İKİ EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN DİNAMİK ANALİZİNİN YAPILMASI

Merdin DANIŞMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Semiha BULUT

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ’NE

Bu çalışma, jürimiz tarafından, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan	…Doç. Dr. Menafeddin NAMAZOV	…..………..
Üye	…Doç. Dr. İsfendiyar BAKŞİYEV	…..………..
Üye	…Yrd. Doç. Dr. Semiha BULUT	…..………..
Üye	...………………………………....	
Üye	...………………………………....	

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

…/…/ 2008

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

……………………………………

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosunun 05.01.1984 tarihli toplantısında kabul edilen ve daha sonra 30.12.1993 tarihinde C.Ü.Fen Bilimleri Enstitü Müdürlüğünce hazırlanan ve yayınlanan "Yüksek Lisans ve Doktora tez yazım Kılavuzu" adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

KONULAR **Sayfa**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Semiha BULUT, Doç. Dr. Manefeddin NAMAZOV ve Doç. Dr. İsfendiyar BAKŞİYEV ‘e ve bilgilerinden yararlandığım diğer tüm hocalarıma teşekkür ederim.

ŞEKİLLER LİSTESİ

TABLOLAR LİSTESİ

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simge ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simge	**Açılama**	**Birim**
L	Lagrange ifadesi	J
K	Kinetik enerji	J
P	Potansiyel enerji	J
T	Dönme momenti	Nm
D	Polar atalet momenti	Nm
I	Atalet momenti	Nm
R	Rotasyon matrisi	
d	Öteleme matrisi	
J	Jakobiyen matrisi	
A	Homojen dönüşüm matrisi	
w	Açısal hız	rad/s
v	Hız	m/s
θ	Açısal yer değiştirme	rad
$\dot{\theta}$	Açısal yer değiştirmenin türevi	rad/s
$\ddot{\theta}$	Açısal yer değiştirmenin ikinci dereceden türevi	rad/s^2
l	Uzunluk	m
m	Kütle	kgs^2/m
r	Yarıçap	m
G	Ağırlık	kg
g	Genelleştirilmiş koordinat	
^{T}	Matris satırlarını sütün yapan operatör	
Tr	Matris köşegen çizgisini toplayan operatör	
V	Hacim	m^3
g	Yer çekimi ivmesi	m/ s^2
£	Lagrange fonksiyonu	
B	Viscous sürtünme katsayısı	Nm/s
Tc	Coulomb sürtünme katsayısı	Nm/s
G	Dişli oranı	
F_i	Güç, Tork	Nm
i	Değişken nokta operatörü	

1. GİRİŞ

Robotik fiziksel aktivite ve karar verme gibi uygulamalarla bir görevi yürüterek insanların yerini alabilecek makinalarla ilgili çalışmaları içerir. Robotik, geleneksel mühendislik sınırlarını kesiştiren yeni bir modern teknoloji alanıdır. Robotların karmaşıklığını ve uygulama alanlarını anlamak elektrik-elektronik mühendisliği, makine mühendisliği, endüstri mühendisliği, bilgisayar mühendisliği ve matematik alanlarında geniş bir bilgi ağı gerektirmektedir.

Robotun tarihçesine bakıldığında; 1920'li yıllarda Karel Capek bu kavramı ortaya atanlardandı. İlk gelişmeler 1940'lı yıllarda olmasına rağmen 1954'de George Devol tarafından ilk olarak programlanabilir robot tasarlanmıştır. 1956'da henüz fizik öğrencisi olan Josept Engelberger ticari robotlar konusunda faaliyetlerde bulunmuştur [1]. Robotlar hakkında ilk ciddi çalışma ise 1961'de New Jersey-Trenton 'da General Motors tarafından yapılmıştır. Robotik konusunda yapılan gelişmelerin temelinin buradan kaynaklandığı söylenebilir. 1961'de robot kolunu geri beslemeli kontrolü [2], 1963'de ilk robot görme sistemi ve 1971'de Stanford Üniversitesi tarafından Stanford kolları geliştirilmiştir. 1978'de Unimation temelinde General motors 'un çalışmalarından esinlenilerek PUMA robotu tasarlanmıştır. SCARA robotu 1979'da Japonlar tarafından tasarlanmıştır. İlk doğrudan sürülen robot 1981 yılında Carnigie-Mellon Üniversitesi tarafından tasarlanmıştır. İkibinli yıllarda ise Japonlar tarafından tasarlanan ASİMO robotu, robotik konusunda bu yıllara damgasını vurmuştur[1].

Robotik sistemler endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılmakta ve her yeni teknolojik gelişimle birlikte geliştirilmektedir. İnsanların yapamadığı veya yapmasının sakıncalı olduğu işlerde robotik sistemlerin kullanılması kaçınılmaz olmaktadır.

Bu çalışmada robotikte genel kavramlara değinilecek ve kinematik dinamik modellemesi ele alınarak eklemlere gelen kuvvetler üzerinde durulacaktır. Robotun serbestlik derecesi arttıkça sistemin çözümü doğrusal olmadığı için kinematik denklemlerle ters modellemenin yapılması oldukça zordur. Robotun dinamik özellikleri bilindiği takdirde robotun yeri kontrol edilebilir. Dinamik modelleme yapıldığında çok küçük kuvvetle bile robot kolu tepkide bulunabilir. Aşırı kuvvet uygulandığında ise robot kolu çatlayabilir veya osilasyon yapabilir [2].

Bu çalışmada ayrıca MATLAB ve ANSYS programları kullanılarak iki elemli robot kolunun eklem noktalarına gelen kuvvetler belirlenecektir.

1.1 Robotun Tanımı

Robot, bir dizi verilen görev çerçevesinde çeşitli programlanmış hareketler ile materyalleri, parçaları, aletleri veya özel donanımları hareket ettirmek için tasarlanmış programlanabilir çok işlevli manipülatördür. Bu tanım Robot Institute of America (RIA) tarafından verilmiştir [1]. Bu bölümde robotu oluşturan parçalar kısaca incelenecektir.

1.2 Robotu Oluşturan Parçalar

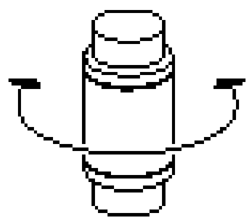
Robot dört ana kısımdan meydana gelir:

1. Bir mekanik yapı yada eklemlerle birbirine bağlanmış sıralı rijid cisimlerden(uzuvlardan) oluşan manipülatör; manipülatör, serbestliği sağlayan bir koldan (arm), el becerisi sağlayan bir bilekten (wrist) ve robotun yapması gereken görevi tamamlayan sonlandırıcıdan (end effector) oluşmaktadır.
2. Eklemlerin hareketlenmesiyle manipülatörün hareketini sağlayan hareketlendiriciler (actuators-motors)
3. Manipülatörün veya çevrenin durumunu gözleyen algılayıcılar (sensors).
4. Manipülatör hareketini kontrol eden ve yöneten bir kontrol sistemi [3].

1.3 Eklem Yapıları

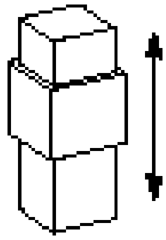
Eklemler manipülatörlerde hareketi sağlayan mekanizmalardır ve yapılarına göre ikiye ayrılırlar:

1. Döner (Revolute – R) Eklemler: Menteşeye benzer ve iki uzuv arasında dönme hareketine izin verir.



Şekil 1.1: Döner Tip Eklem

2. Kayar (Prismatic – P) Eklemeler: İki uzuv arasında doğrusal harekete izin verir.

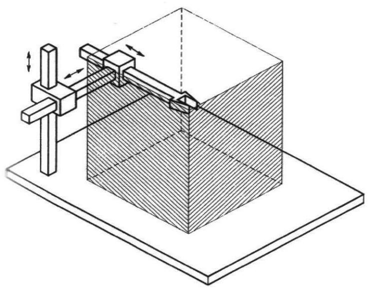


Şekil 1.2: Kayar Tip Eklem

1.4 Manipülatörlerin Sınıflandırılması

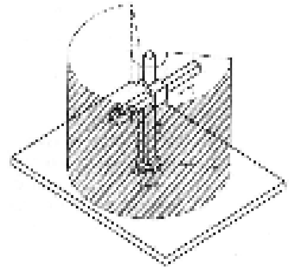
Manipülatörler çalışma uzaylarına göre sınıflandırılırlar. Aşağıda manipülatör yapıları ve bunların çalışma uzayları görülmektedir.

1. **Kartezyen (Cartesian) manipülatör:** Bu tip bir manipülatör üç tane kayar tip eklem ile elde edilir. Mekanik yönden çok sağlamdır fakat çalışma uzayındaki hareket yeteneği bakımından zayıftır. Bu tip manipülatörler çok büyük boyutlarda ve ağırlıklarda nesneleri hareket ettirmek ve taşımak için idealdir. Kartezyen manipülatörlerde eklemleri hareket ettiren motorlar çoğunlukla elektrik bazen de pünomatik motorlarıdır.



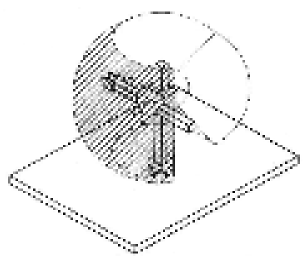
Şekil 1.3: Kartezyen Manipülatör

2. **Silindirik (Cylindirical) manipülatör:** Bu tip bir manipülatör bir tane döner ve iki tane kayar tip eklem ile elde edilir. Bu tip manipülatörler de mekanik yönden sağlamdır fakat bilek konum doğruluğu (accuracy) yatay harekete bağlı olarak azalır. Benzer şekilde büyük boyutlu nesnelerin taşınmasında kullanılırlar. Bu tip manipülatörlerde hidrolik motorları tercih edilir.



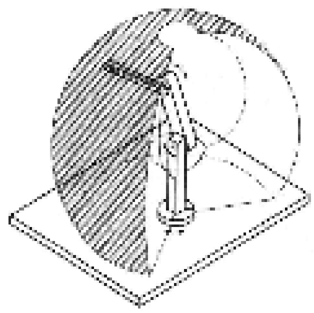
Şekil 1.4: Silindirik Manipülatör

3. Küresel (Spherical) manipülatör: Bu tip bir manipülatör iki tane döner ve bir tane kayar tip eklem ile elde edilir. Bu tip manipülatörler mekanik yönden diğer iki tipten daha zayıf, mekanik yapı yönünden daha karmaşıktır. Çoğunlukla makine montajlarında kullanılırlar. Bu tip manipülatörlerde elektrik motorları tercih edilir.



Şekil 1.5: Küresel Manipülatör

4. Eklemli (Articulated) - İnsan kolu (Anthrophomorphic) manipülatör: İnsan kol yapısı esas alındığı için bu isim verilmiştir. Bu tip manipülatörler tüm eklemleri döner olduğundan çalışma uzaylarında en yetenekli manipülatörlerdir. Endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanına sahiptirler (boyama, kaynak yapma, montaj, yüzey temizleme vb.). Bu tip manipülatörlerde elektrik motorları tercih edilir.



Şekil 1.6: Eklemli-İnsan Kolu Manipülatör

Robotik alanındaki genel kavramlar aşağıdaki ana ve alt başlıklarda toplanabilir:

1. Dönüşümler:
    a) Dönme Matrisi
    b) Öteleme Vektörü
    c) Homojen Dönüşüm
2. Düz Kinematikler
    a) Denavit-Hartenberg (DH) Dönüşümü
3. Ters Kinematikler
4. Hız Kinematikleri
    a) Jakobyen
    b) Tekillikler
5. Dinamikler
    a) Lagrange Denklemleri
    b) Newton-Euler (NE) Denklemleri

İzleyen bölümlerde düz ve ters kinematik denklemleri hariç bu kavramlar tek tek ele alınacaktır [4].

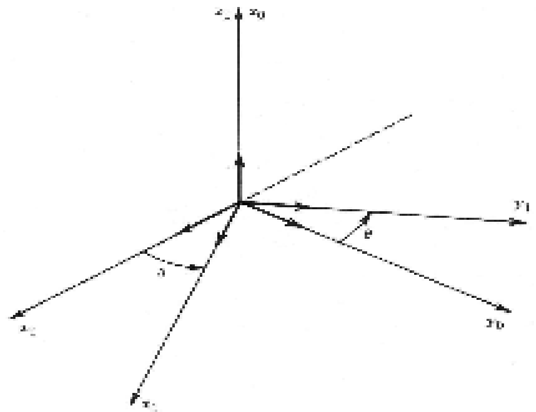
2. DÖNÜŞÜMLER

Manipülatör eklemlerle birbirine bağlanmış rijid cisimlerin açık uçlu kinematik zinciri olarak kabul edilir. Zincirin bir ucu yere bağlı iken diğer ucu sonlandırıcıya bağlıdır. Sonuçta bu yapının hareketi her bir uzvun diğerine göre hareketlerinin toplamından oluşturulur. Bunun için önce bir rijid cismin uzaydaki konumunu ve yönelimini belirtmek için dönme (rotation) matrisi ve öteleme (translation) vektörü oluştururuz. Bu matris ve vektörü birleştirmek için daha sonra homojen dönüşüm denklemlerini kullanırız.

2.1 Dönme Matrisi

Şekil 2.1 ’de gösterildiği üzere $\{i_0,j_0,k_0\}$ $ox_0y_0z_0$ koordinat çerçevesi için , $\{i_1,j_1,k_1\}$ $ox_1y_1z_1$ koordinat çerçevesi için birim vektörler olsun. 1. koordinat çerçevesi 0. koordinat çerçevesinde z_0 ekseni etrafında θ açısı kadar döndürülerek elde edilmiştir. Bu iki koordinat çerçevesi arasındaki dönüşüm Eşitlik 2.1.1 ile bulunur. Buradaki R_0^1 matrisi 1. koordinat çerçevesinden 0. koordinat çerçevesine dönme matrisini göstermektedir. 1. koordinat çerçevesi 0. koordinat çerçevesinden belli bir dönme ile elde edildiğinden bu matris dönme matrisi adını alır [5].

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} i_0 i_1 & j_0 i_1 & k_0 i_1 \\ i_0 j_1 & j_0 j_1 & k_0 j_1 \\ i_0 k_1 & j_0 k_1 & k_0 k_1 \end{bmatrix} \qquad (2.1.1)$$



Şekil 2.1: z_0 Ekseni Etrafında Dönme

Burada

$$i_0 i_1 = \cos\theta \qquad j_1 i_0 = -\sin\theta \qquad (2.1.2)$$

$$j_0 j_1 = \cos\theta \qquad i_1 j_0 = \mathbf{sin}\,\theta$$

$$k_0 k_1 = 1$$

ve diğer tüm nokta çarpımlar sıfır olmak üzere,

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} \mathbf{cos}\,\theta & -\mathbf{sin}\,\theta & 0 \\ \mathbf{sin}\,\theta & \mathbf{cos}\,\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (2.1.3)$$

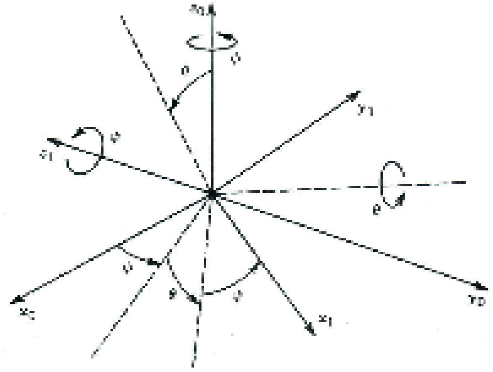
dönme matrisi elde edilir. R_0^1 gösterilimi yerine dönme eksenini ve açısını belirten $R_{z,\theta}$ gösterilimi de kullanılabilir.

Koordinat çerçeveleri etrafında dönme tek olmayabilir, böylece devam eden şekilde $ox_2y_2z_2$, $ox_3y_3z_3$, $ox_4y_4z_4$ … koordinat çerçeveleri elde edilebilir. Aslında sonuçta elde edilen koordinat çerçevesi sadece üç eksen etrafında (x,y,z) belirli açılarla dönmüştür. Bu nedenle elimizde bulunan rasgele bir koordinat çerçevesinin temel koordinat çerçevesine göre dönme matrisini elde etmek için üç tane açı değeri yeterlidir. Bu açıların tanımlanması için iki tane gösterilim mevcuttur:

1. Euler açıları gösterilimi
2. Roll / Pitch / Yaw açıları gösterilimi

2.1.1 Euler Açıları ve Gösterilimi

Euler açıları sırasıyla z ekseni etrafında *Φ* açısı kadar, y ekseni etrafında *θ* açısı kadar, tekrar z ekseni etrafında *Ψ* açısı kadar dönmelere karşılık gelmektedir. Euler açıları gösterilimi Şekil 2.2 ‘de verilmiştir.



Şekil 2.2: Euler Açıları Gösterimi

Burada **cos** = c, **sin** = s olmak üzere dönme matrisi şu şekilde elde edilir :

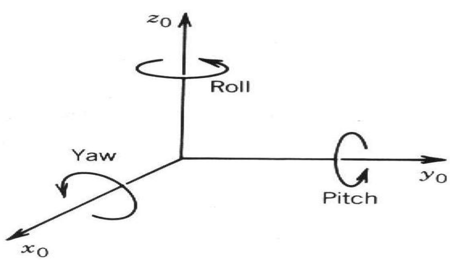
$$R_0^1 = R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} \tag{2.1.4}$$

$$= \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ s\phi & ff & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\phi c\theta c\psi - s\phi s\psi & -c\phi c\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta \\ s\phi c\theta c\psi + c\phi s\psi & -s\phi c\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta \\ -s\theta c\psi & s\theta s\psi & c\theta \end{bmatrix}$$

Roll/Pitch/Yaw Açıları ve Gösterilimi

Roll / Pitch / Yaw açıları sırasıyla z ekseni etrafında *Φ* açısı kadar, *y* ekseni etrafında *θ* açısı kadar ve x ekseni etrafında *Ψ* açısı kadar dönmelere karşılık gelmektedir. Roll / Pitch / Yaw açıları gösterilimi Şekil 2.3 ‘de verilmiştir.



Şekil 2.3: Roll / Pitch /Yaw Açıları Gösterimi

Burada dönme matrisi şu şekilde elde edilir:

$$R_0^1 = R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{x,\psi} \tag{2.1.5}$$

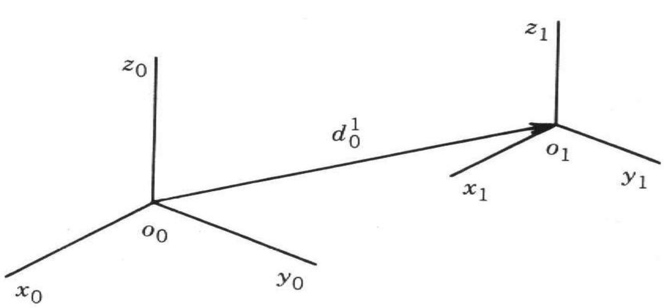
$$= \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\psi & -s\psi \\ 0 & s\psi & c\psi \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c\phi c\theta & -s\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \\ s\phi c\theta & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi & -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi \end{bmatrix}$$

2.2 Öteleme Vektörü

Şekil 2.4 ’de gösterildiği üzere oxyz ’den $|d|$ kadar bir öteleme ile elde edilmiş oxyz koordinat çerçevesi düşünelim. Bu iki koordinat çerçevesi arasındaki dönüşüm öteleme vektörü ile tanımlanır.

$$d_0^1 = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}$$



Şekil 2.4: Ötelenmiş Çerçeve

2.3 Homojen Dönüşüm

Üç boyutlu uzayda koordinat çerçeveleri arasındaki dönüşüm dönme matrisleri ve öteleme vektörleri yardımıyla yapılır. Her ikisinin birlikte gösterilimi için yani koordinat çerçeveleri arasında hem dönmenin, hem de ötelemenin var olduğu durumda homojen dönüşüm matrisleri kullanılır. Homojen dönüşüm matrisleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$T_0^1 = \left[\begin{array}{ccc|c} & R_0^1 & & d_0^1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right]_{4x4} \tag{2.3.1}$$

Burada elde edilen T_0^1 matrisi 1. koordinat çerçevesinden 0. koordinat çerçevesine homojen dönüşüm matrisini göstermektedir. T_0^1 matrisini 4x4 boyutundan kare matris olduğuna dikkat edilmelidir. Bu homojen matris oluşturulurken matrisin tersinin alınabilmesi için yapılmıştır. T_0^1 matrisindeki $T_{4,4}$ elemanı olan 1 tüm elemanların bire bir ölçeklendiğini göstermektedir.

Bu elde ettiğimiz genel kalıba bağlı olarak temel homojen dönüşüm matrisleri şu şekildedir :

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha & 0 \\ 0 & s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{y,\phi} = \begin{bmatrix} c\phi & 0 & s\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\phi & 0 & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3.2)$$

$$d_{x,a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} d_{y,b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} d_{z,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Denavit - Hartenberg (DH) Dönüşümü

3.1 Denavit - Hartenberg Dönüşüm Yöntemi

Eşitlik 2.3.2 ile elde edilen dönüşüm kolay gibi görünse de her bir eklem için koordinat çerçevelerinin yerleştirilmesi ve birbirlerine göre yorumlanması anlam karmaşasına yol açmaktadır. Bu anlam karmaşasını ortadan kaldırmak için Denavit ve Hartenberg 1955 yılında sistematik bir yöntem önermişlerdir [5].

Bu yöntemde aşağıdaki kurallara göre önce koordinat çerçeveleri atanır, daha sonra dönüşüm için gerekli uzuv ve eklem parametreleri bulunur.

Şekil 3.1,2'de gösterildiği gibi 0,1, i-1 tane koordinat takımının robota bağlandığını varsayalım. z eksenleri eklemlerin dönme eksenleri olarak belirlenir. i 'inci koordinat takımı D-H'e göre yerleşmesi gereken noktaya bağlamak için şu iki durum göz önünde bulundurulmalıdır.

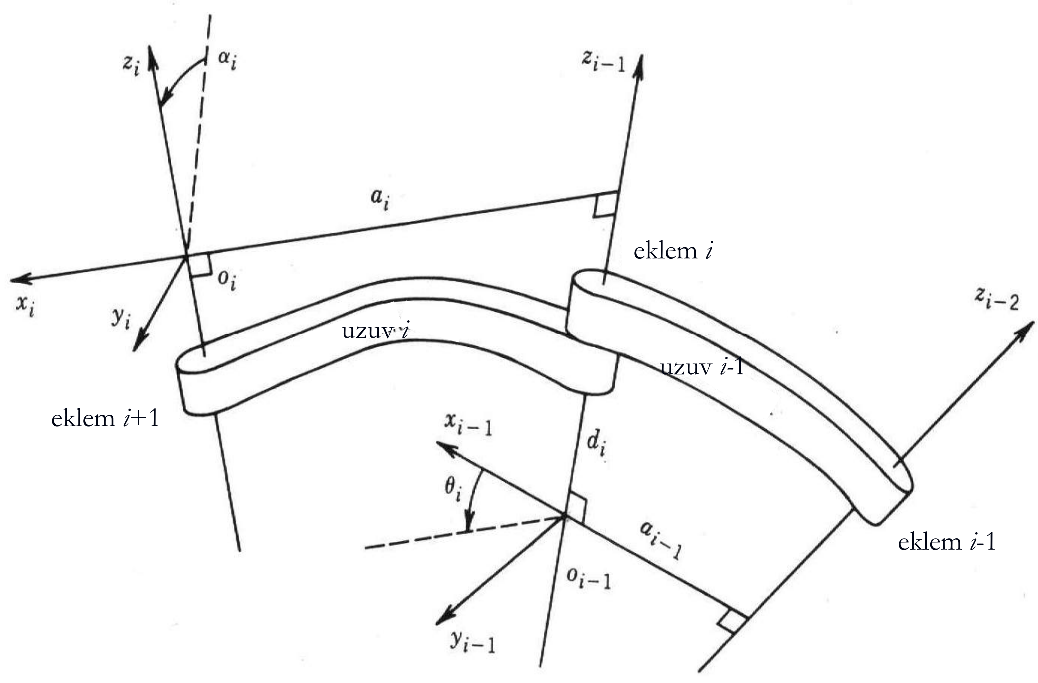
a) z_i ve z_{i-1} eksenleri paralel değilse,

b) z_i ve z_{i-1} eksenleri paralel ise, İlk olarak a) şıkkını inceleyelim. Eğer bu iki eksen birbirine paralel değilse, bu iki eksene dik olan ve bu iki ekseni dik kesen sadece bir tane doğru çizilebilir. Bu çizilen doğruda x eksenini gösterir. x_i ekseni ile z_i ekseninin kesiştiği nokta o_i başlangıç noktasıdır. Böylece (DH-1) ve (DH-2) koşulları sağlanmış olur ve o_{i-1} noktasının o_i ye olan uzaklığını gösteren vektör z_{i-1} ve x_i eksenleri yardımıyla bulunabilir. i' inci koordinat takımı, y_i ekseninin sağ el kuralına uygun olarak seçilmesiyle tamamlanır. Ve böylece homojen transformasyon matrisi oluşturulabilir.

b) Eğer z_{i-1} ve z_i eksenleri paralelseler, bu iki eksen dik olarak kesen sonsuz sayıda doğru çizilebilir. Bu durumla çok sık karşılaşıldığı için iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Bu durumda (DH-1) koşulu xi ekseninin doğrultusunu tam olarak belirleyemez. Bunun için, oi ekseni birinci uzuv üzerinde olmak üzere rastgele seçilir. o_i 'den geçen ve z_i ile z_{i-1} eksenlerini dik olarak kesen doğru x eksenini tanımlar. z_{i-1} ve z_i paralel olduklarından α_i de sıfır olacaktır. x_i belirlendikten sonra saat ibrelerinin tersi yönünde olacak şekilde y_i 'nin de yeri belirlenebilir.

Sonuç olarak söylenebilir ki; Robot kolu terimleri l_i, d_i, α_i ,θ_i olmak üzere, eklem ister prizmatik, ister döner eklem olsun l_i *ve* α_i parametreleri sabittir.

- Eğer eklem prizmatik ise θ_i sabit, d_i değişkendir.
- Eğer eklem döner eklem ise d_i sabit, θ_i değişkendir.



Şekil 3.1: Denavit - Hartenberg Çerçeve Ataması

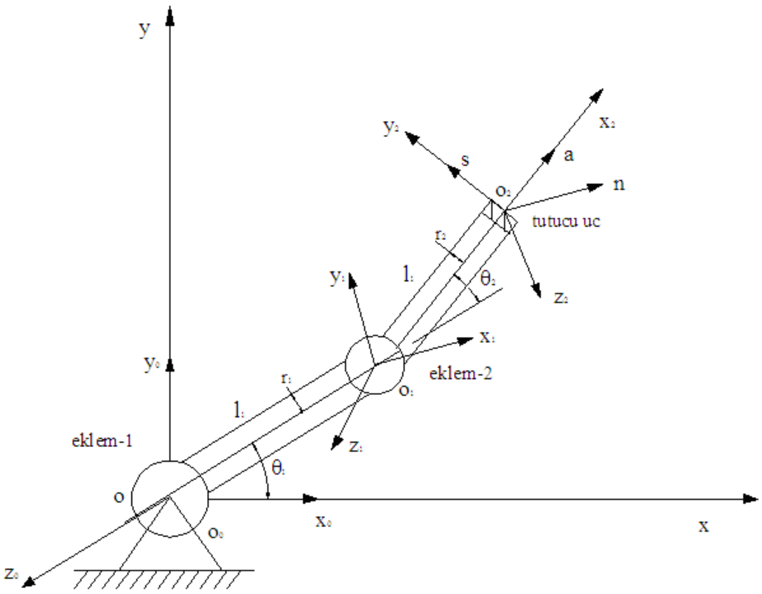
$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & l_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i & l_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.1)$$

Daha sonra sonlandırıcı koordinat çerçevesinden temel çerçevesine dönüşüm matrisini hesapla.

$$T_0^n = A_1 \ldots A_n \quad (3.1.2)$$

Örnekler:

Örnek 1: Şekil 3.2 ‘deki düzlemsel iki uzuvlu düzlemsel manipülatörü düşünelim.



Şekil 3.2: İki Eklemli Düzlemsel Manipülatör

Eklem eksenleri z_0 ve z_1 sayfa düzlemine diktir. $o_0x_0y_0z_0$ temel koordinat çerçevesini Şekil 3.3 ’de görüldüğü üzere sağ el kuralına bağlı olarak düzenleriz. Merkezi z_0 ekseninin sayfa düzlemiyle kesiştiği noktaya yerleştirilmiştir ve x_0 ekseninin seçimi tamamen rasgeledir. Temel koordinat çerçevesi yerleştirildiğinde DH dönüşüm kurallarında belirtildiği gibi $o_1x_1y_1z_1$ çerçevesi yerleştirilir. Bu çerçevenin merkezi o_1, z_1 ekseni ile sayfa düzleminin kesiştiği noktaya yerleştirilmiştir. Son çerçeve $o_2x_2y_2z_2$ merkez o_2 ‘yi uzuv 2’nin sonunda seçerek yerleştirilir. Daha sonra oluşturulan şekilden yola çıkarak uzuv ve eklem

parametreleri bulunur [6].

Uzuv	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	0	0	θ_1^*
2	a_2	0	0	θ_2^*

Tablo 3.1: İki Uzuvlu Düzlemsel Manipülatör İçin Parametreler

Tablo 3.1 'de * ile verilen parametreler değişken değerli parametrelerdir. Eşitlik 3.1.1'den yararlanarak ve Tablo 3.1 'i kullanarak A matrisleri şu şekilde bulunur;

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & a_1c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & a_1s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.1.3}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2c_2 \\ s_2 & c_{21} & 0 & a_2s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.1.4}$$

Elde edilen A matrisleri Eşitlik 3.1.2'de yerine koyulursa

$$T_0^2 = A_1A_2 = \begin{bmatrix} c & -s & 0 & a_1c_1 + a_2c_{12} \\ s & c & 0 & a_1s_1 + as_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.1.5}$$

olur. Burada c_{12} ifadesi $\cos(\theta_1+\theta_2)$'ye, benzer şekilde s_{12} ifadesi $\sin(\theta_1+\theta_2)$'ye karşılık gelmektedir. Burada T_0^2 matrisinin son sütunun birinci ve ikinci elemanları sırasıyla o_2 merkezinin temel koordinat çerçevesindeki x ve y bileşenleri olduğuna dikkat edilmelidir [6].

4. HIZ KİNEMATİKLERİ

Matematiksel olarak düz kinematikler, kartezyen konum ve yönelim uzayı ile eklem konumları arasında bir işlev tanımlar. Hız kinematiklerini (sonlandırıcının doğrusal ve açısal hızları) bu işlevin Jakobyen 'ini belirleyerek elde edebiliriz [6].

Jakobiyen

Jakobyen matris değerli bir işlevdir ve skaler bir işlevin türevinin vektörel hali olarak düşünülebilir. Bu Jakobyen veya Jakobyen matrisi robotikte aşağıdaki alanlarda büyük önem taşır.

1. Düzgün yörünge (smooth trajectory) türetilmesi
2. Tekil (Singüler) konfigürasyonların bulunması
3. Hareket denklemlerinin türetilmesi
4. Sonlandırıcı kuvvet ve momentlerinin diğer manipülatör eklemlerine taşınması

n eklemli bir manipülatör için Jakobyen, eklem hızlarının *n*-vektörü ile sonlandırıcının 6 vektörden oluşan doğrusal ve açısal hızları arasındaki ilişkiyi verir. Buna göre *n* eklemli bir manipülatör için Jakobyen 6 x *n* boyutunda bir matristir [7].

Jakobyen için genel ifade

$$\underline{\mathbf{v}}_0^n = J_v \underline{\dot{\mathbf{q}}} \tag{4.1.1}$$

$$\underline{\boldsymbol{\omega}}_0^n = J_\omega \underline{\dot{\mathbf{q}}} \tag{4.1.2}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{v}}_0^n \\ \underline{\boldsymbol{\omega}}_0^n \end{bmatrix} = J_0^n \underline{\dot{\mathbf{q}}} \tag{4.1.3}$$

$$J_0^n = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \tag{4.1.4}$$

şeklindedir. Jakobyen matrisi *n* uzuvlu bir manipülatör için sırasıyla sütunların düzenlenmesiyle oluşturulur.

$$J_0^n = \left[J_1 J_2 \cdots J_n \right] \tag{4.1.5}$$

Buna göre eğer eklem *i* dönerse sütun *i*

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (\underline{o}_n - \underline{o}_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \begin{matrix} \rightarrow & J_v \\ \rightarrow & J_w \end{matrix} \tag{4.1.6}$$

Eğer eklem *i* kayarsa sütun *i*

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \rightarrow & J_v \\ \rightarrow & J_w \end{matrix} \tag{4.1.7}$$

olur [7].

Örnek 2:

Tekrar Şekil 3.2 'deki iki uzuvlu düzlemsel manipülatörü ele alalım. Burada n=2 olduğundan Jakobyen 6x2 boyutundadır ve şu şekilde ifade edilir:

$$J(q) = \begin{bmatrix} z_0 \times (\underline{o}_2 - \underline{o}_0) & z_1 \times (\underline{o}_2 - \underline{o}_1) \\ z_0 & z_1 \end{bmatrix} \qquad (4.1.8)$$

Burada $\underline{o}_0$, $\underline{o}_1$, $\underline{o}_2$ sırasıyla sıfırıncı, birinci ve ikinci koordinat çerçevelerinin merkezleridir. Eşitlik 5.1.8'de gerekli değişkenleri Şekil 3.3 'den yararlanarak bulursak;

$$\underline{o}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \underline{o}_1 = \begin{bmatrix} a_1 c_1 \\ a_1 s_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \underline{o}_2 = \begin{bmatrix} a_1 c_1 + a_2 c_{12} \\ a_1 s_1 + a_2 s_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (4.1.9)$$

ve

$$z_0 = z_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (4.1.10)$$

olur. Bu değerleri Eşitlik 4.1.8'de yerine koyarsak;

$$J(q) = \begin{bmatrix} -a_1 s_1 - a_2 s_{12} & -a_2 s_{12} \\ a_1 c_1 + a_2 c_{12} & a_2 c_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4.1.11)$$

olarak bulunur.

4.2 Tekillikler (Singülerlikler)

Jakobyen matrisinin rankının azaldığı(det(J)=0) manipülatör konfigürasyonları tekillikler veya tekil konfigürasyonlar olarak adlandırılabilir. Ranktaki bu azalma serbestlik derecesinde azalma olarak da kabul edilebilir.

Tekilliklerin belirlenmesi şu sebeplerden önemlidir;

1. Tekillikler yapılamayacak hareketleri veya ulaşılamayacak noktaları belirtebilir.
2. Tekilliklerde küçük sonlandırıcı hızları büyük eklem hızlarına sebep olabilir.

3. Tekilliklerde ters kinematik problemleri için çözüm olmayabilir veya sonsuz sayıda çözüm olabilir.

   Tekillikler incelemede kolaylık getirmesi açısından iki kısımda incelenebilir:

1. Kolun hareketi sonucu oluşan kol tekillikleri
2. Bileğin hareketi sonucu oluşan bilek tekillikleri [8].

Örnek 3:

6'dan daha az uzva sahip manipülatörlerin Jakobyen matrisleri kare değildir, bu yüzden determinantı hesaplanamaz. Bu tip manipülatörlerin tekilliklerinin belirlenmesi için Jakobyen matrisinin gerekli kısımları incelenir. Tekrar Şekil 3.2 'deki iki uzuvlu düzlemsel manipülatörü ele alırsak;

$$J(q) = \begin{bmatrix} -a_1s_1 - a_2s_{12} & -a_2s_{12} \\ a_1c_1 + a_2c_{12} & a_2c_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.2.1}$$

Matrisin bizim için gerekli 2x2'lik kısmının determinantını hesaplarsak

$$\mathbf{det}(J) = \begin{vmatrix} -a_1s_1 - a_2s_{12} & -a_2s_{12} \\ a_1c_1 + a_2c_{12} & a_2c_{12} \end{vmatrix} = a_1a_2s_2 \tag{4.2.2}$$

olarak bulunur. Eşitlik 4.2.2'den yola çıkarak bu manipülatör için θ_2=0 ve θ_2=π değerli duruşların tekillikler olduğunu söyleyebiliriz [6].

5. İKİ EKLEMLİ PLANAR ROBOT KOLUN ANALİZİ

5.1 ROBOT KOLUNUN MATEMATİKSEL OLARAK DİNAMİK ANALİZİ

5.1.1 Giriş

Bu bölümde robot kolunun dinamiği incelenecektir. Robot kolunun hareketi eklemlere uygulanan kuvvet ile belirlenir. Bu nedenle eklemlere uygulanacak kuvvet yada moment büyüklüklerinin zamana göre konumu, hızı ve ivmesi irdelenmelidir. Biz bu çalışmamızda eklemlere gelen torklar üzerinde duracağız.

Robot kolları karmaşık dinamik sistemler olarak tarif edilir ve problemlerin çözümünde dinamik analizleri yapabilmek için birçok düzenli yaklaşımlardan yararlanılır. Çok karmaşık sistemlerin dinamik eşitliklerini kolay bir tarzda elde edebilmek için Lagrange eşitliklerini kullanmak bize yardımcı olacaktır.

Dinamik denklemler konum, hız ve ivme ile güç ve tork arasında ilişkiler kurar. Ve genellikle genellikle robot kolunun hareket denklemlerini elde etmek için çözülürler. Yani güç ve torklar girildiğinde bu denklemler sistem hareketinin sonuçlarını verirler. Bu durumda denklemleri çözmek gerekmez. Çünkü elde edilen denklemlerle robot kolunun hareketi belirtilmiş olur. Ancak sisteme uygulanacak güç ve tork değerlerinin iyi bilinmesi gerekir. Elde edilen dinamik denklemler kullanılarak bu bilgileri de elde edebiliriz [4].

İleride de görüleceği gibi robot kolunun dinamik denklemlerini elde ederken her bir noktada efektif ataletler ve bu noktalar arasında bağıl ataletler için yaklaşımlar elde ediyoruz. Bunu yaparken de söz konusu nokta için ivme ve tork arasındaki ilişkiyi belirlememiz gerekiyor. Ayrıca ağırlık etkilerini sistem içersinde inceleyebilmek amacıyla robot kolunun eklemlerine uygulamak için ayrıca torklara karar veriyoruz. Sistemin hıza bağlı torkları ise genellikle ihmal edilir [9].

Robot kollarının dinamik denklemlerini elde etmek için kullanılan yöntemlerden bazıları şunlardır;

1. Lagrange – Euler (L-E)
2. Newton – Euler (N-E)
3. Rekursif Lagrange (R-L)
4. Genelleştirilmiş D'Alembert Yöntemi

şeklindedir. Bunlardan Lagrange-Euler ve Newton-Euler yöntemleri en çok kullanılan yöntemlerdir [9].

5.1.2 Lagrange Mekaniği

Lagrange L, kinetik enerji K ve potansiyel enerji P arasındaki fark olarak tarif edilir.

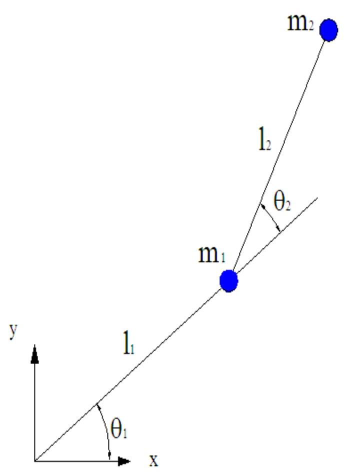
$$L = K - P \tag{5.1}$$

Kinetik ve potansiyel enerjileri belirli bir koordinatlara göre tarif etmek için kullanılan eşitlik şu şekildedir [4].

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i \tag{5.2}$$

Buradan q_i kinetik ve potansiyel enerjileri ifade etmek için kullanılır. $\dot{q}_i$ uygun hız ve F_i uygun güç ve torktur. Fi, q_i 'nin doğrusal veya açısal koordinatta olmasına göre sırasıyla güç veya torktur.

Şekil 5.1 ‘de görünen iki eklemli robot kolunu düşünelim. Burada m_1, m_2 birinci ve uzuvların kütleleri, l_1, l_2 uzunluklarıdır. θ_1 ve θ_2 genel koordinatlarda seçilmiş uzuv açıları olarak tarif edilir.



Şekil 5.1: İki Eklemli Robot Kolunun Eklemlere İndirgenmiş Kütlesel Gösterimi

5.1.2.1 Kinetik ve Potansiyel Enerji

Öncelikle kinetik enerjiyi hesaplayalım. Kinetik enerjinin genel ifadesi olan $K = 1/2\,.mV^2$ formülünü sistemimize uygun olarak yazarsak 1 no lu uzvun kinetik enerjisi ;

$$K_1 = 1/2.\ m_1.l_1^2.\theta_1^2 \tag{5.3}$$

Potansiyel enerji ise y koordinatı ile tanımlanmış dikey yükseklik ve kütle ile ilişkilidir. Ve şu şekilde yazılabilir.

$$P_1 = -m_1.g.l_1.\cos(\theta_1) \tag{5.4}$$

Bu şekilde 1 ve 2 no lu uzvun kinetik ve potansiyel enerjileri tanımlanmış olur. İkinci uzvun kinetik ve potansiyel enerjileri için öncelikle uzvun kartezyen koordinatlardaki yeri tanımlanmalıdır. Ve şu şekilde ifade edilir;

$x_2 = l_1.sin(\theta_1) + l_2.sin(\theta_1+\theta_2)$ (5.5)

$y_2 = -l_1.cos(\theta_1) - l_2.cos(\theta_1+\theta_2)$ (5.6)

Koordinatlara bağlı kartezyen hız bileşenleri ise şu şekildedir ;

$x_2 = l_1.cos(\theta_1).\theta_1 + l_2.cos(\theta_1+\theta_2).(\theta_1+\theta_2)$ (5.7)

$y_2 = l_1.sin(\theta_1).\theta_1 + l_2.sin(\theta_1+\theta_2).(\theta_1+\theta_2)$ (5.8)

Kinetik enerji denklemini elde etmek için hız büyüklüğünün karesini alırsak;

$$V_2^2 = x_2^2 + y_2^2$$

$$=l_1^2.\theta_1^2 + l_2^2.(\theta_1^2 + 2.\theta_1.\theta_1 + \theta_2^2) + 2.l_1.l_2.cos(\theta_1).cos(\theta_1+\theta_2).(\theta_1^2+\theta_1.\theta_2)$$

$$+ 2.l_1.l_2.sin(\theta_1).sin(\theta_1+\theta_2).(\theta_1^2+\theta_1.\theta_2)$$

$$= l_1^2.\theta_1^2 + l_2^2.(\theta_1^2 + 2.\theta_1.\theta_1 + \theta_2^2) + 2.l_1.l_2.cos(\theta_2).(\theta_1^2+\theta_1.\theta_2) \quad (5.9)$$

Ve kinetik enerji ;

$$K_2= 1/2.\ m_2.l_1^2.\theta_1^2 + 1/2.m_2.l_2^2.\theta_1^2.(\theta_1^2 + 2.\theta_1.\theta_1+\theta_2^2) + m_2.l_1.l_2.cos(\theta_2).(\theta_1^2+\theta_1.\theta_2) \quad (5.10)$$

Potansiyel enerji ;

$$P_2 = -m_2.g.l_1.cos(\theta_1) - m_2.g.l_2.cos(\theta_1+\theta_2) \quad (5.11)$$

5.1.2.2 Lagrange Denklemi

Böylece Lagrange denklemi şu şekilde elde edilmiş olur ;

$$L = 1/2.(m_1+m_2).l_1^2.\theta_1^2 + 1/2.m_2.l_2^2.(\theta_1^2+2.\theta_1.\theta_2+\theta_2^2) + m_2.l_1.l_2.cos(\theta_2).(\theta_1^2+\theta_1.\theta_2)$$

$$+(m_1+m_2).g.l_1.cos(\theta_1) + m_2.g.l_2.cos(\theta_1+\theta_2) \quad (5.12)$$

5.1.2.3 Dinamik Eşitlikler

Dinamik eşitlikleri elde etmek için (5.2) denkleminden Lagrange L ‘yi çekelim.

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1+m_2)l_1^2\dot{\theta}_1 + m_2 l_2^2\dot{\theta}_1 + m_2 l_2^2\dot{\theta}_2 + 2m_2 l_1 l_2\cos(\theta_2)\dot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_2\cos(\theta_2)\dot{\theta}_2 \quad (5.13)$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = [(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2)]\ddot{\theta}_1 + [m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2)]\ddot{\theta}_2$$

$$- 2m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2)\dot{\theta}_2^2 \qquad (5.14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -(m_1 + m_2) g l_1 \sin(\theta_1) - m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \qquad (5.15)$$

Denklem (5.12) ve (5.13), denklem (5.2)'ye göre birleştirilirse 1 no lu uzvun torku bulunmuş olur.

$$T_1 = [(m_1 + m_2)l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2)]\ddot{\theta}_1 + [m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2)]\ddot{\theta}_2$$

$$- 2m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2)\dot{\theta}_2^2 + (m_1 + m_2) g l_1 \sin(\theta_1) + m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \qquad (5.16)$$

2 no lu uzuvdaki torku bulmak için Lagrange ifadesinin $\dot{\theta}_2$ ve θ_2 'ye göre diferansiyeli aşağıdaki gibi alınır.

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2 l_2^2 \dot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2 + m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2)\dot{\theta}_1 \qquad (5.17)$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2)\ddot{\theta}_1 - m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \qquad (5.18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = -m_2 g l_1 l_2 \sin(\theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - m_2 g l_2 \qquad (5.19)$$

Böylece 2 no lu uzva gelen tork;

$$T_2 = [m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2)]\ddot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 - 2m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2$$

$$- m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2)\dot{\theta}_1^2 + m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \qquad (5.20)$$

Elde edilen tork değerlerini formulize ederek aşağıdaki şekilde yazarsak;

$$T_1 = D_{11}\ddot{\theta}_1 + D_{12}\ddot{\theta}_2 + D_{111}\dot{\theta}_1^2 + D_{122}\dot{\theta}_2^2 + D_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + D_{121}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + D_1 \qquad (5.21)$$

$$T_2 = D_{12}\ddot{\theta}_1 + D_{22}\ddot{\theta}_2 + D_{211}\dot{\theta}_1^2 + D_{222}\dot{\theta}_2^2 + D_{212}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + D_{221}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + D_2 \qquad (5.22)$$

Yukarıda formulize ettiğimiz eşitlikleri inceleyecek olursak;

D_{ii} formunun karşılığı, i uzvundaki efektif atalet olarak bilinir. Çünkü i uzvundaki ivme, i uzvunda $D_{ii}\ddot{\theta}_i$ torkuna neden olur.

D_{ij}, i ve j noktaları arasındaki bağıl atalettir. Çünkü i veya j noktalarındaki ivme sırasıyla j veya i 'de torka neden olur. Buda sırasıyla $D_{ij}\ddot{\theta}_i$ veya $D_{ij}\ddot{\theta}_j$ 'ye eşittir.

j ’deki hızdan dolayı i ‘de $D_{ijk}\dot{\theta}_j^{\,2}$ terimi şeklinde merkezcik güç oluşur.

$D_{ijk}\dot{\theta}_j\dot{\theta}_k + D_{ikj}\dot{\theta}_k\dot{\theta}_j$ terimleri j ve k ‘da ki hızlardan dolayı i ‘de oluşan Coriolis gücü olarak bilinir.

Son olarak D_i şeklindeki terim ise yer çekimini temsil ede[4]. Denklemler karşılaştırılırsa aşağıdaki katsayılar bulunur.

Efektif atalet;

$$D_{11} = [(m_1 + m_2)l_1^{\,2} + m_2 l_2^{\,2} + 2m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2)] \tag{5.23}$$

$$D_{22} = m_2 l_2^{\,2} \tag{5.24}$$

Bağıl atalet;

$$D_{12} = m_2 l_2^{\,2} + m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) \tag{2.25}$$

Merkezcil ivme katsayıları;

$$D_{111} = 0 \tag{5.26}$$

$$D_{122} = -m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2) \tag{5.27}$$

$$D_{211} = -m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2) \tag{5.28}$$

$$D_{222} = 0 \tag{5.29}$$

Coriolis ivme katsayıları;

$$D_{112} = D_{121} = -m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2) \tag{5.30}$$

$$D_{212} = D_{221} = -m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2) \tag{5.31}$$

Ağırlık terimleri;

$$D_1 = (m_1 + m_2) g l_1 \sin(\theta_1) + m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{5.32}$$

$$D_2 = m_2 g l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{5.33}$$

İki eklemli robot kolu için yerçekiminin ihmal edildiği bir ortamda, 2 uzvunun sabit ($\ddot{\theta}_2$ =0) ve serbest (T_2 =0) olması durumu için denklem (5.21) ve (5.22) ‘ye sayısal örnekler verelim.

İlk durumda (5.21) ve (5.22) denklemleri;

$$T_1 = D_{11}\ddot{\theta}_1 \tag{5.34}$$

$$T_2 = D_{12}\ddot{\theta}_1 \tag{5.35}$$

İkinci durumda T_2 = 0 olduğundan (5.21) ve (5.22) denklemleri dikkate alınarak $\ddot{\theta}_2$ denklemden çekilerek T_1 bulunur.

$$T_2 = 0 = D_{12}\ddot{\theta}_1 + D_{22}\ddot{\theta}_2$$

Buradan

$$\ddot{\theta}_2 = -\frac{D_{12}}{D_{22}}\ddot{\theta}_1$$

olarak bulunur. $\ddot{\theta}_2$, (5.21) denkleminde yerine konulursa;

$$T_1 = [D_{11} - \frac{D_{12}^{\ 2}}{D_{22}}]\ddot{\theta}_1 \tag{5.36}$$

denklemi elde edilmiş olur [4].

İki eklemli robot kolu için l_1= 20 cm, l_2= 12cm ve m_1= 1,75 kg olarak seçelim. m_1 değerine de robot kolunun yüksüz ve yüklü olması durumları için sırasıyla 0,25 kg ve 0,50 kg değerlerini verelim. Yerçekiminin ihmal edildiği bir ortamda sistemin yüksüz ve yüklü olması durumları için (5.34) ve (5.36) denklemleri ve katsayıları dikkate alınarak 1 no lu uzva gelen tork değerlerini hesaplayalım. Burada I_t ve I_f değerleri, robot kolunun sırasıyla sabit ve serbest durumları için 1 no lu uzva gelen tork değerlerini temsil etmektedir

θ₂	**cosθ₂**	**D₁₁** x10⁻²	**D₁₂** x10⁻²	**D₂₂** x10⁻²	I_t x10⁻²	I_f x10⁻²
0	1	9,56	0,60	0,36	9,56	8,56
90	0	8,36	0,36	0,36	8,36	8,00
180	-1	7,16	0,24	0,36	7,16	7,00
270	0	8,36	0.36	0,36	8,36	8,00

Tablo 5.1: Robot kolunun farklı konumları için yüksüz haldeki atalet ve tork değerleri

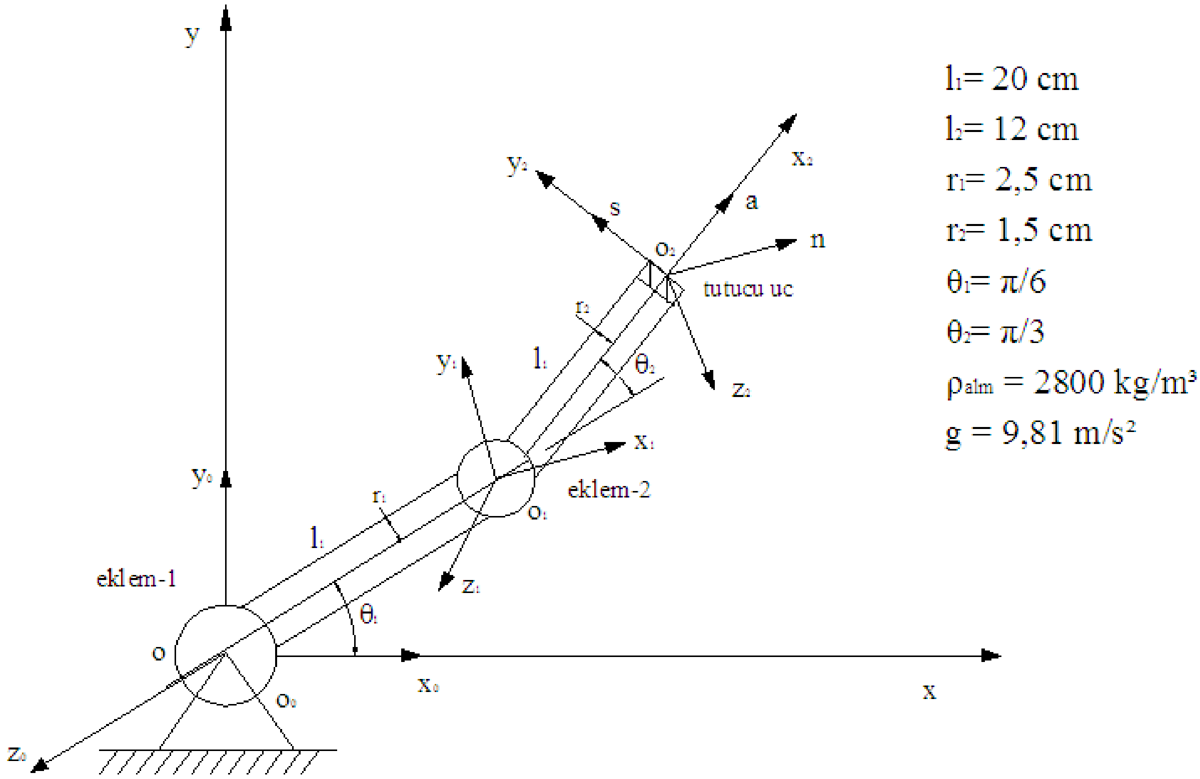
θ₂	**cosθ₂**	**D₁₁** x10⁻²	**D₁₂** x10⁻²	**D₂₂** x10⁻²	I_t x10⁻²	I_f x10⁻²
0	1	1,212	1,92	0,72	1,212	7,00
90	0	9,72	0,72	0,72	9,72	9,00
180	-1	7,32	0,48	0,72	7,32	2,48
270	0	9,72	0.72	0,72	9,72	9,00

Tablo 5.2: Robot kolunun farklı konumları için yülü haldeki atalet ve tork değerleri

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2 karşılıklı incelendiğinde robot kolunun yüklü ve yüksüz olması durumların için ataletler ve uzuvlara gelen tork değerleri görülmektedir. Robot kolunun yüklü olması durumunda uzuv ataletlerini arttığı görülmektedir. Ancak robot kolunun farklı konumları için eklemlere gelen torklar farklılık göstermektedir. Örneğin θ_2 açısının 90° ve 270° değerleri için 2 no lu ekleme gelen tork değerleri artarken, 0° ve 180° değerleri için azalma görülmektedir. Aynı şekilde θ_2'nin 180° değeri için 1 no lu ekleme gelen tork azalırken 0°, 90° ve 270° değerleri için artış görülmektedir.

Sonuç olarak söylenebilir ki; robot kolunun yüksüz veya yüklü olması durumlarında eklemlere gelen tork değerleri robot kolunun konumuyla bağlantılı olarak değişiklik göstermektedir. Ve robot kolunun eklemlerine gelen tork değerleri kolun tekil konumunda en fazla olmaktadır. Bu nedenle robot kolunun dinamik hareketi incelendiğinde kolun tekil konuma gelmeyecek şekilde tasarımının yapılması planlanır.

5.2. ROBOT KOLU SEÇİMİ



Şekil 5.2: İki Eklemli Robot Kolu

Şekil 5.2 ‘deki iki eklemli robot kolunun uzuvların kartezyen koordinatlardaki konumu ve uzvun gerçek ölçüleri görülmektedir. 1 ve 2 no lu eklemlere servo motorlar yerleştirilerek robot kolunun dinamik denklemleri elde edilecektir. Sistemin çalışmasına uygun motorlar kataloglardan seçilmiş ve teknik özellikleri ileride verilmiştir. Robot kolu için hesaplanmış olan değerler kullanılarak Matlab programı ile kinematik ve dinamik denklemlerin sonuçları elde edilecektir. Daha sonra ise Ansys programı kullanılarak 1 ve 2 no lu eklemlere gelen gerilme değerleri bulunacaktır.

Robot kolu için isotropik katı model ve 2017- Alüminyum alaşımı malzeme seçilmiştir.

Seçilen malzemenin özellikleri şu şekildedir;

Elastisite modülü $E = 72.10^9$ Pa

Poison oranı $\upsilon = 0.29$

5.2.1 Motor Seçimi ve Robot Kolunun Özellikleri;

1 no lu ekleme uygulanacak motor ;
TAMAGAWA-SEİKİ DC Servo Motor TS3551 TRE Series 100 W E8 [12]

Teknik Özellikler;
Torque Constant $K_T = 8{,}1.10^{-2}$ Nm/ A
Rated Torque $To = 0.319$ Nm
Friction Torque $Tf = 2{,}5.10^{-2}$ Nm
Maximum Torque $T_{max} = 1{,}80$ Nm
Atalet Momenti $J_M = 0{,}279.10^{-2}$ $kg.m^2$
Motor Ağırlığı $w_{1motor} = 2$ kg

Motor Akımı =
$I = (To + Tf) / K_T = (0{,}319 + 2{,}5.\ 10^{-2}) / 8{,}1.10^{-2} = 4.24$ A

Dişli Oranı ;
$Gr_1 = T_{max} / (K_T.\ I) = 1{,}80 / (8{,}1.10^{-2}\ .\ 4{,}24 = 5{,}24$

2 no lu ekleme uygulanacak motor;
TAMAGAWA-SEİKİ DC Servo Motor TS3252 TRE Series 60 W E6 [12]

Teknik Özellikler;
Torque Constant $K_T = 5{,}7.10^{-2}$ Nm/ A
Rated Torque $To = 0.191$ Nm
Friction Torque $Tf = 1{,}7.10^{-2}$ Nm
Maximum Torque $T_{max} = 1{,}10$ Nm
Atalet Momenti $J_M = 0{,}157.10^{-2}$ $kg.m^2$
Motor Ağırlığı $w_{2motor} = 0{,}74$ kg

Motor Akımı =
$I = (To + Tf) / K_T = (0{,}191 + 1{,}7.\ 10^{-2}) / 5{,}7.10^{-2} = 3{,}65$ A
Dişli Oranı ;
$Gr_1 = T_{max} / (K_T.\ I) = 1{,}10 / (5{,}7.10^{-2}\ .\ 3{,}65 = 5{,}28$

Yer Vektörleri:

Şekil ‘ den 1 ve 2 nolu uzvun yer vektörleri şu şekilde tanımlanabilir.

r_{1x} = 0.10 m, r_{1y} = 0.025 m,

r_{2x} = 0.06 m, r_{2y} = 0.015 m,

Uzuvların Hacimleri:

$V_1 = \pi . r_1^2 . l_1 = \pi.(0{,}025)^2.0{,}20 = 3{,}927.10^{-4}$ m^3

$V_2 = \pi . r_2^2 . l_2 = \pi.(0{,}015)^2.0{,}12 = 0{,}848.10^{-4}$ m^3

Uzuvların Ağırlıkları:

$w_1 = V_1.\rho_{alm} = 3{,}927.10^{-4}.2800 = 1{,}01$ kg

$w_2 = V_2.\rho_{alm} = 0{,}848.10^{-4}.2800 = 0{,}237$ kg

Uzuvların Kütleleri:

$m_1 = w_1 / g = 1.01 / 9{,}81 = 0{,}112$ $kg.s^2 / m$

$m_2 = w_2 / g = 0.237 / 9{,}81 = 0{,}024$ $kg.s^2 / m$

Uzuvların Ataletleri:

1 nolu uzuv için;

$W_1 = w_1 + w_{1motor} = 1{,}01 + 0{,}80 = 1{,}81$ kg

$I_{xx} = ½. W_1. r_1^2 = ½.1{,}81.(0{,}025)^2 = 0{,}056$ kgm^2

$I_{yy} = ½. W_1. (3r_1^2 + l_1^2) = ½.0{,}50.(3.(0{,}025)^2 + (0{,}20)^2) = 0{,}034$ kgm^2

2 nolu uzuv için;

$W_2 = w_2 + w_{2yük} = 0{,}237 + 0{,}263 = 0{,}50$ kg

(Taşınmak istenen yük ağırlığı maksimum 0.263 kg olarak belirlenmiştir.)

$I_{xx} = ½. W_2. r_2^2 = ½.0{,}50.(0{,}015)^2 = 0.56. 10^{-4}$ kgm^2

$I_{yy} = ½. W_2. (3r_2^2 + l_2^2) = ½.0.50.(3.(0.015)^2 + (0.12)^2) = 0.628.10^{-3}$ kgm^2

5.2.2 Motor Sürtünme Değerleri:

Coulomb sürtünme değeri(B);

Coulomb sürtünmenin x-yönündeki değeri, motor friction tork(T_f) değerinin %20 fazlası olarak alınır. y-yönündeki değeri ise bu değerin %8 eksik değeridir ve negatif yönde seçilir [10].

1 no lu motor için;

T_{cx1} = Tf x 1.2 = $2{,}5.10^{-2}$ = 0.03 Nm

T_{cy} = -T_{cx1} x 0.92 = 0.03.0.92 = -0.0275 Nm

2 no lu motor için;

T_{cx2} = Tf x 1.2 = $1{,}7.10^{-2}$ = 0.0204 Nm

T_{cy} = -T_{cx2} x 0.92 = 0.0204.0.92 = -0.0187 Nm

Viscous sürtünme değeri(B);

Viscous sürtünme değeri, coulomb sürtünme değerinin %55 kadarı olarak alınır [11].

1 no lu motor için;

B = T_{cx1} x 0.55 = 0,03x0,55 = 0,0165 Nm

2 no lu motor için;

B = T_{cx2} x 0.55 = 0,0204.0,55 = 0,01122 Nm

5.3 ROBOT KOLUNUN MATLAB İLE ÇÖZÜMLEMESİ

5.3.1 Matlaba Giriş

Şekil 6.1 ’de verilen iki eklemli robot kolu için Matlab programı ile çözüm yapmabilmek amacıyla gerekli olan değerler bölüm 5.2 ‘de hesaplanmıştır. Robot kolunun Matlab programı için yazılan planar isimli program EK1 ‘de verilmiştir. Sisteme tanıtılan robot kolu için matlab içerisinde alt programlar oluşturularak sistemin düz kinematik, ters kinematik, homojen dönüşüm, jakobiyen matris, animasyon, düz dinamik ve ters dinamik analizleri yapılmıştır.

5.3.2 Transformasyonlar

```
L =
   [1x1 link]    [1x1 link]
qz =
    0     0
qr =
        0    1.0472
qstretch =
        0    1.5708
planar =
planar (2 eklemli, RR) [Unimation] <params of 8/95>
                    grav = [0.00 0.00 9.81]                  standard D&H parameters
  alpha              A                theta            D              R/P0.000000   0.200000
0.523599        0.000000       R0.000000     0.120000       1.047198       0.000000
Translasyon matrisi
   transl(0.5, 0.0, 0.0)
ans =
    1.0000         0         0    0.5000
         0    1.0000         0         0
         0         0    1.0000         0
         0         0         0    1.0000
```

Y ekseninde 90 derece dönme;

```
   roty(pi/2)
ans =
   0.0000         0    1.0000         0
        0    1.0000         0         0
  -1.0000         0    0.0000         0
        0         0         0    1.0000
```

ve Z ekseninde -90derece dönme

```
   rotz(-pi/2)
ans =
   0.0000    1.0000         0         0
  -1.0000    0.0000         0         0
        0         0    1.0000         0
        0         0         0    1.0000
```

bunlarin carpimi hesaplanabilir

```
   t = transl(0.5, 0.0, 0.0) * roty(pi/2) * rotz(-pi/2)
t =
   0.0000    0.0000    1.0000    0.5000
  -1.0000    0.0000         0         0
  -0.0000   -1.0000    0.0000         0
        0         0         0    1.0000
```

Bu transformasyonlar yeni bir koordinatı temsil ederler.

Ana orjin (0, 0, 0) ‘a göre yeni bir koordinat tanımlanır.

```
      t * [0 0 0 1]'
ans =
   0.5000
        0
        0
   1.0000
```

Euler açıları

```
   tr2eul(t)
```

ans =

0 1.5708 -1.5708

veya roll/pitch/yaw acilari

tr2rpy(t)

ans =

-1.5708 0.0000 -1.5708

rotx(pi/2) * rotz(-pi/8) çarpımı aşağıdaki şekilde olur.

ans =

0.9239	0.3827	0	0
-0.0000	0.0000	-1.0000	0
-0.3827	0.9239	0.0000	0
0	0	0	1.0000

rotz(-pi/8) * rotx(pi/2)

ans =

0.9239	0.0000	-0.3827	0
-0.3827	0.0000	-0.9239	0
0	1.0000	0.0000	0
0	0	0	1.0000

5.3.3 Yörüngeler

Robot kolunun uygun açı ve hızda ilerleme zamanı;

Zaman, birinci ve ikinci uzvun hareketine uyumlu olarak tamamlanır.

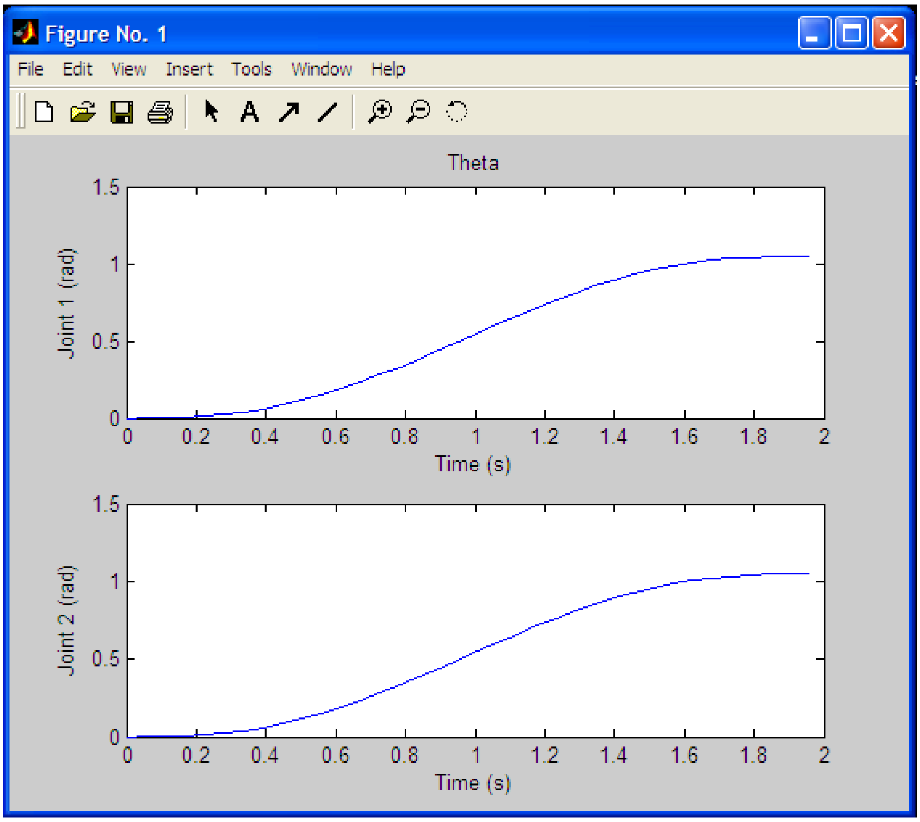
t = [0:.056:2];

her iki farklı hareket arasında uygun konumların tanımlanması,

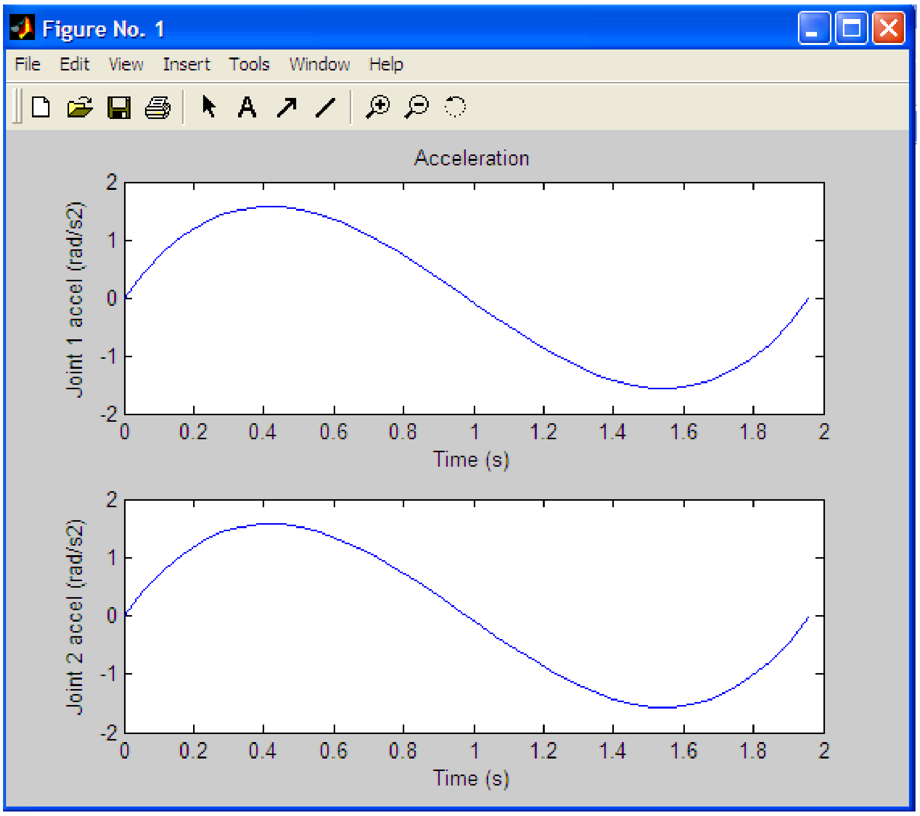
q = jtraj(qz, qr, t);

2. ve 3. nokta robot kolunun 1. ve 2.eklemlerine karşılık gelmektedir.

Her iki uzvun başlangıç noktası konum-zaman grafikleri şu şekildedir;



Şekil 5.3: 1 ve 2 no lu Uzuvların Açısal Konumlarının Zamana Bağlı Değişimi



Şekil 5.4: 1 ve 2 no lu Uzuvların Açısal İvme Değişimleri

5.3.4 Animasyon

Yapılacak animasyon için yörünge ve zaman denklemlerini yeniden yazarsak;

```
t = [0:.056:2]';        , zaman vektörü
q = jtraj(qz, qr, t);   , yörünge koordinatları
```

Robot resminin oluşturulması;

```
plot(planar, q);
```

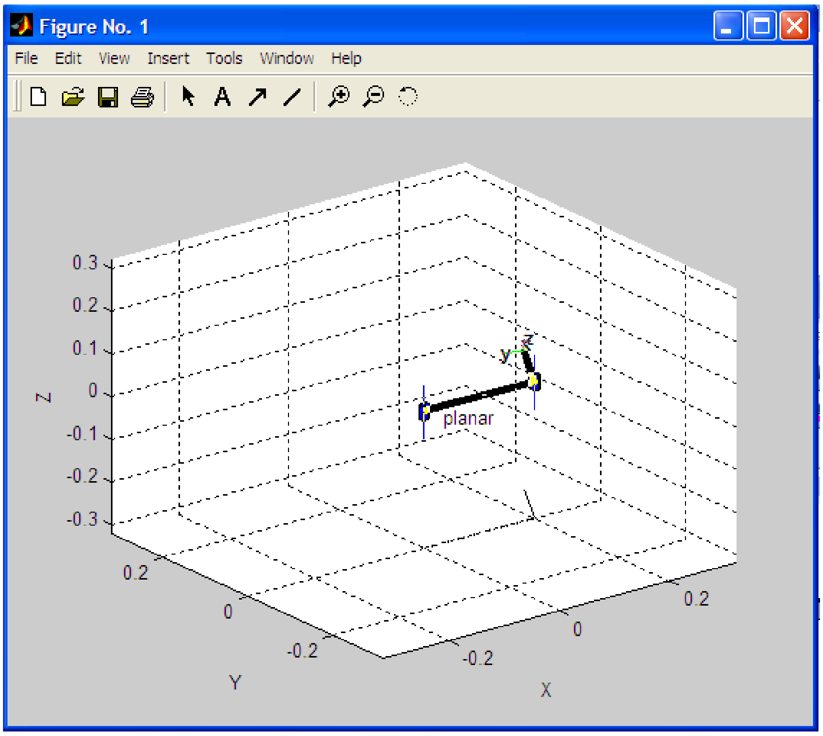
İki eklemli robot kolu hareketi belirli zaman ve peryotlar için tanınır. Robotun yer değişikliği aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

```
planar_2 = planar;
planar_2.name = 'another Planar';
planar_2.base = transl(-0.5, 0.5, 0);
hold on
plot(planar_2, q);
```

Robot kolu için oluşturulan planar dosyası sisteme yeniden tanıtılmıştır.

```
clf
plot(planar, qr);
figure
plot(planar, qr);
view(40,50)
plot(planar, q)
drivebot(planar)
scale =
     1
     1
```

Verilen ölçülerdeki robot kolu için 3 boyutlu gösterim aşağıdaki şekildedir.



Şekil 5.5: İki Eklemli Planar Robot Kolu 3 Boyutlu Gösterimi

5.3.5 İleri Kinematik

```
L =
   [1x1 link]    [1x1 link]


qz =
     0     0
qr =
         0    1.0472
qstretch =
         0    1.5708
planar =
planar (2 eklemli, RR) [Unimation] <params of 8/95>
                    grav = [0.00 0.00 9.81]                    standard D&H parameters
  alpha              A                    theta               D                R/P0.000000   0.200000
0.523599        0.000000        R0.000000      0.120000        1.047198        0.000000        R
```

İleri kinematik problemlerin çözümünde kartezyen pozisyonun ve mekanizmanın konumunun, eklem konumları ve kinematik durumlara göre bilinmesi gerekir.

Planar örneği tekrar düşünülürse, ve sıfır eklem koordinatları;

qz aşağıdaki gibidir;

```
   qz
qz =
     0     0
```

Kinematik tanımlama;

```
   fkine(planar, qz)
ans =
    1.0000         0         0    0.3200
         0    1.0000         0         0
         0         0    1.0000         0
         0         0         0    1.0000
```

Robot kolunun sonraki uzvunun homojen transformasyon haline geri dönülür.

Genel bir zaman vektörü;

t = [0:.056:2];

eklem koordinatları zamana göre birleştirilirse

q = jtraj(qz, qr, t);

eklem koordinatları için homojen transformlar verilirse;

T = fkine(planar, q);

örneğin, birinci eklem;

T(:,:,1)

ans =

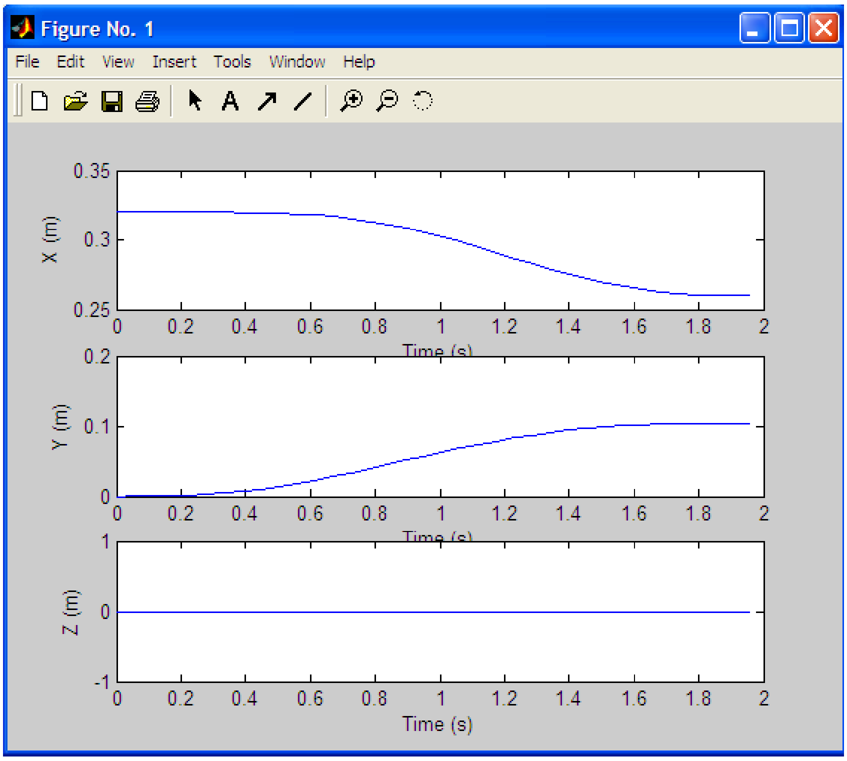
1.0000	0	0	0.3200
0	1.0000	0	0
0	0	1.0000	0
0	0	0	1.0000

ve onuncu noktada

T(:,:,10)

ans =

0.9932	-0.1162	0	0.3192
0.1162	0.9932	0	0.0139
0	0	1.0000	0
0	0	0	1.0000



Şekil 5.6: Son İşlemcinin (end-effector) Açısal Konum Değişimi

5.3.6 Ters Kinematik

Burada eklemlerin bulunduğu yer istenilen son koordinat için gösterilir.

```
plot(planar, q)
```

Ters kinematik analizde, robot kolunun sonraki uzvunun homojen transformasyon denklemleri verildiğinde, robot kolunun eklemlerinin koordinatları belirlenir.

İşlemcinin bulunduğu noktanın koordinatına göre ilk eklemin koordinatı belirlenir.

```
 q = [0 pi/6]
 q =
      0    0.5236
 T = fkine(planar, q);
 qi = ikine(planar, T);
```

robot kolu için basit matrisler gösterildi.

```
qi'
ans =
   0.0000
   0.5236
```

Orijinal kuvvet ile karşılaştırıldığında;

```
   q
q =
      0    0.5236
T = fkine(planar, qr);
   qi = ikine(planar, T);
   qi'
ans =
  -0.0000
   1.0472
qr
qr =
      0    1.0472
      1
```

Bununla birlikte her iki durum da aynı son-efekt sonucunu veriri.

```
fkine(planar, qi) - fkine(planar, qr)
```

```
ans =
  1.0e-016 *
        0         0         0         0
        0         0         0   -0.1388
        0         0         0         0
        0         0         0         0
```

Ters kinematikler trajectory için hesaplanmış olmalıdır.

Kartezyen yönde bir çizgi izlersek;

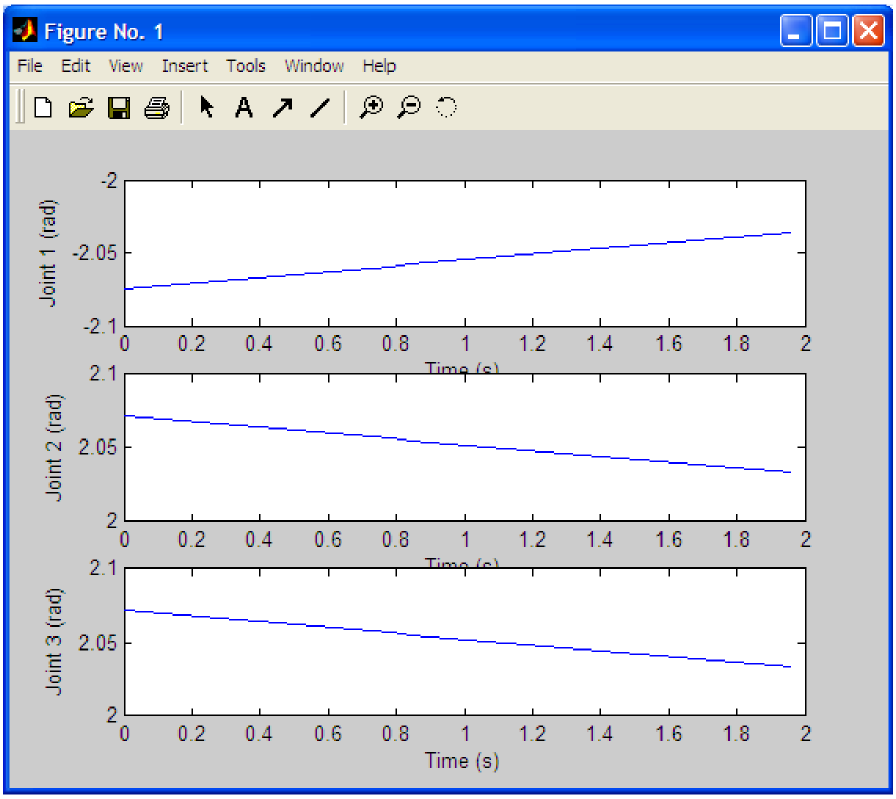
```
   t = [0:.056:2];                      , zaman vektörü yaratma
   T1 = transl(0.01, -0.2, 0)           , başlangıç noktası bulma
T1 =
   1.0000         0         0    0.0100
        0    1.0000         0   -0.2000
        0         0    1.0000         0
        0         0         0    1.0000

   T2 = transl(0.02, -0.2, 0)           , ve izlenecek yol
T2 =
   1.0000         0         0    0.0200
        0    1.0000         0   -0.2000
        0         0    1.0000         0
        0         0         0    1.0000

   T = ctraj(T1, T2, t/2);       , kartezyen yol bulunması
tic
   q = ikine(planar, T);
   toc
elapsed_time =
   1.0460
```

Bu noktanın animasyonu böylece tanımlanmış oldu.

```
plot(planar, q)
```



Şekil 5.7: Belirlenen Eksen Takımlarının Zamana Bağlı Konum Değişimi

5.3.7 Jakobiyenler

Jakobiyenler ve hareket denklemleri;

İki uzuvlu düzlemsel manipulator vektör elemanları,

[dx dy dz drx dry drz]

şeklinde dir. Ve hareketin diferansiyel denklemlerini oluşturursak;

transl(dx,dy,dz) * rotx(drx) * roty(dry) * rotz(drz)

verilen jakobiyen matris denklemlerinden şu sonuçlar alınabilir;

```
D = [.1 .2 0 -.2 .1 .1]';
diff2tr(D)
ans =
        0   -0.1000    0.1000    0.1000
   0.1000         0    0.2000    0.2000
  -0.1000   -0.2000         0         0
        0         0         0         0
```

Bilinen denklemler kullanılarak D-H parametlereri yardımıyla dönüşüm denklemlerinin sonuçları elde edilir.

```
T = transl(100, 200, 300) * roty(pi/8) * rotz(-pi/4);
DT = tr2jac(T) * D;
DT'
ans =
  -29.5109   69.7669  -42.3289   -0.2284   -0.0870    0.0159
```

İki eklemli robot kolu için elde edilen homojen dönüşüm matrisi kare matris olmadığı için determinantı alınamaz. Bu nedenle elde ettiğimiz 6x2 boyutundaki matrisin 2x2 boyutundaki ilk kısımları kullanılarak determinant hesaplanır.

Robot kolunun hareketin için diferansiyel denklem matrisleri kartezyen koordinatlar için elde edilmiştir.

$$dX = J(q)\, dQ$$

iki eklemli robot kolu için planar adıyla yazılan program verilerine göre elde edilen sonuçlar şu şekildedir.

```
q = [0.1 0.75]
q =
   0.1000    0.7500

J = jacob0(planar, q)
J =
  -0.1101   -0.0902
   0.2782    0.0792
        0         0
        0         0
        0         0
   1.0000    1.0000
J = jacobn(planar, q)
J =
   0.1363   -0.0000
   0.2663    0.1200
        0         0
        0         0
        0         0
   1.0000    1.0000
```

Verilen değerler yeniden girilecek olursa;

```
J=[-0.1101   -0.0902 ;0.2782    0.0792]
  J =
     -0.1101   -0.0902
      0.2782    0.0792
    det(J)
ans =
    0.0164
    Ji = inv(J)
Ji =
    4.8370    5.5088
  -16.9906   -6.7242
```

Hareketin klasik kontrolu yapılırsa;

```
            dQ/dt = J(q)^-1 dX/dt
    vel = [1 0]';     x yönündeki yörünge hareketi
    qvel = Ji * vel;
    qvel'
ans =
    4.8370  -16.9906
```

d0X yazılırsa;

```
                        d2X = Jac(T2) d0X
    T2 = fkine(planar, q);         son nokta dönüşümü elde edilmiş olur.
    d6X = tr2jac(T2) *[1 0 0 0 0 0]';   iki serbestlik dereceli manipulator.
    d6X=[ 0.6600;-0.7513]
d6X =
    0.6600
   -0.7513
    qvel = Ji * d6X;
    qvel'
ans =
   -0.9463   -6.1619
```

Planar isimli program bu aşamada yeniden çağırılırsa;

```
   rank( jacobn(planar, qr) )
ans =
    2
   svd( jacobn(planar, qr) )
ans =
   1.4399
   0.1396
```

İki eklemli robot kolunun diferansiyel denklem çözümleri Matlab programı kullanılarak yukarıda verildiği şekliyle elde edilmiştir.

5.4 ROBOT KOLUNUN ANSYS İLE ÇÖZÜMÜ

5.4.1 Katı Modelin ANSYS Programı ile Oluşturulması

5.4.1.1 Eleman Tipi Seçimi

Main Menu: Preprocessor–ElementType–Add/Edit/Delete–Add/Solid/Tet10 node92

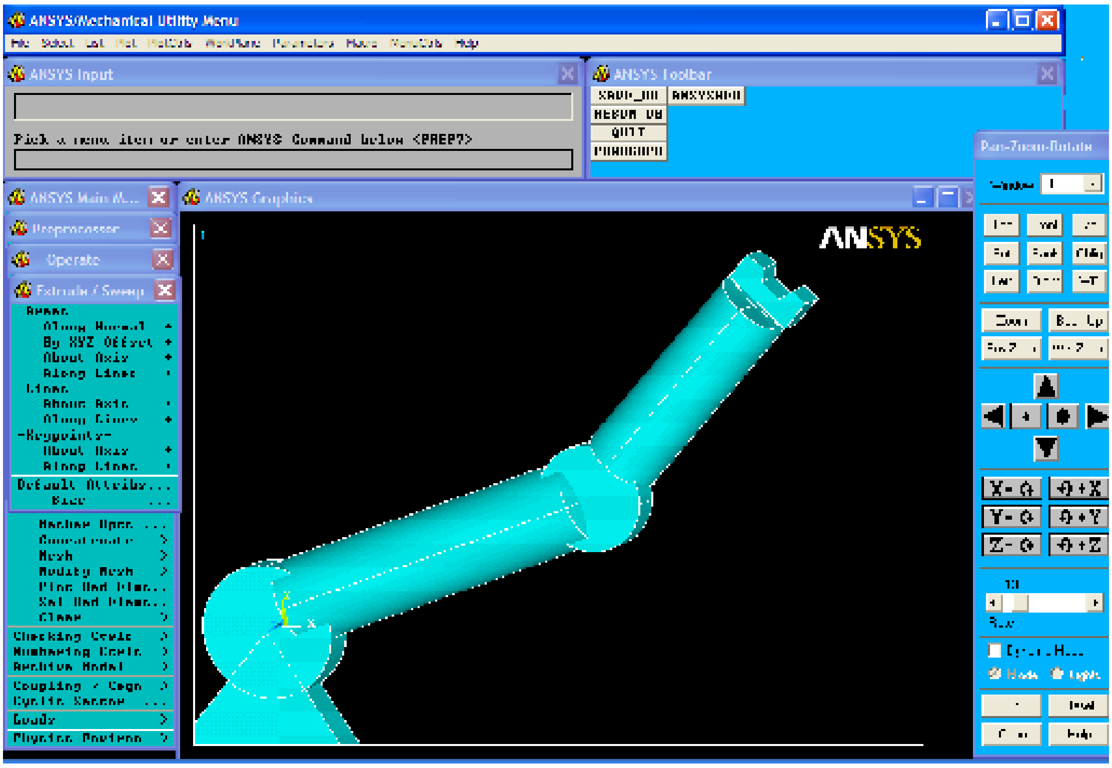
5.4.1.2 Malzeme Özelliğinin Girilmesi

Main Menu: Preprocessor – Material Props – Constant – Isotropic – $E=72.10^9$, $\nu = 0.29$

5.4.1.3 Katı Modelin Oluşturulması

Main Menu: Preprocessor – create – volume – x, y, z, r değerlerinin girilmesi

Katı modellemede; oluşturulacak katının sistemdeki koordinatları belirlenip sisteme girilmesiyle modelin son hali ortaya çıkmış olacaktır. Katı model oluşturulurken silindirik eksen takımının seçilmesine dikkat edilmelidir.

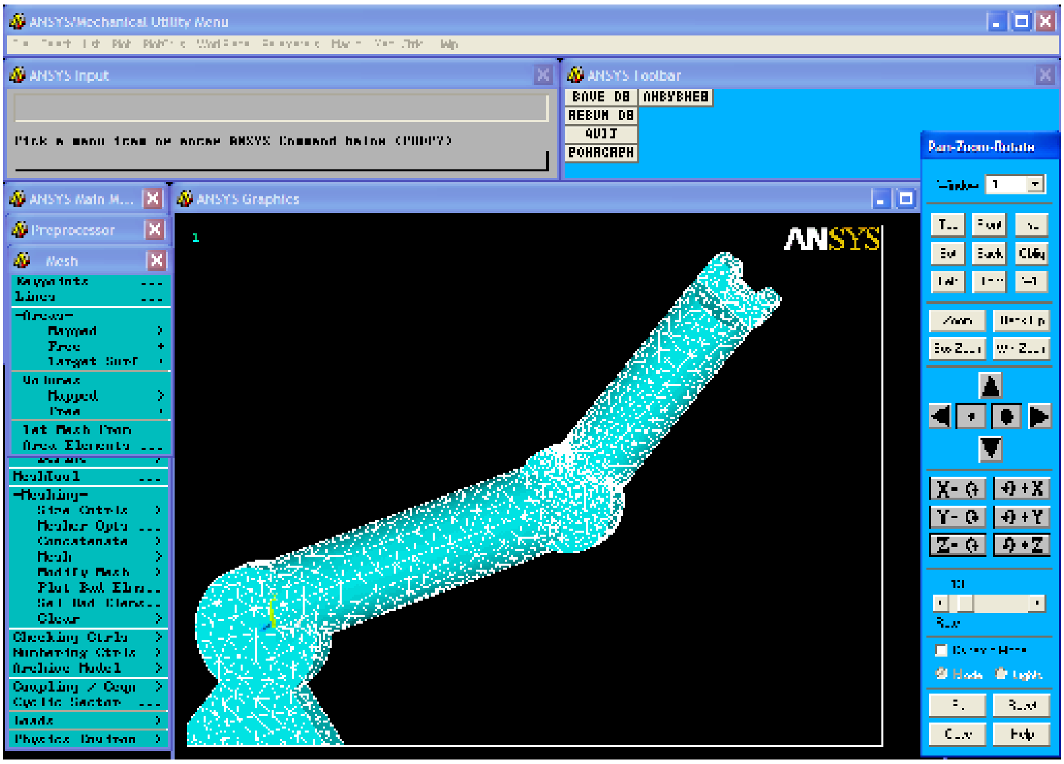


Şekil 5.8: Robot Kolunun ANSYS Katı Modeli

5.4.1.4 Katı Modeli Elemanlarına Ayırma

Main Menu: Preprocessor – Mesh Tool – Mesh

Katı model seçilerek elemanlarına ayırma işlemi tamamlanmış olur.



Şekil 5.9: Katı Modelin Elemanlarına Ayrılmış Hali (Mesh)

5.4.1.5 Sınır Şartlarının Verilmesi

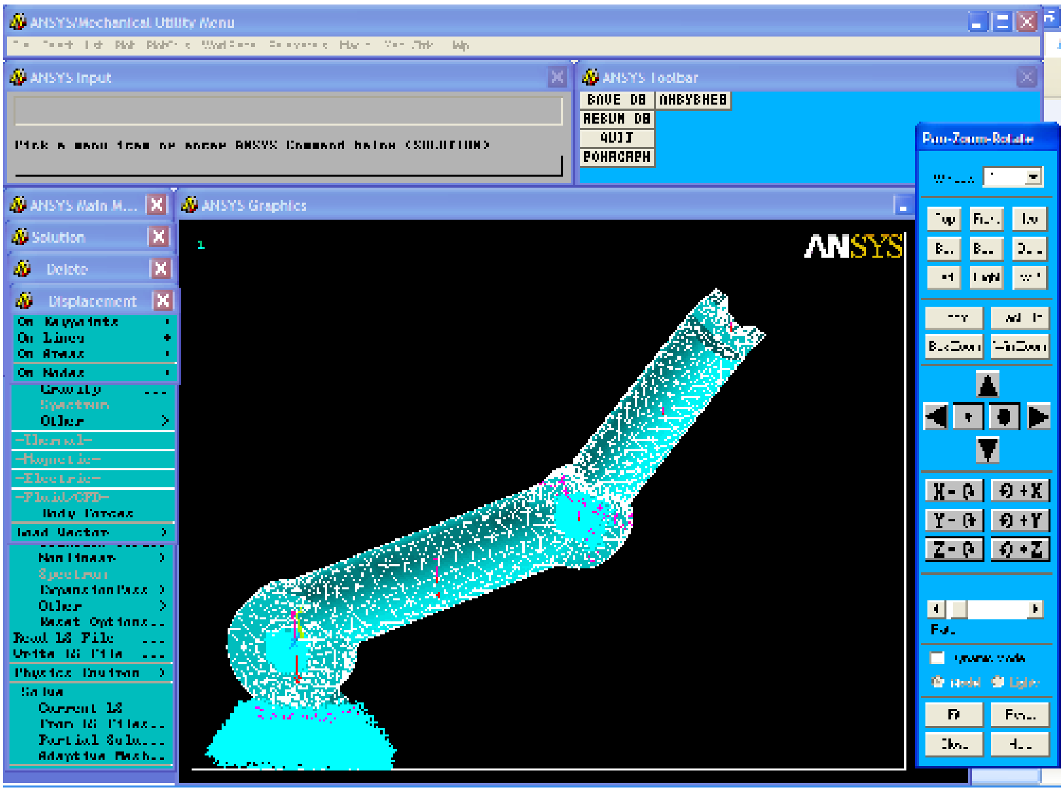
Main Menu: Solition – Loads – Structural – Displacement - On Nodes

Hareketsiz uzuv taban alanı ankastre edilerek modelin sistem içerisinde sabitlenmesi sağlanmış olacaktır. Ayrıca Robot kolunun her iki eklemi için ayrıca sınır şartı verilerek çözümleme yapılmıştır.

5.4.1.6 Kuvvetlerin Girilmesi

Main Menu: Solution – Loads – Structural – Force/moments - On Nodes

Uzuv-1, Uzuv-2 ağırlıkları G_1 = 1010 gr ve G_2 = 237 gr olarak, motor ağırlıkları w_{1motor} = 2000 gr ve w_{2motor} = 740 gr olarak ağırlık merkezlerindeki node'lara girilerek eklem noktaları kuvvete maruz kalacaktır. Ayrıca taşınacak yük için $w_{2yük}$ = 263 gr ağırlık son işlemci üzerine yerleştirilmiştir. Modelin sistemdeki son hali Şekil 6.3 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 5.10: Robot Kolunun Sınır Şartları ve Kuvvet Altındaki Görünüşü

5.4.1.7 Modelin ANSYS İle Çözümü

Main Menu: Solution – Current LS

Bu çözümleme ile birlikte dinamik modelin statik haldeki ve eksenel kuvvet altındaki davranışı incelenmiştir. Robot kolunun eklemlerine gelen kuvvetler ve gerilme analizleri ANSYS Programı ile çözümlenmiştir.

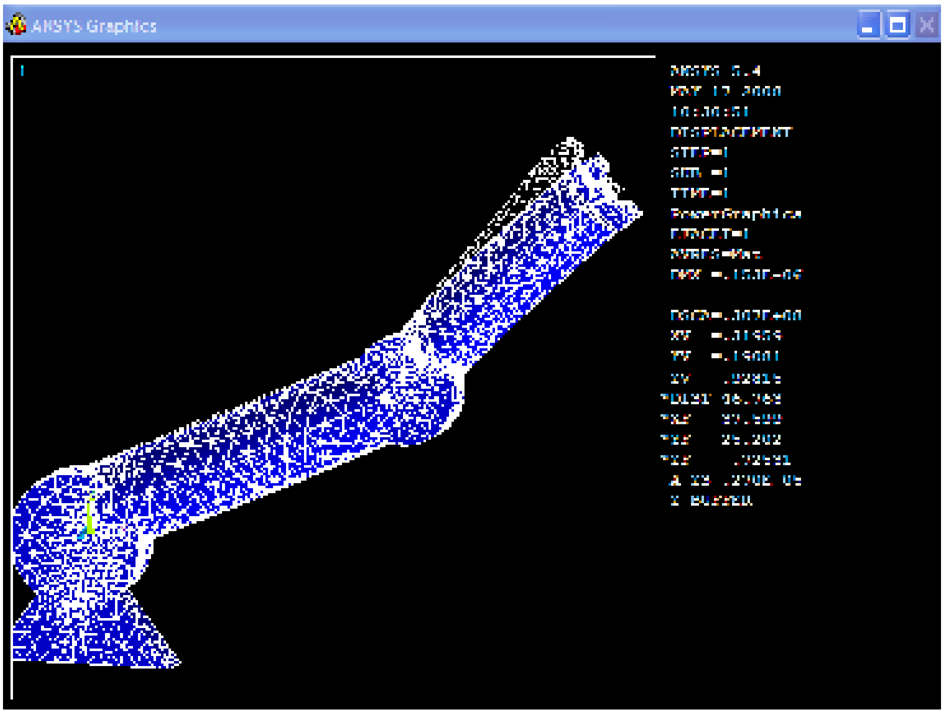
5.4.1.8 Sonuçların Alınması

Main Menu: General Post – Plot Result – Contor Plot

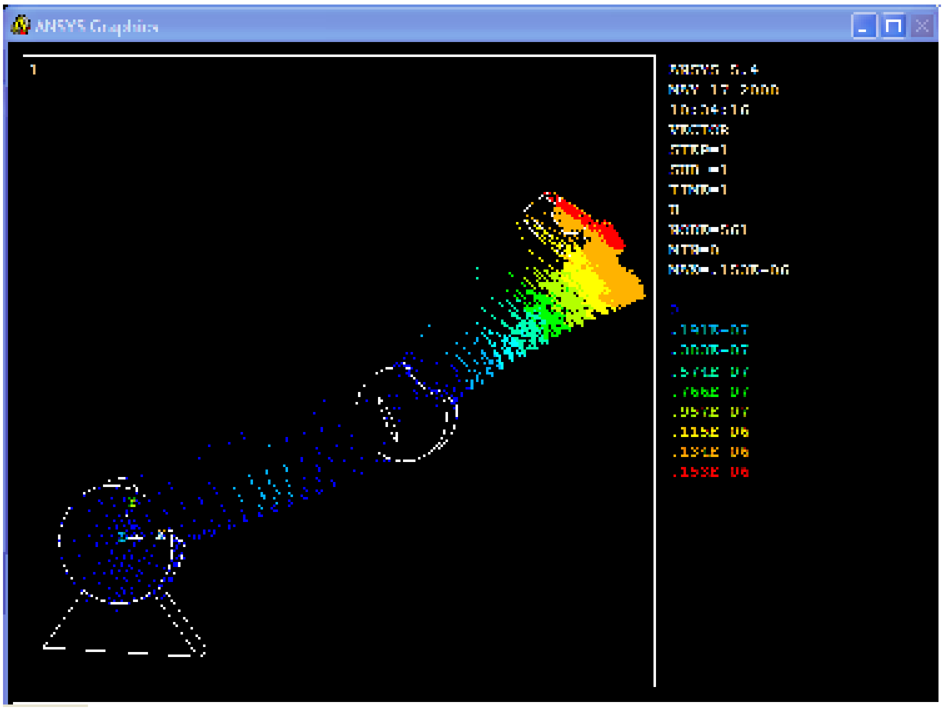
ANSYS çözümlemesi ile Robot kolunun değişik pozisyonlarındaki kuvvet ve gerilme analizleri grafiksel olarak gösterilmektedir. Model içerisinde belirlenen bir node, alan veya hacmin gerilme ve kuvvet analizleri görülebilmektedir.

5.4.2 Katı Modelin (Manipulatorun) ANSYS Çözümleme Sonuçları

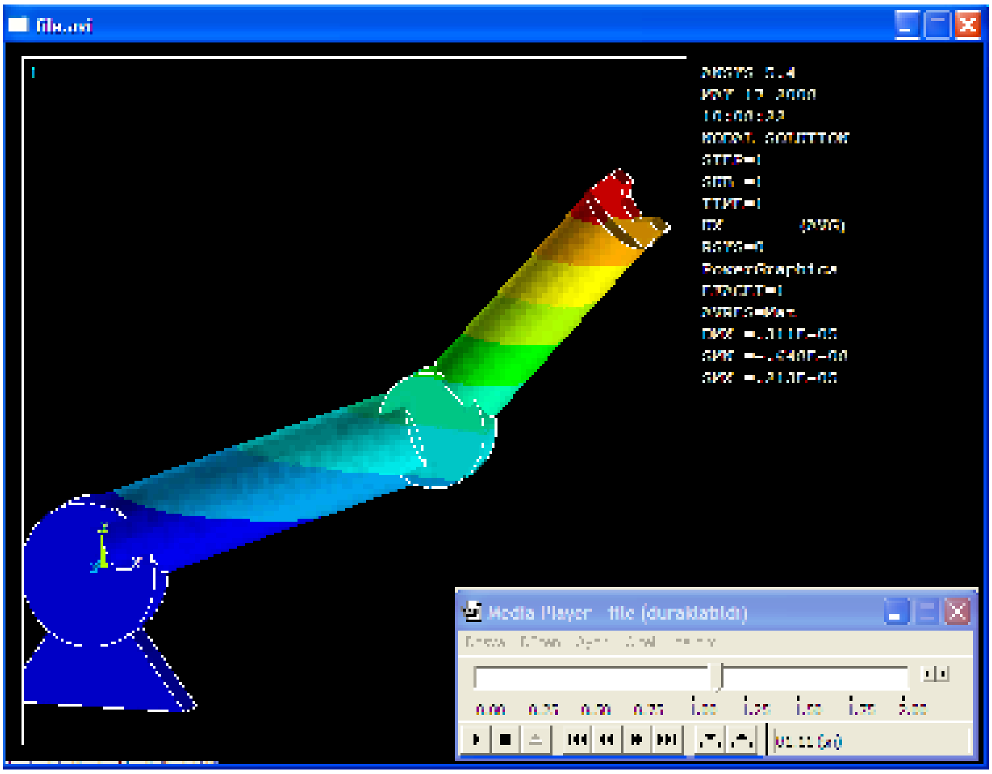
Eklemlere gelen kuvvetler, gerilme analizleri, kolun görsel hareketi Ansys programı ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.



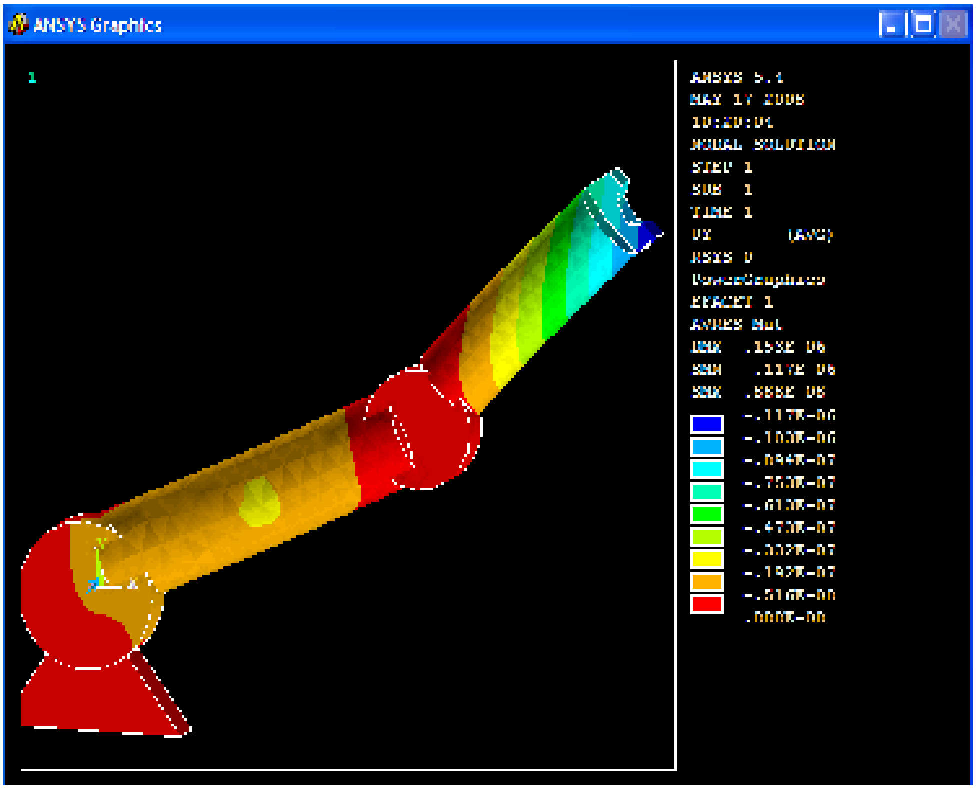
Şekil 5.11: Robot Kolunun Eksenel Yük Altındaki Davranışı



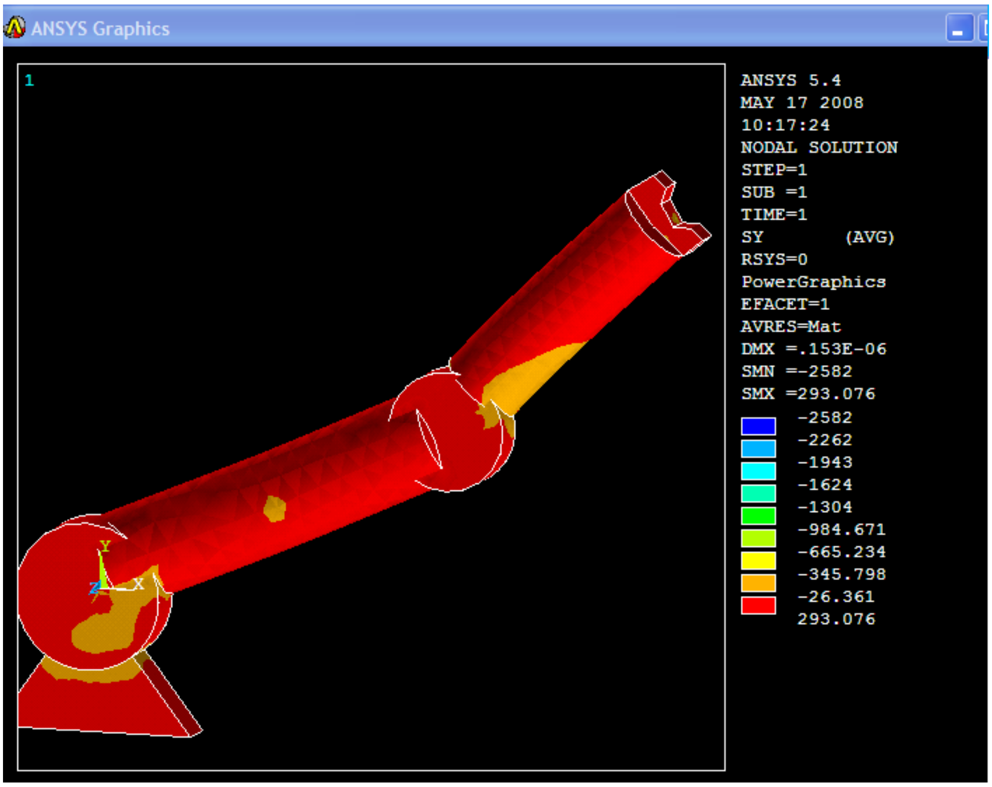
Şekil 5.12: Robot Kolu Üzerine Gelen Kuvvetler



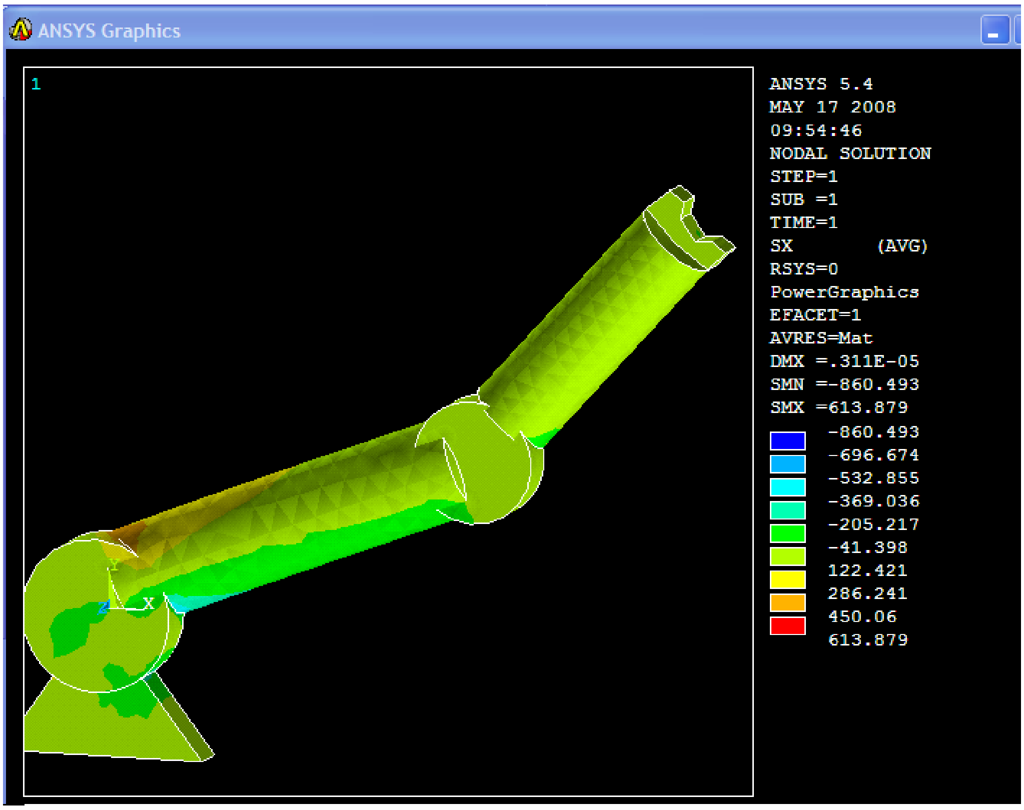
Şekil 5.13: Robot Kolu Hareketi Animasyon Görünümü



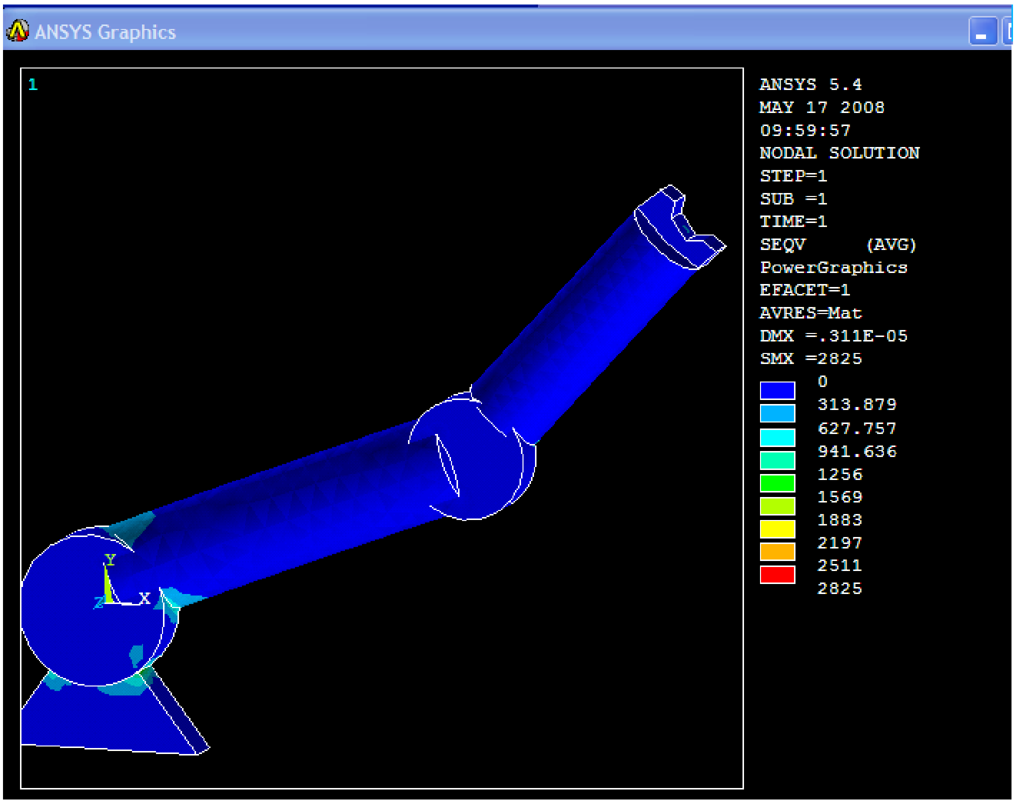
Şekil 5.14: Robot Kolu Düşey Yöndeki Toplam gerilmeler



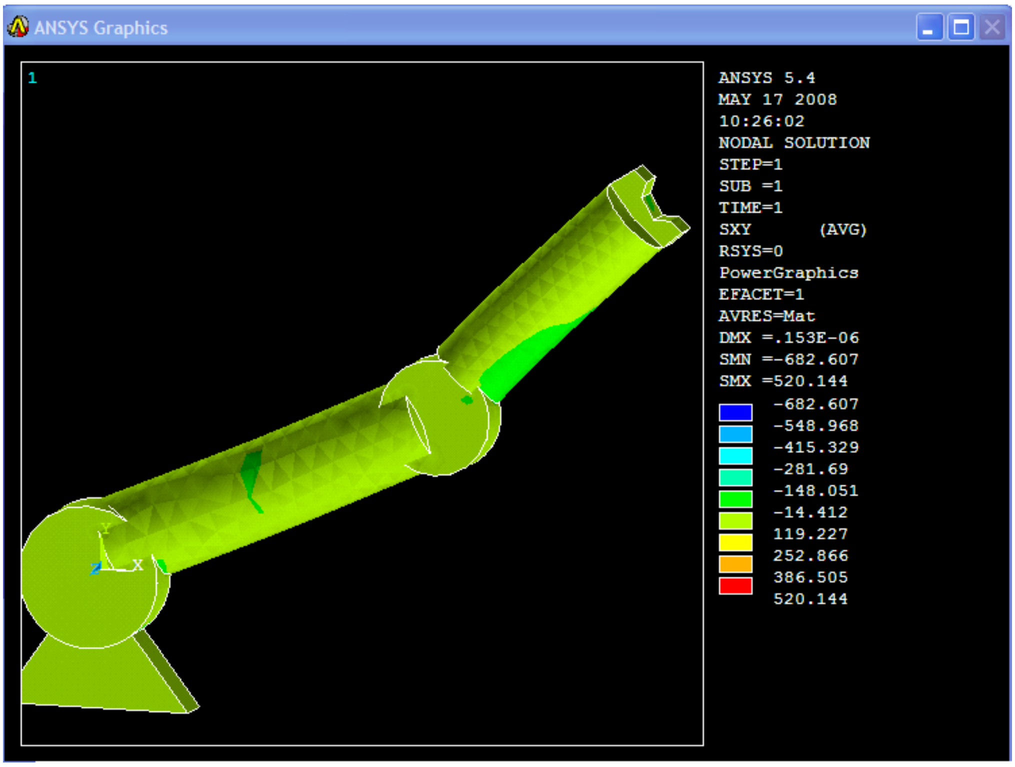
Şekil 5.15: Robot Kolu Eklemlerine Gelen Normal Gerilmeler



Şekil 5.16: Robot Kolu Eklemlerine Gelen Normal gerilmeler



Şekil 5.17: Robot Kolu 1 no lu Ekleme Gelen Normal Gerilmeler



Şekil 5.18: Robot Kolu 2 no lu Ekleme Gelen Normal Gerilmeler

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İki serbestlik dereceli planar robot kolunun Denavit-Hartenberg yöntemiyle ileri ve ters kinematik analizleri, Lagrange ve Newton-Euler denklemleri kullanılarak da dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Matematiksel olarak yapılan bu analizler daha sonra Matlab programı kullanılarak, ölçüleri ve teknik özellikleri belirlenen iki eklemli bir robot kolu için çözümlenmiştir. Tasarlanan robot kolu bilgileri Matlab programında planar adlı bir dosya oluşturularak yazılmıştır. Program EK1 'de verilmiştir. Analizi yapılan manipulator için ANSYS programı kullanılarak, robot kolu üzerine ve mafsal noktalarına gelen kuvvetler incelenmiştir. Robot kolunun bulunduğu pozisyona göre uygulanması gereken kuvvet ya da momentin, robot kolu üzerinde oluşturabileceği hasar ve eklemlerin zorlanma durumları gösterilmiştir. Hesapları yapılan planar robot kolunun Matlab ve Ansys programlarında animasyonları oluşturulmuştur.

Robotik sistemlerin esasını oluşturan robot kolunun adaptif kontrolü önem taşımaktadır. Çalışma esasları temelde kinematik ve dinamik analizlerin neticesi olarak gerçekleştirilen robot kolları ile bütünleşik sistemler kurularak endüstriyel alanda hızlı gelişmeler kaydedilebilecektir. Robot kolu uzuv sayısı arttıkça oluşturulan sistemin iş yapabilme kabiliyeti artacağından, daha fazla uzva sahip robot kolları için çözümlemeler yapılarak sistemin performansı artırılabilir. Bu çalışmada iki eklemli bir robot kolunun tasarlanmasında en zayıf bölge olan eklem noktalarına gelen kuvvetler görülmüştür. Çalışmamızda tasarladığımız iki eklemli robot kolu daha büyük boyutlarda analiz edilerek iş yapabilme gücü de artırılabilmektedir.

KAYNAKLAR :

1. **SPONG M. W. , VIDYASAGAR M.** , 1989 , " Robot Dynamics and Control ", John Wiley & Sons Inc. , 336 s.
2. **ASADA , H. , and SLOTINE J.E. ,** 1986 , Robot analysis and Control , John Wiley&Sons , New York
3. **PAUL R. P. ,** 1981 , " Robot Manipulators : Mathematics , Programming and Control " , MIT Press , 279 s.
4. **BEJEZY, A. K. ,** Robot Arm Dynamics and Control. NASA – JPL Technical Memorandum. 33-669. Feb. 1974.
5. **FU , K.S. , GONZALEZ , R.C. and LEE C.S.G. , 1987 , Robotics :** Control , Sessing , Vision and Intelligence , McGraw-Hill Book Company , New York
6. **S. BULUT and M.B. TERZIOGLU,** " Joint angle variations analyses of the two link planer manipulator in welding by using inverse kinematics ", *Robotica*, 2006, Vol. 24, 355-363.
7. **J. M. HOLLERBACK and S. GIDEON,** " Wrist-Partitioned inverse kinematic accelations and manipulator dynamics ". *Int. J. Rrobotics Res*., 4 , 61-76, 1983.
8. **HEMAMI, H., JASWA, V.C., and MCGHEE, R.B.,** "Some Alternative Formulations of Manipulator Dynamics for Computer Simulation Studies", *Allerton Conf. on Communication, Control and Computing*, Monticello, IL, Oct., 1975.
9. **SILVER, D.B.,** "On the Equivalence of Lagrangian and Newton-Euler Dynamics for Manipulators", *Int. J.Robotics Res.,* No. 2, 1982.
10. **S. AMSTRONG, O. KHATİP, and J. BURDİCK,** " The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm", *Stanford Artificial Intelligence Laboratory Stanford University*, Vol. 510-518.
11. **P. I. CORKE,** " A Search for Consensus Among Model Parameters Reported for the PUMA Robot ", Div. Manufacturing Technolog, CSIRO**,** *Preston*, 3072, Australia
12. www.tamagawa-seiki.co.ud

ÖZGEÇMİŞ

Bu tezi hazırlayan Merdin Danışmaz, Trabzon'un Araklı ilçesinde doğmuştur. İlköğrenimi Sahil İlköğretim Okulu'nda, liseyi Araklı Lise'sinde ve lisans öğrenimi Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yapmıştır.

Bekar ve özel bir şirkette Makine Mühendisi olarak çalışmaktadır.

EK1: ROBOT KOLU TASARIMI İÇİN MATLAB'DA YAZILAN PROGRAM (PLANAR)

```
clear L

L{1}=link([0 0.20 pi/6 0])
L{2}=link([0 0.12 pi/3 0])

L{1}.m=1.81
L{2}.m=0.50

L{1}.r=[0.10 0.025]
L{2}.r=[0.06 0.015]

L{1}.I =[ .056 .034 0 0 0 0]
L{2}.I =[ .056e-3 .0628e-3 0 0 0 0]

L{1}.Jm=27.9e-6
L{2}.Jm=15.7e-6

L{1}.G=-5.24
L{1}.G=5.28

% Viscous friction (motor referenced)

L{1}.B=0.0165
L{2}.B=0.01122


% Coulomb friction (motor referenced)

L{1}.Tc=[.03 -.0275]
L{2}.Tc=[.0204 -.0187]

% some useful poses qz=[0 0];
% zero angles, L shaped pose;

qz=[0 0]
qr=[0 pi/3]     % ready pose, arm up;
qstretch=[0 pi/2]

planar=robot(L,'planar','Unimation','params of 8/95')
clear L
planar.name='planar';
planar.manuf='Unimation';
```