



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TIBBİ AYDINLATMADAKİ ELLE AYARLANABİLEN TAVAN
LAMBASININ HAREKETİNİ TAKİP EDEN İKİNCİ BİR AYDINLATMA
BAŞLIĞINI TAŞIYAN ROBOT KOLUN TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nihat ÇABUK

DANIŞMAN

Doç. Dr. Faruk ŞEN

AKSARAY, 2014

T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KABUL ve ONAY BELGESİ

Nihat ÇABUK'un "Tıbbi Aydınlatmadaki Elle Ayarlanabilen Tavan Lambasının Hareketini Takip Eden İkinci Bir Aydınlatma Başlığını Taşıyan Robot Kolun Tasarımı" başlıklı lisansüstü tez çalışması, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih vesayılı kararı ile oluşturulan aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak **Oy Birliği/Oy Çokluğu** ile kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Doç. Dr. Faruk ŞEN (Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Semih BENLİ (Aksaray Üniversitesi)

Üye : Yrd. Doç. Dr. H. İbrahim DURSUN (Aksaray Üniversitesi)

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.06.2014

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu' nun tarih vesayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Selçuk REİS
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Teknolojinin gelişmesi insanların ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla bağlı olmanın yanında birçok toplumda ihtiyaç gereğinin tersine teknolojik ürünler üretildiği için ihtiyaç hissetme etkisi oluşturmuştur. Daha farklı bir açıdan bakıldığında teknolojik gelişmeler ve ürünler bir toplumun diğerine birçok yönden üstünlük sağlama ve baskı kurmanın temel ögesi haline gelmiştir. Bu nedenle milletler böyle bir yarışın gerisinde kalmanın geleceklerini tehdit altında gördüklerinden olsa gerek teknolojik yarışlara katılmak zorunda hissetmektedirler.

Buna benzer sebeplerdendir ki Türk Milleti olarak bizlerde bu yarışa katılmak zorunda olduğumuzun farkındayız. Bu sebeple üniversitelerimiz katma değeri yüksek olan teknolojik ürünlerin bilimsel temellerini öğrencilere verme ve üretim olanaklarını sağlamaya çalışmaları kaçınılmaz olmuştur. Çeşitli kurum ve kişiler tarafından başlatılan ya da devam ettirilen çalışmalar nihai hedefe ulaşmasa da bir aşama olarak görülüp önemsenmesi gereken bir konu olduğu açıktır.

Ülkemizdeki sayısız çalışmalardan biri olarak bu tez çalışması da başta bahsedilen sebeplerin bir sonucu olduğu da bilinmelidir. Bu tez çalışması hedeflenen sonuçlara belli ölçüde ulaşsa da bu çalışmayı bir aşama olarak görüp daha iyi sonuçlar alınması için devam ettirilmesi gerektiğinin de farkında olduğumu da belirtmek isterim.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın baőlamasında ve tamamlanmasında desteklerini esirgemeyen değerli danıőmanım Doç. Dr. Faruk ŞEN'e (Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi), tez ile ilgili fikirlerini esirgemeyen Doç. Dr. Necmettin ŞAHİN'e (Aksaray Üniversitesi), yüksek lisans eğitimim boyunca derslerini aldığım makine mühendisliğinin değerli akademisyenlerine, çalışma boyunca tezin değerlendirmesinde beni yalnız bırakmayan değerli mesai arkadaőım Öğr. Gör. Veli BAKIRCIOğLU'na (Aksaray Üniversitesi), uzun süren yüksek lisans öğrenimim boyunca sabırla bana destek olan eőime, bu çalıőmadan dolayı fazla zaman ayıramadığım ocuklarım İkbal ve Yusuf Őamil'e teőekkürü borç bilirim.

ÖNSÖZ	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. MALZEME VE YÖNTEM	5
3.1. Robot Tanımı	5
3.2. Robotun Yapısı	6
3.2.1. Robotların sınıflandırılması	7
3.2.1.1. Güç kaynaklarına göre robotlar	9
3.2.1.2. Geometrik şekillerine göre robotlar	9
3.2.1.2.1. Kartezyen robot	9
3.2.1.2.2. Silindirik robot	10
3.2.1.2.3. Scara robot	10
3.2.1.2.4. Döner robot	11
3.2.1.3. Kontrol yöntemlerine göre robotlar	12
3.2.1.3.1. Servo olmayan robotlar	13
3.2.1.3.2. Servo robotlar	13
3.2.1.4. Keskinlik derecesine göre robotlar	14
3.2.1.4.1. Doğruluk	14
3.2.1.4.2. Çözünürlük	15
3.2.1.4.3. Tekraredebilirlik	15

3.2.2. Robotlarda serbestlik derecesi.....	16
3.3. Robotlarda Kullanılan Algılayıcılar.....	17
3.3.1. Robot eklemlerinde kullanılan sensörler.....	18
3.3.1.1. Encoder.....	18
3.3.1.2. Hall-Effect sensörleri.....	19
3.3.1.3. Potansiyometre.....	20
3.3.1.4. Mesafe sensörleri.....	20
3.4. Robotlarda Kullanılan Elektrik Motorları.....	22
3.4.1. AC ve DC servo motorlar.....	23
3.4.2. Motorların seçimi.....	25
3.5. Robotlarda Benzetim.....	26
3.5.1. Çevrimiçi programlama.....	27
3.5.2. Çevrimdışı programlama.....	27
3.6. Robot Dinamiğine İlişkin Tanımlamalar.....	28
3.6.1. Konum.....	29
3.6.2. Yönelim.....	31
3.6.3. Öteleme.....	32
3.6.4. Dönme.....	34
3.6.5. Dönüşüm matrisinin tersini alma.....	37
3.6.6. Ardışık dönüşümler.....	38
3.7. Robot Kolu Kinematığı.....	39
3.7.1. İleri kinematik.....	40
3.7.1.1. Denavit-Hartenberg yöntemi.....	40
3.7.2. Ters kinematik.....	49
3.7.2.1 Analitik çözüm yaklaşımı.....	50
4. TEZ KONUSU OLAN ROBOTUN TASARIMI.....	54
4.1. Tasarlanan Sistemin Öğeleri.....	55
4.1.1. Ameliyathane aydınlatma sistemi.....	55

4.1.2. Master kol.....	57
4.1.2.1. İleri kinematik hesaplamalar.....	58
4.1.2. Slave kol.....	65
4.1.2.1. İleri kinematik hesaplamalar.....	66
4.1.2.2. Ters kinematik hesaplamalar.....	70
4.1.2.2.1. Çözüm kümesi.....	74
4.1.3. Master-Slave kol.....	74
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	79
KAYNAKLAR.....	81
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Tıbbi Aydınlatmadaki Elle Ayarlanabilen Tavan Lambasının Hareketini Takip Eden
İkinci Bir Aydınlatma Başlığını Taşıyan Robot Kolun Tasarımı

Nihat ÇABUK

T.C.

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Faruk ŞEN

İkinci Danışman: Doç. Dr. Necmettin ŞAHİN

Elektrik, elektronik, bilgisayar ve makine gibi alanlarındaki bilimsel gelişmeler robot teknolojisindeki gelişmelere dayanak olmuştur. Robotlar hangi görevleri yapacaklarsa ona göre tasarımları yapılır ve işlevciler uygun şekilde robot üzerine monte edilir. Bu iki durum sonunda robot özel bir görev için çalışmaya başlayabilir.

Bu çalışmada tıbbi operasyonlarda kullanılan konumu elle ayarlanabilen bir aydınlatma başlığına ek olarak farklı bir aydınlatma açısıyla aydınlatma yapmak için ikinci bir aydınlatma başlığını taşıyan robot kol tasarımı yapılmıştır. Bu tip bir çalışma robot uygulamalarında master-slave (efendi-köle) olarak özelleşmiş bir çalışma şeklidir. Master kol ile yapılan aydınlatma bölgesinin üç boyutlu konumu hesaplanır ve bu konuma slave kolun yönelmesi sağlanır. Çalışma sonuçları istenilen seviyede olmasa da master kolun hareketine bağımlı olarak slave kolun otomatik hareket ettiği görülmüştür. Daha uygun sonuçların alınması için sistem üzerinde daha fazla çalışılması gerektiği görülmüştür. Bu çalışmanın tam olarak uygulanabilirliği ve tıbbi sonuçları robotik bilginin yanında tıbbi bir bilgi gerektirdiğinden sonucu tam olarak bilinmemektedir.

2014, 82 Sayfa

Anahtar Kelimeler :Tıbbi aydınlatma, robot kol, kinematik, master-slave

ABSTRACT

Master of Science Thesis

Design of Robot Arm Following Manually Controlling Medical Lighting

Nihat ÇABUK

T.R.

Aksaray University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineer

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Faruk ŞEN

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

Advances in the field of electrical, electronics, computers and machine developments in robot technology have supported developments in robot technology. Robot designs are made according to usage and actuators mounted on the robot in accordance. At the end of these two cases, the robot can begin to work for a specific task.

In this study, a robot arm has been designed. The robot arm follows position manually adjustable medical lighting mechanism. Such application is referred to as master-slave in the robotics. Three dimensional position of lighting area made by master arm is calculated. Then, the slave arm focuses any angle or orientation to the position. This simulation data obtained from the study though not exactly at the desired level it has been observed that movement of the slave arm depending on the movement of the master arm. It was observed that even should be studied on the system to obtain more optimal results. The applicability of such a study in the medical field requires robotics knowledge as well as medical knowledge. So, results in practice are not known exactly according to this study.

2014, 82 Pages

Keywords : Medical lighting, robot arm, kinematic, master-slave

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 3.1. Robot eklemlerinin sembolik gösterimi.....	6
Şekil 3.2. Robot çalışma düzlemleri	6
Şekil 3.3. Bağlanma şekillerine göre robotlar.....	8
Şekil 3.4. Robotik mekanik sistemin soyağacı	8
Şekil 3.5. Kartezyen robot ve çalışma uzayı.....	10
Şekil 3.6. Silindirik robot ve çalışma uzayı	10
Şekil 3.7. Scara robot ve çalışma uzayı	11
Şekil 3.8. Küresel robot ve çalışma uzayı.....	11
Şekil 3.9. Döner robot ve çalışma uzayı	11
Şekil 3.10. Açık çevrimli motor kontrol blok şeması	13
Şekil 3.11. Kapalı çevrimli motor kontrol blok şeması	14
Şekil 3.12. Doğruluk ve uzaysal çözünürlük temsili diyagramı	15
Şekil 3.13. 6-DOF bir endüstriyel robot hareket eksenleri	17
Şekil 3.14. Encodere örnek şekil.....	18
Şekil 3.15. Entegre servo sistemli motor	19
Şekil 3.18. Hall-Effect sensörü a) Motora yerleşmiş hali b) Sensörün yalın hali.....	19
Şekil 3.19. Potansiyometre çeşitleri a) Çizgisel hareketli b) Dairesel hareketli	20
Şekil 3.20. a) Ultrasonik sensör ve dalga yansımaları b) Kızıl ötesi sensör.....	21
Şekil 3.21. a) Kapasitif sensör b) Endüktif sensör.....	22
Şekil 3.22. Daimi mıknatıslı AC servo motor yapısı.....	23
Şekil 3.23. Direct-Drive motor	24
Şekil 3.24. Çevrim dışı programlama ile yapılmış bir çalışma örneği	28
Şekil 3.25. P noktasının {A} koordinat sistemine göre gösterimi	29
Şekil 3.26. P noktasının {A} ve {B} koordinat sistemine göre gösterimi.....	30
Şekil 3.27. {B} koordinat sisteminin {A} koordinat sistemine göre gösterimi.....	30
Şekil 3.28. Merkezleri çakışık iki koordinat sistemi	31
Şekil 3.29. Yönelimleri aynı merkezleri farklı iki koordinat sisteminin gösterimi	33
Şekil 3.30. Yönelimleri ve merkezleri farklı iki koordinat sisteminin gösterimi	33
Şekil 3.31. Robot kol koordinatlarının gösterimi	39
Şekil 3.32. Direk ve ters kinematik ilişkisi.....	40
Şekil 3.33. 7-DOF 6R1P robotun eklemlerine koordinat yerleştirilmesi.....	41
Şekil 3.34. Manipülatöre ait dört farklı geometrik düzenleşim	49
Şekil 3.35. 5-DOF 4R1P robotun eklemlerine koordinatların yerleştirilmesi	50

Şekil 4.1. Aydınlatma başlıklarının bir birlerine göre konumu	54
Şekil 4.2. Farklı konfigürasyonlara sahip aydınlatma sistemleri.....	55
Şekil 4.3. Ameliyathane odasına örnek resim.....	56
Şekil 4.4. Ameliyat alanı aydınlatma sistemi	56
Şekil 4.5. Master kolun SolidWorks programında çizilen katı modeli.....	58
Şekil 4.6. Master kol MATLAB tasarım ekranı görüntüsü	63
Şekil 4.7. Master kol çalışma uzayı 1	64
Şekil 4.8. Master kol çalışma uzayı 2	65
Şekil 4.9. Master kol çalışma uzayı 3	65
Şekil 4.10. SolidWorks programında çizilen slave kolun Matlab Simulink görüntüsü..	66
Şekil 4.11. Slave kol ters kinematik hesaplama fonksiyonları bloğu	68
Şekil 4.12. Slave kol MATLAB tasarım ekranı görüntüsü.....	69
Şekil 4.13. Çizelge 4.5'deki sınır değerlere göre slave kolun çalışma uzayı.....	70
Şekil 4.14. Matlab MUPAD ile oluşturulan çalışma uzayı.....	70
Şekil 4.15. Master-Slave kinematik hesaplamaları fonksiyon blokları	75
Şekil 4.16. Master ve slave kol konum bilgilerinin görüldüğü tasarım ekranı	76
Şekil 4.17. Slave kol elektrik motorlarının sürülmesi ile ilgili şekil	76
Şekil 4.18. Master-Slave çalışma ekranı görüntüsü.....	76
Şekil 4.19. Master-Slave çalışmasına ait Matlab simülink ekranı 1	77
Şekil 4.20. Master-Slave çalışmasına ait Matlab simülink ekranı 2	77
Şekil 4.21. Master-Slave çalışmasına ait Matlab simülink ekranı 3	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 3.1. Robot çalışma düzlemleri açıklaması	7
Çizelge 3.2. Geometrilerine göre robotların güçlü ve zayıf yönleri	12
Çizelge 3.3. Elektrik motorları karşılaştırma çizelgesi.....	24
Çizelge 3.4. 7-DOF robota ait D-H parametreleri	41
Çizelge 3.5. 5-DOF robota ait D-H parametreleri	50
Çizelge 4.1. Ameliyat bölgesi aydınlatma sistemine ait ölçüler	57
Çizelge 4.2. Master kol DH Çizelgesi	58
Çizelge 4.3. Master kol eklem değişkenlerinin sınır değerleri	64
Çizelge 4.4. Slave kol DH Çizelgesi.....	66
Çizelge 4.5. Slave kol eklem değişkenlerinin sınır değerleri.....	69
Çizelge 4.6. Hesaplanan açılara göre oluşturulan çözüm kümesi çizelgesi.....	74

KISALTMALAR DİZİNİ

PD	Proportional Derivative
PID	Proportional Integral Derivative
URL	Uniform Resource Locator
DOF	Degrees Of Freedom (Serbestlik derecesi)
D-H	Denavit-Hartenberg
ISO	International Organization for Standardization
ADC	Analog to Digital Converter
DAC	Digital to Analog Converter
Hz	Herz
rc	Radio Control
RC	Rezistor Capacitor
AC	Alternative Current
DC	Direct Current
PM	Permanent Magnet
P	Prismatic
R	Revolute
rpm	Revolutions per Minute
μm	Micro Meter
kW	Kilo Watt
4R1P	4 dönel 1 prizmatik
Max	Maximum
Min	Minumum
MATLAB	Matrix Laboratory (Matematiksel İşlemlerin Yapıldığı Program)
CAD	Computer Aided Design
I	Identity matris

$$c_i \quad c\theta_i$$

$$s_i \quad s\theta_i$$

$$c_{ijk} \quad c\theta_i c\theta_j c\theta_k$$

$$s_{ijk} \quad s\theta_i s\theta_j s\theta_k$$

SİMGELER DİZİNİ

${}^A\hat{Z}_B$	A noktasından B noktasına Z vektörü
${}^A\hat{Y}_B$	A noktasından B noktasına Y vektörü
${}^A\hat{X}_B$	A noktasından B noktasına X vektörü
$\cos \alpha_{AB}$	A vektörü ile B vektörü arasındaki α açısının cosinüsü
A_R_B	A koordinat sistemi ile B koordinat sistemi arasındaki dönme matrisi
A_T_B	A koordinat sistemi ile B koordinat sistemi arasındaki transform matrisi
B_P	Point of B (B noktası)
${}^A_{P_x}$	A noktasının x eksenindeki bileşeni
R_x	X eksenindeki dönme matrisi
$\{A\}$	A koordinat sistemi
T^{-1}	Transform matrisinin tersi
R^{-1}	Dönme matrisinin tersi
θ_i	i. Teta açısı
l_1	1. Link(uzuv) uzunluğu
h	Height (Yükseklik)
d	Dimension (ölçü-boyut)
t_1	Master kol birinci eklem açısı
t_{11}	Slave kol birinci eklem açısı
0_T_5	0. koordinat sistemi ile 5. koordinat sistemi arasındaki transform matrisi
n	Normal vektör
s	Slide (kayma) vektörü
a	Approach (yaklaşım) vektörü
π	180° ya da pi sayısı
r_{11}	Dönme matrisi (1.1). elemanı

1. GİRİŞ

Modern bir kontrol sistemi tipik olarak hareket kontrolcüsü, motor sürücüsü veya yükselteci, bir elektrik, pnömatik veya hidrolik motoru ve geri besleme sensöründen oluşmaktadır. Sistem aynı zamanda bir veya daha çok kayış, vida ve/veya dişli mekanizmasına da sahip olabilir. Hareket kontrol sisteminin tüm bileşenleri sisteme verilen görevleri kusursuz bir şekilde yapmaları için birlikte çalışmaktadırlar. Bunların seçiminde hem ekonomik etkiler hem de mühendislik gerekleri dikkate alınmalıdır (Sandin, 2003).

Bu çalışmada yedi serbestlik derecesine sahip tıbbi operasyon aydınlatmasında kullanılan bir mekanizmanın eklemlerine konum algılayıcılar yerleştirilerek bir master kol ve bu master mekanizmadaki aydınlatma başlığının aydınlatma bölgesini farklı bir açıdan otomatik olarak aydınlatacak olan ikinci bir mekanizma olan slave kol tasarımı yapılmıştır. Çalışmada tasarımı yapılan seri robot kolu diğer seri robot kolları ile aynı tasarım şekline sahip olsa da kullanım alanı olarak tıbbi alan tercih edilmiştir. Master kol olarak tanımlanan elle ayarlanan aydınlatma sisteminin her bir eklemine ve aydınlatma odaklama sistemine açışal konum algılayıcı olarak lineer potansiyometreler uygun görülmüştür. Slave kolun eklem noktalarına ve odaklama sistemine rc servo motorlar yerleştirilmiştir.

Çalışma prensibi kısaca sıralanacak olursa;

- Master kolun eklem noktalarındaki potansiyometrelerden analog bilgiler alınır.
- Master kolun odaklama sistemindeki potansiyometrelerden analog bilgi alınır.
- Alınan bilgiler ADC devresiyle sayısal forma dönüştürülür.
- Bu bilgiler veri işleme merkezinde işlenerek aydınlatma bölgesinin merkezinin üç boyutlu (x,y,z) konumu tespit edilir.
- Tespit edilen noktaya Slave kolun gidebilmesi için ters kinematik hesaplamalar yapılır.
- Uygun olan bir hareket için slave kolların ve odaklama sisteminin olması gereken konumu hesaplanır.
- Elde edilen en uygun açışal değerlere göre eklem noktalarındaki ve odaklama sistemindeki motorlara uygulanması gereken sinyaller motorlara uygulanır.

Tıbbi operasyon anında ameliyat ekibinden birinin elle ayarlayabildiği aydınlatma sisteminin eklem noktalarına yerleştirilen açısai ve çizgisel konum algılayıcı potansiyometrelerden ve aydınlatma başlığının ışık odaklama sisteminden alınan bilgileri bir veri işleme biriminde işlenerek aydınlatmanın yapıldığı bölgenin merkez noktasının üç boyutlu konumu tespit edilir. Elde edilen bu üç boyutlu noktanın olduğu yere slave adı verilen aydınlatma başlığı taşıyan robot kol tarafından konumlanması yapılır. Bu konumlama ters kinematik olarak ifade edilen bir hesaplama ile yapılmaktadır. Slave koldaki her bir eklemdede kullanılan servo motora ve aydınlatma odaklama sistemine uygulanacak olan elektrik sinyali ters kinematik hesaplama göre belirlenir.

Bu tasarımın nihai hedefi, operasyon bölgesinin aydınlatma kalitesinin artırılması için kullanılan ikinci bir aydınlatma başlığının ikinci bir kişi gerektirmeden yapılmasıdır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Robot ismi her ne kadar yakın geçmişe sahip olsa da, içerik ve işlev olarak çok derin bir geçmişe sahiptir. Robotik çalışmasının temelini teşkil eden sibernetik bilimi güdümbilim olarak Türkçe 'ye çevrilmiştir. Bu bilim haberleşme, kontrol ve denge olmak üzere üç ögeden oluşmaktadır. İlk sibernetikçi olarak kabul edilen Ebul-iz İsmail bin ar-Razzaz el-Cezeri 12. Yüzyıl dönemlerinde yaşamış biridir. O dönemde suyun kaldırma gücünden faydalanarak değişik yönlerde otomatik hareketler elde etmiştir. Teknolojik gelişmeler bu sibernetik düşüncesinin dışına çıkmamıştır. Sistem ne olursa olsun, dış ortamdaki bir bilgi alınmalı bu bilgi işlenmeli ve kontrol işlemi gerçekleştirilmelidir. Günümüzde robotik olarak ifade edilen bu bilim alanı birçok teknolojik alana özelleşerek çalışmalar devam etmiştir. Robotik oyuncak alanından endüstriyel uygulamalara kadar birçok alanda kullanılmaktadır (Lewis vd., 2004).

Bazı Slav dillerinde 'robota' ismi 'iş' anlamına gelmektedir. Türetilmiş isim olan 'robotnik' ise 'işçi' anlamına gelmektedir. Çoğu Doğu Avrupa evlerinde standart sabah ifadesi olarak 'I go to robota' (İşe gidiyorum) kullanılmaktadır (Lumelsky, 2006).

Robot kelimesi 1921 yılında oyun yazarı Karel Capek tarafından R. U. R. (Rossum's Universal Robots) adlı dramasıyla tanıtılmıştır. Bu dramada, robotlar insanlara benzeyen fakat yorulmadan çalışan makineler olarak görülmüştür. 1940'ların sonlarına doğru Oak Ridge ve Argonne Ulusal Laboratuvarlarında radyoaktif malzemeleri işlemek için uzaktan kontrollü mekanik manipülatörlerin araştırma programları başlatıldı. Bu sistemler "Ana-Uydu"(Master-Slave) tipindeydiler ve insan operatörler tarafından yapılan el ve kol hareketlerini büyük bir sadakatle yerine getirmekteydiler. Devol ve Joseph F. Engelberger 1959 yılında Unimaton Inc. tarafından tanıtılan ilk endüstriyel robotlara öncülük etmişlerdir. Bu robotun özelliği bir manipülatörle bir bilgisayarın uyumlu çalışması sonucu ortaya çıkan birçok değişik görevi otomatik olarak gerçekleştiren bir makine olmasıdır (Lewis vd., 2004).

1962'de H. A. Ernst bilgisayar kontrollü dokunma sensörlü mekanik bir elin gelişiminden bahsetmiştir. MH-1 diye anılan bu cihaz blokları algılayabiliyor ve bu blokları operatör yardımı olmaksızın istif yapabiliyordu. Bu çalışma uyarlamalı davranış kapasiteli bir robotun ilk örneklerinden biridir.

1963'de Amerikan Makine ve Dökümhane Şirketi (American Machine and Foundry Company) VERSATRAN ticari robotunu tanıttı. Aynı yılın başlangıcında manipülatörler için Roehampton kolu ve Edinburgh kolu gibi değişik kol tasarımları geliştirilmiştir.

1968'de McCarthy ve meslektaşları Stanford Yapay Zekalaboratuvarında elleri, gözleri ve kulakları(manipülâtörler, TV kameralar ve mikrofon) olan bir bilgisayar geliştirmişlerdir. Konuşulanların farkına varan, bir masanın üzerindeki rasgele yerleştirilmiş blokları tespit eden ve komutlar doğrultusunda onları düzene koyan bir sistem göstermişlerdi. Aynı zamanlarda Pieper (1968) bilgisayar kontrollü bir manipülâtörün kinematik problemi üzerinde çalışmıştır. 1971'de Kahn ve Roth kısıtlanmış bir kolun dinamiği ve kontrolü üzerine çalışmışlar (Çetinkaya, 2009).

1973'de Richard Hohn, Cincinnati Milacron Corporation için T3 (The Tomorrow Tool) adı verilen ilk mini-bilgisayar denetimli robotu geliştirdi. 1974'de Stanford kolunu geliştiren Profesör Scheinman Vicarm Inc. isimli bir firma kurarak mini-bilgisayar kullanan robot kolları pazarlamaya başladı. 1978'de PUMA isimli robot üretildi ve pazarlanmaya başlandı.

1979'da Stanford Cart isimli gezer robot, üzerine monte edilmiş bir kameradan alınan görüntüleri kullanarak engellerle dolu bir odayı engelleri aşarak boydan boya geçti (Erden, 2003).

Son yıllarda tıp alanında da robotik gelişmeler olmuştur. 1989'da Cerrahi uygulamaları geliştirmek ve hasta yaşamını iyileştirmek amacı ile Computer Motion adında bir yüksek teknoloji tıbbi cihaz şirketi kurulmuştur. 2000'ler gelinirken bu şirket ZEUS adı verilen robotu üretmiştir. Bu robot ile ilk olarak 1999 yılında By-Pass ameliyatı gerçekleştirilmiştir(Akpınar, 2013).

Da Vinci ve ZEUS gibi hassas manipülâtörlere sahip robotlar ile ağır cerrahi müdahaleler yapılabilmektedir. ZEUS master-slave yöntemiyle kontrol edilen iki adet tutma pensi manipülâtörleri ve bir adet Laparoskop tutma kolundan oluşur. Da Vinci de benzer şekilde birçok sayıda kolları bulunan ve bu kollar master-slave yöntemiyle tıp operatörü tarafından kullanılmaktadır. 2005 yılında Chicago'da bir üniversite kliniğinde tıp operatörleri Da Vinci robotunu kullanarak bir insanın akciğerinin yaklaşık yüzde 60'ını tümörleriyle beraber alarak başarılı bir ameliyat gerçekleştirmişlerdir (Hayashibe vd., 2006).

2005 Türkiye Florence Nightingale Hastanesinde kullanılan dört kollu cerrah robot Da Vinci ile %100 başarılı ameliyatlar yapılmaktadır.(Akpınar,2013)

Günümüzde robotik cerrahi tıbbın hemen hemen her alanında kullanılmaktadır.

3.MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde robotların tanımı ve yapısı incelenecek olup, kol robot olarak kullanılan robotların sınıflandırılması yapılacaktır. Robot kollarının konum tespiti ve kontrolünün yapılabilmesi için ileri kinematik ve ters kinematik hesaplamaların nasıl yapılacağı ve bu hesaplamalarda kullanılan çeşitli yöntemler incelenecektir.

Bu tez kapsamında tasarımı planlanan robot kolun bileşenleri incelenecek olup bir tıbbi operasyon odasında bulunan operasyon bölgesi aydınlatma sisteminin gerçek ölçüleri dikkate alınarak mekanik tasarım ve kinematik hesaplamalar yapılacaktır. Bu tasarım ve hesaplamalar yapılırken SOLID WORKS ve MATLAB programları kullanılacaktır.

3.1. Robot Tanımı

Kelime anlamı olarak robot Çek ve Slovak dillerinde köle veya işçi anlamına gelir. Kullanımına göre robotun tanımı birçok kişi ve kurum tarafından farklı şekillerde yapılsa da temelde aynı söylemler kullanılmıştır. Birçoğu “bir robot programlanabilme yeteneğine sahip makinedir” ifadesi benzeri tanımlamalar yapmıştır (Selig, 1995).

Bazı tanımlara yer verilecek olunursa;

Amerika Robot Enstitüsü (1979):

Çeşitli işleri yapabilmek için programlanmış hareketlerle malzeme, parça, alet, ya da özel cihazları taşımak için tasarlanmış çok işlevli, tekrar programlanabilir düzenek.

Webster Sözlüğü (1993):

Normal koşullarda insanlara atfedilen işlevleri yapan, ya da fiziksel olarak insana benzeyen otomatik bir düzenek(Erden, 2003).

Bu tanımlamalar ışığında robot “Hareket eden canlıların hareketlerinin taklidini yaparak insanlara hizmet için üretilmiş makinelerdir” denilebilir.

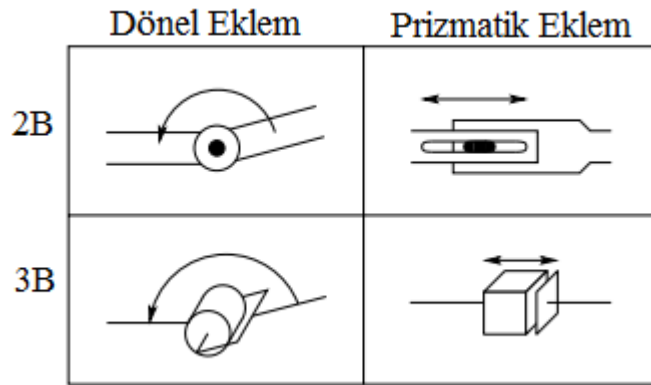
Robot bilimi matematik, fizik, kontrol, makine, elektrik ve bilgisayar mühendisliği gibi bilim dallarının disiplinidir. Bu bilim dallarından makine robotların dinamik ve statik yapısını inceler. Matematik robotların hareket modelini çıkarır.

Elektrik robotların sensörleri ve eyleyicilerinin tasarımı ile ilgilenirken bilgisayar mühendisliği robot programlama ile ilgilenmektedir(Bingül ve Küçük, 2009).

Robotlar temelde iki kategoride tasarlanırlar. Bunlar genel amaçlı olanlar ve özel işler için olanlardır. Genel amaçlı olanlar her tip görevin üstesinden gelmek için 6 serbestlik derecesi ve üzeri serbestlik derecesine sahiptirler. Özel tasarımlı yapılara sahip olanlar 5 ve daha az serbestlik derecesine sahiptirler (Nie ve Huang, 2012).

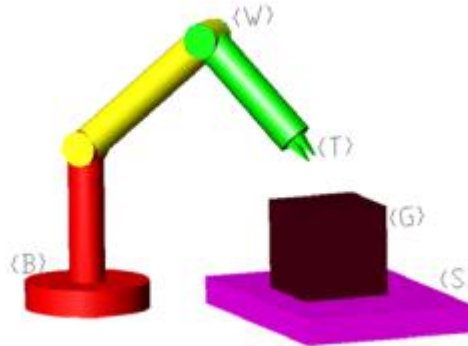
3.2.Robotun Yapısı

Tüm robotların bir birinden bağımsız hareket edebilen uzuvları vardır. Bu uzuvlar bir birleriyle dönel eklem ya da prizmatik (kayar) eklem olarak iki şekilde bağlanabilir. Kullanım yerlerine göre hangi tür eklem kullanılacağına karar verilir. Prizmatik eklemler diğerine göre temelde daha fazla yük taşıyabilme özelliğine sahipken döner eklem daha geniş çalışma uzayına sahiptir(Bingül ve Küçük, 2009). Çalışma uzayı bir robotun uç işlevcisinin ulaşabileceği alanı ifade etmektedir. Dönel eklemleri R ile temsil edilirken dönme değişkenine eklem açısı denir bu açı ' θ ' ile temsil edilmektedir. Prizmatik eklemler P ile temsil edilirken bu değişken eklem kaçıklığı olarak ifade edilir ve 'd' ile temsil edilmektedir (Lewis vd., 1993). Şekil 3.1.'de bu eklemlerin iki boyutlu ve üç boyutlu temsili şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.1.Robot eklemlerinin sembolik gösterimi (Spong vd., 2006)

Bir robot kol uzuvların bir birine seri olarak bağlanmasıyla oluşturulur. Bu uzuvların bulunduğu yerler ve hareket alanları robotun çalışma çerçevesini oluşturmaktadır.



Şekil 3.2. Robot çalışma düzlemleri

Robotun uzuvları bağımsız hareket ediyorlarsa da ana çerçeveden istasyon çerçevesine doğru robotun uzuvları bir sonraki uzvun uzaydaki konumunu etkilemektedir. Robot çalışma düzlemleri ile ilgili açıklamalar Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Robot çalışma düzlemleri açıklaması (Bingül ve Küçük, 2009)

Ana Çerçeve {B} (Base Frame)	Robotun referans koordinat sistemidir.
İstasyon Çerçeve {S} (Station Frame)	Evrensel çerçeve de denir. Robotun bütün hareketlerini bu çerçevede yapar. Ana çerçeveye göre ${}^B_S T$ şeklinde tanımlanır.
Bilek Çerçevesi {W} (Wrist Frame)	Bilek çerçevesi robotun son bağlantısına yerleştirilir.
Araç Çerçevesi {T} (Tool Frame)	Bu çerçeveye robotun herhangi bir işlevi gerçekleştirmesi için eleman yerleştirilir.
Hedef Çerçevesi {G} (Goal Frame)	Robotun işlem yapacağı nesnenin üzerindeki çerçevedir.

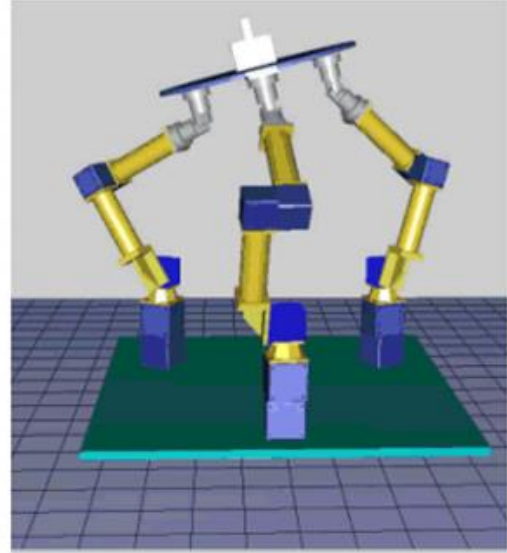
3.2.1. Robotların sınıflandırılması

Robotlar güç kaynaklarına göre, geometrik şekline göre, kinematik yapısına göre, kullanım alanına göre, kontrol yöntemine göre gibi birçok kritere göre sınıflandırılabilir(Spong vd., 2006).

Robot kollarının yerleşimine göre robotlar seri ve paralel olmak üzere iki temel gruba ayrılır. Seri robotlar daha geniş bir çalışma uzayına sahipken paralel robotlar daha kütleli işlerde kullanılırlar.Robotik sistemlerin mekanik yapıları robot çeşitlerinden bağımsız olarak şekil3.4.'de verilmiştir(Angeles, 2007).

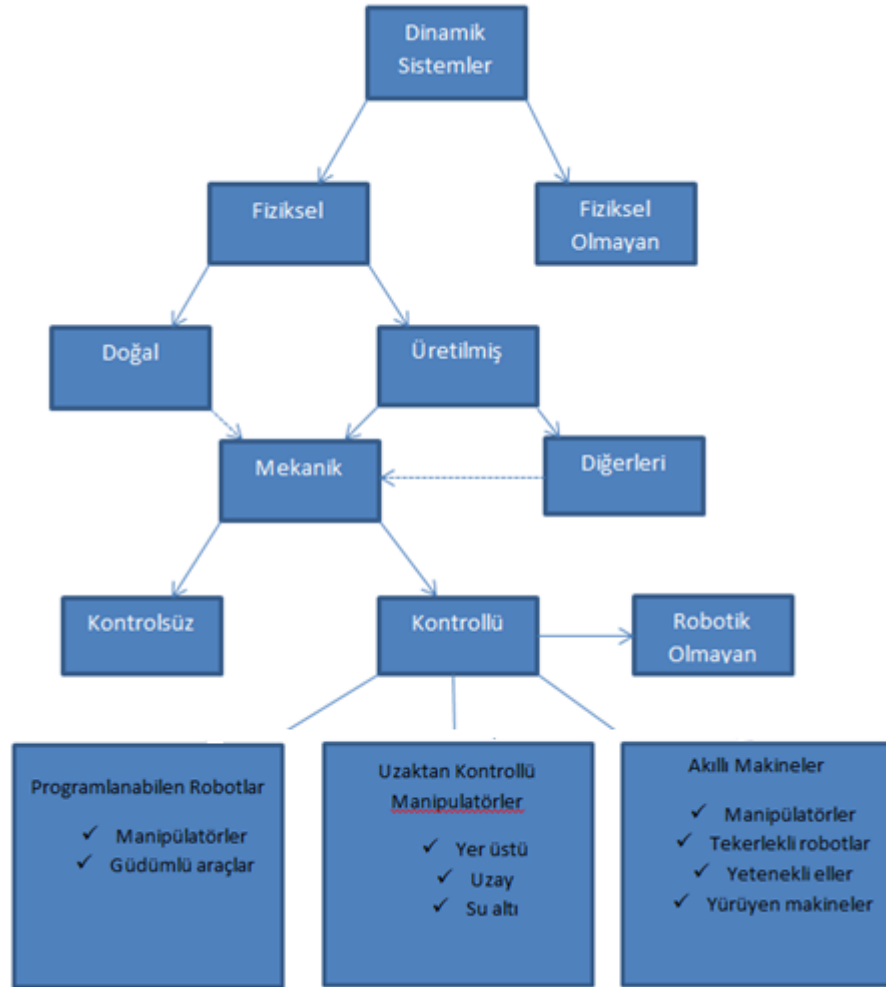


a) Seri Robot



b) Paralel Robot

Şekil 3.3. Bağlanma şekillerine göre robotlar(Yücel, 2009)



Şekil 3.4. Robotik mekanik sistemin soyağacı (Angeles, 2007)

3.2.1.1. Güç kaynaklarına göre robotlar

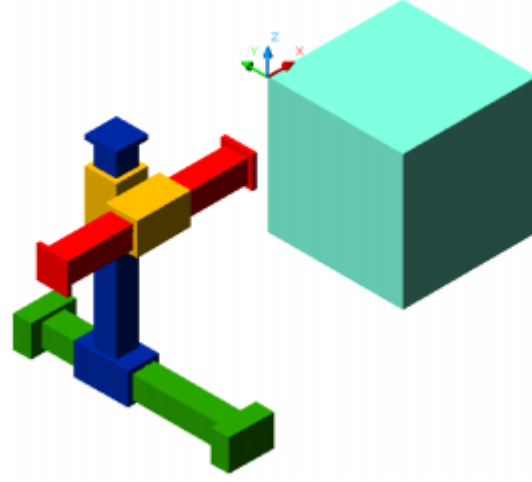
Robotların tahrik sistemlerinde elektrikli, hidrolik ve pnömatik olmak üzere üç güç kaynağı kullanılır. Hidrolik sistemli robotlar özellikle tork üretme kapasiteleri yüksek olduğundan özellikle ağır yüklerin kaldırılması gereken yerlerde kullanılırlar. Bunun yanında yağ sızırmaları ve gürültülü çalışmaları eksik yanlarıdır. Elektrik tahrik sistemli robotlar çok sessiz, daha ucuz, daha az yerleşim alanı ihtiyaç duymaları ve kullandıkları elektrik enerjisi daha ulaşılabilir olduğundan popülerliği daha fazladır. Pnömatik tahrikli robotlar basit yapılı ve ucuz olmasına karşın kontrol edilebilirliği zor olduğundan daha az tercih edilmektedirler(Spong vd., 2006).

3.2.1.2. Geometrik şekillerine göre robotlar

Bir robot kolu veya manipülatörü bir dizi robot uzuvlarının uzayda birbirine eklenmesiyle oluşmaktadır. Kol hareketleri eklemlerle sağlanmaktadır. Bu eklemler prizmatik ve dönel yapılara sahip olabilirler(Lewis vd., 1993). Robot kolun ilk üç eklemine göre robot kol için farklı gruplandırma yapılabilmektedir. Eğer ilk üç eklem prizmatikse bu robota Kartezyen (Prismatic Prismatic Prismatic PPP), ilk eklem döner ikinci ve üçüncü eklem prizmatikse bu robota Silindirik (Revolute Prismatic Prismatic RPP), ilk iki eklem dönel üçüncü eklem prizmatik ve bütün uzuvlar birbirine paralelse bu robota Scara (RRP), ilk iki eklem dönel ve üçüncü eklem prizmatikse bu robota Küresel (RRP) robot denir. Ayrıca ilk üç eklemi dönelse bu robota da Döner (RRR) robot denir(Bingül ve Küçük, 2009).

3.2.1.2.1. Kartezyen robot

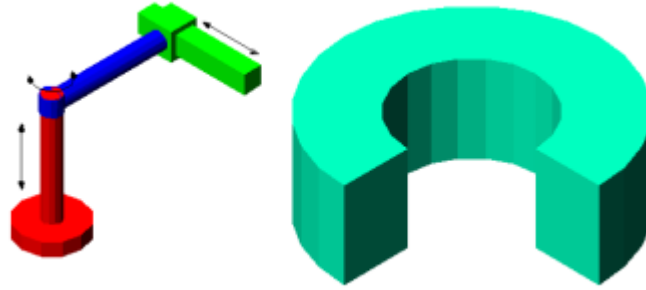
Mekanik yapıları sağlam olmasına karşın çalışma uzayındaki hareket yetenekleri oldukça düşüktür. Ancak kinematik basit ve genellikle büyük hacimli ve ağırlıklı nesnelerin taşınmasında kullanılır.



Şekil 3.5.Kartezyen robot ve çalışma uzayı(Çetinkaya, 2009)

3.2.1.2.2. Silindirik robot

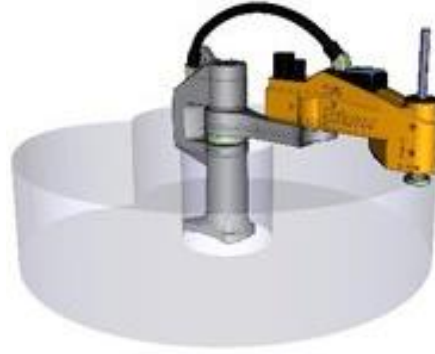
Silindirik robot kollar da kendi etrafında dönebilen bir mafsalsal ve bunun üzerinde bulunan üç ekseninde de doğrusal hareket edebilen kollarından oluşmaktadır. Kartezyen yapıya göre hareket alanı daha fazladır(Çengelci ve Çimen, 2005).



Şekil 3.6.Silindirik robot ve çalışma uzayı(Çetinkaya, 2009)

3.2.1.2.3. Scara robot

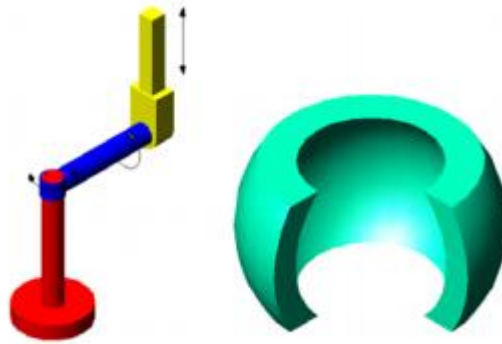
Hız ve konum performansı çok iyi olduğundan dolayı bu robot kol en çok elektronik sanayinde, elektronik kartlara malzemelerin montajını gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. Tutma ve taşıma işlerinde maliyetinin ucuz olmasından ve programlanmasının kolay olmasından dolayı şu anda sanayide en çok kullanılan robot olmuştur(Çengelci ve Çimen, 2005).



Şekil 3.7.Scara robot ve çalışma uzayı(URL-1)

3.2.1.2.4. Küresel robot

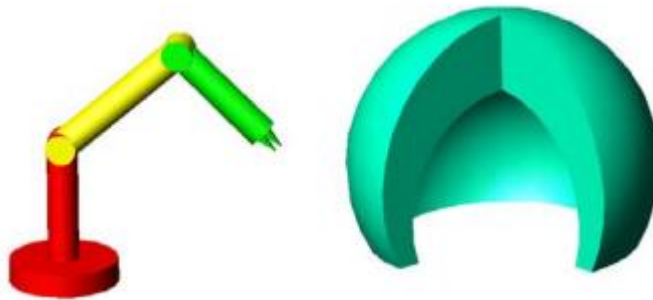
Bel, omuz ve dirsek mafsallarından oluşan bir yapıya sahiptirler. Bel ve omuz mafsalı kendi etrafında dönme hareketi yapabilirken, dirsek mafsalı kola uzama ve kısalma hareketi yaptırmaktadır. Kinematik yapıları kartezyen ve silindirik robot kollara göre daha karmaşıktır.



Şekil 3.8.Küresel robot ve çalışma uzayı(Çetinkaya, 2009)


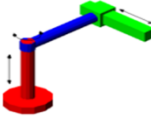

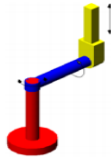

3.2.1.2.4. Döner robot

Hareket yeteneği en gelişmiş robottur. Aynı oranda kontrolü de zordur.



Şekil 3.9.Döner robot ve çalışma uzayı(Çetinkaya, 2009)

Çizelge 3.2.Geometrilerine göre robotların güçlü ve zayıf yönleri (Bingül ve Küçük, 2009; Çetinkaya, 2009; URL-1, URL-2)

Geometrik Yapıları	Güçlü Yönleri	Zayıf Yönleri
 <p>PPP</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kinematik denklemleri basit olduğundan kontrolü kolaydır. ➤ Gövde yapısı çok sağlam olduğundan yük kaldırabilme kapasitesi iyidir. ➤ Çalışma uzayının her noktasında hareket kabiliyeti aynıdır. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Çalışma alanının ölçüsü robotun ölçüsünden küçüktür. ➤ Robot kendi gövdesine ulaşamaz. ➤ Prizmatik eklemleri açık olduğundan çalışma ortamındaki tozlardan olumsuz etkilenir.
 <p>RPP</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ana çerçeve döner olduğu için uç işlevcisinin hızı yüksektir. ➤ Kinematik denklemleri karmaşık değildir. ➤ Çalışma uzayı kartezyen robota göre büyüktür. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Geniş çaplı hareket kabiliyeti kol uzunluğuna bağlıdır.
 <p>RRP</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Hız ve hassasiyet açısından performansı çok iyidir. ➤ Çok küçük bir yerleşim alanına ihtiyaç duyarlar. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Yük taşıma kapasitesi düşüktür.
 <p>RRP</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sahip oldukları çalışma uzayı oldukça büyüktür. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kinematik denklemleri karmaşık olduğu için kontrolleri zordur. ➤ Hareket kabiliyeti her noktada farklılık gösterir.
 <p>RRR</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Çok büyük çalışma uzayına sahiptirler. ➤ Tamamı dönel olan eklemlerin hareket ettirilmesi oldukça kolaydır. ➤ Hareketleri esnek ve hızlıdır. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kinematik denklemleri karmaşık olduğu için kontrolleri zordur. ➤ Hareket kabiliyeti her noktada farklılık gösterir.

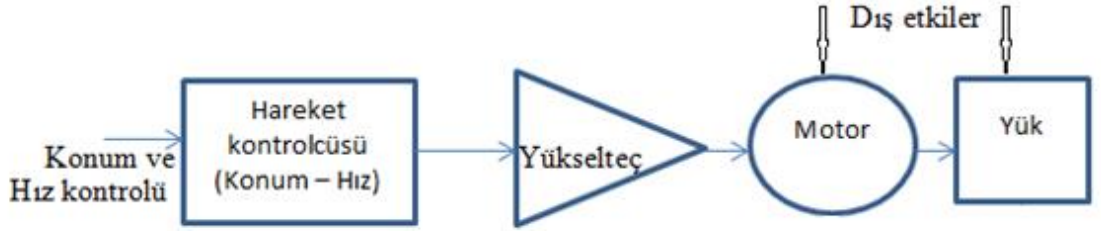
3.2.1.3. Kontrol yöntemlerine göre robotlar

Robotlarda iki farklı kontrol yöntemi kullanılabilir. Bunlar servo (otomatik) robotlar ve servo olmayan robotlar. İlki akıllı olmayan tip olarak da söylenebilir. Servo robotlar ise akıllı robotlar olarak da ifade edilebilir.

3.2.1.3.1. Servo olmayan robotlar

En basit robotlardır denilebilir. Bunlar “tut ve yerleştir” işlevini yerine getirdiklerinden açık döngülü robotlar da denilebilir. Programlanması yapıldıktan sonra dışardan herhangi bir veri almayan/alamayan robotlardır. Geri beslemesi olmayan bu robotlara en iyi örnek yıka ile ilgili (çamaşır, bulaşık vs.) makinelerdir.

Bu robotların hareket alanları sınırlıdır. Bu sınır genellikle mekanik bir şekilde belirlenir. Bu tip robotlar daha az maliyetli olduklarından özel kullanımlar için tercih edilirler(URL-3).



Şekil 3.10. Açık çevrimli motor kontrol blok şeması

Bu sistem yük pozisyonu ve hızı için kontrolcüden motor sürçüşüne gönderilecek olan sistem giriş palslerinin hedefi ve sayısı önceden belirlenmiş olduğundan geri besleme sensörüne ihtiyaç duymaz. Bu durum yük pozisyonunun doğruluğunun düşük olmasına ve zamanla pozisyon hatalarının artmasına neden olur. Bu nedenle açık çevrimli sistem olarak bilinen bu sistem sadece kabul edilebilir yük hatalarının olduğu ve bazı özel uygulamalarda kullanılırlar(Sandin, 2003).

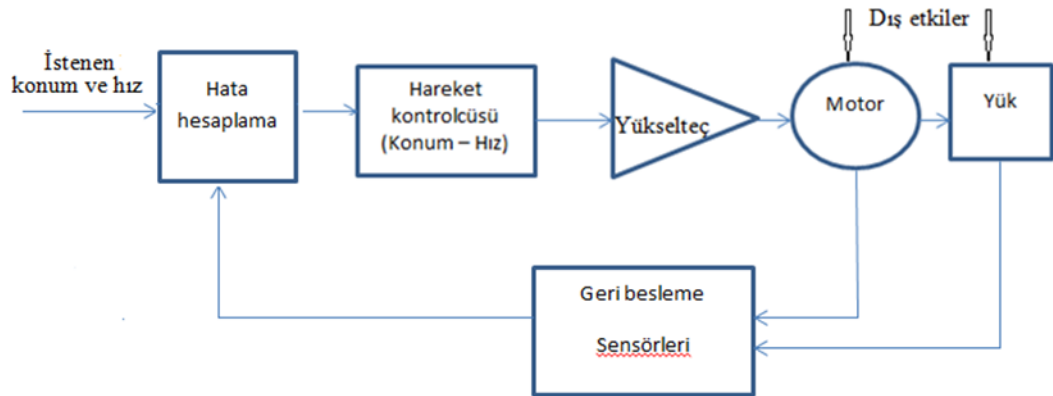
3.2.1.3.2. Servo robotlar

Bu tip robotlar geri beslemeli olduklarından kapalı sistemli robotlar olarak da söylenebilir. Hız ve konumun önemli olduğu hareketli sistemlerde kullanımları öne çıkmaktadır. Çevreyle sürekli etkileşim halinde olan bu tip robotların çalışma prensibi insanların algılama, düşünme ve uygulama yeteneklerini taklit edebilmektedir. Programlanmaları bilgisayar, dâhili bir ağ ya da internet yoluyla yapılabilir. Servo robotlar kendi aralarında yüksek sevide akıllı ve akıllı robotlar olarak iki gruba ayrılabilir. Bu ikisi arasındaki temel fark robotun çevresiyle etkileşim yeteneği ile

ilgilidir. Bu yetenek robottaki sensörlerin niteliği, çeşitliliği ve niceliği ile ilgilidir(URL-3; Fink ve Kriehn, 2009). Kapalı döngülü bir sistemlerin tasarımı sistem bileşenlerinin davranışlarının bilinmesi, ardışık konumda olan bileşenlerin birbirlerine etkilerini hesaba katılması ve sistem dışı etkilerin dikkate alınmasıyla yapılır. Bu tasarım belli başlı şu iki yolla yapılır.

- 1- Sistem ya da bileşenlerin davranışlarının matematiksel bağlantılar şeklinde ifade edilmesi,
- 2- Sistem ya da bileşenlerin davranışlarının blok şemaları ve sinyal akış grafikleri şeklinde gösterilmesi.

Bir kontrol sisteminin çalışmasının incelenmesi kontrol bileşenleri arasındaki bağıntıların elde edilmesini gerekli kılar. Kontrol sistemi zamana bağlı değişkenler içerdiğinden söz konusu bağıntılar da diferansiyel eşitlikler biçiminde olur. Tüm sistemi anlatan bu denklemler kümesine sistemin matematiksel modeli denir(Akçalı, 2001). Matematik modelinden önce sistemin blok şeması çizilmelidir.



Şekil 3.11. Kapalı çevrimli motor kontrol blok şeması

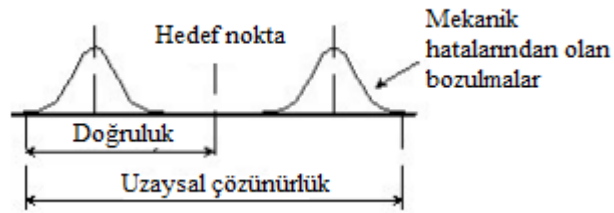
3.2.1.4. Keskinlik derecesine göre robotlar

Robotların çalışma kalitesi doğruluk (accuracy), çözünürlük (resolution) ve tekraredebilirlik (repeatability) gibi üç temel unsura bağlıdır.

3.2.1.4.1. Doğruluk

Robotun iş alanı içinde arzu edilen hedef noktaya istenilen zaman içinde gelme yeteneği olarak ifade edilebilir. Buna uzaysal çözünürlük de denir. İlk olarak doğruluk robot bileşenlerinin birbirleriyle uyumunu temsil eden robot teknolojisine bağlıdır. Robotların mekanik hataları robot kalitesini doğrudan etkilemektedir(URL-4).

Robotikte doğruluk ifadesi çözünürlük ve tekraredebilirlik ile sıklıkla karıştırılmaktadır. Aslında robotik sistemin doğruluğu robotun mekanik hatalarına, bilgisayar kontrol algoritmalarına ve sistem çözünürlüğüne dayanır.



Şekil 3.12.Doğruluk ve uzaysal çözünürlük temsili diyagramı(URL-4)

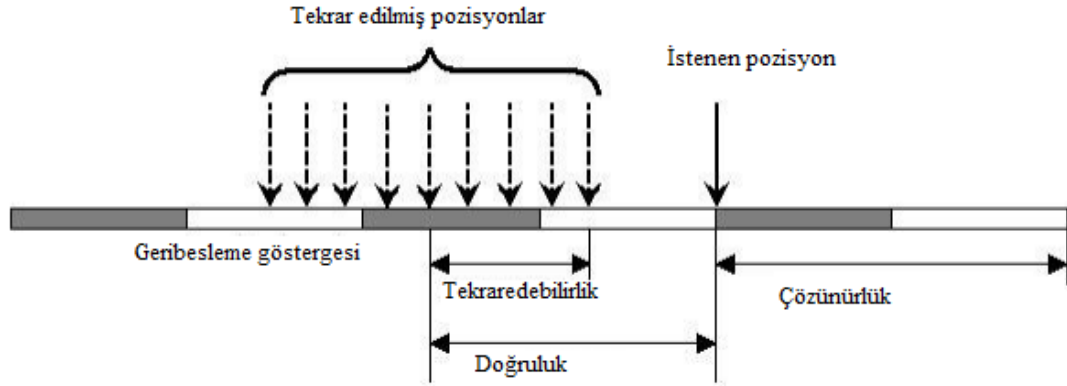
3.2.1.4.2. Çözünürlük

Bir robotun çözünürlüğü kontrol ünitesinin tasarımıyla belirlenen bir özelliktir. Ki bu başlıca robotun pozisyon geri besleme sensörlerine bağlıdır. Bir robotun eklemlerinin hareket şekillerine göre çözünürlük derece ve mm olarak ifade edilir. Dönel eklemlerin çözünürlüğü derece ile kayar eklemlerin çözünürlüğü mm ile ifade edilebilir. Örneğin, bir optik encoder dönen bir mil için her turda 100 pals üretirse bunun açısal kontrol çözünürlüğü $360/100= 3.6$ derece denilebilir. Benzer şekilde robottaki kayar eklemdaki mesafe sensörünün algılayabileceği en küçük değişim çizgisel kontrol çözünürlüğü olacaktır. Robot programının çözünürlüğü ile kontrol çözünürlüğü sistem çözünürlüğü şeklinde ifade edilebilir(URL-4).

3.2.1.4.3. Tekraredebilirlik

Tekraredebilirlik doğrulukla ilgili istatistiksel bir ifadedir. Eğer bir robot aynı noktaya eşit çevresel koşullarda birkaç defa aynı şekilde ulaşabilirse tekrar edebilirliğinden söz edilebilir. Eğer robot bir hedefe her seferinde aynı mesafede uzak kalıyorsa bu robotun tekraredebilirlik seviyesi yüksek ancak doğruluk seviyesi düşük denebilir. Robot üreticileri robotlarının doğruluk derecesinden ziyade tekraredebilirlik derecesi ile ilgili sayısal bilgiler vermektedirler. Çünkü doğruluk robotların taşıdığı yüklerle ilişkilidir.

Tekraredebilirlik normal bir şekilde uzunluk ölçüsüyle ifade edilebildiğinden doğruluk kriterine göre daha anlam ifade etmektedir. ISO9283 standardı bununla ilgili bir standarttır(ISO 9283).



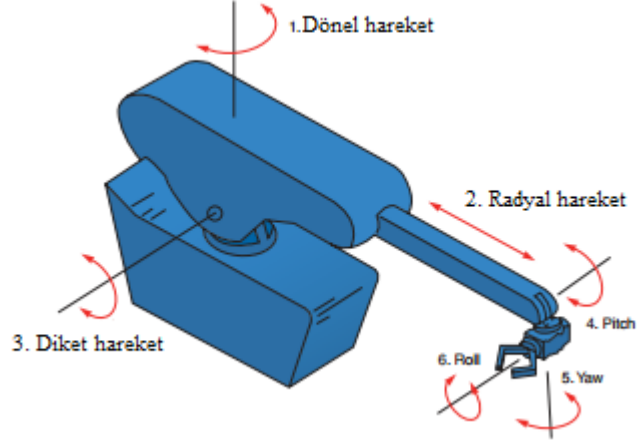
Şekil 3.13.Bir robot kolun doğruluk, çözünürlük ve tekraredebilirliğinin temsili gösterimi(URL-4)

Normal olarak bir robot sprej boyama, tut ve yerleştir gibi tekrarlanabilir işler için tasarlanır. Ki bu yüksek tekraredebilirlik ancak düşük doğruluğa sahiptir. Doğruluğu yüksek bir robot off-line programlama ile ilgili uygulamalarda gereklidir. Büyük ölçüde robot hataları zamanla değişen sıcaklık hataları, uyum hataları ve geometrik hataların yayılmasından kaynaklanmaktadır. Bir robotun geometrik hataları eklemlerin aşınması ve yanlış hizalanmasından gelmektedir. Uyum hataları aşırı yük ve kendi yerçekiminden kaynaklanan bir robotun eklem ve bağlantı kaymalarından kaynaklanmaktadır. Uyum hataları aynı zamanda robotun değişen konumuna bağlıdır. Termal hatalar motor, mil yatakları ve çalışma ortamı gibi iç ve dış kaynaklı ısıdan kaynaklanan robot bileşenlerinin ısı bozulması ve genişlemesinden kaynaklanır(Cubero, 2007).

3.2.2. Robotlarda serbestlik derecesi

Robotlar belirli miktarda beceriye sahip olsa da bu insanların becerilerine sahip olduğu anlamına gelmemektedir. İnsan elinin kontrolü 35 adet kas ve 22 eklemlilik bir yapı ile yapılmaktadır. Böylece insan eli 22 serbestlik derecesine sahiptir. Serbestlik derecesi (Degrees of Freedom – DOF) bir mekanizmanın üç boyutlu uzayda hareket serbestliğini ifade etmektedir. Bu hareket ileri-geri, aşağı-yukarı ve sağa-sola şeklinde olmaktadır. Her serbestlik derecesi bir eklem gerektirmektedir. Bir robot tamamıyla özgür hareket edebilmesi için 6 serbestlik derecesine sahip olmalıdır. Daha fazla serbestlik derecesi elde etmek için eklem sayısı artırılabilir. Bu da robotun işlevcisine daha fazla esneklik kazandırır(URL-3). Bunun yanında kontrolü zorlaşır. Kullanım yerlerine bağlı olarak

bazı robot tiplerinde 3 serbestlik derecesi yeterli olmaktadır. Eklemlerdeki hareket şekilleri roll, pitch, yaw olarak üç çeşitte ifade edilmektedir.



Şekil 3.14.6-DOF bir endüstriyel robot hareket eksenleri

3.3. Robotlarda Kullanılan Algılayıcılar

Robotlar açık döngülü ve kapalı döngülü kontrol yöntemleriyle kontrol edilmektedirler. Bir robot hareketini çevresindeki değişimlere duyarlı bir şekilde yaparsa bu robotun kontrolü kapalı döngü ile yapılmıştır denilebilir. Robotun çevresindeki değişimler ısı, ışık, basınç, robotun konumu, ses, manyetik alan gibi fiziksel, kimyasal ve elektriksel şeklinde olabilmektedir. Bir robot bu değişimlere göre hareket edebilmesi için o değişimleri algılayabilmesi gerekir. Robotun yaptığı görevin doğruluğunu etkileyen önemli faktörlerden biri olan bu algılama özel tasarlanmış ve üretilmiş Türkçe 'ye algılayıcı olarak çevrilen sensörler tarafından yapılmaktadır. Her fiziksel, elektriksel ve kimyasal değişimlerin algılanması için çok çeşitli sensörler üretilmiştir. Bunlar kendi aralarında kullanım yerlerine göre, hassasiyetine göre ve ölçme sınırına göre gibi guruplara ayrılmaktadırlar. Sensörler temaslı ve temassız olmak üzere iki şekilde ölçüm yapan tipleri mevcuttur. Temaslı ölçüm yapan sensörler çevresel birimlere dokunmak zorunda olduğundan sensör belirli bir zamanda zarar görüp sistemin çalışmasını aksatacağından tercih edilmezler. Temaslı sensörlerin nerdeyse hepsi şu üç fiziksel büyüklüğü ölçebilirler; dokunma/kuvvet, yakınlık ve kayma. En basit yapıdaki temaslı sensöre mekanik anahtar örnek verilebilir(Hall, 1984). Sensörler yapısal olarak iki kısma ayrılırlar. Bunlar değişimi algılayan algılama kısmı, diğeri algılanan değişimi elektriksel forma dönüştüren transdüser kısmıdır. Transdüser çıkışı analog veya dijital elektrik sinyali üretebilir. Kullanılacağı sisteme göre bu çıkışlar Analog Dijital Çevirici ve Dijital Analog Çevirici (ADC-DAC) ile bir birlerine dönüştürülebilir.

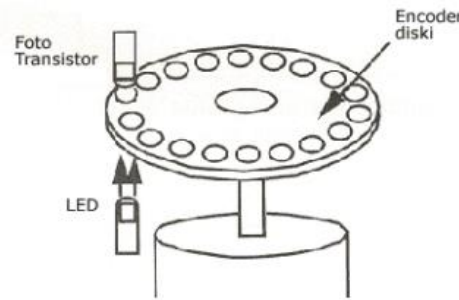
Sensörler robotun çevresini algılama görevinden daha önemlisi robot uzuvlarının hareketinin kontrolünde kullanılmaktadır. Çünkü robot hareketi başladığında bu sensörlerin görevi başlamaktadır. İkincil olarak robotun çalışma alanında yapacağı işle ilgili algılamalar gelmektedir. Son olarak robotun çok nadir karşılaşacağı istenmeyen bir yere çarpma, robot birimlerin arıza ve ısınma durumu ve dış hava şartlarındaki çok nadir karşılaşılabilecek olumsuz değişimleri algılama görevi gelmektedir. Bu durumla belki de hiçbir zaman karşılaşmayacaktır. Böylelikle öncelikle robot mekanik yapısına entegre edilen belli başlı sensörlerden başlanabilir.

3.3.1. Robot eklemlerinde kullanılan sensörler

Bir robot eklemi ya dönme ya da öteleme hareketi yapmaktadır. Bu hareketin ne kadar yapılacağı veya ne kadar yapıldığını veya ne kadar hızla yapıldığını algılamak için çizgisel veya açısal konum ve hız ölçen sensörler kullanılmaktadır.

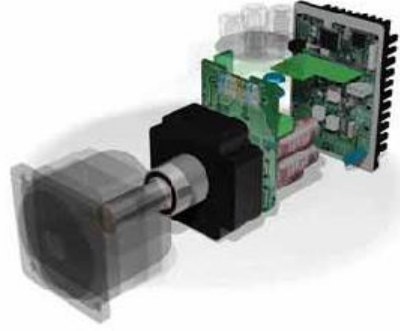
3.3.1.1. Encoder

Bu sensör dairesel hareket yapan bir cismin konumunu ve hızını ölçmede yaygın olarak kullanılanıdır. Dönen parçaya paralel monte edilen bir dişli, delikli çark, eşit aralıklarla siyaha boyanmış pleksiglas disk gibi parçalardan biri yerleştirilir. Kullanılan parçanın bir tarafına ışık kaynağı diğer tarafına ışığı alıp elektriksel işarete çeviren foto transistör türünde bir alıcı yerleştirilir. Dairesel hareket başladığında disk şeklindeki parça da dönme hareketi yapacağından ışık kaynağı ile ışık alıcı arasında belirli aralıklarla engel oluşturacaktır. Her bir engel durumunda ışık alıcı çıkışı elektriksel pals üretecektir. Üretilen bu elektriksel pals sayısı diskin açısal konumu hakkında bilgi verirken birim zamanda oluşan pals sayısı da açısal hızı hakkında bilgi verecektir. Bu bilgiler kontrol merkezinde işlenerek açısal kontrol yapılmış olur(Kuşçu, 2008).



Şekil 3.15.Encodere örnek şekil

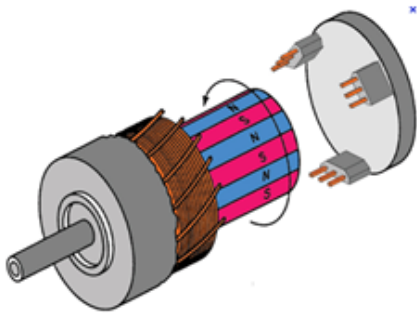
Encoder bazı motor tiplerinde entegre şekilde bulunurken bu özelliği olmayan motorlarda encoderler monte edilerek robotlarda kullanılabilir. Master-slave şeklinde çalışan robot kollarda slave kolda entegre encoderli motor kullanılırken master kolda encoder monte edilmelidir.



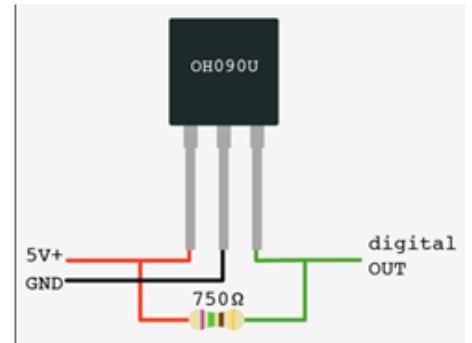
Şekil 3.16. Entegre servo sistemli motor(URL-5)

3.3.1.2. Hall-Effect sensörleri

Optik encoderlerin çalışma prensibine benzer, kullanım alanı da oldukça fazla olan diğer açısal hızölçer sensör de hall-effect sensördür. Optikte ışık kaynaklı iken bunda manyetik alan kaynaklıdır. Dönen disk veya mile bağlanmış bir veya birçok mıknatıs dönme esnasında manyetik olarak anahtarlama yapan bir alıcının çıkışında elektrik pulsü üretmesini sağlar. Birim zamandaki puls sayısı ile orantılı bir hız tespiti yapılmış olur. Bu sensörler 100kHz frekansın üzerine çıkabilmelerinin yanında çevresel kirlilikten etkilenmediklerinden hemen hemen her ortamda kullanılabilirler(URL-6).



a)



b)

Şekil 3.17. Hall-Effect sensörü a) Motora yerleşmiş hali b) Sensörün yalın hali

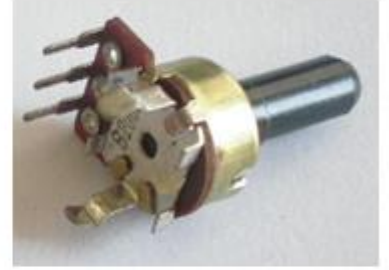
Hall-effect sensörleri de optik encoderler gibi motora entegre bir şekilde olabilmektedirler. Motor şaftının sonuna, rotorun etrafına yerleştirilen ya da motorun içine sensörler motorun pozisyonunu doğru bir şekilde tespit edebilir(URL-7).

3.3.1.3. Potansiyometre

Bir diğer açısal konum ölçer olarak potansiyometre verilebilir. Potansiyometrede bir iletken kayak direnç malzemesi üzerinde ileri ve geri hareket eder. Kayağın pozisyonu çıkış direnç değerini dolayısıyla çıkış gerilimini belirler(Hall, 1984). Çıkış geriliminin değeri açısal konum hakkında bilgi verir. Potansiyometreler hem dairesel hem de çizgisel şekilde üretildiklerinden çizgisel konum belirlemede de kullanılabilirler.



a)



b)

Şekil 3.18. Potansiyometre çeşitleri a) Çizgisel hareketli b) Dairesel hareketli

3.3.1.4. Mesafe sensörleri

Temassız mesafe ölçüm sensörleri temel olarak ses, optik, endüktif, kapasitif, temelli olarak üretilirler.

Ses temelli sensörler insan kulağının duyamayacağı yüksek frekanslı sesi algılayan sensörler iken ışık temelli sensörler insan gözünün göremeyeceği dalga boyundaki ışığı algılayan sensörlerdir.

Ultrasonic olarak ifade edilen yüksek frekanslı sesi algılayan sensörlerde sesi gönderen bir vericinin yanında ya da karşısında (ki bu tasarıma göre değişebilir) sesi alan bir alıcı mevcuttur. Sesin hızı saniyede 300m olduğu dikkate alınarak gönderilen ses sinyali bir yüzeye çarparak ya da doğrudan alıcıya ulaşma zamanı ölçülerek mesafe ölçümü yapılmış olur.

Kızıl ötesi olarak ifade edilen ışığı kullanan sensörler ultrasonic olandan farklı bir şekilde ışığın hızına göre değil yansıyan ışığın genliğine ya da gelme açısına göre çalışmaktadır(Hall, 1984).

Bu tip sensörlerin çalışmasında sensörlerden gönderilen ses ya da ışığın çarpacağı yerlerin özelliği önem arz etmektedir(URL-7). Robot kolları gibi bütünleşik sistemlerin eklem yerlerinde bu tür sensörlerin kullanılması her zaman olumlu sonuç vermeyebilir.

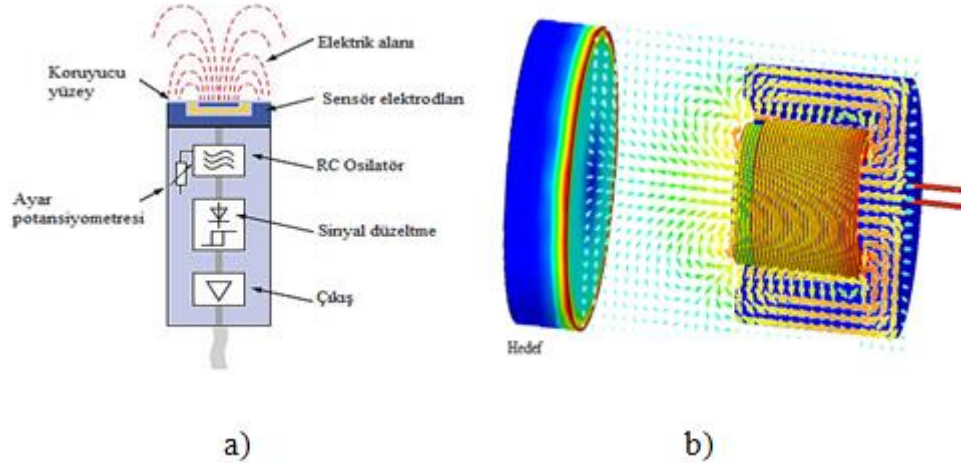


Şekil 3.19. a) Ultrasonik sensör ve dalga yansıması b) Kızıl ötesi sensör (URL-7)

Bunların yerine yüzeyden etkilenmeyen sensörler tercih edilmelidir. Bunlar endüktif ve kapasitif temelli sensörlerdir.

Endüktif yaklaşım sensörlerinin uç tarafına bir ferit nüve üzerine sarılmış bobin yüksek frekansta bir elektromanyetik alan oluşturur. Sensör ucuna metal bir cisim yaklaştırıldığında bu alan, metal cisim tarafından bozularak bobinin endüktansı değişir. Bu değişim oranı/miktarı cismin sensöre yaklaşım mesafesi ile ilgili bir elektriksel bilginin oluşmasını sağlar.

Kapasitif sensörler endüktif sensörün algılayamadığı metal dışındaki malzemeleri algılayan sensörlerdir. Sensörün ön tarafında RC rezonans devresi bulunur. Sensöre bir cisim yaklaştığında mesafeyle ilişkili olarak kapasite (C) değişerek rezonans frekansını etkiler. Bu şekilde algılama işlemini yapmış olur.



Şekil 3.20. a) Kapasitif sensör b) Endüktif sensör (URL-8, URL-9)

3.4. Robotlarda Kullanılan Elektrik Motorları

Robotik birçok teknolojik alanının kaynaşmasıyla oluşuyor olsa da özellikle endüstriyel robotlar için en önemlisi hareketlerinin kontrolüdür. Bu da robotların hareketini sağlayan motorların kontrolünün önemini göstermektedir(Brogardh, 2007).

Bu tezin içeriği elektrikli eyleyiciler(çalıştırıcı) ile ilgili olduğundan elektrik tahrikli robotlar hakkında bilgi verilecektir.

Elektrik motoru kullanmanın iyi yönlerini şu şekilde sıralayabiliriz.

- Yük veya araçların daha kesin konumlanabilmesi daha az süreç hataları ve ürün bozulmaları ve daha az malzeme maliyetinin olması.
- Parça uyarlanması ve yüksek seviyede esneklik için daha hızlı parça değişimine olanak tanınması.
- Artan yüksek verimlilik ve kapasite hacmi.
- Kolay kurulum, programlama ve eğitim için daha basit sistem tasarımına sahip olması.
- Daha az arıza zamanı ve bakım maliyetine sahip olması.
- Yağ veya hava kaçağı olmadan daha temiz ve gürültüsüz çalışması(Sandin, 2003).

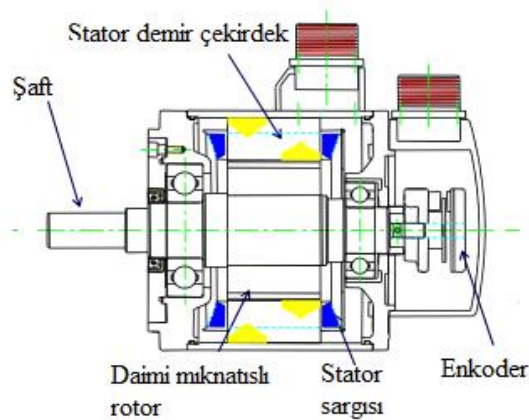
Eyleyici olarak kullanılan elektrik motorları üç çeşittir. Bunlar servo sistemli ac motorlar, servo sistemli dc motorlar ve step motorlardır. Hem ac hem dc servo sistemli motorlar keskin pozisyon kontrolü için yerleşik sisteme sahiptir. Küçük ve orta boyuttaki robotlarda yüksek tork özelliğinden dc servo kullanılır. Ağır görevli işlerde ac

servolar kullanılır. Temelini dc motorun oluşturduğu step motorlar endüstriyel robotlarda tercih edilmezlerken eğitim amaçlı tercih edilenlerin başında gelmektedirler(Ren ve Chen, 2006).

3.4.1. AC ve DC servo motorlar

Bir servo sistemli motor step motorlarla karşılaştırıldığında daha düzgün harekete ve pozisyon kontrolünde daha yüksek çözünürlüğe sahiptir. Servo motor olarak tasarlanan bir motor aşırı ısınma olmadan belirli bir hız aralığında çalışma yeteneğine, sıfır hızda çalışma ve yüklü pozisyonda gerekli torku koruma yeteneğine ve düşük hızda uzun süre aşırı ısınma olmadan çalışma yeteneğine sahip olması için bazı değişimlere tabi tutulmalıdır. Robotikte en çok kullanılan robotların en önemlisi daimi mıknatıslı (Permanent Magnet – PM) motor tipidir. Bu özelliğe sahip olan servo motorlar aynı zamanda motor kafesinde motorun rotoruna doğrudan yerleştirilmiş encoder veya resolve sahiptir. Bu aygıt motor milinin hızını ve pozisyonunu doğru bir şekilde göstermektedir. Bu motorlarda dönen parça mıknatıs olduğundan motorun diğer parçalarıyla herhangi bir fiziksel bağlantısı olmamaktadır.

İlk servo sistemli motorlarda dc motorlar kullanılırken daha yüksek frekanslı anahtarlama yapabilen daha yüksek akımlı transistörler üretildikten sonra ac motorların popülerliği artmıştır. Çünkü bir ac motor dc motora göre daha yüksek akım dalgalanmalarını idare edebilmektedir. Önceleri değişken hız uygulamalarında dc motorlar tercih edilirken ac motorların kontrolü ile ilgili gelişmelerden dolayı ac motorlar daha çok kullanılmaya başlanmıştır(Ren ve Chen, 2006).



Şekil 3.21. Daimi mıknatıslı AC servo motor yapısı (URL-10)

Bu tip motorlara bağlı dişli mekanizması geri tepme, sürtünme ve aşınma problemlerine neden olurlar. Bu problemler hataya, zayıf dinamik tepkiye, zayıf tork kontrol yeteneğine, sınırlı maksimum hız sorununa ve sürekli takibi gibi sorunlara yol

açmaktadırlar(URL-3). Bu problemleri belli ölçüde kaldıran yeni teknoloji elektrik motor tipi tasarımcısının adına itafen fisher-paykel olarak da ifade edilen direct-drive yani doğrudan sürülen motorlar olmuştur. Direct Drive motorlar motor miline doğrudan kuble edilmiştir. Böylece güç aktarımı dişli kayış-kasnak gibi mekanik parçalara ihtiyaç duyulmadan yapılmış olur(URL-11).



Şekil 3.22.Direct-Drive motor(URL-11)

Çizelge 3.3.Elektrik motorları karşılaştırma çizelgesi (URL-10)

Çeşit	Tanımlama	İndüksiyon Motoru	DC Servo Motor	Senkron AC Servo Motor	Endüktif AC Servo Motor
Motor	Tasarım	Basit	Karmaşık	Üst Seviye	Basit
	Stator	Bobin	Daimi Mıknatıs	Bobin	Bobin
	Rotor	Bobin	Bobin	Daimi Mıknatıs	Bobin
	Geri Besleme	Seçenekli	Enkoder (A,B,C)	Enkoder (A,B,C,U,V,W)	Enkoder (A,B,C)
	Hız	1.800/3.600 rpm	3.000 rpm	1.000~5.000 rpm	20.000 rpm
	Güç Aralığı	~ 400 kW	~ 5 kW	~ 22 kW	2.2 ~55 kW
	Ömrü	Rulman Ömrü	Fırça Ömrü	Rulman Ömrü	Rulman Ömrü
Sürücü	Kontrol Tipi	Vektörel/Skaler Kontrol	Vektörel	Vektörel	Vektörel
	Kontrol Modu	Hız	Hız/Pozisyon	Hız/Pozisyon/Tork	Hız/Pozisyon
	Hız Kontrol aralığı	1:200	1:1.000	1:10.000	1:1.000
	Frekans Cevabı	30 Hz	100 Hz	250~600 Hz	100 Hz
	Maksimum Tork	%150	%300	%300	%150
	Frenleme Direnci	Yok	Yok	Var	Yok
	Pozisyon Doğruluğu	± 10 mm	± 10 μ m	± 5 μ m	± 20 μ m

3.4.2. Motorların seçimi

Robotların kaldıracacağı yükün değerine, yükü taşıma zamanına ve robotun çalışacağı ortama göre motor seçimi sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Motor gücünün küçük seçilmesi motorda aşırı ısınma, motor ve koruma elemanlarının ömründe kısaltmaya sebep olurken, gücün büyük seçilmesi durumunda ise maliyetin artması ve verimin düşmesine sebep olur. Motor seçimi yaparken; motor sınıfı ve karakteristiği iyi belirlenmeli, seçilen motorun ekonomik analizi yapılmalı, motor yapısına uygun sürücü seçilmeli, çalışma süresinin sürekliliği belirlenmeli, mekanik yükün tip ve özellikleri iyi belirlenmeli ve bu yüke uygun motor mil gücü belirlenmelidir(Kozkurt vd., 2012). Motora bağlanacak olan redüktör seçimi de tasarlanacak olan sistemle doğrudan ilişkili olduğundan redüktörün çevrim oranı, mekanik yapısı ve tork değeri dikkate alınmalıdır.

Servo motorların anahtar özelliği kusursuz tork kontrolü sağlamasıdır. Servo motorların çoğunda hız artarken sargı kayıpları ve şaft sürtünmelerinden dolayı tork azalması meydana gelir. Servo motorlar maksimum torklarını bir iki dakika gibi kısa bir süre

boyunca verebilmektedirler. Sürekli tork motorun belirsiz bir süre boyunca ne kadar tork üretebildiğinin göstergesidir(Craig, 2005).

3.5. Robotlarda Benzetim

Robotun fiziksel olarak uygulamasının yapılmasından öne bilgisayar ortamında ilgili programlar yardımıyla robot hareketlerini canlandırma işlemine robotların benzetimi denir. Robotun beklenmedik hareketinden dolayı olabilecek kazaların maddi ve manevi zararlarını ortadan kaldırma yönünden önem arz etmektedir (Bingül ve Küçük, 2009).

Simülasyon şeklinde ifade edilen bu uygulama mevcut bir sistem ile ilgili deneylerin yerine sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bir dizi fayda sağlamaktadır:

- Gerçek uygulamalarla karşılaştırıldığında sanal deneyler önemli ölçüde finansal ve zaman olarak düşük harcama gerektirir. Çünkü sanal prototipini yapmak gerçek prototipini yapmaktan çok daha ucuzdur.
- Bazı destekleme kuruluşları veya devletler gerçek deneyleri desteklemezler. En azından daha az maliyetli olması bu durumu ortadan kaldırabilir.
- Normal olarak sanal deneylerin tüm yönleri tekrarlanabilir. Gerçek sistemin sonuçlarının garanti edilememesi yada maliyetinin yüksek olması önemli bir husustur.
- Simülasyon modelleri tamamıyla kontrol edilebilir. Böylece tüm giriş değişkenleri ve parametreleri önceden belirlenebilir. Bu normal olarak gerçek sistemle ilgili bir durum değildir.
- Simülasyon modelleri tamamıyla görüntülenebilir. Tüm çıkış değişkenleri ve dâhili durumları ulaşılabilir. Oysa gerçek sistemde görüntülenen her değişken için önemli ölçüm maliyetleri içerir. Buna ek olarak her bir ölçüm sistemin davranışını etkiler.
- Bazı durumlarda gerçek bir deney ahlaki nedenlerle reddedilebilir. Bu nedenle simülasyon bu durumla karşılaşma zorunluluğunu ortadan kaldırır.

Bütün bu olumlu yönlerinin yanında olumsuzlukları da vardır.

- Her sanal deney bir sistemin tam olarak doğrulanmış geçerli bir modelini gerektirir.
- Modelin simülasyon hızının ve yenilenebilirliğinin simülasyon için kullanılan bilgisayarın gücüyle sınırlı olduğundan işlemin doğruluğu da sınırlı olur(Pelz, 2003).

İyi bir robot benzetim programı robotların tüm bileşenlerini modelleyebilmelidir. Robot benzetim programları çevrimdışı (off-line) ve çevrimiçi (on-line) olmak üzere genel olarak iki programlama yöntemiyle çalışmaktadır (Bingül ve Küçük, 2009).

3.5.1. Çevrimiçi programlama

Robotun kullanımı esnasında gerçekleştirilir. Robotun uç işlevcisinin kullanıcı arabirimi vasıtasıyla eş zamanlı bir şekilde istenilen noktaya ulaştırılmasında kullanılır. Bu tür programlama robotun çalışma alanının çok değişken olduğu ortamlar için tercih edilir (Bingül ve Küçük, 2009).

3.5.2. Çevrimdışı programlama

Çevrimdışı (off-line) programlama bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design - CAD) yardımıyla desteklenen her türlü ön üretim çalışmasını sağlar. Bu programlama günümüz endüstriyel otomasyonunda olduğu kadar robot araştırmalarında da kullanılan vazgeçilmez bir yöntemdir. Bilgisayar ortamında kullanıcıya en iyi sonucu buluncaya kadar deneme olanağı sağlar. Bu yöntem kullanılarak robotlar bir kullanıcı arabirimiyle (teach pendant) kolaylıkla programlanabilir ve test edilebilir. Yine bu yöntemle robot ve çalışma hücresinde (working cell) bulunan bütün robot bileşenleri üç boyutlu olarak modellenebildiğinden robotların gerçek uygulamadaki beklenmeyen hareketleri için önlem alınmış olur. Herhangi bir robot mekanik bileşeninin bir yere çarpma ihtimali sistem tarafından belirlenir ve ilgili koordinat bilgisi verilerek kullanıcı uyarılır. Belirlenen yörüngede robotun hareket etmesi sıfır hatayla sağlanmasını yanında ters kinematik hesaplamalarda yanlış girilen bir açı ve mesafe bilgisinden kaynaklanabilecek kazalar ortadan kaldırılır(Bingül Z. ve Küçük S., 2009).



Şekil 3.23.Çevrim dışı programlama ile yapılmış bir çalışma örneği(URL-12)

3.6. Robot Dinamiğine İlişkin Tanımlamalar

Bir robot istenilen hareketleri yapabilmesi için kendisine verilen komutları kendisinin bulunduğu konumu ve hedef noktanın konumu bilmesi gerekir. Her iki konum bilindikten sonra hedefe yönelebilmesi robot eklemlerinin gerekli hareketleri yapması beklenir. Robot tüm bu hareketleri evrensel çerçeve olarak adlandırılan çalışma uzayında yapar. Robotların geometrik yapılarına göre bu hareketler üç boyutlu (X,Y,Z) eksenlerin birinde, ikisinde veya hepsinde gerçekleşebilir. Hangi eksen hareket edileceği veya hangi konumdan hangi konuma gelineceği robot eklemlerine yerleştirilen koordinat eksenleri dikkate alınarak yapılır.

Koordinat eksenlerinin birilerine durumları dört kategoride incelenebilir.

- 1- Merkezleri ve yönelimleri çakışık
- 2- Merkezleri çakışık yönelimleri farklı
- 3- Yönelimleri aynı merkezleri farklı
- 4- Yönelimleri ve merkezleri farklı

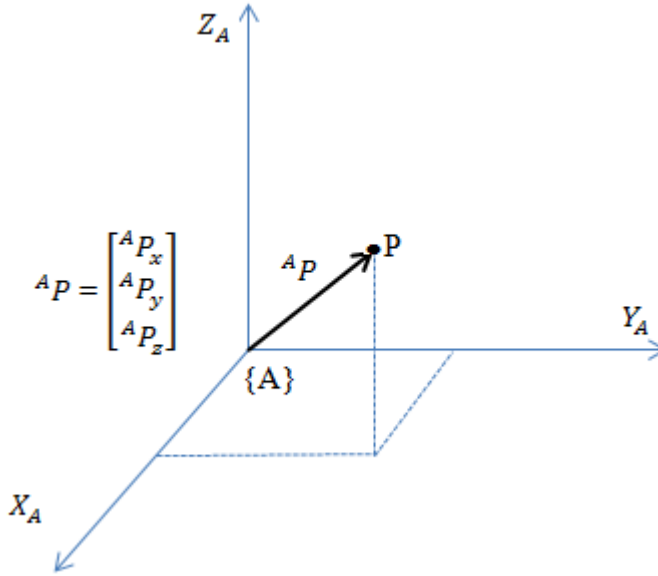
Bu durumları incelerken iki koordinat sisteminin yönelimlerini birbirlerine göre ifade ederken dönme matrisi, merkezlerini ifade ederken öteleme vektörü kullanılır. Sıralamada önce yönelim (dönme) matrisi daha sonra öteleme vektörü dikkate alınır. Bu işlemlerden sonra homojen dönüşüm matrisi denilen 4x4'lük matris elde edilir.

Sırayla konum, yönelim ve öteleme işlemleri incelenecek olursa;

3.6.1. Konum

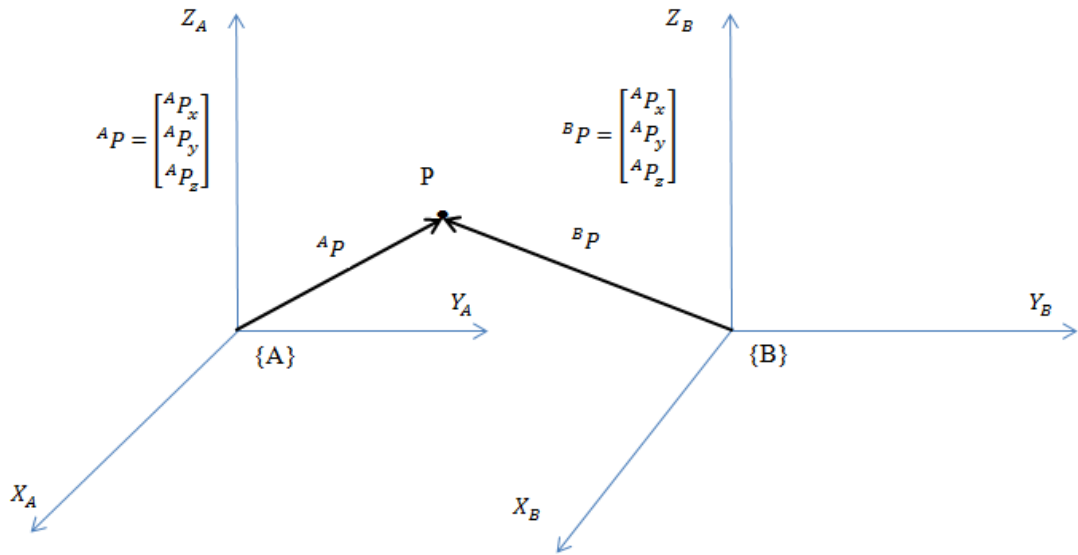
Evrensel çerçeve içerisinde robota ilişkin bir nokta üç boyutlu uzayda 3x1 boyutunda bir vektör ile ifade edilir. Bu vektör konum vektörü olarak ifade edilir. Bir vektör koordinat sisteminin ismine göre ifade edilir. Bu isimlendirme genelde alfabetik olarak verilir. Örneğin evrensel çerçeve içerisinde A olarak isimlendirilmiş bir koordinat sistemine göre bir P noktasının vektörel gösterimi ${}^A P$ şeklindedir. Bu noktanın A koordinat sisteminin merkezine olan uzaklığı x, y ve z eksen değerleri dikkate alınarak hesaplanır. Bu vektörün matematiksel gösterimi ise denklem 3.1'deki gibidir.

$${}^A P = \begin{bmatrix} {}^A P_x \\ {}^A P_y \\ {}^A P_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$



Şekil 3.24.P noktasının {A} koordinat sistemine göre gösterimi

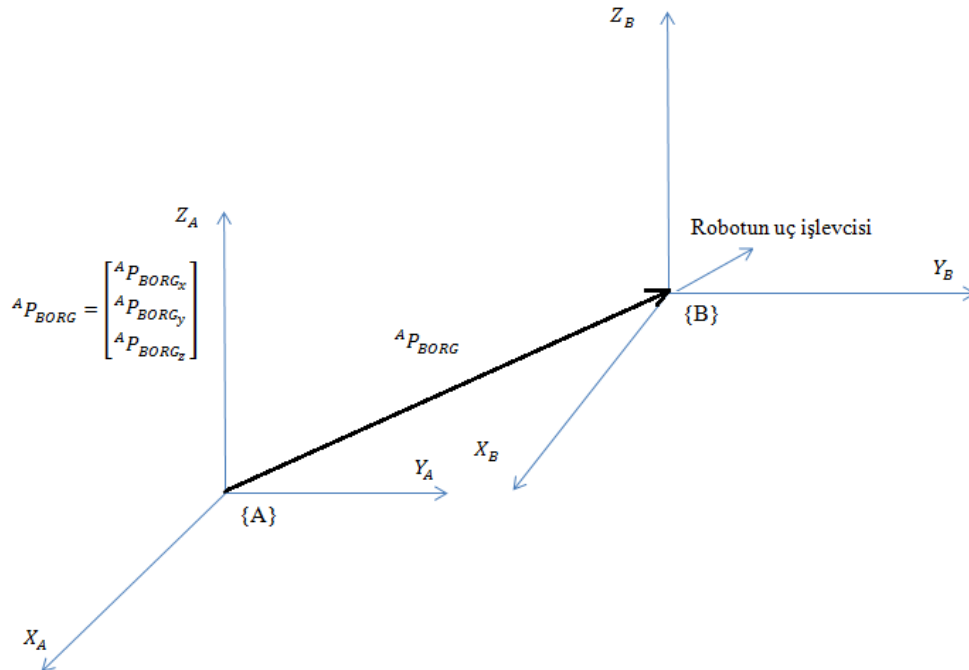
Aynı P noktasının {A} ve {B} koordinat sistemine göre tanımlamaları yapılabilir. P noktası her iki koordinat sistemlerinin merkezlerine uzaklığı farklı olabilir. Bu tanımlama P noktasının robot eklemlerinin ve robotun çevresindeki nesnelerin koordinat eksenlerine göre konumunun ve mesafesinin belirtilmesinde kullanılır.



Şekil 3.13.P noktasının {A} ve {B} koordinat sistemine göre gösterimi

Robotun uç işlevcisinin koordinat eksenleri {B} olarak kabul edildiğinde {A} koordinat ekseninin merkezi ile robot uç işlevcisi arasındaki mesafe $A P_{BORG}$ olarak gösterilir. Bunun x, y ve z eksen bileşenleri vardır. Denklem 3.2.'de bu vektörün matematiksel gösterimi verilmiştir.

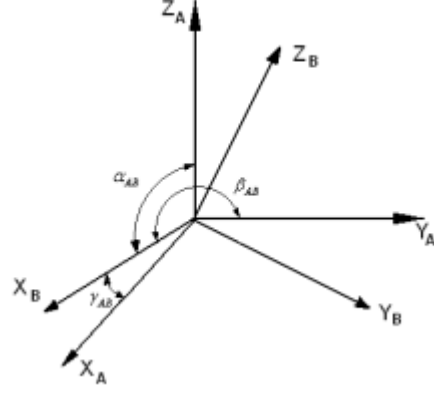
$$A P_{BORG} = \begin{bmatrix} A P_{BORG_x} \\ A P_{BORG_y} \\ A P_{BORG_z} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$



Şekil 3.26.{B} koordinat sisteminin {A} koordinat sistemine göre gösterimi

3.6.2. Yönelim

Bir koordinat sisteminin başka bir koordinat sistemine göre dönme miktarıdır. Yönelim 3x3 boyutunda bir matris ile ifade edilir. Robotun uç işlevcisine yerleştirilen koordinat sisteminin eksenleri ile diğer bir eklemine yerleştirilen koordinat sisteminin eksenleri arasındaki açılar 3x3'lük yönelim matrisini oluşturur.



Şekil 3.27. Merkezleri çakışık iki koordinat sistemi

Uç işlevcisi {B} koordinat sisteminde bulunan bir robot işlevcisinin konumu {A} referans koordinat sistemi cinsinden ifade edilmesinde birim vektörler kullanılır. {B} koordinat sistemine ait birim vektörler denklem 3.3.'de verilmiştir.

$$\{B\} = \hat{X}_B, \hat{Y}_B, \hat{Z}_B \quad (3.3)$$

{A} koordinat sistemine göre gösterimi ise aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\{A\} = {}^A\hat{X}_B, {}^A\hat{Y}_B, {}^A\hat{Z}_B \quad (3.4)$$

{A} koordinat sistemine göre {B} koordinat sisteminin yönelimini ise ${}^A_B R$ dönme matrisi verir.

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} {}^A\hat{X}_B & {}^A\hat{Y}_B & {}^A\hat{Z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Her iki koordinat sisteminin merkezleri çakışık olduğu kabul edildiğinde \hat{X}_B birim vektörünün yönelimi {A} koordinat sistemine göre aşağıdaki gibi olur.

$${}^A\hat{X}_B = \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \\ r_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |X_B||X_A| \cos \gamma_{AB} \\ |X_B||Y_A| \cos \beta_{AB} \\ |X_B||Z_A| \cos \alpha_{AB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_B \cdot \hat{X}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Y}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Z}_A \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Bu denklem diğer birim vektörlerinde kullanıldığında ${}^A_B R$ dönme matrisi aşağıdaki gibi olur.

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} {}^A\hat{X}_B & {}^A\hat{Y}_B & {}^A\hat{Z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_B \cdot \hat{X}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{X}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{X}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Y}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{Y}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{Y}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Z}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{Z}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{Z}_A \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Matris elemanlarının dikenlik ve birim özellikleri aşağıda gösterildiği gibidir.

$$\begin{aligned} \hat{X} \cdot \hat{X} &= 1 & \hat{Y} \cdot \hat{Y} &= 1 & \hat{Z} \cdot \hat{Z} &= 1 \\ \hat{X} \cdot \hat{Y} &= 0 & \hat{X} \cdot \hat{Z} &= 0 & \hat{Y} \cdot \hat{Z} &= 0 \end{aligned}$$

{A} koordinat sisteminin {B} koordinat sistemine göre yönelimi denklem 3.7.'nin ters yazılmış şekline eşittir. Bu da ${}^A_B R$ matrisinin devriği ${}^B_A R$ matrisi olduğunu gösterir. Bu iki matrisin çarpımı birim matrisi verir. ${}^B_A R$ matrisinin devriği (transpozu) ${}^B_A R^T$ şeklinde gösterilir. Benzer şekilde bir matrisin kendisi ile transpozunun çarpımı birim matrisi verir.

$${}^A_B R^T = {}^B_A R \quad (3.8)$$

$${}^B_A R^T \cdot {}^B_A R = {}^A_B R \cdot {}^B_A R = \begin{bmatrix} {}^B\hat{X}_A \cdot {}^B\hat{X}_A & {}^B\hat{X}_A \cdot {}^B\hat{Y}_A & {}^B\hat{X}_A \cdot {}^B\hat{Z}_A \\ {}^B\hat{Y}_A \cdot {}^B\hat{X}_A & {}^B\hat{Y}_A \cdot {}^B\hat{Y}_A & {}^B\hat{Y}_A \cdot {}^B\hat{Z}_A \\ {}^B\hat{Z}_A \cdot {}^B\hat{X}_A & {}^B\hat{Z}_A \cdot {}^B\hat{Y}_A & {}^B\hat{Z}_A \cdot {}^B\hat{Z}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = I \quad (3.9)$$

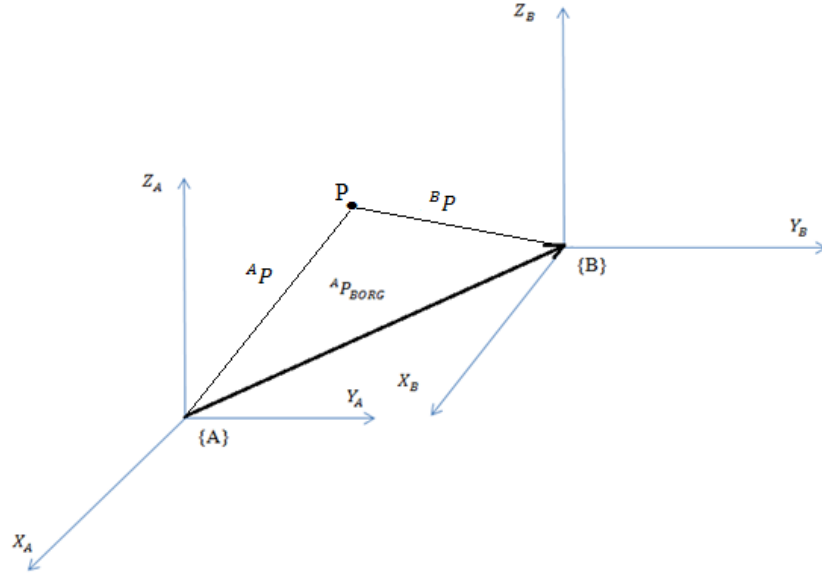
Merkezleri çakışık iki koordinat sisteminin birine göre tanımlanmış bir nokta diğer koordinat sistemine göre tanımlanması dönme matrisi kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$${}^A P = {}^A_B R \cdot {}^B P \quad (3.10)$$

3.6.3. Öteleme

Merkezleri farklı konumda olan iki koordinat sisteminin birbirlerine göre ifade edilmesinde öteleme vektörü bilinmelidir. Yönelimleri aynı fakat merkezleri farklı olan iki koordinat sisteminin merkezleri arasındaki uzaklık ${}^A P_{BORG}$ vektörü ile ifade edilir. Bir noktanın diğer koordinat sistemine göre gösterimi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$${}^A P = {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (3.11)$$

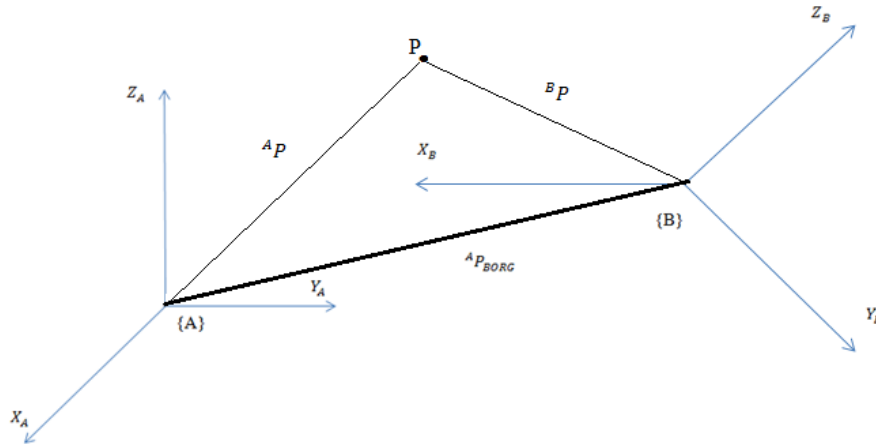


Şekil 3.28.Yönelimleri aynı merkezleri farklı iki koordinat sisteminin gösterimi

Yönelimleri ve merkezleri farklı iki koordinat sisteminin bir birlerine göre ifade edilmesinde hem yönelim matrisi hem de öteleme vektörü bilinmelidir. Herhangi bir P noktasının gösterimi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$${}^A P = {}^A_B R \cdot {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (3.12)$$

Yönelimler aynı olursa buradaki ${}^A_B R = I$ olduğundan denklem 3.11 ile aynı olur. Merkezler aynı yönelimler farklı olursa ${}^A P_{BORG} = 0$ olacağından denklem 3.10'daki gibi ${}^A P = {}^A_B R \cdot {}^B P$ şeklini alır.



Şekil 3.29.Yönelimleri ve merkezleri farklı iki koordinat sisteminin gösterimi

Yönelimleri ve merkezleri farklı olan iki koordinat sisteminin birinin merkezinde bulunan noktanın diğerine göre konumu aşağıdaki gibi bulunur.

$${}^A P = {}^A_B R \cdot 0 + {}^A P_{BORG}$$

$${}^A P = {}^A P_{BORG}$$

(3.13)

3.6.4. Dönme

Bir koordinat sisteminin eksenlerinin herhangi biri etrafında döndürülmesi iki veya üç boyutlu uzayda ifade edilebilir(Bingül ve Küçük, 2009). Öncelikli olarak iki boyutlu uzayda dönme incelenecek olursa P vektörünün x ve y bileşenleri

$$x = P \cos \alpha \text{ ve } y = P \sin \alpha \text{ olur.}$$

Bu vektör θ kadar döndürüldüğünde

$$x' = P \cos (\alpha + \theta) \text{ ve } y' = P \sin (\alpha + \theta) \text{ olur.}$$

Yani,

$$x' = P \cos \theta \cos \alpha - P \sin \theta \sin \alpha$$

$$y' = P \sin \theta \cos \alpha + P \cos \theta \sin \alpha$$

şeklinde açılır. $x = P \cos \alpha$ ve $y = P \sin \alpha$ ifadeleri yerine konursa P' vektörünün bileşenleri;

$$x' = x \cos \alpha - y \sin \alpha$$

$$y' = x \sin \alpha + y \cos \alpha$$

olarak bulunur.

Matris olarak gösterimi ise;

$$R_{(\theta)} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \text{ şeklinde olur.}$$

P noktası ile dönme matrisi kullanılarak P' ' nün yeni konumu aşağıdaki gibi gösterilir.

$$P' = R_{(\theta)}P = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \theta - y \sin \theta \\ x \sin \theta + y \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Üç boyutlu uzayda bir P noktasının merkezleri aynı kabul edilen iki koordinat sisteminin eksenleri θ kadar döndürülmesiyle bir birleri cinsinden ifade edilmesi üç farklı şekilde olabilir.

z ekseninde θ kadar döndürülürse;

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

y ekseninde θ kadar döndürülürse;

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

x ekseninde θ kadar döndürülürse;

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

dönme matrisleri elde edilir.

Dönme matrisleriyle konum vektörü çarpıldığında bir P noktasının diğer koordinat sistemine göre konumu hesaplanmış olur.

Örneğin {B} koordinat sistemine göre konumu $\begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix}$ olarak verilen bir P noktasının

konumu {B} koordinat sisteminin z eksenini etrafında 30 derece döndürülmesiyle oluşan {A} koordinat sistemine göre konumu hesaplanacak olursa (Craig, 2005);

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^A_B R = R_{z(30)} = \begin{bmatrix} \cos 30 & -\sin 30 & 0 \\ \sin 30 & \cos 30 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^A_B R = R_{z(30)} = \begin{bmatrix} 0,866 & -0,500 & 0,000 \\ 0,500 & 0,866 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{bmatrix} \text{ dönme matrisi elde edilir.}$$

$${}^A P = {}^A_B R \cdot {}^B P$$

$${}^A P = \begin{bmatrix} 0,866 & -0,500 & 0,000 \\ 0,500 & 0,866 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix}$$

$${}^A P = \begin{bmatrix} -0,634 \\ 3,098 \\ 2 \end{bmatrix} \text{ olarak bulunur.}$$

Dönme ve yönelim hesaba katıldığında denklem 3.12. kullanılarak;

$${}^A P = {}^A_B R \cdot {}^B P + {}^A P_{BORG}$$

$${}^A P = {}^A_B T \cdot {}^B P$$

$$(3.18)$$

eşitliği elde edilir. Buradan;

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} {}^A R & & & {}^A P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

eşitliği elde edilir. Bu 4x4 matrise homojen dönüşüm matrisi denir(Craig, 2005).

Örneğin, {A} koordinat sistemi x ekseninden 5 birim, y ekseninde 10 birim ötelenmiş ve

z ekseninde 30 derece döndürülerek elde edilen bir {B} koordinat sisteminde ${}^A P = \begin{bmatrix} 2 \\ 6 \\ 0 \end{bmatrix}$

olarak verilen bir P noktasının {B} koordinat sistemine göre konumu bulunacak olursa;

$${}^B T_A = \begin{bmatrix} 0.866 & -0.500 & 0.000 & 5.0 \\ 0.500 & 0.866 & 0.000 & 10.0 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^B P = \begin{bmatrix} 0.866 & -0.500 & 0.000 & 5.0 \\ 0.500 & 0.866 & 0.000 & 10.0 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2.0 \\ 6.0 \\ 0.0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$${}^B P = \begin{bmatrix} 3.732 \\ 16.196 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ olarak bulunur.}$$

Tek bir ekseninde yapılan dönme hareketinin dönme matrisi böyleyken iki veya üç eksenindeki dönmelerin etkisi ile oluşan dönme matrisi denklem 3.15, 3.16 ve 3.17'de verilen dönme matrislerinin ileri yönlü çarpımı yapılarak elde edilir. Ki bunun tümleşik gösterimi denklem 3.5.'de verilmişti.

Örneğin iki koordinat sistemi arasında şu bağlantılar kullanılarak bir hesaplama yapılacak olursa;

Bir {B} koordinat sisteminin eksenlerinden x -60 derece, y 90 derece ve z 30 derece döndürülüp, x eksenini boyunca 10 birim, y eksenini boyunca 20 birim ve z eksenini boyunca -5 birim öteleme yapıldığında {A} koordinat sistemi ile çakışıyor. Buna göre B

koordinat sistemine göre ${}^B P = \begin{bmatrix} 3 \\ 6 \\ 2 \end{bmatrix}$ olarak yerleştirilen robot işlevcisinin {A}

koordinat sistemine göre konumunu bulunacak olursa;

$$R_{x(-60)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-60) & -\sin(-60) \\ 0 & \sin(-60) & \cos(-60) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.500 & 0.866 \\ 0 & -0.866 & 0.500 \end{bmatrix}$$

$$R_{y(90)} = \begin{bmatrix} \cos 90 & 0 & \sin 90 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin 90 & 0 & \cos 90 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{z(30)} = \begin{bmatrix} \cos 30 & -\sin 30 & 0 \\ \sin 30 & \cos 30 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.866 & -0.500 & 0 \\ 0.500 & 0.866 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^A_B R_{(xyx)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.500 & 0.866 \\ 0 & -0.866 & 0.500 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.866 & -0.500 & 0 \\ 0.500 & 0.866 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^A_B R_{(xyx)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -0.866 & 0.500 & 0 \\ -0.500 & -0.866 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.866 & -0.500 & 0 \\ 0.500 & 0.866 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^A_B R_{(xyx)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -0.500 & 0.866 & 0 \\ -0.866 & -0.500 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^A_B T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 10 \\ -0.500 & 0.866 & 0 & 20 \\ -0.866 & -0.500 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^A P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 10 \\ -0.500 & 0.866 & 0 & 20 \\ -0.866 & -0.500 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3.0 \\ 6.0 \\ 2.0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$${}^A P = \begin{bmatrix} 12 \\ 23.696 \\ -10.134 \end{bmatrix} \text{ olarak bulunur.}$$

3.6.5. Dönüşüm matrisinin tersini alma

Dönüşüm matrisinin tersinin alınması farklı koordinat sistemlerinde tanımlanan noktaların bir birlerine dönüştürülmesinde kullanılır. Dönüşüm matrisindeki dönme matrisinin tersi alınır ve yeni dönüşüm matrisinde dönme kısmına yazılır. Daha sonra tersi alınmış dönme matrisi ile konum vektörü çarpılır ve önüne eksi işaret getirilir. Bu

yeni eleman yeni dönüşüm matrisinde konum vektörünün yerine yazılır. Bu şekilde dönüşüm matrisinin devriği alınmış olur.

Örneğin;

$${}^A_B T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 10 \\ -0.500 & 0.866 & 0 & 20 \\ -0.866 & -0.500 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ dönüşüm matrisinin devriği;}$$

$${}^A_B T^T = {}^B_A T = \begin{bmatrix} 0 & -0.500 & -0.866 & 10 \\ 0 & 0.866 & -0.500 & 20 \\ 1 & 0 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^A_B T^T = {}^B_A T = \begin{bmatrix} 0 & -0.500 & -0.866 & \left[\begin{array}{ccc} 10x0 & -20x0.500 & +5x0.866 \\ 10x0 & +20x0.866 & +5x0.500 \\ 10x1 & +20x0 & -5x0 \end{array} \right] \\ 0 & 0.866 & -0.500 & \\ 1 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & \left[\begin{array}{ccc} & & \\ & 1 & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{array} \right] \end{bmatrix}$$

$${}^A_B T^T = {}^B_A T = \begin{bmatrix} 0 & -0.500 & -0.866 & 5.67 \\ 0 & 0.866 & -0.500 & -19.82 \\ 1 & 0 & 0 & -10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olarak bulunur.

3.6.6. Ardışık dönüşümler

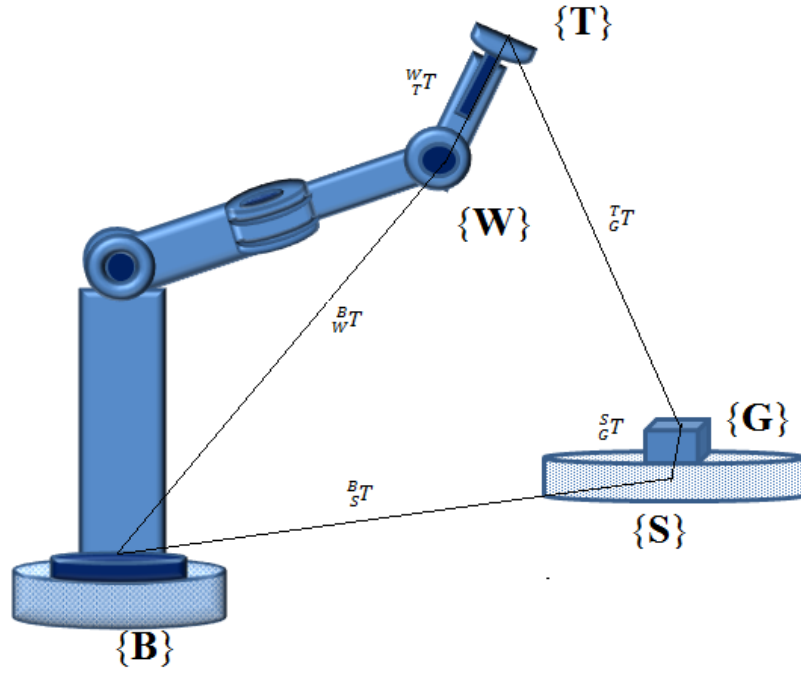
Robotun uç işlevcisinin konumunun referans koordinat sistemine göre konumunun belirlenebilmesi için uç işlevcinin koordinat sisteminden başlayıp referans koordinat sistemine doğru robot eklemlerine atanan koordinat sistemleri boyunca dönüşümler yapılmalıdır.

Üç koordinat sistemi arasındaki dönüşüm aşağıdaki gibi yapılır.

$$\begin{aligned} {}^A_C T &= {}^A_B T {}^B_C T = \begin{bmatrix} {}^A_B R & {}^A_B P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B_C R & {}^B_C P_{CORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} {}^A_B R {}^B_C R & {}^A_B R {}^B_C P_{CORG} + {}^A_B P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Bu denklem {C} koordinat sisteminde verilen bir noktanın vektörü ile çarpılırsa {A} koordinat sistemine göre konumu bulunur. Yani;

$${}^A_P = \begin{bmatrix} {}^A_B R {}^B_C R & {}^A_B R {}^B_C P_{CORG} + {}^A_B P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^C_P \\ 1 \end{bmatrix} \text{ olur.}$$



Şekil 3.30. Robot kol koordinatlarının gösterimi

Robot kolu koordinatları arasındaki ardışık dönüşüm ${}^B_S T \quad {}^S_G T = {}^B_W T \quad {}^W_T T \quad {}^T_G T$ eşitliği ile verilebilir. Bu eşitlikteki ${}^T_G T$ dönüşüm matrisi yalnız bırakmak için;

${}^B_W T \quad {}^W_T T$ ifadesinin yerine ${}^B_T T$ yazıldığında

${}^B_S T \quad {}^S_G T = {}^B_T T \quad {}^T_G T$ denkleminin her iki tarafı ${}^B_T T^{-1}$ ile çarpıldığında

$${}^B_T T^{-1} {}^B_S T \quad {}^S_G T = {}^B_T T \quad {}^B_T T^{-1} {}^T_G T$$

$${}^T_G T = {}^B_T T^{-1} {}^B_S T \quad {}^S_G T$$

$$(3.21)$$

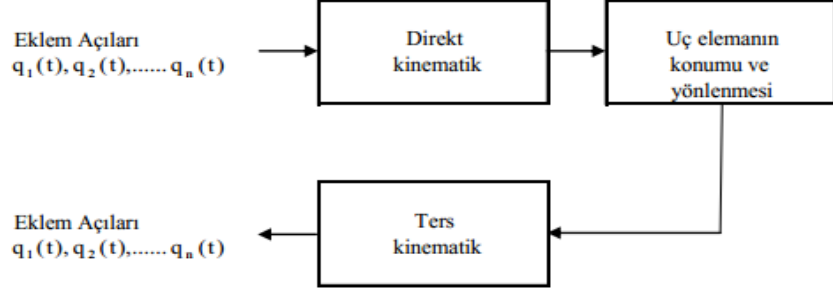
Eşitliği elde edilir.

3.7. Robot Kolu Kinematığı

Hareketin geometrisinin sabit referans koordinat sistemine göre zamanın fonksiyonu olarak analitik olarak incelenmesidir. Teori ve uygulamada robot kolu kinematığı ile ilgili olarak aşağıda verilen iki temel durum vardır.

- 1- Bir manipulatörün eklemlerine ait açı bilgileri ve uzuvların geometrik yapıları dikkate alınarak kolun uç noktasının referans eksene göre konumu ve yönelmesi tanımlanır.

- 2- Robotun uç noktasının uzayda verilen herhangi bir noktaya ulaşabilmesi için eklemlerin açı ve kayma değerlerinin hesaplanması. Birden fazla kol konfigürasyonu ile ulaşılması durumunda uygun olanın seçilmesi(URL-4). Bahsi geçen bu iki durumun birincisi ileri kinematik, ikincisi ters kinematik olarak tanımlanır.



Şekil 3.31.Direk ve ters kinematik ilişkisi(URL-4)

3.7.1. İleri kinematik

Eklem değişkenlerinin durumuna göre robotun uç işlevcisinin konumunun belirlenmesi olarak ifade edilen ileri kinematik ile ilgili bazı çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden Denavit-Hartenberg yöntemi sıklıkla kullanılan yöntemdir.

3.7.1.1. Denavit-Hartenberg yöntemi

Bu yöntemde dört ana değişken kullanılarak robot kinematik analizi yapılır. Bunlar, iki koordinat eksenindeki bağ uzunluğu a_{i-1} , $(i-1)$ ile i eksenleri arasındaki bağ açısı α_{i-1} , üst üste çakışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı d_i ve iki bağ arasında oluşan eklem açısı θ_i 'dir. Bu dört değişkene D-H parametreleri denir(Bingül ve Küçük, 2009). Eklemlere koordinat sistemleri yerleştirilmesi aşağıdaki hususlara göre yapılır.

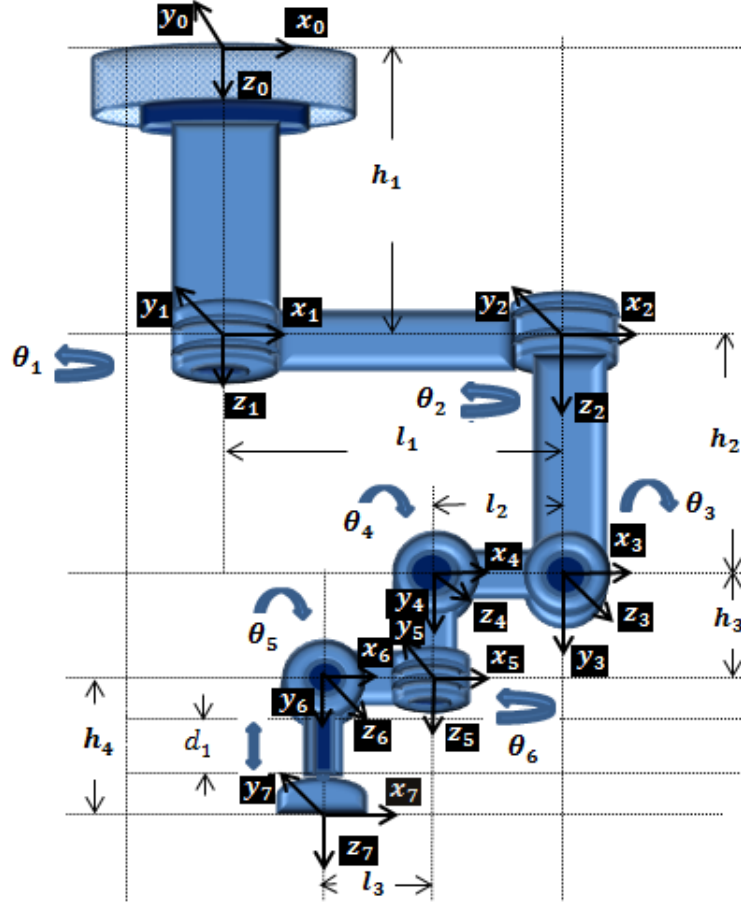
- 1- Kayma hareketi z ekseninde, dönme hareketi z ekseninde yapılır.
- 2- Dönme hareketinde kolun eksenini x eksenine seçilir.
- 3- Sağ el kuralına göre y eksenini belirler.
- 4- Sıfır ve birinci eksenler üst üste kabul edilir.

Eklem parametreleri aşağıdaki ifadelerle ifade edilir.

- 1- a_{i-1} , \hat{Z}_{i-1} ile \hat{Z}_i arasındaki \hat{X}_{i-1} boyunca belirlenen uzunluk.
- 2- a_{i-1} , \hat{Z}_{i-1} ile \hat{Z}_i arasındaki \hat{X}_{i-1} boyunca ölçülen açıdır.

- 3- d_i , \hat{X}_{i-1} ile \hat{X}_i arasındaki \hat{Z}_i boyunca belirlenen uzunluk.
- 4- θ_i , \hat{X}_{i-1} ile \hat{X}_i arasındaki \hat{Z}_i boyunca ölçülen açıdır.

Aşağıda tez çalışması ile ilişkili bir geometriye sahip 6R1P yedi serbestlik derecesine sahip manipülatör tasarlanmış ve ileri kinematik örnek hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 3.32.7-DOF 6R1P robotun eklemlerine koordinat yerleştirilmesi

Çizelge 3.4.7-DOF robota ait D-H parametreleri

i	a_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	Değişken
1	0	0	h_1	θ_1	θ_1
2	0	l_1	h_2	θ_2	θ_2
3	90	0	0	θ_3	θ_3
4	0	$-l_2$	0	θ_4	θ_4
5	-90	0	h_3	θ_5	θ_5
6	90	$-l_3$	0	θ_6	θ_6
7	-90	0	(h_4+d_1)	0	d_1

Aşağıda yapılan matris işlemlerinde görsel sadelik oluşturmak için aşağıdaki kısaltmalar yapılmıştır.

$$c\theta_i = c_i$$

$$s\theta_i = s_i$$

$$c\theta_i c\theta_j c\theta_k = c_{ijk}$$

$$s\theta_i s\theta_j s\theta_k = s_{ijk}$$

Transfer matrisi genel formu aşağıdaki gibidir.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c a_{i-1} & c\theta_i c a_{i-1} & -s a_{i-1} & -s a_{i-1} d_i \\ s\theta_i s a_{i-1} & c\theta_i s a_{i-1} & c a_{i-1} & c a_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Bu parametrelere ve transfer matrisi formuna göre her bir eklem için dönüşüm matrisleri aşağıdaki gibi yazılır.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_1 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & -l_2 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_3 \\ -s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & -l_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^6_7T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (h_4 + d_1) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Bu matrisler ileri yönlü çarpıldığında ana çerçeveden araç çerçevesine doğru dönüşüm matrisi elde edilir.

$$\begin{aligned} {}^B_7T &= {}^0_7T = \\ &\begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_1 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots \\ &\cdots \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & -l_2 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_3 \\ -s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots \\ &\cdots \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & -l_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (h_4 + d_1) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Aşağıda kullanılan c_i ve s_i , $\cos\theta_i$ ve $\sin\theta_i$ anlamına gelmektedir.

$$\begin{aligned} {}^0_2T &= \begin{bmatrix} (c_{12} - s_{12}) & (-c_1s_2 - s_1c_2) & 0 & c_1l_1 \\ (s_1c_2 + c_1s_2) & (-s_{12} + c_{12}) & 0 & s_1l_1 \\ 0 & 0 & 1 & (h_1 + h_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^0_3T &= {}^0_2T \cdot {}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3(c_{12} - s_{12}) & -s_3(c_{12} - s_{12}) & (c_1s_2 + s_1c_2) & c_1l_1 \\ c_3(s_1c_2 + c_1s_2) & -s_3(s_1c_2 + c_1s_2) & (s_{12} - c_{12}) & s_1l_1 \\ 0 & s_3 & c_3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$${}^0T_4 = {}^0T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} & \left\{ \begin{array}{l} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} & \{(c_1 s_2 + s_1 c_2)\} & \left\{ \begin{array}{l} -l_2 c_3 (c_{12} - s_{12}) \\ +c_1 l_1 \end{array} \right\} \\ \left\{ \begin{array}{l} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} & \left\{ \begin{array}{l} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} & \{(s_{12} - c_{12})\} & \left\{ \begin{array}{l} -l_2 c_3 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ +s_1 l_1 \end{array} \right\} \\ \left\{ \begin{array}{l} (s_3 c_4 + c_3 s_4) \\ 0 \end{array} \right\} & \left\{ \begin{array}{l} (-s_{34} + c_{34}) \\ 0 \end{array} \right\} & 0 & \left\{ \begin{array}{l} -l_2 s_3 + (h_1 + h_2) \\ 0 \end{array} \right\} \end{bmatrix}$$

$${}^0T_5 = {}^0T_4 {}^4T_5 = \begin{bmatrix} \left[\begin{array}{l} c_5 \left\{ \begin{array}{l} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} \\ -s_5 \{(c_1 s_2 + s_1 c_2)\} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{l} -s_5 \left\{ \begin{array}{l} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} \\ -c_5 \{(c_1 s_2 + s_1 c_2)\} \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{l} c_5 \left\{ \begin{array}{l} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} \\ -s_5 \{(s_{12} - c_{12})\} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{l} -s_5 \left\{ \begin{array}{l} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} \\ -c_5 \{(s_{12} - c_{12})\} \end{array} \right] \dots \\ \left[\begin{array}{l} c_5 \{(s_3 c_4 + c_3 s_4)\} \\ 0 \end{array} \right] & \left[\begin{array}{l} -s_5 \{(s_3 c_4 + c_3 s_4)\} \\ 0 \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{l} \{-c_3 s_4 (c_{12} - s_{12})\} \\ \{-s_3 c_4 (c_{12} - s_{12})\} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{l} h_3 \left\{ \begin{array}{l} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} \\ + \left\{ \begin{array}{l} -l_2 c_3 (c_{12} - s_{12}) \\ +c_1 l_1 \end{array} \right\} \end{array} \right] \\ \dots \left[\begin{array}{l} \{-c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2)\} \\ \{-s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2)\} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{l} h_3 \left\{ \begin{array}{l} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} \\ + \left\{ \begin{array}{l} -l_2 c_3 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ +s_1 l_1 \end{array} \right\} \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{l} \{(-s_{34} + c_{34})\} \\ 0 \end{array} \right] & \left[\begin{array}{l} h_3 \{(-s_{34} + c_{34})\} \\ + \{-l_2 s_3 + (h_1 + h_2)\} \\ 1 \end{array} \right] \end{bmatrix}$$

$${}^0T = {}^0T \quad {}^5T =$$

$$\left[\begin{array}{c} \left(\begin{array}{c} c_6 \left[\begin{array}{c} c_5 \left\{ \begin{array}{c} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} \\ -s_5 \{ (c_1 s_2 + s_1 c_2) \} \end{array} \right] \\ + s_6 \left[\begin{array}{c} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right] \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} c_6 \left[\begin{array}{c} c_5 \left\{ \begin{array}{c} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} \\ -s_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{array} \right] \\ + s_6 \left[\begin{array}{c} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right] \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} c_6 \left[\begin{array}{c} c_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \\ -s_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{array} \right] \\ + s_6 \left[\begin{array}{c} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right] \end{array} \right) \\ 0 \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{c} -s_6 \left[\begin{array}{c} c_5 \left\{ \begin{array}{c} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} \\ -s_5 \{ (c_1 s_2 + s_1 c_2) \} \end{array} \right] \\ + c_6 \left[\begin{array}{c} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right] \end{array} \right) \\ \dots \\ \left(\begin{array}{c} -s_6 \left[\begin{array}{c} c_5 \left\{ \begin{array}{c} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} \\ -s_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{array} \right] \\ + c_6 \left[\begin{array}{c} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right] \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} -s_6 \left[\begin{array}{c} c_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \\ -s_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{array} \right] \\ + c_6 \left[\begin{array}{c} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right] \end{array} \right) \\ 0 \end{array} \right) \quad \dots \\ \left(\begin{array}{c} -s_5 \left\{ \begin{array}{c} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} \\ -c_5 \{ (c_1 s_2 + s_1 c_2) \} \end{array} \right) \\ \dots \left(\begin{array}{c} -s_5 \left\{ \begin{array}{c} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} \\ -c_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} -s_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \\ 0 \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{c} -l_3 \left[\begin{array}{c} c_5 \left\{ \begin{array}{c} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} \\ -s_5 \{ (c_1 s_2 + s_1 c_2) \} \end{array} \right] \\ + \left[\begin{array}{c} h_3 \left\{ \begin{array}{c} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} \\ -l_2 c_3 (c_{12} - s_{12}) \\ + c_1 l_1 \end{array} \right] \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} -l_3 \left[\begin{array}{c} c_5 \left\{ \begin{array}{c} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} \\ -s_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{array} \right] \\ + \left[\begin{array}{c} h_3 \left\{ \begin{array}{c} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} \\ -l_2 c_3 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ + s_1 l_1 \end{array} \right] \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} -l_3 \left[\begin{array}{c} c_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \\ -s_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{array} \right] \\ + \left[\begin{array}{c} h_3 \{ (-s_{34} + c_{34}) \} \\ -l_2 s_3 + (h_1 + h_2) \end{array} \right] \end{array} \right) \\ 1 \end{array} \right) \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned}
{}^0T_7 = {}^0T_6 {}^6T_7 = & \left[\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} c_6 \left[\begin{array}{l} c_5 \left\{ \begin{array}{l} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} \\ -s_5 \{ (c_1 s_2 + s_1 c_2) \} \end{array} \right] \\ +s_6 \left[\begin{array}{l} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right] \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} -s_5 \left\{ \begin{array}{l} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{array} \right\} \\ -c_5 \{ (c_1 s_2 + s_1 c_2) \} \end{array} \right] \end{array} \right) \\ \\ \\ \left(\begin{array}{l} c_6 \left[\begin{array}{l} c_5 \left\{ \begin{array}{l} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} \\ -s_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{array} \right] \\ +s_6 \left[\begin{array}{l} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right] \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} -s_5 \left\{ \begin{array}{l} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{array} \right\} \\ -c_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{array} \right] \end{array} \right) \quad \dots \\ \\ \left(\begin{array}{l} c_6 \left[\begin{array}{l} c_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \\ +s_6 \left[\begin{array}{l} (-s_{34} + c_{34}) \end{array} \right] \end{array} \right] \\ 0 \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} -s_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \\ 0 \end{array} \right] \end{array} \right)
\end{array} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} -s_6 \left[c_5 \begin{Bmatrix} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{Bmatrix} \right] \\ + c_6 \left[\begin{Bmatrix} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \end{Bmatrix} \right] \end{pmatrix} \quad \left((h_4 + d_1) \begin{pmatrix} -s_6 \left[c_5 \begin{Bmatrix} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{Bmatrix} \right] \\ + c_6 \left[\begin{Bmatrix} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \end{Bmatrix} \right] \end{pmatrix} \right) \\
\left(-s_6 \left[c_5 \begin{Bmatrix} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{Bmatrix} \right] \right. \\ \left. + c_6 \left[\begin{Bmatrix} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{Bmatrix} \right] \right) \quad \left((h_4 + d_1) \begin{pmatrix} -s_6 \left[c_5 \begin{Bmatrix} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{Bmatrix} \right] \\ + c_6 \left[\begin{Bmatrix} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{Bmatrix} \right] \end{pmatrix} \right) \\
\left(-s_6 \left[c_5 \{(s_3 c_4 + c_3 s_4)\} \right] \right. \\ \left. + c_6 \left[\{(-s_{34} + c_{34})\} \right] \right) \quad \left((h_4 + d_1) \begin{pmatrix} -s_6 \left[c_5 \{(s_3 c_4 + c_3 s_4)\} \right] \\ + c_6 \left[\{(-s_{34} + c_{34})\} \right] \end{pmatrix} \right) \\
0 \quad \left(-l_3 \left[c_5 \begin{Bmatrix} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{Bmatrix} \right] \right. \\ \left. + \begin{Bmatrix} h_3 \begin{Bmatrix} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{Bmatrix} \\ + \begin{Bmatrix} -l_2 c_3 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ +s_1 l_1 \end{Bmatrix} \end{Bmatrix} \right) \\
1
\end{pmatrix}$$

$$P_x = \left\{ \left((h_4 + d_1) \left(-s_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (c_{12} - s_{12}) \} \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \} \end{bmatrix} + c_6 \begin{bmatrix} \{-c_3 s_4 (c_{12} - s_{12})\} \\ \{-s_3 c_4 (c_{12} - s_{12})\} \end{bmatrix} \right) \right. \\ \left. + \left(-l_3 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (c_{12} - s_{12}) \} \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \} \end{bmatrix} \right) \right. \\ \left. + \left(h_3 \begin{bmatrix} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \} \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \} \end{bmatrix} \right) \right. \\ \left. + \begin{bmatrix} -l_2 c_3 (c_{12} - s_{12}) \} \\ +c_1 l_1 \end{bmatrix} \right) \right\} \quad (3.23)$$

$$P_y = \left\{ \left((h_4 + d_1) \left(-s_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \end{bmatrix} + c_6 \begin{bmatrix} \{-c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2)\} \\ \{-s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2)\} \end{bmatrix} \right) \right) \right. \\ \left. + \left(-l_3 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \end{bmatrix} \right) \right. \\ \left. + \left(h_3 \begin{bmatrix} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \end{bmatrix} \right) \right. \\ \left. + \begin{bmatrix} -l_2 c_3 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ +s_1 l_1 \end{bmatrix} \right) \right\} \quad (3.24)$$

$$P_z = \left\{ \left((h_4 + d_1) \left(-s_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \end{bmatrix} + c_6 \begin{bmatrix} \{-s_{34} + c_{34}\} \end{bmatrix} \right) \right) \right. \\ \left. + \left(-l_3 \begin{bmatrix} c_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \end{bmatrix} \right) \right. \\ \left. + \begin{bmatrix} h_3 \{ (-s_{34} + c_{34}) \} \\ + \{ -l_2 s_3 + (h_1 + h_2) \} \end{bmatrix} \right) \right\} \quad (3.25)$$

Tüm açı değerleri sıfır olduğunda;

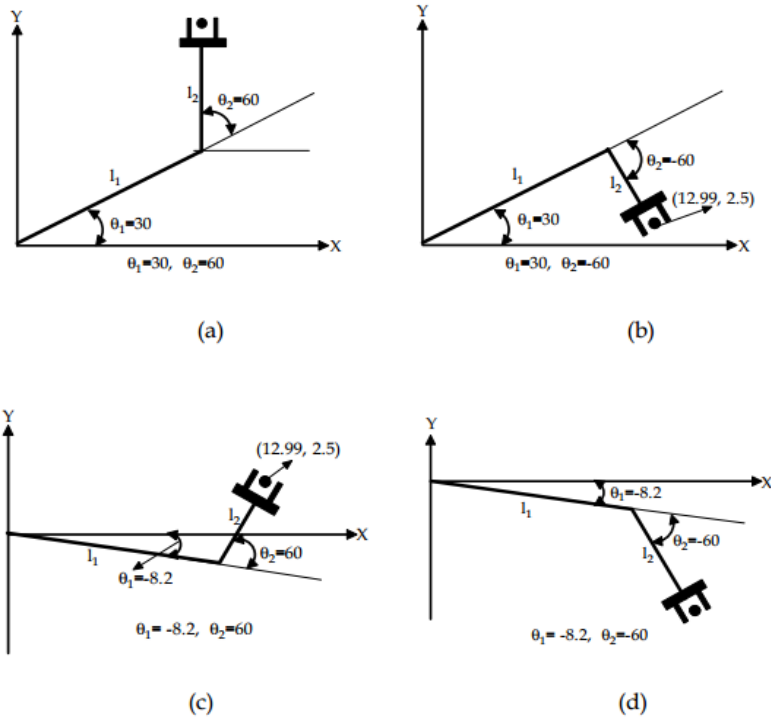
$$P_x = (l_1 - l_2 - l_3)$$

$$P_y = 0$$

$$P_z = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + d_1)$$

3.7.2. Ters kinematik

Ters kinematik modelleme robotik araştırmalarının en temel problemlerinden biridir(Gan vd., 2005). Ters kinematik üç boyutlu uzayda verilen herhangi bir noktaya robotun uç işlevcisinin ulaşması için eklem değişkenlerinin belirlenmesi işlemidir. Ancak eklem değişkenleri iki farklı değerde olabildiğinden seri manipülatörün uç işlevcisi istenen konuma gelemeyebilir. Ya da istenen konuma birden fazla geometrik düzenleşimle gelebilir. Bu durum istenmeyen bir durumdur. Manipülatörün kullanım yerine göre eklem değişkenleri için belirlenen sınır değerler istenmeyen durum sayısı azaltabilir.



Şekil 3.33. Manipülatöre ait dört farklı geometrik düzenleşim(Cubero, 2007)

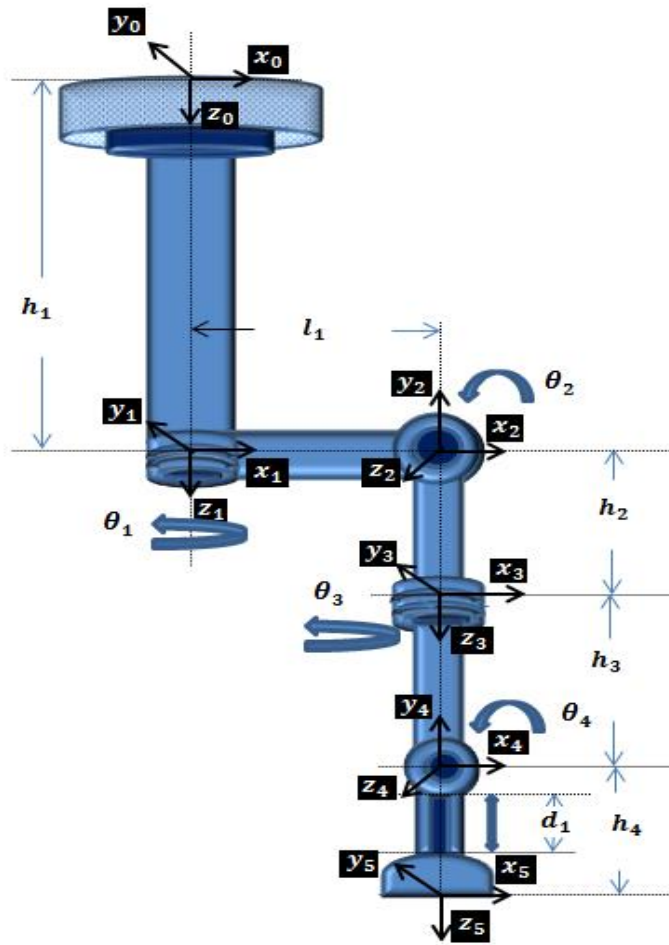
Şekil 3.33.'e göre dört farklı ters kinematik çözüm olsa da bunlardan ikisi gerçek çözümlü (b ve c) diğer ikisi gerçekte olmayan çözümlü göstermektedir. Buradan anlaşılacağı üzere matematiksel çözüm daima fiziksel çözümlü temsil etmemektedir.

Bir manipülatörün kinematik eşitlik çözümü lineer olmayan bir problem içerir. Altı serbestlik derecesine sahip bir robot manipülatörün kinematik eşitliğinde on iki eşitlik ve altı bilinmeyen (θ_1 θ_6) vardır. Bu eşitliklerden dokuz tanesi dönme matrisi bileşeni iken üç tanesi bağımsız değişken içermektedir. Böylece altı bilinmeyenli üç eşitlik elde edilmiş olur.

Ters kinematik hesaplamada geometrik ve cebirsel olmak üzere iki çözüm yaklaşımı vardır. Geometrik yaklaşımda manipülâtörün geometrik özelliği dikkate alınarak trigonometrik eşitlikler yazılarak çözüm yapılırken cebirsel yaklaşımda matris ve matrisler arasındaki matematiksel hesaplamalar yapılarak çözüm yapılır. Üç ve daha fazla ekleme sahip manipülâtörler için geometrik yaklaşım çok zorlayıcı bir çözüm içerdiğinden cebirsel yaklaşım tercih edilir(Cubero, 2007).

3.7.2.1 Analitik çözüm yaklaşımı

Aşağıda tez çalışması ile ilişkili bir geometrik yapıya sahip 4R1P 5-DOF bir manipülâtörün ters kinematik hesaplaması örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.34.5-DOF 4R1P robotun eklemlerine koordinatların yerleştirilmesi

Çizelge 3.5.5-DOF robota ait D-H parametreleri

i	a_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	Değişken
1	0	0	h_1	θ_1	θ_1
2	-90	l_1	0	θ_2	θ_2

3	90	0	h_2	θ_3	θ_3
4	-90	0	h_3	θ_4	θ_4
5	90	0	$(h_4 + d_1)$	0	d_1

Robota ait ileri kinematik dönüşüm matrisleri denklem 3.22'ye göre yazılırsa;

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -h_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_4 & -c\theta_4 & 0 & h_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -(h_4 + d_1) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

${}^0_5T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T$ denkleminin her iki tarafı ${}^0_1T^{-1}$ ile çarpıldığında

$${}^0_1T^{-1} {}^0_5T = {}^0_1T^{-1} {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T$$

${}^0_1T^{-1} {}^0_5T = {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T$ eşitliği elde edilir.

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{olarak kabul edilirse;}$$

Bu eşitliğe göre matrisler yerine konduğunda;

$${}^1_5T = \begin{bmatrix} (c_1r_{11} + s_1r_{21}) & (c_1r_{12} + s_1r_{22}) & (c_1r_{13} + s_1r_{23}) & (c_1p_x + s_1p_y) \\ (-s_1r_{11} + c_1r_{21}) & (-s_1r_{12} + c_1r_{22}) & (-s_1r_{13} + c_1r_{23}) & (-s_1p_x + c_1p_y) \\ & r_{31} & r_{32} & (p_z - h_1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T \quad {}^2_3T \quad {}^3_4T \quad {}^4_5T = {}^1_5T =$$

$$\begin{bmatrix} (c_2c_3c_4 - s_2s_4) & (-s_3c_2) & (c_2c_3s_4 + s_2c_4) & \left(l_1 + h_4(s_2c_4 + c_2c_3s_4) + h_2s_2 + h_3s_2 \right) \\ (s_3c_4) & (c_3) & (s_3s_4) & (h_4s_3s_4) \\ (-c_2s_4 - c_3c_4s_2) & s_2s_3 & (c_2c_4 - c_3s_2s_4) & \left(h_4(c_2c_4 - c_3s_2s_4) + h_2c_2 + h_3c_2 \right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ters kinematik hesaplamalar için bu iki matris elemanları eşitlendiğinde;

$$\begin{aligned} 1- (c_1r_{11} + s_1r_{21}) &= (c_2c_3c_4 - s_2s_4) \\ 2- (-s_1r_{11} + c_1r_{21}) &= (s_3c_4) \\ 3- r_{31} &= (-c_2s_4 - c_3c_4s_2) \\ 4- (c_1r_{12} + s_1r_{22}) &= (-s_3c_2) \\ 5- (-s_1r_{12} + c_1r_{22}) &= (c_3) \\ 6- r_{32} &= s_2s_3 \\ 7- (c_1r_{13} + s_1r_{23}) &= (c_2c_3s_4 + s_2c_4) \\ 8- (-s_1r_{13} + c_1r_{23}) &= (s_3s_4) \\ 9- r_{33} &= (c_2c_4 - c_3s_2s_4) \\ 10- (c_1p_x + s_1p_y) &= (l_1 + h_4(s_2c_4 + c_2c_3s_4) + h_2s_2 + h_3s_2) \\ 11- (-s_1p_x + c_1p_y) &= (h_4s_3s_4) \\ 12- (p_z - h_1) &= (h_4(c_2c_4 - c_3s_2s_4) + h_2c_2 + h_3c_2) \end{aligned}$$

8. ve 11. Eşitliklerin benzerlikleri dikkate alındığında;

11. eşitliğin her iki tarafı h_4 'e bölünürse 8. Eşitlik elde edilir.

$$(-s_1p_x + c_1p_y)/h_4 = (h_4s_3s_4)/h_4$$

Bu duruma göre

$$(-s_1p_x + c_1p_y)/h_4 = (-s_1r_{13} + c_1r_{23}) \text{ elde edilir.}$$

Buradan sinüs ve kosinüslü ifadeler eşitliğin iki tarafına alınır.

$$\frac{s_1}{c_1} = \frac{(r_{23}h_4 - p_y)}{(r_{13}h_4 - p_x)} \text{ eşitliği elde edilir.}$$

Buradan;

$$\tan\theta_1 = \frac{(r_{23}h_4 - p_y)}{(r_{13}h_4 - p_x)}$$

$$\theta_1 = \text{Arctan2}((r_{23}h_4 - p_y), (r_{13}h_4 - p_x)) \quad (3.26)$$

Elde edilir.

θ_1 bilindiğine göre;

5. eşitlik dikkate alınarak;

$$(-s_1r_{12} + c_1r_{22}) = (c_3)$$

$$\theta_3 = \text{Arctan2}\left(\pm\sqrt{1 - (-s_1r_{12} + c_1r_{22})^2}, -s_1r_{12} + c_1r_{22}\right) \quad (3.27)$$

6. eşitlik dikkate alınarak;

$$r_{32} = s_2s_3$$

$$\theta_2 = \text{Arctan2}\left(\frac{r_{32}}{s_{\theta_3}}, \pm\sqrt{1 - \left(\frac{r_{32}}{s_{\theta_3}}\right)^2}\right) \quad (3.28)$$

11. eşitlik dikkate alınarak;

$$(-s_1p_x + c_1p_y) = (h_4s_3s_4)$$

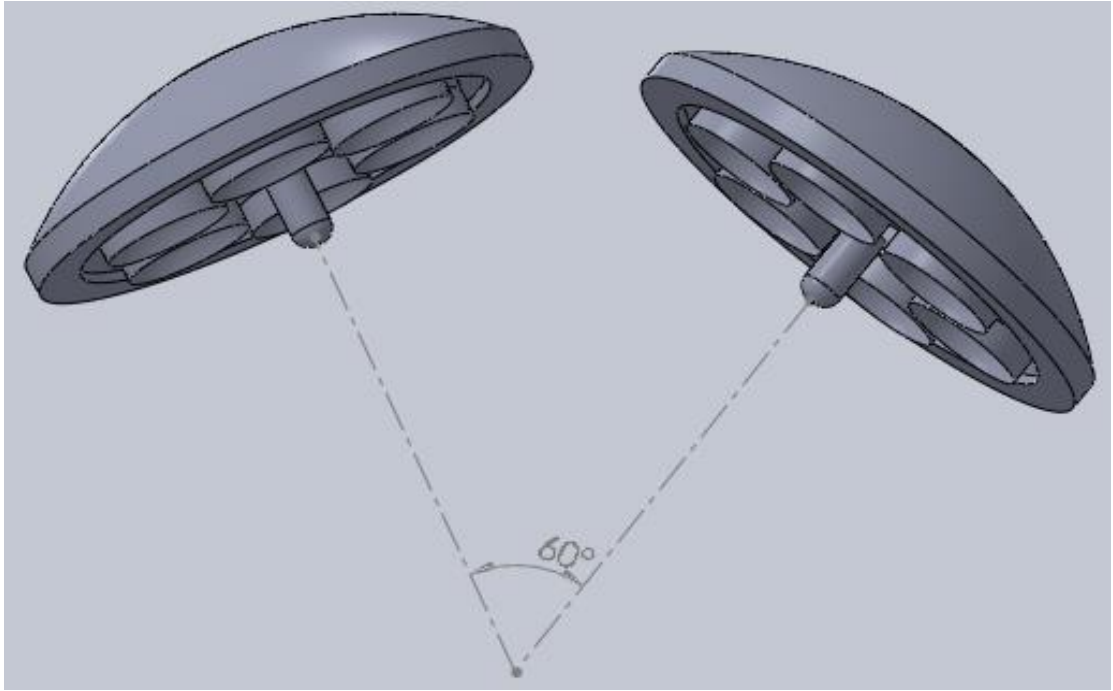
$$\theta_4 = \text{Arctan2}\left(\frac{(-s_{\theta_1}p_x + c_{\theta_1}p_y)}{s_{\theta_3}h_4}, \pm\sqrt{1 - \left(\frac{-s_{\theta_1}p_x + c_{\theta_1}p_y}{s_{\theta_3}h_4}\right)^2}\right) \quad (3.29)$$

açısı elde edilir.

Robot kolun kullanım yerine göre açıların sınır değerleri belirlenerek sistem açılarının çözüm kümesi elemanları azaltılabilir. Ters kinematikteki olumsuz durumlardan olan tekillik (singularity) robotun bir serbestlik derecesini ortadan kaldırabilir. Denklem 3.30 ve 3.31.'deki payda ifadesinin sıfır olmaması için θ_3 değeri 0 ve 180 değerlerini almaması gerekir (Küçük ve Bingül, 2006).

4. TEZ KONUSU OLAN ROBOTUN TASARIMI

Giriş bölümünde de değinildiği gibi çalışma bir master ve slave kol olmak üzere iki koldan oluşmaktadır. Master kol bir robot kol özelliği taşımasa da eklemlerine yerleştirilen konum algılayıcılar ile aydınlatma başlığının aydınlatma odak noktasının konumunun tespit edilmesini sağlamaktadır. Bunun için ileri kinematik hesaplamalar yapılacaktır. Bu hesaplamalar sonucunda bulunan konum bilgisi slave kol olan robot kol eklemlerinde bulunan motorlar sürülecektir. Slave kolun istenen konuma gelebilmesi için ters kinematik hesaplamalar yapılacaktır. Master koldaki aydınlatma başlığının yönelim bilgisi ile belirlenen dönme matrisi çarpılarak slave koldaki aydınlatma başlığının yönelimi sağlanacaktır. Bu yönelim aydınlatma başlıklarının bir birlerine göre 60 derece açı farkı ile aydınlatma yapmasını sağlayacaktır.



Şekil 4.1. Aydınlatma başlıklarının bir birlerine göre konumu

Yapılan çalışmanın çalışma şeklini şu şekilde özetleyebiliriz:

- Master kolun aydınlatma başlığının istenen yönelim matrisi oluşturulur.
- Master koldaki konum algılayıcılardan açı ve mesafe bilgileri alınır.
- Bu bilgiler ileri kinematik denklemde yerine konarak referans noktaya göre aydınlatma odak noktası belirlenir.
- Slave kolun ters kinematik hesaplamaları yapılır.
- Slave kolun eklemlerinin yapacağı hareketlerin sınırları belirlenir.

- Master koldan gelen konum bilgisine göre ve istenen yönelim bilgisine göre slave kolun eklem açıları belirlenir.
- Belirlenen açıların oluşabilmesi için slave koldaki servo motorlara gönderilecek olan elektrik sinyalleri denetleme biriminde hesaplanır.
- Motor sürücüleri ile servo motorlar sürülür.

Bu işlemler katı modeli Solid Works programında oluşturulduktan sonra kinematik hesaplamaları ve simülasyonu Matlab programında yapılmıştır.

4.1. Tasarlanan Sistemin Öğeleri

Tasarlanacak olan sistemin kullanım yeri, hassasiyet ve doğruluk oranı, çalışma şartları ve kütlesi gibi birçok etmen tasarımda kullanılacak olan elemanların seçimini etkilemektedir. Yeterli özellikte malzeme kullanmamak sistemin istenilen asgari çalışmasını sağlayamazken gereğinden çok fazla özelliklere sahip malzeme kullanmak da sistemin maliyetini arttırmaktadır.

4.1.1. Ameliyathane aydınlatma sistemi

Bu kısımda tasarımı yapılacak olan master kol için referans alınacak aydınlatma sistemi konfigürasyonu incelenecek ve ölçümleri yapılacaktır.

Hastanelerimizde kullanılan ameliyathane aydınlatma sistemleri farklılık göstermesinin yanında birçok ortak özelliklere sahiptirler. Bu farklılıklardan birisi de bu tezi en çok ilgilendiren yönü olan kol konfigürasyonlarıdır.



Şekil 4.2.Farklı konfigürasyonlara sahip aydınlatma sistemleri(URL-13)



Şekil 4.3.Ameliyathane odasına örnek resim (URL-14)

Bu çalışmada şekil 4.4.'de Aksaray Devlet Hastanesi ameliyat odalarının birinde kullanılan aydınlatma sistemi örnek olarak kullanılacaktır. Şekilde ışık odak noktasının konumunun belirlenmesi için eklemlere lineer potansiyometreler olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4.4.Ameliyat alanı aydınlatma sistemi

Aynı işlevi gören iki aydınlatma sisteminin bulunduğu bu örnekte her ikisi de yedi serbestlik derecesine sahiptir. Bunların ilk altısı dönel yedincisi odaklama ayarını yapan ışık odağına öteleme hareketini sağlayan prizmatik olarak kabul edilebilen eklemdir. Dolayısıyla master olarak kullanacak kol 6R1P 7-DOF olacak şekilde modelleme

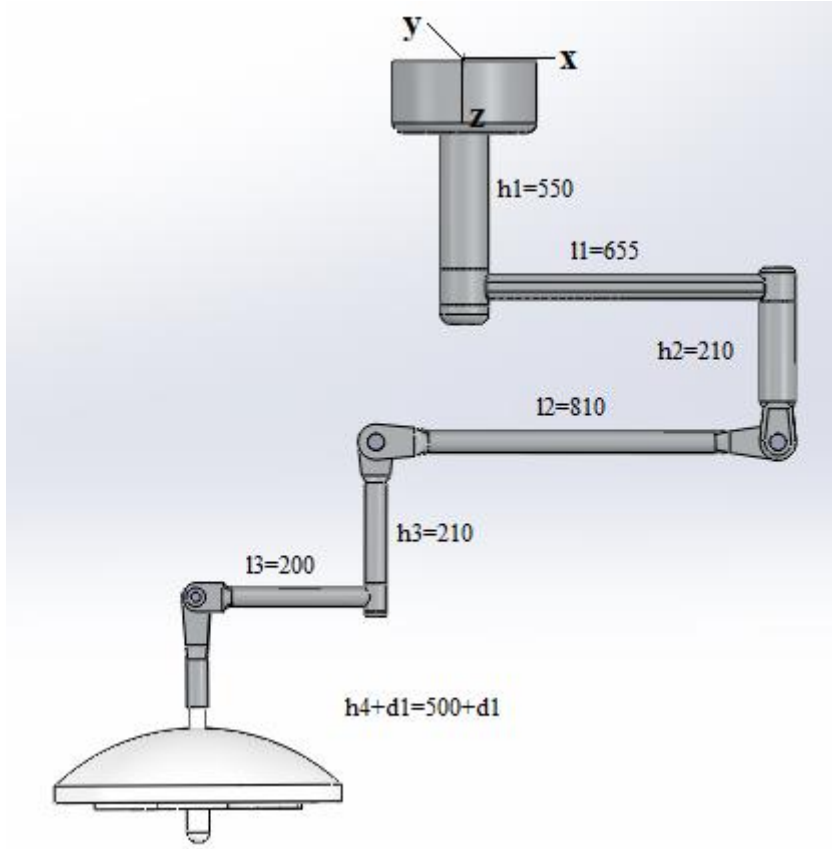
yapılacak ve ileri kinematik hesaplamaları ona göre yapılacaktır. Örnek olarak alınan bu sistemin linklerinin uzunluk ölçümlerine ait değerler tavandan itibaren link numaraları verilerek Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1.Ameliyat bölgesi aydınlatma sistemine ait ölçüler

Parça	~ Uzunluk(mm)
Link 1	550
Link 2	655
Link 3	210
Link 4	810
Link 5	210
Link 6 (başlığa olan dik uzunluk)	400
Sistemin açık uzunluğu	2180
Başlık dış çap	700
Başlık iç çap	550
Başlık derinlik	300
Masa üst seviyesi (max) – oda tavanı	2200
Masa yüksekliği (ayarlanabilen)	700-900

4.1.2. Master kol

Master kol manuel kontrollü kol olarak ifade edilmişti. Bu kısımda Çizelge 4.1.'deki ölçüler referans alınarak 6R1P master kolun katı modeli Solid Works programında çizilmiş hali ile ileri kinematik hesaplamaları yapılmıştır. 6R1P olarak modellenen master kolun prizmatik eklemi aydınlatma başlığının ışık odak uzaklığı ayarını temsil etmektedir. d_1 olarak sembolize edilen bu değişken master ve slave kolda aydı değerleri alacağı ve aynı ekseninde değişeceği için ters kinematik hesaplamada bir değişken olarak hesaplanmamıştır. Master koldaki d_1 değerinin aynısı slave kolda da gerçekleşecektir.



Şekil 4.5.Master kolun SolidWorks programında çizilen katı modeli

4.1.2.1. İleri kinematik hesaplamalar

Bölüm 3.'de ileri kinematik incelemesinde Çizelge 3.3.'de oluşturulan D-H parametrelerinden faydalanacak olursak Çizelge 4.2. elde edilir.

Çizelge 4.2.Master kol DH Çizelgesi

i	α_{i-1}(Derece)	a_{i-1}(mm)	d_i(mm)	θ_i	Değişken
1	0	0	$h_1 = 550$	θ_1	θ_1
2	0	$l_1 = 655$	$h_2 = 210$	θ_2	θ_2
3	90	0	0	θ_3	θ_3
4	0	$l_2 = -810$	0	θ_4	θ_4
5	-90	0	$h_3 = 210$	θ_5	θ_5
6	90	$l_3 = -200$	0	θ_6	θ_6
7	-90	0	$(h_4 + d_1) = (500 + d_1)$	0	d_1

Dönüşüm matrisleri bölüm 3.'de elde edilmişti.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & l_1 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & -l_2 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_3 \\ -\sin(\theta_5) & -\cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 & -l_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_6) & \cos(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$${}^6_7T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (h_4 + d_1) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Bu dönüşüm matrisleri ileri yönlü çarpıldığında yönelim(normal, kayma ve yaklaşım vektörleri) matrisi ve konum vektörünü içeren bir dönüşüm matrisi elde edilir. Yönelim matrisi robot uç işlevcisinin hedef noktaya referans koordinat eksenine hangi açılarla ulaşacağını belirlerken konum vektörü uç işlevcinin konumunu gösterir.

Bölüm 3'de yukarıdaki dönüşüm matrislerinin ileri yönlü çarpımı sonucu elde edilen dönüşüm matrisinden faydalanılabilir. Bu eşitlikler kullanılarak ve master kolun gerçek ölçü değerleri eşitlikte yerine yazılarak nihai konum eşitlikleri ve dönme matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$${}^0_7T = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & P_x \\ n_y & s_y & a_y & P_y \\ n_z & s_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Uç işlevcinin konum vektörü;

$$p = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Aşağıda yapılan matris işlemlerinde görsel sadelik oluşturmak için aşağıdaki kısaltmalar yapılmıştır.

$$\cos(\theta_i) = c_i \quad (4.10)$$

$$\sin(\theta_i) = s_i \quad (4.11)$$

$$\cos(\theta_i) * \cos(\theta_j) * \cos(\theta_k) = c_{ijk} \quad (4.12)$$

$$\sin(\theta_i) * \sin(\theta_j) * \sin(\theta_k) = s_{ijk} \quad (4.13)$$

X eksenindeki konumu;

$$P_x = \left\{ \left((500 + d_1) \left(-s_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (c_{12} - s_{12}) \} \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \} \\ -s_5 \{ (c_1 s_2 + s_1 c_2) \} \} \right) + c_6 \begin{bmatrix} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \} \right) \right) + \left(-200 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (c_{12} - s_{12}) \} \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \} \\ -s_5 \{ (c_1 s_2 + s_1 c_2) \} \} \right) + \left(210 \begin{bmatrix} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \} \right) + \left(-810 c_3 (c_{12} - s_{12}) \right) + c_1 655 \right) \right\} \quad (4.14)$$

Y eksenindeki konumu;

$$P_y = \left\{ \left((500 + d_1) \left(-s_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ -s_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{bmatrix} + c_6 \begin{bmatrix} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \end{bmatrix} \right) \right. \\ \left. + \left(-200 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ -s_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{bmatrix} \right) \right. \\ \left. + \begin{bmatrix} 210 \{ -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ + \{ -810 c_3 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ + s_1 655 \end{bmatrix} \right) \right\} \quad (4.15)$$

Z eksenindeki konumu;

$$P_z = \left\{ \left((500 + d_1) \left(-s_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \\ \{ (-s_{34} + c_{34}) \} \end{bmatrix} \right) \right) \right. \\ \left. + \left(-200 \begin{bmatrix} c_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \\ \{ (-s_{34} + c_{34}) \} \end{bmatrix} \right) \right. \\ \left. + \begin{bmatrix} 210 \{ (-s_{34} + c_{34}) \} \\ + \{ -810 s_3 + (550 + 210) \} \end{bmatrix} \right) \right\} \quad (4.16)$$

Elde edilen bu eşitlikler kullanılarak bulunacak nokta slave kolun konumlanacağı nokta olacaktır.

Şekil 4.4.'de master kolun görüntüsü master eklemlerinin açılarının sıfır ve ışık odak uzaklığının en düşük olduğu konumudur. Bu duruma göre P_x , P_y , P_z değerleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$P_x = l_1 - l_2 - l_3 = 655 - 810 - 200 = -355 \text{ mm}$$

$$P_y = 0$$

$$P_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + d_1 = 550 + 210 + 210 + 500 + 0 = 1470 \text{ mm}$$

Dönme matrisini oluşturan öğeler uç işlevcinin normal vektörü(n), kayma vektörü(s) ve yaklaşım vektörüdür(a).

Normal vektör(normal vector);

$$n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$n = \begin{bmatrix} \left(c_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (c_{12} - s_{12}) \} \\ -s_5 \{ (c_1 s_2 + s_1 c_2) \} \end{bmatrix} \right) \\ + s_6 \begin{bmatrix} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \end{bmatrix} \\ \left(c_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ -s_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \end{bmatrix} \right) \\ + s_6 \begin{bmatrix} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{bmatrix} \\ \left(c_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \end{bmatrix} \right) \\ + s_6 \begin{bmatrix} (-s_{34} + c_{34}) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Kayma vektörü(sliding vector);

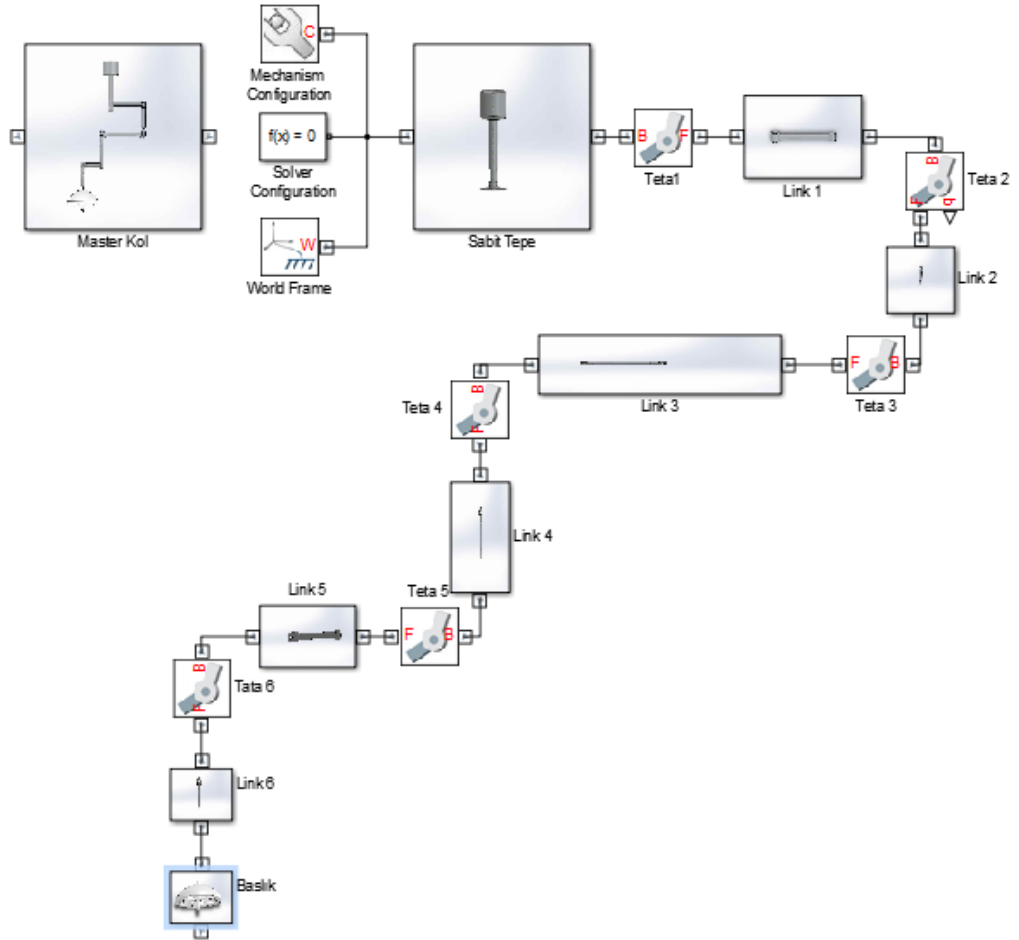
$$s = \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$s = \begin{bmatrix} \left(-s_5 \begin{bmatrix} c_{34} (c_{12} - s_{12}) \\ -s_{34} (c_{12} - s_{12}) \end{bmatrix} \right) \\ -c_5 \{ (c_1 s_2 + s_1 c_2) \} \\ \left(-s_5 \begin{bmatrix} c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{bmatrix} \right) \\ -c_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \\ (-s_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \}) \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Yaklaşım vektörü(approaching vector);

$$a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$a = \begin{bmatrix} \left(-s_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (c_{12} - s_{12}) \} \\ -s_5 \{ (c_1 s_2 + s_1 c_2) \} \\ -s_3 \{ c_4 (c_{12} - s_{12}) \} \end{bmatrix} \right) \\ + c_6 \begin{bmatrix} -c_3 s_4 (c_{12} - s_{12}) \\ -s_3 c_4 (c_{12} - s_{12}) \end{bmatrix} \\ \left(-s_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ c_{34} (s_1 c_2 + c_1 s_2) \} \\ -s_5 \{ (s_{12} - c_{12}) \} \\ -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{bmatrix} \right) \\ + c_6 \begin{bmatrix} -c_3 s_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \\ -s_3 c_4 (s_1 c_2 + c_1 s_2) \end{bmatrix} \\ \left(-s_6 \begin{bmatrix} c_5 \{ (s_3 c_4 + c_3 s_4) \} \\ (-s_{34} + c_{34}) \end{bmatrix} \right) \\ + c_6 \begin{bmatrix} (-s_{34} + c_{34}) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$



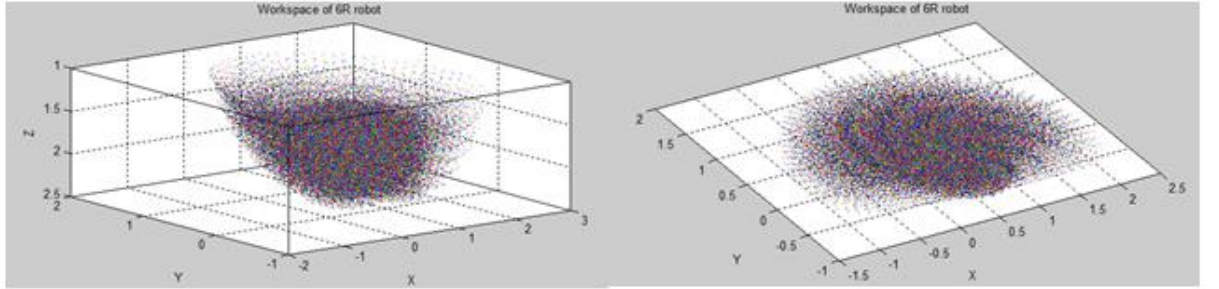
Şekil 4.6. Master kol MATLAB tasarım ekranı görüntüsü

Master kolun eklem açıları sınırları kolun kullanım yerine uygun bir şekilde belirlenmelidir.

Çizelge 4.3.Master kol eklem değişkenlerinin sınır değerleri

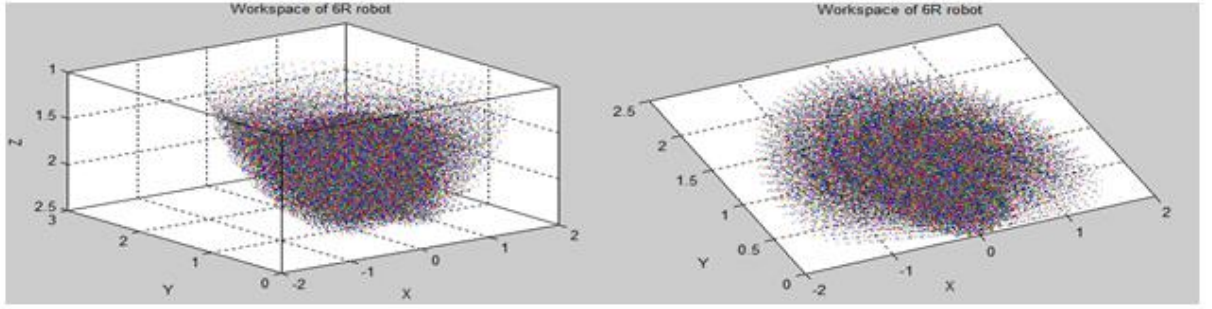
Eklem Değişkeni	Minimum	Maximum
θ_1	0 rad.	π rad.
θ_2	$-\pi$ rad.	0 rad.
θ_3	$-\pi/3$ rad.	0 rad.
θ_4	$-\pi/4$ rad.	$\pi/4$ rad.
θ_5	$-\pi/2$ rad.	$\pi/2$ rad.
θ_6	$-\pi/4$ rad.	$\pi/4$ rad.
d_1	300 mm	800 mm

Master kol eklem değişkenleri ve uzuv bilgilerine göre master kolun uç işlevcisinin ulaşabileceği noktalar kümesi robotun çalışma uzayını vermektedir. Workspace ya da operational space olarak ifade edilen bu çalışma uzayı robotun çalışmasıyla ilgili önemli bir veridir(Kelly vd., 2005). Çizelge 4.2. ve 4.3.'deki veriler dikkate alınarak $\theta_1=0$, $\theta_2=(-\pi)-(0)$ aralığında ve diğer açılar çizelge 4.3 göre master kolun çalışma uzayı şekil 4.7.'deki gibi elde edilir.



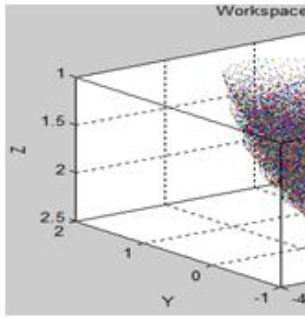
Şekil 4.7.Master kol çalışma uzayı 1

$\theta_1= \pi/2$, $\theta_2= (-3\pi/2)-(-\pi/2)$ aralığında ve diğer açılar Çizelge 4.3.'deki aralıkta olduğu durumdaki çalışma uzayı şekil 4.8.'deki gibi elde edilir.



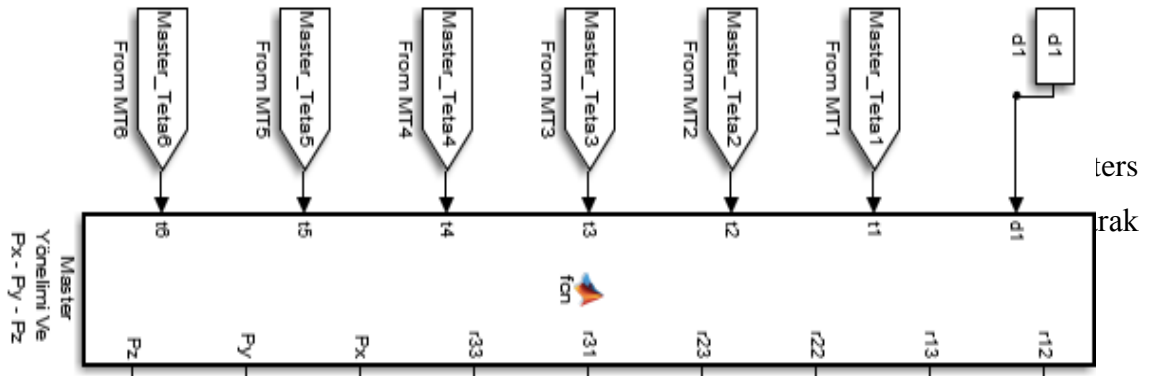
Şekil 4.8. Master kol çalışma uzayı 2

$\theta_1 = \pi$, $\theta_2 = (0) - (\pi)$ aralığında ve diğer açıların Çizelge 4.3.'deki aralıkta olduğu durumdaki çalışma uzayı Şekil 4.9.'daki gibi elde edilir.



Şekil 4.9. Master kol

çalışma uzayı 3

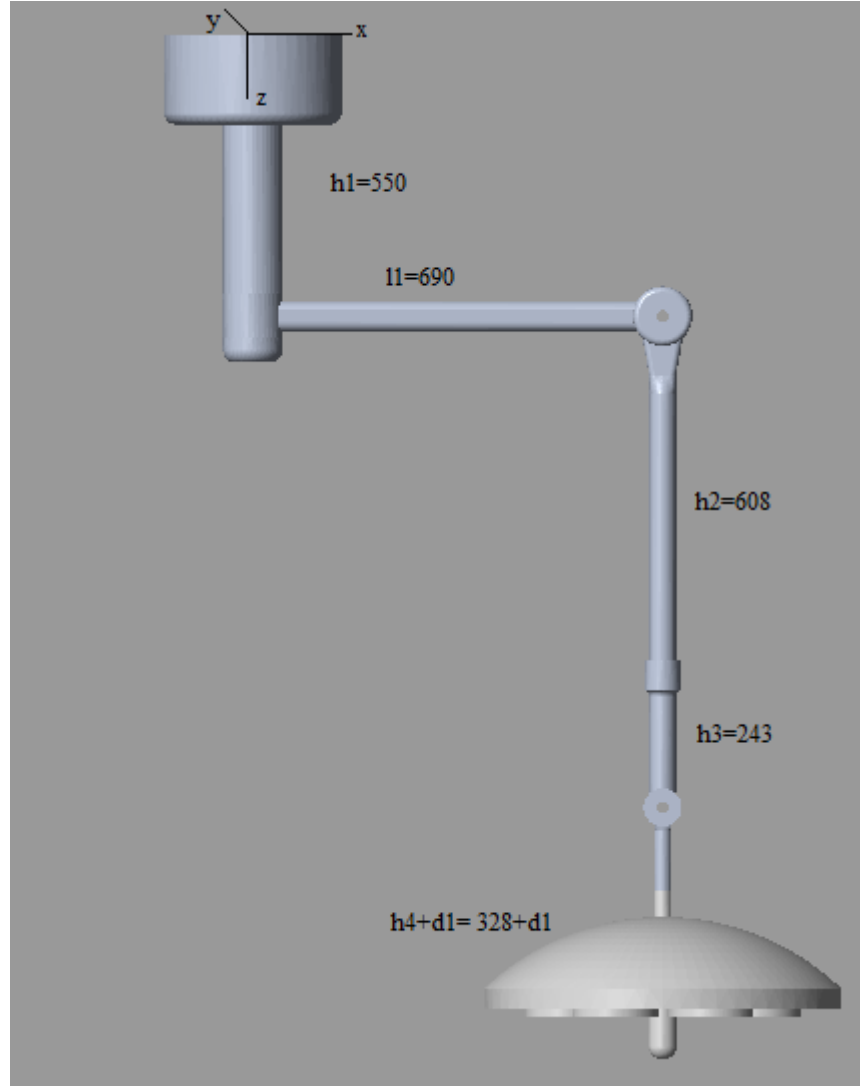


4.1.2. Slave kol

Slave kol, master kola başlığının konumu ve hareket eden robot kol kısmında master kolun

bağlı olan aydınlatma yöneline göre otomatik olarak ifade edilmişti. Bu eklem uzunlukları ve

yerleşim yeri referans alınarak slave kolun katı modeli Solid Works programında çizilmiş hali ve ters kinematik hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 4.10.SolidWorks programında çizilen slave kolun Matlab Simulink görüntüsü

4.1.2.1. İleri kinematik hesaplamalar

Çizelge 4.4.Slave kol DH Çizelgesi

i	α_{i-1} (Derece)	a_{i-1} (mm)	d_i (mm)	θ_i	Değişken
1	0	0	$h_1=550$	θ_1	θ_1
2	-90	$l_1=690$	0	θ_2	θ_2
3	90	0	$h_2=608$	θ_3	θ_3
4	-90	0	$h_3=243$	θ_4	θ_4
5	90	0	$(h_4 + d_1) =$ $(328 + d_1)$	0	d_1

Robota ait ileri kinematik dönüşüm matrisleri;

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -h_2 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

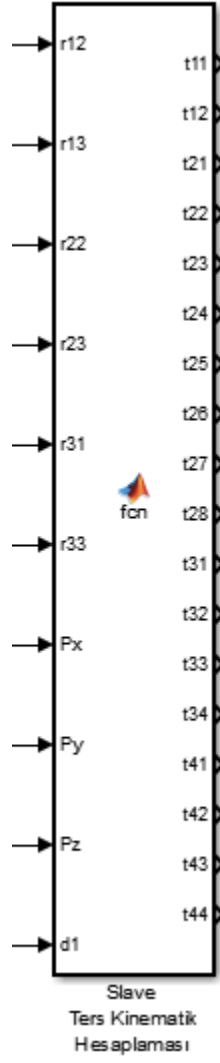
$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_4) & -\cos(\theta_4) & 0 & h_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -(h_4 + d_1) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Slave kolun ileri yön matris çarpımı;

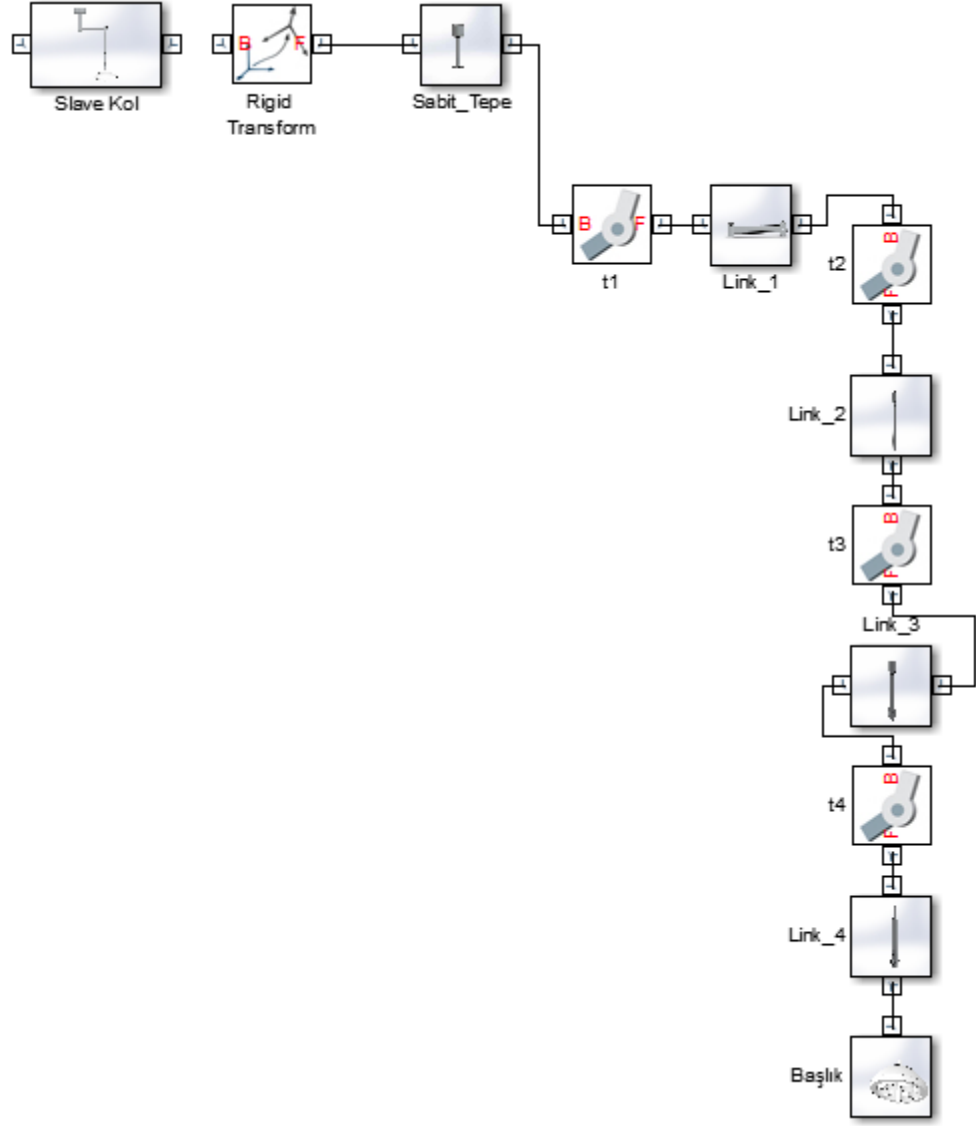
$${}^0_5T = {}^0_1T * {}^1_2T * {}^2_3T * {}^3_4T * {}^4_5T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(4.28)



Şekil 4.11. Slave kol ters kinematik hesaplama fonksiyonları bloğu

Ters kinematik hesaplamalar için gerekli master kol verileri ve ters kinematik hesaplama sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.11.'de görülmektedir. Slave kolun birinci eklemi için iki farklı, ikinci eklemi için sekiz farklı, üçüncü eklemi için dört farklı ve dördüncü eklemi için dört farklı açı değerleri bulunmuştur.

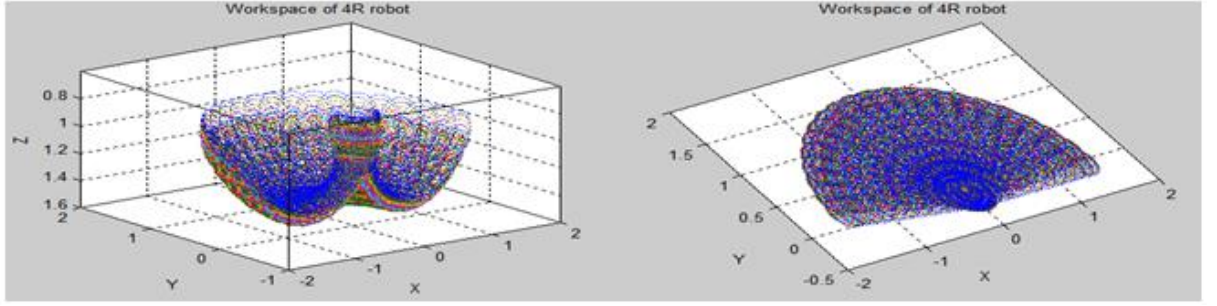


Şekil 4.12. Slave kol MATLAB tasarım ekranı görüntüsü

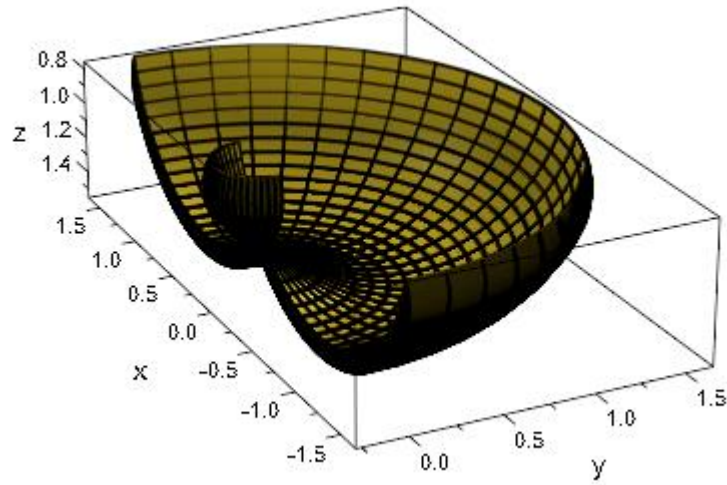
Slave kolun eklem açıları sınırları kolun kullanım yerine uygun bir şekilde belirlenmelidir.

Çizelge 4.5.Slave kol eklem değişkenlerinin sınır değerleri

Eklem Değişkeni	Minimum	Maximum
θ_1	0 rad.	π rad.
θ_2	$-\pi/3$ rad.	$\pi/3$ rad.
θ_3	$-\pi$ rad.	π rad.
θ_4	$-\pi/3$ rad.	$\pi/3$ rad.
d_1	300 mm	800 mm



Şekil 4.13. Çizelge 4.5’deki sınır değerlere göre slave kolun çalışma uzayı



Şekil 4.14. Matlab MUPAD ile oluşturulan çalışma uzayı

4.1.2.2. Ters kinematik hesaplamalar

Robot kolun linklerinin bağlı olduğu eklemler temelde dönel(Revolute), kayar (Prismatic) hareket edebilen motorlarla sağlanmaktadır. Bu çalışmada dönel eklemler kullanılmıştır. Robot kol istenilen konuma gelebilmesi için eklemlerin olması gereken açılarının hesaplanması ters kinematik hesaplamalarla yapılmaktadır. Her bir eklem değişkenini içeren matrislerin belirli kurallara göre çarpılıp eşitlenmesi yoluyla eklem değişkenlerinin eşitlikleri bulunur.

Birinci eklem açısı değişkeni(θ_1) için yapılan ters kinematik hesaplama aşağıda verilmiştir.

$${}^2_3T * {}^3_4T = {}^1_2T^{-1} * {}^0_1T^{-1} * {}^0_5T * {}^4_5T^{-1}$$

(4.29)

Eşitliği kullanılarak eşitliğin her iki tarafında oluşan matrislerin (1,4), (2,4) ve (3,4). elemanlarının kareleri alınıp toplanırsa ve bir birine eşitlenirse teta1 açısı bulunur.

$$(1,4)^2 + (2,4)^2 + (3,4)^2 = (1,4)^2 + (2,4)^2 + (3,4)^2 \quad (4.30)$$

${}^2_3T * {}^3_4T$ matrisi için;

$$(1,4) = 0$$

$$(2,4) = (-h_2 - h_3)$$

$$(3,4) = 0$$

${}^1_2T^{-1} * {}^0_1T^{-1} * {}^0_5T * {}^4_5T^{-1}$ matrisi için;

$$(1,4) = h_1 * \sin(\theta_2) - l_1 * \cos(\theta_2) - P_z * \sin(\theta_2) + d_1 * r_{33} * \sin(\theta_2) + h_4 * r_{33} * \sin(\theta_2) +$$

$$P_x * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) + P_y * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) - d_1 * r_{13} * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) -$$

$$h_4 * r_{13} * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) - d_1 * r_{23} * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) - h_4 * r_{23} * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_1)$$

$$(2,4) = h_1 * \cos(\theta_2) - P_z * \cos(\theta_2) + l_1 * \sin(\theta_2) + d_1 * r_{33} * \cos(\theta_2) + h_4 * r_{33} * \cos(\theta_2) -$$

$$P_x * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) - P_y * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) + h_1 * r_{23} * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) +$$

$$h_4 * r_{23} * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) + d_1 * r_{13} * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) + h_4 * r_{13} * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2)$$

$$(3,4) = P_y * \cos(\theta_1) - P_x * \sin(\theta_1) - d_1 * r_{23} * \cos(\theta_1) - h_4 * r_{23} * \cos(\theta_1) + d_1 * r_{13} * \sin(\theta_1) +$$

$$h_4 * r_{13} * \sin(\theta_1)$$

$$(1,4)^2 + (2,4)^2 + (3,4)^2 = (1,4)^2 + (2,4)^2 + (3,4)^2$$

$$(h_2 + h_3)^2 = P_x^2 - 2 * P_x * d_1 * r_{13} - 2 * P_x * h_4 * r_{13} - 2 * \cos(\theta_1) * P_x * l_1 + P_y^2 - 2 * P_y * d_1 * r_{23} -$$

$$2 * P_y * h_4 * r_{23} - 2 * \sin(\theta_1) * P_y * l_1 + P_z^2 - 2 * P_z * d_1 * r_{33} - 2 * P_z * h_1 - 2 * P_z * h_4 * r_{33} + d_1^2 * r_{13}^2$$

$$+ d_1^2 * r_{23}^2 + d_1^2 * r_{33}^2 + 2 * d_1 * h_1 * r_{33} + 2 * d_1 * h_4 * r_{13}^2 + 2 * d_1 * h_4 * r_{23}^2 + 2 * d_1 * h_4 * r_{33}^2 +$$

$$2 * \cos(\theta_1) * d_1 * l_1 * r_{13} + 2 * \sin(\theta_1) * d_1 * l_1 * r_{23} +$$

$$h_1^2 + 2 * h_1 * h_4 * r_{33} + h_4^2 * r_{13}^2 + h_4^2 * r_{23}^2 + h_4^2 * r_{33}^2 + 2 * \cos(\theta_1) * h_4 * l_1 * r_{13} +$$

$$2 * \sin(\theta_1) * h_4 * l_1 * r_{23} + l_1^2$$

Bu eşitlik;

$a * \sin(\theta) + b * \cos(\theta) = c$ trigonometrik eşitliğinden faydalanılarak

$$\theta = A \tan 2(a,b) + A \tan 2(\pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \quad (4.31)$$

ters trigonometrik eşitlik kullanılarak

$$a = (2 * h_4 * l_1 * r_{23} + 2 * d_1 * l_1 * r_{23} - 2 * P_y * l_1)$$

$$b = (2 * h_4 * l_1 * r_{13} + 2 * d_1 * l_1 * r_{13} - 2 * P_x * l_1)$$

$$c = ((h_2 + h_3)^2 - (P_x^2 - 2 * P_x * d_1 * r_{13} - 2 * P_x * h_4 * r_{13} + P_y^2 - 2 * P_y * d_1 * r_{23} - 2 * P_y * h_4 * r_{23}$$

$$+ P_z^2 - 2 * P_z * d_1 * r_{33} - 2 * P_z * h_1 - 2 * P_z * h_4 * r_{33} + d_1^2 * r_{13}^2 + d_1^2 * r_{23}^2 + d_1^2 * r_{33}^2 +$$

$$2 * d_1 * h_1 * r_{33} + 2 * d_1 * h_4 * r_{13}^2 + 2 * d_1 * h_4 * r_{23}^2 + 2 * d_1 * h_4 * r_{33}^2 + h_1^2 + 2 * h_1 * h_4 * r_{33} + h_4^2 * r_{13}^2 +$$

$$h_4^2 * r_{23}^2 + h_4^2 * r_{33}^2 + l_1^2))$$

$$\theta_1 = A \tan 2(a,b) + A \tan 2(\pm\sqrt{a^2 + b^2 - c^2}, c) \quad (4.32)$$

Olarak bulunur.

Birinci eklem açısı değişkeni(θ_3) için yapılan ters kinematik hesaplama aşağıda verilmiştir.

$${}^0_1T^{-1} * {}^0_5T = {}^1_2T * {}^2_3T * {}^3_4T * {}^4_5T \quad (4.33)$$

Her iki taraftaki matrislerin (2,2). elemanları eşitlenir.

$$(2,2)=(2,2) \quad (4.34)$$

$$r_{22} * \cos(\theta_1) - r_{22} * \sin(\theta_1) = \cos(\theta_3)$$

Buradan; $\cos(\theta) = k$ ise

$$k = r_{22} * \cos(\theta_1) - r_{22} * \sin(\theta_1)$$

$$\theta = A \tan 2(\pm\sqrt{1 - k^2}, k) \quad (4.35)$$

ters trigonometrik eşitlikle

$$\theta_3 = A \tan 2(\pm\sqrt{1 - (r_{22} * \cos(\theta_1) - r_{22} * \sin(\theta_1))^2}, r_{22} * \cos(\theta_1) - r_{22} * \sin(\theta_1)) \quad (4.36)$$

θ_3, θ_1 açısına bağımlı olarak bulunur.

Birinci eklem açısı değişkeni(θ_4) için yapılan ters kinematik hesaplama aşağıda verilmiştir.

$$[{}^0_1T * {}^1_2T]^{-1} * {}^0_5T = {}^2_3T * {}^3_4T * {}^4_5T \quad (4.37)$$

Eşitliği kullanılarak eşitliğin her iki tarafında oluşan matrislerin (1,4), (2,4) ve (3,4). elemanlarının kareleri alınıp toplanırsa ve bir birine eşitlenirse θ_4 açısı bulunur.

$$(1,4)^2 + (2,4)^2 + (3,4)^2 = (1,4)^2 + (2,4)^2 + (3,4)^2 \quad (4.38)$$

$[{}^0_1T * {}^1_2T]^{-1} * {}^0_5T$ matrisi için

$$(1,4) = h_1 * \sin(\theta_2) - l_1 * \cos(\theta_2) - P_z * \sin(\theta_2) + P_x * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) + P_y * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_1)$$

$$(2,4) = h_1 * \cos(\theta_2) - P_z * \cos(\theta_2) + l_1 * \sin(\theta_2) - P_x * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) - P_y * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2)$$

$$(3,4) = P_y * \cos(\theta_1) - P_x * \sin(\theta_1)$$

${}^2_3T * {}^3_4T * {}^4_5T$ matrisi için

$$(1,4) = \cos(\theta_3) * \sin(\theta_4) * (d_1 + h_4)$$

$$(2,4) = -h_2 - h_3 - \cos(\theta_4) * (d_1 + h_4)$$

$$(3,4) = \sin(\theta_3) * \sin(\theta_4) * (d_1 + h_4)$$

Kareleri alınıp toplanırsa;

$$P_x^2 - 2 * \cos(\theta_1) * P_x * l_1 + P_y^2 - 2 * \sin(\theta_1) * P_y * l_1 + P_z^2 - 2 * P_z * h_1 + h_1^2 + l_1^2 \\ = d_1^2 + 2 * \cos(\theta_4) * d_1 * h_2 + 2 * \cos(\theta_4) * d_1 * h_3 + 2 * d_1 * h_4 + h_2^2 + 2 * h_2 * h_3 + \\ 2 * \cos(\theta_4) * h_2 * h_4 + h_3^2 + 2 * \cos(\theta_4) * h_3 * h_4 + h_4^2$$

Burada $\cos(\theta_4)$ yalnız bırakılırsa;

$$\cos(\theta_4) = [(P_x^2 - 2 * \cos(\theta_1) * P_x * l_1 + P_y^2 - 2 * \sin(\theta_1) * P_y * l_1 + P_z^2 - 2 * P_z * h_1 + h_1^2 + l_1^2) \\ - (d_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + h_4^2 + 2 * d_1 * h_4 + 2 * h_2 * h_3)] / 2 * (d_1 * h_2 + d_1 * h_3 + h_2 * h_4 + \\ h_3 * h_4)$$

Buradan; $\cos(\theta) = m$ ise;

$$m = [(P_x^2 - 2 * \cos(\theta_1) * P_x * l_1 + P_y^2 - 2 * \sin(\theta_1) * P_y * l_1 + P_z^2 - 2 * P_z * h_1 + h_1^2 + l_1^2) - \\ (d_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + h_4^2 + 2 * d_1 * h_4 + 2 * h_2 * h_3)] / 2 * (d_1 * h_2 + d_1 * h_3 + h_2 * h_4 + \\ h_3 * h_4)$$

$$\theta = A \tan 2(\pm \sqrt{1 - m^2}, m) \quad (4.39)$$

ters trigonometrik eşitlikle

$$\theta_4 = A \tan 2(\pm \sqrt{1 - m^2}, m) \quad (4.40)$$

θ_4, θ_1 açısına bağımlı olarak bulunur.

Birinci eklem açısı değişkeni (θ_2) için yapılan ters kinematik hesaplama aşağıda verilmiştir.

$${}^0_1T^{-1} * {}^0_5T * {}^4_5T^{-1} * {}^3_4T^{-1} = {}^1_2T * {}^2_3T$$

(4.41)

Her iki taraftaki matrislerin (3,4). elemanları eşitlenir.

$$(3,4) = (3,4) \quad (4.42)$$

$$P_z - h_1 - d_1 * r_{33} - h_4 * r_{33} - h_3 * r_{33} * \cos(\theta_4) + h_3 * r_{31} * \sin(\theta_4) = \\ h_2 * \cos(\theta_2)$$

$$\cos(\theta_2) = (P_z - h_1 - d_1 * r_{33} - h_4 * r_{33} - h_3 * r_{33} * \cos(\theta_4) + h_3 * r_{31} * \sin(\theta_4)) / h_2$$

Buradan; $\cos(\theta) = n$ ise

$$\theta = A \tan 2(\pm \sqrt{1 - n^2}, n) \quad (4.43)$$

$$n = (P_z - h_1 - d_1 * r_{33} - h_4 * r_{33} - h_3 * r_{33} * \cos(\theta_4) + h_3 * r_{31} * \sin(\theta_4)) / h_2$$

ters trigonometrik eşitlikle

$$\theta_2 = A \tan 2(\pm \sqrt{1 - (n)^2}, n) \quad (4.44)$$

θ_2, θ_4 açısına bağımlı olarak bulunur.

Master koldaki ışık odak ayarını temsil eden d_1 değişkeni slave kolda da aynı değerde olacağından ters kinematik hesaplamada bir sabitmiş gibi hesaplamalar yapılmıştır.

4.1.2.2.1. Çözüm kümesi

Ters kinematik çözüm ile elde edilen açılar birden fazla değer almaktadır. Robot kolu doğru konuma yönlendirecek açılar doğru çözüm kümesidir. Robot kolun Matlab simülasyonunda uygun çözüm kümesi Çizelge 4.4.'de ok ile gösterilen şekilde bulunmuştur.

Çizelge 4.6. Hesaplanan açılara göre oluşturulan çözüm kümesi çizelgesi

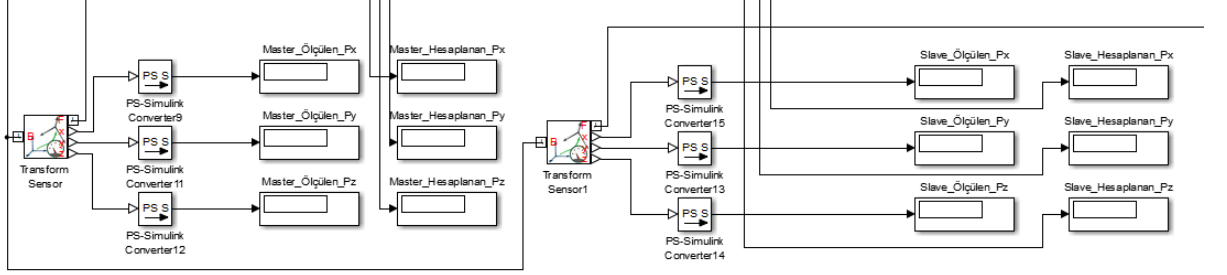
θ_1							
+				-			
θ_3		θ_3		θ_3		θ_3	
θ_4		θ_4		θ_4		θ_4	
+	-	+	-	+	-	+	-
θ_2	θ_2	θ_2	θ_2	θ_2	θ_2	θ_2	θ_2

$$\mathcal{C} = \{ +\theta_1, +\theta_2, +\theta_3, +\theta_4 \}$$

4.1.3. Master-Slave kol

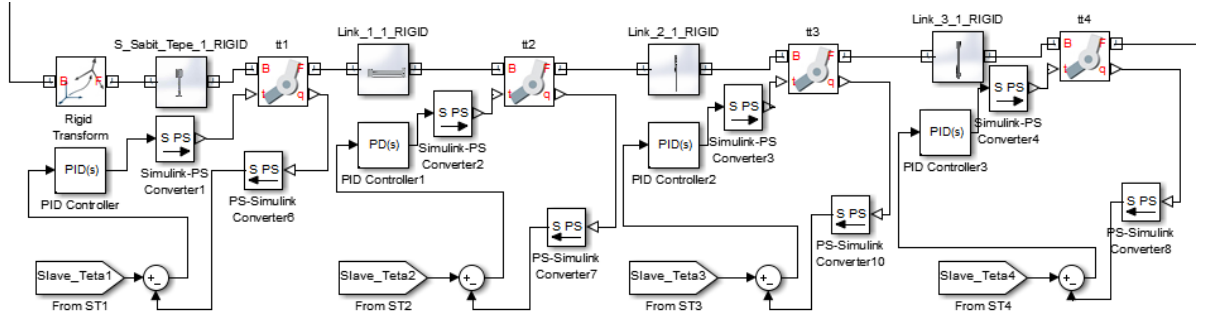
Master ve slave kolun MATLAB uygulamasında gerçek uygulama ölçüleri ile uyumlu bir şekilde yapılmıştır. Bunun için her iki kolun ameliyathane tavanına montaj yerleri arasında x koordinat ekseninde 2metre mesafe konulmuştur.

Matlab simülink çalışmasında master kol ve slave kolun uç işlevcisine yerleştirilen üç boyutlu konum sensörlerinden ölçülen konum bilgileri ile master ve slave ileri kinematik denklemleri ile hesaplanan konum bilgileri tasarım ekranında karşılaştırılmıştır. Bununla ilgili görüntü Şekil 4.16.'da verilmiştir.

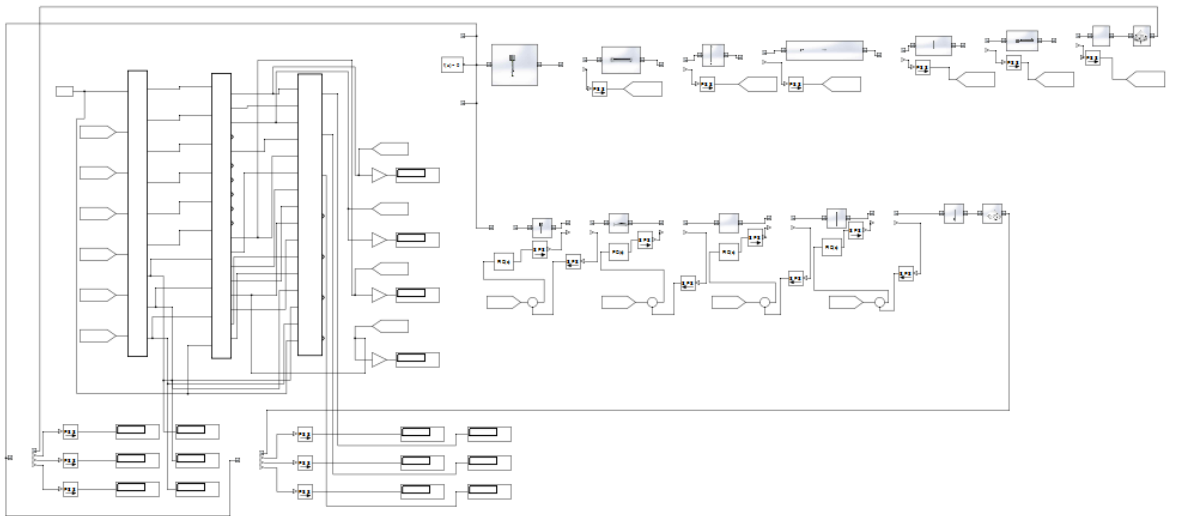


Şekil 4.16. Master ve slave kol konum bilgilerinin görüldüğü tasarım ekranı görüntüsü

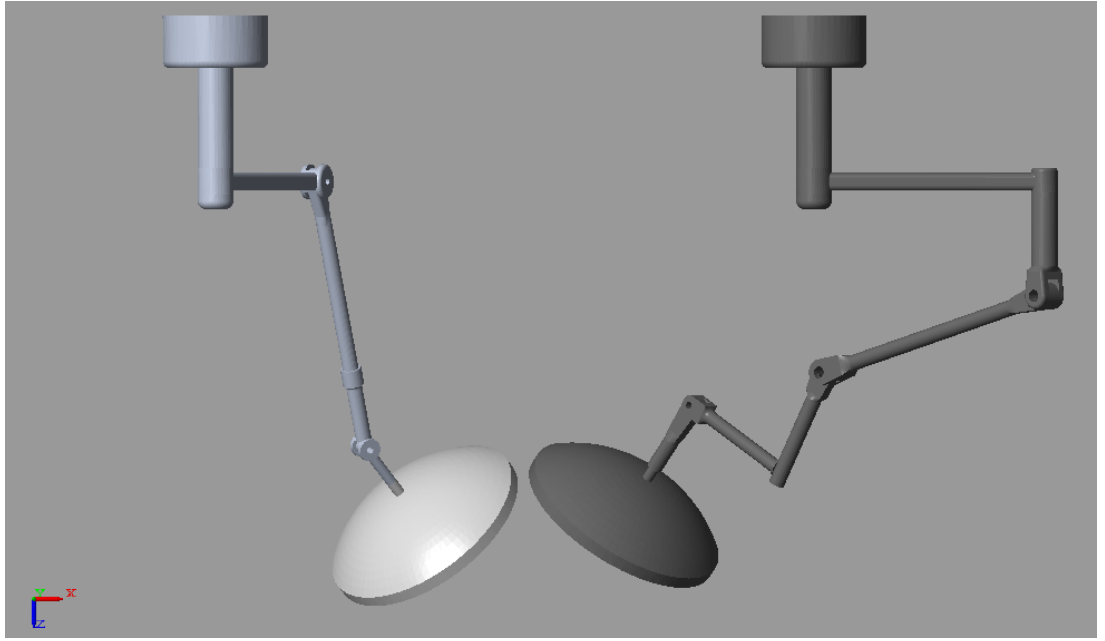
Slave kola ait eklemlerdeki elektrik motorların sürülmesinde motorlara uygulanan elektrik sinyalleri PI (Proportional Integral) ve PID (Proportional Integral Derivate) kontrol yöntemleri ile elde edilmiştir.



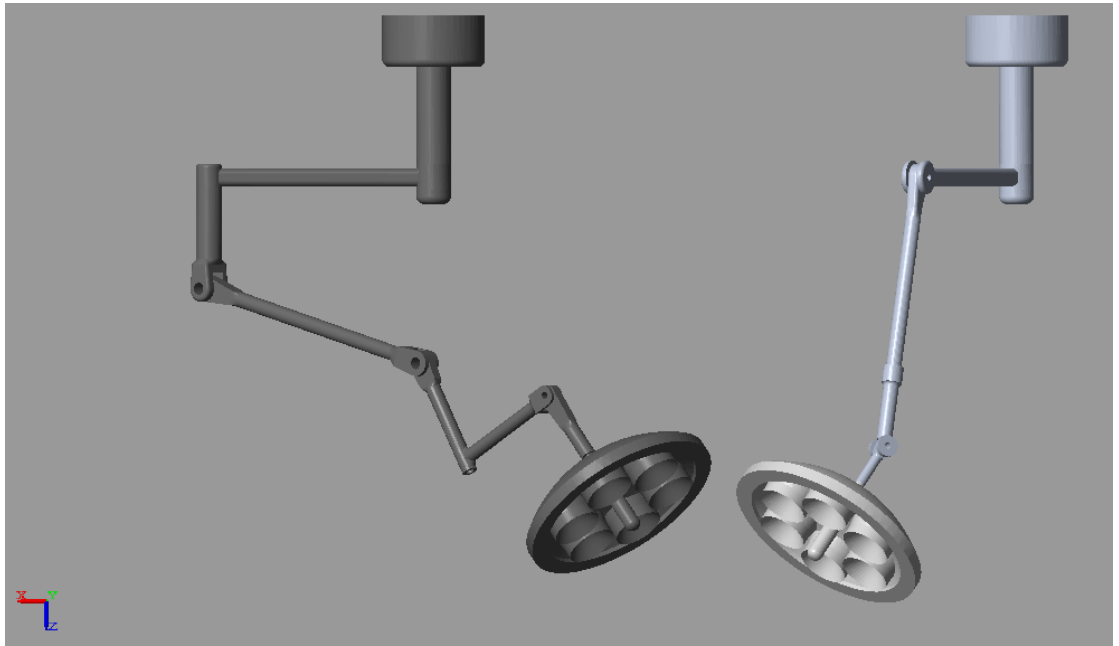
Şekil 4.17. Slave kol elektrik motorlarının sürülmesi ile ilgili şekil



Şekil 4.18. Master-Slave çalışma ekranı görüntüsü



Şekil 4.19.Master-Slave çalışmasına ait Matlab simülinkekranı 1



Şekil 4.20.Master-Slave çalışmasına ait Matlab simülinkekranı 2



Şekil 4.21. Master-Slave çalışmasına ait Matlab simülink ekranı 3

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada bir ameliyathane bulunan operasyon bölgesi aydınlatma sisteminin mekanik yapısı model alınarak Solid Works programında çizimi yapıldıktan sonra ileri kinematik hesabı ve simülasyonu MATLAB programında gerçekleştirilmiştir. Tez içerisinde master robot kol olarak ifade edilen bu tasarımın ileri kinematik hesaplamasında uç işlevci olan aydınlatma başlığının elde edilen üç boyutlu uzaydaki konumunu hesaplayan fonksiyonlar yazılmıştır. Elde edilen bu konuma otomatik olarak yönelebilecek ikinci bir robot kolun tasarımı yine Solid Works programında yapılmıştır. Slave kol olarak isimlendirilen bu robot kolun ileri ve ters kinematik hesaplamaları MATLAB programında yapılmıştır. Slave kolun master kolun hareketine duyarlı olarak çalışabilmesi için master kolun konum ve yönelim vektör bilgileri slave kolun hareketlendirilmesinde girdi olarak kullanılmıştır.

Çalışma sonucunda MATLAB simülink ekranında master ve slave kolların hareketleri görülmüştür. Master kolun her hareketi sonucunda oluşan konum ve yönelim vektörleri sürekli olarak MATLAB programında hesaplaması yapılarak slave kolun hareketi için kesintisiz veri olarak hesaplama fonksiyonlarına verilmiştir. Slave koldaki sanal elektrik motorlarının sürülmesi için elde edilen veriler slave kolun ters kinematik hesaplamasından ve PD ve PID bloklarından alınmıştır. Her iki kolun uç işlevcisine monte edilen üç boyutlu konum sensörlerinden alınan konum bilgileri ile kolların uzunluk açısal ölçüleri dikkate alınarak hesaplanan konum bilgileri karşılaştırılarak sistemin doruluğunun bir kısmı bu şekilde kontrol edilmiştir.

Simülasyon çalışmasında master kol ile slave kolun arzu edilen uyumu bazı konumlarda sağlansa da bazı konumlarda uyumsuzluk gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak her iki robot kolun çalışma uzaylarının tam olarak çakışmamasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Slave kol için rasgele seçilen eklem açı değerleri ile yapılan kinematik hesaplamalar sonu oluşan konum vektörü değeri ile hareket sonucunda oluşan eklem açı değerlerinin tamamıyla örtüştüğü gözlemlenmiştir.

Bilgisayar ortamında tasarımı ve simülasyonu yapılan bu master-slave çalışmanın gerçek ortamda uygulanabilirliği kullanılan elektronik ve mekanik malzemelerin uygunluğu ve kalitesi mutlak olarak çalışmanın güvenilirliğini etkilemektedir. Bunun yanında böyle bir çalışmanın düşünülen tıbbi ortamdaki uygunluğu ve uygulanabilirliği şüphesiz tıbbi gereksinimler ve hassasiyetlerine bağlıdır.

Tez çalışmasının başlaması esnasında operatör tıp doktorlarıyla görüş alışverişinde bulunmuş olsa da uygulanabilirliği daha kapsamlı ve ayrıntılı araştırmayı gerektirmektedir.

Bu tür bir çalışmanın devamı olabilecek uygulamalı bir çalışmanın portatifinin yapılması bunun takibinde tıbbi hassasiyetlerin dikkate alınmasından sonra gerçek ortam uygulamasının gerçekleştirilmesi hem zaman hem de ekonomik anlamda kaynak temin edildiğinde olacağı ön görülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Akçalı İ.D., 2001. Otomatik Kontrol, Nobel Kitapevi, ADANA
- Akpınar H., Robotik Cerrahi.
<http://www.florence.com.trendouroloji-robotik-cerrahi1312-dr-haluk-akpinar.html>, 28.11.2013
- Angeles J., 2007. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems, Springer, USA
- Bingül Z. ve Küçük S., 2009. Robot Kinematığı, Birsen Yayınevi, İstanbul
- Brogardh T., 2007. Present and future robot control development—An industrial perspective, Annual Reviews in Control, 31, 69-79
- Craig K., 2005. Motors for mechatronics an introduction, ders notu
- Craig J.J., 2005. Introduction to Robotics, Pearson Prentice Hall, USA
- Cubero S., 2007. Industrial Robotics, pIV pro literatur Verlag Robert Mayer-Scholz, Germany
- Çengelci B., Çimen H., 2005. Endüstriyel robotlar, Teknolojik Araştırmalar Elektronik Dergi, 2, 69-78
- Çetinkaya Ö., 2009. Bir kolun hareketini takip eden dört dönel mafsallı robot kolu tasarımı ve deneysel araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Erden A., Mayıs. 2003. Robotik-1, Bilim ve Teknik Dergisi, TÜBİTAK, Ankara
- Fink M. ve Kriehn C. Industrial robots
www.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2009/ws/seminar/PDF/Industrial%20robots.pdf, 03.12.2013
- Hall D.J., 1984. Robotic Sensing Devices, Carnegie-Mellon University Pub., USA
- Hayashibe B., Suzuki N., Hashizume M., Konishi K., Hattori A. 2006. Robotic surgery setup simulation with the integration of inverse-kinematics computation and medical imaging, computer methods and programs in biomedicine, 83, 63-72
- ISO 9283, KS B 7082, 1999. Robot Performance Criteria, Association of Korean Standard, Kore
- Kelly R., Santibáñez B. ve Loría A., 2005. Control of Robot Manipulators in Joint Space, Springer, UK
- Kozkurt C., Fenercioglu A., Akar M., 2012. Otomatik Depolama Sistemlerindeki Robotlar için Servo Motor Seçimi, Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, Tokat

- Kuşçu H., 2008. Ders notları, Trakya Üniversitesi, Edirne
- Küçük S., Bingül Z., 2006. Robot Kinematics:Forward and Inverse Kinematics, Industrial- Robotics-Theory-Modelling-Control, Germany
- Lumelsky V.J., 2006. Sensing Intelligence Motion, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA
- L. Lewis F., M.Dawson D., ve T.Abdallah C., 1993. Control of Robot Manipulators, Graduate Textbook, Macmillan Publishing Company
- L. Lewis F., M.Dawson D., ve T.Abdallah C., 2004. Robot Manipulator Control Theory and Practice, Marcel Dekker, New York
- Nie L.ve Huang H., 2012. Inverse Kinematics for 6-DOF Manipulator by the Method of Sequential Retrieval, Proceedings of 2012 International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (MEMS), Atlantis Press, 255-258.
- Q. Gan J.,Oyama E., Rosales E. M. ve Hu H., 2005. A complete analytical solution to the inverse kinematics of the Pioneer 2 robotic arm, Robotica, 23, 123-129, UK
- Pelz G., 2003. Mechatronic systems, Wiley Pub., Germany
- Ren T-J., Chen T-J., 2006. Robust speed-controlled induction motor drive based on recurrent neural network, Electric Power Systems Research, 76, 1064-1074
- Sandin E. P., 2003. Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated, McGraw-Hill, USA
- Selig J.M., 1995. Introductory Robotics, Prentice Hall, UK.
- Spong W., Hutchinson S., ve Vidyasagar M. 2006. Robot Modeling and Control, John Wiley&Sons Inc.
- URL-1,<http://www.staubli.com/en/robotics/6-axis-scara-industrial-robot/low-payload-6-axis-scara-robotts40print.html>, 03.12.2013
- URL-2,http://www.kukarobotics.com/turkey/tr/products/industrial_robotsspecialscara_robotsetAdvEN=google_TR&etAdvKW=Scara_robot, 03.12.2013
- URL-3,<http://203.115.126.36:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/551/fundamentals%20of%20robotics.pdf?sequence=1>, 01.11.2013
- URL-4,http://www.robotics.technion.ac.il/courses/Advanced_Laboratory/Lab8/ARL_8_read.pdf, 04.12.2013
- URL-5, <http://www.jvl.dk/default.asp?Action=Details&Item=277>, 05.12.2013
- URL-6, http://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect_sensor, 05.12.2013
- URL-7,<http://www.powersystemsdesign.com/hall-effect-sensors-deliver-higher-efficiency-in-brushless-dc-motors>, 05.12.2013

URL-8,<http://www.balluff.comballuffMUSEnewsSearch-for-Better-Proximity-Sensor.jsp>, 05.12.2013

URL-9,<https://www.cst.comApplicationsArticleSensitivity-Computation-Of-An-Inductive-Proximity-Sensor>, 05.12.2013

URL-10,http://www.nez.com.twArchive_tdownload_AC%20SERVO%20MOTOR.pdf, 05.12.2013

URL-11, <http://www.fp.fisherpaykel.com/direct-drive-motors>, 08.11.2013

URL-12, <http://4dsysco.comsiemens-plmtecnomatixtecnomatix-robcad>, 09.12.2013

URL-13, <http://www.quickmedical.com/burton-apex-or-lights.html>, 23.11.2012

URL-14, <http://www.skytron.us/s2/10%20STELLAR.htm>, 23.11.2012

Yücel S., 2009. Yürek mekanizması ile robot kollarda ağırlık kuvvetlerinin dengelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.

7. EKLER

Çalışmanın yapıldığı bilgisayarın donanım ve yazılım bilgileri:

İşletim sistemi
Windows 7

İşlemci
Intel Core 2 Duo 2.93 GHz

Bellek
3GB

7.1. EK 1.

Program: Solid Works 2012

Master kol Solid Works çizimleri:



Slave kol Solid Works çizimleri:



7.2. EK 2.

Program: MATLAB R2013a

Master kol ileri kinematik hesaplama fonksiyonları:

```
function [r12,r13,r22,r23,r31,r33,Px,Py,Pz] = fcn(d1,t1,t2,t3,t4,t5,t6)
```

```
Px=(0.655*cos(t1)+ (1.679*cos(t3)*sin(t1)*sin(t2))/2 +  
0.375*cos(t1)*sin(t2)*sin(t5) + 0.375*cos(t2)*sin(t1)*sin(t5) -  
(1.679*cos(t1)*cos(t2)*cos(t3))/2 - 0.325*cos(t1)*cos(t2)*cos(t3)*sin(t4) -  
0.325*cos(t1)*cos(t2)*cos(t4)*sin(t3) + 0.325*cos(t3)*sin(t1)*sin(t2)*sin(t4)  
+ 0.325*cos(t4)*sin(t1)*sin(t2)*sin(t3) +  
0.405*cos(t1)*sin(t2)*sin(t5)*sin(t6) + 0.405*cos(t2)*sin(t1)*sin(t5)*sin(t6)  
+ d1*cos(t1)*sin(t2)*sin(t5)*sin(t6) + d1*cos(t2)*sin(t1)*sin(t5)*sin(t6) -  
0.375*cos(t1)*cos(t2)*cos(t3)*cos(t4)*cos(t5) -  
0.405*cos(t1)*cos(t2)*cos(t3)*cos(t6)*sin(t4) -  
0.405*cos(t1)*cos(t2)*cos(t4)*cos(t6)*sin(t3) +  
0.375*cos(t1)*cos(t2)*cos(t5)*sin(t3)*sin(t4)+0.375*cos(t3)*cos(t4)*cos(t5)*si  
n(t1)*sin(t2) + 0.405*cos(t3)*cos(t6)*sin(t1)*sin(t2)*sin(t4) +  
0.405*cos(t4)*cos(t6)*sin(t1)*sin(t2)*sin(t3) -  
0.375*cos(t5)*sin(t1)*sin(t2)*sin(t3)*sin(t4) -  
d1*cos(t1)*cos(t2)*cos(t3)*cos(t6)*sin(t4) -  
d1*cos(t1)*cos(t2)*cos(t4)*cos(t6)*sin(t3) +  
d1*cos(t3)*cos(t6)*sin(t1)*sin(t2)*sin(t4) +  
d1*cos(t4)*cos(t6)*sin(t1)*sin(t2)*sin(t3) -  
0.405*cos(t1)*cos(t2)*cos(t3)*cos(t4)*cos(t5)*sin(t6) +  
0.405*cos(t1)*cos(t2)*cos(t5)*sin(t3)*sin(t4)*sin(t6) +  
0.405*cos(t3)*cos(t4)*cos(t5)*sin(t1)*sin(t2)*sin(t6) -  
0.405*cos(t5)*sin(t1)*sin(t2)*sin(t3)*sin(t4)*sin(t6) -  
d1*cos(t5)*sin(t1)*sin(t2)*sin(t3)*sin(t4)*sin(t6) -  
d1*cos(t1)*cos(t2)*cos(t3)*cos(t4)*cos(t5)*sin(t6) +  
d1*cos(t1)*cos(t2)*cos(t5)*sin(t3)*sin(t4)*sin(t6) +  
d1*cos(t3)*cos(t4)*cos(t5)*sin(t1)*sin(t2)*sin(t6));
```

```
Py=(0.655*sin(t1) - 0.375*cos(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*sin(t2) +  
cos(t2)*sin(t1)) - sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1))) - (d1  
+ 0.405)*(cos(t6)*(cos(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)) +  
cos(t4)*sin(t3)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1))) +  
sin(t6)*(cos(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)) -  
sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1))) +  
sin(t5)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)))) -  
(1.679*cos(t3)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)))/2 -  
0.375*sin(t5)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)) -  
0.325*cos(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1))-  
0.325*cos(t4)*sin(t3)*(cos(t1)*sin(t2)+cos(t2)*sin(t1)));
```

```
Pz=(0.325*cos(t3)*cos(t4) - (1.679*sin(t3))/2 + (d1 +  
0.405)*(cos(t6)*(cos(t3)*cos(t4) - sin(t3)*sin(t4)) -  
cos(t5)*sin(t6)*(cos(t3)*sin(t4) + cos(t4)*sin(t3))) - 0.325*sin(t3)*sin(t4) -  
0.375*cos(t5)*(cos(t3)*sin(t4) + cos(t4)*sin(t3)) + 1.595/2);
```

```
r11=((cos(t6)*(cos(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)) -  
sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2))) -  
sin(t5)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)))/2 -  
(sin(t6)*(cos(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)) +  
cos(t4)*sin(t3)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)))/2 +  
(3^(1/2)*(cos(t6)*(cos(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)) +  
cos(t4)*sin(t3)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2))) +  
sin(t6)*(cos(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)) -  
sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2))) -  
sin(t5)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)))))/2);  
r12=(- sin(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)) -  
sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2))) -  
cos(t5)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)));
```

```
r13=(- (cos(t6)*(cos(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)) +  
cos(t4)*sin(t3)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2))))/2 -  
(sin(t6)*(cos(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)) -  
sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)))) -
```

```

sin(t5)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)))/2 -
(3^(1/2)*(sin(t6)*(cos(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)) +
cos(t4)*sin(t3)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2))) -
cos(t6)*(cos(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)) -
sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2))) -
sin(t5)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)))/2);

r21=((cos(t6)*(cos(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)) -
sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1))) +
sin(t5)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)))/2 -
(sin(t6)*(cos(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)) +
cos(t4)*sin(t3)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)))/2 +
(3^(1/2)*(cos(t6)*(cos(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)) +
cos(t4)*sin(t3)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1))) +
sin(t6)*(cos(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)) -
sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1))) +
sin(t5)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)))/2);

r22=(cos(t5)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)) -
sin(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)) -
sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1))));

r23=(-(cos(t6)*(cos(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)) +
cos(t4)*sin(t3)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)))/2 -
(sin(t6)*(cos(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)) -
sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1))) +
sin(t5)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)))/2 -
(3^(1/2)*(sin(t6)*(cos(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)) +
cos(t4)*sin(t3)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1))) -
cos(t6)*(cos(t5)*(cos(t3)*cos(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1)) -
sin(t3)*sin(t4)*(cos(t1)*sin(t2) + cos(t2)*sin(t1))) +
sin(t5)*(cos(t1)*cos(t2) - sin(t1)*sin(t2)))/2);

r31=((sin(t6)*(cos(t3)*cos(t4) - sin(t3)*sin(t4)))/2 -
(3^(1/2)*(cos(t6)*(cos(t3)*cos(t4) - sin(t3)*sin(t4)) -
cos(t5)*sin(t6)*(cos(t3)*sin(t4) + cos(t4)*sin(t3)))/2 +
(cos(t5)*cos(t6)*(cos(t3)*sin(t4) + cos(t4)*sin(t3)))/2);

r32=(-sin(t5)*(cos(t3)*sin(t4) + cos(t4)*sin(t3)));

r33=((3^(1/2)*(sin(t6)*(cos(t3)*cos(t4) - sin(t3)*sin(t4)) +
cos(t5)*cos(t6)*(cos(t3)*sin(t4) + cos(t4)*sin(t3)))/2 +
(cos(t6)*(cos(t3)*cos(t4) - sin(t3)*sin(t4)))/2 -
(cos(t5)*sin(t6)*(cos(t3)*sin(t4) + cos(t4)*sin(t3)))/2);

```

end

Slave kol ileri kinematik hesaplama fonksiyonları:

```

function [Psx,Psy,Psz] = fcn( t11,t21,t31,t41,d1)
h1=0.4725;
h4=0.318;
h2=0.572;
h3=0.254;
l1=0.690;

Psx=(l1*cos(t11) - (h4+d1)*(sin(t41)*(sin(t11)*sin(t31) -
cos(t11)*cos(t21)*cos(t31)) - cos(t11)*cos(t41)*sin(t21)) +
h2*cos(t11)*sin(t21) + h3*cos(t11)*sin(t21));
Psy=(l1*sin(t11) + (h4+d1)*(sin(t41)*(cos(t11)*sin(t31) +
cos(t21)*cos(t31)*sin(t11)) + cos(t41)*sin(t11)*sin(t21)) +
h2*sin(t11)*sin(t21) + h3*sin(t11)*sin(t21));
Psz=(h1 + (h4+d1)*(cos(t21)*cos(t41) - cos(t31)*sin(t21)*sin(t41)) +
h2*cos(t21) + h3*cos(t21));
Psx=Psx+2;

```

Slave kol ters kinematik hesaplama fonksiyonları:

```
function
[t11,t12,t21,t22,t23,t24,t25,t26,t27,t28,t31,t32,t33,t34,t41,t42,t43,t44] =
fcn(r12,r13,r22,r23,r31,r33,Px,Py,Pz,d1)

h1=0.4725;
h4=0.318;
h2=0.572;
h3=0.254;
l1=0.690;

Px=Px-2;

%t1 açıları hesaplaması (TETA1)
a=(2*d1*l1*r23+2*h4*l1*r23-2*Py*l1);
b=(2*d1*l1*r13+2*h4*l1*r13-2*Px*l1);
c=(h2+h3)^2-(Px^2-2*Px*d1*r13-2*Px*h4*r13+Py^2-2*Py*d1*r23-2*Py*h4*r23+Pz^2-
2*Pz*d1*r33-2*Pz*h1-
2*Pz*h4*r33+d1^2*r13^2+d1^2*r23^2+d1^2*r33^2+2*d1*h1*r33+2*d1*h4*r13^2+2*d1*h4
*r23^2+2*d1*h4*r33^2+h1^2+2*h1*h4*r33+h4^2*r13^2+h4^2*r23^2+h4^2*r33^2+l1^2);

t11a=atan2(a,b);
t11b=atan2((abs((a)^2+(b)^2-(c)^2))^(1/2),c);
t11c=atan2(-(abs((a)^2+(b)^2-(c)^2))^(1/2),c);
t11=t11a+t11b;
t12=t11a+t11c;

%t3 açıları hesaplaması (TETA3)
d=(r22*cos(t11)-r12*sin(t11));

t31=atan2((abs(1-d^2))^(1/2),d);
t32=atan2(-(abs(1-d^2))^(1/2),d);
dd=(r22*cos(t12)-r12*sin(t12));
t33=atan2((abs(1-dd^2))^(1/2),dd);
t34=atan2(-(abs(1-dd^2))^(1/2),dd);

% t4 açıları hesaplaması (TETA4)
z=((Px^2 - 2*cos(t11)*Px*l1 + Py^2 - 2*sin(t11)*Py*l1 + Pz^2 - 2*Pz*h1 + h1^2
+ l1^2-
(d1^2+2*d1*h4+h2^2+2*h2*h3+h3^2+h4^2))/(2*d1*h2+2*d1*h3+2*h2*h4+2*h3*h4));
z1=((Px^2 - 2*cos(t12)*Px*l1 + Py^2 - 2*sin(t12)*Py*l1 + Pz^2 - 2*Pz*h1 + h1^2
+ l1^2-
(d1^2+2*d1*h4+h2^2+2*h2*h3+h3^2+h4^2))/(2*d1*h2+2*d1*h3+2*h2*h4+2*h3*h4));

t41=atan2((abs(1-z^2))^(1/2),z);
t42=atan2(-(abs(1-z^2))^(1/2),z);
t43=atan2((abs(1-z^2))^(1/2),z);
t44=atan2(-(abs(1-z^2))^(1/2),z);

% t2 açıları hesaplaması (TETA2)
g=(Pz-h1-d1*r33-h4*r33-h3*r33*cos(t41)+h3*r31*sin(t41))/h2;
g1=(Pz-h1-d1*r33-h4*r33-h3*r33*cos(t42)+h3*r31*sin(t42))/h2;
g2=(Pz-h1-d1*r33-h4*r33-h3*r33*cos(t43)+h3*r31*sin(t43))/h2;
g3=(Pz-h1-d1*r33-h4*r33-h3*r33*cos(t44)+h3*r31*sin(t44))/h2;

t21=atan2((abs(1-g^2))^(1/2),g);
t22=atan2(-(abs(1-g^2))^(1/2),g);
t23=atan2((abs(1-g1^2))^(1/2),g1);
t24=atan2(-(abs(1-g1^2))^(1/2),g1);
t25=atan2((abs(1-g2^2))^(1/2),g2);
t26=atan2(-(abs(1-g2^2))^(1/2),g2);
t27=atan2((abs(1-g3^2))^(1/2),g3);
t28=atan2(-(abs(1-g3^2))^(1/2),g3);

end
```

Şekil 4.6. grafiği için yazılan kodlar:

```
delta=0.2; t1=0; d1=0; t2=-pi:delta:0; t3=-pi/3:delta:0; t4=-pi/4:delta:pi/4;
t5=-pi/2:delta:pi/2; t6=-pi/4:delta:pi/4;
    for K = 1:length(t4);
        for L=1:length(t3);
            for M=1:length(t2);
                for N=1:length(t5);
                    for P=1:length(t6);

x=(0.655*cos(t1) + (1.679*cos(t3(L))*sin(t1)*sin(t2(M)))/2 +
0.375*cos(t1)*sin(t2(M))*sin(t5(N)) + 0.375*cos(t2(M))*sin(t1)*sin(t5(N)) -
(1.679*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L)))/2 -
0.325*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*sin(t4(K)) -
0.325*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t4(K))*sin(t3(L)) +
0.325*cos(t3(L))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t4(K)) +
0.325*cos(t4(K))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L)) +
0.405*cos(t1)*sin(t2(M))*sin(t5(N))*sin(t6(P)) +
0.405*cos(t2(M))*sin(t1)*sin(t5(N))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t1)*sin(t2(M))*sin(t5(N))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t2(M))*sin(t1)*sin(t5(N))*sin(t6(P)) -
0.375*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N)) -
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t4(K)) -
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t3(L)) +
0.375*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t5(N))*sin(t3(L))*sin(t4(K))+0.375*cos(t3(L))*cos
(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M)) +
0.405*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t4(K)) +
0.405*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L)) -
0.375*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L))*sin(t4(K)) -
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t4(K)) -
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t3(L)) +
d1*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t4(K)) +
d1*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L)) -
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t6(P)) +
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t5(N))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) +
0.405*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t6(P)) -
0.405*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) -
d1*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) -
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t5(N))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t6(P)));

y=(0.655*sin(t1) - 0.375*cos(t5(N))*(cos(t3(L))*cos(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M))
+ cos(t2(M))*sin(t1)) - sin(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1))) - (d1+
0.405)*(cos(t6(P))*(cos(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1)) + cos(t4(K))*sin(t3(L))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1))) +
sin(t6(P))*(cos(t5(N))*(cos(t3(L))*cos(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1)) - sin(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1))) + sin(t5(N))*(cos(t1)*cos(t2(M)) - sin(t1)*sin(t2(M))))
- (1.679*cos(t3(L))*(cos(t1)*sin(t2(M)) + cos(t2(M))*sin(t1)))/2 -
0.375*sin(t5(N))*(cos(t1)*cos(t2(M)) - sin(t1)*sin(t2(M))) -
0.325*cos(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) + cos(t2(M))*sin(t1))-
0.325*cos(t4(K))*sin(t3(L))*(cos(t1)*sin(t2(M))+cos(t2(M))*sin(t1)));

z=(0.325*cos(t3(L))*cos(t4(K)) - (1.679*sin(t3(L)))/2 + (d1+
0.405)*(cos(t6(P))*(cos(t3(L))*cos(t4(K)) - sin(t3(L))*sin(t4(K))) -
cos(t5(N))*sin(t6(P))*(cos(t3(L))*sin(t4(K)) + cos(t4(K))*sin(t3(L)))) -
0.325*sin(t3(L))*sin(t4(K)) - 0.375*cos(t5(N))*(cos(t3(L))*sin(t4(K)) +
cos(t4(K))*sin(t3(L))) + 1.595/2);
    plot3(x,y,z)
        hold all
        title('Workspace of 6R robot');
        xlabel('X');ylabel('Y');zlabel('Z');
    end
end
```

```

end
end
end

```

Şekil 4.7. grafiği için yazılan kodlar:

```

delta=0.2; t1=pi/2; d1=0; t2=-3*pi/2:delta:-pi/2; t3=-pi/3:delta:0; t4=-
pi/4:delta:pi/4; t5=-pi/2:delta:pi/2; t6=-pi/4:delta:pi/4;
for K = 1:length(t4);
    for L=1:length(t3);
        for M=1:length(t2);
            for N=1:length(t5);
                for P=1:length(t6);

x=(0.655*cos(t1) + (1.679*cos(t3(L))*sin(t1)*sin(t2(M)))/2 +
0.375*cos(t1)*sin(t2(M))*sin(t5(N)) + 0.375*cos(t2(M))*sin(t1)*sin(t5(N)) -
(1.679*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L)))/2 -
0.325*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*sin(t4(K)) -
0.325*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t4(K))*sin(t3(L)) +
0.325*cos(t3(L))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t4(K)) +
0.325*cos(t4(K))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L)) +
0.405*cos(t1)*sin(t2(M))*sin(t5(N))*sin(t6(P)) +
0.405*cos(t2(M))*sin(t1)*sin(t5(N))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t1)*sin(t2(M))*sin(t5(N))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t2(M))*sin(t1)*sin(t5(N))*sin(t6(P)) -
0.375*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N)) -
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t4(K)) -
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t3(L)) +
0.375*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t5(N))*sin(t3(L))*sin(t4(K))+0.375*cos(t3(L))*cos
(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M)) +
0.405*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t4(K)) +
0.405*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L)) -
0.375*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L))*sin(t4(K)) -
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t4(K)) -
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t3(L)) +
d1*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t4(K)) +
d1*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L)) -
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t6(P)) +
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t5(N))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) +
0.405*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t6(P)) -
0.405*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) -
d1*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) -
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t5(N))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t6(P));

y=(0.655*sin(t1) - 0.375*cos(t5(N))*(cos(t3(L))*cos(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M))
+ cos(t2(M))*sin(t1)) - sin(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1))) - (d1+
0.405)*(cos(t6(P))*(cos(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1)) + cos(t4(K))*sin(t3(L))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1))) +
sin(t6(P))*(cos(t5(N))*(cos(t3(L))*cos(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1)) - sin(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1))) + sin(t5(N))*(cos(t1)*cos(t2(M)) - sin(t1)*sin(t2(M))))
- (1.679*cos(t3(L))*(cos(t1)*sin(t2(M)) + cos(t2(M))*sin(t1)))/2 -
0.375*sin(t5(N))*(cos(t1)*cos(t2(M)) - sin(t1)*sin(t2(M))) -
0.325*cos(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) + cos(t2(M))*sin(t1))-
0.325*cos(t4(K))*sin(t3(L))*(cos(t1)*sin(t2(M))+cos(t2(M))*sin(t1));

z=(0.325*cos(t3(L))*cos(t4(K)) - (1.679*sin(t3(L)))/2 + (d1+
0.405)*(cos(t6(P))*(cos(t3(L))*cos(t4(K)) - sin(t3(L))*sin(t4(K))) -
cos(t5(N))*sin(t6(P))*(cos(t3(L))*sin(t4(K)) + cos(t4(K))*sin(t3(L)))) -
0.325*sin(t3(L))*sin(t4(K)) - 0.375*cos(t5(N))*(cos(t3(L))*sin(t4(K)) +
cos(t4(K))*sin(t3(L))) + 1.595/2);
plot3(x,y,z)
hold all
title('Workspace of 6R robot');

```



```

xlabel('X');ylabel('Y');zlabel('Z');
end
end
end
end
end
end

```

Şekil 4.8. grafiği için yazılan kodlar:

```

delta=0.2; t1=pi; d1=0; t2=0:delta:pi; t3=-pi/3:delta:0; t4=-pi/4:delta:pi/4;
t5=-pi/2:delta:pi/2; t6=-pi/4:delta:pi/4;
for K = 1:length(t4);
for L=1:length(t3);
for M=1:length(t2);
for N=1:length(t5);
for P=1:length(t6);

x=(0.655*cos(t1) + (1.679*cos(t3(L))*sin(t1)*sin(t2(M)))/2 +
0.375*cos(t1)*sin(t2(M))*sin(t5(N)) + 0.375*cos(t2(M))*sin(t1)*sin(t5(N)) -
(1.679*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L)))/2 -
0.325*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*sin(t4(K)) -
0.325*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t4(K))*sin(t3(L)) +
0.325*cos(t3(L))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t4(K)) +
0.325*cos(t4(K))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L)) +
0.405*cos(t1)*sin(t2(M))*sin(t5(N))*sin(t6(P)) +
0.405*cos(t2(M))*sin(t1)*sin(t5(N))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t1)*sin(t2(M))*sin(t5(N))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t2(M))*sin(t1)*sin(t5(N))*sin(t6(P)) -
0.375*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N)) -
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t4(K)) -
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t3(L)) +
0.375*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t5(N))*sin(t3(L))*sin(t4(K))+0.375*cos(t3(L))*cos
(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M)) +
0.405*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t4(K)) +
0.405*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L)) -
0.375*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L))*sin(t4(K)) -
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t4(K)) -
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t3(L)) +
d1*cos(t3(L))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t4(K)) +
d1*cos(t4(K))*cos(t6(P))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L)) -
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t6(P)) +
0.405*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t5(N))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) +
0.405*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t6(P)) -
0.405*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) -
d1*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) -
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t1)*cos(t2(M))*cos(t5(N))*sin(t3(L))*sin(t4(K))*sin(t6(P)) +
d1*cos(t3(L))*cos(t4(K))*cos(t5(N))*sin(t1)*sin(t2(M))*sin(t6(P)));

y=(0.655*sin(t1) - 0.375*cos(t5(N))*(cos(t3(L))*cos(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M))
+ cos(t2(M))*sin(t1)) - sin(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1))) - (d1+
0.405)*(cos(t6(P))*(cos(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1)) + cos(t4(K))*sin(t3(L))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1))) +
sin(t6(P))*(cos(t5(N))*(cos(t3(L))*cos(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1)) - sin(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) +
cos(t2(M))*sin(t1))) + sin(t5(N))*(cos(t1)*cos(t2(M)) - sin(t1)*sin(t2(M))))
- (1.679*cos(t3(L))*(cos(t1)*sin(t2(M)) + cos(t2(M))*sin(t1)))/2 -
0.375*sin(t5(N))*(cos(t1)*cos(t2(M)) - sin(t1)*sin(t2(M))) -
0.325*cos(t3(L))*sin(t4(K))*(cos(t1)*sin(t2(M)) + cos(t2(M))*sin(t1))-
0.325*cos(t4(K))*sin(t3(L))*(cos(t1)*sin(t2(M))+cos(t2(M))*sin(t1)));

z=(0.325*cos(t3(L))*cos(t4(K)) - (1.679*sin(t3(L)))/2 + (d1+
0.405)*(cos(t6(P))*(cos(t3(L))*cos(t4(K)) - sin(t3(L))*sin(t4(K))) -
cos(t5(N))*sin(t6(P))*(cos(t3(L))*sin(t4(K)) + cos(t4(K))*sin(t3(L)))) -
0.325*sin(t3(L))*sin(t4(K)) - 0.375*cos(t5(N))*(cos(t3(L))*sin(t4(K)) +
cos(t4(K))*sin(t3(L))) + 1.595/2);

```

```

plot3(x,y,z)
    hold all
    title('Workspace of 6R robot');
    xlabel('X');ylabel('Y');zlabel('Z');
    end
    end
    end
    end
end
end

```

Şekil 4.15. grafiği için yazılan kodlar:

```

delta=0.15; d1=0; t11=0:delta:pi; t21=-pi/3:delta:pi/3; t31=-pi:delta:pi;
t41=-pi/3:delta:pi/3 ;
for J=1:length(t11);
    for M=1:length(t21);
        for L=1:length(t31);
            for K=1:length(t41);

x=(0.690*cos(t11(J)) - (0.2540+d1)*(sin(t41(K))*(sin(t11(J))*sin(t31(L)) -
cos(t11(J))*cos(t21(M))*cos(t31(L))) - cos(t11(J))*cos(t41(K))*sin(t21(M))) +
0.5720*cos(t11(J))*sin(t21(M)) + 0.2540*cos(t11(J))*sin(t21(M)));

y=(0.690*sin(t11(J)) + (0.2540+d1)*(sin(t41(K))*(cos(t11(J))*sin(t31(L)) +
cos(t21(M))*cos(t31(L))*sin(t11(J))) + cos(t41(K))*sin(t11(J))*sin(t21(M))) +
0.5720*sin(t11(J))*sin(t21(M)) + 0.2540*sin(t11(J))*sin(t21(M)));

z=(0.4725 + (0.2540+d1)*(cos(t21(M))*cos(t41(K)) -
cos(t31(L))*sin(t21(M))*sin(t41(K))) + 0.5720*cos(t21(M)) +
0.2540*cos(t21(M)));
plot3(x,y,z)
    hold all
    title('Workspace of 4R robot');
    xlabel('X');ylabel('Y');zlabel('Z');

    end
    end
    end
end
end

```

Şekil 4.16. grafiği için yazılan kodlar:

```

reset():
    i:=0:t31:=0:d1:=0:
for k from -1.04 to 1.04 step 0.01 do:
    i:=i+1:
    t41:=k:
    x:=(0.690*cos(t11) - (0.2540+0)*(sin(t41))*(sin(t11))*sin(t31) -
cos(t11)*cos(t21)*cos(t31)) - cos(t11)*cos(t41)*sin(t21)) +
0.5720*cos(t11)*sin(t21) + 0.2540*cos(t11)*sin(t21));
    y:=(0.690*sin(t11) + (0.2540+0)*(sin(t41))*(cos(t11))*sin(t31) +
cos(t21)*cos(t31)*sin(t11)) + cos(t41)*sin(t11)*sin(t21)) +
0.5720*sin(t11)*sin(t21) + 0.2540*sin(t11)*sin(t21));
    z:=(0.4725 + (0.2540+0)*(cos(t21))*cos(t41) - cos(t31)*sin(t21)*sin(t41)) +
0.5720*cos(t21) + 0.2540*cos(t21));
    s[i] := plot::Surface([x, y, z], t11 = 0 .. PI, t21 = -PI/3 ..
PI/3,AdaptiveMesh = 3,FillColorFunction = RGB::MuPADGold):
end_for

plot(s[i] $ i = 1 .. 208,Scaling = Constrained)

```

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Nihat ÇABUK
Doğum Yılı :1978

Eğitim Bilgileri (Kurum ve Yıl)

Lisans :Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve
Bilgisayar Eğitimi Bölümü Elektronik Öğretmenliği Programı
2002

İletişim Bilgileri

Adres :Aksaray Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu
Merkez/AKSARAY
Telefon :0505 388 48 17 / 0 382 288 25 05
E-posta : nihaticabuk@hotmail.com/ nihaticabuk@aksaray.edu.tr