



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



İŞBİRLİKÇİ BİR ROBOTUN ARI
ALGORİTMASI KULLANARAK OPTİMUM
EMPEDANS KONTROLÜ

Erdem KARAKOYUN

YÜKSEK LİSANS

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Erdem KARAKOYUN tarafından hazırlanan “İşbirlikçi Bir Robotun Arı Algoritması Kullanarak Optimum Empedans Kontrolü” adlı tez çalışması 19/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ

.....

Danışman

Prof. Dr. Mete KALYONCU

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arif ŞEN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Erdem KARAKOYUN

19.06.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

İŞBİRLİKÇİ BİR ROBOTUN ARI ALGORİTMASI KULLANARAK OPTİMUM EMPEDANS KONTROLÜ

Erdem KARAKOYUN

**Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim
Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2023, 86 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Mete KALYONCU
Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arif ŞEN
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ**

Bu çalışmada, 7 serbestlik dereceli Kuka LBR iiwa 14 R820 serisi işbirlikçi robotun optimum empedans kontrolcü tasarımı yapılmıştır. İlk olarak robot kolun D-H parametreleri belirlenmiş bu parametreler yardımı ile ileri ve ters kinematik analizi ve sayısal hesaplamaları yapılmıştır. Matematiksel modelin elde edilmesinden sonra sistemin katı modeli MATLAB programına aktarılmıştır. Empedans ve PID kontrolcü MATLAB/Simulink programında tasarlanmıştır. Son olarak Arı Algoritması kullanılarak tasarımı yapılan kontrolcünün optimizasyonu yapılmıştır. Optimize edilen kontrolcünün çalışma performansı; dışarıdan kuvvet uygulanmadan robot kolun istenilen yörüngeyi takip etmesi, hareketsiz duran robota üç ekseninde kuvvet uygulanması, hareket halinde robot kola dışarıdan kuvvet uygulanması, hareket halinde iken robotun düz bir engelle karşılaşması ve hareket halinde iken robotun eğik bir engelle karşılaşması olmak üzere beş farklı senaryoda incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafiklerle sunulmuştur. Geliştirilen metodun etkinliği sayısal uygulamalarla gösterilmiştir. Bu kapsamda robotun çalışmasını denetleyen optimize edilmiş kontrolcünün çok düşük hata değerleri ile sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Beş farklı senaryoda da robot kol, az miktarda aşmalar ile salınım yapmadan ve kalıcı durum hatası oluşmadan, hareketsiz durduğu durumlar için başlangıç konumuna başarılı bir şekilde tekrar gelmiş ve hareket halindeki durumlar için ise kendisinden istenilen yörüngeleri başarılı bir şekilde tamamlayabilmiştir.

Anahtar kelimeler: Arı Algoritması, Empedans Kontrol, İşbirlikçi Robot, PID Kontrol, Robot Kol, Optimizasyon

ABSTRACT

MS THESIS

**OPTIMUM IMPEDANCE CONTROL OF A COLLABORATIVE ROBOT USING
THE BEES ALGORITHM**

Erdem KARAKOYUN

**Konya Technical University Institute of Graduate Studies Department of Mechanical
Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2023, 86 Pages

Jury

Prof. Dr. Mete KALYONCU

Asst. Prof. Dr. Muhammed Arif ŞEN

Asst. Prof. Dr. Hasan Hüseyin BİLGİÇ

In this study, the optimum impedance controller of the Kuka LBR iiwa 14 R820 series collaborative robot with 7 degrees of freedom is designed. First, the D-H parameters of the robot arm are determined and with the help of these parameters, forward and inverse kinematics analysis and numerical calculations are made. After obtaining the mathematical model, the solid model of the system is transferred to the MATLAB program. Impedance and PID controller are designed in MATLAB/Simulink program. Finally, the controller designed using the Bees Algorithm is optimized. The operating performance of the optimized controller is examined in five different scenarios which are following the desired trajectory of the robot arm without external force, applying force in three axes to the robot standing still, applying external force to the robot arm in motion, robot encountering a straight obstacle while in motion, and robot encounters an inclined obstacle while in motion. The obtained results are presented with graphics. The effectiveness of the developed method is demonstrated by numerical applications. In this context, it has been observed that the optimized controller controlling the operation of the robot gives results with very low error values. In five different scenarios, the robot arm successfully has returned to the starting position for the situations where it is stationary and has been able to successfully complete the desired trajectories for the situations in motion, without oscillating with little overshoots and without any steady-state error.

Keywords: The Bees Algorithm, Impedance Control, Collaborative Robot, PID control, Robot Arm, Optimization

ÖNSÖZ

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar için yedi serbestlik dereceli işbirlikçi bir robot seçilmiştir. İşbirlikçi robotun yedi serbestlik dereceli olmasının ve bu çalışmada optimizasyona yer verilmesinin ayrı ayrı motivasyonları mevcuttur.

İlk olarak burada daha düşük serbestlik dereceli bir robot yerine yedi serbestlik dereceli robot seçilmesindeki motivasyon, özellikle işbirlikçi robot başlığı altında çalışan bu robotun herhangi bir engelle karşılaştığında, daha düşük serbestlik dereceli robotların aksine, fazladan olan bir eklemi sayesinde sahip olduğu esneklik ile engeli aşarak çalışmasına devam edebilme kapasitesinin yüksek olmasıdır. Literatürde yapılmış olan çeşitli çalışmalarda, yedi serbestlik dereceli robot kolların hareket kabiliyetleri, deneylerle ve gerçek çalışma ortamındaki uygulamalarla gösterilmiştir.

İkinci olarak bu tez kapsamında seçilen robotun kontrol parametrelerine optimizasyon uygulanmasındaki motivasyon ise, robot kolun herhangi bir engelle karşılaştığında veya henüz harekete başlamadığı durumda bile kendisine uygulanacak bir kuvvete karşı kendisini bir an önce adapte ederek, zaman ve enerji kaybı oluşturmadan, en hızlı şekilde bozuculara reaksiyon göstererek, optimum bir şekilde tekrar kendisinden istenen çalışma yörüngesine devam etmesi veya başlangıç konumuna en hızlı şekilde kayıpları minimize ederek ve kalıcı hatalar oluşturmadan dönebilmesidir. Ayrıca uygulanan optimizasyon ile istenilen kuvvet aralıklarında robot kolun verimli ve güvenli çalışmasının sağlanmasıdır. Yani yapılan optimizasyon ile robot kol engelle veya kuvvetle karşılaştığında bunları hem en hızlı şekilde hem de en emniyetli şekilde aşarak kendisinden istenilen görevi başarıyla yapabilmesidir.

Tez çalışmamda, bütün bu motivasyonları bana aşılaman, güncel ve gelişmekte olan bir konuyu seçmemde bana yol gösteren, çalışmanın her anında desteğini esirgemeyen ve potansiyelimi zorlamama teşvik eden danışmanım Prof. Dr. Mete KALYONCU 'ya sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, çalışmanın nihayete ermesinde katkıları çok olan Dr. Abdullah ÇAKAN 'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak manevi desteklerini hep hissettiğim, beni varlıklarıyla motive eden anneme, babama ve kardeşlerime en kalbi duygularıyla teşekkür ediyorum.

Erdem KARAKOYUN
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Tezin Önemi	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. 7 SERBESTLİK DERECELİ İŞBİRLİKÇİ ROBOTUN MODELLENMESİ	20
3.1. Kinematik Analiz	21
3.1.1. İleri Kinematik	21
3.1.2. Ters Kinematik	23
3.2. Jakobiyen ve Tekillik	27
3.2.1. Konum Tekilliği Problemi	29
3.2.2. Oryantasyon Tekilliği Problemi	30
3.3. Dinamik Analiz	32
4. KONTROLCÜ TASARIMI VE OPTİMİSAZYONU	34
4.1. PID Kontrol	35
4.2. Empedans Kontrol	36
4.3. Arı Algoritması ve Optimizasyon	39
5. SAYISAL UYGULAMALAR	42
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	63
EKLER	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

x, y, z	: Koordinatlar
θ	: Açık (z ekseninde)
α	: Açık (x ekseninde)
d	: Uzunluk (z ekseninde)
a	: Uzunluk (x ekseninde)
ψ	: Kol açısı
τ	: Tork
m	: Kütle
f	: Temas kuvveti
M	: Kütle katsayısı
K	: Yay katsayısı
B	: Sönüm katsayısı
$G(s)$: Transfer fonksiyonu
K_p	: Oransal kazanç
K_i	: İntegral kazanç
K_d	: Türevsel kazanç

Kısaltmalar

AA	: Arı Algoritması
D-H	: Denavit–Hartenberg
Dof	: Serbestlik Derecesi
Emp	: Empedans Kontrolcü
iiwa	: Akıllı Endüstriyel Çalışma Asistanı
LBR	: Düşük Kütleli Robot
MATLAB	: Sayısal Hesaplama ve Dördüncü Nesil Programlama Yazılımı
PID	: Oransal-İntegral-Türevsel Kontrolcü

1. GİRİŞ

İşbirlikçi robotlar gelişen teknoloji ile klasik endüstriyel robotların yerini almaya başlayan nispeten yeni bir teknolojidir. Çerçevesi yeni bir konumda insanla temassız çalışan endüstriyel robotların aksine, insanla birlikte aynı ortamda çalışabilen işbirlikçi robotlar endüstride ve akademik alanda giderek artan bir ilgi görmektedir.

İşbirlikçi robotların, küçük ve ortak ölçekli şirketlerden büyük ölçekli çok uluslu şirketlere kadar, makina besleme, kalite kontrol, yapıştırma-dağıtma, taşıma, çapak alma, montaj, cıvatalama, zımparalama, paketleme, etiketleme, enjeksiyon kalıplama, CNC, kaynak, laboratuvar analiz, test ve örnek alma gibi birçok alanda kullanımı bulunmaktadır.

İşbirlikçi robotlar, basit kurulum, basit programlama, değişken ortama uyum, güvenli, az ön yatırım, hızlı yatırım getirisi gibi özelliklerden dolayı geleneksel robotların yerine tercih edilmektedir. Ayrıca işbirlikçi robotlar beraber çalıştıkları insanların iş yükünü hafifletip, sürekli tekrarlanan işleri yaparak daha konforlu bir ortam sunmakla birlikte, insan eliyle yapılamayacak hassas işlerde de iş arkadaşlarına yardımcı olmaktadır.

Üzerinde çalışılacak robotun iyi kontrol edilebilmesi, istenen işlevi yerine getirebilmesi için gerekli olan en önemli parametrelerden biridir. Genel olarak konum veya kuvvet kontrolünün sağlanması gerekmektedir. İşbirlikçi robotlarda konum ve kuvvet kontrolü konusunda çeşitli yöntemler bulunmaktadır ve literatürde bu yöntemler ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Hangi kontrol yönteminin seçileceği robotun kullanım alanına ve yapacağı işe göre değişim göstermektedir. Örneğin robotun çevre ile temasının zayıf olduğu, çalışma ortamında insan ya da ekipman bulunmayacak görevlerde, konum kontrol yöntemleri yeterli olabilmektedir. Ancak manipülâtörün çevre ile etkileşiminin olabileceği ya da istenilen işi yapabilmesi için çevre ile etkileşiminin olması gerektiği görevlerde ise kuvvet kontrolünün de bulunması gerekmektedir.

Bu çalışmada seçilen robotun 7 serbestlik dereceli olması, insan veya herhangi bir engel bulunan ortamda, robotun istenilen konuma ulaşabilmesinde bir esneklik sağlamaktadır. Diğer bir deyişle 6 serbestlik dereceli robotun engeli aşım ulaşamadığı noktalara 7 serbestlik derecesi ile ulaşılabilir.

Bu kapsamda bu tezde seçilen robotun matematiksel modeli çıkartılıp, katı model MATLAB/SimScape ortamına doğrudan aktarılmış ve robota ait kontrol sistemi MATLAB/Simulink ara yüzünde modellenmiştir. Bu model ile işbirlikçi robota ait uzuvların istenilen açısal konumlara gelebilmesi ve belirli kuvvet aralığında emniyetli çalışabilmesi için Arı Algoritması ile PID kontrolcü ve empedans kontrolcü optimizasyonu sağlanmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Robotlar genel bir ifade ile, insanlar tarafından yapılmasının tehlikeli, problemlili ya da yorucu ve hatta daha maliyetli olabileceği işlerde kullanılan ağır otomasyon işçileri olarak tanımlanabilir. Kullanılan işbirlikçi robotlar, onları tasarlayan insandan bağımsız olarak kendi başlarına bir şey ifade etmemektedirler, dolayısıyla her zaman belli bir çalışma sürecine entegre edilerek kullanılmaktadırlar. Bu sebepten kullanılacak robotun optimizasyonu, fizibilitesi, verimliliği, emniyeti gibi konuların değerlendirilmesi gerekmektedir.

İnsan ile çalışılmasında birçok avantaja sahip olmalarının yanında işbirlikçi robotların iş arkadaşı insanlarla temasında yaralanmalara veya daha ciddi sonuçlara sebep olmamaları için öncelikle keskin kenarlara sahip olmaması ve insana temasında zarar vermeyecek bir kontrol mekanizmasına sahip olması gerekmektedir. Bu kontrolde konum kontrolü işi yapabilmek için gerek şart olmasına karşın emniyet açısından yeter şartı sağlamak için kuvvet kontrollüde önem taşımaktadır.

Hogan'a göre manipülatörün çevre ile temasının zayıf olduğu görevlerde konum kontrol yöntemleri yeterli olabilmekteyken manipülatörün çevre ile etkileşiminin daha fazla olması öngörülen görevlerde kuvvet kontrolü de gerekmektedir.

Ayrıca ISO/TS 15066 da belirtildiği üzere işbirlikçi çalışma 4 şekilde gerçekleşir.

1. Emniyetli izlemeli duruş
2. Elle yönlendirme
3. Hız ve mesafe izleme
4. Güç ve kuvvet sınırlama

Bu tez çalışmasında yukarıda belirtilen hassasiyetler kapsamında öncelikle üzerinde çalışılan robotun matematiksel modelinin oluşturulması ve bu robota kumanda edecek olan kontrolcünün engeller bulunan çalışma alanında, engellere veya kendisine zarar vermeden temasta bulunsa da tekrar eklemlerinin pozisyonunu değiştirerek istenilen konuma ulaşması, bu ulaşımın en kısa yoldan enerji ve zaman kaybı yaşamadan yapılabilmesi için optimizasyonu amaçlanmıştır.

Amaçlanan optimizasyonun sağlanabilmesi için birçok çalışmada başarılı sonuçlar veren Arı Algoritması kullanılmıştır. Ayrıca burada yapılan çalışmaları grafik yöntemlerle sunarak, yapılan kontrolcü tasarımı ve optimizasyonunun verdiği sonuçların değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

1.2. Tezin Önemi

Endüstri 4.0'ın en önemli özelliklerinden biri olarak karşımıza çıkan insan ve robot iş birliği konusunda önemli gelişmeler olmaktadır. İnsanların robotlar tarafından kolayca kopyalanamayacak becerilere sahip olduğu bir gerçektir. Bunun yanında çok fazla otomasyonun da maliyetleri arttıran sonuçlar doğurabileceği görüşleri vardır. Bu sebeplerden dolayı insan ile robot iş birliğinin yeni ve ekonomik çözümler sağlayabileceği çalışma yolları daha iyi sonuçlar verebilecektir. Örnek olarak, günümüzde insansız akıllı fabrikalardan ziyade pek çok yeni uygulamada insanlar robotlar ile iş birliği içerisinde el ele çalışmaktadır. Bu şekilde çalışan işletmelerde insanlar üretim sürecinin kontrol ve takip işlerini yaparken, robotlar ise fiziksel olarak yorucu ve bilek gücüne dayanan işleri yapmaktadır. Böylece her ikisi de kendine has yetenekleriyle sürece katkıda bulunmaktadır.

Ülkemiz içinde çok fazla katma değer sağlayacağı değerlendirilen ileri robotik sistemler ve işbirlikçi robotlar, Endüstri 4.0'ın önemli alanlarından. Geleceğin akıllı fabrikalarındaki üretim sisteminin temel yapısını, işbirlikçi robotların, onları kullanan insanlarla ve diğer robotlar ile nesnelere interneti vasıtasıyla etkileşimi oluşturmaktadır.

Yukarıdaki ifadelerden de anlaşılacağı gibi sanayi 4.0 dönüşümünde robot faaliyetlerinin önemli bir yer tuttuğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte ülkelerde çalışan insan sayısı başına robot kullanımı anlamına gelen “üretimde yoğunluk” bakımından Türkiye gelişmiş ülkelere kıyasla çok gerilerdedir. Örnek olarak, Güney Kore’de 10 bin işçi başına 531 robot düşerken bu sayı ülkemizde yalnızca 19 dur. Dünya genelinde ise ortalama 10 bin işçiye 70 endüstriyel robot düşerken Türkiye’de çalışan insan başına düşen robot sayısının oldukça düşük olduğu açıkça görülebilmektedir.

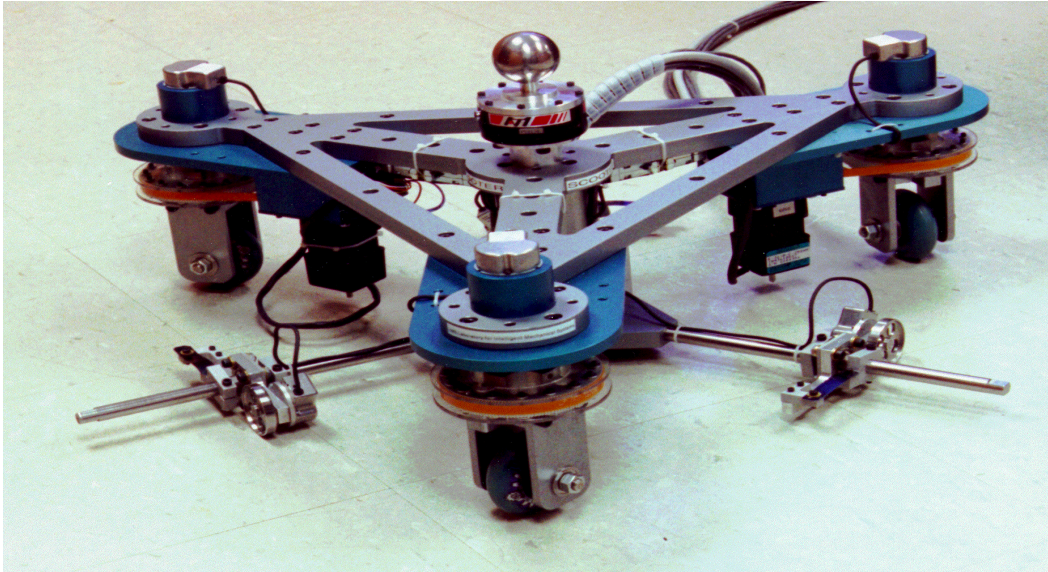
Klasik endüstriyel robotlarda bile dünyadan geride olan ülkemizin nispeten yeni teknoloji olan işbirlikçi robotlarda bu teknolojiyi yakalayabilmesi önem taşımaktadır. Bu kapsamda bu tezde, güncel ve gelecekte farklı uygulamaları gelişime açık olan, stratejik öneme sahip işbirlikçi robotlar üzerinde çalışmak önem arz etmektedir.

Ayrıca işbirlikçi robot çalışmaları Türkçe kaynaklarda yok denebilecek kadar azdır ve özellikle yukarıda belirtildiği gibi engelli ortamlarda daha büyük avantajlara sahip olan yedi serbestlik dereceli robot çalışması da aynı şekilde çok az bir kaynak stoğuna sahiptir. Diğer yabancı kaynaklarda ise yapılan karmaşık matematiksel işlemlerin ayrıntısına ulaşılamamaktadır. Bu kapsamda bu tezde açık olarak sunulan matematiksel işlemler ile işbirlikçi robotların çalışmalarına kaynak oluşturabilecek bir çalışma yapılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

İşbirlikçi robotlar, 1996 yılında Northwestern Üniversitesi'nde profesör olan J. Edward Colgate ve Michael Peshkin tarafından icat edilmiştir. İlk işbirlikçi robotlar (Şekil 2.1), hareket için güç kaynağına sahip olmadan, insan tarafından hareket ettirilen yardımcı ekipmanlardı. İlk başlarda kullanılan işbirlikçi robotların özellikleri, bir yükü yönlendirerek, hareketin insan çalışan ile iş birliği içerisinde bilgisayar kontrolüne izin vermekteydi. Daha sonra işbirlikçi robotlarda sınırlı miktarda hareket gücü sağlandı. İlk zamanlarda işbirlikçi robot ifadesine alternatif olarak “Akıllı Destek Cihazları” (Intelligent Assist Device (IAD)) terimi kullanıldı. O zamanlar, Akıllı Destek Cihazları için pazar talebi ve güvenlik standartları bu robotlar için endüstriyel malzeme taşıma ve otomotiv montaj operasyonlarını iyileştirme amacıyla kullanılmalarına olanak sağlamıştı.

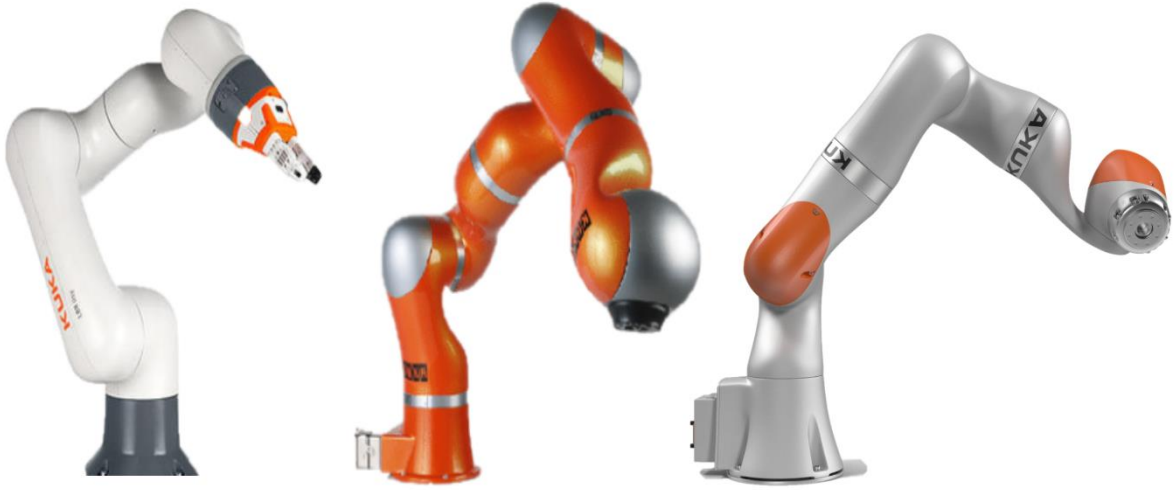
1997 yılında Colgate ve Peshkin tarafından kurulan Cobotics şirketi, otomobillerin son montajlarında kullanılan çeşitli işbirlikçi robot modellerini üretti.



Şekil 2.1. Colgate ve Peshkin tarafından geliştirilen işbirlikçi robot

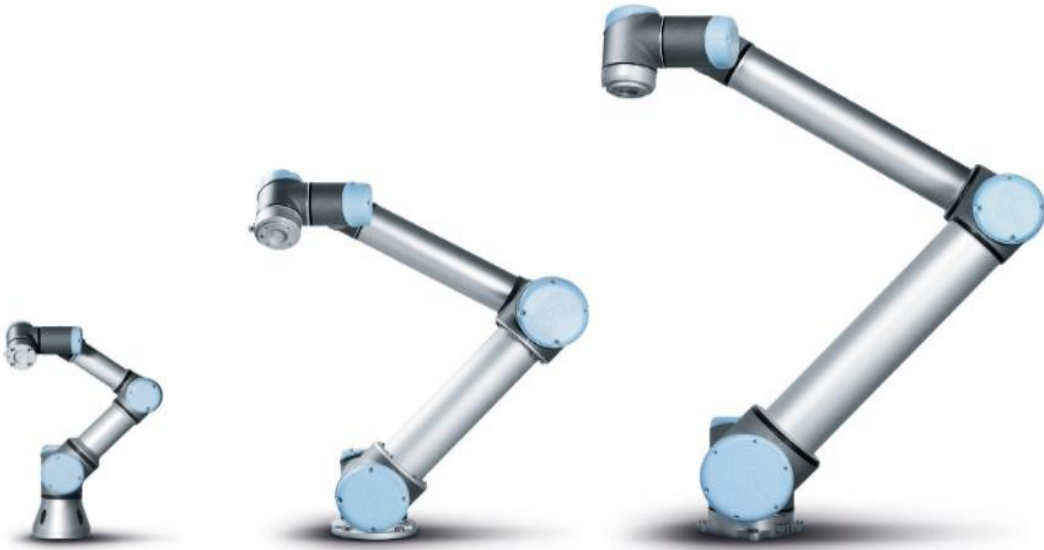
İşbirlikçi robotların ilerleyen yıllarda kullanımı daha çok yaygınlaştı ve aşağıda sıralanan firmalar çeşitli modellerle bu alanda varlık göstermeye başladılar.

Örneğin KUKA, ilk İşbirlikçi robotu LBR 3'ü 2004 yılında piyasaya sürdü. Bu bilgisayar kontrollü hafif robot, Alman Havacılık ve Uzay Merkezi enstitüsü ile uzun bir iş birliğinin sonucu olarak ortaya çıkmıştı. Sonrasında KUKA, 2008'de KUKA LBR 4'ü ve 2013'te KUKA LBR iiwa'yı çıkararak teknolojisini daha da geliştirdi (Şekil 2.2).



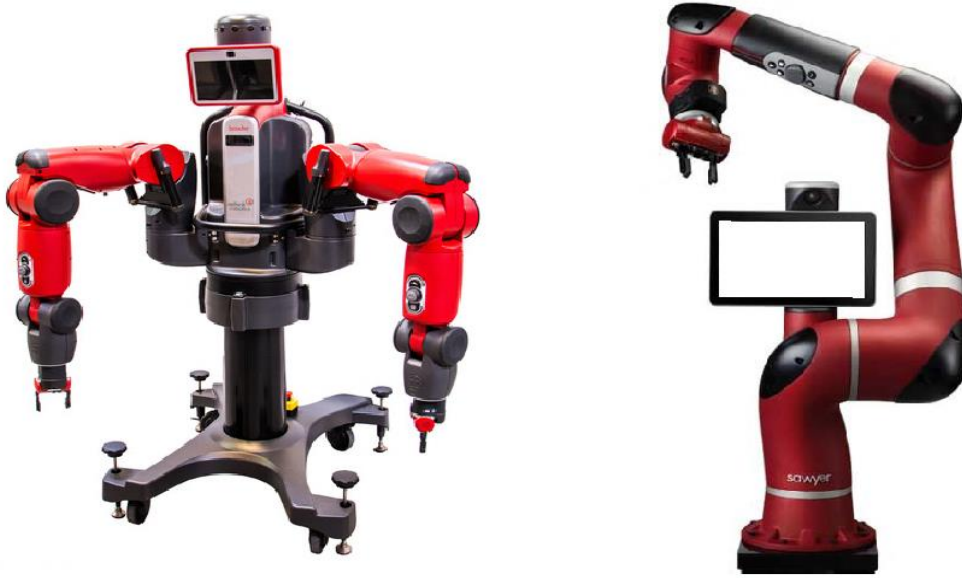
Şekil 2.2. KUKA LBR 3, LBR 4 ve LBR iiwa

Universal Robots, ilk işbirlikçi robotu UR5'i 2008'de piyasaya sürdü. Daha sonra 2012'de UR10 işbirlikçi robotu ve 2015'te daha küçük, daha düşük yük kapasiteli UR3'ü piyasaya sürdü (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. UR3, UR5 ve UR10

Rethink Robotics, aşağıda Şekil 2.4'te sırasıyla gösterilen, bir endüstriyel işbirlikçi robot olan Baxter'i 2012'de ve yüksek hassasiyet için tasarlanmış daha küçük ve daha hızlı işbirlikçi robot olan Sawyer'ı ise 2015'te piyasaya sürdü.



Şekil 2.4. Baxter ve Sawyer

FANUC, 2015 yılında ilk işbirlikçi robotu olan 35 kg ağırlığındaki FANUC CR-35iA'yı piyasaya sürdü. Daha sonra bu şirket, FANUC CR-4iA, CR-7iA ve CR-7 / L uzun kollu versiyon dahil olmak üzere bir ortak robotlar serisini piyasaya sürdü (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. FANUC CR-7 / L, CR-7iA CR-4iA ve CR-35iA

ABB şirketi ilk olarak, iş birliğine dayalı çift kollu işbirlikçi robot olan Şekil 2.6'da gösterilen YuMi'yi 2015 yılında piyasaya sürdü.



Şekil 2.6. YuMi

İşbirlikçi robotların zaman içinde gelişiminin yanında, bu robotlarda kullanılan empedans kontrol ise Hogan tarafından 1984 yılında yapılan çalışma ile, kuvvet kontrolün kaynağı olarak antagonist (karşıt) kasların birlikte çalışmasının gözlemlenmesi ile bu kasların birbirlerine karşı olan dirençleri matematiksel olarak modellenmesi olarak ortaya çıkmıştır.

Yukarıda tarihsel gelişimi belirtilen işbirlikçi robotlar ve bu robotlarla empedans kontrol uygulamasının farklı yaklaşımları aşağıdaki çalışmalarda gösterilmiştir.

Masayuki Shimizu ve arkadaşlarının, 2008 yılında yaptığı çalışmada 7 serbestlik dereceli robotların ters kinematik analizlerinin yapılması için ilk olarak geometrik yaklaşımdan faydalanılmıştır. Bu yeni yöntem ile karmaşık olan ters kinematik çözümler çok daha pratik bir şekilde sunulmuştur.

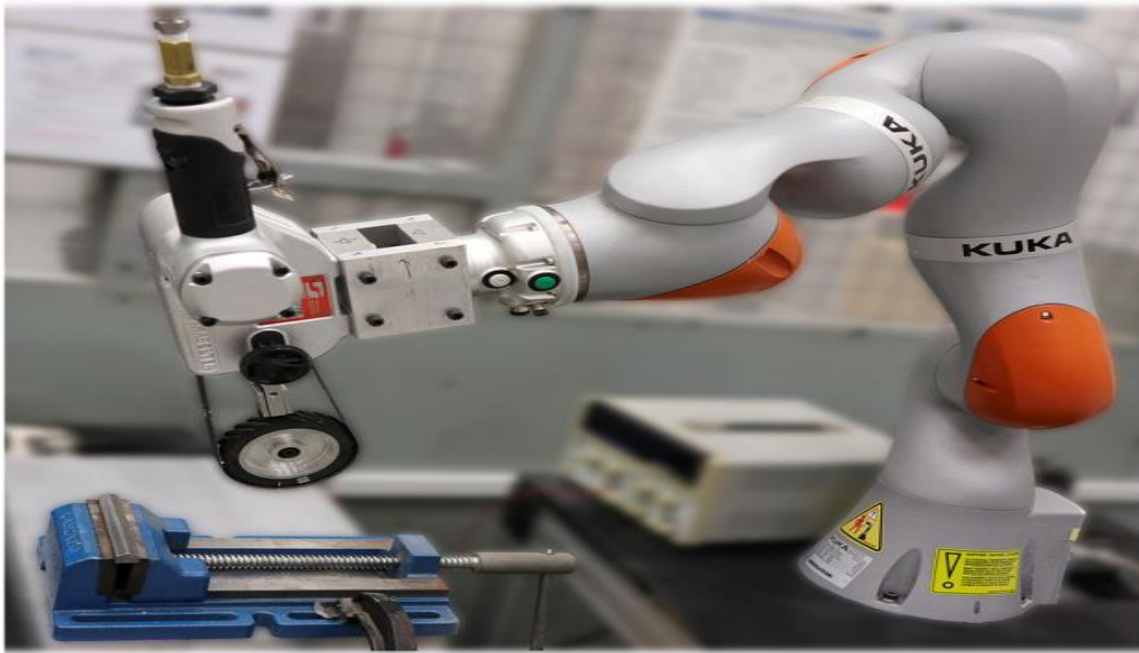
Carlos Faria ve arkadaşlarının, 2018 yılında yaptığı çalışmada 7 serbestlik dereceli robotun pozisyon tabanlı kinematik analizine yeni bir bakış açısı getirilmeye çalışılmıştır.

Amin Ghorbanpour ve Hanz Richter'in, 2021 yılında yaptığı çalışmada bir işbirlikçi robotun enerji verimliliği odaklı empedans kontrolcü optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmada matematiksel modeli oluşturulan iki benzer işbirlikçi robotun, iş parçasını belirli bir yörünge boyunca taşıırken ki konum hassasiyeti ve malzemeye veya robotun kendine hasar vermeyecek bir kavrama kuvvetini amaçlayan, elektrik tasarrufu odaklı bir şekilde empedans kontrolcü kazançları elde edilmiştir. Bu çalışmada robotların bütün eklemleri yarı aktif olarak düşünülmüş. Yarı aktif eklemler rejeneratiftirler, robotlardan gelen fazla mekanik enerji DC

motorlardan geri akmak için uygun olduğunda elektrik enerjisi depolama elemanı kaynağının şarj edilmesini sağlar. Bu şekilde yapılan çalışma sonucunda enerji tüketimde %60 düşüş gözlenmiştir.

Ficuciello F. ve arkadaşlarının, 2015 yılında 7 serbestlik dereceli KUKA LWR4 işbirlikçi robot ile yaptıkları çalışmada insan hareketlerini temel alan farklı empedans kontrol yaklaşımları deneysel olarak uygulanmıştır.

Lakshminarayanan S. ve arkadaşlarının, 2020 yılında yaptığı çalışmada, Şekil 2.7’de gösterilen KUKA LBR iiwa 7 R800 tipi işbirlikçi robot ile deneysel olarak titanyum ve alüminyum gibi bir iş parçasının bitirme işlemlerinde uygulanan pah kırma gibi işlemlerin farklı bir bakış açısı ile Lissajous eğrileriyle matematiksel modeli oluşturulan bir sistemin her iterasyonda hem konumu hem de kuvvetleri aynı anda uyarlayan empedans kontrolüne dayalı iteratif bir öğrenme yöntemi uygulanmıştır.



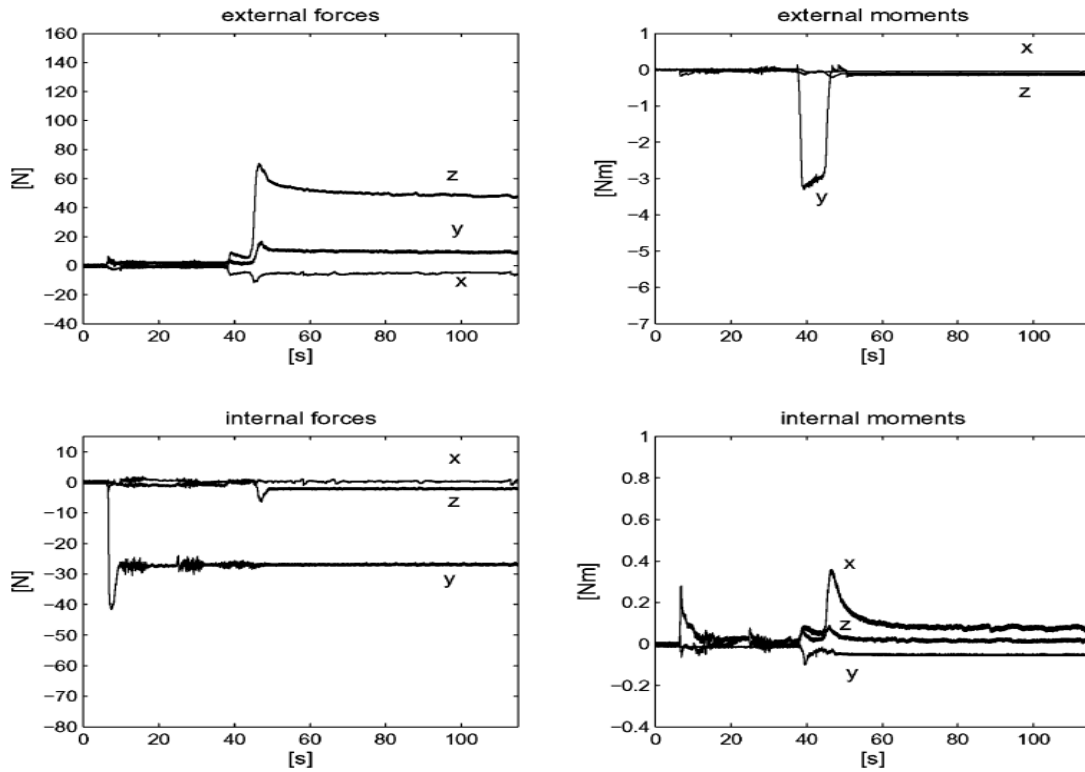
Şekil 2.7. KUKA LBR iiwa 7 R800

Hanafusa M. ve arkadaşlarının, 2021 yılında yaptığı çalışmada insan uzvunun hareket değişkenlerinin algılanarak işbirlikçi robotun daha stabil çalışması için geri bildirim yapan bir uyarlamalı empedans kontrolcü tasarımı yapılmıştır.

Caccavale F. ve arkadaşlarının, 2008 yılında yaptığı çalışmada 6 serbestlik dereceli iki robot kol için 4 farklı kontrolcü ile yapılan 4 farklı deneyin sonuçları değerlendirilmiştir. Bu kontrolcü çeşitleri konum kontrolcü, dış empedans kontrol (robot kol ve çevre arasında), iç

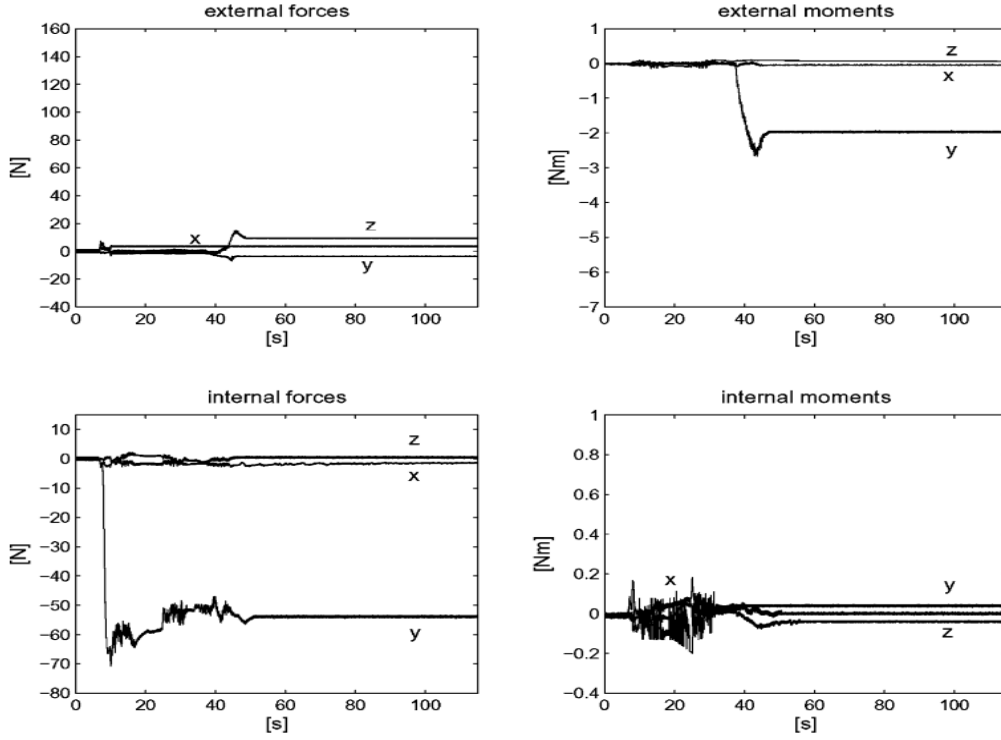
empedans kontrol (robot kavrayıcıları ve taşınan nesne arasında) ve iç ve dış empedans kontrolün bir arada kullanılmasıdır.

Bu deneysel çalışma sonucunda yalnızca konum kontrolüne sahip kontrolcüden alınan sonuçlarda çevredeki engellere temas halinde x ve z eksenlerindeki kuvvetlerde artış görülmüştür, iç empedans kontrolü olmadığına parça y ekseninde kavranamadan kaymaya başlamıştır. Aşağıdaki iç kuvvetler grafiğinde görüleceği üzere nesnenin kaymaması için iç kuvvet y ekseninde artmıştır ve bu da nesnenin fazla sıkılmasına sebep olmuştur (Şekil 2.8).



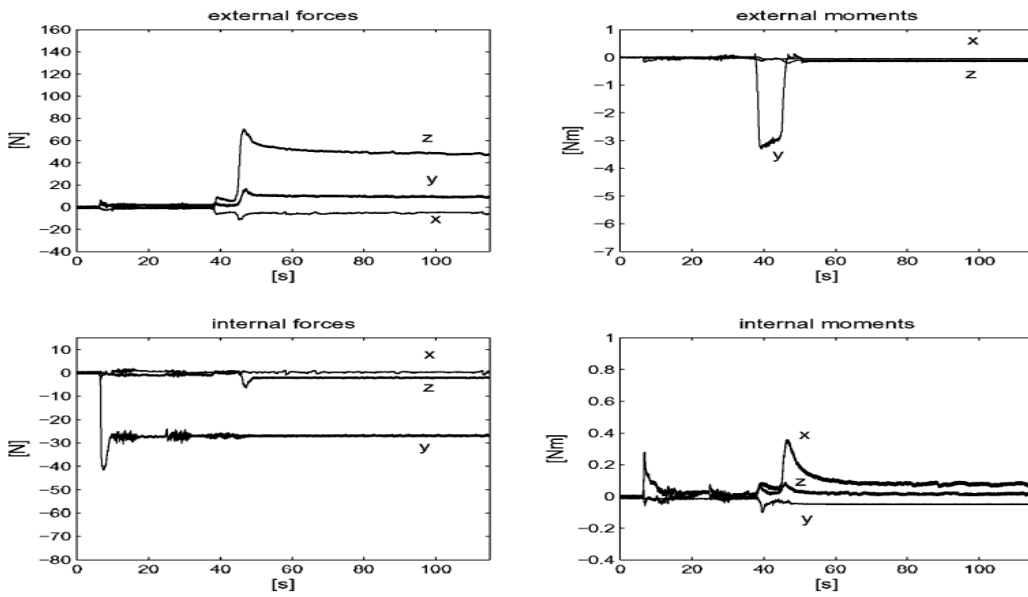
Şekil 2.8. Yalnızca konum kontrolü sonuçları

Dış empedans kontrolcü ile deney yapıldığında ise robot kolların maruz kaldığı dış kuvvetlerde gözle gözlenir düşüşler meydana gelmiştir. Fakat iç empedans kontrol olmadığı için yalnız konum kontrolcüde olduğu gibi y ekseninde iç kuvvetler nesnenin kaymaması için artmıştır (Şekil 2.9).



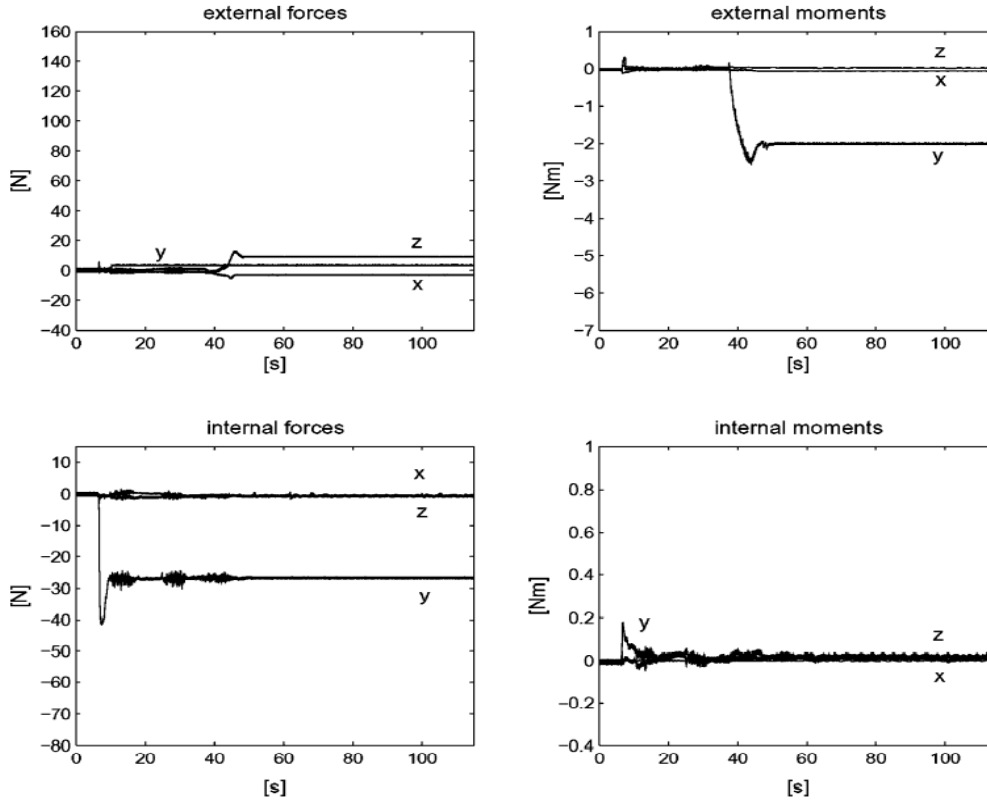
Şekil 2.9. Yalnızca dış empedans kontrol sonuçları

Sadece iç empedans kontrolcü ile yapılan deneyde ise öncelikle y eksenindeki kuvvette ciddi düşüş meydana gelmiştir yani nesne haddinde fazla sıkışmaya maruz kalmamaktadır. Fakat işbirlikçi robotun çevreye temasındaki dış kuvvetler halen fazla olduğu görülmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Yalnızca iç empedans kontrol sonuçları

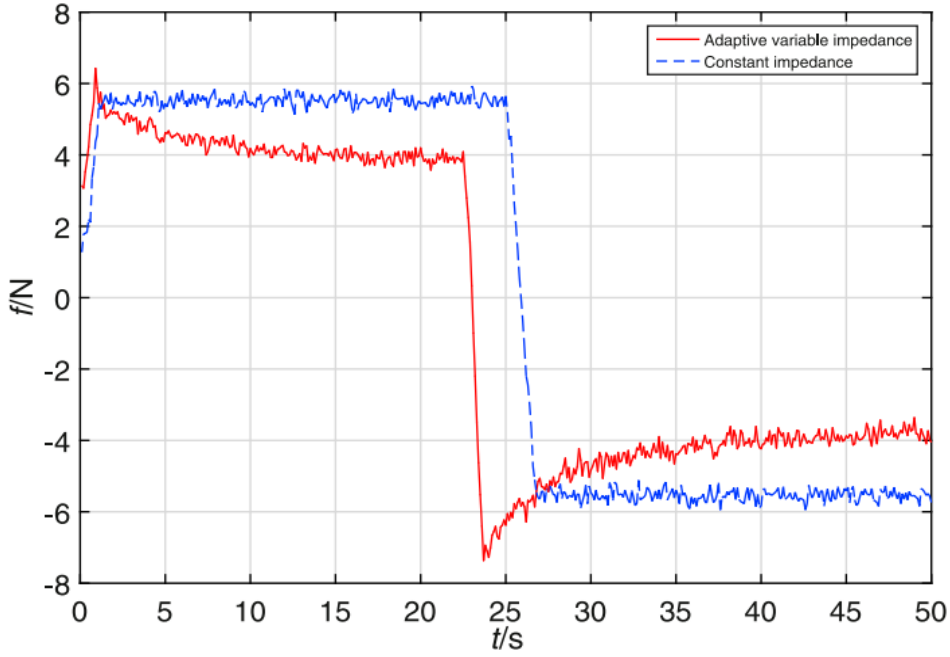
Son olarak iç ve dış empedans kontrolcü ile kuvvet/konum kontrolü ile yapılan deneyde dış ve iç kuvvetlerin makul seviyelerde tutulduğu ve iç ve dış hareketlerin minimize edildiği ve istenilen konuma daha stabil hareket ettiği gözlenmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. İç ve dış empedans kontrolcü ile kuvvet/konum kontrolü sonuçları

Tianyu Ren ve arkadaşları, 2018 yılında yaptıkları bir çalışmada aktüatör esnekliği ve doğrusal olmayan sürtünme kaynaklı robot eklemlerinde meydana gelen tork bozulma problemlerini temel alacak 7 serbestlik dereceli bir işbirlikçi robot için empedans kontrolcü tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlarda empedans kontrolcünün uygulama kolaylığı ve yüksek verimine dikkat çekilmiştir.

Dong, J ve arkadaşları, 2020 yılında yaptıkları çalışmada hıza dayalı uyarlanabilir değişken empedans kontrol ile sabit değerli empedans kontrolcü deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Deneylerde Stäubli TX-90 tipi işbirlikçi robot ve 6 kuvvet sensörü kullanılmıştır. Sonuç olarak aşağıdaki Şekil 2.12’de görüldüğü gibi hıza dayalı uyarlanabilir değişken empedans kontrolün daha iyi sonuçlar verdiği çıkarımı yapılmıştır.

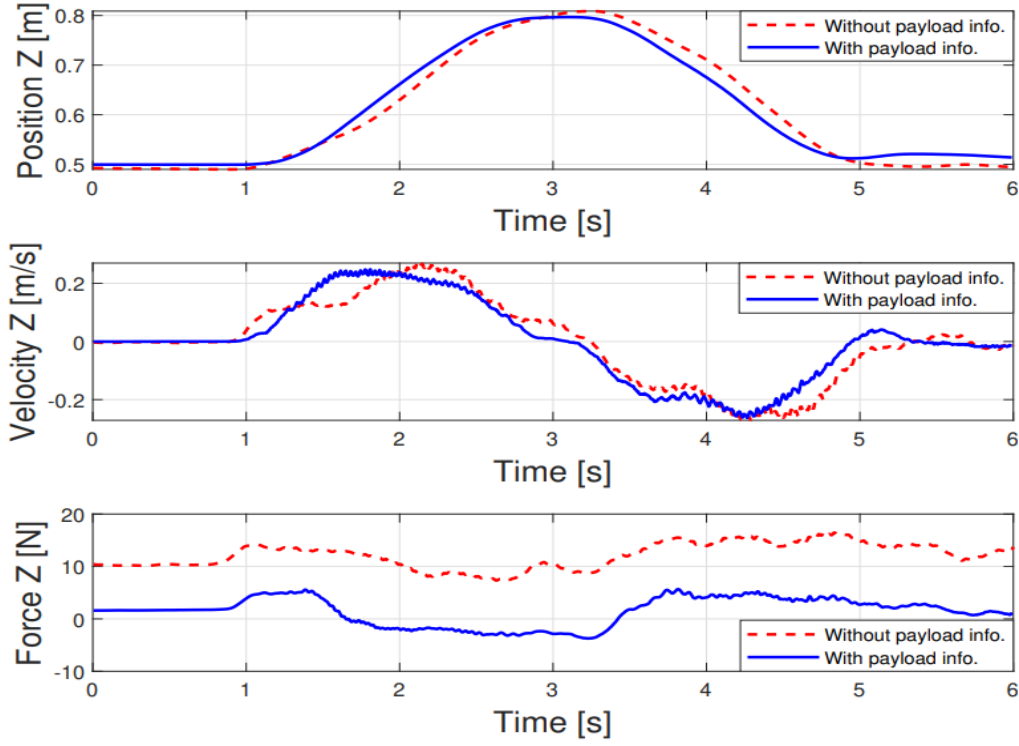


Şekil 2.12. Değişken empedans ile sabit empedans kontrol karşılaştırması

Chien S. ve arkadaşları, 2020 yılında yaptıkları çalışmada, işbirlikçi robotların kontrol sisteminin maliyetlerini düşürme amaçlı kuvvet sensörü olmadan 6 serbestlik dereceli robotun gözlemci tabanlı empedans kontrolcü tasarımı yöntemleri sıralanmıştır. Çalışma sonucunda en verimli sensörsüz kontrolcü tasarımının Değiştirilmiş Genişletilmiş Durum Gözlemcisi olduğu tespit edilmiştir.

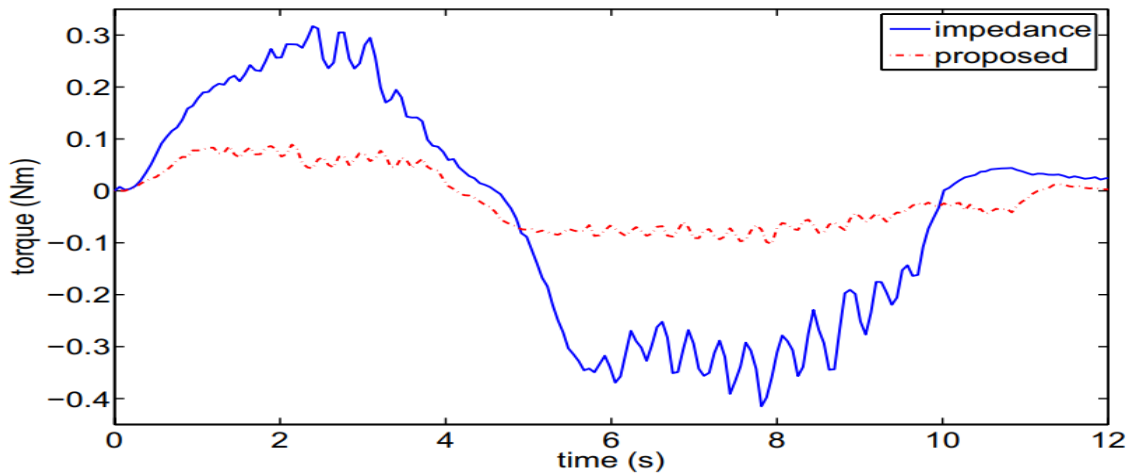
Roveda L. ve arkadaşlarının, 2020 yılında KUKA LBR iiwa 14 R820 serisi işbirlikçi robotla yaptıkları çalışmada insan robot etkileşimini en aza indirebilmek için yapay sinir ağları ile insan davranışlarını da tahmin etmeyi amaçlayan uyarlanabilir empedans kontrolcü uygulaması yapılmıştır. Çalışma sonunda insan robot etkileşiminin minimize edildiği gözlenmiş ve ileride yapılacak yapay zekaya uygulaması hedeflenerek çalışma sonlandırılmıştır.

Chien S. ve arkadaşlarının, 2020 yılında 7 serbestlik dereceli Kuka LBR iiwa 14 R820 serisi işbirlikçi robot ile yaptıkları çalışmada, ağırlığı robot tarafından taşınan bir yükün insan tarafından kontrol edilip, empedans kontrol yapısına sahip robotunda onu takip etmesi deneysel olarak çalışılmıştır. Deney iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir, ilkinde robota taşınan yük bilgileri verilmezken, ikinci durumda ise robota taşınan yükün ağırlık ve geometrisi robotun kontrolcüsüne tanımlanmıştır. İnsan hareketini takip eden robotun, taşıdığı yükü bildiği durumdaki konum, hız ve kuvvet değerlerinin daha verimli olduğu Şekil 2.13'teki gibi görülmüştür.



Şekil 2.13. Deney sonuçları

Li Y. ve arkadaşlarının, 2014 yılında yaptıkları çalışmada insan uzuvlarının da tahminini içeren bir empedans kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Çalışma sonunda insan hareketlerinin de tahmini ile yapılan deneyde uygulanan tork avantajları grafiklerle gösterilmesine rağmen, tahmin aşamasında maruz kalınabilecek hatalarında yine empedans kontrol tarafından telafi edilebileceği belirtilmiştir (Şekil 2.14).



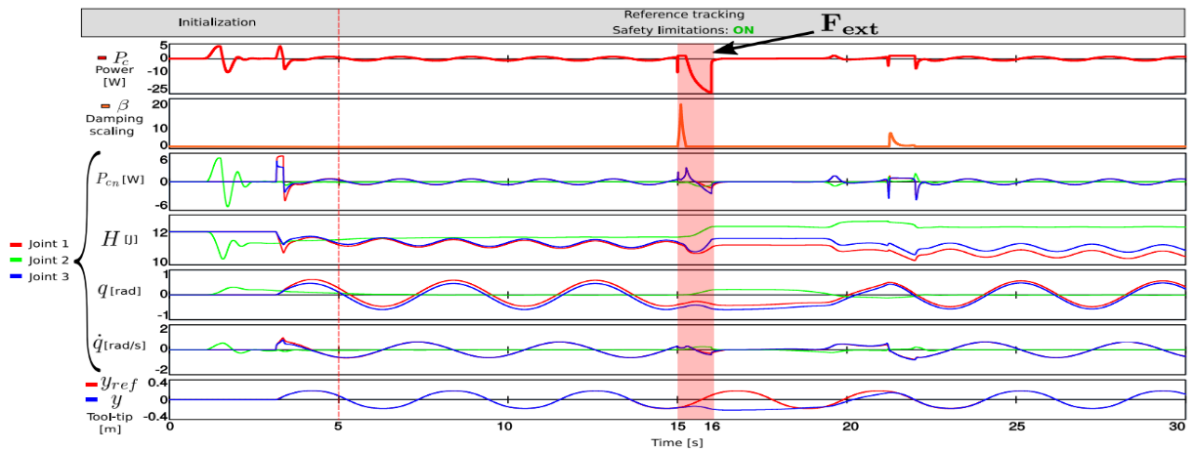
Şekil 2.14. Deney sonuçları

Kana S. ve arkadaşları, 2021 yılında KUKA LBR iiwa 7 R800 serisi işbirlikçi bir robot ve bir tablet bilgisayara bağlı ucuz maliyetli yapı sensörü ile plastikten yapılmış bir pervane fan kanadı üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Makine öğrenmesi ve yapay zekadaki ilerlemelere rağmen robotların bağımsız çalışmasını zorlaştıran birçok etken olduğu çıkarımı ile başlayan bu çalışmada, robotun insan ile çalışabildiği bir yaklaşım sunulmuştur (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. KUKA LBR iiwa 7 R800 ve üzerinde çalışılan kanat

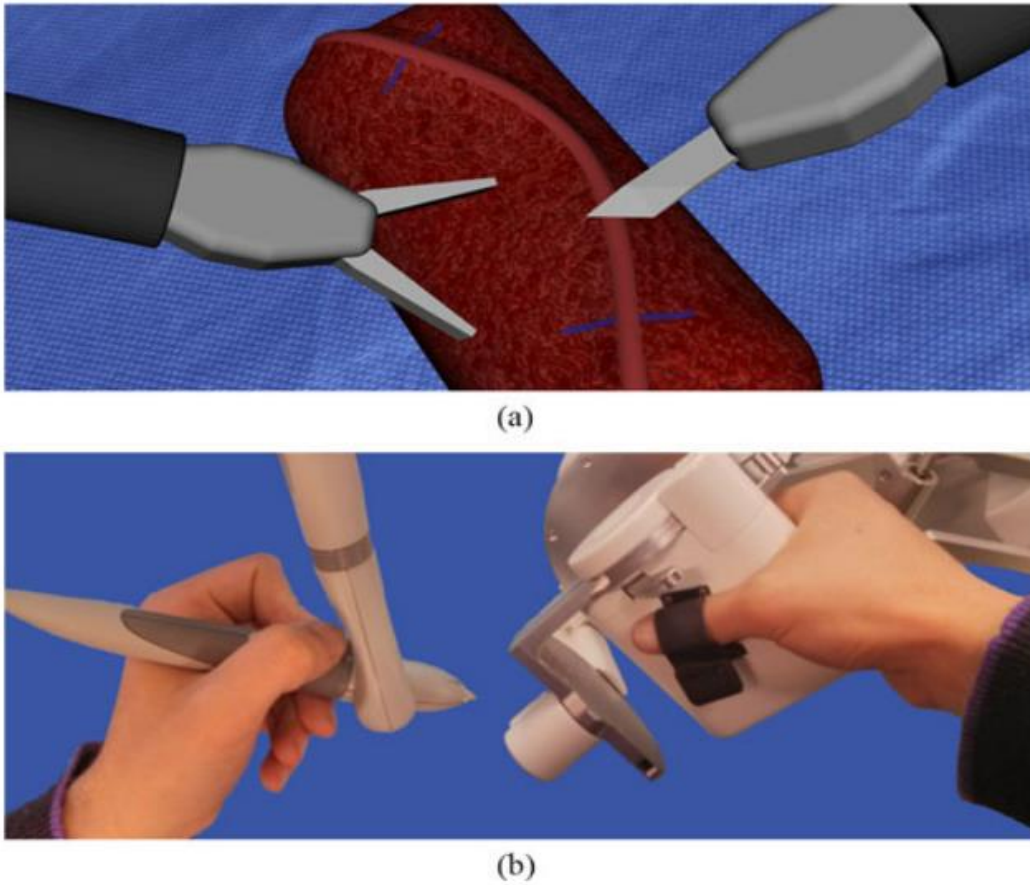
Raiola G. ve arkadaşları, 2018 yılında enerji tasarrufu odaklı çalışmada, bir enerji tankı modeli sunarak, işbirlikçi robotun yalnızca çevre ile temasında enerji tüketimi yapacağı bir empedans kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Deney sonuçları Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Deney sonuçları

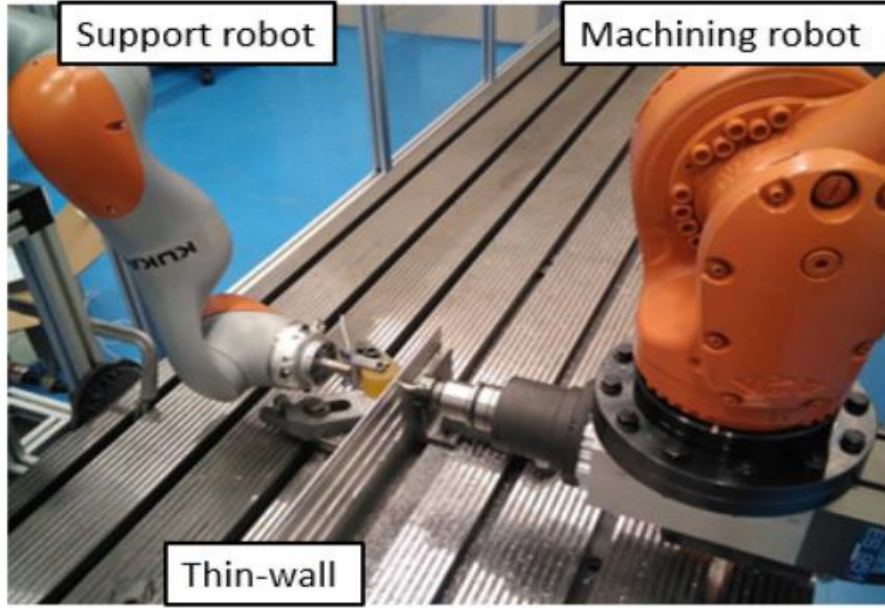
Ying-Long C. ve arkadaşlarının, 2020 yılında yaptığı çalışmada COVID-19 sürecinde hastalardan numune almak için uzaktan kumanda ile ağızdan numune alabilecek bir mekanizmaya kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Yapılan çalışmada numune alınacak hastanın davranışı öngörülemediği için emniyetli bir süreç için empedans kontrolcü seçilip deneysel çalışma sonlandırılmıştır.

Bowyer S. ve Baena F. R. tarafından 2015'te, insanın kumanda ettiği ve ameliyat işlemlerinde kullanılacak bir robot kolun yüksek hassasiyet ve doğrulukta çalışmasını amaçlayan bir empedans kontrolcü çalışması yapılmıştır (Şekil 2.17).



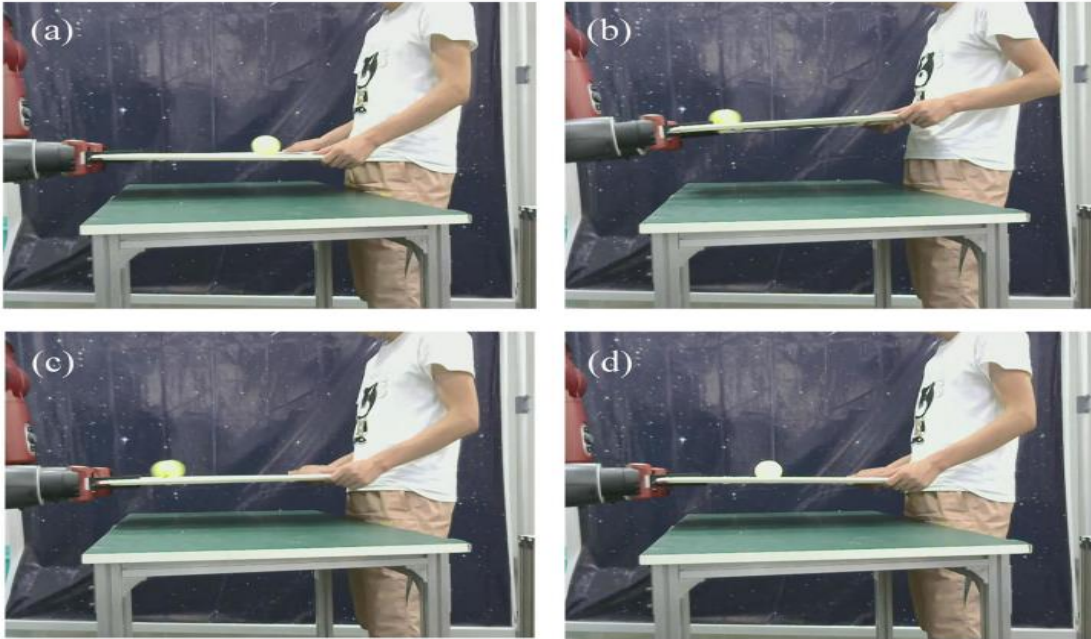
Şekil 2.17. a) Sanal model, b) İşbirlikçi robot

Torres R. ve arkadaşlarının, 2020 yılında yaptıkları bir çalışmada daha önceki kaynaklardan farklı olarak, KUKA LBR iiwa 7 serbestlik dereceli işbirlikçi robot, aynı çalışma ortamını insanla değil başka bir robotla paylaşıp, verilen ince levha delme işlemini aşağıdaki Şekil 2.18'deki gibi gerçekleştirmiştir. Çalışma sonunda empedans kontrolcüye sahip işbirlikçi robot desteğiyle çalışan robotun daha yüksek işleme verimliliği ve malzemede daha az hasara sebep olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.18. İşbirlikçi ve işleyici robot

Li S. ve Zhang S. tarafından 2021 yılında, iki kollu bir robot ile insan, ortasında top olan bir levhayı iki tarafından Şekil 2.19’da gösterildiği gibi tutmuş ve insan kaynaklı olarak levhanın konumunun değiştirilmesine robotun tepki vererek topu levha üzerinde tutmasına yönelik bir empedans kontrol çalışması yapılmıştır.



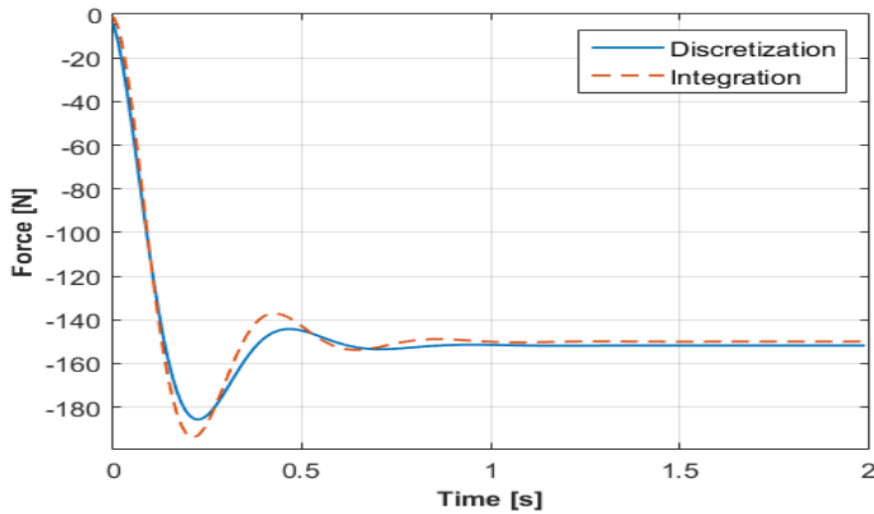
Şekil 2.19. İnsan ve robot uygulaması

Josin Hippolitus A. ve arkadaşlarının, 2021 yılında 7 serbestlik dereceli iki kollu ABB YuMi tipi bir robotun CAD ortamında simülasyonu ile yaptıkları çalışmada robot kolların iş parçasını kavramasına yönelik değerlendirmeler yapılmıştır (Şekil 2.20).



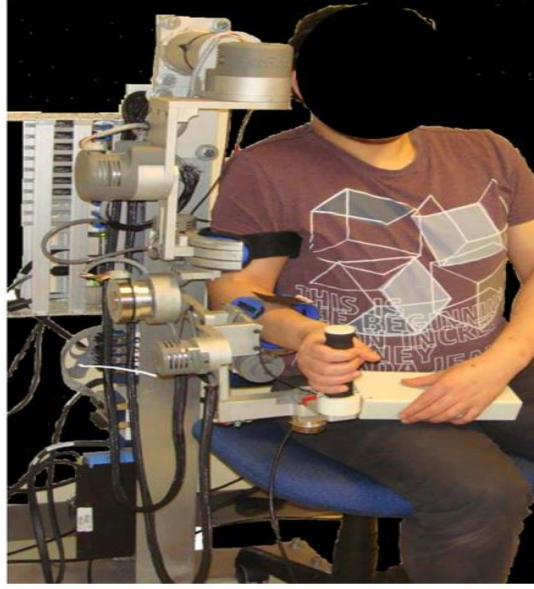
Şekil 2.20. ABB YuMi ve kavrama yaptığı parçalar

Lahr G. ve arkadaşları, 2016 yılında birleştirme ve ayrıştırma olarak isimlendirilen iki farklı empedans kontrolcü metodunun sanal ve deneysel çalışmalarını yapmıştır. İki metot da benzer sonuçlar vermiştir ve simülasyon ile deneysel çalışma, belirsizlikler ve bozucu etkilerden dolayı farklılık gösterse de empedans kontrolcünün yine de kararlı sonuçlar sunduğu Şekil 2.21’te verilen grafikte gözlenmiştir.



Şekil 2.21. Deney sonuçları

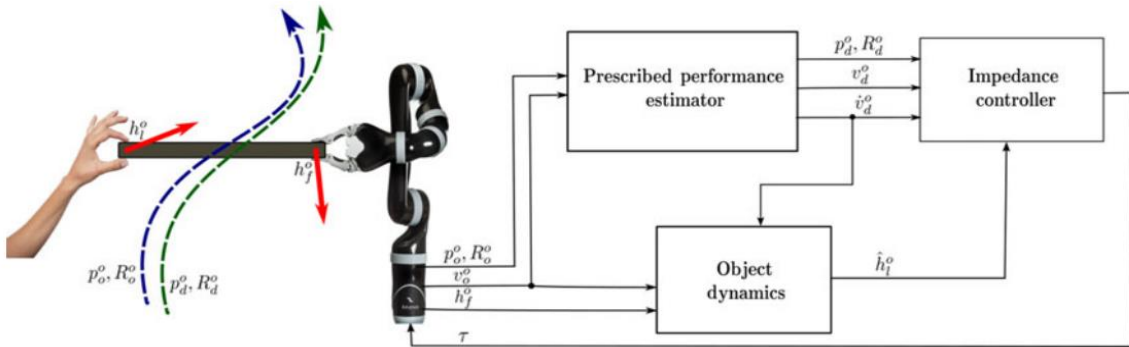
Brahmi B. ve arkadaşlarının, 2021 yılında yaptıkları çalışmada üst uzuv rehabilitasyon robotlarının engelli insanlarla entegre edilebilmesinin, makine öğrenmesi ve uyarlanabilir empedans kontrol yöntemleriyle sağlanması deneysel olarak sunulmuştur (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. Dış iskelet rehabilitasyon robotu

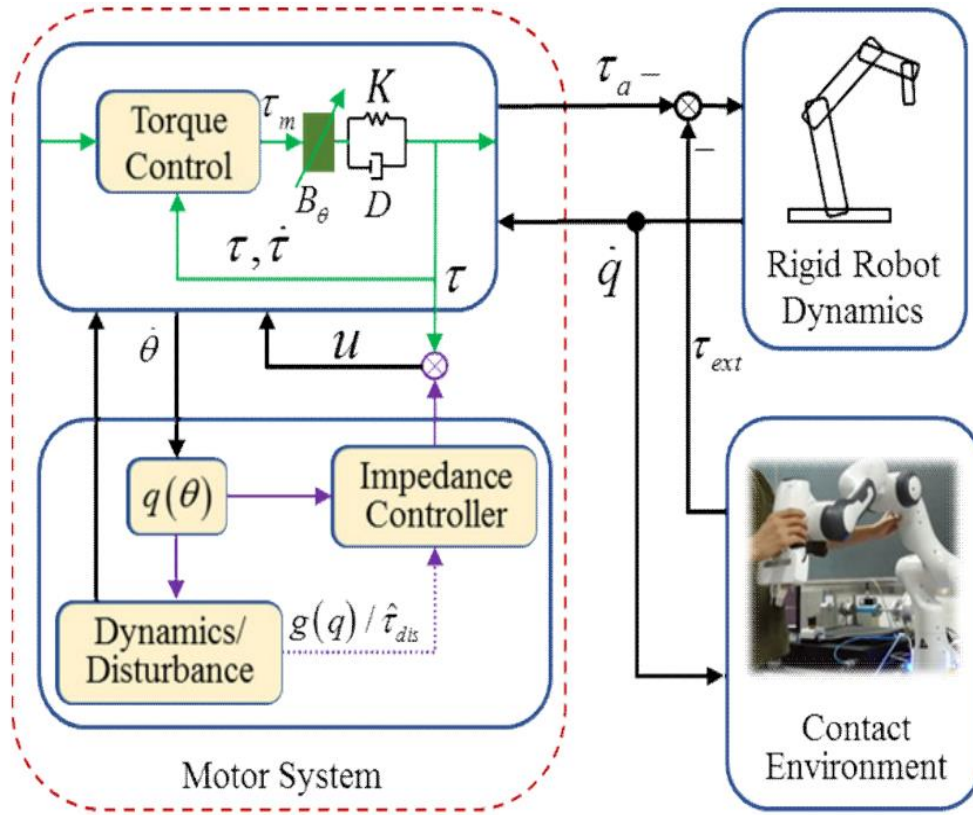
Ochoa, H. ve Cortesao, R., 2021 yılında yaptıkları çalışma insan becerilerine dayalı robot destekli kalıp cilalama işlemi için bilgisayarlı bir tork empedans kontrol yapısı sunmaktadır.

Alevizos K. I. ve arkadaşlarının, 2020 yılında yaptıkları çalışmada insanın, nesnenin istenen yörüngesini belirlediği, minimum insan çabasıyla gerçekleştirilecek işlemin empedans kontrolcüye sahip bir robot tarafından da istenen hareketi tahmin ederek daha kararlı bir sonuç alınması deneysel olarak sunulmuştur (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Sunulan metodun kontrol diyagramı

Wang H. ve arkadaşları, 2019 yılında yaptıkları çalışmada, esnek eklemlerin modellenmesi ve analizi yoluyla, işbirlikçi robotların aktif uyumunu gerçekleştirmek için kullanılan tork geri beslemesine dayalı bir empedans kontrolcü sunulmuştur. Bu kontrolcü iki parçadan oluşmuştur: tork kontrolörü ve empedans kontrolörü. Tork kontrolörü, robot dinamiklerini telafi etmek için kullanılmıştır ve empedans kontrolörü, eklem sertliğini ve sönümü ayarlamak için kullanılmıştır. 7 serbestlik dereceli bir robotla yapılan bu çalışmada sunulan kontrolcünün klasik kontrol yöntemlerinden daha verimli olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada sunulan kontrol şeması Şekil 2.24'te gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Tork geri beslemesine dayalı empedans kontrol blok diyagramı

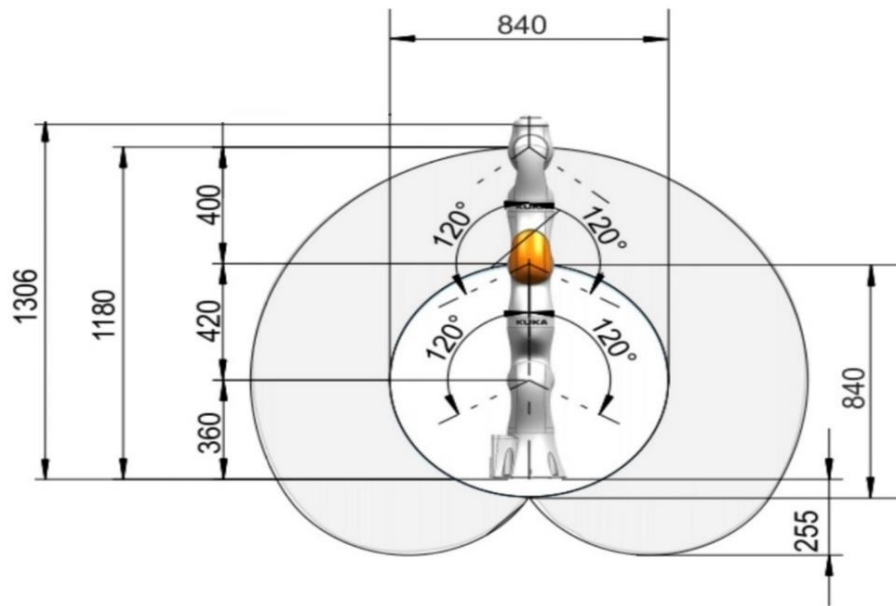
Hogan N., 1984 yılında empedans kontrolün teori, uygulama ve kullanım olarak üç farklı bölümde temellerini atmıştır. Bu üç bölümlü makale, bir manipülatör ve çevresi arasındaki dinamik etkileşimin kontrolüne yönelik bir yaklaşım sunmaktadır.

3. 7 SERBESTLİK DERECELİ İŞBİRLİKÇİ ROBOTUN MODELLENMESİ

Bu çalışmada örnek uygulamalar için Kuka iiwa14 serisi robot seçilmiştir (Şekil 3.1). Seçilen robotun üzerinde yapılacak en önemli çalışmalardan birisi robotun matematiksel modelinin çıkartılması olacaktır. Özellikle çok serbestlik dereceli robotlar için bu işlemler oldukça karmaşıktır. Bu yüzden bu bölümde yapılan işlemler basamak basamak açıklanarak 7 serbestlik dereceli robotun kinematik ve dinamik analizlerinin yanında tekillik analizde yapılacaktır. Seçilen Kuka iiwa14 serisi robotun eklem limitleri aşağıda Çizelge 3.1’de ve yapısal özellikleri Şekil 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yedi serbestlik dereceli robotun çalışma limitleri

Eklemler	Eklem Limitleri		
	Pozisyon	Tork	Hız
1	$\pm 170^\circ$	320 Nm	85°/s
2	$\pm 120^\circ$	320 Nm	85°/s
3	$\pm 170^\circ$	176 Nm	100°/s
4	$\pm 120^\circ$	176 Nm	75°/s
5	$\pm 170^\circ$	110 Nm	130°/s
6	$\pm 120^\circ$	40 Nm	130°/s
7	$\pm 175^\circ$	40 Nm	135°/s



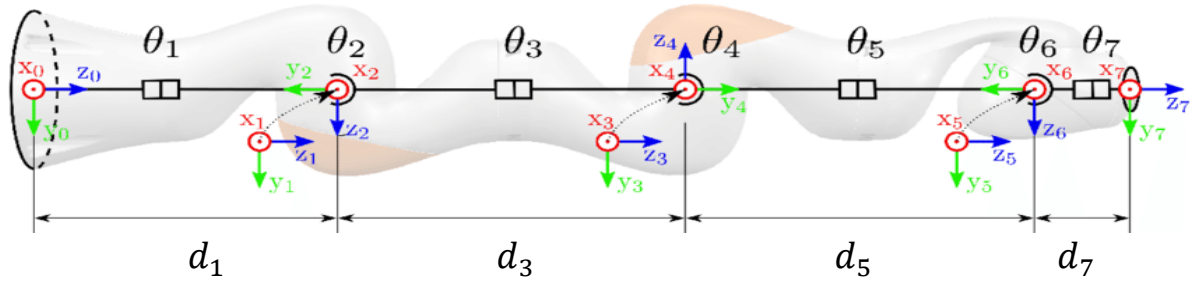
Şekil 3.1. Yedi serbestlik dereceli robotun yapısal boyutları ve çalışma uzayı

3.1. Kinematik Analiz

Robot kinematiği, robotların hareketinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesini ifade etmektedir. Kinematik analizle, robotun tüm bağlantılarının konumu, hızı ve ivmesi, bu harekete neden olan kuvvetler dikkate alınmadan elde edilir. Herhangi bir robotun kinematik çözümü, ileri ve ters kinematik olmak üzere iki farklı çözümle yapılmaktadır. Bir robotun ileri kinematiği, robot uç noktasının konumunun ve yönünün, eklem açı değerlerinden hesaplanmasını ifade ederken ters kinematik ise robot uç noktasının konumundan ve yönünden, eklem açısı değerlerinin hesaplanması ifade eder.

3.1.1. İleri Kinematik

Yedi serbestlik dereceli SRS tipi tamamen döner uzuvlardan oluşan robotun ileri kinematiğinin çözümlenebilmesi için ilk olarak aşağıda Şekil 3.2'deki gibi eksen takımına yerleştirilen robot kolun şekildeki parametrelere göre Çizelge 3.2'deki D-H parametreleri çıkartılır.



Şekil 3.2. Yedi serbestlik dereceli robotun fiziksel yapısı

Çizelge 3.2. D-H parametreleri

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$-\pi / 2$	d_1	θ_1
2	0	$\pi / 2$	0	θ_2
3	0	$\pi / 2$	d_3	θ_3
4	0	$-\pi / 2$	0	θ_4
5	0	$-\pi / 2$	d_5	θ_5
6	0	$\pi / 2$	0	θ_6
7	0	0	d_7	θ_7

Daha sonra elde edilen yukarıdaki D-H parametreleri yardımı ile bütün eklemlerin birbirlerine göre dönüşüm matrisleri elde edilerek robot ucunun dönüşüm matrisine ulaşılabacaktır.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & \alpha_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$${}^0T_7 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 \quad (3.2)$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & -\cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & 0 & \sin \theta_6 & 0 \\ \sin \theta_6 & 0 & -\cos \theta_6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$${}^6T_7 = \begin{bmatrix} \cos \theta_7 & -\sin \theta_7 & 0 & 0 \\ \sin \theta_7 & \cos \theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

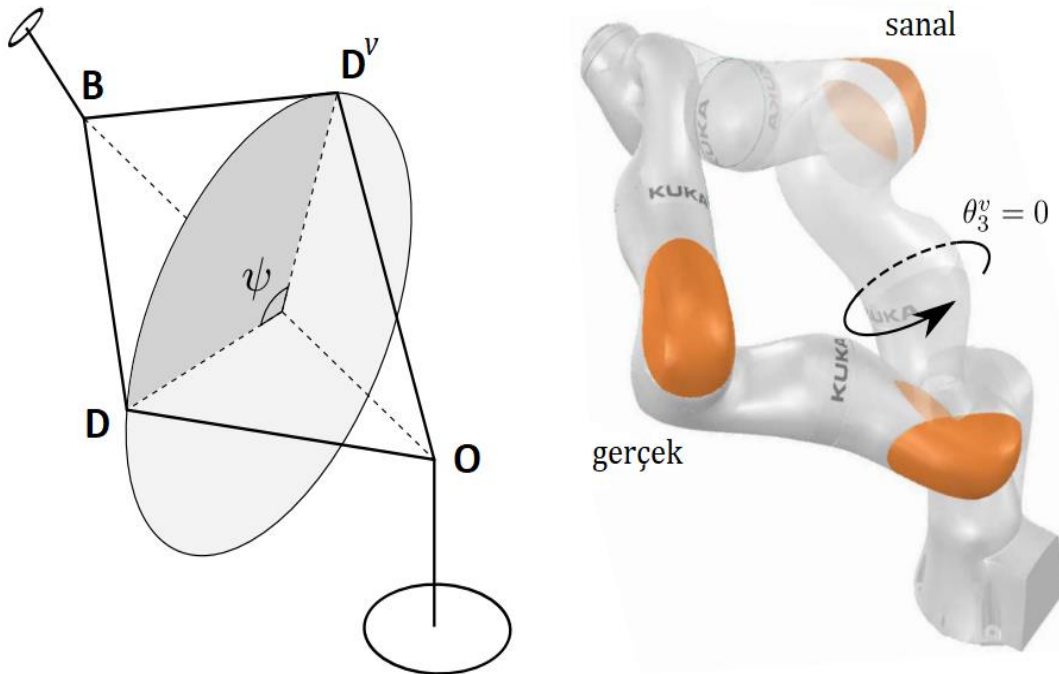
$${}^0T_7 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.1.2. Ters Kinematik

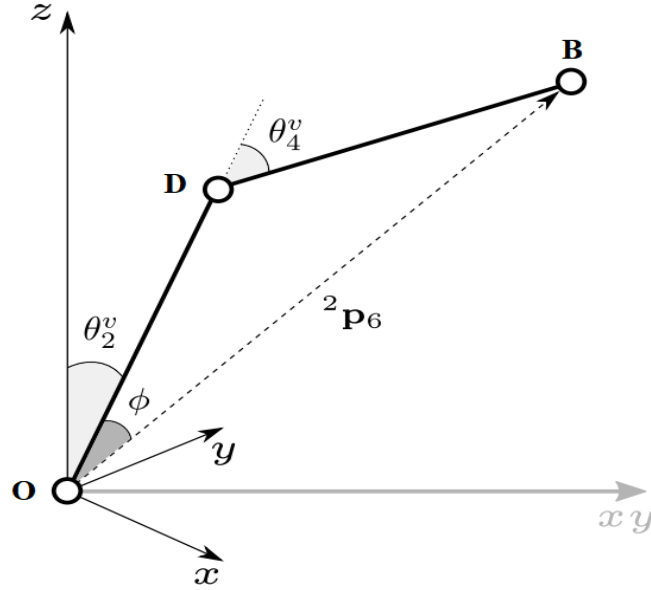
7 serbestlik dereceli bir robot için ters kinematik çözüm, sayısal yöntemlerle çok karmaşıktır ve sonuca ulaşmak çok zordur. Bu sebeple en uygun çözüm robotun geometrisinden yararlanılarak analitik çözüm olacaktır. Bu bağlamda robot kol üst ve alt olarak iki parçaya ayrılmaktadır. Alt uzuv konumlandırma, üst uzuv ise yönlendirme olarak, robotun çalışmasını sağlamaktadır.

Robotun ters kinematik çözümde aranan θ_i açısal değerlerinin bulunabilmesi için aşağıda Şekil 3.3'teki gibi robot kolun geometrisi verilmiştir. Burada sanal durum olarak ifade edilen durumda robotun θ_3 değeri sıfır olarak kabul edilip robot kol 6 serbestlik dereceli gibi hareket etmektedir. Gerçek durumda ise θ_3 değeri mevcuttur ve iki durum arasında oluşan kol açısı ψ ters kinematik çözümlerinde kullanılacaktır.

Çizimde omuz-dirsek-bilek olarak baş harfleri kısaltma olarak kullanılan uzuvlar sırasıyla 2.,4. ve 6. uzuvlardır. Bu şekil için 5. uzuv sadece 6 numaralı uzvu etkilediği ve sadece onu kendi etrafında döndürüp konumunu değiştirmedeği için θ_5 için herhangi bir kabul yapılmamaktadır.



Şekil 3.3. Gerçek ve sanal dirsek arasındaki kol açısı ve gerçek ve sanal robotun aynı duruş için görünümü



Şekil 3.4. Sanal robotun parametreleri

Yukarıdaki Şekil 3.4'ten yararlanılarak θ_4 açısal değeri kolay olarak bulunabilir. Bunun için öncelikle bilinmeyen 2_6p vektörü D-H parametreleri kullanılarak çıkartılan aşağıdaki vektörler ile bulunur. 0_2p temelden omuza, 2_4p omuzdan dirseğe, 4_6p dirsekten bileğe, 6_7p bilekten robot ucuna vektörlerin kartezyen uzaydaki konumlarını ifade etmektedir.

$${}^0_2p = [0 \ 0 \ d_1]^T \quad (3.11)$$

$${}^2_4p = [0 \ d_3 \ 0]^T \quad (3.12)$$

$${}^4_6p = [0 \ 0 \ d_5]^T \quad (3.13)$$

$${}^6_7p = [0 \ 0 \ d_7]^T \quad (3.14)$$

Bu vektörler kullanılarak 2_6p omuzdan bileğe olan vektör aşağıdaki gibi bulunur.

$${}^2_6p = {}^0_2p - {}^0_7p - ({}^0_7R_7p) \quad (3.15)$$

Kosinüs teoreminden θ_4 bulunur.

$$\theta_4 = \left(\frac{\|{}^2_6p\|^2 - (d_3)^2 - (d_5)^2}{2d_3d_5} \right) \quad (3.16)$$

Diğer açılar bulmak için yukarıdaki sanal ve gerçek olarak ifade edilen benzetimden çıkartılan ψ açısal değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için öncelikle omuzdan-dirseğe ve

dirsekten bileğe olan birim vektörlerin çarpımı ile önce sanal düzlemin normal vektörü ve gerçek düzlemin normal vektörü aşağıdaki gibi bulunur.

$$v_{odb}^v = \left(\frac{{}^0_4p^v - {}^0_2p^v}{\|{}^0_4p^v - {}^0_2p^v\|} \right) \times \left(\frac{{}^0_6p^v - {}^0_2p^v}{\|{}^0_6p^v - {}^0_2p^v\|} \right) \quad (3.17)$$

$$v_{odb} = \left(\frac{{}^0_4p - {}^0_2p}{\|{}^0_4p - {}^0_2p\|} \right) \times \left(\frac{{}^0_6p - {}^0_2p}{\|{}^0_6p - {}^0_2p\|} \right) \quad (3.18)$$

$$sg_{\psi} = sgn[(\widehat{v_{odb}^v} \times \widehat{v_{odb}}) \cdot {}^2_6p] \quad (3.19)$$

$$\psi = sg_{\psi} \arccos(\widehat{v_{odb}^v} \times \widehat{v_{odb}}) \quad (3.20)$$

ψ açısı ve 0_7T dönüşüm matrisi bulunduktan sonra alt ve üst uzuvların açısal değerleri aşağıdaki adımlar ile bulunur. İlk olarak, 4 numaralı uzvun başlangıç noktasına göre dönüşüm matrisi ${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T$ ile bulunabileceği gibi aşağıdaki formülle de elde edilebilir. Burada ${}^0_4R^v$ referans düzleme göre 4. uzvun dönüşüm matrisidir ve ${}^0_{\psi}R$ ise dirseğin 2_6p vektörü etrafında dönüşünü ifade eden dönüşüm matrisidir.

$${}^0_4R = {}^0_{\psi}R {}^0_4R^v \quad (3.21)$$

3 numaralı uzuv, 4 numaralı uzuvla beraber hareket ettiği için aşağıdaki Denklem 3.22 yazılabilir.

$${}^0_3R = {}^0_{\psi}R {}^0_3R^v \quad (3.22)$$

Yukarıdaki denklemde ${}^0_{\psi}R$ dönüş matrisini bulmak için Rodriguez dönüş matrisi kullanılır.

$${}^0_{\psi}R = I_3 + \sin(\psi) [\widehat{{}^2_6p} x] + (1 - \cos(\psi)) [\widehat{{}^2_6p} x]^2 \quad (3.23)$$

Sonuç olarak formül aşağıdaki gibi şekillendirilir.

$${}^0_3R = [\widehat{{}^2_6p} x] {}^0_3R^v \sin(\psi) - [\widehat{{}^2_6p} x]^2 {}^0_3R^v \cos(\psi) + [I_3 + \widehat{{}^2_6p}^2] {}^0_3R^v \quad (3.24)$$

Yukarıdaki Denklem 3.24, A, B ve C yardımcı matrisleri ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$${}^0_3R = A_O \sin(\psi) + B_O \cos(\psi) + C_O \quad (3.25)$$

$$A_O = [\widehat{{}^2_6p} x] {}^0_3R^v \quad (3.26)$$

$$B_O = -[\widehat{{}^2_6p} x]^2 {}^0_3R^v \quad (3.27)$$

$$C_O = [\widehat{{}^2_6p} \widehat{{}^2_6p}^T] {}^0_3R^v \quad (3.28)$$

${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T$ çarpından çıkartılan aşağıdaki dönüşüm matrisi ile yukarıdaki eşitlikle $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ değerleri aşağıdaki gibi bulunabilir.

$${}^0_3R = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\theta_2 \cos\theta_3 - \sin\theta_1 \sin\theta_3 & \cos\theta_1 \sin\theta_2 & \cos\theta_3 \sin\theta_1 + \cos\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_3 \\ \cos\theta_1 \sin\theta_3 + \cos\theta_1 \cos\theta_3 \sin\theta_1 & \sin\theta_2 \cos\theta_3 & \cos\theta_2 \sin\theta_1 \sin\theta_3 - \cos\theta_1 \cos\theta_3 \\ -\sin\theta_2 \cos\theta_3 & \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \sin\theta_3 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$\theta_1 = \text{atan2}({}^0_3R[a_{o22} \sin\psi + b_{o22} \cos\psi + c_{o22}], {}^0_3R[a_{o22} \sin\psi + b_{o22} \cos\psi + c_{o22}]) \quad (3.30)$$

$$\theta_2 = {}^0_3R \arccos[a_{o32} \sin\psi + b_{o32} \cos\psi + c_{o32}] \quad (3.31)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}({}^0_3R[-a_{o33} \sin\psi - b_{o33} \cos\psi - c_{o33}], {}^0_3R[-a_{o31} \sin\psi - b_{o31} \cos\psi - c_{o31}]) \quad (3.32)$$

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ için yapılan işlemler üst uzuv içinde tekrar edilirse $\theta_5, \theta_6, \theta_7$ değerleri aşağıdaki gibi bulunur.

$${}^4_7R = A_b \sin(\psi) + B_b \cos(\psi) + C_b \quad (3.33)$$

$$A_b = {}^3_4R^T A_b^T {}^0_7R \quad (3.34)$$

$$B_b = {}^3_4R^T B_b^T {}^0_7R \quad (3.35)$$

$$C_b = {}^3_4R^T C_b^T {}^0_7R \quad (3.36)$$

$${}^4_7R = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 \cos\theta_6 \cos\theta_7 - \sin\theta_5 \sin\theta_7 & -\cos\theta_7 \sin\theta_5 - \cos\theta_5 \cos\theta_6 \sin\theta_7 & \cos\theta_5 \sin\theta_6 \\ \cos\theta_5 \sin\theta_7 + \cos\theta_6 \cos\theta_7 \sin\theta_5 & \cos\theta_5 \cos\theta_7 - \cos\theta_6 \sin\theta_5 \sin\theta_7 & \sin\theta_5 \sin\theta_6 \\ -\cos\theta_7 \sin\theta_6 & \sin\theta_6 \sin\theta_7 & \cos\theta_6 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}({}^4_7R[a_{b23} \sin\psi + b_{b23} \cos\psi + c_{b23}], {}^4_7R[a_{b13} \sin\psi + b_{b13} \cos\psi + c_{b13}]) \quad (3.38)$$

$$\theta_6 = {}^4_7R \arccos[a_{b33} \sin\psi + b_{b33} \cos\psi + c_{b33}] \quad (3.39)$$

$$\theta_7 = \text{atan2}({}^4_7R[a_{b32} \sin\psi + b_{b32} \cos\psi + c_{b32}], {}^4_7R[-a_{b31} \sin\psi - b_{b31} \cos\psi - c_{b31}]) \quad (3.40)$$

3.2. Jakobiyen ve Tekillik

İleri ve ters kinematik çözümlerinde sonra robot kolun uç noktasının doğrusal ve açısal hızlarının analiz edilmesinde kullanılan Jakobiyen matrisi elde edilecektir. Daha sonra elde edilen Jakobiyen matris ile tekillik analizi yapılacaktır.

Tekillik, robot kolun belirli bir pozisyonda bazı açısal değerlerle konumlandığı belirli durumlarda, eksen konumu nedeniyle, robotun kartezyen uzayda hareketlerinin sınırlanabilmesi anlamına gelmektedir. 7 eksenli bir robotun fazla olan bir ekleminden kaynaklanan esneklik, 6 eksenli robotun aksine, bir tekillikğe ulaşmak için iki veya daha fazla kinematik koşulun (örn. uzatılmış konum, 2 dönme eksenini çakışması) aynı anda aktif olmasını gerektirir. Bu tez çalışmasında robot koldan istenilen yörüngelerde herhangi bir tekillik durumu meydana gelmemiştir, bu yüzden tekillik çalışması genel bilgilendirme olarak verilir ve tekillikten kaçınma hesaplamaları bu çalışmanın dışında bırakılmıştır.

Bu kapsamda seçilen robotun uç noktasının bir eksenle hareketinin artık mümkün olmadığı dört farklı robot konumu vardır. Tekillik analizinin ardından bu konumlar gösterilmiştir.

Yukarıda belirtildiği gibi jakobiyen, her bir eklemün uç noktasının hızına katkısını belirler. Diğer bir deyişle jakobiyen, eklem hızlarıyla uç noktasının hızı arasında ilişki kurar. En genel kapsamda robot kolun jakobiyen matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

7 serbestlik dereceli robot için aşağıdaki gibi doğrusal ve açısal hız jakobiyen matrisleri ifade edilebilir.

$$J_v = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p_x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p_x}{\partial \theta_3} & \frac{\partial p_x}{\partial \theta_4} & \frac{\partial p_x}{\partial \theta_5} & \frac{\partial p_x}{\partial \theta_6} & \frac{\partial p_x}{\partial \theta_7} \\ \frac{\partial p_y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p_y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p_y}{\partial \theta_3} & \frac{\partial p_y}{\partial \theta_4} & \frac{\partial p_y}{\partial \theta_5} & \frac{\partial p_y}{\partial \theta_6} & \frac{\partial p_y}{\partial \theta_7} \\ \frac{\partial p_z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_3} & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_4} & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_5} & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_6} & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_7} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$J_w = [({}^0_7RZ_1)_{3 \times 1} \quad ({}^1_7RZ_2)_{3 \times 1} \quad ({}^2_7RZ_3)_{3 \times 1} \quad ({}^3_7RZ_4)_{3 \times 1} \quad ({}^4_7RZ_5)_{3 \times 1} \quad ({}^5_7RZ_6)_{3 \times 1} \quad ({}^6_7RZ_7)_{3 \times 1}] \quad (3.43)$$

Sonuç olarak aşağıdaki Denklem 3.44'te gösterildiği gibi jakobiyen matrisi son halini alır.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} & J_{17} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} & J_{27} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} & J_{37} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} & J_{47} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & J_{56} & J_{57} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} & J_{66} & J_{67} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Jakobiyen matrisi yukarıda Denklem 3.44'te elde edilmiştir, tekillik analizi için elde edilen bu 6x7 matrisin transpozesi alınıp aşağıdaki Denklem 3.45 ile tekillik değerlendirilmesi yapılmıştır.

$$\det(J(\bar{q})J(\bar{q})^T) = 0 \quad (3.45)$$

Fakat bu işlemi yukarıda elde edilen Jakobiyen matrisle yapmak oldukça karmaşık olacaktır ve sonuca ulaşmak oldukça güçtür. Bu nedenle referansı, robot uç noktası yerine bilek eklemi ile değiştirilerek Jakobiyen matrisi aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$J_G(q) = \begin{bmatrix} J_{11} & 0_{3 \times 3} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Burada yukarıda genel jakobiyenden;

$$J_{11}: J_{11}, J_{12}, J_{13}, J_{14}, J_{21}, J_{22}, J_{23}, J_{24}, J_{31}, J_{32}, J_{33}, J_{34}$$

$$J_{21}: J_{41}, J_{42}, J_{43}, J_{44}, J_{51}, J_{52}, J_{53}, J_{54}, J_{61}, J_{62}, J_{63}, J_{64}$$

$$J_{22}: J_{45}, J_{46}, J_{47}, J_{55}, J_{56}, J_{57}, J_{65}, J_{66}, J_{67}$$

$$0_{3 \times 3}: J_{15}, J_{16}, J_{17}, J_{25}, J_{26}, J_{27}, J_{35}, J_{36}, J_{37}$$

değerlerini temsil etmektedir. Manipülâtörün eklemleri bu noktada ters kinematik analizinde yapıldığı gibi iki bölüme ayrılabilir: Robotun uç noktasının konumundan sorumlu olan alttaki dört eklem θ_u ve oryantasyonundan sorumlu olan üstteki üç eklem θ_l olarak ifade edilip aşağıdaki matrisler elde edilebilir.

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_u \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$\dot{\theta}_u = [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{\theta}_4]^T \quad (3.48)$$

$$\dot{\theta}_l = [\dot{\theta}_5 \quad \dot{\theta}_6 \quad \dot{\theta}_7]^T \quad (3.49)$$

Böylece robot uç noktasının hız değerleri, sadeleştirilmiş jakobiyen ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_w \\ W_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & 0_{3 \times 3} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_u \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$V_w = J_{11} \dot{\theta}_u \quad (3.51)$$

$$W_w = J_{21} \dot{\theta}_u + J_{22} \dot{\theta}_l \quad (3.52)$$

Sonuç olarak bu doğrultuda manipülatörün teklik problemi, konum tekliği problemi ve yönelim tekliği problemi olarak ayrıştırılabilir. Burada J_{11} , konum tekliği problemi ile, J_{21} ve J_{22} ise yönelim tekliği problemi ile ilgilidir.

3.2.1. Konum Tekliği Problemi

Denklem 3.51'den, manipülatörün konum tekliğinin ancak şu durumlarda oluştuğu görülebilir;

$$\det(J_{11}J_{11}^T) = 0 \quad (3.53)$$

$J_{11}J_{11}^T$ Jakobiyen alt matrislerinin minörlerinin toplamı olarak temsil edilebilir.

$$\det(J_{11}J_{11}^T) = \sum_{i=1}^4 M_i^2 \quad (3.54)$$

Yukarıda bahsedildiği gibi bu yöntemin uygulanmasında referans olarak robotun uç noktası yerine dirsek alınacaktır. Bu işlem aşağıdaki matris yardımı ile yapılacaktır.

$${}^i J_G(\bar{q}) = B \cdot J_G(\bar{q}) \quad (3.55)$$

Burada;

$$B = \begin{bmatrix} {}^iR_0 & 0 \\ 0 & {}^iR_0 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Böylelikle ilk başta elde edilen karmaşık matris artık çözülebilir seviyeye indirilmiş olur. Yukarıdaki Denklem 3.54'ten $M_i^2 (i = 1,2,3,4)$, Jakobiyen alt matrisi $J_{11} = [J_{11}^1 \ J_{11}^2 \ J_{11}^3 \ J_{11}^4]^T$ 'nin minörüdür. Sonuç olarak M_i aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$M_1 = \det([J_{11}^1 \ J_{11}^2 \ J_{11}^3]) = 0 \quad (3.57)$$

$$M_2 = \det([J_{11}^2 \ J_{11}^3 \ J_{11}^4]) = 42 \cos(q3)(\cos^2(q4) - 1)/625 \quad (3.58)$$

$$M_3 = \det([J_{11}^1 \ J_{11}^3 \ J_{11}^4]) = -42 \sin(q2) \sin(q3) \sin^2(q4)/625 \quad (3.59)$$

$$M_4 = \det([J_{11}^1 \ J_{11}^2 \ J_{11}^4]) = 42 \cos(q2) \cos(q3)/625 + 441 \sin(q2) \sin(q4)/6250 - 42 \cos(q2) \cos(q3) \cos^2(q4)/625 + 42 \cos(q4) \sin(q2) \sin(q4)/625 \quad (3.60)$$

Yukarıdaki 4 minörün toplamının sıfır olabilmesi için her birinin ayrı ayrı sıfır olması gerekmektedir. Böylece, $\sin(q4)$ ve $\sin(q2)$ nin ikisinden en az birinin ve $\cos(q3)$ kesin sıfır olması gerekmektedir. Buradan pozisyon tekilliği için $q4 = 0$, $q2 = 0$ ve $q3 = \pm \pi/2$ sonucuna ulaşılabilir.

3.2.2. Oryantasyon Tekilliği Problemi

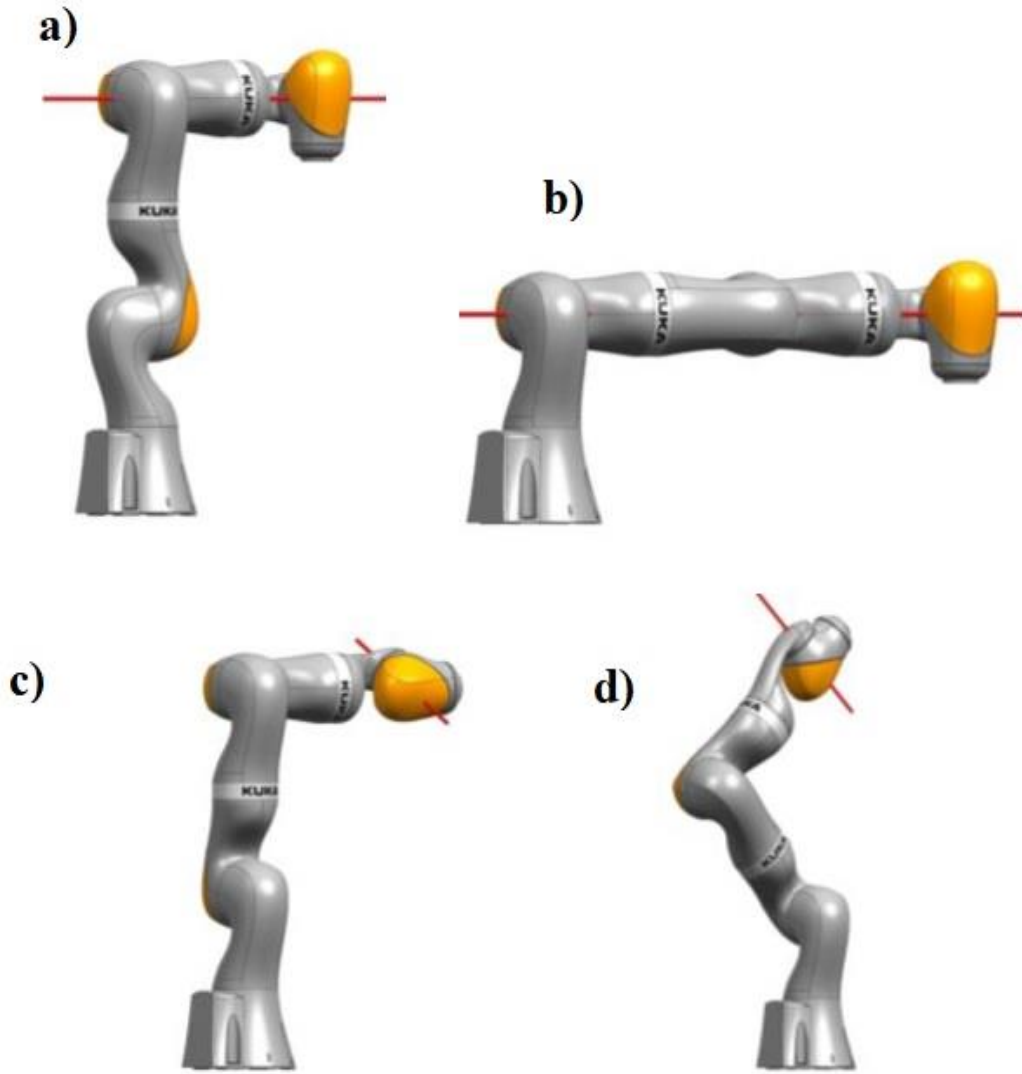
Oryantasyon tekilliğini bulmak için aşağıdaki denklemler çözülmelidir.

$$\det(J_{21}(\bar{q})J_{21}(\bar{q})^T) = 2 \sin^2(q2) + 2 \sin^2(q3) - 2 \sin^2(q2) \sin^2(q3) = 0 \quad (3.61)$$

$$\det(J_{22}(\bar{q})) = -\sin(q6) = 0 \quad (3.62)$$

Buradan görüldüğü üzere oryantasyon tekilliği $q2 = 0$, $q3 = 0$ ve $q6 = 0$ olduğu durumlarda meydana gelmektedir.

Yukarıda ulaşılan değerler KUKA Roboter kullanıcı kitabının 14. bölümünde bulunan tekillik değerleri ile aynı şekilde bulunmuştur. Aşağıdaki Şekil 3.5'te bu tekillik durumları gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Tekillik meydana getiren durumlar, **a)** $q_2 = 0, q_3 = 0$, **b)** $q_4 = 0$, **c)** $q_4 = \pi/2$ ve $q_6 = 0$ **d)** $q_5 = \pi/2$ ve $q_6 = 0$

Şekil 3.5'te gösterilen robot konfigürasyonları ve belirtilen açılarının oluşması durumunda robotun hareketi kırmızı renkle gösterilen eksenlerde kısıtlanmış olur. Başka bir deyişle robot kolun uç noktası artık belirtilen bu eksenler boyunca hareket edememektedir. Tekillikler, robotik sistemlerde optimum performans için ciddi bir sorun olma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, bir robot inşa edilirken tasarım sürecinin en başından itibaren anlaşılmalı ve not edilmelidir.

Yukarıda ileri kinematik, ters kinematik, jakobiyen ve tekillik analizlerinde yapılan bütün matematiksel hesaplamaların sonuçları ve bu hesaplamaların nasıl yapıldığı hakkında bilgi veren Matlab kodları bu çalışmanın sonunda bulunan ekler bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.3. Dinamik Analiz

Dinamik modelleme, bir sistemdeki kuvvet ve hareket arasındaki ilişkiyi açıkça tanımlayan denklemlerin türetilmesi anlamına gelir. Bir robotun çalışmasını gerekli olan şekilde kontrol edebilmek için, kontrol algoritması tasarımında ve hareket simülasyonunda dinamik modelin dikkate alınması önemlidir. Genel olarak sistemin dinamik denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$M_q(q)\ddot{q} + C_q(q, \dot{q})\dot{q} + G_q(q) = \tau \quad (3.63)$$

Burada $M_q(q)$, $C_q(q, \dot{q})$ ve $G_q(q)$ sırasıyla atalet matrisi, Coriolis vektörü ve yerçekimi vektörünü ifade etmektedir.

Denklem 3.63'teki tork eşitliği, aşağıdaki şekilde Lagrange denklemi ile de ifade edilebilir.

$$L = K - P = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (3.64)$$

Burada; K kinetik enerji P ise potansiyel enerjidir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_i}(q)^T J_{v_i}(q) + J_{w_i}(q)^T R_i(q) I_i R_i(q)^T J_{w_i}(q)] \dot{q} \quad (3.65)$$

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n g^T r_{c_i} m_i \quad (3.66)$$

Yukarıda gösterilen kinetik enerji eşitliği aşağıdaki gibi de ifade edilebilir,

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_i}(q)^T J_{v_i}(q) + J_{w_i}(q)^T R_i(q) I_i R_i(q)^T J_{w_i}(q)] \dot{q} = \frac{1}{2} M_q(q) \dot{q} \quad (3.67)$$

buradan kütle atalet momenti aşağıdaki gibi elde edilir;

$$M_q(q) = m_i J_{v_i}(q)^T J_{v_i}(q) + J_{w_i}(q)^T R_i(q) I_i R_i(q)^T J_{w_i}(q) \quad (3.68)$$

Coriolis vektör ve yerçekimi vektörü de aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$C_q(q, \dot{q}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ijk}(q) \dot{q}_j \quad (3.69)$$

$$G_q(q) = \frac{\partial P}{\partial q} \quad (3.70)$$

Dinamik denklem kartezyen koordinatlarda ifade edilirse;

$$M_x(q)\ddot{x} + C_x(q, \dot{q})\dot{x} + G_x(q) + f_{ext} = f \quad (3.71)$$

x ve q arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (3.72)$$

$$\ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q)\dot{q} \quad (3.73)$$

Buradan yukarıdaki bütün denklemler ile Denklem 3.63'te bulunan sistemin dinamik denklemindeki bütün değişkenler kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$M_x(q) = (J^+)^T M J^+ \quad (3.74)$$

$$G_x(q) = (J^+)^T G \quad (3.75)$$

$$C_x(q) = (J^+)^T [C - M\dot{J}^+] J^+ \quad (3.76)$$

$$f = (J^+)^T \tau \quad (3.77)$$

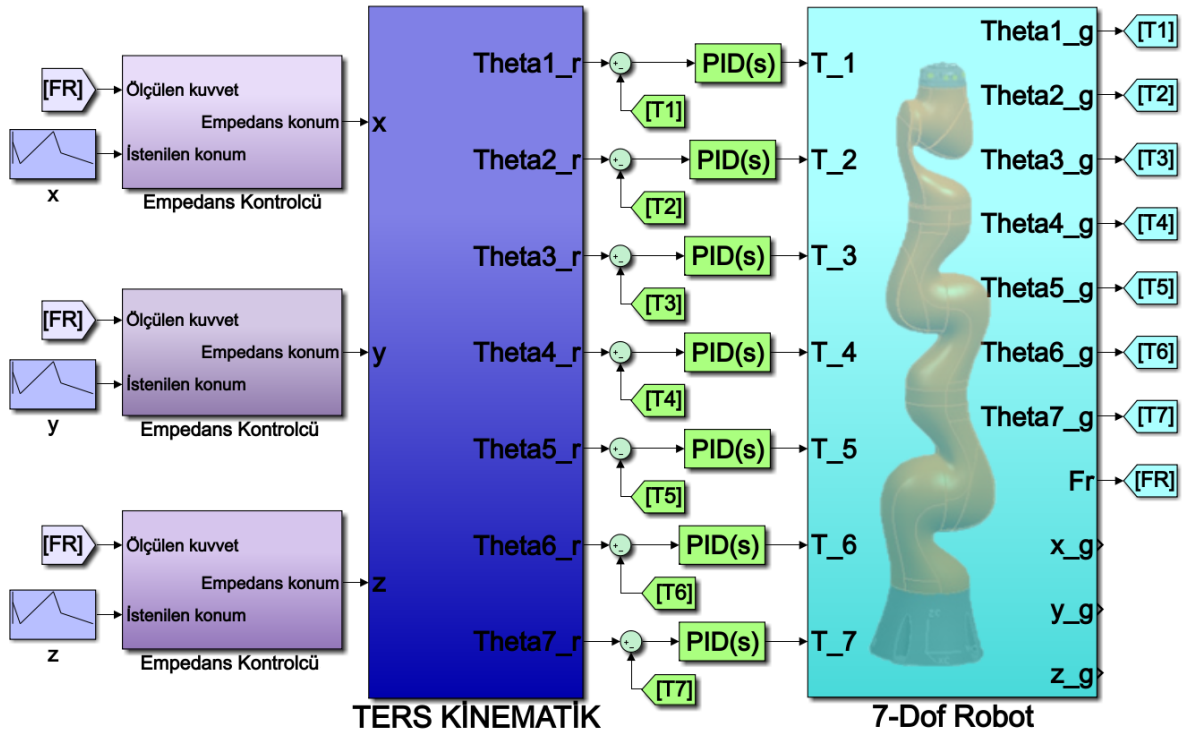
Burada M , C ve G sırasıyla $M_q(q)$, $C_q(q, \dot{q})$ ve $G_q(q)$ denklemlerini ifade etmektedir. J kare matris olmadığından J^+ sözde ters matris (pseudo inverse matrix) olarak tanımlanır, J ise yukarıda bulunan matrisi ifade eder.

4. KONTROLÇÜ TASARIMI VE OPTİMİSAZYONU

Daha önce belirtildiği gibi robotlarda kontrol çok önemli bir gerekliliktir. Özellikle çalışma ortamında engeller bulunabilen veya en önemlisi insanlarla aynı çalışma ortamını paylaşan işbirlikçi robotlarda kontrol hayati önem taşımaktadır. Bu kapsam da burada yapılacak kontrolcü tasarımı ve optimizasyonu önem taşımaktadır. Seçilen yedi serbestlik dereceli işbirlikçi robot için bu bölümde PID kontrolcü ve Empedans kontrolcü tasarımı MATLAB/Simulink ortamında yapılacaktır.

Yapılan bu tasarımda her eklem için 3 toplamda 21 PID parametresi ve 3 Empedans parametresi Arı Algoritması kullanılarak optimize edilecektir. Arı Algoritması ile optimizasyon yöntemi kullanarak kontrolcü tasarlanmasının ilk uygulamasını Pham ve Kalyoncu (2009) önermişlerdir. Sonrasında, üzerinde çalışılan birçok sistemde farklı kontrolçülere ait parametrelerin Arı Algoritması ile optimizasyon yapılarak ayarlanmasına yönelik çalışmalar sunulmuştur (Sen ve Kalyoncu, 2015; Bakırcıoğlu ve ark., 2016b; Bilgic ve ark., 2016; Sen ve ark., 2016; Sen ve Kalyoncu, 2016; Sen ve ark., 2018; Eser ve ark., 2021; Çınar ve ark., 2022; Gümüş ve ark., 2023).

MATLAB/Simulink ara yüzünde tasarlanan kontrol şeması aşağıda Şekil 4.1'de genel hatları ile gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kontrol şeması

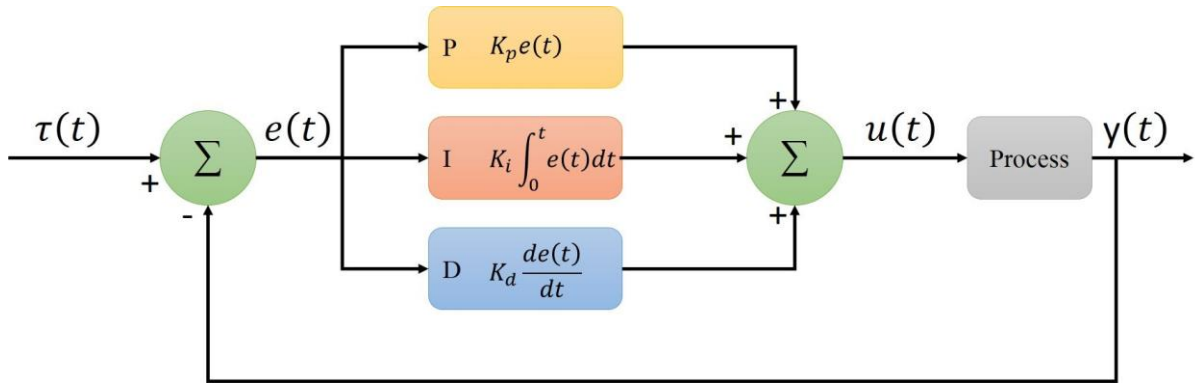
4.1. PID Kontrol

PID kontrolcüler uzun yıllardır endüstride ve akademik çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Şekil 4.2). PID algoritması hata değerini azaltmak için oransal, integral ve türevsel olmak üzere üç ayrı sabit parametreyi kontrol eder. Sezgisel olarak, bu değerler mevcut değişim göz önüne alınarak şu şekilde yorumlanabilir; P mevcut hataya bağlıdır, I geçmiş hataların toplamı ve D gelecekteki hataların bir tahminidir. Sistem, bu üç eylemin ağırlıklı toplamı yoluyla kontrol edilerek istenen duruma getirilir. Bu katsayılar aşağıdaki gibi kısaca tanımlanabilir.

Oransal kazanç katsayısı, K_p : Meydana gelen hataya bağlı olarak PID çıkışına aktarılacak olan değer doğrusal bir şekilde değişir. Dinamik cevabın hızlıca referans değerine yaklaşmasını sağlar ancak bununla birlikte sistem cevabındaki aşımaları artırır.

İntegral katsayı, K_i : Sistemin referans verilen değere oturmasını sağlamak en önemli görevidir; yani kalıcı durum hatasını azaltmaktır. Bununla birlikte sistem cevabını hızlandırabilir ancak bunun bir yan etkisi olarak dinamik cevapta salınımlar oluşabilir.

Türev katsayısı, K_d : Sistem cevabının hızlandırılmasına katkı sağlar. Değerinin yükseltilmesi salınımlar ve aşımaları artırabilir. Oransal kazançtan farklı olarak oluşan hata değerinin eğimini dikkate alır.



Şekil 4.2. PID kontrol şeması

PID kontrol parametreleri geleneksel yöntemlerle belirlenebildiği gibi bu çalışmada olduğu gibi farklı yöntemlerle de belirlenebilmektedir. PID Kontrolcü genel transfer fonksiyonu aşağıda görülmektedir.

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.1)$$

Bu eşitlik düzenlendiği zaman T_i ve T_d katsayılarının oransal kazanç parametresi olan K_p ile olan bağlantıları aşağıdaki denklemde gösterilen, integral kazanç K_i ve türevsel kazanç K_d parametrelerini verir.

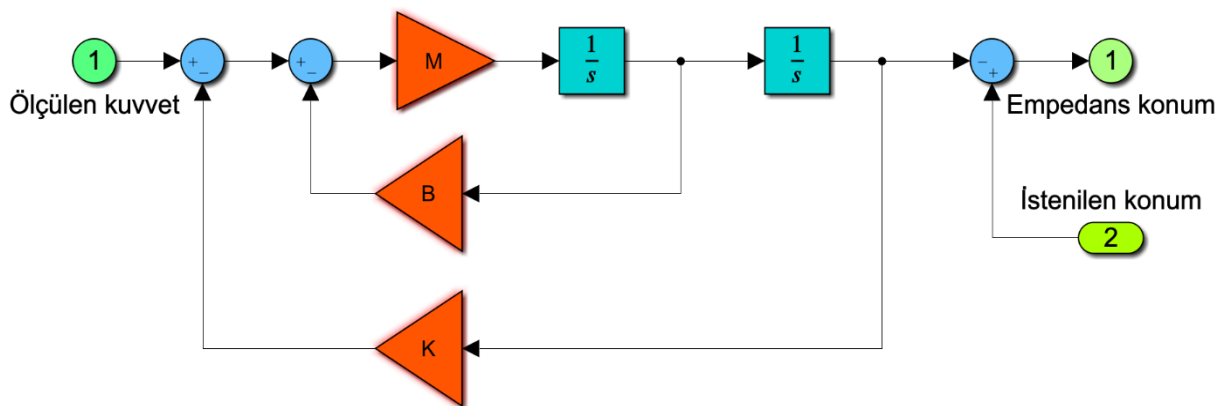
$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.2)$$

PID kontrolcünün matematiksel ifadesi aşağıdaki denklemde verilmiştir. Burada $u_i(t)$ kontrolcü sinyali, sistemin giriş sinyalidir ve $e_\theta(t)$ ise konum hatasıdır.

$$u_i(t) = K_p e_\theta(t) + K_i \int_0^t e_\theta(t) dt + K_d \frac{de_\theta(t)}{dt} \quad (4.3)$$

4.2. Empedans Kontrol

Empedans kontrol problemi, ortaya çıkan temas kuvvetlerinin hedef empedans kuralına göre robot referans konumuyla gerçek konumu arasındaki bir fark ortaya çıkaracak biçimde bir kontrol yöntemi tasarımı gerekliliği olarak tanımlanabilir. Empedans kontrol, robotun temasa geçtiği çevreye uygun şekilde modellenmesini sağlayan ve harici kuvvetlere karşı davranışını kontrol eden bir kontrol yöntemidir. Empedans kontrol, direkt olarak robot ile temasa geçtiği cisim arasında oluşan harici kuvvetleri kontrol etmek yerine, konum ile oluşan harici kuvvetler arasında bir bağıntı kurarak, robotun harici kuvvetlere karşı davranışını tanımlar. Empedans kontrol yapısı Şekil 4.3'te verilmiştir. Burada gösterilen M, B ve K sırasıyla atalet, sönüm ve sertlik katsayılarını ifade etmektedir.



Şekil 4.3. Empedans kontrol şeması

Hogan'ın geliştirdiği empedans kontrol yöntemi, kuvvet kontrol yönteminden ziyade bir etkileşim kontrol yöntemi olarak kabul edilir. Hogan'ın bakış açısına göre empedans kontrolün temeli, robotun kontrol tasarımının yalnızca yörünge takibine göre değil, aynı zamanda robotun mekanik empedansını ayarlayacak şekilde tasarlanmasıdır.

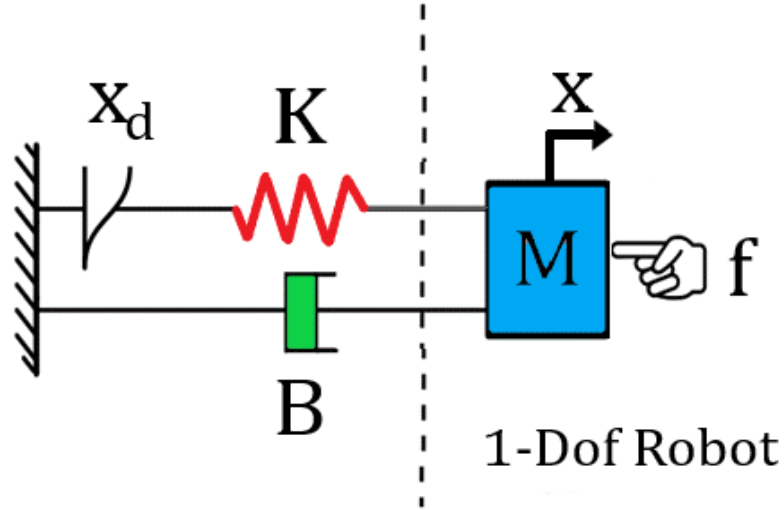
Empedans kontrol yöntemi, literatürde konum tabanlı ve kuvvet tabanlı olarak uygulanmaktadır. Bu tez çalışmasında da kullanılmış olan konum tabanlı empedans kontrol yöntemi, geleneksel pozisyon denetleyicilerine sahip robotik sistemlerde, kuvvet ve etkileşim kontrolü gereksinimini karşılayabilmek için uygun ve gerçekleştirilebilir bir seçenektir.

Başka bir deyişle konum tabanlı empedans kontrol, robot ile çevre arasında ortaya çıkan temas kuvvetlerinin, empedans kuralına göre robotun gerçek konumuyla referans konumu arasında bir fark ortaya çıkaracak biçimde kontrol edilmesi olarak tanımlanabilir.

Kuvvet tabanlı empedans kontrolcüsünde ise robot yüzey ile etkileşim haline geçtiğinde mekanik empedans meydana gelir. Empedans kontrolcü ayrıca, robotun yörünge takibini de kontrol eder ve temas kuvvetleriyle ilişkilerini ayarlayarak, istenilen aralıkta temas kuvveti kontrolü sağlanır. Empedans kontrolcü, konum ve kuvvet kontrolü için parametre değişikliğine gerek kalmadan kontrolü sağlar. Empedans kontrolcüsünde temas halinde olacak yüzey ile ilgili bilgiye ihtiyacı yoktur. Sistem ve yüzey arasındaki dinamik etkileşim empedans yoluyla ayarlanır. Bu sebeple empedans kontrol, özellikle etkileşim durumlarında, daha faydalıdır. Empedans kontrolcü, robotun yüzey ile temas anında robotun pozisyonunu, hızını, temas kuvvetini ölçüp geri besleme yoluyla istenen mekanik empedansa karar verir.

Empedans kontrolcü, robotun kendisinden istenilen yörüngeyi takip ederken içinde bulunduğu çevreyle temas kurduğu noktada konum-kuvvet etkisinin etkileşimini düzenler. Gerçek sistemlerde bu etkileşim belli bir aralıkta tutulup temas kuvveti ve robot ucunun izleyeceği yol empedans kontrolcü aracılığıyla regüle edilerek çarpışmalar önlenir. Ayrıca, ölçülen temas kuvvetleri, kontak durumunun anında geri bildirimini sağlamak için denetleyiciye dahil edilmiştir. Kuvvet geri beslemeli sistemde, herhangi bir kuvvetle karşılaşmadığında yörünge takip edilir. Yörünge üzerinde yüzey ile temas anında bir tepki kuvveti oluştuğunda kuvvet sınırlandırılır ve empedans kontrolcü robotun dinamik davranışını kontrol edecektir (Yöngül, 2019).

Kuvvet ile hareket ilişkisi dikkate alınarak empedans kontrol tasarımı sıfır, bir ve ikinci dereceden bir dinamik model kullanılarak yapılabilir. İkinci dereceden kütle-yay-damper sistemiyle ifade edilen mekanik empedans Şekil 4.4 ile tanımlanabilir.



Şekil 4.4. İkinci dereceden empedans kontrol gösterimi

Zaman içerisinde kuvvet kontrolü konusunda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalara örnek olarak farklı empedans kontrol yaklaşımları aşağıdaki gibi gösterilebilir.

1. Anlık Empedans Kontrol
2. Uyarlamalı Empedans Kontrol
3. Genişletilmiş Empedans Kontrol
4. Uzaysal Empedans Kontrol
5. Hibrit Empedans Kontrol

Empedans kontrol denklemi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$F = M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + B_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_d(x - x_d) \quad (4.4)$$

Yukarıdaki denklemde; F tepki kuvveti ve M_d , B_d , K_d sırası ile istenen atalet, sönüm ve sertlik değerleridir. Burada;

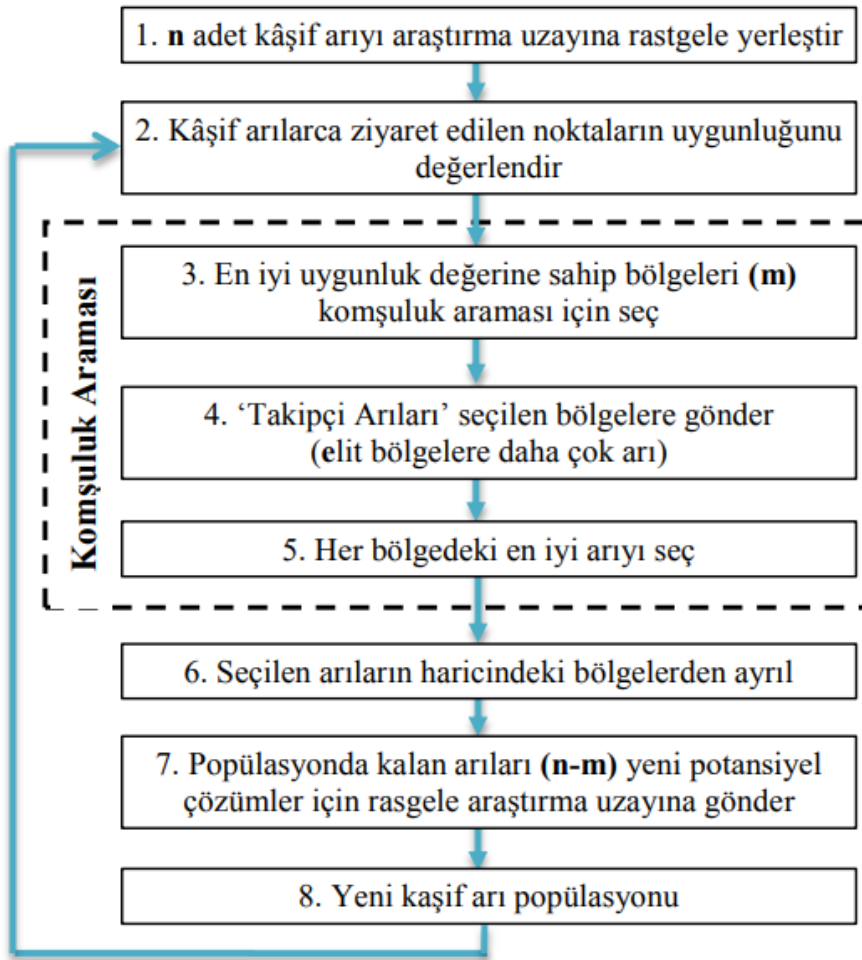
$$F = [f_x, f_y, f_z, \tau_\alpha, \tau_\beta, \tau_\gamma]^T \quad (4.5)$$

$$x = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T \quad (4.6)$$

olarak tanımlanabilir.

4.3. Arı Algoritması ve Optimizasyon

Seçilen yedi serbestlik dereceli robot ile yapılan bu çalışmada kontrolcü optimizasyonu Arı Algoritması ile yapılacaktır. Arı Algoritması ilk olarak 2006 yılında D.T. Pham ve arkadaşları tarafından önerilmiş olup, bal arılarının kaynak arama davranışını taklit eden popülasyon tabanlı, sezgisel bir arama algoritmasıdır. Arıların kaynak arama davranışları, öğrenme, hatırlama ve bilgi paylaşma özellikleri sürü zekâsının en ilgi çekici araştırma alanlarından birisidir. Bal arıları arasındaki kolektif zekânın önemli bir göstergesi; buldukları kaynağın (nektar, su vs.) kalitesi hakkındaki bilgiyi paylaştıkları salınım dansıdır. Arı Algoritmasına ait akış şeması Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Arı Algoritması (AA) akış şeması

D.T. Pham tarafından geliştirilen temel Arı Algoritması birçok parametre içermektedir. Bu parametreler: kâşif arı sayısı (n), ziyaret edilen n nokta içinden seçilen en uygun bölge sayısı (m), seçilen m bölge içindeki en iyi bölge sayısı (e), en iyi e bölgeye gönderilen arı sayısı (ne_p),

kalan (m-e) bölgeye gönderilen arı sayısı (nsp), bölge boyutu (ngh) ve durdurma kriteri /iterasyon (itr) sayısıdır.

Algoritma n adet kâşif arının araştırma uzayına rastgele yerleştirilmesi ile başlar. 2. adımda, kâşif arılarca ziyaret edilen noktaların birbirlerine göre uygunlukları değerlendirilir. 3. adımda, n adet bölge içerisinde diğerlerine göre daha uygunluk değerine sahip m adet bölge seçilir. 4.ve 5. adımda, m adet bölge içerisinde en iyi uygunluk değerine sahip elit bölgeler (e) ve geriye kalan bölgeler (m-e) seçilir. Bu bölgelerin komşuluk arama boyutu (ngh) belirlenir. Seçilen bölgelerde komşuluk araması (bölge içinde en uygun noktaların araştırılması) için, daha umut verici çözümleri temsil eden en iyi e bölgeye seçilen diğer bölgelere göre daha fazla takipçi arı (nep), diğer bölgelere ise daha az takipçi arı (nsp) gönderilerek, detaylı arama yapılır. Her bölge içerisinde en uygun değere sahip arı seçilir. 6. 7. ve 8. adımda ise, her bölgede en uygun değere sahip arı haricindeki diğer arılar araştırma uzayından ayrılır. Popülasyondaki diğer arılar (n-m) yeni potansiyel çözümler elde etmek için tekrar, rastgele olarak, araştırma uzayına yerleştirilirler. Optimizasyon durdurma kriteri (itr) sağlanana kadar devam ettirilir. Her bir iterasyonun sonunda yeni popülasyon; seçilen her bir bölgenin temsilcileri ve rastgele arama yapan kâşif arılar olmak üzere iki parçadan oluşacaktır (Sen, 2016).

Arı Algoritması, sisteme ait uzuvların referans olarak verilen açısal konumlara en kısa sürede en az hata ile gidebilecek gerekli kontrolcü kazançlarını bulmak için uygulanacaktır. PID kontrol için uygulanan amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$J = \sqrt{(|X_{ref} - X_{ger}|)^2 + (|Y_{ref} - Y_{ger}|)^2} \quad (4.7)$$

Yukarıda açıklandığı üzere Arı Algoritması ile, robot kola ait eklemlerin istenilen açısal değerlere ulaşırken ve karşısına çıkacak engellere karşı mukavemet göstermeden istenilen konuma ulaşması için gerekli kontrolcü kazançları aranmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda ilk olarak deneme yanılma yöntemi ile kontrolcü parametreleri için belirli aralıklara ulaşılmıştır. Daha sonra bulunan bu aralıklarda Arı Algoritması doğrudan uygulanarak optimizasyon sağlanmıştır. Ayrıca empedans kontrolden gelebilecek sağlıklı verilerin sonucunda PID kontrolcünün bu verileri takip etmemesi için iki kontrolcü ayrı ayrı optimize edilmiştir. İlk olarak PID kontrolcü optimizasyonu yapılmıştır ve daha sonra empedans kontrolcü optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda PID kontrolcü kazançları için arama aralıkları aşağıdaki Çizelge 4.1’de olduğu gibi belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. PID kontrol optimizasyonu için seçilen arama aralıkları

	Kp_1	Kp_2	Kp_3	Kp_4	Kp_5	Kp_6	Kp_7
Alt Sınır	0	1950	3	50	10	0	0
Üst Sınır	3	2000	8	100	20	3	3

	Ki_1	Ki_2	Ki_3	Ki_4	Ki_5	Ki_6	Ki_7
Alt Sınır	0	0	10	150	5	0	0
Üst Sınır	3	3	20	250	10	3	3

	Kd_1	Kd_2	Kd_3	Kd_4	Kd_5	Kd_6	Kd_7
Alt Sınır	0	700	3	0	0	0	0
Üst Sınır	5	750	8	3	3	3	3

Arı algoritması rastgele değerler üreterek baslar, belirlenen arama aralıkları içerisinde amaç fonksiyonunu minimize edecek optimum parametreler araştırılır. Program ilk olarak verilen aralıkta kazanç katsayılarını rastgele belirler, daha sonra Simulink benzetim modelini çalıştırarak bu kazançlara göre amaç fonksiyonunu hesaplayıp seçilen kazanç değerlerinin uygunluğunu denetler ve bölgeleri belirler. Algoritma girilen iterasyon sayısına göre, verilen aralıkta en iyi kazanç değerlerini bulmaya çalışır. Çizelge 4.2’de Arı algoritmasının yukarıda açıklanan çalışması için kullandığı parametreler verilmiştir.

Çizelge 4.2. Arı Algoritması parametreleri ve değerleri

Parametre	Değeri	Açıklama
n	20	Kâşif Arı Sayısı
m	6	Ziyaret Edilen n Nokta İçinden Seçilen En Uygun Bölge Sayısı
e	3	Seçilen m Bölge İçindeki En İyi Bölge Sayısı
nep	10	En İyi e Bölgeye Gönderilen Arı Sayısı
nsp	5	Kalan (m-e) Bölgeye Gönderilen Arı Sayısı
ng	0.01	Bölge Boyutu
itr	150	Durdurma Kriteri / İterasyon

Yukarıda gösterilen Şekil 4.5'teki Arı Algoritması akış şemasına uygun olarak ve Çizelge 4.2'deki değerlerle PID kontrol kazançları optimize edilmiştir ve Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Optimizasyon sonrası PID kazanç değerleri

Kp_1	Kp_2	Kp_3	Kp_4	Kp_5	Kp_6	Kp_7
0.51	1976.7	4.60	81.18	18.27	0.70	0.14
Ki_1	Ki_2	Ki_3	Ki_4	Ki_5	Ki_6	Ki_7
0.001	0.03	14.80	201.19	7.21	0.56	0.13
Kd_1	Kd_2	Kd_3	Kd_4	Kd_5	Kd_6	Kd_7
3.26	744.31	5.18	0.03	1.05	0.03	0.09

Yukarıda belirtildiği üzere iki kontrolcü ayrı ayrı optimize edilmiştir. Bu kapsamda uygulanan Empedans kontrol amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$J = \sqrt{(|X_{emp} - X_{ger}|)^2 + (|Y_{emp} - Y_{ger}|)^2} \quad (4.8)$$

Empedans kontrolcü katsayıları için arama aralıkları Çizelge 4.4'teki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. Empedans kontrol optimizasyonu için seçilen arama aralıkları

	M	B	K
Alt Sınır	0	0	0
Üst sınır	5	5	5

Tekrar empedans kontrol içinde Arı Algoritması akış şemasına göre ve Çizelge 4.2'deki değerlerle Empedans kontrol katsayıları aşağıdaki Çizelge 4.5'teki gibi optimize edilmiştir.

Çizelge 4.5. Optimizasyon sonrası Empedans katsayı değerleri

M	B	K
1.98	2.47	4.84

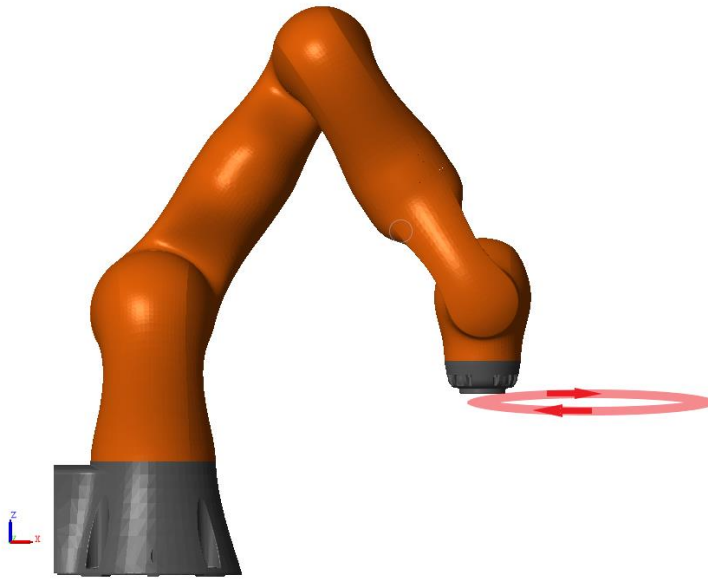
5. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu çalışmada seçilen yedi serbestlik dereceli işbirlikçi robotun matematiksel modeli çıkartılmış, kinematik ve dinamik analizlerinin yanında jakobiyen ve tekillik analizi de yapılmıştır. Kontrolcü tasarımı ve robotun çalışması, Matlab/Simulink ortamında kontrol edilmiştir. Daha sonra beş farklı senaryo için kontrolcü çalışma performansı değerlendirilmiştir. Bütün bu çalışmalar aşağıda grafiklerle gösterilmiş ve gerekli değerlendirmeler yapılmıştır.

1) Dışarıdan kuvvet uygulanmadan robot kolun istenilen yörüngeyi takip etmesi

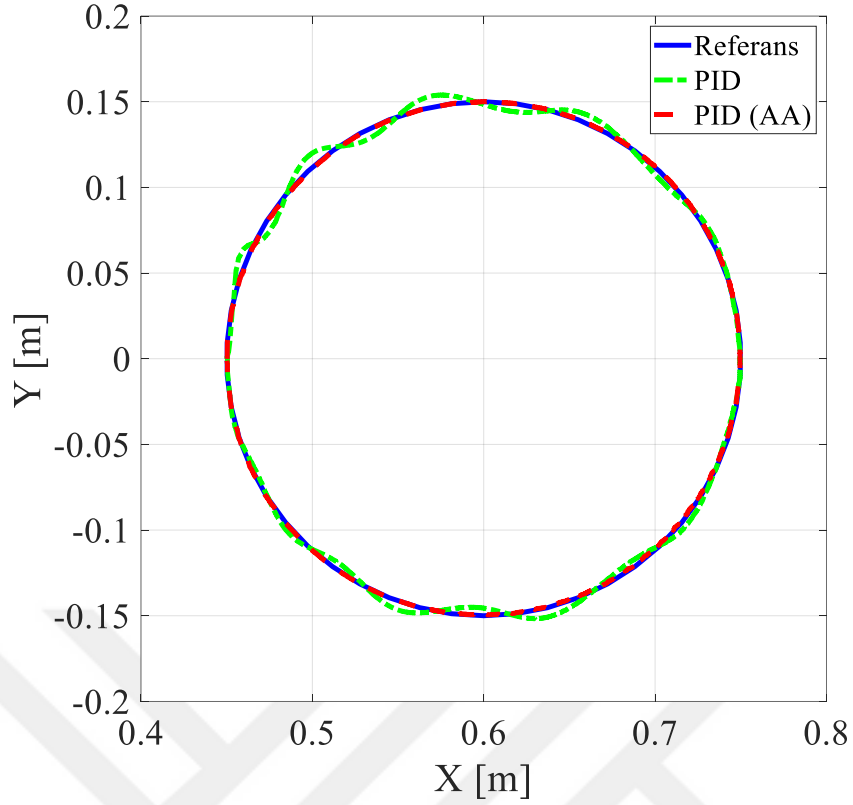
Bu senaryo için robot kolun dışarıdan kuvvete maruz kalmadan PID kontrolcü denetiminde dört farklı hareket yörüngesindeki davranışları, tek tek şekiller ve grafiklerle sunulacaktır.

İlk olarak aşağıda Şekil 5.1'deki gibi robot kolun dairesel bir eksende hareket etmesi takip edilmiştir.



Şekil 5.1. Robot kol ve tanımlanan dairesel eksen

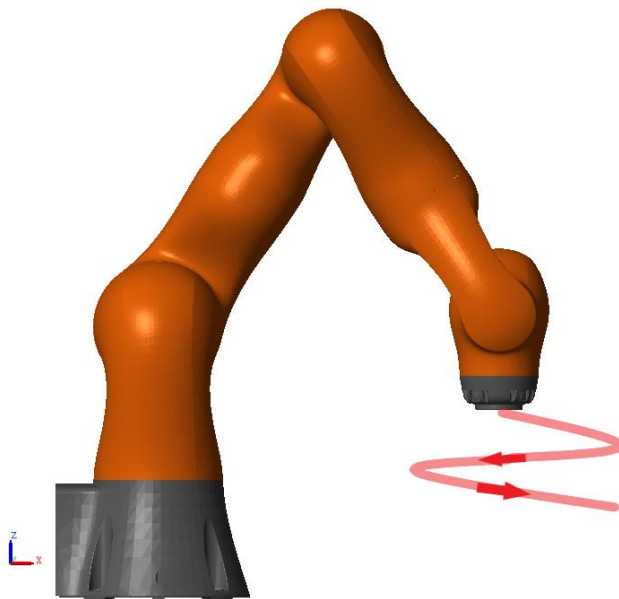
Robot kol herhangi bir dış kuvvete maruz kalmadan yukarıdaki yörüngeyi takip etmiştir. Referans alınan bu yörünge ile PID kontrolünde gerçekleşen yörünge, optimizasyon öncesi ve sonrası sonuçlarıyla aşağıdaki Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Dairesel hareket için istenen ve gerçekleşen yörüngeler

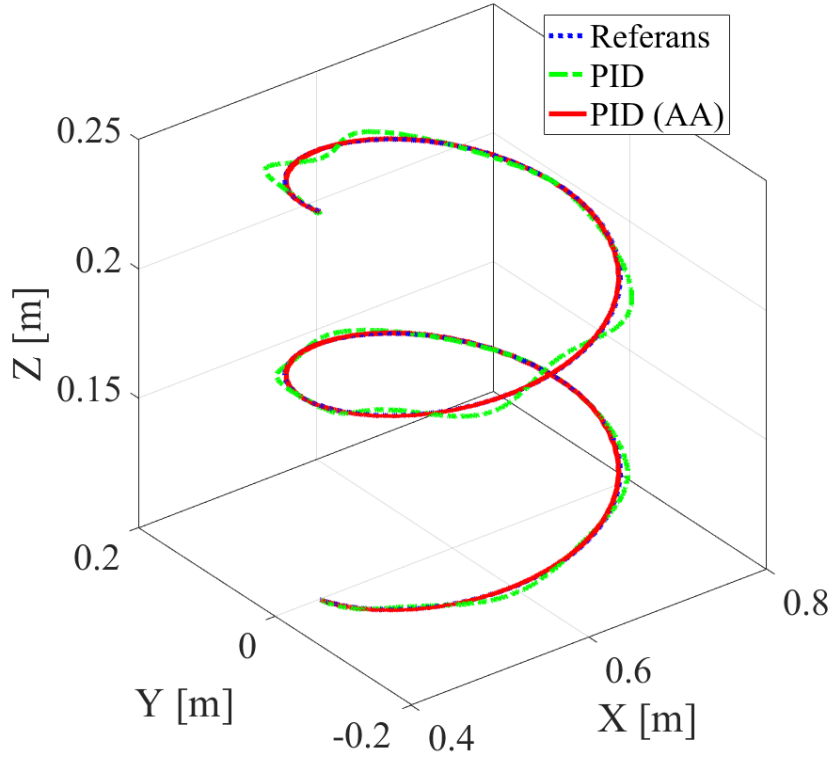
Yukarıda görüldüğü gibi robot kol istenilen referans yörüngeyi, optimize edilen PID kontrolcü (PID (AA)) denetiminde yüksek hassasiyetle takip etmiştir.

İkinci olarak robot kolun aşağıda Şekil 5.3'te gösterilen spiral bir yörüngeyi takip etmesi istenmiştir.



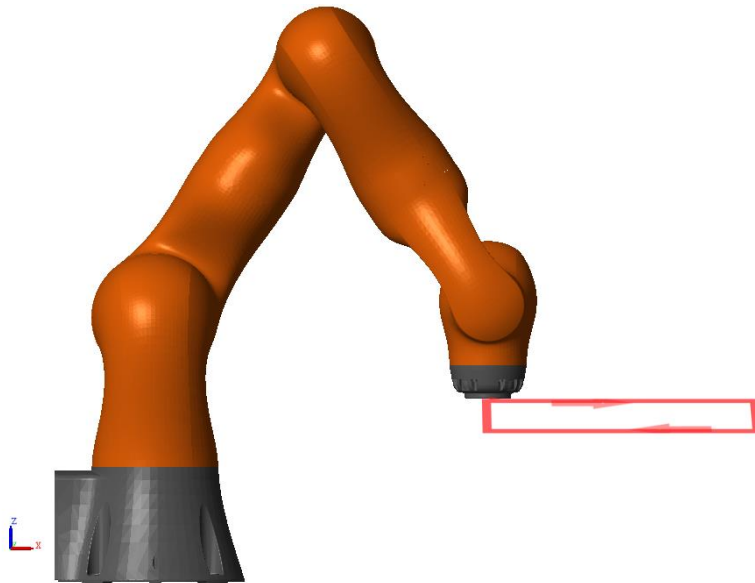
Şekil 5.3. Robot kol ve tanımlanan spiral eksen

Yukarıda görüldüğü gibi üç eksen de hareket eden robot kolun çalışma performansı aşağıdaki Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



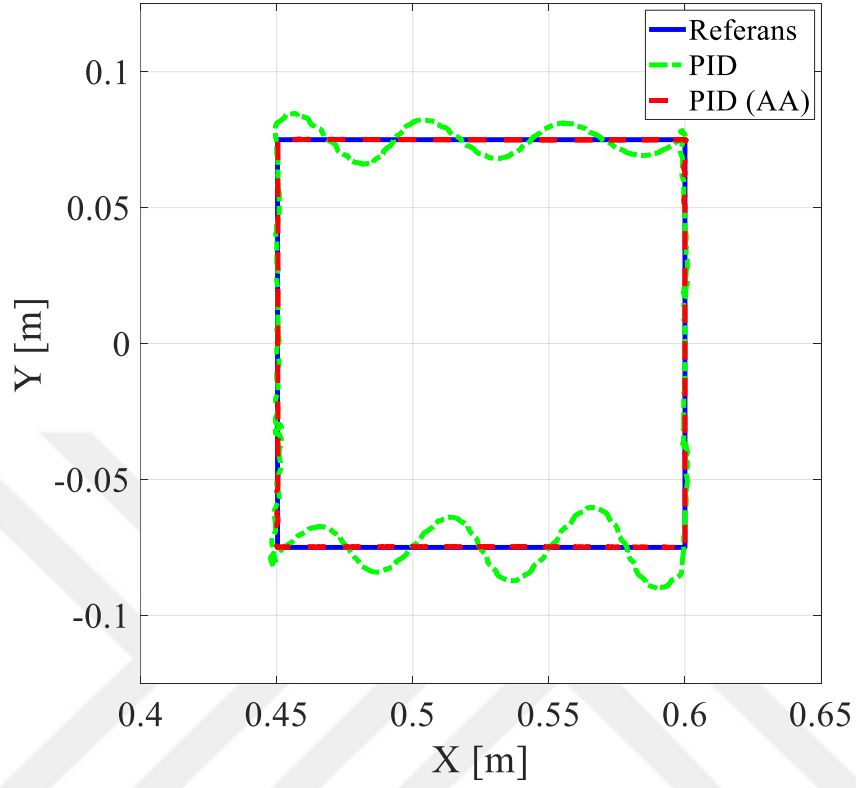
Şekil 5.4. Spiral hareket için istenen ve gerçekleşen yörüngeler

Bu bölümde üçüncü durum olarak robot kolun aşağıda Şekil 5.5'teki gibi kare bir yörüngeyi x ve y eksenlerinde takip etmesi değerlendirilmiştir.



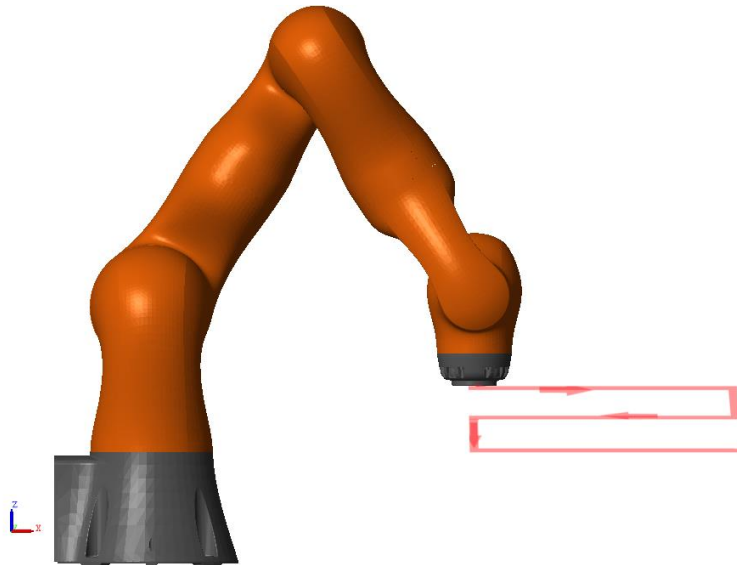
Şekil 5.5. Robot kol ve tanımlanan kare eksen

Robot kolun özellikle köşeli kenarlarda davranışının değerlendirilebileceği bu hareket yörüngesindeki çalışma performansı aşağıdaki Şekil 5.6 ile gösterilmiştir.



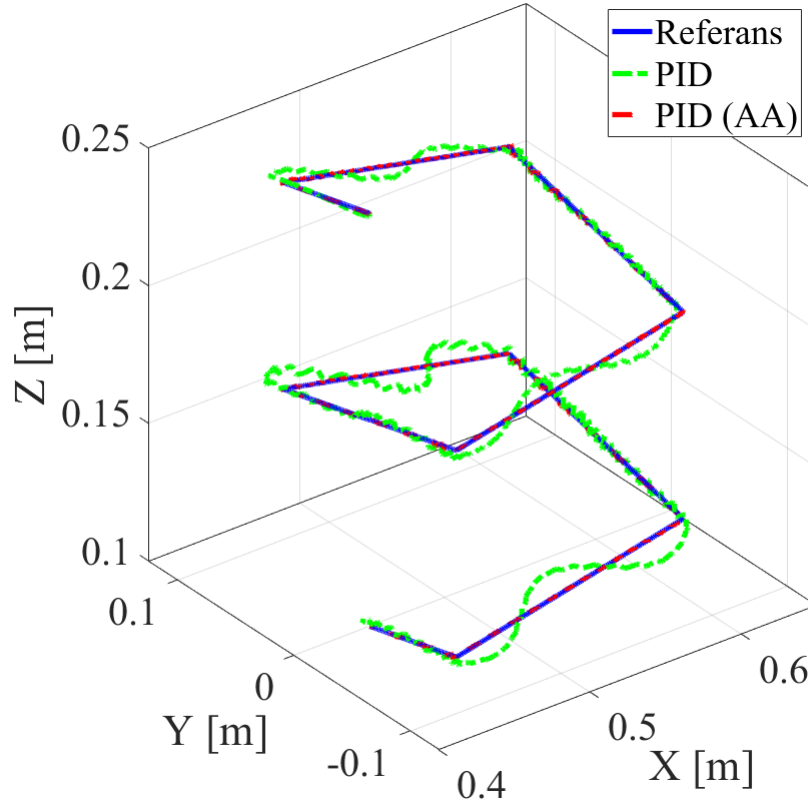
Şekil 5.6. Kare hareket için istenen ve gerçekleşen yörüngeler

Bu bölümde son durum olarak robot kolun Şekil 5.7’de gösterilen x, y ve z eksenlerinde, köşeli kenarlı bir yörüngeneyi takip etmesi istenmiştir.



Şekil 5.7. Robot kol ve tanımlanan kare spiral eksen

Yukarıdaki gösterildiği gibi üç ekseninde hareket eden robot kolun, istenilen referans yörünge karşısında, optimizasyon öncesi ve sonrası PID kontrolcünün denetiminde oluşan yörüngeler aşağıdaki Şekil 5.8 ile sunulmuştur.



Şekil 5.8. Kare spiral hareket için istenen ve gerçekleşen yörüngeler

Yukarıdaki dört farklı durumda da görüldüğü gibi Arı Algoritması ile optimize edilmiş olan PID kontrolünde istenilen yörüngede ilerleyen robot kol, optimizasyon öncesi değerlere göre, her durum için iyi bir çalışma performansı göstermiştir.

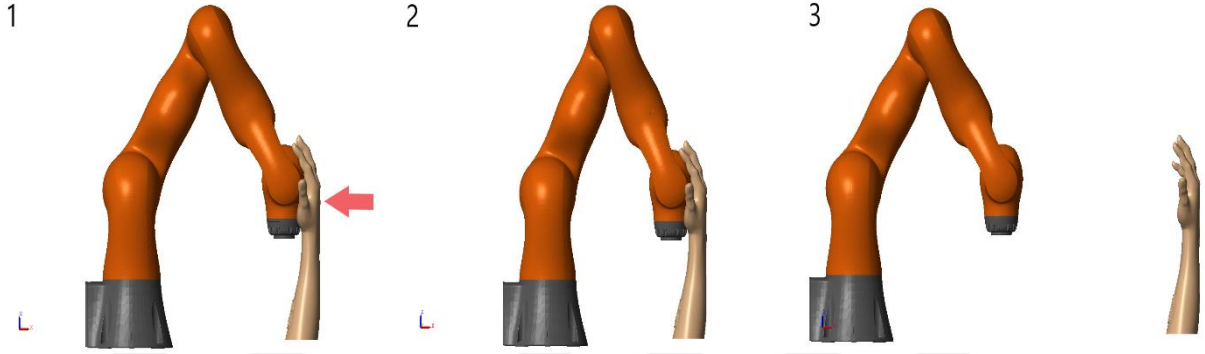
Dışarıdan kuvvet uygulanmadığı durumlar için konum kontrolü sadece PID kontrolcü tarafından kontrol edilmiştir. PID kontrolün tek başına kullanılacağı sistemler genellikle dışarıdan herhangi bir kuvvetin etki etmeyeceği veya robotların korumalı bir alanda çalıştıkları durumlar için uygundur.

2) Hareketsiz duran robota üç ekseninde kuvvet uygulanması

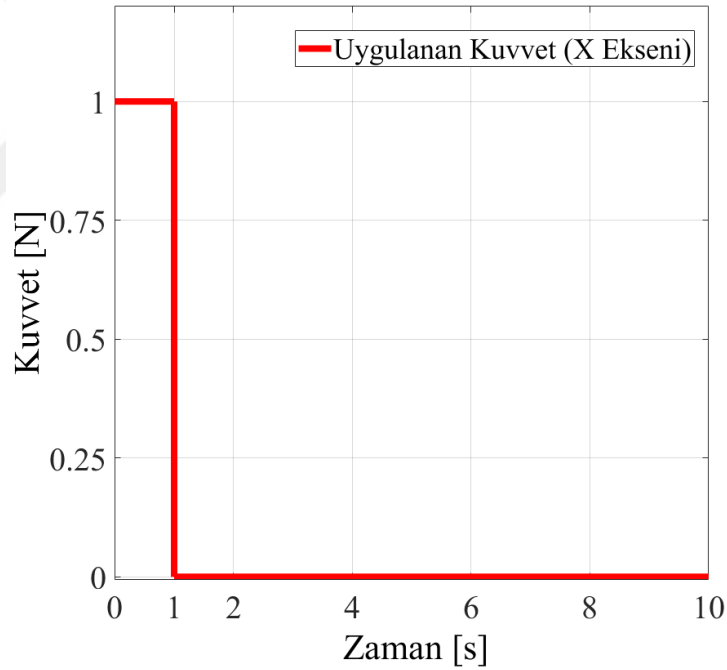
Bu senaryoda robot kola hareketsiz olarak başlangıç konumunda iken x, y ve z eksenlerinde kuvvet uygulanmıştır. Uygulanan bu kuvvet ile robotun optimize edilen kontrolcü

davranışları ile optimizasyon öncesi davranışları üç eksen için ayrı ayrı olarak aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.

İlk olarak x ekseninde robot kola, 1 saniye boyunca 1N büyüklüğünde itme kuvveti Şekil 5.9'da gösterildiği gibi uygulanmıştır. Uygulanan bu kuvvet şekil 5.10'da gösterilmiştir.

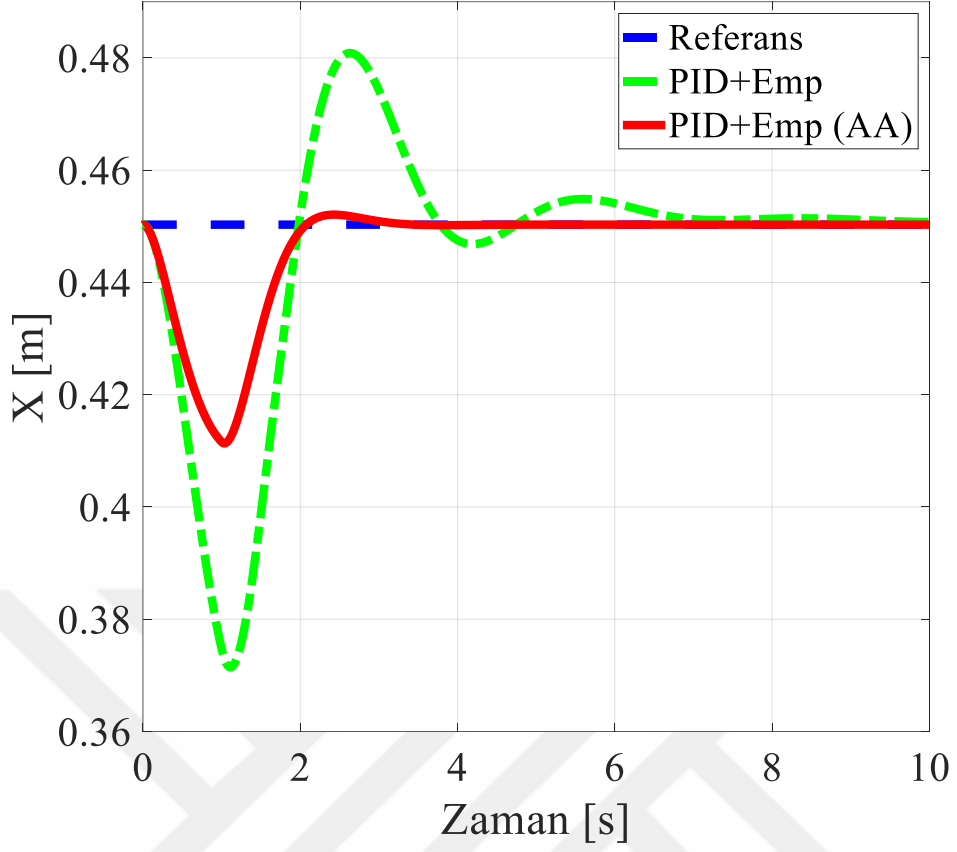


Şekil 5.9. X ekseninde robota uygulanan kuvvet



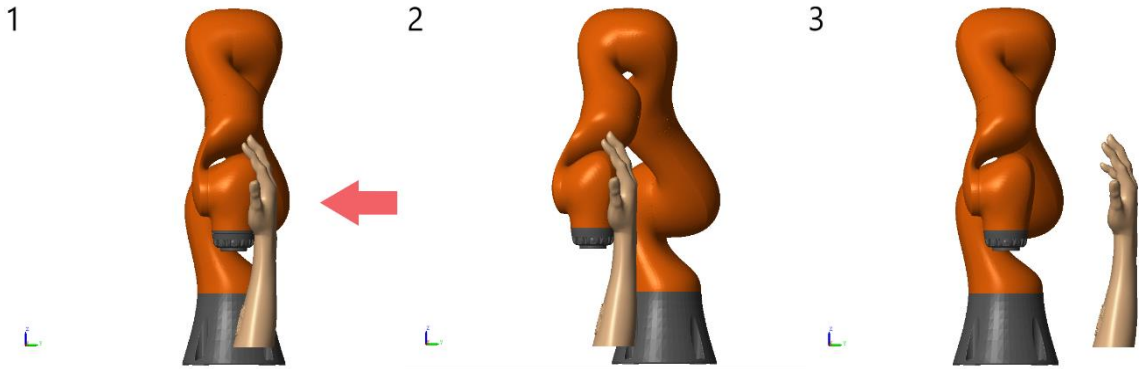
Şekil 5.10. X ekseninde robota uygulanan kuvvet değeri

Robot kola uygulanan kuvvet kesildikten sonra robot kol optimize edilmiş olan empedans kontrolcü denetiminde başlangıç konumuna kısa sürede tekrar dönmüştür. X ekseninde robotun harici kuvvete verdiği bu reaksiyon optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası performansları ile Şekil 5.11'de gösterilmiştir.

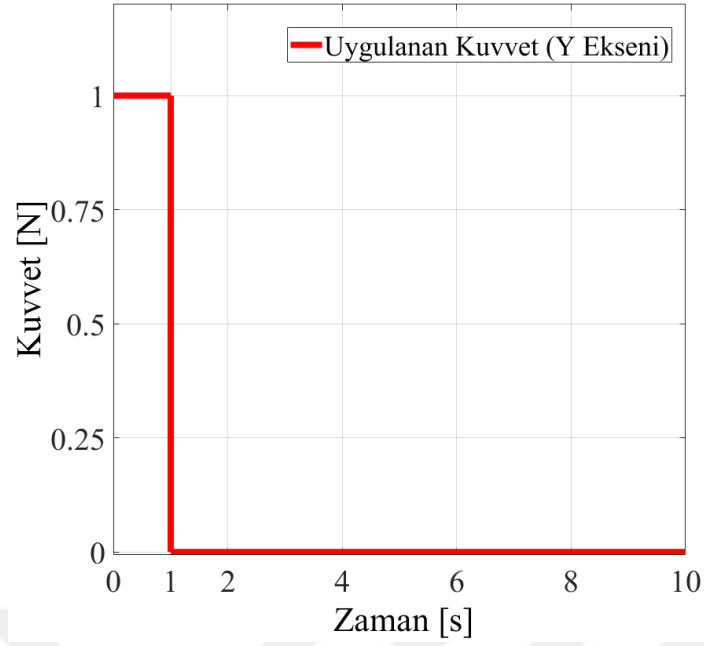


Şekil 5.11. X ekseninde uygulanan kuvvete karşı robot kolun optimizasyon öncesi ve sonrası reaksiyonu

İkinci olarak aynı şekilde 1N'luk kuvvet 1 saniye boyunca y ekseninde Şekil 5.12'de gösterildiği gibi uygulanmıştır. Uygulanan kuvvetin değeri ve uygulanma süresi Şekil 5.13'te gösterilmiştir.

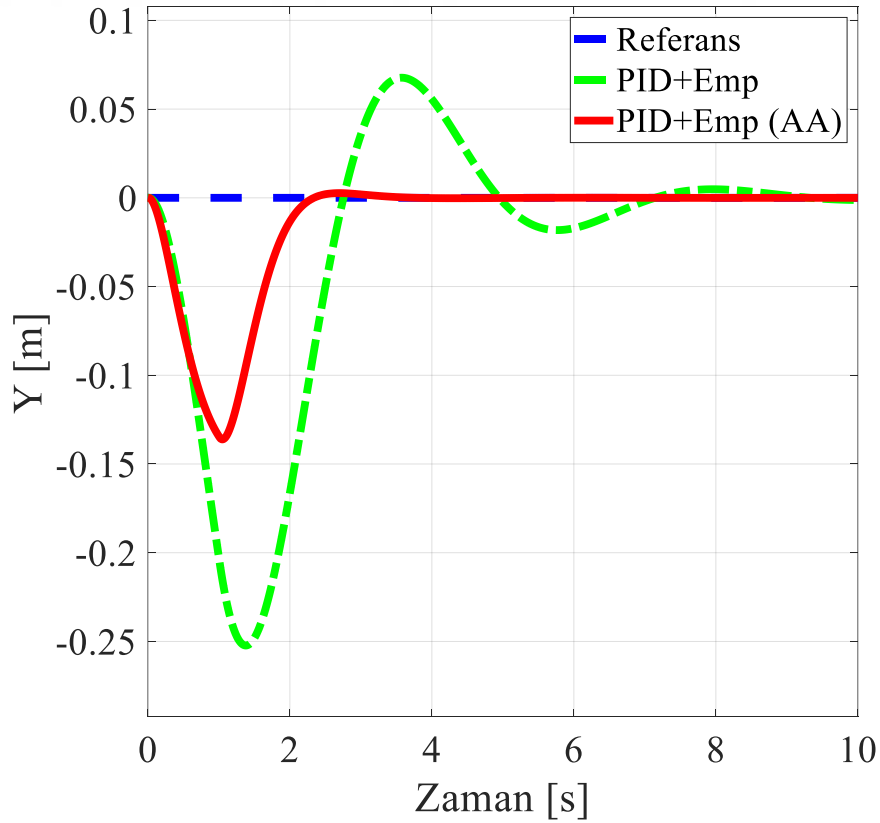


Şekil 5.12. Y ekseninde robota uygulanan kuvvet



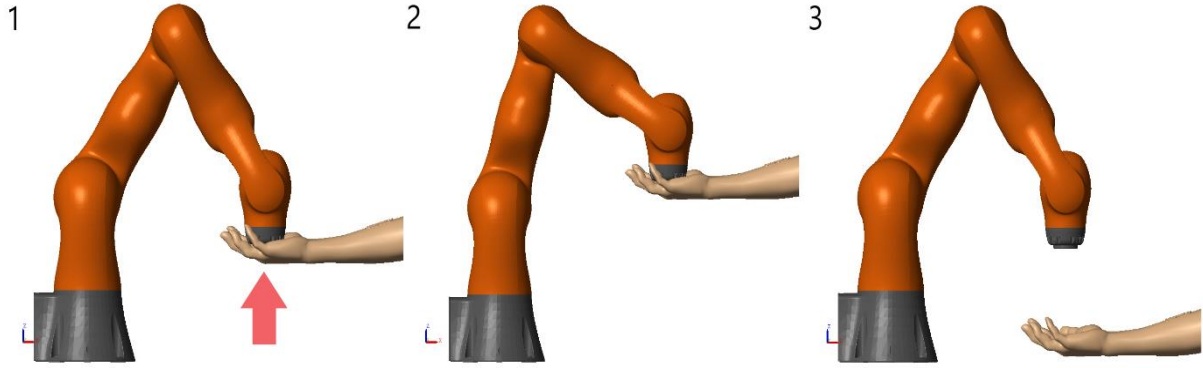
Şekil 5.13. Y ekseninde robota uygulanan kuvvet değeri

Başlangıç konumunda iken y ekseninde uygulanan kuvvete karşı robot kolun bu eksenindeki hareketi, optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonraki haliyle Şekil 5.14'te aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

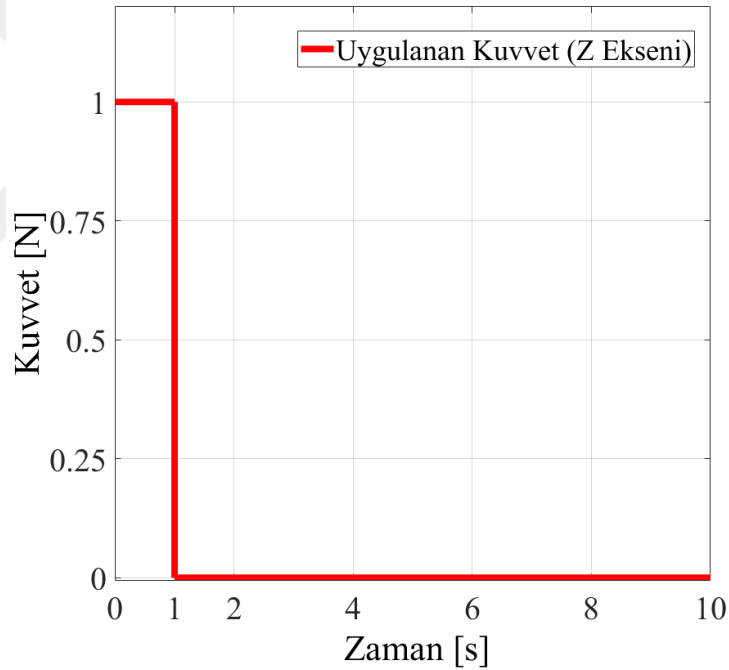


Şekil 5.14. Y ekseninde uygulanan kuvvete karşı robot kolun optimizasyon öncesi ve sonrası reaksiyonu

Bu bölümde son olarak robot kol z ekseninde 1N'luk kuvvete 1 saniye boyunca Şekil 5.15'teki gibi maruz bırakılmıştır. Uygulanan kuvvetin değeri ve uygulanma süresi aşağıdaki Şekil 5.16'da gösterilmiştir.

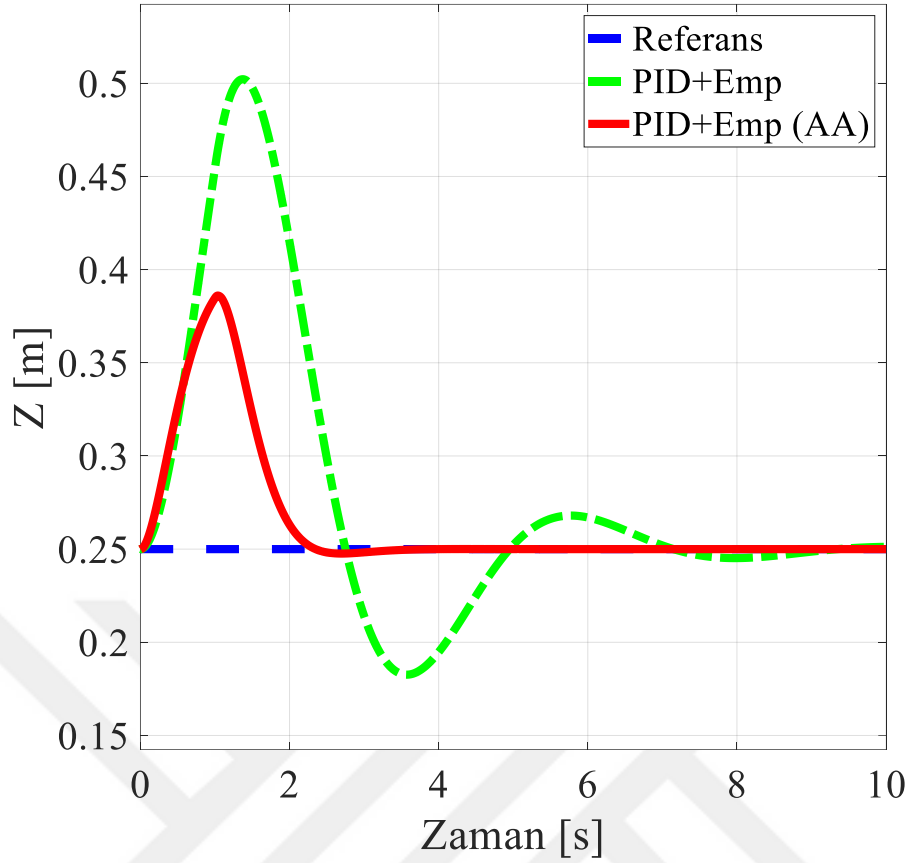


Şekil 5.15. Z ekseninde robota uygulanan kuvvet



Şekil 5.16. Z ekseninde robota uygulanan kuvvet değeri

Kuvvetin etkisinde z ekseninde yukarı doğru hareket eden robot kolun başlangıç konumuna tekrar gelmesini gösteren grafik, optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası olarak Şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.17. Z ekseninde uygulanan kuvvete karşı robot kolun optimizasyon öncesi ve sonrası reaksiyonu

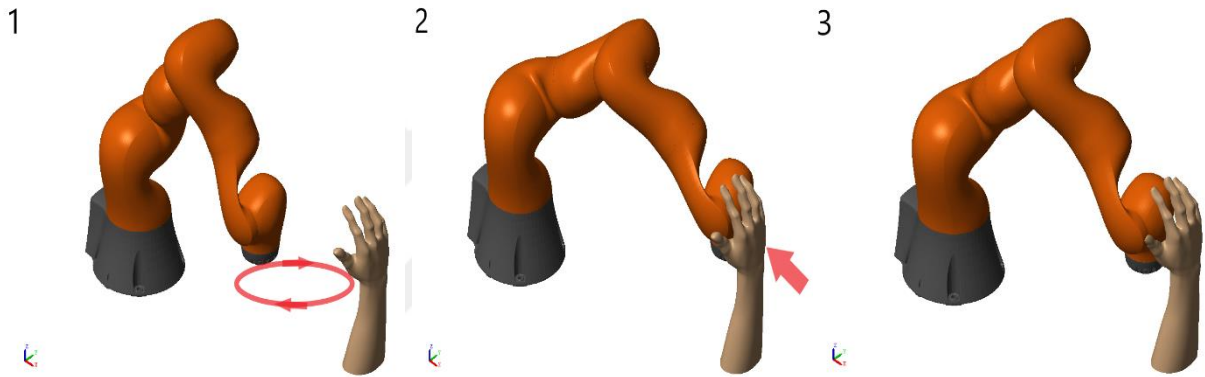
Yukarıdaki grafiklerde görüldüğü gibi empedans kontrolcü ile kontrol edilen robot, üç farklı ekseninde uygulanan kuvvetlere karşı mukavemet göstermeyip bu kuvvetleri sönümledikten sonra tekrar başlangıç konumuna en kısa sürede gelmektedir. Böylece örneğin bir insan veya başka bir ekipmanın robota çarpması halinde çarpmanın etkisiyle meydana gelen tepki kuvvetini minimize ederek yaralanmalar veya malzeme hasarlarının oluşması engellenebilecektir. Ayrıca burada robotun harici kuvvet kesilir kesilmez tekrar hızlı bir şekilde başlangıç konumuna gelmesi için kontrolcü parametrelerine yapılan optimizasyonun verimliliği optimizasyon öncesi ve optimizasyon sonrası olarak grafiklerde açık bir şekilde görülmektedir. Böylelikle robotun hem herhangi bir istenmeyen temasta emniyetsiz bir durum oluşturmayacak şekilde tasarlanan, hem de zaman ve enerji kaybı oluşturmadan hızlı bir şekilde kalıcı durum hatası oluşturmadan başlangıç konumuna gelmesini sağlayan optimize edilmiş empedans kontrolcünün başarılı bir şekilde sonuç verdiği söylenebilir.

Optimizasyon öncesi deneme yanılma yöntemi ile tasarlanan empedans kontrolcünde ise, uygulanan kuvvetlerin etkisi ile robot kol, ilk olarak başlangıç konumundan çok uzaklaşmış, kuvvet etkisi kaldırıldıktan sonra ise tekrar başlangıç konumuna gelmesi, meydana gelen salınımlar ile çok daha uzun zamanda gerçekleşmiştir.

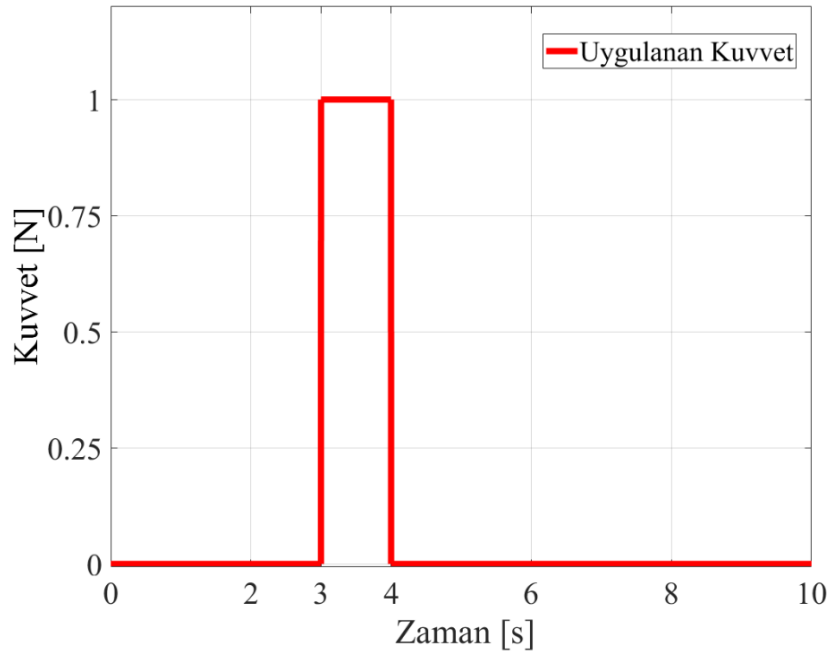
3) Hareket halinde robot kola dışarıdan kuvvet uygulanması

Üçüncü senaryo olarak aşağıdaki gibi başlangıç konumundan hareketine başlayan robotun bir kuvvetle karşılaşması değerlendirilmiştir. Robot kol, aşağıdaki Şekil 5.18’de gösterildiği gibi istenilen bir çalışma yörüngesinde hareket ederken hareketinin belli bir anında 1N değerinde 1 saniye boyunca Şekil 5.19’daki gibi uygulanan kuvvete karşı verdiği reaksiyon Şekil 5.20’de aşağıda gösterilmiştir.

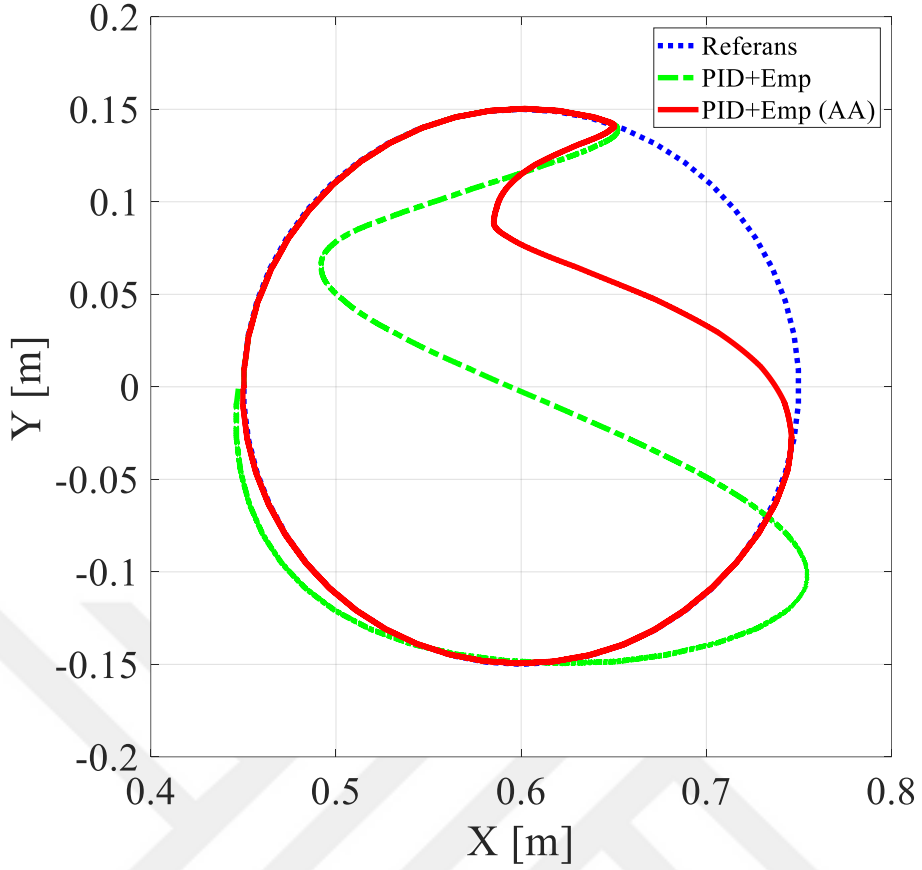
Aşağıda görüldüğü gibi verilen dairesel konumda ilerleyen robot kolun belirli bir anında dışarıdan uygulanan bir kuvvet ile hareket akışı bozulmuş fakat kendisini hızlı şekilde tekrar konumlandırarak hareketini istenilen şekilde tamamlamıştır.



Şekil 5.18. Hareket halinde iken robota uygulanan kuvvet



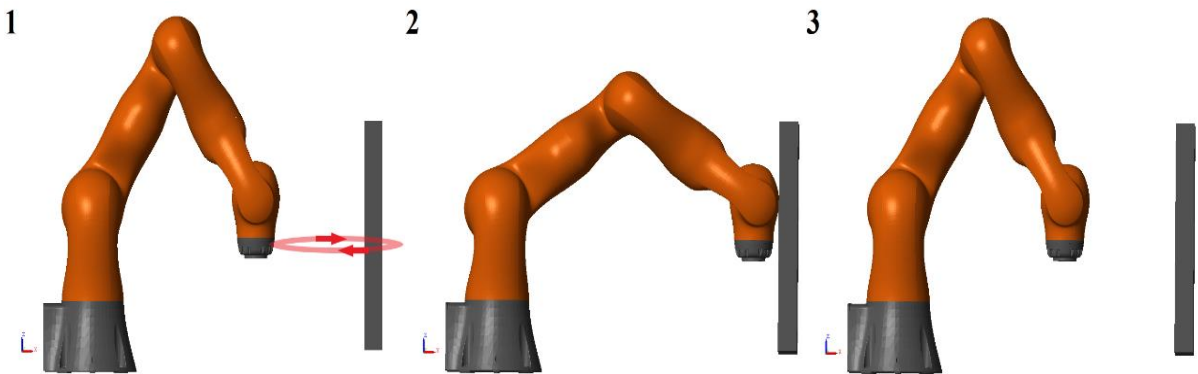
Şekil 5.19. Hareket halinde iken robota uygulanan kuvvet değeri



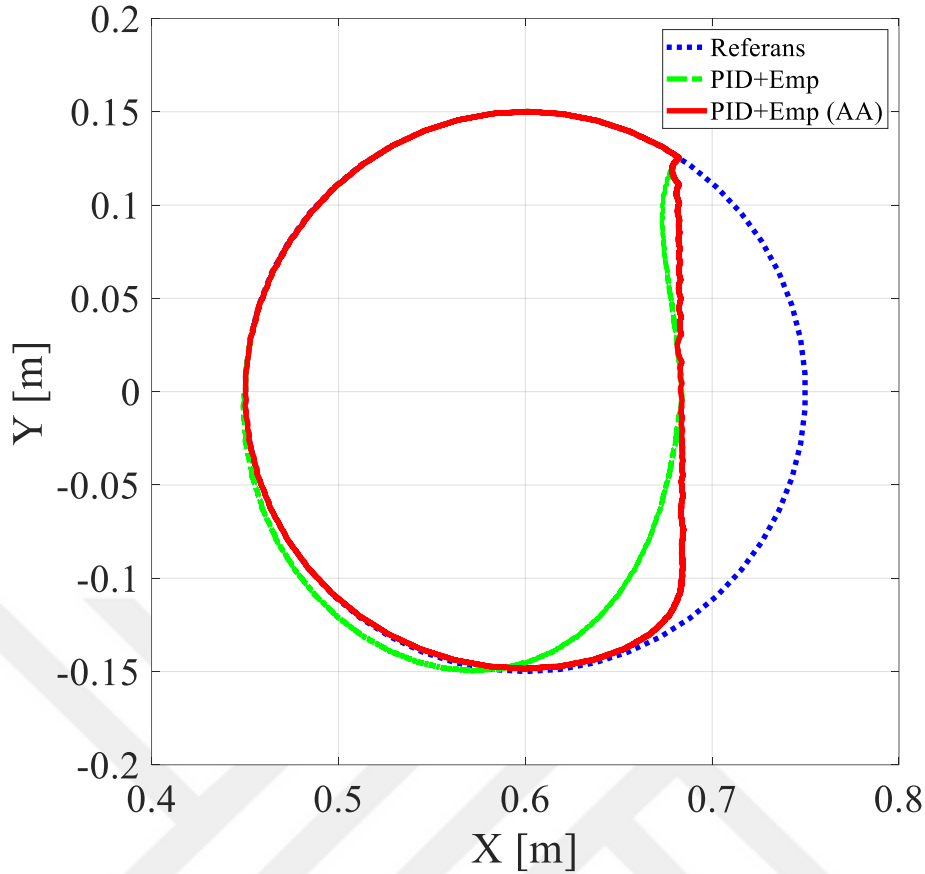
Şekil 5.20. Hareket halinde harici kuvvete maruz kalan robotun optimizasyon öncesi ve sonrası reaksiyonu

4) Hareket halinde iken robotun düz bir engelle karşılaşması

Bu çalışmada dördüncü senaryo olarak aşağıda Şekil 5.21’de gösterildiği gibi robot kol kendisinden istenilen dairesel bir yörüngede hareket ederken düz bir engelle karşılaşmış ve bu engel karşısında gösterdiği reaksiyon aşağıdaki Şekil 5.22’de sunulmuştur.



Şekil 5.21. Robot kolun düz bir engelle karşılaşması

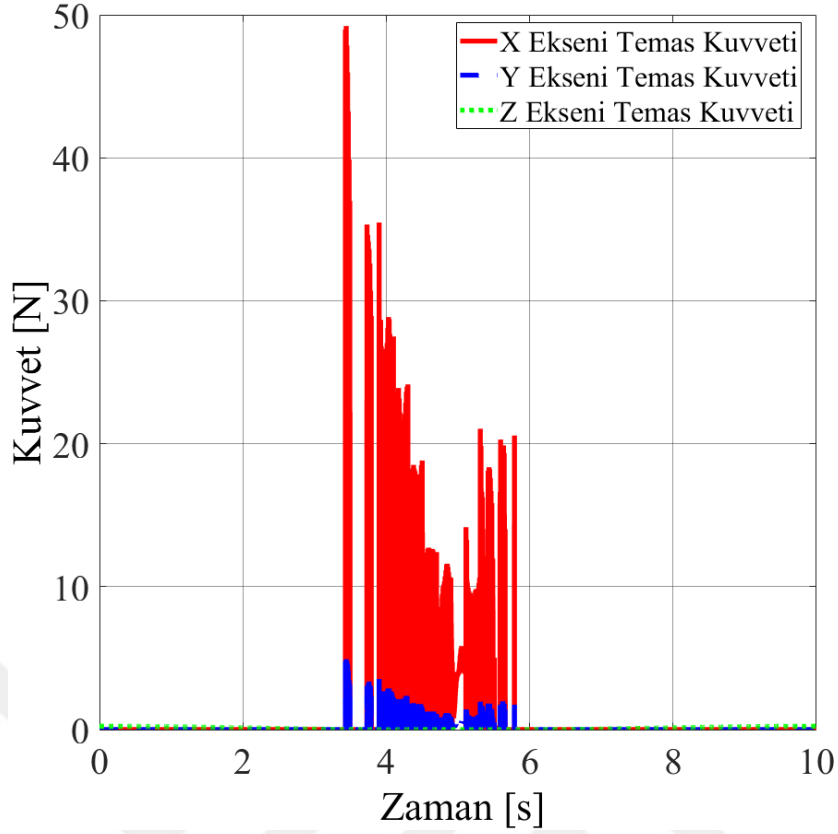


Şekil 5.22. Düz bir engelle karşılaşan robotun optimizasyon öncesi ve sonrası reaksiyonu

Yukarıda görüldüğü gibi engelle karşılaşan robot kol, engele kadar veya harici bir kuvvetle karşılaşınca kadar bütün senaryolarda olduğu gibi PID kontrol parametreleriyle hareket ederken, engele temasında empedans kontrolcü devreye girmiştir. Optimize edilmiş empedans kontrolcü denetiminde oluşan yukarıdaki Şekil 5.22’de elde edilen yörüngeden (PID+Emp (AA)) görüldüğü gibi, robot kol engel boyunca meydana gelen tepki kuvvetlerini sönümleyerek engeli takip etmiştir ve engelden kurtulduktan sonra ise eklemlerini tekrar konumlandırıp istenilen yörüngeye tekrar girerek başlangıç konuma ulaşmıştır.

Optimizasyon öncesi empedans kontrolcünde ise robot kol engele temas ettiği anda oluşan temas kuvvetini sönümlemekte zorlanmıştır. Bunun sonucunda engelden uzaklaşarak ileri bir noktada tekrar engele temasta bulunmuştur fakat tekrar sönümlenemeyen temas kuvvetlerinden dolayı bir kez daha engelle arası açılmıştır. Daha sonrasında ise kendisinden istenilen referans yörüngeye oturmakta zorlanan robot kol salınımlar yaparak başlangıç konumuna yakın bir noktaya varmıştır.

Aşağıdaki Şekil 5.23’te robotun bu yüzey etkileşimli hareketinde oluşan tepki kuvvetleri gösterilmiştir. Robot kol x ve y eksenlerinde hareket ettiği için yüzeyin tepki kuvvetleri bu eksenlerde oluşmuştur ve z ekseninde tepki kuvveti oluşmamıştır.

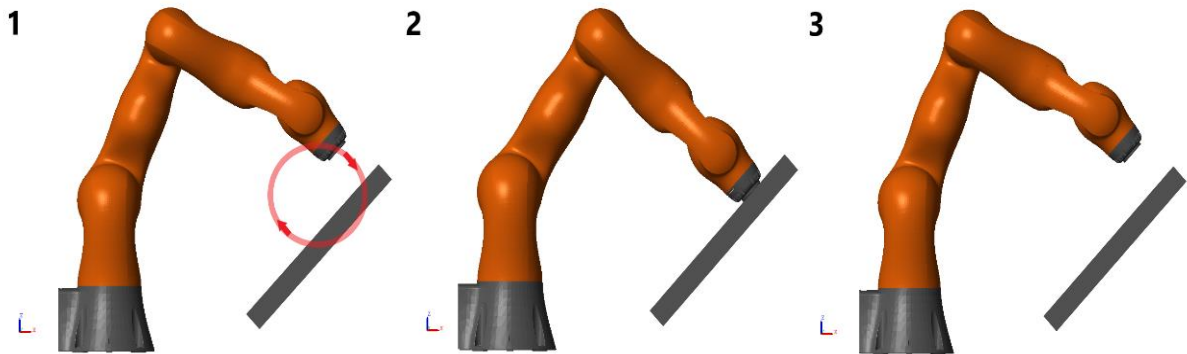


Şekil 5.23. Düz bir engelle karşılaşan robotun temas kuvvetleri

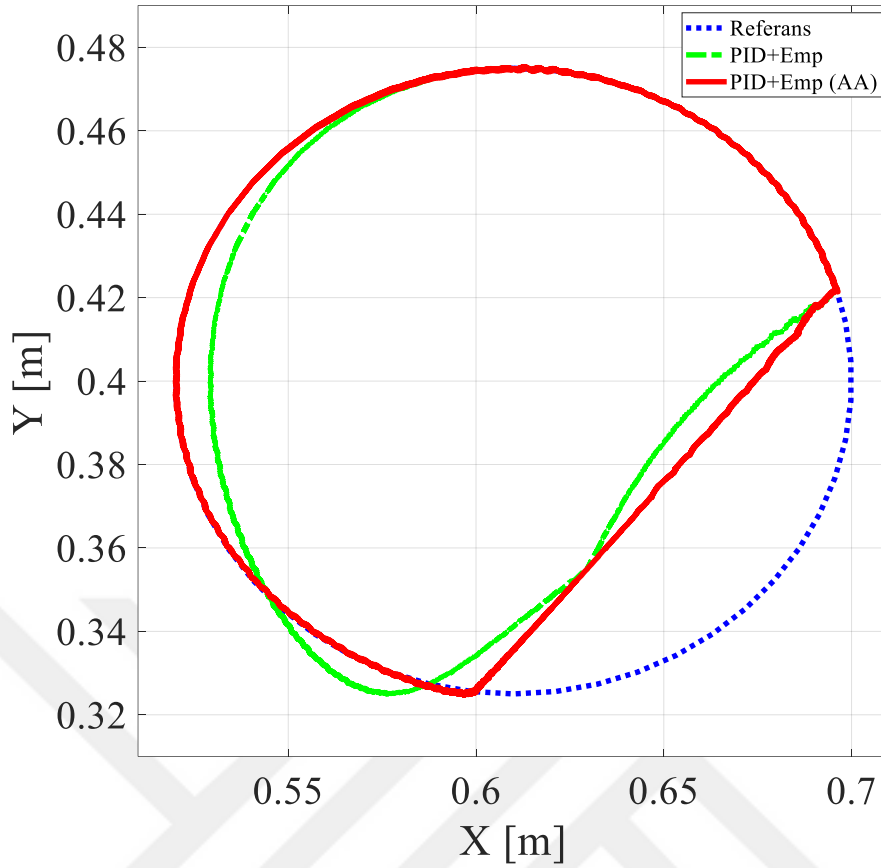
5) Hareket halinde iken robotun eğik bir engelle karşılaşması

Beşinci ve son senaryo olarak robot kol 45 derece eğik olan bir engelle, Şekil 5.24 ile aşağıda gösterildiği gibi karşı karşıya gelmiştir.

Dördüncü senaryodan farklı olarak robot kola y ekseninde dönen bir dairesel yörünge tanımlanmıştır. Bu yörüngeyi takip ederken x ve z eksenlerinde 45 derecelik açıyla konumlandırılmış bir engelle karşılaşan robot kolun davranışı Şekil 5.25 ile aşağıdaki gibi gösterilmiştir.



Şekil 5.24. Robot kolun eğik bir engelle karşılaşması

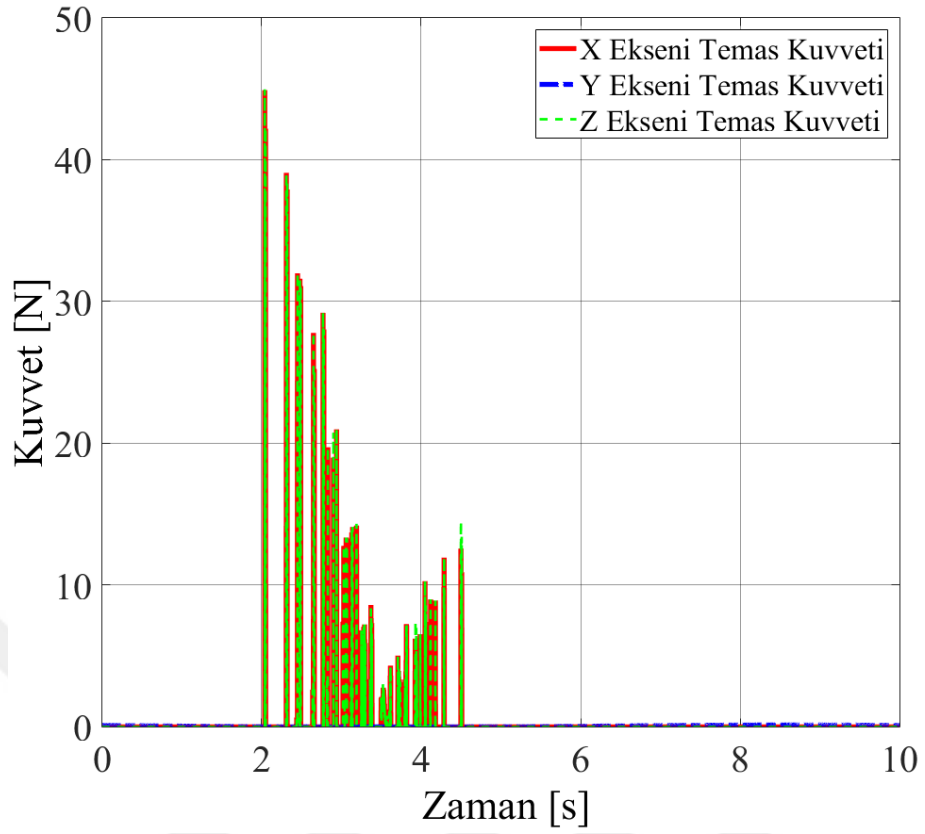


Şekil 5.25. Eğik bir engelle karşılaşan robotun optimizasyon öncesi ve sonrası reaksiyonu

Yukarıda görüldüğü gibi robot kol 45 derecelik açıyla konumlandırılan bir engelle hareketinin belli bir anında temasta bulunmuştur. Dördüncü senaryoda tek eksenle etki eden tepki kuvveti bu senaryoda ise iki eksenle oluşmaktadır. Bu kapsamda iki eksenle var olan empedans kontrolcü devreye girmiştir.

Başlangıçta optimize edilmemiş olan empedans kontrolcü denetiminde hareket eden robotun engele temasında kendisini engele uyarlamakta zorlandığı ve engelden ayrıldığı noktada ise kendisinden istenilen dairesel yörüngeye tekrar girmekte başarısız olduğu yukarıdaki Şekil 5.25'te görülmektedir. Empedans kontrolcünün optimizasyonu sonrası çalışmasında ise robot kol her iki eksenle de meydana gelen tepki kuvvetlerini sönümleyerek engel boyunca ilerlemiş ve hareketinin engelle ayrıştığı noktada eklemlerini tekrar konumlandırarak istenilen yörüngeyi başarılı olarak, Şekil 5.25'te gösterildiği gibi tamamlayabilmiştir.

Yüzey etkileşiminde oluşan tepki kuvvetleri ise aşağıdaki Şekil 5.26'da gösterilmiştir. Bu senaryodaki engel x-z ekseninde 45 derece eğimli olduğu için robotun bu iki eksenle de yüzey tepki kuvvetleri birbirine eşit olarak gerçekleşmiştir ve y ekseninde tepki kuvveti gerçekleşmemiştir.



Şekil 5.26. Eğik bir engelle karşılaşan robotun temas kuvvetleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada seçilen 7 serbestlik dereceli Kuka LBR iiwa 14 R820 serisi işbirlikçi robotun, PID ve Empedans kontrolü ile bunların optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Robot kolun katı modeli MATLAB/SimScape ortamına doğrudan aktarılmıştır. Uygulanan kontrol sistemi, MATLAB/Simulink ara yüzünde modellenmiştir. Kendisinden istenilen çalışma senaryolarında robot kolun davranışları grafiklerle sunulup değerlendirmeler yapılmıştır.

Parametre sayısı çok fazla olduğu için başlangıçta deneme yanılma yöntemi ile yaklaşım yapılmıştır. Bu sebepten dolayı ilk önce geniş bir aralıkta yaklaşık değerler bulunduktan sonra uygulanan algoritma ile aralıklar daraltılarak nihai sonuçlara erişilmiştir. Optimizasyon sonucu istenilen yörüngeler ile gerçekleşen yörüngelerin sonuçlarındaki farklılıklar her bir senaryo için şu şekilde oluşmuştur;

- İlk senaryoda gerçekleştirilen, harici kuvvet etki etmeden, iki eksen de daire ve kare yörünge ile üç eksen de daire spiral ve kare spiral yörünge olmak üzere dört farklı şekilde tanımlanan yörüngede hareket eden robot kolda, optimize edilen PID kontrolcü oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Optimizasyon öncesi çalışmada meydana gelen yörüngeden kaçışlar ve yörünge etrafındaki salınımlar optimizasyon ile iyileştirilmiştir.
- İkinci senaryoda, başlangıç konumunda hareketsiz duran robot kol, üç eksen de harici bir kuvvetle harekete zorlanmıştır. Sırasıyla her üç eksen de uygulanan bu harici kuvvet 1 N değerindedir ve 1 saniye boyunca uygulanmıştır. Oldukça küçük bu kuvvetle bile sistem hareket ettirilebilmiştir.
- Bu kapsamda ilk olarak robot kol, x ekseninde 45 cm de başlangıç konumda iken 1 N değerindeki kuvvetin etkisiyle -x yönünde 41 cm noktasına hareket etmiştir ve 1 saniye sonunda kuvvet etkisi kaldırılmıştır. Robot kolun başlangıç konumuna geri gelmesi kuvvet kaldırıldıktan sonra 1,8 saniye içerisinde ve 0,21 cm maksimum aşma ile başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir.
- Daha sonraki durumda robot kol, y ekseninde sıfır başlangıç konumda iken 1 N kuvvetin etkisiyle -y yönünde -14 cm noktasına hareket etmiştir ve 1 saniye sonunda kuvvet etkisi kaldırılmıştır. Kuvvet etkisi kaldırıldıktan 2,7 saniye sonra robot kol 0,7 cm maksimum aşma ve salınım olmadan y eksenindeki başlangıç konumuna gelmiştir.

- Son olarak robot kol, z ekseninde 25 cm de başlangıç konumunda iken yine 1 N büyüklüğündeki kuvvet 1 saniye uygulandığında, robotun uç noktası +z yönünde 39 cm noktasına hareket etmiştir. Kuvvet kaldırıldıktan 2,8 saniye sonra, 0,68 cm maksimum aşma ile salınım yapmadan başlangıç konumuna gelmiştir.
- Robotun hareketsiz başlangıç konumunda iken kuvvete maruz kaldığı bu senaryoda, bütün eksenlerde yaklaşık %4 maksimum aşma ile kalıcı durum hatası oluşmadan ve salınım yapmadan çok kısa oturma sürelerinde empedans kontrolcü verimli bir şekilde reaksiyon göstermiştir. Optimizasyon öncesi durumda ise, üç eksen de robot kol salınımlar yaparak tekrar başlangıç konumuna gelmekte zorlanmıştır. Üç eksen içinde optimize edilmiş kontrolcü reaksiyonuna kıyasla, uygulanan kuvvetin etkisiyle robot uç noktası iki kat fazla ötelenmiş ve her üç durum içinde yaklaşık %30 maksimum aşma göstermiştir. Bu aşmalar ve salınımlar sonucunda optimize edilen durumda oturma süreleri kuvvet etkisi kaldırıldıktan sonra 3 saniyenin altında gerçekleşirken, optimizasyon öncesi durumlarda ise bu sürenin 9 saniyeyi aştığı gözlemlenmiştir.
- Daha sonra robot kol kendisine x ve y ekseninde tanımlanan dairesel yörüngede hareket ederken, x ekseninde 1 N büyüklüğünde kuvvet 1 saniye boyunca -x yönünde uygulanmıştır. Robot kol iki eksen de ilerleyerek dairesel hareket yapmaya çalıştığı için bu kuvvet iki eksen de robotun konumunu etkilemiştir. Uygulanan kuvvet ile robot kolun işeyici ucu -x yönünde 6,4 cm, -y yönünde 5,3 cm ötelenmiştir. Kuvvet etkisi kaldırıldığında robotun uç noktası 3,4 saniye sonra, x ekseninde 0,12 cm, y ekseninde 0,1 cm olarak yaklaşık %2 referans yörüngeden maksimum sapma ile kalıcı durum hatası oluşturmadan ve salınım yapmadan optimize edilmiş empedans kontrolcü ve PID kontrolcü denetiminde kendisinden istenilen yörüngeye oturmuştur. Optimizasyon öncesi çalışmasında ise robot uç noktası uygulanan kuvvetin etkisi ile iki eksen de iki kat daha fazla ötelenmiştir. Kuvvet etkisi kaldırıldığında, referans yörüngeden yaklaşık %30 maksimum aşma yaparak yörüngeye tekrar girmekte zorlanmıştır.
- Son olarak çalışma alanında engel bulunan iki yüzey etkileşimli senaryoda, robot kol önce düz bir engelle daha sonra da 45 derece eğik bir engelle hareketinin belirli bir anında temasta bulunmuştur. İlk olarak, robot kol düz engelle hareketinin 3,5. saniyesinde temasta bulunmuştur. Bu temasta oluşan temas

kuvveti maksimum 49 N olarak ölçülmüştür. Başlangıçta optimize edilmemiş empedans kontrolcü denetiminde engelle temasında robotun temas noktası engelden uzaklaşmıştır. Daha sonra robot kol referans yörüngeye tekrar oturmakta zorlanmış ve referans yörüngeden aşmalar gerçekleşmiştir. Bu engelden uzaklaşmalar ve referans yörüngeden sapmalar, optimize edilmiş duruma göre yaklaşık %2 değerinde hatalı gerçekleşmiştir. Optimizasyon sonrasında ise robot kol, engel boyunca hareketini devam ettirdikten sonra, engelin bittiği noktadan en kısa sürede tekrar yörüngesine girmiştir.

- Yüzey etkileşimi olan ikinci durumda ise robot kolun y eksenini etrafında dairesel yörüngede hareket etmesi istenmiştir. Bu hareketinde x ve z eksenlerine 45 derece açı ile yerleştirilen engelle hareketinin 2. saniyesinde temasta bulunmuştur. Bu temasta oluşan maksimum kuvvet 44 N olarak gerçekleşmiştir. Optimizasyon öncesi empedans kontrolcü ile çalışmasında robot uç noktası engeli takip etmekte zorlanarak ilk temastan sonra engelden uzaklaşmıştır. Hareketin devamında ise referans yörüngeden aşmalar yaparak salınımlar ile yörüngeye oturamamıştır. Bu engelden uzaklaşmalar ve referans yörüngeden sapmalar, optimize edilmiş duruma göre yaklaşık %2 değerinde hatalı gerçekleşmiştir. Optimizasyon sonrasında ise bütün bu aşmalar ve salınımlar iyileştirilerek robot uç noktası, engel boyunca hareketini devam ettirmiş, engelle ayrıştığı noktada yüksek bir hassasiyetle tekrar çalışma yörüngesine girerek hareketini başarılı şekilde tamamlamıştır.

Yukarıda sonuç değerleriyle sunulan beş farklı senaryonun her biri için, optimize edilmiş PID ve Empedans kontrolcü ile çalışmalarında, performanslarının önemli ölçüde arttırıldığı görülmektedir. Optimizasyon öncesi ve sonrası çalışma performanslarındaki en fazla iyileşmelerin ise, robot kola harici kuvvetin etki ettiği durumlarda olduğu gözlemlenmiştir.

Bu tez kapsamında konum temelli olarak PID ve Empedans kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Kuvvet temelli, kuvvet geri beslemeli kontrolcü tasarımının ilerideki çalışmalarda yapılması amaçlanmaktadır. Fakat robotun kuvvet hassasiyetlerini arttırmak için ve tezin başında amaçlanan, emniyetli çalışma değerlerinde robotun optimize edilmesi hedefi kapsamında, empedans parametreleri yüksek kuvvetler oluşturmaması için dikkate alınmıştır.

Bu kapsamda yay katsayısı 5000 N sönüm katsayısı 100 Nm/s olan engel ile robotun temasında tepki kuvveti, düz engel için 49 N, eğik engel içinde 44 N olarak makul değerlerde gerçekleştirilebilmiştir.

Bu çalışmada, engelin tepki kuvvetleri engel boyunca hem sabit değildir hem de aralıklı bir şekilde oluşmuştur. Kuvvet değerlerinin aralıklı oluşmasının sebebi, bu tez çalışmasındaki empedans kontrolcü tasarımının amacı engellerden kaçınmak olduğundan, temastan sonra robotun aslında çalışma sahasında bulunmaması gereken bir engelle karşılaştığından dolayı, etkileşimde bulunduğu engele sürtünme etkisi yaratmamak için aralıklı temaslarda bulunmasıdır. Böylelikle temas edilen bir insan ise, ilk temastan sonra robotun önünde engel olmaktan kaçınabilecektir veya engel herhangi bir ekipman ise onun ya da robotun üzerinde sürtünmeden oluşabilecek hasarlar engellenebilecektir. Eğer bu empedans kontrol tasarımı temas yüzeyinde bir sürtünme oluşturma amacı gütseydi, örneğin bir cam silme işlemi olabilir, bu durumda ilk temastan son noktaya kadar sabit bir kuvvetin temas yüzeyine etki etmesi amaçlanabilirdi.

Bu kapsamda çalışmanın sayısal uygulamalar bölümde grafiklerle gösterildiği üzere Arı Algoritması ile optimize edilen PID kontrolcü ve Empedans kontrolcü oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Özellikle işbirlikçi robot başlığı altında kontrolcü hassasiyetinin, üzerinde durulması gereken bir konu olduğu bu az hatalar ile tekrar vurgulanmıştır.

Sonuç olarak robotlarda kullanılacak kontrolcü seçiminde robotun çalışacağı ortamın değerlendirilmesinin önemi ortaya çıkmaktadır. Örneğin kapalı bir ortamda çevreyle teması olmayan robotlar için PID kontrolcü yeterli sonuçlar vermekte iken çevreye temasın olabileceği, insan veya başka robotlarla birlikte iş ortamını paylaşan robotlar için ise empedans kontrolcü kullanımı en doğru ve emniyetli seçim olacaktır.

Ayrıca kontrolcü seçiminin çalışma şartlarına uygun olmasının yanında bu kontrolcünün çalışma parametrelerinin de optimum olarak bulunması önem arz etmektedir. Böylelikle hem herhangi bir temasta robotun tepkisi istenilen değerlerde sınırlandırılabilir hem de kontrolcünün dış etkilerden kurtulduğu anda göstereceği hızlı reaksiyon ile zaman ve enerji kaybından maksimum ölçüde kaçınılmış olunacaktır. İşbirlikçi robotlardan beklenen şey hem önüne çıkan engellere zarar vermemesi hem de bu engellerle temasında durup tekrar bir operatörün kumanda etmesini beklemeden kendisini duruma uyarlayabilmesidir.

Son olarak bu tezdeki elde edilen tecrübeler ile daha sonra yapılabilecek çalışmalarda, kaynak araştırması bölümünde iyi sonuçlar verdiği görülen, insan robot etkileşimini en aza indirebilmek için yapay sinir ağları ile insan davranışlarını da tahmin etmeyi amaçlayan, uyarlanabilir empedans kontrolcü uygulaması, dolayısıyla genel olarak yapay zeka uygulamaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Alevizos, K. I., Bechlioulis, C. P. and Kyriakopoulos, K. J., 2020, Physical Human–Robot Cooperation Based on Robust Motion Intention Estimation, *Robotica*, 38 (10), 1842–1866.
- Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A. ve Kalyoncu, M., 2015, Dört Ayaklı Robotun Bir Bacağı İçin PID Kontrolcü Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanarak Optimizasyonu, in *Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, İzmir*.
- Bilgic, H. H., Sen, M. A. and Kalyoncu, M., 2016, Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on The Bees Algorithm, *Journal of Vibroengineering*, 18 (6), 3684–3694.
- Bowyer, S. A. and Baena, F. R., 2015, Dissipative Control for Physical Human–Robot Interaction, *IEEE Transactions on Robotics*, 31 (6), 1281–1293.
- Brahmi, B., El Bojairami, I., Laraki, M.-H., El-Bayeh, C. Z. and Saad, M., 2021, Impedance learning control for physical human-robot cooperative interaction, *Mathematics and Computers in Simulation*, 190, 1224–1242.
- Caccavale, F., Chiacchio, P., Marino, A. and Villani, L., 2008, Six-DOF Impedance Control of Dual-Arm Cooperative Manipulators, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 13 (5), 576–586.
- Chien, S.-H., Wang, J.-H. and Cheng, M.-Y., 2020, Performance Comparisons of Different Observer-Based Force-Sensorless Approaches for Impedance Control of Collaborative Robot Manipulators, *IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS)*, 1, 326–331.
- Çınar, M. A., Kalyoncu, M. ve Şen, M. A., 2022, Üç Serbestlik Dereceli (3R) Bir Çizim Robotunun Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanılarak Optimal Yörünge Kontrolü, *Politeknik Dergisi*, 1-1.
- Dong, J. and Xu, J., 2020, Physical human-robot interaction force control method based on adaptive variable impedance, *Journal of the Franklin Institute*, 357 (12), 7864–7878.
- Eser, O., Çakan, A., Kalyoncu, M. ve Botsalı, F., 2021, Arı Algoritması (AA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Kullanarak Çeyrek Araç Modeli Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(3), 621–632.
- Faria, C., Ferreira, F., Erhagen, W., Monteiro, S. and Bicho, E., 2018, Position-based kinematics for 7-DoF serial manipulators with global configuration control, joint limit and singularity avoidance, *Mechanism and Machine Theory*, 121, 317–334.
- Ficuciello, F., Villani, L. and Siciliano, B., 2015, Variable Impedance Control of Redundant Manipulators for Intuitive Human–Robot Physical Interaction, *IEEE Transactions on Robotics*, 31 (4), 1552–3098.

- Ghorbanpour, A., and Richter, H., 2021, An Overview of Energy-Optimal Impedance Control of Cooperative Robot Manipulators, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 144 (12), 121002-121015.
- Gümüş, M. S., Çakan, A. ve Kalyoncu, M., 2023, Cascade Proportional Derivative Controller For A Flexible Link Robot Manipulator Using The Bees Algorithm, *Academic Platform Journal of Engineering and Smart Systems*, 11 (1), 27-34.
- Hanafusa, M. and Ishikawa, J., 2021, Operability Evaluation of Human-Adaptive Impedance Control for Human-collaborative Robots, *22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 80-86.
- Hogan, N., 1984, Impedance Control: An Approach to Manipulation, *1984 American Control Conference*, 304-313.
- Hogan, N., 1985a, Impedance control: An approach to manipulation: Part II—Implementation, *ASME, Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107 (1), 8-16
- Hogan, N., 1985b, Impedance control: An approach to manipulation: Part I—Theory, *ASME, Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107 (1), 1-7.
- Josin Hippolitus, A., Senthilnathan, R. and Malla, O., 2021, Simulation of Grasp Localization Inferences for a Dual-Arm Collaborative Robot, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1012, 012004.
- Kana, S., Tee, K.-P. and Campolo, D., 2021, Human–Robot co-manipulation during surface tooling: A general framework based on impedance control, haptic rendering and discrete geometry, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, 102033.
- KUKA Sunrise.OS 1.11, Operating and Programming Instructions for System Integrators, https://www.oir.caltech.edu/twiki_oir/pub/Palomar/ZTF/KUKARoboticArmMaterial/KUKA_SunriseOS_111_SI_en.pdf [Ziyaret Tarihi: 14 Aralık 2022].
- Lahr, G. J. G., Soares, J. V. R., Garcia, H. B., Siqueira, A. A. G. and Caurin, G. A. P., 2016, Understanding the Implementation of Impedance Control in Industrial Robots, *2016 XIII Latin American Robotics Symposium and IV Brazilian Robotics Symposium (LARS/SBR)*, 269-274.
- Lakshminarayanan, S., Kana, S., Mohan, D. M., Manyar, O. M., Then, D. and Campolo, D., 2020, An adaptive framework for robotic polishing based on impedance control, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112 (1-2), 401–417.
- Li, S., Wang, H. and Zhang, S., 2021, Human-Robot Collaborative Manipulation with the Suppression of Human-caused Disturbance, *J Intell Robot Syst*, 102, 73.
- Li, Y. and Ge, S. S., 2014, Human–Robot Collaboration Based on Motion Intention Estimation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19 (3), 1007–1014.

- Ochoa, H. and Cortesao, R., 2021, Impedance Control Architecture for Robotic-Assisted Mold Polishing based on Human Demonstration, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69 (4), 3822-3830.
- Pham, D.T., Koç, E., Ghanbarzadeh, A., Otri, S., Rahim, S. and Zaidi, M., 2006a, The Bees Algorithm - A Novel Tool for Complex Optimisation Problems, *2nd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems*, 454-461.
- Pham, D.T., Koç, E., Kalyoncu, M. and Tinkır, M., 2008, Hierarchical PID Controller Design for a Flexible Link Robot Manipulator Using the Bees Algorithm, *Proceedings of 6th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*, Sakarya, Turkey, Ekim 14-16, 757-765.
- Pham, D. and Kalyoncu, M., 2009, Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the Bees Algorithm, *7th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2009)*, Wales, United Kingdom, 475-480.
- Raiola, G., Cardenas, C. A., Tadele, T. S., de Vries, T. and Stramigioli, S., 2018, Development of a Safety- and Energy-Aware Impedance Controller for Collaborative Robots, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3 (2), 1237-1244.
- Ren, T., Dong, Y., Wu, D. and Chen, K., 2018, Impedance control of collaborative robots based on joint torque servo with active disturbance rejection, *Industrial Robot: An International Journal*, 46 (10), 518-528.
- Roveda, L., Maskani, J., Franceschi, P. et al., 2020, Model-Based Reinforcement Learning Variable Impedance Control for Human-Robot Collaboration, *J Intell Robot Syst*, 100, 417-433.
- Sen, M. A., Bilgiç, H. H. ve Kalyoncu, M., 2016, Çift Ters Sarkaç Sisteminin Denge ve Konum Kontrolü için Arı Algoritması ile LQR Kontrolcü Parametrelerinin Tayini, *Mühendis ve Makina*, 57 (679), 53-62.
- Sen, M. A., Bakırcıoğlu, V. ve Kalyoncu, M., 2017b, Design and simulation impedance controller for trajectory control with obstacle of quadruped robot's leg, *International Advanced Researches & Engineering (IAREC 2017)*, Osmaniye, Turkey: 558-568.
- Shimizu, M., Kakuya, H., Yoon, W.K., Kitagaki, K. And Kosuge, K., 2008, Analytical Inverse Kinematic Computation for 7-DOF Redundant Manipulators With Joint Limits and Its Application to Redundancy Resolution, *in IEEE Transactions on Robotics*, 24 (5), 1131-1142.
- Torres, R., Gonzalez, S., Elguea, I., Aginaga, J., Iriarte, X., Agirre, N. and Inziarte, I., 2020, Robotic assisted thin-wall machining with a collaborative robot, *2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Hong Kong, China, 1505-1508.
- Ying-Long, C., Fu-Jun, S. and Yong-Jun, G., 2020, Remote Human-robot Collaborative Impedance Control Strategy of Pharyngeal Swab Sampling Robot, *2020 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*, 341-345.

- Yöngül, A., 2019, Dört ayaklı yürüyen bir robotun tek bacağı için arı algoritması kullanılarak kontrolcü tasarımı, *Master's thesis, Konya Teknik Üniversitesi*.
- Wang, H., Wang, Z. and Wang, H., 2019, Impedance Control Strategy and Experimental Analysis of Collaborative Robots Based on Torque Feedback, *2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2951-2957.



EKLER**EK-1: İleri Kinematik Sonuçlar**

$${}^0_7T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} r_{11} = & \sin(q7) * (\sin(q5) * (\cos(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \\ & \cos(q3)) - \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) - \cos(q5) * (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \\ & \cos(q2) * \sin(q3))) - \cos(q7) * (\sin(q6) * (\sin(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \\ & \cos(q2) * \cos(q3)) + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2)) + \cos(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q4) * \\ & (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) - \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \\ & \sin(q5) * (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q3)))))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{21} = & \cos(q7) * (\sin(q6) * (\sin(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \\ & \sin(q1)) - \cos(q4) * \sin(q1) * \sin(q2)) + \cos(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q4) * (\cos(q1) * \\ & \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) + \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \sin(q5) * \\ & (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3)))) - \sin(q7) * (\sin(q5) * \\ & (\cos(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) + \sin(q1) * \sin(q2) * \\ & \sin(q4)) - \cos(q5) * (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3)))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{31} = & \cos(q7) * (\cos(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \\ & \sin(q2)) + \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q5)) - \sin(q6) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \\ & \sin(q2) * \sin(q4))) - \sin(q7) * (\sin(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \\ & \sin(q2)) - \cos(q5) * \sin(q2) * \sin(q3)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{12} = & \sin(q7) * (\sin(q6) * (\sin(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \\ & \cos(q3)) + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2)) + \cos(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q4) * (\sin(q1) * \\ & \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) - \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \sin(q5) * \\ & (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q3)))) + \cos(q7) * (\sin(q5) * \\ & (\cos(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) - \cos(q1) * \sin(q2) * \\ & \sin(q4)) - \cos(q5) * (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q3)))) \end{aligned}$$

$$r_{22} = -\sin(q7) * (\sin(q6) * (\sin(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) - \cos(q4) * \sin(q1) * \sin(q2))) + \cos(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) + \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \sin(q5) * (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3)))) - \cos(q7) * (\sin(q5) * (\cos(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) + \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) - \cos(q5) * (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3))))$$

$$r_{32} = -\cos(q7) * (\sin(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q2))) - \cos(q5) * \sin(q2) * \sin(q3)) - \sin(q7) * (\cos(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q2))) + \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q5)) - \sin(q6) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q4)))$$

$$r_{13} = \cos(q6) * (\sin(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2)) - \sin(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) - \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \sin(q5) * (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q3))))$$

$$r_{23} = \sin(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) + \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \sin(q5) * (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3)))) - \cos(q6) * (\sin(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) - \cos(q4) * \sin(q1) * \sin(q2))$$

$$r_{33} = \sin(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q2)) + \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q5)) + \cos(q6) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q4))$$

$$p_x = d5 * (\sin(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2)) + d7 * (\cos(q6) * (\sin(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2)) - \sin(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) - \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \sin(q5) * (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q3)))) + d3 * \cos(q1) * \sin(q2)$$

$$\begin{aligned}
p_y = & d3 * \sin(q1) * \sin(q2) - d7 * (\cos(q6) * (\sin(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \\
& \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) - \cos(q4) * \sin(q1) * \sin(q2)) - \sin(q6) * (\cos(q5) * \\
& (\cos(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) + \sin(q1) * \sin(q2) * \\
& \sin(q4)) + \sin(q5) * (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3)))) - d5 * \\
& (\sin(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) - \cos(q4) * \sin(q1) * \\
& \sin(q2))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
p_z = & d1 + d7 * (\sin(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \\
& \sin(q2)) + \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q5)) + \cos(q6) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \\
& \sin(q2) * \sin(q4))) + d5 * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q4)) + d3 * \\
& \cos(q2)
\end{aligned}$$



EK-2: Jakobiyen Sonuçlar

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} & J_{17} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} & J_{27} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} & J_{37} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} & J_{47} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & J_{56} & J_{57} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} & J_{66} & J_{67} \end{bmatrix}$$

$$J_{11} = d5 * (\sin(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) - \cos(q4) * \sin(q1) * \sin(q2)) + d7 * (\cos(q6) * (\sin(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) - \cos(q4) * \sin(q1) * \sin(q2)) - \sin(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) + \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \sin(q5) * (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3)))) - d3 * \sin(q1) * \sin(q2))$$

$$J_{12} = d7 * (\cos(q1) * \sin(q6) * (\sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q5) + \cos(q2) * \cos(q5) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \cos(q5) * \sin(q2)) + \cos(q1) * \cos(q6) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q4))) + d3 * \cos(q1) * \cos(q2) + d5 * \cos(q1) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q4))$$

$$J_{13} = d7 * (\sin(q6) * (\sin(q5) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) - \cos(q4) * \cos(q5) * (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q3))) + \cos(q6) * \sin(q4) * (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q3))) + d5 * \sin(q4) * (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q3))$$

$$J_{14} = d7 * (\cos(q6) * (\cos(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) - \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \cos(q5) * \sin(q6) * (\sin(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2))) + d5 * (\cos(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) - \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q4))$$

$$J_{15} = d7 * \sin(q6) * (\sin(q5) * (\cos(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) - \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) - \cos(q5) * (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q3)))$$

$$J_{16} = -d7 * (\sin(q6) * (\sin(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2)) + \cos(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) - \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \sin(q5) * (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q3))))))$$

$$J_{17} = 0$$

$$J_{21} = d5 * (\sin(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2)) + d7 * (\cos(q6) * (\sin(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) + \cos(q1) * \cos(q4) * \sin(q2)) - \sin(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q4) * (\sin(q1) * \sin(q3) - \cos(q1) * \cos(q2) * \cos(q3)) - \cos(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \sin(q5) * (\cos(q3) * \sin(q1) + \cos(q1) * \cos(q2) * \sin(q3)))))) + d3 * \cos(q1) * \sin(q2)$$

$$J_{22} = d7 * (\sin(q1) * \sin(q6) * (\sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q5) + \cos(q2) * \cos(q5) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \cos(q5) * \sin(q2)) + \cos(q6) * \sin(q1) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q4))) + d5 * \sin(q1) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q4)) + d3 * \cos(q2) * \sin(q1)$$

$$J_{23} = -d7 * (\sin(q6) * (\sin(q5) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) - \cos(q4) * \cos(q5) * (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3)))) + \cos(q6) * \sin(q4) * (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3))) - d5 * \sin(q4) * (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3))$$

$$J_{24} = -d7 * (\cos(q6) * (\cos(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) + \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \cos(q5) * \sin(q6) * (\sin(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) - \cos(q4) * \sin(q1) * \sin(q2)))) - d5 * (\cos(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) + \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q4))$$

$$J_{25} = -d7 * \sin(q6) * (\sin(q5) * (\cos(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) + \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) - \cos(q5) * (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3))))$$

$$J_{26} = d7 * (\sin(q6) * (\sin(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) - \cos(q4) * \sin(q1) * \sin(q2)) + \cos(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q4) * (\cos(q1) * \sin(q3) + \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q1)) + \sin(q1) * \sin(q2) * \sin(q4)) + \sin(q5) * (\cos(q1) * \cos(q3) - \cos(q2) * \sin(q1) * \sin(q3))))))$$

$$J_{27} = 0$$

$$J_{31} = 0$$

$$J_{32} = -d5 * (\cos(q4) * \sin(q2) - \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q4)) - d3 * \sin(q2) - d7 * (\sin(q6) * (\cos(q5) * (\sin(q2) * \sin(q4) + \cos(q2) * \cos(q3) * \cos(q4)) - \cos(q2) * \sin(q3) * \sin(q5)) + \cos(q6) * (\cos(q4) * \sin(q2) - \cos(q2) * \cos(q3) * \sin(q4))))$$

$$J_{33} = d7 * (\sin(q6) * (\cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q5) + \cos(q4) * \cos(q5) * \sin(q2) * \sin(q3)) - \cos(q6) * \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4)) - d5 * \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q4))$$

$$J_{34} = -d5 * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q2)) - d7 * (\cos(q6) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q2)) - \cos(q5) * \sin(q6) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q4)))$$

$$J_{35} = -d7 * \sin(q6) * (\sin(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q2)) - \cos(q5) * \sin(q2) * \sin(q3))$$

$$J_{36} = d7 * (\cos(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q2)) + \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q5)) - \sin(q6) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q4)))$$

$$J_{37} = 0$$

$$J_{41} = \cos(q7) * (\cos(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q2)) + \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q5)) - \sin(q6) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q4))) - \sin(q7) * (\sin(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q2)) - \cos(q5) * \sin(q2) * \sin(q3))$$

$$J_{42} = \cos(q7) * (\cos(q6) * (\cos(q3) * \sin(q5) + \cos(q4) * \cos(q5) * \sin(q3))) + \sin(q3) * \sin(q4) * \sin(q6)) + \sin(q7) * (\cos(q3) * \cos(q5) - \cos(q4) * \sin(q3) * \sin(q5))$$

$$J_{43} = -\cos(q7) * (\cos(q4) * \sin(q6) - \cos(q5) * \cos(q6) * \sin(q4)) - \sin(q4) * \sin(q5) * \sin(q7)$$

$$J_{44} = -\cos(q5) * \sin(q7) - \cos(q6) * \cos(q7) * \sin(q5)$$

$$J_{45} = -\cos(q7) * \sin(q6)$$

$$J_{46} = \sin(q7)$$

$$J_{47} = 0$$

$$J_{51} = -\cos(q7) * (\sin(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q2)) - \cos(q5) * \sin(q2) * \sin(q3)) - \sin(q7) * (\cos(q6) * (\cos(q5) * (\cos(q2) * \sin(q4) - \cos(q3) * \cos(q4) * \sin(q2)) + \sin(q2) * \sin(q3) * \sin(q5)) - \sin(q6) * (\cos(q2) * \cos(q4) + \cos(q3) * \sin(q2) * \sin(q4))))$$

$$J_{52} = \cos(q7) * (\cos(q3) * \cos(q5) - \cos(q4) * \sin(q3) * \sin(q5)) - \sin(q7) * (\cos(q6) * (\cos(q3) * \sin(q5) + \cos(q4) * \cos(q5) * \sin(q3))) + \sin(q3) * \sin(q4) * \sin(q6))$$

$$J_{53} = \sin(q7) * (\cos(q4) * \sin(q6) - \cos(q5) * \cos(q6) * \sin(q4)) - \cos(q7) * \sin(q4) * \sin(q5)$$

$$J_{54} = \cos(q6) * \sin(q5) * \sin(q7) - \cos(q5) * \cos(q7)$$

$$J_{55} = \sin(q6) * \sin(q7)$$

$$J_{56} = \cos(q7)$$

$$J_{57} = 0$$

$$J_{61} = \sin(q_6) * (\cos(q_5) * (\cos(q_2) * \sin(q_4) - \cos(q_3) * \cos(q_4) * \sin(q_2)) + \sin(q_2) * \sin(q_3) * \sin(q_5)) + \cos(q_6) * (\cos(q_2) * \cos(q_4) + \cos(q_3) * \sin(q_2) * \sin(q_4)))$$

$$J_{62} = \sin(q_6) * (\cos(q_3) * \sin(q_5) + \cos(q_4) * \cos(q_5) * \sin(q_3)) - \cos(q_6) * \sin(q_3) * \sin(q_4)$$

$$J_{63} = \cos(q_4) * \cos(q_6) + \cos(q_5) * \sin(q_4) * \sin(q_6)$$

$$J_{64} = -\sin(q_5) * \sin(q_6)$$

$$J_{65} = \cos(q_6)$$

$$J_{66} = 0$$

$$J_{67} = 1$$

EK-3: İleri Kinematik, Ters Kinematik ile Jakobiyen ve Tekillik Analizi Matlab Kodları

```

% İLERİ KİNEMATİK
function [ pose, nsparam, rconf, jout]

%Tolerans
tol =1e-8;

%Robot parametreleri
%Eklem uzunlukları
l = [0.34 0.42 0.4 0.126];

%Denavit-Hartenberg parametreleri 7 DoF
%DH: [a,  alpha,d,  theta]
dh = [0  -pi/2  1(1)  0;
      0   pi/2  0    0;
      0   pi/2  1(3)  0;
      0  -pi/2  0    0;
      0  -pi/2  1(5)  0;
      0   pi/2  0    0;
      0   0    1(7)  0];

%Eklem sayısı
nj = size(dh,1);

%Robot konfigürasyonu
rconf = (joints (2) < 0) + 2*(joints (4) < 0) + 4*(joints (6)<0);

[ arm, elbow, wrist] = Configuration(rconf );

%DH parametrelerinin theta sütununa, eklem değerlerinin atanması
dh(:,4) = joints;

%Dönüşüm matrislerinin tanımlanması
tr= zeros(4,4, nj);

%DH parametreleriyle oluşturulan dönüşüm matrisi

%R = [Xx,Yx,Zx,  --  Xx = cos(theta), Yx = -sin(theta) * cos(alpha), Zx =
sin(theta) * sin(alpha)
%   Xy,Yy,Zy,  --  Xy = sin(theta), Yy =  cos(theta) * cos(alpha), Zy = -
cos(theta) * sin(alpha)
%   Xz,Yz,Zz]; --  Xz = 0.0,          Yz =  sin(alpha),          Zz =
cos(alpha)

for i=1:nj
    a = dh(i,1); alpha = dh(i,2); d = dh(i,3); theta = dh(i,4);
    v = [ a*cos(theta), a*sin(theta), d ];

```

```

    Xx = cos(theta); Yx = -sin(theta) * cos(alpha); Zx = sin(theta) *
sin(alpha);
    Xy = sin(theta); Yy = cos(theta) * cos(alpha); Zy = -cos(theta) *
sin(alpha);
    Xz = 0.0;      Yz = sin(alpha); Zz = cos(alpha);
    tmp = [Xx, Yx, Zx, v(1);
          Xy, Yy, Zy, v(2);
          Xz, Yz, Zz, v(3);
          0,  0,  0,  1];

    if(i==1)
        tr(:, :, 1) tmp;

    else
        tr(:, :, i) = tr(:, :, i-1) * tmp;

    end
end

xs = tr(1:3,4,1);      % tabandan omuz pozisyonu
xe = tr(1:3,4,4);      % tabandan dirsek pozisyonu
xw = tr(1:3,4,6); % tabandan bilek pozisyonu
xsw = xw-xs;          % omuzdan bilek pozisyonu

pose= tr(:, :, end); %tabandan uç nokta pozisyonu

% Kol açısı nsparam( $\psi$ ) hesaplanması
% Sanal düzlemdeki dirsek pozisyonu xe0 olarak gösterilmiştir.
[vv, ~, jout] = ReferencePlane(pose, elbow);

% vv gerçek düzlemin normal vektörü: xs-xe0-xw
% VC sanal düzlemin normal vektörü: xs-xe-xw
v1=unit(xe-xs);
v2=unit(xw-xs);
vc=cross(v1, v2);

cos_ns = dot(unit(vv), unit(vc));

if(abs(norm(cos_ns))>1)
    cos_ns = sign(cos_ns);

end

%Bu vector kol açısı( $\psi$ ) sinyalini verecektir.
v3 = cross(unit(vv),unit(vc));

if(norm(v3) > tol)
    nsparam = sign (dot (v3, xsw)) * acos(cos_ns);

else

```

```

if(norm(vv - vc) < tol)
    nsparam 0;

    end
end
end

function [ joints, s_mat, w_mat ] = InverseKinematics( pose, nsparam, rconf )
% TERS KİNEMATİK
Configuration(rconf);
[ arm, elbow, wrist ] = Configuration(rconf);

%Tolerans
tol = 1e-8;

%Robot parametreleri
%Eklem uzunlukları
l = [0.34 0.42 0.4 0.126];

%Denavit-Hartenberg parametreleri 7 DoF
%DH: [a, alpha, d, theta]
dh = [0    -pi/2    l(1)    0;
      0     pi/2     0     0;
      0     pi/2    l(3)    0;
      0    -pi/2     0     0;
      0    -pi/2    l(5)    0;
      0     pi/2     0     0;
      0     0      l(7)    0];

%Eklem sayısı
nj = size(dh,1);

% Sanal düzlemdeki eklem değerleri
joints = zeros(1,nj);

% Omuz dönüş matrisi
s_mat = zeros(3,3,3);

% Bilek dönüş matrisi
w_mat = zeros(3,3,3);

xend = pose(1:3,4); %tabandan uç nokta pozisyonu
xs = [0 0 dh(1,3)]'; % tabandan omuz pozisyonu
xwt = [0 0 dh(end,3)]'; % bilekten uç nokta pozisyonu
xw = xend - pose(1:3,1:3)*xwt;% tabandan bilek pozisyonu
xsw = xw - xs; % omuzdan bileğe vektör
usw = unit(xsw);

```

```

lbs = l(1);
lse = l(2); %üst kol uzunluğu (omuzdan dirsek)
lew = l(3); %alt kol uzunluğu (dirsekten bileğe)

%Duruşun kol+önkol erişimi içinde olup olmadığını kontrol edilmesi
assert(norm(xsw) < lse + lew && norm(xsw) > lse - lew, ' Ulaşılabilir çalışma
alanının dışında belirtilen poz ');

% -- 4. Eklem --
% Dirsek eklemi, yalnızca eklemin yapısına bağlı olduğundan doğrudan
hesaplanabilir.
assert(abs((norm(xsw)^2 - lse^2 - lew^2)-(2*lse*lew)) > tol,;

% Kosinüs teoremi
joints(4) = elbow * acos((norm(xsw)^2 - lse^2 - lew^2)/(2*lse*lew));

T34 = dh_calc(dh(4,1),dh(4,2),dh(4,3),joints(4));
R34 = T34(1:3,1:3);

% Omuz eklemleri;
% Kol açısı sıfır iken ilk olarak referans eklem açılarını hesaplanır.
[~, R03_o, ~] = ReferencePlane(pose, elbow);

skew_usw = skew(usw);

% Yardımcı matrisler As Bs ve Cs (6) ve (9) birlikte yazılarak aşağıdaki
% gibi hesaplanabilir.
% R0psi = I3 + sin(psi)*skew_usw + (1-cos(psi))*skew_usw^2 (6)
% R03 = R0psi * R03_o (9)
% (6) (9) da yerine yazılırsa
% R03 = R03_o*skew_usw*sin(psi) + R03_o*(-skew_usw^2)*cos(psi) + R03_o(I3 +
skew_usw^2) elde edilir.
% R03 = As *sin(psi) + Bs *cos(psi) + Cs
As = skew_usw * R03_o;
Bs = -skew_usw^2 * R03_o;
Cs = (usw*usw') * R03_o;

psi = nsparam;
R03 = As*sin(psi) + Bs*cos(psi) + Cs;

% T03 dönüşüm matrisi
%[ cos(j1)*cos(j2)*cos(j3) - sin(j1)*sin(j3), cos(j1)*sin(j2),
cos(j3)*sin(j1) + cos(j1)*cos(j2)*sin(j3), 0.4*cos(j1)*sin(j2)]
%[ cos(j1)*sin(j3) + cos(j2)*cos(j3)*sin(j1), sin(j1)*sin(j2),
cos(j2)*sin(j1)*sin(j3) - cos(j1)*cos(j3), 0.4*sin(j1)*sin(j2)]
%[
-cos(j3)*sin(j2), cos(j2),
-sin(j2)*sin(j3), 0.4*cos(j2) + 0.34]
%[
0, 0,
0, 1]

```

```

joints(1) = atan2(arm * R03(2,2), arm * R03(1,2));
joints(2) = arm * acos(R03(3,2));
joints(3) = atan2(arm * -R03(3,3), arm * -R03(3,1));

Aw = R34' * As' * pose(1:3,1:3);
Bw = R34' * Bs' * pose(1:3,1:3);
Cw = R34' * Cs' * pose(1:3,1:3);

R47 = Aw*sin(psi) + Bw*cos(psi) + Cw;

% T47 dönüşüm matrisi
%[ cos(j5)*cos(j6)*cos(j7) - sin(j5)*sin(j7), - cos(j7)*sin(j5) -
cos(j5)*cos(j6)*sin(j7), cos(j5)*sin(j6), (63*cos(j5)*sin(j6))/500]
%[ cos(j5)*sin(j7) + cos(j6)*cos(j7)*sin(j5), cos(j5)*cos(j7) -
cos(j6)*sin(j5)*sin(j7), sin(j5)*sin(j6), (63*sin(j5)*sin(j6))/500]
%[
-cos(j7)*sin(j6),
sin(j6)*sin(j7), cos(j6), (63*cos(j6))/500 + 2/5]
%[
0,
0,
1]

joints(5) = atan2(wrist * R47(2,3), wrist * R47(1,3));
joints(6) = wrist * acos(R47(3,3));
joints(7) = atan2(wrist * R47(3,2), wrist * -R47(3,1));

% Eklemin kullanacağı Omuz ve Bilek matrislerinin gruplandırılması
% limit algoritmaları;
s_mat(:, :, 1) = As;
s_mat(:, :, 2) = Bs;
s_mat(:, :, 3) = Cs;
w_mat(:, :, 1) = Aw;
w_mat(:, :, 2) = Bw;
w_mat(:, :, 3) = Cw;

%% Tekillik Analizi
clear; clc;
%% Her eklemin bir öncekine göre homojen dönüşüm matrisi
q = sym('q', [1 7], 'real');

d1 = 0.360; d3 = 0.420; d5 = 0.400;

%d7 = 0.126;
d7 = 0;

DH = [
q (1) d1 0 -pi/2 0;
q (2) 0 0 pi/2 0;
q (3) d3 0 -pi/2 0;
q (4) 0 0 pi/2 0;
q (5) d5 0 -pi/2 0;

```

```

q (6) 0      0      pi/2  0;
q (7) d7     0      0      0];

R = SerialLink(DH);

A0_1 = sym_transfDH(DH(1,:));
A1_2 = sym_transfDH(DH(2,:));
A2_3 = sym_transfDH(DH(3,:));
A3_4 = sym_transfDH(DH(4,:));
A4_5 = sym_transfDH(DH(5,:));
A5_6 = sym_transfDH(DH(6,:));
A6_7 = sym_transfDH(DH(7,:));

%J = R.jacob0(q);

%% Her bağlantının homojen matrisleri
T0_1 = simplify(A0_1);
T0_2 = simplify(A0_1*A1_2);
T0_3 = simplify(A0_1*A1_2*A2_3);
T0_4 = simplify(A0_1*A1_2*A2_3*A3_4);
T0_5 = simplify(A0_1*A1_2*A2_3*A3_4*A4_5);
T0_6 = simplify(A0_1*A1_2*A2_3*A3_4*A4_5*A5_6);
T0_7 = simplify(A0_1*A1_2*A2_3*A3_4*A4_5*A5_6*A6_7);

%% GEOMETRİK JACOBIYEN

o = {T0_1(1:3, 4); T0_2(1:3, 4); T0_3(1:3, 4); T0_4(1:3, 4); T0_5(1:3, 4);
      T0_6(1:3, 4); T0_7(1:3, 4)};
z = {T0_1(1:3, 3); T0_2(1:3, 3); T0_3(1:3, 3); T0_4(1:3, 3); T0_5(1:3, 3);
      T0_6(1:3, 3); T0_7(1:3, 3)};

Jg = [
cross(z{1}, (o{7}-o{1})) cross(z{2}, (o{7}-o{2}))...
cross(z{3}, (o{7}-o{3})) cross(z{4}, (o{7}-o{4}))...
cross(z{5}, (o{7}-o{5})) cross(z{6}, (o{7}-o{6}))...
cross(z{7}, (o{7}-o{7}));
z{1} z{2} z{3} z{4} z{5} z{6} z{7}];

disp(Jg);

%% Farklı referans sistemleri için Jacobian matrisi

% Referans sistem {1}
T1_0 = inv(T0_1);
R1_0 = T1_0(1:3, 1:3);
B = [R1_0 zeros(3, 3); zeros(3, 3) R1_0];
J1_0 = B*Jg;

% Referans sistem {2}
T2_0 = inv(T0_2);

```



```

R2_0 = T2_0(1:3, 1:3);
B = [R2_0 zeros(3, 3); zeros(3, 3) R2_0];
J2_0 = B*Jg;

% Referans sistem {3}
T3_0 = inv(T0_3);
R3_0 = T3_0(1:3, 1:3);
B = [R3_0 zeros(3, 3); zeros(3, 3) R3_0];
J3_0 = B*Jg;

% Referans sistem {4}
T4_0 = inv(T0_4);
R4_0 = T4_0(1:3, 1:3);
B = [R4_0 zeros(3, 3); zeros(3, 3) R4_0];
J4_0 = B*Jg;

% Referans sistem {5}
T5_0 = inv(T0_5);
R5_0 = T5_0(1:3, 1:3);
B = [R5_0 zeros(3, 3); zeros(3, 3) R5_0];
J5_0 = B*Jg;

% Referans sistem {6}
T6_0 = inv(T0_6);
R6_0 = T6_0(1:3, 1:3);
B = [R6_0 zeros(3, 3); zeros(3, 3) R6_0];
J6_0 = B*Jg;

% Referans sistem {7}
T7_0 = inv(T0_7);
R7_0 = T7_0(1:3, 1:3);
B = [R7_0 zeros(3, 3); zeros(3, 3) R7_0];
J7_0 = B*Jg;

%% Konum Tekilliyi: J11 minörlerinin hesaplanması
J11 = J4_0(1:3, 1:4);

M1 = simplify(det(J11(1:3, 1:3)));
M2 = simplify(det(J11(1:3, 2:4)));
M3 = simplify(det([J11(1:3, 1) J11(1:3, 3:4)]));
M4 = simplify(det([J11(1:3, 1:2) J11(1:3, 4)]));

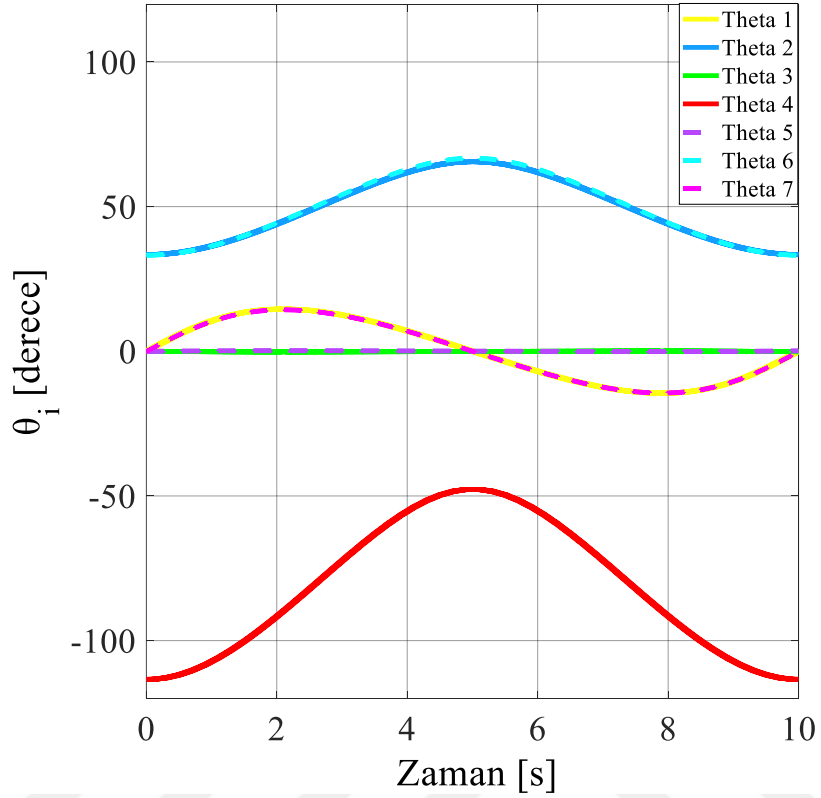
disp([M1; M2; M3; M4]);

%% Oryantasyon tekilliyi: det(J22) = 0
J22 = J4_0(4:6, 5:7);
detJ22 = simplify(det(J22));
disp(detJ22);

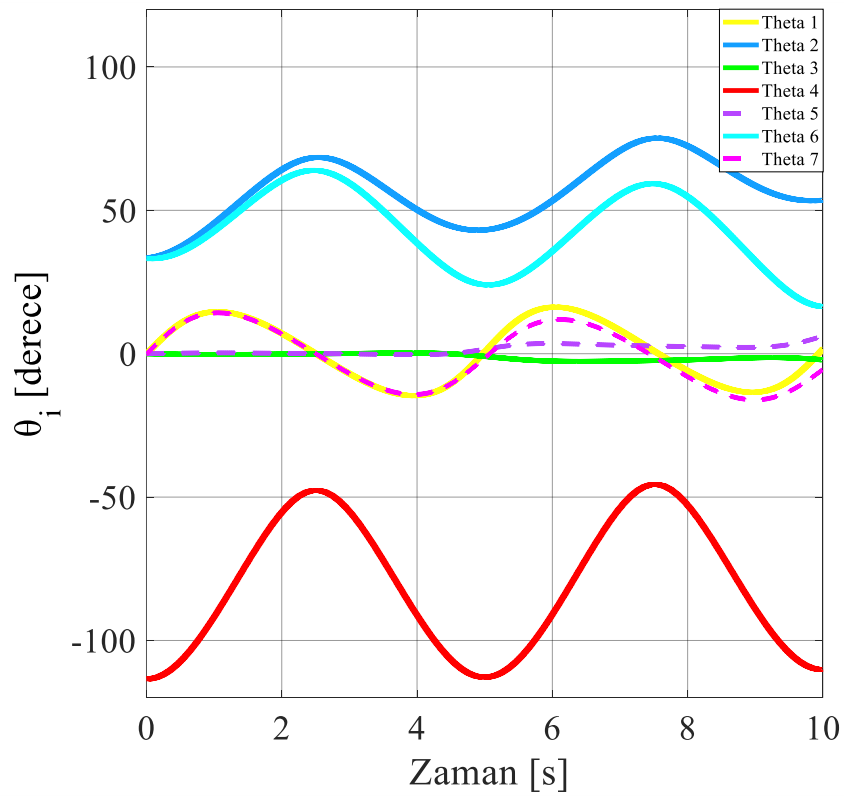
```

EK-4: Her Bir Senaryo İçin Robot Eklemlerinin Açısal Değerleri

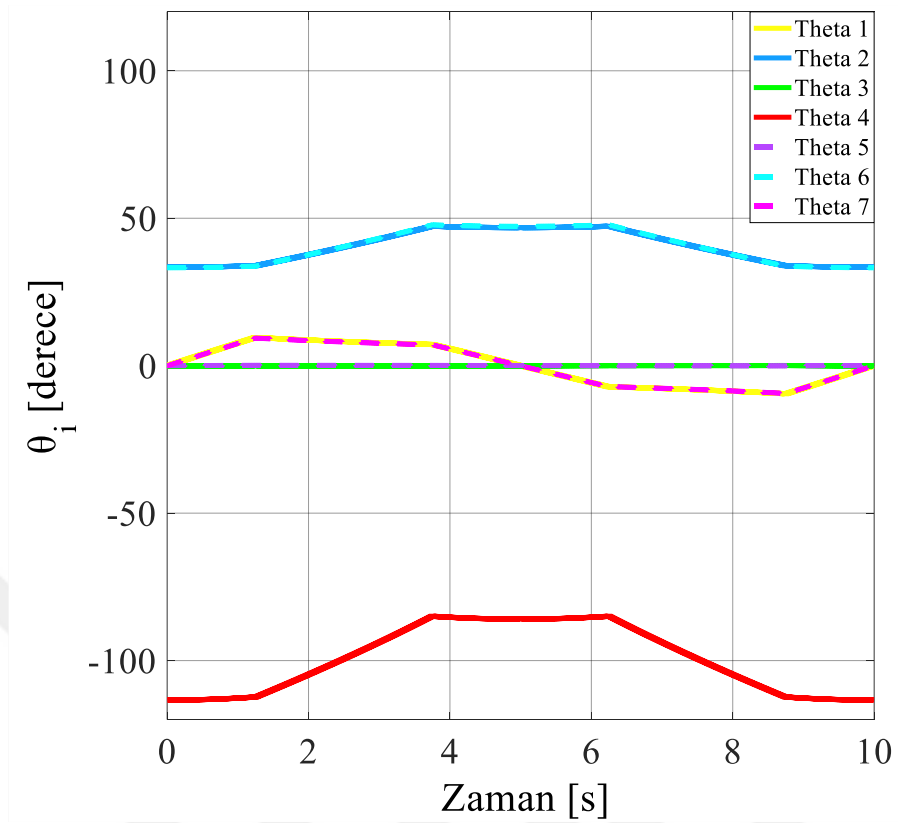
Robot Kolun Dairesel Bir Eksende Hareket Etmesi



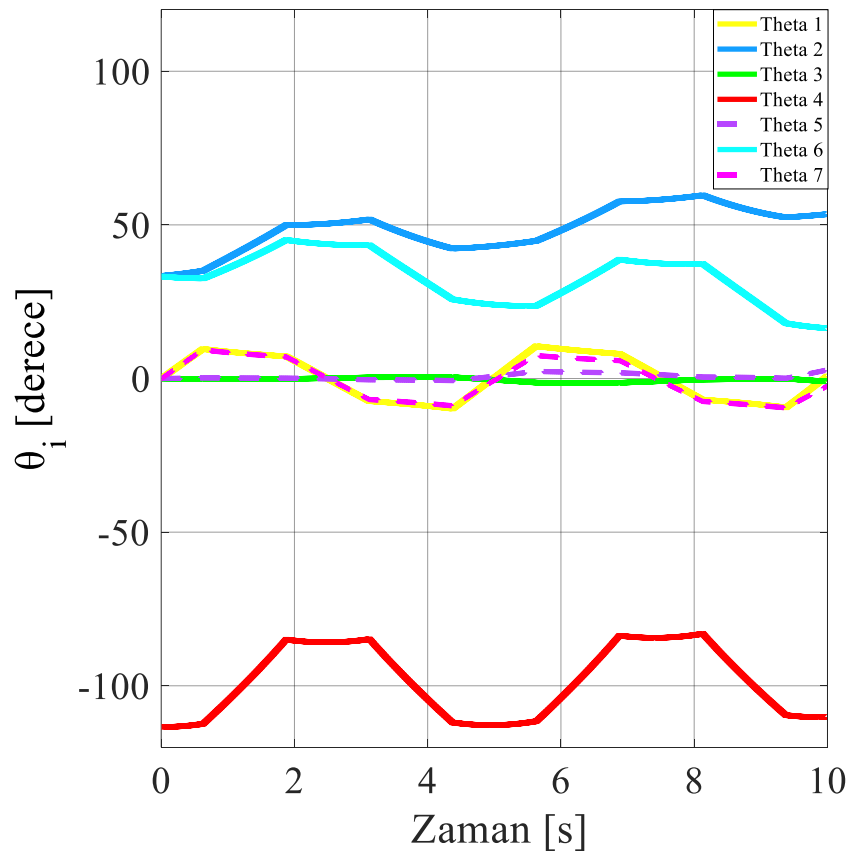
Robot Kolun Spiral Bir Eksende Hareket Etmesi



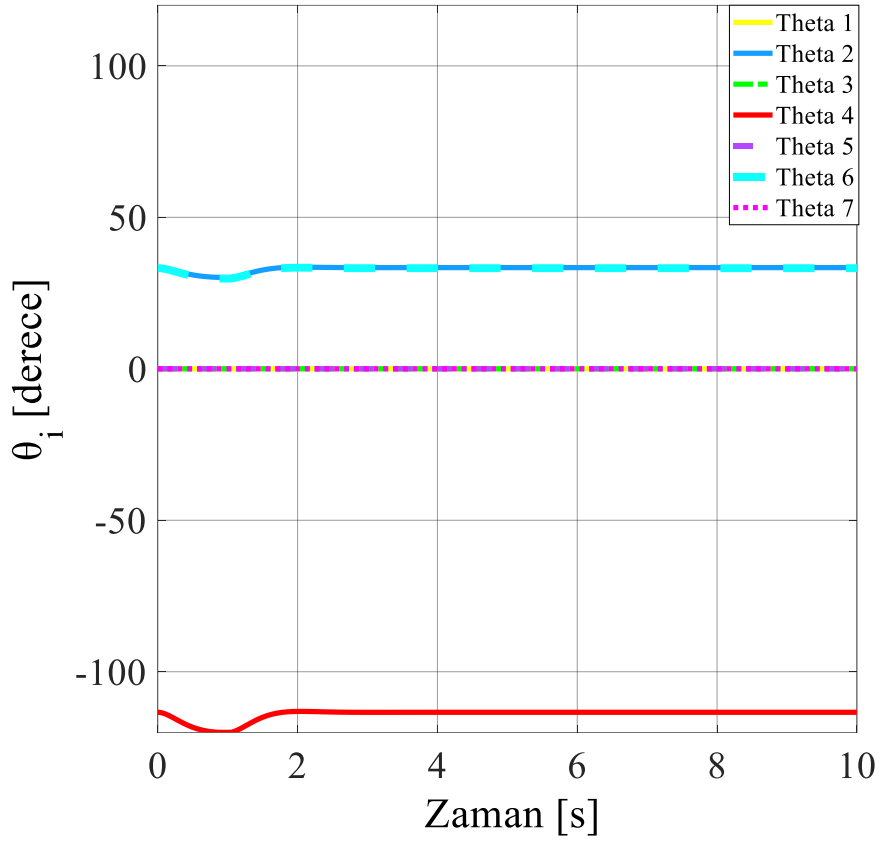
Robot Kolun Kare Bir Eksende Hareket Etmesi



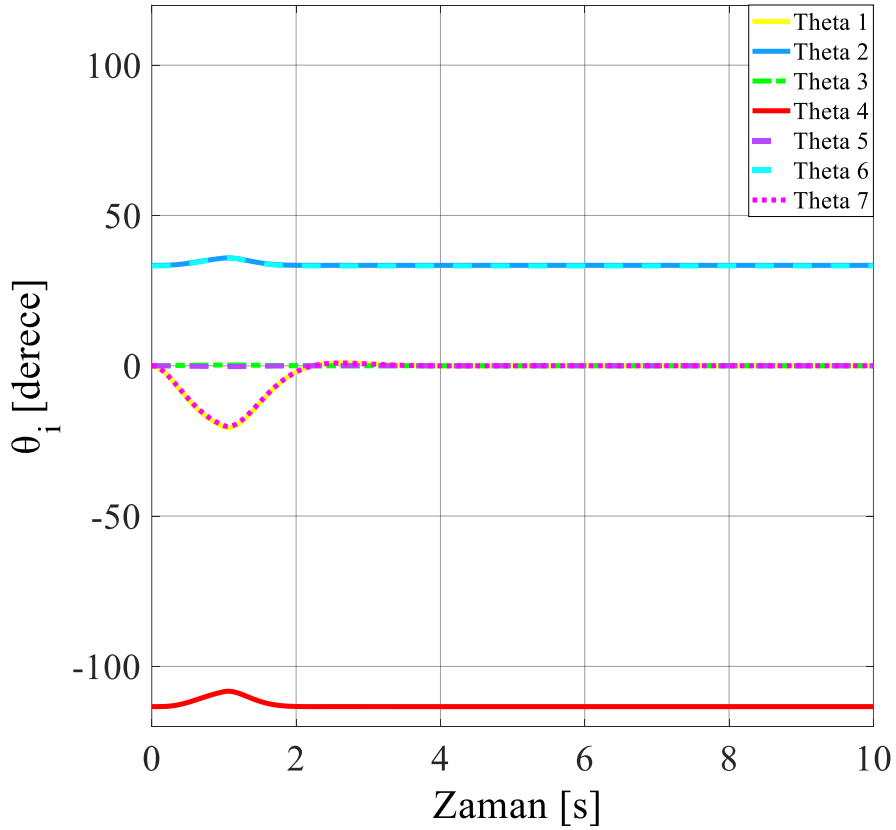
Robot Kolun Kare Spiral Bir Eksende Hareket Etmesi



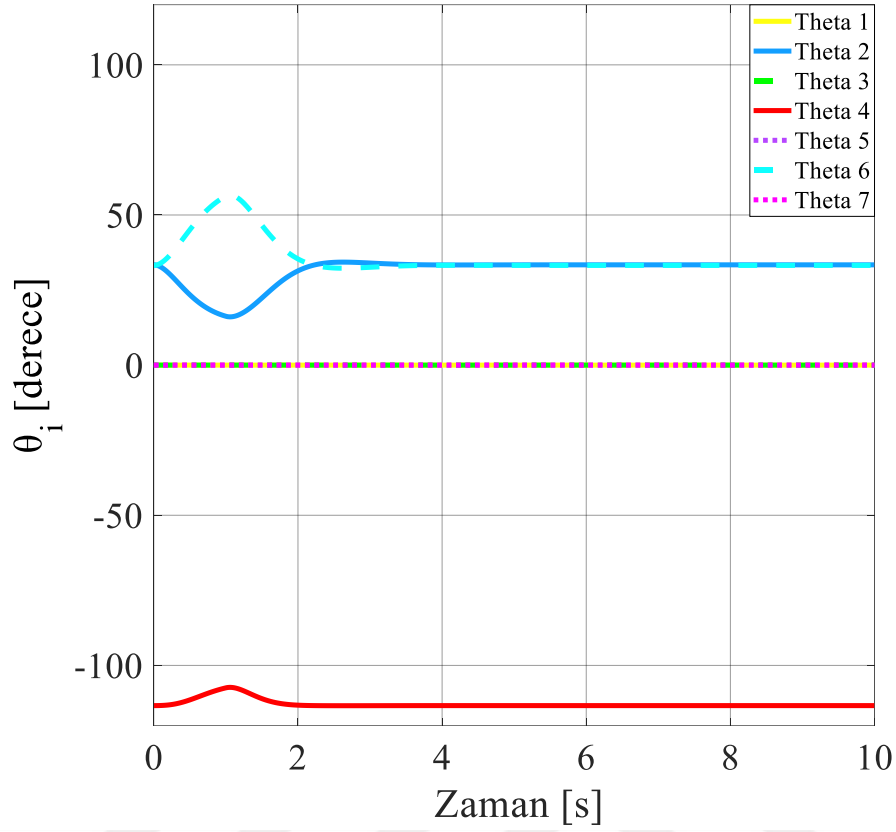
Robot Kol Başlangıç Konumundayken X Ekseninde Kuvvet Uygulanması



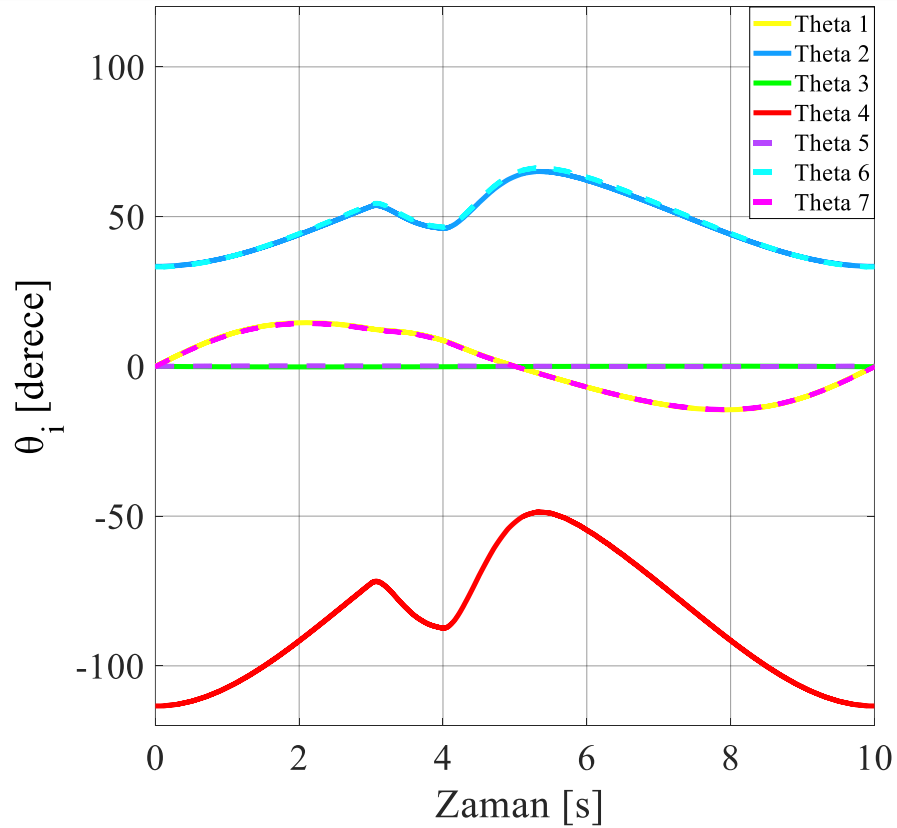
Robot Kol Başlangıç Konumundayken Y Ekseninde Kuvvet Uygulanması



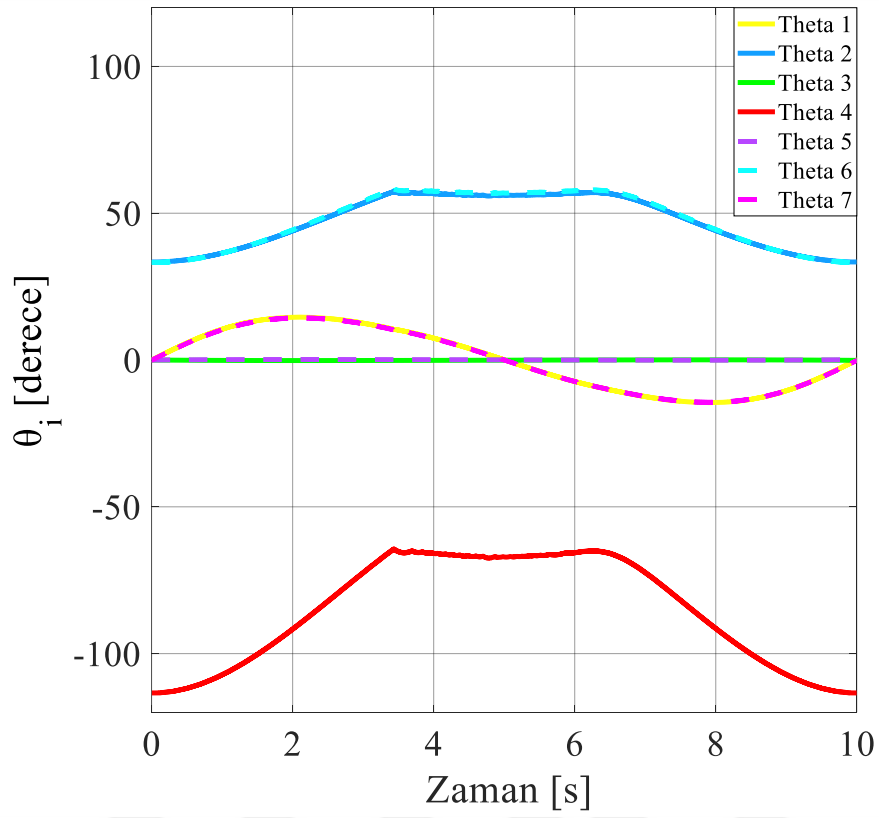
Robot Kol Başlangıç Konumundayken Z Ekseninde Kuvvet Uygulanması



Robot Kol Hareket Halindeyken Robota Kuvvet Uygulanması



Robot Kolun Hareketinde Düz Bir Engelle Karşılaşması



Robot Kolun Hareketinde Eğik Bir Engelle Karşılaşması

