



**6 EKSENLİ BİR ROBOT KOLUNUN
KİNEMATİK ANALİZİ VE P.I.D İLE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mouayad ZAKARIYA

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2025

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

6 EKSENLİ BİR ROBOT KOLUNUN
KİNEMATİK ANALİZİ VE P.I.D İLE KONTROLÜ

Mouayad ZAKARIYA

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSA

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Mouayad ZAKARIYA tarafından hazırlanan “6 Eksenli Bir Robot Kolunun Kinematik Analizi ve P.I.D İle Kontrolü” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 27/05/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL

Başkan : Doç. Dr. Serkan ÇAŞKA

Manisa Celal Bayar Üniversitesi,
Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi

...İmza...

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Melih ÖZÇATAL

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

...İmza...

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL

Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

...İmza...

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım
bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

27 / 05 / 2025

Mouayad ZAKARIYA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

6 EKSENLİ BİR ROBOT KOLUNUN KİNEMATİK ANALİZİ VE P.I.D İLE KONTROLÜ

Mouayad ZAKARIYA

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSA

Robotlar, bağımsız olarak algılayabilen, düşünebilen, planlayabilen ve hareket edebilen araçlardır. Görevleri bağımsız olarak yerine getirmenin yanı sıra, insan yeteneklerini de genişletebilir. Robotik alanında son yıllarda büyük gelişmeler yaşanmıştır. Robotlar daha akıllı hale gelmiş, karmaşık görevleri yerine getirebilecek kapasiteye ulaşmış ve çok çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu gelişmeler hayatımızda büyük değişimlere yol açmıştır. Robotlar artık profesyonel ve kişisel hayatımızın ayrılmaz bir parçasıdır. Robotik endüstrisi modern dönemde büyük bir gelişmeye sahne olmuştur.

Elektronik, sensörler ve yapay zeka gibi teknolojilerdeki gelişmeler sayesinde robotik alanında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu dönemde robotlar, fabrikalarda, hastanelerde ve askeriyede kullanılan robotlar gibi, bağımsız olarak görev yapması mümkündür. Robotik sektörü, daha akıllı hale getirilerek, görevleri daha bağımsız bir şekilde yerine getirebilme hedefiyle sürekli bir gelişim içerisinde.

Robotlar, hem profesyonel hem de kişisel hayatımızda çeşitli alanlarda insan hayatını büyük ölçüde değiştirmektedir. Robotlar, endüstri, tıp, eğitim, eğlence, güvenlik, lojistik, tarım, araştırma ve geliştirme gibi profesyonel hayatımızdaki çeşitli alanlara girmiştir. Bilim, uzay, inşaat, temizlik, sterilizasyon, alışveriş, teslimat, çeviri ve yüz tanıma, renk ve hareket analizi gibi benzer alanlarda ilerlemiştir.

Bu tez çalışmasında ABB şirketinin modellediği altı serbestlik dereceli IRB 1200 modeli robot kolun katı modeli tasarlanmasının ardından Matlab/Simulink ortamına aktarılmıştır. Matlab/Simulink ortamında hedef noktalar belirlenmiştir yörünge haline getirilmiştir, bu konumlar homojen dönüşümünden geçtikten sonra her robot eksenine açı gereksinimlerini belirlemek için ters kinematik çözüm bloğuna aktarılır, ters kinematik bloğu ise DC motorlara aktarılır, daha sonra Matlab/Simulink ortamına aktarılan IRB 1200 modeli robot kolun eklemlerine açı gereksinimleri iletilir ve son olarak konum bilgisi edinmek üzere ileri kinematik bloğuna iletilir. Ancak aynı değerde olmayan giriş ve çıkış bilgileri gözlemlenmesinin ardından kontrol sistemi eklenerek sistemin yanıtını referans sinyaline yaklaştırılmış, kontrol sistemi için denetleyici olarak P.I.D seçilmiş ve her bir eklem için ayrı sistem kontrol bağlanmıştır. Robot kol konum kontrolü bu şekilde sağlanmıştır. Sistem yanıtı sırasında oldukça düşük hatalar ve referans konumlara yakın sonuçlara varılmıştır.

2025, xii + 74 sayfa

Anahtar Kelimeler: Robot manipülatörü, İleri kinematik, Ters kinematik, Motor kontrol sistemi, Simulink, Homojen dönüşümü, Robot kolu.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE KINEMATIC ANALYSIS AND PID CONTROL OF A 6-AXIS ROBOTIC ARM

Mouayad ZAKARIYA

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Mechatronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Faruk Emre AYSA

Robots are equipments that can perceive, think, plan and move independently. In addition to performing tasks independently, they can also expand human capabilities. There have been great developments in the field of robotics in recent years, robots have become smarter, have reached the capacity to perform complex tasks and have begun to be widely used in a wide variety of applications. These developments have led to great changes in our lives and robots have now become an integral part of our professional and personal lives. The robotics industry has witnessed great development in the modern era.

Great progress has been made in the field of robotics thanks to developments in technologies such as electronics, sensors and artificial intelligence. During this period, robots have become able to perform tasks independently, such as robots used in factories, hospitals and the military. The robotics sector is in constant development with the goal of becoming smarter and being able to perform tasks more independently.

Robots have greatly changed human life in various areas, both in our professional and personal lives. Robots have entered various areas in our professional lives such as industry, medicine, education, entertainment, security, logistics, agriculture, research and development. Science, space, construction, cleaning, sterilization, shopping, delivery, translation and facial recognition. It has advanced in areas such as voice, text, shape, color, motion analysis and similar areas.

In this thesis study, the solid model of the six-degree-of-freedom IRB 1200 model robot arm modeled by ABB company was designed and then transferred to the Matlab/Simulink environment. In the Matlab/Simulink environment, certain positions were determined and turned into trajectory, after these positions passed through the homogeneous transformation, they were transferred to the inverse kinematics solution block to determine the angle requirements for each robot axis, the inverse kinematics block was transferred to the DC motors, then the angle requirements were transmitted to the joints of the IRB 1200 model robot arm that we transferred to the Matlab/Simulink environment and finally transmitted to the forward kinematics block to obtain position information. However, it was observed that input and output information that were not at the same value, then the control system was added, P.I.D was selected as the controller and a system control was connected for each joint. The robot arm position control has been achieved in this way and very low errors and results close to the reference positions were observed.

2025, xii + 74 pages

Keywords: Robot manipulator, Forward kinematics, Inverse kinematics, Motor control system, Simulink, Homogeneous transformation, Robot arm.

TEŞEKKÜR

Bilim yolumu aydınlatıp yüksek lisans sürecimde en büyük destek kaynağım olan, mühendislik ve bilim alanlarının ötesinde azim ve disiplinde bana yol gösteren, zamanını benden esirgmeden en küçük ayrıntıları sabırla açıklayan, gelecekteki adımlarımda sözleri ve tavsiyeleriyle bana daima rehberlik edecek olan saygıdeğer öğretmenim ve danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Faruk Emre AYSAL hocama en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmamın özgünlüğünü artırmak ve mümkün olan en iyi sonuca ulaşmak için sundukları yorumları ve değerli önerileriyle katkıda bulunan, azimleriyle bana örnek olan, emekleri ve destekleriyle her zaman yanımda olan Doç. Dr. Serkan ÇAŞKA ve Dr. Öğr. Üyesi Melih ÖZÇATAL hocalarımdan emeklerinden ötürü memnuniyetimi sunarım.

Bilgelik ve özveriyle dolu hayatı ilk ilham kaynağım olan, sessiz desteği ve sözlü motivasyonu ile zor zamanlarımda görünmez güç gibi yanımda olan, bana mekatronik mühendisliği bölümünde eğitim almayı özellikle tavsiye eden, her öğüdü ve sabrıyla bana güç veren değerli makine mühendisi babama en derin minnet duygularımı sunuyorum. Koşulsuz sevgi sembolü olan, beni nezaketiyle kucaklayan, dualarıyla saran ve sınırsız şefkatiyle yanımda duran sevgili anneme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Hep yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen ve motivasyon kaynağı olan sevgili aileme desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

Mouayad ZAKARIYA

Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ROBOT TİPLERİ.....	7
2.1 Scara Robot	8
2.1.1 Scara Robot Kinematiği	10
2.1.2 Scara Robot Dinamiği	10
2.1.3 Scara Robot Yörünge Planlaması	11
2.2 Paralel Robot	12
2.2.1 Paralel Robot Örnekleri.....	12
2.2.2 Paralel Robot Kullanım Alanlarına Göre İsimleri	13
2.2.3 Paralel Robot Kinematiği	13
2.3 Kartezyen Robot.....	14
2.3.1 Kartezyen Robot Kinematiği.....	14
2.4 Küresel Robot.....	15
2.5 Silindirik Robot	16
3. LİTERATÜR	17
4. MATERYAL ve METOT.....	25

4.1 Altı Serbestlik Dereceli ABB IRB 1200 Robot Kolunun Mekanik Tasarımı	26
4.2 Altı Serbestlik Dereceli ABB IRB 1200 Robot Kolunun İleri Kinematiği	32
4.3 Altı Serbestlik Dereceli ABB Robot Kolunun Ters Kinematiği	36
4.4 Katı Modelinin Simulink Ortamına Aktarılması	43
4.5 Simulink Modeli	43
4.6 DC Motorların Matematik Denklemleri	45
4.7 Robot Kol Eklemlerinde Kullanılan DC Motorların P.I.D Kontrolü.....	46
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	50
5.1 Ters Kinematik Sonuçları	50
5.2 P.I.D Kontrol Simülasyonları	52
6. BULGULAR ve ÖNERİLER.....	60
7. KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ.....	74

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

H_n^{n-1}	Homojen dönüşüm
τ	Her bir eklem için tork değeri
q	Eklem yer değiştirmesi
$\dot{q}$	Eklem ivmesi
θ_n	Robot kolunun eklem açısı
p_x	X ekseninde konum
p_y	Y ekseninde konum
p_z	Z ekseninde konum
K	Ara değişken
$\cos^{-1}(x)$	$\cos(x)$ ters fonksiyonu
$e(t)$	Hata işareti
$r(t)$	Ayar noktası
$y(t)$	Çıktı süreci

Kısaltmalar

ABB	Asea Brown Boveri adlı robot kol firması
DC	Doğru akım (Direct current)
DH	Denavit-Hartenberg
I.D	İntegral ve türevsel kontrol
IRB	Endüstriyel robot B (Industrial robot B)
P	Prizmatik eklem
P.D	Oransal ve türevsel kontrol
P.I	Oransal ve integral kontrol
P.I.D	Oransal, integral ve türevsel kontrol
R	Döner eklem
ROS	Robot işletim sistemi (Robot operating system)
SCARA	Seçici uyumluluk eklemlili robot kolu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Serbestlik dereceleri (Adeagbo1 vd. 2021).....	4
Şekil 1.2 Elektronik kontrol şeması (Aparnathi ve Dwivedi 2014).	5
Şekil 1.3 Kontrol blok diyagramı (İnt.Kyn.1).	6
Şekil 2.1 Seçici uyumluluk montaj robot kolu (Zhen vd. 2023).	9
Şekil 2.2 Her bir robotun katı parçasıyla ilişkili koordinat sistemleri (Chanal vd. 2021).9	
Şekil 2.3 ABB delta paralel robotu (Allison ve Arena 2014).	13
Şekil 2.4 Kartezyen tipi robot kolun çalışma alanı (Chen 2019).	14
Şekil 2.5 Joshi küresel robot (Joshi ve Banavar 2009).....	15
Şekil 2.6 Silindirik robot çalışma alanı (Saygılı 2006).	16
Şekil 4.1 Robot kolun akış diyagramı.	25
Şekil 4.2 Taban şasesinin imalat resmi.	26
Şekil 4.3 Birinci bağlantının imalat resmi.....	27
Şekil 4.4 İkinci bağlantının imalat resmi.	28
Şekil 4.5 Üçüncü bağlantının imalat resmi.	29
Şekil 4.6 Dördüncü bağlantının imalat resmi.....	30
Şekil 4.7 Beşinci bağlantının imalat resmi.....	31
Şekil 4.8 Altıncı bağlantının imalat resmi.....	32
Şekil 4.9 Robotun ölçüleri.....	33
Şekil 4.10 Projenin Matlab/Simulink ortamında genel modeli.	44
Şekil 4.11 SolidWork modelinin Matlab/Simulink'e aktarılması.....	44
Şekil 4.12 Kontrol sistemi şeması.	45

Şekil 4.13 IRB 1200 robot kolu.	45
Şekil 4.14 P.I.D kontrol şeması.	47
Şekil 4.15 Projenin genel kontrol şeması.	47
Şekil 4.16 Kontrol grafiği.....	48
Şekil 5.1 Ters kinematiğin ileri kinematikle karşılaştırılması.....	51
Şekil 5.2 IRB 1200 robot kolun çalışma aralığı.	51
Şekil 5.3 Robot uç efektörün X ekseninde referans konum ve sistemin yanıtı.	52
Şekil 5.4 Robot uç efektörün X ekseninde P.I.D sinyali.	53
Şekil 5.5 Robot uç efektörün Y ekseninde referans konum ve sistemin yanıtı.	53
Şekil 5.6 Robot uç efektörün Z ekseninde referans konum ve sistemin yanıtı.	54
Şekil 5.7 Robot uç efektörün X eksen üzerinde konum hata değerler grafiği.	54
Şekil 5.8 Robot uç efektörün Y eksen üzerinde konum hata değerler grafiği.	55
Şekil 5.9 Robot uç efektörün Z eksen üzerinde konum hata değerler grafiği.	55
Şekil 5.10 Robot uç efektörün X eksen üzerinde konum mutlak hata grafiği.....	56
Şekil 5.11 Robot uç efektörün Y eksen üzerinde konum mutlak hata grafiği.....	56
Şekil 5.12 Robot uç efektörün Z eksen üzerinde konum mutlak hata grafiği.	57
Şekil 5.13 Birinci eklem referans hareketi ve sistemin yanıtı.	58
Şekil 5.14 İkinci eklem referans hareketi ve sistemin yanıtı.....	58
Şekil 5.15 Üçüncü eklem referans hareketi ve sistemin yanıtı.....	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 DH parametreleri.....	33
Çizelge 5.1 Eksenlere göre hata değerleri.	57



RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 Robotik tekerlekli sandalye (Hsu vd. 2011).	12
--	----



1. GİRİŞ

Son yıllarda, teknolojinin hızlı gelişimi robotik uygulamalarını tıp (Soto vd. 2020), havacılık (Licitra vd. 2018), denizcilik (Nash vd. 2021), tarım (Wang vd. 2022) ve hizmet (Holthöwer ve van Doorn 2022) alanlarına girmesinde önemli rol oynamıştır. Endüstriyel robotlar için, yüksek hız ve hassas veri işleme özelliklerini doğrudan endüstriyel robotların üretim kalitesiyle ilgilidir.

Robotik, robotların tasarımı, kurulumu, işletimi, yapısal incelemesi, imalatı ve uygulamasıyla ilgilenen teknoloji dalıdır. Robotik, elektronik, mühendislik, mekanik ve yazılım bilimleriyle ilişkilidir (Groover vd. 2012). Robot kolları birden fazla eklem arasındaki koordinasyonu gerçekleştirir ve çeşitli operasyonel görevlere uyum sağlamaktadır (Deng vd. 2022, Ji vd. 2023), akıllı üretim, sağlık hizmetleri, malzeme taşıma ve montaj gibi çeşitli gerçek dünya uygulamalarında kullanılır (Liu vd. 2023, Li vd. 2024).

Son zamanlarda robotik kollara olan talep, tek görevli yapılandırılmış alan operasyonlarından çok görevli yapılandırılmamış alan operasyonlarına doğru kademeli olarak kaymıştır (Xiong vd. 2020, Pan vd. 2024). Bir robot, belli görevleri yerine getirebilen mekanik ve akıllı bir etkidir. Robot kolları genellikle elektronik donanım ve yazılım komutlarıyla yönlendirilen elektromekanik cihazlardır. Robotlar otonom veya yarı otonom olabilir (Parker 1988, Groover vd. 2012).

Robotlar hayatımızda önemli bir role sahiptirler. Hız ve doğruluk açısından insanın sınırlarını aşan görevleri yerine getirebilirler. Robotlar, insan davranışlarını uygulamak ve daha sonra bu davranışları robotun belirli bir görevi başarmasını sağlayan becerileri uygulamak için kullanılabilirler (Lin vd. 2011). Yorulmak gibi sorunlarla karşılaşmaz ve insanlar tarafından tasarlandıkları için programlanabilmektedir ayrıca bazı özel görevlere uymaları ve onu yerine getirmeleri mümkündür (Niku 2011).

Otomasyon veya otomatik kontrol, sanayi ortamında makineler ve cihazlar gibi ekipmanları çalıştırmak için çeşitli kontrol sistemlerinin kullanılmasıdır. Otomasyonun

en büyük faydası iş gücünden tasarruf sağlamasıdır ancak enerji ve malzemeden tasarruf etmek için de kullanılabilir. Kaliteyi, doğruluğu ve hassasiyeti en üst seviyeye taşımada robot kolları güçlü bir alternatiftir. Otomat kelimesinden esinlenen otomasyon terimi, General Motors'un 1947 yılında otomasyon bölümünü kurmadan önce yaygın olarak kullanılmamaktaydı. O devirde sanayi firmaları, 1930'larda geri beslemeli kontrol cihazlarına hızla önem vermeye başlamıştır. Otomasyon, genellikle bir arada olmak üzere mekanik, hidrolik, pnömatik, elektronik ve bilgisayarlar gibi çeşitli yollarla elde edilmiştir. Modern sanayide, uçaklar ve gemiler gibi karmaşık sistemler ise genellikle bu birleşik tekniklerin hepsini kullanır (Parker 1988). Robotik, günlük görevlerimizi kolaylaştıran pratik ve kullanışlı robotlar modellemektir. Uzun ömürleri ve yorulmaz yapılarıyla robotlar, endüstride tehlikeli görevlerin üstesinden gelmede insanlara destek olur (Nehmzow 2003).

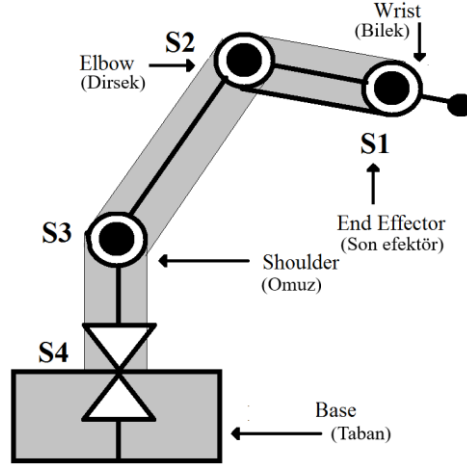
Endüstriyel robotlar üretim süreçlerinde hız, doğruluk ve verimlilik sağlayarak çok sayıda ürünün imalatında kritik bir rol üstlenmektedir (Muir ve Neuman 2007). Son zamanlarda robotlar çoğunlukla çalışanlar için sağlık riski taşıyan ortamlar veya pratik olmayan alanlarda olmak üzere hemen hemen tüm beden işlerinde çalışmaktadır. Bu sayede çalışanlar; robotların programlanması, bakımı ve işletilmesi gibi uzmanlık gerektiren işlere odaklanabilecek daha fazla zamana sahip olmaktadır. (Kramer ve Anderson 2011). Bazı durumlarda bir robot, insanın yerini alır; çünkü insan, uzayda veya su altında çalışmak gibi özel koşullarda görev yapması tehlikelidir. Bu nedenle, bir robot sürecinde etkili bir tasarım elde etmek için yapay zeka ve bilişsel bilim gibi faktörler dikkate alınmalıdır (Nehmzow 2003).

Robotlar, endüstriyel, askeri, uzay araştırmaları ve tıbbi uygulamalar gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Bu robotlar manipülatör robotlar olarak sınıflandırılabilir ayrıca yükleme, boşaltma, sprej boyama, kaynak yapma ve montaj gibi görevleri gerçekleştirmek için otomatik veya yarı otomatik ekipmanın diğer parçalarıyla eşgüdüm sağlar. Genellikle robotlar, belirli bir program veya algoritma kullanan bir bilgisayar veya kontrol cihazı aracılığıyla tasarlanır, inşa edilir ve kontrol edilir. Programlar ve robotlar, program değiştiğinde robotun yanıtının da buna göre değişeceği şekilde

tasarlanır. Bu sayede yüksek görev esnekliğine sahip bir robotun ortaya çıkmasını sağlar. (Anonim 2005).

Robot kol hızı, robot kol ucunun ne kadar hızlı konumlanabilmesidir. Her eksenin ayrı açısal ve doğrusal hızı bulunmaktadır, bileşik hız ise tüm eksenler hareket ettiğinde robot kol ucunun hızı olarak tanımlanabilir. İvme bir eksenin hızının değişmesidir. Bu sınırlayıcı bir faktör olduğundan, bir robot kısa bir mesafe ve sık sık yön değişikliği gerektiren karmaşık bir yol üzerindeki hareket ettiği için maksimum hızına ulaşamayabilir (Parker 1988).

Robot manipülatörü, robotun iş yapmasını sağlayan çeşitli yönlerde hareket edebilen eksenlerle birleştirilmiş bölümlerden oluşur. Robot koluna takılı bir tutucu alet veya özel bir cihaz olan uç efektör gerekli işi yapar. Manipülatör, insan koluna benzer hareket sağlayan mekanik bir ünedir. Birincil işlevi, kolun ucundaki aletin gerekli işi yapmasını sağlayacak belirli hareketi sağlamaktır. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere bir robot hareketi iki genel kategoriye ayrılabilir: kol, vücut (omuz ve dirsek) hareketi ve bilek hareketleri. Bu kategorilerle ilişkili bireysel eklem hareketlerine serbestlik derecesi denir. Her eksen bir serbestlik derecesine eşittir. Tipik olarak endüstriyel robotlar 4–6 serbestlik derecesi ile donatılır. Manipülatörün büküldüğü, kaydardığı veya döndürdüğü noktalara eklemler veya konum eksenleri denir. Manipülatör, bağlantı, dişliler, aktüatörler ve geri bildirim cihazları gibi mekanik cihazlar kullanılarak gerçekleştirilir. Konum eksenleri genel koordinat olarak adlandırılır (Serrezuela vd. 2017).

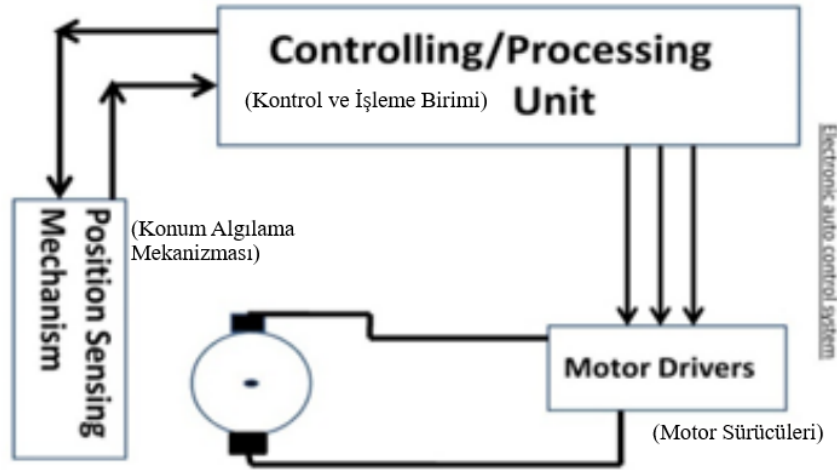


Şekil 1.1 Serbestlik dereceleri (Adeagbol vd. 2021).

X eksen hareket manipülatörü içeri ve dışarı hareket ettirirken Y eksen hareket manipülatörün yandan yana hareket etmesini sağlar. Z eksen hareketi manipülatörün yukarı ve aşağı hareket etmesini sağlamaktadır. Son efektör mekanik olarak açılıp kapanan cihazdır. Alet montaj plakası olarak işlev görür. İşlem türüne bağlı olarak, geleneksel son efektörler aşağıdaki gibi çeşitli cihazlar ve alet ekleriyle donatılmıştır:

Yaygın olarak kullanılan alet ekleri: tutucular, kancalar, elektromıknatıslar, vakum kapları ve malzeme taşıma için yapıştırıcı parmaklar, boyama için püskürtme tabancası, matkaplar, somun sürücüler gibi elektrikli aletler ve montaj cihazları gibi ölçüm aletleridir (Aparnatthi ve Dwivedi 2014). Kontrolör, bir robotun hareketlerini başlatan ve koordine eden bir iletişim cihazıdır. Robota gerekli girdileri kabul eder ve çıkış sürücü sinyallerini, robot hareketleri ve dış dünya ile uyumu için kontrol eden bir motora veya aktüatöre sağlar. Şekil 1.2’de gösterilen blok diyagramı, robot kontrolörünün birçok farklı parçasını göstermektedir. Kontrolörün merkezi bilgisayardır. Bir kontrol sisteminin giriş ve çıkış bölümü, robot kontrolör bilgisayarı ve aşağıdaki parçalar arasında bir iletişim arayüzü sağlamalıdır:

- Geri bildirim sensörleri
- Üretim sensörleri
- Üretim makine araçları
- Program depolama cihazları

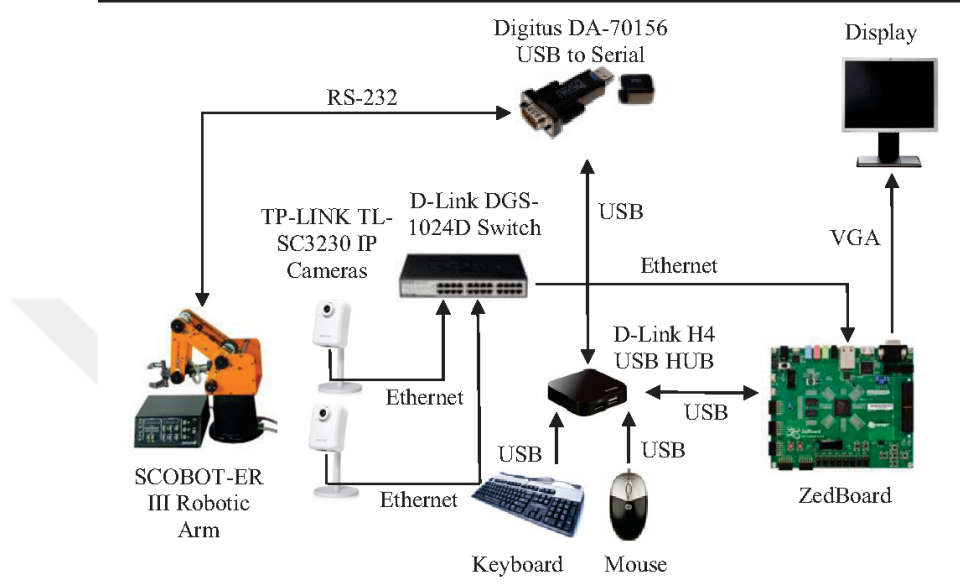


Şekil 1.2 Elektronik kontrol şeması (Aparnathi ve Dwivedi 2014).

Bilgisayar, robot kolun hareketini sürücü arayüzünden robot kolundaki aktüatörlere geçen sürücü sinyalleri aracılığıyla kontrol eder. Robotlar genellikle kullanılan kontrol sistemi türüne göre üç ana kategoriye ayrılır: servo olmayan ve açık devre sistemi, servo ve kapalı devre sistemi, son olarak ise servo ve sürekli kontrollü yol ile kapalı devre sistemleri. Günümüzde endüstriyel alanda kullanılan robotların yaklaşık olarak hepsi kontrol için yardımcı bilgisayarlar veya gömülü mikroişlemcilerdir. Bunlar, gerekli tüm işlevlerini yerine getirmenin yanı sıra ilişkili sensörler, tutucular ve diğer ilişkili yardımcı ekipmanlarla arayüz oluşturur ve bunları kontrol eder. Kontrol sistemi, çevrimiçi algılama, dallanma ve diğer ekipmanların entegrasyonu için gerekli bellek işlevlerini gerçekleştirir. Sorun giderme ve onarım için kendi kendine hata bulma özelliği, robot sisteminin arıza süresini büyük ölçüde azaltır. Bazı robot kontrolörleri; hesaplama özelliği, bellek kapasitesi ve giriş-çıkış verileri açısından sistem kontrolörleri olarak da hizmet etmek ve birçok başka süreci yönetmek için yeterli kapasiteye sahiptir. Robot kontrolörlerinin ve sistemlerinin programlanması robotik endüstrisi tarafından belli bir standarda koyulmamıştır, bu nedenle, üreticiler programlayan kişinin özel eğitimini gerektiren kendi programlama dillerini kullanırlar. Kontrolör, şekil 1.3'te gösterildiği gibi bir robotun hareketlerini başlatan, sonlandıran ve koordine eden bir bilgi işleme aygıtıdır. Robota gerekli girdileri alırken çıkış sürücü sinyallerini, robot hareketleri ve hedef konumlarla uyumlu hale getirmek için bir aktüatöre iletir. Robot

kol ve servo motorların kontrolü için çeşitli kontrolörler mevcuttur. İki ana kontrolör türü vardır (Parker 1988, Serrezuela vd. 2017, Aparnathi ve Dwivedi 2014) :

- Mekanik Kontrolörler
- Elektronik (Dijital) Kontrolörler



Şekil 1.3 Kontrol blok diyagramı (İnt.Kyn.1).

Bu tez çalışmasında robot kol literatür taraması sonucunda 6 eksenli robot kolu tasarımı, kinematik analizi, motor kontrol şema tasarımı yapılması literatürdeki eksiklik dolduracaktır. Bu çalışmada robot tipleri anlatılmış, ileri kinematik ve ters kinematik matematik çözümleri bulunmuş, kontrol sistemi olarak P.I.D denetleyicili kontrol sistemi tasarlanmıştır. SolidWorks yazılımı kullanılarak ABB markalı IRB 1200 modeli 6 eksenli robot kolu tasarlanmış ardından Matlab/Simulink ortamında ileri kinematik ve ters kinematik çözümleri gerçekleştirilmiştir. DC motor şeması tasarlanmış ve en önemlisi P.I.D denetleyicili bir kontrol şeması tasarlanmıştır.

2. ROBOT TİPLERİ

20. yüzyılda robotik, çalışanlara iş sağlığı arttırmak ve yorgunluğunu azaltmak için tekrarlı ve tehlikeli işlere uyum sağlamak amacıyla esnek bir otomasyon aracı olarak büyük bir önem kazanmıştır. Aynı zamanda, robot otomasyonunun kullanımı üretim verimliliğini ve tutarlılığını da artırdı. Robotların ilk uygulaması 1937'de kartezyen robot olarak başladı (Barbosa vd. 2020). O zamandan beri kartezyen robot tarım, otomatik depolama sistemi ve mermer mozaik döşeme otomasyonu gibi otomasyon endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ko vd. 2010, Barnett vd. 2020). Ancak, kartezyen robotun çalışma aralığı ve hassasiyeti diğer robot türlerinden daha zayıftır (Zhang vd. 2024). Araştırmacıların sürekli geliştirmeleri sonucunda ilk silindirik robot 1962'de Amerika Birleşik Devletleri'nde tanıtıldı ve kuruldu (Singh vd. 2013).

Silindirik robotlar normalde kaynak ve kalıp döküm ekipmanlarıyla montaj endüstrilerinde uygulanır (Chaturvedi vd. 2020). Silindirik robot, kartezyen robotla karşılaştırıldığında daha iyi bir doğruluğa sahiptir, ancak hareket aralığı silindirik bir şekille sınırlıdır. Bu nedenle, büyük hareket aralığı için küresel robot ve eklemlili robot tercih edilir (Collins ve Yim 2016). Yapılan geliştirmeler sayesinde küresel robot ve eklemlili robot; askeri alan, tıbbi, malzeme taşıma ve üretim gibi daha yüksek erişilebilirlik gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang vd. 2009, Jain vd. 2019).

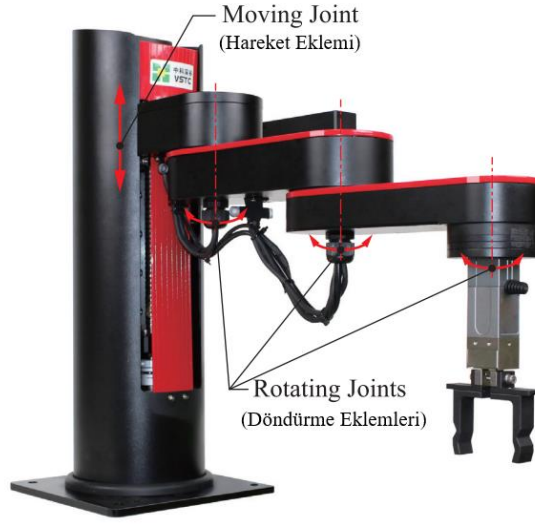
Seçici Uyumluluk Eklemlili Robot Kolu (SCARA) robotu yerçekimi kuvvetine karşı çalışması gereken yalnızca 3 eklemlili olan 1 eklemlili olduğundan aynı anda yüksek hassasiyet, doğruluk ve güç verimliliğine sahiptir. Yüksek doğruluğa ulaşmak için, SCARA robot sisteminin doğrusal olmayan dinamik davranışını yönlendirmek için gelişmiş bir denetleyici gerektirir (Hua vd. 2004, Akdoğan ve Adli 2011). Seçici Uyumluluk Montaj Robot Kolu (SCARA) şekil 2.1'de gösterilmiştir.

2.1 Scara Robot

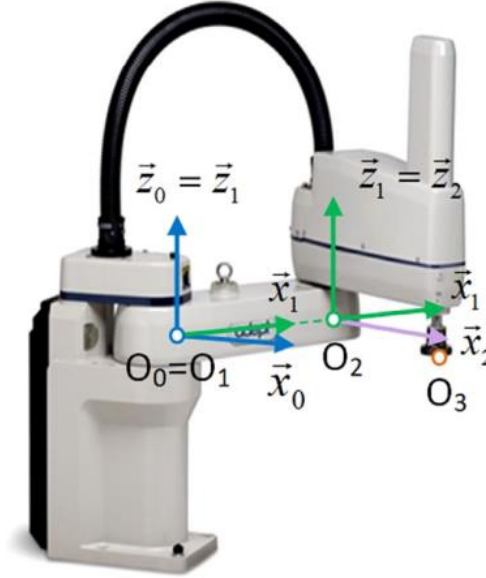
SCARA robotu 1979 yılında Japonya’da Profesör Hiroshi Makino tarafından icat edilmiştir (Barbosa vd. 2020). Seçici Uyumluluk Montaj Robot Kolu (SCARA) robotları endüstri ortamlarında yüksek konumlandırma doğruluğu, hızlı hareket, yüksek güvenilirlik, düşük maliyet ve küçük ayak izi nedeniyle montaj (Chen vd. 2022), sıralama (Su vd. 2022), kaynak (Fateh vd. 2010) ve işleme (Gamaralalage vd. 2018) gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

SCARA robot araştırma ve geliştirme faaliyetleri, yüksek doğruluk ve hızlı çalışma yönlerini geliştirmeyi amaçlamaktadır, bunun nedeni ise bunların her ikisi de SCARA'nın avantajlarıdır (Shariatee vd. 2014). Bu nedenle, SCARA robotunun kurulması tıp endüstrisi ve imalat sektörü gibi birçok sektörde uygulanmıştır (Verma vd. 2020). SCARA robotu için kinematik modelleme, robotun matematiği biçiminde fiziksel tanımını sağlar. Kinematik modelleme, ileri kinematik ve ters kinematik modelleme olmak üzere iki bölüme ayrılabilir. SCARA için ileri kinematik modelleme, eklem açılarını girdi olarak kullanarak uç efektör konumunu elde etmek üzere formüle edilmiştir. Bu nedenle, ileri kinematik modelleme, SCARA robotu için bir konum planlaması üretmek için uygulanabilir. Kinematik modeli tersine çevirerek, istenen uç efektör konumu ters kinematik modellemede kullanılabilir ve bu şekilde istenen eklem açıları elde edilebilir (Serrezuela vd. 2017). Bu nedenle, çalışma zarfını belirlemek ve robot kolunun işlevselliğini optimize etmek için kinematik modelleme esastır (Liu vd. 2014).

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, SCARA robotu doğrudan hareket kontrolünü tamamlayabilen motorun içindeki bir servo sürücü tarafından doğrudan sürülebilir ve dört serbestlik derecesi bulunmaktadır (üç döner eklem ve bir hareketli eklem). İlk serbestlik derecesi kaldırma hareketidir, iki ve üç sıralı serbestlik derecesi sırayla büyük kol eklemi ve küçük kol eklemidir, son serbestlik derecesi ise uç efektörün eklemidir (Zhen vd. 2023). Şekil 2.2’de gösterildiği bir SCARA robotun her sabit parçasına sabitlenmiş bir koordinat sistemi kurulmuştur.



Şekil 2.1 Seçici uyumluluk montaj robot kolu (Zhen vd. 2023).



Şekil 2.2 Her bir robotun katı parçasıyla ilişkili koordinat sistemleri (Chanal vd. 2021).

2.1.1 Scara Robot Kinematiği

Robot kolunun konumu, robotun kinematiğini formüle etmek için homojen dönüşüm matrisini kullanan yaygın olarak kullanılan Denavit-Hartenberg yaklaşımıyla tanımlanır (Liu vd. 2014). Ortak bağlantı homojen dönüşüm matrisi eşitlik 2.1'de gösterilmiştir.

$$H_n^{n-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & r_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & r_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Burada n hedef eklemi, α_n, θ_n, d_n ve r_n Denavit-Hartenberg parametreleridir. α_n , eklem eksenleri Z_n ve Z_{n+1} 'nin düzleme dik bir düzleme dik izdüşümlerinin oluşturduğu açıdır, θ_n , ortak normal X_n ve X_{n+1} 'nin eklem eksenleri Z' 'ye dik bir düzleme dik izdüşümlerinin oluşturduğu açıdır, d_n , X_n ile X_{n+1} arasındaki mesafedir ve Z_n ile r_n , eksenlere ait ortak düzlemler arasındaki mesafedir. Denavit-Hartenberg parametresi robotik kolun eklem bağlantı parametresinden elde edilebilir. Eşitlik 2.2'de gösterildiği gibi, her eklem için homojen dönüşüm matrisinin çarpılması robotik kol için son konumu ve dönüş açısını elde edecektir.

$$H_n^0 = H_1^0 H_2^1 H_3^2 \dots H_n^{n-1} \quad (2.2)$$

2.1.2 Scara Robot Dinamiği

Dinamik modellemenin amacı, robot sisteminin farklı yük koşullarındaki kuvvet ve tork davranışını tahmin etmektir (Das ve Dülger 2005). Dinamik modellemeden bir robotun gerekli torku, eklem hızı, eklem ivmesi ve eklem konumu hesaplanabilir ayrıca uygun bir aktüatör ve iletim sistemi seçmek için referans olarak kullanılabilir (Shariatee vd. 2014, He vd. 2019). Kontrol sistemleri tasarlamak için, SCARA robot kolunun dinamik davranışının matematiksel dinamik modelini uygulamak mümkündür. Daha sonra, gerekli performansla uyumlu en iyi kontrolör seçilebilir. NewtonEuler denklemi ve Lagrangian denklemi, tipik olarak SCARA robotunun dinamik modellemesi için iki

metodoloji olarak kullanılır. Lagrange denkleminin genel denklemi ve Newton-Euler denklemleri sırayla eşitlik 2.3 ve 2.4'te gösterilmiştir.

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial U}{\partial q} \quad (2.3)$$

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (2.4)$$

Burada τ her bir eklem için tork, q eklem yer değiştirmesi, $\dot{q}$ eklem hızı, $\ddot{q}$ eklem ivmesi, T kinematik enerji ve U potansiyel enerjidir. Her iki yöntem de SCARA robotunun dinamik davranışını hesaplamak için geçerlidir.

2.1.3 Scara Robot Yörünge Planlaması

Yörünge planlama; robot kolunun istenen yolu, hızı ve ivmesini hesaplayarak bir robot hareketi tasarlamak için kullanılan yöntemlerden biridir (Horne vd. 1990). Yörünge planlamasından hesaplanan bilgiler, daha sonra kontrolör tarafından yol hareketinin gerçekleştirilmesinde kullanılabilen bir zaman dizisi biçiminde istenen torku elde etmek için dinamik modele aktarılır (Chen vd. 2012). Yörünge planlamasını elde etmek için eklem alan yöntemi ve kartezyen uzay yöntemi kullanılabilir (Yılmaz ve Demir 2024). Eklem alan yöntemi, üçüncü dereceden polinomun genel formülü eşitlik 2.5'te gösterildiği gibi robot kolunun istenen yolu, hızı ve ivmesini hesaplamak için üçüncü dereceden polinom uygular.

$$\theta(t) = C_0 + C_1t + C_2t^2 + C_3t^3 + \dots + C_it^n \quad (2.5)$$

θ robot kol eklem açısı, C_i ($i = 0$ ile arası 3) bilinmeyen sabitler, t ise zaman olmak üzere.

2.2 Paralel Robot

Paralel robotların kökeni, 1965 yılında D. Stewart tarafından geliştirilen uçuş simülatörü ve 1956 yılında V. Eric Gough tarafından geliştirilen otomobil lastiği testleri için geliştirilen mekanizmaya dayanır (Zhang ve Yang 2020). Kapalı devre robotları, 90'lı yıllardan beri sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır (Rachedi vd. 2015). 1994 yılında, paralel kinematik yapıya sahip ilk takım tezgahları Chicago'daki uluslararası üretim teknolojisi fuarında tanıtıldı (Weck ve Staimer 2002). Bugün gelinen noktada paralel robotlar havacılık, otomotiv ve tıp gibi alanları kapsayan çok çeşitli uygulamalara sahiptir (Singh vd. 2021). Gough-Stewart platformuna ek olarak, Delta (Vischer ve Clavel 1998) ve Star (Staicu 2009) gibi paralel doğrusal robotlar, Agile Eye (Gosselin 1996) gibi rotasyonel paralel robotlar da vardır. Paralel robotların en büyük dezavantajı ise çalışma alanlarında riskleri olmasıdır (İder 2005).

2.2.1 Paralel Robot Örnekleri

Medikal sektörde paralel robot örneklerinden biri paralel robotlarla tasarlanan tekerlekli sandalye resim 2.1'de gösterilmiştir, ABB firmasının ürettiği ve çeşitli alanlarda kullanılan delta paralel robotu şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Resim 2.1 Robotik tekerlekli sandalye (Hsu vd. 2011).



Şekil 2.3 ABB delta paralel robotu (Allison ve Arena 2014).

2.2.2 Paralel Robot Kullanım Alanlarına Göre İsimleri

Paralel mekanizmalara kullanıldıkları alana göre farklı isimler verilir. Bunlardan bazıları paralel robotlar, paralel manipülatörler ve paralel kinematik makinelerdir (Zhang vd. 2025). Yörünge planlama özellikle paralel robotikte temel problemlerden biridir. Paralel robotlar için yörüngeler planlanırken, döngü kapatma kısıtlamalarına uyarak görevi minimum sürede ve minimum enerji harcamasıyla gerçekleştirmek önemlidir (Chen ve Liao 2011).

2.2.3 Paralel Robot Kinematiği

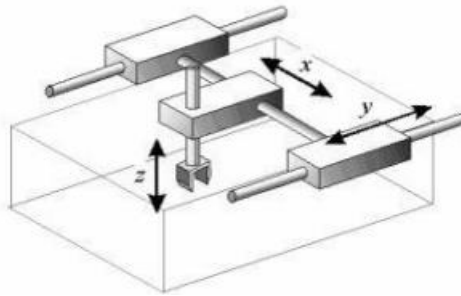
Paralel mekanizmalar hareketli bir platformun en az iki seri kinematik zincirle sabit tabana bağlandığı kapalı devre mekanizmalarıdır. Paralel kinematik tasarımlarının geleneksel seri manipülatörlere göre potansiyel avantajlarından bazıları dayanıklılık ve büyük yük taşıma kapasitesidir (Merlet 2006).

2.3 Kartezyen Robot

Kartezyen koordinat robotu, üç ana kontrol eksenini doğrusal olan ve birbirlerine dik açılarda bulunan endüstriyel bir robottur (Zhang ve Wei 2017). Üç kayan eklemler, yukarı aşağı, içeri dışarı, ileri geri hareket etmektedir. Bu robotun avantajlarından biri, kontrol çözümü basittir. Bir robot koordinat sistemi olarak, yatay hareket ve kutuları yerleştirmek için de etkilidir (Poole 1989).

2.3.1 Kartezyen Robot Kinematığı

Robotlar, doğrusal (prizmatik P), döner (rotasyon R) veya bu ikisinin birleşimi olan eklemlerle birbirine takılı katı bağlantılarından oluşan mekanizmalara sahiptir (Groover vd. 2012). Aktif prizmatik P ve aktif döner R eklemleri, nesneleri yerleştirmek gibi karmaşık görevleri otomatik olarak gerçekleştirmek üzere programlanabilir denetleyiciler kontrolün altındaki motorlar tarafından çalıştırılır. Aktif prizmatik P eklemlerinin doğrusal hareketi, dişliler aracılığıyla döner motorlar tarafından çalıştırılması mümkündür. Kartezyen koordinat robotları ise bir kartezyen koordinat sisteminin X, Y, Z eksenleriyle hizalanmış, karşılıklı olarak dik aktif prizmatik P eklemleri tarafından yönlendirilir (Descartes 2003, 2009). Kartezyen koordinat robotları genellikle doğrusal aktif prizmatik P eklemleri yoluyla hareket ettiği için T serbestlik derecesiyle hareket ederler. Ancak, bazı kartezyen koordinat robotlarının ayrıca dönme R serbestlik derecesi vardır (Wiktor 2021). Kartezyen robotun çalışma alanı şekil 2.4'te gösterilmiştir.



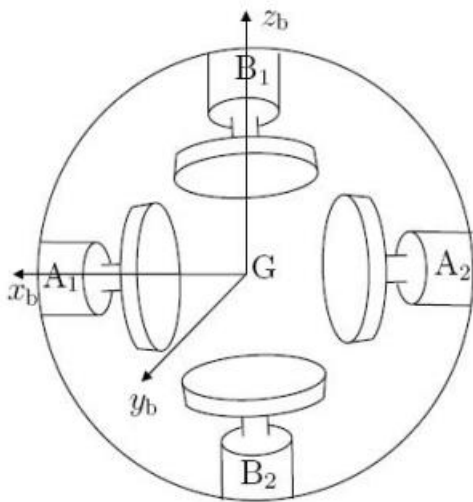
Şekil 2.4 Kartezyen tipi robot kolun çalışma alanı (Chen 2019).

2.4 Küresel Robot

Küresel robotlar tüm bileşenlerin dış kabuk görevi gören bir küre içine yerleştirildiği ve küre yüzeyinin yerde yuvarlanmasıyla hareketin gerçekleştirildiği robotlardır (Kayacan 2010). Küresel robot küresel dış şekle sahip bir mobil robottur (Halme vd. 1996). Küresel robot genellikle robotun gövdesi olarak çalışan küresel bir kabuktan ve robotun hareket etmesini sağlayan dahili bir üniteden yapılır (Mukharjee vd. 2002). Küresel mobil robotlar genellikle yüzeyler üzerinde yuvarlanarak hareket eder. Yuvarlanma hareketi genellikle robotun kütle merkezini değiştirerek gerçekleştirilir (Alizadeh ve Mahjoob 2009, Joshi vd. 2010).

Küresel kabuk genellikle katı şeffaf malzemeden yapılır ancak özel uygulamalar için opak malzemeden yapılabilir (Ylikorpi vd. 2017). Küresel kabuğu başka yapılarla dönüşebilen ve yuvarlanmanın yanı sıra başka görevler de gerçekleştirebilen yeniden yapılandırılabilir küresel robotlar mevcuttur (Shi vd. 2013).

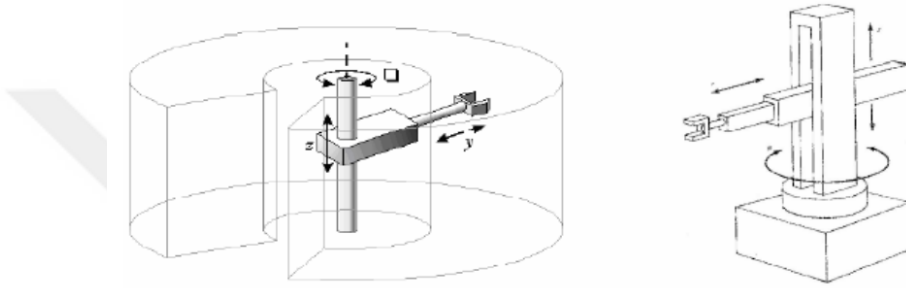
Neredeyse tüm küresel robotlarda küresel kabuğun hareketliliği ve kapalı yapısı nedeniyle dahili ünitesi ile harici kontrol ünitesi arasındaki iletişim kablosuzdur (Michaud vd. 2005). Joshi Küresel robot tasarımı şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Joshi küresel robot (Joshi ve Banavar 2009).

2.5 Silindirik Robot

Silindirik manipölatör bir RPP yapısına sahiptir. Eksenlerinin biçimi silindirik bir koordinat sistemidir (Alagon vd. 2023). Silindirik robotların pozisyonu bir yükseklik, bir açı ve bir yarıçap ile kontrol edilir. İki prizmatik eklem ve bir döner eklemleri vardır. Bu robotlar genellikle montaj görevleri için kullanılır (Alagon vd. 2024). Silindirik robot çalışma alanı şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Silindirik robot çalışma alanı (Saygılı 2006).

3. LİTERATÜR

Cihangir (2024), iki ayrı 4 eksenli robot kol tasarımı yapmıştır, bu robot kollarından birisi destek mekanizmalıyken diğeri geleneksel robot kolu olarak tasarlamıştır, her iki robot kolu için kinematik çözümü sağlanmıştır ve yörünge çizilmiştir, yörünge için zamana bağlı gerekli tork değerleri bulmuştur. Destek mekanizmalı robot kolun enerji tasarrufu konusunda ileri adım atmıştır. Optimize edilmiş destek mekanizmalı robot kolu imalat edilmiştir oldukça düşük hata değerleriyle yörüngeleri takip etmiştir (Cihangir 2024).

Mahboubbeh (2022), 4 eksenli robot kolu tasarlamıştır kontrol için uygun birden fazla kontrol yöntemi arasında karşılaştırma yapmıştır, Matlab/Simulink ortamında P.I.D, SMC, FPID ve FLC yöntemleri arasında karşılaştırma yapmıştır. SMC kontrol yöntemiyle oldukça yüksek sonuçlar elde edildiği göstermiştir (Mahboubbeh 2022).

Onart (2024), medikal sektörde 3 boyutlu basımın kullanım alanını tartışmıştır robot kolu yardımıyla yapay uzuvların basımı mümkün olduğu göstermiştir. KUKA markalı 6 serbestlik dereceli robot kolun bağlantıları bilgisayar ortamında SolidWorks yazılımı yardımıyla katı modeli tasarlanmıştır. Basılması planlanan yapay uzuv yerleştirileceği uç efektör katı modeli tasarlanmıştır ve 3 boyutlu yazıcıda basılmıştır ardından basacak robot kola entegre edilmiştir ve üzerine şırınga entegre edilmiştir. Uzuv basmak için basınç gerekir onun için 8 bar değerinde kompresör kullanılmıştır. Uzuv basım işlemlerine başlamak üzere sprutCAM programına uzuvların katı modelleri aktarılmıştır ve başarıyla yapay uzuvlar basılmıştır (Onart 2024).

Ramdoun (2024), 3 serbestlik dereceli robotun kinematik ve dinamik çözümleri bulmuştur ardından Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak 3 serbestlik dereceli robot kolu tasarımı gerçekleştirmiştir. DC motor tasarlanmıştır ve son olarak robot kolu P.I.D denetleyicili kontrol sistemi tasarlanmıştır aynı zamanda bulanık mantık kontrol sistemi tasarlanmıştır, sistemin girişi olarak konum bilgisi ve hız bilgisi seçilmiştir bu şekilde hem konum hem hız kontrolü sağlanmıştır (Ramdoun 2024).

Turgut Aksoy (2024), robot kol ters kinematik çözümleri sırasında sürü zekâlı yöntemlerinin yapay sinir ağlarıyla birlikte kullanımını tartışmıştır, oldukça iyi sonuçlara varmıştır (Turgut Aksoy 2024).

Türe (2023), 3 eksenli bir robot kolunda pnömatik sistemlerin kullanımı tartışmıştır bu pnömatik sistemlerle robot koluna uygun yapay kaslar üretmiştir. 3 eksenli robot kolun katı modeli SolidWorks yazılımıyla tasarımı gerçekleştirilmiştir sonra Matlab/Simulink ortamında ters kinematik hesaplamaları ve yapay sinir ağları yöntemiyle robot kol konum kontrolü sağlanmıştır (Türe 2023).

Müftü (2023), 2 eksenli bir robot kol P.I.D ile kontrolü sağlamıştır. Robot kinematik çözümü Arduino Matlab Destek Paketi yoluyla sağlanmıştır. DC motor için transfer fonksiyonu bulunmuştur. Kontrol sistemi süsü zekâlı yöntemleri olan, Kaos oyun optimizasyon (CGO) algoritması, yapay arı koloni (YAKA) algortması ve Parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması ile kontrol sistemi desteklenmiştir ve sonuçlar karşılaştırılmıştır Kaos oyun optimizasyon algoritmasıyla elde edilen sonuçların referans konuma daha yakın olduğu tespit edilmiştir (Müftü 2023).

Uçar (2022), renkli bir bant boyunca yürüyen objeleri tespit eden bir robot manipülatör sistemi tasarlamıştır. Derin öğrenme algoritması olan YOLO algoritması ile tespit edildikten sonra robot manipulatörü tarafından kavranır, objelerin konum bilgisi alındıktan sonra robot kolu objelere doğru hareket etmesi için konum kontrolü sağlanması için yapay sinir ağları kullanılmıştır, sonuç doğruluk oranı %91.75 olarak sunulmuştur (Uçar 2022).

Hosseini ve Hahn (2024), elektrik tasarrufu için enerji açısından verimli bir yörünge planlama yaklaşımı önermişlerdir. Bu çalışmada PMSM tip motoru kullanılmıştır, elektrik sargı direnç kayıpları ve atalet kuvvetleri dahil olmak üzere mekanik kayıplar, sürtünme ve yerçekim gibi çeşitli faktörler göz önünde bulundurularak, robot kolun her bir eklemi için gerçek zamanlı tork verileri 8 saniyelik bir süre boyunca toplanmıştır. Manipülatörün güç kayıp maliyet fonksiyonu (PLCF) türetilmiştir ve belirtilen elektromekanik faktörleri içerecek şekilde ayarlanmıştır. Beşinci dereceden polinom

interpolasyon yöntemi ile kartezyen uzayda dairesel bir hareket kullanılarak üretilen iki yörünge senaryosu, açısal hızlardaki ve ivmelerdeki değişikliklerin PLCF üzerindeki etkilerini gözlemlemek için analiz edilmiştir. Bulgular simülasyon ve ölçüm yoluyla sunulur ve enerji tüketiminde önemli bir azalmayla sonuçlandığı gösterilmiştir (Hosseini ve Hahn 2024).

Khairuddin vd. (2024), yeni bir ileri kinematik yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu çalışmada kinematik modeller oluşturmak amacıyla kullanılan DH tablosu, OpenMANIPULATOR-X robot kolu için DH parametrelerinin belirlenmesi ve dönüşüm matrisinin hesaplanmasını içermektedir, ayrıca parçacık sürüsü optimizasyon (PSO) algoritmasının yapay arı kolonisi (ABC) ve guguk kuşu arama (CS) algoritmalarıyla kıyasla en düşük hataya sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Khairuddin vd. 2024).

Bavesh Ram vd. (2023), duyuşal sistem aracılığıyla kontrol edilebilen bir duyuşal sistem ve robot kolu için yeni tasarım sunmuşlardır. Bu çalışmada bireylerin kol hareketlerini analiz etmek için takabilecekleri düşük ağırlıklı bir duyuşal bant tasarlanmıştır, duyuşal bant robotik kola bağlandı ve tekrarlanabilirlik sağlanmıştır. Robot kolu, kullanıcının hareketlerini etkili bir şekilde tekrar etmiştir ve eklem için ortalama hata %2 olarak hesaplanmıştır. (Bavesh Ram vd. 2023).

Dong vd. (2023), çift kollu bir robot tarafından araba sürüşü için bimanuel direksiyon döndürme yöntemi önermişlerdir. Bu çalışmada bimanuel manipölasyonu sağlanmıştır. Dönüş manipölasyonu, fiziksel sınırlar, çarpışmayı önleme ve kapalı zincir yapılandırması için hareket koordinasyonu gibi çoklu gereksinimleri ele almak için QP tabanlı bir bimanuel manipölasyon denetleyicisi kullanılmıştır. Kullanılabilirliği gerçek bir araç üzerinde yapılan deneylerle doğrulanmıştır. Göreceli konum hatalarından kaynaklanan deneysel büyük kuvvet nedeniyle, bir uyarlama şeması önerilmiştir. Bu şemanın iç kuvveti önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir (Dong vd. 2023).

Wang vd. (2023), çift kollu robotlar için optimizasyon tabanlı koordineli hareket planlama yöntemi önermişlerdir. Sınırlı ortamlarda çarpışma önleme ve çeşitli görevler için uygun koordineli manipölasyonları modelleyerek birleşik bir çerçeve

oluşturulmuştur. Kapı açma ve kutu taşıma simülasyonları çift 7 serbestlik dereceli manipülatörlerle yürütülmüştür. Bu çerçevede farklı senaryolarda iyi çalışabileceğini ve önerilen PC-DDP çözücüsünün diğer DDP varyantlarından ve büyük ölçekli seyrek optimizasyon çözücülerinden daha verimli olduğu gösterilmiştir (Wang vd. 2023).

Ju vd. (2023), mobil bir insansı üst gövde robotu tasarlamışlardır ardından robotun hareketi için yeni kinematik yaklaşımı önermişlerdir. Bu çalışmada mobil robotun ve çift kollu manipülatörün kinematiği birleştirilmiştir. Bel eklemlerinin ve mobil platformun hareketi bir bozulma olarak kabul edildikten sonra manipülatörün ters kinematik çözümüne eklenmiştir ve çift kol koordinasyonu için bağlantı eklemleriyle insansı robotun ayrıştırma tüm vücut kontrolü gerçekleştirilmiştir (Ju vd. 2023).

Widayaka vd. (2023), 2 serbestlik dereceli bir kol manipülatör robot üzerinde bir deney gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada deney ters kinematik denklemi robotu hareket ettirmek için uygulanmıştır, X ve Y ekseninde girdi koordinatları sağlayarak gerçekleştirilmiştir. X ve Y ekseninde koordinat giriş değerleri verilerek 5 deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonuçları, ters kinematik denklemlerin simülasyon aşamasında iyi çalıştığını ve böylece 2 serbestlik dereceli kol manipülatör robot sisteminde gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir (Widayaka vd. 2023).

Liu vd. (2023), DARO adlı insan benzeri çift kollu bir robot kolu tasarlamışlardır. Yapılan çalışmada DARO-N adlı bir versiyonu geliştirilmiştir. DARO üzerinde çeşitli performans doğrulama deneyleri yürütülmüştür (Liu vd. 2023).

Velagić vd. (2023), elle itme ve tahriksiz tekerlekler kullanarak düzgün hareket sağlayan mobil robot hareket sisteminin tasarlamışlardır. Bu çalışmada servo motorların kontrolü ve ultrasonik sensörlerle senkronizasyonları gösterilmiştir. Dört devir süresince iki servo motorun dönüş dizisi, robotun bir adımını gerçekleştirerek ve bu diziler bir ara dönüşle birlikte tekrarlayarak, sürünmeye benzeyen ileri bir adımın simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Donanım gerçekleştirimi ile yazılımın uyarlanması arasındaki bağlantı kurulmuştur (Velagić vd. 2023).

Chi vd. (2024), nesne tespiti için derin öğrenme algoritmasına dayalı bir tanıma ve yakalama yöntemi tasarlanmışlardır. Bu çalışmada çift kollu kooperatif tekerlekli mobil robot kullanılmıştır, YOLOv8'in nesne tespit algoritması 4 tür hedef nesne tanımlamak için kullanılmıştır ve robotun uç esnek tutucu kullanılmıştır. Robot el-göz kalibrasyonu görüş inceleme sistemi aracılığıyla, kamera hedef nesneyi tespit etmek ve konumlandırmak için kullanılmıştır ve hedef tespitin ilgili algoritmaları robot kolunun hedef nesneyi başarıyla tutmasını sağlamak için birleştirilmiştir. Hedef nesnenin tanıma doğruluğunun %85'in üzerinde olduğu ve yakalama başarı oranının da %80'in üzerinde olduğu görülmüştür (Chi vd. 2024).

Niu ve Zhang (2024), insan kol hareketi verilerini toplayıp analiz ederek belirli bir pozisyonda bir kolun antropomorfik hareketin problemini çözmek için bir kol hareketi karakteristik kriteri oluşturmuşlardır. Bu çalışmada omuz ve bilek eklemlerinin aralarında sanal burulma yayları olduğu ve hareket sırasında farklı bilek pozisyonlarının farklı sanal burulma yayı sertliklerine karşılık geleceğini dikkate alarak, kol sertliği gösterimi, çoklu regresyonla belirlenmiştir ve buna göre robot kol sertliğine eşlenmiştir (Niu ve Zhang 2024).

Sutyasadi vd. (2023), bir robot kolu prototipi tasarlanıp imal etmişlerdir. Mekanik kısmı 3 boyutlu yazıcı kullanılarak PLA malzemeden yapılmıştır bağlantı ise PVC borudan yapılmıştır. Ayrıca P.I.D kontrolü sağlanmıştır. Hareketteki kazanç telafisi nedeniyle aşağı harekette yaklaşık %7,8'lik bir aşma bulunmuştur ve 2 ile 3 arasında sabit durum hatası bulunmuştur (Sutyasadi vd. 2023).

He vd. (2023), insan-robot etkileşimli çift kollu bir robot sistem için yeni bir tasarım geliştirmişlerdir. Bu çalışmada sistem, saf teleoperasyon ve otonom çalışma yöntemlerine alternatif olarak İnsan-döngüde işletim sistemini benimsenmemiştir. Önerilen robotun uygulanabilirliğini doğrulamak için laboratuvarında fiziksel bir robot sistemi ve simüle edilmiş bir canlı hat bakım platformu oluşturulmuştur, sonuçlardan gösterilen hedef yörünge ve sistemin yanıtı olan yörünge yüksek derecede benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir (He vd. 2023).

Wang vd. (2023), robot kontrolü için sensör füzyonunun etkinliğini kanıtlamıştır ve tek modlu sinyal girişinin getirdiği kısıtlamaları dile getirmişlerdir. Bu çalışmada yalnızca antropomorfik çift kollu robotların teleoperasyon kontrolünü sağlanmasının ardından kontrol sürecinin uyarlanabilirliğini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Operatörler ayarlama kolaylığına sahip olduğunu ve robot bu görevleri gerçek zamanlı olarak hızlı bir şekilde tekrarlanabilirliğini göstermiştir (Wang vd. 2023).

Tian vd. (2023), üretim hattında algılama ve ayırma istasyonunun çalışma ortamını analiz etmişlerdir ve buna göre atık giderme robotunun robotik kolunun daha az serbestlik derecesine ve hafif yüke sahip olması için teknik gereksinimleri bulmuşlardır ve robotu gereksinimlere göre tasarlamışlardır. Bu çalışmada homojen koordinat sisteminin yapısını basitleştirerek ileri kinematik analizini daha basit hale getirilmiştir. Aynı zamanda, ters kinematiğin analizinde, yapısal özelliklere göre geometrik yöntem ve analitik yöntemin birleşimini kullanılmıştır. Eklem 1 için, çözüm yöntemini basitleştirebilen geometrik izdüşüm yöntemi çözmek için kullanılmıştır. Eklem 2 ve 3 için, ileri kinematik sonuçlarına göre çözmek için analitik yöntem kullanılmıştır. Monte Carlo analiz yöntemi ve Matlab yazılımı kullanılarak robotun dijital bir modelini oluşturulmuştur ve robot kolun çalışma alanının simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimize edilen sistem ile robot kolun çalışma alanının atıkları gidermek için gereksinimlerini karşılayabileceğini gösterilmiştir (Tian vd. 2023).

Yuan vd. (2024), Matlab simülasyonu ile çift kollu robotlar tarafından koordineli nesne işleme için robot kinematiğine dayalı bir kuvvet kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Bu çalışmada integral adaptasyon parametrelerinin dinamiklerle bütünleştirilerek, çift kollu robot nesnelerle etkileşime girdiğinde istenen temas kuvvetini sorunsuz bir şekilde elde edebildiğini göstermiştir. Robotun ters kinematiğini çözmek için Jacobian matrisi yöntemini kullanarak, belirli yol gereksinimleri olmadan pratik bir yörünge çözümü verimli bir şekilde elde edilmiştir (Yuan vd. 2024).

Ju ve Yu (2023), yönlü tanjant matrisini (DTM) kullanarak biyonomik robot kolları için yenilikçi bir ters kinematik yaklaşımı tasarlamışlardır. Bu çalışmada sabit eksenli dönüşün yeniden tanımlanmasının ardından DTM klasik yönlü kosinüs matrisine

(DCM) bir alternatif olarak önerilmiştir. DTM genel robot kollarına uygun kinematik denklemler oluşturmak için kullanılmıştır ve bu denklemler dört bilinmeyenli ikinci dereceden bir polinom haline getirilmiştir. Paralel eklem eksenleri 3, 4 ve 5'i içeren nominal denklemi ele alarak polinom devam yöntemi aracılığıyla gerçek zamanlı fiziksel çözümler türetilmiştir. Bu ters kinematik yaklaşımı biyonomik robot kollarının geliştirilmesinde uygulanmış ve gelişmiş robotik uygulamalar için potansiyeli gösterilmiştir (Ju ve Yu 2023).

Xia vd. (2024), endüstriyel bir robot manipülatörünün koordinat kontrolüne odaklanmışlardır. Bu çalışmada bükülme deformasyonu azaltılarak tespit koordinatlarının doğruluğunu etkili bir şekilde iyileştirilmiştir. Gerilim dağılımı önemli ölçüde optimize ettiği ve sistemin genel deformasyonunu azalttığı gösterilmiştir (Xia vd. 2024).

Tago vd. (2024), tehlikeli görevler için uzatılabilir kollara sahip yeni bir yumuşak tırmanma robotu tasarlamışlardır. Bu çalışmada robot esnek yapısı ve kollarının hareketini uzatarak elde edilen büyük hareket mesafesi elde edilmiştir. Robotun esnek olması bir tırmanma gösterisi kullanılarak test edilmiştir ayrıca yatay ve çapraz hareket yoluyla üç boyutlu hareketler test edilmiştir (Tago vd. 2024).

Su vd. (2024), kaya delme robotun matematiksel modeli tasarlamışlardır ve manipülatörün duruşunun dinamikler üzerindeki etkisi göz önünde bulundurularak analiz etmişlerdir ardından bir yönlendirme kontrol stratejisi bulmuşlardır. Bu çalışmada simülasyon modelinin etkinliği, simülasyon deneyleri ve teorik karşılaştırma ile test edilmiştir, kontrol stratejisiyle oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir (Su vd. 2024).

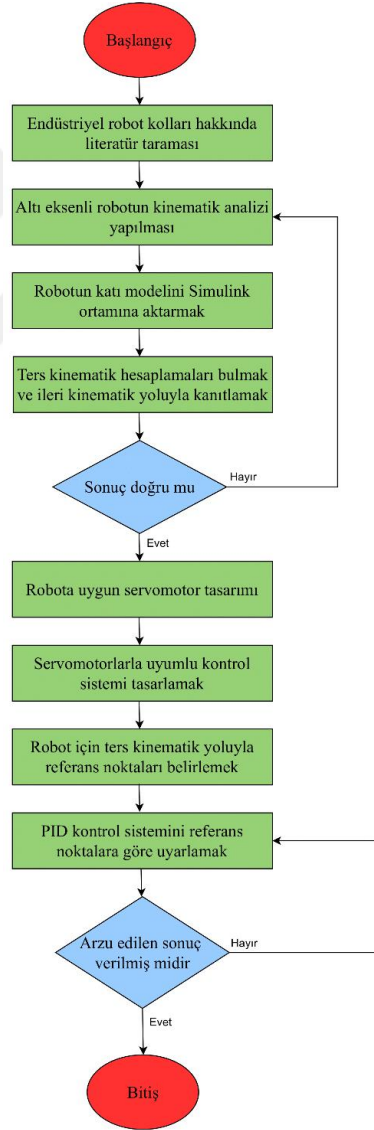
Cui vd. (2024), ROS tabanlı çift kollu bir robot Rubik küpü çözme sistemi tasarlamışlardır ve imal etmişlerdir. Bu çalışmada tasarlanan sisteme görme algılama düğümü, küp çözme düğümü ve hareket planlama düğümü eklenmiştir. Görme algılama düğümü, küpün renk dizisini tanımak için HSV renk modunu kullanılır. Küp çözme düğümü, Kociemba algoritmasını kullanarak küpü geri yükleyebilen eylem dizisini hesaplamak için kullanılır. Hareket planlama düğümü, RRT-Connect algoritmasına

dayalı olarak küpün kenarının dönüşünü gerçekleştirmek için 18 eylem tasarlamak için kullanılır. Robot test edilmiştir ve yapılan deneylerde başarı oranının %86 olarak elde edilmiştir (Cui vd. 2024).

Literatür taraması sonucunda robot kolları için bazı eksiklikler doldurulduğu görülmüştür ancak altı eksenli robot kolları için kinematik analiz, ileri-ters kinematik matematiği ve robot kollarında P.I.D kontrolü bölümlerinde eksiklikler gözlemlenmiştir. Bu çalışmada altı eksenli robot kolu IRB 1200 için gerekli kinematik analizi yapılmıştır ardından ileri-ters kinematik matematiği detaylı bir şekilde anlatılmış ve her mafsalda takılı DC motoru için kontrol sağlanması için P.I.D denetleyicili kontrol sistemi eklenmiştir.

4. MATERYAL ve METOT

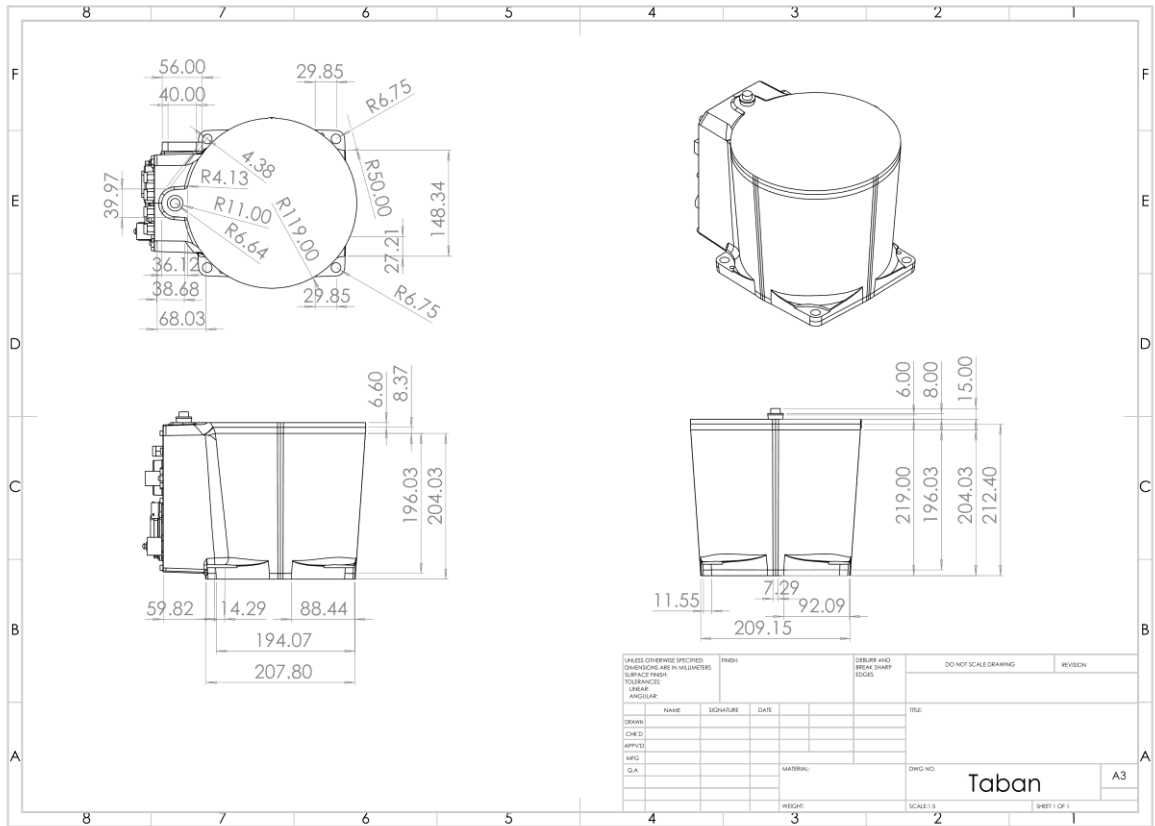
Modellemenin çalışma stratejisi ve sistemin kontrolü Şekil 4.1'de özetlenmiştir. Bu çalışmada altı eksenli robot kolu tasarlandıktan sonra Matlab/Simulink ortamına aktarılmıştır ardından ters kinematik ve ileri kinematik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Robotun gideceği yol çizildikten sonra ters kinematik üzerinden gerekli eklem açıları belirlenmiştir ve her bir ekleme servomotor eklenmiştir. Servomotorlara uygun P.I.D kontrol sistemi tasarlanmıştır. Son olarak ileri kinematik ile ters kinematik hesaplama sonuçları ve kontrol sistem sonuçları incelenmiştir.



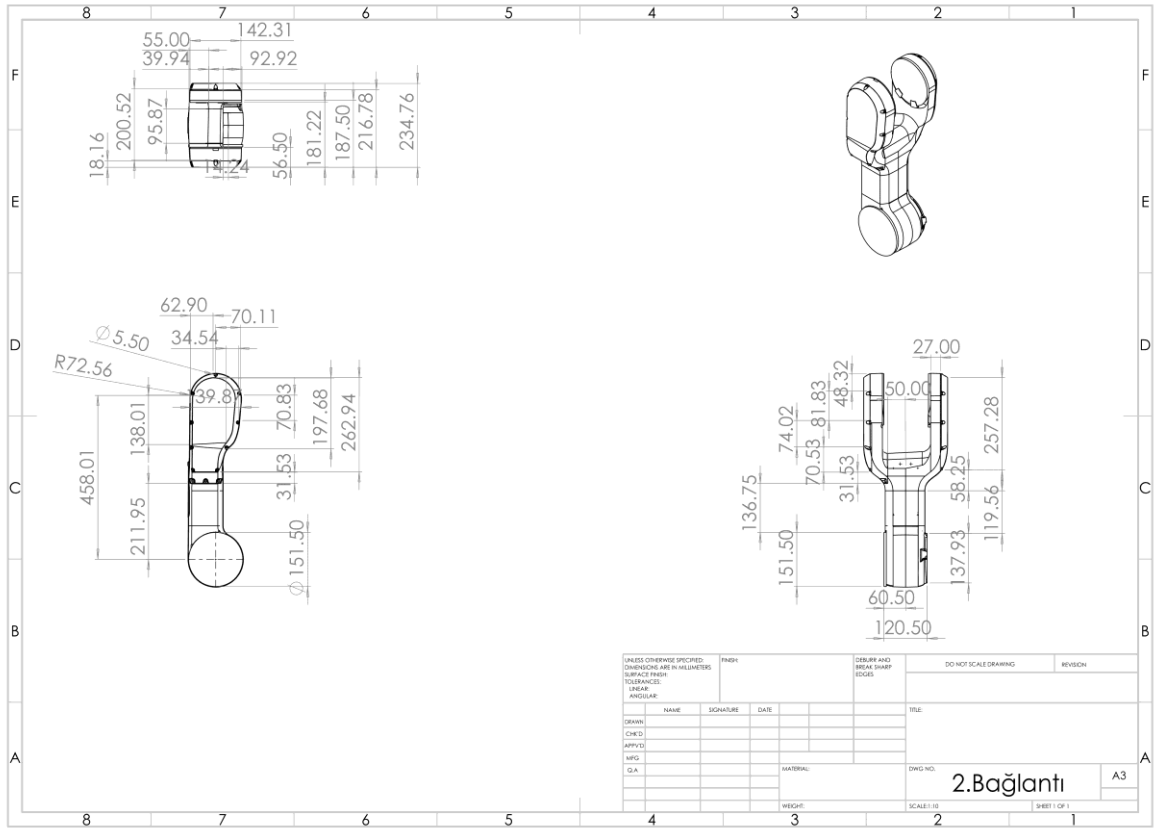
Şekil 4.1 Robot kolun akış diyagramı.

4.1 Altı Serbestlik Dereceli ABB IRB 1200 Robot Kolunun Mekanik Tasarımı

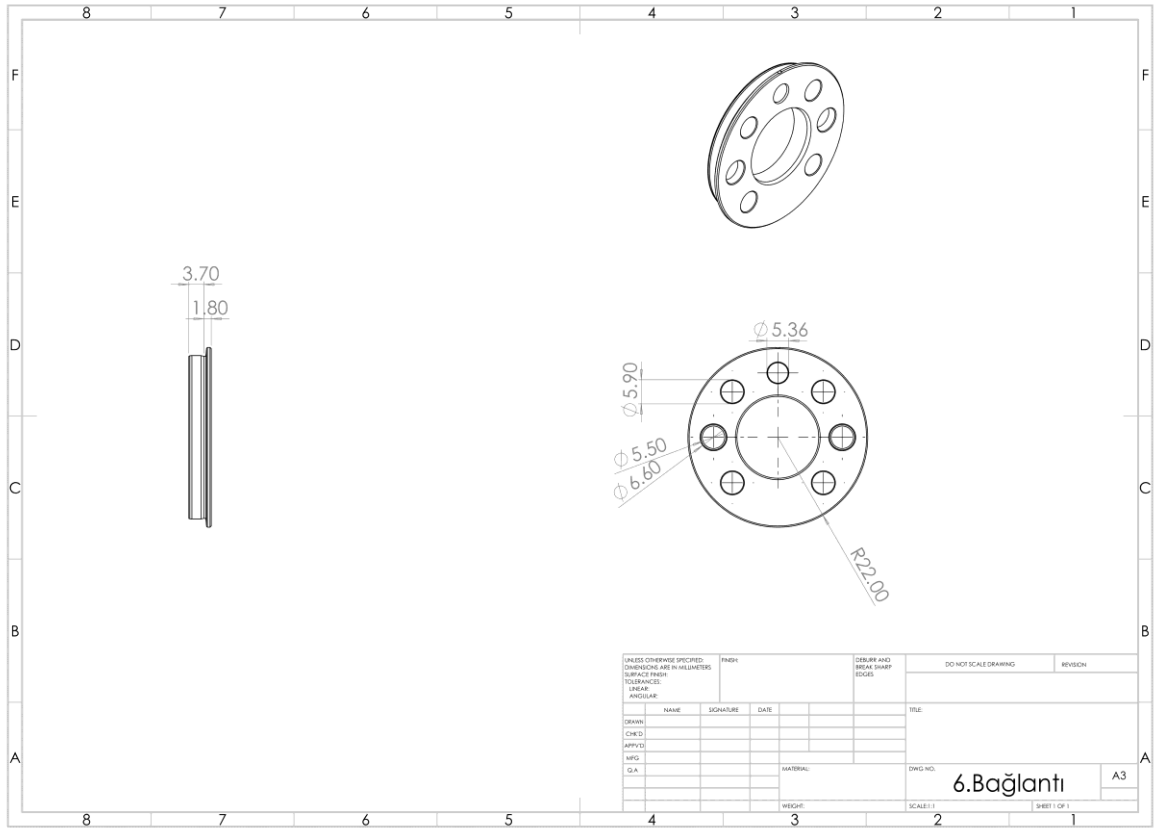
Bu çalışmada ABB IRB 1200 robotu Solidworks yazılımıyla tasarlanmıştır. Robotun boyutları, üretici firmanın veri föyünde (İnt.Kyn.2) belirlediği ölçülere göre tasarlanmıştır. Taban şasesinin imalat resmi şekil 4.2'de, birinci bağlantının imalat resmi şekil 4.3'te, ikinci bağlantının imalat resmi şekil 4.4'te, üçüncü bağlantının imalat resmi şekil 4.5'te, dördüncü bağlantının imalat resmi şekil 4.6'da, beşinci bağlantının imalat resmi şekil 4.7'de, altıncı bağlantının imalat resmi şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Taban şasesinin imalat resmi.



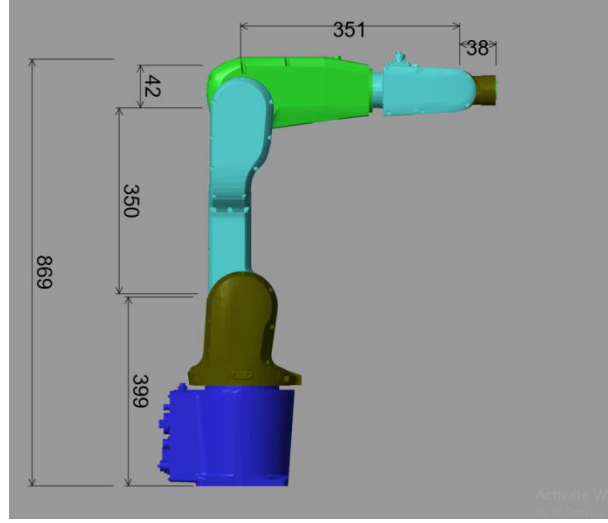
Şekil 4.4 İkinci bağlantının imalat resmi.



Şekil 4.8 Altıncı bağlantının imalat resmi.

4.2 Altı Serbestlik Dereceli ABB IRB 1200 Robot Kolunun İleri Kinematiği

Robot kinematiğinin temel aracı, robotu bir araya getiren kinematik zincirlerini tasvir eden kinematik denklemlerdir. Doğrusal olmayan bu denklemler eklem parametrelerini robot yapısıyla eşleştirir. İleri kinematik verilen eklem parametre değerleri için robotun kinematik denklemlerini kullanarak robotun uç elemanının konumunu ve yönünü ortaya çıkarır. Bunun tersi olan süreç ise uç efektörün istenen konum ve yöne gelmesi için bulunması gereken eklem parametrelerini ortaya çıkaran ters kinematiktir. IRB 1200 açık zincir robot kolu, 6 eksenli endüstriyel robot manipülatörünün hareketini incelemek için robotun ölçüleri şekil 4.9'da gösterilmiştir. Çizelge 4.1'de verilen DH parametreleri kinematik denklemlerinde kullanılmak üzere bulunmuştur. Robot manipülatör uç efektörü konumlandırmak için ilk üç eklem kullanılırken sonraki üç eklem ise robot ucunu yönlendirmek için kullanılır.



Şekil 4.9 Robotun ölçüleri.

Çizelge 4.1 DH parametreleri.

Bağlantı	θ_{n+1} (Derece)	d_{n+1} (mm)	a_{n+1} (mm)	α_{n+1} (Derece)
1	θ_1	d_1	0	-90
2	θ_2-90^0	0	a_2	0
3	θ_3	0	a_3	-90
4	θ_4	d_4	0	+90
5	θ_5	0	0	-90
6	θ_6-180^0	d_6	0	0

İleri kinematik model, eklem açıları göz önüne alındığında manipülatörün konumunu bulmak için kullanılır. DH parametreleri bilindiğinde bu nispeten basit bir problem olur. DH ile çözme yöntemi, herhangi bir robot konfigürasyonu için kullanılabilen robot hareket modellemesinin standart yoludur. Öncelikle tabana sabitlenen $\{0\}$ referans çerçevesinden başlayarak her birleşim noktasına bir çerçeve atanır ve bu çerçeveyi bir sonrakine dönüştürülür. Referans çerçevelerin her bir ekleme dönüşümü ve DH parametrelerine dayanarak, ardışık bağlantılara eklenen çerçevelere ilişkin homojen dönüşüm matrisleri bulunur. Bağlantı dönüşüm matrisinin tanımını kullanarak, ${}^{i-1}T_i$ matrisi, ' i ' koordinat sisteminden ' $i - 1$ ' e homojen dönüşümü eşitlik 4.1'de ifade edilmiştir:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Çizelge 5.1'in her satırı için bu matrisi bularak, aşağıda gösterildiği gibi birden fazla dönüşüm matrisi bulunabilir.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ -C_2 & S_2 & 0 & -a_2 C_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & -S_3 & a_3 C_3 \\ S_3 & 0 & C_3 & a_3 S_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & -C_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & -S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & C_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} -C_6 & S_6 & 0 & 0 \\ -S_6 & -C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Bu matrisler, taban çerçeveye göre uç çerçeveyi tanımlayan genel dönüşüm matrisini belirlemek için birleştirilir. 0T_1 'den 5T_6 'ya kadar olan matrislerin çarpılmasıyla, uç efektörün konumunu tanımlayan denklemleri içeren 0T_6 elde edilir.

$${}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Robot kolunda her eklemden bir çerçeve bulunmaktadır, bir eklemin çerçevesi başka bir eklemin çerçevesine göre rotasyonu veya yönelimini hesaplamak için çerçevelerin X, Y ve Z olan her bir eksenin diğer eklemin eksenlerine göre rotasyonu bulunması gerekmektedir. Uç efektörün taban çerçeveye göre yönelimini hesaplamak için uç efektörün çerçeve X eksenini tabanın çerçeve eksenlerine göre hesaplanmıştır, uç efektörün X eksenini taban çerçevesinin X eksenine göre yönelimi eşitlik 4.9'da, uç efektörün X eksenini taban çerçevesinin Y eksenine göre yönelimi eşitlik 4.10'da, uç efektörün X eksenini taban çerçevesinin Z eksenine göre yönelimi ise eşitlik 4.11'de gösterilmiştir.

$$n_x = -C_1S_{23}C_4C_5C_6 - S_1S_4C_5C_6 - C_1C_{23}S_5C_6 + C_1S_{23}S_4S_6 - S_1C_4S_6 \quad (4.9)$$

$$n_y = -S_1S_{23}C_4C_5C_6 + C_1S_4C_5C_6 - S_1C_{23}S_5C_6 - S_1S_{23}S_4S_6 + C_1C_4S_6 \quad (4.10)$$

$$n_z = -C_4C_{23}C_5C_6 + S_{23}S_5C_6 + C_{23}S_4S_6 \quad (4.11)$$

Uç efektörün Y eksenini taban çerçevesine göre yönelimi aynı şekilde hesaplanmıştır, uç efektörün Y eksenini taban çerçevesinin X eksenine göre yönelimi eşitlik 4.12'de, uç efektörün Y eksenini taban çerçevesinin Y eksenine göre yönelimi eşitlik 4.13'te, uç efektörün Y eksenini taban çerçevesinin Z eksenine göre yönelimi ise eşitlik 4.14'te gösterilmiştir.

$$o_x = C_1S_{23}C_4C_5S_6 + S_1S_4C_5S_6 + C_1C_{23}S_5S_6 + C_1S_{23}S_4C_6 - S_1C_4C_6 \quad (4.12)$$

$$o_v = S_1 S_{23} C_4 C_5 S_6 - C_1 S_4 C_5 S_6 + S_1 C_{23} S_5 S_6 + S_1 S_{23} S_4 C_6 + C_1 C_4 C_6 \quad (4.13)$$

$$o_z = C_4 C_{23} C_5 S_6 - S_{23} S_5 S_6 + C_{23} S_4 C_6 \quad (4.14)$$

Uç efektörün Z eksenine göre yönelimi ise, uç efektörün Z eksenine taban çerçevesinin X eksenine göre yönelimi eşitlik 4.15'te, uç efektörün Z eksenine taban çerçevesinin Y eksenine göre yönelimi eşitlik 4.16'da, uç efektörün Z eksenine taban çerçevesinin Z eksenine göre yönelimi ise eşitlik 4.17'de gösterilmiştir.

$$a_x = -C_1 S_{23} C_4 S_5 - S_1 S_4 S_5 + C_1 C_{23} C_5 \quad (4.15)$$

$$a_y = -S_1 S_{23} C_4 S_5 + C_1 S_4 S_5 + S_1 C_{23} C_5 \quad (4.16)$$

$$a_z = -S_5 C_4 C_{23} - S_{23} C_5 \quad (4.17)$$

Pozisyon bilgisi elde etmek için uç efektörün X, Y ve Z eksenlerine göre pozisyonun değerleri elde edilmesi gerekmektedir. Pozisyonun X eksenindeki konumu eşitlik 4.18'de, Y eksenindeki konumu eşitlik 4.19'da, Z eksenindeki konumu ise eşitlik 4.20'de gösterilmiştir.

$$p_x = -C_1 S_{23} C_4 S_5 d_6 - S_1 S_4 S_5 d_6 + C_1 C_{23} C_5 d_6 + C_1 C_{23} d_4 + a_3 C_1 S_{23} + C_1 a_2 S_2 \quad (4.18)$$

$$p_y = -S_1 S_{23} C_4 S_5 d_6 + C_1 S_4 S_5 d_6 + S_1 C_{23} C_5 d_6 + S_1 C_{23} d_4 + a_3 S_1 S_{23} + S_1 a_2 S_2 \quad (4.19)$$

$$p_z = -S_5 C_4 C_{23} d_6 - S_{23} C_5 d_6 - S_{23} d_4 + a_3 C_{23} + a_2 C_2 + d_1 \quad (4.20)$$

4.3 Altı Serbestlik Dereceli ABB Robot Kolunun Ters Kinematığı

Bir robotun uç efektörünün hedef nesnesine ulaşacak şekilde konumunu ve yönünü ayarlamak için ters kinematik çözümü kullanılır. Uç efektörün belirli bir konumu için, uç efektörü belirtilen konuma getiren eklem açıları ters kinematik model ile tanımlanır.

Başka bir deyişle eşitlik 4.8'deki 0T_6 'ya on altı sayısal değer verildiğinde, ters kinematik çözüme karşılık gelen $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ ve θ_6 eklem açılarıdır. IRB 1200 robotunun ters kinematik çözümü yazılmıştır.

Eşitlik 4.18 ve 4.19'da iki X ve Y ekseninde yeni konum türetilerek 4.21 ve 4.22'de görüldüğü üzere yeni eşitlikler türetilmiştir. Eşitlik 4.22 ve eşitlik 4.21'e bölünerek eşitlik 4.23 türetilmiş olur.

$$p'_x = p_x - d_6 a_x = C_1 C_{23} d_4 + a_3 C_1 S_{23} + C_1 a_2 S_2 \quad (4.21)$$

$$p'_y = p_y - d_6 a_y = S_1 C_{23} d_4 + a_3 S_1 S_{23} + S_1 a_2 S_2 \quad (4.22)$$

$$\frac{p'_y}{p'_x} = \frac{S_1 (C_{23} d_4 + a_3 S_{23} + a_2 S_2)}{C_1 (C_{23} d_4 + a_3 S_{23} + a_2 S_2)} \quad (4.23)$$

Eşitlik 4.23'te her iki tarafı $\tan^{-1}(x)$ fonksiyona girdi olarak alındığında eşitlik 4.24 bulunur.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{p'_y}{p'_x} \right) \quad (4.24)$$

Eşitlik 4.20'de Z ekseninde yeni konum türetilerek eşitlik 4.25'te görüldüğü üzere yeni eşitlik türetilmiştir.

$$p'_z = p_z - d_6 a_z = -S_{23} d_4 + a_3 C_{23} + a_2 C_2 + d_1 \quad (4.25)$$

Eşitlik 4.26 ara değişken olarak bilinen bir formüldür ve ters kinematik hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır, bu eşitlikte değişkenlerin değerleri olarak p_x yerine eşitlik 4.21'deki p'_x değeri, p_y yerine eşitlik 4.22'deki p'_y değeri, p_z yerine eşitlik 4.25'teki p'_z yazıldığında eşitlik 4.27 elde edilir ve eşitlik 4.28'de görüldüğü üzere denklem en sade haline getirilmiştir.

$$K = \frac{(p_x)^2 + (p_y)^2 + (p_z)^2 - d_4^2 - a_3^2 - a_2^2}{2a_2} \quad (4.26)$$

$$\frac{(p'_x)^2 + (p'_y)^2 + (p'_z - d_1)^2 - d_4^2 - a_3^2 - a_2^2}{2a_2} = a_3 C_3 - d_4 S_3 \quad (4.27)$$

$$a_3 C_3 - d_4 S_3 = K \quad (4.28)$$

Eşitlik 4.29 ve 4.30'da yazılı olan uzunluk değerleri trigonometrik denklemlerle ifade edilmiştir, eşitlik 4.29 ve 4.30'dan yola çıkarak eşitlik 4.32 elde edilmiştir. Eşitlik 4.28 ve 4.32'den eşitlik 4.33 bulunmuştur. Eşitlik 4.33'te Pisagor trigonometrik özdeşliği kullanılırsa eşitlik 4.34 elde edilir.

$$d_4 = \delta \cos \phi \quad (4.29)$$

$$a_3 = \delta \sin \phi \quad (4.30)$$

$$\delta = (\sqrt{d_4^2 + a_3^2})^2 \quad (4.31)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{a_3}{d_4} \right) \quad (4.32)$$

$$S_\phi C_3 - S_3 C_\phi = \sin(\phi - \theta_3) = \frac{K}{\delta} \quad (4.33)$$

$$\cos(\phi - \theta_3) = \pm \sqrt{1 - \frac{K^2}{\delta^2}} \quad (4.34)$$

Eşitlik 4.34'ün $\cos^{-1}(x)$ ters fonksiyonu alındığında eşitlik 4.35 elde edilir.

$$\phi - \theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{K}{\pm \sqrt{a_3^2 + d_4^2 - K^2}} \right) \quad (4.35)$$

Eşitlik 4.35'te $\tan^{-1}\left(\frac{K}{\pm\sqrt{a_3^2+d_4^2-K^2}}\right)$ bir tarafa eşitli θ_3 ifadesini diğer tarafa atılınca eşitlik 4.36 elde edilir.

$$\theta_3 = \phi - \tan^{-1}\left(\frac{K}{\pm\sqrt{a_3^2+d_4^2-K^2}}\right) \quad (4.36)$$

Eşitlik 4.36'da ϕ yerine eşitlik 4.32'deki değeri yazılırsa eşitlik 4.37 elde edilmiş olur.

$$\theta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{a_3}{d_4}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{K}{\pm\sqrt{a_3^2+d_4^2-K^2}}\right) \quad (4.37)$$

Eşitlik 4.37'de $\tan^{-1}(x)$ fonksiyon sonucunun iki değeri olmasından dolayı θ_3 için iki çözüm elde edilir.

Eşitlik 4.38'de gösterildiği 0T_6 matrisini ${}^0T_3^{-1}$ matrisiyle çarparak, yalnızca bilinen değişkenlerin bir fonksiyonu olan 3T_6 fonksiyonu elde edilmiş olur. Eşitlik 4.39'da 3T_6 matrisi yazılmıştır ardından eşitlik 4.40'ta ${}^0T_3^{-1}$ bulunmuştur, eşitlik 4.38 için gerekli matris değerleri eşitlik 4.41'de bulunmuştur ve 3T_6 değeri bu şekilde elde edilebilir.

$${}^0T_3^{-1} \cdot \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^3T_6 \quad (4.38)$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_1S_{23} & S_1 & C_1C_{23} & a_3C_1S_{23} + a_2C_1S_2 \\ S_1S_{23} & -C_1 & S_1C_{23} & a_3S_1S_{23} + a_2S_1S_2 \\ C_{23} & 0 & -S_{23} & a_3C_{23} + a_2C_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

$${}^0T_3^{-1} = \begin{bmatrix} C_1S_{23} & S_1S_{23} & C_{23} & -a_3 - a_2C_3 - d_1C_{23} \\ S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ C_1C_{23} & S_1C_{23} & -S_{23} & a_2S_3 + d_1S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

$${}^3T_6 = \begin{bmatrix} C_1S_{23} & S_1S_{23} & C_{23} & -a_3 - a_2C_3 - d_1C_{23} \\ S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ C_1C_{23} & S_1C_{23} & -S_{23} & a_2S_3 + d_1S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Eşitlik 4.42'de gösterildiği gibi 3T_6 matrisi eşitlik 4.5, 4.6 ve 4.7'de verilen 3T_4 , 4T_5 ve 5T_6 'nın çarpılmasıyla hesaplanması mümkündür.

$${}^3T_6 = {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} -C_4C_5C_6 + S_4S_6 & C_4C_5S_6 + S_4C_6 & -C_4S_5 & -C_4S_5d_6 \\ -S_4C_5C_6 - C_4S_6 & S_4C_5S_6 - C_4C_6 & -S_4S_5 & -S_4S_5d_6 \\ -S_5C_6 & S_5S_6 & C_5 & d_6C_5 + d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Eşitlik 4.42, 4.14, 4.15 ve 4.16'daki elemanlarını eşitleyerek, eşitlik 4.43 ve 4.44 elde edilir.

$$C_5 = C_1C_{23}a_x + S_1C_{23}a_y - S_{23}a_z \quad (4.43)$$

$$d_6C_5 + d_4 = C_1C_{23}p_x + S_1C_{23}p_y - S_{23}p_z + a_2S_3 + d_1S_{23} \quad (4.44)$$

Eşitlik 4.43 ve eşitlik 4.44'ten yola çıkarak eşitlik 4.45 elde edilir.

$$d_6(C_1C_{23}a_x + S_1C_{23}a_y - S_{23}a_z) + d_4 = C_1C_{23}p_x + S_1C_{23}p_y - S_{23}p_z + a_2S_3 + d_1S_{23} \quad (4.45)$$

Eşitlik 4.18, 4.19, 4.20 ve 4.45'ten yola çıkarak eşitlik 4.46 verilir.

$$C_{23}(C_1p_x + S_1p_y - d_6C_1a_x - d_6S_1a_y) - S_{23}(p_z - d_1 - d_6a_z) = d_4 - a_2S_3 \quad (4.46)$$

Eşitlik 4.46'daki parantez içindekiler için eşitlik 4.47, 4.48 ve 4.49 kullanılır daha sonra eşitlik 4.46 sadeleştirilerek eşitlik 4.50 elde edilir.

$$M_1 = C_1p_x + S_1p_y - d_6C_1a_x - d_6S_1a_y \quad (4.47)$$

$$M_2 = p_z - d_1 - d_6a_z \quad (4.48)$$

$$M = -a_2S_3 + d_4 \quad (4.49)$$

$$C_{23}M_1 - S_{23}M_2 = M \quad (4.50)$$

Eşitlik 4.50'den yola çıkarak 4.51'deki eşitlikler bulunur.

$$\begin{aligned} \theta_{23} &= \alpha - \tan^{-1} \left(\frac{M}{\pm \sqrt{M_1^2 + M_2^2 - M^2}} \right), \\ \theta_{23} &= \tan^{-1} \left(\frac{M_1}{M_2} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{M}{\pm \sqrt{M_1^2 + M_2^2 - M^2}} \right), \end{aligned} \quad (4.51)$$

Eşitlik 4.52 ve 4.53'ten yola çıkarak eşitlik 4.54 elde edilir ardından eşitlik 4.55 bulunur.

$$\rho = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} \quad (4.52)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \quad (4.53)$$

$$C_{23}S_\alpha - S_{23}C_\alpha = \sin(\alpha - \theta_{23}) = \frac{M}{\rho} \quad (4.54)$$

$$\cos(\alpha - \theta_{23}) = \pm \sqrt{1 - \frac{M^2}{\rho^2}} \quad (4.55)$$

İki tarafın $\cos(x)$ ters fonksiyonu alındığında eşitlik 4.56 elde edilir.

$$\alpha - \theta_{23} = \tan^{-1} \left(\frac{M}{\pm \sqrt{M_1^2 + M_2^2 - M^2}} \right) \quad (4.56)$$

Eşitlik 4.15, 4.16 ve 4.17'den yola çıkarak eşitlik 4.58 ve 4.59 elde edilir.

$$\theta_2 = \theta_{23} - \theta_3 \quad (4.57)$$

$$-S_4S_5 = C_1S_{23}a_x + S_1S_{23}a_y + C_{23}a_z \quad (4.58)$$

$$-C_4S_5 = S_1a_x - C_1a_y \quad (4.59)$$

Eşitlik 4.58'i 4.59'a bölündüğünde eşitlik 4.60 elde edilir.

$$\frac{S_4}{C_4} = \frac{C_1S_{23}a_x + S_1S_{23}a_y + C_{23}a_z}{S_1a_x - C_1a_y} \quad (4.60)$$

Eşitlik 4.60'ta her iki tarafın $\tan^{-1}(x)$ 'i alındığında eşitlik 4.61 elde edilir. Dördüncü eklem açısı değerini bulan denklemi eşitlik 4.61'de bulunmuştur.

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{C_1S_{23}a_x + S_1S_{23}a_y + C_{23}a_z}{S_1a_x - C_1a_y} \right) \quad (4.61)$$

Eşitlik 4.58'den eşitlik 4.62 elde edilmiştir.

$$\cos(\theta_5) = C_1C_{23}a_x + S_1C_{23}a_y - S_{23}a_z \quad (4.62)$$

Eşitlik 4.62'nin her iki tarafın $\cos^{-1}(x)$ fonksiyonun içine alındığında eşitlik 4.63'te beşinci eklem açısı denklemi verilir.

$$\theta_5 = \cos^{-1}(C_1C_{23}a_x + S_1C_{23}a_y - S_{23}a_z) \quad (4.63)$$

Beşinci eklem elde edildiği benzer hesaplamalarla eşitlik 4.64 ve eşitlik 4.65'ten yola çıkarak eşitlik 4.66'da altıncı açısı denklemi elde edilir.

$$-S_5C_6 = C_1C_{23}n_x + S_1C_{23}n_y - S_{23}n_z \quad (4.64)$$

$$S_5S_6 = C_1C_{23}o_x + S_1C_{23}o_y - S_{23}o_z \quad (4.65)$$

$$\theta_6 = \tan^{-1} \left(\frac{-(C_1C_{23}o_x + S_1C_{23}o_y - S_{23}o_z)}{C_1C_{23}n_x + S_1C_{23}n_y - S_{23}n_z} \right) \quad (4.66)$$

4.4 Katı Modelinin Simulink Ortamına Aktarılması

Bu çalışmada robot kolu SolidWorks yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır ardından birleşik robot tanım biçimi (URDF) olarak aktarılmıştır.

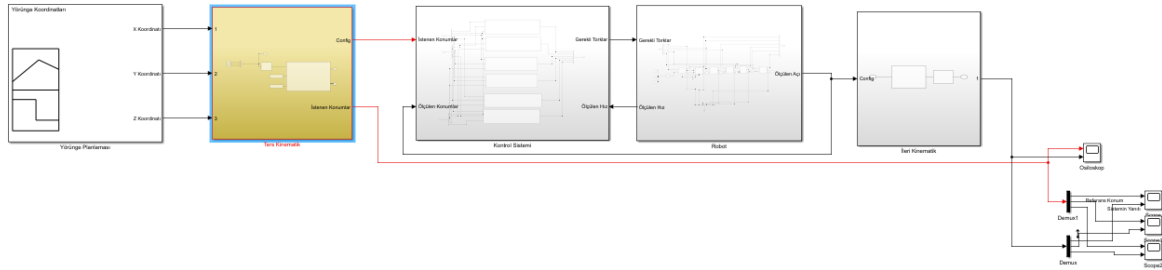
SolidWorks yazılımından URDF biçimine aktarım işlemi SolidWorks to URDF Exporter programı yoluyla sağlanmıştır. SolidWorks to URDF Exporter robotun bağlantıları ve birleşmiş hali URDF dosyasına kolayca aktarılmasını sağlayan bir SolidWorks eklentisidir. SolidWorks to URDF Exporter, katı modelleri ve robotlar için bir dizin içeren ROS benzeri bir paket oluşturmaktadır. SolidWorks programında URDF biçimine dönüştürmek üzere her bir bağlantının referans koordinatı belirlenir ardından eklemlerin çeşitleri belirlenir. URDF biçimli dosya elde edildikten sonra Simulink ortamında kullanmak üzere `smimport()` fonksiyonu kullanılarak `smimport('IRB1200.urdf');` komutu yazılır. Bu kod kullanılarak robot kolu Simulink ortamına aktarılmıştır.

4.5 Simulink Modeli

Simulink, farklı alanlarda dinamik sistemleri modellemek ve analiz etmek için Matlab yazılım tabanlı bir programlama ortamıdır. Simulink, çok alanlı simülasyon ve model tasarımı için otomatik kontrol ve dijital sinyal işlemede yaygın olarak kullanılır.

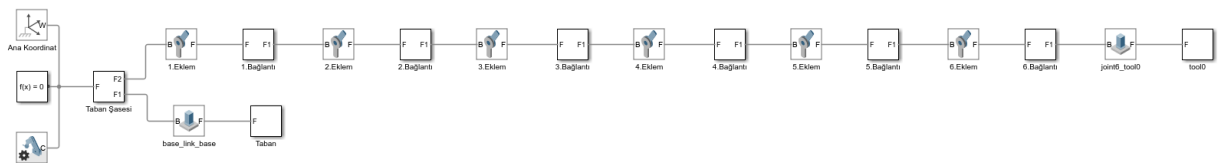
6 eksenli robot kolu SolidWorks ortamında modellendikten sonra Simulink ortamına aktarılmıştır, robotun gideceği noktalar belirlendikten sonra yörünge planlaması bloğuna aktarılmıştır. Yörünge planlaması bloğundan referans noktalar ortaya çıkar daha sonra ters kinematik bloğuna geçer. Ters kinematik bloğu gidilecek noktalar için gerekli eklem açılarını hesaplar ve bu açı bilgilerini kontrol sistemine gönderir. Kontrol sistemi bloğu ise robot eklemlerini gerekli açılara ulaştırır. Robotun bilgileri içeren robot bloğu kontrol sistemiyle birlikte çalışarak eklem açılarını referans konumda bulundurur. Kontrol sisteminin etkinliğini kontrol etmek üzere ileri kinematik bloğuna sistemin yanıtı olan ölçülen açılar ileri kinematiğe aktarılmaktadır. İleri kinematik ise sistemin

yanıtı olan açılırları girdi olarak alır ve konumu hesaplar. Çalışmanın genel tasarımı şekil 4.10'da gösterilmiştir.

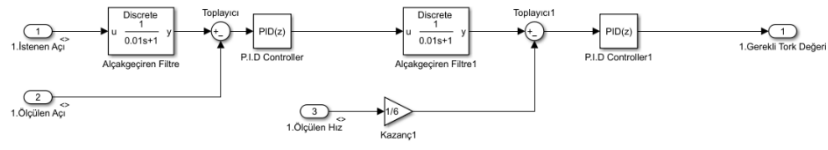


Şekil 4.10 Projenin Matlab/Simulink ortamında genel modeli.

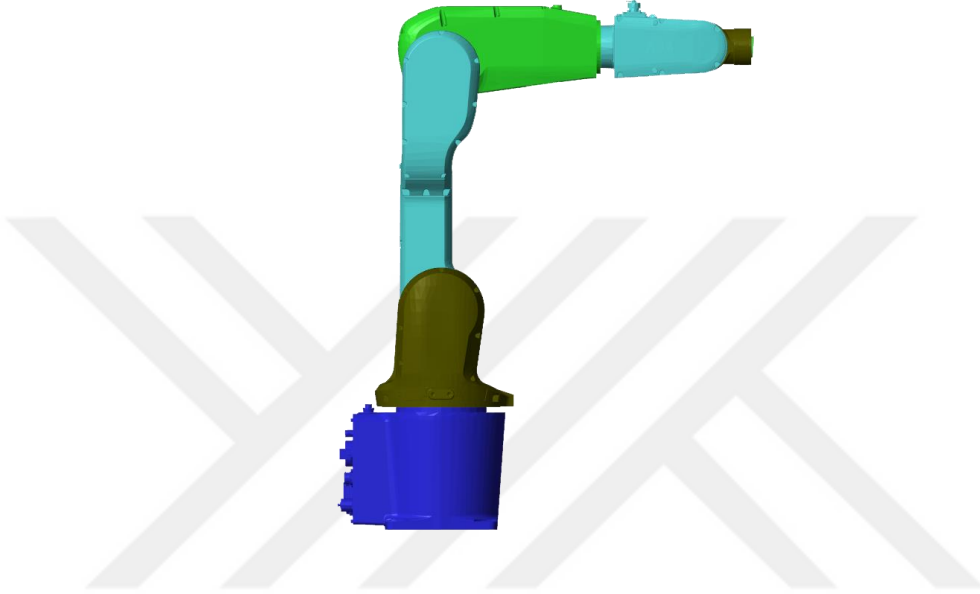
Robot kolu çeşitli alanlarda kullanımı yaygın bir sistem haline getirmiştir, bu çalışmada ABB IRB 1200 robot kolu SolidWorks yazılımında tasarlandıktan sonra kinematik analizi yapılmak üzere şekil 4.11’de görüldüğü üzere Matlab/Simulink ortamına aktarılmıştır, ardından her ekleme uygun DC motor tasarlanmıştır. Son aşama olarak kontrol sistemi tasarlanmıştır. Yörünge belirlendikten sonra kontrol sistem sonuçları elde edilmiştir. Şekil 4.12’de gösterilen robot kolunun kontrol şemasında eklemlerin ölçülen konum ve hız bilgilerini hesaplayarak en iyi sonuçlar elde edilir. Görüldüğü üzere kontrol sistemine hız değerlerini dahil edilmiştir. Bilgisayar ortamında tasarlanan robot kolunun katı model tasarımı şekil 4.13’te gösterilmiştir.



Şekil 4.11 SolidWork modelinin Matlab/Simulink'e aktarılması.



Şekil 4.12 Kontrol sistemi şeması.



Şekil 4.13 IRB 1200 robot kolu.

4.6 DC Motorların Matematik Denklemleri

Robot kolun her mafsalı için bir doğru akım motoru entegre edilmiştir. Bu çalışmadaki DC motorun matematik modelinin bölümleri elektrik ve dinamik olarak ikiye ayrılmaktadır. DC motorun elektriği eşitlik 4.67'de, dinamik kısmı ise eşitlik 4.68'de ifade edilmiştir.

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a (di_a(t)/dt) + K_e \omega(t) \quad (4.67)$$

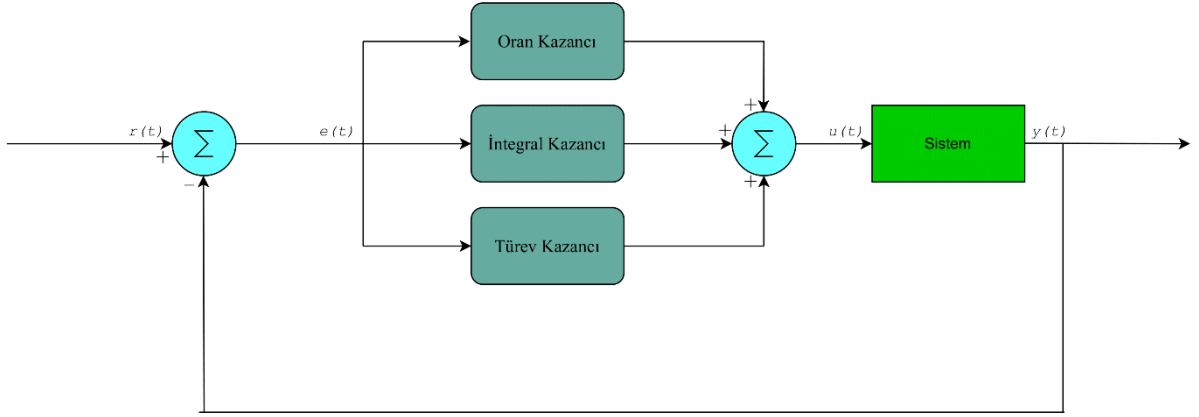
$$J (d\omega(t)/dt) + B \omega(t) = K_t i_a(t) - T_\gamma(t) \quad (4.68)$$

4.7 Robot Kol Eklemlerinde Kullanılan DC Motorların P.I.D Kontrolü

P.I.D kontrolünden çıkan sistemin yanıtını bir sensör kullanarak ölçmek ardından sonucu referans değerle karşılaştırarak oransal, integral ve türevsel bileşenlerini hesaplamaktır. Bu üç bileşen ile kontrol sağlanır ve sistemin yanıtını referans noktaya yakın bir sonuca ulaştırır.

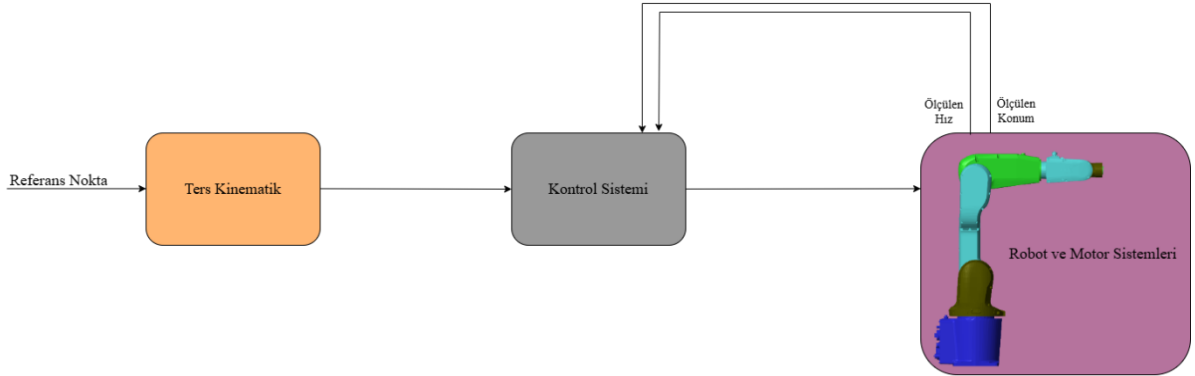
P, I ve D bileşenlerinin her biri kontrol sisteminde farklı işlevlere sahip olmakla beraber bir arada kullanılırlar ve bu şekilde sistemin performansı geliştirilir. Bazı durumlarda bu bileşenlerden biri veya birkaçı devre dışı bırakılır. P, I ve D bileşenlerinden sadece oransal kontrol içeren P kontrolü, oransal ve integral bileşenleri bir araya getiren P.I kontrolü, son olarak ise oransal ile türevsel bileşenleri içeren PD kontrolü kullanılması mümkündür, ayrıca tüm bileşenlerin bir arada kullanıldığı PID kontrol kullanılabilir. Sadece integral ve türevsel bileşenleri kullanan ID kontrol yapısına uygulamalarda nadiren rastlanır. Hata işareti $e(t)$, Şekil 4.14'te gösterildiği gibi ayar noktası $r(t)$ ile çıktı süreci $y(t)$ arasındaki farktır. Çıktı ve giriş değerleri büyük miktarda farklılık gösterdiğinde fiziksel sisteme büyük bir giriş sinyali verilir. Küçük hatalar olduğunda küçük girişler kullanılır. Kontrol sinyali, $u(t)$ 'deki herhangi bir değişikliğin K 'nin belirli bir orantılı artışı için hata sinyalindeki değişikliğe doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Orantılı denetleyici çıkışı matematiksel olarak eşitlik 4.69'da gibi gösterilir:

$$u(t) = K e(t) \quad (4.69)$$



Şekil 4.14 P.I.D kontrol şeması.

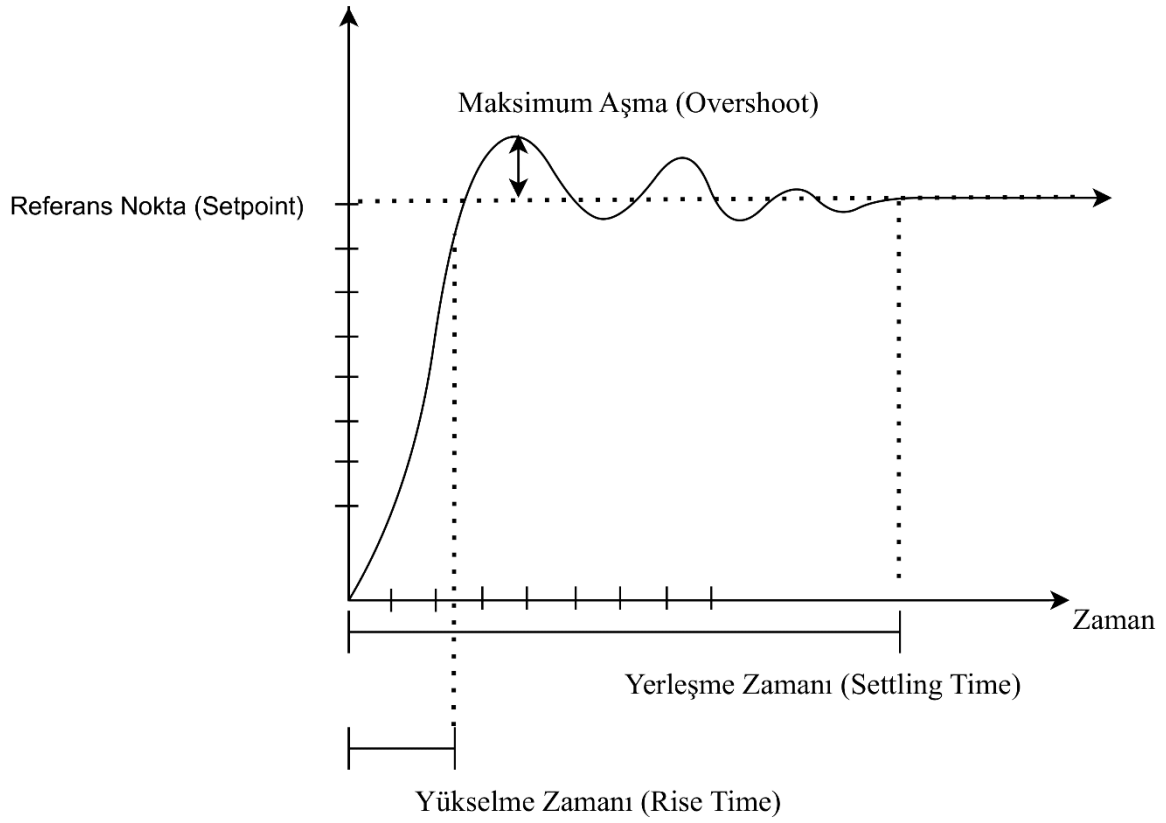
Bir kontrol sisteminde süreç değişkeni, açısal hız (rad/s) veya açı (rad) gibi kontrol edilmesi gereken sistem parametresidir. Süreç değişkenini ölçmek ve kontrol sistemine geri bildirim sağlamak için bir sensör kullanılır. Referans noktası, açı kontrol sistemi durumunda yüz derece gibi süreç değişkeni için istenen değerdir. Şekil 4.15'te gösterildiği gibi bu çalışmanın kontrol şemasında sistemin yanıtı olan konum ve hız değerleri dikkate alarak kontrol sağlanmıştır.



Şekil 4.15 Projenin genel kontrol şeması.

Herhangi bir anda süreç değişkeni ile referans noktası arasındaki fark sistemi tetiklemek için istenen aktüatör çıkışını belirlemek üzere kontrol sistemi algoritması tarafından kullanılır. Genellikle kontrol sistemini bozulmaların süreç değişkeni üzerindeki etkisini en aza indirecek şekilde tasarlamaya çalışılır.

Kontrol sistemi performansı referans noktası komut değişkeni olarak bir adım fonksiyonunun uygulanması ve ardından süreç değişkeninin tepkisini ölçülür. Genellikle yanıt, tanımlanan dalga biçimi özellikleri ölçülür. Kontrol grafiği terimleriyle birlikte şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Kontrol grafiği.

Bir kontrol sisteminin performans gereksinimlerini tanımlamak için bu özelliklerin birini veya tamamını dikkate aldıktan sonra kontrol sisteminin bu tasarım niteliklerini karşılamasının bekleneceği en zor koşulları baz almak yararlı olacaktır. Sistemde süreç değişkeninin ölçümünü etkileyen bir bozukluk vardır. En zor koşullarda yüksek performans gösteren bir kontrol sisteminin tasarlanması önemlidir.

Bazı durumlarda sistemin belirli bir kontrol çıkışının yanıtı zamanla değişebilir. Doğrusal olmayan bir sistem bir çalışma noktasında istenen yanıtı üreten kontrol parametrelerinin başka bir çalışma noktasında tatmin edici bir yanıt üretemeyebileceği

bir sistemdir. Kontrol sisteminin doğrusal olmayan durumları ne kadar iyi çözme ölçüsü kontrol sisteminin sağlamlığı olarak adlandırılır. Hızla değişen veya karmaşık davranışlara sahip sistemler, daha hızlı kontrol döngüsü hızlarına ihtiyaç duyar.

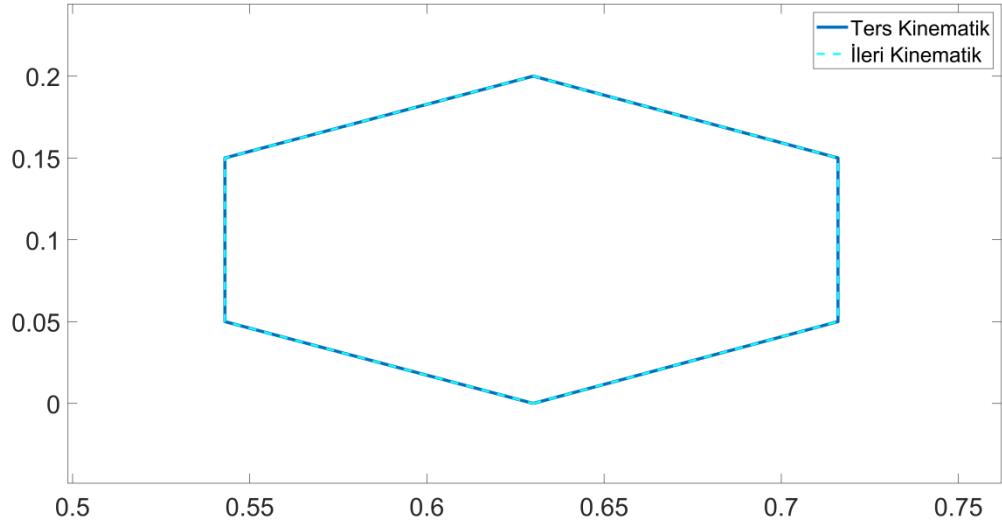


5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Otomasyon sistemlerinde kritik rolleri olan robot kolları son günlerde çeşitli alanlarda yer almaya başlamıştır. Robot kollarının global olarak yaygın olmasının yanında yerel olarak yaygın hale gelmiştir. Bu çalışmada kinematik analizi sırasında ters kinematik yöntem hesaplamalarının sonuçları incelenmiştir ardından DC motor ve P.I.D kontrol sonuçları tartışılmıştır.

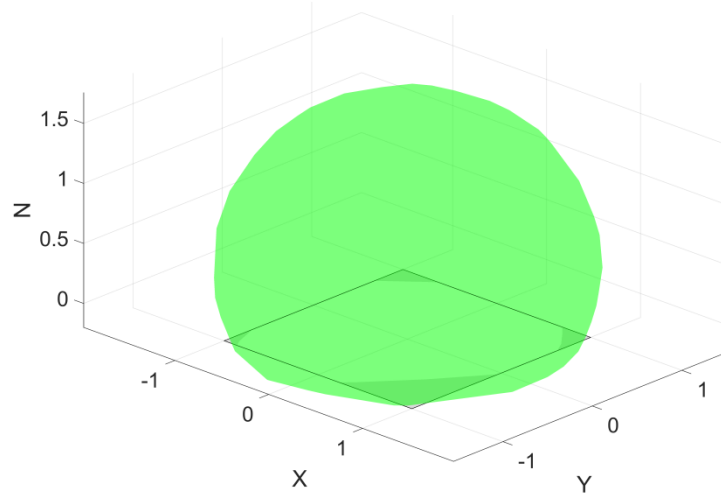
5.1 Ters Kinematik Sonuçları

Ters kinematik, bir robot kolun uç efektörün koordinat sistem üzerinde belirli referans konumları için gerekli eklem açılarını hesaplayan bir yöntemdir. Bu çalışmada gerekli eklem açıları bulmak için tasarlanan ters kinematik modelinin etkinliği test edilmiştir. Önce gidilecek noktaların X, Y ve Z eksenleri üzerinde yerleri belirlenmiştir ardından bu noktalarda bulunmak için gerekli konum açıları bulunmuştur, ardından ileri kinematik sistemine gerekli eklem açıları girilmiştir. Altıgen çizmek üzere gerekli hesaplamalar yapılmıştır, şekil 5.1’de gösterildiği gibi robot kolu ters kinematik ve ileri kinematik yöntemleriyle altıgen çizilmiştir, her iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu altıgen çizilirken hata farkları olmuştur, X ekseninde ortalama hata $1,05 \times 10^{-10}$, Y ekseninde ortalama hata $5,05 \times 10^{-11}$, Z eksenindeki ortalama hata ise $1,58 \times 10^{-10}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.1 Ters kinematiğin ileri kinematikle karşılaştırılması.

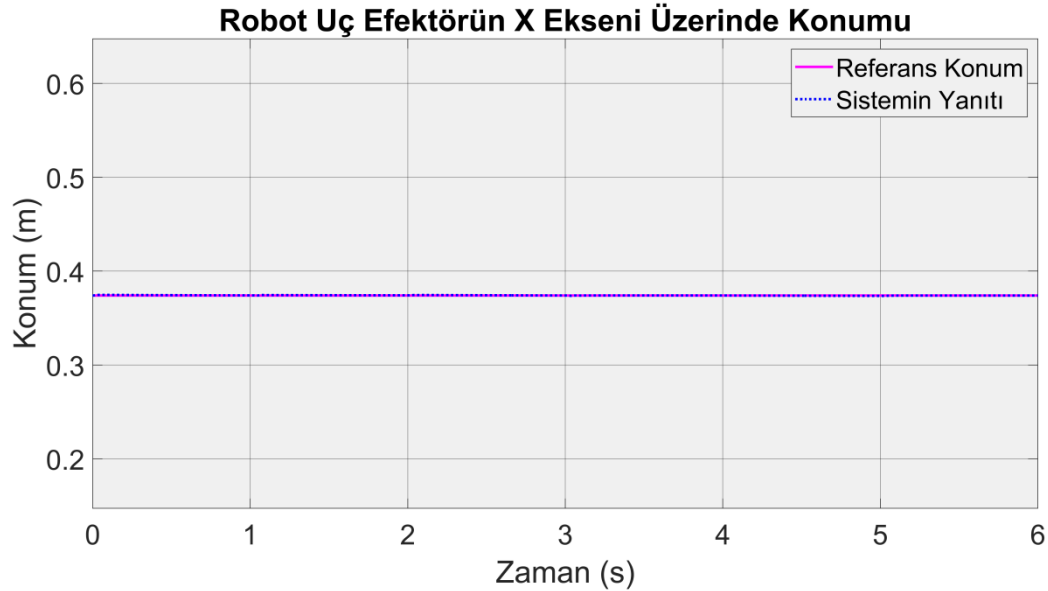
Robotun çalışma uzayı şekil 5.2’de çizilmiştir. Kinematik analizi kullanılarak hesaplandıktan sonra robot uç efektörün gidebileceği noktalar uzay alanda belirtilmiştir. Robot kol uç efektörün gidebileceği noktalar çizilen uzayla sınırlıdır.



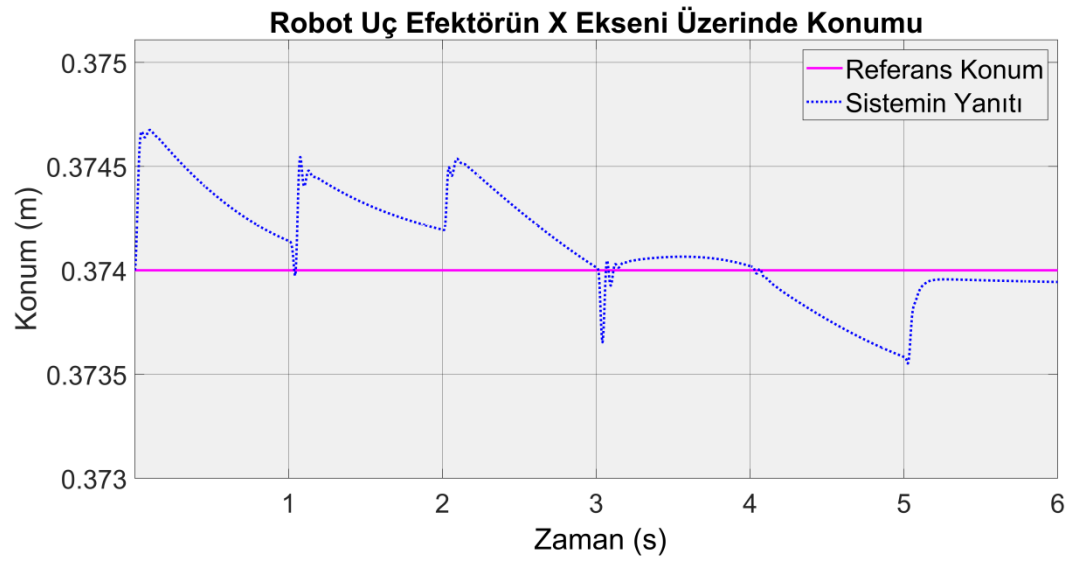
Şekil 5.2 IRB 1200 robot kolun çalışma aralığı.

5.2 P.I.D Kontrol Simülasyonları

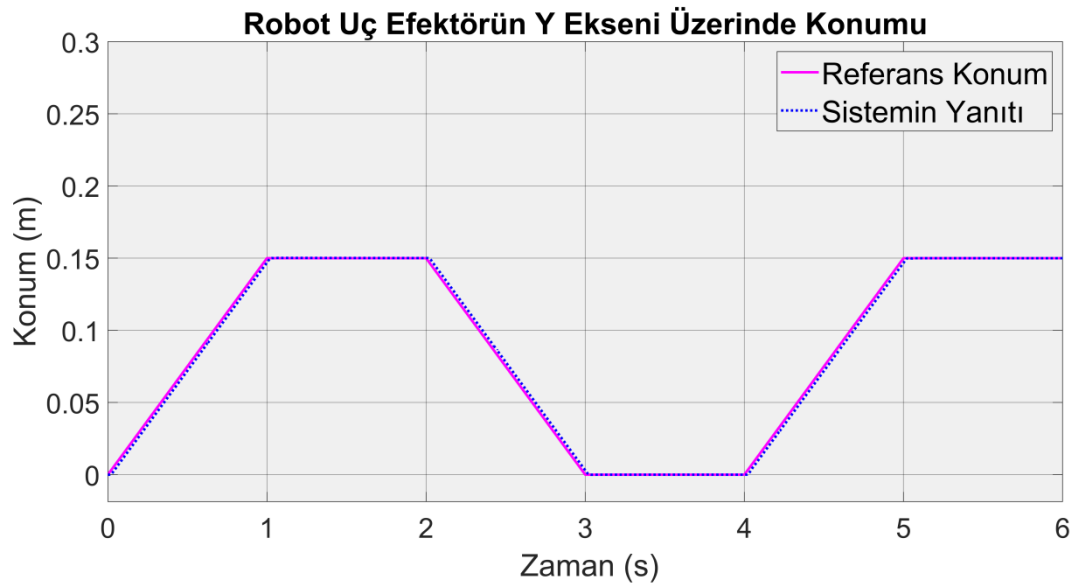
P.I.D kontrol yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. P.I.D kullanım alanlarından birisi robot kolları ve otomasyondur. Endüstriyel otomasyonun bir bölümü olan altı eksenli robot kollarında her bir eklem için ayrı P.I.D kontrolü kullanılması tercih edilmektedir. Kontrolörün sonuçlarını incelemek üzere robot kol uç efektörü için belirli bir yörünge çizilerek bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiş ve sistemin performansı analiz edilmiştir. Robot kolu için P.I.D kontrolörü kullanılmıştır. Şekil 5.3'te görüldüğü üzere 6 eksenli robot kol uç efektörün hedef yörüngenin X eksenine göre konumun ters kinematik kontrol sistemi ve ileri kinematikten geçtikten sonra X ekseninde sistemin yanıtı, referans olan konumun X eksenine karşılaştırılmıştır ayrıca grafik yakından incelendiğinde P.I.D kontrol sinyali oluşturduğu şekil 5.4'te gösterilmiştir. şekil 5.5'te robot uç efektörünün Y ekseninde referans konumu ve sistemin yanıtı karşılaştırılmıştır, şekil 5.6'da ise robot uç efektörünün Z ekseninde referans konumu karşılaştırılmıştır ve aradaki fark grafik şeklinde gösterilmiştir. Şekil 5.3, şekil 5.5 ve şekil 5.6'da görüldüğü üzere hata payı oldukça düşüktür, sistem yanıtı ise referans konuma yakındır.



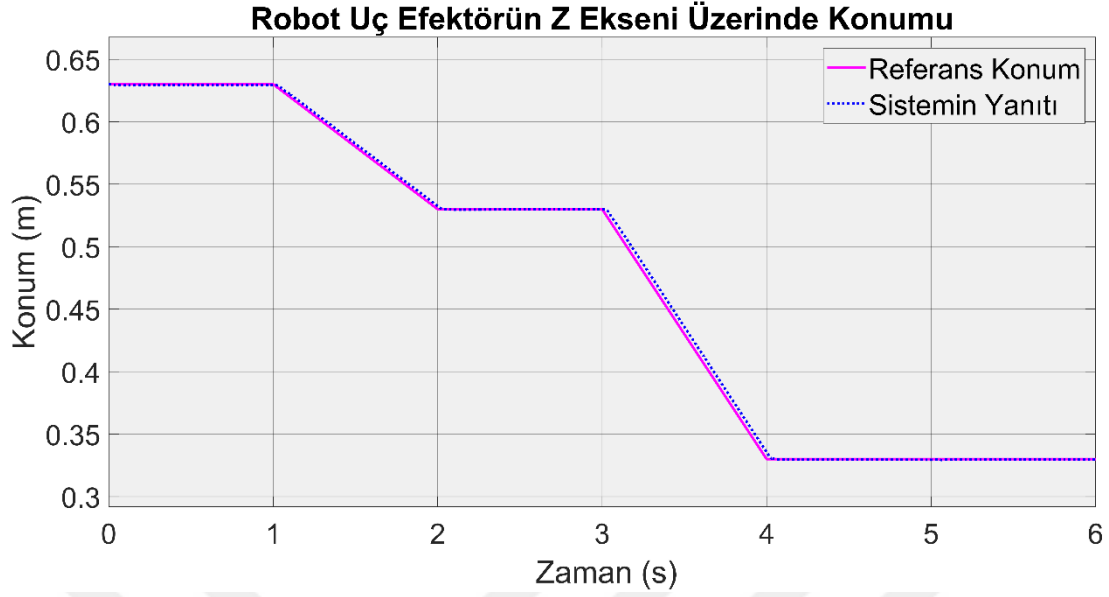
Şekil 5.3 Robot uç efektörün X ekseninde referans konum ve sistemin yanıtı.



Şekil 5.4 Robot uç efektörün X ekseninde P.I.D sinyali.

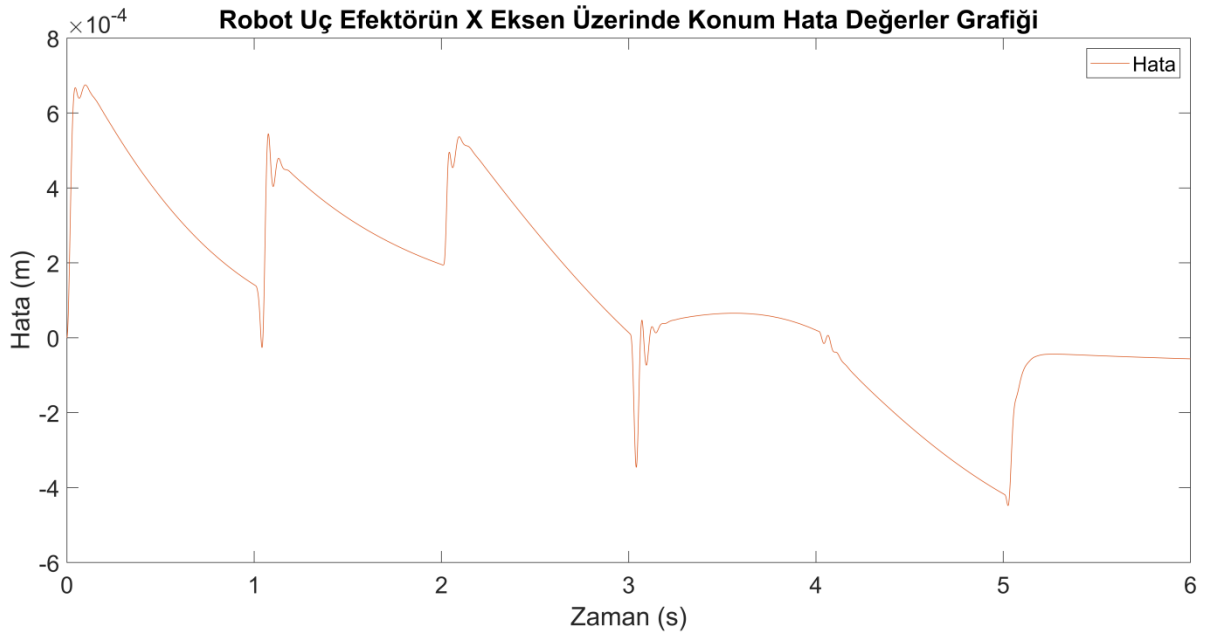


Şekil 5.5 Robot uç efektörün Y ekseninde referans konum ve sistemin yanıtı.

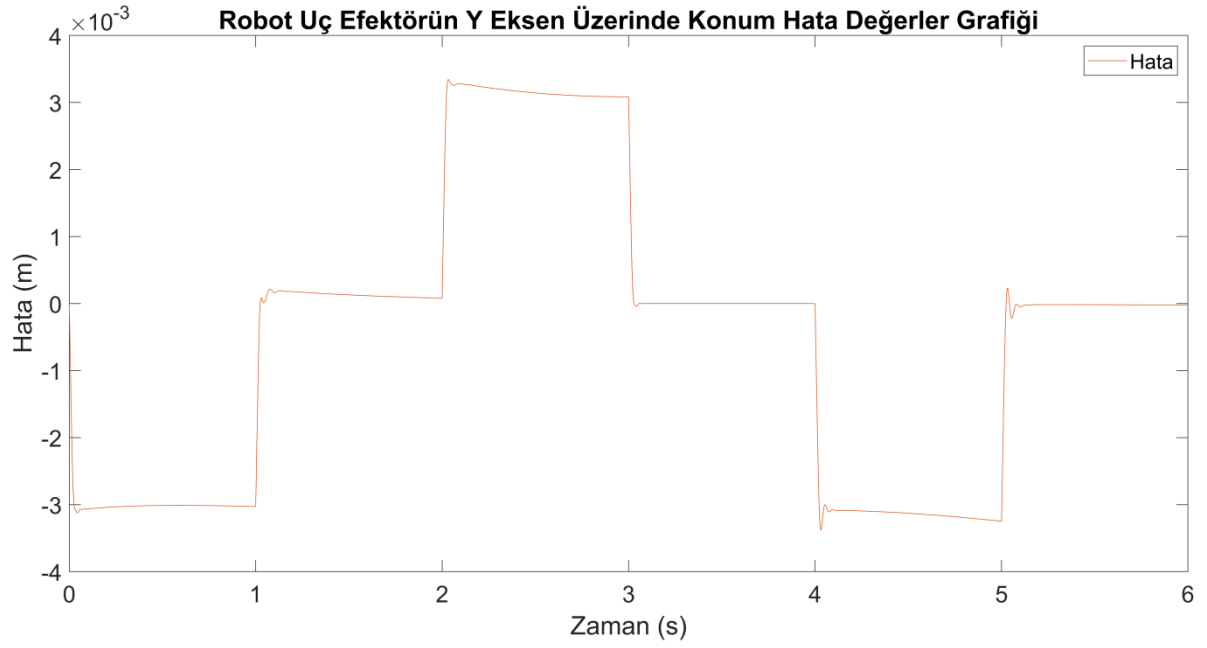


Şekil 5.6 Robot uç efektörün Z eksen üzerinde referans konum ve sistemin yanıtı.

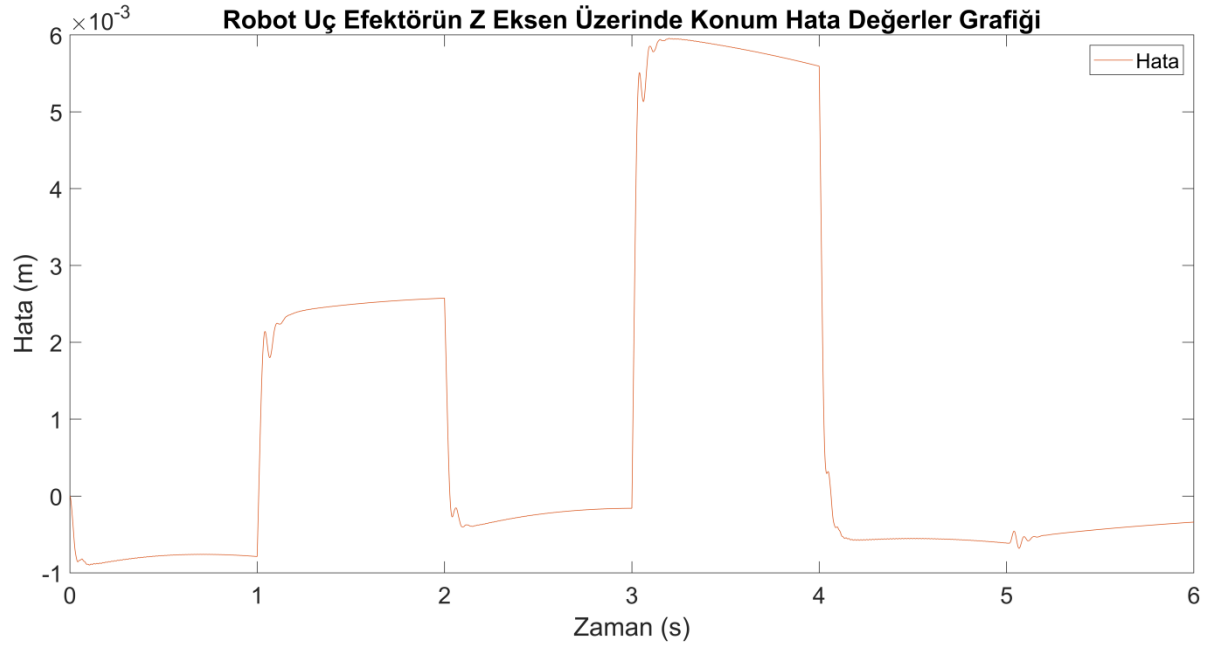
Robotun kontrol sonuçlarını ölçmek için ayrıca hata değerleri incelenmiştir ve grafikte çizilmiştir. Şekil 5.7'de robot uç efektörün X eksen üzerinde konum hata değerler grafiği, şekil 5.8'de robot uç efektörün Y eksen üzerinde konum hata değerler grafiği, şekil 5.9'da robot uç efektörün Z eksen üzerinde konum hata değerler grafiği gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Robot uç efektörün X eksen üzerinde konum hata değerler grafiği.



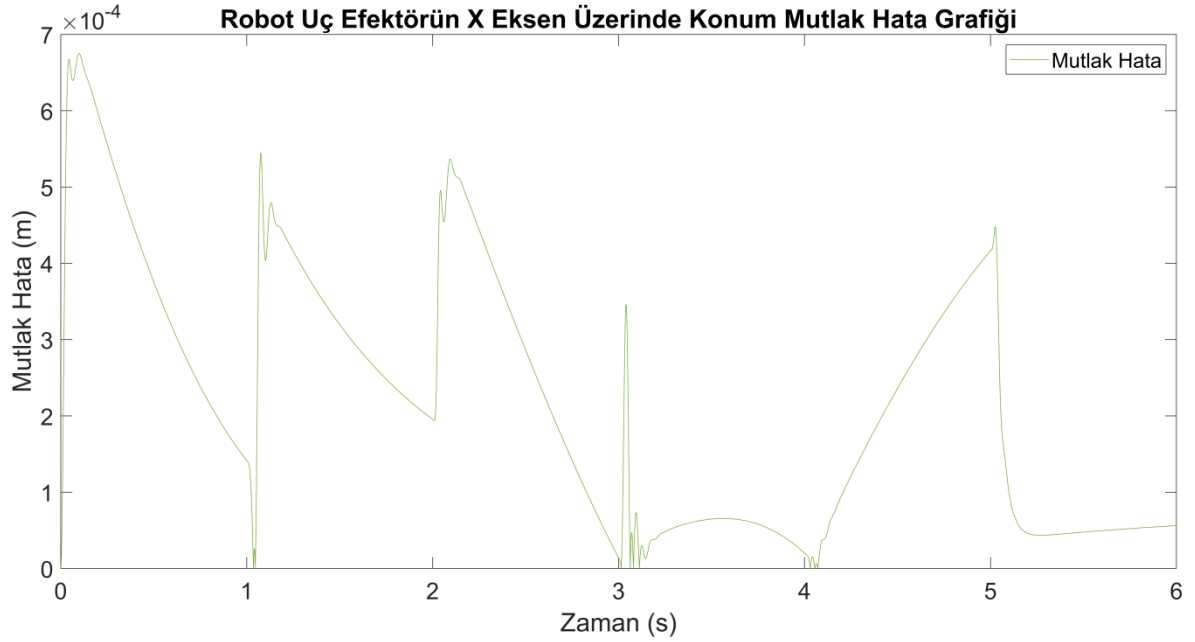
Şekil 5.8 Robot uç efektörün Y eksen üzerinde konum hata değerler grafiği.



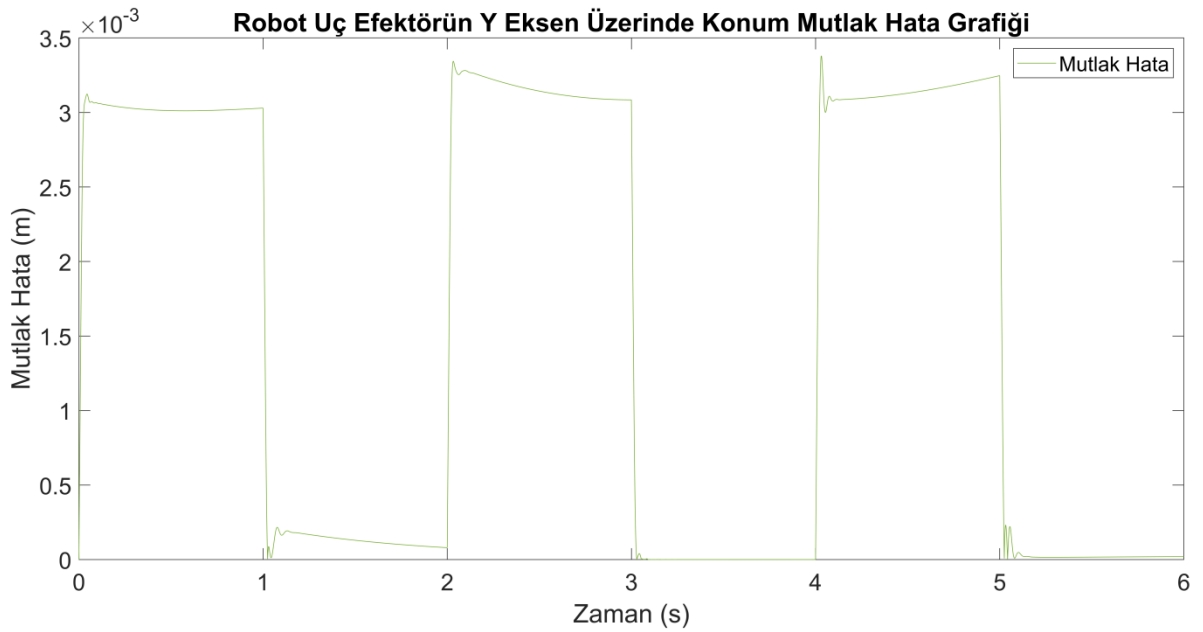
Şekil 5.9 Robot uç efektörün Z eksen üzerinde konum hata değerler grafiği.

Ayrıca sistemin sonuçlarını test etmek amacıyla uç efektörün eksenlere göre mutlak hata değerler bulunup grafik üzerinde çizilmiştir. Şekil 5.10'da robot uç efektörün X eksen

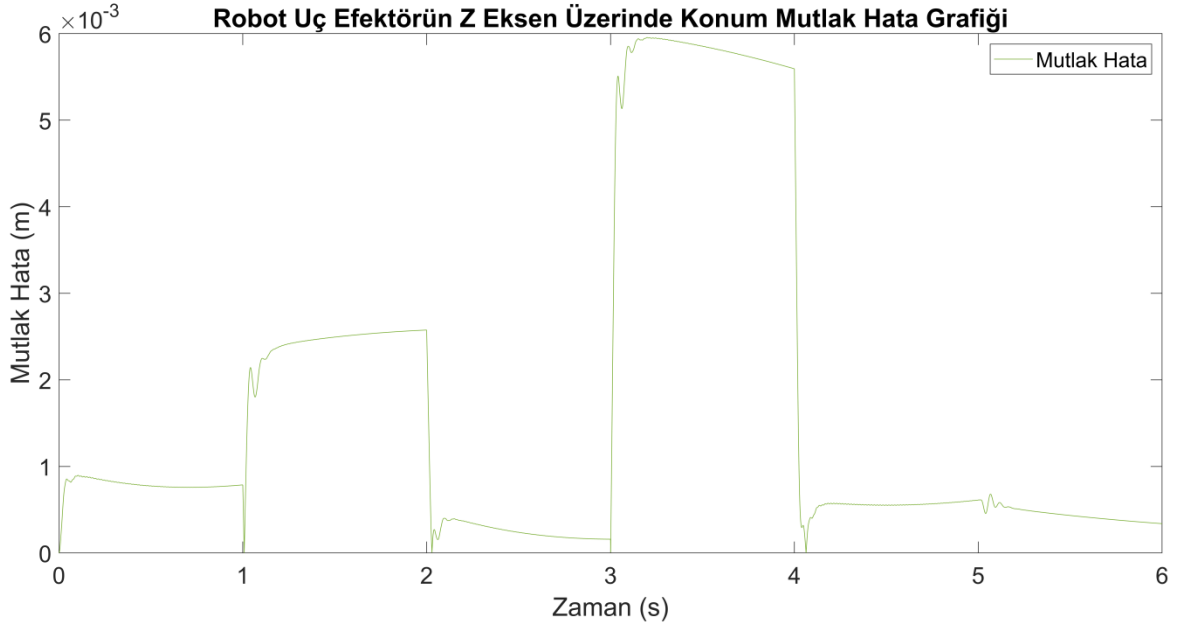
üzerinde konum mutlak hata değerler grafiği, şekil 5.11’de robot uç efektörün Y eksen üzerinde konum mutlak hata grafiği, Şekil 5.12’de robot uç efektörün Z eksen üzerinde konum mutlak hata grafiği gösterilmiştir.



Şekil 5.10 Robot uç efektörün X eksen üzerinde konum mutlak hata grafiği.



Şekil 5.11 Robot uç efektörün Y eksen üzerinde konum mutlak hata grafiği.



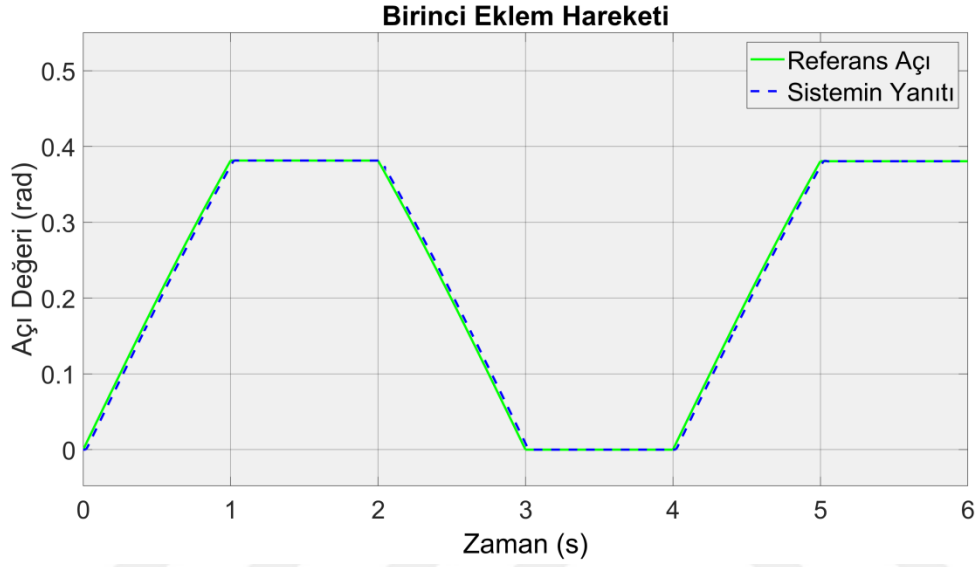
Şekil 5.12 Robot uç efektörün Z eksen üzerinde konum mutlak hata grafiği.

Al Musawi (2016), yapay sinir ağları (YSA) tabanlı kontrol sistemini yeni bir yaklaşımla tasarlamıştır, yaygın olarak kullanılan YSA kontrol mimarisini altı eksenli cerrahi robot koluna entegre etmiştir ve bu robot kolun çıktıları önerilen mimarinin çıktılarıyla karşılaştırmıştır, önerilen mimarinin eksenlere göre yüzde hata ortalamaları $x=0,17$, $y=0,36$, $z=0,12$ olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.1'de görüldüğü üzere P.I.D tabanlı robot kolu kontrol sistemin sonuçları gösterilmiştir. Diğer çalışmada YSA tabanlı kontrol sistemleri kullanılmıştır, bu çalışmada P.I.D kontrolü kullanılarak benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

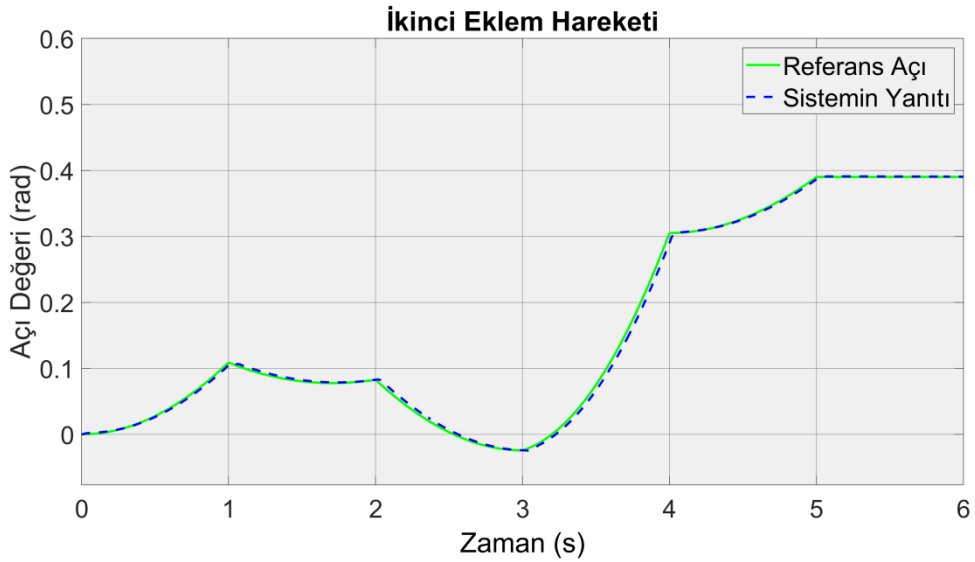
Çizelge 5.1 Eksenlere göre hata değerleri.

Eksen	Ortalama Mutlak Hata	Ortalama Karesel Hata	Kök Ortalama Kare Hatası	Yüzde Hata Ortalaması
X	$2,4784 \times 10^{-4}$	$9,5156 \times 10^{-8}$	$3,0847 \times 10^{-4}$	$3,68 \times 10^{-2}$
Y	$1,8 \times 10^{-3}$	$5,5133 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$7,12 \times 10^{-2}$
Z	$1,8 \times 10^{-3}$	$7,34 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-3}$	$2,392 \times 10^{-1}$

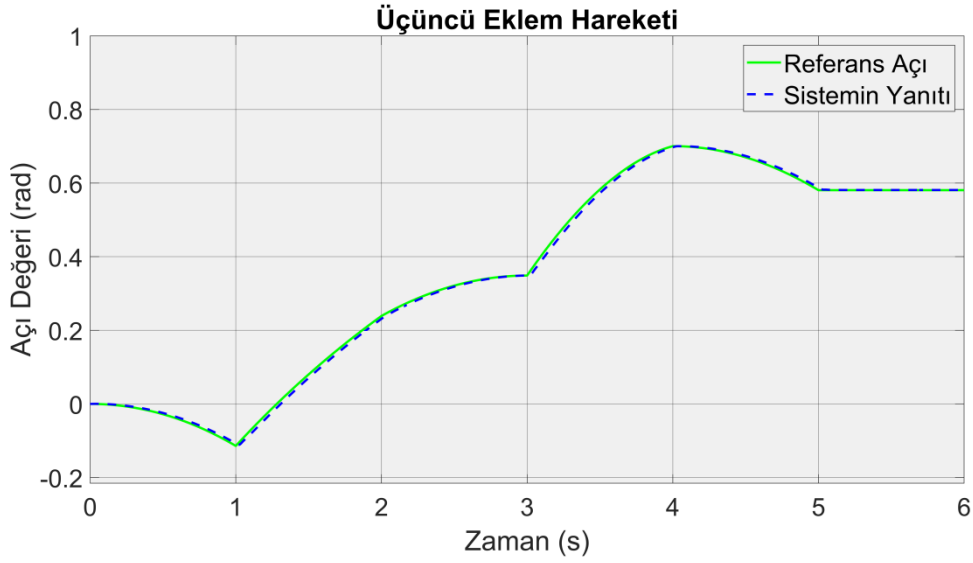
6 eksenli robot kollarında konum analizi için ilk üç eklem dikkate alınırken diğer eklemler yönelim söz konusu olduğunda dikkate alınabilir. Bu çalışmada kullanılan robot kolun ilk üç eklemin kontrolü oldukça iyi sonuçlar göstermiştir. Birinci eklemin hareket grafiği şekil 5.13'te ikinci eklemin hareket grafiği, şekil 5.14'te, üçüncü eklem hareket grafiği ise şekil 5.15'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13 Birinci eklem referans hareketi ve sistemin yanıtı.



Şekil 5.14 İkinci eklem referans hareketi ve sistemin yanıtı.



Şekil 5.15 Üçüncü eklem referans hareketi ve sistemin yanıtı.

Robot bilimi son yıllarda yaygın bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu tez çalışmasında robot manipülatörü iki farklı açıdan incelenmiştir, robot kolunun kinematik analizi yapıldıktan sonra kontrol sistemlerin sonuçları tartışılmıştır. Kinematik analiz süreci ileri kinematik ve ters kinematik modellemesini içerir. Yüksek performans sağlamak ve hataları azaltmak için robot hareketine kontrol sağlamak amacıyla P.I.D kullanılmıştır, hız değerini dahil ederek kontrol sistemi optimize edilmiştir.

Robot modelleme adımlarını sıralamak gerekirse; önce DH parametreleri kullanarak döner eklemlere sahip robot manipülatörü için ileri ve ters kinematik denklemleri bulunmuştur daha sonra DC motorun matematiksel modeli tasarlanmıştır, son olarak robot manipülatörü kontrolünü sağlamak için P.I.D kontrol sistemi entegre edilmiştir.

Otomasyon alanında robot manipülatörleri giderek daha önemli hale gelmiştir. Aktüatörü doğru ve güvenilir bir şekilde kontrol etmek için çok sayıda kontrolör bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında aktüatör olarak DC motorun kontrolü için P.I.D seçilmiştir.

6. BULGULAR ve ÖNERİLER

Modern çağın ortaya çıkardığı araştırma ve geliştirme faaliyetleri insanın hayatını oldukça olumlu yönde geliştirmiştir, bu gelişmelerden birisi otomoasyon alanında robot kollarının üzerinde yapılan geliştirme faaliyetleridir. Robot kolları savunma sanayii ve uzay alanlarında yer aldıkları gibi çeşitli alanlara da girip kritik rol kazanmıştır. Bu çalışmada ters kinematik bazında X eksen için $1,05 \times 10^{-10}$, Y eksen için $5,05 \times 10^{-11}$, Z eksen için ise $1,58 \times 10^{-10}$ ortalama hata değerine sahiptir P.I.D kontrol sistemi ve servomotor entegreli ters kinematik sisteminde ise X eksen bazında ortalama yüzde hata $3,68 \times 10^{-2}$, Y eksen bazında ortalama yüzde hata $7,12 \times 10^{-2}$, Z eksen bazında ortalama yüzde hata ise $2,39 \times 10^{-1}$. Robot kolları için kontrol sistemiyle iyi sonuçlar elde edilmesi oldukça önemlidir. P.I.D kontrol sistemine bulanık mantık eklenerek daha yüksek performans ve daha düşük hatalar elde edilmesi denenebilir. Eklemlerin sayısını yükseltip kinematik analizi yapılması ve ardından kontrol sistemin optimize edilmesi, robot kolunun imal edilmesi ve aynı yörünge için sonuçların karşılaştırılması veya farklı tiplerde robot kollarına aynı kontrol sistemi entegre edilmesi ve sonuçların karşılaştırılması önerilmektedir.

Karmaşık kinematik analizinde alternatif bir yöntem geliştirerek robot kolun kinematik analizini daha basit hale getiren sistem geliştirilebilir ve bu sistemin ayrıca farklı sayıda eklemler için uygun olarak tasarlanması önerilmektedir.

Aynı kontrol sistemi denizaltı sistemler, savunma sanayi, spor ekipmanları, farklı sistemlere entegre ederek aynı kontrol sistemin robot harici sistemlerde ortaya çıkardığı sonuçları hesaplanması önerilmektedir.

Altı eksenli robot kolun son efektör olarak gripper (tutucu) seçilmesi ardından kinematik analiz yapılması önerilmektedir.

Bu çalışmada ayrıca incelenen robot koluna benzer birden fazla robot kolu birleştirilerek paralel robot kolu geliştirilmesi önerilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Adeagbo I M A, Solomon I D, Idowu P O, Ojo J A, 2021, Design and Fabrication of RF-Controlled Pick and Place Robotic Vehicle, *International Journal of Scientific Engineering and Science*, 5, 18–23.
- Akdoğan E, Adli M A, 2011, The Design and Control of a Therapeutic Exercise Robot for Lower Limb Rehabilitation: Physiotherabot, *Mechatronics*, 21, 509–522.
- Al Musawi A R J, 2016, Haptik Teknoloji Kullanarak Robot Kolunun Denetiminde Öğrenmenin Uygulanması, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 155s, Gaziantep.
- Alagon F J A, Alagon J G, Miano J I, Aleluya E R M, Salaan C J O, PLC-Based Electro-Pneumatic Cylindrical Robot with Color Object Detection and Vacuum End Effector for Material Handling Trainer, *Proceedings of the 2023 IEEE 15th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 2023, November 19–23, Palawan.
- Alagon F J A, Alagon J G, Miano J I, Aleluya E R M, Salaan C J O, Simulation of Motion Control of a Cylindrical Robot Manipulator, *Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on System Integration and Smart Technologies (SIST)*, 2024, May 15–17, Astana.
- Alizadeh H V, Mahjoob M J, Effect of Incremental Driving Motion on a Vision-Based Path Planning of a Spherical Robot, *Second International Conference on Computer and Electrical Engineering*, 2009, December 28–30, Dubai.
- Anonim, 2005, World Robotics, International federation of robotics (IFR), Geneva.
- Allison J, Arena J D, Solving the Reconfigurable Design Problem for Multiability With Application to Robotic Systems, *ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2014, August 17–20, New York.
- Aparnathi R, Dwivedi V V, 2014, The Novel of Six axes Robotic Arm for Industrial Applications, *International Journal of Robotics and Automation*, 3, 161–167.

- Barbosa W S, Gioia M M, Natividade V G, Wanderlay R F F, Chaves M R, Gouvea F C, vd., 2020, Industry 4.0: examples of the use of the robotic arm for digital manufacturing processes, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14, 1569–1575.
- Barnett J, Duke M, Au C K, Lim S H, 2020, Work distribution of multiple Cartesian robot arms for kiwifruit harvesting, *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, Article number 105202.
- Bavesh Ram S, Gokulraj V A, Chirranjeavi M, Aaruran S, Harikumar M E, Transhumeral Sensory System to Control Robotic Arm, 2023 IEEE International Conference on Distributed Computing VLSI Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER), 2023, August 23–24, Mangalore.
- Borase R P, Maghade D K, Sondkar S Y, Pawar S N, 2021, A review of PID control tuning methods and applications, *International Journal of Dynamics and Control*, 9, 818–827.
- Cammarata A, 2015, Optimized Design of a Large-Workspace 2-Dof Parallel Robot for Solar Tracking Systems, *Mechanism and Machine Theory*, 83, 175–186.
- Cesconeto E M, Perondi E A, 2019, Development of a Hydraulic Robotic Arm – Determination of The Kinematic Parameters, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 505, 537–544.
- Chanal H, Guyon J B, Koessler A, Dechambre Q, Boudon B, Blaysat B, vd., 2021, Geometrical defect identification of a SCARA robot from a vector modeling of kinematic joints invariants, *Mechanism and Machine Theory*, 162, Article number 104339.
- Chaturvedi R, Islam A, Sharma K, 2020, Anticipated Investigation of a Cylindrical Robot ARM by Means of Compound Materials, *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, 7, 736–745.
- Chen C T, Liao T T, 2011, A Hybrid Strategy for the Time- and Energy-Efficient Trajectory Planning of Parallel Platform Manipulators, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27, 72–81.

- Chen G, Yang Y, Zhai L, Zou K, Yang Y, 2012, SCARA robot control system design and trajectory planning: A case study, *Advances in Electrical Engineering and Automation*, 139, 171–176.
- Chen Y, 2019, *Introduction to Programming Languages: Programming in C, C++, Scheme, Prolog, C#, and Python*, 6th edition, Kendall Hunt Publishing Company, 400s, Dubuque.
- Chen Z, Li S, Zhu K, Li S, Chen H, Optimization of Hydraulic Robot Arm Motion Control Algorithm Based on Neural Network Algorithm, 2024 IEEE 4th International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), 2024, May 24–26, Changchun.
- Chen Z, Xie S, Zhang X, 2022, Position/force visual-sensing-based robotic sheetlike peg-in-hole assembly, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, Article number 3500711.
- Chi M, Chang S, Guo Z, Huang S, Li Z, Li J, Research on Target Recognition and Grasping of Dual-arm Cooperative Mobile Robot Based on Vision, 2024 International Symposium on Intelligent Robotics and Systems (ISoIRS), 2024, June 14–16, Changsha.
- Cihangir F, 2024, Entegre Destek Mekanizmasına Sahip Bir Robot Kolu Tasarımı ve Geliştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 98s, İstanbul.
- Collins F, Yim M, Design of a Spherical Robot Arm with The Spiral Zipper Prismatic Joint ,2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016, May 16–21, Stockholm.
- Cui Q, Ning J, Guo X, Design and Research of a New Intelligent Handshake Robot based on the Perspective of the Science Popularization, 2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2024, May 25–27, Xi'an.
- Das M T, Dülger L C, 2005, Mathematical modelling, simulation and experimental verification of a scara robot, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13, 257–271.

- Deng L, Sun S, Christie M D, Li W, Donghong Ning, Haiping Du, vd., 2022, Innovative variable stiffness and variable damping magnetorheological actuation system for robotic arm positioning, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 34, 123–137.
- Descartes R, 2003, *Discourse on the Method, Optics, Geometry, and Meteorology*, Çev.: John Veitch, Hackett Publishing Company, 224s, Indianapolis.
- Descartes R, 2009, Discourse on the method of rightly conducting the reason, and seeking truth in the sciences, *Annals of Neurosciences*, 16, 17–21.
- Dong Y, Yu Z, Chen X, Zhu X, Wang C, Gergondet P, 2023, Bimanual Continuous Steering Wheel Turning by a Dual-Arm Robot, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 29, 1773–1784.
- Fateh M M, Farahani S S, Khatamianfar A, 2010, Task space control of a welding robot using a fuzzy coordinator. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 8, 574–582.
- Fenucci A, Indri M, Romanelli F, An Off-Line Robot Motion Planning Approach for the Reduction of the Energy Consumption, 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2016, September 06–09, Berlin.
- Gamaralalage S, Jesus P, Šormaz D, 2018, Conversion of the SCARA robot into a hybrid manufacturing workstation, *Procedia Manufacturing*, 17, 62–69.
- Gosselin C M, St-Pierre E, Gagné M, 1996, On the Development of the Agile Eye, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 3, 29–37.
- Groover M P, Weiss M, Nagel R N, Odrey N G, Dutta A, 2012, *Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications*, 4th Edition, Tata McGraw-Hill, 546p, New York.
- Groover M P, Zimmers E W, 2003, *CAD/CAM: Computer-Aided Design and manufacturing*, Prentice-hall, 512p, Englewood Cliffs.
- Hájek P, 1998, *Metamathematics of Fuzzy Logic* First Edition, Springer Science & Business Media, Dordrecht.

- Halme A, Schönberg T, Wang Y, Motion control of a spherical mobile robot, Proceedings of 4th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 1996, March 18–21, Mie.
- He H, Li Y, Chen J, Guo Y, Bi X, Dong E, A Human-Robot Interaction Dual-Arm Robot System For Power Distribution Network, 2023 China Automation Congress (CAC), 2023, November 17–19, Chongqing.
- He Y, Mai X, Cui C, Gao J, Yang Z, Zhang K, 2019, Dynamic Modeling, Simulation, and Experimental Verification of a Wafer Handling SCARA Robot with Decoupling Servo Control, IEEE Access, 7, 47143–47153.
- Holthöwer J, van Doorn J, 2022, Robots do not judge: Service robots can alleviate embarrassment in service encounters, Journal of the Academy of Marketing Science, 54, 767–784.
- Horne B, Jamshidi M, Vadić N, 1990, Neural Networks in Robotics: A Survey, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 3, 51–66.
- Hosseini S, Hahn I, On Experimental Energy Consumption Estimation of a 6-DoF Industrial UR3e Robot Arm Manipulator in Trajectory Planning, 2024 33rd IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 2024, August 26–30, California.
- Hsu P E, Hsu Y L, Lu J M, Tsai J H, Chen Y S, iRW: An Intelligent Robotic Wheelchair Integrated with Advanced Robotic and Telehealth Solutions, Asia Pacific eCare and TeleCare Congress, 2011, June 16–19, Hong Kong.
- Hua C, Guan X, Duan G, 2004, Variable Structure Adaptive Fuzzy Control for a Class of Nonlinear Time-Delay Systems, Fuzzy Sets and Systems, 148, 453–468.
- Ider S K, 2005, Inverse Dynamics of Parallel Manipulators in the Presence of Drive Singularities, Mechanism and Machine Theory, 40, 33–44.
- Jain R, Zafar M N, Mohanta J C, 2019, Modeling and Analysis of Articulated Robotic Arm for Material Handling Applications, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 691, Article number 012010.

- Joshi V A, Banavar R N, 2009, Motion analysis of a spherical mobile robot, *Robotica*, 27, 343–353.
- Joshi V A, Banavar R N, Hippalgaonkar R, 2010, Design and analysis of a spherical mobile robot, *Mechanism and Machine Theory*, 45, 130–136.
- Ju F, Ju H, Jie Z, A Kinematic Decoupling Whole-body Control Method for a Mobile Humanoid Upper Body Robot, 2023 International Conference on Frontiers of Robotics and Software Engineering (FRSE), 2023, June 16–18, Changsha.
- Ju Y, Yu M, An Innovative Inverse Kinematics for Bionic Robot Arms Based on Directional Tangent Matrix, 2023 2nd International Conference on Automation, Robotics and Computer Engineering (ICARCE), 2023, December 14–16, Wuhan.
- Kayacan E, 2010, Modeling and control of spherical rolling robot, *Robotica*, 28, 563–574.
- Khairuddin A K, Mohd Zaman M H, Mohd Zainuri M A A, Ibrahim M F, Dimensional Optimization of Open-Source 4-DoF Robot Arm, 2024 IEEE 15th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), 2024, August 8–9, Shah Alam.
- Ko M S, Wang G N, Shin H S, Park S C, Machine Control Level Simulation of an AS/RS in the Automotive Industry, Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, 2010, December 05–08, Maryland.
- Kozima H, Nakagawa C, Yano H, 2004, Can a robot empathize with people?, *Artificial Life and Robotics*, 8, 83–88.
- Kramer A K, Anderson M, A PIC18 Robot-Centered Microcontroller Systems Laboratory, IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), 2011, October 12–15, South Dakota.
- Lee C C, 1990, Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller—Part I, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 20, 404–418.

- Lee J K, Stiehl W D, Toscano R, Breazeal C, 2009, Semi-Autonomous Robot Avatar as a Medium for Family Communication and Education, *Proceedings of Advanced Robotics*, 23, 1925–1949.
- Li Z, Li S, Luo X, 2024, A novel machine learning system for industrial robot arm calibration, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 71, 2364–2368.
- Licitra G, Bürger A, Williams P, Ruiterkamp R, Diehl M, 2018. Optimal input design for autonomous aircraft. *Control Engineering Practice*, 77, 15–27.
- Lin I H, Liu C Y, Chen L C, Evaluation of Human-Robot Arm Movement Imitation, 2011 8th Asian Control Conference (ASCC), 2011, May 15–18, Kaoshiung.
- Liu J, Jian F, Liu J, Four Degrees of Freedom SCARA Robot Modeling and Simulation, 2014 International Symposium on Computer, Consumer and Control, 2014, June 10–12, Taichung.
- Liu Q, Nie Z, Gong Z, Liu X J, 2023, An omnidirectional transportation system with high terrain adaptability and flexible configurations using multiple nonholonomic mobile robots, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8, 6060–6067.
- Liu Y, Huang Q, Zhang P, Yan M, Liang D, Kong L, Design and Development of the Dual-Arm Robot DARO, 2023 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA), 2023, August 19–19, Beijing.
- Mahboubbeh I, 2022, Modeling and Control of 4DOF Robot Arm, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 83s, Muğla.
- Merlet, J.-P. (2006). *Parallel Robots*, 2nd edition, Springer, Dordrecht.
- Michaud F, Laplante J F, Larouche H, Duquette A, Caron S, Letourneau D, vd., 2005, Autonomous Spherical Mobile Robot for Child-Development Studies, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 35, 471–480.

- Muir F P, Neuman P C, 2007, Pulsewidth Modulation Control of Brushless DC Motors for Robotic Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 32, 222–229.
- Mukharjee R, Minor M A, Pukrushpan J T, 2002, Motion Planning for a Spherical Mobile Robot: Revisiting the Classical Ball-Plate Problem, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 124, 502–511.
- Müftü S, 2023, İki Uzunlu Bir Robot Kolunun Pozisyon Kontrolü için Optimize Edilmiş PID Kontrolcü Tasarımı, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 81s, Konya.
- Nash J Z, Bond J, Case M, Michael Case, McCarthy I, Mowat R, vd., 2021, Tracking the fine scale movements of fish using autonomous maritime robotics: A systematic state of the art review. Ocean Engineering, 229, Article number 108650.
- Nehmzow U, 2003, Mobile Robotics: a practical introduction, Springer Nature, Berlin.
- Niku S B, 2011, Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications 2nd edition, John Wiley & Sons, 480p, New Jersey.
- Onart F, 2024, 6 Eksenli Endüstriyel Robot Kolunun Biyoyazıcıya Dönüştürülmesi ve PDMS ile Organ Modellerinin Basılması, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 60s, Adana.
- Osawa H, Tobita K, Kuwayama Y, Imai M, Yamada S, Behavioral Turing Test using Two-axis Actuators, 2012 IEEE RO-MAN: The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2012, September 9–13, Paris.
- Pan S, Li J, Fan J, Zhu X, 2024, Robot manipulator tracking control with conquering joint physical limits at angle and velocity layers based on different-layer equivalency technique, Applied Mathematical Modelling, 128, 220–241.
- Parker S P, 1988, McGraw-Hill Encyclopedia of Electronics and Computers 2nd edition, McGraw-Hill, 1047p, New York.

- Pedrycz W, 1993, Fuzzy Control and Fuzzy Systems, 2nd edition, Research Studies Press Ltd., Chichester.
- Poole H H, 1989, Fundamentals of Robotics Engineering 1st edition, Springer, 436p, New York.
- Rachedi M, Hemici B, Bouri M, 2015, Design of an H_{∞} Controller for the Delta Robot: Experimental Results, Advanced Robotics, 29, 1165–1181.
- Ramdoun Y, 2024, Endüstriyel Robot Kolunun Kinematiği, Dinamik Hesaplamaları, Yörünge Planlaması, PID ve Bulanık Mantık ile Kontrolü, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 72s, Elâzığ.
- Ramesh M, Yadav A K, Pathak P K, 2022, Artificial Gorilla Troops Optimizer for Frequency Regulation of Wind Contributed Microgrid System, Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 18, Article number 011005.
- Sahu P K, Balamurali G, Mahanta G B, Biswal B B, 2019, A Heuristic Comparison of Optimization Algorithms for the Trajectory Planning of a 4-axis SCARA Robot Manipulator, Advances in Intelligent Systems and Computing, 711, 569–582.
- Saygılı Ç, 2006, Scara Tipi Bir Robotun Tasarımı ve Animasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- SCARA robots system with uncertainty and experimental validation, Control Engineering Practice, 135, Article number 105610.
- Schreiber R R, 1983, Robot Vision: An Eye to the Future, Robotics Today, 5, 53–57.
- Serrezuela R R, Chavarro A F C, Cardoso M A T, Toquica A L, Martinez L F O, 2017, Kinematic Modelling of a Robotic Arm Manipulator Using Matlab, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 12, 2037–2045.
- Shariatee M, Akbarzadeh A, Mousavi A, Alimardani S, Design of an Economical Scara Robot for Industrial Applications, 2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2014, October 15–17, Tehran.

- Shi L, Guo S, Mao S, Yue C, Li M, Asaka K, 2013, Development of an amphibious turtle-inspired spherical mother robot, *Journal of Bionic Engineering*, 10, 446–455.
- Singh B, Sellappan N, Kumaradhas P, 2013, Evolution of Industrial Robots and their Applications, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3, 763–768.
- Singh D, Choudhury R, Singh Y, Mukherjee M, 2021, Workspace Analysis of 3-DOF U-Shape Base Planar Parallel Robotic Motion Stage Using Shape Memory Alloy Restoration Technique (SMART) Linear Actuators, *SN Applied Sciences*, 3, Article number 511.
- Soto F, Wang J, Ahmed R, Demirci U, 2020, Medical robotics: medical micro/nanorobots in precision medicine, *Advanced Science*, 7, Article number 2070117.
- Staicu S, 2009, Dynamics Analysis of the Star Parallel Manipulator, *Robotics and Autonomous Systems*, 57, 1057–1064.
- Su Y T, Li T H S, Chen M X, Lin S J, Yang C Y, Wang C W, 2022, A fully automatic calibration for vision-based selective compliance assembly robot arm and its application to intelligent wafer inspection scheduling. *IEEE Access*, 10, 50100–50113.
- Su Y, Sun H, Jiang Y, Wei L, Deng S, Sun H, A distributed drive articulated robot control system based on steering control strategy, 2024 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2024, August 04–07, Tianjin.
- Su Y, Zheng C, 2017, PID control for global finite-time regulation of robotic manipulators, *International Journal of Systems Science*, 48, 1–12.
- Sutyasadi P, Wicaksono M B, Maneetham D, Improvement Control of a Three Axis Articulated Robotic Arm Using PID Cascade Control, 2023 11th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM), 2023, November 10–11, Makassar.

- Tago Y, Satake Y, Ishii H, 2024, A Novel Soft Climbing Robot With Pneumatic Extendible Arms, IEEE Robotics and Automation Letters, 9, 8667–8673.
- Tian Y, Jiang Y, Huang X, Dan J, Li J, Wang Q, Research on Robot Technology with Fewer Degree of Free for Detecting and Sorting Station, 2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2023, August 06–09, Heilongjiang.
- Tumari M Z, Saealal M S, Rashid W N, Saat S, Nasir M A M, 2017, The Vehicle Steer by Wire Control System by Implementing PID Controller, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, 9, 43–47.
- Turgut Aksoy T, 2024, 6 Serbestlik Dereceli Robot Kolun Ters Kinematik Analizinin Yapay Zeka Yöntemleri ile Gerçekleştirilmesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine ve İmalat Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 47s, Manisa.
- Türe K, 2023, Pnömatik Yapay Kaslı 3 Serbestlik Dereceli Robot Kolun Yapay Sinir Ağları ile Konum Kontrolü, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 77s, Zonguldak.
- Uçar K, 2022, Robot Kolu ile Hareketli Nesnenin Segmentasyonu ve Kavranması için Derin Öğrenme Tabanlı Bir Yaklaşım, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Doktora Tezi, 111s, Konya.
- Velagić J, Alispahić I, Osmanović A, Design and Development of Crawling Mobile Robot with 2-DOF Robot Arm, 2023 International Symposium ELMAR, 2023, September 11–13, Zadar.
- Verma V, Gupta A, Gupta M K, Chauhan P, 2020, Performance Estimation of Computed Torque Control for Surgical Robot Application, Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 14, 7017–7028.
- Vischer P, Clavel R, 1998, Kinematic Calibration of the Parallel Delta Robot, Robotica, 16, 207–218.
- Wang F, Chen F, Yang X, Yong Q, Dong Y, Zhang X, Integrating Sensor Fusion for Teleoperation Control of Anthropomorphic Dual-Arm Robots, 2023 WRC

- Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA), 2023, August 19–19, Beijing.
- Wang T, Chen B, Zhang Z, Li H, Zhang M, 2022, Applications of machine vision in agricultural robot navigation: A review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, Article number 107085.
- Wang Y, Li H, Zhao Y, Chen X, Huang X, Jiang Z, 2023, A Fast Coordinated Motion Planning Method for Dual-Arm Robot Based on Parallel Constrained DDP, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 29, 2350–2361.
- Weck M, Staimer D, 2002, Parallel Kinematic Machine Tools – Current State and Future Potentials, *CIRP Annals*, 51, 671–683.
- Widayaka P D, Puspitaningayu P, Alamsyah S A, Muktiadji R F, Widodo A, Abdillah R, Design and Implementation of 2-DOF Arm Manipulator Robot as Robotic Kinematic Learning Platform, 2023 Sixth International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE), 2023, October 14–15, Surabaya.
- Wiktor P, 2021, Coupled Cartesian Manipulators, *Mechanism and Machine Teory*, 161, Article number 103903.
- Xiong F, Liu Z, Huang K, Yang X, Qiao Hong, Hussain A, 2020, Encoding primitives generation policy learning for robotic arm to overcome catastrophic forgetting in sequential multi-tasks learning, *Neural Networks*, 129, 163–173.
- Yılmaz A, Demir B, 2024, Optimization of Renewable Energy Systems Using Machine Learning Techniques, *Proceedings of the 2024 International Conference on Advanced Energy Conversion Technologies (ICAECOT)*, 01-03 October, Setif.
- Ylikorpi T J, Halme A J, Forsman P J, 2017, Dynamic modeling and obstacle-crossing capability of flexible pendulum-driven ball-shaped robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 87, 269–280.
- Yu H, Guan Z, Chen T, Yamamoto T, 2020, Design of data-driven PID controllers with adaptive updating rules, *Automatica*, 121, Article number 109185.

- Yuan W, Qian H, Xiao B, Adaptive Compliance Control of Dual-arm Robot for Cooperative Handling Task, 2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2024, May 25–27, Xi'an.
- Zhang C, Yang J, 2020, A History of Mechanical Engineering, Springer 1st edition, 569p, Singapore.
- Zhang D, Wei B, 2017, Mechatronics and Robotics Engineering for Advanced and Intelligent Manufacturing 1st edition, Springer, 468p, Cham.
- Zhang H, Zhu X, Yang M, Liu Z, Cai C, 2025, A deep learning approach for pose error prediction in parallel robots, Measurement, 242, Article number 115815.
- Zhang L, Li H, Wang J, 2024, A Novel Control Strategy for Improving Efficiency in Wireless Power Transfer Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 71, 1234–1245.
- Zhang Q, Jia Q, Sun H, Gong Z, Application of a Genetic Algorithm based PI Controller in a Spherical Robot, 2009 IEEE International Conference on Control and Automation, 2009, December 9–11, Christchurch.
- Zhen S, Meng C, Xiao H, Liu X, Chen Y-H, 2023, Robust approximate constraint following control for SCARA robots system with uncertainty and experimental validationi, Control Engineering Practice, 138, Article number 105610.

İnternet Kaynakları

- 1- https://www.bvn4buy.com/?product_id=110239606_38, 13.02.2024
- 2- https://library.e.abb.com/public/6f866d55894a49a7b44384db76e01b4b/IRB1200_R_OB0275EN_A.pdf, 26.12.2024