

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ROBOT KOL TASARIMI, KİNEMATİK ANALİZİ
VE ETKİLEŞİMLİ KONTROLÜ

Hüseyin HAVUSOĞLU

Haziran, 2014

İZMİR

ROBOT KOL TASARIMI, KİNEMATİK ANALİZİ VE ETKİLEŞİMLİ KONTROLÜ

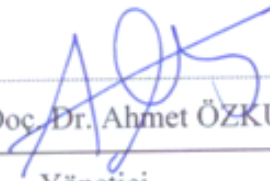
**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Hüseyin HAVUSOĞLU

**Haziran, 2014
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HÜSEYİN HAVUSOĞLU tarafından YRD. DOÇ. DR. AHMET ÖZKURT yönetiminde hazırlanan “ROBOT KOL TASARIMI, KİNEMATİK ANALİZİ VE ETKİLEŞİMLİ KONTROLÜ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZKURT
Yönetici


Doç. Dr. Latif Selim
Jüri Üyesi


Doç. Dr. Zeki KIRAC
Jüri Üyesi


Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimde bana gerek bilgi ve yol göstericiliğiyle gerekse sabrı ve anlayışıyla yardımcı olan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZKURT' a ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Hüseyin HAVUSOĞLU

ROBOT KOL TASARIMI, KİNEMATİK ANALİZİ VE ETKİLEŞİMLİ KONTROLÜ

ÖZ

Gelişen teknolojiye en büyük paylardan biri robotlara aittir. Günümüzde farklı kullanım alanlarına sahip olan robotlar yaklaşık 60 yıldır hayatımızda bulunmaktadır. Robotlar uygulama alanlarına göre farklı türlerde olabilirler. Bu çalışmada 4 serbestlik derecesine sahip manipülatör tasarlanmış, uygulanmış ve etkileşimli olarak kullanılabilmesi için deneysel bir test ortamı hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, robot manipülatöre ait model parametreleri belirlenerek transformasyon matrisinin çıkarılması ve kinematik hesaplamalarla konum kontrolü yapılması amaçlanmıştır. Robot manipülatörünün üretimi tasarım parametrelerine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. CAD çizim programından alınan tasarım verileri MATLAB programına aktarılmış ve simulinkte model oluşturulmuştur. MATLAB programına ait grafik arayüzü kullanılarak robot manipülatörün kontrolü için bir arayüz programı tasarlanmıştır. Bu arayüz programı ile hem MATLAB Simulink dosyasındaki 3D modelin hem de robot manipülatör gerçek görüntüsünün konum kontrolü sağlanmıştır. Robot manipülatöre ait Denavit-Hartenberg parametreleri belirlenerek transformasyon matrisi oluşturulmuştur.

Robot manipülatöre ileri kinematik ve ters kinematik değerleri verilerek uç işlevcinin konumu denenmiştir. Simülasyonun ve gerçek görüntünün eş zamanlı hareketi sağlanmıştır.

Bu çalışmanın robot – bilgisayar etkileşim sistemlerinin gelişmesinde ve eğitim amaçlı olarak kullanılması hedeflenmektedir.

Anahtar kelimeler: Robot, MATLAB, arayüz, Denavit-Hartenberg, transformasyon matrisi, ileri kinematik, ters kinematik

ROBOT ARM DESIGN, KINEMATIC ANALYSIS AND INTERACTIVE CONTROL

ABSTRACT

The largest share of emerging technology belongs robots. Nowadays, robots which have different area of use are available in our lives about 60 years. Robots can be of different types according to application areas. In this study, with 4 degrees of freedom manipulator designed, implemented and experimental test platform was prepared in order to use interactively.

In this thesis, obtaining transformation matrix by determining robot manipulator model parameters and position control with kinematics calculations is aimed. Robot manipulator is produced by depending on the design parameters. Design data acquired from CAD drawings were transferred to MATLAB program and MATLAB Simulink model has been created. Interface program has been designed to control robot manipulator by using graphical interface of MATLAB program. By this interface program, position control of both image of the 3D model in MATLAB Simulink file and real image of the robot manipulator is provided. The transformation matrix is obtained by determining Denavit-Hartenberg parameters of the robot manipulator.

Gripper position is experimented by giving forward kinematics and inverse kinematics values to the robot manipulator. The simultaneous movement of simulation and the real image is provided.

This study is aimed to use in development of robots - computer interaction systems and educational purposes.

Keywords: Robot, MATLAB, interface, Denavit-Hartenberg, transformasyon matrice, forward kinematic, inverse kinematic

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ – ROBOT NEDİR?	5
2.1 Robotun Komponentleri	5
2.2 Robotun Mafsalları.....	5
2.2.1 Kayar Mafsallar	5
2.2.2 Döner Mafsallar	6
2.3 Robot Türleri	6
2.3.1 Kartezyen Robot Manipülatörler	6
2.3.2 Silindirik Robot Manipülatörler	7
2.3.3 Küresel Robot Manipülatörler	7
2.3.4 SCARA Robot Manipülatörler	8
2.3.5 İnsan Koluna Benzer Manipülatörler.....	8
2.4 Robotlara Hareket Veren Enerji Türleri.....	9
2.4.1 Elektrik Enerjisi	9
2.4.2 Pnömatik Enerji	9
2.4.3 Hidrolik Enerji	10
2.5 Robotların Kullanım Alanları.....	10
2.5.1 Endüstriyel Robotlar	10
2.5.1.1 Endüstriyel Robotların Kullanım Alanları	11

2.5.2 Operasyonel Robotlar	11
2.5.3 Tıp ve Sağlık Robotları.....	11
2.6 Robot Seçiminde Dikkat Edilecek Özellikler.....	12
2.6.1 Çalışma Uzayı.....	12
2.6.2 Tekrarlanabilirlik	12
2.6.3 Yük Taşıma Kapasitesi	12
2.7 Kinematik	12
2.7.1 İleri Kinematik.....	13
2.7.2 Ters Kinematik	13
2.7.3 Denavit Hartenberg Yöntemi.....	14
2.7.4 Homojen Transformasyon Matrisi.....	15
BÖLÜM ÜÇ – TEZ ÇALIŞMASI	18
3.1 Mekanik Kısım	18
3.1.1 Mekanik Tasarım	18
3.1.2 Motorlar	22
3.1.3 Kontrol Kartı (USB2Dynamixel)	24
3.2 Matlab Yazılımı.....	25
3.2.1 GUI Tasarımı	25
3.2.2 Simulink Model	26
3.3 Kinematik	29
3.3.1 Denavit – Hartenberg Parametreleri ve Dönüşüm Matrisleri	29
3.3.2 İleri ve Ters Kinematik.....	31
3.4 Çalışma Uzayı	35
BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL ÇALIŞMA.....	38
4.1 İleri Kinematik.....	38
4.2 Ters Kinematik	42
4.3 Tekrarlanabilirlik.....	47

BÖLÜM BEŞ – SONUÇ VE ÖNERİLER.....	48
KAYNAKLAR	50

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Tez çalışması blok diyagramı	3
Şekil 2.1 Kayar mafsalları	5
Şekil 2.2 Döner mafsalları	6
Şekil 2.3 Kartezyen robot	6
Şekil 2.4 Silindirik robot	7
Şekil 2.5 Küresel robot	7
Şekil 2.6 SCARA robot	8
Şekil 2.7 İnsan kolu robot	8
Şekil 2.8 İleri kinematik	13
Şekil 2.9 Ters kinematik	13
Şekil 2.10 D-H parametreleri	14
Şekil 3.1 Proje çalışması blok diyagramı	18
Şekil 3.2 Robot manipülatör xy düzlemi görünüşü	19
Şekil 3.3 Robot manipülatör xz düzlemi görünüşü	20
Şekil 3.4 Robot manipülatör yz düzlemi görünüşü	20
Şekil 3.5 Robot kol izometrik görünüş	21
Şekil 3.6 Robot kol izometrik görünüş	21
Şekil 3.7 Dynamixel RX 28/24F motor	22
Şekil 3.8 Motor dönüş açıları	23
Şekil 3.9 Dynamixel RX 28/24F pin açıklamaları	23
Şekil 3.10 Dynamixel 24F / RX28 pin bağlantıları	24
Şekil 3.11 USB2Dynamixel	24
Şekil 3.12 Bilgisayar, USB2Dynamixel, dynamixel motor bağlantısı	25
Şekil 3.13 Matlab'ta tasarımı yapılan arayüz programı	26
Şekil 3.14 Eklem 1 simulink modeli	27
Şekil 3.15 Eklem 2 simulink modeli	27
Şekil 3.16 Eklem 3 simulink modeli	27
Şekil 3.17 Eklem 4 simulink modeli	27
Şekil 3.18 Robotun simulink modeli	28

Şekil 3.19 Matlab simulinkte çalıştırılan robot kol.....	29
Şekil 3.20 Robot kol farklı eklem açıları	32
Şekil 3.21 Robot kol xy düzlemindeki görünüş	33
Şekil 3.22 Robot kol zr düzlemindeki görünüş.....	34
Şekil 3.23 Robot kol 0 konumu	35
Şekil 3.24 Çalışma uzayı xy düzlemi.....	36
Şekil 3.25 Çalışma uzayı zy düzlemi	36
Şekil 3.26 Çalışma uzayı perspektif görünüş.....	37
Şekil 4.1 Robot kol çubuk model pozisyonu	40
Şekil 4.2 Robot kol cad model pozisyonu.....	41
Şekil 4.3 Robot kol gerçek pozisyonu.....	41
Şekil 4.4 Uç işlevcinin noktadan noktaya izlediği yol.....	44
Şekil 4.5 Robot manipülatör 1. nokta konumu	44
Şekil 4.6 Robot manipülatör 2. nokta konumu	45
Şekil 4.7 Robot manipülatör 3. nokta konumu	45
Şekil 4.8 Robot manipülatör 4. nokta konumu	46
Şekil 4.9 Robot manipülatör 5. nokta konumu	46
Şekil 4.10 Robot manipülatör tekrarlanabilirlik testi.....	47

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 D-H parametreleri	30
Tablo 4.1 Noktaların Kartezyen Koordinatları	42

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Günümüzde çok hızlı gelişen teknolojinin getirmiş olduğu yeniliklerle ürünlerin kalitesi artmış, daha ucuza imal edilmeye başlanmış ve seri üretim artmıştır. Endüstride yapılan bu iyileştirmelerde robotlar geniş bir yer tutmaktadır.

Robotlar bugünün endüstrisinde çok güçlü elementlerdir. Çok farklı görevlerde kullanılabilirler ve bu görevleri hassas bir şekilde gerçekleştirebilme kabiliyetlerine sahiptirler. Görevleri gerçekleştirirken insanlar gibi bir güvenlik alanına ve konfora ihtiyaç duymazlar. Fakat fonksiyonlarını düzgün bir şekilde gerçekleştirebilmek için bir çok kaynak kullanırlar (Niku, 2001).

Robotik ve otomasyon, verimliliği, güvenliği ve kaliteyi artırabilir. Herhangi bir yaşam desteğine, konfora ve güvenliğe ihtiyaç duymadan tehlikeli bölgelerde çalışabilir. Robotlar çalışmak için ışık, temiz hava, havalandırma ve gürültüden korunma gibi çevresel konfora ihtiyaç duymazlar. İnsanlardan daha düzgün işler yapabilirler. İşlem hassasiyetleri mm'nin binde biri kadar olabilir. Robotlar düşük ücretler, sosyal problemler, memnuniyetsizlik, işçiler arasında sorunlar gibi problemleri olmadığı için insanların yerini almışlardır. Ama uygunsuz veya yanlış cevaplar, eksik karar verme durumu, güç kaybı, robotun mekanik veya üzerindeki cihazların arızalanması gibi dezavantajları vardır. Çevre birimlerine, eğitilmelerine ve programlanmaya ihtiyaç duyarlar (Niku, 2001).

Otomasyon tekniklerinin gelişim periyodu dünyanın ekonomik gelişimine yakından bağlıdır. Endüstriyel anlamda robotların kullanımı özel bir cihaz olarak 1960'lı yıllarda computer-aided design (CAD) ve computer-aided manufacturing (CAM) ile birlikte kullanılmaya başlanmıştır. Kuzey Amerika'da 1980'lerin başında robotik ekipmanlar çok benimsenmiştir. 1980'lerin ortalarında biraz gerileme gerçekleşmişse de sonlarına doğru robotik üreticiler artmaya başlamıştır (Craig, 2005).

Robotlar genel olarak maliyeti düşürmek ve ürün kalitesini artırmak için kullanılırlar. İnsan sağlığının tehlikeye düşeceği kimyasal enerji, nükleer enerji gibi alanlarda kullanılırlar.

Robot kelimesi ilk olarak 1920 yılında Karel Capek tarafından kullanılmıştır.

Issac Asimov 1950 yılında “I robot” adlı eserinde robot kelimesini ilk defa robotik anlamında kullanmıştır.

Denavit ve Hartenberg 1955 yılında transformasyon matrislerini sunmuşlardır. Bu durum robotun endüstrileşmesindeki ilk adım olarak kabul edilebilir. İlk endüstriyel uygulama ise 1961 yılında üretilen “Unimate” robotudur. (Hagele, Nilson ve Pires, 2008)

1961 yılından sonra robotlara ilgi artmış ve bu konuyla ilgili çalışmalar başlamıştır. 1979 yılında SCARA robot geliştirilmiştir (Kurfess (Ed), 2005). 1990’lı yıllardan günümüze kadar ise gelişim hızla devam etmiştir.

Bu çalışmada, aşağıda Şekil 1.1’de verilen blok diyagramı gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki amaç, mekanik ve simülasyon bileşenlerinin geliştirilen robot modeli ve teorik kinematik altyapıya uygun olarak kullanıcı ile etkileşimli şekilde hareket ettirilmesidir. Bu sayede bir robot sisteminin tüm bileşenleri, sürücüleri ve teorik temelleri kullanılarak bir eğitim ve test ortamı sağlanmıştır.

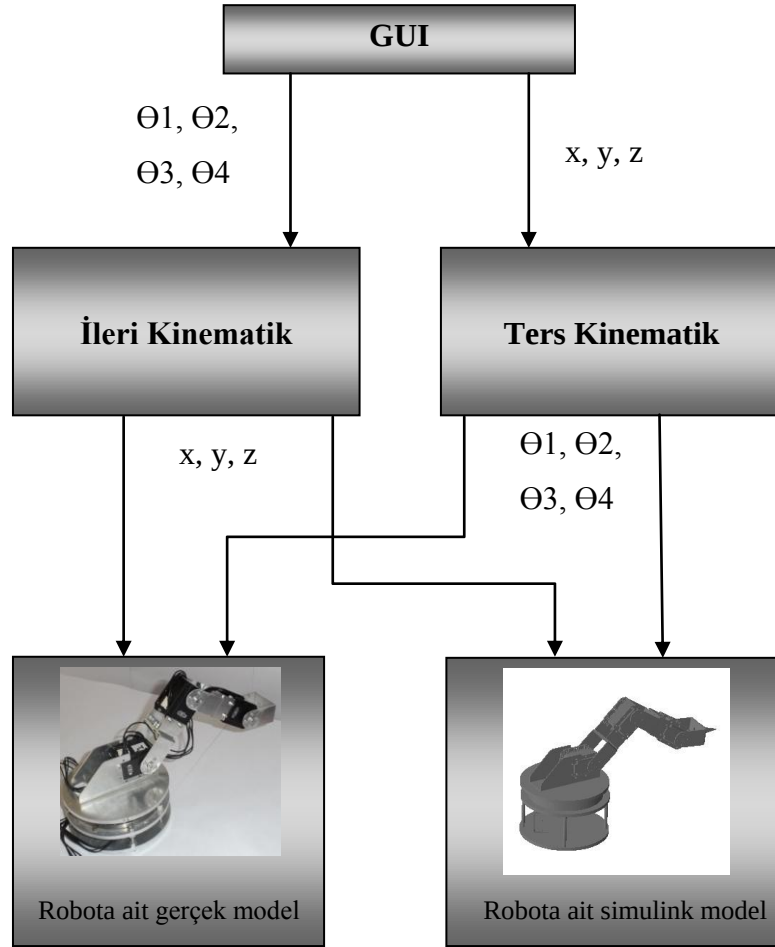
Bilgisayar ekranında bulunan grafik arayüz programından (GUI) robot manipülatöre ait eklemlerdeki motorlara hareket verilmektedir. Aynı zamanda bilgisayar ekranındaki 3D görüntüye de hareket verilerek hem mekaniğin hem de 3D görüntünün eş zamanlı olarak hareket etmesi sağlanmıştır.

Grafik arayüz programından robot kolun her bir eklemine ait transformasyon matrisi değerleri gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir. Aynı zamanda robot

manipülatöre ait ana  er eve ile uç i levcisi arasındaki transformasyon matrisi değerleri de izlenebilmektedir.

Kullanıcı grafik arayüz programında robot manipülatöre ait a ı değerini girerek uç i levcinin gittiği noktanın koordinatlarını ekrandan izleyebilmektedir. Ters olarak da uç i levcinin gitmesi gereken noktanın koordinatları arayüz programına girilerek eklemlerin hangi a ı değerine gelmesi gerektiği yine aynı ekranda izlenebilmektedir. GUI'ye girilen ve hesaplamalar neticesinde elde edilen değerlere bağlı olarak manipülatörün ve 3D görüntünün hareketi gözlenebilmektedir.

Bu çalışmada amaçlanan kullanıcının robota ait a ı veya uç nokta değerlerini GUI'den izleyerek robot manipülatörün gerçek ve 3D görüntüsünün hareketinin gözlenmesidir.



Şekil 1.1 Tez  alı ması blok diyagramı

Birinci bölümde robotlara giriş yapılarak robotların tarihsel gelişimi, robotik sistemlerin kavramsal altyapısı verilmiştir.

İkinci bölümde robotlar hakkında genel bilgiler verilmiştir. Robotların mesnet tipleri, türleri, tahrik sistemleri, kullanım alanları, seçim özellikleri ve kinematiği ayrıntılı şekilde verilmiştir.

Üçüncü bölümde projenin deneysel ve teorik kısımları anlatılmıştır. Mekanik kısımda robot kolun tasarlanması, motorlar ve kontrol kartından bahsedilmiştir. Matlab kısmında gui tasarlanmış ve simulink oluşturulmuştur. Kinematik kısımda ileri ve ters kinematik hesapları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde robot kola ait yapılan deneysel çalışmanın detayları ve sonuçları verilmiştir. Burada ileri kinematik ve ters kinematik hesaplarıyla robot manipülatörün konum analizinin gerçekleştirilme adımları da yer almaktadır.

Beşinci bölümde yapılan çalışmadan öğrenilebilecek bilgiler ve bu bilgilerin uygulanabileceği alanlara ait öneriler verilerek tez çalışması sonlandırılmıştır.

BÖLÜM İKİ

ROBOT NEDİR?

Üretim robotları taşıma, kaynak, montaj gibi işleri yerine getirebilen gerektiğinde tekrar programlanarak farklı bir fonksiyon içinde kullanılabilen araçlardır.

2.1 Robotun Komponentleri

Robot temel olarak dört kısma ayrılır.

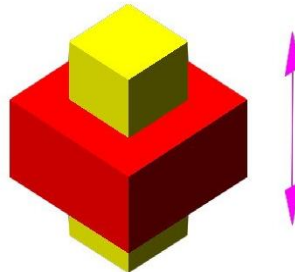
1. Mafsal hareketlerini sağlayan aktüatörler
2. Sensörler
3. Kontrol sistemi
4. Robotun mekaniği

2.2 Robotun Mafsalları

Mafsallar, robot manipülatörün hareketlerinin gerçekleştiği noktalardır. Mafsallar kayar veya döner olarak iki gruba ayrılır.

2.2.1 Kayar Mafsallar

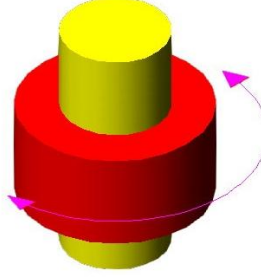
İki uzvun birbirine göre kayma hareketine izin verir.



Şekil 2.1 Kayar mafsal

2.2.2 Döner Mafsallar

İki uzvun birbirine göre dönme hareketine izin verir.

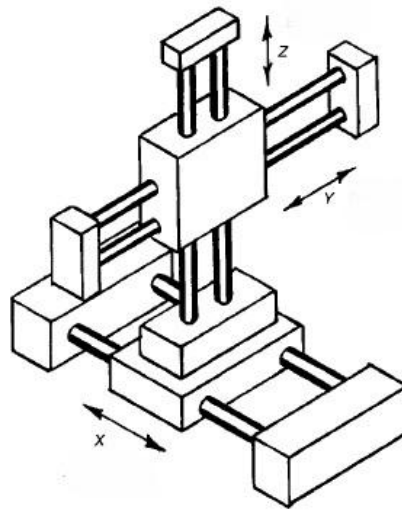


Şekil 2.2 Döner mafsall

2.3 Robot Türleri

2.3.1 Kartezyen Robot Manipulatörler

Kartezyen robotlar yapı itibari ile sağlam mekaniğe sahiptirler. Çalışma hacimleri kendi boyutlarından daha küçüktür. Hareketlerini elektrik motorundan, pnömomatik etkileyiciden veya hidrolik etkileyiciden alabilirler. Yapıları mukavim olduğundan dolayı büyük kuvvetler altında çalışabilirler (Bingöl ve Küçük, 2005).

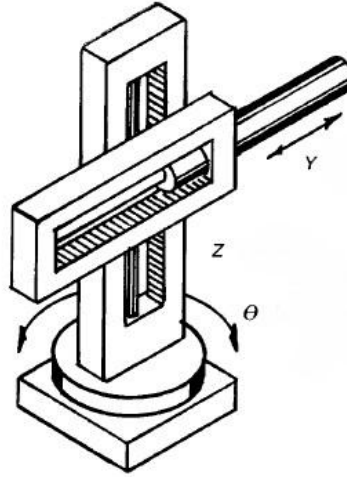


Şekil 2.3 Kartezyen robot (Sandin, 2003)

Kontrol edilebilme kabiliyetleri fazladır. Ağır yük kaldırabilirler. Fakat çalışma uzayı dar bir hacme sahiptir.

2.3.2 Silindirik Robot Manipulatörler

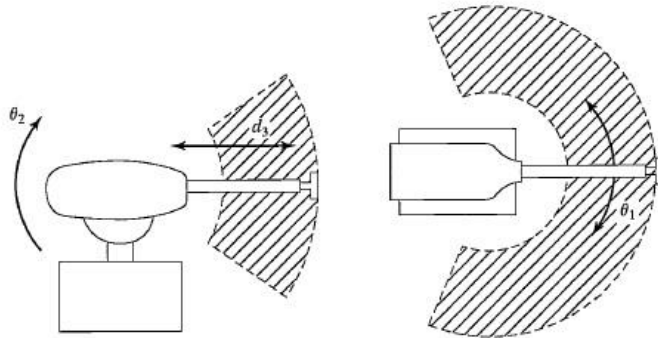
Silindirik robotlar silindirik koordinat sistemini kullandıklarından dolayı bu ismi almışlardır. İki adet kayar mafsala ve bir adet döner mafsala sahiptir. Ağır yükleri kaldırabilme kabiliyetleri vardır (Bingöl ve Küçük, 2005).



Şekil 2.4 Silindirik robot (Sandin, 2003)

2.3.3 Küresel Robot Manipulatörler

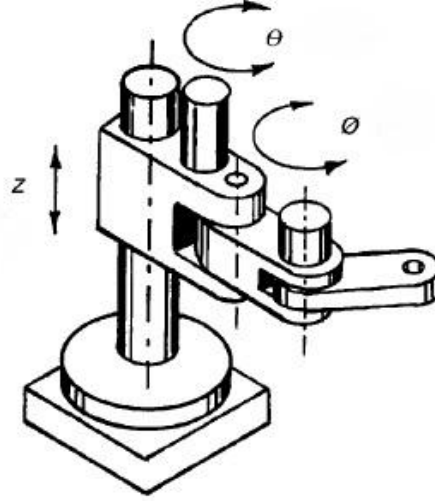
Küresel robotlar küresel koordinat sisteminin parametrelerini kullandığı için bu isimle anılırlar. Küresel robot iki adet döner ve bir adet kayar mafsala sahiptir. Döner mafsallarda genellikle elektrik motorları kullanılır (Bingöl ve Küçük, 2005).



Şekil 2.5 Küresel robot (Craig, 2005)

2.3.4 SCARA Robot Manipulatörler

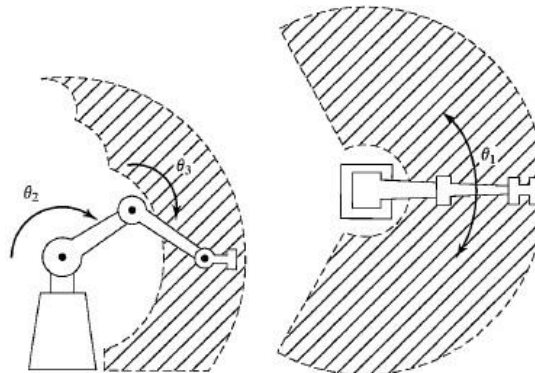
SCARA türü robotlar birbirine paralel 3 eksenenden meydana gelmektedirler. İki adet döner mafsala ve bir adet kayar mafsala sahiptirler. Hassasiyetleri oldukça iyi robotlardır. Bundan dolayı elektronik endüstrisinde kullanılmaktadırlar (Bingöl ve Küçük, 2005).



Şekil 2.6 SCARA robot (Sandin, 2003)

2.3.5 İnsan Koluna Benzer Manipulatörler

Bu manipulatörler insan kol hareketlerini taklit ettiği için bu isimle anılmaktadırlar. Çalışma hacimlerinde hareket kabiliyetleri fazladır. Elektrik motorları bu manipulatörlerde genellikle kullanılan tahrik elemanlarıdır (Bingöl ve Küçük, 2005).



Şekil 2.7 İnsan kolu robot (Craig, 2005)

2.4 Robotlara Hareket Veren Enerji Türleri

Robot manipülatöre hareket veren enerji türleri üçe ayrılır (Bingöl ve Küçük, 2005).

- Pnömatik enerji
- Hidrolik enerji
- Elektrik enerjisi

2.4.1 Elektrik Enerjisi

Elektrik enerjisi robot manipülatörlerdeki elektrik motorlarını hareket ettirmek için kullanılırlar. Robotlarda motor türü olarak endüstriyel uygulamalarda genellikle servo motorlar kullanılmaktadır. Robotun çalışma uzayında aynı noktaya tekrar tekrar gitmesi gerektiğinden dolayı tekrarlanabilirliğini yani konumunu koruması gerekmektedir. Servo motorlar kendi içlerinde konum kontrollü olduğundan dolayı tercih sebebidir.

Dezavantaj olarak yanıcı ortamlarda elektrik arkı oluşabileceğinden dolayı bu tür ortamlarda kullanılmaları uygun değildir.

2.4.2 Pnömatik Enerji

Pnömatik enerji hava enerjisidir. Pistonlara belirli basınçlarda hava verilerek hareketi gerçekleştirirler. Hava sıkışabilir bir akışkan olduğundan dolayı hassas işlerde kullanılmaları uygun değildir. Buradan çıkan ikinci sonuç ise ağır yükler altında da çalıştırılmaları verimli olmaz. Pnömatik enerji temiz olduğundan dolayı endüstride genellikle gıda, ilaç sektöründe kullanılmaktadır. Yatırım maliyetleri diğer türlere göre daha ucuzdur.

2.4.3 Hidrolik Enerji

Hidrolik enerji hidrolik pistonlara veya hidrolik motorlara enerji vermek için kullanılmaktadır. Hidrolikte kullanılan akışkan ağır yükler altında çok az sıkıştığından dolayı hassas işlerde kullanılabilirler. Diğer iki enerji sistemine göre daha büyük kuvvetleri karşılayabilirler. Fakat hidrolik enerjide kullanılan sıvının viskozitesi yüksek olduğundan dolayı diğer iki enerji sistemine göre daha yavaşlardır. Hidrolik enerji sisteminin ilk yatırım maliyeti yüksektir.

2.5 Robotların Kullanım Alanları

Robotların kullanım alanları, endüstriyel robotlar, operasyonel robotlar, tıp ve sağlık robotları olarak ayrılabilir.

2.5.1 Endüstriyel Robotlar

Robotlar endüstrinin farklı sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Sektöre göre kullanılan robotların türleri de değişmektedir. Örnek vermek gerekirse otomotiv sektöründe araçların sac kısımlarının kaynağı için robot kol manipülatörler kullanılmaktadır. Robot kullanılmasının nedenler arasında seri imalat olması ve kaynak kalitesinin iyi olmasıdır. Bir başka örnek olarak kesim yapan robotlar verilebilir. Bu tür robotlar genellikle kartezyen robotlardır. Kontrollerinin kolay olması ve hassas konumlama yapılabildiğinden dolayı tercih edilirler.

Gıda ve ilaç sektöründe pnömatik enerjiyi kullanan robotlar kullanılmaktadır. Bunun nedeni insan sağlığına doğrudan etki eden ürünlerin üretilmesidir. Hidrolik enerji kullanıldığında bulunduğu ortama yağ dökülme olasılığı çok yüksektir. Bu olasılık yüksek ise yağın gıdalara bulaşma olasılığı da yüksektir. İlaç sektöründe de aynı senaryo verilebilir. Bu durum hidrolik enerjinin tercih edilmeme sebebidir. Aynı şekilde elektrik motorları da verilebilir. Bu motorlar hem toz birikimine hem de kıvılcım çıkartarak yangın çıkarma olasılığına sahiptirler.

Endüstride robotlar hatasız üretim, hızlı üretim, maliyetin azaltılması, insan riskini ortadan kaldırması, kesintisiz çalışabilmesi gibi nedenlerden dolayı tercih edilirler. Fakat robotlar düşünemez, programlama olmadan çalışamaz, her bir fonksiyon için programlanması gerekir. Yatırım maliyetleri yüksektir (Kurfess, 2005).

2.5.1.1 Endüstriyel Robotların Kullanım Alanları

- Parça seçme, sıralama, yerleştirme, tezgaha yöneltme,
- Parçaların montajı,
- Çapak temizleme ve parlatma,
- Bitmiş parçaların ölçü ve kontrolü,
- Stoklama işlemi,
- Boya işlemlerinde (özellikle otomotiv sanayinde)
- Punta, ark kaynağında,
- Lazer ile kesme işlemlerinde kullanılırlar

2.5.2 Operasyonel Robotlar

Bu tip robotlar genelde uzaktan kontrollü veya özel bir amaca yönelik dizayn edilmiş robotlar olup, uçakların dış temizliğinde, bomba imha çalışmalarında, madencilik, uzay araştırmaları, denizin altında yapılan çalışmalarda, depremler sonrası kurtarma çalışmalarında, askeri amaçlı çalışmalarda kullanılmaktadır.

2.5.3 Tıp ve Sağlık Robotları

Ortopedik amaçlı insan uzuvları ve protezleri beyinden gelen sinyali sensörler ile algılayarak uzuvlardaki manipulatörleri hareket ettirirler. Ayrıca günümüzde tıbbi operasyonlar için kıtalar arası iletişim kurabilen cerrahların ameliyat yapmasını sağlayan robotlar vardır. Türkiye’de de bu şekilde başarılı ameliyatlar yapılmaktadır (Kurfess, 2005).

2.6 Robot Seçiminde Dikkat Edilecek Özellikler

Robot seçiminde robotun kullanım yeri, çalışma uzayı, tekrarlanabilirlik, yazılım , yük taşıma kapasitesi gibi özellikleri değerlendirilmelidir.

2.6.1 Çalışma Uzayı

Robotun uç işlevcisinin robot mekaniğine bağlı olarak ulaşabileceği noktaların oluşturduğu hacimdir. Robot bu hacimde istenilen noktaya sorunsuz bir şekilde ulaşabilmektedir. Çalışma uzayı kullanılan uygulamaya göre farklılık gösterir. Aynı robot farklı alanlarda farklı görevleri yerine getirirken çalışma alanları uygulamaya göre farklılık gösterebilir.

2.6.2 Tekrarlanabilirlik

Robotun daha önce gitmiş olduğu bir noktaya tekrar tekrar gidebilme yeteneğini ifade eder. Kullanılan uygulamaya göre farklılık gösterir. Örneğin bir kaynak robotu kaynak yaparken tekrarlanabilirlik yeteneğinin kaynak telinin yarıçapından fazla olmaması gerekir. Aksi takdirde geri dönüşü olmayan hasarlara neden olabilir.

2.6.3 Yük Taşıma Kapasitesi

Yük taşıma kapasitesi genellikle taşıma amaçlı kullanılacak robotlarda dikkat edilmesi gereken bir özelliktir. Robotun hassas konumlama yapabilecek şekilde taşıyabileceği maksimum yük değerine dikkat edilmesi gerekmektedir.

2.7 Kinematik

Kinematik, ileri kinematik ve ters kinematik olmak üzere iki kısma ayrılır (Craig, 2005).

2.7.1 İleri Kinematik

Robotun ileri yön kinematiği, robot mafsallarının konumları, hızları ve ivmeleri ile ilgilenir. Bir robot birbirine kayar veya dönel eklemlerle bağlıdır. İki bağ arasındaki ilişki bir homojen dönüşüm matrisiyle açıklanır. Eklem dönüşüm matrislerinin çarpılmasıyla robotun ana çerçevesi ile uç kısmı arasında bağ kurulur. Bu bağ robotun uç işlevcisinin konumunu ve yönelimini ana çerçeveye göre verir. Daha genel ifadeyle ileri kinematik problem, eklem değişkenlerinin verilmesiyle (θ_i , d_i) uç işlevcisinin konumunun (x, y, z) ve yöneliminin bulunmasıdır.



Şekil 2.8 İleri kinematik

2.7.2 Ters Kinematik

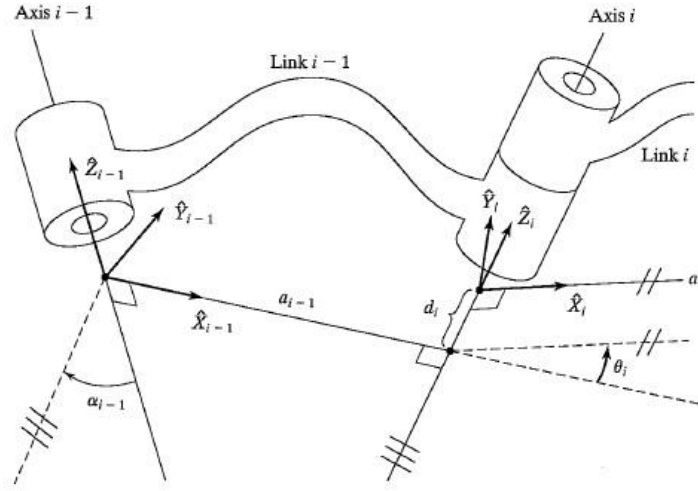
Robotların ileri yön kinematiğinde robotun eklem açıları verilerek robotun uç işlevcisinin konumu bulunur. Ters kinematikte ise robotun uç işlevcisinin yönelimi ve konumu verilerek robotun bu yönelim ve konuma ulaşabilmesi için gerekli olan açı değerlerinin bulunması sağlanır. Fakat ters kinematikte denklemlerin doğrusal olmamasından dolayı bu denklemlerin çözümü son derece karmaşıktır. Elde edilen denklemler tekil çözümler üretmeyip birden fazla sonuç üretirler.



Şekil 2.9 Ters kinematik

2.7.3 Denavit Hartenberg Yöntemi

Denavit-Hartenberg kinematik için 4 parametre kullanır.. Bu parametreler, eksenler arasındaki bağ uzunluğu a , i ile $(i-1)$ eksenleri arasındaki kaçıklık açısı α , eksenler arasındaki kaçıklık d ve uzuvlar arasındaki θ açısı'dır. Bu değişkenlere (a , α , d , θ) D-H parametreleri denir (Angeles, 2007).



Şekil 2.10 D-H parametreleri (Craig, 2005)

Robotun hareket eksenlerinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için eklemlere koordinat sistemi yerleştirirken aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmelidir.

1. Mafsal eksenlerinin kayma ve dönme yönleri belirlendikten sonra bu harekete bağlı olarak bu eksene paralel bir doğru çizilir.
2. Döner mafsallarda θ dönme açısı z yönünde, kayar mafsallarda z ekseninde olmalıdır.
3. Z eksenine dik ve bir sonraki mafsala doğru olan eksen X eksen olmalıdır.
4. İki eksen belirlendikten sonra üçüncü eksen bunlara dik olan eksen olarak belirlenir.

5. Eğer $(i-1)$. ile i . ekseninin kayma veya dönme yönleri aynıysa Z eksenini yerleştirildikten sonra uzuv doğrultusunda X eksenini yerleştirilir. En son Y eksenini belirlenir.
6. Sıfır ve birinci eksenler üst üste kabul edilebilir.

Eklemlere yerleştirilen koordinat sistemleri yukarıda açıklanan kurallara göre belirlendikten sonra eklem değişkenleri aşağıdaki ifadeler göz önünde bulundurularak isimlendirilir (Angeles, 2007).

1. $a(i-1)$, $Z(i-1)$ ile $Z(i)$ arasında $X(i-1)$ boyunca belirlenen uzunluktur.
2. $\alpha(i-1)$, $Z(i-1)$ ile $Z(i)$ arasında $X(i-1)$ boyunca ölçülen açıdır.
3. $d(i)$, $X(i-1)$ ile $X(i)$ arasında $Z(i)$ boyunca belirlenen uzunluktur.
4. $\theta(i)$, $X(i-1)$ ile $X(i)$ arasında $Z(i)$ boyunca ölçülen açıdır.

Yukarıdaki değişkenler D-H değişkenleridir. Bu değişkenler herhangi bir robot için belirlendikten sonra dönüşüm matrisleri yardımıyla robotun ana çerçevesiyle uç işlevcisi arasında bir bağlantı tanımlanmış olur.

2.7.4 Homojen Transformasyon Matrisi

Homojen transformasyon matrisi robotun ana çerçevesi ile uç işlevcisi arasında matematiksel bir bağ kurmamızı sağlayan matristir. Ana çerçeveden başlayıp denavit-hartenberg parametrelerini kullanarak sırasıyla her bir eklemden diğer ekleme geçiş matrislerinin birbiriyle çarpımından bu matris elde edilir. Bir eklemden diğer ekleme geçiş yaparken dönme veya öteleme matrisleri kullanılır. Bu matrisler aşağıda gösterilmiştir (Denavit ve Hartenberg, 1964).

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha & 0 \\ 0 & s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$R_{y,\varphi} = \begin{bmatrix} c\varphi & 0 & s\varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\varphi & 0 & c\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R_{z,\Theta} = \begin{bmatrix} c\Theta & -s\Theta & 0 & 0 \\ s\Theta & c\Theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$d_{x,a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$d_{y,b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$d_{z,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Bu matrisler, eklemlere yerleştirilmiş koordinat eksenlerinin bir önceki koordinat eksenine göre konumunu verir. İki eklem arasında geçiş yapılırken aşağıdaki dönüşüm matrisleri çarpılarak elde edilen matris kullanılır (Denavit ve Hartenberg, 1964).

$$A_i = Rot_z, Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_x, \begin{bmatrix} c\Theta_i & -s\Theta_i c\alpha_i & s\Theta_i s\alpha_i & a_i c\Theta_i \\ s\Theta_i & c\Theta_i c\alpha_i & -c\Theta_i & a_i s\Theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Her bir eklem için elde edilen bu A_i matrisi (2.7) sırasıyla birbiriyle çarpılarak o robot için homojen transformasyon matrisi elde edilir. (2.8)'de 4 serbestlik derecesine sahip bir robot manipülatörün homojen transformasyon matrisinin çarpım yöntemi gösterilmektedir.

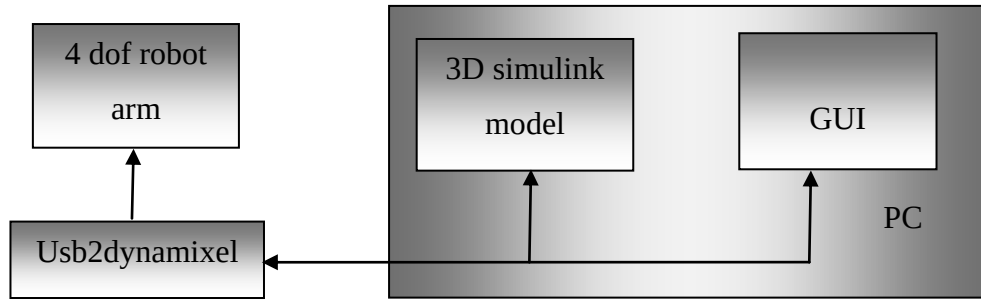
$${}^0T_4 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 \quad (2.8)$$

BÖLÜM ÜÇ

TEZ ÇALIŞMASI

Bilgisayarda simülasyonlu robot kol manipülatörü tasarımı ve kontrolü projesinde, robot manipülatörün SolidWorks programı vasıtasıyla 3D modeli oluşturularak imal edilmiştir. 3D model simulink modelin oluşturulması ve kontrol edilebilmesi için MATLAB programına aktarılmıştır. Bu programda bir grafik arayüzü oluşturularak hem simülasyonun hareket etmesi hem de bir sürücü kullanarak robotun hareket etmesi sağlanmıştır.

Bu proje ile robotun her türlü hareketi konum, hız, tork değerleri uzaktan izlenebilecek ve arıza tespit edilebilecektir.



Şekil 3.1 Proje çalışması blok diyagramı

3.1 Mekanik Kısım

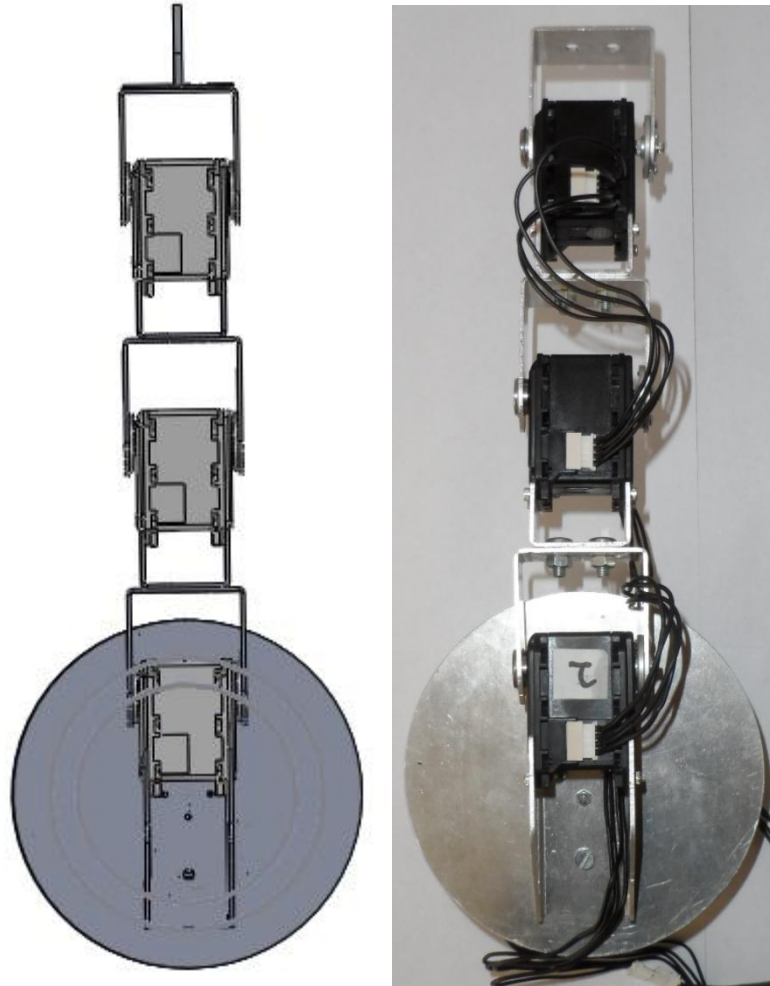
Mekanik kısım, mekanik tasarım, motorlar ve kontrol kartı olarak üç kısma ayrılır.

3.1.1 Mekanik Tasarım

Günümüzde birçok CAD programı bulunmaktadır. Bu programlar amaçlarına göre (yüzey modelleme, katı tasarım, kalıp tasarımı vs.) endüstrinin farklı alanlarında kullanılırlar. Bu çalışmada robot kolun tasarımı için SolidWorks programı kullanılmıştır. Robot manipülatör 4 hareket ekseninden meydana geldiğinden dolayı 4 serbestlik derecesine sahiptir. Kullanacağımız motorlar göz önünde bulundurularak

tasarımın boyutlarına karar verilmiştir. Robotun imali göz önünde bulundurularak hafif olması için alüminyum malzemeden tasarımı yapılmıştır.

Şekil 3.2’de robot kol manipülatöre ait üstten görünüş görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere robot, döner tabla ve tablanın üzerine montajlı 3 eklemden meydana gelmektedir. Buradaki motorlar robot manipülatörün eklemlerini ifade eder. Motorlar birbirlerine seri olarak bağlanmışlardır. Her bir motorun kendisine ait ID’si olduğundan dolayı program tarafından istenilen motor hareket ettirilebilmektedir.



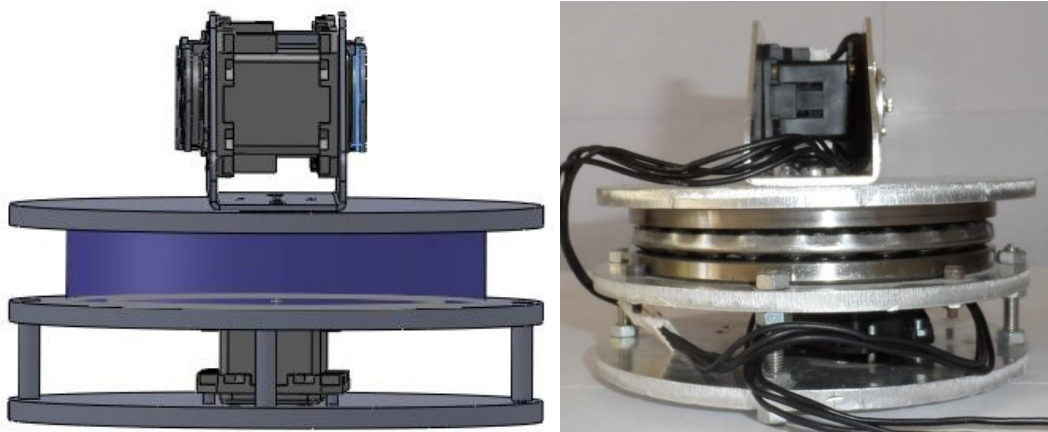
Şekil 3.2 Robot manipülatör xy düzlemi görünüşü

Şekil 3.3’te robot manipülatöre ait yandan görünüş görülmektedir. Bu konum aynı zamanda robotun 0 konumunun görüntüsüdür.



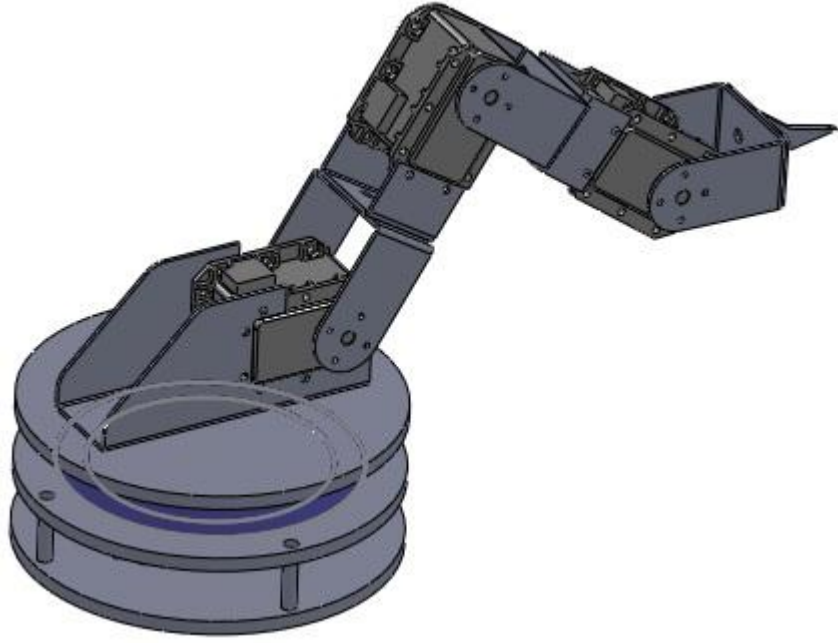
Şekil 3.3 Robot manipulatör xz düzlemi görünüşü

Şekil 3.4’te robot manipulatöre ait arkadan görünüş görülmektedir.



Şekil 3.4 Robot manipulatör yz düzlemi görünüşü

Şekil 3.5 ve şekil 3.6’da robot manipulatöre ait izometrik görünüş görülmektedir.



Şekil 3.5 Robot kol izometrik görünüş



Şekil 3.6 Robot kol izometrik görünüş

Yukarıdaki şekillerden görüleceği üzere tasarımı yapılan robot kol 4 döner eklemden meydana gelmiştir.

3.1.2 Motorlar

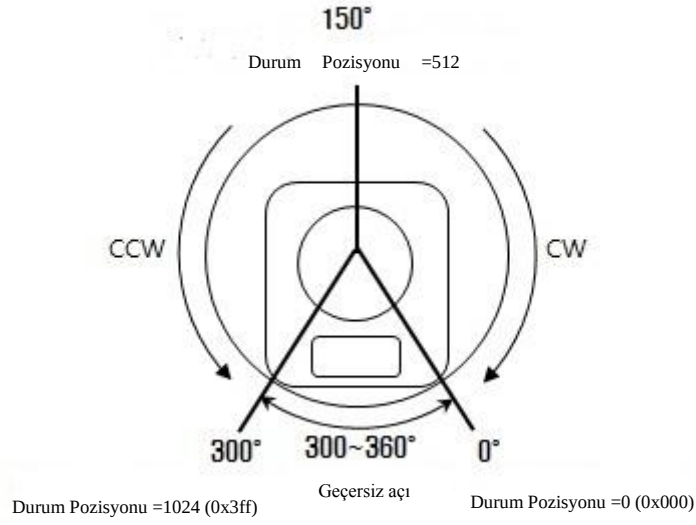
Robot için kullanılan motorlar Dynamixel 24F ve RX28 motorlardır. Bu motorlar üzerinde redüktör, kontrol kartı, sürücü ve network barındırmaktadır. Bu motorlardan toplamda 4 adet kullanılacaktır. Motorların özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Ağırlık: 67 gr
- Boyutlar: 35.6 mm x 50.6 mm x 35.5 mm
- Çözünürlük: 0.29°
- Redüktör küçültme oranı: 193 : 1
- Tork: 2.6 Nm (at 12V, 2.4A)
- Yüksüz hız: 126 rpm (at 12V)
- Çalışma açısı: 0° - 300°
- Çalışma sıcaklığı: -5°C - +80°C
- Gerilim: 9V – 12V (Önerilen gerilim 11.1 V)
- Komut sinyali: Dijital paket
- Protokol tipi: RS485 asenkron seri iletişim (8 bit, 1 stop, No Parity)
- Link (fiziksel): RS485
- ID: 254 ID (0 - 253)
- İletişim hızı: 7843 bps – 1 Mbps
- Geri besleme: Pozisyon, sıcaklık, yük, giriş voltajı, vb.
- Malzeme: Full metal dişli, plastik gövde
- Standby akımı: 50 ma



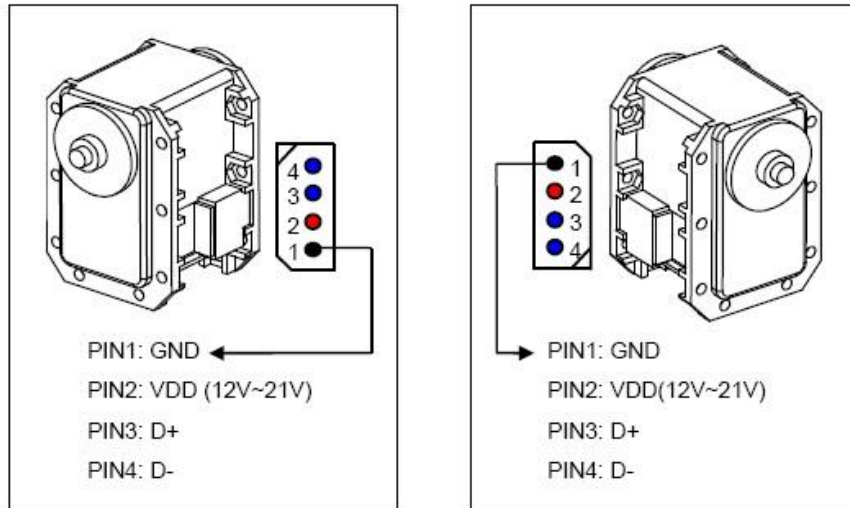
Şekil 3.7 Dynamixel RX 28/24F motor (Dynamixel RX28 / 24F user's manual, b.t.)

Şekil 3.8’de motorların dönüş açıları gösterilmiştir. Motorlar 0° ile 300° arasında hareketlerini gerçekleştirirler.

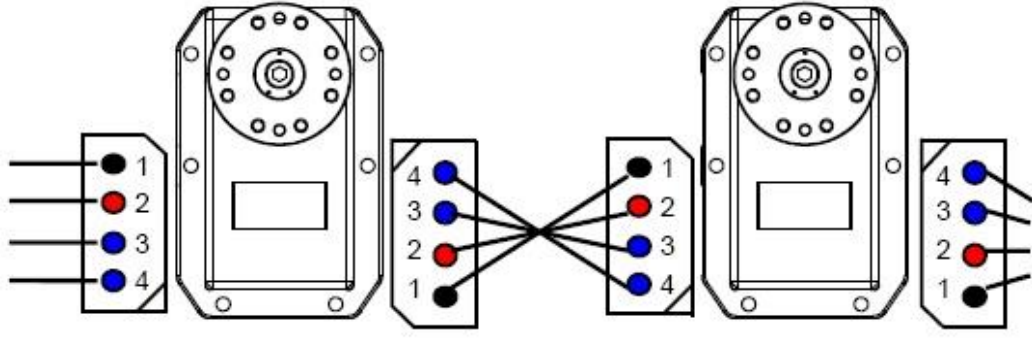


Şekil 3.8 Motor dönüş açıları (Dynamixel RX28 / 24F user’s manual, b.t.)

Motora ait pinlerin ne anlama geldiği ve motorların birbirleriyle seri bağlantısı Şekil 3.9’da görülmektedir. 1 numaralı pin groundu, 2 numaralı pin pozitif voltajı, 3 numaralı pin data iletimini ve 4 numaralı pin de data alımını ifade eder.



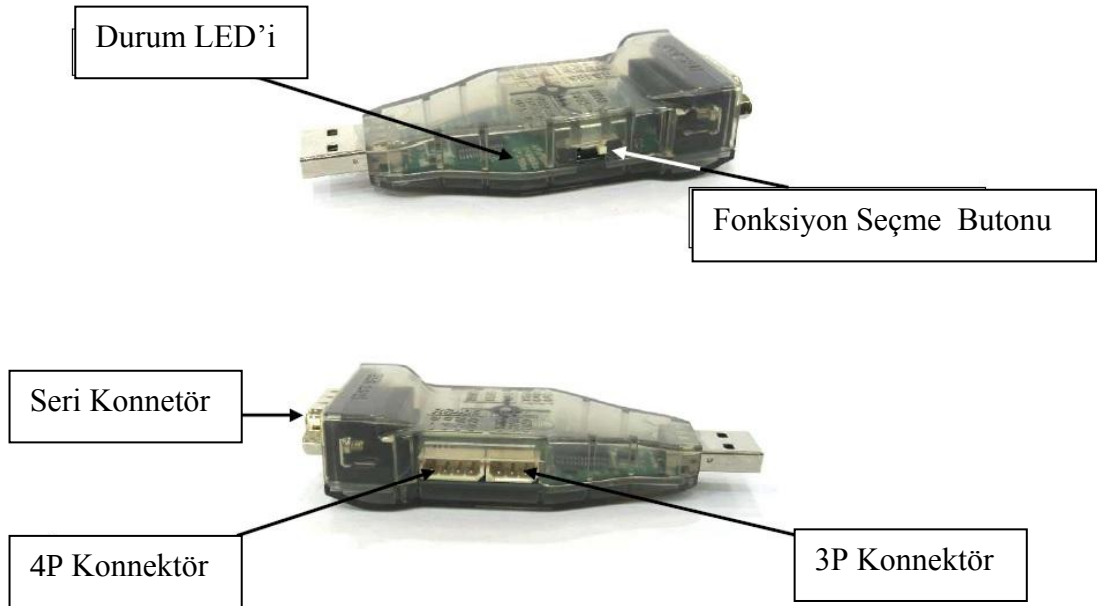
Şekil 3.9 Dynamixel RX 28/24F pin açıklamaları (Dynamixel RX28 / 24F user’s manual, b.t.)



Şekil 3.10 Dynamixel 24F / RX28 pin bağlantıları (Dynamixel RX28 / 24F user's manual, b.t.)

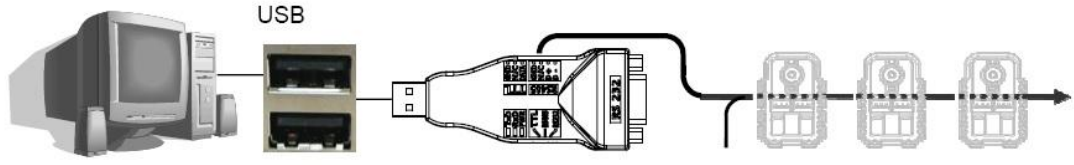
3.1.3 Kontrol Kartı (USB2Dynamixel)

USB2Dynamixel cihazı dynamixel motorları bilgisayar üzerinden sürmek için kullanılır. Bu cihaz usb port ile bilgisayara bağlanır ve motorun tipine göre 4p veya 3p ile motorlara bağlanır.



Şekil 3.11 USB2Dynamixel (Usb2dynamixel user's manual, b.t.)

Şekil 3.12'de bilgisayar, USB2Dynamixel ve dynamixel 24F motorların birbiriyle bağlantı şekli görülmektedir.



Şekil 3.12 Bilgisayar, USB2Dynamixel, dynamixel motor bağlantısı (Usb2dynamixel user's manual, b.t.)

3.2 Matlab Yazılımı

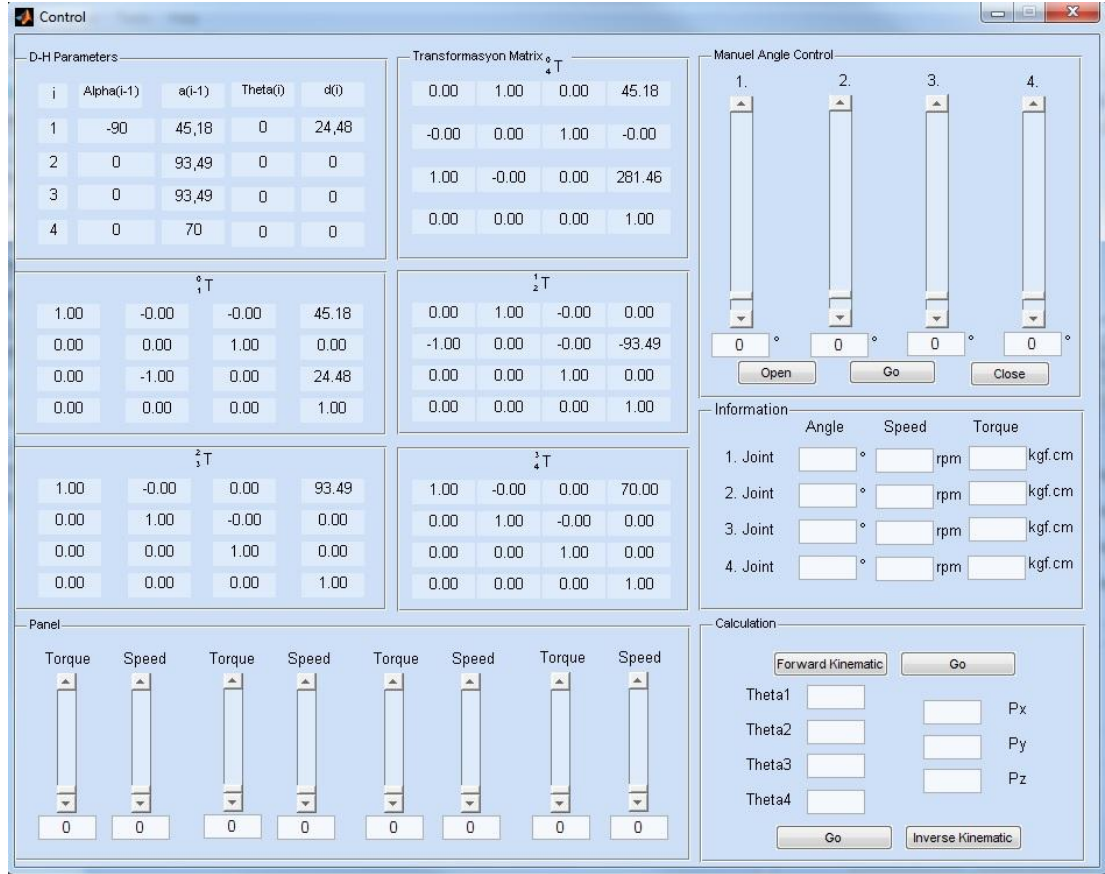
Matlab yazılımı, GUI tasarımı ve simulink model olarak iki kısımdan oluşmaktadır.

3.2.1 GUI Tasarımı

Graphical User İnterface (GUI) matlab programının modüllerinden biridir ve kullanıcıya görsel bir arayüz tasarlama imkanı vermektedir. Amaca uygun olarak tasarlanan arayüz programından seri porttan veri gönderimi, veri alımı, açılan figure pencerelerinin içerisindeki şekilleri değiştirme gibi işlemler gerçekleştirilebilmektedir.

Bu çalışmada tasarımı yapılan GUI ile robot manipülatörün motorlarına data gönderimi ve simulinkteki 3D robot manipülatör görüntüsünün hareket ettirilmesi işlemleri gerçekleştirilir.

GUI kendi içerisinde kinematik hesaplamaları yaparak bulunan sonuçlara göre kullanıcının ekran üzerinde Denavit-Hartenberg parametrelerini, eklemler arasındaki ve ana transformasyon matrisinin değerlerini görmemizi sağlar. Şekil 3.13'te tasarımı yapılan GUI görülmektedir.

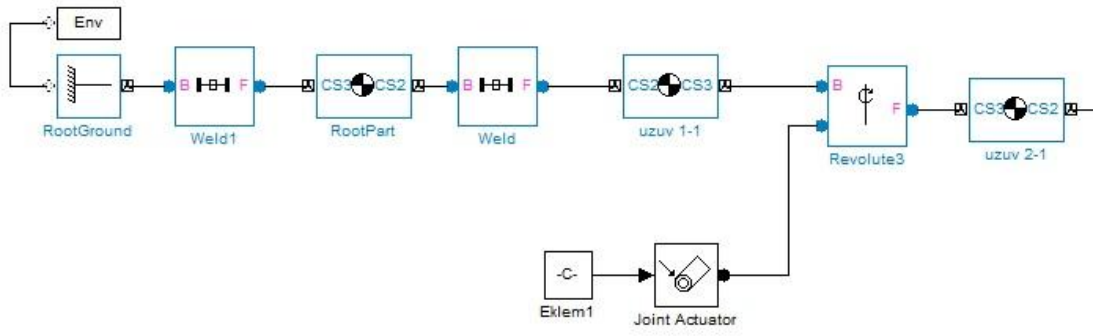


Şekil 3.13 Matlab'ta tasarımı yapılan arayüz programı

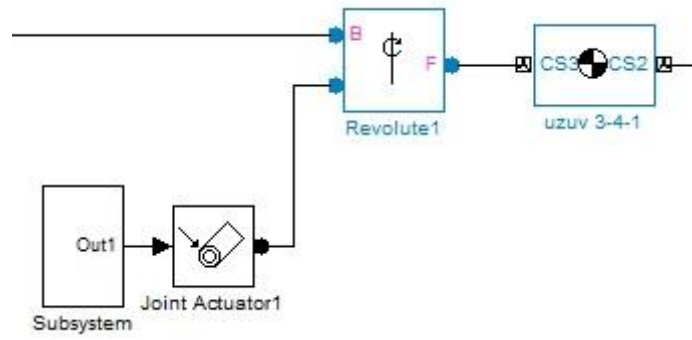
3.2.2 Simulink Model

Tasarımını yaptığımız robot manipülatörün simulasyonunu oluşturabilmek için CAD modelimizi MATLAB ortamına almamız gerekmektedir. Bu işlemi gerçekleştirebilmek için SimMechanics paketini kullanacağız. SimMechanics, CAD modelini Matlab içerisine alarak matematiksel modeli oluşturmamızı sağlamaktadır. Oluşturulan simulink modelde gerekli parametreler değiştirilerek robotun hareketi kontrol edilmektedir (Arifoğlu, 2004).

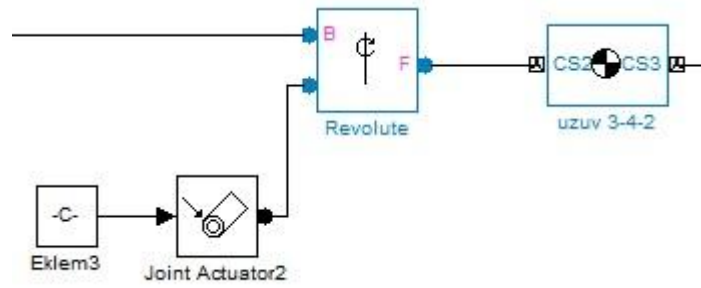
Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17 sırasıyla robot manipülatöre ait her bir eklem-uzuv çiftinin simulink modelini göstermektedir. Şekillerde revolute ismiyle gösterilen kutucuklar döner mafsallı ifade etmektedir. Joint actuator ismiyle gösterilen kutucuklar ise döner mafsallı döndüren motoru ifade etmektedir. C harfi yazan kutucuklar ise motora gireceğimiz açı değerini yazacağımız kutucuklardır.



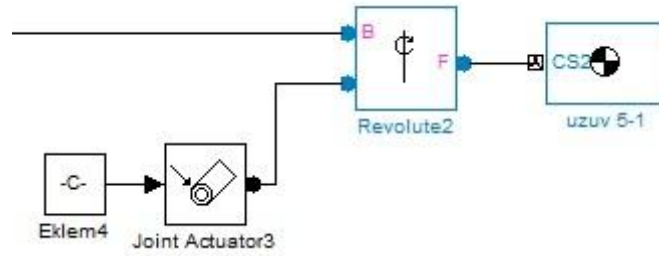
Şekil 3.14 Eklem 1 simulink modeli



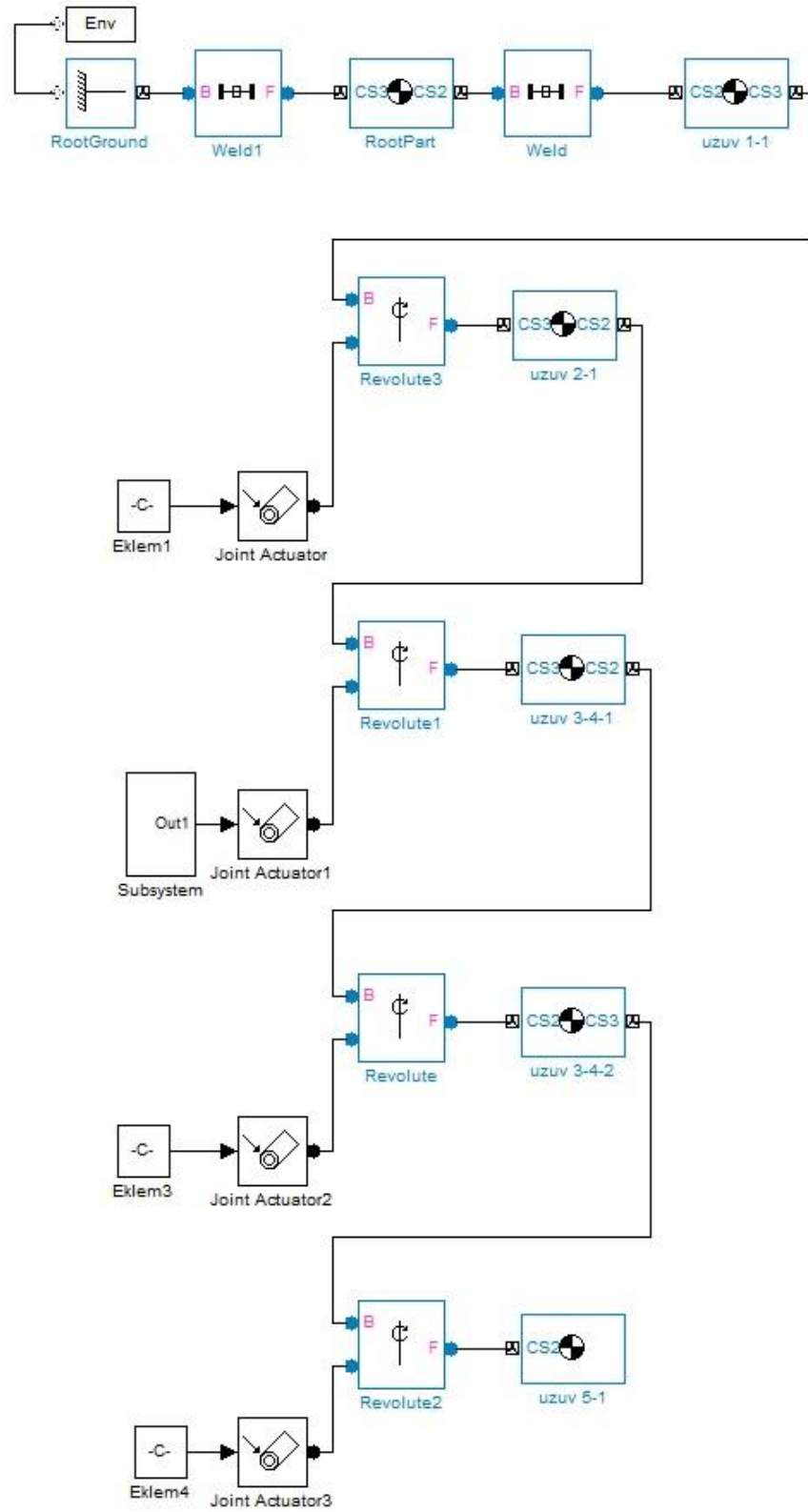
Şekil 3.15 Eklem 2 simulink modeli



Şekil 3.16 Eklem 3 simulink modeli

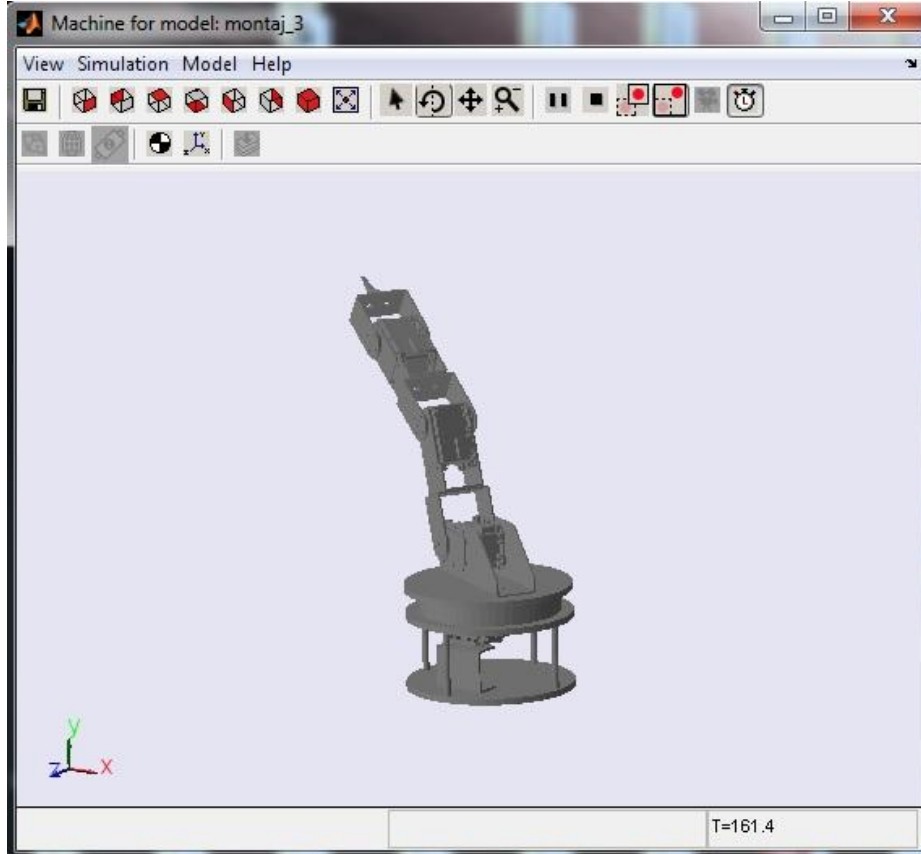


Şekil 3.17 Eklem 4 simulink modeli



Şekil 3.18 Robotun simulink modeli

Şekil 3.18’de robot manipülatöre ait oluşturulan simulink model görülmektedir. Bu model çalıştırıldığında şekil 3.19’deki 3D görüntü elde edilir. Robot kolu hareket ettirmek için simulink modelde görülen eklem değişkenleri değiştirilir.



Şekil 3.19 Matlab simulinkte çalıştırılan robot kol

3.3 Kinematik

Kinematik, Denavit – Hartenberg parametreleri, dönüşüm matrisleri, ileri kinematik ve ters kinematik kısımlarından oluşmaktadır.

3.3.1 Denavit – Hartenberg Parametreleri ve Dönüşüm Matrisleri

Tasarımı yapılan robot manipülatöre ait Denavit – Hartenberg parametreleri Tablo 3.1’de görülmektedir.

Tablo 3.1 D-H parametreleri

Eklem	$\alpha(i-1)$	$a(i-1)$	$\Theta(i)$	$d(i)$
1	-90	45,183	Θ_1	24,437
2	0	93,49	Θ_2	0
3	0	93,49	Θ_3	0
4	0	70	Θ_4	0

Bu parametrelere bağılı olarak (2.7) genel dönüşüm matrisi kullanılarak her bir eklem için yazılan transformasyon matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$${}^0_1A = \begin{bmatrix} \cos\Theta_1 & 0 & \sin\Theta_1 & 45,183*\cos\Theta_1 \\ \sin\Theta_1 & 0 & -\cos\Theta_1 & 45,183*\sin\Theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 24,437 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$${}^1_2A = \begin{bmatrix} \cos\Theta_2 & -\sin\Theta_2 & 0 & 93,49*\cos\Theta_2 \\ \sin\Theta_2 & \cos\Theta_2 & 0 & 93,49*\sin\Theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$${}^2_3A = \begin{bmatrix} \cos\Theta_3 & -\sin\Theta_3 & 0 & 93,49*\cos\Theta_3 \\ \sin\Theta_3 & \cos\Theta_3 & 0 & 93,49*\sin\Theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^3_4A = \begin{bmatrix} \cos\Theta_4 & -\sin\Theta_4 & 0 & 70*\cos\Theta_4 \\ \sin\Theta_4 & \cos\Theta_4 & 0 & 70*\sin\Theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Her bir eklem için ayrı ayrı elde edilen dönüşüm matrisleri sırayla birbirleriyle çarpılarak homojen transformasyon matrisi elde edilir. Bu matris robot manipülatörün ana eksenine ile robot manipülatörün uç işlevcisi arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade eder. Robot manipülatöre ait homojen transformasyon matrisi (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4)'teki matrislerin sırasıyla birbiriyle çarpılmasıyla elde edilir.

$${}^0_4A = {}^0_1A {}^1_2A {}^2_3A {}^3_4A \quad (3.5)$$

$$s_1 = \sin(\theta_1) \quad (3.6)$$

$$c_1 = \cos(\theta_1) \quad (3.7)$$

$$s_{2-90} = \sin(\theta_2 - 90) \quad (3.8)$$

$$c_{2-90} = \cos(\theta_2 - 90) \quad (3.9)$$

(3.5)'te elde edilen matrise (3.6), (3.7), (3.8) ve (3.9)'daki kısaltmaları uygularsak (3.10)'daki matrisi elde ederiz.

$${}^0_4A = \begin{bmatrix} -c_4s_{2-90}c_1s_3 - c_{2-90}c_1c_3 - s_4c_{2-90}c_1s_3 + s_{2-90}c_1c_3 & s_4s_{2-90}c_1s_3 - c_{2-90}c_1c_3 - c_4c_{2-90}c_1s_3 + s_{2-90}c_1c_3 & -s_1 & P_x \\ -c_4s_{2-90}s_1s_3 - c_{2-90}s_1c_3 - s_4c_{2-90}s_1s_3 + s_{2-90}s_1c_3 & s_4s_{2-90}s_1s_3 - c_{2-90}s_1c_3 - c_4c_{2-90}s_1s_3 + s_{2-90}s_1c_3 & c_1 & P_y \\ -s_4c_{2-90}c_3 - s_{2-90}s_3 - c_4c_{2-90}s_3 + s_{2-90}c_3 & s_4c_{2-90}s_3 + s_{2-90}c_3 - c_4c_{2-90}c_3 - s_{2-90}s_3 & 0 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Aşağıda robot manipülatöre ait Px, Py ve Pz noktalarının denklemleri gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} P_x &= a_1c_1 + a_2c_{2-90}c_1 - a_4c_4(s_{2-90}c_1s_3 - c_{2-90}c_1c_3) - a_4s_4(c_{2-90}c_1s_3 + s_{2-90}c_1c_3) + a_3c_{2-90}c_1c_3 - a_3s_{2-90}c_1s_3 \\ P_y &= a_1s_1 + a_2c_{2-90}s_1 - a_4c_4(s_{2-90}s_1s_3 - c_{2-90}s_1c_3) - a_4s_4(c_{2-90}s_1s_3 + s_{2-90}s_1c_3) + a_3c_{2-90}s_1c_3 - a_3s_{2-90}s_1s_3 \\ P_z &= d_1 - a_2s_{2-90} - a_4c_4(c_{2-90}s_3 + s_{2-90}c_3) - a_4s_4(c_{2-90}c_3 - s_{2-90}s_3) - a_3c_{2-90}s_3 - a_3s_{2-90}c_3 \end{aligned} \quad (3.11)$$

3.3.2 İleri ve Ters Kinematik

Transformasyon matrisinin 4. sütunu robot kolun uç işlevcisinin kartezyen koordinatlardaki (x, y, z) konumunu verir. Bu matris kullanılarak ileri kinematik ve ters kinematik çözümler elde edilir.

Verilen herhangi açı değerleri yukarıdaki denklemlerde yerine yerleştirildiğinde x, y ve z değerleri elde edilir. Bu durum robota ait ileri kinematik çözümü ifade eder.

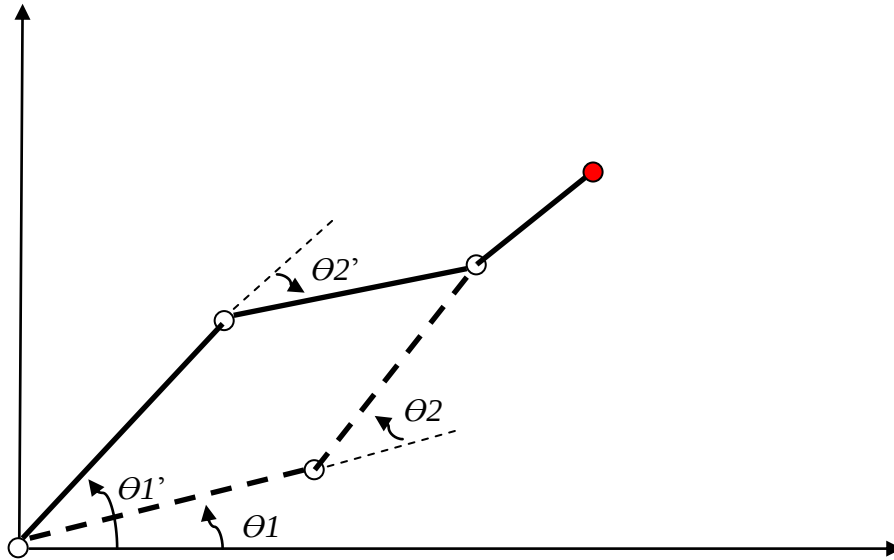
P_x, P_y, P_z değerleri verilerek robot manipülatöre ait her bir mafsalin açı değeri bulunabilir. Bu ters kinematik çözümü elde etmek için (3.5) eşitliğinden faydalanılır.

$${}^0_1A^{-1} {}^0_4A = {}^1_2A {}^2_3A {}^3_4A \quad (3.12)$$

$${}^1_2A^{-1} {}^0_1A^{-1} {}^0_4A = {}^2_3A {}^3_4A \quad (3.13)$$

$${}^2_3A^{-1} {}^1_2A^{-1} {}^0_1A^{-1} {}^0_4A = {}^3_4A \quad (3.14)$$

Yukarıdaki matris eşitlikleri kullanılarak yapılan çözümlerde robot kolun açılmasına ait birden fazla çözüm kümesi bulunur. Kısaca robot aynı noktaya gitmek için Şekil 3.20'deki gibi farklı eklem açılarında bulunabilir.



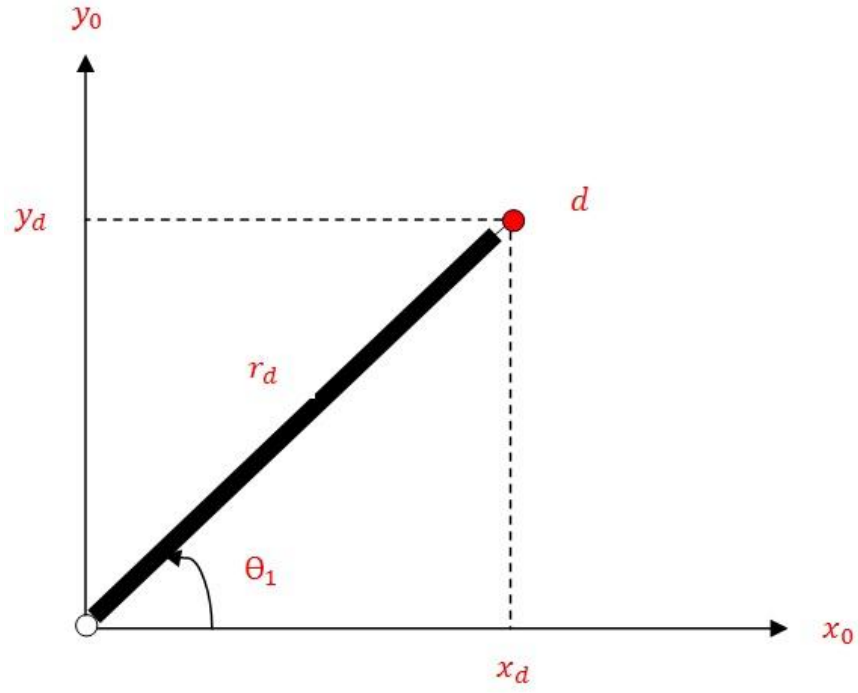
Şekil 3.20 Robot kol farklı eklem açıları

Robot manipülatöre ait dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$${}_{\text{uç}}^{\text{temel}}T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Buradaki matrisin ilk 3x3 lük bölümü yönelimi ifade eder. Bu yönelimden faydalanarak robot manipülatöre ait geometrik çözüm aşağıdaki gibi elde edilir.

Robot kolun xy düzlemindeki hareketi sadece 1. eklemin açısıyla sağlanmaktadır. Bu eklem değişkeni θ_1 ile ifade edilirse θ_1 'e ait denklem Şekil 3.21 vasıtasıyla yazılır.

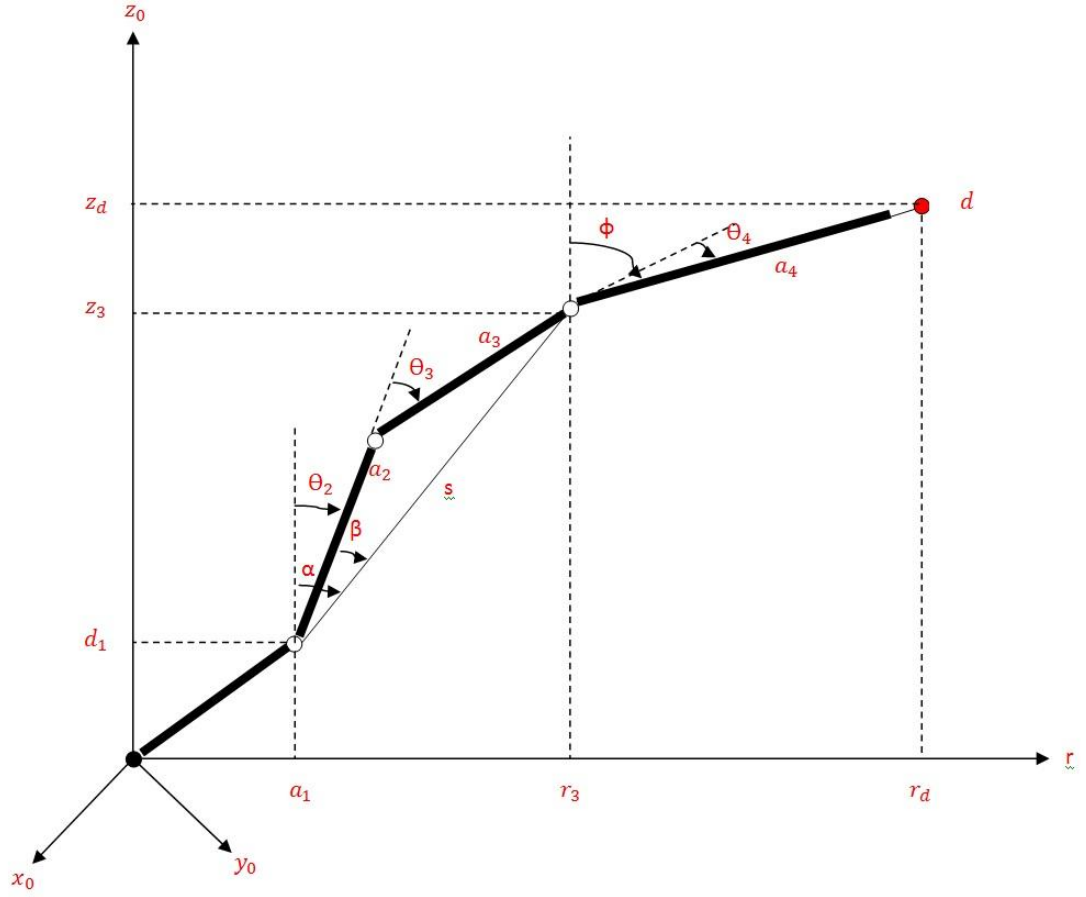


Şekil 3.21 Robot kol xy düzlemindeki görünüş

$$\theta_1 = \text{atan}(y_d, x_d) \quad (3.16)$$

$$r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \quad (3.17)$$

θ_1 açısı elde edildikten sonra θ_2 , θ_3 ve θ_4 açıları Şekil 3.22'den yararlanılarak elde edilir.



Şekil 3.22 Robot kol zır düzlemindeki görünüş

$$\varphi = \Theta_2 + \Theta_3 + \Theta_4 \quad (3.18)$$

$$\varphi = \text{atan}(c_1 a_x + s_1 a_y, a_z) \quad (3.19)$$

$$r_3 = r_d - a_4 \sin(\varphi) \quad (3.20)$$

$$z_3 = z_d - a_4 \cos(\varphi) \quad (3.21)$$

$$s = \sqrt{(r_3 - a_1)^2 + (z_3 - d_1)^2} \quad (3.22)$$

$$\alpha = \text{atan}(r_3 - a_1, z_3 - d_1) \quad (3.23)$$

$$\beta = \text{acos}((s^2 + a_2^2 - a_3^2) / 2sa_2) \quad (3.24)$$

$$\Theta_2 = \alpha \mp \beta \quad (3.25)$$

$$\Theta_3 = \text{acos}((s^2 - a_2^2 - a_3^2) / 2a_2a_3) \quad (3.26)$$

$$\Theta_4 = \varphi - \Theta_2 - \Theta_3 \quad (3.27)$$

Elde edilen denklemler vasıtasıyla kartezyen koordinatlarda verilen x , y ve z noktasına robot manipulatörünün hareket edebilmesi için gerekli açı değerleri elde edilir. Bu çözüm ters kinematik çözümü ifade eder.

İleri kinematik çözüm aynı geometriden yararlanılarak robot kola ait uzuv uzunlukları ve açı değerleri kullanılarak hesaplanır.

$$z_d = d_1 + (a_2 \cos \Theta_2) + (a_3 \cos(\Theta_2 + \Theta_3)) + (a_4 \cos(\Theta_2 + \Theta_3 + \Theta_4)) \quad (3.28)$$

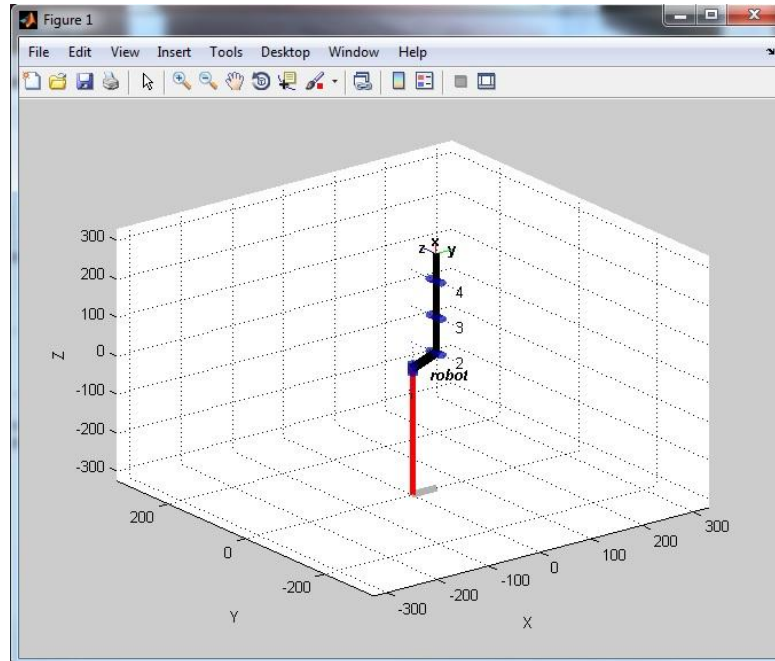
$$r_d = a_1 + (a_2 \sin \Theta_2) + (a_3 \sin(\Theta_2 + \Theta_3)) + (a_4 \sin(\Theta_2 + \Theta_3 + \Theta_4)) \quad (3.29)$$

$$x_d = P_r \cos \Theta_1 \quad (3.30)$$

$$y_d = P_r \sin \Theta_1 \quad (3.31)$$

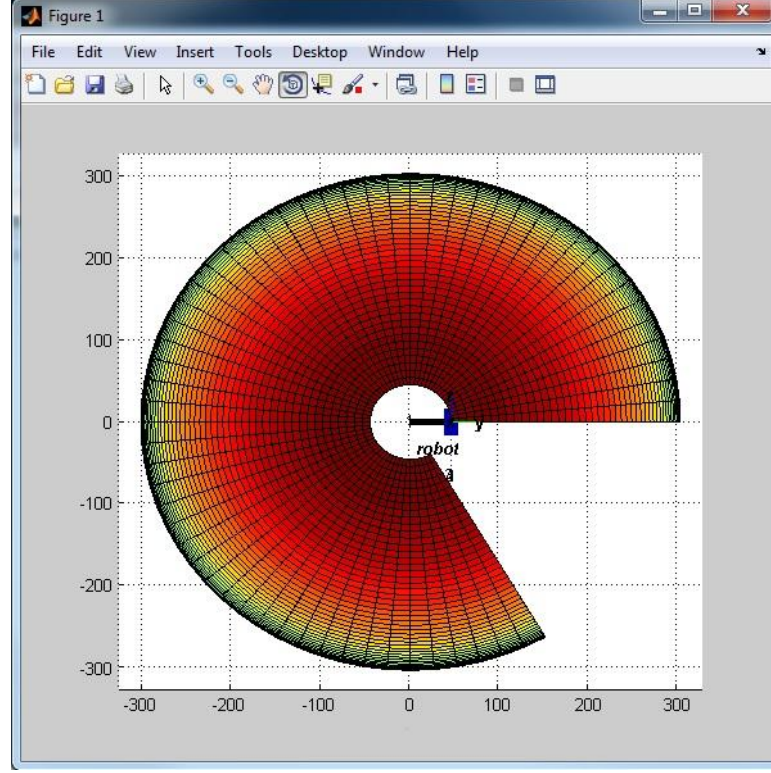
3.4 Çalışma Uzayı

Çalışma uzayı, robot kola ait uç işlevcisinin bulunduğu konumda ulaşabildiği noktaların kümesidir. Tasarımı yapılan robot kola ait çalışma uzayı ve değerleri Şekil 3.23, Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26 de verilmiştir.

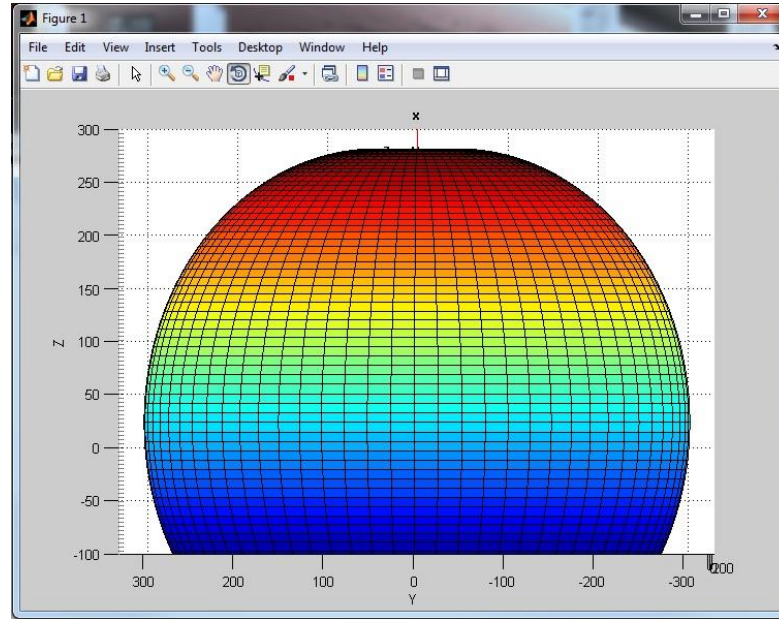


Şekil 3.23 Robot kol 0 konumu

Robot manipölatorün 1. eklemi 0° ile 300° arasında hareketini gerçekleřtirebilmektedir.

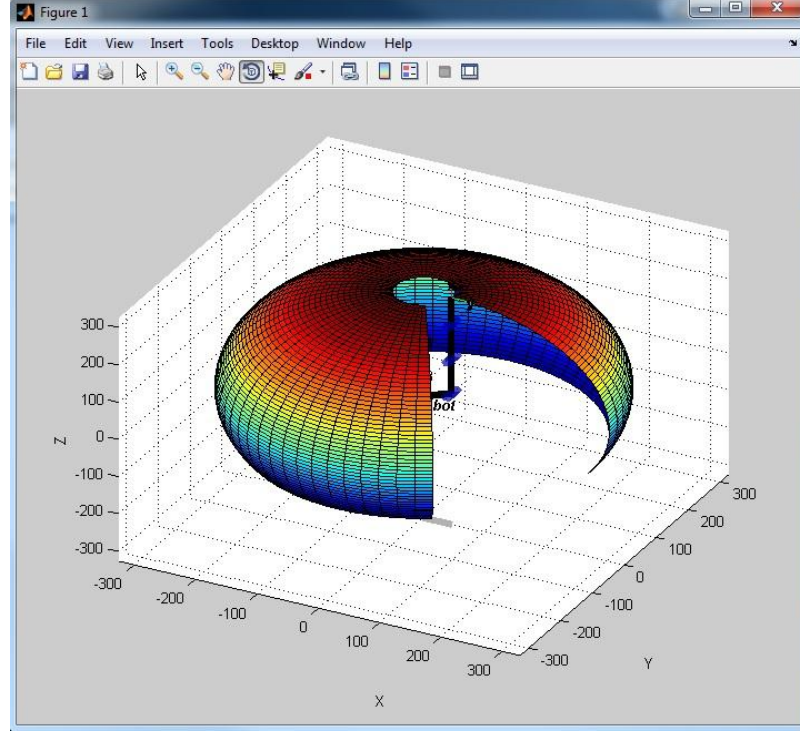


şekil 3.24 çalışma uzayı xy dözlemi



şekil 3.25 çalışma uzayı zy dözlemi

Robot manipölator x ve y ekseninde maksimum 300 mm, z ekseninde ise maksimum 280 mm noktasına gidebilmektedir.



Şekil 3.26 Çalışma uzayı perspektif görünüş

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 İleri Kinematik

Robot manipülatöre ait eklem açılarına farklı değerler verilerek daha önce bulunan dönüşüm matrisi kullanılarak elde edilen x, y, z değerleri ile matlab robotic toolboxtan elde edilen x, y ve z değerleri karşılaştırılacaktır. Eklemlere açı değerleri uygulanarak kolun o noktaya gitmesi sağlanacaktır (Arifoğlu, 2004), (Corke, 2004), (Corke, 2008).

$$\underline{\Theta 1 = 7^\circ, \Theta 2 = -36^\circ, \Theta 3 = 114^\circ, \Theta 4 = 12^\circ \text{ için}}$$

```
>> %uzuv1
alfa1 = -pi/2;
a1 = 45.18;
d1 = 24.48;
%uzuv2
a2 = 93.490;
%uzuv3
a3 = 93.490;
%uzuv4
a4 = 70;
theta1 = 7*(pi/180);
theta2 = -36*(pi/180);
theta3 = 114*(pi/180);
theta4 = 12*(pi/180);
%Transformasyon matrix
T10 = troz(theta1)*transl(0,0,d1)*transl(a1,0,0)*trotx(alfa1);
T21 = troz(theta2-(pi/2))*transl(a2,0,0);
T32 = troz(theta3)*transl(a3,0,0);
T43 = troz(theta4)*transl(a4,0,0);
```

$$T = T_{10} * T_{21} * T_{32} * T_{43}$$

$$T =$$

$$\begin{bmatrix} 0.9925 & -0.0000 & -0.1219 & 150.5444 \\ 0.1219 & 0.0000 & 0.9925 & 18.4845 \\ -0.0000 & -1.0000 & 0.0000 & 119.5527 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Yukarıdaki işlem sonucunda görüleceği üzere dönüşüm matrisinin 4. sütununda $x=150.544$, $y=18.4845$ ve $z=119.5527$ olarak bulunmuştur.

Aşağıda matlab robotic toolboxın fkine (forward kinematic) fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonuç görülmektedir (Arifoğlu, 2004), (Corke, 2004), (Corke, 2008).

```
>> %uzuv1
alfa1 = -pi/2;
a1 = 45.18;
d1 = 24.48;
%uzuv2
a2 = 93.490;
%uzuv3
a3 = 93.490;
%uzuv4
a4 = 70;
theta1 = 0;
theta2 = 0;
theta3 = 0;
theta4 = 0;
%Model
%      alfa    a    theta    d
L1 = link([-pi/2    a1    theta1    d1    0], 'standard');
```

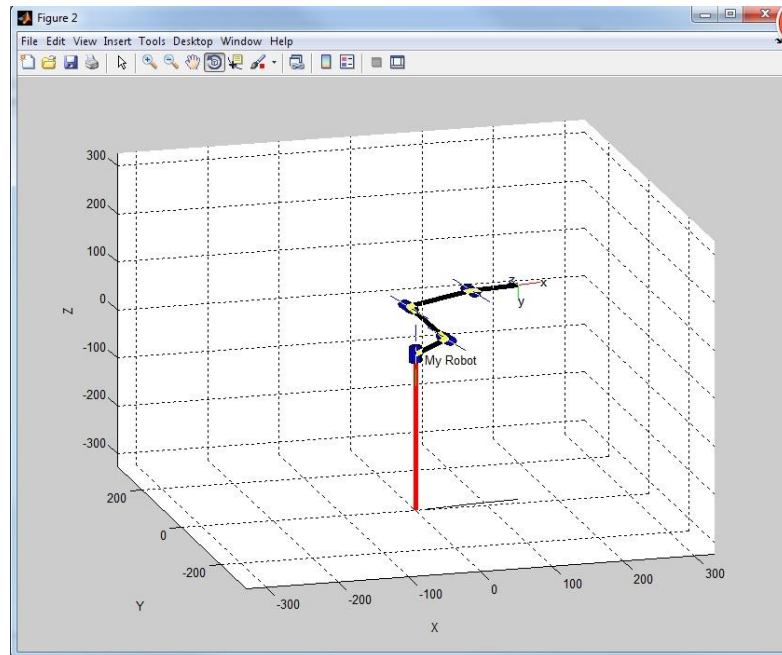
```

L2 = link([ 0    a2    theta2    0    0], 'standard');
L3 = link([ 0    a3    theta3    0    0], 'standard');
L4 = link([ 0    a4    theta4    0    0], 'standard');
L2.offset=-pi/2;
Robot_1 = robot({L1,L2,L3,L4});
q_yeni=[7 -36 114 12]*pi/180;
T_yeni=fkine(Robot_1,q_yeni)
T_yeni =
    0.9925    0.0000   -0.1219   150.5444
    0.1219    0.0000    0.9925    18.4845
    0.0000   -1.0000    0.0000   119.5527
    0         0         0         1.0000

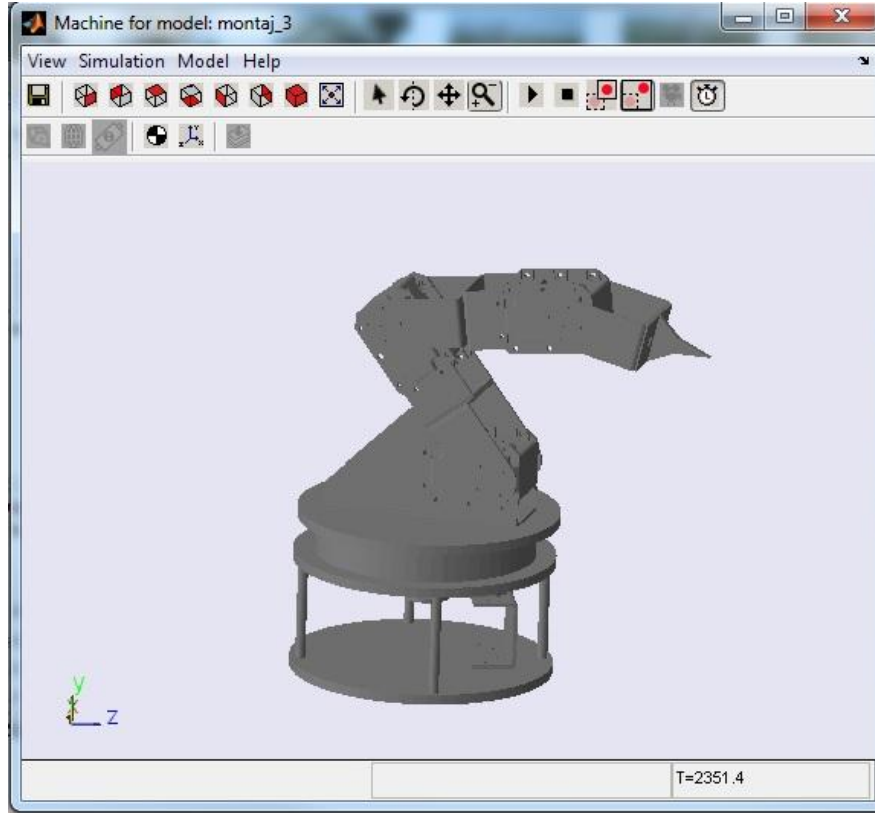
```

Elde edilen kartezyen koordinat değerleri $x=150.5444$, $y=18.4845$ ve $z=119.5527$ 'dir.

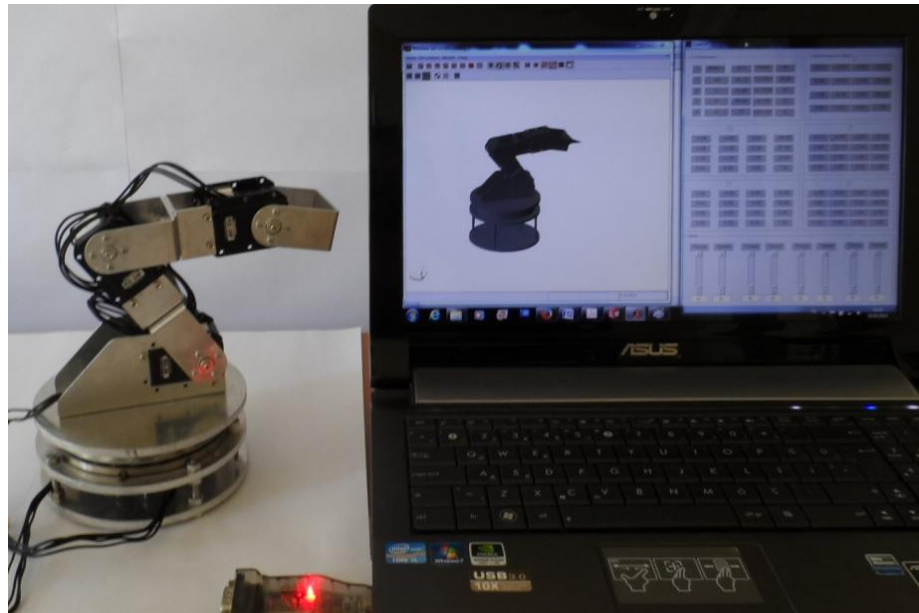
Değerlerden görüleceği üzere çözümler birbirine eşittir. Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te robot manipulatörün bu noktada alacağı konum şekli görülmektedir.



Şekil 4.1 Robot kol çubuk model pozisyonu



Şekil 4.2 Robot kol cad model pozisyonu



Şekil 4.3 Robot kol gerçek pozisyonu

4.2 Ters Kinematik

Robot uç işlevcisinin verilen x , y ve z değerleri için eklem açılarının değerleri geometrik çözümden elde edilir. Robot manipülatör uç işlevcisi için aşağıda verilen x , y ve z değerleri için sırayla geometrik çözüm uygulanıp her bir ekleme ait açılar hesaplanacaktır.

Tablo 4.1 Noktaların kartezyen koordinatları

	x	y	z
1	200	50	120
2	200	175	120
3	200	175	0
4	200	50	0
5	200	50	120

Tablo 4.1'deki x , y ve z değerleri geometrik çözüm yöntemi ile bulunan denklemlerde yerine yerleştirilerek eklem açıları hesaplanır. Bu açıları hesaplamak için MATLAB programından yararlanılmıştır. Aşağıda 1. nokta için yazılan program kodları görülmektedir.

```
w123 = [T(1,4) T(2,4) T(3,4)];  
w456 = [T(1,3) T(2,3) T(3,3)];  
q1 = atan2(w123(2), w123(1));  
rd=sqrt(w123(1)^2+w123(2)^2);  
q234 = atan2(((cos(q1)* w456(1)) + sin(q1))* w456(2),w456(3));  
z3=T(3,4)-(a(4)*cos(q234));  
r3=rd-(a(4)*sin(q234));  
s=sqrt((r3-a(1))^2+(z3-d(1))^2);  
beta=acos(((s^2)+(a(2)^2)-(a(3)^2))/(2*s*a(2)));  
alfa=atan2(r3-a(1),z3-d(1));  
q2=alfa-beta;  
q3=acos((s^2-a(2)^2-a(3)^2)/(2*a(2)*a(3)));
```

```

q4=q234-q2-q3;
q = [q1 q2 q3 q4];
plot(Robot_1, q)
q11=[q1 q2 q3 q4]*180/pi

```

Aşağıdaki program kodları her bir noktaya uygulandığında her bir eklem için bulunan açılar (ters kinematik) gösterilmiştir.

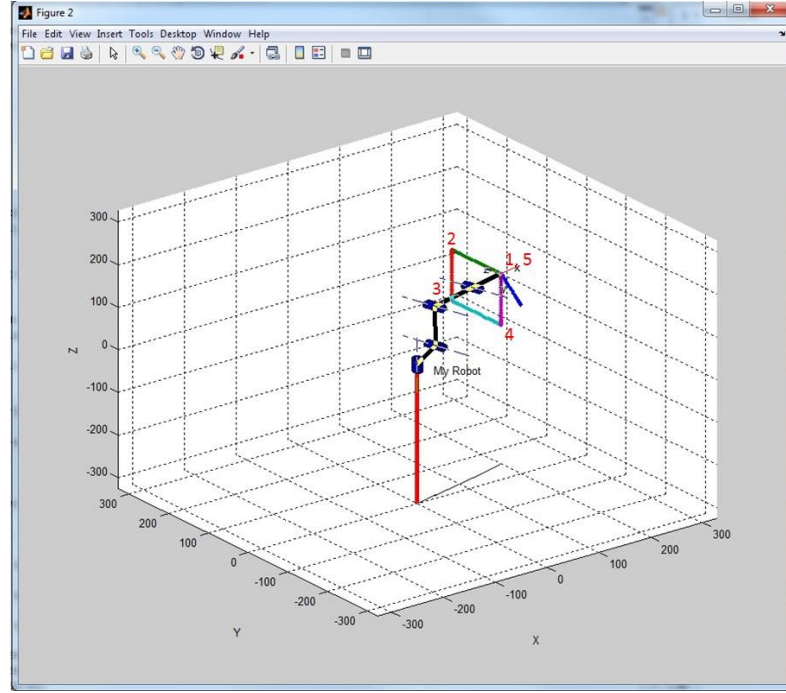
```

>> q11
q11=
    14.0281  -1.5323  90.2860   1.2462
>> q22
q22=
    41.1737  40.0484  35.1061  14.8455
>> q33
q33 =
    41.1859  63.8744  70.6661 -44.5405
>> q44
q44 =
    14.0565  45.3196 119.4764 -74.7960
>> q55
q55=
    14.0362  -1.5283  90.3081   1.2203

```

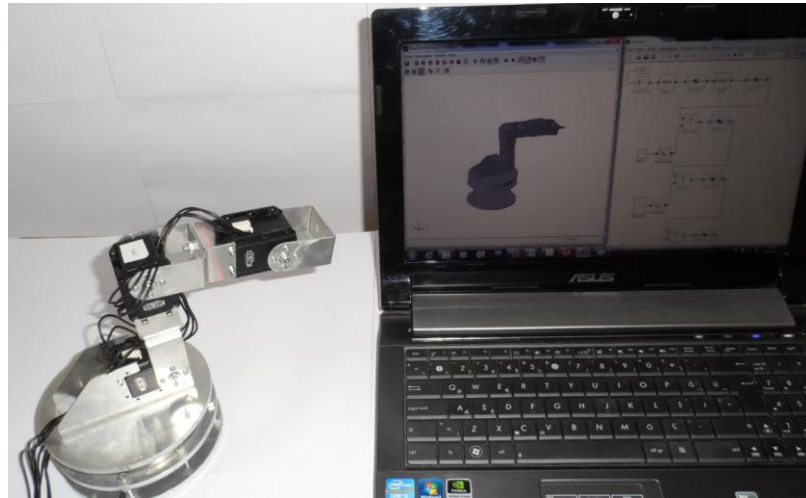
Burada 1. ve 5. noktalara dikkat edilmesi gerekmektedir. Noktaların değerleri aynı olmasına rağmen bulunan açı değerleri % 1-2 oranında birbirinden farklılık göstermektedir. Bu durum işlevcinin o noktaya giderken hangi doğrultuyu kullandığından kaynaklanmaktadır. Açı değerleri bulunurken bir önceki noktanın dönüşüm matrisi değerleri kullanılmaktadır. Her bir nokta için dönüşüm matrisi değerleri birbirinden farklı olduğundan dolayı farklı doğrultulardan gelindiğinde % 1-2 oranında hata payı meydana gelmektedir.

Şekil 4.4'te doğrultular ve noktalara ait açı değerleri kullanılarak uç işlevcinin izlediği yol görülmektedir. İzlediği yol sırasıyla 1 noktası, 2 noktası, 3 noktası, 4 noktası ve 5 noktasıdır.



Şekil 4.4 Uç işlevcinin noktadan noktaya izlediği yol

Robot manipülörün ve simulinkteki görüntünün ters kinematik neticesinde elde edilen açı değerlerini kullanarak eşit zamanlı çalışması Şekil 4.5'te 1. nokta için görülmektedir.



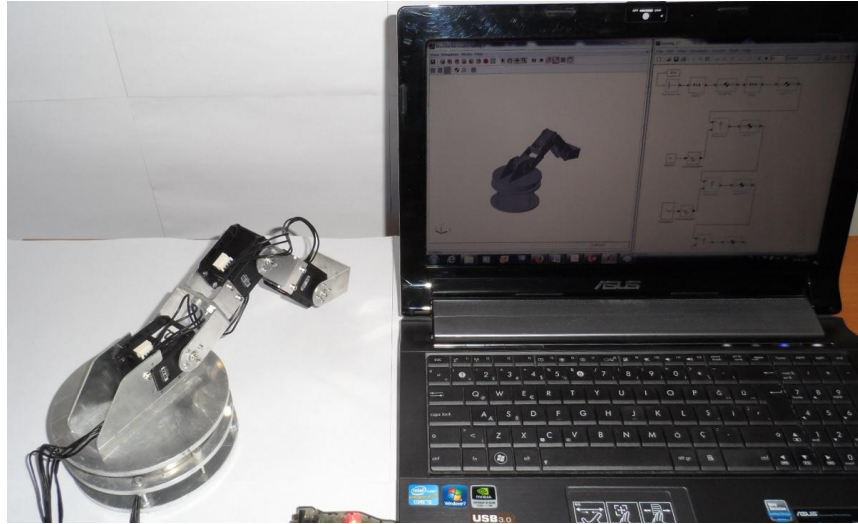
Şekil 4.5 Robot manipülör 1. nokta konumu

2. nokta için bulunan ters kinematik değerleri manipülatöre uygulandığında Şekil 4.6'daki konum elde edilir.



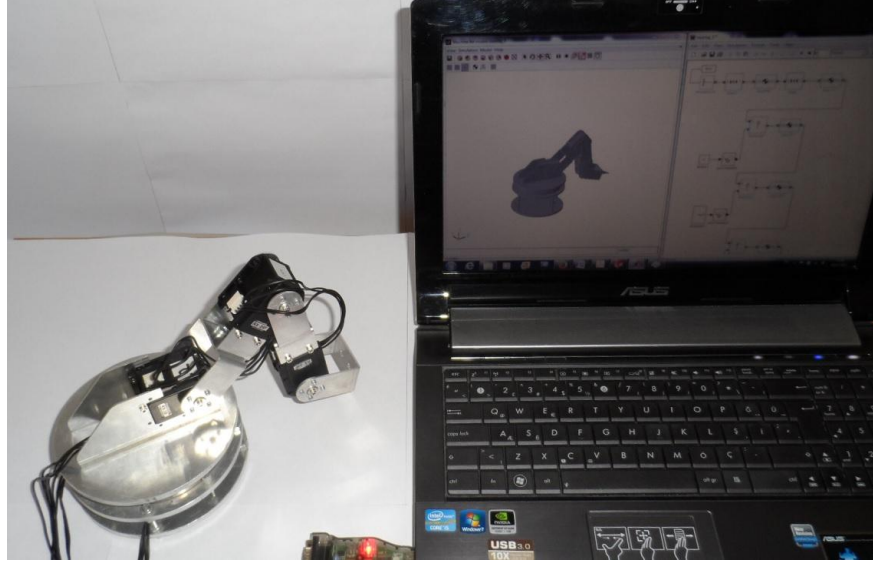
Şekil 4.6 Robot manipülatör 2. nokta konumu

Manipülatöre 3. noktanın ters kinematik değerleri uygulandığında Şekil 4.7'deki konum elde edilmektedir.



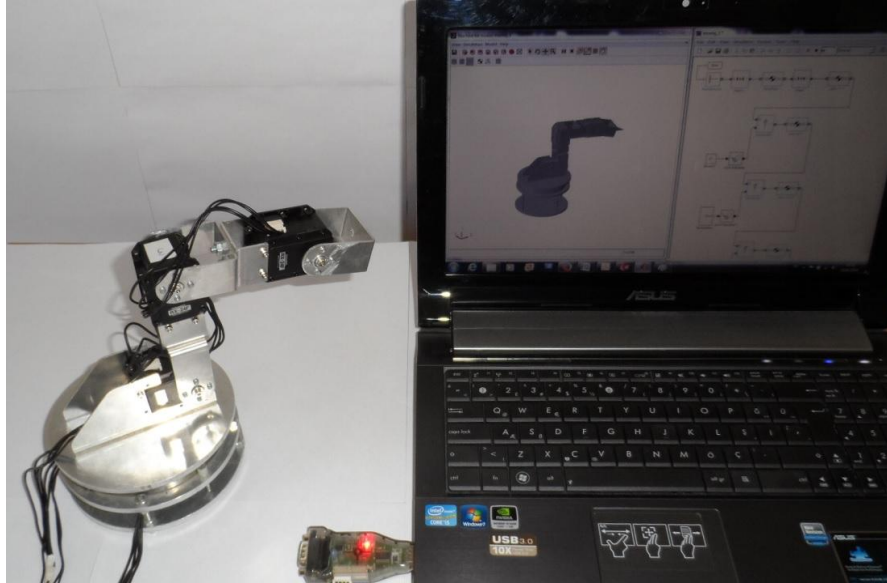
Şekil 4.7 Robot manipülatör 3. nokta konumu

4. noktaya ait ters kinematik değerleri robot manipülatöre uygulandığında Şekil 4.8'deki konum elde edilir.



Şekil 4.8 Robot manipölätör 4. nokta konumu

Şekil 4.9'daki konum manipölätöre ait 5. noktanın ters kinematik değeri ile elde edilir.



Şekil 4.9 Robot manipölätör 5. nokta konumu

4.3 Tekrarlanabilirlik

Robot manipülatöre ait önemli parametrelerden birisi tekrarlanabilirliktir. Şekil 4.10'da robot manipülatörün tekrarlanabilirlik kabiliyeti test edilirken çekilmiş fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.10 Robot manipülatör tekrarlanabilirlik testi

Robot manipülatöre ileri kinematik uygulanarak eklem açıları 10 defa değiştirilmiş ve sürekli aynı noktaya gitmesi sağlanmıştır.

Test sonucunda elde edilen noktalar 2 mm çaplı daire içinde kaldığı gözlenmiştir. Bu değer robot manipülatöre ait maksimum değerdir ve en geniş çalışma hacmini ifade eder. Daha küçük çalışma hacimlerinde tekrarlanabilirlik değerinin 1 mm'nin altında olduğu gözlenmiştir.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tezin amacı robot manipülatör ve 3D görüntünün hesaplanan ileri ve ters kinematik değerlerine bağlı olarak etkileşimli hareketinin en az hatayla gerçekleşmesi ve sonuçların analiz edilmesidir. Bu analizler sonucunda sistemin eğitim ve test sistemlerinde kullanılmak üzere geliştirilmesi mümkün olabilir.

Tasarımı yapılan robot manipülatör ve ekrandaki 3D simülasyon görüntüsü eş zamanlı olarak hareket etmekte ve konum kontrolü yapılmaktadır. Eklemlere verilen açı değerleriyle robotun uç işlevcisinin alacağı konum ve uç işlevcisinin gideceği konum değerleri verilerek eklem açılarının alacağı değerler hesaplanmaktadır.

CAD ortamında tasarımı yapılan robot manipülatör imal edilmiştir. Tasarım malzemesi olarak hafif olmasından dolayı alüminyum kullanılmıştır. Tasarımda kullanılan motorlar servo motorlar olup Dynamixel firmasının ürettiği RX28 ve RX24F kodlu bünyesinde bir çok sensör ve kontrol sistemi içeren yeni geliştirilmiş akıllı robot motorlardır. Dynamixel motorlar akıllı servo motor olarak adlandırılmaktadırlar. Klasik servo motorlardan farklı olarak üzerinde bir takım sensörler bulunmaktadır. Bu motorlarda tork ayarı, hız ayarı yapılabilmekte ve bu değerler anlık olarak okunabilmektedir.

CAD ortamındaki robot manipülatör hareket kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için MATLAB programına aktarılmıştır. Matlab programında Graphical User Interface (GUI) tasarımı yapılmıştır. GUI, her bir motorun açı, tork ve hız değerleri kontrol edilebilecek, motorların anlık açı, tork ve hız değerleri görülebilecek şekilde tasarlanmıştır. GUI kullanılarak aynı zamanda simulinkteki 3D görüntü de hareket ettirilmiştir. Hem 3D görüntünün hem de robot manipülatörün GUI aracılığıyla eş zamanlı hareketi sağlanarak konum kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Manipülatöre ait motorların sürülebilmesi için usb2dynamixel kontrol kartı kullanılmıştır. Usb2dynamixel, usb çıkışı bilgisayara, 4p veya 3p çıkışı da motorlara bağlanmaktadır. Motorların kontrolü GUI'den sağlandığı için MATLAB komutları kullanılarak RS-485 protokolü üzerinden veri gönderimi sağlanmıştır. Bu karta motorlar seri şekilde bağlanmaktadır.

Robot manipülatöre ait ileri kinematik ve ters kinematik hesaplamaları yapılmıştır. Bu değerler kullanıcı arayüzünde rahatlıkla görülmektedir ve kullanıcı tarafından etkileşimli olarak değiştirilebilmektedir. Hesaplamalar hem nümerik olarak hem de robotic toolbox kullanılarak yapılmıştır ve sonuç değerlerinin aynı olduğu görülmüştür. Bu hesaplamalar kullanılarak robot manipülatörün belirli bir yörünge izleyerek bu noktalara gitmesi sağlanmıştır. Manipülatör için hesaplanan ters kinematik değerleri o noktaya farklı doğrulardan gelmesine göre %1-2 oranında değişiklik göstermektedir. Bu durum hesaplamadan kaynaklanan hata payını ifade etmektedir.

Bu çalışmada üzerinde durulan nokta konum kontrolüdür. İleriki aşamalarda manipülatöre ait her bir eklem hız ve tork kontrolü üzerinde çalışılabilir. Robot manipülatörün yörünge planlanmasında bu parametreler kullanılarak daha hassas yörünge planlaması yapılabilir.

Endüstriyel alanda robot manipülatör herhangi bir yerde çalışırken yapmış olduğu hareketler simülasyon görüntüsünden izlenebilir, hatalar görülebilir. Herhangi bir arıza durumunda arızanın tipi, nerede olduğu, manipülatörün son pozisyonu vs. durumların bilgisi alınabilir.

Bu çalışmayla elde edilen bilgiler ve mekanik sistem robotik sistemlerin anlaşılması, olası problemlerin gözlenmesi ve çözüm yollarının geliştirilmesi amacıyla eğitim ve üretime giriş uygulamalarında, etkileşimli ve kullanıcı dostu yapısıyla kullanılabilir. Bu nedenle elde edilen sistemin bilgisayar destekli bir robot manipülatör seti olarak kullanımı planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Angeles, J. (2007). *Fundamentals of robotic mechanical systems* (3. Baskı). USA: Springer
- Arifoğlu, U. (2005). *Matlab simulink ve mühendislik uygulamaları*. İstanbul: Alfa Yayınları
- Asimov, I. (1950). *I robot*. New York: Doubleday ve Company
- Bingöl, Z. ve Küçük, S. (2005). *Robot tekniği -1*. İstanbul: Birsen Yayınevi
- Capek, K. (1920). *Rossum's universal robots*. Czech Republic
- Corke, P.I. (2004). *Robotics, vision and control*. Australia: Springer.
- Corke, P.I. (2008). *Robotic toolbox for Matlab*. 23 Ağustos 2013, http://petercorke.com/Robotics_Toolbox.html
- Craig, J.J. (2005). *Introduction to robotics, mechanics and control* (3. Baskı). USA: Pearson.
- Denavit, J. ve Hartenberg, R. S. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics*, 25, 215-221.
- Denavit, J. ve Hartenberg, R. S. (1964). *Kinematic synthesis of linkages*. USA: McGraw Hill.
- Dynamixel RX28 user's manual, (b.t.). 16 Eylül 2013, http://www.crustcrawler.com/motors/RX28/docs/RX28_Manual.pdf

Dynamixel RX24F user's manual, (b.t.). 16 Eylül 2013,
http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/rx_series/rx-24f.htm

Hagele, M., Nilson, K., ve Pires, J. N. (2008). *Handbook of robotics*. USA: Springer

Kurfess, T. R. (Ed). (2005). *Robotics and automation handbook*. USA: CRC Press

Niku, S.B. (2001). *Introduction to robotics, analysis, systems, applications*. USA: Prentice Hall.

Sandin, P.E. (2003). *Robot mechanisms and mechanical devices*. USA: McGraw-Hill.

Usb2dynamixel user's manual, (b.t.). 20 Ocak 2014,
[http://www.crustcrawler.com/electronics/USB2Dynamixel/docs/USB2Dynamixel\(english\).pdf](http://www.crustcrawler.com/electronics/USB2Dynamixel/docs/USB2Dynamixel(english).pdf)