motorlu sürüş sisteminin konfigürasyonunu inceleyerek güç yönetim stratejisinin optimizasyon amaçlı fonksiyonu dinamik programlama metodu kullanarak kurgulanmıştır. Geleneksel sürüş kontrol stratejilerine göre, dinamik programlama kullanılarak kurgulanan kontrol stratejisi ile tekli mod stratejide %8,0 çift mod stratejide ise %8,8 oranında enerji masrafının düşürüldüğü gözlemlenmiştir.

[10], ise optimize edilmiş sürüş problemini Optimal Kontrol Problemi olarak belirlemiş ve belirli bir zaman ve mesafede aracın enerji tüketiminin minimize edilmesini Dinamik Programlama metodu ile hedeflemiştir.

Bu çalışmada bir elektrikli araç ile seyahat edilecek iki nokta arasında harcanacak enerjinin en küçük olabilmesi için Dinamik Programlama yöntemi ile enerji optimizasyonu yapılmış ve araç için bir hız profili oluşturulmuştur. Çalışmada bölüm II'de detayları verilen sürekli mıknatıslı motor ile sürülen elektrikli ticari araç konfigürasyonu kullanılmış araç dinamik ve bileşen parça modelleri Matlab ortamında hazırlanmıştır. Dinamik prgramlama algoritmaları bölüm III'de anlatıldığı gibi yine Matlab ortamında hazırlanmış ve araç kontrol sistemine entegre edilmiştir. Literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalarda araç parametrelerinin tanımlı olduğu ve zamanla değişmeyeceği varsayılmış ve enerji optimizasyon çözümlemeleri bu varsayım üzerine kurulmuştur. Bu projede araç parametrelerinin zamanla değişebileceği veya önceden bilinmeyeceği varsayımı ile başlayıp bölüm IV'de belirtildiği gibi araç parametrelerinin kestirimi 'Gradient Descent' algoritmaları ile yapılmış ve sonrasında enerji optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. 'Gradient Descent' algoritmaları Matlab ortamında geliştirilmiş ve bu çalışmanın özgünlüğüne katkı sağlamaktadır.

II. ELEKTRİKLİ ARAÇ GÜÇ AKTARMA ORGANLARI KONFIGURASYONU VE MODELİ

Bu bölümde, Plug-in Elektrikli Araç (PEV) modeli tanıtılmıştır. Söz konusu araç, 75 kW e-motorlu, 66 kWh lityum-iyon akü kapasitesine ve 18,5 oranına sahip bir şanzımana sahip bir akülü elektrikli ticari minibüstür. Güç aktarma organının yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Plug-in BEV Güç Aktarma Organları Konfigürasyonu

Araç modeli temel olarak üç bölüme ayrılmaktadır:

a) Araç üzerine etkiyen kuvvetlerin toplamı olan araç dinamik modeli,

b) Akü kimyasal değerlerinin dahil olduğu eşdeğer elektriksel devreden oluşan akü modeli,

c) Laboratuvar test sonuçlarından elde edilen tablolardan oluşan motor ve invertör modelleri olarak sınıflandırılmaktadır.

A. Araç Dinamik Modeli

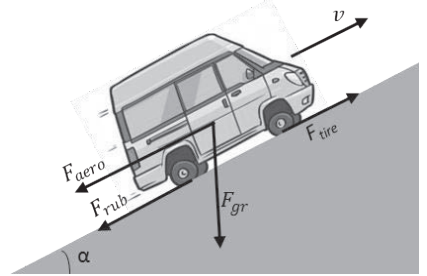
Taşıt dinamikleri, Newton'un ikinci hareket yasası $\Sigma f = m dv/dt$ [11]'ye dayanan bir nokta kütesinin hareketini temsil eder. Bir araç üzerinde boyuna yönde etki eden kuvvetler aşağıda verilmiştir:

Aero-dinamik direnç kuvveti F_{aero}

Lastik üzerindeki kuvvet F_{tire}

Yuvarlanma direnç kuvveti F_{rub}

Yerçekimi kuvveti F_{gr}



Şekil 2. Araç Üzerine Etkiyen Kuvvetler

Şekil 3, bir araç üzerinde etki eden bütün kuvvetleri boyuna yönde göstermektedir. Aerodinamik direnç kuvveti F_{aero} , sürtünme katsayısı (CD), aracın ön alanı (A), hava yoğunluğu (ρ) ve araç hızı karesinin (V) bir ürünüdür. Aerodinamik direnç kuvvetinin denklemi aşağıda verilmiştir:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_D A V^2 \quad (1)$$

Yuvarlanma direnci kuvveti F_{rub} , yol düzgünlüğünü ve araç lastiklerinin özellikle deformasyonları ile ilgili durumunu dikkate almaktadır. Yuvarlanma direnci kuvveti F_{rub} denklemi aşağıda verilmiştir:

$$F_{rub} = m_u m_{ss} g \quad (2)$$

F_{tire} , aracın yerçekimi kuvvetine karşı yokuş yukarı taşımak için gereken kuvvet miktarını tanımlar. Denklemi aşağıda verilmiştir:

$$F_{tire} = G_b T_{rq} / R_{tire} \quad (3)$$

F_{gr} yerçekimi kuvvetinin yol eğimine göre araç üzerine etkisi tanımlamaktadır. Denklem aşağıda belirtilmiştir:

$$F_{gr} = m_{ss} g \sin(\alpha) \quad (4)$$

Araç hızındaki değişim oranı, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$\frac{dv}{dt} = (1 / (m_{ss} + I_m G_b^2 / (n_g R_{tire}^2))) (F_{tire} - F_{rub} - F_{aero} - F_{gr}) \quad (5)$$

Elektrikli aracımıza özgü (1) - (5) denklemlerindeki parametreler aşağıdaki Tablo 1'de özetlenmiştir. Parametreler yolda çalışan ticari bir araçtan elde edilmiştir.

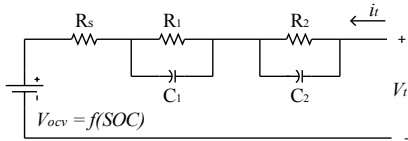
Tablo 1
Elektrikli Araç Parametreleri

Sembol	Değer	Birim	Tanım
R_{ine}	0.354	m	Lastik yarıçapı
g	9.81	m/s ²	Yerçekimi sabiti
m_{ji}	0.009	N	Yol sürtünme
C_D	0.55	-	Hava sürtünme katsayısı
A	5	m ²	Araç ön alanı
m_{ss}	4200	kg	Araç kütlesi
n_g	0.9	-	Lastiğe özgü katsayısı
I_m	0.11	Kg.m ²	Motor ataleti
G_B	18.5	-	Toplam dişli oranı

B. Akü Modeli

Pil, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren birbirine bağlı çoklu elektro-kimyasal hücrelerden oluşur [12]. Büyük bir pil takımındaki çoklu pil hücreleri, geleneksel fosil yakıtın yüksek enerji yoğunluğuna yaklaşmak için kullanılır. Günümüzde elektrikli araçlarda farklı tipte piller kullanılmaktadır. Bu makale, diğer akü tiplerine kıyasla üstün nitelikleri nedeniyle, aynı zamanda ulaşım uygulamaları için en yaygın şekilde kullanıldığı için bir lityum-iyon akü paketini dikkate almaktadır.

Akü modelinin iki RC ağ temsili, benzer ileri çalışmalarda yaygın olarak bulunan yaklaşıklık seviyesidir ve bu yüzden bu çalışma için Şekil 3'te gösterildiği gibi seçilmiştir. İki RC ağının matematiksel denklemleri Denk. (5) ve (6):



Şekil 3. İki RC Ağ Akü Modeli

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{C1} \\ \dot{V}_{C2} \\ \dot{SOC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \\ SOC \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ \frac{1}{C_2} \\ \frac{1}{C} \end{bmatrix} i_t \quad (5)$$

$$V_t = V_{ocv}(SOC) + R_S i_t + V_{C1} + V_{C2} \quad (6)$$

V_{C1} ve V_{C2} , sırasıyla C1 ve C2 kapasitörlerinin voltajlarıdır ve SoC, akünün şarj durumunu gösterir. Tahmin edilmesi gereken parametreler R_S , R_1 , R_2 , C1 ve C2'dir. Akü kapasitesi C'nin sabit olduğu kabul edilir. Akü açık devre voltajı V_{ocv} (SoC), SoC'daki SoC-ocv eşleşmesini temsil eden sekizinci dereceden bir polinom denklemdir [13].

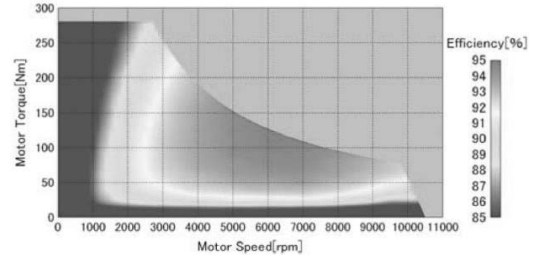
Bir EV'nin akü paketi, hücreleri paralel ve seri bağlayarak oluşturulabilir. Çalışma voltajı seviyesinin yanı sıra seri hücre sayısı elde etmek ve mevcut talebi karşılamak için paralel hücre sayısı tespit edilmelidir. Ayrıca tek bir şarjla kullanım süresini

de belirler. Bununla birlikte, tüm bu hücrelerin bağlanması hücrelerin ısı radyasyonu nedeniyle yönetimi, dengelemeyi, şarj etmeyi, boşaltmayı ve soğutma işlemlerini daha karmaşık hale getirir. Ambalajın dışına yakın yerleştirilen hücreler, ısılarını dış ortama yayabilir. Bununla birlikte, paketin ortasındaki hücreler birbirlerini bile ısıtır. Hücre modelinin sıcaklık bağımlılığı doğası nedeniyle, tek hücrelerin SoC'ları birbirinden farklıdır. Bu gerçek, her bir hücrenin açık devre voltajı, SoC seviyesine göre değiştiği için çeşitli sorunlara neden olur. Bu nedenle, paralel hatların terminal voltajları farklıdır ve bu voltaj farkları her bir satırdaki akımları değiştirir.

Akü modellemesi, tüm hücreler için SoC, şarj etme ve boşaltma işlemleri sırasında aynı olsaydı basit olurdu. Bununla birlikte, anlamlı bir dinamik model için, SoC farklılıklarının dikkate alınması gerekir. Bu sorunu çözebilecek uygun bir optimizasyon yazılımı gerekir. Bir maliyet fonksiyonuyla, paralel hatlardaki akımlar bir hattın voltaj farklarını en aza indirerek belirlenebilir. Bu yöntem hücre modelinden bağımsızdır. Hücredeki RC ağlarının sayısı, çözücü değiştirilmeden gereksinimlere göre değiştirilebilir.

C. Motor ve Inverter Modeli

Akünün yanı sıra motor ve invertör elektrikli bir aracın en önemli parçalarıdır. Sürücü bloğu sürücüdün bir tork talebi alır ve elektrik motorunu çalıştırmak için uygun bir miktarda akım oluşturur, böylece araç sürücü tarafından istenildiği şekilde hızlanır. Motor invertörü verimlilik verileri, tork-hız eğrisinden elde edilir. Böyle bir tork-hız eğrisi, Şekil 4'te aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4. Motor Inverter Verim Haritası [14]

III. ENERJİ OPTİMİZASYONU VE DİNAMİK PROGRAMLAMA

Önceden belirlenmiş herhangi iki nokta arasında yapılan sürüş için minimum enerji tüketimini sağlamak amacıyla geliştirilen optimizasyon metodlarından literatürde en yaygın olarak kullanılan Dinamik Programlama Optimizasyon metodu kullanılmıştır[15]. Genel anlamda ayrık zamanlı dinamik sistemin kontrolü denklem (8)'de ki gibi tanımlanmaktadır[16].

$$x_{t+1} = x_t + f(t, x_t, u_t), \quad t = 0, 1, \dots, T-1 \quad (8)$$

x_t , n-boyutlu bir vektör olarak sistem durumunu belirtmektedir ve u_t , m-boyutlu bir vektör olarak, t zamanında kontrol veya eylemi belirtir. Maliyet fonksiyonu denklem (9)'da belirtildiği gibi her bir kontrol sırasının maliyetini tanımlar.

$$C(x_0, u_{0:T-1}) = \varphi(x_T) + \sum_{t=0}^{T-1} R(t, x_t, u_t) \quad (9)$$

$R(t, x_t, u_t)$, u 'nın zaman t ve durum x 'deki eylemi ile ilişkili bir maliyet fonksiyonudur. $\varphi(x_T)$, durum x_T 'nin zaman T 'deki bitişi ile ilişkili bir maliyet fonksiyonudur. Optimal kontrol problemi, $C(x_0, u_{0:T-1})$ fonksiyonunu minimize eden $u_{0:T-1}$ sırasını bulmaktır. Problemin standart çözümü dinamik programlama ile yapılır. Optimum maliyet fonksiyonu denklem (10)'da ki gibi belirtilir.

$$J(t, x_t) = \min_{u_t: T-1} (\varphi(x_T) + \sum_{s=t}^{T-1} R(s, x_s, u_s)) \quad (10)$$

Denklem (9)'un en küçük değeri $J(0, x_0)$ ile tanımlanır. $J(t, x)$, tüm x 'ler için $J(t+1, x)$ 'den özyinelemeli aşağıdaki şekilde olarak hesaplanır:

$$\begin{aligned} J(t, x) &= \varphi(x) \\ J(t, x_t) &= \min_{u_t: T-1} \left(\varphi(x_T) + \sum_{s=t}^{T-1} R(s, x_s, u_s) \right) \\ &= \min_{u_t} \left(R(t, x_t, u_t) + \min_{u_{t+1}: T-1} \left(\varphi(x_T) + \sum_{s=t+1}^{T-1} R(s, x_s, u_s) \right) \right) \\ &= \min_{u_t} (R(t, x_t, u_t) + J(t+1, x_{t+1})) \\ &= \min_{u_t} (R(t, x_t, u_t) + J(t+1, x_t, f(t, x_t, u_t))) \end{aligned} \quad (11)$$

(4)'te belirtilen enerji denklemi kullanılarak enerji optimizasyonu sağlanmıştır.

Buna göre aşağıdaki maliyet fonksiyonu (12) ve kısıtlamalar (13) tanımlanmıştır.

$$J = \sum_{s=0}^{s=s_f} E(s) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} s(0) &= s_0 & s(t_f) &= s_f \\ v(0) &= v_0 & v(t_f) &= v_f \end{aligned} \quad (13)$$

Enerji denklemi her bir tekrarlamada çözümlenerek optimum hız profili elde edilmiştir. Dinamik programlama optimizasyonunda Bellman prensibi kullanılarak optimum hız profili son durumdan zamanda geriye doğru arama yaparak basitleştirilmiştir. Belman optimum prensibine göre [15], "optimum yöntemi, başlangıç ve sonuç durumu ne olursa olsun, daha sonra alınan kararlar ile oluşan optimum yöntem, ilk verilen kararda elde edilen durum yöntemi ile uyumlu seçmelidir". Bellman prensibine göre Denklem (8)'de belirtilen dinamik sistemdeki zamanı 0'a doğru artacak şekilde belirtilirse, $t+1$ 'in yerine $t+dt$, $dt \rightarrow 0$ olacak şekilde eklenerek denklem (14) elde edilir.

$$x_{t+dt} = x_t + f(t, x_t, u_t)dt \quad (14)$$

İlk konum sabitlenerek $x(0) = x_0$ olarak belirlenir ve son konum ise serbest bırakılır. Problem kontrol sinyali $u(t)$ 'nin, $0 < t < T$ ve $u(0 \rightarrow T)$ belirtilerek bulunmasıdır. Bu durumda denklem (15) oluşturularak bu denklemin en küçük olduğu durumlarda kontrol sinyali bulunur.

$$C(x_0, u(0 \rightarrow T)) = \varphi(x_T) + \int_0^T d\tau R(\tau, x(\tau), u(\tau)) \quad (15)$$

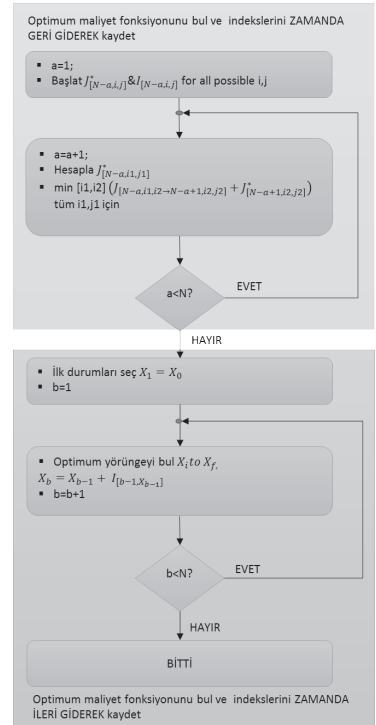
Yol maliyeti $x(0 \rightarrow T)$ ve $u(0 \rightarrow T)$ yörüngelerine bağlı zamana göre integral alınırsa denklem (11) aşağıda belirtildiği üzere denklem (16)'ya dönüşür.

$$J(t, x) = \min_u (R(t, x, u)dt + J(t+dt, x + f(x, u, t)dt))$$

$$\approx \min_u (R(t, x, u)dt + J(t, x) + \partial_t J(t, x)dt + \partial_x J(t, x)f(x, u, t)dt)$$

$$-\partial_t J(t, x) = \min_u (R(t, x, u) + f(x, u, t)\partial_x J(t, x)) \quad (16)$$

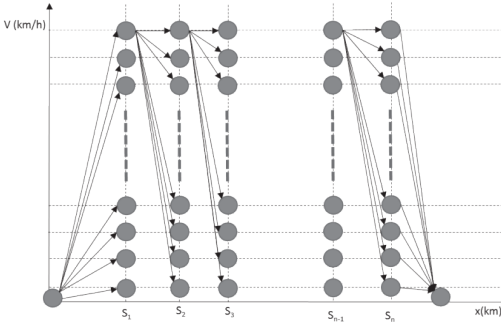
Genel olarak Dinamik Programlama yöntemi Şekil 5'te gösterildiği gibi iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlar optimum maliyet fonksiyonun hesaplanması ve zamanda geriye giderek son durumun indekslenerek, Bellman Prensibine göre optimum profilin zamanda ileriye giderek belirlenmesi şeklinde tanımlanabilir.



Şekil. 5. Dinamik Programlama Algoritması

Şekil 5'te belirtilen algoritmaya göre öncelikle ilk hız değerleri ayarlanır. Daha sonra her bir mesafe bölümü için olası n adet hız adımı belirlenerek bunların sisteme etkisi teker teker hesaplanır. Belirlenen varış lokasyonundan geriye olası enerji tüketimleri hesaplanarak, enerji tüketiminin minimum olması için gerekli hız profili çıkarılır. Hesaplama sonunda her bir mesafe bölümü için minimum enerji tüketim indisi ve hız bilgisi kaydedilir. Bu sayede aracın, kullanıcının belirlediği iki

nokta arasında minimum enerji tüketimi ile gitmesi için gerekli hız profili kaydedilmiş olur. Hız ve yol bölümleri Şekil 6'da belirtilmiştir.

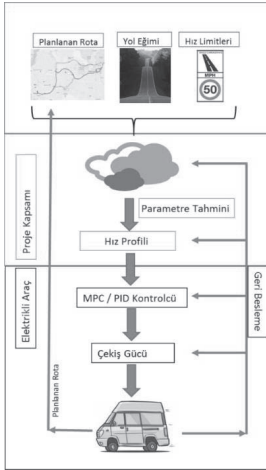


Şekil 6. Hız ve Yol Bölümleri

IV. PROBLEM TANIMI VE MODEL PARAMETRE KESTİRİMİ

Bir önceki bölümde belirtildiği gibi oluşturulan hız profili mesafe bölümlerine bağlı olarak minimum enerji tüketimi için kontrolcüye gönderilir. Sistem tasarımını Şekil 7'de tanımlanmıştır. Araç için gerekli hız profili oluşturulurken 2. kısımda belirtilen araç denklemleri kullanılmaktadır. Bu denklemlerde kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiş ve optimizasyon çalışmaları buna göre yapılmıştır.

Fakat gerçek sürüş ortamında bu parametrelerin bir kısmı, kütle, hava sürüklenme katsayısı ve yol sürtünme katsayısı yol, hava ve araç şartlarına göre değişkenlik göstermektedir. Bu parametrelerin değişmesi ile oluşturulan hız profili istenilen minimum enerji tüketimini karşılayamaz.



Şekil 7. Genel Sistem Tasarımı

Sürüş esnasında değişken parametre değerlerinin enerji optimizasyonu algoritmasına aktarılması gerekmektedir. Bu bağlamda doğru parametreleri kullanmak için enerji optimizasyon algoritmasının içerisinde bir kestirim algoritması yerleştirildi. Yerleştirilen bu fonksiyon "Gradient Descent" algoritması kullanılarak her bir bölümde doğru parametrelerin

bulunması için çalıştırılıyor. 'Gradient Descent' algoritmasına göre maliyet fonksiyonu (10)'da tanımlanmıştır.

$$\min J(\theta) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (h_{\theta}(x_i) - y_i)^2 \quad (10)$$

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3], h(x) = \theta_1 + x\theta_2 + x\theta_3 \quad (11)$$

(5)'te belirtilen enerji denklemi (10) ve (11)'daki denklemlerin yerine yazılırsa denklem (12) oluşmaktadır.

$$dE(v) = \frac{1}{2} \theta_1 (v_f^2 - v_i^2) + \theta_2 dr (v_f^2 + v_i^2) + \theta_1 g dh + \theta_1 \theta_3 g \sqrt{dr^2 - dh^2} \quad (12)$$

$$\theta_1 = \text{kütle}$$

$$\theta_2 = \text{hava sürtünme katsayısı}$$

$$\theta_3 = \text{yol sürtünme katsayısı}$$

(13)'de belirtilen denkleme göre θ_1, θ_2 ve θ_3 parametreleri aşağıda sırasıyla (14), (15), (16) denklemlerinde belirtilen iterasyon ile tahmin edilmektedir.

$$\theta_1 \leftarrow \theta_1 - \alpha \frac{\partial}{\partial \theta_1} \left[\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (h_{\theta}(x_i) - y_i)^2 \right] \quad (14)$$

$$\theta_2 \leftarrow \theta_2 - \alpha \frac{\partial}{\partial \theta_2} \left[\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (h_{\theta}(x_i) - y_i)^2 \right] \quad (15)$$

$$\theta_3 \leftarrow \theta_3 - \alpha \frac{\partial}{\partial \theta_3} \left[\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (h_{\theta}(x_i) - y_i)^2 \right] \quad (16)$$

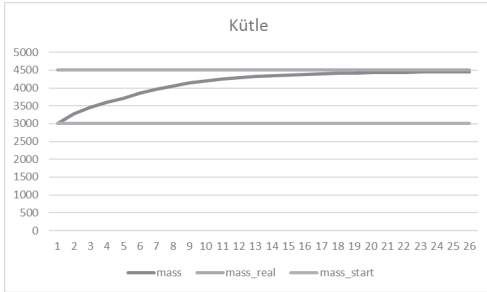
V. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Matlab ortamında Dinamik Programlama optimizasyon algoritması ve "Gradient Descent" parametre kestirim algoritması koşturulmuştur. Referans olması için basit bir Gaussian yol profili belirlenmiş ve bu profile araç koşturulmuştur. Her bir bölümde araca gerekli hız bilgisi verilmeden önce parametre kestirimi yapıp en uygun tahmin sonucuna uyan hız profili her bölümde araca verilmiştir. Bölüm III'de belirtildiği gibi hız profili oluşturulurken seyahat edilecek mesafe bölümlere ayrılır ve her bir bölüm için en uygun hız belirlenmektedir. Simülasyon ilk başlangıcında seyahat edilecek mesafede tanımlanan ilk 20 bölüm öncelikli olarak hiçbir işlem yapmadan kaydedilir. Daha sonra parametre kestirim algoritmaları çalıştırılarak bu ilk 20 bölüme göre uygun parametreler bulunur. Daha sonra bulunan yeni parametre değerleri enerji optimizasyon algoritmasına gönderilir ve yeni hız profilinin çıkması sağlanır. Oluşturulan yeni hız profili tekrardan araca gönderilir ve seyahat boyunca gerçekte harcanan enerji ile hesaplanan enerji gerçek zamanlı olarak takip edilir.

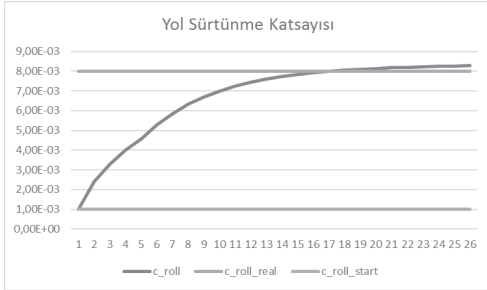
Her bölümde yapılan parametre kestirim sonuçları sırasıyla Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da belirtilmiştir. İlk aşamada kütle, yol sürtünme katsayısı ve hava sürtünme katsayısı sırasıyla 3000 kg, 0.001 ve 1.0 olarak tanımlanmıştır. Gerçek araç modelinde ise bu değerler sırasıyla 4500 kg, 0.008 ve 1.7181 olarak kaydedilmiştir. Simülasyon sonuçlarında da görüldüğü üzere sürüş profilinin ilk bölümlerinde tahmin edilen parametre değerleri ile gerçek değerler arasındaki farklılıklar çok yüksektir. Parametre kestirim algoritması çalıştıkça bu farklılıklar küçülmektedir. Bu farklılıkların oluşmasının en

önemli nedeni 3 farklı parametreden oluşan 3 boyutlu uzay içerisinde minimum değeri yakalamak için bu parametrelerin optimum seviyede değişmesi gerekliliğidir. Ayrıca kontrol algoritmasında belirlenen öğrenme katsayısı işlemin daha hızlı yapılabilmesi için mümkün olduğunca küçük tutulmaya çalışılmıştır. Bu yüzden simuasyon sonuçlarında da görüldüğü üzere tahmin edilen parametre değerleri ile gerçek değerleri arasında çok küçük göz ardı edilebilecek farklılıklar bulunmaktadır.

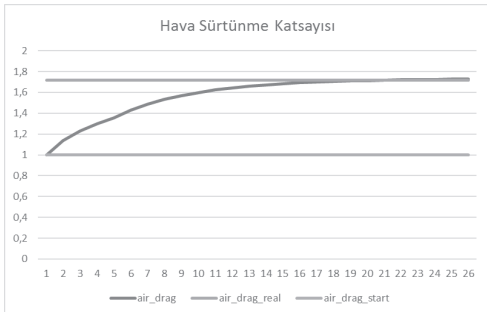
Enerji optimizasyonu ile ilgili yapılan simuasyon sonuçları ise Şekil 11'de görülmektedir. Hesaplama işlemi sonucu oluşturulan hız profili, ivme bilgisi, yol profili, gerekli tork, harcanan enerji ve yol boyunca harcanan akü SOC (State of Charge) değerleri belirtilmiştir.



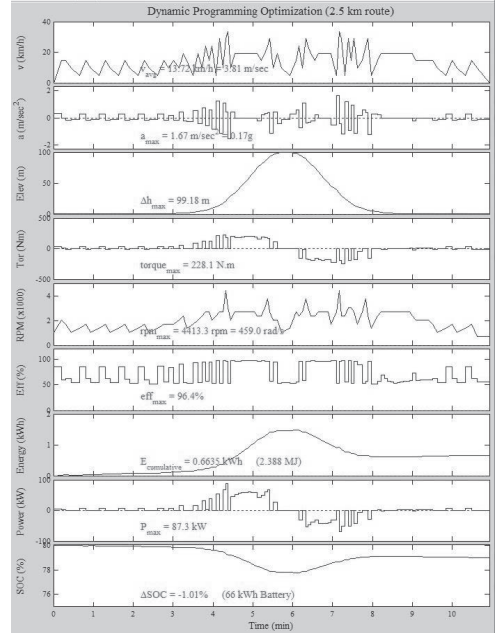
Şekil 8. Kütle Kestirim Değişim Eğrisi



Şekil 9. Yol Sürtünme Katsayısı Kestirim Değişim Eğrisi



Şekil 10. Hava Sürtünme Katsayısı Kestirim Değişim Eğrisi



Şekil 11. Dinamik Programlama Simülasyon Sonucu

VI. SONUÇ

Bu çalışma sonucunda, Dinamik Programlama ile enerji optimizasyonu yapılan bir elektrikli aracın, ağırlık, hava sürtünme katsayısı ve yol sürtünme katsayısı parametrelerinin kestiriminin 'Gradient Descent' algoritması ile yapılabilirliği gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmada araç modeli, optimizasyon algoritması ve parametre kestirim algoritması Matlab ortamında geliştirilmiş ve parametre kestirim algoritmasından çıkan değerler enerji optimizasyon algoritmasına verilerek, hesaplanan hız profili araca verilmiştir. Bir sonraki yapılacak çalışmada araç modeli ile parametre kestirim ve optimizasyon algoritmaları farklı ortamlarda koşturularak, simülasyon zamanları farklılaştırılarak gerçek dünyaya yakın bir uygulama hedeflenmektedir. Ayrıca parametre kestirimi sürekli çalıştırarak enerji hesaplamaları ile gerçek harcanan enerji arasında oluşabilecek farklılıklar gerçek zamanlı takip edilip parametre iyileştirme çalışması seyahat sonuna kadar devam ettirilecektir.

KAYNAKÇA

- [1] <https://www.itdp.org/2018/09/11/electric-buses-china/>
- [2] N. Petit ve A. Sciarretta, "Optimal Drive of Electric Vehicles Using an Inversion Based Trajectory Generation Approach," in Proc. IFAC World Congress, vol. 18, pp. 14519-14526, 2011.
- [3] W. Dib, A. Chasse, P. Moulin, A. Sciarretta ve G. Corde, "Optimal Energy Management for an Electric Vehicle in Eco-Driving Applications," Control Engineering Practice, vol. 29, pp. 299-307, 2014.
- [4] F. Mensing, "Optimal Energy Utilization in Conventional, Electric and Hybrid Vehicles and its Application to Eco-Driving," Ph.D. dissertation, INSA Lyon, 2013.
- [5] B. M. Baumann, G. Washington, B. C. Glenn ve G. Rizzoni, "Mechatronic Design and Control of Hybrid Electric Vehicles," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 5, pp. 58-72, 2000.

-
- [6] N. J. Schouten, M. A. Salman ve N. A. Kheir, "Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles" IEEE Trans. Control Syst. Tech., vol. 10, pp. 460-468, 2002.
- [7] A. Sciarretta ve L. Guzzella, "Control of Hybrid Electric Vehicles," IEEE Control Syst. Mag., vol. 27, pp. 60-70, 2007.
- [8] G. Paganelli, G. Ercole, A. Brahma, Y. Guezennec ve G. Rizzoni, "A General Formulation for The Instantaneous Control of The Power Split in Charge-Sustaining Hybrid Electric Vehicles," in Proc. Int. Conf. Adv. Vehicle Control (AVEC), pp. 73-80, 2000.
- [9] W. Wang, Z. Zhang, J. Shi, C. Lin ve Y. Gao, "Optimization of a Dual-Motor Coupled Powertrain Energy Management Strategy for a Battery Electric Bus Based on Dynamic Programming Method," IEEE Access, vol. 6, pp. 32899-32909, 2018.
- [10] D. Maamria, K. Gillet, G. Colin, Y. Chamaillard ve C. Nouillant, "On the Use of Dynamic Programming in Eco-Driving Cycle Computation for Electric Vehicles," in Proc. IEEE Conf. on Control Applications (CCA), 2016.
- [11] T. D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics," SAE International, 1992.
- [12] C. A. MacKay ve M. A. Olla, "Thin Cell Electrochemical Battery System and Method of Interconnecting Multiple Thin Cells," US Patent pub. no: 5503948, 1996.
- [13] J. Li ve M. S. Mazzola, "Accurate Battery Pack Modeling for Automotive Applications," J. Power Sources, vol. 237, pp. 215-228, 2013.
- [14] X. Wang, H. He, F. Sun ve J. Zhang, "Application Study on The Dynamic Programming Algorithm for Energy Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles," Energies, vol. 8, pp. 3225-3244, 2015.
- [15] D. E. Kirk, "Optimal Control Theory: An Introduction," Dover Publications, 2004.
- [16] H. J. Kappen, D. Barber, A. T. Cemgil ve S. Chiappa, "Optimal Control Theory and the Linear Bellman Equation in Bayesian Time Series Models," Cambridge University Press, pp. 363-387, 2011.

Hesaplanmış-Tork Kontrolcüsü (Computed-Torque Controller) Tabanlı ve Bilek Fleksiyon-Ekstansiyon Hareketlerini Gerçekleştirebilen Dirsek Altı Protez Kol Tasarımı ve Gerçeklenmesi

Hürkan ŞAHİN
Mekatronik Mühendisliği,
Yıldız Teknik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
hurkan.sah@gmail.com

Caner EMEÇ
Mekatronik Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
caner.emec@gmail.com

Şebnem SARIOZKAN
Mekatronik Mühendisliği,
Yıldız Teknik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
sebnemsariozkan@gmail.com

Doç. Dr. Aydın YEŞİLDİREK
Mekatronik Mühendisliği,
Yıldız Teknik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
aydiny@yildiz.edu.tr

ÖZET

Günümüzde uzuv kayıplarından dolayı milyonlarca insan günlük hayatlarında zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu grup insanlar içinde en önde gelen kayıplardan biri el işlevinin kaybı olarak kayıtlarda yer almaktadır. Bu sebepten ötürü bu konuda giderek artan sayıda çalışmalar yapılmaktadır. Bu projede insan fizyolojisine daha uyumlu, altı-serbestlik dereceli bir el protez cihazı geliştirilmesi çalışması sunulmuştur.

Çalışmada bilek supinasyon/pronasyon hareketi yerine bilek fleksiyon/ekstansiyon özelliğinin dahil edildiği, tendon ile sürülen bir el protezi tasarımı önerilmiştir. Ayrıca system dinamiği denklemleri türetilerek parmakların ihtiyaç duyduğu tork değerleri, hesaplanmış-tork kontrolcüsü kullanılarak oluşturulmuş, simülasyonda kontrolör tasarımına bağlı olarak parmağın davranışı incelenmiştir. Bu protez için Hesaplanmış-Tork kontrol metodu yardımıyla el ve parmak hareketlerinin doğrusal olmayan kontrolcülerle daha gerçekçi bir davranış için hareket kontrolü sağlanmıştır. Yapılmış olan protez el tasarımı ile bilek minimum 2 N-m büküm kuvvetini kaldırabilmektedir. Buna ek olarak, Hesaplanmış-Tork kontrolcüsü kullanılarak yapılmış olan parmak simülasyonunda bir parmağın fleksiyon-ekstansiyon hareketi üç saniyelik bir stabilizasyon zamanı ve yüzde ikilik bir hata payı ile gerçekleştirilebilmektedir. Elde edilen bu ilk sonuçlar ile ileri düzeyde el hareketlerinin insan fizyolojisiyle uyumlu bir biçimde kullanımına imkan sağlayacak bir geliştirmede elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler—Hesaplanmış-Tork Kontrolcüsü, Dirsekaltı Protez Kol, Bilek Fleksiyon-Ekstansiyon Hareketi

1. GİRİŞ

Ekstremité kaybı, bir insanın yaşam kalitesini düşüren, günlük yaşamda bir çok işi yapmasını zorlaştıran veya engelleyen önemli bir sağlık sorunudur. Gelişen robotik/ biyomekatronik teknoloji ve yeni üretim teknikleri sayesinde, protez kollar daha ucuz ve üretilmesi daha kolay hale gelmiştir. Biyomekatronik sistemler, insan uzuv hareketlerinin desteklenmesi, uzuvların güçlendirilmesi, sorunlu vücut fonksiyonlarının iyileştirilmesi ya da kaybedilmiş uzuvlara ait fonksiyonların yerine getirilmesi açısından önemli bir yer tutmaktadır.

Dünya genelinde 10 milyondan fazla insan; hastalıklar, savaş, terör ve şiddet, trafik kazaları, iş kazaları, diyabet veya Amelia hastalığı nedeniyle uzuv kaybı yaşamaktadır. Bu hastaların yüzde 30'u kol kaybı yaşamıştır. Kol kaybı yaşayanların yüzde 59'u ise dirsek altı kol kaybı yaşamış insanlardır [1].

Bu projede, dirsek altı kol uzuvunu kaybetmiş insanlar için bir protez kol tasarımı yapılması amaçlanmaktadır. Böylece hasta kişiler günlük işlerini yerine getirebilecek hareketleri gerçekleştirebileceklerdir.

Günümüzde, kayıp uzuvların yerini almak üzere biyonik kollar üretmek ve geliştirmek için büyük çaba harcanmaktadır, böylelikle engelli çalışanların günlük yaşamda işlerini başkalarının yardımı olmadan gerçekleştirebilmeleri amaçlanmaktadır. Son yıllarda 3B yazıcı teknolojisi ile üretimin yaygınlaşması ile beraber, düşük maliyetli ve işlevsel bir çok yeni protez kol tasarımı ortaya çıkmaya başlamıştır. [2] [3] Bu tasarımların pek çoğunda ip-tendon modeliyle parmak kontrolü, ve dişli vasıtasıyla bilek döndürme hareketi olduğu gözlemlenmiştir. Fakat, bilek döndürme hareketi (supination &

pronation) tüm önkol ve omuza kadar gelen üst eksteremitenin hareketiyle mümkün olan bir harekettir [4]. Bundan dolayı bu hareketin doğrudan bilekten sağlamak gerçekçi bir tasarım olmamakla beraber bilek fleksiyon-ekstansiyon hareketini de ortadan kaldırmaktadır.

Protez kollar mekanik özellikleri ile incelendiğinde, farklı cisimleri kavramak üzerine geliştirilmiştir. Piyasada üretilen ya da hobi olarak tasarlanan ürünlere bakılırsa bunlardan hobi olarak üretilen TACT [5], myoelektrik kontrolle çalışan protez bir koldur. TACT, ince tutam, üç çeneli ayna, kavrama vb. Gibi birçok farklı kavrama türünü gerçekleştirebilir.

TACT bar mekanizma olarak adlandırılan ve yine iplerin gerilme kuvveti ile hareketin sağlandığı bir mekanizmaya sahiptir. Ayrıca, parmak tasarımındaki çubuk mekanizması, eklemlerin aynı anda hareket etmesini sağlar ve bu özellik kavrama yeteneği için önemlidir.

Piyasada seri üretime sahip olan Dextrus [6], OpenHand Project tarafından üretilen EMG kontrollü robot el tasarımıdır.

Tüm motorlar ve elektronik bileşenler avuç içine yerleştirilmiştir, bu sayede farklı amputeler tarafından kullanılabilir. İp-kasnak modeli kullanılmadığı için bilek rotasyon hareketini rahatlıkla gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca, kullanıcıların kendine özel kontrol donanımlarını oluşturabilmeleri için belirlenmiş bir seri iletişim arayüzüne sahiptir.

Diğer bir protez kol üreticisi [7] Bebionic'in geliştirdiği olduğu protez kol ile kullanıcı, kas sinyallerini deri yüzeyinden okuyan miyoelektrik sensörlerin vasıtasıyla protez kolu kontrol edebilir.

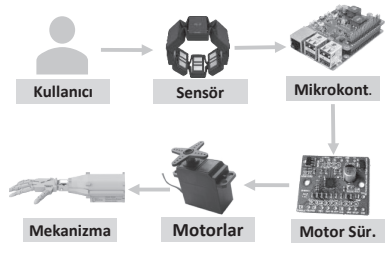
Bebionic elin parmak mekanizması, robot elin daha kesin bir konum algısına sahip olması ve özellikle MCP (metacarpophalangeal), bağlantı noktasındaki dönüş açısını artırılabilmesi için dişli mekanizmasından oluşmaktadır. Bu şekilde, parmaklar herhangi bir nesneyi kavramak için yeterli dönme açısına sahip olabilmektedir. Ayrıca, dişliler birim ağırlık veya hacim başına en yüksek güç iletim kapasitesine sahip mekanizmalardır. Bu özellik, kupa için gerekli gücün en verimli şekilde iletilmesini sağlar. Ancak, özel üretim teknikleri nedeniyle maliyetlidir ve belirli aralıklarla bakım ve onarıma ihtiyaç duymaktadırlar. Ayrıca ürünün on dört adet seçilebilir kavrama özelliği bulunmaktadır. Bütün bu özellikler ürünün hareket kabiliyetini arttıran özelliklerdir. Ayrıca, 45 kg'a yük kapasitesi bulunmakta ve maksimum kavrama kuvveti 140.1 Newton'a kadar çıkmaktadır. Bu sayede yüksek dayanıklılık ve kavrama gücüne sahiptir. Tüm bu özellikleri göz önüne alınarak, Bebionic el dünya çapında 11.000 \$ (9000 €) [8] bir fiyat ile satışa sunulmaktadır.

Diğer bir çalışma fransız heykeltıraş Gael Langevin tarafından gerçekleştirilmiş olan InMoov açık kaynaklı 3D baskılı doğal boyutlardaki insansı robotdur [9]. Burada kullanılan robotik el yukarıdaki protez kollardan farklı olarak serçe parmak ve yüzük parmağın hareketini kolaylaştırabilmek adına fazladan bir eklemler içerir. Bu eklemler sayesinde el, yumruk ve yayılma hareketini daha kolay bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Bu yüzden bu projede kullanılmış olan el tasarımı InMoov robotunun el tasarımına aittir. Ancak InMoov robotunda bilek için tasarlanmış olan hareket dönüş hareketidir. Bilek fleksiyon-ekstansiyon hareketi değildir. Bundan dolayı, bilek tasarımı için el ve dirsek altı kısımlarında düzenlemeye gidilmiştir.

Bunlara ek olarak bu çalışmada Bebionic'e kıyasla, mekanik parçaların sayısı azaltılarak maliyet düşürülmüştür ve dişli tasarımı yerine kontrolü kolay ve maliyeti daha düşük olan iptendon modeli tercih edilmiştir. Bilek hareketi için de bilek rotasyon sistemi yerine hareket ve kavrama kabiliyetini arttırmak adına bilek fleksiyon-ekstansiyon sistemi uygun görülmüştür. Ayrıca, maliyet değerini düşürmek için malzeme olarak ABS plastik tercih edilmiştir ve el ağırlığı gerçek bir insan eline göre optimize edilebilmektedir.

Son olarak, protez kolun hareket kabiliyetini arttırmak için insan anatomisine uygun bir el dizaynı gerçekleştirilmiştir. En az beş hareketi gerçekleştirebilecek bir alt kol tasarımı için MATLAB üzerinden Hesaplanmış-Tork kontrolcüsü kullanılarak bir simülasyon hazırlanmıştır. Bu sayede, simülasyon üzerinden elde edilecek verilerle protez elin gerçekleştirebileceği hareketler için detaylı bir şekilde pozisyon ve tork analizi yapılabilecektir.

II. SİSTEMİN GENEL GÖRÜNÜMÜ

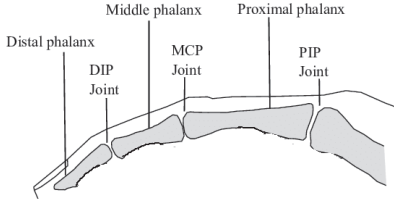


Şekil -1: Sistemin Genel Görünümü

Şekil-1, sistemin ana yapısını göstermektedir. Sistemin ilk adımı kullanıcı ile başlamaktadır. Kullanıcı elini hareket ettirmek istediğinde, o hareketle ilgili kaslarda elektriksel bir potansiyel fark oluşur. Kol üzerine yerleştirilmiş olan sensör ile kas sinyali tespit edilir ve bu sinyal mikrodenetleyiciye iletilir. Mikrodenetleyicide iki ana işlem bulunmaktadır. Bunlar, sinyal iletim kalitesini, arttırmak için kullanılan sinyal işleme ve hareket sınıflandırmasıdır. Bundan sonra mikrodenetleyicide hareket sinyali üretilir ve motor sürücüsüne iletilir. Son olarak, ilgili motorlar hareket sinyalini algılar ve mekanizma isteneni pozisyona hareket eder.

1. Mekanik Tasarım

Bir insan elinin anatomik yapısında; el, ayası, ayayı kola bağlayan bir bilek ve parmaklar bulunmaktadır. Parmaklar, üç eklemler bölgesinden oluşmaktadır ve bu eklemler parmakların gevşeme ve kasılma gibi temel hareketleri yapabilmelerini sağlamaktadır.



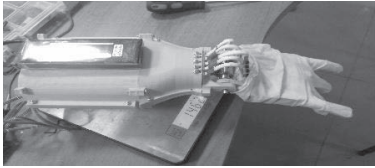
Şekil-2: Parmak Eklemleri

Parmak üç farklı dönme noktasına sahiptir ve işaret, orta, yüzük ve serçe parmak MCP, PIP (proximal interphalangeal) ve DIP (distal interphalangea) eklemlerinden, başparmak ise IP (interphalangeal), MCP (metacarpophalangeal) ve CMC (carpometacarpal) eklemlerinden oluşmaktadır. Bu eklemlerin etrafında belirli açılarla dönen kemikler, kendilerine bağlı olan kasların yardımıyla kasılma ve gevşeme sağlamaktadır.

Bu projede başparmak, işaret ve yüzük parmakları için 3; yüzük ve serçe parmak içinse 4 dönme noktasına sahip bir protez kol tasarımı yapılmıştır.



Şekil-3:(a)



Şekil-3:(b)

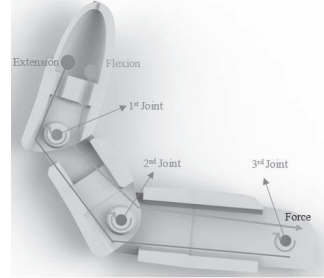
Şekil-3: Sırasıyla (a): Solidworks Çizimi ve (b): Sistemin Gerçeklenmesi

Mekanik tasarım, Şekil-3:(a) ve Şekil 3:(b)'de görüldüğü gibi birçok parça ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, bu parçaların asıl amacı ve neden seçildikleri hakkında bilgi verilecektir ve mekanik tasarımın genel özellikleri tartışılacaktır. Daha sonra, el bileği ve parmakların hareketini sağlayan mekanizmalardan bahsedilecektir. Son olarak, malzeme ve aktüatör gibi bileşenlerin seçimi tartışılacaktır.

Protez kolun tasarımı ile ilgili önemli detaylar, hareket kabiliyeti ve kavrama gücü baz alınarak belirlenmiştir. Buna göre belirlenen öncelikli husus protez elin taşıyabileceği ağırlıktır. Burada insan elinin toplam ağırlığına ve önkolun (yaklaşık 1,5 kg) ortalama ağırlığına dayanan bir model tasarımı yapılmıştır. Belirlenen bu ağırlık ile kullanıcı kolunu kullanmadığında ya da yorgun olduğunda, herhangi bir denge veya duruş kaybının oluşmaması amaçlanmaktadır. Kullanıcının günlük işlerini halledebilmesi amacıyla, 1-1,5 kg ağırlığa kadar yük kapasitesine sahip ve gün boyunca aynı şarj ile kullanılabilecek bir protez kol tasarımı yapılmıştır.

1.1 Parmak Hareketi

Bu projede ip-tendon mekanizması parmak hareketi için kullanılmıştır. Mekanizma özetlenirse, motora bağlı bir kasnak ve kasnağı parmağa bağlayan ip bulunmaktadır. Bu mekanizma ile parmağın konumu motor tarafından kolayca kontrol edilebilir.



Şekil – 4: İp-Tendon Modeli Çalışma Prensibi

Şekil-4, ip-tendon mekanizmasını göstermektedir. Parmaklara ve servo motora bağlı iki ip bulunmaktadır. Bu nedenle, uzatma ve bükülme aynı servo motor tarafından kontrol edilebilmektedir. Turuncu ipin asıl amacı fleksiyon ve yeşil ipin amacı ise ekstensiyondur. Servo motorlar saat yönünün tersine döndüğünde ise turuncu ip parmağı ucundan çekmektedir.

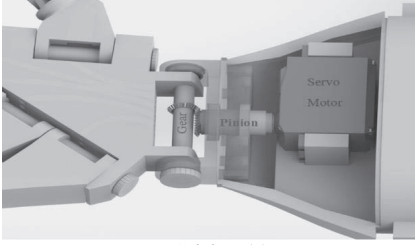
1.2 Bilek Hareketi

Protez kolların çoğu, hareket zorluğundan dolayı, el bileği fleksiyonu için herhangi bir sisteme sahip değildir. Protez kol için el bileği fleksiyon hareketinin ana zorlukları

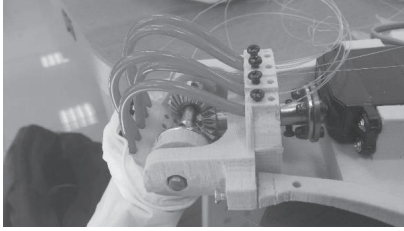
- Protez kolların bilek bölümünde, yüksek yük kapasitesine sahip bir sistem tasarlamak için yeterli alan bulunmamaktadır.
- Esneme veya uzatma sırasında, el ile önkol arasındaki mesafe değişmektedir. Bu nedenle, ip-tendon sistemi bu mesafe değişikliğinden etkilenebilir.

İlk sorunla başa çıkmak amacıyla, bilek hareketi için dişli çarkı tercih edilmiştir. Çünkü dişliler boyuta göre en dayanıklı makine elemanlarından biridir. Ayrıca, dişlilerin birçok avantajı bulunmaktadır. Hareketi, millerin küçük bir merkez mesafesi boyunca iletmek için de kullanılabilmektedir [10]. Bunun yanı sıra, dişli sistemi kullanılarak hareket, paralel olmayan ve kesişen bir mil arasında iletelebilmektedir.

Sistemde, el ile önkol arasında bir kablo sistemi vardır. Bu sayede, el ile önkol arasındaki ip uzunluğu sabit kalabilmektedir. Dişli mekanizması olarak konik dişli seti seçilmiştir, çünkü bileğin maksimum 90 dereceye kadar fleksiyon ve ekstensiyon hareketini gerçekleştirmesi istenmektedir. Şekil-5, dişli tahrikini göstermektedir



Şekil-5: (a)



Şekil-5: (b)

Şekil-5: Sırasıyla (a): Bilek için Solidworks Çizim ve (b): Bilek Modelinin Gerçeklenmesi

Konik dişli seçiminde önemli hususlar şunlardır;

- Pinyon ve dişlinin basınç açıları aynı olmalıdır.
- Dişli ve pinyon çapları veya modülleri aynı olmalıdır
- Dedendum, addendumdan büyük olmalıdır.
- Yüz genişliği, perde koni yarıçapından daha küçük olmalıdır.

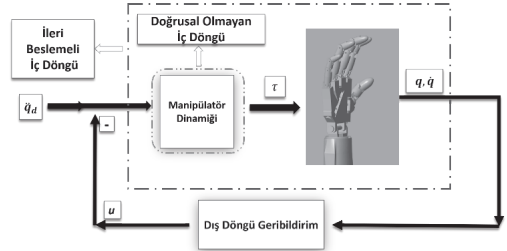
2. Kontrolcü Tasarımı

Kullanışlı bir robot, hareketini ve robot ile çevresi arasındaki etkileşimli kuvvetleri ve momentleri kontrol edebilen bir mekanizmaya sahip olmalıdır. Bunu başarmak için, robot bir kontrolör tarafından düzenlenmeli ve yanlış davranışlar kontrolör tarafından azaltılmalıdır.

Bu çalışmada, kontrolcü kullanılmasının temel nedeni, istenen el hareketinin bir sonucu olarak parmak eklemlerinin dönme açısını belirleyebilmek ve bu eklemlere uygulanan torkları hesaplamaktır. Hareket yolunu hesapladıktan sonra parmakların dönme açısı, Matlab Multibody-Toolbox ile oluşturulan simülasyon sayesinde elin hareketinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

İstenen yol, yol oluşturma alt sisteminde belirlenir ve istenen açılar, Hesaplanmış Tork Kontrolcüsüne verilir. Bunun sonucu olarak, denetleyicinin bulduğu sistemin açısı değerleri, bir sonraki simülasyonda kullanılmak üzere Simulink alt sisteminde El Modellemesi'ne gönderilir. Ayrıca hesaplanan tork değerleri ile, servo motorun seçilmesi mümkün olabilir.

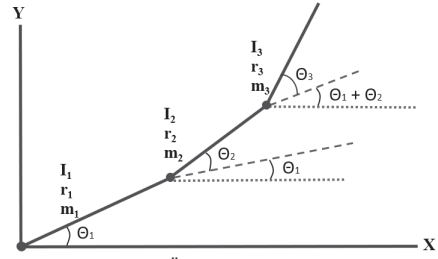
Hesaplanmış-Tork, klasik bağımsız kontrolcüler ve bazı modern tasarım tekniklerini bir araya getiren doğrusal olmayan sistemlerin geribildirim ile doğrusallaştırılmasının özel bir uygulamasıdır [11].



Şekil-6: Hesaplanmış-Tork Kontrolü Genel Akış Şeması

Hesaplanmış-Tork denetleyici Şekil-6'da görüldüğü gibi, sistemin doğrusallaştırması ve stabilizasyonu için iki döngüye sahiptir. Bunlardan biri, robot kol dinamiği denklemlerinden oluşan İleri Beslemeli İç Döngü'dür ve sistemin doğrusallaştırması iç döngüde açısı değerlerinin hata değerlerine göre torkun hesaplanması ile gerçekleştirilir. Diğer döngü, dış döngü sistemin stabilizasyonu için gereklidir. PID kontrol cihazı, istenen açı ile sistem açısı arasındaki hata değerlerini düşürdüğü için, istenen duruma ulaşarak sisteme stabilize kazandırır [12].

Manipülör dinamiği, sistem ileri kinematik denklemlerinden ve sistem diferansiyel denklemlerinden oluşur. Manipülör dinamik denklemleri, Lagrange-Euler metodu ile, Şekil 7'de gösterilen modele göre türetilmiştir.



Şekil-7: Üç-Link Parmak Modeli

Sistemin manipulator dinamik denklemleri yazıldıktan sonra denklemler eşitlik 1.1'i sağlayacak bir vektör formuna getirilir.

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) + \tau_d = \tau \quad 1.1$$

Denklemler 1.1'de M ile gösterilen matris kütle/Eylemsizlik matrisi olarak adlandırılmaktadır. V, merkezci / coriolis matrisi ve G ise yerçekimi matrisidir.

Lagrange denklemi, sistem kinetik ve potansiyel enerjileri içermektedir, bu nedenle sistemin enerji denklemleri, eksen yansıtılan kütle merkezine göre eklemlerin konumunu bulunarak türetilmiştir. Daha sonra, konum denklemlerinin türevi alınarak hız denklemleri belirlenmiştir. Aşağıdaki denklemler, sistemin konum ve hız denklemlerine dayanarak elde edilmiş M, V ve G matrisleridir.

M matrisi i x j indeksli bir matris olmak üzere i = 1,2, ..., n ve j = 1,2, ..., m'e kadar n x m boyutlu bir matristir. Üç link parmak modeli çözüldüğünde 3x3 boyutuna sahip bir matris elde edilmiştir. M(q) ile gösterilen kütle-eylemsizlik matrisinde q olarak gösterilen açısıl pozisyonu temsil etmektedir ve 1x3'lük bir matristir. Eşitlik – 1.2'de gösterilen matris kütle matrisini temsil etmektedir.

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad 1.2$$

$$M_{11} = I_1 + m_1 \frac{r_1^2}{4} + m_2 \left(r_1^2 + \frac{r_2^2}{4} + r_1 r_2 \cos(\theta_2) \right) + m_3 \left(r_1^2 + r_2^2 + \frac{r_3^2}{4} + 2r_1 r_2 \cos(\theta_2) + r_1 r_3 \cos(\theta_1 + \theta_2) + r_2 r_3 \cos(\theta_3) \right) \quad 1.2(a)$$

$$M_{12} = m_2 \left(\frac{r_2^2}{4} + r_1 r_2 \cos(\theta_2) \right) + m_3 \left(r_2^2 + \frac{r_3^2}{4} + r_1 r_2 \cos(\theta_2) + r_1 r_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \frac{1}{2} + r_2 r_3 \cos(\theta_3) \right) \quad 1.2(b)$$

$$M_{13} = m_3 \left(\frac{r_3^2}{4} + r_1 r_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \frac{1}{2} + r_2 r_3 \cos(\theta_3) \frac{1}{2} \right) \quad 1.2(c)$$

$$M_{21} = m_2 \left(\frac{r_2^2}{4} + r_1 r_2 \cos(\theta_2) \frac{1}{2} \right) + m_3 \left(r_1 r_2 \cos(\theta_2) + r_1 r_3 \cos(\theta_1 + \theta_2) \frac{1}{2} + r_2 r_3 \cos(\theta_3) \right) \quad 1.2(d)$$

$$M_{22} = I_2 + m_2 \frac{r_2^2}{4} + m_3 \left(r_2^2 + \frac{r_3^2}{4} + r_2 r_3 \cos(\theta_3) \right) \quad 1.2(e)$$

$$M_{23} = m_3 \left(\frac{r_3^2}{4} + r_2 r_3 \cos(\theta_3) \frac{1}{2} \right) \quad 1.2(f)$$

$$M_{31} = m_3 \left(\frac{r_3^2}{4} + r_1 r_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \frac{1}{2} + r_2 r_3 \cos(\theta_3) \frac{1}{2} \right) \quad 1.2(g)$$

$$M_{32} = m_3 \left(\frac{r_3^2}{4} + r_2 r_3 \cos(\theta_3) \frac{1}{2} \right) \quad 1.2(h)$$

$$M_{33} = I_3 + m_3 \frac{r_3^2}{4} \quad 1.2(i)$$

Bunlara ek olarak, $M_{12} = M_{21}$, $M_{13} = M_{31}$, ve $M_{23} = M_{32}$ simetrik matris olarak gösterilebilir.

V, merkezci / coriolis matrisi olarak eşitlik 1.3'deki gibi belirlenmiştir.

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{21} \\ V_{31} \end{bmatrix} \quad 1.3$$

$$V_{11} = - \left((m_2 \frac{1}{2} + m_3) r_1 r_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin(\theta_2) + \frac{m_3}{2} r_1 r_3 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) - \frac{m_3}{2} r_2 r_3 (2\dot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_3) \right) \quad 1.3(a)$$

$$V_{21} = - \left((m_2 \frac{1}{2} + m_3) r_1 r_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) + m_3 \left(r_1 \frac{r_3}{2} \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) + r_2 \frac{r_3}{2} (2\dot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_3) \right) - \left(\left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) r_1 r_2 (\dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)) \sin(\theta_2) + \frac{m_3}{2} r_1 r_3 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) \right) \right) \quad 1.3(b)$$

$$V_{31} = - \left(m_3 \left(r_1 r_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) + r_2 \frac{r_3}{2} \dot{\theta}_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_3) \right) - m_3 \left(r_1 \frac{r_3}{2} \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) + r_2 \frac{r_3}{2} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) \sin(\theta_3) \right) \right) \quad 1.3(c)$$

G yerçekimi matrisi olarak eşitlik 1.4'deki gibi tanımlanmıştır.

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \\ G_{31} \end{bmatrix} \quad 1.4$$

$$G_{11} = - \left(\left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) g r_1 \sin(\theta_1) + \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) g r_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + \frac{m_3}{2} g r_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \right) \quad 1.4(a)$$

$$G_{21} = - \left(\left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) g r_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + m_3 g r_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \right) \quad 1.4(b)$$

$$G_{31} = -\frac{m_3}{2}gr_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad 1.4(c)$$

Solidworks'de yapılmış olan üç boyutlu tasarımın sonucunda

$$r_1 = 38.78 \text{ mm}, r_2 = 25.15 \text{ mm} \text{ ve } r_3 = 31.26 \text{ mm}$$

$$m_1 = 5.57 \text{ g}, m_2 = 3.56 \text{ g}, \text{ ve } m_3 = 2.94 \text{ g}$$

$$I_1 = 110376.96 \text{ g} \cdot \text{mm}^2, I_2 = 103060.83 \text{ g} \cdot \text{mm}^2 \text{ ve}$$

$$I_3 = 118171.81 \text{ g} \cdot \text{mm}^2 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

$$\tau = M(\ddot{q}_d - u) + N \quad 1.5$$

Eşitlik 1.5 Hesaplanmış-Tork kanunu olarak adlandırılır ve bu denklemlerde durum uzayı dönüşümü yoktur. Hesaplanan tork kontrolü robot dinamiği'nin tersine bağlıdır ve aslında bazen ters dinamik kontrolü olarak da adlandırılır.

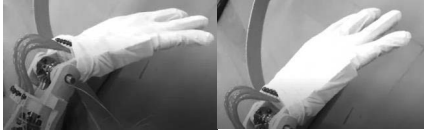
Son olarak yol tanımlaması yapılarak parmakların izleyeceği yol MATLAB Simulink ile yapılan kontrolcü ile belirlenip, MATLAB Multibody Toolbox ile hazırlanan simülasyona bu açış değerleri verilmiştir. Ayrıca hesaplanan tork değerleri ile parmak hareketi için uygun olan motor seçilmiştir.

3. TEST SONUÇLARI

3.1 Mekanik Test Sonuçları



Şekil-8: (a)



Şekil-8: (b) ve (c)



Şekil-8: (d)

Şekil-8: Sırasıyla (a): Bilek Fleksiyon Hareketi, (b): Yarı Fleksiyon, (c): Sıfır Konumu ve (d): Ekstansiyon Hareketi

Şekil-8 sırasıyla bileğin fleksiyon ve ekstansiyon hareketini göstermektedir. Buna göre bilek fleksiyon hareketini 4 saniyede ekstansiyon hareketini 5 saniyede gerçekleştirmektedir. Bileğin pozisyonu fleksiyon hareketi

için sıfır konumundan 60 derece aşağıda, ekstansiyon hareketi içinse sıfır konumundan 40 derece yukarıda olacak şekilde belirlenmiştir. Bu farkın nedeni ise bilekteki kanalların ekstansiyon hareketi sırasında oluşturdıkları dirençtir.



Şekil-9: (a)



Şekil-9: (b) ve (c)

Şekil-9: Sırasıyla (a): Parmak Sıfır Konumu, (b): Parmak Fleksiyonu ve (c): Parmak Ekstansiyonu

Şekil-9 orta parmak fleksiyon-ekstansiyon hareketine dair görüntüler içermektedir. İlk pozisyonda kasnak 90 derece pozisyonunda ve parmak Şekil-9 (a)'da görüldüğü gibidir. Fleksiyon hareketini gerçekleştirebilmesi için kasnak sıfır derece konumuna getirilmiştir. Daha sonra kasnak 150 dereceye getirilerek parmağın ekstansiyon hareketini gerçekleştirmesi sağlanmıştır.



Şekil-10: Yumruk ve Yayılma Hareketinin Gerçeklenmesi

Şekil-10'da gösterildiği gibi, el yayılma hareketini 5 saniye ve ardından yumruk hareketi 5 saniye ile 7 saniye arasında gerçekleştirmiştir. Yayılma hareketlerinin doğruluğu % 75 ve yumruk hareketinin doğruluğu ise % 76'dır. Burada hareketlerin en az 5 saniye ile kısıtlanmasının sebebi ise motorların çalışma hızlarından kaynaklanmaktadır. Parmaklar için DSS P05 servo motoru tercih edilmiştir. DSS P05 için yüküz hız değeri 60 derecede 17 saniyedir. Parmakta oluşan ip gerilmesi ve sürtünmeler sonucu gerçek değer bunun üstündedir.

3.2 Kontrolcü Simülasyon Sonuçları

Polinomiyal yol interpolasyonu kullanılarak oluşturulan patika ile açış takibi yapılmıştır. Simülasyonda yapılmak istenen parmak hareketi parmağın dik konumdan fleksiyon hareketini yaptıktan sonra tekrar eski konumuna geri gelmesini sağlamaktır. Bunun için başlangıç pozisyonları,

$$x_i = 0, y_i = 63.93 \text{ mm}$$

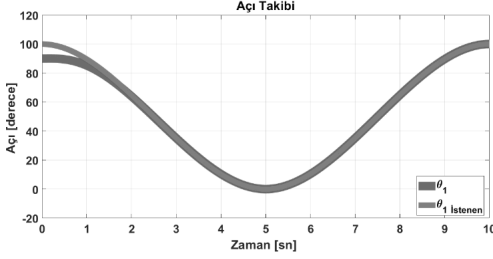
Bitiş pozisyonu ise,

$$x_f = 38.78 \text{ mm}, y_f = -25.15 \text{ mm}$$

Kullanılan P, I ve D katsayıları,

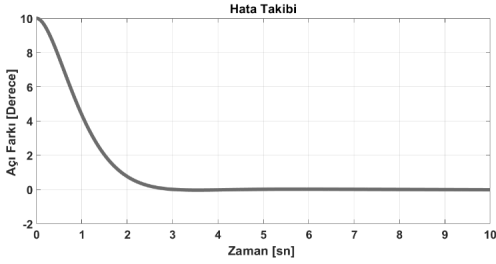
$$K_p = K_v = 3 \text{ with } K_i = 0$$

Birinci eklem için açı takibi sonuçları Şekil-11'deki gibidir.



Şekil-11: Parmaktaki Birinci Eklem Açı Takibi

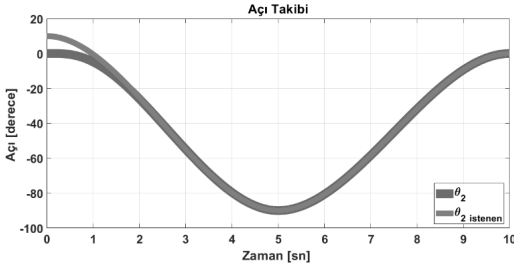
Hata takibi Şekil-12'de gösterildiği gibidir.



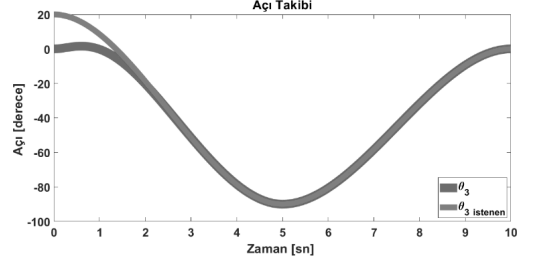
Şekil-12: Birinci Eklem Hata Takibi

Parmak 5 saniyelik aralıkla fleksiyon ve ekstensiyon hareketi yapmaktadır. Şekil-11 açı takibinde mavi ile gösterilen yol parmağın verdiği cevap, turuncu yol ise arzulanan patikadır. İlk 5 saniyede fleksiyon hareketine başlamadan önce istenen yol olarak parmağın 100 derecelik bir konumdan hareket etmesi istenmiştir. Şekil-12 Hata Takibinde ise bu istenilen patikayı sistemin yakalama süresi yaklaşık 3 saniyedir. Sistem sıfıra oturduktan sonra hata 0.018 olarak hesaplanmıştır.

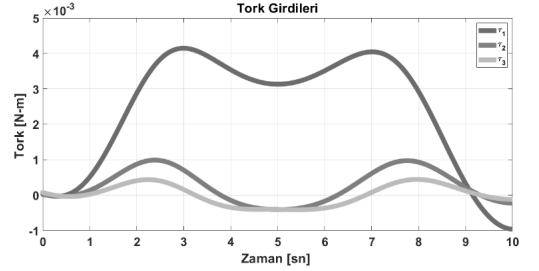
Diğer iki eklem için açı takibi sonuçları Şekil-13 ve Şekil-14'deki gibidir.



Şekil-13: İkinci Eklem Açı Takibi

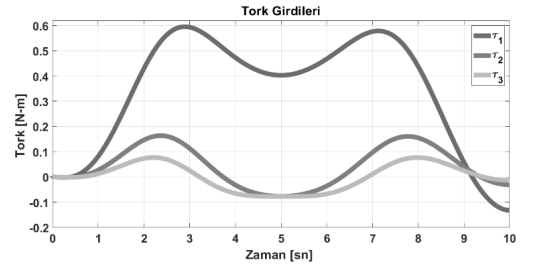


Şekil-14: Üçüncü Eklem Açı Takibi



Şekil-15: Parmak Birinci Eklem Yüksüz Durum Tork Cevabı

Şekil-15'de parmak herhangi bir yüke tabi bırakılmadığında hesaplanan tork değerleri bulunmaktadır. Mavi ile gösterilen değerler birinci eklem, kırmızı ile gösterilen değerler ikinci eklem ve sarı ile gösterilen değerler ise üçüncü eklem tork değerleridir. Birinci eklem için maksimum tork değeri 0.05 kg-cm olarak hesaplanmıştır.



Şekil-16: Parmak Birinci Eklem Yüklü Durum Tork Cevabı

Şekil-16'da parmak 1.5 kg'lık bir yüke tabi tutulup her iki eklem arasında 0.5 kg yük oluşacak şekilde kütle değerleri kontrolçüye girilmiştir. Bunun sonucunda mavi ile gösterilen birinci eklemde maksimum olarak hesaplanan tork değeri 6.11 kg-cm olarak hesaplanmıştır.

Sisteme girilen kütle değeri arttırıldığı zaman hata takibi sonucunda elde edilen değerde herhangi bir önemli artış gözlenmemiştir. Yüksüz durumda 0.018 olarak hesaplanan hata değeri 0.02'e çıkmıştır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada bilek fleksiyon-ekstansiyon hareketini gerçekleyebilen bir protez kol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda parmak hareketi için kullanılacak motorların belirlenmesi için Hesaplanmış-Tork Kontrolcü simülasyonu sonucunda elde edilen tork değerleri yardımcı olmuştur. Simülasyondan elde edilen değerlere göre ortalama olarak 5 kg-cm torka sahip bir servo motor ile parmak hareketi gerçekleştirilmiştir. Yine bilek için yapılan dışlı ile ortalama 15 kg-cm torka sahip bir motor ile fleksiyon-ekstansiyon hareketi gerçekleştirilmiştir.

Bilek için kullanılan kanallar parmak hareketini etkilediğinden ip-tendon modelinde kullanılacak ipin ve motorların seçimi bir takım deneyler sonucunda yapılmıştır. Yine aynı durumdan ötürü bilek hareketinde kısıtlamalar gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki çalışmada bu konu üzerinde durulması planlanmaktadır. Ayrıca Hesaplanmış-Tork Kontrolcüsü için bir kontrol kartı geliştirilmesi planlanmaktadır.

5. DESTEKLER

Bu proje TÜBİTAK 2209-B Sanayi Odaklı Bitirme Tezi kapsamında desteklenmektedir.
Başvuru Numarası: 1139B411801634

KAYNAKÇA

- [1] Maurice LeBlanc, MSME, CP "Give Hope - Give a Hand" - The LN-4 Prosthetic Hand
- [2] Gibbard, J. (2019). *The Open Hand Project - Dextrus*. [online] Openhandproject.org. Available at: <http://www.openhandproject.org/dextrus.php> [Erişildi 6 Nisan 2019].
- [3] Bebionic.com. (2019). *The world's most advanced Prosthetic Hand - bebionic*. [online] Available at: <http://bebionic.com/> [Erişildi 6 Nisan 2019].
- [4] M.,Soubeyrand, B.,Assabah, M., Bégin, E., Laemmel, A., Dos Santos and M., Crézé "Pronation and supination of the hand: Anatomy and biomechanics. *Hand Surgery and Rehabilitation*", 2017, [online] 36(1), pp.2–11.
- [5] Instructables, "Tact: Low-cost, Advanced Prosthetic Hand," *Instructables.com*, 08-Oct-2017. [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/Tact-Low-cost-Advanced-Prosthetic-Hand/>. [Accessed: 12-Oct-2018].
- [6] Instructables. "Dextrus V1.1 Robotic Hand." *Instructables*, Instructables, 4 Apr. 2014, www.instructables.com/id/Dextrus-v11-Robotic-Hand/. Accessed 6 Apr. 2019.
- [7] Bebionic.com. (2019). *The bebionic 3 myoelectric hand product - features-bebionic*. [online], Available at: http://bebionic.com/the_hand/features/ [Accessed 6 Apr. 2019].
- [8] A., Saenz. (2019). *How Much is the Newest Advanced Artificial Hand? \$11,000 USD (video)*. [online] Singularity Hub. Available at: <https://singularityhub.com/2010/06/30/how-much-is-the-newest-advanced-artificial-hand-11000-usd-video/> [Accessed 6 Apr. 2019].
- [9] L., Gael, "InMoov, Open Source 3D Printed Life-Size Robot", January ,2012.
- [10] N., Dechev, "Mechanism and Machine Theory", et al., 1157-1173, 2001
- [11] L., Frank, D., Dawson, C., Abdallah, "Robot Manipulator Control Theory and Practice", Second Edition, Marcel Dekker, NewYork, 2004
- [12] J., Sankaran,"Real-Time Computed Torque Control of Flexible-Joint Robots", Natural Library of Canada , Toronto, 1997

Derin Pekiştirmeli Öğrenme Kullanarak Konum Denetimli Robotlarda Kuvvet Denetimi

Emir Arditi
Özyeğin Üniversitesi
İstanbul, TÜRKİYE
emir.arditi@ozu.edu.tr

Erhan Öztop
Özyeğin Üniversitesi
İstanbul, TÜRKİYE
erhan.oztop@ozyegin.edu.tr

Öz — Bu araştırmanın amacı, konum denetimli robotik sistemlerde, derin pekiştirmeli öğrenme kullanılarak kuvvet denetimi gerçekleştirebilen bir sistem kurmaktır. Tork denetimine müsaade eden robotik sistemlerde, bu görevi öğrenme metotlarına başvurmadan yerine getirmek mümkündür. UR-5 gibi endüstriyel robotik sistemler, güvenlik sebebiyle çoğunlukla tork denetimine müsaade etmemektedir ve bu yüzden bu alanda alternatif çözüm yollarına ihtiyaç vardır. Bu amaç doğrultusunda ilk adım atmak amacıyla derin pekiştirmeli öğrenme ile, robot eyleyicisinin verilen bir A noktasından B noktasına seyahat ederken istenen temas tork profilini oluşturacak eklem açısı değişimlerini öğrenmeyi amaçlamaktadır. Bu hedefe ulaşmak için, görevi iyi anlatacak kadar kompleks; fakat aynı zamanda öğrenme ajanımızın rahatça öğrenmesini sağlayacak kadar spesifik bir ödül fonksiyonun oluşturulması kritiktir. Araştırmamız kullanılabilir bir ödül fonksiyonu geliştirme üzerine yoğunlaşmıştır. Şu aşamada deneylerimiz, farklı sistem parametreleri kullanarak, benzetim ortamında gerçekleştirilmektedir. Öncül bulgularımız derin pekiştirmeli öğrenme ile oluşturulan öğrenme ajanının, optimale yakın bir politika üstüne yoğunlaşmış öğrenme gerçekleştirebileceğine işaret etmekle birlikte, başarılı bir tork yörünge takibi için ödül fonksiyonun daha karmaşık tanımlanması ya da denetleyici ve öğrenen bir sistemin birlikte kullanılmasının daha verimli olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler — Robot Denetimi, Derin Pekiştirmeli Öğrenme, Pozisyon Denetimi, Dinamik Denetim, Sürekli Hareket Alanı

I. GİRİŞ

“Akıllı” robotik sistemler her geçen gün daha hızlı bir şekilde endüstriyel süreçlere dahil olmaktadır. Bu tür sistemlerin süreçlere dahililiyeti, montaj, parlatma, taşıma ve daha birçok sürecin otomatize olmasını sağlamıştır. Bu süreçlerin ortak ve belki de en büyük sorunu, endüstride kullanılan robotik sistemlerin pozisyon denetimli olmasıdır. Pozisyon denetimli robotik sistem kavramı, robotu kontrol ederken eklemlere uygulanan kuvvet ile değil, eklem açıları ile komuta edilen robotik sistemlere verilen addır. Endüstride bu tarz robotların kullanılmasının en temel sebebi de güvenlik gerekçeleridir. Açık girdisi alan bir sistemi kuvvet denetimli hale getirmek için robotik sistemin ters dinamik denklemlerinin çıkarılması ve genellikle kapalı kutu olarak sunulan pozisyon ya da hız denetleyicisinin parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Bu basamaklarda yapılacak olan olası hatalar ise robotun güvenli bir şekilde çalışmasını engelleyecek ve/veya kendisine zarar verme riskini doğuracaktır. Buna karşın pozisyon denetimli

robotik sistemlerin en büyük dezavantajlarından biri ise, mümkün iş uzayını kısıtlamasıdır. Örnek olarak, parlatma gibi işleri, sadece pozisyon uzayında kinematik yöntemlerle çözmek mümkün değildir. Bunun gibi karmaşık görevleri yerine getirebilmek için, robotun denetim mekanizmasının kinematik özelliklere ek olarak, kendisi ve ortam ile bağlantılı kuvvetlere de bağlı olarak tasarlanması gerekmektedir. Cheah[1]’nın belirttiği gibi, bu hareket-kuvvet problemini çözmenin birden fazla metodu mevcuttur. Bu makalede, ters dinamik modelleme ve ters-mühendislik yöntemlerine başvurmadan pekiştirmeli öğrenme ile pozisyon takibine ek olarak tork yörünge takibinin ne derece mümkün olabileceği irdelenecektir.

Devamlı denetim problemleri, yapay öğrenme alanında çok fazla üzerine düşülen problemlerdir[2][3][4][9]. Bunun nedeni ise ayrık durum ve eylem uzayı üzerinde başarılı uygulama bulan metotların devamlı durum ve eylem uzayı problemlerine başarılı bir şekilde genellenememesidir. Devamlı denetim problemlerinin bu kadar ilgi görmesinin bir başka sebebi, ayrık çok eylemlili problemlere de çözüm getirmesidir. Birçok gerçek hayat probleminde, özellikle robotik öğrenme problemlerinde, eylem uzayı devamlı ve çoğuldur. Aynı zamanda, robotik öğrenme problemlerinde eklem sayısı, eklem limitleri gibi model parametreleri çok kesin ve kısıtlıdır. Bu yüzden, robotik öğrenme problemlerini pekiştirmeli öğrenme problemi olarak modellemek ve çözmek mümkündür.

Son yıllarda, devamlı denetim tabanlı problemlere çözüm arayan birçok pekiştirmeli öğrenme sistemi ortaya atılmıştır. Bunlardan birkaçı, Derin Deterministik Politika Gradyanı (İng. Deep Deterministic Policy Gradients, Lillicrap et. al, 2015) [2], Model Bazlı İvme ile Derin Q-Ağları (İng. Model-Based Accelerated DQN, Gu et al, 2016) [3] ve Yaklaşık Politika Eniyilemesi (İng. Proximal Policy Optimization, Schulman et al, 2017) [4]’dir. Belirtilen algoritmaların hepsinin, sürekli denetim problemlerinin belli başlı setlerinde başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Bu makalede kullanacağımız deney düzeniği olan Pozisyon Denetimli Robotik Sistemlerde Kuvvet Denetimi’ni, bu algoritmalara tabii tutabilmek için sürekli denetim problemi olarak modelledik. Sistemimizin başarılı uygulama bulması tork denetimine izin vermeyen sistemlerin de, birleştirme, parlatma gibi çevre ile iletişim içeren birçok görev için kullanılabilmesine olanak sağlayacaktır. Şu anki sonuçlar

öncül niteliktedir; ancak, çalışılması gereken yönü açıkça ortaya koymaktadır.

II. METOD

A. Pekiştirmeli Öğrenme

Sutton[5], pekiştirmeli öğrenmeyi basitçe, bir ajanın, belli bir ortamın önemli noktalarını, bir amaca ulaşmak için öğrenmesi olarak tanımlar. Bir öğrenme ajanı mevcuttur ve bu ajan her eylem aldığı zaman, ortamdaki ona bir gözlem (ortamın yeni durumu) ve bir ödül bildirilir. Bütün pekiştirmeli öğrenme sistemleri, en basitinden en karmaşığına kadar, bu döngü üstünden ilerler ve gelişir. Bu döngü, çok daha genel bir fikir olan Markov Karar Süreci'ne (İng. Markov Decision Process)(MDP) dayanır. MDP, bir dörtlü eş üzerine dayanır ve bu dörtlü, Durum Seti, Eylem Seti, Durumlar Arası Geçişler (Durum-Aksiyon-Durum) ve Ödül Fonksiyonu'nu içerir. Küçük ve ayrık bir uzaya sahip problemlerde, değer döngüsü gibi kesin algoritmalar ile problemlere yaklaşmak mümkündür; fakat bizim makalemizin üzerinden gittiği problem sürekli denetim problemi olduğu için, kesin metotlar kullanmak mümkün değildir ve bu yüzden daha karmaşık yakınsama metodlarına ihtiyaç doğmaktadır.

B. Derin Pekiştirmeli Öğrenme

Deneylerimiz sırasında, Giriş bölümünde belirttiğimiz Derin Pekiştirmeli Öğrenme metodlarından biri olan Yaklaşık Politika Eniyilemesi'ni (kısıltma. PPO) kullandık. PPO, OpenAI tarafından, devamlı denetim problemlerini çözmeye çalışmak için, 2017 yılında ortaya atılan, aktör-kritik tabanlı bir algoritmadır. Bu algoritma, yine OpenAI'nin daha önce ortaya attığı Güven Bölgesi Politika Optimizasyonu (kısıltma. TRPO)[9] isimli bir algoritmanın geliştirilmiş bir sürümüdür. PPO, gizli fayda tahminleri üstünden KL uyumsuzluklarını hesaplama üzerine dayanır. PPO'nun ortaya atılan diğer devamlı denetim problemlerinde çözüm önerilerine oranla en büyük farkı, diğer sistemlerin, genellikle sayısı sabit bir bellek tutup, bu bellekten örnekleme yaparak öğrenme gerçekleştirmeye çalışmasıdır. PPO ise, bir bölümü tamamen oynadıktan sonra, o bölümde oluşturulan veri üstünden, birden fazla kez öğrenme gerçekleştirir ve bu gerçekleştikten sonra bunun verisini tutmaz. Bundan ötürü, PPO sürekli büyüyen veya evrilen bir bellek yapısına ihtiyaç duymamaktadır. Aynı zamanda PPO, pekiştirmeli öğrenmenin keşfetme bölümünde, rastgele bir aksiyon alıp bunun üzerinden öğrenmek yerine, aksiyon setine sürekli olarak küçük katsayılarla gürültü ekler. Bu gürültünün amacı, yapay sinir ağının kendi düzeneği bazında ziyaret etmeyeceği durum uzaylarını ziyaret etmektir. Bu gürültü ile ziyaret ise, daha uygun bir politikaya ulaşmamıza yardımcı olur. PPO algoritmasının detaylı tanımı, Şekil 1'deki gibidir.

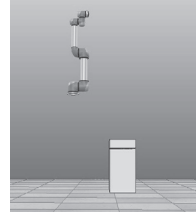
Aktör - Kritik Tabanlı Yaklaşık Politika Optimizasyonu Algoritması

```
K = Tekrar Sayısı
for iterasyon=1,2,...,do
  for aktör=1,2,...,N do
    T suresi için eski politika  $\pi_{\theta}$ 'yi çalıştır
    Kritik ağından gelen tahminler ve  $\pi_{\theta}$ 'dan gelen örneklemeler ile Avantaj
    Yakınsamalarını hesapla  $A_1, \dots, A_T$ 
  end for
  for tekrar=1,2,...,K do
    Aktör ağınnın kayıp fonksiyonu  $L'$ 'yi  $\theta'$ 'ya göre, Kritik ağınnı ise yeni oluşar
     $\pi_{\theta'}$ 'ya göre optimize et.
  end for
   $\theta_{eski} \leftarrow \theta$ 
end for
```

Şekil 1: PPO algoritması

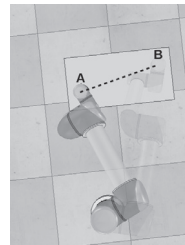
C. Ortam Düzenegi ve İş Tanımı

Benzetim ortamımızı, popüler bir robotik benzetim ortamı olan V-REP[6] üzerinde oluşturduk. Diğer benzetim ortamları yerine V-REP'i tercih etme nedenimiz, V-REP'in içinde hazır olarak bulunan robot sistem setlerinin çeşitliliği ve benzetim sahnesine uzaktan rahat bir şekilde erişilip manipüle edilebilmesidir. V-REP ortamında oluşturduğumuz benzetim ortamımızın örneği Şekil 2'de mevcuttur.



Şekil 2: Deneylerimiz sırasında kullanılan benzetim düzeneği

Deneylerimiz sırasında kullandığımız robotik sistem, Universal Robots firması tarafından tasarlanan bir robot olan UR-5'tir. UR-5, altı tane serbestlik dereceli ve pozisyon denetimi ile kontrol edilebilen bir robotik sistemdir. Şekil 2'de görülen masanın içine yerleştirilmiş olan bir kuvvet sensörü mevcuttur ve daha önceden belirtildiği gibi, bizim bu sistemdeki amacımız bu masanın üzerinde A noktasından B noktasına, masaya istenen kuvvet uygulanacak şekilde yol almaktır. Şekil 3'te, düzeneğimizde amaçlanan yolun görselleştirilmesi halini bulabilirsiniz.

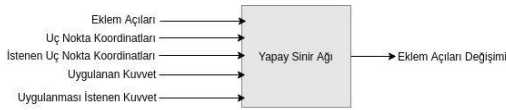


Şekil 3: Robot'un A noktasından B noktasına örnek hareketi

Kuvveti ölçebilmek için, oluşturduğumuz dikdörtgen masanın üzerine aynı uzunluk ve genişliğe sahip bir panel ekledik. Bu

paneli benzetme ortamının fizik motorunun sağladığı araçlar sayesinde masanın üstüne monte ettik ve 2 panel arasında bir kuvvet sensörü koyduk. Üstteki panelin fizik özelliklerinde kuvvetin eşit dağılması özelliğini ekledik ve bu yüzden masa ve panel arasına sadece 1 tane kuvvet sensörü eklememiz, deney ölçümlerini hesaplamamız için yeterli oldu. Bu özelliği kontrol etmek için, masanın farklı bölgelerine kuvvet sensörleri yerleştirdik ve hepsinde aynı okumayı almayı amaçladık. Okumaların beklentimiz ile tutarlı olduğunu gözlemlediğimiz zaman, sistemimizi bu belirtilen varsayım üzerine oluşturduk.

Derin Pekiştirmeli Öğrenme sistemimize girdi olarak 14 tane değer seçilmiştir. Bu değerler, robotun eklemlerinin t zamandaki açıları(-0.2 ve 0.2 radyan arasında), robotun uç noktasının t zamandaki masaya göre x, y ve z koordinatları, robotun uç noktasının sahip olmasını istediğimiz x, y ve z değerleri (B noktası), robotun masaya uyguladığı t zamandaki kuvvet, ve robotun t zamanda uygulamasını istediğimiz kuvvettir. Sistemimizin eylem uzayı ise 6 boyuttan oluşmaktadır ve bu değerlerden her biri, ajanın, aldığı girdi durumuna göre, eklem açılarındaki önerdiği değişim değerleridir. Sistemimizin genel şemasını, Şekil 4'te bulabilirsiniz.



Şekil 4: Derin Pekiştirmeli Öğrenme sisteminin düzeneği

PPO algoritmasının ana temeli olan yapay sinir ağıının son elemanı, negatif ve pozitif değerleri ortak olarak yakalayabilmek için, tanh aktivasyon fonksiyonu ile oluşturulmuştur. Şu anda mevcut olan düzeneğimizde, ödül ceza fonksiyonumuz Şekil 5'teki gibidir.

$$r(s) = \begin{cases} -100 & \text{Başarısız} \\ 100 & \text{Başarılı} \\ |F_{amaçlanan} - F_t| / 10 + D * 10 & \text{Diğer} \end{cases}$$

Şekil 5: Deneylerimiz sırasında kullandığımız ödül fonksiyonu

Ödül fonksiyonunda belirtilen "Başarı", robotun uç kısmının B noktasına ulaşması ve bu noktaya istenen kuvveti uygulaması olarak tanımlanmıştır. "Başarısız" olmak ise, robotun uç noktasının masadan teması kesmesi, veya verilen süre limitinde işi tamamlayamamasıdır. Aynı zamanda, belirtilen F değerleri kuvveti, D değeri ise robotun uç noktası ile ulaşılacak istenen nokta arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Bu öğrenme düzeneğini, Python programlama dilinde mevcut olan Keras [7] isimli bir kütüphane ile gerçekleştirdik. Keras, Google Brain tarafından geliştirilen Tensorflow [8] isimli kütüphanenin üzerine yazılmıştır.

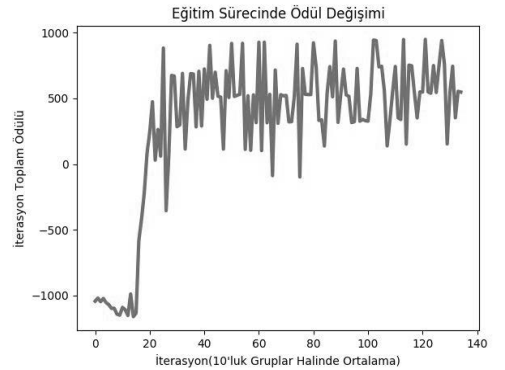
III. SONUÇLAR

Makalenin bu bölümünde, bir önceki bölümlerde açıkladığımız benzetim ortamı ve ajan açıklamalarımız ile, 2 farklı deney görevi üzerinden sonuç bildireceğiz. Görevlerimizden ilki A noktasından B noktasına giden yolda, sabit olarak aynı kuvvetin uygulanmasını sağlamak şeklinde tanımlanmıştır. İkinci görevimiz ise, uygulanması gereken kuvvetin zamana göre değişkenlik göstermesi üstünden tanımlanmıştır. Bu görevleri, oluşan sonuç bazında, toplanan ödül, uygulanan kuvvet ve pozisyon değişimi grafiği üzerinden açıklayacağız.

A. Sabit Kuvvet Profili

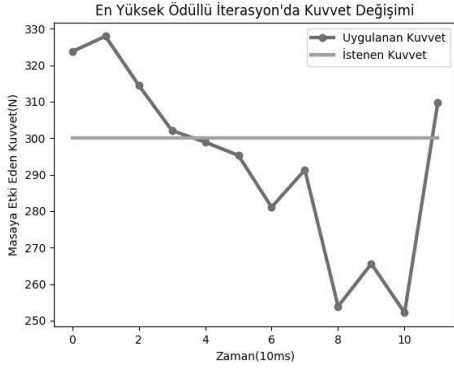
Bu görevde, istediğimiz kuvvet profilinde kuvveti her t zamanda aynı tuttuk. Görev, masa üzerinde A noktasından B noktasına giderken, masaya düzenli olarak 300N kuvvet uygulamaktır. Öğrenme sırasında iterasyon bazında ödül değişimi grafiğini Şekil 4'de verilmiştir.

Bu grafiği incelediğimiz zaman, belli bir oranda öğrenmenin gerçekleştiğini, grafiğin genel eğimi üstünden anlayabiliyoruz. Çok fazla dalgalanma olmasının sebebinin ise, bu grafiğin öğrenme sırasında alınmış olması ve öğrenmede sürekli devam eden bir bilinçli eylem bozmasının olmasının olduğunu düşünüyoruz. Buna rağmen, Şekil 6'da iterasyonların 10'lu gruplar halinde ortalamasının alındığı durumda, yaklaşık olarak 150'inci iterasyondan sonra grupların ortalamasının çoğu zaman 500 ödülün üstünde olduğunu gözlemlemek mümkündür.



Şekil 6: Sabit Kuvvet Profilinde Ödül Gelişimi. Toplam ödülün 500 ile 1000 arasında değişim göstermesi ya da ortalama 750 gibi bir değere yakınsaması bize robotun başarılı bir şekilde A noktasından B noktasına masa ile teması bozmadan hareket etmeyi öğrendiğini göstermektedir. Bunun sebebi ise, ödül fonksiyonumuzun pozitif sonuç verme koşulunda B noktasında bulunmak mevcuttur

Bu, sistemimizin belli bir alt-uygun politikaya yakınsadığının ve öğrenmeyi o noktada gerçekleştirmeye devam ettirdiğinin göstergesidir. Bu bölümde toplanan iterasyonlar içerisinde, en çok ödülü alan yolun zamana göre masaya uyguladığı kuvvetin grafiği Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7: En yüksek ödüllü iterasyonda zaman başına masaya uygulanan kuvvet. Tam 300N uygulanmamasına rağmen, sistemin açıkça bu sayının etrafında dolandığını gözlemleyebiliyoruz.

Sistemimizin tamamen sabit olarak 300N kuvvet uygulamak konusunda başarılı olamamasına rağmen, belli bir aralık içerisinde 300'e yakınlaştığını görüyoruz. Düzenli işlenen bir gürültünün mevcut olmasına rağmen 300 noktasına yakın bir grafiğin oluşması, ajanın en azından alt-uygun bir politikaya yaklaştığını önermektedir. Ajanın hem kuvvet denetimini, hem de pozisyon denetimini başarılı bir şekilde uygulaması, sistemimizin en önemli gereksinimlerinden biridir. Şekil 8'de, ajanın A noktasından B noktasına giderken izlediği yol mevcuttur.

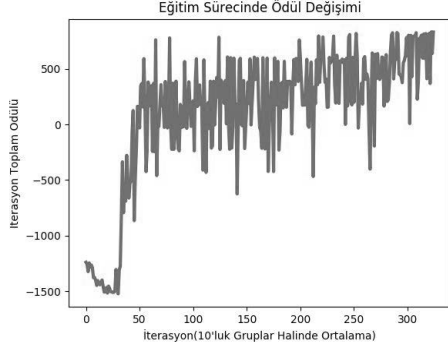


Şekil 8: En yüksek ödüllü iterasyonda A noktasından B noktasına izlenen yol

Daha fazla zaman ve parametre düzenlemesi ile, bu sonuçların çok daha iyi noktalara ulaşacağı kanaatindeyiz. Aynı zamanda, 12 iterasyonda başarı kriterini sağlaması, diğer bir deyiş ile B noktasına belli bir kuvvet aralığında ulaşmış olması, oluşturduğumuz ajanın tersine kinematik özelliklerini öğrendiğinin bir göstergesidir ve en azından ulaşmak istediğimiz sonuçlardan biri açısından güzel bir göstergedir.

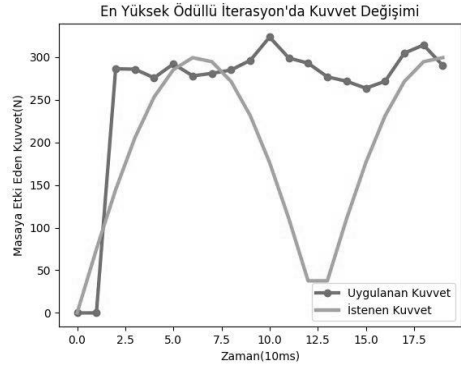
B. Sinüs Dalgası Tabanlı Kuvvet Profili

İkinci görevimiz, sistemin sabit bir profil izlemek yerine, zaman içerisinde değişebilen kuvvet değerlerine ayak uydurması şeklinde oluşturulmuştu. Öğrenme sırasında elde edilen ödül değerlerinin grafiği Şekil 9'da mevcuttur.



Şekil 9: Sinüs Kuvvet Profiline Ödül Gelişimi

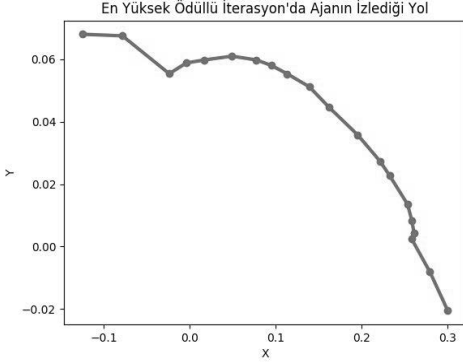
Bu sonuçları incelediğimiz zaman, ödül değişiminin zaman içerisinde gelişim gösterdiğini, fakat diğer grafikteki kadar belli bir sınır noktasına ulaşmadığını görebiliyoruz. Bunun bize bulgu olarak ilk belirttiği nokta, sistemimizin yeterli düzeyde öğrenemediği; fakat öğrenmekte olduğudur. Bu grafikteki noktalara göre, sistemin daha herhangi bir politikaya yakınsanmadığını söylemek adil olabilir. Başarılı olduğu senaryolar arasında, en yüksek ödülü aldığı iterasyonun kuvvet değişim grafiği, Şekil 10'daki gibidir.



Şekil 10: En yüksek ödüllü iterasyonda zaman başına masaya uygulanan kuvvet

Bu grafik incelendiği zaman, sistemin 20 aksiyonda B noktasına o anda istenen kuvvet düzeyinde ulaştığını ve bu yüzden geçen seferki gibi tersine kinematik algılamasında başarılı olduğunu; fakat grafiğin sinüs dalgasına benzer herhangi bir yanı olmadığını rahat bir şekilde gözlemleyebiliriz. En yüksek ödülü alan iterasyonun bu olduğunu göz önünde bulundurursak, ödül fonksiyonumuzun

bu görev için yeterli kesinlikte olmadığı şeklinde bir çıkarım yapmak mümkündür. Şekil 11’de, ajanın bahsedilen iterasyonda A noktasından B noktasına giderken izlediği yol mevcuttur.



Şekil 11: En yüksek ödüllü iterasyonda A noktasından B noktasına izlenen yol

Bir diğer ihtimalin ise, sınır ağı parametrelerimizi güncellemek ve daha uzun iterasyonlar oluşturmak olduğu kanaatindeyiz ve Şekil 6’daki ödül değişim çizgisinin son noktalarda eğiminin pozitif yönde olması bu öngörümüzü destekler niteliktedir.

Sonuç olarak, bu sonuçlar öncül düzeyde olup modelimizde, özellikle de ödül fonksiyonunda ne tür değişiklikler yapmamız gerektiği konusunda bilgi verir niteliktedir. Bu noktalar bir sonraki bölümde tartışılmıştır.

IV. TARTIŞMA VE PLANLANAN ÇALIŞMALAR

Bu makalede, pozisyon denetimli robotlar için kuvvet denetimi sağlayabilecek bir derin pekiştirmeli öğrenme metodu önerdik, modelimizi ve benzetme ortamımızı açıkladık ve sonuçlarımızdan bahsettik. Sonuçlarımız, bu önerilen metodun doğruluğunu kanıtlamaktan uzak olsa da, sistemimizin, bulgulara göre tersine kinematik yapısını öğrenmiş olmasının, ve ilkel sonuçlara göre sabit kuvvette belli bir aralık içerisinde başarılı olmasının umut verici olduğunu düşünüyoruz. İnaniyoruz ki gelecek çalışmalarda yapılacak modifikasyonlar, daha kuvvetli bir sistem ve parametrisasyon ile, sistemimizin işe yarar bir kuvvet denetim mekanizması olma potansiyeli mevcut.

Öncelikle değişiklik yapmamız gereken noktanın, ödül fonksiyonumuz olduğu kanaatindeyiz. Bulgularımıza göre, çalıştırmayı denediğimiz 2 sistemde A noktasından B noktasına gitmek konusunda başarılı oluyor; fakat 2. sistem, belli bir tork düzeneği üstünden hareket edemiyor. Bize göre, bunun birincil nedeni, ödül fonksiyonumuzun istenen kuvvete ulaşamadığı zaman verilen cezaların yeterli boyutta olmadığıdır. Ödül fonksiyonumuzu yeniden şekillendirmenin ve cezaların boyutlarını gözden geçirmenin, sistemimizde çok büyük bir pozitif etki yaratacağını düşünüyoruz.

İkinci olarak, sistemimizde gözden geçirmemiz gereken olası bir başka noktanın, Derin Pekiştirmeli Öğrenme sistemimize verdiğimiz girdiler olduğunu düşünüyoruz. Bu tarz sistemlerde, durum uzayının tanımının kesin yapılması çok önemlidir ve bu yüzden sistemin sonucunu etkileyebilecek bilgilerin sisteme verilmesi çok ciddi önem taşımaktadır. Bu yüzden bir sonrası denemelerimizde, durum uzayımıza, robotun eklem açılarının hızı, uç noktanın t-1 zamandan t zamana değişimi gibi, çevreyi daha iyi açıklayacak parametreler ekleyeceğiz ve bu eklemelerin sonuçlarımızı daha iyi bir noktaya taşıyacağı düşüncesindeyiz.

Sistemimizi güçlendirmek için yapabileceğimiz bir başka güncelleme ise, sistemimizi daha uzun süre çalıştırmak ve farklı A-B noktaları ve farklı beklenen kuvvet ile eğitmek olacaktır. Bu sayede, sistemimizin, sadece şu anda belirtilen kısıtlı uzayda ve beklentiler ile değil, farklı farklı parametreler ile çalışan daha genel bir model olmasını amaçlayacağız ve bu genel modelinde, şu anki sonuçlarımızdan çok daha kapsamlı ve iyi sonuçlar vereceğine inanıyoruz.

Son olarak, sistemimizde pozitif etki yaratacağını düşündüğümüz bir başka nokta ise, sistemi tersine kinematik yükünden kurtarmaktır. Derin Pekiştirmeli Öğrenme sistemimize, çevre parametrelerini verip, açı değişimlerini beklemek yerine, sistemimizin üstüne bir tersine kinematik modülü oturtup, açı değerlerini bu sistemden alıp, Derin Pekiştirmeli Öğrenme sistemimize vererek, bu açılarda bu kuvvetin uygulanması için açılar nasıl değişmelidir düşüncesi üstünden ilerleyerek, problem karmaşıklığını azaltmak mümkündür ve bu azaltım, asıl amacımız olan kuvvet denetimi işini gerçekleştirmeyi kolaylaştıracaktır.

V. REFERANSLAR

- [1] C. C. Cheah, D. Wang “Learning impedance control for robotic manipulators”, IEEE Transactions on Robotics and Automation vol 14, pp. 452-465, June 1998.
- [2] T. P. Lillicrap, J. J. Hunt, A. Pritzel, N. Heess, T. Erez, Y. Tassa, D. Silver, and D. Wierstra, “Continuous control with deep reinforcement learning,” International Conference on Learning Representations (ICLR), 2016.
- [3] S. Gu, “Continuous Deep Q-Learning with Model-based Acceleration”, International Conference on Machine Learning (ICML), 2016.
- [4] J. Schulman, F. Wolski, P. Dhariwal, A. Radford, and O. Klimov, “Proximal policy optimization algorithms,” arXiv preprint arXiv:1707.06347, 2017.
- [5] R. S. Sutton and A. G. Barto, Reinforcement learning: an introduction. Cambridge (Mass.): The MIT Press., 2018.
- [6] E. Rohmer, “V-REP: a versatile and scalable robot simulation framework”, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013
- [7] F. Chollet, “Keras”, <https://keras.io>, 2015
- [8] M. Abadi, “Tensorflow: large scale machine learning on heterogeneous systems”, tensorflow.org, 2015
- [9] J. Schulman, S. Levine, “Trust Region Policy Optimization”, ICML(2015)

Yarı Otonom İnsansız Sualtı Robot Sisteminin Mekatronik Sistem Tasarımı

Esra Yuğuran, Savaş Dilibal, Devkan İçli, Furkan Çetinkaya, Umut Macit, Enes Sönmez, Esat Karakaya ve Burak Lale

Mekatronik Mühendisliği Bölümü

İstanbul Gedik Üniversitesi

İstanbul, Türkiye

esrayuguran@gmail.com, savas.dilibal@gedik.edu.tr

Özetçe — Geliştirilen sualtı robot sistemi, su altında başta sualtı arama olmak üzere çeşitli görevleri gerçekleştirmek için tasarlanan yarı otonom bir robottur. Mekatronik sistem tasarımı esaslarına göre alt sistemleri geliştirilen sualtı robotun şasisi akrilik ve 6000 serisi alüminyumdan oluşmaktadır. Robotun doğrusal ve döngüsel hareket kabiliyeti şasiye simetrik olarak üç ayrı konumda yerleştirilen itici elektrik motor çiftleri ile sağlanmıştır. Sualtı hareket ve denge sisteminin kontrolü, gömülü sistem kontrol kartı ile gerçekleştirilmiştir. Sualtı robotun robotik tutucu sistemi, eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilen pnömomatik tahrikli tutucu alt sisteminden oluşmaktadır. Su altında mayın imha görevi için nikel-titanyum akıllı malzeme temelli imha mekanizması geliştirilmiştir. Sualtı robotun kamerasından alınan görüntü, su üstündeki operatöre sanal gerçeklik gözlüğü (FPV) ile aktarılmaktadır. Operatörün kafa hareketleri ile kamera görüş açısının bakılan yöne yönlendirilmesi için, altı eksenli sensör (IMU) kullanılarak pan-tilt hareket mekanizması geliştirilmiştir. Robotta bulunan basınç ve sıcaklık sensörleriyle sualtında bulunan bölgeden alınan basınç ve sıcaklık verileri su üstündeki arayüze aktarılmıştır. Mekatronik tasarım esaslarına uygun özellikleri geliştirilen prototip sualtı robotu, su altında tutma/bırakma, mayın arama/imha, sıcaklık, basınç ölçümü görevlerini yerine getirebilecek kabiliyettir. Bu çalışmada, prototipi geliştirilen yarı otonom sualtı robotun mekatronik sistem tasarımı, alt sistemlerin ilişkisi, robotik tutucu sistemi, mayın imhada kullanılan nikel-titanyum mekanizması ve gelecekte yapılacak çalışmalar açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler— Mekatronik Sistem Tasarımı, Yarı Otonom Sualtı Robotu, Robot Manipülatör, Nikel-Titanyum

I. GİRİŞ

Son yıllarda mekatronik sistemlerdeki teknolojik gelişmelere bağlı olarak insansız sualtı, insansız kara ve insansız hava araçları alanlarında yapılan araştırma çalışmaları artış göstermiştir [1-3]. Sualtı uzaktan kumandalı, otonom veya yarı otonom olarak çalışan insansız sualtı araçları, sualtında gerçekleştirilecek birçok uygulamayı daha risksiz olarak gerçekleştirebilmektedir.

İnsansız sualtı araçları savunma sanayi uygulamalarında konum tespiti ve mayın aram/imha, çevre güvenliği, kontrol, sualtı kaynak işlemlerinde kullanılmasının yanında eğlence, arkeoloji veya hizmet sektörü gibi birçok farklı alanda aktif olarak kullanılmaktadır [1].

İnsansız sualtı araçları; farklı yapı, boyut ve ağırlıklarda tasarlanan yarı otonom veya otonom olarak çalışan, sualtında çeşitli görevleri yerine getirmeye odaklı mekatronik sistemlerdir [2]. Haberleşme kablosu vasıtasıyla uzaktan kumandalı veya kablosuz otonom olarak tasarlanan insansız sualtı araçları ile ilgili birçok farklı tasarım geliştirilmiştir [3]. Kontrol istasyonunda gemiyle RF haberleşen ve sualtında fiberoptik kabloyla kontrol istasyonu ile iletişim halinde olan iki araç sistemi olarak tasarlanan ULISAR ülkemizde bu alanda tasarlanmış olan sualtı araçlarından biridir. Görüntülü navigasyon yapabilen aracın 100 metre derinliğe kadar çalışabilmesi hedeflenmiştir [4].

Ülkemizde milli ROV projesi kapsamında GATE Elektronik/TR Teknoloji Ltd.Şti.'nin geliştirdiği askeri sınıf insansız sualtı aracında, robotik tutucu, silah sistemi, kablo sarma ünitesi geliştirmeleri ve bunların entegrasyonu üzerine araştırmalar yapılmıştır [5]. Ülkemizde geliştirilen bir diğer su altı sistemi ise ASELSAN'ın geliştirdiği sualtı keşif ve gözetleme aracıdır. Bu araç, kıyı ve limanların güvenliği, mayın imha, arama, kurtarma gibi özelliklere sahiptir [6].

Bu çalışmada, sualtı arama ve mayın imhada kullanılabilecek şekilde yarı otonom olarak prototipi geliştirilen sualtı robot sisteminin mekatronik sistem tasarımı incelenmiştir. Sisteme teknolojik olarak değer katan akıllı malzeme temelli imha mekanizmasının kullanılması ve kamera görüş açısının operatör kontrollü gerçekleştirilmesi detaylı olarak bu çalışmada aktarılmıştır.

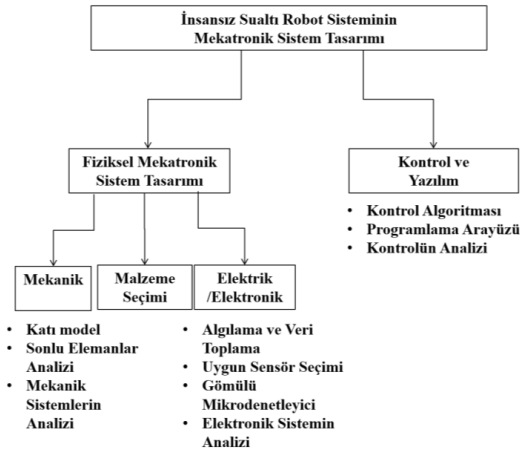
II. GELİŞTİRİLEN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI

Prototipi Şekil 1'de gösterilen yarı otonom sualtı robot sisteminin mekatronik sistem tasarımı üç ana alt sistem içerisinde incelenmiştir. Öncelikle fiziksel mekatronik sistem tasarımı mekanik, malzeme seçimi ve elektrik/elektronik alt

sistemleri detaylandırılarak oluşturulmuştur. Kontrol ve yazılım alt sistemleri eş zamanlı olarak geliştirilmiştir. Elde edilen mekatronik sistem alt sistemlerin entegrasyonu ile sağlanmıştır.



Şekil 1. Geliştirilen yarı otonom sualtı robot sistemi



Şekil 2. İnsansız sualtı robot sisteminin mekatronik sistem tasarım aşamaları

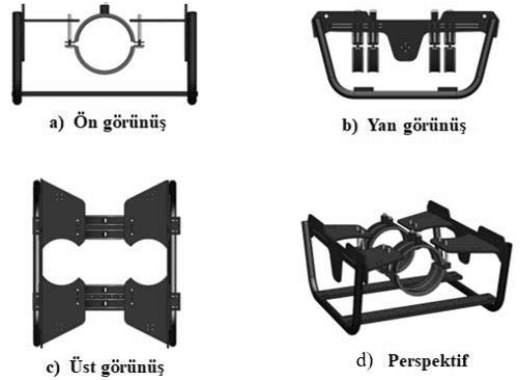
A. Fiziksel Mekatronik Sistem Tasarımı

Mekanik Alt Sistem

Tasarım geliştirme süreci boyunca bilgisayar destekli tasarım ortamında hidrostatik ve hidrodinamik yapılar farklı geometrilere değerlendirilmiştir. Sualtı robotun görevler esnasında dengede kalmasını sağlamak amacıyla farklı prototipler oluşturularak motor konfigürasyonuna uygun olarak altı motora sahip tasarım geliştirilmesine karar verilmiştir. Geliştirilen insansız sualtı robotun şasisinin teknik çizimleri

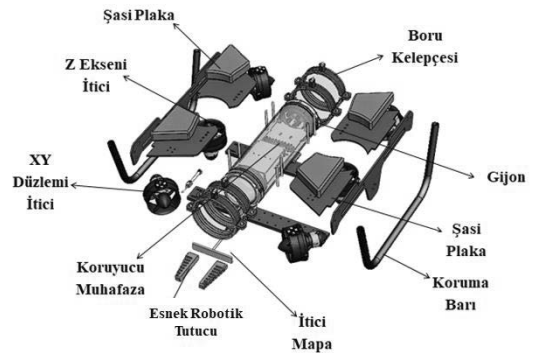
Şekil 3'te ve su altı robotunun alt donanımları ve Şekil 4'te gösterilmiştir.

Geliştirilen sualtı robotun gövde yapısının konstrüksiyonu için dayanıklı ve hafif olacak şekilde malzeme seçimi yapılarak akrilik ve 6000 serisi alüminyum malzemeler kullanılmıştır. Autodesk Fusion 360 ortamında bilgisayar destekli tasarım ile tasarımı geliştirilen robot şasisi için akrilik malzemeler lazer kesim yöntemiyle kesilerek Şekil 4'te gösterilen ana gövde yapısı oluşturulmuştur.



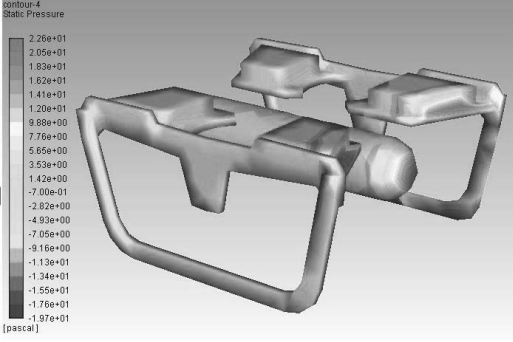
Şekil 3. Geliştirilen insansız sualtı robotun şasisinin teknik çizimleri

Sualtı robot üzerinde, elektronik alt sistemleri korumak amacıyla kullanılan su geçirmez silindirik koruma bloğu, standart boru kelepçeler ile ana şasiye sabitlenmiştir. Akrilik malzeme, birçok malzemeye kıyasla daha düşük yoğunluklu olduğu için, robotun hidrostatik kaldırma kuvveti altında denge merkezi kolaylıkla konumlandırılmıştır. Mekanik alt sistem içerisinde yer alan her alt parçanın tasarımı yapılırken kolaylıkla sökülüp takılabilir olmasına özen gösterilmiştir. Ayrıca mekanik alt sistemde yer alan her alt parçanın standartlığına ve üretim kolaylığına dikkat edilmiştir.



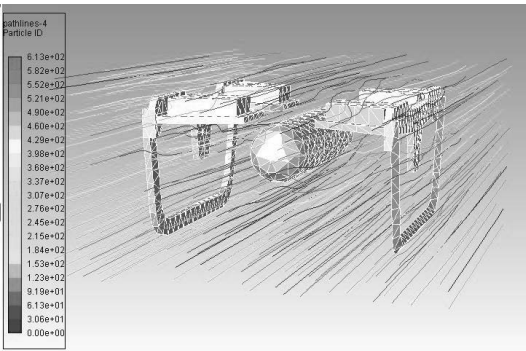
Şekil 4. Geliştirilen insansız sualtı robotunun alt donanımları

Sonlu elemanlar analizleri FloEFD dinamik akışkan analiz programı kullanılarak yapılmıştır. Robot dış akış analizi için geliştirilen sonlu eleman yapısı, 4 düğüm noktalı üçgen elemanlardan oluşturulmuştur. Geliştirilen model toplam 78442 eleman ve 14696 düğümden oluşmaktadır.



Şekil 5. Dış akış etkisi altında yapıdaki hidrostatik basınç dağılımı

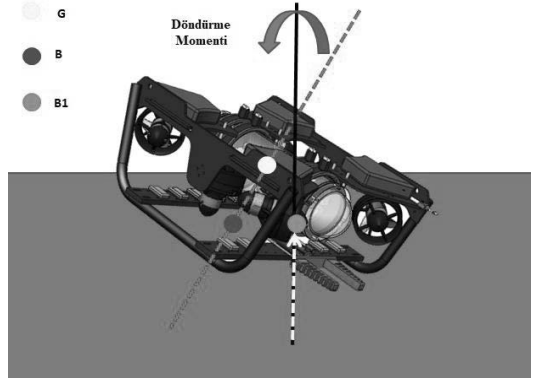
Analiz sonuçları dış akış etkisi altında yapıda oluşan gerilme dağılımı bakımından incelendiğinde robotun üzerinde bulunan yüklerin yoğun olarak pervanelerin iç kısımlarında meydana geldiği tespit edilmiştir. Elde edilen hidrostatik basınç değerleri sualtı robot üzerindeki yapıda kullanılan malzemelerin akma gerilmeleri altında olduğundan emniyet sınırları içerisinde olduğu görülmüştür. Yapılan analiz sonucunda, modelin kritik noktalarında meydana gelen basınç değerlerine göre robot gövde yapısının uygunluğu teyit edilmiştir. Oluşan basınç durumunda etki eden gerilmeler ile gövdede kullanılan akrilik malzemenin akma gerilmesi karşılaştırıldığında herhangi bir kritik durumun söz konusu olmadığı tespit edilmiştir. Model çözümlenirken simetri olarak analiz yapısı oluşturulmuştur. Dış akış analizi ile yapının türbilans bölgeleri tespiti analizinde ise maksimum basınçlar pervanelerin döndüğü bölgede meydana gelmiştir. Burada oluşan vorteksten ötürü direnç kuvveti artmakta ancak itici gücünü yenemeyeceği için bir sorunla karşılaşılmayacağı görülmektedir. Robotun geometrik yapısı ile karşılaşacağı direnç kuvveti 8.4 N olarak hesaplanmıştır. Genel olarak yapısal anlamda aracın belli bir hızın üstüne çıkması (20 km/saat) gerekmedikinden geliştirilen tasarımın temel görevleri karşılayabilecek bir yapıda olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Hidrodinamik dış akış analizi ile türbilans bölgelerinin tespiti

Şasi üzerinde itki motorları ağırlık merkezi eksenine yakın olacak şekilde konumlandırılmıştır. Robota uygulanacak olan döndürme momenti Şekil 7'de gösterilen esaslar altında dikkate alınmıştır. Robotun sualtında dengesinin sağlanması

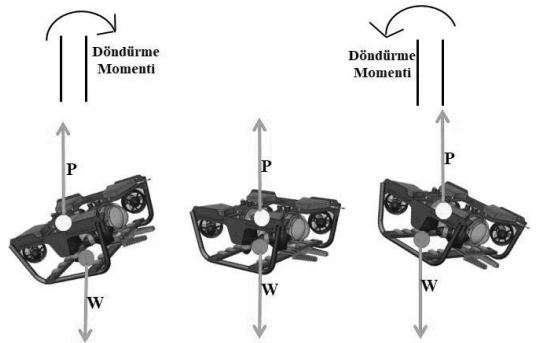
ve kararlı hareket edebilmesi için Şekil 8'de verilen ağırlık merkezi ve kaldırma kuvveti arasındaki ilişki dikkate alınmıştır.



Şekil 7. Döndürme momenti etkisi (B: sepiye noktası, G: ağırlık merkezi)

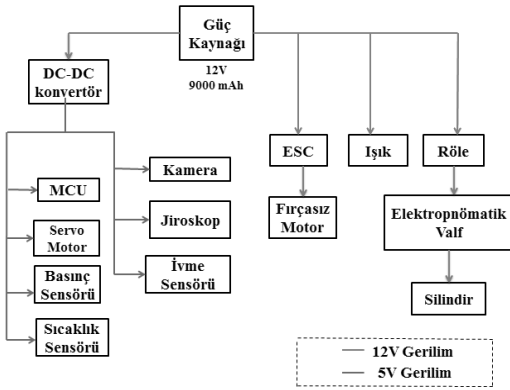
Sualtı robotta şasi üst bölümüne yüksek hacimli ve düşük yoğunluklu süngerler alt bölümüne ise metalik plakalar eklenmiştir. Bu sayede robota etki eden kaldırma kuvvetiyle, robotun ağırlık merkezi eksenini aynı düzlemde olacak şekilde mekanik yapı oluşturulması sağlanmıştır. Böylece, robot pasif bir şekilde denge konumuna gelmiştir. Bu sayede robotun dengeye gelmesi için itici motorlara daha az ihtiyaç duyulmuştur. Bu da hem elektrik tüketimini hem de yapının yüksek akıma geçmeden çalışmasına olanak sağlamıştır.

Sualtı robot sistemlerinde suyun kaldırma kuvveti ve ağırlık merkezi aynı eksende olmaz ise yüzdürücü kuvvet dengeye gelmek istediğinden dolayı robot dengesini bulamaz. Robotun ağırlık merkezi ve büyüklüğüne eşit olan yüzdürücü kuvvetlerin ortaya çıkardığı kuvvet sayesinde, robot pasif bir şekilde dengelenmiştir. Robotun pasif bir şekilde dengede kalması, yüzdürücü kuvvet ve ağırlık merkezi haricinde tüm sistemin yoğunluğudur. Robotun özgül ağırlığı 1 kg/m³'ten düşük olduğundan suyun içinde askıda kaldığı görülmüştür. Bu özellik robot şasisinde kullanılan düşük yoğunluklu malzemeler sayesinde sağlanmıştır.



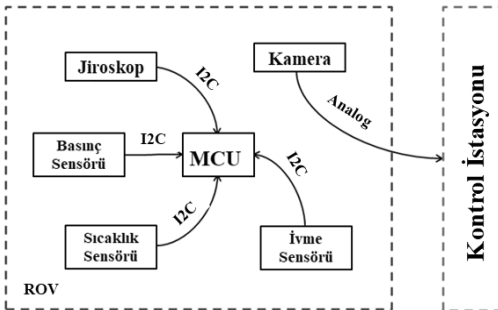
Şekil 8. Sualtı robot ağırlık merkezi ve kaldırma kuvveti etkisi

Geliştirilen sualtı robotun üzerinde sensör ve mikrodenetleyici alt sistemleri güç tüketimi bulunan elektronik alt sistemlerdir. Bu elektronik alt sistemlerin besleme gerilimleri birbirinden farklı olmakla beraber, tüm elektronik alt sistemler 12V veya 5V gerilim ile çalıştırılmaktadır. Sualtı robotun güç kaynağı 12V 9000 mAh değerinde lityum polimer güç bloğundan sağlanmaktadır. Sistem için gerekli olan 12V gerilim direkt olarak güç kaynağından alınmakta, 5V gerilim ise DC-DC dönüştürücüler vasıtasıyla sağlanmaktadır. Geliştirilen sualtı robotun ana elektrik blok şeması Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Sualtı robotta elektronik alt sistemlerin veri akış blok diyagramı

Sistem içerisinde sensörlerin mikrodenetleyici ile seri haberleşmesi I2C protokolü ile sağlanmıştır. I2C protokolünde iki hat üzerinden tüm sensörler ile iletişim kolaylıkla sağlanabilmektedir. Kamera görüntü aktarımı analog sinyal üzerinden gerçekleştirilmiştir. Servo motor, elektronik hız kontrolü (ESC) ve lümen ışıklar için genlik dalga modülasyonu (PWM), röle için dijital sinyal tetiklenmiştir.



Şekil 10. Haberleşme blok şeması

Geliştirilen sualtı robotun tüm elektronik alt sistem donanımları sızdırmazlığı sağlamış olan silindirik geometrideki akrilik koruyucu içerisine sabitlenmiştir. Koruyucu içerisinden güç, haberleşme ve vakumlama kablolarının dışarıya çıkışı, koruyucu silindirin arka kapağı üzerindeki sızdırma engelleyici contaların bulunduğu deliklerden sağlanmıştır.

Sualtı Robot Üzerinde Kullanılan Sensör Sistemleri

Derinlik (Basınç) Sensörü:

Derinlik ölçümü için kullanılan basınç sensörü suya karşı yalıtımı yapılmış olan ve su geçirmez bir muhafaza içerisinde korunan basınç sensörüdür. Sensör, 300 m derinlikte 3 MPa hidrostatik basınca kadar ölçüm yapabilmektedir. I2C haberleşme protokolüne sahip olan sensör I2C protokolüne sahip tüm mikrodenetleyiciler ile uyumlu olarak çalışabilmektedir.

Sıcaklık Sensörü:

Sualtı robot üzerinde kullanılan sıcaklık sensörü Bluerobotics firmasına ait olan bir sensördür. Alüminyum muhafaza ile yalıtılmış olan sensör akışkan içerisinde $\pm 0.1^\circ \text{C}$ 'ye kadar hassas ölçüm yapabilmekte ve I2C protokolü üzerinden haberleşerek mikrokontrolciye sistem entegrasyonu sağlanmaktadır.

İvme Ölçer ve Jiroskop:

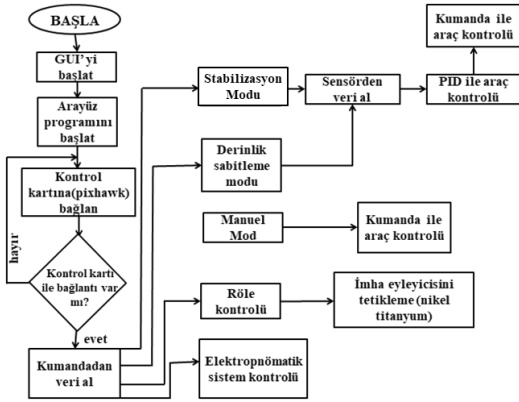
Sualtı robot üzerinde kullanılan MPU-9250 ataletsel ölçü birimi (IMU) mikroişlemci kontrol ünitesi modülü ile üç eksen ivmeölçer, üç eksen jiroskop ve üç eksen manyetometre verisi alınmıştır. 3-5 V aralığında besleme gerilimi bulunan IMU için haberleşme protokolü olarak I2C kullanılmıştır. Üç eksen jiroskop aralığı $\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000 \text{ dps}$ 'dir. İvme aralığı ise $\pm 2\text{G}, \pm 4\text{G}, \pm 8\text{G}, \pm 16\text{G}$ 'dir. Manyetometre aralığı $\pm 4800 \text{ uF}$ 'dir. Sistem üzerinde boyutları: 15mm x 25mm x 2mm'dir.

Robotun Kontrolü ve Operatör Kontrollü Kamera Hareketleri

Robotun Kontrolü

Robotun kontrol kartı (pixhawk) açık kaynak kodlu STM32 mikro denetleyiciye sahip, ArduSub yazılım tabanlı bir kontrol kartıdır.

Kontrol kartına yüklenen QgroundConrol programında, derinlik sabitleme modu aktifleştirilerek robot üzerindeki kontrol sisteminde kullanılan basınç sensörü vasıtasıyla derinlik ölçümünden alınan veriler kontrol istasyonuna aktarılmaktadır. Sensörden alınan veriler kullanılarak kapalı çevrim PID kontrol ile robotun belirlenen derinlikte sabit kalması sağlanmaktadır.



Şekil 11. Kontrol algoritması

Tablo 1. Sualtı robotta kullanılan basınç, sıcaklık, ivmeölçer ve jiroskop sensörlerinin teknik özellikleri

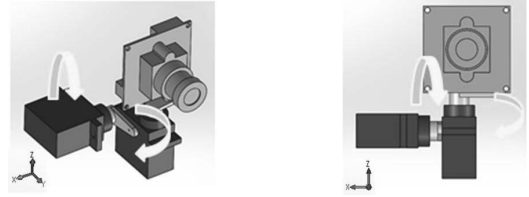
	Parametreler	Değer
Basınç Sensörü	Besleme gerilimi	2,5-5,5 volt
	I2 C Lojik Voltaj	2,5 - 3,6 volt
	Pik akımı	1.25 mA
	Maksimum mekanik basınç	50 bar
	İşletme basıncı	0-30 bar
	Çalışma derinliği	300m
	Bağıl doğruluk (0-40 ° C)	200mbar
	Çalışma sıcaklığı	-20 ile + 85 ° C
	Depolama sıcaklığı	-40 ile + 85 ° C
	Mutlak doğruluk	1.5 °
Sıcaklık Sensörü	Delik Boyutuyla Tavsiye Edilen	10,2 mm
	Besleme gerilimi	3,3 - 5,5 volt
	I2 C Lojik Voltaj	3,3 volt
	Pik akımı	1.4 mA
	Çalışma sıcaklığı	-40 ile + 125 ° C
	Depolama sıcaklığı	-55 ile + 150 ° C
İvme Ölçer ve Jiroskop	Mutlak doğruluk	0.1 ° C
	Delik Boyutuyla Tavsiye Edilen	10,2 mm
	Besleme gerilimi	3-5 Volt
	Haberleşme	I2C/SPI
	Gyro Aralığı	+/-250, +/-500, +/-1000, +/-2000dps
	İvme Ölçer Aralığı	+/-2G, +/-4G, +/-8G, +/-16G
	Magnetometre Aralığı	+/-4800 uF
	Boyutları	15mm * 25mm (yaklaşık)

Operatör Kontrollü Kamera Hareketleri

Sualtı robot üzerinde bulunan kameradan görüntü sanal gerçeklik gözlüğü (FPV) vasıtasıyla alınmaktadır. Gözlükte kullanılan MPU6050 sensöründen alınan eğim verisi vasıtasıyla kameranın pan-tilt hareket mekanizması çalışmaktadır.

FPV görüntüleme sistemi için kullanılan kameranın bir mikrodenetleyici ve servomotorlarla yapılan pan ve tilt hareketlerinin (kameranın hem istikamet açısından hem de

düşey düzlemde hareketine izin veren mekanizma) kontrolü için FPV gözlük üzerinde bulunan ivme ve gyro sensöründen veriler alınır.



Şekil 12. Sualtı robot kamerasının pan-tilt hareket mekanizmasının konfigürasyonu

Alınan veriler sayesinde operatörün kafa hareketleri ile robot, içerisinde bulunan kameranın hareketi sağlanmış olur (Şekil 13).

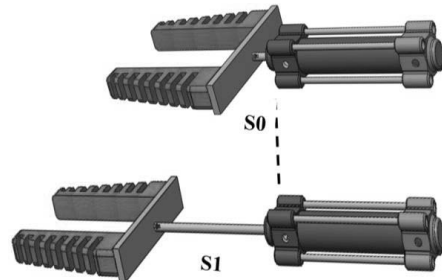


Şekil 13. Operatör tarafından manuel kontrolün sanal gerçeklik gözlüğü vasıtasıyla kontrol ünitesinden sağlanması

Robotta bulunan robotik tutucu sistemi (Şekil 15); pnömatik alt sistem vasıtasıyla ileri-geri ve açma-kapama hareketlerini gerçekleştirebilmektedir. Pixhawk kontrol kartı üzerinde bulunan çıkışlarla itici motorlar ve ışıklar Qgroundcontrol sisteminden kumanda vasıtasıyla manuel olarak kontrol edilebilmektedir.

B. Robot Manipülâtör ve Robotik Tutucu Sistemi

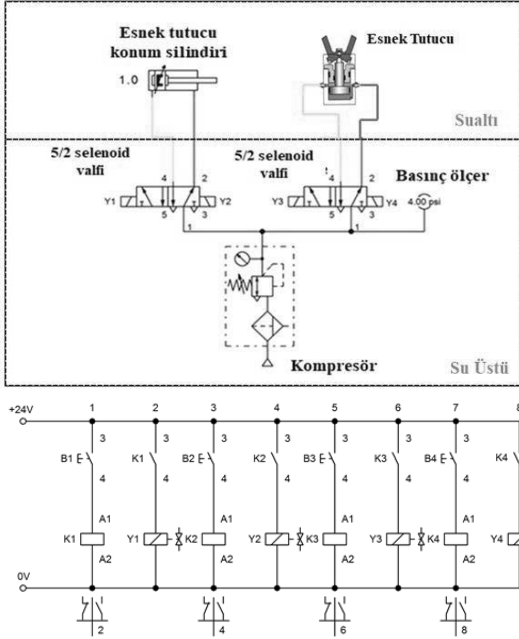
Geliştirilen sualtı robotunda kullanılan robotik tutucu eklemeli imalat yöntemi ile imal edilmiş pnömatik sistemle çalışan mekatronik alt sistemdir [7].



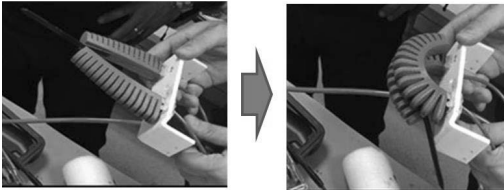
Şekil 14. Sualtı robot manipülâtör sisteminde bulunan esnek robotik tutucu alt sisteminin ileri-geri konumları [7]

Robot manipulatörün ileri-geri hareketi için elektropnömatik eyleyici alt sistem devre elemanları olarak; kompresör, basınçölçer, şartlandırıcı (FRL), 3/2 yön kontrol valfleri ve tek etkili silindir kullanılmıştır. Ayrıca, sualtı robot gövde ön bölümü üzerine elektropnömatik kumanda ile tahrik edilen basınçlı hava imha silindiri opsiyonel olarak yerleştirilmiştir.

Sistemin çalışması, kontrol masasında bulunan 3 adet valf üzerinden sağlanmaktadır. Bu valfler manuel olarak operatör tarafından manuel olarak veya yarı otonom modül kullanılarak sürülmektedir.



Şekil 15. Robot manipulatör kontrol mekanizmasının elektropnömatik devre ve kumanda şeması



Şekil 16. Sualtı robot manipulatör sisteminde bulunan esnek robotik tutucunun açık ve kapalı konumları [7]

C. Nikel-Titanyum Mayın İmha Mekanizması

Mekatronik sistemlerde doğrusal veya döner hareket sağlayan eyleyiciler; mekanik, elektromekanik, akışkan

basıncı (hidrolik/pnömatik), akıllı malzemeler ve hibrid eyleyiciler olarak beş grupta incelenebilir. Bu eyleyici mekanizmaları içerisinde elektromekanik, akışkan basıncı ve mekanik eyleyiciler geleneksel eyleyici sistemleri olarak bilinir. Geleneksel eyleyici sistemlerinden farklı olarak kullanılan şekil bellekli alaşımlar, savunma ve havacılık alanında başta uçak ve helikopter kanat ve pal hareket sistemlerinden, jet motor nozul hareket sistemlerine, adaptif kompozit sistemlerden kaplin sistemlerine kadar birçok uygulamada geleneksel eyleyici sistemlerinin yerini almaya başlamıştır.

Savunma ve havacılık alanlarında akıllı malzemeler olarak bilinen nikel-titanyum şekil bellekli alaşımlardan elde edilen kuvvet veya momentin mekatronik sistemlerde eyleyici olarak kullanılması ile ilgili birçok uygulama bulunmaktadır [8-10]. Şekil bellekli alaşımlar, mekanizma olarak sistem içerisinde uygulamada kullanılmadan önce boyutsal olarak kararlı davranış göstermesi için sabit sıcaklık veya sabit yük altında termomekanik döngüsel şekil bellek eğitimi olarak gerçekleştirilen işlemlere tabi tutulurlar [9].

Geliştirilen yarı otonom sualtı robot üzerindeki imha mekanizması için eyleyici olarak kullanılan NiTi şekil bellekli alaşım parçalar sualtında koruyucu içerisinde bulunan lityum-polimer pilden alınan elektrik akımı ile tetiklenecek şekilde şasi üzerinde konumlandırılmıştır [9]. Geliştirilen mayın imha sistemi için NiTi şekil bellekli alaşım çubuklara 520 °C'de şekil belleği kazandırılarak imha mekanizması sualtında çalışmaya hazır hale getirilmiştir [11-12].

III. TARTIŞMA

Prototipi geliştirilen sualtı robotun genel özellikleri benzer sualtı robotik sistemler ile karşılaştırıldığında sualtı görüntü izleme, mayın imha ve esnek tutucu mekanizması gibi avantajlara sahip olduğu görülmektedir. Sisteme ait ölçüm yapılan temel özellikler yıllara göre şu şekildedir;

Tablo 2. Geliştirilen sualtı robotunun yıllara göre karşılaştırılması

Özellikler	Geliştirilen Sualtı Robot Sistemi		
	2016	2017	2018
Havadaki Ağırlığı	10 kg	12.2 kg	11.6kg
Uzunluk	490mm	450mm	485 mm
Genişlik	450mm	470mm	450mm
Yükseklik	326mm	321mm	325mm
Maksimum Dalış Mesafesi	30 m	50m	50m
Gövde Yapısı	Al 6000	Akrilik	Akrilik ve Al 7000
Motor Sayısı	8	8	6
Kamera	CUAV PX4FLOW	CUAV PX4FLOW	CUAV PX4FLOW
Hareket Kabiliyeti	3 eksenli hareket	3 eksenli hareket	3 eksenli hareket
Özgünlük	-	Esnek Robot Tutucu	Pan-tilt ve Ni-Ti Mekanizmaları

Geliştirilen sualtı robotu ilk kez 2016 yılında tarafımızca tasarlanmıştır. Daha sonraki yıllarda yaptığımız Ar-Ge çalışmalarıyla sistem günden güne iyileştirilmiştir ve sistemde bazı değişikliklere gidilmiştir. Robottaki değişimlerin en önemlileri şu şekildedir; 2017 yılında robota katılan robot tutucu sistemi, elastik TPU malzemeden eklemeli imalat

yöntemi kullanılarak 85 Shore A sertliğinde üretilmiştir [7]. Tıpkı bir ahtapot kolu gibi farklı geometrilerdeki cisimleri rahatlıkla kavrayarak güçlü kavrama imkanı sağlamaktadır. Tutucu sistem, elektropnömatik sistemle tahrik edildiği için servomotor tahrikli robot tutucu sistemlerine göre kontrolü daha kolaydır. Basıncılı havaya ihtiyaç duyulması sistemin dezavantajını oluşturmaktadır. 2018 yılında tasarlanan kamera mekanizması için kullanılan operatör kontrollü pan-tilt mekanizması sayesinde kameranın görüş alanı operatörün kafa hareketlerine göre değiştiği için geçmiş senelere göre avantaj sağlamıştır. Ayrıca 2018 yılında mayın imha görevi için nikel-titanyum imha mekanizması geliştirilmiştir.

IV. SONUÇ VE GELECEKTE YAPILACAK ÇALIŞMALAR

Sonuç olarak, geliştirilen sualtı robotu birçok alt sistemin bir araya gelmesiyle sualtında yarı otonom olarak görev yapan bir mekatronik sistemdir. Gerçekleştirilen sualtı testlerde sualtı robotun alt sistem donanımlarının göreve dönük olarak başarılı bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Gelecekte yapılacak uygulamalarda mekatronik sistem tasarımı esasları kapsamında sistemin otonom hale getirilmesi için kontrol, güç kaynağı ve haberleşme alt sistemlerinin geliştirilmesine önem verilerek sualtı robotun çok maksatlı kullanımının sağlanması planlanmaktadır. Ayrıca, yapılacak numerik analizler ile mayın tarama görevleri için gövdede yüksek dayanıklı kompozit malzeme kullanılması ile ilgili iyileştirme çalışmaları devam etmektedir.

V. TEŞEKKÜR

Prototipi geliştirilen sualtı robotun hidrostatik ve hidrodinamik numerik analizleri aşamasında sağladıkları sonlu

elemanlar analizi desteği için BIAS Mühendislik firmasına ve elektropnömatik yön kontrol valflerinin tedarikini sağlayan Mert Akışkan Gücü firmasına teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] Ahmad M. et al. (2019). Remotely Operated Underwater Vehicle (ROV) Using Wireless Communication Protocol over a Floating Unit. In: Arai K., Bhatia R., Kapoor S. Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) Springer
- [2] Manzanilla A., Reyes S., Garcia M., Mercado D. and Lozano R. (2019). Autonomous Navigation for Unmanned Underwater Vehicles: Real-Time Experiments Using Computer Vision, IEEE Robotics and Automation, 4(2), 1351-1356, Doi: 10.1109/LRA.2019.2895272.
- [3] Canlı G.A., Kurtoglu İ. (2015). Dünyada ve Ülkemizde İnsansız Sualtı Araçları (AUV & ROV) Tasarım ve Uygulamaları, Sayı 4
- [4] Leblebicioğlu, M.K.(2010). ULISAR: Bir İnsansız Sualtı Aracı, Savunma Sanayi Gündemi, 41-47, 12.
- [5] Inan, A. (2011). Iskenderun Körfezinde Petrol Kirliliğinin Modellenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 26, No 2, 471-478
- [6] Wang, J. S., Lee, C. S. G. (2003). Self-Adaptive Recurrent Neuro-Fuzzy Control of an Autonomous Underwater Vehicle. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 19(2), 283-295.
- [7] Dilibal S., Candas C., Sahin H. Akışkan basıncı tahrikli esnek robotik tutucu sistemi, Patent, 2018/0474.
- [8] Dilibal S., Tabanlı RM., Dikicioglu A. (2004). Development of shape memory actuated ITU Robot Hand and its mine clearance compatibility. Journal of Materials Processing Technology, 155156, 1390-1394, Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.221
- [9] Dilibal S. (2018). Stabilized actuation of a novel NiTi shape memory alloy actuated flexible structure under thermal loading. Materials in Tehnologije, 52(5), 599-605, Doi: 10.17222/mit.2018.042.
- [10] Dilibal S., Sahin H., Dursun E., Engeberg ED. (2017). Nickel-titanium shape memory alloy-actuated thermal overload relay system design. Electrical Engineering, 99(3) 923930, Doi: 10.1007/s00202-016-0458-2.
- [11] Dilibal S., Guner E., Akturk N. (2002). Three-finger SMA robot hand and its practical analysis. Robotica, 20(02), 175-180, Doi: 10.1017/S0263574701003757.
- [12] Dilibal S., Engeberg ED., Antagonistically actuated shape memory alloy manipulator, Patent, USPTO 2017, 9744055 B2

3B Nokta Bulutu Verisi ile Bölge Büyütme Tabanlı Kapı Bulma Uygulaması

Kadir BAYRAM, Berk KOLAYLI, Ali SOLAK, Barış TATAR, Kaya TURGUT, Burak KALECİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Eskişehir, TÜRKİYE

kadiryayram96@hotmail.com

berkkolayli48@gmail.com

ali.solak.1996@gmail.com

eng.baristatar@hotmail.com

kayaturgut@hotmail.com

burakaleci@gmail.com

Öz — Bina içi ortamlarda, kapılar ortamda bulunan bölümleri birbirinden ayırmak için kullanılmaktadırlar. Kapıların konumlarının belirlenmesi, robotun seyrüsefer ve konumlandırma gibi temel görevlerinde verimliliği arttıracak gibi yapı bilgi modellemesi (building information modeling) ve otonom tekerlekli sandalye geliştirilmesi gibi karmaşık görevlerde de önem taşımaktadır. Geçmiş çalışmalarda kapıların belirlenmesi ile ilgili olarak genellikle görüntü tabanlı kapalı kapı bulma yaklaşımları ve lazer tabanlı açık kapıların bulunmasına yönelik yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada 3B nokta bulutu verisi kullanılarak ofis, bina ve benzeri yapılarda yarı açık ve/veya kapalı kapıların tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Gerçeklenen yöntemde Bölge Büyütme (Region Growing), parametre belirleme ve Yönlendirilmiş Sınırlama Kutusu (Oriented Bounding Box - OBB) algoritmaları kullanılmaktadır. Gerçeklenen yöntemin test edilmesi için ESOGU Elektrik-Elektronik Mühendisliği Laboratuvar binası GAZEBO benzetim ortamında modellenmiş ve “ESOGU KAPILAR” isimli veri kümesi oluşturulmuştur. Yöntemin verimliliği yarı açık ve kapalı kapılara robotun farklı uzaklıklarda ve açılarda bulunduğu durumlar göz önüne alınarak irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler— GAZEBO, 3B nokta bulutu, bölge büyütme, kapı.

I. GİRİŞ

Kapı konumlarının belirlenmesi robotik alanında konumlandırma, seyrüsefer, metrik, topolojik ve anlamsal haritalama ve keşif gibi bir çok uygulamada robotların verimliliğini arttırmak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, otonom tekerlekli sandalye geliştirilmesi ve yapı bilgi modellemesi gibi konularda da kapıların yerlerinin bilinmesi kritik önem taşımaktadır.

Kapı bulma konusunda yapılan geçmiş çalışmalar genellikle iki gruba ayrılmaktadır. İlk grupta kapalı kapıların görüntü tabanlı bulunmasına yönelik yöntemler yer almaktadır. Bu yöntemlerin başarıları genellikle ortama ve ortamdaki ışık miktarına bağlıdır. Ayrıca bu yöntemlerde robot ile kapı arasındaki mesafe ve açı değerleri başarılarını önemli ölçüde

etkilemektedir. İkinci grupta yer alan yöntemlerde ise robotun kapının içinde ya da çok yakında olduğu durumlarda mesafe verisi kullanılarak açık kapıların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmalar ise genellikle kapıların genişliği ile aynı mesafeye sahip boşlukları tespit ettiklerinde bu konumları kapı adayı olarak belirlemekte ve daha sonra çeşitli sezgiseller ile kapı olup olmadıklarına karar vermektedir.

Bu çalışmada, kapıların belirlenmesi için 3B nokta bulutu kullanılmaktadır. Bunun temel sebeplerinden birisi, robotun kapıdan uzak olduğu durumlarda kapıların önceden belirlenerek yol planı ve seyrüsefer gibi görevlerde kullanılmasının planlanmasıdır. Ayrıca bazı ortamlarda ışık miktarı, çalışma ortamının elverişsiz olması vb. gibi renk bilgisini etkileyen etkenler ortaya çıkmaktadır. Böyle durumlarda derinlik bilgisine ya da bu bilgi kullanılarak elde edilen nokta bulutu kümesine güvenilmektedir. Nokta bulutu basit bir yapıya sahip olmasına rağmen nokta bulutunun düzensiz formu ve nokta bulutundaki veri sayısının çok olmasından dolayı işlemesi kolay değildir. Ancak son zamanlarda PCL [1] gibi 3B veriler için oluşturulan kütüphaneler yardımı ile 3B veriler farklı uygulamalar için kolaylıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, kapıların bulunması için ilk olarak nokta bulutu Bölge Büyütme (Region Growing) algoritması [2] kullanılarak bölütlenmektedir. Elde edilen bölütlerden yer düzlemine dik olanlar kapı adayları olarak belirlenmektedir. Bu noktada, görüntü tabanlı yaklaşımların da önemli dezavantajlarından biri olan robot ile kapı arasındaki mesafe ve açının kapı bulma başarısını etkilemesi ele alınmıştır. Algılayıcının farklı konum ve açılarda çözünürlüğünden kaynaklanan hatalar oluşmaktadır. Bu hata miktarının oranını bulmak amacıyla robot kapı ile farklı açı ve mesafelere konumlandırılarak veri toplanmıştır. Daha sonra bu veriler kullanılarak hata miktarı oranını veren bir fonksiyon üretilmiştir. Kapı adayı bölütler ile robot arasındaki mesafe ve açı hesaplanarak kapıların

parametreleri belirlenmektedir. Elde edilen parametreler Yönlendirilmiş Sınırlama Kutusu (Oriented Bounding Box - OBB) yöntemine [3] girdi olarak verilmektedir. Kapı adayları ile tablodaki değerler arasındaki fark belirli bir eşik değerinin altında kaldığında bu aday kapı olarak belirlenmektedir. Gerçeklenen yaklaşımın verimliliğinin ölçülmesi için ESOGU Elektrik-Elektronik Mühendisliği Laboratuvar binası GAZEBO [4] benzetim ortamında modellenmiş ve "ESOGU KAPILAR" isimli veri kümesi oluşturulmuştur. Bu veri kümesinde tekli yarı açık ve kapalı, ikili yarı açık ve kapalı kapılar bulunmaktadır. Kapıların boyutları belirlenirken Engelliler İçin Evrensel Standartlar Kılavuzu'nda [5] yer alan kapı standartları ölçüt alınmaktadır. Yapılan testler robotun kapılara farklı uzaklıkta ve açılarda bulunduğu durumlar göz önüne alınarak irdelenmiştir.

II. GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR

Kapı bulma konusunda yapılan çalışmalara çok çeşitli alanlarda rastlanmaktadır. Görüntü tabanlı kapı bulma yaklaşımlarında genellikle kapıların kapalı olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca bu çalışmalar piksel tabanlı ölçümleri kullandıkları için robot ile kapı arasındaki mesafe ve açıdan çok etkilenebilirler. Bu yüzden genellikle bu çalışmalarda robot kapıların tam karşısında iken ya da kapılardan çok az bir açıyla görüntü alınmaktadır [6-7]. Mesafe verisi kullanarak kapıları belirlemeye çalışan yaklaşımlarda genellikle kapıların geometrik özelliklerinden yararlanılmaktadır [8]. Robot kapının içinde ya da çok yakın bir mesafede iken alınan lazer verilerinde darboğaz karakteristiği oluşmaktadır. Bunu kullanarak kural tabanlı bir yöntem önerilmiştir [9]. Hem mesafe hem de görüntü verisini kullanarak kapıları belirlemeye çalışan yaklaşımlar da bulunmaktadır [10]. Bu çalışmada kapıları belirlemek için dikey doğru çiftleri, kapı ve yer arasındaki mesafe, duvarın renk ve dokusu ve kameranın hareketi gibi özellikler kullanılmıştır. Kapı bulmak için yapılan çalışmalar arasında anlamsal sınıflandırma yaklaşımları da yer almaktadır. Mozos ve diğ. [11] yaptıkları çalışmada lazer verisini kullanarak basit geometrik özellikler çıkarmışlar ve bu özellikleri AdaBoost sınıflandırıcıyı eğitmek için kullanmışlardır.

3B nokta bulutu verisi kullanılarak yapılan kapı bulma çalışmalarının çoğunda hem derinlik bilgisi hem de renk bilgisi birlikte kullanılmaktadır. Burak ve diğ. [12] yaptıkları çalışmada açık kapılara odaklanmışlardır. İlk olarak RANSAC kullanarak baskın olan düzlemi tespit etmeyi amaçlamışlardır. Elde ettikleri düzlemdeki noktaları 3B derinlik görüntüsüne aktarmışlar ve bu görüntüde kapı olabilecek boş alanları tespit etmeye çalışmışlardır. Son olarak kapı olarak belirledikleri bölütle görüntü verisi ile onaylamışlardır.

Blanca ve diğ. [13] yaptıkları çalışmada açık, yarı açık ve kapalı kapıları tespit edebilmek için 3B lazer tarayıcıdan elde ettikleri XYZ koordinat verileri ve kameradan elde ettikleri RGB renk verilerini birlikte kullanmaktadırlar. İlk

olarak duvarları tespit etmektedirler. Daha sonra duvarın içinde renk verisi kullanarak renkteki değişimlere ve derinlik bilgisi kullanarak da kenar tespiti yapmaya çalışmaktadırlar. Sonuç olarak, bu iki bilgiyi birleştirerek kapıları bulmayı hedeflemektedirler.

Vilarino ve diğ. [14] önerdikleri yöntemde sadece nokta bulutu verisini kullanmışlardır. Önceki 3B kapı bulma çalışmalarından farklı olarak ilk önce duvarı bulmak yerine kapıyı bulmaya odaklanmışlardır. Bunu başarmak için robotu ilerletirken elde edilen nokta bulutunun dikey profilini çıkarmaktadırlar. Bu noktada, nokta bulutunun dikey olarak hizalı olduğu varsayımı yapılarak robotun izlediği yörüngeye belirli bir uzaklıkta olan 2B tüm komşuları aranmaktadır. Bu şekilde zemin ve tavan için iki dikey profil çıkarılmakta ve bunlar arasındaki farklılıklar kullanılarak kapılar belirlenmektedir. Buna benzer bir çalışma Staats ve diğ. tarafından yapılmıştır [15]. Bu çalışmada [14]'te önerilen yöntem kullanılmaktadır. Yüksekliğin kapıları belirlemek için yeterli olduğu durumlarda [14] çalışmasının iyi sonuçlar alacağı belirtilmiştir. Ancak bu yüksekliğin yeterli olmadığı durumlarda yatay düzlemdeki dalgalanmalara bakılarak kapıların tespit edilebileceğini belirlemektedirler.

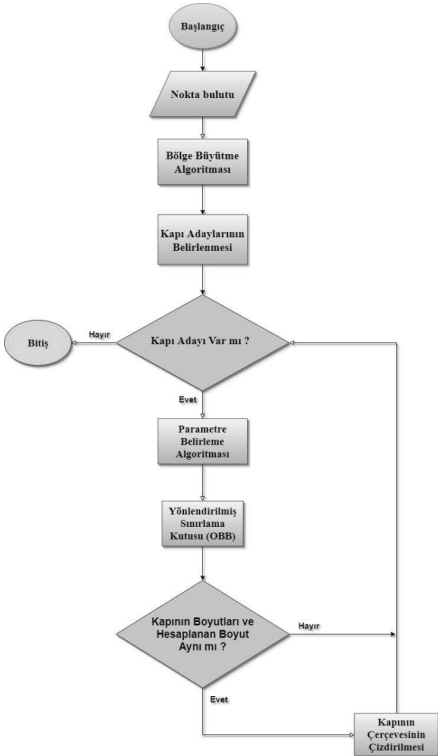
Rusu ve diğ. [16] yaptıkları çalışmada lazer verisi kullanarak kapalı kapıları ve kapı kollarını bulmayı hedeflemektedirler. Bu çalışmada yazarlar 2B bir lazer algılayıcıyı belirli bir eksene sabitlemiş bir direk etrafında döndürerek 3B nokta bulutu elde etmektedirler. Bu nokta bulutunun yoğunluk ve geometrik dağılım değişimlerine gürbüz geometrik tahminciler ve istatistiksel yöntemler uygulayarak kapı ve kolunu bulmaktadırlar. İlk olarak, nokta bulutunda bulunan bütün noktaların normalleri hesaplanarak RMSAC gürbüz tahmincisine verilerek bir düzlem tahmin edilmektedir. Daha sonra da 2B poligonal yapı tahmin edilmektedir. Yazarlar önerdikleri yöntemi farklı açılarda bulunan kapılar üzerinde test etmişlerdir.

Derry ve Argall [17] yaptıkları çalışmada açık tek kapı, kapalı tek kapı, iki tekli ve çift kapı gibi farklı kombinasyonlarda bulunan kapıları bulmaya çalışmaktadırlar. Bu çalışmada kapılardan, belirli uzaklıkta ve belirli açılardan alınan nokta bulutu görüntüleri kullanılmıştır. Yaptıkları çalışmada önce RANSAC kullanarak duvar düzlemini belirlemektedirler. Daha sonra bu düzlemin içinde kapıyı bulmaktadırlar.

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde [16] ve [17] numaralı çalışmaların gerçekleştirdiğimiz yöntemle benzer oldukları görülmüştür. Ancak [16] numaralı çalışma sadece kapalı kapılara odaklanırken gerçekleştirdiğimiz yöntem hem açık hem de kapalı kapıları bulabilmektedir. Benzer şekilde [17] numaralı çalışmada da açılı ve mesafe değerleri ile ilgili sınırlar bulunmaktadır. Çalışmamızda önerdiğimiz parametre belirleme yöntemi ile [17] numaralı verilen çalışmada yer alan açılı ve mesafe değerlerini arttırabilmekteyiz.

III. YÖNTEM VE METODLAR

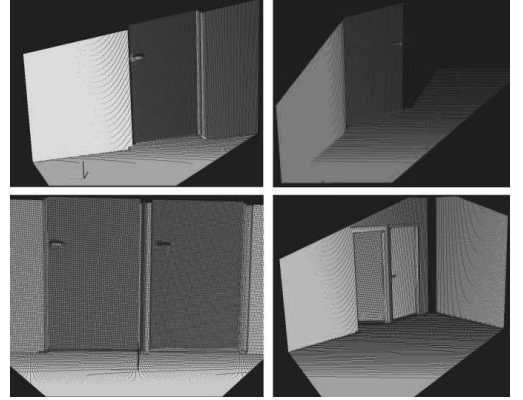
Bu bölümde kapı bulma uygulaması için izlenen yöntem ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Şekil 1’de verilen akış diyagramından izlenen adımlar verilmektedir. İlk olarak bölge büyüme yöntemi [2] kullanılarak bölütleme işlemi yapılmaktadır. Elde edilen bölütlerden yer düzlemine dik olanlar kapı adayları olarak belirlenmektedir. Algılayıcının konum ve açısına göre doğruluk oranı değiştiğinden dolayı kapının genişlik ve yüksekliğini nokta bulutundan direkt olarak hesaplamak yanlış sonuçlar vermektedir. Bundan dolayı her kapı adayı için nokta bulutu ve robot arasındaki mesafe ve açı hesaplanmaktadır. Bu değerler kullanarak parametre belirleme algoritması kapının genişlik ve uzunluk değerlerindeki hata miktarına karar vermektedir. Bu noktada kapı adayına yönlendirilmiş sınırlama kutusu algoritması uygulanmaktadır. Bu algoritma sonucunda nokta bulutunun genişlik ve uzunluk değerleri elde edilmektedir. Bu değerler parametre belirleme algoritması ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmakta ve aralarındaki fark belirli bir eşik değerin altındaysa bu nokta bulutunun kapıya ait olduğuna karar verilmektedir. Son olarak kapının çerçevesi çizdirilmektedir.



Şekil 1: Kapı Bulma Uygulaması Akış Diyagramı

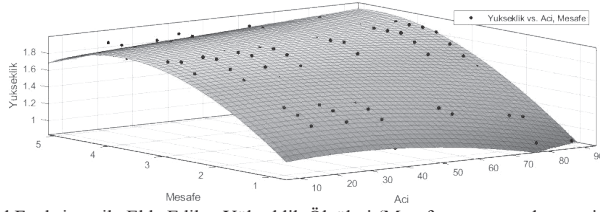
A. 3B Nokta Bulutunun Bölütlenmesi ve Kapı Adaylarının Belirlenmesi

Bu aşamada, 3B nokta bulutunun bölütleme işlemi gerçekleştirilmektedir. 3B noktaların bölütlenmesi üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda oldukça artmıştır. Grilli [18] bu çalışmaları 5 ana kategoriye ayırmıştır: Kenar tabanlı, model tabanlı, bölge büyüme, melez ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar. Kenar tabanlı yaklaşımlar gerçekleşmesi kolay ve hızlıdır. Ancak verideki gürültüye karşı hassastırlar. RANSAC [19] gibi model tabanlı yaklaşımlar ise verideki gürültüye karşı gürbüz, hızlı kolay gerçekleştirilebilirlerdir. Ancak bu yöntemin temel dezavantajı, nokta bulutunun her bölgesinde verinin eşit dağılması gerekmektedir. Makine öğrenmesi yöntemlerinde ise eğitim aşaması gerekmektedir. Bu inceleme göz önüne alındığında bu çalışmada Bölge Büyütme Algoritması tercih edilmiştir. Bu algoritma, bir tohum noktasından çalışmaya başlamaktadır. Daha sonra bu tohum noktasının belirli bir yarıçap komşuluğunda bulunan noktaların dağılımları kullanarak normal ve eğrilik bilgisi hesaplanmaktadır. Her noktaya ait normal ve eğrilik değerleri incelenerek, benzer yapıya sahip olan noktalar kümelenirler. Bu işlem için PCL kütüphanesindeki Bölge Büyütme Algoritması [20] yöntemi kullanılmıştır. Şekil 2’de örnek nokta bulutları ve bu nokta bulutlarına bölge büyüme algoritması uygulandıktan sonra elde edilen bölütler gösterilmektedir.

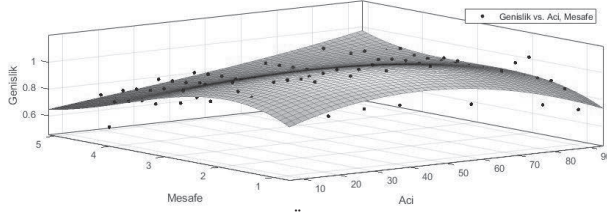


Şekil 2: Örnek Nokta Bulutları ve Bölge Büyütme Algoritması Uygulandıktan Sonra Elde Edilen Bölütler

Nokta bulutu bölütlendikten sonra elde edilen bölütler arasında kapı adayları belirlenmektedir. Bunun için bölütün yer düzlemine dik olan eksene ile yaptığı açıya karar verilmektedir. Bu açı değeri 0 derece ya da belirlenen bir eşik değerinden küçükse bu bölüt kapı adayı olarak belirlenmektedir.



Şekil 3: Polinomal Fonksiyon ile Elde Edilen Yükseklik Ölçüleri (Mesafe metre, açı derece cinsinden kullanılmıştır.)



Şekil 4: Polinomal Fonksiyon ile Elde Edilen Genişlik Ölçüleri (Mesafe metre, açı derece cinsinden kullanılmıştır.)

B. Parametre Belirleme Algoritması

Önerilen Parametre Belirleme Algoritması RGB-D algılayıcının dar açılarda ve uzak mesafelerdeki çözünürlük problemlerine çözüm getirmektedir. Dar açılar veya uzak mesafelerde algılayıcı tarafından kapıyı belirtmek için kullanılan, kapıya ait nokta sayısı azalmakta ve hatalar oluşmaktadır. Bu hataların modellenmesi amacıyla robot kapıyla arasındaki açı 10 dereceden 90 dereceye kadar farklı açılara ve 1 metreden 5 metreye farklı mesafelere konumlandırılarak veri seti oluşturulmuştur ve bu veri seti kullanılarak bir parametre tablosu elde edilmiştir. Elde edilen tablo kullanılarak hesaplanan polinomal fonksiyon ile gezgin robotun kapıya göre açı ve mesafe değerlerine karşılık gelen, beklenen yükseklik ve genişlik ölçüleri belirlenmektedir. Yarı açık kapılar için yükseklik ve genişlik değerlerinin tahmininde kullanılan polinomal fonksiyonlar sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmektedir. Kapalı kapılar için de benzer fonksiyonlar üretilmektedir.

C. Yönlendirilmiş Sınırlama Kutusu ve Kapıların Belirlenmesi

Elde edilen kapı adayları içerisinde kapıya ait kümelerin seçilmesi gerekmektedir. Bunun için kapıların geometrik yapılarından faydalanarak ölçütler belirlenmiştir. Kapıların geometrik analizlerini yapabilmek için her adayın sınırlayıcı kutusu belirlenmiştir. Bu işlem için PCL kütüphanesindeki Yönlendirilmiş Sınırlama Kutusu (Oriented Bounding Box - OBB) [21] yöntemi kullanılmıştır. OBB gösterimi yalnızca konum ve genişlikleri değil aynı zamanda yönlendirmeyi de kodlamaktadır. Bu yöntem aday bölütlerin 8 uç noktasını vermektedir. Bu noktalar kullanılarak bölütün yükseklik ve genişlik bilgileri elde edilmektedir. Bu bilgiler önceki aşamadan gelen bilgiler ile karşılaştırılmaktadır.

Karşılaştırma sonucu belirli bir eşik değerin içindeyse bölüt kapı olarak etiketlenmektedir.

D. Bulunan Kapıların Çerçevesinin Belirlenmesi

Bu aşamada ise geometrik analizlerden sonra bulunan kapıların çerçevesi çıkarılmaktadır. Her kapıya ait yönlendirilmiş sınırlama kutusu yöntemi kullanılarak elde edilmiş dikdörtgenler prizmasının ön yüzündeki noktaları birleştirilerek kapının çerçevesi çıkartılmaktadır.

IV. “ESOGU KAPILAR” VERİ KÜMESİ

ESOGU KAPILAR veri kümesini oluşturmak için ROS [22] robot ara yüzü ve GAZEBO benzetim ortamından yararlanılmıştır. Bu sayede, gerçek ortam uygulamalarına geçmeden önce geliştirilen kapı bulma uygulamasının model üzerinde testleri gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak ESOĞU Elektrik-Elektronik Mühendisliği Laboratuvar binası Gazebo benzetim ortamında gerçeğe uygun olarak modellenmiştir. Farklı problem için de kullanılması planlanan ortamda farklı kategorilere ait nesneler farklı renkler ile ifade edilmektedir. Oluşturulan model Şekil 5'te verilmektedir. Üzerinde Asus Xtion Pro derinlik algılayıcı bulunan Pioneer 3-AT [23] gezgin robotu modellenen ortamda hareket ettirilerek nokta bulutu verisi elde edilmiştir. Veri edinim sürecinde ROS robot ara



Şekil 5: ESOGU Elektrik-Elektronik Mühendisliği Laboratuvar Binası Gazebo Modeli

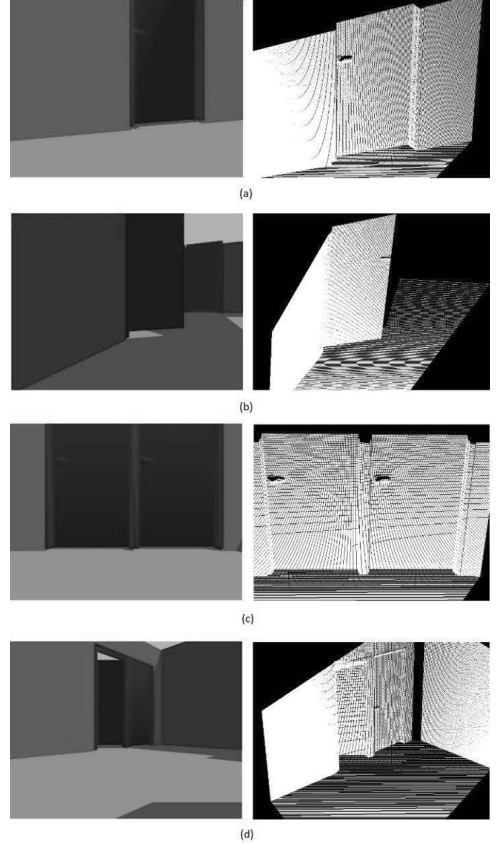
yüzünün içerdiği OpenCV ve PCL gibi görüntü ve nokta bulutu işleme kütüphanelerinden faydalanılmıştır.

Kapı bulma uygulaması için oluşturulan veri kümesi için gezgin robot yarı açık ve/veya kapalı kapıları farklı mesafelerden ve farklı açılardan görecektir. Bu veri kümesi içinde 47 adet tekli kapalı kapı örneği, 39 adet tekli yarı açık kapı örneği, 44 adet çiftli kapalı kapı örneği ve 32 adet çiftli yarı açık kapı örneği olmak üzere toplamda 162 adet kapı örneği yer almaktadır.

Şekil 6' da sol tarafta RGB resimleri yer alırken, sağ tarafta aynı sahneye ait nokta bulutu verisi bulunmaktadır. Şekil 6-a tek kapalı kapının 67.5 derece ve 2.508 metre mesafeden, 6-b tek yarı açık kapının 22.5 derece ve 2.2825 metre mesafeden, 6-c çift kapalı kapının 90 derece ve 2 metre mesafeden, 6-d ise çift yarı açık kapının 45 derece ve 4.2426 metre mesafeden alınmış görüntülerini temsil etmektedir.

V. DENEYSEL SONUÇLAR

Gerçeklenen yöntemin verimliliğini ölçmek amacıyla ESOGU KAPILAR veri kümesi kullanılmıştır. Bölge Büyütme Algoritması için önemli bir parametre olan pürüzsüzlük eşiği noktaların normaleri arasındaki sapmaya bakmaktadır. Bu parametre 3 derece olarak seçilmiştir. İkinci parametre olan Eğrilik Eşiği iki noktanın normaleri arasında küçük sapma olması durumunda eğriler arası eşitsizliği test etmektedir. Bu parametre ise 1.0 olarak seçilmiştir. Bölge Büyütme Algoritması sonucunda elde bölütlerden kapı adaylarını belirlemek için kullanılan yer düzlemine dik olması gereken açı için ± 11 derecelik bir eşik değeri seçilmiştir. Ayrıca kapıların genişlik ve yükseklik değerleri için ise Türkiye Engelliler Yasasında yer alan 0.9 metre ve 2.0 metre değerleri kullanılmıştır.



Şekil 6: Veri Kümesinde Yer Alan Kapılar için Örnekler

Tablo 1: Sayısal Sonuçlar

Kapı Tipi ve Pozisyonu	Açı (derece)	Mesafe (metre)			Kapı Sayısı	Doğru Pozitif		Yanlış Negatif	
		1.5-2.75	2.75-4	4-5.25		Sayı	Yüzde	Sayı	Yüzde
Tekli Kapalı Kapı	0-30	4	10	3	17	15	88,23	2	11,76
	30-60	2	4	6	12	11	91,66	1	8,33
	60-90	10	4	4	18	16	88,88	2	11,11
		1.5-2.75	2.75-4	4-5.25					
Tekli Yarı Açık Kapı	0-30	6	6	4	16	12	75,00	4	25,00
	30-60	4	6	4	14	6	42,85	8	57,14
	60-90	2	3	4	9	9	100,00	0	0,00
		1.5-2.75	2.75-4	4-5.25					
Çiftli Kapalı Kapı	0-30	7	19	1	27	21	77,77	6	22,22
	30-60	3	5	2	10	8	80,00	2	20,00
	60-90	4	2	1	7	6	85,71	1	14,28
		1.5-2.75	2.75-4	4-5.25					
Çiftli Yarı Açık Kapı	0-30	7	7	2	16	13	81,25	3	18,75
	30-60	4	1	2	7	6	85,71	1	14,28
	60-90	5	1	3	9	7	77,77	2	22,22
		1.5-2.75	2.75-4	4-5.25					

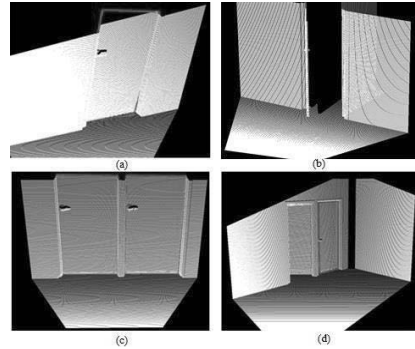
Gerçeklenen yöntemi değerlendirmek için tekli kapalı kapı, tekli yarı açık kapı, çiftli kapalı kapı ve çiftli yarı açık kapılar farklı mesafe ve açılar göz önüne alınarak incelenmiştir. Bu noktada değerlendirme kriteri olarak doğru pozitif ve yanlış negatif kullanılmıştır. Çiftli kapıların olduğu sahnelerde, herhangi bir kapının bulunması doğru pozitif sayısını arttırmaktadır. Sayısal ve görsel sonuçlar Tablo 1 ve Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 1 tekli kapalı kapılar için incelendiğinde açı ve mesafe fark etmeksizin doğru pozitif oranı %88 üzerinde çıkmaktadır. Bunun sebebi parametre belirleme algoritmasının farklı mesafe ve açılarda kapıların genişlik ve yükseklik değerleri için hata miktarını belirlemesi ve bu kullanılarak doğru değerlerin elde edilmesidir. Şekil 7-a'da tekli kapalı kapılar için bir örnek verilmiştir. Bu tabloda 60-90 derece arasındaki açılarda bütün kapıların bulunması teorik olarak beklenmektedir. Ancak kapalı kapılarda duvar düzlemi ile kapı düzlemi arasında derinlik mesafesi olmadığı durumlarda bölge büyütme ve parametre belirleme algoritmaları kapıları ayırt edememektedir.

Tekli yarı açık kapılarda ise 90 dereceye yakın açılarda bütün kapılar bulunmuştur, bunun sebebi kapalı kapılardan farklı olarak her zaman kapı düzlemi ile duvar düzlemi arasında derinlik farkı olmasıdır. 30-60 derece arasındaki açılarda, Şekil 7-b'de gösterildiği gibi kapının yüzey alanı çok azaldığı için bu açılarda doğru pozitif oranı düşmektedir. Çiftli kapalı kapılarda, tekli kapalı kapılara göre oranın düşük çıkmasının sebebi parametre belirleme algoritmasının tekli kapılar için geliştirilmiş olması ve çiftli kapı için uygun değerleri üretmemesidir. Bu yüzden

sonuçlar sadece bölge büyütme algoritmasının sonuçları gibi düşünülebilir. Açı değeri 0'dan 90'a doğru gittikçe doğru pozitif oranının artmasının sebebi budur. Şekil 7-c'de çiftli kapalı kapılar için bir örnek verilmiştir.

Çiftli yarı açık kapılarda, 0-30 ve 30-60 derece arası açılarda tekli yarı açık kapılara göre oran yüksek çıkmaktadır. Bunun nedeni, çiftli yarı açık kapılar, tekli yarı açık kapılardan farklı olarak kapalı kapı yüzeyi de içermektedir. Çiftli kapılarda, iki yüzeyden birinin bulunması başarılı kabul edildiği için doğru pozitif oranı yükselmektedir. 60-90 derece arasındaki açılar için sonuçların doğru pozitif oranının daha düşük çıkmasının sebebi mesafe olduğu düşünülmektedir. Şekil 7-d'de tekli kapalı kapılar için bir örnek verilmiştir.



Şekil 7: Görsel Sonuçlar

VI. SONUÇLAR

Bina içi ortamlarda kapıların bulunması seyrüsefer ve konumlandırma gibi temel görevlerin verimliliğini artırılmasında kullanılabileceği gibi yapı bilgi modellemesi (building information modeling) ve otonom tekerlekli sandalye geliştirilmesi gibi karmaşık görevlerde de önem taşımaktadır. Kapıların belirlenmesi için geçmiş çalışmalardan farklı olarak nokta bulutu verisi kullanılmıştır. Bu şekilde gerçekleştirilen yöntemin ortamdaki ışık vb. gibi etkilerden etkilenmemesi amaçlanmıştır. Ayrıca hem kapalı kapıların belirlenmesi hem de kapıların sonraki çalışmalarda yol planlamasında kullanılması istendiğinden lazer verisi de uygun değildir. Bu çalışmada bölge büyüme algoritması, parametre belirleme algoritması ve yönlendirilmiş sınırlama kutusu algoritmaları kullanılmıştır. Gerçeklenen yaklaşımın test edilmesi için ESOĞU KAPILAR ismi verilen bir veri kümesi oluşturulmuştur. Bu veri kümesi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda parametre belirleme algoritmasının kapıların bulunma oranını önemli şekilde artırdığı görülmüştür. Gelecek çalışmalarda gerçek ortamdaki veriler alınarak gerçekleştirilen yöntemin test edilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] R. B. Rusu and S. Cousins, "3D is here: Point Cloud Library (PCL)," 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, 2011, pp. 1-4.
- [2] P. J. Besl and R. C. Jain, "Segmentation through variable-order surface fitting," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 10, no. 2, pp. 167-192, March 1988.
- [3] Toussaint, Godfried T., "Solving Geometric Problems with the Rotating Calipers ." (1983).
- [4] Gazebo, <http://gazeboosim.org/>, Nisan 2019
- [5] Engelliler İçin Standartlar Kılavuzu, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/9260/mod_resoru/content/0/engelliler-icin-evrensel-standartlar-kilavuzu.pdf.
- [6] Yang, Xiaodong and Tian, Yingli, Robust door detection in unfamiliar environments by combining edge and corner features, Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2010 IEEE Computer Society Conference on IEEE, pages. 57-64, 2010.
- [7] Murillo, Ana Cris and Košecká, J and Guerrero, José Jesús and Sagüés, Carlos, Visual door detection integrating appearance and shape cues, Robotics and Autonomous Systems, 56(6), Elsevier, pages. 512-521, 2008.
- [8] ElKaissi, Muhieddine, et al. "SEDLRF: A new door detectionsystem for topological maps." Computer Architecture for Machine Perception and Sensing, 2006. CAMP 2006. International Workshop on. IEEE, 2006.
- [9] B. Kaleci, Ç. M. Senler, H. Dutagaci and O. Parlaktuna, "Rule-Based Door Detection Using Laser Range Data in Indoor Environments," 2015 IEEE 27th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI), Vietri sul Mare, 2015, pp. 510-517.
- [10] Angelov, Dragomir, et al. "Detecting and modeling doors with mobile robots." Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on. Vol. 4. IEEE, 2004.
- [11] O. M. Mozos, C. Stachniss, and W. Burgard, Supervised Learning of Places from Range Data using AdaBoost, In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pages 1730-1735, 2005.
- [12] B. Kakilioglu, K. Ozcan and S. Velipasalar, "Doorway detection for autonomous indoor navigation of unmanned vehicles," 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Phoenix, AZ, 2016, pp. 3837-3841.
- [13] B. Quintana, S.A. Prieto, A. Adan, F. Bosche, Door detection in 3D coloured point clouds of indoor environments, Automation in Construction, Volume 85, 2018, Pages 146-166.
- [14] Díaz-Vilariño, L., Verbree, E., Zlatanova, S., and Diakité, A.: INDOOR MODELLING FROM SLAM-BASED LASER SCANNER: DOOR DETECTION TO ENVELOPE RECONSTRUCTION, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W7, pp. 345-352, 2017.
- [15] B. R. Staats, A. A. Diakité, R. L. Voûte & S. Zlatanova (2018) Detection of doors in a voxel model, derived from a point cloud and its scanner trajectory, to improve the segmentation of the walkable space, International Journal of Urban Sciences.
- [16] R. B. Rusu, W. Meeussen, S. Chitta and M. Beetz, "Laser-based perception for door and handle identification," 2009 International Conference on Advanced Robotics, Munich, 2009, pp. 1-8.
- [17] M. Derry and B. Argall, "Automated doorway detection for assistive shared-control wheelchairs," 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, 2013, pp. 1254-1259.
- [18] Grilli, E., Menna, F. & Remondino, F. A review of point clouds segmentation and classification algorithms. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives 42(2W3), 339-344. issn: 16821750 (2017).
- [19] Fischler, M. A., & Bolles, R. C., 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, Vol. 24(6), pp. 381-395.
- [20] Region Growing, http://pointclouds.org/documentation/tutorials/region_growing_segmentation.php, Nisan 2019.
- [21] OBB, http://pointclouds.org/documentation/tutorials/moment_of_inertia.php, Nisan 2019.
- [22] ROS, <http://www.ros.org/>, Nisan 2019.
- [23] P3-AT, http://www.ist.tugraz.at/_attach/Publish/Kmr06/pioneer-robot.pdf, Nisan 2019.

Farklı Morfolojilere Sahip Robotlar Arasında Öğrenme Aktarımı

S. Ece Ada
Tezli Yazılım Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Boğaziçi Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
ece.ada@boun.edu.tr

H. Levent Akın
Bilgisayar Mühendisliği
Boğaziçi Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
akin@boun.edu.tr

Özetçe —Geçmiş bilgileri yeniden kullanma ve farklı senaryolar üzerinde genelleyeabilme becerisi, zekanın en önemli bileşenlerinden biridir. Derin pekiştirmeli öğrenme, öğrenme aktarımı alanında pek çok yenilik sunmuş olmasına rağmen derin öğrenmenin içerdiği dezavantajları da beraberinde getirmiştir. Bu çalışmada, derin pekiştirmeli öğrenme kullanılarak yapılan öğrenme aktarımında yaşanan aşırı öğrenmenin algoritmanın genelleye-bilme ve aktarım becerisini ne kadar etkilediğini inceleyip bu soruna özgün çözümler sunulmuştur. MuJoCo [1] benzetiminde insansı bir robotun öğrendiği yürüme hareketinin farklı morfolojik robotlara aktarılması ve bacak robotunun sıçrama hareketinin farklı küttele gövdeye sahip robota aktarılması üstünde çalışılmıştır. Öğrenme aktarımında kullanılan çekişmeli öğrenme ve politika gradyan algoritmalarının hedef görevdeki performansları özgün yöntemlerimizle önemli ölçüde arttırdık.

Anahtar Kelimeler—Derin Pekiştirmeli Öğrenme, Öğrenme Aktarımı, Genelleme Kapasitesi, Aşırı Öğrenme, Erken Durdurma, Çekişmeli Ağlar

I. GİRİŞ

İnsan beyni, öğrendiklerini bir görevden diğerine kolayca aktarabilir, örneğin bebekler sürünerek gezinme bilgilerini yürümeyi öğrenmek için kullanırlar. Gerçek hayatta bir robotun yapması beklenen işleri insana yakın performansta yapabilmesi için öğrendiklerini beklenmedik durumlara uygulayabilmesi gerekmektedir. Öğrenme Aktarımının mümkün olması için kaynak görevdeki öğrenme hedef göreve uyarlanabilir olmalıdır. Benzer olan her görev için robotu baştan eğitmek zaman alıcıdır ve hesaplaması pahalıdır.

Öğrenme aktarımında daha yüksek eğitim, daha yüksek asimptot veya daha yüksek bir başlangıç hedeflenmektedir [2]. Öğrenme aktarımı, eğitim ve test aşamalarındaki görevlerin, çevre dinamiklerinin veya morfolojilerin farklı olduğu durumlarda uygulanır [3], [4], [5]. Öğrenme aktarımı alanı, en son eklenen Öğrenme aktarımını öğrenme ile birlikte İleri Yönlü Öğrenme Aktarımı, Çoklu Görev Öğrenmesi ve Meta Öğrenme Aktarımı'ndan oluşmaktadır [6]. İleri yönlü öğrenme aktarımında amaç daha önce görülmemiş hedef görevde iyi performans göstermektir. Çoklu Görev Öğrenmesi ise bir çok farklı görevi aynı anda öğrenmeyi hedefler. Meta öğrenme veya öğrenmeyi öğrenme ise bir çok farklı görevin öğrenilmesini öğrenerek bunu daha önce karşılaşmadığı ya da öğrendiği görevlerden hangisi ile karşılaşacağını bilmediği hedef görevi başarmasıdır [7]. Öğrenme aktarımını öğrenmede ise görevler kendi içlerinde bir görev aktarımından

oluşmaktadır. Farklı senaryolarda farklı öğrenme aktarımları gerekebilir bundan dolayı öğrenme aktarımları öğrenme aktarımını öğrenme alanında parametrize edilmiştir. Amaç, hedef görevdeki öğrenme aktarımının maksimum olması için nelere bakılması gerektiğini ve doğru parametreleri bulmaktır.

Yeni algoritmaların doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi için derin pekiştirmeli öğrenmede genelleme kapasitesinin değerlendirilmesi gerekmektedir. [8][9] Cobbe ve dig., genelleştirmeyi ölçmek için farklı test ve eğitim ortamları olan bir *CoinRun* çevre oyununu oluştururken, Zhang ve dig., farklı zamanlı bir değerlendirme protokolü ile birlikte bir Labirent Oyunu önermiştir.

Biz ise bu çalışmada normal insansı robotun öğrendiği yürümeyi; uzun, ağır ve ekstra gövdeli insansı robota ve kısa, hafif ve eksik gövdeli insansı robota aktarıyoruz. Dayanıklı derin pekiştirmeli öğrenme deneylerinde sıklıkla kullanılan morfolojisi değiştirilmiş Sıçrayan bacak robotları arasındaki öğrenme aktarımına da karşılaştırma amacıyla yer verilmiştir [4] [10]. Deneylerimizde, derin sinir ağlarından oluşan kaynak görevde dayanıklı olma amacıyla eğitilmiş politikalara çeşitli modifikasyonlar ile hedef görevde kullanılmaktadır. Deneylerimizde dayanıklı çekişmeli pekiştirmeli öğrenmenin geliştirdiğimiz varyasyonları ile aşırı öğrenmeye engel olan yöntemimiz aynı politika gradyan algoritması kullanarak karşılaştırılmaktadır [10] [11]. Geliştirmiş olduğumuz çift ortak eleştirmenli dayanıklı çekişmeli pekiştirmeli öğrenme algoritmasındaki (ÇOE-DÇPÖ) genelleştirme kapasitesini arttırmaya yönelik çalışmamızın amacını detaylandırmak için pekiştirmeli öğrenme ve genelleştirilmiş avantaj değerlendirici algoritmalarını Bölüm I-A ve I-B'de açıklayacağız. Aynı şekilde kırpma parametresi ile örnekleme seçilimi (KPÖS) yöntemimizi yakın politika optimizasyonu algoritmasını kullanarak gerçekleştirdiğimiz için Bölüm I-C'de bu algoritmadan bahsedilmektedir.

A. Pekiştirmeli Öğrenme

Markov karar süreci $(S, \mathcal{A}, \rho(s_{t+1}|s_t, a_t), r_t, \rho(s_0), \gamma)$,

- Başlangıçtaki durum dağılımı: $\rho(s_0) : S \rightarrow R$,
- Durum geçiş dağılımı $\rho(s_{t+1}|s_t, a_t) : S \times \mathcal{A} \times S \rightarrow R$,
- Ödül fonksiyonu $r_t : S \times \mathcal{A} \times S \rightarrow R$ ve
- Gelecek indirim faktörü $\gamma \in (0, 1)$ değişkenler grubundan oluşmaktadır: .

Karar süreci $\pi_\theta(a_t|s_t) : \mathcal{S} \times \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$ politikası kullanılarak örneklenmiştir ve bir Markov ödül sürecine dönüştürülmüştür.

Etmen, pekiştirmeli öğrenme ortamında Denklem 1'de tanımlanan π_θ stokastik politikasının önerdiği eylemleri gerçekleştirerek bir durumdan başka bir duruma geçer. Her geçiş sırasında ödül fonksiyonunun işaret ettiği ödüllü alan etmen, hangi durumda hangi eylemi almanın en çok ödüllü vereceğini öğrenmeye başlar. İndirim faktörü bu süreçte etmeni en yakındaki durumdan ödül almayı öğrenmeye ve algoritmanın sonsuz ufuklu senaryolarda optimum değere yakınsamasına teşvik eder.

$$\pi_\theta(a|s) = \Pr\{A_t = a | S_t = s, \theta_t = \theta\} \quad (1)$$

π_θ politikasını izleyen etmenin s_t durumundaki Denklem 2'de tanımlanan *Değer fonksiyonu*, s durumundan sonraki ödüllerin beklenen değeridir [12], [13] .

$$V^\pi(s_t) := E_{s_{t+1:\infty}, a_{t+1:\infty}} \left[\sum_{l=0}^{\infty} \gamma^l r_{t+l} \right] \quad (2)$$

Denklem 3'de gösterilen *Q-Fonksiyonu* olarak da adlandırılan Aksiyon-Değer fonksiyonu, s_t durumunda alınan a_t aksiyonunun ardından etmenin elde ettiği değeri gösterir.

$$Q^\pi(s_t, a_t) := E_{s_{t+1:\infty}, a_{t+1:\infty}} \left[\sum_{l=0}^{\infty} \gamma^l r_{t+l} \right] \quad (3)$$

Son yıllarda değer fonksiyonları arasında en çok Denklem 4'de verilen, alınan aksiyonun önemini gösteren avantaj fonksiyonu kullanılmaktadır.

$$A^\pi(s_t, a_t) := Q^\pi(s_t, a_t) - V^\pi(s_t) \quad (4)$$

Politika gradyan fonksiyonu log-türev numarası kullanarak Denklem 5'deki gibi tanımlanır. Politika, yapay sinir ağlarından oluşmaktadır ve girdi olarak durum vektörü alınıp çok değişkenli normal dağılım aksiyon ortalamaları çıkarılmaktadır.

$$g := E_{s_{0:\infty}, a_{0:\infty}} \left[\sum_{t=0}^{\infty} A^\pi(s_t, a_t) \nabla_\theta \log \pi_\theta(a_t|s_t) \right] \quad (5)$$

Politika gradyan algoritmalarının parametre uzayında atıkları gradyan iniş adımı, etmen için çok farklı bir aksiyon kombinasyonu vermesine ve optimum değerden çok uzaklaşmasına sebep olabilir. Bu sebeple parametre uzayındaki adım çoğu zaman bir önceki politika parametresi kullanılarak sınırlandırılır [14] [11].

B. Genelleştirilmiş Avantaj Değerlendiricisi

Belirli bir andaki durumun gerçek değer fonksiyonunun ne olduğu tek veya birkaç örnekleme ile bilinemez. Değer fonksiyonunu içeren avantaj fonksiyonu da aynı şekilde şimdiye kadar gördüğümüz örneklerle dayanarak tahmin etmeye çalışılır. Etmen-Eleştirmen yöntemi ile belirli bir andaki durumun değer fonksiyonunun değerini tahmin etmek için ayrı bir eleştirmen derin yapay sinir ağı oluşturulması gerekmektedir. Bu ağı parametreleri değer fonksiyonu değerlendiricisinin

parametrelerini oluşturmaktadır ve örnekleme sonrası elde ettiğimiz ödüller kullanılarak eğitilmektedir.

Schulman ve dig. [13], avantaj fonksiyonundaki yanlışlık ve varyans ödünleşimi sorunundan yola çıkarak genelleştirilmiş avantaj tahmini algoritmasını önermişlerdir. Denklem 6'da t anındaki zamansal fark kalıntısı, 1 ve 2 adım Avantaj değerlendiricisi tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} \delta_t^V &= -V(s_t) + r_t + \gamma V(s_{t+1}) \\ \delta_t^V + \gamma \delta_{t+1}^V &= -V(s_t) + r_t + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 V(s_{t+2}) \end{aligned} \quad (6)$$

İndirim parametresi ile zamanla azalan sonsuz adet avantaj fonksiyonunun üstel ağırlıklı ortalaması Denklem 7'de görülen genelleştirilmiş avantaj değerlendiricisini oluşturmuştur.

$$\begin{aligned} \hat{A}_t^{GAD(\gamma, \lambda)} &= (1 - \lambda) \left(\delta_t^V \left(\frac{1}{1 - \lambda} \right) + \gamma \delta_{t+1}^V \left(\frac{\lambda}{1 - \lambda} \right) + \dots \right) \\ \hat{A}_t^{GAD(\gamma, \lambda)} &= \sum_{l=0}^{\infty} (\gamma \lambda)^l \delta_{t+l}^V \end{aligned} \quad (7)$$

Eleştirmen ağıının çıktısı genelleştirilmiş avantaj değerlendirmesini hesaplamak için kullanılır. Politika gradyan adımı hesaplanırken ödül değeri olarak en son hesaplanan avantaj değerinin standardize edilmiş hali kullanılır.

C. Yakın Politika Optimizasyonu

Aksiyon ve gözlem uzaylarının büyük olduğu İnsansı Robot simülasyonlarında yakın politika optimizasyonu sıklıkla kullanılmaktadır. Denklem 8'de önem örnekleme kullanılarak elde edilen yitim fonksiyonu verilmiştir [11], [14]. Genelleştirilmiş avantaj değerlendiricisi önceki politika kullanılarak alınmış örneklemelemelerden oluşmaktadır.

$$L(\theta) = \hat{E}_t \left[\frac{\pi_\theta(a_t|s_t)}{\pi_{\theta_{eski}}(a_t|s_t)} \hat{A}_t^{GAD(\gamma, \lambda)} \right] \quad (8)$$

Yakın politika optimizasyonu algoritmasına göre eğer standardize edilmiş genelleştirilmiş avantaj negatif ise $1 - \epsilon$ değerinin altındaki politika kesirleri kırılmalıdır Çünkü parametre uzayında bulunduğumuz konum yeterince optimisttir. Bundan dolayı risk alarak gradyan adımı atmamız. Aynı şekilde avantaj pozitif ise $1 + \epsilon$ değerinin üstünde çıkan politika kesirleri kırılmalıdır. Çünkü daha çok ödül alan olan aksiyon kombinasyonunun yeni politikadaki olabilirliği daha yüksektir.

$$L^{KIRP}(\theta) = \hat{E}_t[\min(r_t(\theta) \hat{A}_t, \text{clip}(r_t(\theta), 1 - \epsilon, 1 + \epsilon) \hat{A}_t)] \quad (9)$$

Denklem 10'de eleştirmen yapay sinir ağlarını optimize eden değer fonksiyonu ve kırılmış politika yitimi verilmiştir.

$$L_t^{KIRP+DF}(\theta) = \hat{E}_t[L_t^{KIRP}(\theta) - c_1 L_t^{DF}(\theta)] \quad (10)$$

Çalışmalarımız yakın politika optimizasyonun da bulunduğu açık kaynak kodlu *Open AI Baselines* kütüphanesi kullanılarak yapılmıştır [15].

D. Dayanıklı Çekişmeli Pekiktirmeli Öğrenme

Dayanıklı çekişmeli pekiktirmeli öğrenmede [10], politikanın hedef ortamdaki farklı koşullara karşı dirençli olabilmesi için ayrı bir rakip politika ağı oluşturulur. Bu yeni ağın amacı robotun dengesini bozmak ve yürümesini zorlaştırmaktır. Rakip politika ağına her bir çıktısı robotun vücudundaki önceden belirlenen bölgelere uygulanacak kuvvetin gücünü belirler. Sıçrayan bacak robotunun ayak kısmına iki boyutlu kuvvet uygulanırken insansı robotun her bir vücut bölgesine 3 boyutlu kuvvet uygulanmaktadır. Robotun ve rakibin; politika, eleştirmen avantaj fonksiyonu çifti parametreleri birbirinden farklıdır ve sırasıyla μ ve ν 'dur. Rakip politikanın değer fonksiyonu robotun politikasının negatiftir: $R^2 = -R^1$. Robotun değer fonksiyonu Denklem 11'de verilmiştir.

$$R^1 = E_{s_0 \sim \rho, a^1 \sim \mu(s), a^2 \sim \nu(s)} \left[\sum_{t=0}^{T-1} r^1(s, a^1, a^2) \right] \quad (11)$$

Ortamda atılan her adımda hem robotun politikasından çıkan aksiyon hem de rakibin politikasından çıkan aksiyon alınmaktadır. Özgün algoritmada her iterasyonda iki örneklem alınmaktadır ve ilk örneklemede robotun, ikinci örneklemede rakibin politikası optimize edilmektedir. Dayanıklı çekişmeli pekiktirmeli öğrenme (DÇPÖ) algoritmasının iki ayrı eleştirmenli güven bölgesi optimizasyonu kullanılan [16] [17] ve tek eleştirmenli ama tek örneklemede iki ağ grubunun da optimize edildiği yakın politika optimizasyonu kullanılan [18] bir varyasyonunun açık kaynak kodları vardır.

II. YÖNTEM

Derin pekiktirmeli öğrenmede yapay sinir ağlarında da yoğunlukla görülen aşırı öğrenme sorunu yaşanmaktadır, ancak bu duruma çoğu zaman literatürde algoritma karşılaştırmalarında yer verilmemektedir. Özellikle genellemenin yüksek önem taşıdığı öğrenim aktarımı alanında algoritmaların doğru karşılaştırabilmesi için öncelikle aşırı öğrenmenin olmadığına dikkat edilmelidir. Bu çalışmada, bu sorundan yola çıkarak öncelikle sadece en son veya en iyi performans gösteren politikadan ziyade politikanın belirli aralıklarla kaydedildiği bir yapı kurulmuştur. Bir politikanın kaynak görevde iyi performans göstermesi hedef görevde de iyi performans göstereceğine işaret etmez. Çünkü kaynak görevi aşırı öğrenmesi genelleme kapasitesini düşürür. Bu çalışmada kaynak görevde eğitilip kaydedilen politikaları hedef görevde tek tek test edip hangi politika iterasyonundan sonra aşırı öğrenmenin başladığı gözlemlenmiştir.

A. Kırpma Parametresi ile Örnekleme Seçimi

Politika gradyan algoritmaları son zamanlarda öğrenme aktarımı ve genelleştirme algoritmalarında en çok kullanılan derin pekiktirme algoritmalarından biri olmuştur. Yeni algoritmalar genelde yakın politika optimizasyonunu veya güven bölgesi politika optimizasyonunu karşılaştırma olarak kullanılmaktadır. *Open AI Baselines kütüphanesi* ve literatürlerin çoğu sürekli kontrol görevlerinde metresi olarak 0,2 kullanılmaktadır [15] [11] [19] [20] [21][22] [23]. Buna ek olarak bu değer her paralel örneklemenin ardından öğrenme oranı kullanılarak azaltılmaktadır. Ancak önerimizin ardından

gözlem ve eylem boyutu fazla olan insansı robot algoritmasındaki öğrenme oranı kaldırılmıştır.

Kırpma yöntemi, parametre uzayında kötü yer değiştirmeleri engellemek için kullanılır. Öğrenme aktarımında ise bu değeri yaygın kullanın değerinin çok altında alarak bir önceki politikanın hep daha yakınında hareket etmesini sağladık. Bu yöntem ile hedef görevde daha az ama birbirine daha yakın olan örneklemeleri öğrenme gradyan adımı hesabı için seçilmiştir.

Örneklemlerden her seferinde aynı boyutlarda gruplar alınıp paralel olarak politika gradyan adımı hesaplanmaktadır. Her işlemde hesaplanan adımların ortalaması kullanılarak gradyan adımı atılır. Eğer örneklemeden alınan tanımlama adımı kırılmışsa o adım gradyan adımı hesabı için kullanılamamış olur. Daha küçük grup büyüklüğü daha sık adım atılmasını sağlayacaktır, ancak bu da aşırı öğrenmeye neden olabilir.

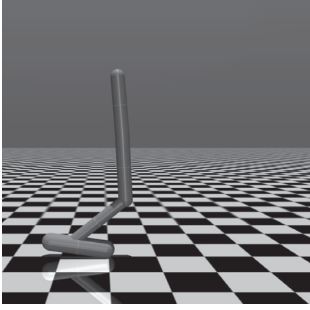
Öğrenme aktarımı algoritmaları arasında adil bir karşılaştırma yapmak için, çeşitli düşük kırpma parametrelerinin değerleri analiz edilmiştir. Kaynak görev ortamındaki adım sayısını artırmak ve kırpma parametresini 0,01 ve 0,05 gibi alınılmadık değerlere düşürmek kırpma parametresi ile örnekleme seçilimi (KPÖS) sağlayacaktır ve öğrenme aktarımı algoritmaları için rekabetçi bir ölçüt olacaktır.

B. Yakın Politika Optimizasyonu ile Dayanıklı Çekişmeli Pekiktirmeli Öğrenmesinde Farklı Eleştirmen Ağ Yapılarının Karşılaştırılması

Dayanıklı çekişmeli pekiktirmeli öğrenme algoritmasını aktarıma yönelik kırpma parametresi ve örnekleme seçimiyle karşılaştırmak amacıyla güven bölgesi politika optimizasyonunu yerine daha sonra çıkan ve şu anda en çok kullanılan politika gradyan algoritması olan yakın politika optimizasyonu algoritmasını kullandık [10][14][11]. Biz deneylerimizde özgün algoritmadaki her örneklemede ya robotun ya da rakibin ağ grubunun optimize edildiği algoritmaya bağlı kalarak karşılaştırmalarımızı yaptık. Sıfır toplamli oyun algoritması olan çekişmeli öğrenme robot politikasının en iyi performans gösterdiği yerde yakınsama yapmayabilir. Bu nedenle belirli aralıklarda politika kaydedilmesi daha geliştirilebilir politikayı bulmamıza olanak sağlar.

Dayanıklı çekişmeli pekiktirmeli öğrenme algoritmasında eleştirmen yapay sinir ağları ayrıdır ve her örneklemede politika ağı ile birlikte optimize edilmektedir. Deneylerin başında her ağ Gauss dağılımı ile başlatılmaktadır, bundan dolayı eleştirmenlerin ağ değerleri ilk başta farklıdır. Bir örneklemede ya robot ağ grubu ya da rakip ağ grubu optimize edilmektedir ancak her iki ağ grubundan da ilerleye doğru çıktı alınmaktadır. Genelleştirilmiş avantaj değerlendiricisi her adımdaki eleştirmen çıktısı ve ödül ile hesaplanmaktadır. Deneylerimizde ayrı eleştirmen ağları DÇPÖ, tek eleştirmenli dayanıklı çekişmeli pekiktirmeli öğrenme (TE-DÇPÖ) ve iki eleştirmenin de çıktısıyla optimize edilen 2 eleştirmen ağı ÇOE-DÇPÖ olmak üzere toplamda 3 çeşit eleştirmen ağ yapısı karşılaştırılmış ve performans üzerine etkileri incelenmiştir.

Önerdiğimiz çift ortak eleştirmenli dayanıklı çekişmeli pekiktirmeli öğrenme algoritmasındaki (ÇOE-DÇPÖ) avantaj



Şekil 1. 5.5 birim gövde kütleli sıçrayan bacak robotu

fonksiyonu hesabında eleştirmenlerin her ikisinden de alınan değer çıktıların ortalaması alınmıştır. 32 farklı rastgele veri üretici tohumunda eğitilip 32 farklı tohumla hedef ortamda test edilmiştir. Şekil 3, 7 ve 8'deki çok hafif ve çok ağır kütleli zor hedef ortamlarında iki ve tek farklı eğitimden dayanaklı çekişmeli pekiştirmeli öğrenme algoritmasından çok daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Örneklemelerden hesaplanan avantaj değerlendircisi hem eleştirmen hem de politika ağını optimize etmek için kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra iki eleştirmenden de gelen değer çıktıların avantaj değerini hesaplamak için kullanarak iterasyon başına doğruluğu artırmış oluyoruz. Her iki eleştirmeni de her örneklemede optimize etmeyi de denedik ancak kullandığımız hiperparametre değer aralığında en iyi performansı bu yöntem ile elde ettik. Bunun sebeplerinden biri eleştirmen ağına da aşırı öğrenme olasılığının olmasıdır. [13] Yöntemimizle hem farklı değerlerle başlatılmış değer eleştirmen ağıının ileriye doğru çıktısını kullanmış olduk hem de eleştirmen ağıının en son örneklemede kullanılan parametre kombinasyonu ile alınan çıktıları aşırı öğrenmesine engel olduk.

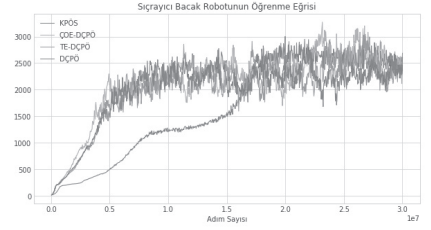
III. DENEYLER

Deneilerimizde DÇPÖ, TE-DÇPÖ, geliştirdiğimiz ÇOE-DÇPÖ ve KPÖS kurduğumuz yeni yapı kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Deneilerimizde adaptif moment yöntemlerinden olan ve yakın politika optimizasyonu ile yaygın olarak kullanılan Adam optimizasyonu kullanılmıştır [24]. Hem sıçrayan bacak robotu hem de insansı robot deneyleri için 2 gizli katmanlı 64'er nörondan oluşan etmen-eleştirmen ağı yapıları kullanılmıştır.

A. Sıçrayan Bacak Robotu

Sıçrayan bacak robotunun gövde kütleli hedef görevde değiştirme, öğrenim aktarımı alanında çok kullanılan deneylerden biridir [4] [3] [10] [25]. Bu sebeple geliştirdiğimiz yöntemleri karşılaştırmak için ilk olarak MuJoCo benzeticisinde amacı ileri yönde en hızlı şekilde sıçramak olan bir Sıçrayan bacak robotunu kullandık. Sıçrayan bacak robotunun durum uzayı, robotun ortamdaki lokasyonu ve eklem hızları gibi MuJoCo benzetimindeki önceden belirlemiş olduğu gözlem değerlerinden oluşmaktadır 11 boyutludur. Aynı şekilde aksiyon uzayı ise dönme momenti kontrolü olan uyluk, ayak ve



Şekil 2. Kaynak görevde sıçrayıcı bacak robotunun öğrenme eğrisi

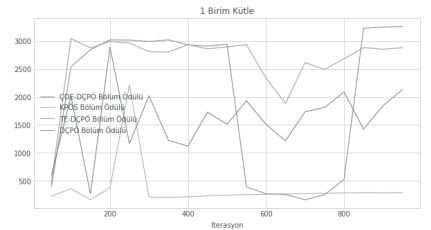
bacak eklemlerinden oluşmaktadır ve 3 boyutludur. Denklem 12'de verilen sıçrayan bacak robotunun değer fonksiyonu aşağıdakilerden oluşmaktadır:

- yaşama bonusu (gövdenin z eksenindeki değeri 1 ve 2 benzetim birimi arasında olmalıdır,
- ileri yönde hız ödülü
- aksiyonların karesinin toplamı

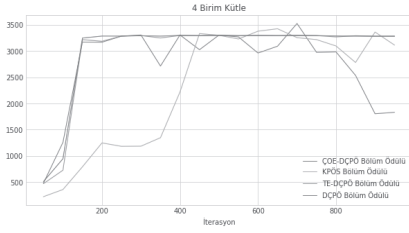
$$r_{sbr}(s, a) = r_{viteri} - 0.001 * \sum a^2 + C_{bonus} \quad (12)$$

Sıçrayan bacak robotunun benzeticideki standart kütleli yaklaşık olarak 3,534 birimdir. Sıçrayan bacak robotunun KPÖS, ÇOE-DÇPÖ, TE-DÇPÖ, DÇPÖ algoritmaları kullanılarak kaynak görevde elde edilen öğrenme grafikleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

Dayanaklı çekişmeli pekiştirmeli öğrenme makalesindeki [10] deneyde Sıçrayan bacak robotu için yaklaşık olarak [2, 25 - 4, 75] aralığı kullanılmıştır. Biz yaptığımız deneylerde genelleştirme kapasitesini gösterebilmek için [1 - 8] aralığını kullandık. Çekişmeli Pekiştirmeli Öğrenmenin farklı eleştirmen yapılarıyla karşılaştırılmasında her iterasyonda toplam iki örneklem alınmıştır: ilk örneklem kullanılarak robotun politika eleştirmen ağıları optimize edilmiştir, daha sonra yeni robot politika eleştirmen ağıları ile ikinci örneklem alınıp rakibin politika eleştirmen ağıları optimize edilmiştir. Şekil 4, 5, 6, 7, 8'de ÇOE-DÇPÖ, KPÖS, DÇPÖ yöntemleri kullanılarak eğitilen robotların hedef görevdeki ilk örnekleme grubundaki ortalama performansları verilmiştir.



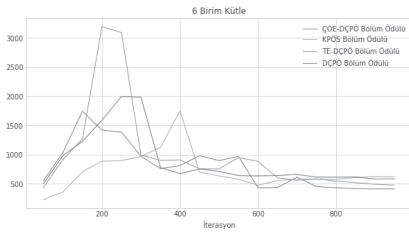
Şekil 3. Standart Kütle ile Eğitilen Sıçrayan Bacak Robot Politikalarının 1 Birim gövdeli Robota Aktarımı



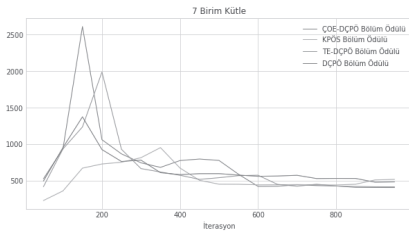
Şekil 4. Standart Kütle ile Eğitilen Sıçrayan Bacak Robot Politikalarının 4 Birim gövdeli Robota Aktarımı



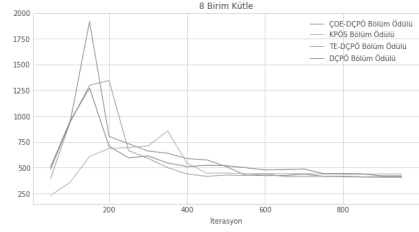
Şekil 5. Standart Kütle ile Eğitilen Sıçrayan Bacak Robot Politikalarının 5 Birim gövdeli Robota Aktarımı



Şekil 6. Standart Kütle ile Eğitilen Sıçrayan Bacak Robot Politikalarının 6 Birim gövdeli Robotta Test Edilmesi

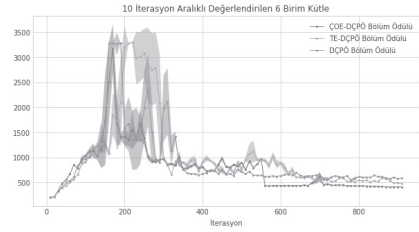


Şekil 7. Standart Kütle ile Eğitilen Sıçrayan Bacak Robot Politikalarının 7 Birim gövdeli Robota Aktarımı

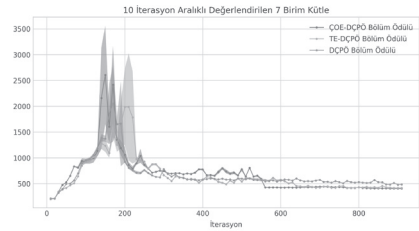


Şekil 8. Standart Kütle ile Eğitilen Sıçrayan Bacak Robot Politikalarının 8 Birim gövdeli Robota Aktarımı

Dayanıklı çekişmeli pekiştirmeli öğrenme yönteminde de çift eleştirmen kullanılmıştır ancak robot ve rakip kendi eleştirmenlerinin değer çıktılarına göre politika optimizasyonu yapmaktadır. İterasyon sayısı ilgili algoritma ile öğrenme sırasında hangi iterasyonda politika parametre kaydının alındığını göstermektedir. Örneğin 500. iterasyon, 3,534 birim kütle ile eğitimin 500. iterasyonu sırasında kaydedilen politika parametrelerini temsil etmektedir. Kaynak görevde öğrenme sırasında hedef görevden örneklem alımı dayanıklı algoritmalarda sıklıkla kullanılmaktadır [4] [25]. Ancak öğrenme aktarımındaki amaçlardan biri hedef görevden en az örneklemeyi alarak optimum sonucu elde etmektir, bu sebeple 50 iterasyonda bir alınan politika değerlerini test edip inceleyeceğiz. Öğrenme esnasında bu örneklemeleri belirli iterasyon aralıklarında test edersek Şekil 7, 8'deki gibi hedef görevden alınan 5 örneklemenin ardından suboptimal politika iterasyon değerini elde edebiliriz.

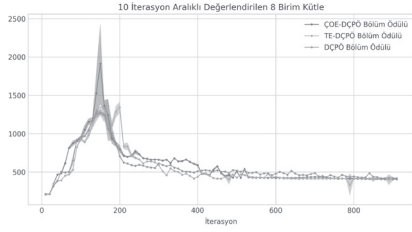


Şekil 9. 10 İterasyon Aralıklı Kaydedilen Standart Kütle ile Eğitilen Sıçrayan Bacak Robot Politikalarının 6 Birim gövdeli Robota Aktarımı



Şekil 10. 10 İterasyon Aralıklı Kaydedilen Standart Kütle ile Eğitilen Sıçrayan Bacak Robot Politikalarının 7 Birim gövdeli Robota Aktarımı

Dayanıklı çekişmeli pekiştirmeli öğrenmenin [10] uzantısı olarak yazmış olduğumuz ÇOE-DÇPÖ algoritması ağır



Şekil 11. 10 İterasyon Aralıklı Kaydedilen Standart Kütle ile Eğitilen Sıçrayan Bacak Robot Politikalarının 8 Birim gövdeli Robota Aktarımı

kütleli hedef görevleri görmemesine rağmen belirgin bir şekilde daha doğrudan aktarımda kaynak görevle Şekil 3, 7 ve 8'de görüldüğü üzere benzer performansı göstermiştir. Şekil 9,10,11'da farklı eleştirmen ağ yapılarını karşılaştırmak amacıyla 10 iterasyonda bir alınan politikaların değerleri görülmektedir. Buna ek olarak Şekil 4'te ve Şekil 5'te KPÖS yöntemimiz var olan eleştirmenli algoritmalarla rekabetçi bir kıyaslama oluşturmaktadır. Bütün grafiklerde KPÖS için yaygın kullanım olan 0,2 yerine 0,05 değeri ve 2048 adım grup büyüklüğü alınmıştır. Diğer algoritmalarda ise kırpma parametresi olarak 0,3 ve grup büyüklüğü olarak da 512 adım alınmıştır. Bu değerler dayanıklı çekişmeli pekiştirmeli öğrenme deneylerinde de kullanılan ızgara araması yöntemi ile bulunmuştur.

Pinto ve dig.'nin yapmış olduğu dayanıklı çekişmeli pekiştirmeli öğrenme deneylerde sıçrayan bacak robotu deneyi 500 iterasyon boyunca yapılmıştır. [10] Özellikle Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'e baktığımızda sabit iterasyon sayısının ardından elde edilen son politikayı direkt hedef görev robotunun politikası olarak kullanmanın yanıltıcı olabileceğini görmekteyiz. Bu sebeple geliştirdiğimiz belirli aralıklarla politika parametrelerini kaydedilip her birinin test edildiği yapı algoritmaların genelleştirme kapasitesi hakkında daha açıklayıcıdır ve yanlış karşılaştırmaların önüne geçecektir. Eğer bu yöntemi kullanmasaydık erken iterasyonlardaki genelleştirme kapasitesi yüksek politikaları hedef görevde kullanamayacaktık ve normal kütlede eğitilen sıçrayan bacak robotunun 5,6,7 ve 8 birim kütleli gövdesi olan hedef görevlerde yüksek performans gösterebileceğini fark edemeyecektik. Yakın politika optimizasyonu makalesinde sıçrayan bacak robotunun güven bölgesi optimizasyonu ve yakın politika optimizasyonu kullanılarak yakınsama yaptığı bölüm başına kazanılan ortalama değerler 1600 ve 2700 arasındadır. Sunmuş olduğumuz eleştirmen yapısı ile 150. politika iterasyonu kullanarak hedef görevde bölüm başına ortalama 1914 değer elde ettik. Aşırı öğrenmeyi hesaba katan değerlendirmeye yöntemimiz ve sunduğumuz çift ortak eleştirmenli yapı sayesinde dayanıklı çekişmeli pekiştirmeli öğrenme makalesindeki yaklaşık 4,75 birim kütleli başarılı hedef görev değerini 8 birime çıkardı. [10]

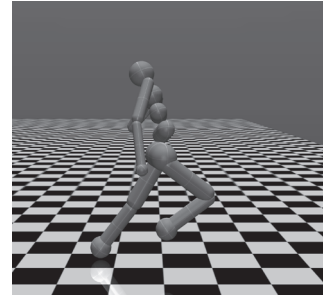
B. İnsansı Robot

İnsansı robotun durum uzayı robotun ortamdaki lokasyonu, vücut bileşenlerinin rotasyon değerleri, kütle merkezine bağlı atalet merkezleri, aktüatör merkezi, kütle merkezine bağlı dış güçler, kütle merkezine bağlı ve eklemlerinde oluşan hızlardan oluşmaktadır ve 376 boyutludur. Aksiyon uzayı ise

dönme momenti kontrolü olan birimlerden oluşmaktadır ve 17 boyutludur[1]. Denklem 13'de verilen insansı robotun değer fonksiyonu aşağıdakilerden oluşmaktadır:

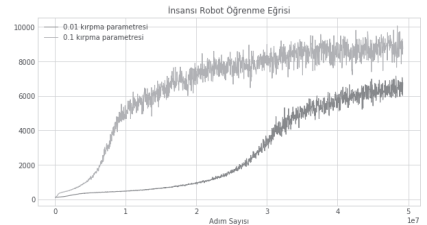
- yaşama bonusu (gövdenin z apsisindeki değeri 1 ve 2 benzetim birimi arasında olmalıdır,
- ileri yönde hız ödülü
- alt sınır 10 ile ikinci dereceden darbe maliyeti
- ikinci dereceden kontrol maliyeti

$$r_{ir}(s, a) = 0.25 * r_{vileri} + \min(5 \cdot 10^{-7} * c_{etki}(s, a), 10) + 0.1 * c_{kontrol}(s, a) + C_{bonus} \quad (13)$$



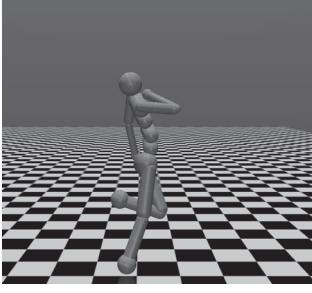
Şekil 12. Standart insansı robot

İnsansı robot öncelikle yakın politika optimizasyonu algoritmasıyla 16 paralel işlem kullanılarak eğretilmiştir. Görevler stokastik olduğundan dolayı 16 paralel işlemin her birinde ayrı tohum kullanılmıştır. Deneylerimizde politikalar toplamda 32 farklı tohumda eğitilip 32 farklı tohumla oluşturulan hedef ortamlarda test edilmiştir. Her gradyan adımının işlemlerdeki gradyan değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Deneylerimizde 50 örnekleme iterasyonunda bir politika kaydı yapılmıştır.

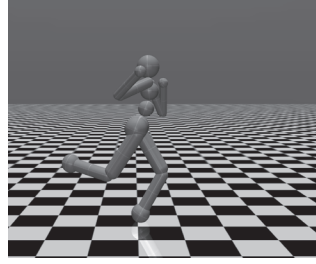


Şekil 13. Kaynak Görevde İnsansı Robotun Öğrenme Eğrisi

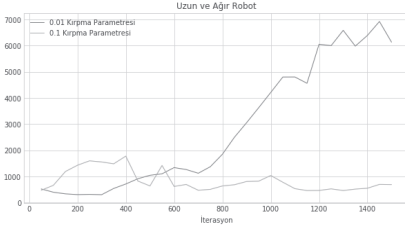
Standart insansı robotun yakın politika optimizasyonu algoritmasıyla öğrenme grafiği Şekil 13'de gösterilmiştir. Şekle bakıldığında iyi performans gösteren kırpma parametresi 0,1'dir ancak deneylerimizde bu değer ile eğitilen politikanın genelleştirme kapasitesinin düşük olduğunu gördük. Buna kıyasla eğitim sırasında düşük performans gösteren 0,01 kırpma parametresi bir çok farklı senaryoda yüksek performans



Şekil 14. Uzun ve ağır insansı robot



Şekil 17. Kısa ve hafif insansı robot

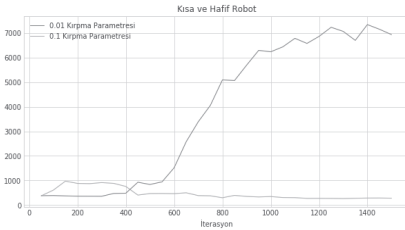


Şekil 15. Uzun ve Ağır İnsansı Robota Aktarılan Politika İterasyonlarının Bölüm Değeri

gösterecektir çünkü eğitildiği senaryoyu aşırı öğrenmemiştir. Dayanıklı çekişmeli pekiştirme öğrenmesini sadece robotun gövdesinde, robotun her kütleli modülüne ve robotun belinin altındaki bütün kütleli modüllerde uygulandığı senaryolarda Örneklem Seçimi belirgin olarak daha iyi sonuç vermiştir dolayısıyla dayanıklı çekişmeli pekiştirme öğrenmesi karşılaştırmaları bu deneylerde dahil edilmemiştir.

Yöntemimiz, ağırlıkları birbirinden ve standart insansı robottan farklı olan kısa ve uzun insansı robotlar kullanılarak karşılaştırıldı. Gövdenin yeri değiştirildiği için robotların yitim fonksiyonlarında yer alan yaşama ek puanının aralığı da değiştirilmiştir. Şekil 15 ve 16'te kaynak görevde iyi performans gösteren kırpma parametresi ile geliştirme kapasitesinin düşük politika elde edildiği görülmektedir.

Düşük kırpma parametresi ile örneklem seçilimi yapıldığında farklı morfolojik robotlara aktarılabilen



Şekil 16. Kısa ve Hafif İnsansı Robota Aktarılan Politika İterasyonlarının Bölüm Değeri

hedef ortamda yüksek performans gösteren politika değerleri bulunmuştur. 0,1 kırpma parametresi ile eğitilen politikanın 400. iterasyonundan sonra aşırı öğrenme kaynaklı geliştirme kapasitesinde düşüş başlamıştır.

IV. SONUÇ

Öğrenme aktarımı alanında yeni geliştirilen algoritmaları karşılaştırmak için öğrenme sorununun da hesaba katılacağı bir değerlendirme yapısı kurduk. Kaynak görevde en iyi performans gösteren politikanın yakınsamadaki değerlerinin hedef göreve direkt aktarılmasının yanıltıcı bir performans kriteri olduğunu kanıtladık. Dayanıklı çekişmeli pekiştirmeli öğrenme algoritması ve yakın politika optimizasyonu ile eğitilen politika ağlarının geliştirme kapasitesinin ve dolayısıyla performansının eğitimin durdurulma zamanına ne kadar bağlı olduğunu grafiklerle gösterdik. Politikaların eğitimini doğru noktada durdurarak daha zor hedef görevlerde kaynak görev performansına yakın performans elde ettik. Bunun yanı sıra dayanıklı çekişmeli pekiştirmeli öğrenme algoritmasında kullanılan farklı eleştirmen ağ yapılarının öğrenme aktarımındaki etkisini karşılaştırdık ve zor hedef görevlerde daha iyi performans gösteren yeni bir ağ yapısı sunduk. KPÖS yöntemimizle morfolojik olarak farklı robotlara öğrenme aktarımı yaptık.

İlerideki çalışmalarımızda daha aktarılabılır politikalar geliştirmek için aşırı öğrenmeye engel olabilecek müfredat öğrenimi algoritmalarını kullanmayı hedefliyoruz. Hedef ve kaynak görevler arasında çapraz geçişleme kullanarak geliştirme kapasitesi yüksek kaynak görevlerin ortak özelliklerini analiz etmeyi planlıyoruz. Farklı ağırlıklar taşıması ve farklı ortamlarda yürümesi beklenen bir insansı hizmet veya kurye robotu üzerinde de geliştirdiğimiz yöntemleri uygulamak istiyoruz.

KAYNAKÇA

- [1] Emanuel Todorov, Tom Erez, and Yuval Tassa. Mujoco: A physics engine for model-based control. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 5026–5033. IEEE, 2012.
- [2] Lisa Torrey and Jude Shavlik. Transfer learning. In *Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and Techniques*, pages 242–264. IGI Global, 2010.
- [3] Peter Henderson, Wei-Di Chang, Florian Shkurti, Johanna Hansen, David Meger, and Gregory Dudek. Benchmark environments for multi-task learning in continuous domains. *arXiv preprint arXiv:1708.04352*, 2017.

- [4] Aravind Rajeswaran, Sarvjeet Ghotra, Balaraman Ravindran, and Sergey Levine. Epopt: Learning robust neural network policies using model ensembles. *arXiv preprint arXiv:1610.01283*, 2016.
- [5] Konstantinos Bousmalis, Alex Irpan, Paul Wohlhart, Yunfei Bai, Matthew Kelcey, Mrinal Kalakrishnan, Laura Downs, Julian Ibarz, Peter Pastor, Kurt Konolige, et al. Using simulation and domain adaptation to improve efficiency of deep robotic grasping. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4243–4250. IEEE, 2018.
- [6] Ying WEI, Yu Zhang, Junzhou Huang, and Qiang Yang. Transfer learning via learning to transfer. In Jennifer Dy and Andreas Krause, editors, *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning*, volume 80 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 5085–5094, Stockholmsmässan, Stockholm Sweden, 10–15 Jul 2018. PMLR.
- [7] Chelsea Finn, Pieter Abbeel, and Sergey Levine. Model-agnostic meta-learning for fast adaptation of deep networks. *arXiv preprint arXiv:1703.03400*, 2017.
- [8] Chiyuan Zhang, Oriol Vinyals, Remi Munos, and Samy Bengio. A study on overfitting in deep reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1804.06893*, 2018.
- [9] Karl Cobbe, Oleg Klimov, Chris Hesse, Taehoon Kim, and John Schulman. Quantifying generalization in reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1812.02341*, 2018.
- [10] Lerrel Pinto, James Davidson, Rahul Sukthankar, and Abhinav Gupta. Robust adversarial reinforcement learning. In *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning-Volume 70*, pages 2817–2826. JMLR. org, 2017.
- [11] John Schulman, Filip Wolski, Prafulla Dhariwal, Alec Radford, and Oleg Klimov. Proximal policy optimization algorithms. *arXiv preprint arXiv:1707.06347*, 2017.
- [12] Richard S Sutton and Andrew G Barto. *Reinforcement learning: An introduction*. MIT Press, 2018.
- [13] John Schulman, Philipp Moritz, Sergey Levine, Michael Jordan, and Pieter Abbeel. High-dimensional continuous control using generalized advantage estimation. *arXiv preprint arXiv:1506.02438*, 2015.
- [14] John Schulman, Sergey Levine, Pieter Abbeel, Michael Jordan, and Philipp Moritz. Trust region policy optimization. In *International Conference on Machine Learning*, pages 1889–1897, 2015.
- [15] Prafulla Dhariwal, Christopher Hesse, Oleg Klimov, Alex Nichol, Matthias Plappert, Alec Radford, John Schulman, Szymon Sidor, Yuhuai Wu, and Peter Zhokhov. Openai baselines. <https://github.com/openai/baselines>, 2017.
- [16] Lerrel Pinto. Rllab implementation for robust adversarial reinforcement learning. <https://github.com/lerrel/rllab-adv>, 2017.
- [17] Lerrel Pinto. Gym environments with adversarial disturbance agents. <https://github.com/lerrel/gym-adv>, 2017.
- [18] Zisu Dong. Tensorflow implementation for robust adversarial reinforcement learning. <https://github.com/Jekyll1021/RARL>, 2018.
- [19] Trapit Bansal, Jakub Pachocki, Szymon Sidor, Ilya Sutskever, and Igor Mordatch. Emergent complexity via multi-agent competition. *arXiv preprint arXiv:1710.03748*, 2017.
- [20] Maruan Al-Shedivat, Trapit Bansal, Yuri Burda, Ilya Sutskever, Igor Mordatch, and Pieter Abbeel. Continuous adaptation via meta-learning in nonstationary and competitive environments. *arXiv preprint arXiv:1710.03641*, 2017.
- [21] Ye Huang, Chaochen Gu, Kaijie Wu, and Xinping Guan. Reinforcement learning policy with proportional-integral control. In *International Conference on Neural Information Processing*, pages 253–264. Springer, 2018.
- [22] Peter Henderson, Riashat Islam, Philip Bachman, Joelle Pineau, Doina Precup, and David Meger. Deep reinforcement learning that matters. In *Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2018.
- [23] Zhaoming Xie, Glen Berseth, Patrick Clary, Jonathan Hurst, and Michiel van de Panne. Feedback control for cassie with deep reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1803.05580*, 2018.
- [24] Diederik P Kingma and Jimmy Lei Ba. Adam: A method for stochastic optimization. In *Proc. 3rd Int. Conf. Learn. Representations*, 2014.
- [25] Hiroaki Shioya, Yusuke Iwasawa, and Yutaka Matsuo. Extending robust adversarial reinforcement learning considering adaptation and diversity. In *ICLR 2018 Workshop*, 2018.

5 Serbestlik Derecesine Sahip Ameliyat Robotunun Kinematığı

Onur Ersoy, Mehmet Can Yıldırım, Özkan Bebek

Makina Mühendisliği Bölümü

Özyeğin Üniversitesi

İstanbul, Türkiye

Email: onur.ersoy,mehmet.yildirim@ozu.edu.tr - ozkan.bebek@ozyegin.edu.tr

Öz — Bu makalede, 5 serbestlik derecesine sahip olan Surgery Robot I'nin (SR-I) tasarımı ve kinematığı anlatılacaktır. SR-I yüksek bant aralığında ve yüksek hassasiyet ile kalp ameliyatı gerçekleştirebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu kabiliyet robota 3 alt birim ile kazandırılmıştır. Bunlar, yüksek ivmelenme için 3 serbestlik dereceli hareketli birim, düşük hatalı konumlandırma için 2 serbestlik dereceli sabit birim ve 3 serbestlik dereceli cerrahi aletleri tahrik etmek için cerrahi alet ünitesidir. SR-I'nin alt birimlerinin ileri ve geri kinematikleri ayrı olarak sunulmuştur. Robotun tahvil oranları ve açısı ofsetleri optik ölçüm sensörleri aracılığıyla kalibre edilmiştir.

Abstract — In this paper, mechanical and electronics design of a lightweight 5-DOF robot, Surgery Robot I (SR-I). The SR-I is designed to operate for high motion bandwidths. This ability is realized using 3 sub-mechanisms: a 3-DOF remote stage for high acceleration, a 2-DOF fixed stage for low error positioning, and a drive unit to actuate 3-DOF surgical tools. The forward and the inverse kinematics of the OSI's sub-units are also presented. The transmission ratios (gear ratios) and initial angle offsets of the robot are calibrated using an optical measurement sensor.

I. GİRİŞ

Geçtiğimiz son yirmi yılda robotik cerrahi alanında hızlı gelişmeler yaşanmıştır[1]. Laparoskopik robotik cerrahi bu gelişmeler ışığında ortaya çıkan bir cerrahi metottur [2]. Laparoskopik robotik cerrahinin geleneksel laparoskopik tekniklere göre birçok avantajı bulunmaktadır. Geleneksel tekniklerde ekran görüntüleri 2 boyutludur ve cerrahi aletlerin hareket kabiliyeti kısıtlıdır. Aksine laparoskopik robotik cerrahide ise görüntüler 3 boyutlu, büyütülmüş ve yüksek çözünürlüklüdür. Boyun ve baş gibi dar alanlarda robotik cerrahi avantajlı bir yöntemdir [3]. Endowrist gibi gelişmiş cerrahi aletler, yüksek maharet, artırılmış hareket alanı ve hassasiyet sunarak iyileşme sürecini hızlandırır, doku tahribatını ve kan kaybını azaltır.

Kardiyopulmoner (Pompalı) koroner arter baypas cerrahi sırasında kalbin ve akciğerin görevi vücut dışı mekanik sistemlerle gerçekleştirilir. Pompasız koroner arter baypas cer-

rahide ise kalp atmaya devam eder. Pompasız baypasın belli şartlar altında yapılmasına rağmen hastanın yatış süresini azaltması, kognitif fonksiyon bozukluğunu engellemesi ve maliyetinin az olması sebebi ile pompalı baypasa tercih edilir. Buna ek olarak, endoskopik baypasın geleceği umut vericidir fakat kalp atışının kompleks dinamikleri sebebiyle ameliyat sırasında yüksek hassasiyeti sağlayabilmek oldukça zorlayıcı bir konudur. Cerrahi alanında bir çok robotik sistem bulunmaktadır. 7 serbestlik derecesine sahip Raven (Applied Dexterity) 2 adet tendon tahrikli mekanizma kullanır[4]. Raven'in kolları motorlara tendonlarla birleşen eklemler aracılığıyla bağlanmıştır. Dolayısıyla tendonlarda oluşan ufak bir miktar gevşeklik bile uç eleman pozisyonunda bir belirsizlik yaratmıştır. Bir başka sistem olan daVinci (Intuitive Surgery, Sunnyvale, CA) ise 6 serbestlik derecesine sahiptir. Kalp atışına benzetilmiş bir veri eşliğinde yapılan çivi ve halka deneyleri sonucunda doğruluk ve tamamlama süresi arasında bir değiş tokuş olduğu görülmüştür[5]. Sonuç olarak bu daVinci'nin atan kalp ameliyatları için hantal bir sistem olduğunu göstermiştir.

SR-I 5 + cerrahi alet serbestlik derecesine sahip, hafif, yüksek bant aralığında hareket edebilen bir kalp ameliyatı robotudur (Şek. 1). Robot, yüksek frekanslarda yüksek hassasiyet ile kalp ameliyatı gerçekleştirebilecek şekilde tasarlanmış ve yapılmıştır. Enkoderler kesin hareket kontrolü yapabilmek adına yüksek çözünürlüğe sahiptirler. Eksenler geri sürülebilir olup, bu özellikle sistemin kuvvet kontrolü algoritmalarına uygunluğu amaçlanmıştır[6].

Makalenin organizasyonu takiben şöyledir. SR-I hakkında genel bir bilgilendirme 2. bölümde yapılmıştır. Sistemin mekanik ve elektronik tasarımı 3. bölümde anlatılmıştır. 4. bölümde ise ileri ve geri kinematikleri ve kinematik kalibrasyonu yapılmıştır.

II. TASARIM

SR-I hastalar üstünde atan kalp ameliyatı gerçekleştirmek amacıyla tasarlanmış bir robotik sistemdir. Yüksek bant aralığında hareket edip cerrahi müdahale gerçekleştirebilecek yeterlikte olan sistem hafif olarak imal edilmiştir. 5 + cerrahi alet serbestlik derecesine sahip robot 3 alt birimden oluşur. Hareketli birim 3, sabit birim ise 2 serbestlik derecesine sahiptir(Şek. 2). Cerrahi alet ünitesinde ise 3 serbestlik derecesine sahip Endowrist'i tahrik etmek için 4 servo motor bulunur.

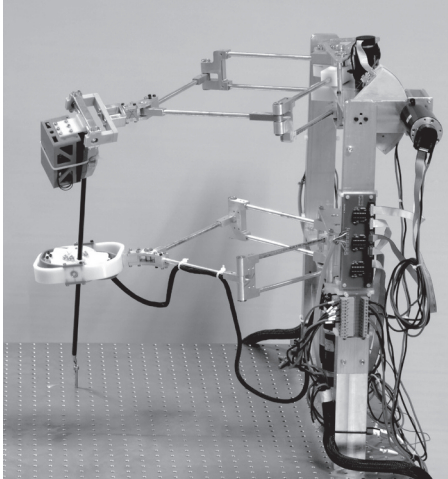
Makro-mikro hareket birimleri benimsenmeden yüksek ivmelenme ve yüksek hassasiyet beraber sağlanamıştır[7]. Hareketli ve sabit birimler büyük hareketleri yüksek ivmelenme ile gerçekleştirirken, cerrahi alet düşük hatalı konumlandırmayı gerçekleştirir. Benzer sistemler daha öncede kullanılmıştır[8].

A. Elektronik Tasarım

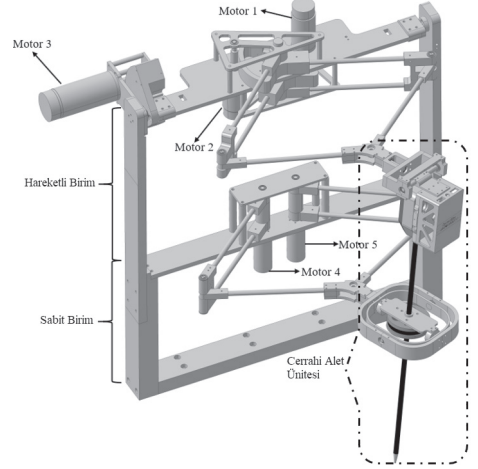
Kalp atışına benzeyen, yüksek frekanslı ve düşük genlikli bir yörünge izleyebilecek motorlar tercih edilmiştir. Uygulanan ters tork analizi sonucunda eksen başına düşen minimum tork ihtiyacının 0.2 Nm olduğu görülmüştür. Eksen 3 için Maxon RE-50 fırçalı DC motor ve bir dönüşte 500 puls sayısına sahip enkoder kullanılmıştır. Kalan eksenler için ise Maxon RE-40 fırçalı DC motorlar ve bir dönüşte 1024 puls sayısına sahip enkoderler kullanılmıştır. Robotun sabit ve hareketli birimlerini tahrik etmek için ESCON 70/10 (Sachseln, İsviçre) motor sürücülerini kullanılmıştır. Akım kontrolü yapılabilmesi bu sürücülerin seçilmesinde en önemli kriterdir. Kapalı döngü tork kontrolü için Quanser Q8-USB (Markham, ON, Canada) veri toplama cihazı seçilmiş ve kullanılmıştır.

B. Mekani Tasarım

SR-I, sabit birim, hareketli birim ve cerrahi alet kısmı olmak üzere 3 alt birime sahip 5 serbestlik dereceli bir robotik sistemdir. Hareketli birim 3 serbestlik derecesine sahiptir ve yüksek bant aralığında hareket eder. Sabit birim ise 2 serbestlik derecesine sahiptir, düşük bant aralığında hareket ve yüksek hassasiyetli konumlandırma gerçekleştirir. Yüksek frekanslarda çalışırken eyleyiciler üstündeki yükü azaltmak adına robot elemanları düşük ağırlıklı olarak tasarlanmış ve imal edilmiştir.



Şekil 1. İmal edilmiş Surgery Robot I (SR-I). Robot yüksek frekansta hareket gerektiren kalp ameliyatları için tasarlanmıştır.



Şekil 2. Surgery Robot I'nin alt birimleri ve eksenleri gösterilmiştir. Hareketli birim 3, sabit birim 2 serbestlik derecesine sahiptir. Cerrahi alet ünitesi hareketli birim uç elemanına monte edilerek cerrahi aletin manipülasyonu sağlanmıştır.

1) *Hareketli Birim:* 3 eyleyici ile tahrik edilen hareketli birim 3 serbestlik derecesine sahiptir. Hareketli birim 4 kol ve 1 adet hareketli taban elemanından oluşmaktadır. Bu kısmın geometrisi 5 çubuk mekanizmasını benimseyerek eyleyicileri taban elemanında toplamış ve kolların hafif olmasını sağlamıştır. Bu birimin yapılış amacı yüksek bant aralığında çalışarak istenen noktaya hızlıca ulaşılmasını sağlamaktır. Kol uzunlukları 260 mm uzunluğundadır. Bütün kollar aynı eksenin tabanda birbirine bağlanmıştır ve bu şekilde eşkenar dörtgen oluşturularak kinematik hesaplanması kolaylaştırılmıştır. Kolların hareketi için tendon tahrikli mekanizma kullanılmıştır. Bu mekanizma dişli kutusu gibi tork aktarımında artışı sağlar ve aynı zamanda gevşekliği ve kaymaları engeller. Bu birimin sonunda cerrahi alete yön vermek amacıyla 2 serbestlik derecesine sahip bir mafsallı bulunur.

2) *Sabit Birim:* Sabit birim 2 serbestlik derecesine sahiptir ve 2 eyleyici ile sabit birim taban elemanı üzerinden tahrik edilir. Bu birimdeki kollar taban elemanı üstünden aynı eksenin birleştirilmemiştir. Sabit birimin yapılış amacı cerrahi aleti hareket sırasında stabil tutmak ve düşük bant aralığında hareketi sağlamaktır. 3 serbestlik dereceli bir mafsallı birimin sonuna yerleştirilerek hareket kabiliyeti artırılmıştır.

3) *Cerrahi Alet Ünitesi:* Cerrahi aletleri manipüle etmek için yapılan cerrahi alet ünitesi kompakt bir tasarıma sahiptir (Şek. 3). Yüksek frekanslarda çalışırken eyleyicilere yüklenmemek adına hafif tasarlanan ünitenin ağırlığı 330 gramdır. Daha önce yapılan çalışmalarda hem DC motor hem de servo motor kullanılmıştır[9]. Hafif olması amacıyla sistemde Dynamixel XL-320 mini servo motorlar kullanılmıştır. 4 makara

ile hareketi sağlanan Endowrist kavrayıcı, ünite tasarımı için baz alınmıştır. Cerrahi alet ihtiyaca göre değiştirilebilir.

III. ROBOT KİNEMATİKLERİ

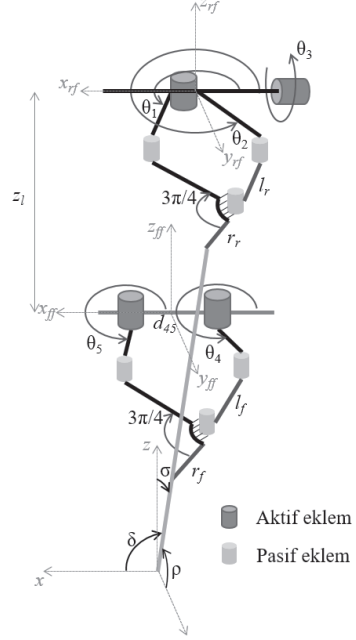
İleri kinematik hesaplamaları sırasında öncelikle hareketli birimin uç elemanının pozisyonu hesaplanmıştır. Kol uzunlukları bilindiğinden dolayı açılar kullanılarak sabit birimin uç elemanın pozisyonu da bulunmuştur. Sonrasında cerrahi aletin uzunluğu, hareketli ve sabit birimlerin uç pozisyonu kullanılarak robotun uç elemanının pozisyonu saptanmıştır.

Endowrist'in kinematikleri daha önce yapılmış araştırmalardan alınmıştır[9], [10]. Prosedüre göre cerrahi alet değiştirilebileceği için kinematik de değişecektir. Bu sebeple cerrahi alet kinematiği hareketli ve sabit birimlerden ayrılmıştır. Bu makalede sadece 5 serbestlik kinematiği sunulmuştur.

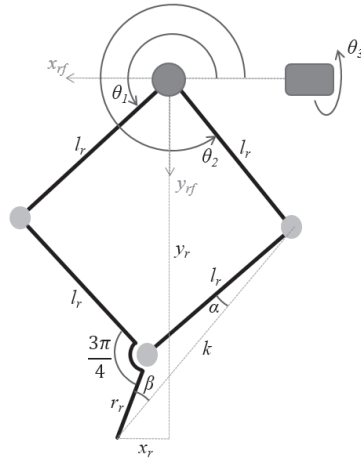
Eksen açılarının bulunması amacıyla, SR-I için ters kinematikler çözülmüştür. Koordinat doğrultu açılarını (İng: Co-ordinate Direction Angles) kullanarak hareketli birimin uç elemanının pozisyonları bulunmuştur. Takiben, cerrahi aletin doğrultu vektörü ve sabit birimin uç eleman pozisyonu bulunmuştur. Bu ilişkiler kullanılarak SR-I'in eksen açıları türetilmiştir. İlerleyen bölümlerde türetilen kinematik formüller detaylı olarak anlatılacaktır.

A. İleri Kinematikler

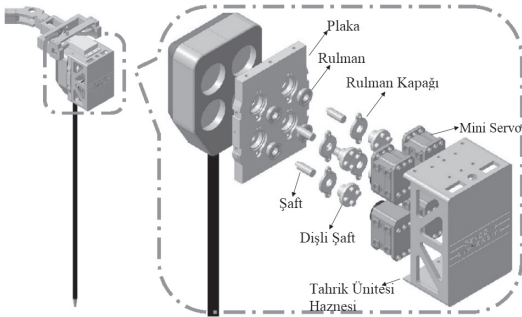
Robotun uç elemanının bulunması amacıyla hareketli ve sabit birimlerin ileri kinematikleri çözülmüştür. SR-I'in koordinat çerçevesi hareketli birim için $\{R\}$, sabit birim için ise $\{F\}$ olarak gösterilmiştir. Kol uzunlukları hareketli birim için l_r , sabit birim için ise l_f olarak gösterilmiştir. r_r ve r_f ise birimlerin uç elemanları ve ilgili mafsalları arasındaki uzaklıklar olarak belirtilmiştir. Birimlerin uç eleman pozisyonları sırasıyla hareketli birim için $p_r = [x_r, y_r, z_r]$ ve sabit birim için $p_f = [x_f, y_f, z_f]$ olarak belirtilmiştir. Şekil 4'de görüldüğü gibi eksen açıları $i = 1, \dots, 5$ ve θ_i olacak şekilde



Şekil 4. SR-I'in ileri kinematiklerinde kullanılan formüllerin türetilmesinde kullanılan değişkenlerin şeması

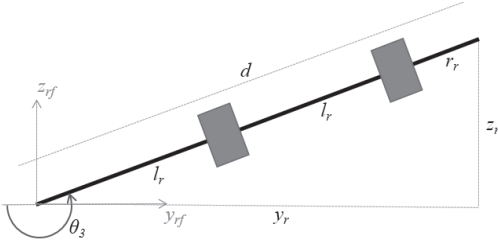


Şekil 5. Hareketli birimin kinematik şeması (x-y düzlemi)

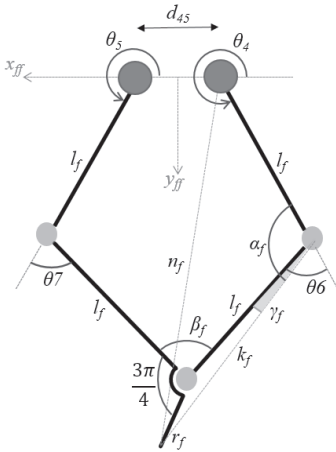


Şekil 3. Surgery Robot I'in alt birimleri ve eksenleri gösterilmiştir. Hareketli birim 3, sabit birim 2 serbestlik derecesine sahiptir. Cerrahi alet ünitesi hareketli birim uç elemanına monte edilerek cerrahi aletin manipülasyonu sağlanmıştır.

belirlenmiştir. $\{R\}$ ve $\{F\}$ arasındaki çerçeve dönüşüm matrisi R_T 'dir. Hareketli ve sabit birim arasındaki ilişki ve uç eleman pozisyonları sırasıyla (1), (2) ve (3)'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Hareketli birimin kinematik şeması (y-z düzlemi)



Şekil 7. Sabit birim kinematik şeması

$c(\theta)$ ve $s(\theta)$ sırasıyla kosinüs ve sinüs için kısaltmadırlar.

$$p_f = {}^F_T p_r \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r c(\theta_1 - \pi) - l_r c(2\pi - \theta_2) + r_r c(\theta_1 - \pi - \frac{\pi}{4}) \\ (l_r s(\theta_1 - \pi) + l_r s(2\pi - \theta_2) + r_r s(\theta_1 - \frac{\pi}{4}))c(\theta_3) \\ (l_r s(\theta_1 - \pi) + l_r s(2\pi - \theta_2) + r_r s(\theta_1 - \frac{\pi}{4}))s(\theta_3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_f s(2\pi - \theta_4) - l_f s(\alpha + \gamma - (2\pi - \theta_4)) \\ + r_f s(\theta_4 - \frac{7\pi}{4} + \gamma + \alpha) \\ 0.5d_{45} - l_f c(2\pi - \theta_4) + l_f c(\alpha + \gamma - (2\pi - \theta_4)) \\ + r_f c(\theta_4 - \frac{7\pi}{4} + \gamma + \alpha) \\ - z_{low} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Formülleri türetmek için kullanılan değişkenler ve geometrik ilişkiler Şek. 4,5,6,7'de gösterilmiştir.

B. Geri Kinematikler

Eksen açılarını bulmak amacıyla SR-I'in geri kinematikleri çözülmüştür. Uç elemanın koordinat doğrultu açıları olan

δ, ρ ve σ (Şek.4) ve uç elemanın pozisyonları olan (x,y,z) kullanılarak p_r bulunmuştur (4).

$$p_r = [\cos(\delta)l_{tool} \quad \cos(\rho)l_{tool} \quad \cos(\sigma)l_{tool}] + [x \quad y \quad z] \quad (4)$$

$$d = \sqrt{y_r^2 + z_r^2}, \quad n = \sqrt{x_r^2 + d^2}$$

$$k = \sqrt{l_r^2 + r_r^2 - 2l_r r_r \cos(\frac{3\pi}{4})} \quad (5)$$

Şek. 5-6'da oluşturulan ilişkiler ve (4) kullanılarak α ve β bulunmuştur.

$$\beta = \text{atan}\left(\frac{d}{x_r}\right), \alpha = \text{asin}\left(\frac{r_r \sin(\frac{3\pi}{4})}{k}\right) \quad (6)$$

θ_2, θ_1 ve θ_3 aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\theta_2 = \text{acos}\left(\frac{k^2 - n^2 - l_r^2}{-2nl_r}\right) + \beta + \pi$$

$$\theta_1 = \text{acos}\left(\frac{n^2 - k^2 - l_r^2}{-2kl_r}\right) - \pi + \theta_2 - \alpha$$

$$\theta_3 = \text{atan}\left(\frac{z_r}{y_r}\right) \quad (7)$$

Sabit birim pozisyonu $p_f = [x_f, y_f, z_f]$, cerrahi aletin doğrultu vektörü v ve cerrahi aletin hareketli birim ile sabit birim arasındaki uzunluk parçası olan l_{po} kullanılarak hesaplanmıştır (8).

$$p_f = v \cdot l_{po} + p_r \quad (8)$$

Sabit birim eksen açıları Şek. 7'deki üçgen ilişkileri kullanılarak türetilmiştir. α_f, γ_f ve θ_6 aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_f = \sqrt{\left(\frac{d_{45}}{2} + x_f\right)^2 + y_f^2},$$

$$\alpha_f = \text{acos}\left(\frac{n_f^2 - l_f^2 - k_f^2}{-2k_f l_f}\right), \gamma_f = \text{asin}\left(\frac{r_f \sin(\frac{3\pi}{4})}{k_f}\right)$$

$$\theta_6 = \pi - \beta_f + \alpha_f \quad (9)$$

Takiben, θ_7, θ_4 and θ_5 aşağıdaki gibi hesaplanmıştır

$$\theta_7 = \text{acos}\left(\frac{x_f^2 + y_f^2 - 2l_f^2}{2l_f^2}\right)$$

$$\theta_4 = \pi + \text{atan}\left(\frac{y_f}{x_f + d_{45}}\right) + \text{atan}\left(\frac{k_f \sin(\pi - \alpha_f)}{l_f + k_f \cos(\pi - \alpha_f)}\right)$$

$$\theta_5 = \pi + \text{atan}\left(\frac{y_f}{x_f}\right) - \text{atan}\left(\frac{l_f \sin(\theta_7)}{l_f + l_f \cos(\theta_7)}\right) \quad (10)$$

C. Kinematik Kalibrasyonu

SR-I üstünde kinematik parametre hatalarını saptamak adına kinematik kalibrasyonu uygulanmıştır. Kolların açılı ofsetleri ve tahvil oranları bu işlem sonunda kalibre edilmiştir. Eyileyiciler üstünde artımlı tip enkoderler olması sebebiyle sistem her yeniden başlatıldığında eksen açılarındaki bir ofset meydana gelir. Bu sebeptendir ki sistem için başlangıç ofset açısı ($\theta_{i,offset}$) ve tahvil oranı (Tr_i) kalibrasyon parametreleri belirlenmiş ve hesaplanmıştır. Kalibrasyon parametreleri için Optitrack optik izleyicileri ve işaretçileri kullanılmıştır. Optik işaretçiler robot'un taban elemanına ve hareketli kollarından birine yerleştirilmiştir. Sonrasında robot kolu mekanik limite dayandırılarak açılı ofsetleri tanımlanmıştır. Mekanik limit seçilmesinin başlıca sebebi sistem her yeniden başlatıldığında kolların bu noktaya tekrar olarak geri getirilebilecek olmasıdır. Tahvil oranı Tr_i ise kolların bir yörünge izletilmesi sonucu optik izleyiciden ve enkoderler toplanan veriler sonucunda hesaplanmıştır.

$$Tr_i = \left(\frac{\theta_{OpTr}}{\theta_{enc}} \right) \quad (11)$$

KAYNAKLAR

- [1] A. Okamura, M. Mataric, and H. Christensen, "Medical and health-care robotics," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 17, no. 3, pp. 26–37, Sep 2010.
- [2] S. Kitano and K. Sugimachi, "Peritoneoscopic cholecystectomy has opened the door to minimally invasive surgery," *J. Gastroenterol. Hepatol.*, vol. 8, no. 5, pp. 476–482, 1993.
- [3] M. Nakayama, F. C. Holsinger, D. Chevalier, and R. K. Orosco, "The dawn of robotic surgery in otolaryngology: head and neck surgery," *Jpn. J. Clin. Oncol.*, Feb 2019.
- [4] M. J. Lum, D. C. Friedman, G. Sankaranarayanan, H. King, K. Fodero, R. Leuschke, B. Hannaford, J. Rosen, and M. N. Sinanan, "The raven: Design and validation of a telesurgery system," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 9, pp. 1183–1197, 2009.
- [5] A. Ruszkowski, O. Mohareri, S. Lichtenstein, R. Cook, and S. Salcudean, "On the feasibility of heart motion compensation on the davinci® surgical robot for coronary artery bypass surgery: Implementation and user studies," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2015, pp. 4432–4439.
- [6] M. Yildirim, O. Ersoy, O. Bebek, and B. Ugurlu, "Tepki kuvveti gözleyici bazlı kuvvet kontrolünün yüksek ataletli robot eklemlerinde deneysel olarak sınanması experimental testing of reaction force observer based torque control on high inertial robot joints," 09 2017.
- [7] Z.-H. Jiang and A. Goldenberg, "Task space trajectory control of flexible micro-macro robot in the presence of parametric uncertainty," *Mechanism and machine theory*, vol. 34, no. 8, pp. 1281–1302, 1999.
- [8] O. Bebek, M. J. Hwang, and M. C. Cavusoglu, "Design of a parallel robot for needle-based interventions on small animals," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 1, pp. 62–73, Feb 2013.
- [9] S. M. S. Afonso, "Development of a gestural master interface for tele-surgery applications," Master's thesis, Instituto Superior Tecnico, Universidade de Lisboa, November 2014.
- [10] C. Y. Kim, M. C. Lee, R. B. Wicker, and S.-M. Yoon, "Dynamic modeling of coupled tendon-driven system for surgical robot instrument," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 15, no. 10, pp. 2077–2084, Oct 2014.

Faydalı Frenleme Altında Fren Pedal Hissiyatının Korunabilmesi için Aktif Fren Pedalı Geliştirme Sistemi

Umut Çalışkan, Ardan Apaydın ve Volkan Patoğlu

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

E-posta: {caliskanumut,ardanapaydin,vpatoglu}@sabanciuniv.edu

Özetçe —Faydalı frenleme, elektrik tahrikli araçlarda frenleme esnasında ortaya çıkan enerjinin elektrik motorunun jeneratör olarak kullanılarak geri kazanılmasıdır. Güvenli ve tekrar edilebilir bir fren sistemi için, faydalı frenleme sistemi ile klasik sürtünme mekanizmalı fren sistemi birlikte kullanılmaktadır. Kooperatif frenleme yaklaşımında enerji geri kazanımını en yüksek seviyede tutmak için faydalı fren kapasitesi öncelikli olarak kullanılmakta ve toplam frenleme kuvvetinin faydalı fren kuvvetinden fazla olduğu durumlarda sürtünme fren sistemi devreye alınmaktadır. Fren pedalı ile faydalı frenleme arasında fiziksel etkileşim olmadığından, faydalı frenleme sırasında fren pedalında herhangi bir tepki kuvveti oluşmamaktadır. Bu durum, kooperatif frenleme sırasında fren pedalında sürücülerin alışık olmadığı bir fren hissiyatının ve öngörülemeyen kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Geleneksel fren pedal hissiyatının geri kazanılması için, fren pedalında faydalı fren sisteminden kaynaklanan eksik fren tepki kuvvetini giderecek aktif fren pedal sistemleri geliştirilmektedir. Bu bildiride, fren pedal hissiyatının faydalı frenleme altında korunabilmesi için, eksik fren tepki kuvvetlerini telafi eden kooperatif fren sistemlerinin geliştirilmesine ve test edilmesine imkan veren, seri-elastik eyleyici tahrikli bir fren pedalı geliştirme sistemi sunulmaktadır. Sistem, faydalı fren algoritmalarının uygulanabileceği kuvvet geri-beslemeli bir fren pedalı ve sistemin test edilmesinde kullanılabilecek tork kontrollü bir test dinamometresinden oluşmaktadır.

Anahtar Kelimeler—Faydalı frenleme, kooperatif frenleme, aktif fren pedalları, kuvvet geri beslemeli sistemler, seri elastik eyleyiciler

I. GİRİŞ

Günümüzde elektrik motor tahrikli araçlar giderek yaygınlaşmaktadır. Bu araçlardaki elektrik motorları aracı tahriklemede kullanıldığı gibi, frenleme kuvvetlerinin oluşturulması için de kullanılabilir. Frenleme esnasında elektrik motorunun jeneratör gibi davranması, aracın kinetik enerjisinin bir kısmının elektrik enerjisi olarak depolanmasına yardımcı olur. Frenleme esnasında ortaya çıkan enerjinin elektrik motorunun jeneratör olarak kullanılmasıyla geri kazanılması *faydalı frenleme* olarak adlandırılmaktadır. Araç teknolojisinin geleceği açısından faydalı frenleme büyük önem taşır.

Faydalı frenleme kapasitesi araçtan araca değişebilmektedir. Faydalı frenlemenin kapasitesini sınırlayan bazı unsurlar mevcuttur: i) faydalı frenleme kuvveti aracın hızına göre doğrusal olmayan şekilde değişir, ii) düşük hızlarda yeterli

frenleme kuvveti üretilemez, iii) yüksek hızlarda ise motordaki mıknatıslar kalıcı zarar görebilir. Ayrıca, iv) pilin anlık şarj durumu da frenleme kapasitesini etkileyen önemli bir faktördür.

Güvenli ve tekrar edilebilir bir fren sistemi için, faydalı frenleme sistemi ile klasik sürtünme mekanizmalı fren sistemi birlikte kullanılmaktadır [1]. İki çeşit frenleme sisteminin birlikte kullanıldığı çeşitli frenleme yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan biri paralel frenleme yöntemidir. Bu yöntemde sürtünme fren sistemi her zaman aktiftir. Faydalı fren sistemi sürtünme fren sistemine bir miktar katkı sağlar. Alternatif yaklaşım, kooperatif frenleme yöntemidir. Bu yöntemin amacı enerji geri kazanımını en yüksek seviyede tutmak için faydalı fren kapasitesini mümkün olduğunca öncelikli olarak kullanmaktır. Kooperatif frenleme yönteminde, sadece toplam frenleme kuvvetinin faydalı fren kuvvetinden fazla olduğu durumlarda sürtünme fren sistemi devreye alınır. Araştırmalara göre kooperatif frenleme paralel frenlemeye göre %50 oranında daha fazla enerji geri kazanabilmektedir [2], [3].

Kooperatif frenleme sistemi daha çok enerji geri kazanımına imkan vermekle beraber, bu yaklaşımın uygulanmasında bazı zorluklar söz konusudur. Bunlardan en önemlisi, hidrolik parçalarla fren pedalına mekanik olarak bağlı olan sürtünme frenleme sisteminden farklı olarak, faydalı frenleme sisteminin fiziksel olarak fren pedalına bağlı olmamasıdır. Fren pedalı ile faydalı frenleme arasında fiziksel etkileşim olmadığından, faydalı frenleme sırasında fren pedalında herhangi bir tepki kuvveti oluşmamaktadır. Bu durum sürücünün frenleme miktarını ayarlamak için gereksinim duyduğu kuvvet geri beslemesinin kısmi kaybına neden olmaktadır. Kooperatif frenleme sırasında sürtünme fren sisteminin ani müdahalesi pedalda ani sertleşmeye ve sürtünme fren sisteminin aniden devreden çıkması pedalda aniden oluşan boşluk hissine neden olmaktadır. Bu sebeplerden ötürü kooperatif frenleme yöntemi, fren pedalında sürücülerin alışık olmadığı bir fren hissiyatı ve öngörülemeyen kuvvetler oluşturmaktadır.

Fren pedalında faydalı fren sisteminden kaynaklanan eksik fren tepki kuvvetini gidermek için çeşitli araştırmalar yapılmış ve bu araştırmalar sonucu değişik pedal tahrik sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerden biri elektro-hidrolik pedal sistemidir. Bu sistemde fren merkez silindiriyle pedal arasına yeni bir hidrolik tahrikli eyleyici eklenmiştir [2], [4], [5]. Bir diğer çözümde ise fren merkez silindirine bir elektrik motoru eklenip, hidrolik sıvının basıncı düzenlenmektedir [3].

Elektro-hidrolik çözümlere alternatif olarak pedal hissiyatını geri kazandırmak için pasif elastik ve sönümleyici elemanlar kullanılması önerilmiştir. Bu yaklaşım özellikle sürtünme fren kuvveti tepkilerinin de fren pedalına aktarılmadığı uzaktan frenleme (drive-by-wire) sistemleri için daha uygundur [6], [7]. Pasif fren mekanizmaları düşük maliyetlidir, ancak uzaktan frenlemeli araçlar regülasyonlar nedeniyle henüz kullanılmadığından, araçlarda pasif fren sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmamıştır.

Aktif olarak pedal hissiyatını geri kazandıran farklı sistemler de geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri redüktörlü bir DC motorla, fren pedalında kapalı döngü hız denetimi yapılmasıdır [8]. Kullanılan diğer bir yöntem ise pedala kuvvet sensörü takarak geri beslemeli kuvvet denetimi yapılmasıdır [9]. Başka bir çalışmada ise fren pedalında reaksiyon tork gözetçisi uygulanarak akım geri beslemeli DC motor kullanılmıştır [10]. Araç simülöründe kuvvet geri beslemeli gaz pedalı olarak açık döngülü haptik cihazlar da kullanılmıştır [11], [12]. Geleneksel araç teknolojisi elektro-hidrolik fren çözümlerini yoğun bir şekilde kullanmaktadır. Son yıllarda elektrikli araçların yaygınlaşması ile elektromekanik fren yaklaşımları ilgi görmektedir. Uzaktan frenleme teknolojisinin yarış pistlerinden çıkıp günlük kullanıma girmesi sonrasında elektromekanik pedal sistemlerinin daha çok önem kazanacağı öngörülmektedir.

Bu bildiride, faydalı frenleme altında fren pedal hissiyatının korunabilmesi için, eksik fren tepki kuvvetlerini telafi eden kooperatif fren sistemlerinin geliştirilmesine ve test edilmesine imkan veren, yenilikçi, seri-elastik eyleyici tahrikli bir fren pedalı geliştirme sistemi sunulmaktadır. Sistem, faydalı fren algoritmalarının uygulanabileceği kuvvet geri beslemeli bir fren pedalı ve sistemin test edilmesinde kullanılabilecek tork kontrollü bir test dinamometresinden oluşmaktadır. Test dinamometresi araçtaki sürtünme fren sisteminden dolayı oluşan tepki kuvvetlerini fren pedalına uygulayabilmekte ve faydalı fren algoritmalarının fren pedalındaki bu bozucu fiziksel kuvvetler altında test edilmesine imkan vermektedir. Kuvvet geri beslemeli pedal ise bu bozucu kuvvetlere rağmen araçtaki pedal hissiyatının geleneksel bir fren sistemi gibi davranabilmesi için uygun telafi kuvvetlerini oluşturmaktadır. Bu sistemdeki seri elastik eyleyici tahrikli fren pedalı önceki çalışmamızda yayınlanmıştır [13]. Bu çalışmamızda, kuvvet geri beslemeli pedalına ek olarak test dinamometresi sisteme eklenmiş ve kooperatif fren algoritması sürtünme frenlemesi nedeniyle ortaya çıkan bozucu kuvvetler altında geliştirilip test edilmiştir.

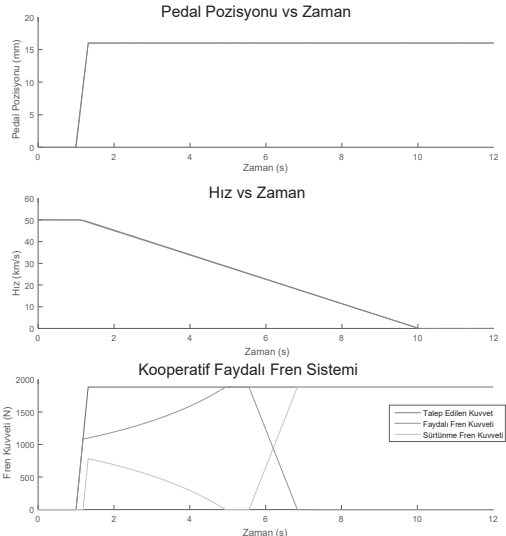
II. FAYDALI FRENLEME ALTINDA ÇALIŞAN AKTİF FREN PEDALI GELİŞTİRME SİSTEMİ

Elektrikli araçlardaki pedal hissiyat sorununu daha net açıklamak için örnek bir kooperatif fren senaryosu Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu frenleme senaryosunda başlangıçta 50 km/s hızla giden bir araç, sabit ivme ile yavaşlamaktadır. Şekil 1'de en alttaki grafik talep edilen frenleme kuvvetini göstermektedir. Frenleme sırasında $t = 1.2$ anında faydalı frenleme kuvveti devreye girer. Aracın hızı, $t = 5.5$ anında 20 km/s altına düşüncü, faydalı frenleme sistemi frenleme kuvveti üretmediği için devreden çıkıp sürtünme fren sistemi devreye girer. Sürtünme fren sisteminin aktif olması veya

olmamasından ötürü kooperatif fren sisteminde fren pedalında hızlı yumuşama ve sertleşme gözlemlenir.

Bu sorunu çözmek için bu çalışmada standart bir fren pedalı yerine seri-elastik fren pedalı kullanılması önerilmiştir. Önerilen fren pedalının ana özelliği, seri-elastik eyleyici tahrikli olması nedeniyle yüksek doğrulukta kapalı döngü kuvvet denetimi yapılabilmesinin yanı sıra, düşük maliyetle uygulanabilir olmasıdır.

Sistemde seri-elastik eyleyicilerin tercih edilmesinin standart bir kuvvet denetimine göre önemli avantajları vardır. Tüm kapalı döngü kuvvet kontrol yöntemlerinde sensör ve eyleyici arasındaki ölenemez esneklik nedeniyle, sistemin kapalı döngü kazancı üzerinde bir üst limit mevcuttur [14], [15]. Sistemin kararlılık kısıtı olan bu üst limit, denetimci kazancı ve kuvvet sensörünün sertliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu üst limit nedeniyle, sistem kararlılığını bozmadan kontrol performansını artırmak için denetimci kazancının yükseltilirken aynı zamanda sensör esnekliğinin azaltılması gereklidir. Yüksek denetimci kazançları kullanılarak sürtünme gibi bozucu etkilere karşı daha gürbüz bir denetimci tasarlanabilir [16]. Ayrıca, sensör esnekliğinin düşürülmesi, sensördeki deplasmanın (örneğin dijital konum ölçerler ile) daha kolay ölçülebilmesine imkan vererek, kuvvet ölçümü için karışık ve yüksek maliyetli sinyal işleme/filtreleme yöntemlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Yüksek denetimci kazancı ile yapılan gürbüz kontrol, eyleyiciden ve güç iletiminde kullanılan mekanizmalardan kaynaklanan bozucu etkilerin telafisini de mümkün kılarak, sistemin uygulanmasında daha düşük maliyetli/performanslı parçaların kullanımına izin verir. Bu sayede, seri-elastik eyleyici tahrikli sistemler, yüksek doğrulukta kapalı döngü kuvvet denetiminden ödün vermeden, alternatif yöntemlere göre çok daha düşük (yaklaşık 10 kat) maliyetle hayata geçirilebilirler.



Şekil 1. Örnek bir kooperatif frenleme sırasında pedal konumu, araç hızı ve (sürtünme ve faydalı) fren kuvvetleri

Seri-elastik eyleyicilerin sisteme gelen ani darbelerle karşı mekanik bir filtre olarak davranması da bu sistemlerin önemli avantajları arasındadır. Seri-elastik eyleyicilerin temel dezavantajı esnek sensör kullanımı nedeniyle kuvvet denetim bant genişliğinde neden oldukları azalmadır. Ancak insanlar için mümkün olan en yüksek hareket bant genişliği oldukça düşüktür. Bu nedenle seri-elastik eyleyicilerin insanlarla fiziksel etkileşime giren kuvvet geri beslemeli sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir [13], [17]–[23].

Sistem, kuvvet geri beslemeli fren pedalı ve tork denetimli test dinamometresinden oluşur. Her iki cihaz da seri elastik eyleyici tahrikli olarak tasarlanmış olup, sabit katı bir kaplin ile birbirine bağlanabilmektedir. Arabadaki denetimli fren ana merkez silindiri'nin oluşturduğu, sürtünme frenlemesinden kaynaklanan tepki kuvvetlerini pedala uygulamak için test dinamometresi kullanılmaktadır. Kuvvet geri beslemeli fren pedalı ise kooperatif fren algoritmalarından gelen fren tepki kuvvetlerini, hidrolik frenenden (dinamometreden) gelen bozucu etkileri telafi ederek araç sürücüsüne uygulamak için kullanılmaktadır. Aktif fren geliştirme sisteminin birbirinden bağımsız iki alt sistem olarak tasarlanmış olması, fren merkez ana silindiri kuvvet yörüngesini pedaldan bağımsız olarak uygulanabilmesine ve fiziksel bozucu kuvvetler altında farklı fren pedal telafi algoritmalarının denenebilmesi açısından önemlidir. İki alt sistemin beraber kullanılması, fren sisteminin gerçek bir araçtaki gibi çalışmasını sağlar.

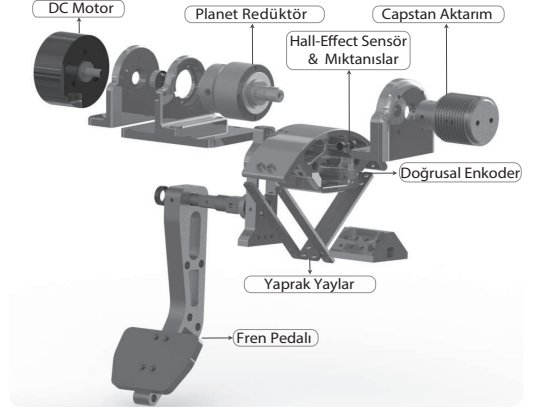
Sistem, faydalı frenleme altında eksik kalan tepki kuvvetlerinin pedala eklenip sürtünme frenlemesinin aniden devreye girmesi/devreden çıkması nedeniyle pedal hissiyatında oluşan bozucu etkilerin ortadan kaldırılıp geleneksel fren pedal hissinin geri kazanılması için yenilikçi algoritmaların geliştirilmesi ve gerçekçi koşullarda test edilmesi için kullanılır. Ayrıca, sistem aracın değişik sürüş modlarına göre pedal tepkilerinin ayarlanması için de kullanılabilmektedir. Sistem, yakın gelecekte yaygınlaşması öngörülen uzaktan frenleme sistemlerin geliştirilmesi için de uygun bir platformdur.

Sistemi oluşturan kuvvet geri beslemeli fren pedalı ve tork denetimli test dinamometresi aynı mekatronik alt yapıya sahiptir.

A. Mekanik Tasarım

Her iki sistem de seri elastik eyleyici tahrikli bir yapıya sahiptir. Seri elastik eyleyici tahrikli fren pedalı günümüzdeki araçlara bütünleştirilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Güç aktarımı için bir adet DC motor, dişli redüktör ve gerdirilmiş kasnak (capstan) mekanizması kullanılmıştır. İkinci aşamada kullanılan gerdirilmiş kasnak mekanizması düşük sürtünme ve boşluk ile çıkış torkunu arttırmak için tercih edilmiştir.

Şekil 2'de sunulan sistem iki ana kısımdan oluşmaktadır. Güç aktarım kısmı ile fren pedalı birbirine yaprak yaylardan oluşan esnek bir dönel eklem mekanizması ile bağlanmıştır. Esnek mekanizmanın üzerinde oluşan deplasman bir doğrusal enkoder aracılığı ile ölçülmektedir. Yaprak yaylardan oluşan esnek dönel eklem (hem analitik hesaplamalar, hem de deneysel ölçümler sonucunda) bilinmektedir. Pedal üzerindeki kuvvetler deplasman ölçümü ve yay sabiti kullanılarak yüksek doğrulukla tahmin edilebilir. Bu kuvvet tahmini de seri elastik eyleyicinin denetiminde geri besleme olarak kullanılır.



Şekil 2. Seri elastik eyleyici tahrikli fren pedalı

Yaprak yaylar ölçümündeki görevlerine ek olarak, sisteme esneklik de kazandırır ve dışardan gelen bozucu kuvvetlere karşı mekanik bir düşük geçirim filtresi olarak davranır.

Seri elastik eyleyici fren pedalı, hidrolik bir frenle birlikte çalışabilecek şekilde geliştirilmiştir. Pasif geri-sürülebilirliğe sahip olacak şekilde tasarlanmış pedalin konumu, acil bir hata durumunda dahi (örneğin elektronik bir hatadan dolayı fren pedallının üzerindeki motorun/denetçinin devre dışı kalması gibi) sürücü tarafından değiştirilebilmekte ve sürtünme freni kullanılarak aracın yavaşlaması sağlanabilmektedir.

B. Seri Elastik Eyleyici Denetimi

Sistemde birbirinden bağımsız iki seri elastik eyleyici denetleyicisi mevcuttur. Seri elastik eyleyicilerin kontrolünde ardarda denetim yaklaşımı kullanılmaktadır [24], [25].

Ardarda denetim yaklaşımında, içteki denetleyici hız denetleyicisi olarak tasarlanmıştır. İçteki hız denetleyicisi hızlı örnekleme zamanı (10 kHz) ile donanım üzerinde uygulanır ve sürtünme gibi bozucu etkilerin telafi edilip sistemin kuvvet kontrol bant genişliği içerisinde ideal hareket kaynağı olarak davranmasını sağlar [25], [26]. Dıştaki kuvvet denetleyicisi 1 kHz örnekleme zamanında uygulanır ve yaprak yayın esnemesinden elde edilen kuvvet tahminini kullanarak arzu edilen kuvvet yörüngesini kapalı döngü olarak takip eder.

Sistem, aktif fren pedalı ve dinamometresi için birbirinden bağımsız denetleyiciler içermektedir. İki seri elastik cihazın birbiriyle etkileşimi fiziksel olarak, sabit kaplin yoluyla gerçekleşir.

Sistemde aktif frenleme algoritmalarının geliştirilebilmesi için, kooperatif frenleme altında uygun fren kuvvetlerini belirleyen bir fren kuvveti üreticisi ve aracın dinamik modelini içeren araç simülatörü de yer almaktadır. Seri elastik eyleyicilerin takip etmeleri istenen kuvvet yörüngelerini hesaplayan bu modüller geliştirilen fren algoritmasına ve kullanılan araca göre geliştirilmelidir.

Kapalı döngü kuvvet denetimindeki sistem için kontrolcü kazancının bir üst limiti mevcuttur. Bu üst limiti sensörün esneklik katsayısı ve denetimsi kazancının çarpımı belirler.

Limiti aştığında sistem kararsızlığa gidebilir [15]. Gürbüz bir kuvvet denetimi yapmak için seri elastik eyleyicinin kuvvet kazancı mümkün olan en yüksek şekilde seçilmesi gereklidir, ancak sensör esnekliğinin artışı sistemin kuvvet kontrol bant genişliğinin azalmasına sebep olur. Bu yüzden sensör esnekliğiyle kontrol kazancı arasında uygun dengenin korunması önemlidir. Bu çalışmada, uygun kuvvet kazançlarının seçiminde literatürdeki çalışmalarda belirlenmiş limitlerden yararlanılmıştır [27]–[29].

C. Sensörler ve Güç Elektroniği

Seri elastik fren pedalında ve dinamometrede, DC motor üzerindeki encoderlere ek olarak, esnek elamanın deplasmanını ölçmek için ikişer adet pozisyon ölçer kullanılmıştır. Bu iki sensörden biri doğrusal enkoder, diğeri ise Hall-effect sensördür. Ayrıca araçlara pedal konumunu ölçen bir sensör de mevcuttur. Bu sensörler birbirinin yedeğidir ve bir sensör bozulsa dahi fazla sensörler sayesinde sistem aynı işlevi gerçekleştirebilmektedir.

Sistemdeki DC motor voltaj kontrolü altında PWM sinyali ile sürülür. Voltaj kontrolü hız denetimi yapan iç denetçi için en uygun yöntemdir. Sistemdeki tüm birimler EtherCAT veri yolu ile birbirine bağlıdır ve gerçek zamanlı olarak mikro denetleyici tarafından kontrol edilmektedir.

III. İNSANLI DENEYLER

Önerilen sistemin etkinliğini test etmek amacıyla sağlıklı gönüllülerin katıldığı kooperatif frenleme deneyleri tasarlanıp uygulanmıştır. Deney için sanal ortamda bir araç takip senaryosu oluşturulmuş ve kullanıcılara, fren yapılması gereken durumlarda kooperatif faydalı fren sistemine sahip bir araçta karşılaşacakları telafi edilmemiş pedal hissiyatı ve aktif pedal kullanılarak telafi edilmiş pedal hissiyatı sunulmuştur. Deneyde, pedal hissiyatının takip mesafesinin korunmasındaki önemi araştırılmış, önerilen sistemin gerçekçi pedal hissiyatını ve bozucu etkileri sağlamasındaki rolü incelenmiştir. Şekil 3'te düz ekranda kullanıcıya sunulan sanal gerçeklik ortamında yaratılmış bir araç takip benzetimi ve önerilen seri elastik faydalı frenleme altında çalışan aktif fren pedalı geliştirme sisteminden oluşan deney düzeneği sunulmuştur.

Araç takip senaryosu sanal düz yolda birbirlerini takip eden iki araçtan oluşmaktadır. Kullanıcının görevi, önde başlayıp rastgele hızlanan ve yavaşlayan bir aracı sabit bir mesafe ile takip etmektir. Araç takip senaryosu, standart CAMP [30] (Crash Avoidance Metrics Partnerships) protokolü temel alınarak geliştirilmiştir. Önceki araç hedef hızı 50 km/s'ye ulaşana kadar 0.2g ile ivmelenmekte, hedef hızına vardığında rastgele olacak şekilde 0.19g, 0.28g veya 0.39g ivmeleriyle durana kadar yavaşlamaktadır. Arkadaki takipçi araç başlangıç pozisyonu olarak önceki araçtan geride başlar ve otomatik olarak daha hızlı ivmelenir. Önceki araç gibi en fazla 50 km/s hızına ulaşır. Takipçi aracın yavaşlaması seri elastik eyleyicili fren pedalı tarafından kontrol edilir. Pedala basıldığında takipçi araç frenleme algoritmasından sağlanan yavaşlama dinamikleri doğrultusunda yavaşlar. Fren pedalının sıfır konumuna gelmesiyle takipçi araç tekrar otomatik olarak ivmelenir.

Seri elastik eyleyici tahrikli fren sistemi kooperatif frenlemede faydalı frenleme altında oluşan telafi edilmemiş fren pedalı hissiyatını ve tarafımızca geliştirilen algoritma [13]



Şekil 3. Deney düzeneği

kapsamında sunulan telafi edilmiş faydalı fren hissiyatını kullanıcılarına aktarır. Detaylandırmak gerekirse, test dinamometresi, sürtünme frenlemesi esnasında hidrolik fren sisteminin devreye girmesi nedeniyle uygulanması gereken tepki kuvvetleri pedala iletilir. Test dinamometresi telafi edilmemiş ve telafi edilmiş kooperatif frenleme durumlarının her ikisinde de aktiftir. Seri elastik eyleyici tahrikli fren pedalı ise geliştirilen telafi algoritması ile pedaldaki fren hissiyatını iyileştirerek doğal fren pedalı hissiyatını geri kazandırmak amacıyla, sadece telafi edilmiş kooperatif frenleme durumunda aktiftir. Birbirlerinden bağımsız olarak fren pedalına etki eden bu iki sistem, kooperatif faydalı fren sisteminde karşılaşılan sorunlu pedal hissiyatının ve bu sorunun çözümü için geliştirilen yöntemin hayata geçirilip kullanıcılarla test edilmesine olanak sağlamıştır.

Fren benzetim deneylerine aktif olarak araba kullanan ve 3 ile 6 senelik araba kullanma deneyimi olan 5 kullanıcı katılmıştır. Kullanıcılardan hiçbirisi faydalı frenleme sistemine sahip araç kullanma deneyime sahip değildir. Kullanıcılara deneyler başlamadan önce deneyin amacı ve kullanacakları sistem hakkında bilgi verilmiştir. Ekran tarafından yansıtılacak olan sanal ortama alışmaları için kullanıcılara öncelikle geleneksel fren hissiyatının sağlandığı kayıt dışı temsili testler yaptırılmıştır. Temsili alışma testlerini tamamlayan kullanıcılar, pedal hissiyatı telafi edilmiş ve telafi edilmemiş kooperatif frenleme testlerini tamamlamışlardır. Her bir test koşulu rastgele bir sırayla kullanıcılara ikişer kez uygulanmıştır. Testler sırasında kullanıcılara hangi koşulun uyguladığı hakkında bilgi verilmemiş, test sonrasında kullanıcılardan hangi koşulun uyguladığını tespit etmeleri istenmiştir.

Fren benzetim deneyinde kullanıcıların telafi edilmiş ve edilmemiş koşullarda yaptıkları frenler esnasında aracın kon-

trolüne sahip olma konusundaki algıları gözlemlenmiştir. Bu veri, kullanıcıların testlerden sonra doldurdıkları anket vasıtasıyla toplanmıştır. Tablo 1'da sunulan 6 sorudan oluşan ankette 5'in tamamen olumlu yanıtı, 1'in ise tamamen olumsuz yanıtı simgelandığı beş kademeli Likert ölçeği kullanılmıştır.

Ayrıca, test sonrasında kullanıcılardan, telafi edilmemiş ve telafi edilmiş koşullarda ayrı ayrı olmak üzere, fren pedalına sabit yavaşlama yapabilecekleri şekilde basmaları istenmiştir. Bu deneyde, sabit yavaşlamalarını gözlemleyebilmeleri için pedal pozisyonu, yavaşlama değeri ve aracın anlık hızı ekranda kullanıcılara sunulmuştur.

IV. SONUÇLAR

Deneyler sırasında tüm kullanıcılar hangi deney koşulunda bulunduklarını tüm denemelerde başarı ile tespit edebilmişlerdir. Kullanıcı deneyimlerini yansıtan anketin sonuçları Tablo 1'da gösterilmiştir.

Anketin ilk sorusu ile telafi edilmemiş kooperatif frenleme koşulunda hidrolik frenlerin devreye girmesinin kullanıcılar tarafından ne kadar algımlandığı ölçülmüş ve kullanıcıların hepsi devreye girişi hissettiklerine tamamen katılmışlardır. İkinci soruda kullanıcılar telafi edilmemiş kooperatif frenleme koşulunda aracı istedikleri zamanda/mesafede durdurabildiklerini belirtmişlerdir.

Üçüncü soruda ise telafi edilmiş kooperatif frenleme hidrolik frenlerin devreye girişini kullanıcılar tarafından hangi seviyede algıladıkları ölçülmüştür. Kullanıcılar devreye girişi hissettiklerine katılmışlardır. Dördüncü soruda telafi edilmiş kooperatif frenleme koşulunda kullanıcılar aracı istedikleri zamanda/mesafede durdurabildiklerine katılmışlardır.

Beşinci soruda telafi edilmiş fren hissiyatının geleneksel fren sistemlerindeki pedal hissiyatına benzerliğini ölçülmüştür. Kullanıcılar pedal hissiyatındaki benzerliğe katılmışlardır. Altıncı soruda ise kullanıcılar hangi pedal hissiyatını tercih edecekleri sorulmuştur. Kullanıcılarda dördü telafi edilmiş pedal hissiyatını tercih ederken, bir kullanıcı telafi edilmemiş pedal hissiyatını tercih etmiştir. Telafi edilmiş pedal kullanmayı tercih edenler yavaşlama sırasında fren pedalındaki ani hissiyat değişiminin dikkatlerini dağıttığını ve bu değişimin aracın kontrolüne müdahale ettiğini belirtmişlerdir.

Pedaldaki kuvvet değişimlerinin fiziksel etkisini yansıtan deneyimizin sonuçları ise Şekil 4'da gösterilmiştir. Şekildeki deneyde kullanıcı telafi edilmemiş ve telafi edilmiş koşullarda sabit bir şekilde pedala basmıştır ve sabit yavaşlama uygulayabilmek için fren pedalını aynı pozisyonda tutmaya çalışmıştır. Grafiklerde pedal pozisyonu, araç hızı, araca uygulanan fren kuvveti ve fren pedalı kuvveti gösterilmiştir.

Telafi edilmemiş faydalı fren koşulunda kullanıcı $t = 5.9$ anında araç hızı 12 m/s iken frene basmış ve $t = 15.5$ 'e kadar pedala basmaya devam etmiştir. Faydalı frenleme pedala basılma esnasında devreye girerken, hidrolik frenler istenilen fren ihtiyacını karşılamak adına $t = 6.25$ anında devreye girmiştir. Hidrolik frenlerin devreye girmesiyle $t = 6.25$ anında pedala ani bir hissiyat değişimi olmuştur. Bu değişikliğin kullanıcıya etkisi pedal pozisyon grafiğinde eğim azalmasıyla gözlemlenebilmektedir. Faydalı frenin yerini hidrolik frene devretmesi $t = 8.0$ 'dan hemen sonra gerçekleşmiştir. Bu esnada fren pedalında 50 N'a varan bir sertleşme gerçekleşmiş ve pedal pozisyonu grafiğinde görüldüğü üzere kullanıcı fren pedalını sabit tutmakta zorluk yaşamıştır.

Telafi edilmiş koşulda ise kullanıcı frene $t = 5$ anında araç hızı 12 m/s ulaştığında basmış ve $t = 13.0$ 'a kadar pedala basmaya devam etmiştir. Hidrolik frenlerin devreye girmesi $t = 6.0$ anında ve faydalı frenin devreden çıkması ile yerini hidrolik frenlere devretmesi $t = 8.0$ anında gerçekleşmiştir. Pedal kuvveti grafiğinden gözlemlenebildiği şekilde telafi algoritması sayesinde fren pedalında ani bir kuvvet değişimine rastlanmamış ve pedal pozisyonunda ani değişimler oluşmamıştır. Telafi edilmiş kooperatif frenleme sistemi kullanıcıları, daha az çaba harcayarak, fren pedalı üzerindeki kontrollerini sağlayabilmişlerdir.

Anketlerden toplanan kullanıcı yanıtları ve kullanıcıların deney koşullarını hatasız bir şekilde tanımlamaları, faydalı frenleme altında fren pedal kuvvetlerinin telafi edilmesinin önemini göstermiştir. Bu sonuç, daha önce yaptığımız araştırmalarda [13] telafi edilmemiş durumda kullanıcıların öndeki araç ile aralarındaki mesafeyi güvenli seviyede tutmak için kullanıcıların istatistiksel öneme sahip miktarda daha fazla sert ve ani fren yaptıklarını gösteren çalışmalarımız ile uyumludur.

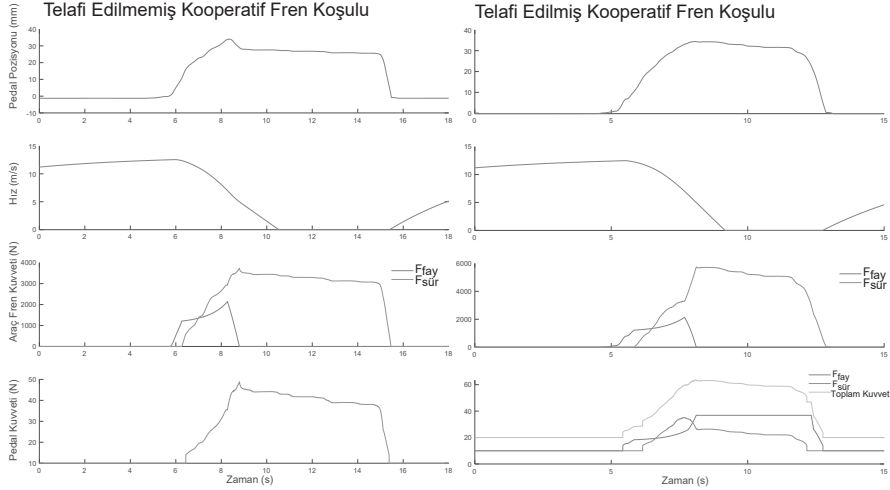
İnsanlı deneyler, fren pedal hissiyatının faydalı frenleme altında korunabilmesi için fren pedalı geliştirme sisteminin uygulanabilirliğini ve etkinliğini göstermiştir. Çalışmalarımız daha fazla gönüllü ve kapsamlı telafi algoritmaları içeren deneylerle devam etmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] F. Wang and B. Zhuo, "Regenerative braking strategy for hybrid electric vehicles based on regenerative torque optimization control," *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 222, no. 4, pp. 499–513, 2008.
- [2] C. N. Kumar and S. C. Subramanian, "Cooperative control of regenerative braking and friction braking for a hybrid electric vehicle," *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 230, no. 1, pp. 103–116, 2015.
- [3] N. Ohkubo, T. Nishoka, K. Akamine, and K. Hatano, "Development of electric servo brake system," *Article of Honda R and D Technical Review*, Tech. Rep. 1, 2013.

Tablo 1. ANKET SORULARI VE ÖZET İSTATİSTİKLER

Q1: Telafi edilmemiş durumda pedala herhangi bir bozucu etki hissettiniz mi?	4.8	0.4
Q2: Telafi edilmemiş durumda istenilen uzaklıkta ve zamanda aracı durdurabildiniz mi?	3.6	0.8
Q3: Telafi edilmiş durumda pedala herhangi bir bozucu etki hissettiniz mi?	1.8	0.74
Q4: Telafi edilmiş durumda istenilen uzaklıkta ve zamanda aracı durdurabildiniz mi?	4.4	0.48
Q5: Telafi edilmiş fren hissiyatı geleneksel araç fren hissiyatına ne kadar benziyordu?	4.0	0
Frekans		
Q6: Telafi edilmiş fren hissiyatını mı, telafi edilmemiş fren hissiyatını mı tercih edersiniz?	80%	20%



Şekil 4. Telafl edilmiş ve telafl edilmemiş kooperatif fren koşullarına ait örnek deney sonuçları

- [4] H. Vollert and J. Mayer, "Electromechanical brake booster," Patent US 8783 792, 2014.
- [5] J. Zhang, C. Lv, J. Gou, and D. Kong, "Cooperative control of regenerative braking and hydraulic braking of an electrified passenger car," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 226, no. 10, pp. 1289–1302, 2012.
- [6] J. W. Zehnder, S. S. Kanetkar, and C. A. Osterday, "Variable rate pedal feel emulator designs for a brake-by-wire system," Delphi Automotive Systems Chassis Systems, Tech. Rep. 1999-01-0481, January 1999.
- [7] Y. Randolph and D. Agnew, "Brake pedal feel simulator," Patent US 7357 465, 2008.
- [8] S. Stachowski, K. Pavlov, and R. Stevenson, "Motor driven feedback mechanism," Patent US 6684 987, 2004.
- [9] M. Iflad, S. Rothfuss, G. Diehm, and Hohmann S., "Active brake pedal feedback simulator based on electric drive," *SAE International Journal of Passenger Cars*, pp. 189–200, 2014.
- [10] W. S. P. Abeysirirwardhana and A. H. S. Abeykoon, "Simulation of brake by wire system with dynamic force control," in *IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability*, 2014.
- [11] M. Mulder, "Haptic gas pedal feedback for active car-following support," Ph.D. dissertation, Technische Universiteit Delft, 2007.
- [12] H. de Rosario, M. Louredo, I. Díaz, A. Soler, J. J. Gil, J. S. Solaz, and J. Jorret, "Efficacy and feeling of a vibrotactile frontal collision warning implemented in a haptic pedal," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 13, no. 2, pp. 80–91, 2010.
- [13] U. Caliskan, A. Apaydin, A. Otaran, and V. Patoglu, "A series elastic brake pedal to preserve conventional pedal feel under regenerative braking," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2018, pp. 1–7.
- [14] C. H. An and J. Hollerbach, "Dynamic stability issues in force control of manipulators," in *American Control Conference*, 1987, pp. 821–827.
- [15] S. Eppinger and W. Seering, "Understanding bandwidth limitations in robot force control," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, 1987, pp. 904–909.
- [16] G. Pratt and M. Williamson, "Series elastic actuators," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, 1995, pp. 399–406.
- [17] J. F. Veneman, R. Ekkelenkamp, R. Kruidhof, F. C. T. van der Helm, and H. van der Kooij, "A series elastic- and bowden-cable-based actuation system for use as torque actuator in exoskeleton-type robots," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 3, pp. 261–281, 2006.
- [18] O. Tokatli and V. Patoglu, "Optimal design of a micro series elastic actuator," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2010.
- [19] M. Sarac, M. A. Ergin, A. Erdogan, and V. Patoglu, "Assiston-mobile: a series elastic holonomic mobile platform for upper extremity rehabilitation," *Robotica*, vol. 32, pp. 1433–1459, 12 2014.
- [20] A. Erdogan, B. Celebi, A. C. Satıcı, and V. Patoglu, "AssistOn-Ankle: A reconfigurable ankle exoskeleton with series-elastic actuation," *Autonomous Robots*, pp. 1–16, 2016.
- [21] A. Otaran, O. Tokatli, and V. Patoglu, "Hands-on learning with a series elastic educational robot," in *Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications*. Springer International Publishing, 2016, pp. 3–16.
- [22] H. Munawar and V. Patoglu, "Gravity-Assist: A series elastic body weight support system with inertia compensation," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, pp. 3036–3041.
- [23] Y. M. Senturk and V. Patoglu, "MRI-VisAct: A bowden cable-driven mri compatible series viscoelastic actuator," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Sage, vol. 40, no. 8, pp. 2440–2453, 2018.
- [24] G. Pratt, P. Willisson, C. Bolton, and A. Hofman, "Late motor processing in low-impedance robots: impedance control of series-elastic actuators," *American Control Conference*, pp. 3245–3251, 2004.
- [25] G. Wyeth, "Demonstrating the safety and performance of a velocity sourced series elastic actuator," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008, pp. 3642–3647.
- [26] J. W. Sensinger and R. F. f. Weir, "Improvements to series elastic actuators," in *IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications*, 2006.
- [27] H. Vallery, R. Ekkelenkamp, H. van der Kooij, and M. Buss, "Passive and accurate torque control of series elastic actuators," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp. 3534–3538.
- [28] H. Vallery, J. Veneman, and E. v. Asseldonk, "Compliant actuation of rehabilitation robots," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 15, no. 3, pp. 60–69, 2008.
- [29] N. L. Tagliamonte and D. Accoto, "Passivity constraints for the impedance control of series elastic actuators," *J. of Systems and Control Eng.*, vol. 228, no. 3, pp. 138–153, 2014.
- [30] J. Hoffman, J. Lee, T. Brown, and D. McGehee, "Comparison of driver braking responses in a high-fidelity simulator and on a test track," *Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1803, no. 02-1062, pp. 59–65, 2014.

Gezegen Gezginleri İçin Külbütör-Boji ve Çift Salıncaklı Süspansiyon Mekanizmalarının Titreşim Analizi

Suavi Yıldırım¹, Selen Erman¹, Mehmet Emil¹, Ali Yaşar², Ozkan Bebek¹

Makina Mühendisliği Bölümü

Özyeğin Üniversitesi¹, Sabancı Üniversitesi²

İstanbul, Türkiye

Email: {suavi.yildirim, selen.erman, mehmet.emil}@ozu.edu.tr

aliyasar@sabanciuniv.edu, ozkan.bebek@ozyegin.edu.tr

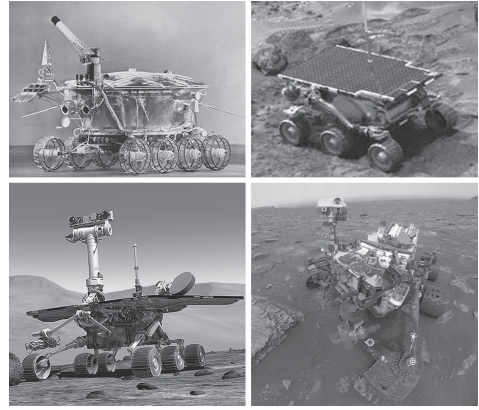
Özetçe —Bu makalede, bilimsel araştırmalar yapmak üzere gök cisimlerine gönderilen gezegen gezginlerine ait farklı süspansiyon sistemleri, Özyeğin Üniversitesi Rover Takımı tarafından geliştirilmiş olan, Külbütör-Boji ve Çift Salıncaklı Süspansiyon mekanizmalarına sahip gezgin prototipleri ve alternatif tasarımlar üzerinden MSC.ADAMS ortamında gerçekleştirilen dinamik benzetimler sonucunda analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında gezginlerin ana gövdelerinin kütle merkezlerinin yer değişimleri incelenmiş, incelenen tasarımlar arasında optimal tasarım tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Gezegen gezginleri, Kara robotları, Benzetim, Titreşim analizi

1. GİRİŞ

Akıllı sistemler uzay araştırmalarının bel kemiğini oluşturmaktadır. Araştırma yapmak üzere gök cisimlerine bilim insanı göndermenin hala büyük risklere ve maliyete mal olduğu günümüzde, insansız uzay araçları, bilim dünyası için önemli bir konumdur. İnsanoğlunun evrendeki diğer gökcisimlerine duyduğu merak ve keşfetme arzusu sonucunda akıllı sistemler gelişmiş ve özerk robotik kavramı ortaya çıkmıştır. Özerk sistemler sayesinde gezgin robotlar, ulaşılması istenen nokta için kendi manevra stratejilerini geliştirebilir, insan-makine iletişimine gerek kalmadan kısa yoldan hedefe ulaşım tasarımı amaçlarını yerine getirebilirler.

Gezegen gezginleri (Planetary Rovers) gök cisimlerinin yüzeyinde hareket ederek çeşitli veriler toplayan ve bulunduğu ortama uyum sağlayarak özerk çalışabilen uzay keşif araçlarıdır. Gezginler, Ay ve Mars yüzeyinde bilimsel araştırmalar yapmak amacıyla 1970'li yıllardan itibaren farklı görevlerde kullanılmıştır. Görevlerin birincil hedefi, gezginlerin gönderildikleri gök cismi üzerinden topladıkları toprak ve kaya örneklerini analiz ederek o gök cismi hakkında bilgiler edinmek olmuştur. Bu misyonun yanı sıra, yakın gelecekte farklı gök cisimlerine insanlı görevlerin düzenleneceğini öngören bilim insanları, gezegen gezginlerinin astronotlara yardım amaçlı da kullanılacağını düşünmektedirler [1].



Şekil 1. Lunokhod-1 (Sol üstte), Sojourner (Sağ üstte) Opportunity (Sol altta) ve Curiosity (Sağ altta)

Gezegen gezginleri tarihinde ilk başarılı görev SSCB'nin Lunokhod 1 adlı aracının Ay'ın yüzeyine ulaşması ile sağlanmıştır. Farklı bir gökcismine başarılı bir şekilde iniş yapan ve uzaktan kontrol edilebilen ilk araç olan Lunokhod 1'in amacı Ay yüzeyindeki toprak yoğunluğunu ve toprağın fiziksel özelliklerini belirlemektir [2].

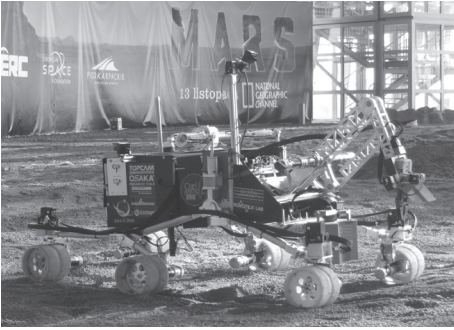
Özerk sistemlerdeki gelişmeler sayesinde bilim insanları daha uzak ufuklara yelken açmış, Sojourner gezgini, 1996 yılında, başka bir gezegene iniş yapan ilk gezegen gezgini ünvanına sahip olmuştur. Mars Pathfinder Misyonu kapsamında planlanan görev süresi 7 gün olan Sojourner gezgini, 83 gün boyunca Mars'taki keşfine devam etmiş, bu süreçte farklı bölgelerin fotoğraflarını çekip kimyevi analizler ve atmosferle ilgili ölçümler yapmıştır [3]. Sojourner ile başlayan Mars keşifleri, NASA'nın Spirit-Opportunity [4] ikiz gezginlerinin 2004 yılında; Curiosity [5] gezgininin ise 2012 yılında Mars'a iniş yapmasıyla devam etmiştir.

Gezegen gezginleri, tasarlandıkları görev itibari ile zorlu ortamlarda yüksek hareket kabiliyetine sahip olmalıdırlar.

Bir çok modern gezegen gezgini özerk sürüş sırasında zorlu arazilerden kaçınma algoritmalarına sahip olsa da, süspansiyon mekanizması gezegen gezginlerinde oldukça önemlidir. Süspansiyon sisteminin amacı gezginin her türlü arazi koşulunda hareket kabiliyetini sürdürülebilirliğini sağlamak ve bilimsel ölçüm ekipmanlarını taşıyan ana gövde kısmını mümkün olduğunca dengeli tutmaktır.

Mars ve Ay'a yollanan gezginlerin önemli görevlerinden biri, biyolojik çeşitlilik vaat eden farklı bölgelerden kaya ve toprak örnekleri toplamaktır. Gezinler farklı bilimsel örnekler toplamak için kayalık arazilere yada eğimli derin kraterlere girmek zorundadır. Bu sebeplerden ötürü süspansiyon tasarımı gezegen gezginlerinde hayati rol oynamaktadır.

Lunokhod-1 kendinden tahrikli otomatik süspansiyon sistemi kullanmasına rağmen [6], modern gezegen gezginlerinde 1989 yılında NASA tarafından icat edilen Külbütör-Boji (Rocker-Bogie) mekanizması [7] ve türevleri [8], [9] sıklıkla kullanılmaktadır. Külbütör-Boji mekanizması, külbütör ve boji isimli iki ayrı parçadan oluşan, tamamen mekanik ve enerji depolamayan elemanlardan oluşmuş, açık kinematik yapıya bir tasarımdır.

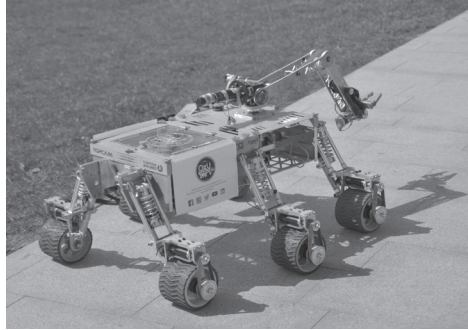


Şekil 2. Merih-II: ÖzÜ Rover Takımı'nın geliştirdiği ikinci nesil gezegen gezgini prototipinin ERC 2016 yarışma alanındaki görüntüsü.

Süspansiyon dizaynı sırasında sınırlı paket alanı, ağırlık, enerji verimliliği gibi hesaba katılması gereken bir çok değişken vardır. Külbütör-Boji mekanizması diğer süspansiyon tasarımları arasında basit yapısı ve dayanıklılığının yanı sıra, yüksek enerji verimliliği ve arazi performansı ile de öne çıkmaktadır. Farklı gezegen gezginlerinde boyut farklarına bağlı olarak, Külbütör-Boji mekanizması çeşitli diferansiyel sistemlere ve kinematik tasarımlara uyarlanmıştır.

Çeşitli üniversiteler de geliştirdikleri gezginler ve süspansiyon sistemleri ile farklı prototipler üreterek literatüre katkı sağlamaktadırlar. Bu bağlamda üniversite öğrencilerini gezgin prototipleri geliştirmeye teşvik eden, öğrencilerin gezegen gezginlerine dair bilgilerini arttırmak ve gelecek gezginlere fikirler üretmek amacıyla, ABD'de University Rover Challenge (URC), Polonya'da ise European Rover Challenge (ERC) adı altında iki büyük yarışma düzenlenmektedir. Yarışmaların genel amacı astronotlara yardımcı olabilecek çeşitli gezegen gezginleri

geliştirmek ve farklı gezgin fikirleri uygulamaktır. Özyeğin Üniversitesi Rover takımı (ÖZÜ Rover) geliştirdiği gezegen gezgini prototipleri ile bu yarışmalara katılmaktadır.



Şekil 3. Theia-II: ÖzÜ Rover Takımı'nın geliştirdiği dördüncü nesil gezegen gezgini prototipi

ÖZÜ Rover Takımı tarafından geliştirilen gezgin prototiplerinin temel farkları sahip oldukları süspansiyon mekanizmalarıdır. Merih serisi gezginler, külbütör-boji mekanizmasını aktif diferansiyel sistemi ile birleştirmek-ten, Theia serisi gezginler, bağımsız yaylı Çift Salıncaklı Süspansiyon Sistemi kullanmaktadır.

ÖZÜ Rover Takımı'nın kullandığı Külbütör-Boji ve Çift Salıncaklı Süspansiyon mekanizmalarının tasarımı bildirinin devamında sunulmuştur. Merih-II ve Theia-II modellerine ek olarak, hibrit bir süspansiyon modeli de geliştirilmiştir. Bu süspansiyon sistemleri zorlu arazi koşullarını taklit edecek şekilde MSC ADAMS/View çoklu cisim dinamiği (Eng: Multibody Dynamics) benzetim programında incelenmiş ve tasarımlar farklı parametreler aracılığıyla karşılaştırılmıştır.

Bu araştırma, Özyeğin Üniversitesi Rover Takımı'nın ürettiği farklı tip gezegen gezgini prototipleri arasından en ideal tasarımın bulunması ve benzer gezegen gezginlerine dair çıkarımlarda bulunmak için yapılmıştır. Araştırma sonucunda, gezegen gezginleri için ideal tasarım özelliklerini tespit etmek ve ve ilerleyen süreçte tasarımların çeşitli araçlar sayesinde optimize edilmesi hedeflenmiştir.

II. YÖNTEM VE CAD MODELLERİ

ÖZÜ Rover Takımı tarafından tasarlanıp üretilmiş olan Merih-II ve Theia-II gezginlerinin CAD montajlarındaki parça sayıları sırasıyla 210 ve 354'tür. Dinamik benzetimlerin gerçekleştirildiği MSC.ADAMS/View yazılımına gezginlerin tüm parçalarını aktarmaktansa araçlar basite indirgenilerek yeniden modellenmiştir. Benzetim arayüzünde modellenen Merih-II'nin (Şekil 5) 18 parçası, Theia-II'nin (Şekil 7) ise 33 parçası vardır. Bu sayede modellerin tasarım özellikleri korunurken, benzetim sonuçları daha hızlı elde edilmiştir.

Modelleme sürecinde gezginlerin kendine özgü ölçülerine bağlı kalınırken, analiz sonuçlarının kıyaslanmasında diğer etmenleri ortadan kaldırmak için ağırlık, tekerlek çapı ve kullanılan malzeme özellikleri aynı seçilmiştir.

araçlardakilere benzer dişli diferansiyel sistemi tercih edilmemiştir. 5 serbestlik dereceli, rijid ve basit yapıda olan diferansiyel sistemi, Külbütör-Boji mekanizması ile beraber gezginin süspansiyon sisteminin oluşturmaktadır. Mars gezgini Curiosity'den farklı olarak Merih-II'nin diferansiyel sistemi, aralarındaki devasa ağırlık farkından dolayı, hareketini sınırlayan doğrusal olmayan yaylar içeren, diferansiyel kısıtlama sistemine sahip değildir. Bu durum süspansiyon sisteminin hareket kabiliyetini oldukça arttırmaktır.

TABLO I: Benzetim çalışmalarında kullanılan
sistem parametreleri

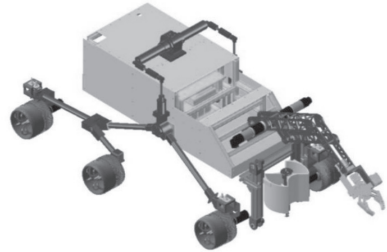
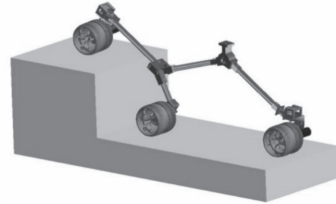
Değer	Açıklama	Birim
	Gezegen Gezzinleri	
50	gövde kütleli	<i>kg</i>
4	yay sabiti	<i>N/m</i>
2	yay sönmüleme katsayısı	<i>Ns/m</i>
0.14	tekerlek çapı	<i>m</i>
	Zemin	
10	temas sertlik sabiti	<i>N/m</i>
1	temas sönmüleme katsayısı	<i>Ns/m</i>
0.1	nüfuz derinliği	<i>mm</i>
1	statik sürtünme katsayısı	—
0.8	dinamik sürtünme katsayısı	—

A. Merih-II

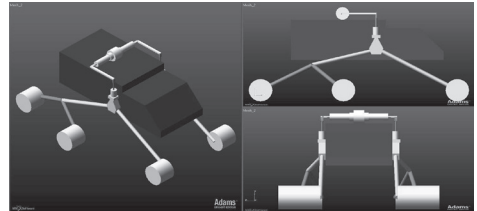
ÖZÜ Rover Takımı tarafından 2016 yılında tasarlanan Merih-II 2012 yılından bu yana Mars'taki görevine devam eden Curiosity gezgini [10] ile aynı karakteristik özellikleri taşıyan Külbütör-Boji mekanizmasına (Rocker-bogie mechanism) ve bu mekanizmanın denge sağlayıcısı görevini üstlenen bir diferansiyelle sahiptir.

1) **Külbütör-Boji Mekanizması:** Aynı anda gezginin tekerlerinden en az dördünün yere basmasını sağlayan bu mekanizma, gezginin yürüyen aksamını oluşturmaktadır. Merih-II'nin Külbütör-Boji tasarımı tekerlekler, diferansiyel çubuk ve ana gövde arasındaki bağlantı noktaları kinematik hesapları yapılarak bulunmuştur [11]. Diferansiyel çubuk ile birbirlerine bağlanmış sağ ve sol tekerler, Külbütör-Boji mekanizması yardımı ile gezginin engeli arazilerde yüzeyle bağlantısını kaybetmeden hareket etmesini sağlar [12]. Merih-II'nin tasarımı kullanılan Külbütör-Boji mekanizmasının 2 önemli avantajı vardır. Bunlardan ilki, Merih-II ilerlediği yüzeylerde engelleri aşarken sağ ve sol külbütör bojiler orantısız şekilde dönüş yaparak Merih 2'nin tekerleklerinin her zaman yüzey ile bağlantı kurmasını sağlar [13]. Külbütör-Boji tasarımının diğer önemli avantajı ise, Merih-II'nin yük dağılımını 6 tekerleğe eşit şekilde paylaştırabilmesidir [14]. Tekerlerdeki tepki kuvvetleri, Külbütör-Boji mekanizmasının kinematik olarak optimize edilmesi ile kararlaştırılabilir. Külbütörün ana gövdeye monte edileceği konumun belirlenmesi, diferansiyel çubuğun kuvvet dağılımı yapılabilmesi ve üzerine binen strese dayanabilmesi için gerekli uzunluklarda üretilmesi en önemli tasarım kısıtlarını oluşturmaktadır.

2) *Diferansiyel:* Merih-II Külbütör-Boji mekanizmasının yanında denge sağlayıcı olarak kullanılan bir çubuk diferansiyel sisteme sahiptir (Şekil 4). Otomobillerde kullanılan diferansiyel sistemler, her iki aks eş zamanlı çalışırken tekerlere devir dengesi sağlamak için geliştirilmiştir. Merih-II de diferansiyel sistemin görevi zorlu arazi koşullarında iki Külbütör-Boji mekanizmasının arasındaki moment farklarını eşitleyerek gezginin dengede kalmasını sağlamaktır [15]. Gezginin içinde yer kaplaması ve mekanik boşluklar barındırmasından dolayı



**Şekil 4. Merih-II Külbütör-Boji Mekanizması
ve Diferansiyel sistemin CAD Modeli**



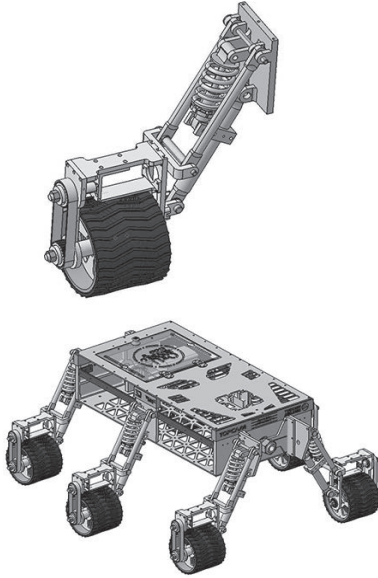
Şekil 5. Merih-II'nin benzetim için basitleştirilmiş modeli

B. Theia-II

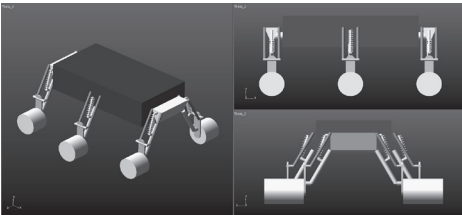
ÖzÜ Rover Takımı'nın dördüncü nesil gezgini olan Theia-II, Merih serisi gezginlere göre yenilikçi mekanik tasarımıyla kütle, yerden yükselik ve iç hacim konusunda farklılık göstermiştir. Tasarımında kullanılan Çift Salıncaklı Süspansiyon sistemiyle engebeli arazide sürüş için gerekli olan yol tutuşu ve dengeyi sağlama kabiliyeti artırılmıştır. Gezginin bacakları kısa tasarlanarak, ağırlık merkezinin yerden yüksekliği azaltılmış ve hareket kabiliyeti artırılmıştır.

1) *Çift Salıncaklı Süspansiyon Sistemi:* Theia-II’de tercih edilen Çift Salıncaklı Süspansiyon sistemi, ön ve arka tekerlek çiftlerinde ekstra birer serbestlik derecesi ile

14 serbestlik derecesine sahiptir. Külbütör-Boji mekanizmasına göre hafif yapıda olması, kolayca değiştirilebilir süspansiyon sertliği ve ekstra serbestlik dereceleri, Çift Salıncaklı Süspansiyon sisteminin tercih sebebi olmuştur. Süspansiyon sisteminin hafif olması, gezginin gövdesinin daha verimli değerlendirilmesine yardımcı olur. Külbütör-Boji mekanizmasında her tekerleğin yere uyguladığı tepki kuvveti kinematik tasarıma bağlıdır. Çift Salıncaklı Süspansiyon sistemi ise sabit sertlikli yaylar içerir, bu yaylar sayesinde gezginin her tekerleğindeki tepki kuvveti Külbütör-Boji mekanizmasına göre çok daha kolay bir şekilde değiştirilebilmektedir. Bir diğer avantajı ise, her süspansiyon bağımsız olduğundan dolayı, diferansiyel sistemi gibi bir tork dengeleyici sisteme gerek olmamasıdır. Bu da daha az hareketli parça ve daha hafif bir tasarım anlamına gelmektedir.



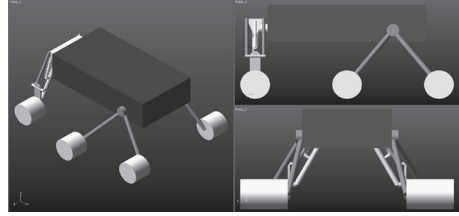
Şekil 6. Theia-II çift salıncaklı süspansiyon mekanizması ve Theia-II'nin CAD modeli



Şekil 7. Theia-II'nin benzetim için basitleştirilmiş modeli

C. Hibrit Gezgin

Hibrit gezgin modeli tasarım özelliklerini Merih-II ve Theia-II gezginlerinden almıştır. Ön aksamda V biçiminde, birbirlerinden bağımsız, boji mekanizması tercih edilirken, arka tekerlek aksamında Theia-II'nin çift salıncaklı süspansiyon mekanizması kullanılmıştır [16]. Bu modelin analiz edilmesinin sebebi ÖzÜ Rover Takımı'nın günümüze dek tasarlayıp ürettiği iki farklı gezgin mekanizmasının avantajlarından faydalanmak istenmesidir, Külbütör-Boji mekanizmasının basit ve enerji verimliliği yüksek pasif tasarımının yanında, gezginin ön tarafındaki Çift Salıncaklı Süspansiyon Sistemi ile diferansiyel kullanımı ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 8. Hibrit gezgin modeli

III. BENZETİM SONUÇLARI

Farklı tip gezegen gezginleri için yapılan titreşim analizlerinin karşılaştırılması tasarlanacak yeni gezginlerin geliştirilmesinde oldukça önemlidir. Gezginin maruz kaldığı titreşim, engebeli arazilerde sürüş kabiliyetini etkilediği gibi, elektronik aksamın fonksiyonlarının uzun süre çalışması için de önemli bir faktördür.

Bölüm II'de açıklanan üç model MSC.ADAMS/View benzetim ortamında aynı arazide koşturulmuştur. Titreşim analizi için simetrik ve asimetrik bölgelerden oluşan, 2 m genişliğinde ve 8 m uzunluğunda bir benzetim ortamı oluşturulmuş, sinüs eğrisi şeklindeki dalgaların genliği 200 mm olarak modellenmiştir (Şekil 9).

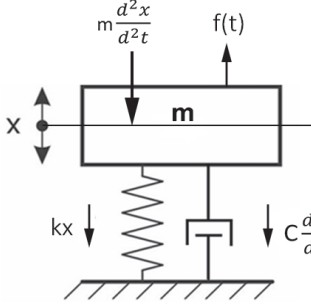


Şekil 9. Titreşim analizi için modellenen engebeli arazi

Gezginlerin tekerlerinin doğrusal hız değeri 0.1 m/s olarak belirlenmiştir. Benzetim ortamında hareketine devam eden gezgin, hareketi boyunca engebeli araziden gelen kuvvetlere maruz kalmaktadır. En basit hali ile dinamik bir sistem kütle, sertlik ve sönümlenme ile ifade edilir. Sistemdeki dinamik yer değiştirme x ile ifade edilirse, sistem üzerindeki kuvvetin zamana bağlı olarak denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Bu denklemde m gövde kütleini, k süspansiyon sertlik katsayısını, c süspansiyonun sönümleme katsayısını temsil etmektedir.

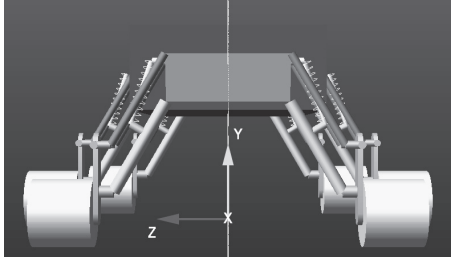
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$



Şekil 10. Bir serbestlik dereceli kütle, yay ve damper sistemi

Gezegen gezgini gibi düşük frekansa sahip sistemlerde titreşimi oluşturan baskın faktör sistemin yer değişim değerleridir. Düşük frekansa sahip sistemlerin titreşimlerinde yer değişimi, hız veya ivmeye göre daha belirleyici bir faktördür [18]. Bu nedenle yapılan titreşim analizlerinde gezginin gövdesinin y ve z eksenlerindeki yer değişim değerleri incelenmiştir.

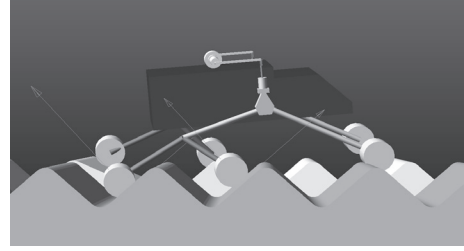
Gezginlerin modellenmesinde sağ el kuralına uygun olarak koordinat düzlemleri belirlenmiştir (Şekil 11). +x eksen gezginlerin ileri yönünü, +y eksen yukarı yönünü ve +z eksen ise gezginlerin sağ tarafını belirtmektedir.



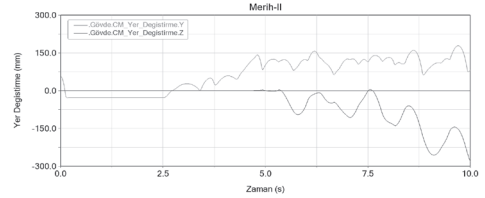
Şekil 11. Gezgin modellerinde seçilen koordinat sistemi

A. Merih-II

Herhangi bir enerji depolayan veya dağıtan elemana sahip olmayan Külbütör-Boji mekanizmalı Merih-II, ağırlık merkezi yerden 382 mm yukarıda olacak şekilde benzetim ortamında modellenmiştir (Şekil 12). Merih-II'nin gövdesinin y ve z düzlemindeki yer değiştirme zaman grafiği incelendiğinde, gezginin y ve z düzleminde ulaştığı maksimum yer değişimi değerlerinin sırasıyla (178.36, 3.84) mm, minimum yer değişimi değerlerinin ise (-27.66, -281.40) mm olduğu görülmektedir (Tablo II).



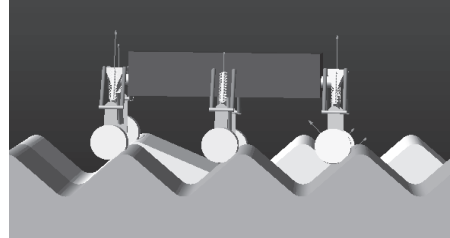
Şekil 12. Benzetim ortamında Merih-II



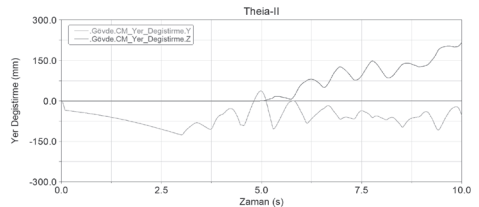
Şekil 13. Merih-II modelinin Yer Değiştirme-Zaman grafiği

B. Theia-II

Çift Salıncaklı Süspansiyon sistemine sahip Theia-II modeli ağırlık merkezi yerden 373 mm yukarıda olacak şekilde benzetim ortamında modellenmiştir. Theia-II'nin gövdesinin yer değişim zaman grafiği incelendiğinde, gezginin y ve z düzleminde ulaştığı maksimum yer değişimi değerlerinin (37.09, 216.22) mm, minimum yer değişimi değerlerinin ise (-125.73, -0.28) mm olduğu görülmektedir (Tablo II).



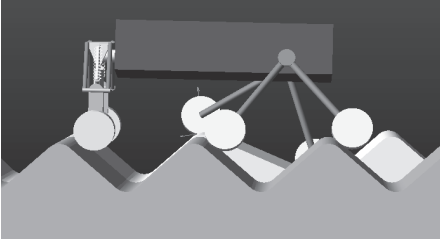
Şekil 14. Benzetim ortamında Theia-II



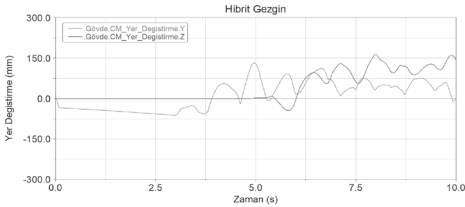
Şekil 15. Optimize edilmiş Theia-II modelinin Yer Değiştirme-Zaman grafiği

C. Hibrit Gezgin

Ön aksamında Merih-II'nin V-biçiminde Boji Mekanizması, arka aksamında Theia-II'nin Çift Salıncaklı Süspansiyon Sistemi bulunan Hibrit Gezgin ağırlık merkezi yerden 365 mm olacak şekilde modellenmiştir. Hibrit modelin gövdesinin yer değişim zaman grafiği incelendiğinde gezginin y ve z düzleminde ulaştığı maksimum yer değişimi değerlerinin (132.06, 164.13) mm, minimum yer değiştirme değerlerinin ise (-61.70, -44.04) mm olduğu görülmektedir (Tablo II).



Şekil 16. Benzetim ortamında Hibrit Gezgin



Şekil 17. Hibrit Gezgin'in Yer Değiştirme-Zaman grafiği

Genel sonuçları daha verimli karşılaştırmak amacıyla, benzetimler sonucunda Merih-II, Theia-II ve Hibrit Gezgin'den toplanan y ve z eksenlerindeki yerdeğişim verileri Tablo II'de sunulmuştur.

TABLE II: Gezgilerin benzetimler sonucunda elde edilen yer değişim değerleri

	y_{min}	y_{maks}	RMS (Kare Ortalamalarının Karekökü)
Merih-II	-27.66	178.36	92.22
Theia-II	-125.73	37.09	52.25
Hibrit Gezgin	-61.70	132.06	72.48
	z_{min}	z_{maks}	RMS (Kare Ortalamalarının Karekökü)
Merih-II	-281.40	3.84	85.35
Theia-II	-0.28	216.22	100.34
Hibrit Gezgin	-44.04	164.13	66.82

Gezgilerin y eksenlerindeki yer değiştirme değerlerinin açıklığı Merih-II için 206.02 mm, Theia-II için 162.82 mm, Hibrit Gezgin için ise 193.76 mm olarak bulunmuştur. Sonuçlar karşılaştırıldığında 6 bağımsız süspansiyona sahip, yay sabitlerinin optimize edildiği Theia-II, en az açıklığa sahip olan gezgin olarak öne çıkmaktadır. Theia-II'yi, arka aksamında çift salıncaklı süspansiyon sistemine

sahip, yay sabitlerinin Theia-II'den esinlenilerek optimize edildiği Hibrit Gezgin 193.76 mm ile takip etmektedir. Arazi modelinin kot farkının 200 mm olduğu göz önüne alındığında, yay sabitleri optimize edilmiş Theia-II ve Hibrit gezgin modellerinin, Külbütör-Boji mekanizmasına sahip olan Merih-II'ye göre daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir.

Gezgilerin z eksenlerindeki yer değiştirme değerlerinin açıklığı Merih-II için 285.24 mm, Theia-II için 216.25 mm, Hibrit Gezgin için ise 208.17 mm olarak bulunmuştur. Asimetrik arazi gezginler üzerinde farklı yanal kuvvet değerlerine sebep olduğu için gezginler z ekseninde yer değiştirme eğilimindedirler. Sonuçlara göre, tekerlere yalnızca ileri hareketi verildiğinde, Hibrit Gezgin'in doğrultusundan en az sapma gösteren gezgin olduğu gözlenmektedir.

Gezgilerin yer değişim grafiklerinin kıyaslanmasında bir diğer parametre olarak RMS (Eng: root-mean-square) yani kare ortalamalarının karekökü değerlerlendirmeye kriteri olarak seçilmiştir. RMS değerleri toplam hatayı ölçmek açısından önemlidir. Değerlere göre y eksenini yer değişimine göre en başarılı sonuç veren gezgin Theia-II olurken z eksenini yer değişimi değerlerine göre ise Hibrit modelin daha başarılı olduğu görülmektedir.

IV. TARTIŞMA

Günümüze dek Ay'a ve Mars'a gönderilmiş olan çoğu gezginde Külbütör-Boji mekanizmasının tercih edildiği görülmektedir [3]-[5]. Gezgilerde, dinamik benzetimlerde daha iyi sonuçlar veren ve koşullara göre optimize edilebilen yaylı sistemlerin tercih edilmemesi hakkında birkaç sebep öne sürülmektedir. Bu sebeplerden ilki Dünya ile Ay, Mars gibi diğer gök cisimleri arasındaki yerçekimi imesinin farklı olmasıdır. Dünya'da geliştirilen yaylı süspansiyon sistemleri, test edildiği koşullar itibarı ile farklı yerçekimi ivmelerinde beklenmedik sonuçlar vermektedirler. Yaylı sistemlerin kullanılmamasının bir diğer nedeni ise üretilen yayların belli bir zaman sonra üretildiği esnadaki yay sabitlerinin değişmesidir. Uzun süre deformasyona uğrayan yaylar işlevlerini kaybetmekte ve mekanizmanın doğru çalışmamasına neden olmaktadır. Bunlara ek olarak Külbütör-Boji mekanizması basit ve katlanabilir yapıdan dolayı uzay aracı tasarımlarında mühendislerin işini oldukça kolaylaştırmaktadır [8]. Açıklanan sebepler doğrultusunda, her ne kadar yaylı sistemlerin koşullara göre uyarlanabilen yapıları olsa da mühendislerin Külbütör-Boji mekanizmasına benzer tasarımlar geliştirmeye devam etmelerinin nedeni olarak mekanizmanın genel anlamda sağladığı kolaylıklar olduğu anlaşılmaktadır.

Bu araştırmanın devamında, çoklu cisim dinamiği benzetimlerinin gerçekleştirildiği MSC.ADAMS yazılımında çeşitli tasarım değişkenleri için optimizasyon araçlarının kullanılması planlanmaktadır. Optimizasyon araçları sayesinde elle girilen çeşitli yay sabitlerinin değerleri yazılım tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bu sayede, gezegen gezginleri için ideal tasarım katsayılarına ulaşılması hedeflenmektedir. Ek olarak, benzetimlerde Dünya'nın yer çekimi etkisine

ek olarak, Ay ve Mars'ın yer çekimi değerlerinin kullanılması planlanmaktadır. Böylece farklı ortamlarda benzetim sonuçları kıyaslanarak mekanizmaların işleyişi hakkında daha çok bilgi edinilecektir.

KAYNAKÇA

- [1] Landis, G. A. (2003, January). Robots and humans: Synergy in planetary exploration. In AIP Conference Proceedings (Vol. 654, No. 1, pp. 853-860). AIP.
- [2] Kassel, S. (1971). Lunokhod-1 Soviet lunar surface vehicle (Vol. 802, No. ARPA). RAND CORP SANTA MONICA CA.
- [3] JPL, NASA. "Mars Pathfinder/Sojourner Rover". [Çevrimiçi] Erişim: <http://www.jpl.nasa.gov/missions/mars-pathfinder-sojourner-rover/> (1 Nisan 2019)
- [4] JPL, NASA. "Mars Exploration Rover-Spirit". [Çevrimiçi] Erişim: <http://www.jpl.nasa.gov/missions/mars-exploration-rover-opportunity-mer/> (1 Nisan 2019)
- [5] JPL, NASA. "Curiosity Rover". [Çevrimiçi] Erişim: http://www.nasa.gov/mission_pages/msl/index.html (1 Nisan 2019)
- [6] Malenkov, M. (2016). Self-propelled automatic chassis of Lunokhod-1: History of creation in episodes. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 11(1), 60-86.
- [7] Harrington, B. D., & Voorhees, C. (2004). The challenges of designing the rocker-bogie suspension for the mars exploration rover.
- [8] Michaud, S., Gibbesch, A., Thüer, T., Krebs, A., Lee, C., Despont, B., ... & Slade, R. (2008). Development of the exomars chassis and locomotion subsystem. In *Proc. of The 9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (iSAIRAS)*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Autonomous Systems Lab.
- [9] Siegwart, R., Thüer, T., Lamon, P., & Krebs, A. (2006). CRAB-Exploration Rover with advanced obstacle negotiation capabilities. In *Proceedings of the 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA 2006) ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, November 28-30, 2006* (pp. 2-2). European Space Research and Technology Centre (ESTEC).
- [10] Wray, J. (2013). Gale crater: The Mars Science Laboratory/Curiosity Rover Landing Site. *International Journal of Astrobiology*, 12(1), 25-38. doi:10.1017/S1473550412000328
- [11] Yasar, Ali & Eyyapan, Can & Özgür, Batikan & Yıldırım, Alp & Bebek, Ozkan & Cicek, Emre & Sercan Aydogdu, Gurkan & Yıldırım, Mehmet & Sena Inan, Seval. (2016). Bir Mars Gezgininin Mekanik Tasarımı. *Türkiye Robotbilim Konferansı*, İstanbul.
- [12] Harrington, B. D., & Voorhees, C. (2004). The challenges of designing the rocker-bogie suspension for the mars exploration rover.
- [13] Li S., Gao H. and Deng Z., "Mobility performance evaluation of lunar rover and optimization of rocker-bogie suspension parameters," in *2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, 1-6, (2008).
- [14] Ullrich R., A. Goktogan H., and Sukkarieh S., "Design optimization of a mars rover's rocker-bogie mechanism using genetic algorithms," in *Proceedings from 10th Australian Space Science Conference*, 199-210, (2010).
- [15] Jordan, Elizabeth. "Mars science laboratory differential restraint: the devil is in the details." (2012).
- [16] Zahir, E., Rahman, M. M., Hossen, M. A., Sarker, A., Ata-E-Rabbi, H. M., Onik, Z. A., ... & Orni, S. N. (2016, December). 6 Wheeled Mars rover design for terrain traversing, equipment servicing, astronaut assistance and on-board testing. In *2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SI)* (pp. 917-922). IEEE.
- [17] F. Barlas, "Design of a Mars Rover Suspension Mechanism, Thesis Study", Izmir Institute of Technology, 2014
- [18] Norton, M. P., Karczub, D. G. (2003). *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. Cambridge university press.

Çok-Etmenli Yörünge Bulma Probleminin Lego Robotlarında Uygulanması: Bir Eğitsel Robotik Çalışması

Emre Hilmi Songur, Aysu Boğatarkan, Farukhzhon Barotov, Batuhan Yıldırım,
Gökay Çoruhlu, Esra Erdem ve Volkan Patoglu

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Email: {emresongur, aysubogatarkan, fbarotov, ybatuhan, gokaycoruhlu, esraerdem, vpatoglu}@sabanciuniv.edu

Özetçe —Çok-etmenli yörünge bulma problemi, birden fazla etmenin birbiriyle çarpışmadan varacakları yerlere ulaşabilmesini ve uzunlukları verilen kısıtları sağlayan yörüngelerin hesaplanmasını hedeflemektedir. Bu problem, hem yapay zeka hem de robotik alanlarında farklı açılardan çalışılmakta olup problemin lojistikten dijital oyunlara kadar uygulamaları bulunmaktadır. Bu motivasyonla, çok-etmenli yörünge bulma problemini, hem yapay zeka yöntemlerinin hem de robotik yöntemlerinin kullanılarak öğretildiği eğitsel bir robotik projesi olarak öneriyoruz. Bu tür bir proje, Sabancı Üniversitesi'nde son iki senedir lisans öğrencileriyle beraber uygulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler—Çözüm Kümesi Programlama, Çok-Etmenli Yörünge Bulma, Eğitsel Robotik, Yapay Zeka, Gezin Robot Kinetiği, Gezin Robot Kontrolü

I. GİRİŞ

Bir etmenin verilen bir çizge üzerinde, bir başlangıç düğümünden bir varış düğümüne ulaşabilmesi için kenarlar üstünde takip etmesi gereken en kısa yörüngenin hesaplanması polinom zamanda yapılabilir [1]. Birden fazla etmenin birbiriyle çarpışmadan varacakları yerlere ulaşabilmesi için takip etmeleri gereken ve uzunlukları verilen bir değerden daha kısa olan yörüngelerin hesaplanması ise ne yazık ki NP-zordur [2]. Bu problem literatürde çok-etmenli yörünge bulma problemi (Multi-Agent Path Finding – MAPF) olarak tanımlanmaktadır. MAPF problemi genelde iki yaklaşımla çalışılmaktadır:

- A* gibi buluşsal (heuristic) arama yöntemleri kullanılarak [3]–[9]; veya
- tamsayı doğrusal programlama (integer linear programming – ILP), çözüm kümesi programlama (answer set programming – ASP) veya önmeler mantığında tutarlılık (propositional satisfiability – SAT) gibi bildirimsel (declarative) veya matematiksel problem çözme yöntemleri kullanılarak [10]–[12].

Bu bildiride, yukarıdaki çalışmalardan farklı olarak, MAPF problemini eğitsel bir robotik projesi olarak öneriyoruz.

Çok-etmenli yörünge bulma problemi, eğitsel robotik açısından çeşitli nedenlerle ilginçtir. Hesaplama karmaşıklığı açısından ilginçtir: tek bir etmen için en kısa yörüngenin hesaplanması polinom zamanda hesaplanabilirken, çoklu etmen için bu

problem NP-zordur. Yapay zeka ile ilişkisi açısından ilginçtir: bu problem, yapay zekada arama, planlama, programlama, bilgi gösterimi ve akıl yürütme açılarından çalışıldığından, robotikle ilgilenen kişilerin farklı yapay zeka yöntemlerini öğrenebilmeleri için ve robotikle entegrasyonun araştırılması açılarından ortak bir platform oluşturmaktadır. Ayrıca, problemin lojistik sektöründe gezin robotlardan, dijital oyunlardaki karakterlerin hareketlerinin belirlenmesine kadar geniş uygulamaları vardır [13], [14].

Bu motivasyonlarla, MAPF problemini, şu aşamaları içeren bir eğitsel bir robotik proje kapsamında çalışmayı öneriyoruz: problemin hesaplama problemi olarak tanımı, problemin yapay zeka yöntemleri kullanılarak modellenmesi ve çözülmesi ve bulunan yörüngelerin gezin robotlarla icra edilmesi.

Bu tür bir eğitsel robotik projesi, Sabancı Üniversitesi'nde PURE (Program for Undergraduate Research)¹ programı kapsamında, iki senedir toplamda yirmiden fazla lisans öğrencisinin oluşturduğu 2-3 kişilik küçük gruplarda uygulanmaktadır. PURE programının amacı, lisans öğrencilerini olabildiğince erkenden araştırma projelerine dahil ederek, projelerdeki çalışmalarının sürekliliğini sağlamaktır. Öğretim üyeleri tarafından gönüllü olarak açılan bu projelerde, öğrenciler de gönüllü olarak yer almaktadır: PURE projeleri krediyle alınan dersler değildir.

Önerilen eğitsel robotik projesinin Sabancı Üniversitesi'ndeki uygulamalarında yer alan öğrenciler, özellikle birinci veya ikinci sınıftaki lisans öğrencileridir. Her grupta, hem mekatronik mühendisliği hem de bilgisayar bilimi ve mühendisliği programlarından öğrenciler bulunmaktadır. Bu bildiride, bu eğitsel robotik projesinin uygulamalarından biri anlatılmaktadır.

Bildiride anlatılan uygulamada, problem çizge teori kullanılarak modellenmektedir. Kullanılan yapay zeka yöntemleri, çözüm kümesi programlama (Erdem ve ark.'nın önerdiği şekilde) ve otomatik akıl yürütmedir (Clingo ASP çözücüsü kullanılarak). Hesaplanan yörüngelerin ırası için çok yönlü LEGO NXT ve EV3 robotları kullanılmaktadır. Robotun beklenen yörüngeyi takibinin kontrolü için robotun kinematik modeli, model tabanlı konum geri-beslemeli kontrol (PID denetçi) ve görüntü işleme algoritmaları kullanılmaktadır.

¹<https://pure.sabanciuniv.edu/>

II. ÇÖZÜM KÜMESİ PROGRAMLAMA

Bilgi gösterimi ve akıl yürütme; etmenlerin otomatik akıl yürütürerek çıkarsama ve muhakeme yapabilmelerine olanak sağlayacak şekilde bilginin matematiksel olarak gösterimi ve hesaplama yöntemleri üzerinde çalışan bir yapay zeka alt alanıdır [15]. ASP bir bilgi gösterimi ve akıl yürütme paradigmasıdır [16]–[20]: bilginin monoton olmayan mantıksal dillerde gösterimine ve bu bilgi üzerinde otomatik akıl yürütülerek yeni bilginin çıkarsanmasına olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda ASP, MAPF gibi zor hesaplama problemlerini mantıksal olarak modelleyerek çözüm üretebilen bir bildirimsel problem çözme paradigmasıdır.

ASP'nin bilgi gösterimi, akıl yürütme ve bildirimsel problem çözme destekleyen yöntemleri, çeşitli çözümleri de beraberinde getirmiştir. Clingo [21] bu ASP çözümlerinden birisidir.

ASP, hem modelleme hem de hesaplama açılarından avantajları sayesinde, biyoenformatikten robotiğe kadar birçok alanda kullanılmaktadır [22].

III. ÇOK ETMENLİ YÖRÜNGE BULMA PROBLEMİ

Çok-etmenli yörünge bulma problemi (MAPF), bir etmenin verilen bir çizge üstünde, bir başlangıç düğümünden bir varış düğümüne ulaşabilmesi için kenarlar üstünde takip etmesi gereken yörüngenin hesaplanması işleminin birden fazla etmene genişletilmiş halidir. Kısıtlar, etmenlerin birbirine ve yoldaki engellere çarpmaması ve yörüngelerin verilen bir maksimum uzunluktan daha kısa olmasıdır.

MAPF probleminin çizge teori kullanılarak geliştirilen bir tanımı Erdem ve ark.'nın bildirisinde [12] şu şekilde sunulmuştur.

MAPF probleminin girdileri:

- etmenlerin gezdiği alanı gösteren bir çizge $G = (V, E)$,
- etmen sayısını gösteren bir pozitif tam sayı k ,
- her etmeni $i \leq k$, başlangıç ve varış noktalarını gösteren bir düğüm ikilisine (v_i, u_i) eşleştiren bir fonksiyon h ,
- engelleri gösteren bir düğüm kümesi $O \subseteq V$ ve
- her pozitif tam sayıyı $i \leq k$ bir tam sayıya l_i eşleştiren bir fonksiyon g : her etmenin (i) yörüngesi için verilen maksimum adım sayısını (l_i) göstermektedir,

MAPF probleminin çıktıları:

Başlangıç ve varış noktaları $h(i) = (v_i, u_i)$ olarak ve maksimum adım sayısı $g(i) = l_i$ olarak verilen her etmen $i \leq k$ için;

- aşağıdaki koşulları sağlayan bir yörünge $P_i = \langle w_{i,1}, \dots, w_{i,n_i} \rangle$ olmalı:
 - yörüngenin uzunluğu n_i verilen maksimum adım sayısına l_i küçük eşit olmalı ($n_i \leq l_i$),
 - yörüngenin başlangıç ve varış noktaları etmenin başlangıç ve varış noktaları olmalı ($w_{i,1} = v_i$ to $w_{i,n_i} = u_i$) ve
 - yörünge engellerden geçmemeli ($w_{i,j} \in V \setminus O$),

- P_i yörüngesinin diğer etmenlerle çarpışmayacak şekilde takip edilebilirliği için, l_i 'a eşit veya küçük her negatif olmayan tam sayıyı P_i 'daki bir düğüme eşleştiren ve aşağıdaki koşulları sağlayan bir fonksiyonun f_i olması:

- P_i 'daki her iki düğüm $w_{i,j}$, $w_{i,j'}$ ve her negatif olmayan tamsayı $t < l_i$ için, eğer $f_i(t) = w_{i,j}$ ve $f_i(t+1) = w_{i,j'}$ ise, $w_{i,j'} = w_{i,j}$ veya $w_{i,j'} = w_{i,j+1}$ olmalı; ve
- iki farklı yörünge P_i ve P_j ve pozitif tam sayılar $t_i \leq l_i$, $t_j \leq l_j$ için, eğer $f_i(t_i) = f_j(t_j)$ ise, $t_i \neq t_j$ olmalı.

21	22	23	24	25
16	17	■	19	20
11	12	13	■	15
■	7	8	■	10
1	2	■	4	5

Şekil 1. Çoklu etmenlerin gezindiği örnek bir ızgara

Şekil 1'de, birden fazla robotun gezindiği bir alan, bir ızgara olarak gösterilmektedir. Üzerinde rakam olmayan ve siyahla gösterilen hücreler engelleri temsil etmektedir. Robotlar, üzerinde bir rakam bulunan hücrelerde bulunabilirler ve dikey/yatay olarak yine üzerinde bir rakam olan komşu hücrelere hareket edebilirler. Örneğin, 1 numaralı hücrede olan bir robot sadece 2 numaralı hücreye hareket edebilir, diğer hücrelere hareket edemez. Üzerinde rakam olan her bir hücrede, en fazla bir robot olabilir. Birbirine komşu ilk robot aynı anda yer değiştiremez. Böyle bir alanda iki robot düşünelim: robot1'in 1 numaralı hücreden 25 numaralı hücreye, robot2'nin ise 25 numaralı hücreden 1 numaralı hücreye gitmek istemediğini varsayalım.

Bu problemde, her bir hücre bir düğüm, her iki dikey/yatay komşu hücre ise yönsüz bir kenar olarak görüldüğünde, robotların gezindiği alan bir çizgeye denk gelmektedir. MAPF olarak modellendiğinde, her bir robot için başlangıç düğümlerinden hedef düğümlerine ulaşmasını sağlayacak bir yörünge hesaplanması istenmektedir.

Bu şekilde modellenen MAPF probleminin, ASP kullanarak hesapladığımız bir çözümünü Şekil 2'de görebilirsiniz.

IV. MAPF'İN ASP İLE ÇÖZÜMÜ

Bir MAPF problemi, kullanılan çizge (düğümler ve kenarlar), her etmenin başlangıç ve varış düğümleri, ortamdaki engeller ve işlemin tamamlanması beklenen maksimum zaman aralığı ile tanımlanmaktadır. Bir önceki kısımda verilen örnekteki bu unsurlar, ASP'de şöyle tanımlanabilir:

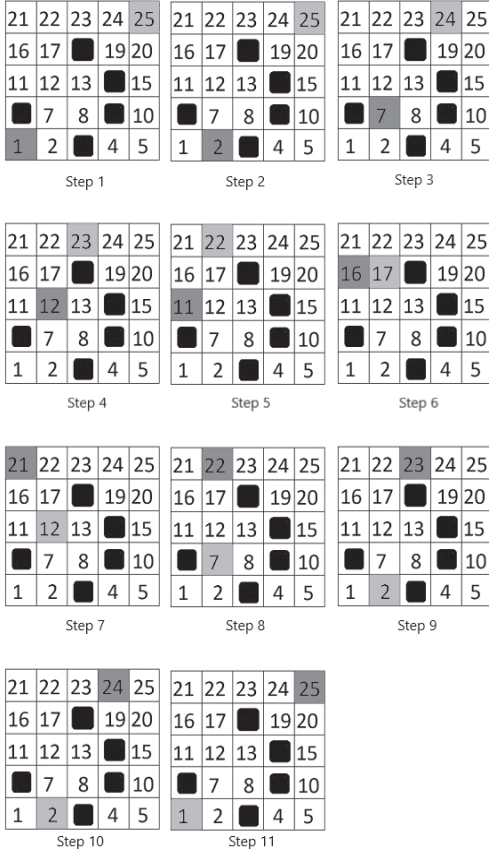
% Yörüngeler en fazla 11 adım olabilir.

time(0..10).

% Düğümler 1'den 25'e kadar isimlendirilir.

vertex(1..25).

% Yatay kenarlar: En sağda bulunan düğümler



Şekil 2. Robot A (kırmızı) ve Robot B'nin (yeşil) Şekil 1'de gösterilen alanda, başlangıç noktalarından hedeflerine ulaşmak için takip ettikleri yörüngeler

hariç, her düğümden kendisinden bir büyük numaralı düğüme doğru bir kenar tanımlanır.

```
edge(X,X+1) :- vertex(X), X!=5, X!=10,
                X!=15, X!=20, X!=25.
```

% Dikey kenarlar: En üstte bulunan düğümler hariç, her düğümden kendisinden bir büyük numaralı düğüme doğru bir kenar tanımlanır.

```
edge(X,X+5) :- vertex(X), X!=21, X!=22,
                X!=23, X!=24, X!=25.
```

% Kenarların yönleri yoktur.

```
edge(X,Y) :- edge(Y,X).
```

% Engellerin olduğu düğümler tanımlanır.

```
obstacle(3;6;9;14;18).
```

% Etmenler tanımlanır.

```
agent(robot1;robot2).
```

% Her etmen için başlangıç ve varış düğümleri tanımlanır.

```
start(robot1,1). start(robot2,25).
```

```
goal(robot1,25). goal(robot2,1).
```

Bir hesaplama probleminin ASP'de genel olarak modellenmesi üç ana kısımdan oluşmaktadır: olası çözüm adaylarının üretildiği kısım (generate), bu adayların sınanarak çözümlerin elde edildiği kısım (test) ve bu iki kısımda gereken ek tanımların modellendiği kısım (define).

MAPF için, olası bütün çözüm adayları, her bir etmen için başlangıç noktalarından başlayan yörüngelerdir.

% Her etmenin başlangıç düğümü yörüngesinin ilk düğümüdür.

```
path(A,0,X) :- start(A,X), agent(A).
```

% A etmeni için T-1 adımında X düğümüne ulaşacak şekilde bir yörünge bulunuyorsa ve X ve Y arasında bir kenar varsa, A etmeni T adımında Y'ye ilerleyebilir veya X'te kalabilir; bu iki alternatiften yalnızca biri seçilir.

```
1{path(A,T,X) ; path(A,T,Y):edge(X,Y)}1 :-
    path(A,T-1,X), time(T).
```

MAPF ile ilgili kısıtlardan bazılarını modelleyebilmek için, aşağıdaki tanıma gerek duyulmaktadır.

% Etmenlerin ziyaret ettiği düğümler tanımlanır.

```
visit(A,X) :- path(A,T,X), agent(A), time(T).
```

Üretilen çözüm adaylarından, MAPF kısıtlarına uygun olmayanlar, sınama kısmında elenir.

% Herhangi bir etmenin yörüngesinde engel bulunamaz.

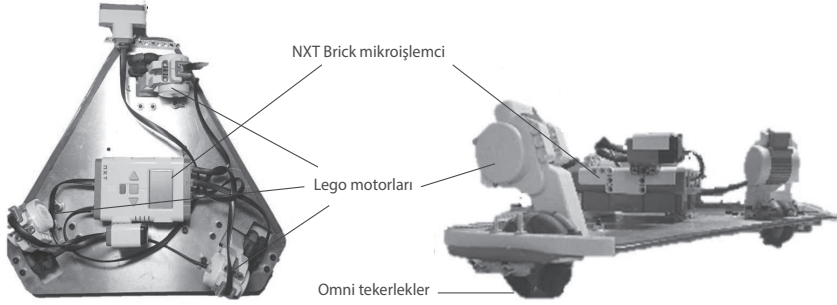
```
:- path(A,T,X), obstacle(X), agent(A),
    time(T).
```

% Herhangi bir etmenin varış düğümü yörüngesinde olmak zorundadır.

```
:- goal(A,X), not visit(A,X), agent(A).
```

% Herhangi iki etmen, aynı zamanda aynı düğümden bulunamazlar.

```
:- path(A1,T,X), path(A2,T,X),
    agent(A1;A2), A1<A2.
```



Şekil 3. MAPF çözümlerinin icrasında kullanılan bir robot düzeneği

% Herhangi iki etmen, tek adımda birbirleriyle yer değiştiremezler.

```
:- path(A1,T,X), path(A1,T+1,Y),
   path(A2,T,Y), path(A2,T+1,X),
   agent(A1;A2), A1<A2, time(T),
   edge(X,Y).
```

Yukarıda verilen spesifik örneğin tanımı ve MAPF problemi çözümü için verilen genel ASP formülasyonu birleştirilip, Clingo'ya verildiğinde², hesaplanan çözümlerden biri şöyledir:

```
path(robot1,0,1) path(robot2,0,25)
path(robot2,1,25) path(robot1,1,2)
path(robot2,2,24) path(robot1,2,7)
path(robot2,3,23) path(robot1,3,12)
path(robot2,4,22) path(robot1,4,11)
path(robot2,5,17) path(robot1,5,16)
path(robot2,6,12) path(robot1,6,21)
path(robot2,7,7) path(robot1,7,22)
path(robot2,8,2) path(robot1,8,23)
path(robot2,9,2) path(robot1,9,24)
path(robot2,10,1) path(robot1,10,25)
```

Bu çözüme göre, robot1 sırasıyla 1-2-7-12-11-16-21-22-23-24-25 numaralı hücreleri takip ederek, robot2 ise sırasıyla 25-25-24-23-22-17-12-7-2-2-1 numaralı hücreleri takip ederek varış noktalarına ulaşabilmektedir. Bu çözüm Şekil 2'de görülebilir.

V. GEZGİN LEGO ROBOT SİSTEMİ

Hesaplanan yörüngelerin icra edilmesinde, Lego NXT veya EV3 sistemleri kullanılarak, Şekil 3'te görüldüğü gibi robot düzenekleri hazırlanmıştır. Bu düzenekler için, üçgen şeklinde lazer kesim metal levhalar kullanılmıştır.

Gezgin robotlarda kinematik kısıtlar olmadan anlık çok yönlü hareketin sağlanabilmesi için, çok yönlü (omni-directional) tekerlekler tercih edilmiştir. Kullanılan çok yönlü tekerlekler birbirine dik iki eksenle hareket etme özelliğindedir; tekerlekler bir doğrultuda serbest hareket edebilirken, diğer doğrultuda motor tahriki altında hareket gerçekleştirirler. Üç tekerleğin birbiriyle 120° açı yapacak şekilde yerleştirilmesindeki

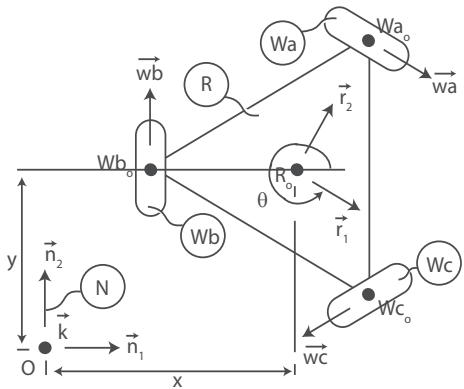
amaç, düzlemde üç serbetlik derecesine sahip robota simetrik bir kinematik yapı sağlamak ve manevra esnekliği elde etmektir.

Her bir tekerlek, üzerindeki enkoder ile birim zamanda tur sayısını okunuyabilen ve -100 ile 100 arası güç değerlerinde çalışabilen, bir Lego motoruyla tahriklenmektedir. Robot gövdesinin dönüş hareketlerinin etkin takibi için gezgin robotlara opsiyonel olarak jiroskop sensörü eklenebilmektedir.

VI. GEZGİN ROBOTUN KİNEMATİK MODELİ

Robotun merkezinin istenilen bir doğrultuda hareket etmesini sağlamak amacıyla her bir tekerleğin ne kadar döndürülmesinin gerektiğini hesaplayabilmek için sistemin kinematik modeli türetilmelidir.

Şekil 4'te yere sabit eksen takımını N olarak adlandıralım ve O noktasını bu eksen takımına sabitleyelim. Benzer şekilde robot cismini R olarak adlandırıp üzerinde bir eksen takımı ve robota sabit bir nokta, R_o , seçelim. R_o 'ın O 'ya göre konumunu x ve y değişkenleri, R eksen takımının N 'ye göre dönüşünü ise θ değişkeni ile ifade edelim. Benzer şekilde, R ile N eksen takımları arasındaki düzlemsel dönüşü ${}^N R^R$ matrisi ile tanımlayalım. Bu gösterimde, robotun üzerindeki R_o noktasının doğrusal hızı ${}^N \vec{v}^{R_o} = \dot{x} \vec{n}_1 + \dot{y} \vec{n}_2$ ve R robot eksen takımının N 'e göre açısal hızı ${}^N \vec{\omega}^R = \dot{\theta} \vec{k}$ olarak tanımlanabilir.



Şekil 4. Gezgin robotun kinematik modeli

²Clingo: <https://potassco.org/clingo/run/>

Robotun tekerleklerini W_a , W_b ve W_c olarak adlandırıp, tekerleklerin aksları üzerinde sırasıyla W_{a_o} , W_{b_o} ve W_{c_o} noktalarını seçelim. Motorlar ile tahriklenen ve yarı çapları r olan tekerleklerin açısız hızlarını $\dot{\phi}_a$, $\dot{\phi}_b$ ve $\dot{\phi}_c$ olarak tanımlayıp, tekerleklerin pozitif tahriklenme altındaki hareket yönlerini $\vec{w}_a$, $\vec{w}_b$ ve $\vec{w}_c$ olarak gösterelim. Tekelerlerde tahrik yönünde kayma olmadığı şartlarda, her bir tekerlek aksındaki hız ile, tekerlek akslarına l uzaklığında olan R_o noktasındaki hız arasında aşağıdaki ilişkiler sağlanmalıdır:

$$\begin{aligned} \left({}^N\vec{v}^{R_o} + {}^N\vec{\omega}^R \times \vec{r}^{R_o W_{a_o}} \right) \cdot \vec{w}_a &= r \dot{\phi}_a \\ \left({}^N\vec{v}^{R_o} + {}^N\vec{\omega}^R \times \vec{r}^{R_o W_{b_o}} \right) \cdot \vec{w}_b &= r \dot{\phi}_b \\ \left({}^N\vec{v}^{R_o} + {}^N\vec{\omega}^R \times \vec{r}^{R_o W_{c_o}} \right) \cdot \vec{w}_c &= r \dot{\phi}_c \end{aligned}$$

Bu denklemlerde $\vec{r}^{R_o W_{i_o}}$ ($i = A, B, C$), robotun üzerindeki R_o noktası ile tekerlek aksları arasındaki konum vektörleri tanımlamaktadır. Bu denklemler sayesinde tekerleklerin açısız hızları ile robotun doğrusal hızları ve açısız hızı arasındaki doğrusal ilişkiyi tanımlayan kinematik Jakobian matrisi aşağıdaki şekilde türetilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = {}^N R^R r \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l \\ -\cos(\pi/3) & \sin(\pi/3) & -l \\ -\cos(\pi/3) & -\sin(\pi/3) & -l \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_a \\ \dot{\phi}_b \\ \dot{\phi}_c \end{bmatrix}$$

Robota ait kinematik Jakobian matrisi tekiliksizdir ve hem ileri hem de ters kinematik hesaplarında kullanılabilir.

VII. YÖRÜNGE TAKİBİ

Her bir robotun yörünge takibi için kullanılan kontrol blok diyagramı Şekil 5'te sunulmuştur. Şekilde, öncelikle gezgin robotun konumunun ve yöneliminin model tabanlı tahmini için, tekerlek açılarının numerik türevi hesaplanıp, Jakobian matrisi aracılığıyla robota ait hızlar hesaplanır. Robotun başlangıç konumunun bilindiği varsayılarak, robota ait hızların uygun başlangıç değerlerinden itibaren integrali alınarak robotun konumu ve yönelimi tahmin edilebilir.

Sensörlerden kaynaklanan gürültü, numerik hesaplamalar-daki yuvarlama hataları ve tekerleklerle zemin arasındaki

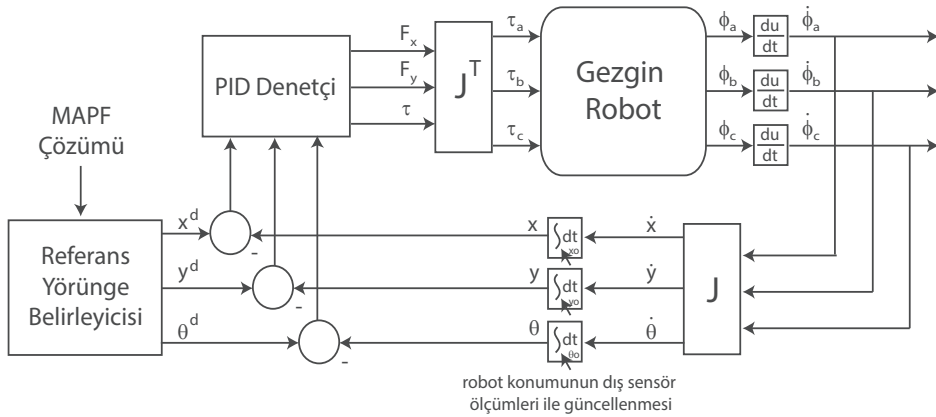
ölünemez kaymalar nedeniyle kinematik model tabanlı tahmin, başlangıç konumu kesin olarak bilinse dahi, ancak kısa süreli olarak geçerliliğini koruyabilmektedir. Kinematik model tabanlı tahminin uzun süre kullanılması durumunda, integral nedeniyle küçük hatalar zamana bağlı olarak hızlı bir şekilde artmakta ve robotun konumu ve yönelimi etkin şekilde belirlenememektedir.

Robot konumunun yüksek doğruluk ile takip edilebilmesi için, robotların üzerine özel etiketler yerleştirilmiş, tavanda konumlandırılmış bir kamera ve OpenCV görüntü işleme kütüphanesi kullanılarak robotların konumu ve yönelimi düzenli aralıklarla ölçülmüştür. Görüntü işleme tabanlı konum tespiti, hesaplama süresi nedeniyle, düşük örnekleme zamanlarında gerçekleştirilebilmektedir. Ancak bu yöntemde global bir sensör kullanılması nedeniyle her zaman belirli bir doğrulukta konum ve yönelim ölçümü yapılabilmektedir. Kinematik model tabanlı tahmin algoritması ise yüksek örnekleme zamanında çalışabilmekte ve kısa süreli tahminleri yüksek doğruluk ile hesaplayabilmektedir. Bu nedenle, sistemde kinematik model tabanlı tahmin algoritması kullanılmakta, ancak bu algoritmadaki konum değerleri görüntü işleme tabanlı konumlama algoritmasından yeni veri geldikçe, bu global sensörün ölçümleri ile, düzenli aralıklarda güncellenmektedir.

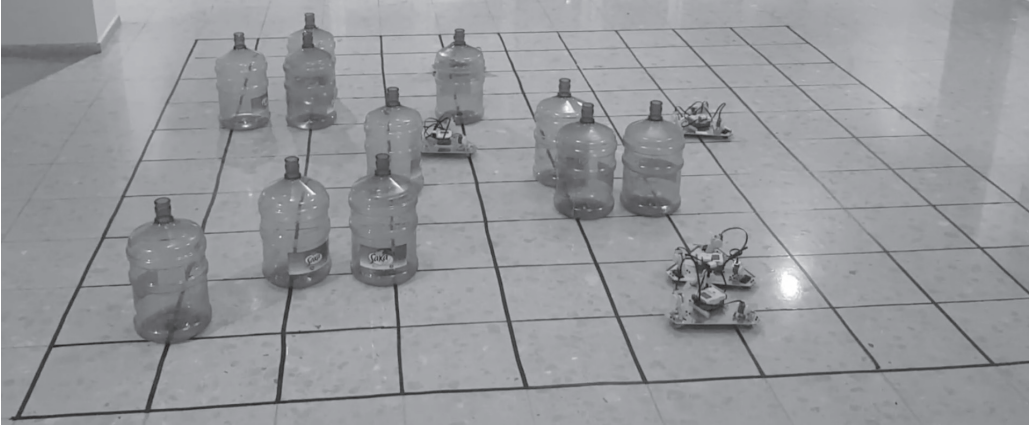
Robotun konumunun ve hızının belirlenmesi sonrasında bu değerler, MAPF çözümüne uygun olarak üretilen referans yörüngeler ile karşılaştırılmakta ve hatalar bir PID denetçisi vasıtasıyla 100Hz örnekleme zamanında kapalı döngü kontrol ile giderilmektedir. Şekil 5'te sunulan kontrolcü Matlab/Simulink ortamında programlanmış ve her bir robotun Lego Brick modülündeki mikro-işlemcide gömülü kod olarak uygulanmıştır.

Robotlar arasındaki senkronizasyonun sağlanması için, her robot MAPF çözümünden gönderilmiş olan her bir adımdaki yörünge takip görevini tamamladığında ana bilgisayara bir teyit sinyali yollamakta, ana bilgisayar da her bir adım için tüm robotlardan teyit aldıktan sonra, bir sonraki adıma ait yörüngeyi takip etme komutunu robotlara göndermektedir.

Şekil 6'da çok-etmenli yörünge bulma probleminin 10x10 bir ızgara üzerinden 4 Lego robotla uygulanmasına dair bir görsele yer verilmiştir.



Şekil 5. Gezgin robotun yörünge takip denetçisi



Şekil 6. Çok-etmenli yörünge bulma probleminin 10x10 bir ızgara üzerinden 4 robotla uygulanması

VIII. SONUÇ

Bu bildiride, çok-etmenli yörünge bulma probleminin eğitsel robotik için kullanılması önerilip, lisans öğrencilerini araştırma projelerine erkenden dahil etmek amacıyla Sabancı Üniversitesi'nde başlatılan PURE programı kapsamındaki uygulamalarından birisi örnek olarak sunulmuştur. Bu örnekte, problemin matematiksel olarak tanımlanmasından, yapay zeka yöntemlerinin robotikte uygulamasına kadar öğrenciler tarafından yapılan çalışmalar adım adım anlatılmıştır. Örnek uygulamada, yapay zeka yöntemi olarak çözüm kümesi programlama kullanılmıştır. Hesaplanan yörüngelerin icraları, Lego NXT ve EV3 robotlarından tasarlanan gezgin robot düzenekleri üzerinde uygulanmıştır.

Bu eğitsel proje kapsamında, öğrenciler hem teorik hem de pratik açılarından eğitilmektedir. Bir taraftan çizge kuramı kullanılarak problem tanımı yapılırken ve problemin hesaplama karmaşıklığı açısından zor olduğu tartışılırken, diğer taraftan yapay zeka yöntemleri öğretilip, bu yöntemlerin kolaylıkla kullanılmasına olanak sağlayan yazılım sistemleri kullanılmaktadır. Benzer şekilde, bir taraftan projede kullanılacak robotların tasarımı, kinematik modellemesi ve kontrolü yapılırken, diğer taraftan yapay zeka ile hesaplanan planların icrası için ilgili yazılım sistemleri kullanılmaktadır. Hem projenin, hem de proje takımlarının disiplinlerarası olması, öğrencilerin takım halinde çalışıp birbirlerinin eksiklerini tamamlayarak ve öğretmek tecrübe edinmelerine de olanak sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numer. Math.*, vol. 1, no. 1, pp. 269–271, 1959.
- [2] D. Ratner and M. K. Warmuth, "Finding a shortest solution for the $n \times n$ extension of the 15-puzzle is intractable," in *Proc. of AAAI*, 1986, pp. 168–172.
- [3] D. Silver, "Cooperative pathfinding," in *Proc. of AIED*, 2005, pp. 117–122.
- [4] R. Luna and K. E. Bekris, "Efficient and complete centralized multi-robot path planning," in *Proc. of IROS*, 2011, pp. 3268–3275.
- [5] S. S. Chouhan and R. Niyogi, "DiMPP: a complete distributed algorithm for multi-agent path planning," *J. Exp. Theor. Artif. Intell.*, vol. 29, no. 6, pp. 1129–1148, 2017.
- [6] K. M. Dresner and P. Stone, "A multiagent approach to autonomous intersection management," *J. Artif. Intell. Res. (JAIR)*, vol. 31, pp. 591–695, 2008.
- [7] K.-H. C. Wang and A. Botea, "Fast and memory-efficient multi-agent pathfinding," in *Proc. of ICAPS*, 2008, pp. 380–387.
- [8] R. Jansen and N. Sturtevant, "A new approach to cooperative pathfinding," in *Proc. of AAMAS*, 2008, pp. 1401–1404.
- [9] G. Sharon, R. Stern, A. Felner, and N. R. Sturtevant, "Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding," *Artif. Intell.*, vol. 219, pp. 40–66, 2015.
- [10] J. Yu and S. M. LaValle, "Planning optimal paths for multiple robots on graphs," in *Proc. of ICRA*, 2013, pp. 3612–3617.
- [11] P. Surynek, "On propositional encodings of cooperative path-finding," in *Proc. of ICTAI*, 2012, pp. 524–531.
- [12] E. Erdem, D. G. Kisa, U. Oztok, and P. Schueller, "A general formal framework for pathfinding problems with multiple agents," in *Proc. of AAAI*, 2013.
- [13] P. R. Wurman, R. D'Andrea, and M. Mountz, "Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses," *AI Magazine*, vol. 29, no. 1, pp. 9–20, 2008.
- [14] T. S. Standley and R. E. Korf, "Complete algorithms for cooperative pathfinding problems," in *Proc. of IJCAI*, 2011, pp. 668–673.
- [15] F. van Harmelen, V. Lifschitz, and B. W. Porter, Eds., *Handbook of Knowledge Representation*, ser. Foundations of Artificial Intelligence. Elsevier, 2008, vol. 3.
- [16] V. Marek and M. Truszczyński, "Stable models and an alternative logic programming paradigm," in *The Logic Programming Paradigm: a 25-Year Perspective*. Springer Verlag, 1999, pp. 375–398.
- [17] I. Niemelä, "Logic programs with stable model semantics as a constraint programming paradigm," *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, vol. 25, pp. 241–273, 1999.
- [18] V. Lifschitz, "Answer set programming and plan generation," *Artificial Intelligence*, vol. 138, pp. 39–54, 2002.
- [19] G. Brewka, T. Eiter, and M. Truszczyński, "Answer set programming at a glance," *ACM Communications*, vol. 54, no. 12, pp. 92–103, 2011.
- [20] —, "Answer set programming: An introduction to the special issue," *AI Magazine*, vol. 37, no. 3, pp. 5–6, 2016.
- [21] M. Gebser, B. Kaufmann, R. Kaminski, M. Ostrowski, T. Schaub, and M. T. Schneider, "Potassco: The Potsdam Answer Set Solving Collection," *AI Communications*, vol. 24, no. 2, pp. 107–124, 2011.
- [22] E. Erdem, M. Gelfond, and N. Leone, "Applications of answer set programming," *AI Magazine*, vol. 37, no. 3, pp. 53–68, 2016.

Açık Kaynak Sürü İHA Benzetim Ortamı

Okan Aşık, Gökçe Uludoğan, H. Kübra Eryılmaz

Bilgisayar Mühendisliği

Boğaziçi Üniversitesi

İstanbul, Türkiye

Email: okan.asik,gokce.uludogan,haticce.eryilmaz@boun.edu.tr

Özetçe —İnsansız hava araçları (İHA) düşen maliyetleri sayesinde bir çok alanda kullanılabilmektedir. En önemli uygulama alanlarından birisi de sürü sistemleridir. Sürü sistemlerindeki en büyük güçlüklerden birisi sistem testleridir. Bu testler sürü İHA sistemleri için daha da zor olmaktadır. Bu sebeple sürü İHA sistemlerinin testleri genellikle benzetim ortamında yapılmaktadır. Bu benzetim ortamları genellikle belirli bir araştırma alanı ve araştırma grubu için tasarlanmaktadır. Bu çalışmada genel amaçlı benzetim ortamı olan Gazebo'yu kullanarak açık kaynak bir sürü İHA benzetim ortamı sunuyoruz. ROS ile desteklenen sistemimiz geliştirmeye açık ve modüler bir kıyaslama sistemi sunmaktadır. Genel bir benzetim ortamı kullanmasıyla bu anlamda ilk çalışmalardandır. Sistemimizi Teknofest 2018 yarışmasında test ettik. Yarışan takımların kodlarını ve yarışma senaryolarını sürü İHA sistemi ile birlikte açık kaynak olarak sağlamaktayız. ¹

Anahtar Kelimeler—Sürü İHA, benzetim ortamı, simülasyon, insansız hava aracı, ROS, Gazebo

1. GİRİŞ

Bir çok faydası sebebiyle sürü sistemleri aynı işi yapabilen büyük ve karmaşık sistemlere tercih edilmektedir. Bu faydaları fazlalık, kolay değiştirilebilirlik, ucuzluk ve basitlik olarak sıralayabiliriz. Bir sürü sisteminde tasarlanan görevi yapmak için belirlenen alt görevleri yapabilecek birden çok birim bulunur. Arızalanan herhangi birimin yerine yenisi kolaylıkla yerleştirilebilmektedir. Her bir birim küçük ve basit olduğu için üretim maliyeti de oldukça düşük olur. Birimlere verilen alt görevler basit görevlerden oluşur ve bu alt görevlerin toplamı ana görevi oluşturur. Tüm bu faydalarına rağmen sürü sistemlerinin en önemli güçlükleri toplam görevin alt görevlere kolayca bölüştürülebilmesi ve sistemin testinin zorluğudur.

Benzetim ortamları, karmaşık sistemlerin testlerinde en çok kullanılan yöntemlerdendir. Belirli problemlere odaklanan araştırma grupları genellikle kendi benzetim yazılımlarını geliştirmektedir. Buna rağmen belirli problem alanlarında ortak benzetim yazılımları geliştirilmektedir. Bu benzetim ortamlarından birisi de Gazebo [1] benzetim ortamıdır. Gazebo, robotik çalışmalarında kullanılmak üzere geliştirilmiş açık kaynak bir platformdur. Gazebo kullanılarak gerçeğe yakın 3 boyutlu dünyalar oluşturmak ve bu dünyalarda robot algoritmalarını gerçeğe yakın şekilde test etmek oldukça kolay olmaktadır. Her ne kadar Gazebo'nun motor ve fiziksel yüzey etkileşimleri gerçek dünyadan farklı olsa da üst seviye karar ve strateji testleri için çok büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Gazebo son yıllarda insansız hava araçlarını(İHA) benzetmek için de kullanılmaya başlandı [2], [3]. Gazebo için geliştirilen İHA benzetim modülleri PX4 [4] ve Ardupilot [5] gibi açık kaynak İHA yazılım tabanları üzerine inşa edildiğinden genel kullanıma uygun değildir. Bu bilinen yazılım alt yapısını kullanmayan Gazebo'da hazır bulunan İHA modellerini kullanan açık kaynak alt seviye uçuş kontrolcüsü geliştirdik. Uçuş kontrolcüsünün yanı sıra görevleri belirleyen bir senaryo, algılama ve haberleşme modülleri geliştirildi. Ayrıca her görev için belirlenen kriterlere göre algoritmanın performansını ölçen bir puanlama modülü geliştirildi. Tüm bu sistemin yükünü çeşitli makinalara dağıtabilmek ve geliştirilmesini kolaylaştırmak için tüm modüller ROS [6] alt yapısı kullanılarak geliştirildi.

Sürü İHA stratejelerini test edebilmek için bir çok farklı görev seçilebilir ama seçilecek görevden bağımsız olarak çözülmesi hedeflenen sürü İHA problemleri bir çok görevde ortaklık göstermektedir. Bu ortak problemlerden bazıları dağıtık haberleşme, görev dağılımı, görev değişimi ve kaynak yönetimi şeklinde sıralanabilir. Biz geliştirdiğimiz benzetim ortamı için çoklu hedef takibi görevini seçtik. Bu problemi daha somutlaştırmak için görevi askeri çatışma bölgesinde görevlendirilen İHA'ların bölgeyi keşfetmesi ve bulduğu teröristleri takip etmesi olarak belirledik. Benzetim ortamında her bir görev senaryo olarak tasarlanmıştır. Senaryo, keşfedilecek alanın büyüklüğünü, alandaki binaların yerlerini, teröristlerin yerlerini ve hareket zamanlarını, İHA'ların maksimum irtifalarını, İHA'ların haberleşme mesafelerini ve İHA'ların yakıt miktarlarını belirler.

Geliştirdiğimiz sistem her senaryo için bir puan üretmektedir. Bu puan teröristlerin harekete başladıkları binaların tespit edilme süresine, keşfedilen alanın toplam alana oranına ve terörist takibi başarısına bağlıdır. Bu görevler için İHA'lar üzerlerinde bulunan kamera görüntüsünü ve benzetim ortamından sağlanan 3 boyutlu poz bilgisini kullanmaktadır. Kamera, ham görüntüler yerine görüş alanına giren nesnelerin bilgisini İHA kontrolcüsüne sağlamaktadır.

Geliştirdiğimiz benzetim ortamını Teknofest 2018 [7] Sürü İHA yarışmasında test ettik. Yarışma esnasında 4 takım 10 farklı senaryo üzerinde yarıştı. Her senaryoda farklı bir sürü İHA kısıtı sunuldu. Sunulan kısıtlar şu şekildedir; keşif alanının büyüklüğü, görevde kullanılabilecek İHA sayısı, maksimum haberleşme uzaklığı, terörist hareketliliği ve sayısı, ve İHA'ların yakıt miktarları. Bu şekilde her takımın senaryolardan aldığı puanlar takımlar arasında normalleştirilmiş ve toplam puan hesaplanmıştır. Yarışan takımların kodları da benzetim ortamı ile birlikte açık kaynak olarak paylaşılmaktadır. Bu şekilde yeni geliştirilecek yöntemler için hazır bir

¹<https://github.com/teknofest-suriha/suriha>

kıyaslama ortamı sunmayı hedefliyoruz.

II. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Sürü sistemleri araştırmalarını, sistemin geliştirilmesinde kullanılan yöntem ve sistemin görevi olarak iki genel kategoride toplayabiliriz [8]. Sürü sistemlerinin geliştirilmesinde genellikle davranışsal ve öğrenen yöntemler kullanılmaktadır. Yöntemlerin analizinde küçük ve büyük ölçekli model analizleri kullanılmaktadır. Küçük ölçekli analiz tüm sistemi sürüdeki her birimin davranışı üzerinden değerlendirirken, büyük ölçekli analiz ortaya çıkan toplam davranış üzerinden değerlendirme yapmaktadır. Küçük ölçekli analiz yaklaşımı her birimi detaylı modellediği için bu modellerin benzetim ortamında gerçekleşmesini ve sistemin değerlendirmesini mümkün kılmaktadır. Vaughan tarafından geliştirilen Stage benzetim ortamı mikro ölçekli modellemeye dayanan ve bine yakın tekerlekli robotu gerçek zamanlı çalıştırabilen ilk çalışmalarındandır [9].

Benzetim ortamlarının en önemli avantajlarından birisi büyük ölçekli görev analizi yapmayı mümkün kılmıştır. Tanımlanan göreve göre sürü sisteminin başansı belirlenen ölçeklerle değerlendirilebilir. Bu sebeple benzetim ortamları sürü sistemlerinin analizde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [9].

Sürü İHA sistemleri için gerçek dünya testleri oldukça zor olmaktadır. Bunun en büyük sebepleri; havada kalma sürelerinin kısa olması, yüksek gürültülü pozisyon sensörleri, kısıtlı hesaplama kabiliyeti ve haberleşme alt yapılarıdır. Bu sebeplerden dolayı sürü İHA sistemlerinin benzetim ortamı analizleri daha çok önem kazanmaktadır. Yapılan bir çok çalışmada benzetim ortamı analizleri sunulurken bu çalışmalarda hemen hemen her araştırma ekibi kendi araştırma konusu için geliştirdiği benzetim ortamını kullanmaktadır [10]. Bu çalışmada robotik araştırma grupları tarafından yaygın olarak kullanılan genel amaçlı yazılım ve benzetim ortamı ROS/Gazebo üzerinde bir sürü İHA karşılaştırma ortamı sunulmaktadır. Bildiğimiz kadarıyla sürü İHA çalışmaları açısından bu sistem bir ilk olmaktadır.

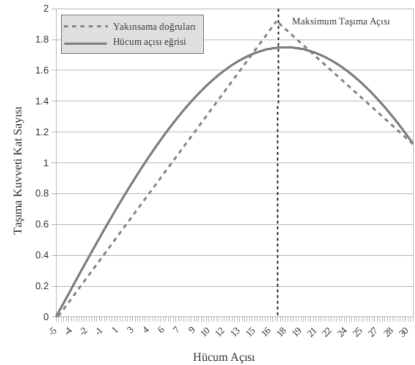
III. AÇIK KAYNAK BENZETİM ORTAMI

Gazebo [1], robot sistemlerinin yazılımsal ve donanımsal benzetimini oluşturabilen açık kaynaklı bir benzetim ortamıdır. Gazebo, hem kullanıcı hem de programlar için fizik benzetimi, çeşitli sensörler ve arayüzler sunmaktadır. Robotik algoritmalarının test edilmesi ve robot tasarımı Gazebo'nun genel kullanım amaçlarındandır.

ROS (Robot Operating System) [6], robotların yazılım modüllerinin kolayca haberleşmesini sağlayan açık kaynaklı bir yazılımdır. ROS, sağladığı standard haberleşme ara birimi sayesinde geliştirilen yöntemlerin mevcut sistemlere kolayca uygulanabilmesini ve test edilebilmesini sağlamaktadır. ROS, içinde barındırdığı standart kütüphanelerin ve desteklediği robotların yanı sıra, geliştiriciler tarafından yazılmış kütüphanelere ve sürücülere de destek vermektedir. Gazebo, ROS'un sağladığı kolay haberleşme ara birimini kullanarak gerçek robotlar için geliştirilen yazılımların çok az değişiklikle benzetim ortamındaki robotlara uygulanmasını kolaylaştırmaktadır.

A. İHA Benzetimi

Gazebo'nun aerodinamik benzetimi, akışkanlar mekaniğinin basitçe modellenmesi ile oluşturulmuştur. Akışkanlar mekaniği fazla karmaşık olduğu için, Gazebo bir nesnenin üzerindeki etkiyen kuvvetleri modeller ve kuvvetleri doğrudan nesnenin bağlantılarına uygular. Özellikle, taşıma ve sürüklenme kuvvetleri su altı ve aerodinamik araçlarının hareketinde önemli bir yere sahiptir. Taşıma kuvveti, bir akışkan içinde hareket eden bir cisim üzerinde akım doğrultusuna dik yönde oluşan kuvvetken, sürüklenme kuvveti hareket doğrultusunun tersi yönde etki eden kuvvettir [11]. Aerodinamik modellemeye diğer bir önemli unsur hücum açısıdır. Hücum açısı, nesnenin hareket yönü ile referans düzlem arasındaki açı olarak tanımlanır. Taşıma kuvveti ile hücum açısı arasındaki ilişki Şekil 1'deki kırmızı eğriyle gösterilmiştir. Hücum açısı belirli bir değere ulaştığında taşıma kat sayısı azalmaya başlar. Bu eğri her nesne için deneysel olarak hesaplanmaktadır. Gazebo, bu eğriyi iki doğru ile temsil eder. Bu temsil için kullanılan parametreler tasarlanan İHA'nın parametreleri olarak benzetim ortamına sağlanmaktadır.

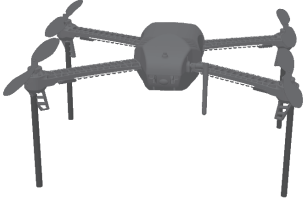


Şekil 1: Taşıma Kuvveti Kat Sayısı ile Hücum Açısı Grafiği. Gazebo Hücum Eğrisini Basitleştirip İki Doğru ile Temsil Etmektedir.

Benzetim ortamında bir tane sabit kanatlı ve bir tane de döner kanatlı olmak üzere iki İHA modeli sunulmaktadır; İris ve Zephyr. Bu modeller İHA'ların basitleştirilmiş aerodinamik modellemesine sahiptir. Bu sebeple ilgili kanatlara verilen dönme hareketine göre İHA'ların taşıma ve sürüklenme kuvvetleri benzetim ortamı tarafında hesaplanmaktadır. İris ve Zephyr Gazebo benzetim ortamında hazır olmasına rağmen alt seviye uçuş kontrolcülere bulunmamaktadır. Bu çalışmanın bir parçası olarak bu modeller için kontrolcüler geliştirilmiştir.

1) *İris Kontrolcüsü:* İris Kontrolcüsü, ROS konusundan gelen ilgili mesajları dinlemektedir. Bu mesajlar, doğrusal ve açısız olmak üzere iki alanda hız komutları içermektedir. Pervanelere verilecek ana hız, doğrusal z eksenini alınıp, belirli bir hız komutuna ulaşan İHA havalanır. İHA'nın hareketini açısız hız alanındaki değerler belirler. İHA'yı x ekseninde hareket ettirmek için açısız y eksenine, y ekseninde hareket ettirmek içinse açısız x eksenine değer verilmelidir.

Kendi ekseninde hareket için ise, açısız z eksenini kullanılmaktadır. X eksenindeki hareket, İHA'yı y ekseninde belirli bir açıda (roll değeri) tutarak sağlar. Y eksenindeki hareket de x eksenine benzer şekilde İHA'yı x ekseninde belirli bir açıda (pitch değeri) tutarak sağlar. Kendi ekseninde hareket, İHA'nın z eksenindeki pozisyon girilen değere eşit olana kadar kendi etrafında dönmesi şeklindedir. X ve y eksenindeki hareketlerin aksine burada verilen açısız değer (yaw değeri) İHA'nın hızına katkı sağlamaz. Kontrolcü doğrusal hata kontrolcüsü kullanarak dört pervanenin göreceli hızlarını ayarlamaktadır.



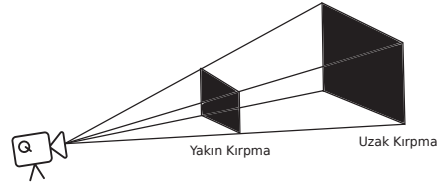
Şekil 2: Gazebo İris Çoklu Döner Kanatlı İHA Modeli

2) Zephyr Kontrolcüsü: Zephyr sabit kanatlı İHA için Gazebo benzetiminin aerodinamik prensipleri ile çalışan hazır model kullanılmıştır. Zephyr kontrolcüsü ROS konusundan gelen ilgili mesajlara göre İHA'nın hareketlerini belirlemektedir. Bu mesajlar, tip olarak İris kontrolcüsüne gelen mesajlarla aynıdır; yani, doğrusal ve açısız olmak üzere iki çeşit hız komutu içermektedir. Fakat bu alanlara verilen değerlerin kullanımı farklıdır. Doğrusal x eksenine verilen değer, sabit kanatlı İHA'nın pervanesinin hızını belirler. Açısız x ve y ekseninde verilen değerler kanatların kontrolü için kullanılır. Açısız x eksenindeki değer, yükselme ve alçalma açısını ayarlarken, açısız y değeri sağ veya sola dönüşü sağlar. Yükselme ve alçalma için sağ ve sol kanatların hücum açısı değiştirilir. Sağa ve sola dönüşler için kanatların birbirlerine göre olan hücum açısı değerleri artırılır veya azaltılır. Kontrolcü doğrusal hata düzeltmelerini kullanmaktadır.



Şekil 3: Gazebo Zephyr Sabit Kanatlı İHA Modeli

3) Sanal Kamera Sensörü: Her İHA'nın üzerinde yere bakan bir kamera bulunmaktadır. Bu kameranın alanına giren nesnelerin tespit edilip İHA'lara gönderilmesi için sanal bir kamera modülü geliştirilmiştir. Bu sanal kamera görüş alanındaki nesneleri İHA'nın kamera ROS konusuna mesaj olarak iletir. Bu mesaj, nesnelerin tiplerini, isimlerini ve pozisyonlarını içermektedir. Sanal kameranın çalışması için İHA'nın belirli bir yükselti aralığında olması gerekir. Bu aralık senaryoya göre değişmektedir. İHA'nın sanal kameranın çalışma yüksekliğinde olması durumunda kameranın algılayabildiği nesneler hesaplanır. Görüş alanı hesaplanırken kameranın görüş açısı, uzak ve yakın kırpma parametreleri dikkate alınır. Görüş alanı içerisinde kalan modeller hesaplanıp mesaj olarak İHA'ya gönderilir. Örnek kamera görüş alanı Şekil 4'de görülebilir. İHA sensör mesajlarını ilgili ROS konusundan alabilir.



Şekil 4: Örnek Görüş Alanı. Yakın Kırpma ve Uzak Kırpma Alanında Bulunan Nesneler Kamera Tarafından Görülebilir.

4) Güç Yönetimi: İHA'ların pille çalıştığı varsayılmıştır. İHA'ların havada kalma süresi sabit olmayıp, pilin kapasitesine ve pervane hızına göre değişkenlik göstermektedir. İHA'ların güç tüketimi hareketli eklemlere uygulanan dış kuvvetlere göre hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, bir veya birden çok eklem fazla kuvvet uygulanması, pil tüketimini artırır.

Sabit kanatlı Zephyr İHA'sı 3 adet hareketli eklem içermektedir. Bunlardan bir tanesi arkadaki pervanenin çalıştırılmasında, diğer iki tanesi ise sağ ve solda bulunan kanatların hareket ettirilmesinde kullanılır. Çoklu döner kanatlı İris İHA'sının ise 4 tane hareketli eklemi bulunmaktadır. İHA'nın havada kalabilmesi için tüm bu eklemlere belirli bir kuvvet uygulanması gerekmektedir. Algoritma 1'de gösterildiği gibi her simülasyon adımında hareketli eklemlere uygulanan kuvvetlerin toplanıp o İHA için belirlenen çarpım faktörü ile çarpılmasıyla pil tüketim miktarı belirlenir ve pilin kapasitesinden düşülür. İHA kontrolcüsü, İHA'nın toplam ve kalan pil durumunu ilgili ROS konusunu dinleyerek alabilir. İHA'nın havadayken pilin bitmesi durumunda, İHA'yı kontrol etmek için gönderilen komutlar işlenmez ve İHA kontrolsüz şekilde yere çakılır. Pili bitmeden piste inebilen İHA'ların pilleri ilk andaki kapasitesine ulaşır ve tekrar kalkış yapabilir.

Algoritma 1 Güç Tüketiminin Hesaplanması

```

kuvvet ← 0
for all eklem do
    kuvvet ← kuvvet + |eklem.kuvvet| × katsayı
end for
pil ← pil - kuvvet

```

5) Haberleşme Modülü: İHA'ların iletişimini sağlamak için bir haberleşme modülü geliştirilmiştir. Her İHA ayrı bir

ROS modülü tarafından kontrol edilir, bu yüzden merkezi bir planlama algoritması ile kontrol edilemezler. Dağıtık şekilde eş güdümlü olarak çalışabilmeleri için haberleşme modülü üzerinden iletişim kurabilirler. Bu yarışma için İHA'ların haberleşme modülü dışında herhangi bir şekilde haberleşmeleri yasaktır. İHA'ların gönderdiği mesajlar belirli bir mesafedeki tüm İHA'lara haberleşme modülü ile yayın yapılır. Özellikle bir İHA'ya mesaj göndermek mümkün değildir. İHA'ların haberleşme mesafesi senaryoya özgüdür, yani senaryodan senaryoya değişmektedir. Bir İHA mesaj yayınlamak istediğinde ilgili ROS konusuna mesaj gönderir. Bu mesaj, *gönderici* ve *mesaj* alanlarını içermektedir. Gönderici alanı İHA'nın adından, mesaj alanı ise gönderilmek istenen mesajdan oluşmaktadır. Haberleşme modülü, bir mesaj aldığı anda mesajı gönderen İHA'nın mesaj yayınlama alanındaki tüm İHA'ları hesaplar ve ardından bu İHA'ların ilgili ROS konularına bu mesajı iletir. Her İHA'nın mesaj alım ROS konusu farklıdır ve her biri kendi ROS konusunu dinlemektedir. Gönderilecek mesajın uzunluğu ve içeriği ile ilgili herhangi bir kısıtlama bulunmamaktadır.

B. Senaryo Görevleri ve Değişkenleri

Geliştirdiğimiz sistemde ana görev askeri operasyon alanındaki teröristlerin yerlerinin tespiti ve takibidir. Bu görevin detayları ve zorlukları senaryo parametreleri ile belirlenmektedir. Bu parametreleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- Senaryoda kullanılacak İHA sayısı.
- Senaryoda bulunan bina sayısı ve binaların yerleşimi.
- Senaryoda bulunan terörist sayısı ve hareket patikaları.
- İki İHA'nın haberleşebileceği maksimum uzaklık.
- Senaryoda keşfedilmesi gereken toplam alanın boyutu.
- İHA'ların kalkış ve iniş yapacağı pistin alanı ve pozisyonu.
- İHA'ların pil kapasiteleri.
- İHA kamerasının algılamasını sağlayan yükseklik aralığı.

Belirlenen ana görev alt görevlere bölünüp performans ölçümü bu alt görevlerin değerlendirilmesiyle yapılmaktadır. Teröristler senaryoda belirlenen zamanda bir binadan çıkıp harita üzerinde başka bir binaya hareket etmektedir. İHA'lar teröristlerin ilk hareket zamanından itibaren çıkış binasını tespit etmekle görevlidirler. Ayrıca tespit ettikleri teröristlerin hareketlerini mümkün olduğunca takip etmekle görevlidirler. Bu görevi yaparken de mevcut alanı en iyi şekilde keşfetmeleri beklenmektedir. Örnek bir senaryonun ekran görüntüsü Şekil 5'de görülmektedir.

C. Performans Ölçümü

Yarışmacıların performansları senaryolardan alınan puanların ölçeklendirilmesi ile hesaplanır. Teröristlerin yerinin tespiti ve teröristlerin takibi görevlerinden alınan puanlar 0.4 katsayısıyla, alan taramadan alınan puan ise 0.3 katsayısıyla çarpılıp toplanarak toplam puan 100 üzerinden hesaplanır. Senaryo görevlerinin puanlarının hesaplanması ise şu şekildedir:

1) *Teröristlerin Yerinin Tespiti*: Yarışma senaryolarında benzetimin belirli bir anında bir veya birden çok terörist bir binadan hareket etmeye başlayacaklardır. Bu hareket anında İHA'lar kullandıkları sanal kamera sensörleri ile teröristlerin harekete başladıkları binayı tespit edip yer kontrol sistemine bildirmeleri gerekmektedir. Yanlış bildirimler takımların ceza puanı almasına yol açacaktır. Alınan cezalar takımın aldığı toplam puan ile çarpılıp doğru tespit ile aldığı puanın düşmesine yol açacaktır. Puan hesaplaması teröristler harekete geçtikten sonra başlayacak ve ne kadar erken tespit edilirse alınan puan o kadar yüksek olacaktır. Puan hesaplaması şu şekilde olmaktadır:

$$zf = mz - ihz \quad (1)$$

$$puan = \left[\frac{(tts - zf) \times 90}{tts} \right] + tp \quad (2)$$

$$puan = puan \times [1.0 - (ytp \times yts)] \quad (3)$$

Denklemden geçen kısaltmaların anlamları şu şekildedir:

- *mz* teröristlerin görüldüğünü bildiren mesajın geliş zamanını göstermektedir.
- *ihz* teröristlerin ilk hareket zamanını göstermektedir.
- *zf* teröristlerin binadan hareketlerinden itibaren İHA'lar tarafından fark edilene kadar geçen süreyi göstermektedir.
- *tts* teröristlerin tespit edilebileceği toplam süreyi göstermektedir.
- *tp* taban puanı ifade etmektedir.
- *ytp* yanlış tespit puanını göstermektedir.
- *yts* yanlış tespit sayısını göstermektedir.

Eğer İHA sistemi hiç bir şekilde bina tespit bildiriminde bulunmazsa *tp* ile ifade edilen puanı alacaktır. Eğer bildirimde bulunursa yaptığı bildirimin toplam süreye oranı miktarında 0 ile 100 arasında bir puan alacaktır. Eğer yanlış bildirim olursa her bir yanlış bildirim doğru bildirim puanından *ytp* çarpımınca azalmasına sebep olacaktır. Teknofest 2018 yarışmasında *tp* 10 ve *ytp* 0.1 olarak kullanılmıştır.

2) *Teröristlerin Takip Edilmesi*: Teröristler hareket etmeye başladıktan sonra varacakları yere kadar İHA'ların teröristleri takip etmesi beklenmektedir. Takip esnasında sanal kamera tarafından yer üzerinde pozisyonu alınan her teröristin yer kontrol sistemine bildirilmesi beklenir. Alınan mesajlar yer kontrol sistemi tarafından her terörist için ayrı ayrı saklanır ve o ana kadar gelen mesajlardan bir patika oluşturulur. Teröristlerin ilk hareket anından varacakları yere kadar izledikleri patikalar kaydedilir. Daha sonra bu iki patika arasındaki fark dinamik zaman bükmesi algoritmasıyla [12] hesaplanır. Bu fark ne kadar azsa takım o kadar yüksek puan alır. Bu patika farkı hesaplaması senaryoda takip edilmesi gereken tüm teröristler için şu şekilde hesaplanır:

$$puan = \frac{1}{TS} \sum_{terrorist_i} \frac{(maxMaliyet_i - maliyet_i) \times 100}{maxMaliyet_i} \quad (4)$$



Şekil 5: Örnek Bir Senaryonun Ekran Görüntüsü

Denklemden geçen kısıltmaların açıklamaları şu şekildedir:

- *TS* toplam terörist sayısını göstermektedir.
- *maxMaliyet* her teröristin simülasyonda takip ettiği gerçek patika vektörünün uzunluklarının toplamına eşittir. Bu aslında teröristin sürekli (0, 0) noktasında bulunduğunu söyleyen bir takımın performansına eşittir.
- *maliyet* her terörist için hesaplanan benzetim ortamında kaydedilen gerçek patika ile İHA'ların bildirdiği patika arasındaki farkı ifade eder. Takip başarısı yüksek bir İHA için bu değer küçük olacaktır. Başarısız bir İHA takımı için bu değer büyük olacaktır. Bu değer dinamik zaman bükme algoritmasıyla hesaplanmaktadır.

3) *Keşfedilen Alan*: İHA'ların üzerinde bulunan sanal kameranın yerde taradığı alanlar hesaplanır ve bu alanlar simülasyondaki haritadan oluşturulan ayrı bir harita üzerinde işaretlenir. Takımın gözlemlenen alan puanı bu gözlemlenen alanın toplam alana oranı olarak 0 ile 100 arasında bir değer olarak hesaplanır. Bir bölge birden çok İHA tarafından tekrar tekrar gözlemlense dahi puana etkisi olmamaktadır. Puan hesabı için bir bölgenin bir kere herhangi bir İHA tarafından gözlemlenmesi yeterli olmaktadır. Aynk harita benzetim ortamındaki alanın çözünürlük parametresine göre bölütlenmesiyle oluşur. Mesela 1000 metreye 1000 metre genişliğindeki bir alanı, çözünürlük parametresi 0.5 olacak şekilde bölütlersek 2000'e 2000 boyutunda bir matris ile (yani 4 milyon hücre ile) gösterebiliriz. Her adımda İHA'ların sanal

sensörlerinin gördüğü alanlar hesaplanıp ayrı haritada ilgili hücreler işaretlenir.

IV. TEKNOFEST 2018

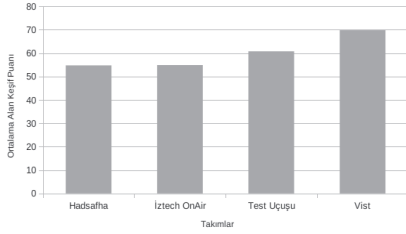
Geliştirdiğimiz benzetim ortamını Teknofest 2018 Sürü İHA yarışmasında test ettik. Yarışmaya 34 başvuru yapıldı. Bu başvurulardan 10'u önelemeyi geçti. Ön elemeyi geçenlerden dört takım yarışmaya katıldı.

A. Takımlar

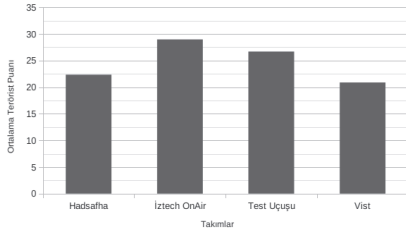
Yarışmaya katılan takımların kodları benzetim ortamı ile birlikte karşılaştırma amaçlı olarak paylaşılmaktadır [13]. Takımlar genellikle yöntemlerini alan taramayı maksimize edecek şekilde seçmişlerdir. Bunda diğer görevlerin daha zor ve ölçmesinin zor olması da rol oynamıştır. Eniyi şekilde teröristleri takip edecek bir algoritmanın, verilen bir senaryo için herhangi bir fırsatçı algoritmadan daha kötü performans gösterme ihtimali vardır. Diğer yandan teröristlerin çıkış binalarını tespit etmeye çalışması yanlış tespitlerden gelebilecek ceza puanları sebebiyle riskli görülmektedir. Tüm bunlara rağmen takımlar temel seviyede verilen görevleri yapmayı başarmıştır.

B. Senaryolar

Yarışmada toplamda 10 tane senaryo kullanılmıştır. Her bir senaryoda yarışma kısıtlarını değiştirip geliştirilen sistemlerin performanslarının gerçekçi testinin yapılması hedeflenmiştir. Dört senaryoda haritanın boyutu 1000 metreye 1000 iken altı senaryoda 500 metreye 500 metredir. Sekiz senaryoda



Şekil 6: Takımların Ortalama Alan Keşif Başarısı



Şekil 7: Takımların Ortalama Terörist Takip Başarısı

altı İHA kullanılmasına izin verilirken senaryoların ikisinde 4 İHA kullanılmasına izin verilmiştir. Tüm senaryolar için sabit kanatlı veya döner kanatlı İHA seçimi takımların inisiyatifine bırakılmıştır. Verilen senaryoların ikisinde belirlenen toplam benzetim süresinde tek pil kullanmak İHA'ların görevlerini tamamlamasına yetmeyecek şekilde pil kapasiteleri belirlenmiştir. Senaryoların iki tanesinde haberleşme mesafesi 100 metre olarak belirlenmiş bir tanesinde 50 metre olarak belirlenmiş ve geri kalan 7 tanesinde 10000 metre belirlenerek harita üzerinde kalan İHA'ların her zaman haberleşmesi mümkün kılınmıştır.

C. Sonuçlar

Teknofest 2018 yarışmasında toplam 10 senaryodan topladığı 84.72 puanla Vist takımı birinci, 82.88 puanla Test Uçuşu takımı ikinci, 76.66 puanla İztech OnAir takımı üçüncü olmuştur. Takımların alan keşfetme ve terörist takibinden aldığı puanlar Şekil 6 ve 7'de görülebilir. Takımların başarısını belirleyen ana unsurun alan keşif başarısı olduğu görülmektedir. İztech OnAir takımı terörist takibinde en başarılı takım olmasına rağmen alan keşfindeki düşük performansı sebebiyle yarışmayı üçüncülükle bitirmiştir. Genel olarak takımların toplam alanın %60'a yakını keşfedebildiğini görüyoruz. Takip başarısı ise ortalama %20-%30 aralığında kalmıştır. Terörist yeri tespitinde sadece İztech OnAir takımı 3 senaryoda tespit mesajı göndermiş bu mesajlardan 2 senaryoda gönderilenler yanlış tespit olduğu için takımın bu iki senaryodan sıfır almasına yol açmış. Bir senaryoda da doğru şekilde tespit yapabilmemiş ama çok geç yaptığı için taban puandan sadece 1 puan fazla alabilmiş. Diğer takımlar tespit etmeye çalışıp puanlarını düşürme riskini göze almamışlardır. Ayrıntılı bilgiye yarışma sonuçlarını yayınladığımız web sayfasından [14] ulaşılabilir.

V. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Geliştirdiğimiz sistem çok amaçlı bir benzetim ortamı üzerinde çalışan ilk sürü İHA benzetim ortamıdır. ROS ve Gazebo dışında bir İHA yazılım alt yapısına bağımlılığı yoktur. Gazebo'nun yeni geliştirilen aerodinamik benzetim modelini kullanmaktadır. Sistem Teknofest İstanbul 2018 yarışmasında test edilmiş ve kod örneklerinin ve senaryoların bulunduğu bir kıyaslama ortamı olarak sunulmuştur.

Gelecekte sisteme farklı görevleri ekleyerek daha genel bir kıyaslama alt yapısı sunmayı hedefliyoruz. Mevcut senaryolarda yeryüzünün tamamen düz ve kare olduğu varsayılmıştır. Gelecekte, yükseklik haritalarıyla eklemeyi planlıyoruz. Ayrıca mevcut sistemde tüm sensörler gürültüsüz şekilde veri sağlamaktadır. Senaryo parametrelerine gürültü parametresini ekleyip senaryo bazlı sensör gürültüsünü kontrol edebilmeyi hedefliyoruz.

KAYNAKÇA

- [1] N. Koenig and A. Howard, "Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator," in *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (IEEE Cat. No. 04CH37566), vol. 3. IEEE, pp. 2149–2154.
- [2] J. Meyer and S. Kohlbrecher. (2014) Hector quadrotor simulation. [Online]. Available: http://wiki.ros.org/hector_quadrotor
- [3] Dronecode.org. (2019) Px4 gazebo simulation. [Online]. Available: <https://dev.px4.io/en/simulation/gazebo.html>
- [4] Dronecode. (2019) Px4 autopilot. [Online]. Available: <https://px4.io/>
- [5] ArduPilot. (2019) Ardupilot open source autopilot. [Online]. Available: <http://ardupilot.org/>
- [6] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng, "Ros: an open-source robot operating system," in *ICRA workshop on open source software*, vol. 3, no. 3.2. Kobe, Japan, 2009, p. 5.
- [7] T. Istanbul. (2019) Teknofest istanbul. [Online]. Available: <https://www.teknofestistanbul.org/>
- [8] M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari, and M. Dorigo, "Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective," *Swarm Intelligence*, vol. 7, no. 1, pp. 1–41, 2013.
- [9] R. Vaughan, "Massively multi-robot simulation in stage," *Swarm intelligence*, vol. 2, no. 2–4, pp. 189–208, 2008.
- [10] S.-J. Chung, A. A. Paranjape, P. Dames, S. Shen, and V. Kumar, "A survey on aerial swarm robotics," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 837–855, 2018.
- [11] Gazebo. (2019) Gazebo tutorial: Aerodynamics. [Online]. Available: <http://gazebo.sim.org/tutorials?tut=aerodynamics&cat=plugins>
- [12] C. S. Myers and L. R. Rabiner, "A comparative study of several dynamic time-warping algorithms for connected-word recognition," *Bell System Technical Journal*, vol. 60, no. 7, pp. 1389–1409, 1981.
- [13] O. Aşık, G. Uludoğan, and H. K. Eryılmaz. (2019) Teknofest sürü İHA benzetim ortamı. [Online]. Available: <https://github.com/teknofest-suriha/suriha>
- [14] ——. (2018) Teknofest istanbul 2018 sürü İHA yarışması. [Online]. Available: <https://teknofest-suriha.github.io>

Rotation-invariant Object Recognition by Spatial Feature Extraction on a Humanoid Robot

Ugo Albanese, Murat Kirtay, Lorenzo Vannucci, Cecilia Laschi, Egidio Falotico
The BioRobotics Institute,
Scuola Superiore Sant'Anna,
Pontedera (PI), Italy
Email: u.albanese, m.kirtay, l.vannucci, c.laschi, e.falotico@santannapisa.it

Abstract—This paper reports our works on rotation-invariant object recognition by using the spatial pooling phase of Hierarchical Temporal Memory (HTM) – a neocortically inspired algorithm. In order to perform object recognition task, we employed this phase in an automatized (not hand-engineered) process to extract features from two datasets. The task was firstly performed on a state-of-the-art image dataset (COIL-100). Then, we construct a new rotation-invariant object dataset to accomplish the same task on a robot platform (the iCub humanoid robot) where actual hardware constraints (e.g., camera resolution) and environmental noise (e.g., reflections) exist. To benchmark the proposed method in terms of recognition accuracy, the extracted features and pixel data were used as inputs to a set of recognition algorithms with different amounts of training data (from 5 to 80%). The results show that the proposed method is effective for robotic applications involving rotation-invariant object recognition with low amount of training data. This work represents a first step towards multimodal learning for invariant object recognition.

Keywords—Object recognition, Sensory representation, the iCub humanoid robot.

I. INTRODUCTION

Invariant object recognition can be defined as preserving object identity (or “object constancy”) that enables an object to be perceived as the same regardless of its variations including illumination, scale, pose, size, lighting, background, etc. [1], [2]. The primate visual system solves this invariance problem with apparent ease. Yet, this problem still remains challenging for artificial visual systems. Despite recent advancements in computational resources to exploit huge amount of data and a growing understanding of how biological visual systems work, the current artificial visual systems still struggle to achieve noteworthy performances in vision-based tasks that involve the invariance problem such as object recognition, and vision-guided grasping [1], [3].

The existing studies on feature extraction and recognition methods show limitations in solving recognition problems on a robotic platform where hardware limitations play an important role. Among such limitations, we can name the collection of hand-crafted features, the need for large amounts of training data and computational power. On one hand, for instance, feature extraction methods such as invariant feature transform (SIFT), histograms of oriented gradients (HOG), and speeded up robust features (SURF) are

based on hand-engineered feature selection to recognize objects [4], [5], [6]. On the other hand, recognition methods like many layered (deep) neural networks and convolutional neural networks [7], [8] require a considerable amount of labeled data and computational power to achieve significant recognition performances. We note that a more comprehensive review on invariant object recognition and its robotic applications can be found in the following studies [1], [3].

In this study, we focused on rotation-invariant object recognition on a state-of-the-art and on a new dataset constructed using the iCub humanoid robot. To be concrete, we designed a three-phased recognition pipeline, namely: preprocessing, feature extraction and recognition. In the preprocessing and recognition phases, we used standard image processing and machine learning algorithms to recognize a test image. In the feature extraction phase, we adopted a mechanistic (not hand-engineered) approach to extract features from the visual patterns. In that, we adapted a spatial pooling mechanism of a neocortically inspired algorithm, Hierarchical Temporal Memory (HTM), to extract features as unique cortical representations of a given visual pattern [9], [10], [11]. These features (i.e., cortical representations) were used as inputs to the different machine learning algorithms.

Unlike previously discussed methods existing in the literature, HTM spatial pooling mechanism enables our recognition pipeline to be mechanistic for feature extraction, therefore allowing for the recognition algorithms to be fed with features obtained without hand-engineering the raw pixel data. Moreover, this approach brings about the possibility of reducing the computational burden by adjusting the size of training sets and the extracted features in case the hardware limitations are critical or data are not abundant. The use of extracted features, instead of pixel data, improves recognition accuracy while using a small training set and therefore fewer computations.

By leveraging our recognition pipeline, we reported significant differences in accuracy with a considerably lesser amount of training data by employing cortical representation as feature vectors (training data: 30%, accuracy: > 97%) instead of preprocessed pixel data (training data: 30%, accuracy: < 86%). Furthermore, the results were benchmarked with state-of-the-art machine learning algorithms in order to test performance improvements after using extracted features instead of using pixel data. Note that, we applied the same pipeline on the iCub’s camera image dataset and obtained similar results with the COIL-100 dataset. On the basis of the obtained results, we foresee the proposed pipeline implemented in our future

studies on the same robot platform such as multimodal learning for grasping task and object concept formation.

This paper is organized as follows: we describe the specifications of datasets in Section II. Section III provides the information about the reproducibility of the research. Section IV presents the implementation procedures of the performed methods in detail. The obtained results are discussed in Section V. Lastly, the conclusions of this work and research objectives for future works are outlined in Section VI.

II. DATASETS

In the first part of this study, we used the Columbia University Image Library (COIL-100) as a rotation-invariant dataset as the input to the proposed recognition pipeline [12]. To test whether similar results can be obtained in a hardware (the iCub humanoid robot) setup, we constructed a new dataset which contains 50 different graspable objects by following the same data acquisition policy employed for COIL-100.

A. The COIL-100 dataset

The COIL-100 dataset consists of 100 objects from various categories such as toys, medicine boxes, and daily life objects. Figure 1 shows 4 objects from those categories. Each object was rotated by 5 degrees on a motorized turntable to obtain 72 color images (7200 in total). Note that, preprocessing operations were performed to crop images from the background and resize them to 128×128 . These steps enable COIL-100 to be the ideal choice for offline recognition tasks.

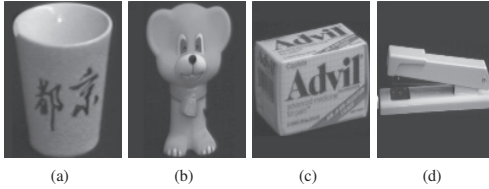


Figure 1: Selected objects from the COIL-100 dataset.

B. Robot platform and constructed dataset

To construct a new dataset with a hardware setup, we followed the acquisition procedure of COIL-100. As can be seen from the Figure 3, the dataset acquisition setup consists of iCub humanoid robot platform and a motorized turntable. We used 50 office and laboratory objects to construct the rotation-invariant dataset [13].

The collected objects were selected, for the future studies, to be graspable by a robotic hand. The data acquisition procedure begins with placing an object on the turntable, then rotating it approximately by 5 degrees and capturing an image of the object with the iCub's camera. The object is rotated until it completes a full rotation and the same automatized process is carried out for each object. The dataset contains 3600 colored images; 4 samples are shown in the Figure 2. The detailed information about the robot platform and data

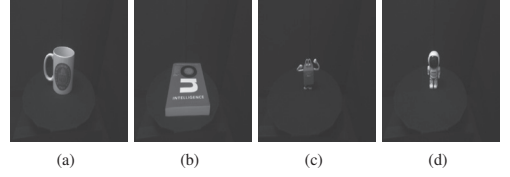


Figure 2: Selected objects from the robot dataset.

acquisition steps can be found in the following technical report [13]. Our motivation behind the construction of a new dataset is to assess whether recognition performances similar to the results obtained by using COIL-100 can be achieved in an environment where hardware constraints (such as camera resolution, and inaccuracies in the rotation of the turntable) and environmental noise (e.g., reflections and shadows) exist.

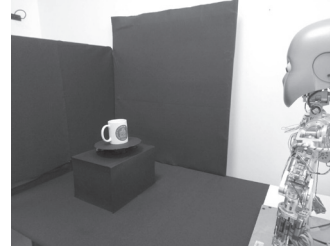


Figure 3: Experiment setup: the iCub robot and motorized turntable

III. REPRODUCIBILITY OF THE STUDY

In order to reproduce the presented results and provide the robot dataset for other researchers, all the related data - including scripts, datasets, and images- have been shared in an online repository¹. Note that, even if the repository is frequently updated, the current state of the paper with related sources can be found on the branch named *tork-2019-submission*.

IV. METHODS

In this section, we describe the proposed recognition pipeline in detail. The pipeline consists of three distinct phases: preprocessing, feature extraction and recognition. Here, we note that the purpose of performing this pipeline on the datasets is two-fold. The first is to benchmark the obtained results and to test whether using extracted features leads to an improvement in recognition performance even employing a lesser amount of training data. The second is to show that similar results can be achieved in a robot platform with our robot dataset.

¹www.github.com/muratkirtay/ToRK2019

A. Preprocessing phase

The operations performed on the images in this phase achieve two main goals. The first one is to transform 32×32 raw pixel matrices into a binarized pixel vectors to be received by either the feature extraction phase or the recognition phase. To do this, a set of standard image processing algorithms such as resizing, cropping and applying an adaptive threshold to binarize (convert to black and white) images, were applied. After completing the image processing steps, the binarized matrices are converted into input vectors. The second goal of this phase is to randomly partition the generated input vectors into training and testing sets. The number of the samples used for training ranged from 5 to 80% of the available input vectors. Meanwhile, the remaining data samples were used as the testing set.

B. Feature extraction phase

To extract features as a cortical representation of a given visual pattern, we follow the mathematical formalization and pseudo-code provided in the studies [9], [14]. To implement this phase, we adapted the framework developed in [9], [10], and implemented in [11]. Note that a complete formalization of the feature extraction mechanism and a thorough description of the neuroscientific concepts underlying the cortical anatomy of the mammalian neocortex are beyond the scope of this paper [9], [10]. That is why, here, we provide sufficient information to understand the fundamental concepts and to reproduce the presented results.

The computations in this phase were executed in three different steps which are: synaptic activation (overlapping), cortical column inhibition and learning. In detail, the dendritic

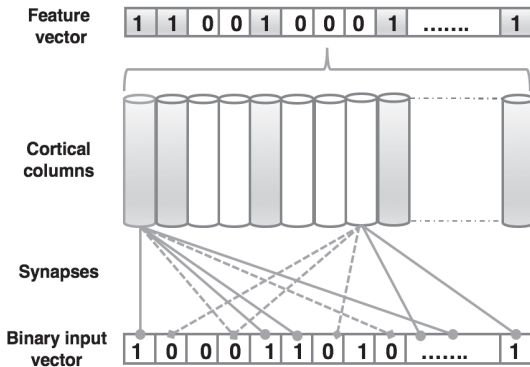


Figure 4: A cortical structure of the spatial pooling mechanism.

synapses are initially connected, in random order, to the elements of a binarized pixel vector. The synapses use their permanence values to form a connection. These permanence values can be considered as 'weight' parameters between input vectors and cortical columns. For a single synapse, this value is increased by 0.01 if the connection has an active bit in the input vector, otherwise, is decreased by 0.01. During the iteration cycle, if a synaptic permanence exceeds the threshold

(0.5) it is deemed as formed, otherwise, it remains unformed. Due to the environmental and hardware constraints, we used 300 synapses per column for the robot dataset and 75 for the COIL-100 dataset. The activation of a column was determined by the total number of formed synapses existing on the column itself.

The HTM model works in the spatiotemporal domain. The spatial domain operations are carried out at columnar level whereas temporal operations are conducted, in the columns, at the cellular level. Since we are concerned only with the spatial characteristics of the input data, we restricted the adapted model to work only at columnar level. In Figure 4, the cortical columns are depicted as white or blue cylinders and the connected synapses are illustrated with solid lines with rounded endpoints while the unformed synapses are represented by dashed lines with diamond-shaped endpoints.

In the column inhibition phase, an inhibition radius - initially 10 columns wide in every direction - was chosen to determine the total number of formed synapses for each column. A column was considered to be active if the number of formed synapses ranked among the first 10 in the inhibition radius. Then, the active column inhibits neighbor columns from being active. This phase was repeated for all the existing columns and it guarantees that only 20% of columns will participate in representing a feature vector. In Figure 4, the active columns are shown as blue cylinders and the inhibited columns are shown in white. The feature vector, as illustrated in the same figure, contains 204 active bits which are independent of the number of 1s in the input vector.

The learning phase is a cortical process that consists of adapting synaptic permanence, performing boosting and updating inhibition radius of the columns. Adaptation of synaptic permanence values is a process that increases the permanence of formed synapses and decreases the unformed ones. Since synapses are attached to elements of the input (pixel) vector, increasing their permanence will enable a stable representation of a specific active bit of the input in the column. The boosting operations provide a reward to the less frequently activated columns in order to compete for representing the input in the extracted feature vector. In doing so, this phase improves the use of the available cortical resources (i.e., synaptic connections) to extract features as cortical representations. In the last step, the inhibition radius is updated calculating the sum of the Euclidean distances between formed synapses and dividing it by the total number of connected synapses.

To sum up, the purpose of this phase is to generate spatially stable representations (i.e., features) from the given input by operating from the bottom (synaptic) level to the upper (cortical) level. This phase can be considered as a mechanistic approach to generate representations of raw data. Instead of hand-engineering features of an image like finding edges, corners and spatial correlations, this approach enables the pipeline to extract spatially important features without having any domain knowledge about the dataset.

C. Recognition phase

In this phase, we extracted cortical representation vectors and processed pixel data for all the visual patterns in the datasets, then we grouped them in a training and a testing

dataset to analyze the recognition accuracy by performing different recognition algorithms. The algorithms implemented in this phase are standard machine learning techniques ranging from the simple distance comparison to complex learning algorithms. To do this, we exploited a high-level neural network software framework with a TensorFlow backend [15]. The source code of the implemented methods and model parameters can be downloaded via the repository link provided in Section III.

Our purpose, with this approach, is to benchmark the results and to assess the feasibility of the feature extraction and recognition phases in an actual hardware platform.

To establish a baseline for the recognition algorithms, we employed representations comparison to compute a similarity metric between a *test* representation vector and the *training* representation vectors. To obtain a numeric value for that metric and to determine the category of the test representation, we perform a bit-wise AND operator between a test representation vector and each representation vectors in the training dataset in sequential order; then, we sum up the number of active bits to sort the derived metric values in descending order. In detail, the category (as object ID) of the test representation deemed to be the same with the training representation ranked as the first - which shares the largest similarity-in this sorted sequence.

The rationale behind this comparison is based on the fact that the cortical representation of similar visual patterns should have similar representations. Note that there is no learning process in this method, yet we performed it to understand the encoding capabilities of the cortical representation while using less data for training data.

Softmax Regression: This method aims to learn the probability of a given visual pattern to a belonging object. In this method, the object IDs are encoded one-hot vector with dimension $1 \times N$ where N is the number of objects in the dataset. This vector has only one active bit in a specific position which refers to the object ID. The training sets - consisting either of binary pixels or feature vectors- was employed to a derive weight matrix by using cross-entropy as a cost function. Then the test set was used to perform a recognition task by employing the computed weight matrix.

Although the implementation of the Softmax regression and single layer perceptron is quite similar, we first perform this method as a simple recognition algorithm to investigate the performance of the proposed pipeline. Then, as a more complex recognition method, we have adopted to the multi-layer perceptron.

Single and Multi-layer Perceptron: A single layer perceptron (SLP) network with 1024 hidden units having a sigmoid activation function was constructed and the network was trained by using stochastic gradient descent to minimize the categorical cross-entropy cost function for 1000 epochs. During the testing phase, we performed Softmax at the output layer to recognize a given test pattern.

It should be highlighted that the parameters of the multi-layer perceptron network - which are activation function, cost function and the number of epochs- are the same parameters that we used in the single layer perceptron. Additionally,

the multi-layer perceptron (MLP) network contains one more hidden layer with 1024 units.

The aforementioned methods were separately trained and tested by using (binarized) pixel data and cortical representations of each visual pattern in the COIL-100 and robot datasets. Then, accuracy rates were extracted for different training rates (5 to 80%) in order to investigate the performance of the proposed pipeline on different datasets.

V. RESULTS

This section provides the recognition results that we obtained from the COIL-100 and the robot datasets. The results were achieved by employing the previously described recognition algorithms. These algorithms were designed to accept, as input vectors, cortical representations and binarized pixel data. The performance of the recognition algorithms was benchmarked according to the recognition accuracy over increasingly larger training sets of sizes ranging from 5 to 80% of the complete dataset. The accuracy rates were calculated dividing the number of correctly recognized input pattern over the total number of recognition tries. The derived value was multiplied by 100 and reported in the tables below up to the second decimal place. The results are depicted in

Training	CR	Softmax		SLP		MLP	
		CR	Pixel	CR	Pixel	CR	Pixel
5	80.45	87.39	62.82	87.55	64.92	85.30	63.92
10	89.00	92.87	75.10	93.92	78.24	91.98	77.24
20	91.29	95.55	82.06	96.37	84.70	94.89	83.91
30	95.60	97.39	85.98	98.03	89.47	96.86	88.78
40	95.60	97.75	87.06	98.36	91.13	97.29	91.09
50	96.58	98.11	87.75	98.80	91.86	97.77	92.02
60	97.00	98.13	88.00	99.13	92.93	97.82	92.58
70	97.38	98.40	89.27	99.22	94.59	98.13	94.50
80	97.00	97.80	89.00	98.86	93.80	97.93	91.06

Table I: Accuracy rates for the COIL-100 dataset while performing recognition algorithms by using binarized pixel values and cortical representations of the input.

the tables organized as follows. The first column indicates the percentage of the training data; the achieved accuracy rates are grouped in columns according to the input types employed and to the performed recognition algorithm. Note that cortical representation is abbreviated to *CR* and binarized pixel data is named as *Pixel*. The second column shows the accuracies obtained by the representation comparison method as a recognition algorithm. As we stated, these results should be considered as the baseline for performance comparison of recognition algorithms using cortical representations as inputs.

Table I shows the obtained results for the COIL-100 dataset. As expected, the accuracy rates improved by enlarging the size of the training set while using pixel data as input to the recognition algorithms. Yet, more interestingly, for any training rate and recognition algorithm, we see that the use of cortical representations as input, yielded significantly better accuracy rates than using pixel data. For instance, the proposed cortical representation outperforms pixel data as inputs with 30% training rate regardless of the performed recognition algorithms. What is more, we observed the same pattern

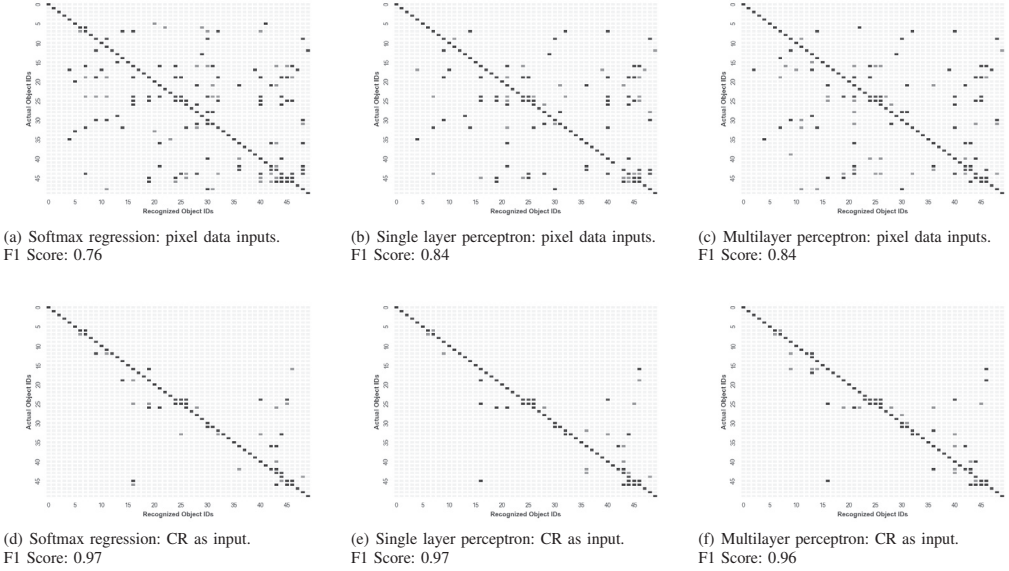


Figure 5: Confusion matrices (as heatmaps) by using 30% training data and F1 score metric to compare recognition performance.

Training	CR	Softmax		SLP		MLP	
		CR	Pixel	CR	Pixel	CR	Pixel
5	73.21	79.24	55.24	79.97	61.53	82.08	63.62
10	83.81	92.00	70.39	92.49	76.49	92.06	77.23
20	88.86	95.34	74.65	95.62	82.27	95.10	81.20
30	91.60	96.62	76.74	96.62	84.43	95.88	84.58
40	93.95	98.00	77.18	98.00	87.45	97.00	87.63
50	94.50	98.27	78.27	98.38	87.50	97.66	87.50
60	94.82	98.62	77.51	98.55	87.44	97.93	88.96
70	95.27	99.36	79.27	99.00	89.63	99.00	90.27
80	95.33	99.46	79.06	98.80	89.46	98.80	90.26

Table II: Accuracy rates for the robot dataset while performing recognition algorithms by using binarized pixel values and cortical representations of the input.

($CR_{accuracy} > Pixel_{accuracy}$) on every training rate provided that the same recognition algorithm is employed.

After analyzing the results that we obtained from the COIL-100 dataset, we set out to test the performance of the recognition pipeline on the dataset acquired from the iCub robot. Table II was constructed with the approach that we followed for Table I. Due to the presence of noise in the environment (e.g., reflection and shadows), the extracted cortical representations also encode such noise. That is why the accuracy rates in CR column in the Table II ranges from 73 to up 95% whereas the values in the corresponding column of Table I 80 to 97%. Nevertheless, a similar trend in the accuracy rate with an increasing number of training rates was also observed and, the use of cortical representations as inputs leads to significantly better accuracy results (up to 99%) than

using the pixel data.

To further analyze the results we obtained with the robot dataset, the recognition rates were illustrated as heat maps by using a 30% training rate. These heat maps can also be seen as confusion matrices. These matrices were depicted in Figure 5 for each recognition algorithms and their inputs. The actual object IDs and the recognized object IDs are presented, respectively, as the row and the columns of the matrices. The densely populated main diagonal indicates the success in recognition while a sparsely populated matrix reveals a lower performance. The construction of these matrices enables us to understand how the algorithms successfully recognize similarly shaped objects. Figure 5(a), 5(b) and 5(c) show the confusion matrices constructed by using pixel data while Figure 5(d), 5(e) and 5(f) show the use of cortical representations (CR) as inputs.

In these visualizations, it can be observed that the elements in the matrices for pixel data are sparser. However, in the case of cortical representations, the elements tend to be more concentrated on the main diagonal. In order to explain this observation, we derived the average precision and recall metrics for the different inputs of the same algorithm. Moreover, to quantify these two metrics in a single value, we report F1 scores computed as the harmonic mean of precision and recall.

The F1 scores obtained for the recognition algorithms follow the same trend, ($CR_{F1} > Pixel_{F1}$), we previously observed in the accuracy values, ($CR_{accuracy} > Pixel_{accuracy}$). In particular, the F1 values in the case of pixel data as inputs to Softmax regression, single layer perceptron, and multilayer perceptron were computed as 0.76, 0.84, and 0.84, respectively. Whereas, the F1 values for the cortical representation were

0.97, 0.97, and 0.96. These results can also be observed from the confusion matrices for cortical representations. In fact, the main diagonal of these matrices is more populated than the ones constructed from pixel data.

We draw the following conclusions based on the presented results. Firstly, the use of the spatially pooled features (cortical representations) brings about a significant improvement in accuracy rates regardless of the recognition algorithm used. Secondly, the obtained accuracy rates suggest that using less complicated algorithms such as Softmax regression and single layer perceptron leads to better results when employing lower training rates. Moreover, the proposed recognition pipeline gives similar results on a dataset acquired by a robotic platform in an uncontrolled environment.

In our previous study, in addition to the result provided in this section, we utilized the same recognition pipeline by using the hand-crafted feature extraction methods such as Histogram Oriented Gradients (HOGs) and 3D color histogram on the COIL-100 dataset [16]. We point out that the results provided in [16] are well aligned with the outcomes of the results shared in this section.

VI. CONCLUSIONS

We presented our results on a rotation-invariant object recognition task performed by exploiting a spatial pooling mechanism to extract features (representations) from the COIL-100 and a robot image dataset in a mechanistic way. In that, we adapted one of Hierarchical Temporal Memory computational phase, to derive the cortical representations of preprocessed visual patterns. Then, we fed these representations into recognition algorithms to test their recognition performance.

The benchmarked results – from COIL-100 and the robot datasets– indicate that using representations instead of processed pixel data significantly improves the recognition accuracy even using a lesser amount of training data. Additionally, we constructed a new graspable object dataset that enables us to integrate the proposed approach into various robotic tasks involving vision or multiple sensory input data [17].

As a continuation of this study, we are in the process of developing a Neocortically inspired hierarchical framework which allows object representation by fusing multimodal (ie., color, depth and tactile) sensory input data. This framework will be firstly employed in a complex and physically realistic simulation environment (e.g., the Neurorobotics Platform [18]), then on the iCub robot. We will exploit this framework for multimodal object learning and online concept formation studies.

ACKNOWLEDGEMENT

This research has received funding from the European Unions Horizon 2020 Framework Programme for Research and Innovation under the Specific Grant Agreement No. 785907 (Human Brain Project SGA2) and the Specific Grant Agreement No. 720270 (Human Brain Project SGA1).

We would like to thank the anonymous reviewers for their valuable comments that have contributed in improving the content of the paper.

REFERENCES

- [1] N. Pinto, Y. Barhomi, D. D. Cox, and J. J. DiCarlo, "Comparing state-of-the-art visual features on invariant object recognition tasks," in *Applications of computer vision (WACV), 2011 IEEE workshop on*. IEEE, 2011, pp. 463–470.
- [2] R. Orús and H. Op De Beeck, "Invariance in visual object recognition requires training: a computational argument," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 3, p. 12, 2010. [Online]. Available: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/neuro.01.012.2010>
- [3] P. Loncomilla, J. R. del Solar, and L. Martínez, "Object recognition using local invariant features for robotic applications: A survey," *Pattern Recognition*, vol. 60, pp. 499 – 514, 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320316301054>
- [4] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91–110, 2004. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- [5] N. Dalal and B. Triggs, "Histograms of oriented gradients for human detection," in *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, vol. 1, June 2005, pp. 886–893 vol. 1.
- [6] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, "Surf: Speeded up robust features," *Computer vision–ECCV 2006*, pp. 404–417, 2006.
- [7] W. Zou, S. Zhu, K. Yu, and A. Y. Ng, "Deep learning of invariant features via simulated fixations in video," in *Advances in neural information processing systems*, 2012, pp. 3203–3211.
- [8] Y. LeCun, K. Kavukcuoglu, and C. Farabet, "Convolutional networks and applications in vision," in *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, May 2010, pp. 253–256.
- [9] J. Mnatzaganian, E. Fokoué, and D. Kudithipudi, "A mathematical formalization of hierarchical temporal memory's spatial pooler," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 3, p. 81, 2017. [Online]. Available: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/frobt.2016.00081>
- [10] J. Hawkins, S. Ahmad, and D. Dubinsky, "Hierarchical temporal memory including htm cortical learning algorithms," *Technical report, Numenta, Inc, Palto Alto* http://www.numenta.com/htmoverview/education/HTM_Cortical-LearningAlgorithms.pdf, 2010.
- [11] M. Kirtay, E. Falotico, A. Ambrosano, U. Albanese, L. Vannucci, and C. Laschi, *Visual Target Sequence Prediction via Hierarchical Temporal Memory Implemented on the iCub Robot*. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 119–130.
- [12] S. A. Nene, S. K. Nayar, and H. Murase, "Object image library (coil-100)," *Tech. Rep.*, 1996.
- [13] M. Kirtay, U. Albanese, L. Vannucci, E. Falotico, and C. Laschi, "A graspable object dataset constructed with the icub humanoid robot's camera," *Tech. Rep.*, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1170629>
- [14] M. Pietrofi, M. Wielgosz, and K. Wiatr, *Formal Analysis of HTM Spatial Pooler Performance Under Preddefined Operation Conditions*. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 396–405.
- [15] F. Chollet *et al.*, "Keras," <https://github.com/fchollet/keras>, 2015.
- [16] M. Kirtay, L. Vannucci, U. Albanese, A. Ambrosano, E. Falotico, and C. Laschi, "Spatial pooling as feature selection method for object recognition," in *Proc. European Symposium on Artificial Neural Networks, Bruges, Belgium, April 2018*.
- [17] T. Nakamura, T. Nagai, and N. Iwahashi, "Multimodal object categorization by a robot," in *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2007, pp. 2415–2420.
- [18] E. Falotico, L. Vannucci, A. Ambrosano, U. Albanese, S. Ulbrich, J. C. Vasquez Tieck, G. Hinkel, J. Kaiser, I. Peric, O. Denninger, N. Cauli, M. Kirtay, A. Roennau, G. Klinker, A. Von Arnim, L. Guyot, D. Peppicelli, P. Martínez-Cañada, E. Ros, P. Maier, S. Weber, M. Huber, D. Plecher, F. Röhrhein, S. Deser, A. Roitberg, P. van der Smagt, R. Dillman, P. Levi, C. Laschi, A. C. Knoll, and M.-O. Gwaltig, "Connecting artificial brains to robots in a comprehensive simulation framework: The neurorobotics platform," *Frontiers in Neurobotics*, vol. 11, p. 2, 2017.

Robot Kontrollü bir Eklemeli İmalat Sisteminin Geliştirilmesi

M. Enes GEBEL¹, Ali ŞEN¹, Oğuzhan YILMAZ²

¹ INTECRO Robotik Otomasyon Ar-Ge Müh. Mak. San Ve Tic. A.Ş.
Ankara, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
enes.gebel@intecro.com.tr, ali.sen@intecro.com.tr, oguzhanyilmaz@gazi.edu.tr

Öz — Eklemeli imalat teknolojileri, son zamanlarda proses ve malzeme çeşitliliğinin artmasıyla, endüstride de ilgi odağı haline gelmiştir. Özellikle metal malzemeler için eklemeli imalat süreçlerinin geliştirilmesiyle başta savunma ve havacılık olmak üzere endüstride bu yöntemler üzerine uygulamalar ve model çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Metal eklemeli imalat yöntemleri olan Toz yataklı ve toz beslemeli yöntemlerin yanı sıra tel beslemeli eklemeli imalat yöntemleri maliyet ve boyut sınırlarında çeşitli avantajlar getirmektedir. Bu çalışmada, Robotik kontrollü tel beslemeli ve ark ergitmeli eklemeli metodu irdelenmiş, sistem bileşenleri tanımlanmış, sistemin getirdiği avantaj ve dezavantajlar tartışılmış ve endüstriden bazı uygulama örnekleri verilmiştir.

Anahtar Kelimeler— Eklemeli imalat, WAAM, Robot, CMT

I. GİRİŞ

Eklemeli imalat bir ürünün, geometrik olarak parçalara ayrılarak çoğu zaman katman katman olmak üzere bu parçaların fiziksel olarak çeşitli proses ve yöntemlerle birbiri üzerine eklenmesiyle, üretildiği bir imalat metodudur. Eklemeli imalat çalışmaları öncelikle hızlı prototipleme amaçlanarak başlamıştır. Zamanla elde edilen teknolojik gelişmeler, özellikle metal ve kompozit malzeme proseslerinin geliştirilmesiyle elde edilen mekanik özelliklerden yola çıkılarak, hızlı prototipleme çalışmaları yerine son ürün amaçlı çalışmalar hız kazanmıştır. Metal üretim yöntemlerinde toz beslemeli ve toz yataklı sistemler günümüzde daha çok tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra tel beslemeli ve ark ergitmeli eklemeli imalat yöntemi (ing. WAAM) toz beslemeli ve toz yataklı sistemlere göre büyük boyutlu parçaların üretilebilirliği ve maliyet uygunluğu açısından avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Hedeflenen parçanın üretiminde kütük malzemeden boşaltılacak hammadde oranı arttıkça eklemeli imalatın özelliklerde WAAM metodunun geleneksel yöntemlere kıyasla maliyet avantajı artmaktadır.

Robotik WAAM sistemlerinde önemli problemlerden bir tanesi takım yolu oluşturmaktır. Campocasso ve ark. yaptıkları çalışmada robotik tel beslemeli eklemeli imalat süreçlerinde takım yolu oluşturma konusunda karşın zorluklar üzerine durmuş, bir polimer ekstrüzyon sisteminde yaptıkları deneysel çalışmadan yola çıkarak tel beslemeli robotik eklemeli imalat yönteminde bilgisayar destekli, çok eksenli, eklemeli imalat yaklaşımı ortaya koymuşlardır. Sistemlerinde 6 eksen robot ve 2 eksen pozisyoner kullanmışlardır. Yapılan çalışmada çok

eksenli sistemde yığma yolu oluşturmada karşılaşılan zorluklar ortaya konmuştur[1]. Compasso ve ark polimer bir sistem üzerinde çalışmışlarken Ding D ve ark. ise Robotik bir WAAM hücresinde yaptıkları çalışmada bir katmanda var olan yığma çizgileri arasındaki mesafeyi parametre olarak incelemişlerdir. Yaptıkları sayısal çalışmada bu değerin, tek bir yığma genişliğinin 0.738 katı olarak saptamışlardır.[2]. Tek bir çizginin yanı sıra Ding D ve ark. yaptıkları başka bir çalışmada Robotik bir WAAM hücresinde yaptıkları çalışmada WAAM metodu için yığma yolu oluşturma stratejisi üzerinde çalışmıştır. Yapılan çalışmada paralel, sarmal, zikzak, contour(çevresel) ve hibrid yığma stratejilerinin farklı şekillerde ve ince duvarlarda geometriye etkisi araştırılmıştır. [3]. Ding D ve ark bir başka çalışmada, çalışmalarını derinleştirerek bütün bir WAAM kontrol programı üzerinde çalışmışlardır. WAAM metodu için otomatik üretim sistemi geliştirilmesi üzerine bir sistem kurgulanmış. Sistemde CAD modelden yığma yollarının bilgisayar destekli elde edilmesi ve yığma parametrelerinin manuel olarak ayarlanması öngörülmüştür. Sistem içerisinde geometrik hassasiyeti ve iç boşlukları yığma yollarına göre kontrol edip yığma yollarını revize eden bir algoritma çalışmaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen numuneler geometrik olarak incelenmiştir. [4]

Takım yolu oluşturulduktan sonra kullanılacak malzeme ve üretilecek olan parçanın mekanik özellikleri endüstriyel uygulamalar için önem arz etmektedir. Wakas A. ve arkadaşları Robotik bir WAAM hücresinde ER70S-6 teli kullanarak örnek parçalar üretmişlerdir. Bu parçalara yığma yoluna dik ve paralel olmak üzere çarpma tokluğu deneyleri uygulamışlar ve yüksek çarpma tokluğu değerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca numuneleri sertlik deneyine tabi tutup, numuneler üzerinde içyapı incelemesi de yapmışlardır [5]. Ge J ve ark. ise 2Cr13 teli kullanmışlardır. Numuneleri ince duvar geometrisinde elde etmişlerdir. Yığılan parçada katmanlar arasında ve katman içinde mikro yapı incelemesinde bulunmuşlardır [6]. Ge j. ve ark yaptıkları bir diğer çalışmada 2Cr13 tel kullanarak ince duvar geometrisinde numuneler elde etmişlerdir. CMT metodu kullanılarak elde edilen numunelerde yapılan incelemelerde proses kararlılığı, yığma yönü dikkate alınarak daha detaylı mikro yapı incelemeleri ve farklı katmanlardaki mekanik özellikler araştırılmıştır[7]. Horgar A ve ark. yaptıkları çalışmada AA5183 tel kullanarak ürettikleri parçaya çekme testi uygulamışlar ve parçadan kesit alarak yığma kalitesini incelemişlerdir. Akma ve çekme dayanımını

sırasıyla 145 ve 293 MPa bulmuşlardır. Sistemin gaz gözenekliliği ve iç çatlaklar bakımından iyileştirilebileceğini savunmuşlardır. [8]

II. SİSTEM BİLEŞENLERİ

Robotik WAAM sistemi Manipülâtör, Kontrolcü, Kaynak Makinesi ve Kaynak Torcu, Pozisyoner olmak üzere temel bileşenlerden oluşmaktadır. Aşağıda bu temel bileşenler tanıtılmış görevleri ortaya konmuştur.

Bu çalışmada WAAM yöntemi sistem donanımları, yazılımları ve yığma stratejileri tanıtılıp endüstrideki fırsatlar tartışılarak, İntecro bünyesinde geliştirilen WAAM tezgahı ile elde edilen numuneler gösterilmiştir. Çalışma içerisinde bir katmanda yığma yolundaki keskin dönüşler, numune yüksekliği ve eğim açısı parametrelerinin parça üretimine etkisi irdelenerek tartışılmıştır.

A. Manipülâtör

Manipülâtör; bir nesneyi bilgisayar kontrollü olarak yer değiştirmemize olanak sağlayan servo kontrollü mekanik sistemdir. Robotik WAAM uygulamasında Kaynak Torcu Manipülâtörün ucuna son işlevci olarak yerleştirilir ve robot konfigürasyonu kaynak torcuna göre ayarlanır.



Şekil 1 Manipülâtör

Manipülâtör sayesinde Bilgisayar destekli olarak ürettiğimiz yığma yollarını belirlenen hızda istenilen torç oryantasyonunda yığma yapılmasını sağlar.

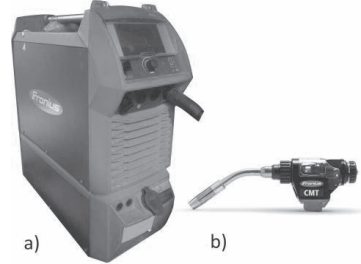
B. Kontrolcü ve Pendant

Manipülâtörün istenilen yörüngede ve istenilen yönelim açılarıyla hareket etmesini, eş zamanlı olarak pozisyonerlerin hareketlerini, yığma esnasında kısmen kaynak makinesini kontrol eden, sistemin algoritmalarının gömülü olduğu endüstriyel bilgisayardır.

C. Kaynak Makinesi ve Kaynak Torcu

WAAM uygulamasında en büyük zorluklardan biri ısı girdisidir. Isı girdisi kontrol edilmezse parçada çarpılmalar başta olmak üzere sıkıntılar meydana gelmektedir. Isı girdisi çok fazla olması halinde yığma esnasında geometriyi bozucu akmlar gözlemlenmektedir. Bu sebeple WAAM uygulamalarında önlemler alınmaktadır. Soğutucu tabla kullanılması, katmanlar arası bir süre bekleme bunlardan bazılarıdır. Bunlarla birlikte Soğuk Metal Transferi (CMT)

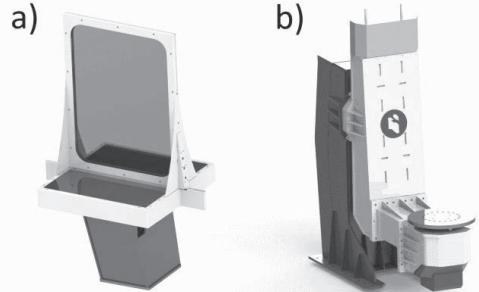
olarak isimlendirilen yığma metodu sıklıkla kullanılmaktadır. Bu durumun oluşmasında malzeme özellikleri de etkili bir parametredir. Şekil 2' de sistemde kullanılan Kaynak makinesi ve kaynak torcu gösterilmektedir.



Şekil 2 a) Kaynak makinesi b) CMT Drive Torç

D. Pozisyoner

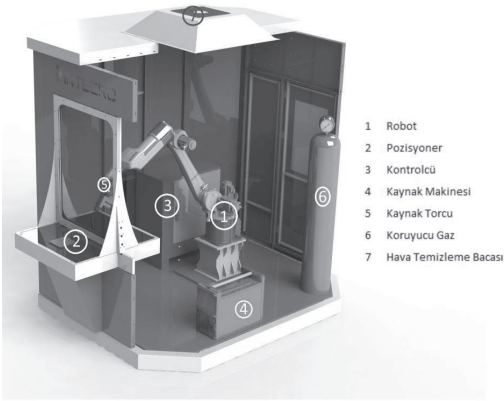
Pozisyonerler; üretilen parçanın monte edildiği, tek eksen ya da iki eksenle döndürülerek yere göre parçanın oryantasyonunu değiştirmemize olanak sağlayan ekipmanlardır. Manipülâtörün erişim kabiliyetini artırmak ile birlikte pozisyonerler sayesinde üretim ve tasarım kabiliyeti de artar. WAAM uygulamalarında pozisyonerler inşa yönünü değiştirerek birçok eklemeli imalat metodunda zorunlu olarak kullanılan destek yapılarına olan ihtiyacı büyük ölçüde ortadan kaldırır. Şekil 3'de tek eksen ve 2 eksenli pozisyonerler gösterilmektedir. Deney düzeneğinde tek eksen pozisyoner kullanılmıştır.



Şekil 3 a) Tek eksen pozisyoner b) 2 Eksen pozisyoner

E. Offline Programlama

Robotik sistemlerde manipülâtöre bir hareketi öğretmede 2 ayrı yöntem kullanılmaktadır. Birincisi manipülâtöre bağlı son işlevcinin operatörün elindeki pendant üzerinden ilgili noktalara götürülerek robota o noktalara ait konum ve yönelimi tanıtmak, ikincisi ise bilgisayar yardımıyla sanal ortamda ilgili geometrinin CAD dosyası üzerinden bu yolların robot kodunu çıkarmaktır. İkinci yöntem Offline programlama olarak isimlendirilmektedir. Robotik eklemeli imalatla Offline programlama, dilimleme yazılımlarıyla elde edilen katmanların ve bu katmanlardaki tarama yollarının robota tanıtılmasında çok önemli bir yere sahiptir.



Şekil 4 Robotik WAAM eklemeli imalat hücresi

Şekil 4'te Robotik WAAM sisteminin bileşenleri ve sistem içindeki yeri belirtilmiştir.

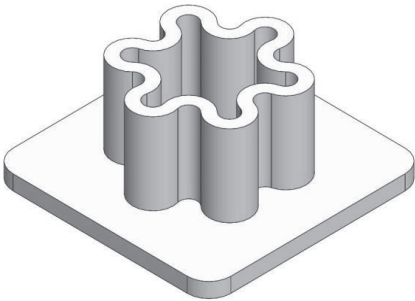
III. MATERYAL METOT

Robotik WAAM metoduyla ürün elde edilmesi için kaydedilen aşamalar Şekil 5'te gösterilmektedir.

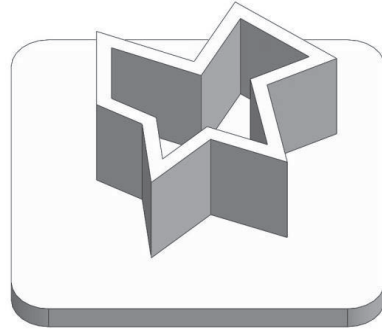


Şekil 5 Akış şeması

Üretilmesi istenen parçalar öncelikle CAD ortamında çizilmiştir. CAD datası çizilen numuneler Şekil 6 ve Şekil 7'da gösterilmiştir.

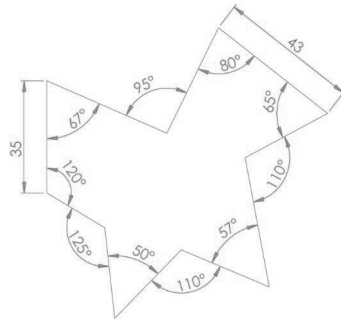


Şekil 6 1. Numune CAD görüntüsü



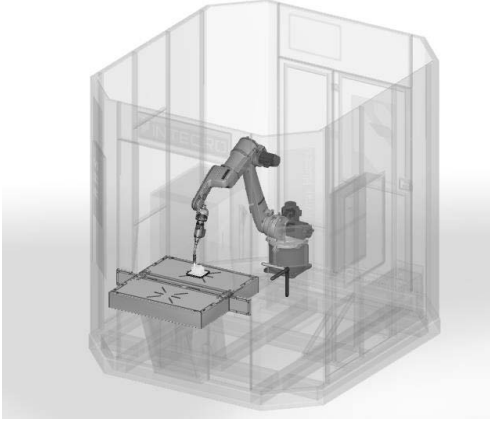
Şekil 7 2. Numune CAD görüntüsü

Yığma esnasında bir katman içerisinde takım yolu mutlaka bir dönüşe sahip olmak zorundadır. Bu dönüşlerde prosesin davranışlarını gözlemlemek için zikzak şeklinde içerisinde iç bükü ve dış bükü çeşitli açılarının olduğu bir geometri 46 mm boyunca yükseltmiştir. Parçaya ait CAD data Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8 1. Numune geometrisinin teknik resmi

Parçanın CAD datası elde edildikten sonra, CAD data bir dilimleme programı yardımıyla ilgili yöntemin gereklilikleri göz önüne alınarak katman yüksekliği, dikiş genişliği gibi parametreler belirlendikten sonra parçanın üretilmesi için kullanılacak olan takım yolları elde edilmiştir. Sistemde KR 6 R1820 arc HW robotu, Offline programlama olarak Robotmaster ticari ürünü kullanılmıştır.



Şekil 9 Offline Programlama

Numuneler AlMg-5 teli ile ve CMT teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Numuneler üretilirken altlık olarak 10mm kalınlıkta Alüminyum 6061 sac kullanılmıştır. Kullanılan kaynak makinesi sinerjik olup yığma parametreleri 75Amper akım, 11.5Volt gerilimde, tel sürme hızı 5m/dk ve robot TCP hızı 50cm/dk olarak ayarlanmıştır.

1.ve 2. Numuneler üretildikten sonra eklemeli imalatla önemli bir konu olan inşa yönü ile parça geometrisi arasındaki açısal farklılık konusu incelenmesi yapılması için 1.numuneye 15° ve 30° eğim açıları verilerek farklı açısal değerlerde parçalar üretilmiştir. Bu açısal değerlerde katman sayısı artırılarak denemeler yapılmıştır. İlk yapılan denemelerde katman sayısı 40 olarak denenmiş, 70 ve 90 olarak katman sayıları artırılmıştır.

IV. UYGULAMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Geometrilere belirlendikten sonra offline olarak robot programlanmış, kaynak makinesi parametreleri ayarlanmış aşağıda gösterilen çıktılar elde edilmiştir.



Şekil 10 2 numaralı numune

Şekil 10'de görülen numunede, üretim sırasında açısal geçişlerde meydana gelen yığılma durumu gözlemlenmiştir. Dış büyük veya iç büyük fark etmeksizin dönüş açısı küçüldükçe yığılmanın arttığı bu durumun parça yüksekliği arttıkça kaynak teli boyu kısalmasına sebebiyet verdiği için geometrik bozukluğun yanı sıra kaynak parametrelerinin de o bölgede, parça yükseldikçe, sorun olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 11 1 numaralı numune

Şekil 11'da geometride açısal geçişler yarım dairelerle yumuşatılmıştır. Bu durumun dönüşlerde meydana gelen yığılmaların önüne geçtiği görülmüştür. İnce düz duvar olarak inşa edilen geometri başarılı bir şekilde üretilmiştir.



Şekil 12 15° eğimli Numune

Düz duvarın başarılı bir şekilde inşa edilmesinden sonra geometride parça inşa yönü boyunca 15° ve 30° olmak üzere sabit açılar belirlenmiş, bu açısal değerlerin elde edilebilirliği incelenmiştir. Eklemeli imalatla destek yapıları ve destek yapılarının gerekliliğinin belirlenmesi parça imalatı için önemli bir konudur. WAAM sistemlerinde parçanın bağlanacağı 2 eksen bir pozisyonere ile inşa yönünün değiştirilebilmesi destek yapılarına ihtiyacı büyük ölçüde azaltmaktadır. Bu durum diğer metal eklemeli imalat yöntemlerine göre WAAM'ın avantajlarından biridir. Destek yapılarının kullanılmasında bir önemli faktör de ısı uzaklaştırılmasıdır. Bu çalışmada ısı girdisi ve soğutma yöntemleri üzerinde bir çalışma yapılmamıştır.



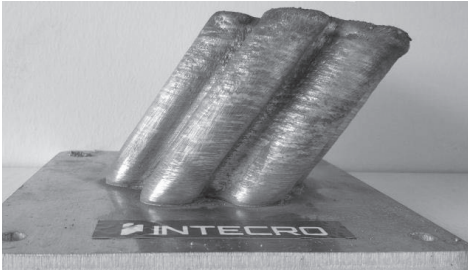
Şekil 13 Numune (60 mm yükseklik, 30° eğim)

2 eksen pozisyonere ile destek yapılarına duyulan ihtiyaç ne kadar azalsa da, yöntemde inşa yönü ve geometrideki eğim açısı arasındaki ilişki önemini korumaktadır. Şekil 12 ve Şekil 13'de eğim açıları artırılarak parça geometrisinin elde edilmesi irdelenmiştir. Elde sonuç 30 derece eğim açısında başarılı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 14 30° eğimli numune

Çalışmaların devamında eğim açısının sürekliliği tartışılmış ve numuneler yükseltilmeye karar verilmiştir. Katman sayısı sırasıyla 70 ve 90'a çıkarılmıştır. 84 mm ve 115 mm yüksekliğinde iki ayrı numune daha üretilmiştir. 84 mm'lik numune sorun gözlenmesi de, yükseklik arttıkça eğim 30°'lik eğim açısının sorun oluşturduğu gözlenmiştir. Şekil 15 ve Şekil 16 'da ilgili numuneler gösterilmektedir. 115 mm yüksekliğe sahip numune yüksekliğe bağlı eğilme gözlenmiştir. Numuneler herhangi bir soğutma sistemi kullanılmadan ve katmanlar arası bekleme yapılmadan üretilmiştir. Geometrinin eğilmesi yüksekliğe bağlı olabileceği gibi zamanla ısı girdisine ve ısı birikmesine bağlı olabileceği de düşünülmektedir.



Şekil 15 Numune (30° eğim, 84 mm yükseklik)



Şekil 16 Numune (30° eğim ve 115 mm yükseklik)

Bu çalışmada robotik bir WAAM sistemi ile katman içinde torç dönüş açılarının etkileri araştırılmış ve sonuç olarak açılar azaldıkça dönme noktalarında yığılmalar olduğu gözlenmiştir. Dönüşlerin keskin olmadığı dairesel geçişli parça üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çalışma içerisinde ikinci bir başlık olarak eğim açıları incelenmiş, 15° ve 30° eğimde parçalar üretilmiştir. İlk üretilen numuneler üretimin başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışma içinde incelenen bir diğer başlık ise eğim açıları ve yükseklik arasındaki davranış biçimidir. Parçalar yükseltildikçe katman düzlemi eğilmeye başlamıştır.

KAYNAKÇA

- [1] S.Campocasso, M.Chalvina, A.-K.Reichlerb, R.Gerbersb, K.Dröderb, V.Hugela, F.Dietrichb "A framework for future CAM software dedicated to additive manufacturing by multi-axis deposition", *Procedia CIRP*, Volume 78, Pages 79-84, 2018
- [2] Donghong Ding, Zengxi Pan, Dominic Cuiuri, Huijun Li, "A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 31, Pages 101-110, February 2015.
- [3] Donghong Ding, Zengxi Pan, Dominic Cuiuri, Huijun Li, "A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 34, Pages 8-19, August 2015
- [4] Donghong Ding, Zengxi Pan, Dominic Cuiuri, Huijun Li, Stephenvan Duin, Nathan Larkin, "Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 39, Pages 32-42, June 2016
- [5] Ali Waqas, Qin Xiansheng, Xiong Jiangtao, Yang Chaoran, Liu Fan, "Impact toughness of components made by GMAW based additive manufacturing", *Procedia Structural Integrity*, Volume 13, Pages 2065-2070, 2018.
- [6] Jinguo Ge, Jian Lin, Hanguang Fu, Yongping Lei, Rongshi Xiao, "A spatial periodicity of microstructural evolution and anti-indentation properties of wire-arc additive manufacturing 2Cr13 thin-wall part, *Materials & Design*, Volume 160, Pages 218-228, 15 December 2018.
- [7] Jinguo Ge, Jian Lin, Yan Chen, Yongping Lei, Hanguang Fu, "Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol 748, Pages 911-921, 2018.
- [8] A. Horgar, H. Fostervoll, B. Nyhus, X. Ren, M. Eriksson, O.M. Akselsen, "Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire", *Journal of Materials Processing Tech.*, Vol 259, Pages 68-74, 2018.

YAZAR DİZİNİ

Acer, Merve - <i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	70
Ada, Ece - <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>	146
Akdoğan, Taylan - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	112
Akgün, Gazi - <i>Marmara Üniversitesi</i>	98
Akın, Levent - <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>	146
Albanese, Ugo - <i>Scuola Superiore Sant'Anna</i>	184
Altınkaynak, Atakan - <i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	70
Altuntaş, Nihal - <i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	16
Amasyalı, Mehmet Fatih - <i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	16
Apaydın, Ardan - <i>Sabancı Üniversitesi</i>	159
Arditi, Emir - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	127
Arıkan, Kutluk Bilge - <i>TED Üniversitesi</i>	105
Aşık, Okan - <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>	178
Askari, Mohammad - <i>Bilkent Üniversitesi</i>	27
Barotov, Farukhzhon - <i>Sabancı Üniversitesi</i>	172
Baygöl, Fatih - <i>Polonom Teknoloji</i>	16
Bayram, Kadir - <i>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi</i>	139
Bebek, Özkan - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	1, 78, 154, 165
Boğatarkan, Aysu - <i>Sabancı Üniversitesi</i>	172
Bölat, Bülent - <i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	32
Cankurt, Tolga - <i>Hidropar Hareket Kontrol Teknolojileri Merkezi</i>	53
Coruk, Sinan - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	92
Çakmak, Furkan - <i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	16
Çalışkan, Umut - <i>Sabancı Üniversitesi</i>	159
Çetinkaya, Furkan - <i>İstanbul Gedik Üniversitesi</i>	132
Çoruhlu, Gökay - <i>Sabancı Üniversitesi</i>	172
Dede, Mehmet İsmet Can - <i>İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü</i>	8
Demirtaş, Serhat - <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>	53
Dibekçi, Ayşan - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	1
Dilibal, Savaş - <i>İstanbul Gedik Üniversitesi</i>	64, 132
Emeç, Caner - <i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	119
Emil, Mehmet - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	165
Emre, Sinan - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	59

Erbaş, Mehmet Dinçer - Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi	84
Erdem, Esra - Sabancı Üniversitesi	172
Erdoğan, Elçin - İnovasyon Muhendislik	47
Ermann, Selen - Özyeğin Üniversitesi	165
Ertuğrul, Şeniz - İzmir Ekonomi Üniversitesi	154
Ersoy, Onur - Özyeğin Üniversitesi	32
Eryılmaz, Hatice Kübra - Boğaziçi Üniversitesi	178
Falotico, Egidio - Scuola Superiore Sant'Anna	184
Gebel, M.Enes - INTECRO Robotik Otomasyon.....	190
Gözüküçük, Mehmet Ali - Özyeğin Üniversitesi.....	112
Güç, Ahmet Furkan - Bilkent Üniversitesi	40
Gülnergiz, Emre Tuğberk - İstanbul Gedik Üniversitesi.....	64
İçli, Devkan - İstanbul Gedik Üniversitesi	132
Kaleci, Burak - Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	139
Kaplanoğlu, Erkan - Marmara Üniversitesi.....	98
Karabulut, Mehmet Gökem - İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü.....	8
Karakaya, Esat - İstanbul Gedik Üniversitesi	132
Kırtay, Murat - Scuola Superiore Sant'Anna	184
Kolaylı, Berk - Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	139
Lale, Burak - İstanbul Gedik Üniversitesi	132
Laschi, Cecilia - Scuola Superiore Sant'Anna	184
Macit, Umut - İstanbul Gedik Üniversitesi	132
Mahkam, Nima - Bilkent Üniversitesi	22
Olğar, Mert Can - İstanbul Teknik Üniversitesi	32
Oral, Ömer - Orta Doğu Teknik Üniversitesi	105
Oruç, Doğan - İstanbul Teknik Üniversitesi	32
Özcan, Onur - Bilkent Üniversitesi	22, 27, 40
Özgüven, Ömer Başar - Bilkent Üniversitesi	22
Öztop, Erhan - Özyeğin Üniversitesi	78, 127
Özvin, Murat - Özyeğin Üniversitesi	1
Patoğlu, Volkan - Sabancı Üniversitesi	159, 172
Qureshi, Muhammad Sarmad - Özyeğin Üniversitesi.....	1
Şahin, Haydar - İstanbul Gedik Üniversitesi	64
Şahin, Hürkan - Yıldız Teknik Üniversitesi.....	119
Salman, Umut Can - İstanbul Teknik Üniversitesi	32
Samankan, Shahrada - İstanbul Teknik Üniversitesi	70

Samur, Evren - <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>	53
Sarıözkan, Şebnem - <i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	119
Şen, A. Ali - <i>INTECRO Robotik Otomasyon</i>	190
Şendur, Polat - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	59
Sevinç, Hasan - <i>İstanbul Teknik Üniversitesi</i>	70
Soğur, Emre Hilmi - <i>Sabancı Üniversitesi</i>	172
Solak, Ali - <i>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi</i>	139
Sönmez, Enes - <i>İstanbul Gedik Üniversitesi</i>	132
Sunal, Begüm - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	78
Tatar, Barış - <i>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi</i>	139
Temel, Zeynep - <i>Carnegie Mellon University</i>	70
Turgut, Ali Emre - <i>Orta Doğu Teknik Üniversitesi</i>	105
Turgut, Kaya - <i>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi</i>	139
Uğurdağ, Hasan Fatih - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	112
Uğurlu, Barkan - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	59, 92
Ülker, Osman - <i>Muş Alparslan Üniversitesi</i>	98
Uludoğan, Gökçe - <i>Boğaziçi Üniversitesi</i>	178
Uslu, Erkan - <i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	16
Vannucci, Lorenzo - <i>Scuola Superiore Sant'Anna</i>	184
Yaşar, Ali - <i>Sabancı Üniversitesi</i>	165
Yavuz, Sırma - <i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	16
Yekdanek, Ayşe Asena - <i>Yeditepe University</i>	64
Yeldan, Alper - <i>Bilkent Üniversitesi</i>	27
Yeşildirek, Aydın - <i>Yıldız Teknik Üniversitesi</i>	119
Yıldırım, Mehmet Can - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	59, 154
Yıldırım, Suavi - <i>Özyeğin Üniversitesi</i>	165
Yıldırım, Batuhan - <i>Sabancı Üniversitesi</i>	172
Yılmaz, Mert - <i>İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü</i>	8
Yılmaz, Oğuzhan - <i>Gazi Üniversitesi</i>	190
Yücel, Hikmet - <i>İnovasyon Mühendislik</i>	47
Yuğuran, Esra - <i>İstanbul Gedik Üniversitesi</i>	132
Yumrukçal, Zafer - <i>ASELSAN</i>	40



Özyeğin Üniversitesi Yayınları
Nişantepe Mahallesi, Orman Sokak, No: 34-36
34794 Alemdağ, Çekmeköy/İstanbul

<http://yayinevi.ozyegin.edu.tr>
yayinevi@ozyegin.edu.tr

ISBN: 978-605-5625-16-0



9 786055 625160