

Beş Eklemlı Çapak Alma Robotu Tasarımı

Hüseyin Karaçalı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim 2012

Five-Joint Robot Arm Design

Hüseyin Karaçalı

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Electrical and Electronics Engineering

October 2012

Beş Eklemlı Çapak Alma Robotu Tasarımı

Hüseyin Karaçalı

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliğı Uyarınca
Elektrik Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı
Kontrol ve Kumanda Sistemler Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Osman Parlaktuna

Ekim 2012

ONAY

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hüseyin Karaçalı'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Beş Eklemlı Çapak Alma Robotu Tasarımı” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Osman Parlaktuna

İkinci Danışman :-

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Osman Parlaktuna

Üye : Prof.Dr. Abdurrahman Karamancıoğlu

Üye : Doç. Dr. Rıfat Edizkan

Üye : Y. Doç. Dr. Ahmet Yazıcı

Üye : Y.Doç. Dr. Metin Özkan

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Son yıllarda metal malzemelerin üretimi sırasında kullanılan çapak alma işlemleri genellikle el ile yapılmaktadır ve yaklaşık olarak toplam maliyetin %25'ni oluşturmaktadır (Chang, 2005). Bu maliyeti düşürmek ve yapılan çapak alma işlemini belirli bir standartta yapabilmek için çapak temizleme işlemlerinde robot kolu kullanımı artmaktadır. Bu çalışmanın amacı da, set üstü ocaklarda kullanılan döküm demir parçalarının üretiminde, üzerlerinde oluşan çapakları temizleyebilecek bir robot kolu tasarımı yapmaktır. Çapak almayla ilgili literatürdeki önceki çalışmalar incelenmiş, duruma uygun olan yöntemlerden yararlanılmış, çalışmanın özgün kısımları çalışmaya özel olarak uygulanmıştır. Tasarımı yapabilmek için robotların ileri ve ters kinematiği, **Jakobiyen** matrisi ve robotların dinamiği üzerinde durulmuştur. İleri kinematik ile robotun eklem değişkenleri kullanarak robotun uç noktasının pozisyon ve yönelmesi bulunurken, ters kinematik ile de uç noktasının pozisyon ve yönelmesi bilinirken eklem değişkenlerine ulaşılmaktadır. **Jakobiyen** matrisi ile eklemlerin hız ve ivmelerinin uç noktasının hız ve ivmesine katkıları incelenmektedir. Robotun dinamik hesaplarıyla da tasarlanan robot kolunun motor seçimi sağlanmıştır. Dinamik hesaplarda gerekli olan parametrelere, robotun **Solidworks** üzerinde çizimi yapılarak erişilmiştir. **Solidworks** dinamik hesaplarda gerekli olan, parçaların kütlelerini, kütle merkezlerini ve atalet momentlerini hesaplamada kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalar genellikle robot kolu kontrolü, yörünge planlaması ve ölçüm teknikleriyle ilgiliyken bu çalışmada özgün bir tasarım yapılması ve robotun hareketlerinin yumuşak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Robot, robot kolu, kinematik, Jakobiyen, robot dinamiği.

SUMMARY

In recent years, deburring of metal materials used during production is usually carried out by hand and constitutes approximately 25% of the total cost (Chang, 2005). To reduce costs and to make a certain standard deburring, using of the robot arm is increasing in the deburring and cleaning processes. The purpose of this study is to design a new robot arm for deburring and cleaning the burrs on cast iron materials. Previous studies in the literature related to deburring examined. To accomplish the design, forward and inverse kinematics of robots, Jacobian Matrix and dynamics of robots are emphasized. Using the joint variables of the robot, position and orientation of the robot end effector is calculated by forward kinematics. Using known position and orientation of the robot end effector, joint variables are calculated through inverse kinematics. Contributions of speed and acceleration of the joints to the velocity and acceleration of the end effector of are examined by Jacobian Matrix. Selection of the motor for designed robot arm is achieved by dynamic model of robot. The parameters needed for the dynamic calculations were reached by drawing robot on the Solidworks. Solidworks was used to calculate of mass, the centers of mass and the moment of inertia of the parts. Studies in the literature are usually related to robotic arm control, trajectory planning and measurement techniques. This study aimed to perform making an original design and smooth movements of the robot.

Key Words: Robot, robot arm, kinematics, Jacobian, the robot dynamics...

TEŞEKKÜR

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak yaptığım bu çalışmamda, gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Prof. Dr. Osman PARLAKTUNA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca sonsuz bir güven ve büyük bir sabırla desteğini esirgemeyen kadim dostum Kübra Başaran'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. İLERİ KİNEMATİĞİN HESAPLANMASI	7
2.1 Robotların Kinematik Analizi	7
2.2 Genel Tanımlamalar Ve Dönüşümleri	10
2.2.1 Konum, yönelim ve koordinat sistemlerinin tanımlanması	10
2.2.1.1 <u>Konum tanımı</u>	10
2.2.1.2 <u>Yönelim tanımı</u>	12
2.2.2 Genel dönüşümler	13
2.3 İleri Kinematik	15
2.3.1 Eklem değişkenlerinin belirlenmesi	16
2.3.2 Denavit-Hartenberg yöntemi	16
2.3.3 Eklemlere koordinat sistemi yerleştirilmesi	19
2.3.4 Eklem dönüşüm matrisi	20
2.3.5 Robot kinematığının çıkarılmasında uygulanan genel kurallar	22
2.3.6 Robotun ileri kinematik denklemlerinin hesaplanması	23
2.3.7 Robotun çalışma uzayının Matlab ortamında oluşturulması	27
3. TERS KİNEMATİĞİN HESAPLANMASI	28
3.1 Ters Kinematik Probleminin Yapısı	29
3.2 Ters Kinematik	30
3.2.1 Robotun ters kinematığının hesaplanması	30

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. JAKOBİYEN MATRİSİNİN HESAPLANMASI.....	34
4.1 Robot Manipulatörlerinin Komşu Eklemler Arasındaki Hız İlişkisi	34
4.2 Jakobiyen Elde Etme Yöntemleri.....	36
4.2.1 İteratif yöntem	38
4.2.2 Doğrudan türev yöntemi.....	39
4.2.3 Vektörel çarpım yöntemi	39
4.3 Başka Koordinat Sistemine Göre Jakobiyen Tanımlanması	40
4.4 Çapak Alma Robotunun Jakobiyen Matrisinin Hesaplanması.....	41
5. ROBOT SİMÜLASYONUNDA SOLİDWORKS KULLANIMI.....	45
6. ROBOT DİNEMATİĞİNİN HESAPLANMASI.....	52
6.1 Newton-Euler Formülasyonu	54
6.2 Lagrange-Euler Formülasyonu.....	57
6.2.1 Lagrange hareket denklemi	59
6.3 Çapak Alma Robotunun Dinamik Analizi.....	60
7. UYGULAMA	62
8. SONUÇ	94
KAYNAKLAR DİZİNİ	98
EKLER	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Set üstü ocakların üzerinde kullanılan ızgaralardan birisinin teknik resmi	1
2.1 Öteleme ve dönme hareketini gerçekleştiren eklem yapıları	7
2.2 a) Prizmatik eklemlerden oluşan robot	8
2.2 b) dönel eklemlerden oluşan robot.....	8
2.3 Robot ve çalışma uzayı	9
2.4 P noktasının $\{A\}$ koordinat sistemine göre tanımlanması	11
2.5 Bir cismin yöneliminin referans koordinat sistemine göre tanımlanması.....	12
2.6 Yönelimleri aynı fakat merkezleri farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi	14
2.7 Hem yönelimleri hem de merkezleri farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi	14
2.8 $(i-1)$, i bağlarının ve $(i-1)$, i , $(i+1)$ eksenlerinin yerleşimi.....	17
2.9 $(i-1)$ ve i eksenlerine koordinat sisteminin yerleştirilmesi.....	17
2.10 Z_{i-1} ile Z_i arasında X_{i-1} boyunca uzanan a_{i-1} bağ uzunluğu	18
2.11 X_{i-1} ile X_i arasında Z_i boyunca uzanan d_i bağ kaçıklığı.....	18
2.12 Z_{i-1} ile Z_i eksenleri arasındaki α_{i-1} bağ açısı	19
2.13 a_{i-1} ile a_i bağları arasındaki θ_i eklem açısı	19
2.14 a_{i-1} , α_{i-1} , d_i ve θ_i eklem değişkenlerinin belirlenmesi	21
2.15 Beş eklemlili robotun koordinat sistemlerinin yerleştirilmesi	24
2.16 Çalışma uzayının 3 boyutlu görüntüsü.....	27
3.1 İleri ve ters kinematik problemin şematik gösterimi	29
3.2 Matematiksel çözüm ile fiziksel çözüm arasındaki ilişki	29
5.1 Tasarlanan çapak alma robotunun montajlanmış hali.....	46

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.2	Tasarlanan çapak alma robotunun birinci bağı 47
5.3	Tasarlanan çapak alma robotunun birinci bağı'nın kütle özellikleri 47
5.4	Tasarlanan çapak alma robotunun ikinci bağı..... 48
5.5	Tasarlanan çapak alma robotunun ikinci bağı'nın kütle özellikleri 48
5.6	Tasarlanan çapak alma robotunun üçüncü bağı 49
5.7	Tasarlanan çapak alma robotunun üçüncü bağı'nın kütle özellikleri..... 49
5.8	Tasarlanan çapak alma robotunun dördüncü bağı..... 50
5.9	Tasarlanan çapak alma robotunun dördüncü bağı'nın kütle özellikleri 50
5.10	Tasarlanan çapak alma robotunun beşinci bağı 51
5.11	Tasarlanan çapak alma robotunun beşinci bağı'nın kütle özellikleri 51
6.1	Bağlar üzerinde oluşan kuvvet ve torklar 54
6.2	Kuvvet ve tork yayılımı 55
6.3	Bağ (i) üzerindeki dinamik kuvvetler 55
7.1	Doğrulardan oluşan yörünge 65
7.2	İleri kinematikle hesaplanan yörünge 65
7.3	Birinci eklemin açısındaki değişim..... 66
7.4	İkinci bağı'nın uzunluğundaki değişim 66
7.5	Üçüncü bağı'nın uzunluğundaki değişim 67
7.6	Birinci eklemin hızı..... 67
7.7	İkinci eklemin hızı 68
7.8	Üçüncü eklemin hızı 68
7.9	Birinci eklemin ivmesi 69

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.10 İkinci eklemin ivmesi	69
7.11 Üçüncü eklemin ivmesi.....	70
7.12 Birinci ekleme uygulanması gereken tork	70
7.13 İkinci ekleme uygulanması gereken tork	71
7.14 Üçüncü ekleme uygulanması gereken tork	71
7.15 Uç noktasının “x” yönündeki hızı.....	72
7.16 Uç noktasının “y” yönündeki hızı.....	72
7.17 Uç noktasının “x” yönündeki ivmesi	73
7.18 Uç noktasının “y” yönündeki ivmesi	73
7.19 Çembersel yörünge	75
7.20 İleri kinematikle hesaplanan yörünge	75
7.21 Birinci eklemin açısındaki değişim.....	76
7.22 İkinci bağın uzunluğundaki değişim.....	76
7.23 Üçüncü bağın uzunluğundaki değişim.....	77
7.24 Birinci eklemin hızı.....	77
7.25 İkinci eklemin hızı	78
7.26 Üçüncü eklemin hızı	78
7.27 Birinci eklemin ivmesi	79
7.28 İkinci eklemin ivmesi.....	79
7.29 Üçüncü eklemin ivmesi.....	80
7.30 Birinci ekleme uygulanması gereken tork	80
7.31 İkinci ekleme uygulanması gereken tork	81

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.32 Üçüncü ekleme uygulanması gereken tork	81
7.33 Uç noktasının “x” yönündeki hızı	82
7.34 Uç noktasının “y” yönündeki hızı	82
7.35 Uç noktasının “x” yönündeki ivmesi	83
7.36 Uç noktasının “y” yönündeki ivmesi	83
7.37 Doğru ve çember parçalarından oluşan yörünge.....	84
7.38 İleri kinematikle hesaplanan yörünge	85
7.39 Birinci eklemin açısındaki değişim.....	85
7.40 İkinci bağıın uzunluğundaki değişim	86
7.41 Üçüncü bağıın uzunluğundaki değişim	86
7.42 Birinci eklemin hızı.....	87
7.43 İkinci eklemin hızı	87
7.44 Üçüncü eklemin hızı	88
7.45 Birinci eklemin ivmesi	88
7.46 İkinci eklemin ivmesi.....	89
7.47 Üçüncü eklemin ivmesi.....	89
7.48 Birinci ekleme uygulanması gereken tork	90
7.49 İkinci ekleme uygulanması gereken tork	90
7.50 Üçüncü ekleme uygulanması gereken tork	91
7.51 Uç noktasının “x” yönündeki hızı	91
7.52 Uç noktasının “y” yönündeki hızı	92
7.53 Uç noktasının “x” yönündeki ivmesi	92

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.54 Uç noktasının “y” yönündeki ivmesi	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 D-H Parametreleri belirlenmesi	22
2.2 Beş eklemlili robotun D-H parametreleri.....	24
4.1 Bir robotun genel açısal ve doğrusal hız denklemleri.....	36

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
$\{A\}$	A çerçevesi
$\text{Atan2}()$	Matlab'ta arctan fonksiyonu
$\{B\}$	B çerçevesi
$c\theta_i$	Kosinüs teta i
$\cos\theta_i$	Kosinüs teta i
∂X	X'in kısmi türevi
∂Y	Y'nin kısmi türevi
∂F	F'nin kısmi türevi
I_{C_i}	Atalet tensörünü
$\{i+1.\}$	i+1. Çerçeve
$\rho(r)$	Yarıçaptaki kütle dağılımı
q_i	i. eklemin genelleştirilmiş koordinatı
\dot{q}_i	i. eklemin genelleştirilmiş hızı
${}^A P$	Pozisyon vektörü
${}^A P_{\text{BORG}}$	B'nin A'ya göre pozisyon vektörü
${}^A R_B$	A'nın B'ye göre dönme matrisi
${}^{i+1} R_i$	i. Çerçevenin i+1. Çerçeveye göre dönme matrisi
r_{ii}	Dönüşüm matrisinin i. Satır i. Sütunun elemanı
$\sin\theta_i$	Sinüs teta i
$s\theta_i$	Sinüs teta i

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
τ	Eklem torkları
$\tau_i :$	Genelleştirilmiş i. Kuvveti
${}^{i-1}T_i$	i. Eklemin i-1. Ekleme göre dönüşüm matrisi
${}^i v$	i. Çerçeveye göre hız
${}^i v_N$	i. Çerçevenin N çerçevesine göre doğrusal hızı
\dot{v}_{C_i}	Kütle merkezinin doğrusal ivmesi
w_N	N çerçevesine göre açısal hız
${}^i w_N$	i. Çerçevenin N çerçevesine göre açısal hızı
\hat{X}_i	i. Çerçeveye göre X ekseninin birim vektörü
\hat{Y}_i	i. Çerçeveye göre Y ekseninin birim vektörü
\hat{Z}_i	i. Çerçeveye göre Z ekseninin birim vektörü
$\dot{\theta}$	Teta açısının türevi
θ_i	Teta i açısı
<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
D-H	Denavit-Hertenberg
F	Kuvvet veya moment vektörü
g	Yerçekimi ivmesi
(G-D)	Genelleştirilmiş D'Alambert

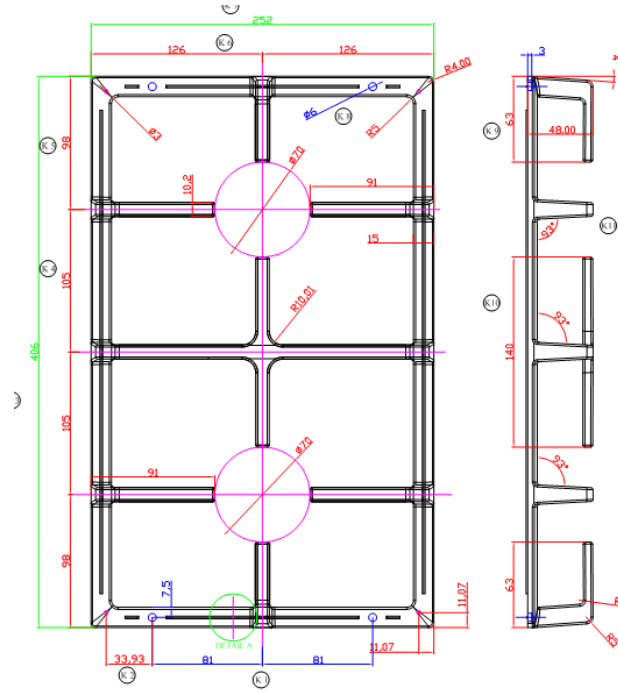
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
h	Yükseklik
J	Jakobiyen matrisi
J^{-1}	Jakobiyen matrisinin tersi
(L-E)	Lagrange-Euler
m	Kütle
(N-E)	Newton-Euler
p_x	Üç boyutlu uzayda x ekseninin pozisyon vektörü
p_y	Üç boyutlu uzayda x ekseninin pozisyon vektörü
p_z	Üç boyutlu uzayda x ekseninin pozisyon vektörü
R	Dönel matris
(R-L)	Özyinelemeli Lagrange(Recursive Lagrange)
P	Prizmatik
v	Hız
X	X eksen
Y	X eksen
Z	Z eksen

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı, Şekil 1.1’de görülen set üstü ocaklar üzerinde kullanılan döküm ızgaraların üretimi sırasında oluşan çapakları, ızgaradan uzaklaştırmayı sağlayacak olan bir robot kolu tasarımı yapmaktır. Çapak temizlemekle ilgili literatür çalışması yapıldığında bu konuyla ilgili yapılmış çeşitli çalışmalar görülebilmektedir. Bunların bir kısmı hazır robot kolları kullanarak yazılım geliştirmeyi ya da yeni kontrol algoritmalarını önerirken bir kısmı da yeni bir sistem geliştirmeyi amaçlamışlardır.



Şekil 1.1 Set üstü ocakların üzerinde kullanılan ızgaralardan birisinin teknik resmi.

Feng-Yi Hsu ve Li-Chen Fu'nun 2000 yılında "Intelligent Robot Deburring Using Adaptive Fuzzy Hybrid Position/Force Control" isimli çalışmalarında uyarlamalı bulanık hibrit pozisyon/kuvvet kontrolü kullanarak çapak temizleme için öneride bulunmuşlardır. Yapılan çalışmanın amacı çapak alma sürecinin karmaşıklığını giderecek kesin bir yol bulmak olarak dile getirilmiştir. Bu çalışma, uyarlamalı bulanık

kontrol yaklaşımı kullanarak robot kollarının hibrit pozisyon/kuvvet kontrollerinin yeni bir tasarımını önermektedir. Önerilen kontrol mimarisi robotun hareketlerine otomatik olarak karar veren dışsal bir döngüye sahip bir birim ile çapağın ne derinlikte temizlenmesi gerektiğine karar veren içsel döngüye sahip başka bir birimden oluşmaktadır. Önerilen uyarlamalı bulanık kontrolör köşe noktalarındaki belirsizlikleri giderebilen B-spline fonksiyonlarını kullanarak kapalı döngü sistemlerin kararlılığını garanti etmektedir. Geliştirilen çalışmada etkinliği sağlamak adına, çapak temizlemek için hazır endüstriyel robot kolu kullanıldığı görülmektedir. Çalışma sonucunda, robot kolunun kesici parçası ile kesilen parçanın köşesi arasında kuvvet dinamiği ile ilişki kuran ve robot dinamiğinin incelenmesini iyileştiren bir uyarlamalı bulanık hibrit pozisyon /kuvvet kontrolörünün önerildiğinden bahsedilmektedir. Ayrıca yumuşak bulanık kontrole sahip kontrolörlerin sahip olmayanlara karşı daha iyi bir performans sergilediğinden de söz edilmektedir. Bahsedilen bu çalışma çapak alma için farklı bir kontrol mekanizması önermektedir. (Hsu and Fu, 2000)

Literatürdeki başka bir çalışma da Nirosh Jayaweera ve Phil Webb tarafından 2011 yılında “Robotic Edge Profiling of Complex Components” ismiyle yapılmıştır. Çalışmanın amacı aero-motor parçalarının üzerinde oluşan çapakları otomatik olarak temizleyebilecek bir sistem geliştirmek ve bu sistemi test etmektir. Çalışmada bahsedilen sistem kullanılmadan önce çapakların temizlenmesi istenilen noktaların tespiti için in-proses olarak adlandırılan ölçüm sensörlerinin kullanıldığından söz edilmiştir. Ayrıca sistemin özü, gerekli olan robot yörüngesinin oluşturulması için bir dizi algoritma olarak açıklanmıştır. Çalışma aero-motor parçaları üzerindeki çapakları temizlemek için temassız ölçme teknikleri ile matematiksel işlem standartlarının bir arada robot kollarında kullanılabildiğini ortaya koymaktadır. Ek olarak çalışmanın gerçek zamanlı çapak temizlemeyi etkili bir şekilde yapmayı sağladığından söz edilmiştir. Bahsedilen bu çalışma, özetle çapak temizleme için yörünge oluşturma önerisi vermektedir. (Jayaweera and Webb, 2011)

Literatürdeki farklı bir makale de Mohammad Mohammad tarafından 2008 yılında “Modeling a Deburring Process, Using DELMIA V5®” ismiyle yayımlanmıştır. Bu çalışma bir robot uygulaması ile entegre bir çapak alma sürecini irdelenmiştir. Konvansiyonel çapak alma süreçlerinin sanayinin bitirme süreçlerinde yıllardır kullanıldığına değinilmiş, bu çapak alma işlemlerinin zahmetli, tutarsız ve hatalı

olabildiği üzerinde durulmuştur. Bu süreçlerde otomasyon kullanımının ise çok yararlı olduğundan söz edilmiştir. Süreçlerin içerisine robotların dahil edilmesinin, süreçleri daha esnek ve uygun hale getirdiği söz konusu edilmiştir. Bu çalışmada, ürün yaşam döngüsü aracı DELMIA® kullanarak köşelerdeki çapakların temizlenmesi için simülasyon çalışması yapıldığından bahsedilmiştir. Çalışmada süreç bitim işlem planı oluşturmak için belirli özellikler ortaya koyulmaktadır. Çalışmaya göre oluşturulan yörünge gerçek donanıma yüklenmeden önce robotun çevresi ve çarpışma bölgeleri belirlenir. Daha sonra da temizleme simülasyonu oluşturulur. Sonrasında da belirlenen yola göre robotun temizleme aparatı simüle edilir. Bu çalışmanın amacı el ile yapılan işlemlerin off-line simülasyon yardımıyla yapılmasını sağlamak olarak açıklanmıştır. Sonuç olarak DELMIA® sayesinde sanal çevre içerisinde çapak alma işleminin simülasyonunun sağlandığından bahsedilmiştir. Otomatik çapak alma işleminin sağlıklı ve güvenilir sonuçlar verdiğiğine değinilmiştir. Fakat konvansiyonel makineler için bu yöntemin zor ve zahmetli olduğundan da söz edilmiştir. (Mohammad, 2008)

Çapak almayla ilgili, 2009 yılında Jure Rejc, Justin Cinkelj ve Marko Munih tarafından “Dimensional Measurements of a Gray-Iron Object Using A Robot and a Laser Displacement Sensor” ismiyle yayımlanan başka bir makale de mevcuttur. Bahsedilen bu çalışma endüstriyel SCARA robotu kullanarak gri-demir parçaların çapaklarının temizlenmesinde temassız boyutsal ölçüm sistemi araştırması yapmaktadır. Bu sistem için özel bir çekirdek sürücüsü ve dinamik ilişkili bağlantı kütüphanesi hazırlanmıştır. Lazer ölçümlerinin kullanımı robot koordinat sistemlerinin örneklenmesinde daha hassas sonuçlar vermektedir. Taranmış verileri kullanarak çapak alma noktalarının koordinatlarının hesaplama onarımı için başka bir program yazılmış, polinom yaklaşımı için tekil yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Robot ölçüm sisteminin doğruluğunu karşılaştırmalı olarak sağlamak için ölçümler bir koordinat ölçme cihazı ile belirli bir referans küp üzerinde yapılmıştır. Gerçek gri demirli ocaklar üzerinde karşılaştırmalı ölçümler de yapılmıştır. Hesaplamaların çapak alma robotu için uygun olduğundan söz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda bir lazer ve bir endüstriyel robot kullanarak gri demirli parçaların temassız boyutsal ölçümünü yapabilen bir sistemin geliştirildiğinden bahsedilmiştir. Çalışmanın robotun yüksek hızlı hareketlerinde de kayıpsız sonuçlar verdiğiğine değinilmiştir. Koordinat ediniminin doğruluğu ve sağlamlığı bir polinom ile temin edilmiştir. Bu temassız sistem, CMM(Coordinate-

Measuring Machine) yaklaşımı ile kıyaslandığında daha hızlı olduğu; fakat CMM kadar kesin sonuçlar vermediği görülmüştür. Sistemin aynı zamanda montaj parçalarının kontrol edilmesi ve diğer endüstriyel robotların kontrolünde kullanılabilmesine değinilmiştir. Özetle bu makale çapak alma için özel bir ölçüm metodu önerisi yapmaktadır. (Rejc, et al., 2009)

Farklı bir çalışma olarak K. M. Murphy, R. J. Norcross ve F. M. Proctor 1998 yılında “Cad Directed Robotic Deburring” isimli bir makale yayımlamışlardır. Amaç hazır bir robot kolu kullanarak, çapak alma işlemi için CAD programlarından faydalanılmasıdır. Bir operatör bir grafik ara yüzü kullanılarak, temizlenecek parçanın köşelerini, temizleme aparatlarını, robotun hareket hızını, kesme hızını ve istenilen temas gücünü belirlediği varsayılmıştır. Çapak alma yolları oluşturulup gerçek zamanlı kontrol sistemi tarafından Puma 760 robota gönderilmiştir. Robot çapak alma için iki-geçiş tekniği kullanmıştır. İlk geçişte robot, çapak alınacak noktaları düzeltmek için kuvvet geri besleme kullanır ve robotun kinematik hesaplarını, taşlama aparatının aşınmasını hesaplar ve temizleme yolunu bu bilgilere göre doğrular. İkinci geçişte robot doğrulanmış yolu kullanır ve çapakları temizler. Çalışma, çapak alma tekniğini, algoritmasını ve veri biçimlerini içermektedir. Bu çalışmanın daha önceki çapak alma tekniklerini daha esnek ve tekrarlanabilir yaptığından bahsedilmektedir. Ancak bu yöntem, çok çeşitli parçaları temizlemek için kullanıldığında, yöntemin her parçaya uyarlanması zahmetlidir. Çapak temizleme verileri, geometri ve sabit verilerle birleştirilerek otomatik olarak robot çapak temizleme yolları oluşturulur. NBS Real-Time Control Sistemi tarafından kontrol edilen bir Puma 760 robot, çapak alma için iki-geçiş tekniği kullanarak yukarıda bahsedildiği şekilde temizleme işlemini tamamlar. Bu yaklaşım, alüminyum ve pirinç parçaların çapak alma için etkili olduğu kanıtlanmıştır. Özetle bu çalışma yeni bir yol ve malzeme önerisi yapmaktadır. (Murphy, et al., 1998)

Yukarıda bahsedilen tüm bu çalışmalardan yararlanılarak ve problemimiz doğrultusunda belirtilen döküm demir parçalarının çapaklarını her bölgede temizleyebilecek robot kolu tasarımı yapmak amaçlanmıştır. Ayrıca robot kolunun uç noktasının pozisyonunun hızının ve ivmesinin de izlenebilir hale gelmesi düşünülmüştür. Diğer çalışmalardan farklı olarak sıfırdan bir tasarım yapılmış, tasarımda eklemlere uygun motor seçebilmek için de robot kolunun belirli bir yörüngeyi izlerken her eklemine uygulanması gereken torklar hesaplanmıştır. Bu amaçları

gerçekleştirmek için ızgaraların üzerindeki her noktayı içeren bir çalışma uzayını gerçekleyecek yapıda, bir robot kolu tasarımı yapılmıştır. Robotun düşünölen çalışma uzayı içerisinde istenilen her noktaya ulaşabilmesi için beş eklemli olmasına karar verilmiştir. İlk üç eklem, robotun ucundaki taşıma aparatının üç boyutlu uzayda istenilen koordinata gitmesini sağlarken, son iki eklem de robotun uç işlevcisinin ızgaraya istenilen yönelmede ulaşmasını sağlayacaktır. İlk üç eklem sırasıyla dönel, prizmatik, prizmatik yapılardan oluşurken, son iki eklem de basit bir bilek hareketi sağlayacak dönel eklemlerden oluşmaktadır. Kısacası tasarlanan kol RPPRR yapılı ve beş eklemli bir robot koludur. Robot kolunun kullanım amacı çapak temizleme olarak düşünüldüğü için tez içerisinde robot kolundan çapak alma robotu olarak da bahsedilmiştir.

Tasarımın gerçekleştirilebilmesi için belirli aşamaların sırayla yapılması gerekmektedir. Bu aşamalar aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Tüm maddeler sıralı olarak gerçekleştirilerek robot tasarımı sonuçlandırılmıştır.

1. İlk olarak robotun ileri kinematiğinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için de ileri kinematik hesaplarda kullanılacak koordinat eksenleri robota uygun şekilde yerleştirilmiştir.
2. Robot eklemlerine eklenen koordinat eksenleri yardımıyla robotun ileri kinematiği hesaplanmıştır.
3. İleri kinematikte elde edilen denklemlerle robotun çalışma uzay çıkarılmıştır.
4. Robotun ileri kinematiği eklemlerin sahip oldukları değişken değerlerine göre robot kolun uç işlevcisinin pozisyon ve yönelmesini istasyon noktasına göre vermektedir. Fakat gerçek hayatta kullanılacak bir robot kolu için bu bilgi yeterli değildir. Robotun uç işlevcisinin sahip olduğu pozisyon ve yönelmeye göre de eklem değişkenlerinin değerleri belirlenebilmelidir. Bunun için de ters kinematik hesaplara ihtiyaç vardır. İleri kinematik hesaplarından sonra robot kolunun ters kinematik hesapları yapılmıştır.
5. Ters kinematikten elde edilen denklemlerle çalışma uzayı içerisindeki her noktaya robot kolunun erişmesini sağlayan eklem değişkenlerinin değeri belirlenmiştir. Böylece robot kolunun çalışma uzayındaki her noktaya ulaşabildiği kanıtlanmıştır.

6. Robot kolunu somut uygulamalarda kullanmak için eklemlerinin sahip olması gereken değişken değerlerinin yanında eklemlerin açısai ve doğrusal hızları da bilinmelidir. Hızlara ulaşabilmek için de bu bilgiyi sağlayacak **Jakobiyen** matrisi hesaplanmıştır.
7. İleri ve ters kinematiği, çalışma uzayı ve eklem hızları hesaplanan robot kolunun her eklemi için uygun motor seçimini sağlayabilmek adına dinamik hesaplarına ihtiyaç vardır. Dinamik hesapları gerçeğe uygun yapabilmek için **Solidworks** ortamında robot kolun modellemesi yapılmıştır.
8. **Solidworks** ortamının da yardımı ile robot uzuvlarının gerçek kütlelerine, kütle merkezlerine ve atalet momentlerine ulaşılmıştır.
9. **Solidworks** ortamından gerekli bilgiler alınıp dinamik denklemlerde kullanılarak çapak alma robotunun eklem torkları bulunmuştur.
10. Son olarak uç noktasının hızlarına bakılarak uç noktasının ivmelenmesinin belirli bir bant aralığında kalması sağlanmıştır.

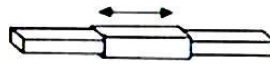
Tezin konu dağılımı şu şekildedir: Bölüm 1’de tezin amacından bahsedilmiştir. İstenilen parça üzerinde çalışabilecek robot kol şekli önerisi yapılmıştır. Bölüm 2’de robot kol tasarımında kullanılan kinematik incelemelere değinilmiştir. Özellikle ileri kinematik konusu açıklanmıştır. Ayrıca bölümün sonunda robot üzerinde uygulama şekli gösterilmiştir. Benzer şekilde bölüm 3’te ters kinematik konusu irdelenmiştir. Bölüm 4’te robot kol hareketinin hızı ile ilgili olan **Jakobiyen** matrisi üzerinde durulmuştur. Bölüm 5’te çapak alma robotunun bilgisayar ortamında simülasyonunu sağlayan **Solidworks** hakkında bilgi verilmiştir ve yapılan uygulama teze eklenmiştir. Bölüm 6’da, robot kolu için torkları hesaplamaya yarayan dinamik modellemeden bahsedilmiştir. Hesaplamalar bölümün sonunda gösterilmiştir. Bölüm 7’de, oluşturulan çapak alma robotu tasarımı ve matematiksel ifadeleri üç farklı yörünge kullanılarak test edilmiştir. Çıktılar incelenmiştir. Bölüm 8’de, elde edilen sonuçlar kullanılarak tasarlanan robot kolunun uygulanabilir olup olmadığına bakılmıştır. Geliştirilebilir yönlerine değinilmiştir. Geliştirilebilmesi için de önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2

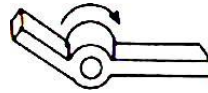
İLERİ KİNEMATİĞİN HESAPLANMASI

2.1 Robotların Kinematik Analizi

Kinematik bilimi nesnelerin devinimleriyle ilgilenen bir hareket bilimidir. Robot kinematığında, verilen eklem değişkenleri ile robotun uç noktasının pozisyonu ve yönelmesi arasındaki ilişki incelenir. Özellikle uç işlevci (end-effector) ile eklemler arasında bir ilişki tanımlar. Bir robot, yapısal olarak birbirine göre bağımsız hareket eden, öteleme (prismatic-genellikle P) ve dönme (revolute-R harfi ile gösterilir) hareketi gerçekleştiren eklemlerle, bu eklemleri birbirine birleştiren bağlardan oluşur. Şekil 2.1'de öteleme ve dönme hareketini gerçekleştiren eklem yapıları görülmektedir. Dönme hareketinden dolayı gerçekleşen yer değiştirmeye eklem açısı (joint angle) ve bağlar arasındaki yer değiştirmeden dolayı oluşan ötelemeye ise eklem kayması (joint offset) denir. Şekil 2.2.a'da prizmatik eklemlerden oluşan bir robot Şekil 2.2.b'de ise dönel eklemlerden (revolute joints) oluşan bir robot görülmektedir. (Bingül ve Küçük, 2005)

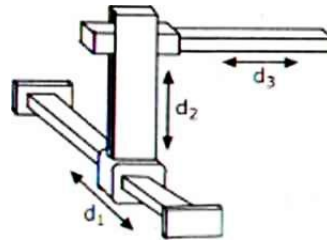


a) Prizmatik eklem

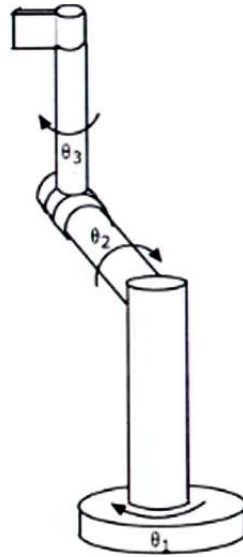


b) Dönel eklem

Şekil 2.1 Öteleme ve dönme hareketini gerçekleştiren eklem yapıları (Bingül ve Küçük'ten, 2005).



(a)

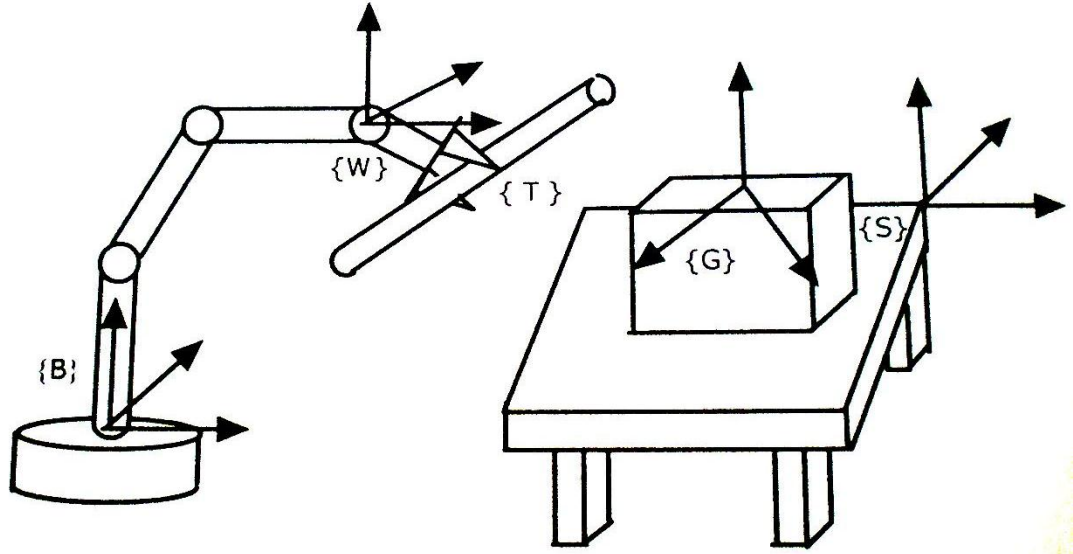


(b)

Şekil 2.2 a) Prizmatik, b) döneleklemlerden oluşan robot (Bingül ve Küçük'ten, 2005).

Robot kinematiği her bir robot ekleminin konumu, bir öncekine veya bir sonrakine göre ifade edilir. Arka arkaya oluşturulan bu ilişkiye açık kinematik zincir denir. Bu ilişkiyi oluşturan ifadeler, robotun konum ve yönelim bilgisini içeren 4×4 'lük homojen dönüşüm matrislerinden (transformation matrix) oluşur. Her bir eklem için bir homojen dönüşüm matrisi oluşturulur. Oluşturulan bu matrislerin sayısını, robotun serbestlik derecesi (degrees-of-freedom) belirler (Craig, 2005).

Robot ve robotun çalışma alanındaki nesnelere genel isimler verilir. Şekil 2.3'te bir robot ve çalışma alanındaki nesnelere görülmektedir.



Şekil 2.3 Robot ve çalışma uzayı (Bingül ve Küçük'ten, 2005).

Ana Çerçeve {B} (Base Frame)	:	Robotun sabit, yani hareket etmeyen parçasıdır.
İstasyon Çerçevesi {S} (Station Frame)	:	İstasyon çerçevesine evrensel çerçeve de denir. Robotun hareketleri bu çerçeveye göre ifade edilir. İstasyon çerçevesi genellikle ana çerçeveye göre ${}^B_S T$ şeklinde tanımlanır.
Bilek Çerçevesi {W} (Wrist Frame)	:	Bilek çerçevesi robotun son bağlantısına yerleştirilmiştir. Bu çerçeve, ana çerçeveye göre ${}^B_W T$ şeklinde tanımlanır.
Araç Çerçevesi {T} (Tool Frame)	:	Bu çerçeveye robotun herhangi bir işlevi gerçekleştirmesi için eleman yerleştirilir. Araç çerçevesi bilek çerçevesine göre ${}^W_T T$ şeklinde tanımlanır.
Hedef Çerçevesi {G} (Goal Frame)	:	Robotun işlem yapacağı nesnenin üzerindeki çerçevedir. Hedef çerçevesi istasyon çerçevesine göre ${}^S_G T$ şeklinde tanımlanır.

Robot kinematiği ikiye ayrılır. Bunlar ileri ve ters kinematiktir. Robotun ileri kinematiği (forward kinematics), robotun eklem değişkenleri yardımıyla uç işlevcisinin pozisyon ve yönelimini bulmayı amaçlarken, robotun ters kinematiği (inverse kinematics), robot kolunun uç noktasının pozisyon ve yönelmesi bilinen durumlarda robotun sahip olması gereken eklem değişkenlerine ulaşmayı amaçlar. Farklı bir ifadeyle, kinematik eklem uzayıyla Kartezyen uzay arasında bağ kurar. İleri kinematik

eklem uzayından Kartezyen uzaya geçmeyi sağlarken, ters kinematik Kartezyen uzaydan eklem uzayına ulaşmayı sağlar. Kinematik hesapları yapabilmek için robot kolunun eklemlerine koordinat sistemleri eklenmelidir. Bu durumda da koordinat eksenlerinin yapıları ve birbirleriyle olan ilişkileri konusunda bir takım bilgilere ihtiyaç vardır. Koordinat sistemleriyle ilgili gerekli olan bilgilere Bölüm 2.2’de yer verilmiştir.

2.2 Genel Tanımlamalar ve Dönüşümler

Robotlar kendi çevrelerindeki nesnelere bulunduğu üç boyutlu uzayda hareket ederler. Bu durum robotun ve çevresindeki nesnelere göre konum ve yönelim tanımlarının yapılmasını gerektirir. Konum ve yönelimlerin belirlenebilmesi için üç boyutlu uzayda robotun kendisi de dahil olmak üzere her nesneye bir koordinat sistemi yerleştirilir (Craig, 2005). Nesnelere ve bu nesnelere yerleştirilen bütün koordinat sistemleri evrensel çerçeve içerisinde bulunur. Tanımlanacak tüm konum ve yönelimler evrensel çerçeveye veya bu evrensel çerçeve içerisindeki diğer Kartezyen koordinat sistemlerine göre gerçekleştirilir.

2.2.1 Konum, yönelim ve koordinat sistemlerinin tanımlanması

Konum, yönelim ve koordinat sistemlerinin tanımlanması nesnelere evrensel çerçeve içerisinde, birbirleri ile veya evrensel çerçeve ile aralarındaki özelliklerini açıklar. Bunlar aşağıda sırayla açıklanacaktır.

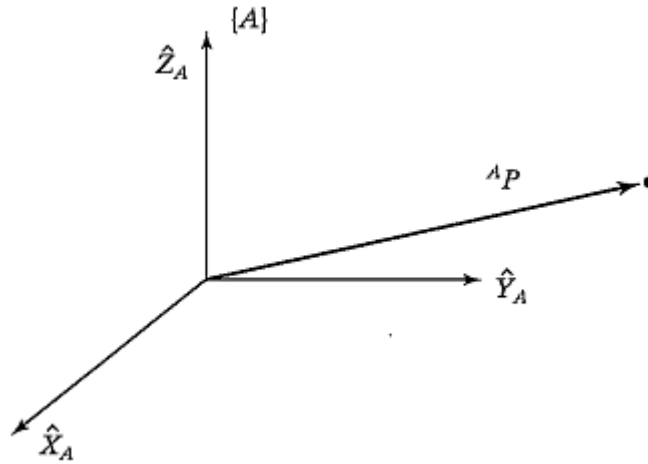
2.2.1.1 Konum tanımı

Bir nokta, koordinat sistemi tanımlamak suretiyle evrensel çerçeve içerisinde herhangi bir yerde konumlandırılabilir. Ayrıca evrensel koordinat çerçevesi içerisinde birçok koordinat sistemi yerleştirebilir. Üç boyutlu uzayda, bir nokta bu koordinat sistemlerinin merkezine göre tanımlanmış 3×1 boyutlu bir vektörle gösterilebilir. Bu vektör hangi koordinat sistemine göre tanımlanmışsa ona göre isimlendirilir, örneğin

evrensel çerçeve içerisinde bulunan bir P noktasının $\{A\}$ koordinat sistemine göre konumu ${}^A P$ şeklinde bir vektörle gösterilir. ${}^A P$, P noktasının $\{A\}$ koordinat sisteminin merkezine uzaklığını, (x, y, z) eksenlerinde sayısal olarak tanımlar. ${}^A P$ vektörü matematiksel olarak Denklem 2.1'de gösterildiği gibidir (Bingül ve Küçük, 2005).

$${}^A P = \begin{bmatrix} {}^A p_x \\ {}^A p_y \\ {}^A p_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Şekil 2.4'te bir birine dik üç birim vektöre sahip $\{A\}$ koordinat sistemi ile P noktası birlikte gösterilmiştir.

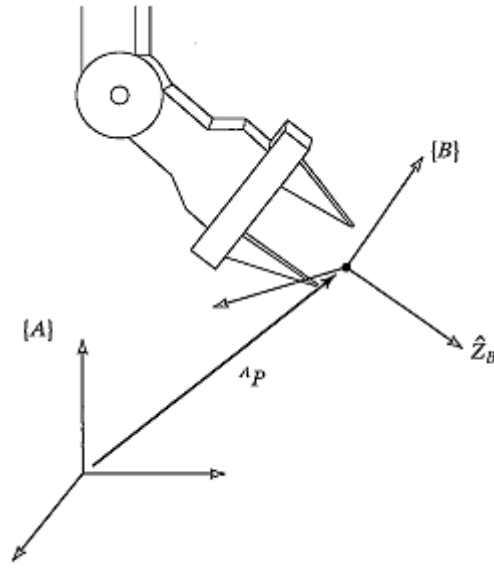


Şekil 2.4 P noktasının $\{A\}$ koordinat sistemine göre tanımlanması (Craig'ten, 2005).

2.2.1.2 Yönelim tanımı

Üç boyutlu uzayda, bir noktanın herhangi bir koordinat sistemine göre konumunun yanında yönelimi de tanımlanır. Yönelim, bir koordinat sisteminin başka bir koordinat sistemine göre dönme miktarıdır ve 3x3 boyutlu bir matrisle ifade edilir.

Bir katı cismin yönelimini başka bir referans koordinat sistemine göre tanımlamak için katı cisme bir koordinat sistemi yerleştirilir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi uç işlevcisine {B} koordinat sistemi yerleştirilerek {A} referans koordinat sistemine göre yönelimi tanımlanır.



Şekil 2.5 Bir cismin yöneliminin referans koordinat sistemine göre tanımlanması (Craig'ten, 2005).

Uç işlevcisine yerleştirilen {B} koordinat sistemini, {A} referans koordinat sistemi cinsinden ifade etmek için birim vektörler kullanılır. {B} Koordinat sisteminin birim vektörlerini aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\{B\} = \hat{X}_B, \hat{Y}_B, \hat{Z}_B \quad (2.2)$$

{B} koordinat sisteminin birim vektörleri {A} koordinat sistemi cinsinden ise aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\{B\} = {}^A\hat{X}_B, {}^A\hat{Y}_B, {}^A\hat{Z}_B \quad (2.3)$$

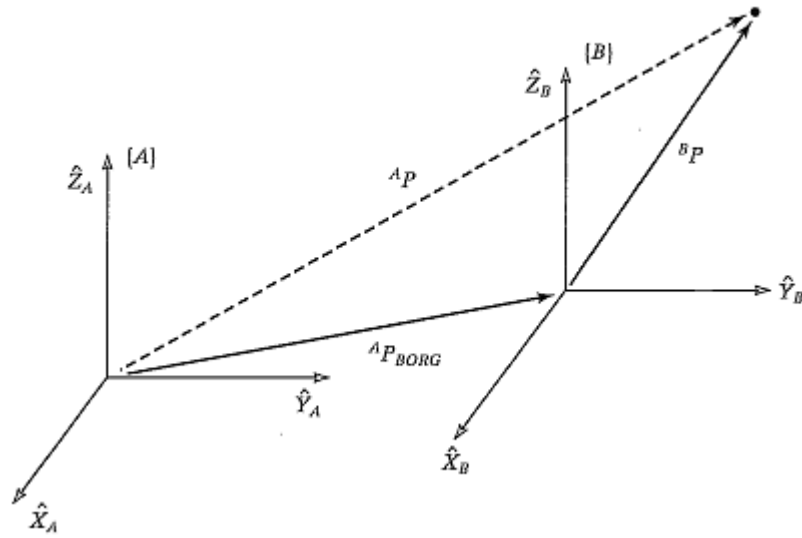
Denklem 2.3'teki ifade 3x3 boyutlu bir matrisle Denklem 2.4'teki gibi ifade edebilir. 3x3 şeklinde yazılabilen bu matrise dönme matrisi (rotation matrix) denir. Bu matris $\{B\}$ koordinat sisteminin yönelimini $\{A\}$ koordinat sistemine göre açıkladığı için ${}^A_B R$ şeklinde gösterilir. ${}^A_B R$, $\{B\}$ koordinat sisteminin $\{A\}$ koordinat sistemine göre x, y ve z eksenlerindeki dönme miktarını gösterir.

$${}^A_B R = \begin{bmatrix} {}^A\hat{X}_B & {}^A\hat{Y}_B & {}^A\hat{Z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.2.2 Genel dönüşümler

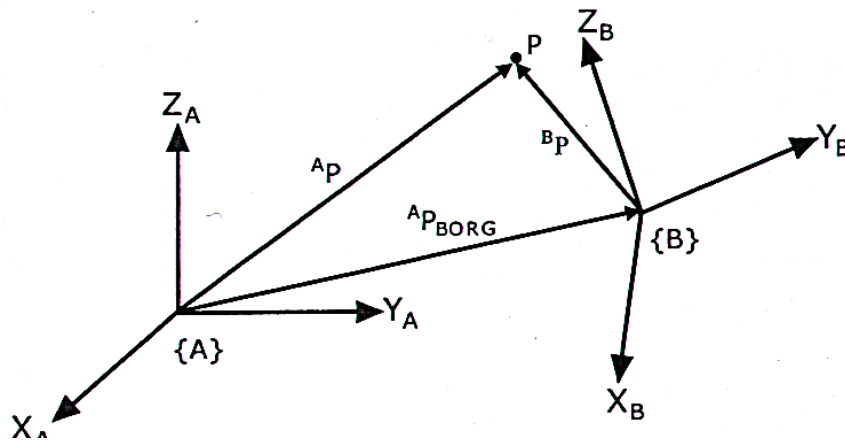
Şimdiye kadar bir vektörün her hangi bir koordinat sistemine göre konumu ve yönelimi üzerinde durulmuştur. Şimdi ise iki koordinat sisteminin bir birlerine göre konum ve yönelimleri incelenecektir. $\{A\}$ ve $\{B\}$ gibi iki koordinat sistemi olsun. $\{A\}$ koordinat sisteminin $\{B\}$ koordinat sistemine uzaklığı ${}^A P_{BORG}$ gibi bir vektörle ifade edilebilir. Şekil 2.6'da yönelimleri aynı, merkezleri farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi görülmektedir. P noktasının $\{A\}$ koordinat sistemine uzaklığı ${}^A P_{BORG}$ vektörü kullanarak aşağıdaki gibi gösterilebilir (Bingül ve Küçük, 2005).

$${}^A P = {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (2.5)$$



Şekil 2.6 Yönelimleri aynı fakat merkezleri farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi (Craig'ten, 2005).

Şekil 2.7'de ise hem yönelimleri hem de merkezleri farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi görülmektedir. Bu durumda P noktasının {A} koordinat sistemine uzaklığı Denklem 2.6'daki gibi ifade edilir.



Şekil 2.7 Hem yönelimleri hem de merkezleri farklı noktalarda bulunan iki koordinat sistemi (Bingül ve Küçük'ten, 2005).

$${}^A P = {}^A_B R {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (2.6)$$

2.3 İleri Kinematik

Robotun ileri kinematiği (forward kinematics), robot bağlarının konumları arasındaki ilişkiyle ilgilenir. Bir robot, ana çerçevesinden araç çerçevesine doğru birbirine prizmatik veya dönel eklemlerle tutturulmuş seri bağlardan oluşur. İki bağ arasındaki ilişki bir homojen dönüşüm matrisiyle açıklanır. Eklem dönüşüm matrislerinin art arda çarpılmasıyla, ana çerçeveye araç çerçevesi arasındaki ilişki tanımlanır. Bu ilişki araç çerçevesinin yönelimini ve konumunu ana çerçeveye göre verir. Başka bir ifadeyle, ileri kinematik problem, eklem değişkenlerinin (prizmatik veya dönel) verilmesiyle uç işlevcisinin konumunu ve yönelimini ana çerçeveye göre hesaplanmasıdır (Bingül ve Küçük, 2005).

Robotun ileri yön kinematiğinin, robot bağlarının konumları arasındaki ilişkiyle ilgilendiğinden söz edilmişti. Eğer her bir ekleme bir koordinat sistemi yerleştirilirse, komşu iki eklem arasındaki ilişki bir ${}^{i-1}_i T$ dönüşüm matrisi ile ifade edilir. İlk ekleme ait dönüşüm matrisi, ilk ekleme ana çerçeve arasında bir ilişki tanımlarken son ekleme ait dönüşüm matrisi ise uç işlevcisi ile son eklem arasında bir ilişki tanımlar. Arka arkaya sıralanan bu eklem dönüşüm matrislerinden yararlanarak ana çerçeveye araç çerçevesi arasında bir ilişki tanımlanır. Araç çerçevesinin yönelimini ve konumunu ana çerçeveye göre ifade eder. Gösterimi aşağıdaki gibidir.

$${}^0_N T = {}^0_1 T {}^1_2 T \dots {}^{N-1}_N T \quad (2.7)$$

Her bir eklem matrisi ${}^{i-1}_i T$, bir eklem değişkeninin fonksiyonudur. ${}^0_N T$ dönüşüm matrisi ise N tane eklem değişkeninin fonksiyonudur. Eklem matrisine ek olarak ana çerçeve ile istasyon çerçeve (${}^{istasyon}_0 T$) ve uç işlevci ile araç çerçeve arasında (${}^{araç\ çerçeve}_N T$) dönüşüm matrisleri tanımlanır. Araç çerçeve ile istasyon çerçeve arasındaki toplam dönüşüm ise aşağıdaki gibi ifade edilir (Bingül ve Küçük, 2005).

$${}_{\text{araç çerçeve}}^{\text{istasyon}}T = {}_{0}^{\text{istasyon}}T {}_N^0T {}_{\text{araç çerçeve}}^NT \quad (2.8)$$

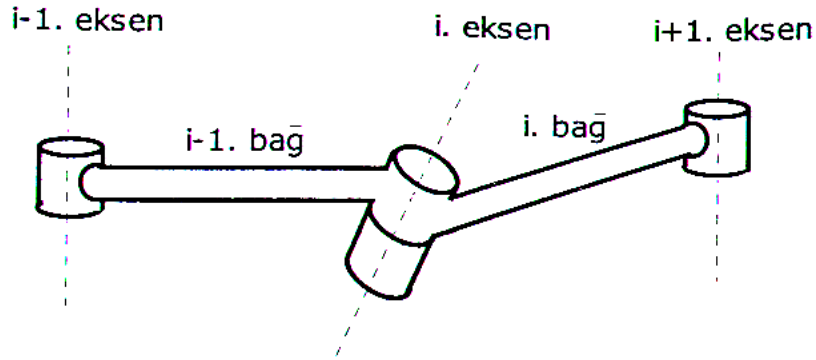
Yukarıdaki eşitlikte yer alan, ana çerçeve ile istasyon çerçeve ve uç işlevci ile araç çerçeve arasındaki dönüşümler sabit olduğundan bu dönüşümler tek bir ${}_N^0T$ matrisi ile ifade edilebilir.

2.3.1 Eklem değişkenlerinin belirlenmesi

Robotların eklem değişkenlerini belirlemek için birçok kinematik yöntem geliştirilmiştir. Kinematik problemlerin çözümü, Kartezyen üç boyutlu ve Kartonyum (Yang and Freudenstein, 1964) dört boyutlu olmak üzere iki farklı uzayda gerçekleştirilir. Fakat bir robotun eklem değişkenlerinin belirlenmesinde en fazla tercih edilen yöntem kısaca D-H olarak gösterilen Denavit-Hartenberg yöntemidir (Denavit and Hartenberg, 1955).

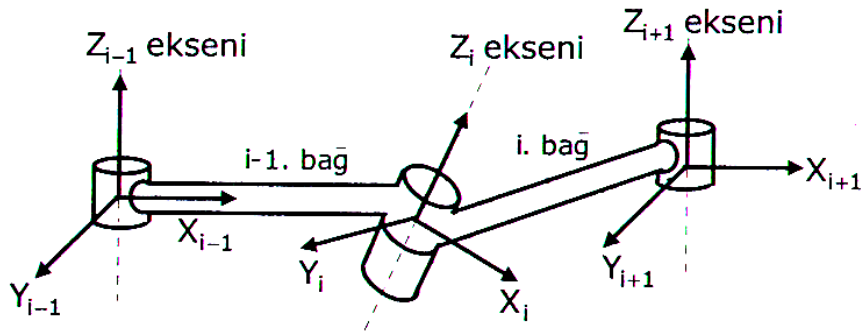
2.3.2 Denavit-Hartenberg yöntemi

Denavit-Hartenberg yönteminde her bağ için dört ana parametre kullanılarak robot kinematiği çıkarılır. Bu parametreler, iki eksen arasındaki bağ uzunluğu (link length) a_{i-1} , (i-1) ile i eksenleri arasındaki bağ açısı (link twist) α_{i-1} , üst üste çakışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı (joint offset) d_i ve iki bağ arasında oluşan eklem açısı (joint angle) θ_i 'dir. Bu dört parametreye D-H parametreleri denir. Bu parametreleri belirlemek için, öncelikle Şekil 2.8'de gösterildiği gibi robotun hareket eksenleri belirlenir ve hareket eksenleri bağlardan bir fazla olacak şekilde numaralandırılır (Bingül ve Küçük, 2005).



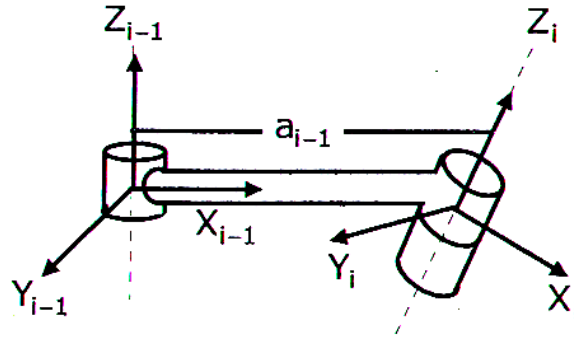
Şekil 2.8 (i-1), i bağlarının ve (i-1), i, (i+1) eksenlerinin yerleşimi (Bingül ve Küçük'ten, 2005)..

Bu işlemi gerçekleştirdikten sonra eksenlerin her birine bir koordinat sistemi yerleştirilir ve bağ hareket eksenini Şekil 2.9'de görüldüğü şekilde, koordinat sisteminin Z eksenini kabul edilir.



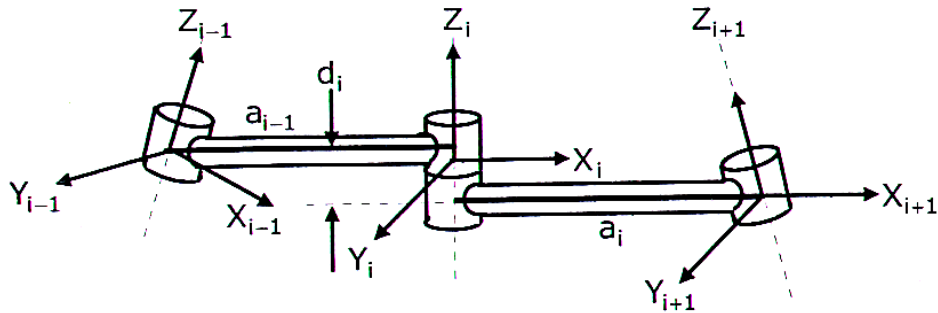
Şekil 2.9 (i-1) ve i eksenlerine koordinat sisteminin yerleştirilmesi (Bingül ve Küçük'ten, 2005).

Z eksenini belirlendikten sonra Şekil 2.10'da görüldüğü gibi X_{i-1} yönünde uzanan Z_{i-1} ile Z_i arasındaki dik uzaklık a_{i-1} bağ uzunluğu olarak belirlenir.



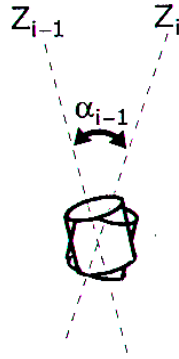
Şekil 2.10 Z_{i-1} ile Z_i arasında X_{i-1} boyunca uzanan a_{i-1} bağ uzunluğu (Bingül ve Küçük'ten, 2005).

Bağ kaçıklığı olarak isimlendirilen d_i , Şekil 2.11'de görüldüğü gibi X_{i-1} ile X_i arasında Z_i boyunca uzanan üst üste çakışan bağlar arasındaki mesafe şeklinde belirlenir.



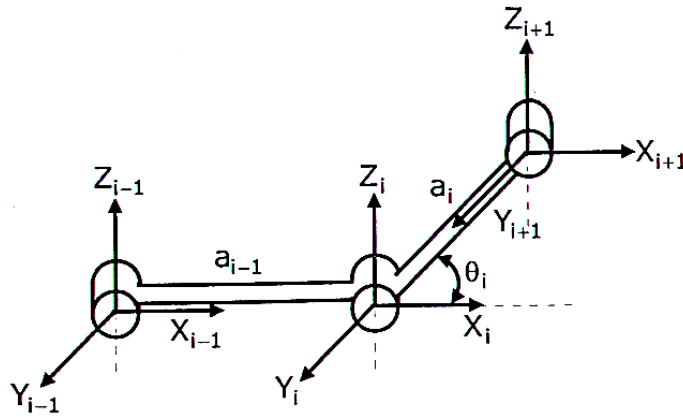
Şekil 2.11 X_{i-1} ile X_i arasında Z_i boyunca uzanan d_i bağ kaçıklığı (Bingül ve Küçük'ten, 2005).

α_{i-1} bağ açısı, Z_{i-1} ile Z_i dönme eksenleri arasında oluşan, Şekil 2.12'de görülen açıdır.



Şekil 2.12 Z_{i-1} ile Z_i eksenleri arasındaki α_{i-1} bağ açısı (Bingül ve Küçük'ten, 2005).

a_{i-1} ile a_i bağları arasında, Şekil 2.13'te görüldüğü gibi X eksenleri boyunca ölçülen açı, θ_i , eklem açısıdır.



Şekil 2.13 a_{i-1} ile a_i bağları arasındaki θ_i eklem açısı (Bingül ve Küçük'ten, 2005).

2.3.3 Eklemlere koordinat sistemi yerleştirilmesi

Eklemlere koordinat sistemleri yerleştirilirken sırasıyla aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir.

1. Öncelikle eklem eksenlerinin dönme veya kayma yönleri belirlenir ve bu eksene paralel bir doğru çizilir.

2. Bu işlem gerçekleştirilirken eklem eksenleri, döner eksenler için dönme yönü Z, prizmatik eklemler için kayma yönü Z eksenini olarak belirlenir.
3. Z eksenine dik ve kol boyunca olan bağ uzunluğu X eksenini olarak kabul edilir.
4. Z ve X eksenleri belirlendikten sonra sağ el kuralına göre Y eksenini bulunur.
5. Eğer arka arkaya gelen iki eklem için dönme veya kayma yönleri aynı ise Z eksenini belirlendikten sonra kol boyunca X eksenini belirlenir. Son olarak sağ el kuralına göre Y eksenini belirlenir.
6. Sıfır ve birinci eksenler üst üste kabul edilebilir.
7. Bir seri robotun eklemlerine koordinat sistemleri yerleştirilirken birinci eksenin dönme yönü Z eksenini olarak belirlendikten sonra genellikle bu eklem için X eksenini döndürüldüğünde komşu iki Z eksenini üst üste çakışacak şekilde bir X eksenini yerleştirilir.

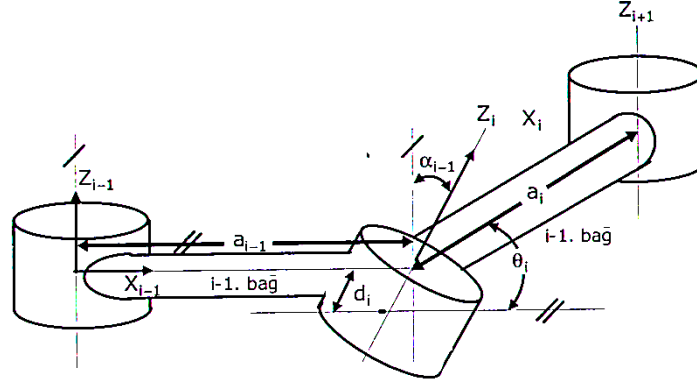
Eklem yerleştirilen koordinat sistemleri yukarıda açıklanan kurallara göre belirlendikten sonra eklem değişkenleri aşağıdaki ifadeler göz önünde bulundurularak isimlendirilir (Craig, 2005).

1. a_{i-1} , \hat{Z}_{i-1} ile \hat{Z}_i arasında \hat{X}_{i-1} boyunca belirlenen uzunluktur.
2. α_{i-1} , \hat{Z}_{i-1} ile \hat{Z}_i arasında \hat{X}_{i-1} boyunca ölçülen açıdır.
3. d_i , \hat{X}_{i-1} ile \hat{X}_i arasında \hat{Z}_i boyunca belirlenen uzunluktur.
4. θ_i , \hat{X}_{i-1} ile \hat{X}_i arasında \hat{Z}_i boyunca ölçülen açıdır.

2.3.4 Eklem dönüşüm matrisi

i. eklem yerleştirilen $\{i\}$ koordinat sisteminin i-1. eklem yerleştirilen $\{i-1\}$ koordinat sistemine göre Şekil 2.14'te belirlenen a_{i-1} , α_{i-1} , d_i ve θ_i eklem parametrelerinden yararlanarak robotun bir eklemine ait dönüşüm matrisi Denklem 2.9'daki gibi elde edilir. Bu dört parametrenin meydana getirdiği matrislerin çarpımıyla,

sadece n serbestlik derecesine sahip bir robotun yalnızca bir eklemine ait dönüşüm matrisi elde edilir. Bir dönüşüm matrisi 3×3 'lük bir dönme matrisinden ve 3×1 'lik bir konum vektöründen oluşur.



Şekil 2.14 a_{i-1} , α_{i-1} , d_i ve θ_i eklem değişkenlerinin belirlenmesi (Bingül ve Küçük'ten, 2005).

$${}^{i-1}T_i = R_x(\alpha_{i-1})D_x(a_{i-1})R_z(\theta_i)D_z(d_i)$$

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & s \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c \alpha_{i-1} & c\theta_i c \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s \alpha_{i-1} & c\theta_i s \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Denklemden $c\theta_i$, $\cos\theta_i$ ve $s\theta_i$, $\sin\theta_i$ ifadelerini temsil etmektedir.

2.3.5 Robot kinematiğinin çıkarılmasında uygulanan genel kurallar

Sıfır konumda bulunan bir robot kolunun ileri yön kinematiği aşağıda sıralanan genel kurallar takip edilerek bulunur.

1. Öncelikle her ekleme koordinat sistemi yerleştirilir.
2. Çizelge 2.1 göz önünde bulundurularak her eklem için D-H parametreleri belirlenir. Tablonun her satırında bulunan parametreler kullanılarak bir ekleme ait dönüşüm matrisi elde edilir. Satır sayısı ya da dönüşüm matrisi sayısı robotun serbestlik derecesini belirler. Tabloda yer alan α_{i-1} ve a_{i-1} robotun hareket etmesiyle değişmeyen sabit parametreler iken d_i ve θ_i robotun hareketiyle değişen parametrelerdir. Her bir eklem için elde edilen d_i ve θ_i parametrelerinden sadece bir tanesinin değişken olduğu unutulmamalıdır.

Çizelge 2.1 D-H Parametreleri belirlenmesi.

Eksen no	D-H Parametreleri				i. Eklem değişkeni
1	α_0	a_0	d_1	θ_1	d_1 veya θ_1
2	α_1	a_1	d_2	θ_2	d_2 veya θ_2
3	α_2	a_2	d_3	θ_3	d_3 veya θ_3
4	α_3	a_3	d_4	θ_4	d_4 veya θ_4

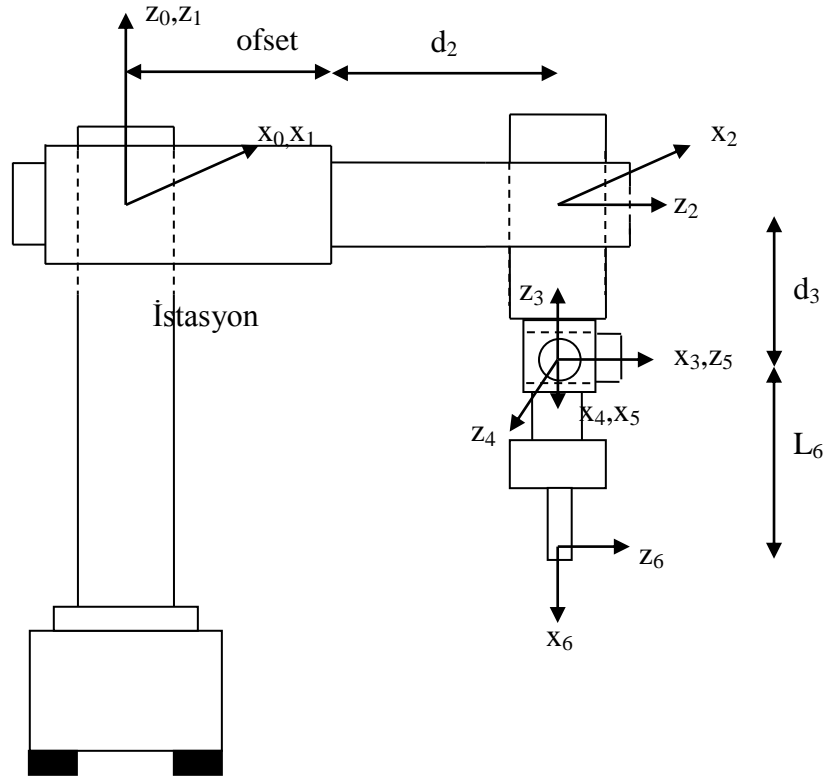
3. Çizelge 2.1'de ki D-H parametrelerinin belirlenmesiyle her bir eklem için Denklem 2.9'daki genel eklem dönüşüm matrisi kullanılır.
4. Yukarıdaki dönüşüm matrislerinin çarpılmasıyla ana çerçeveden araç çerçeveye doğru ileri yönlü robot kinematiği çıkarılır.

$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{N-1}T_N \quad (2.10)$$

5. Dönüşüm matrislerinin çarpılmasıyla uç işlevcinin konumu ve yönelimini içeren ve eklem değişkenlerinin fonksiyonu olan genel bir dönüşüm matrisi elde edilir. Bu matrisin de 9 elemandan oluşan dönme belirten ($r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}$ ve r_{33}) ve 3 elemandan oluşan konum (p_x, p_y ve p_z) belirten toplam 12 elemanı bulunur (Bingül ve Küçük, 2005).

2.3.6 Robotun ileri kinematik denklemlerinin hesaplanması

Bu bölümde beş eklemli çapak alma robotunun ileri kinematik denklemleri hesaplanmıştır. İleri kinematik denklemler hesaplanmadan önce ilk olarak, ikinci bölümde anlatılan konular doğrultusunda robot üzerinde Şekil 2.15'te gösterildiği biçimde koordinat sistemleri yerleştirilmiştir. İstasyon olarak birinci eklem bulunduğ u nokta seçilerek D-H parametrelerinin ilk satırının sıfır olması sağlanmıştır.



Şekil 2.15 Beş eklemlü robotun koordinat sistemlerinin yerleştirilmesi.

Bölüm 2.3.2’de anlatıldığı şekilde robotun D-H parametreleri çıkarılmış, parametreler Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Beş eklemli robotun D-H parametreleri.

Eksen No	D-H Parametreleri			i. Eklem Değişkeni
i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	90^0	0	(-d ₂ -ofset)	0
3	-90^0	0	-d ₃	0
4	90^0	0	0	θ_4
5	-90^0	0	0	θ_5
6	0	-L ₆	0	0

D-H parametreleri oluşturulduktan sonra bu parametrelerden yararlanarak her bir eklem için genel dönüşüm matrisi hesaplanmıştır. Genel dönüşüm matrisleri Bölüm 2.3.4'te verilen genel matris formuna hesaplanan D-H parametreleri uygulanmasıyla oluşturulmuştur.

$${}^0_1T = \begin{pmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

$${}^1_2T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & (-d_2 - ofset) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

$${}^2_3T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$${}^3_4T = \begin{pmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

$${}^4_5T = \begin{pmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_5 & -c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

$${}^5_6T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -L_6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Her eklem için genel dönüşüm matrisleri hesaplandıktan sonra matrisler sırasıyla çarpılarak robotun istasyonu ile uç işlevcisi arasındaki ilişkiyi veren genel dönüşüm matrisi çıkarılmıştır.

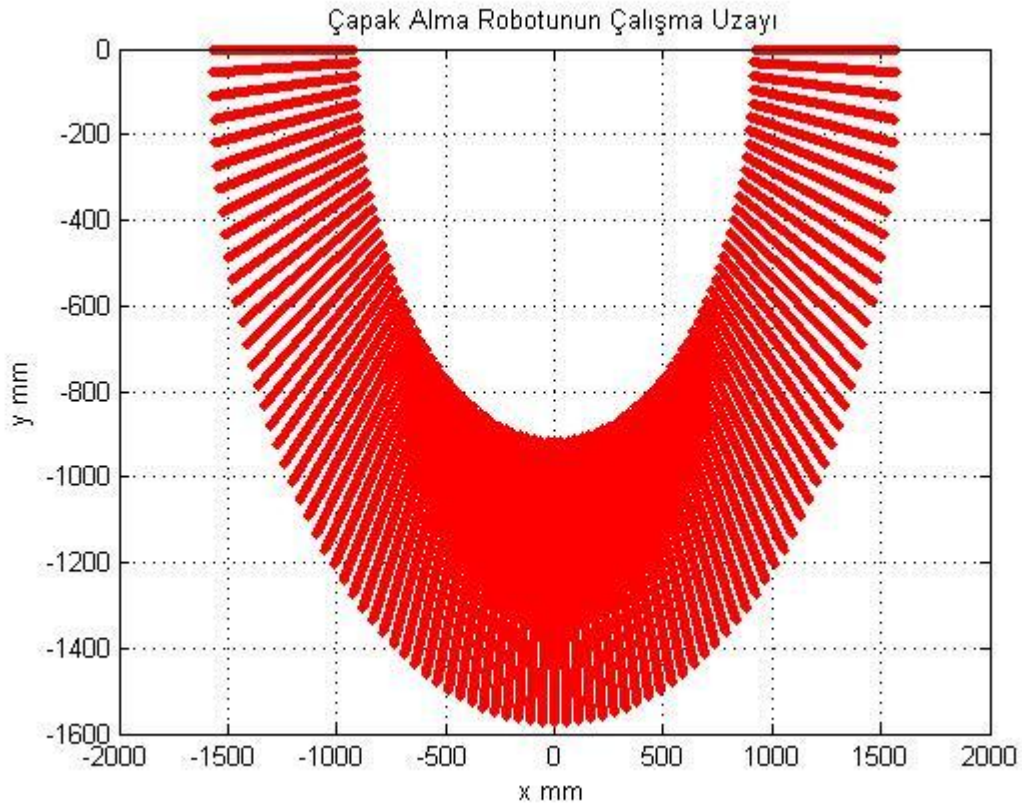
$${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T \quad (2.17)$$

$${}^0_6T = \begin{pmatrix} c_1c_4c_5 - s_1s_5 & -c_1c_4c_5 - c_1c_5 & -c_1s_4 & L_6(s_1s_5 - c_1c_4c_5) + s_1(d_2 + offset) \\ s_1c_4c_5 + c_1s_5 & c_1c_5 - s_1c_4s_5 & -s_1s_4 & -L_6(s_1c_4c_5 + c_1s_5) - c_1(d_2 + offset) \\ s_4c_5 & -s_4s_5 & c_4 & -L_6s_4c_5 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Robot istasyonu ile uç işlemcisi arasındaki ilişkiyi veren yukarıdaki Denklem 2.18'in çıkarılmasıyla robotun ileri kinematiği tamamlanmıştır.

2.3.7 Robotun çalışma uzayının Matlab ortamında oluşturulması

İlk olarak robot kolunun ileri kinematiği Matlab ortamında oluşturulmuştur. Robotun ileri kinematiği hesaplandıktan sonra robotun istasyonu ile uç işlevcisi arasındaki matematiksel ifadeyi veren homojen dönüşüm matrisi hazır bulunmaktadır. Bu matrisin son sütunu sırayla x, y, z olmak üzere uç noktasının üç boyutlu uzaydaki yer koordinatlarını vermektedir. Eğer eklem açılarının alabileceği tüm değerler bu homojen dönüşüm matrisine girilirse son sütunda elde edilen sonuçlar uç noktasının ulaşabileceği noktaları verecektir. Bu noktaların tümünün birleşimi de robotun çalışma uzayını ifade etmektedir. Çalışma uzayı tespiti için Matlab kodu oluşturulmuştur. Genel dönüşüm matrisi hesaplanırken ofset olarak gösterilen değer gerçek hayata uyumlu olarak 0.745m, L6 değeri de 0.170m olarak seçilmiştir. Kodun çıktısı robotun çalışma uzayını ortaya koymaktadır. Matlab kodu tezin sonunda Ek.1. kısmında verilmiştir. Matlab kodunun çıktısı Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.16 Çalışma uzayının 2 boyutlu görüntüsü.

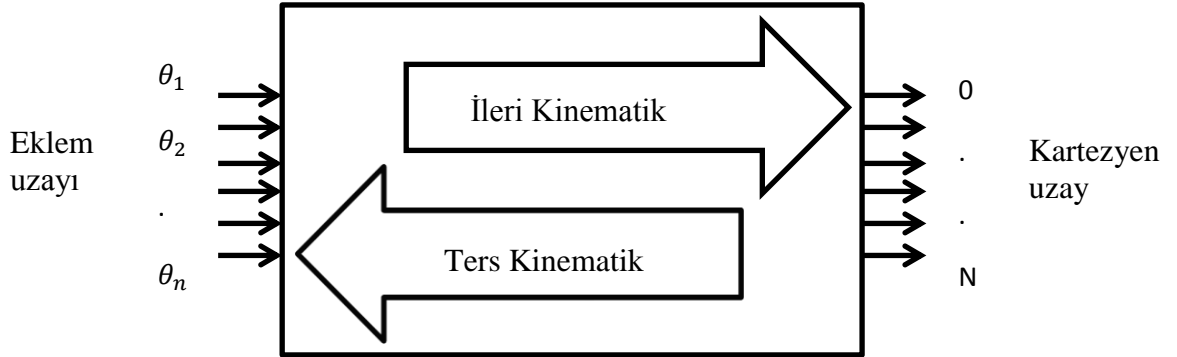
BÖLÜM 3

TERS KİNEMATİĞİN HESAPLANMASI

Robotların ileri yön kinematığında eklem değişkenleri ve robotun fiziksel değişkenleri dönüşüm matrisinde yerlerine konulup ana çerçeveden araç çerçevesine doğru robotun yönelimi ve konumu hesaplanır. Robotlar için ters kinematik problem ise, araç çerçevesinin ana çerçeveye göre yönelimi ve konumu verildiğinde, robotun bu yönelim ve konuma ulaşabilmesi için gerekli olan eklem değişkenleri hesaplanması şeklinde tanımlanır (Craig, 2005).

Ters kinematikte kullanılan denklemler doğrusal değildir. Denklemlerin doğrusal olmamasından dolayı çözümleri son derece karmaşıktır. Bu denklemler, tekil çözüm üretmeyip birden fazla çözüm üretebilir.

Robot kollarının ters kinematığı, robot kontrolünün en önemli aşamalarından birini oluşturmaktadır. Ters kinematik problemi Kartezyen uzayda, ana çerçeveye göre verilen uç işlevcinin konum ve yönelim verileri yardımıyla eklem değişkenlerinin bulunması şeklinde tanımlanabilir. Başka bir ifadeyle, bir robot kolunun uç işlevcisinin yönelimini ve konumunu Kartezyen koordinat sisteminden eklem koordinat sistemine dönüştürme işlemine ters kinematik problem denir (Bingül ve Küçük, 2005; Wang and Chen'den (1991)). Şekil 3.1'de ileri ve ters kinematik problemin şematik gösterimi verilmiştir. Ters kinematik problem çözümü, gerçek zamanlı kontrol eyleyicilerinin, eklem torklarının hesaplanması ve yörünge planlaması gibi birçok uygulama için son derece önemlidir (Asada and Slotine, 1986; Wolovich, 1987; Schilling, 1990; Kerrow, 1991).

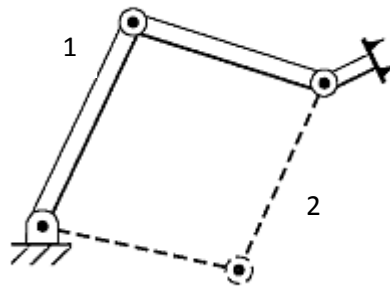


Şekil 3.1 İleri ve ters kinematik probleminin şematik gösterimi (Bingül ve Küçük'ten, 2005).

3.1 Ters Kinematik Probleminin Yapısı

Ters kinematik problem, aşağıda sıralanan özelliklerden dolayı çözülmesi oldukça güç olan bir problemidir.

1. Analitik olarak karmaşık, doğrusal olmayan denklemler içerir.
2. Eklemlerin yapısına bağlıdır. Bir robot çoğunlukla prizmatik eklemlerden oluşuyorsa ters kinematik çözümleri de o derece kolay elde edilirken dönel eklem sayısı arttıkça çözüm de o derece zorlaşmaktadır.
3. Her zaman matematiksel çözüm fiziksel çözümü temsil etmez. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi 1 numaralı çözüm hem matematiksel hem de fiziksel çözüm oluştururken, 2 numaralı çözüm, matematiksel çözüm üretirken fiziksel çözüm üretmemektedir.



Şekil 3.2 Matematiksel çözüm ile fiziksel çözüm arasındaki ilişki (Craig'ten, 2005).

4. Aynı uç işlevci tasarımı için birden fazla çözüm olabilir. Ters kinematik çözüm sayısı robotun serbestlik derecesinin yanında aynı zamanda eklem değişkenlerine de bağlıdır. Her bir eklemden a ve d parametrelerinin her ikisinin de bulunması çözüm sayısının artmasına neden olur. Ters kinematik çözüm sayısına robotların eklem yapısının da önemli etkisi vardır. Prizmatik eklemler çözüm sayısının azalmasına, dönel eklemlerse artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, dönel eklemlerden oluşan robotlarda fiziksel çözüm sayısının fazla olması, üç boyutlu uzayda bir noktaya pek çok farklı şekilde ulaşma imkânı sağlar.
5. Ters kinematik problem, verilen bir robot tasarımı için tamamen analitik (closed form) olarak çözülebileceği gibi, analitik çözümün mümkün olmadığı durumlarda sayısal yöntemler kullanılarak da çözülebilir. Fakat tamamen kesin sonuç üreten analitik çözüme ait denklemler bilgisayar ortamında çok hızlı çalışırken, eklem açılarının iteratif olarak çözüldüğü sayısal çözüm ise bilgisayar ortamında analitik çözüme göre daha yavaş çalışır. Ayrıca, sayısal olarak eklem açılarını bulmak için yazılan algoritmanın yapısı da (çözüm zamanı ve başlangıç koşulları) son derece önemlidir.
6. Robotların ters kinematik çözümlerinde bilek yapılarının da büyük önemi vardır. Eklemlerin bir noktada kesiştiği bilek yapıları tamamen analitik olarak çözülebilirken eklem kaçıklığı barındıran bileklerin bir kısmında tamamen analitik çözüme ulaşılamamaktadır (Bingül ve Küçük, 2005).

3.2 Robotun Ters Kinematığının Hesaplanması

Bölüm 2’de robot kolunun ileri kinematik çözümü yapılmış ve Denklem 2.9 kullanılarak homojen dönüşüm matrisi bulunmuştur. Ters kinematik çözümü gerçekleştirebilmek için robot kolunun uç işlevcisinin istasyonuna göre pozisyonunu ve yönelmesini verdiği düşünülen bir matrise ihtiyaç vardır. Denklem 3.1’de verilen bu matris ile ileri kinematik yöntemle bulunmuş olan ve Denklem 3.2’de gösterilen homojen dönüşüm matrislerinin uygun elemanları eşleştirilerek ters kinematik çözüme ulaşılmıştır. Denklem 3.2’ye ulaşmak için Bölüm 2.3.7’de söz edildiği şekilde ofset değeri 0.745m olarak seçilmiştir.

$$T_u^i = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$${}^0_6T = \begin{pmatrix} c_1c_4c_5 - s_1s_5 & -c_1c_4c_5 - c_1c_5 & -c_1s_4 & L_6(s_1s_5 - c_1c_4c_5) + s_1(d_2 + 745) \\ s_1c_4c_5 + c_1s_5 & c_1c_5 - s_1c_4s_5 & -s_1s_4 & -L_6(s_1c_4c_5 + c_1s_5) - c_1(d_2 + 745) \\ s_4c_5 & -s_4s_5 & c_4 & -L_6s_4c_5 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Denklem 3.1’de sol üst 3x3’lük kısım uç işlevcisinin istasyona göre yönelmesini, $(p_x \ p_y \ p_z)^T$ ise istasyona göre pozisyonunu belirtmektedir. İleri kinematik çözümden bu matrisin eklem değişkenlerini $(\theta_1, d_2, d_3, \theta_4, \theta_5)$ ’in fonksiyonu olarak bilinmektedir. Şimdi tüm eklem değişkenleri bulunmalıdır. Izgaranın çapağı alınırken her noktada çapağı alacak uç işlevcinin yönlenmesinin bilindiği kabul edilmiştir. Bilinen bu yönelme sayesinde bileğin sahip olması gereken ve sonlu sayıdaki θ_4 ve θ_5 açıları da önceden tespit edilebilmektedir. Yani, bilek eksenlerinin kesiştiği noktanın çalışacağı parçaya göre konumu ve yönelmesi bilindiği için ters kinematik çözümüne başlamadan bu açılar kolayca belirlenebilmektedir. Denklem 3.2’nin (3,1) ve (3,2) elemanlarını kullanarak θ_5 açısı kolayca hesaplanabilir. Bu durumda:

$$\theta_5 = A \tan 2(-o_z, n_z), s_4 \neq 0 \text{ iken} \quad (3.3)$$

Yukarıda tanjant hesaplamasındaki bölüm nedeniyle s_4 açıları sadeleşeceğinden θ_5 açısı bulunmuş olacaktır. θ_5 açısı bilindiğine göre Denklem 3.1’in n_z elemanından s_4 ’ün değeri de kolaylıkla bulunabilir. Bulunan s_4 sayesinde θ_4 açısı da aşağıdaki gibi bulunmuş olacaktır.

$$\theta_4 = A \tan 2(s_4, c_4) \quad (3.4)$$

θ_4 ve θ_5 açıları bulunduktan sonra Denklem 3.1 ve 3.2'nin (1,4) ve (2,4) elemanlarını kullanarak d_2 'ye kolayca ulaşılabilir.

$$\begin{aligned}
 p_x &= L_6(s_1s_5 - c_1c_4c_5) + s_1(d_2 + 745) \\
 p_y &= -L_6(s_1c_4c_5 + c_1s_5) - c_1(d_2 + 745) \\
 p_x^2 + p_y^2 &= d_2^2 + 2L_6s_5d_2 + L_6^2s_5^2 + L_6^2c_4^2c_5^2 + 1490L_6s_5 + 1490d_2 + 555025 \\
 p_x^2 + p_y^2 &= (d_2 + 745 + L_6s_5)^2 + L_6^2c_4^2c_5^2 \\
 (d_2 + 745 + L_6s_5)^2 &= p_x^2 + p_y^2 - L_6^2c_4^2c_5^2
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$d_2 = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - L_6^2c_4^2c_5^2} - L_6s_5 - 745$$

Aynı şekilde Denklem 3.1 ve 3.2'nin (3,4) elemanlarından da d_3 hesaplanabilir.

$$d_3 = -p_z - L_6s_4c_5 \tag{3.6}$$

Dört eklem değişkeni hesaplandıktan sonra Denklem 3.1 ve 3.2'nin (3,4) elemanlarında θ_1 açısına aşağıdaki şekilde ulaşılabilir.

$$\begin{aligned}
p_x &= L_6(s_1s_5 - c_1c_4c_5) + s_1(d_2 + 745) \\
p_y &= -L_6(s_1c_4c_5 + c_1s_5) - c_1(d_2 + 745) \\
p_x + p_y &= d_2(s_1 - c_1) + L_6s_5(s_1 - c_1) - L_6c_4c_5(s_1 + c_1) + 745(s_1 - c_1) \\
c_1 &= -\frac{p_y + L_6s_1c_4c_5}{d_2 + 745 + L_6s_5} \\
p_x &= s_1(d_2 + 745 + L_6s_5) + L_6c_4c_5\left(\frac{p_y + L_6s_1c_4c_5}{d_2 + 745 + L_6s_5}\right) \\
p_x &= s_1(d_2 + 745 + L_6s_5) + \left(\frac{p_y L_6c_4c_5}{d_2 + 745 + L_6s_5}\right) + \frac{L_6^2 s_1 c_4^2 c_5^2}{d_2 + 745 + L_6s_5} \\
p_x &= s_1 \left[(d_2 + 745 + L_6s_5) + \left(\frac{L_6^2 c_4^2 c_5^2}{d_2 + 745 + L_6s_5}\right) \right] + \left(\frac{p_y L_6c_4c_5}{d_2 + 745 + L_6s_5}\right) \\
s_1 &= \frac{p_x(d_2 + 745 + L_6s_5) - p_y L_6c_4c_5}{(d_2 + 745 + L_6s_5)^2 + L_6^2 c_4^2 c_5^2} \\
c_1 &= \pm \sqrt{1 - s_1^2} \\
\theta_1 &= A \tan 2(s_1, c_1)
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Yukarıda görüldüğü gibi tasarlanan çapak alma robotunun ters kinematik çözümü tamamlanmıştır. Sonuç eklem değişkenleri toplu olarak aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\theta_1 &= A \tan 2(s_1, c_1) \\
d_2 &= \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - L_6^2 c_4^2 c_5^2} - L_6s_5 - 745 \\
d_3 &= -p_z - L_6s_4c_5 \\
\theta_4 &= A \tan 2(s_4, c_4) \\
\theta_5 &= A \tan 2(-o_z, n_z)
\end{aligned}$$

BÖLÜM 4

JAKOBİYEN MATRİSİNİN HESAPLANMASI

Bu bölümde çapak alma robotunun uç işlevcisinin üç boyutlu uzayda hareketinden kaynaklanan açısal ve doğrusal hızları hesaplanacaktır. Ayrıca, robot kolunun hareketleri incelenirken **Jakobiyen** olarak isimlendirilen matris üzerinde durulacaktır.

Bir konum vektörünün hızı uzayda bir noktanın doğrusal hızı olarak düşünülebilir. Bir vektörün herhangi bir koordinat sistemindeki hızını bulabilmek için o koordinat sistemine göre vektörün türevi alınır. Başka bir deyişle o vektörün istenilen koordinat sistemine göre belli bir zaman dilimindeki yer değiştirme miktarı bulunur.

Doğrusal hız uzayda bir noktanın niteliği hakkında bilgi verirken açısal hız ise bir katı cismin veya bu katı cisme yerleştirilen bir koordinat sisteminin niteliğini açıklar (Bingül ve Küçük, 2005).

4.1 Robot Kollarının Komşu Bağları Arasındaki Hız İlişkisi

Art arda gelen her eklem birbirine göre açısal ve doğrusal hızlara sahiptir. Her bir eklem hızlarını bulabilmek için ana koordinat sisteminden başlanarak bir dizi işlem gerçekleştirilir. $i+1$. eklem hızı, i . eklem hız ifadesine, $i+1$. eklem açısal hızından kaynaklanan ifadenin de eklenmesiyle bulunur. Bilindiği gibi bir eklem açısal dönmesi her zaman Z ekseninde olacağından, $i+1$. eklem etrafında gerçekleşen $i+1$. eklem açısal hızı aşağıdaki gibi tanımlanır (Bingül ve Küçük, 2005).

$$\dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{i+1} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'deki ifadeyi, $\{i.\}$ koordinat sistemi cinsinden bulmak için ${}^{i+1}R$ ile çarpılır. Bu ifadeye de $i.$ eklem açışal hızı olan iW_i ifadesini eklersek, $i+1.$ eklem açışal hızını elde edilir.

$${}^iW_{i+1} = {}^iW_i + {}^{i+1}R\dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2'deki ifadeyi $\{i+1.\}$ koordinat sistemi cinsinden ifade etmek için her iki taraf ${}^{i+1}R$ ile çarpılır.

$$\begin{aligned} {}^{i+1}R{}^iW_{i+1} &= {}^{i+1}W_{i+1} \\ {}^{i+1}W_{i+1} &= {}^{i+1}R{}^iW_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$\{i+1.\}$ koordinat sisteminin doğrusal hızı ise, $\{i.\}$ koordinat sisteminin doğrusal hızına $\{i.\}$ koordinat sisteminin dönmesinden kaynaklanan yeni bir elemanın eklenmesiyle bulunur. Bu yeni eleman ${}^iW_i \times {}^iP_{i+1}$ ifadesidir. Doğrusal hızlar için aşağıdaki genel denklemler yazılabilir.

$${}^iV_{i+1} = {}^iV_i + {}^iW_i \times {}^iP_{i+1} \quad (4.4)$$

$${}^{i+1}V_{i+1} = {}^{i+1}R{}^iV_{i+1} = {}^{i+1}R({}^iV_i + {}^iW_i \times {}^iP_{i+1}) \quad (4.5)$$

Eğer sonraki eklem prizmatik ise, eklem değişkeni \dot{d}_{i+1} olacağından bu durumda ikinci eklemeye ait doğrusal hız aşağıdaki gibi olacaktır.

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_i R {}^i v_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^i v_i + {}^i w_i \times {}^i P_{i+1}) + \dot{d}_{i+1} {}^{i+1} \hat{Z}_{i+1} \quad (4.6)$$

Şu ana kadar elde edilen robotun genel açısal ve doğrusal hızlarını veren denklemler Çizelge 4.1’de bir arada verilmiştir (Bingül ve Küçük, 2005).

Çizelge 4.1. Bir robotun genel açısal ve doğrusal hız denklemleri

Eklem tipi	Genel doğrusal hız denklemleri	Genel açısal hız denklemleri
Dönel	${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^i v_i + {}^i w_i \times {}^i P_{i+1})$	${}^{i+1}w_{i+1} = {}^{i+1}_i R {}^i w_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1} \hat{Z}_{i+1}$
Prizmatik	${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^i v_i + {}^i w_i \times {}^i P_{i+1}) + \dot{d}_{i+1} {}^{i+1} \hat{Z}_{i+1}$	${}^{i+1}w_{i+1} = {}^{i+1}_i R {}^i w_i$

4.2 Jakobiyen Elde Etme Yöntemleri

Jakobiyen her bir eklemün uç işlevcisinin hızına katkısını belirler. Başka bir ifadeyle **Jakobiyen** matrisi eklem hızlarıyla uç işlevcisinin hızı arasında bir ilişki kurar.

Matematiksel bir ifade olarak **Jakobiyen**, türevin çok boyutlu olarak gerçekleştirildiği bir işlem biçimidir.

Eklem değişkenlerinin birer fonksiyonu olarak konum ve yönelimdeki değişim miktarını hesaplamak için pozisyonu veren herhangi bir fonksiyonun her eklem değişkenine göre kısmi türevi alınmalıdır (Bingül ve Küçük, 2005). Eğer gösterim, Denklem 4.7’deki gibi düşünülürse **Jakobiyen** Denklem 4.8 ve 4.9’daki haliyle ifade edilebilir. Burada Y uç noktasını, X ise eklem değişkenlerini ifade etmektedir.

$$Y = F(X) \quad (4.7)$$

$$\partial Y = \frac{\partial F}{\partial X} \partial X \quad (4.8)$$

$$\partial Y = J(X) \partial X \quad (4.9)$$

Yukarıdaki denklemde ∂Y eklemlerin konum ve yöneliminde meydana gelen yer değiştirmeyi, ∂F robotun konum ve yönelim ifadelerini, X ise eklem değişkenlerini göstermektedir.

Denklem 4.9'daki eşitliğin her iki tarafının da zamana göre türevi alınırsa, \dot{X} elde edilir.

$$\dot{Y} = J(X)\dot{X} \quad (4.10)$$

Konum ve yönelim vektörü X ifadesinin türevi 0v şeklinde gösterilirse Denklem 4.10 aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Burada 0V uç noktasının eksenlere göre hız bileşenlerini içeren vektörü, 0v doğrusal hızları, 0w da açısal hızları ifade etmektedir. $\dot{\theta}$ ise eklem değişkenlerinin hızını vermektedir.

$${}^0V = \begin{bmatrix} {}^0v \\ {}^0w \end{bmatrix} = {}^0J(\theta)\dot{\theta} \quad (4.11)$$

Yukarıdaki eşitlikten bir robot kolunun herhangi bir konfigürasyonu için uç işlevcisinin hızının eklem değişkenlerinin hızına doğrusal olarak bağlı olduğu görülmektedir. Bu ifade sadece anlık bir durumu göstermektedir. Devam eden anlık durumlarda ise, **Jakobiyen** de buna bağlı olarak değişir. Herhangi bir boyutta **Jakobiyen** tanımlanabilir. **Jakobiyen**'deki her bir satır robotun serbestlik derecesiyle belirlenir. **Jakobiyen** matristeki her bir kolon sayısını ise eklem değişkenlerinin sayısı belirler (Craig, 2005).

Jakobiyen matrisinin tersi alınabiliyorsa, bu durumda eklem değişkenlerinin değişim oranları Kartezyen uzaydaki hızlar cinsinden ifade edilebilir.

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\theta)V \quad (4.12)$$

Eğer J^{-1} her zaman elde edilebiliyorsa, bu ifade robot kontrolünde kullanılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta J^{-1} ifadesinin tekil noktalarda elde edilemeyeceğidir (Craig, 2005).

Bir robotun **Jakobiyen** matrisi, iteratif, vektörel çarpım ve doğrudan türev alma gibi üç farklı yöntem kullanılarak çıkarılabilir. İteratif ve vektörel çarpım yöntemleri robotun her bir eklemine ait hem açısal hem de doğrusal hızlarını verirken doğrudan türev alma yönteminde ise robot eklemlerinin sadece doğrusal hızlarına erişilebilmektedir (Bingül ve Küçük, 2005).

4.2.1 İteratif yöntem

Bu yöntemle **Jakobiyen** aşağıdaki adımları takip ederek bulunur.

1. ${}^N w_N$ ve ${}^N v_N$ ifadelerini elde etmek için her bir ekleme

$${}^{i+1}w_{i+1} = {}^{i+1}_i R {}^i w_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (4.13)$$

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_i R ({}^i v_i + {}^i w_i \times {}^i P_{i+1}) + \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (4.14)$$

ifadeleri uygulanır.

2. ${}^N w_N$ ve ${}^N v_N$ ifadeleri matris formunda yazılır ve

$${}^N \begin{bmatrix} w_N \\ v_N \end{bmatrix} = {}^N J(\theta) \dot{\theta} \quad (4.15)$$

ifadesinden ${}^N J(\theta)$ çekilir. Burada v_N ve w_N ifadelerinin 3x1 boyutlu vektör olduğu unutulmamalıdır.

3. Gerekliyse, ${}^0 w_N$ ve ${}^0 v_N$ ifadeleri elde edilir.

$${}^0 \begin{bmatrix} w_N \\ v_N \end{bmatrix} = {}^0 J(\theta) \dot{\theta} \quad (4.16)$$

ifadesinden ${}^0 J(\theta)$ çekilir (Bingül ve Küçük, 2005).

4.2.2 Doğrudan türev yöntemi

Eğer sadece doğrusal hızlara ait **Jakobiyen** matrisine ihtiyaç duyulursa bunun için daha kısa bir yöntem olan konum vektörünün doğrudan türevini almak yeterlidir. Bunun için de öncelikle robot kolunun istasyonu ile uç işlevcisi arasındaki bağıntıyı veren homojen dönüşüm matrisi ileri kinematik yoluyla bulunmalıdır. Bulunan homojen dönüşüm matrisinin son sütununun ilk üç elemanı üç boyutta konumu vermektedir. Her bir elemanın zamana göre türevi alınırsa doğrusal hızlar bulunmuş olur. Bunları da matris formunda yazarak $J(\theta)$ matrisi elde edilir.

4.2.3 Vektörel çarpım yöntemi

Genel olarak vektörel çarpım yöntemine göre i. eksene ait **Jakobiyen** bulunurken, diğer bütün eksenler dondurularak sadece i. eksene ait işlem yapılır. Tüm eksenler için aynı işlem tekrarlanarak toplam **Jakobiyen** matrisi bulunur. Örneğin, **Jakobiyen** matrisin birinci kolonu bulunurken diğer eklemler sabit tutulup birinci ekleme göre kısmi türev işlemi gerçekleştirilir (Bingül ve Küçük, 2005).

4.3 Başka Koordinat Sistemine Göre Jakobiyen Tanımlanması

{B} koordinat sistemine göre elde edilmiş **Jakobiyen** {A} koordinat sistemine göre şöyle tanımlanır. {B} koordinat sistemine göre tanımlanan Kartezyen hızlar **Jakobiyen** ve eklem hızları cinsinden yazılır.

$$\begin{bmatrix} {}^B v \\ {}^B w \end{bmatrix} = {}^B V = {}^B J(\theta) \dot{\theta} \quad (4.17)$$

Bu denklemden yararlanılarak ${}^A J(\theta)$ ifadesi bulunur.

$$\begin{bmatrix} {}^A v \\ {}^A w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A_B R & 0 \\ 0 & {}^A_B R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B v \\ {}^B w \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

yukarıdaki ifadede $\begin{bmatrix} {}^B v \\ {}^B w \end{bmatrix} = {}^B J(\theta) \dot{\theta}$ yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} {}^A v \\ {}^A w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A_B R & 0 \\ 0 & {}^A_B R \end{bmatrix} {}^B J(\theta) \dot{\theta} \quad (4.19)$$

Aynı zamanda $\begin{bmatrix} {}^A v \\ {}^A w \end{bmatrix} = {}^A J(\theta) \dot{\theta}$ olduğundan yukarıdaki ifade aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$${}^A J(\theta) \dot{\theta} = \begin{bmatrix} {}^A_B R & 0 \\ 0 & {}^A_B R \end{bmatrix} {}^B J(\theta) \dot{\theta} \quad (4.20)$$

Denklemin sağ ve sol tarafındaki $\dot{\theta}$ ifadeleri sadeleştirilirse {B} koordinat sistemine göre ifade edilmiş **Jakobiye**n {A} koordinat sistemine göre aşağıdaki gibi tanımlanmış olur (Craig, 2005).

$${}^A J(\theta) = \begin{bmatrix} {}^A R_B & \dot{0} \\ 0 & {}^A R_B \end{bmatrix} {}^B J(\theta) \quad (4.21)$$

4.4 Çapak Alma Robotunun Jakobiye Matrisinin Hesaplanması

Tasarlanan çapak alma robotunda hem prizmatik hem de dönel eklemler olduğu için **Jakobiye**n matrisi bulunurken hem açısal hem de doğrusal hızlara ihtiyaç vardır. Bölüm 4.2’de çeşitli **Jakobiye**n hesaplama yöntemleri üzerinde durulmuştur. Bu çalışmada doğrusal hızları hesaplamada kolaylık sağladığından eklemlerin doğrusal hızları doğrudan türev alma yöntemiyle hesaplanmıştır. Bunun yanında doğrudan türev alma yöntemi yalnızca doğrusal hızları verebildiğinden açısal hızları hesaplamak için de iteratif yöntemle başvurulmuştur. Tüm hızlar hesaplandıktan sonra matris formunda yazılarak **Jakobiye**n matrisi oluşturulmuştur.

İlk olarak ileri kinematik ile homojen dönüşüm matrisi oluşturulur (Bkz. Denklem 2.18). Bu matrisin son sütunu pozisyon vektörüdür. Pozisyon vektörünün her elemanını ayrı ayrı ele alınırsa aşağıdaki denklemleri elde etmiş olunur.

$$p_x = L_6(s_1 s_5 - c_1 c_4 c_5) + s_1(d_2 + 745) \quad (4.22)$$

$$p_y = -L_6(s_1 c_4 c_5 + c_1 s_5) - c_1(d_2 + 745) \quad (4.23)$$

$$p_z = -L_6 s_4 c_5 - d_3 \quad (4.24)$$

Her bir elemanın zamana göre türevi alınır da doğrudan türev alma yöntemiyle doğrusal hızları hesaplanmış olur. Türevi alınmış ifadeler aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
\dot{p}_x = v_x &= L_6 s_1 c_4 c_5 \dot{\theta}_1 + L_6 c_1 s_4 c_5 \dot{\theta}_4 + L_6 c_1 c_4 s_5 \dot{\theta}_5 + L_6 c_1 s_5 \dot{\theta}_1 + L_6 s_1 c_5 \dot{\theta}_5 + c_1 d_2 \dot{\theta}_1 + s_1 \dot{d}_2 + 745 c_1 \dot{\theta}_1 \\
\dot{p}_y = v_y &= -L_6 c_1 c_4 c_5 \dot{\theta}_1 + L_6 s_1 s_4 c_5 \dot{\theta}_4 + L_6 s_1 c_4 s_5 \dot{\theta}_5 + L_6 s_1 s_5 \dot{\theta}_1 - L_6 c_1 c_5 \dot{\theta}_5 + s_1 d_2 \dot{\theta}_1 - c_1 \dot{d}_2 + 745 s_1 \dot{\theta}_1 \\
\dot{p}_z = v_z &= -L_6 c_4 c_5 \dot{\theta}_4 + L_6 s_4 s_5 \dot{\theta}_5 - \dot{d}_3
\end{aligned}
\tag{4.25}$$

Bu ifadeleri de matris formunda yazarak Denklem 4.14'teki gibi **Jakobiyen** matrisini elde etmiş oluruz.

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_6 s_1 c_4 c_5 + L_6 c_1 s_5 + c_1 d_2 + 745 c_1 + 745 s_1 & s_1 & 0 & L_6 c_1 s_4 c_5 & L_6 c_1 c_4 s_5 + L_6 s_1 c_5 \\ -L_6 c_1 c_4 c_5 + L_6 s_1 s_5 + s_1 d_2 & -c_1 & 0 & L_6 s_1 s_4 c_5 & L_6 s_1 c_4 s_5 - L_6 c_1 c_5 \\ 0 & 0 & -1 & -L_6 c_4 c_5 & L_6 s_4 s_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{d}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \end{pmatrix}
\tag{4.26}$$

Yukarıda doğrudan türev alma yöntemiyle doğrusal hızlara ulaşılmıştır. Ancak açısal hızları bulabilmek için farklı bir yöntem daha ihtiyaç vardır. Çapak alma robotunun açısal hızlarını bulmak için iteratif yöntem seçilmiştir. İşlemler Bölüm 4.3.1'de anlatıldığı şekilde yapılarak açısal hızlara ulaşılmıştır. Öncelikle ilk eklemimiz dönel eklem olduğu için sadece Z eksenini etrafında Denklem 4.14'te ifade edildiği şekilde açısal hıza sahiptir.

$$\omega_1^1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix}
\tag{4.27}$$

İşlemler tekrarlanarak son ekleme kadar açısal hızlar hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}
\omega_1^1 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix} \\
\omega_2^2 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_1 \\ 0 \end{pmatrix} \\
\omega_3^3 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix} \\
\omega_4^4 &= \begin{pmatrix} c_4 & 0 & s_4 \\ -s_4 & 0 & c_4 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_4 \dot{\theta}_1 \\ c_4 \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_4 \end{pmatrix} \\
\omega_5^5 &= \begin{pmatrix} c_5 & 0 & -s_5 \\ -s_5 & 0 & -c_5 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_4 \dot{\theta}_1 \\ c_4 \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_5 s_4 \dot{\theta}_1 - s_5 \dot{\theta}_4 \\ -s_5 s_4 \dot{\theta}_1 - c_5 \dot{\theta}_4 \\ c_4 \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_5 \end{pmatrix} \\
\omega_u^u &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_5 s_4 \dot{\theta}_1 - s_5 \dot{\theta}_4 \\ -s_5 s_4 \dot{\theta}_1 - c_5 \dot{\theta}_4 \\ c_4 \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_5 s_4 \dot{\theta}_1 - s_5 \dot{\theta}_4 \\ -s_5 s_4 \dot{\theta}_1 - c_5 \dot{\theta}_4 \\ c_4 \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_5 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{4.28}$$

Hesaplanan açısal hızlar kendi eksenlerine göre hesaplandığı için uç işlevcisinin açısal hızını istasyon eksenine göre tekrar bulmak gerekir. Bunun için de Bölüm 4.3'te anlatıldığı gibi uç işlevcisinin açısal hız matrisi, istasyonla uç işlevcisi arasındaki bağıntıyı veren dönme matrisiyle çarpılmalıdır. İşlemler aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.

$$\begin{aligned}
\omega_u^0 = R_u^0 \omega_u^u &= \begin{pmatrix} c_1 c_4 c_5 + s_1 s_5 & c_1 c_4 c_5 - c_1 c_5 & -c_1 s_4 \\ s_1 c_4 c_5 + c_1 s_5 & -s_1 c_4 c_5 - c_1 c_5 & -s_1 s_4 \\ s_4 c_5 & -s_4 s_5 & c_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_5 s_4 \dot{\theta}_1 - s_5 \dot{\theta}_4 \\ -s_5 s_4 \dot{\theta}_1 - c_5 \dot{\theta}_4 \\ c_4 \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_5 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} (-c_1 c_4 s_4 + c_1 s_4 c_5 s_5 + s_1 s_4 c_5 s_5 + c_1 c_4 s_4 c_5^2 - c_1 c_4 s_4 c_5 s_5) \dot{\theta}_1 + (c_1 c_5^2 - s_1 s_5^2 - c_1 c_4 c_5^2 - c_1 c_4 c_5 s_5) \dot{\theta}_4 - c_1 s_4 \dot{\theta}_5 \\ (-s_1 c_4 s_4 + 2c_1 s_4 c_5 s_5 + s_1 c_4 s_4 c_5^2 + s_1 c_4 s_4 s_5^2) \dot{\theta}_1 + (c_1 c_5^2 - c_1 s_5^2) \dot{\theta}_4 - s_1 s_4 \dot{\theta}_5 \\ (c_4^2 + s_4^2 c_5^2 + s_4^2 s_5^2) \dot{\theta}_1 + c_4 \dot{\theta}_5 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} (-c_1 c_4 s_4 + c_1 s_4 c_5 s_5 + s_1 s_4 c_5 s_5 + c_1 c_4 s_4 c_5^2 - c_1 c_4 s_4 c_5 s_5) \dot{\theta}_1 + (c_1 c_5^2 - s_1 s_5^2 - c_1 c_4 c_5^2 - c_1 c_4 c_5 s_5) \dot{\theta}_4 - c_1 s_4 \dot{\theta}_5 \\ 2c_1 s_4 c_5 s_5 \dot{\theta}_1 + (c_1 c_5^2 - c_1 s_5^2) \dot{\theta}_4 - s_1 s_4 \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_1 + c_4 \dot{\theta}_5 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{4.29}$$

Hesaplanan açısal hızlar da matris formunda yazılarak Denklem 4.30'daki gibi **Jakobiyen** matrisi oluşturulmuştur.

$$\begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -c_1 c_4 s_4 + c_1 s_4 c_5 s_5 + s_1 s_4 c_5 s_5 + c_1 c_4 s_4 c_5^2 - c_1 c_4 s_4 c_5 s_5 & 0 & 0 & c_1 c_5^2 - s_1 s_5^2 - c_1 c_4 c_5^2 - c_1 c_4 c_5 s_5 & -c_1 s_4 \\ & 2c_1 s_4 c_5 s_5 & 0 & c_1 c_5^2 - c_1 s_5^2 & -s_1 s_4 \\ & 1 & 0 & 0 & c_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \end{pmatrix} \tag{4.30}$$

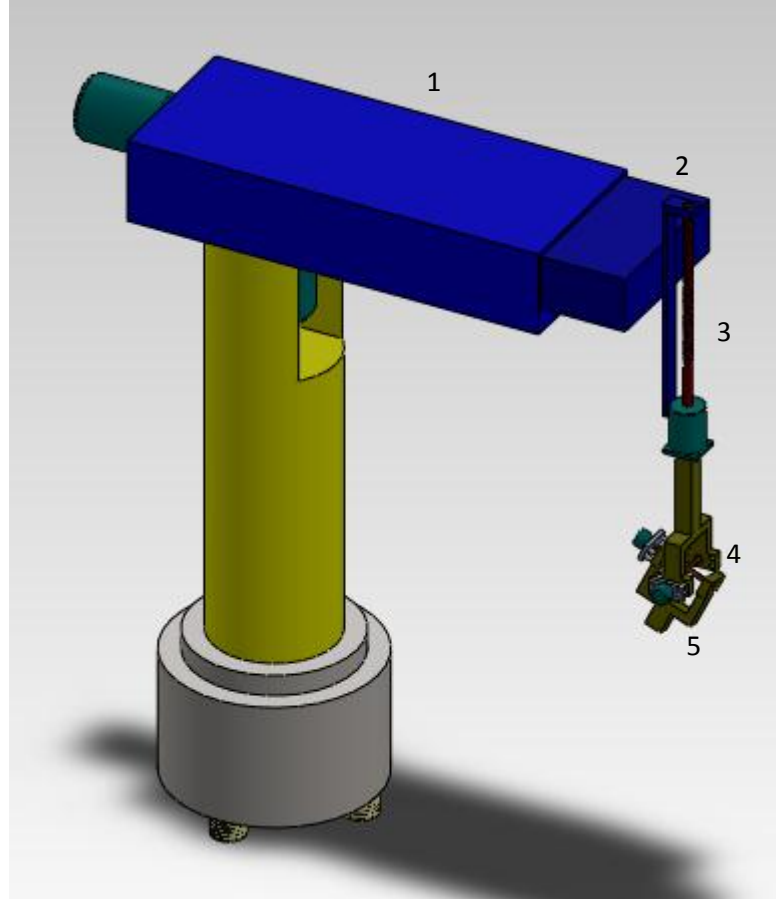
BÖLÜM 5

ROBOT SİMÜLASYONUNDA SOLIDWORKS KULLANIMI

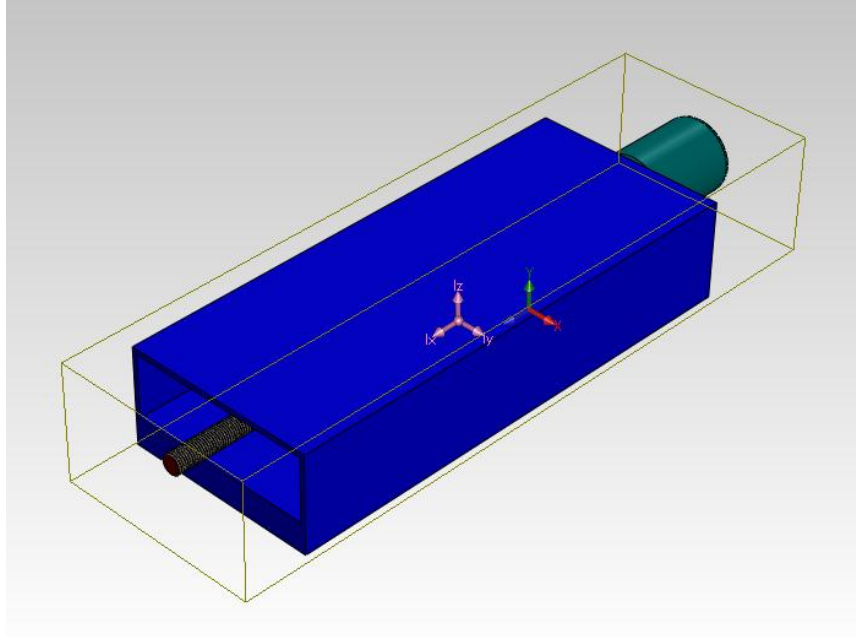
Solidworks programı üç boyutlu katı mekanizmaların bilgisayar ortamında çizilip geliştirilmesini sağlayan, içerisinde mekanik hesaplama için izin veren birçok araç barındıran bir yazılım ortamıdır. Bölüm 6’da, her bir eklemin hesaplanması istenen tork ifadeleri için parçaların kütleleri, kütle merkezleri ve atalet momentleri bilinmelidir. Tasarlanan çapak alma robotu karmaşık ve özgün şekilli birçok parçadan oluştuğu için parçaların kütlelerinin, kütle merkezlerinin ve atalet momentlerinin hesaplanması zor bir hal almaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek amacıyla **Solidworks** programının kullanımına karar verilmiştir. Robotun her parçası program ara yüzünde tek tek çizilmiş, parçaların malzemeleri program üzerinde seçilmiş daha sonra da yine program üzerinde montajlanmıştır. **Solidworks**’ün içerdiği kütle özellikleri aracı sayesinde de istenilen kütle merkezlerine, parçaların ağırlıklarına ve atalet momentlerine kolayca erişilebilmiştir. Bu araçla tork ifadesini sayısal olarak hesaplamayı sağlayacak kütle merkezlerinin, atalet momentlerinin ve her parçanın kütlelerinin sayısal ifadelerine ulaşılmıştır.

Tork ifadeleri her bir ekleme için ayrı ayrı hesaplandığından, çapak alma robotu da parça parça ele alınmalıdır. Bu nedenle her parça **Solidworks** üzerinde çizildikten sonra teker teker o parçanın kütlesi, kütle merkezi ve atalet momenti program üzerinden çekilmiştir. Burada alınan atalet momenti program üzerinde “Çıktı koordinat sisteminden alınmış” ifadesiyle verilen atalet momentidir. Çapak alma robotu beş eklemden oluştuğu için beş adet de bağa sahiptir. Aşağıda her bir bağ için oluşturulan **Solidworks** çizimi ve gerekli olan parametreler sırasıyla verilmiştir. Çizimler üzerine mavi, yeşil ve kırmızı renklerden oluşan referans koordinat sistemi ile parçanın ağırlık merkezi eklenmiştir. Kütle merkezi referans koordinat sistemine göre uzaklıkları vermektedir.

Aşağıda ilk olarak robotun montajlanmış hali verilmiştir. Daha sonra her bağ tek tek ele alınarak istenilen önce her bağın şekli sonrasında da kütle özellikleri verilmiştir. Montajlanmış şekil üzerindeki numaralar bağların numaralarını göstermektedir.



Şekil 5.1 Tasarlanan çapak alma robotunun montajlanmış hali



Şekil 5.2 Tasarlanan çapak alma robotunun birinci bağı

link1 (Assembly Configuration - Varsayılan)'in Kütle özellikleri

Çıktı koordinat Sistemi: -- varsayılan --

Kütle = 35537.62 gram

Hacim = 35537617.82 milimetre küp

Yüzey alanı = 2686501.53 milimetre kare

Kütle merkezi: (milimetre)

X = 0.00
Y = 68.84
Z = 184.21

Birincil Eylemsizlik Eksenleri ve Birincil Eylemsizlik Momenti: (gram * milimetre kare)
Kütle merkezinden alınmış.

$I_x = (0.00, -0.03, 1.00)$	$P_x = 616166394.25$
$I_y = (1.00, -0.00, 0.00)$	$P_y = 4019210125.33$
$I_z = (0.00, 1.00, 0.03)$	$P_z = 4363479699.60$

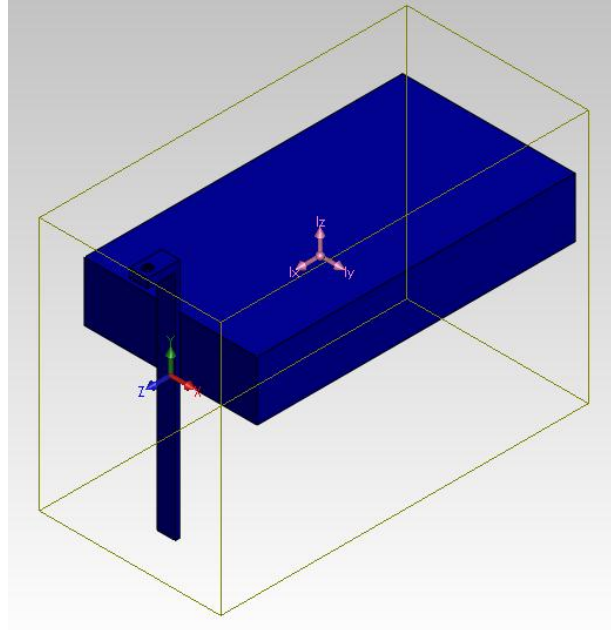
Atalet momenti: (gram * milimetre kare)
Kütle merkezinden alınmış ve çıktı koordinat sistemi ile hizalanmış.

$L_{xx} = 4019210125.33$	$L_{xy} = -1574.68$	$L_{xz} = 1114.17$
$L_{yx} = -1574.68$	$L_{yy} = 4359478228.47$	$L_{yz} = -122387720.85$
$L_{zx} = 1114.17$	$L_{zy} = -122387720.85$	$L_{zz} = 620167865.38$

Atalet momenti: (gram * milimetre kare)
Çıktı koordinat sisteminden alınmış.

$I_{xx} = 5393508407.53$	$I_{xy} = -888.72$	$I_{xz} = 2949.80$
$I_{yx} = -888.72$	$I_{yy} = 5565375651.93$	$I_{yz} = 328249784.98$
$I_{zx} = 2949.80$	$I_{zy} = 328249784.98$	$I_{zz} = 788568724.12$

Şekil 5.3 Tasarlanan çapak alma robotunun birinci bağının kütle özellikleri



Şekil 5.4 Tasarlanan çapak alma robotunun ikinci bağı

link2 (Assembly Configuration - Varsayılan)'in Kütle özellikleri

Çıktı koordinat Sistemi: -- varsayılan --

Kütle = 14025.31 gram

Hacim = 14025305.68 milimetre küp

Yüzey alanı = 1449125.54 milimetre kare

Kütle merkezi: (milimetre)

X = 0.00
Y = 63.94
Z = -328.65

Birincil Eylemsizlik Eksenleri ve Birincil Eylemsizlik Momenti: (gram * milimetre kare)
Kütle merkezinden alınmış.

Ix = (0.00, -0.01, 1.00)	Px = 258374532.03
Iy = (1.00, 0.00, 0.00)	Py = 677422153.81
Iz = (0.00, 1.00, 0.01)	Pz = 850441129.34

Atalet momenti: (gram * milimetre kare)
Kütle merkezinden alınmış ve çıktı koordinat sistemi ile hizalanmış.

Lxx = 677422153.81	Lxy = 3.58	Lxz = 2.17
Lyx = 3.58	Lyx = 850403441.63	Lyz = -4723580.25
Lzx = 2.17	Lzy = -4723580.25	Lzz = 258412219.73

Atalet momenti: (gram * milimetre kare)
Çıktı koordinat sisteminden alınmış.

Ixx = 2249693922.45	Ixy = 4.05	Ixz = -0.25
Iyx = 4.05	Iyy = 2365326372.26	Iyz = -299476137.07
Izx = -0.25	Izy = -299476137.07	Izz = 315761057.75

Şekil 5.5 Tasarlanan çapak alma robotunun ikinci bağıının kütle özellikleri



Şekil 5.6 Tasarlanan çapak alma robotunun üçüncü bağı

link3 (Assembly Configuration - Varsayılan)'in Kütle özellikleri

Çıktı koordinat Sistemi: -- varsayılan --

Kütle = 1356.10 gram

Hacim = 1356104.20 milimetre küp

Yüzey alanı = 171527.61 milimetre kare

Kütle merkezi: (milimetre)

X = 0.00
Y = -0.00
Z = 298.40

Birincil Eylemsizlik Eksenleri ve Birincil Eylemsizlik Momenti: (gram * milimetre kare)
Kütle merkezinden alınmış.

Ix = (0.00, -0.00, 1.00)	Px = 1586541.44
Iy = (0.00, -1.00, -0.00)	Py = 49581855.83
Iz = (1.00, 0.00, 0.00)	Pz = 50436988.73

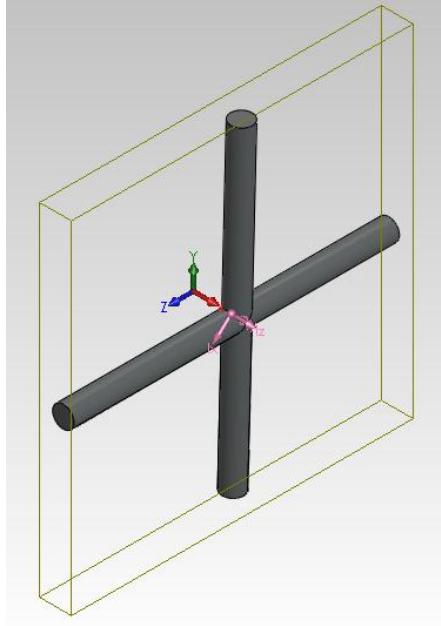
Atalet momenti: (gram * milimetre kare)
Kütle merkezinden alınmış ve çıktı koordinat sistemi ile hizalanmış.

Lxx = 50436988.73	Lxy = -0.76	Lxz = 16.65
Lyx = -0.76	Lyy = 49581855.83	Lyz = -61.36
Lzx = 16.65	Lzy = -61.36	Lzz = 1586541.44

Atalet momenti: (gram * milimetre kare)
Çıktı koordinat sisteminden alınmış.

Ixx = 171187648.59	Ixy = -0.76	Ixz = 47.65
Iyx = -0.76	Iyy = 170332515.69	Iyz = -87.99
Izx = 47.65	Izy = -87.99	Izz = 1586541.44

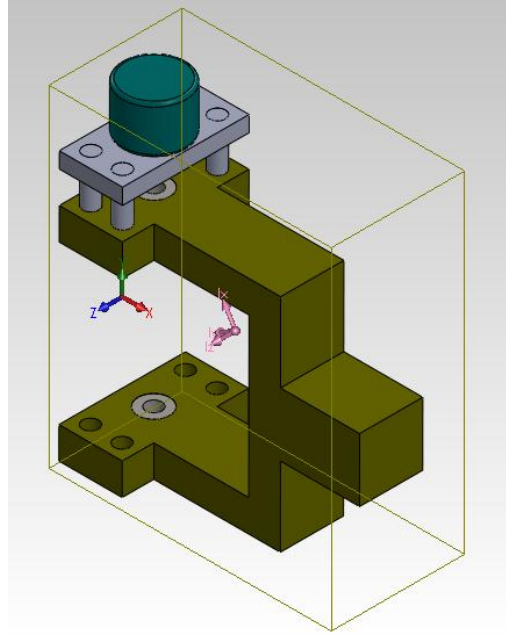
Şekil 5.7 Tasarlanan çapak alma robotunun üçüncü bağının kütle özellikleri



Şekil 5.8 Tasarlanan çapak alma robotunun dördüncü bağı

link4 (Assembly Configuration - Varsayılan)'in Kütle özellikleri		
Çıktı koordinat Sistemi: -- varsayılan --		
Kütle = 22.90 gram		
Hacim = 22895.27 milimetre küp		
Yüzey alanı = 9338.92 milimetre kare		
Kütle merkezi: (milimetre)		
X = 20.07		
Y = 2.44		
Z = 2.57		
Birincil Eylemsizlik Eksenleri ve Birincil Eylemsizlik Momenti: (gram * milimetre kare)		
Kütle merkezinden alınmış.		
Ix = (-0.02, -0.71, 0.71)	Px = 22293.85	
Iy = (-0.02, -0.71, -0.71)		Py = 22596.93
Iz = (1.00, -0.03, 0.00)	Pz = 44602.93	
Atalet momenti: (gram * milimetre kare)		
Kütle merkezinden alınmış ve çıktı koordinat sistemi ile hizalanmış.		
Lxx = 44587.14	Lxy = 591.16	Lxz = -4.06
Lyx = 591.16	Lyy = 22461.18	Lyz = -151.49
Lzx = -4.06	Lzy = -151.49	Lzz = 22445.39
Atalet momenti: (gram * milimetre kare)		
Çıktı koordinat sisteminden alınmış.		
Ixx = 44874.83	Ixy = 1711.57	Ixz = 1178.08
Iyx = 1711.57	Iyy = 31833.82	Iyz = -7.85
Izx = 1178.08	Izy = -7.85	Izz = 31802.63

Şekil 5.9 Tasarlanan çapak alma robotunun dördüncü bağının kütle özellikleri



Şekil 5.10 Tasarlanan çapak alma robotunun beşinci bağı

link5 (Assembly Configuration - Varsayılan)'in Kütle özellikleri

Çıktı koordinat Sistemi: -- varsayılan --

Kütle = 483.13 gram

Hacim = 483132.00 milimetre küp

Yüzey alanı = 90421.05 milimetre kare

Kütle merkezi: (milimetre)

X = 71.50
Y = 17.17
Z = -0.03

Birincil Eylemsizlik Eksenleri ve Birincil Eylemsizlik Momenti: (gram * milimetre kare)
Kütle merkezinden alınmış.

$I_x = (-0.51, 0.86, -0.00)$	$P_x = 1066082.90$
$I_y = (-0.86, -0.51, 0.00)$	$P_y = 2043459.16$
$I_z = (0.00, 0.00, 1.00)$	$P_z = 2854645.74$

Atalet momenti: (gram * milimetre kare)
Kütle merkezinden alınmış ve çıktı koordinat sistemi ile hizalanmış.

$L_{xx} = 1791898.91$	$L_{xy} = -427300.84$	$L_{xz} = 664.77$
$L_{yx} = -427300.84$	$L_{yy} = 1317646.86$	$L_{yz} = -2391.18$
$L_{zx} = 664.77$	$L_{zy} = -2391.18$	$L_{zz} = 2854642.02$

Atalet momenti: (gram * milimetre kare)
Çıktı koordinat sisteminden alınmış.

$I_{xx} = 1934405.06$	$I_{xy} = 165950.73$	$I_{xz} = -258.18$
$I_{yx} = 165950.73$	$I_{yy} = 3787353.17$	$I_{yz} = -2612.88$
$I_{zx} = -258.18$	$I_{zy} = -2612.88$	$I_{zz} = 5466853.79$

Şekil 5.11 Tasarlanan çapak alma robotunun beşinci bağının kütle özellikleri

BÖLÜM 6

ROBOT DİNAMIĞININ HESAPLANMASI

Dinamik, harekete neden olan kuvvetlerin incelenmesi olarak tanımlanabilir. Bir robot kolunu ivmelendirebilmek, uç işlevcisini sabit hızla hareket ettirebilmek ve sonunda durdurabilmek için eklemlere belli bir torkun uygulanması gereklidir. Eklemlere uygulanan tork ifadesi, robotun takip ettiği yörünge, eklemlerin kütlesi, kolun kaldıracağı yük gibi birçok duruma bağlıdır. Robot kolunun arzu edilen yörüngeyi takip edebilmesi için kolun dinamik denklemleri kullanarak eklemlere uygulanacak tork ifadelerinin bulunması gereklidir(Bingül ve Küçük, 2005).

Robot kolu dinamiğiyle ilgili iki nokta önemlidir mevcuttur. İlki eklem değişkenlerine bağlı olan tork ifadesinin bulunmasıdır. İkincisi ise bulunacak bu tork ifadesinin hangi yöntemle elde edileceğidir.

Bu bölümde, robot kollarının kontrolünde gerekli olan robot kolu dinamik denklemlerinin çıkarılmasında kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir.

Bir robot kolunun dinamik modeli, robot kolunun dinamik davranışlarını belirleyen hareket denklemlerinden oluşur. Robot kolunun dinamik analizi, eklemlere tahrik elemanları tarafından uygulanan moment veya kuvvet büyüklükleri ile robot kolunun zamana göre konumu, hızı ve ivmesi arasındaki ilişkilerin incelenmesi demektir. Böyle bir analiz için, robot kolun dinamik davranışlarını tanımlayan doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin elde edilmesi ve çözülmesi gerekmektedir (Karahana, 2007).

Robot kol dinamiği, robot kol hareketindeki denklemlerin matematiksel formülasyonu ile uğraşır. Bundan dolayı kolun hareket denklemi, kolun dinamik davranışını tanımlayan bir dizi matematiksel denklemden oluşur. Bu dinamik denklem, doğrusal olmayan, birbirleriyle bağlantılı ve ikinci dereceden bir diferansiyel denklem sistemini gösterir. Bir kolun gerçek dinamik modeli, Newton ve Lagrangian mekaniği

gibi bilinen fiziksel kanunlardan elde edilebilir (Spong and Vidyasagar, 1989; Craig, 2005).

Robot kolunun dinamik denklemlerinin elde edilmesi konusunda Lagrange-Euler ve Newton-Euler formülasyonu temel alınarak şimdiye kadar birçok çalışma yapılmış ve bu iki formülasyon kullanılarak birçok yöntem geliştirilmiştir (Duffy, 1980).

Robot kolunun dinamik denklemlerini elde etmek için literatürde bilinen birçok yöntem vardır. Bunlar, Lagrange-Euler (L-E), Recursive Lagrange (R-L), Newton-Euler(N-E), Genelleştirilmiş D'Alambert (G-D) prensibi gibi yaklaşımlardır (Lewis et al, 1993; Craig, 2005).

Bu yöntemlerden en çok kullanılanlar, önce Uicker'in (1965) geliştirip daha sonra Bejczy'nin (1974) uyguladığı Lagrange-Euler. Walker ve Paul'un (1980) geliştirdiği Newton-Euler yöntemleridir.

Bejczy (1974), ardışıl robot bağları için 4x4 homojen dönüşüm matris gösteriminden faydalanarak altı serbestlik derecesine sahip bir Stanford robotunun dinamik modelini, genelleştirilmiş koordinatlardan faydalanıp iş ve enerji ifadelerinden yararlanan Lagrange-Euler formülasyonunu kullanarak çıkarmıştır. Matlab simulink benzeşim programı için uygun bir yapıya sahip Lagrange-Euler yöntemi yoğun matematiksel ifadeler içermesine karşın, geçmiştekinin aksine günümüz bilgisayarında gerçek zamanlı ileri ve ters dinamik problem çözümünde oldukça hızlı işlediğinden, çok sık tercih edilir bir yöntem olmuştur.

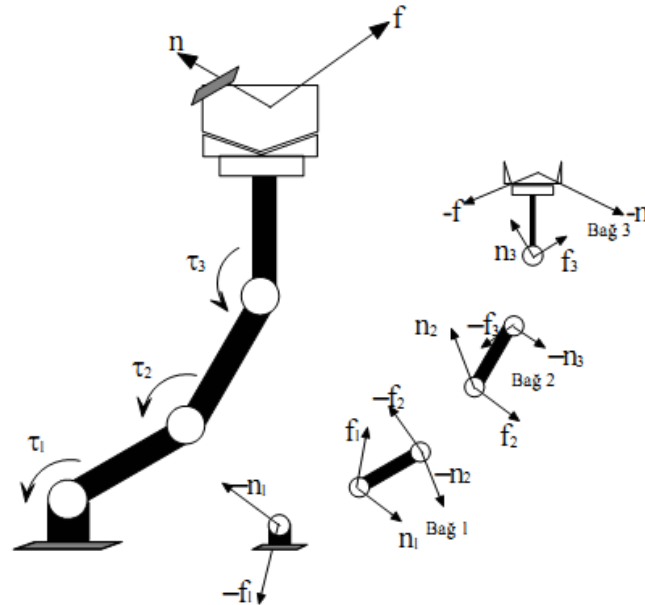
Newton-Euler yöntemi, Armstrong (1979), Orin, Ghee, Vukobratovic ve Hartoch (1979) ve Luh (1980) tarafından robot kolunun dinamik modelini çıkarmak için kullanılmıştır. Bu yöntemle dinamik model çıkarılırken ana koordinat çerçevesinden başlayarak uç işlevcinin koordinat çerçevesine kadar özyineli işlemler basitçe gerçekleştirilir. Buna karşın Newton-Euler yöntemi, elde edilen denklemlerin vektörel çarpım terimlerini içermesinden dolayı oldukça zahmetli bir yöntemdir (Karahan, 2007).

6.1 Newton-Euler Formülasyonu

Bu formülasyon, Newton'un ikinci kanununun doğrudan yorumlanmasıyla çıkarılır. Bu kanun kuvvet ve moment açısından dinamik sistemleri tanımlar. Bu denklemler, robot bağları üzerinde etkili olan tüm kuvvet ve momentleri birleştirir. Kuvvetlerin ve momentlerin kendi çerçeveleri dahilinde tanımlanmasına göre Denklem 6.1 ve 6.2, bağa uygulanan kuvvet veya momenti verir. Şekil 6.1'de her bir eklem üzerinde oluşan kuvvet ve momentler gösterilmektedir. Bunlar bağlar üzerinde kuvvet yayılımını göstermektedirler (Craig, 1989; Spong and Vidyasagar, 1989; Duffy 1980: Karahan'dan (2007)).

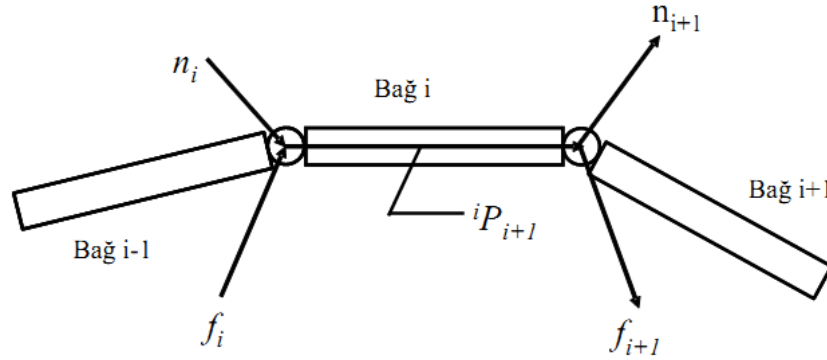
$${}^i f_i = {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1} \quad (6.1)$$

$${}^i n_i = {}_{i+1}^i R^{i+1} n_{i+1} + {}^i P_{i+1} \times {}^i f_i \quad (6.2)$$



Şekil 6.1. Bağlar üzerinde oluşan kuvvet ve torklar (Karahan'dan, 2007)

Denklemlerde yer alan f_i , bağ (i-1) tarafından bağ (i) üzerinde harcanan kuvveti göstermektedir. n_i , bağ (i-1) tarafından bağ (i) üzerinde sarf edilen torku göstermektedir (Karahana, 2007).

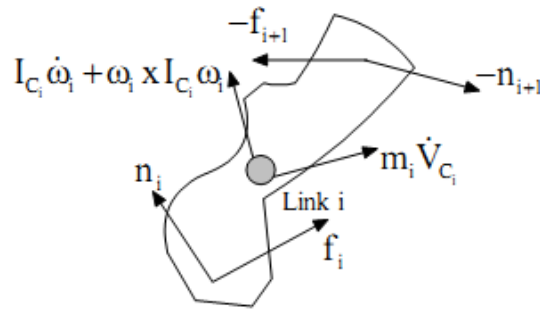


Şekil 6.2 Kuvvet ve tork yayılımı (Karahana'dan, 2007)

Newton-Euler algoritmasına göre bir bağ üzerinde oluşan kuvvet ve moment Denklem 6.3 ve 6.4 ile elde edilir (Şekil 6.3).

$$F_i = m_i \dot{v}_{C_i} \quad (6.3)$$

$$N_i = I_{C_i} \dot{\omega}_i + \omega_i \times I_{C_i} \omega_i \quad (6.4)$$



Şekil 6.3 Bağ (i) üzerindeki dinamik kuvvetler (Karahana'dan, 2007)

Denklemlerde yer alan \dot{v}_{C_i} doğrusal ivmeyi, I_{C_i} atalet tensörünü, w_i ve \dot{w}_i sırasıyla açısal hız ve açısal ivmeyi gösterir. Bu denklemler, bağın atalet kuvveti ve momentidir.

Denklem 6.3 ve 6.4'ten yola çıkarak Newton-Euler algoritmasını bağ (i) üzerinde uygulandığında, bu bağ üzerinde oluşan kuvvet ve tork, Denklem 6.5 ve 6.6 ile ifade edilir. Burada P_{C_i} (i). eklem kütle merkezini, P_{i+1} (i+1). Eklem pozisyonunu vermektedir (Karahana, 2007).

$$f_i = F_i + f_{i+1} \quad (6.5)$$

$$n_i = N_i + n_{i+1} + P_{C_i} \times F_i + P_{i+1} \times f_{i+1} \quad (6.6)$$

Bu denklemlerden eklem torkunu elde etmek için eklem eklem değişkenine bakılır. Eğer eklem prizmatik ya da dönel eklem olması durumunda Denklem 6.7 kullanılır.

$$\tau_i = \begin{cases} n_i Z_i \text{ döner} \\ f_i Z_i \text{ kayma} \end{cases} \quad (6.7)$$

Newton-Euler algoritmasını kullanarak en son bağdan geriye doğru istasyon çerçevesine kadar olan kuvvet veya momentler hesaplanır. Bu hesaplama için gerekli olan denklemler aşağıda verilmiştir.

$${}^i f_i = {}_{i+1} R^{i+1} f_{i+1} + {}^i F_i \quad (6.8)$$

$${}^i n_i = {}^i N_i + {}_{i+1} R^{i+1} n_{i+1} + {}^i P_{C_i} \times F_i + {}^i P_{i+1} \times {}_{i+1} R^{i+1} f_{i+1} \quad (6.9)$$

Jakobiyen matrisinin transpozu ile uç işlevicide oluşan kuvvet çarpıldığında ise eklem torklarını veren Denklem 6.10 elde edilir.

$$\tau = J^T F \quad (6.10)$$

Burada F, kuvvet veya moment vektörü τ ise eklem torkları vektörüdür (Karahana, 2007).

6.2 Lagrange-Euler Formülasyonu

Kol dinamiğinde Newton-Euler formülasyonuna alternatif olan Lagrange-Euler formülasyonu, genelleştirilmiş koordinatları kullanarak iş ve enerji açısından sistemin dinamik davranışını belirler. Robot dinamiğinde Lagrange-Euler fonksiyonlarını, Lee 1982'de, Tourassis ve Neuman 1985'te, Vukabratovic ve Kircanski 1985'te oldukça uygun bir formda sunmuşlardır. Özyineli ilişkileri ise Waters 1979'da ve Hollerbach 1980'de ortaya koymuşlar ve hesaplamaları basitleştirmişlerdir.

Buradaki ana fikir, bir sistemin içerdiği toplam iş ve enerji ile sistemin ifade edilmesi, bu yöntemin esasını oluşturur. Ayrıca matematiksel ifadeleri çıkarmak Newton-Euler yönteminden daha basit ve daha sistemattir (Karahana, 2007).

Lagrange-Euler yöntemi iş ve enerji eşitliğini kullandığı için öncelikle enerjiden bahsetmek gerekecektir.

Doğrusal bir hızla hareket eden bir kütle için kinetik enerjisini veren denklem 6.15 aşağıda gösterilmiştir.

$$K = \frac{1}{2} m v^2 \quad (6.15)$$

Şekil 6.3'te verilen kütlenin dönme kinetik enerjisi denklem 6.16 ile ifade edilir.

$$K_{rot} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (6.16)$$

Bu denklemde yer alan atalet momenti ise denklem 6.17 ile hesaplanır.

$$I = \int_{vol} \rho(r) r^2 dr \quad (6.17)$$

Denklemde yer alan r , hacimdeki yarıçap ve bu yarıçaptaki kütle dağılımı ise $\rho(r)$ 'dir. m 'nin bir nokta kütlesi olduğu durumda, bu atalet momenti denklem 6.18 şeklinde olur.

$$I = mr^2 \quad (6.18)$$

Dönme kinetik enerjisi, daha güzel bir şekilde denklem 6.19 ile ifade edilebilir.

$$K_{rot} = \frac{1}{2} mr^2 \dot{\theta}^2 \quad (6.19)$$

Sabit g yerçekimi ivmesindeki h yüksekliğinde bulunan bir m kütlenin potansiyel enerjisi, Denklem 6.20 ile ifade edilir.

$$P = mgh \quad (6.20)$$

Sıfır potansiyel enerjiye karşılık gelen referans noktası keyfi olarak seçilebilir. Çünkü potansiyel enerjideki farklar, yalnızca fiziksel kuvvetler açısından anlamlıdır.

Aynı referans noktasına göre bir F kuvvetin torku ise Denklem 6.23 ile ifade edilir (Karahana, 2007).

$$N = rXF \quad (6.23)$$

6.2.1 Lagrange hareket denklemi

Kinetik enerji ile potansiyel enerji arasındaki fark Lagrange olarak Denklem 6.24'te ifade edilir.

$$L = K - P \quad (6.24)$$

Bir sistem için Lagrange hareket denklemi aşağıda bulunan Denklem 6.25 ile ifade edilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6.25)$$

Burada ;

q_i : i. eklemin genelleştirilmiş koordinatları

\dot{q}_i : i. eklemin genelleştirilmiş hızları

τ_i : genelleştirilmiş i. kuvvet

Hareket denklemi kullanıldığında q , eklem açılarından θ_i (derece ya da raydan olarak) ve eklem ofsetlerinden d_i (metre) oluşan eklem değişkeni vektörüdür. Buna göre τ , eklem açılara karşılık gelen tork n_i (Nm) ve eklem ofsetlerine karşılık gelen kuvvet f_i (N) parçalarına sahip bir vektördür (Karahan, 2007).

6.3 Çapak Alma Robotunun Dinamik Analizi

Bu bölümde çapak alma robotunun dinamik modeli çıkarılmıştır. Lagrange-Euler yönteminin hesap yükünün ağır olmasına rağmen dinamik modelin çıkarılmasında kullanılan matris işlemlerinin Newton-Euler yöntemine göre daha kolay gerçekleştirilmesi ve kontrolör tasarımını kolaylaştırması nedeniyle çapak alma robotunun dinamik modeli çıkarılırken Lagrange-Euler yöntem tercih edilmiştir.

Bölüm 6.2’de anlatıldığı şekilde Lagrange denkleminin hesaplanabilmesi için öncelikle enerji denklemleri türetilmelidir. Bunun için de enerji denklemlerinin her bir elemanın uygun koşullarda bulunması gerekmektedir. Bu amaçla öncelikle kinetik enerjilerin hesaplarında kullanılacak olan parçaların doğrusal hızlarının kareleri istasyona göre hesaplanmıştır. Doğrusal hızlar pozisyon vektörünün zamana göre türevleri alınarak bulunmuştur. Doğrusal hızların kareleri bulunduktan sonra Denklem 6.15’te verilen kinetik enerji formülü yardımıyla doğrusal hızlardan kaynaklanan kinetik enerjinin sayısal ifadesi bulunmuştur. Çapak alma robotu dönel eklem de içerdiğinden açısal hızlar nedeniyle de kinetik enerjiye sahiptir. Açısal hızlar sebebiyle sahip olduğu kinetik enerjiyi bulmak için Denklem 6.19’da verilen ifade kullanılmıştır. Böylece iki ifadeyi toplayarak robot kolunun sahip olduğu toplam kinetik enerjiye ulaşılmıştır. Her bir bağına sahip olduğu potansiyel enerjiyi bulmak için de Denklem 6.21 kullanılmış ayrı ayrı potansiyel enerjiler bulunmuştur. Denklem 6.24 ile de Lagrange olarak ifade edilen matrise ulaşılmıştır. Artık elde edilen Lagrange matrisi sayesinde her bir eklem için gerekli olan torklara erişilebilir. Bunun için Denklem 6.25 yardımı ile torkların sayısal olarak hesaplanması yeterlidir. Tüm değerler yerine konularak her bir eklemin tork ifadesine ulaşılmıştır.

Hesaplanan dinamik denklemleri çok uzun ve karmaşık olduğu için burada verilmemiştir. Denklemler tezin sonunda Ek.2. kısmında verilmiştir.

BÖLÜM 7

UYGULAMA

Çapak alma robotunun ileri ve ters kinematikleri, **Jakobiyen** matrisi ve Lagrange matrisine bağlı tork ifadeleri hesaplandıktan sonra her eklem için ayrı ayrı açı ya da uzunluk değişimlerine, uç noktasının izlediği yola, her eklem pozisyonunun birinci türevlerine, ikinci türevlerine ve torklarına ulaşılabilir. Bu bölümde üç farklı yörünge seçilmiş, hesaplanan tüm denklemler Matlab ortamına aktarılmıştır. İstenilen bu üç yörünge programa aktarılarak yukarıda bahsedilen tüm parametreler hesaplatılmıştır. Bunların yanında uç noktasının hızının sabit 3m/dk olması istenmektedir. Robot kolunun bir doğru boyunca hareketinde herhangi bir problem yaşanmazken yörüngenin köşe noktalarında uç noktasının pozisyonunun ikinci türevi çok büyük değerlere ulaşabilmektedir. Bu durumu önleyebilmek için uç noktasının hızının ani değişimini engelleyecek parabolik bir modelleme uygulanmıştır. Uç noktasının hızı köşe noktalarına yaklaşırken exponansiyel olarak azaltılmış, köşe noktalarından uzaklaşırken de exponansiyel olarak arttırılmıştır. Amaç uç noktadaki ivmelenmeyi belirli bir bant aralığında tutup, ivmenin sürekli olmasını sağlamaktır.

Parabolik modelleme yapılırken hızın ani olarak artması gereken durumlarında izlenen yörünge üzerinden 100 örneklem noktası alınmıştır. Yani noktasal olarak belirlenen yörüngeden 100 birim alınmıştır. Bu 100 birimin ilk 50 biriminde eğimi pozitif olan bir parabolün sağ yarısı düşünülmüş, son 50 biriminde de eğimi negatif olan yarım bir parabolün sol yarısı ile istenilen hız değerine ulaşılmıştır. Hızın ani olarak azalması gereken durumlarda ise, yine 100 örneklem noktası alınmıştır. Bu 100 örneklem noktasının ilk 50 noktasında eğimi negatif olan parabolün sağ yarısı şeklinde modelleme yapılırken, son 50 noktasında pozitif eğimli bir parabolün sol yarısı ile hızın istenilen seviyeye gelmesi sağlanmıştır. Modellemede kullanılan parabol denklemi, Denklem 7.1'de görülen klasik parabol denklemidir.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (7.1)$$

Parabolün tepe noktası, $T(r, k)$ olarak düşünülmektedir. Bu kabulde parabol denklemini Denklem 7.2’de verildiği hale dönüştürülebilir.

$$y = a(x - r)^2 + k \quad (7.2)$$

Hızın artması ya da azalması gereken noktalar, parabolün tepe noktası olarak düşünülerek yukarıda bahsedildiği şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Denklem 7.2’deki r , tepe noktasının x bileşeni, k ise y bileşenidir. Buradan hareketle artış ve azalışlardaki birimler 50’şer birim seçildiği için r her zaman 50 olarak seçilmiş, k ise toplamda 100 birim sonra hızın ulaşması gereken seviye olarak seçilmiştir. Tüm değişkenler yerlerine konup hesaplamalar yapılarak modelleme tamamlanmıştır. Bu konuyla ilgili uygulamalar Şekil 7.15 ve Şekil 7.16’da açıkça görülmektedir. Ayrıca her yörünge için kullanılan hızların x ve y bileşenlerini gösteren grafiklerde de uygulama açıklamalara paralel şekilde görülmektedir. Robot kolunun uç noktasının hız ve ivme grafikleri de uygulamaların sonunda çizdirilmiştir.

Parametrelerin hesaplanmasında aşağıda verilen sabitler kullanılmıştır. Sabitlerin bir kısmı bölüm 5’te bahsedildiği şekilde **Solidworks** programından çekilmiş, diğerleri de istenilen şekilde eklenmiştir.

```
%Kütleler (kg)
m1=35537.62/10^3;
m2=14025.31/10^3;
m3=1356.10/10^3;
m4=22.90/10^3;
m5=483.13/10^3;
```

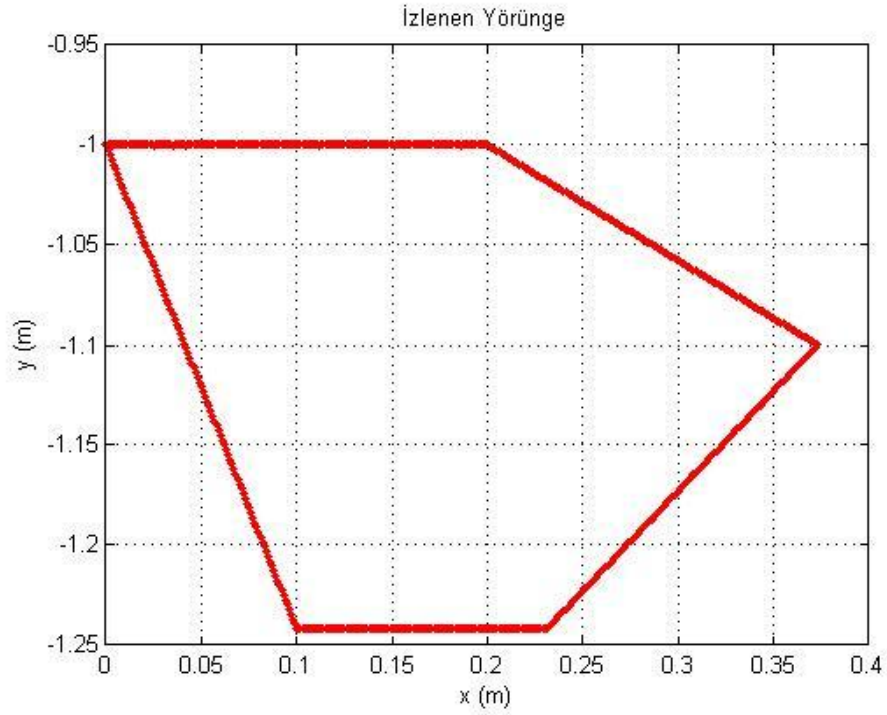
```
% Uç parça uzunluğu (m)
l6=170/10^3;
```

```
% Ağırlık merkezleri (m)
pc1x=0.00;
pc1y=68.84/10^3;
pc1z=184.21/10^3;
pc2x=0.00;
pc2y=63.94/10^3;
pc2z=-328.65/10^3;
```

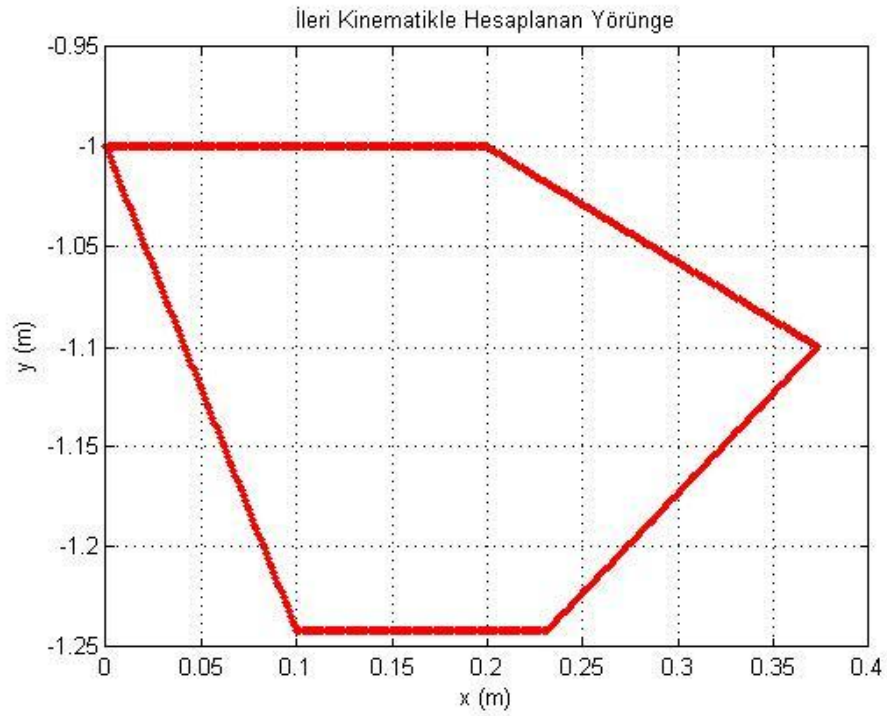


```
pc3x=0.00;  
pc3y=0.00;  
pc3z=298.40/10^3;  
pc4x=20.07/10^3;  
pc4y=2.44/10^3;  
pc4z=2.57/10^3;  
pc5x=71.50/10^3;  
pc5y=17.17/10^3;  
pc5z=0.03;  
  
% Eylemsizlik momentleri (kg*m^2)  
izz1=788568724.12/10^9;  
izz2=315761057.75/10^9;  
izz3=1586541.44/10^9;  
ixx4=44874.83/10^9;  
ixy4=1711.57/10^9;  
ixz4=1178.08/10^9;  
iyy4=31833.82/10^9;  
iyz4=-7.85/10^9;  
izz4=31802.63/10^9;  
ixx5=1934405.06/10^9;  
ixz5=-258.18/10^9;  
izz5=5466853.79/10^9;  
  
% Yerçekimi ivmesi (m/s^2)  
g=10000/10^3;  
  
% İvmeler (m/s^2)  
ax=0;  
ay=0;  
az=0;
```

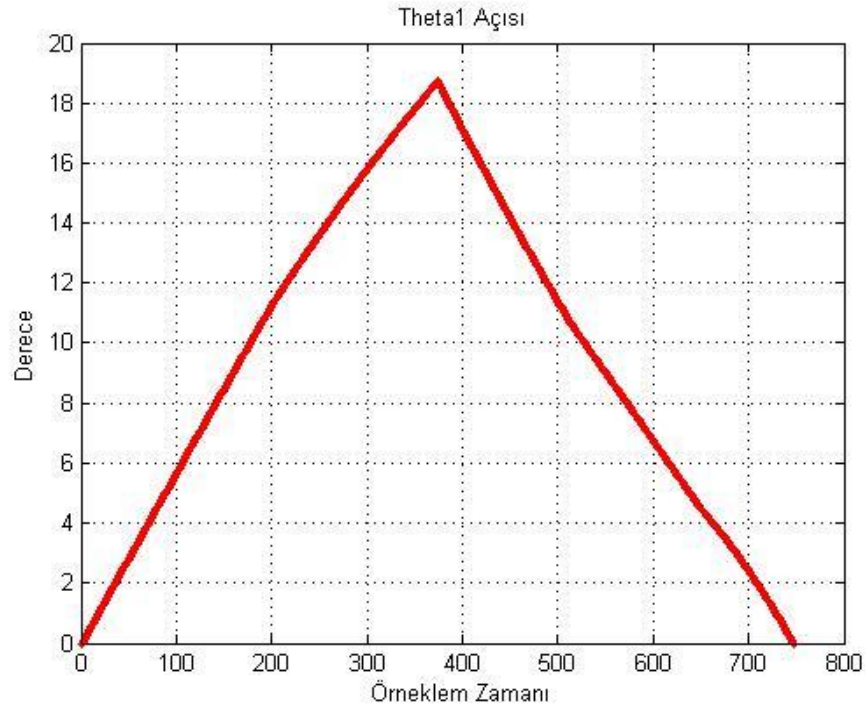
1. İlk olarak doğrulardan oluşan bir yörünge seçilmiş parametreler ekrana bastırılmıştır.



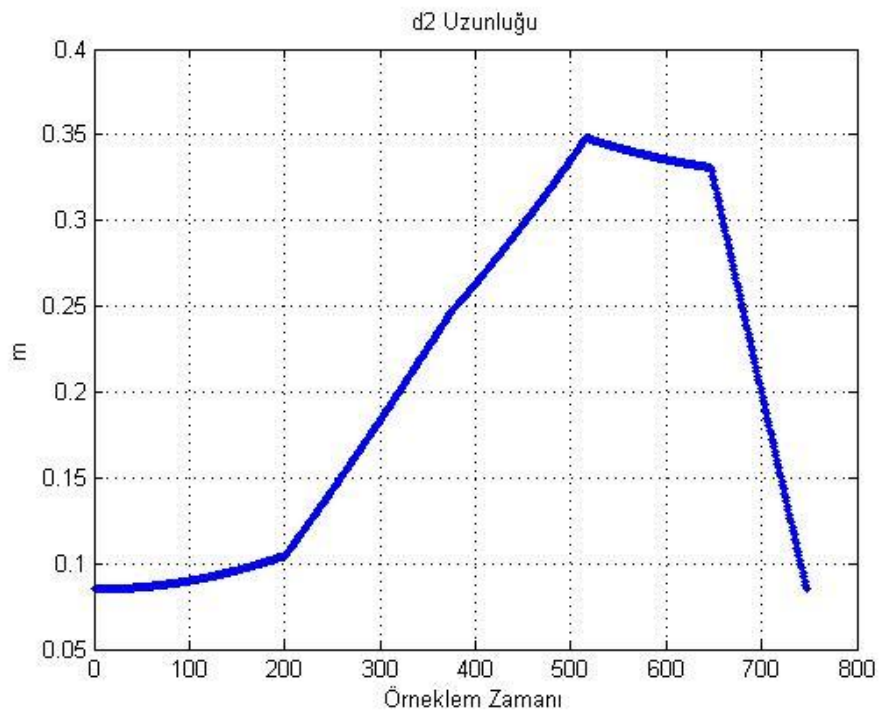
Şekil 7.1 Doğrulardan oluşan yörünge



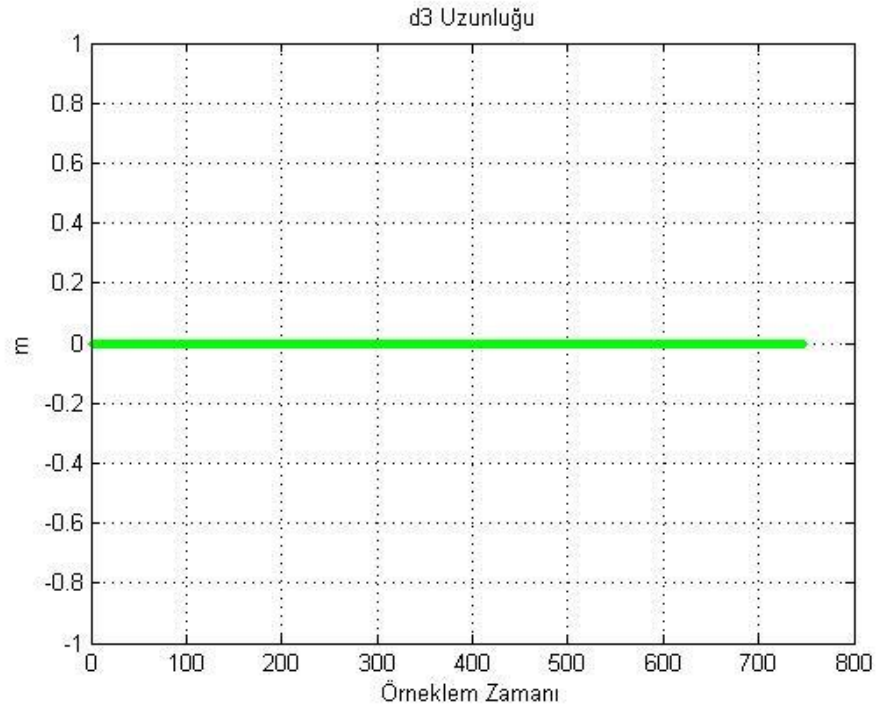
Şekil 7.2 İleri kinematikle hesaplanan yörünge



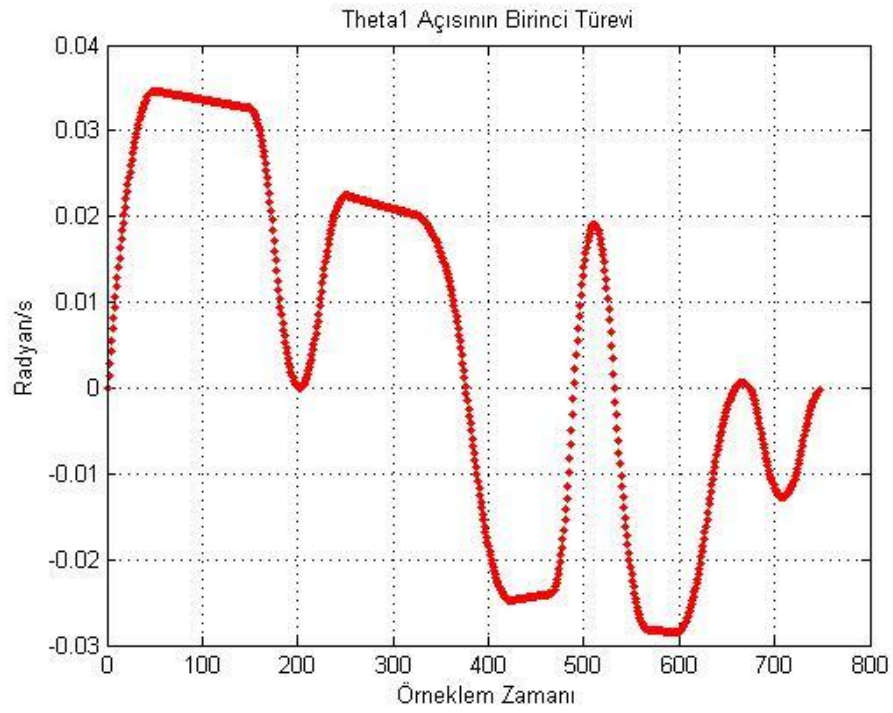
Şekil 7.3 Birinci eklemin açısındaki değişim



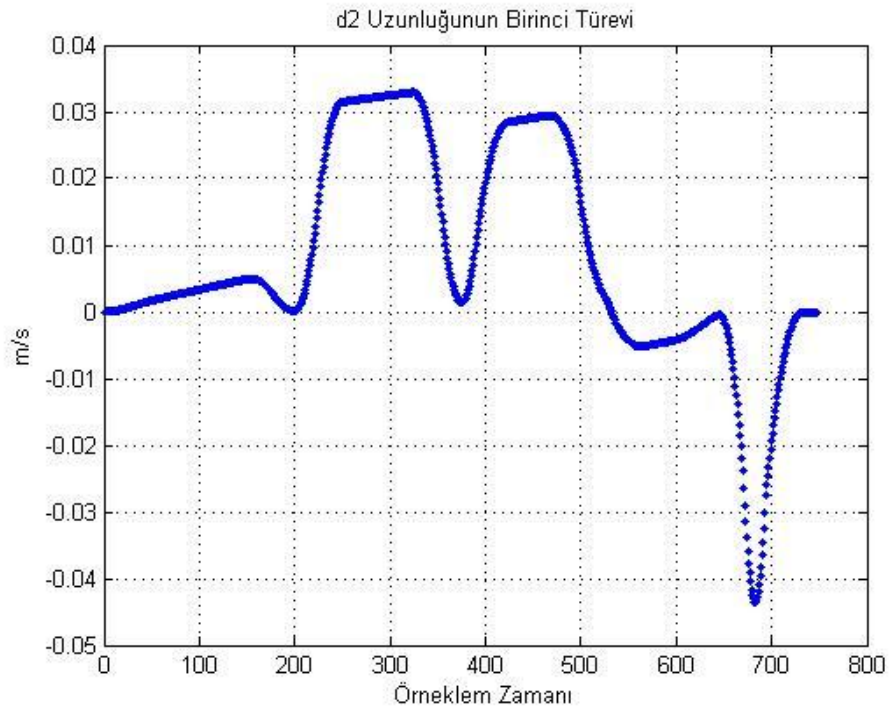
Şekil 7.4 İkinci bağıın uzunluğundaki değişim



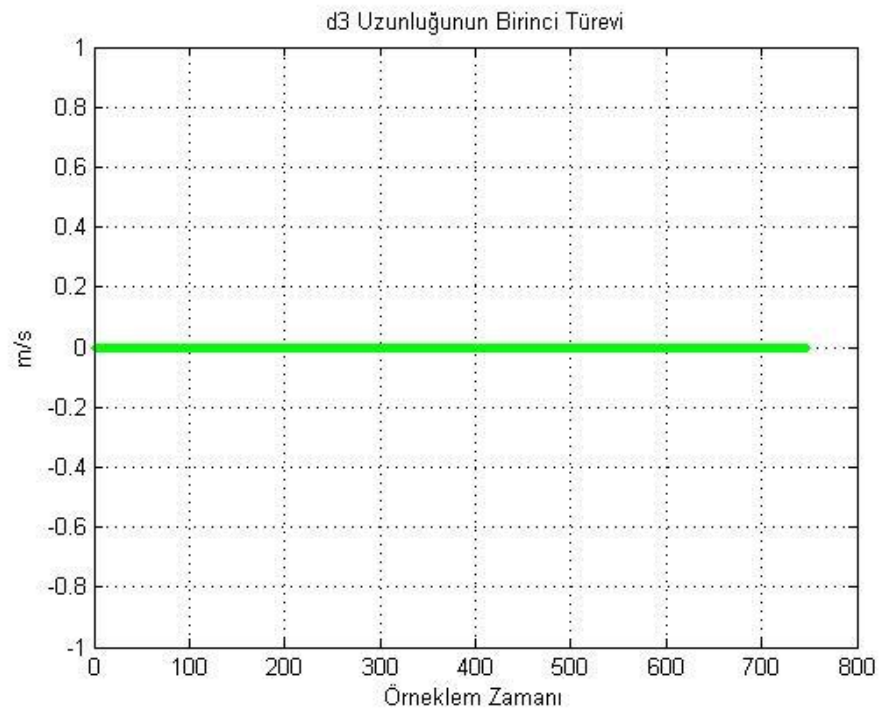
Şekil 7.5 Üçüncü bağımlı uzunluğundaki değişim



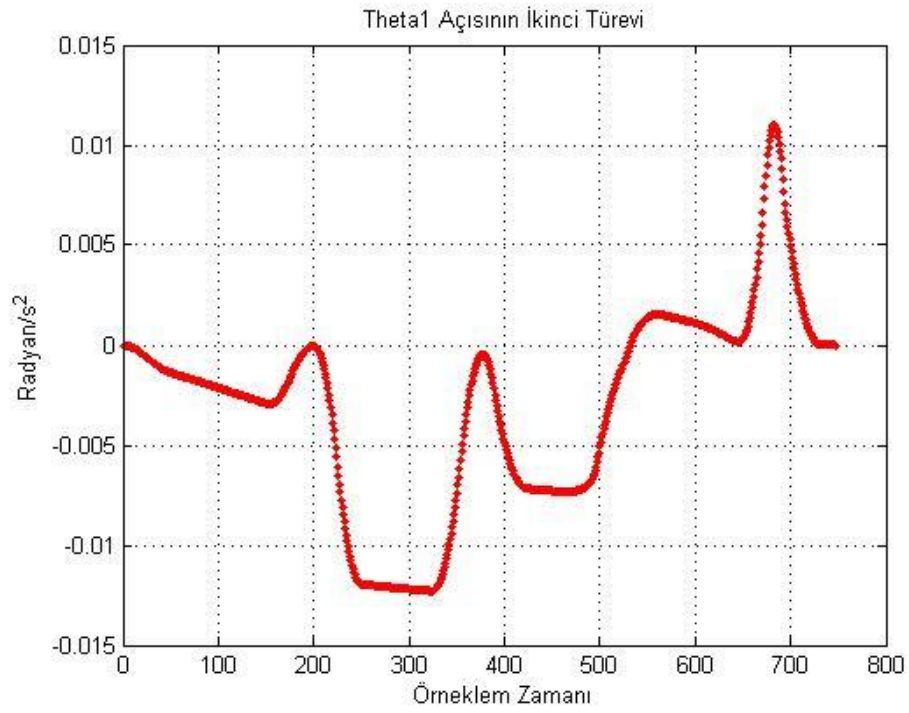
Şekil 7.6 Birinci eklem hızı



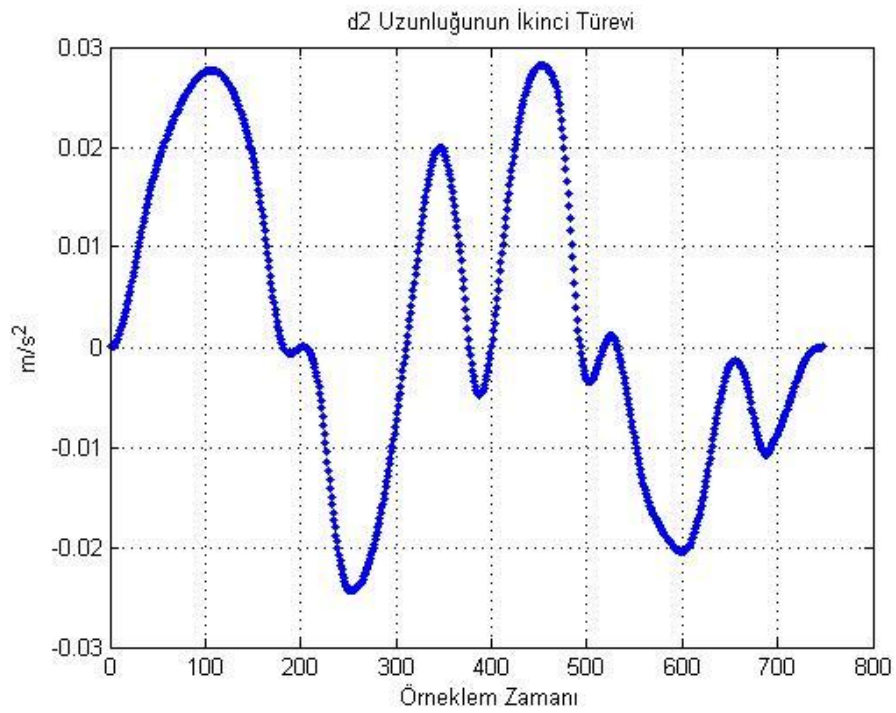
Şekil 7.7 İkinci eklem hızı



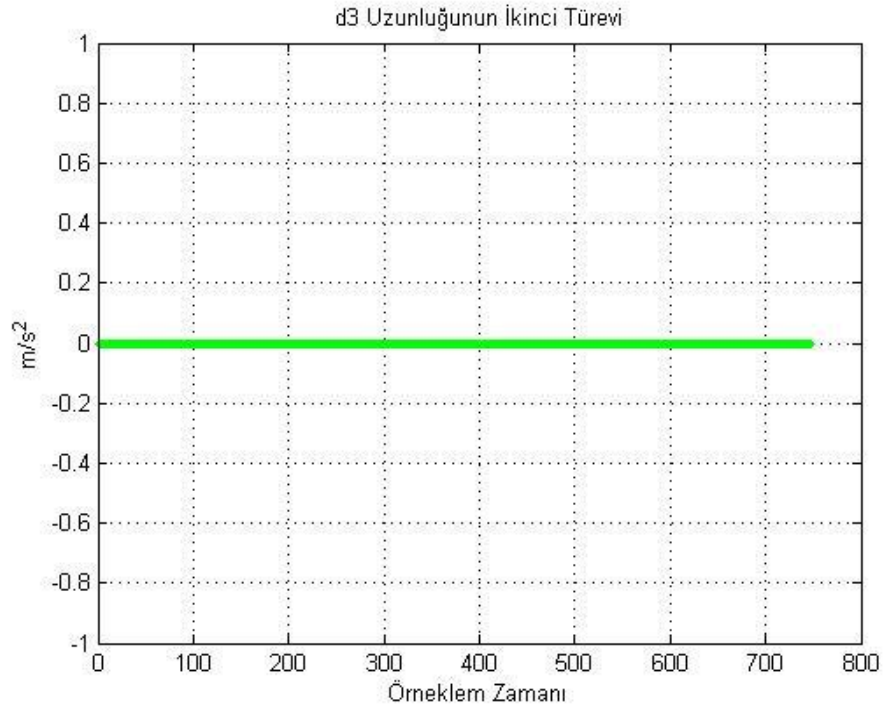
Şekil 7.8 Üçüncü eklem hızı



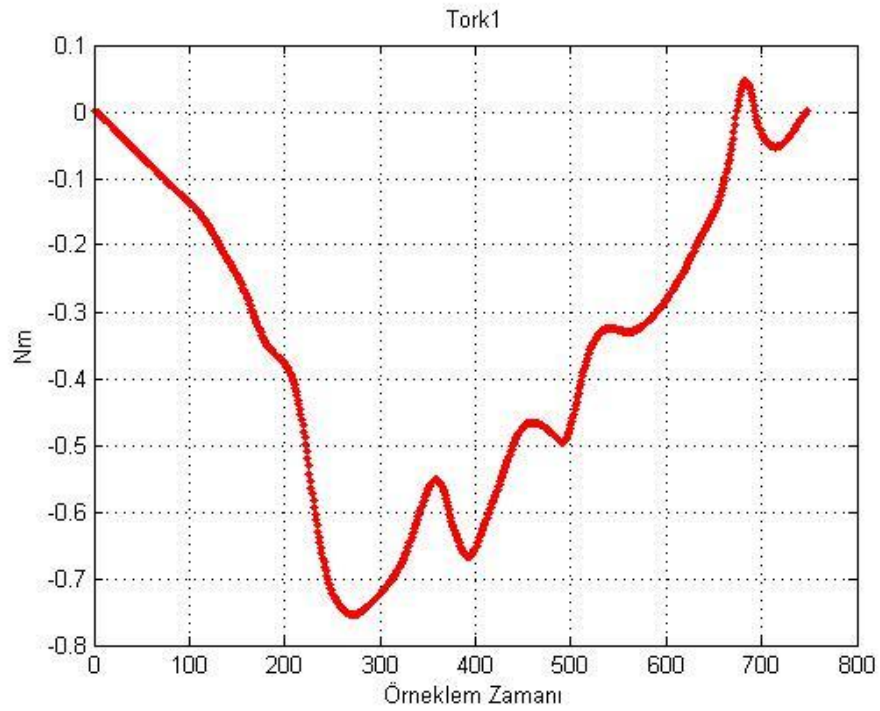
Şekil 7.9 Birinci eklemin ivmesi



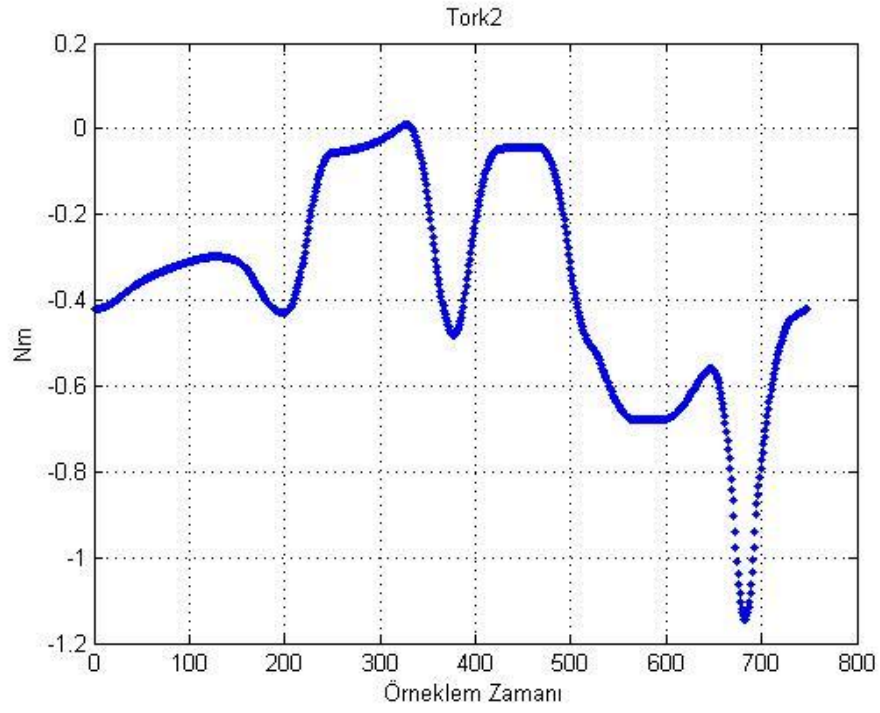
Şekil 7.10 İkinci eklemin ivmesi



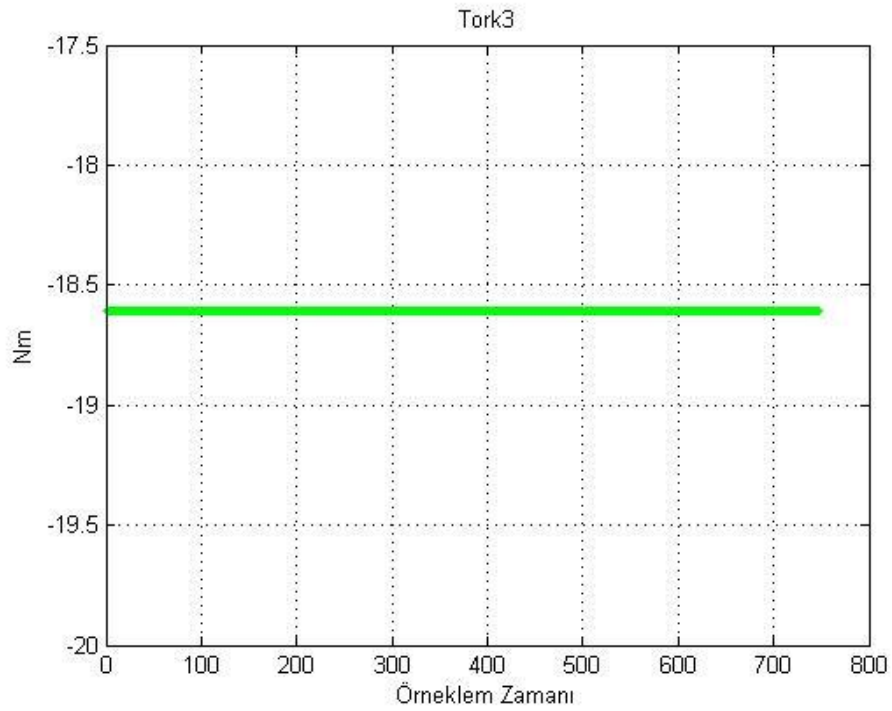
Şekil 7.11 Üçüncü eklem ivmesi



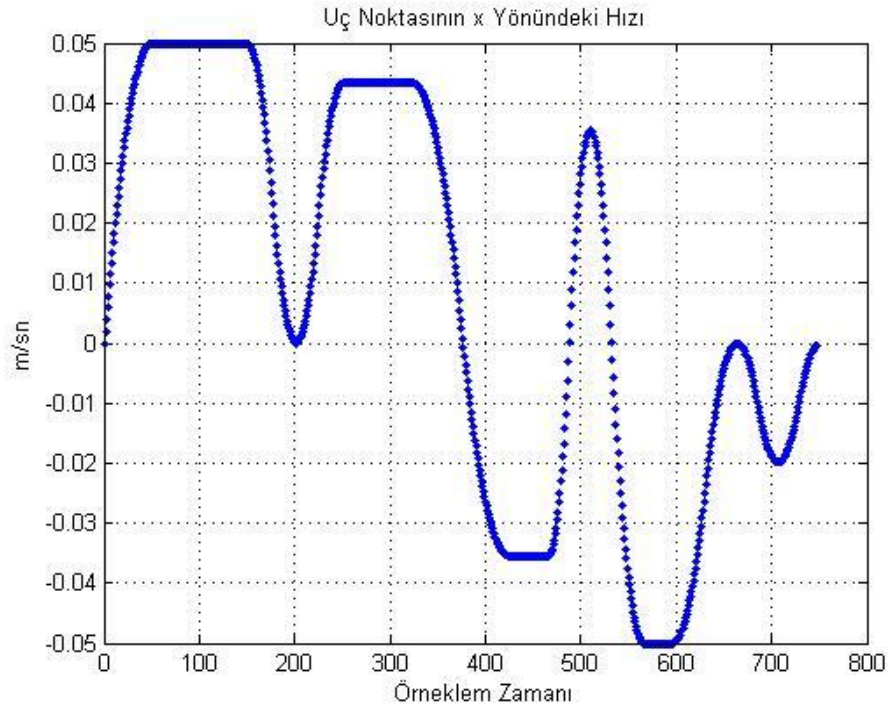
Şekil 7.12 Birinci ekleme uygulanması gereken tork



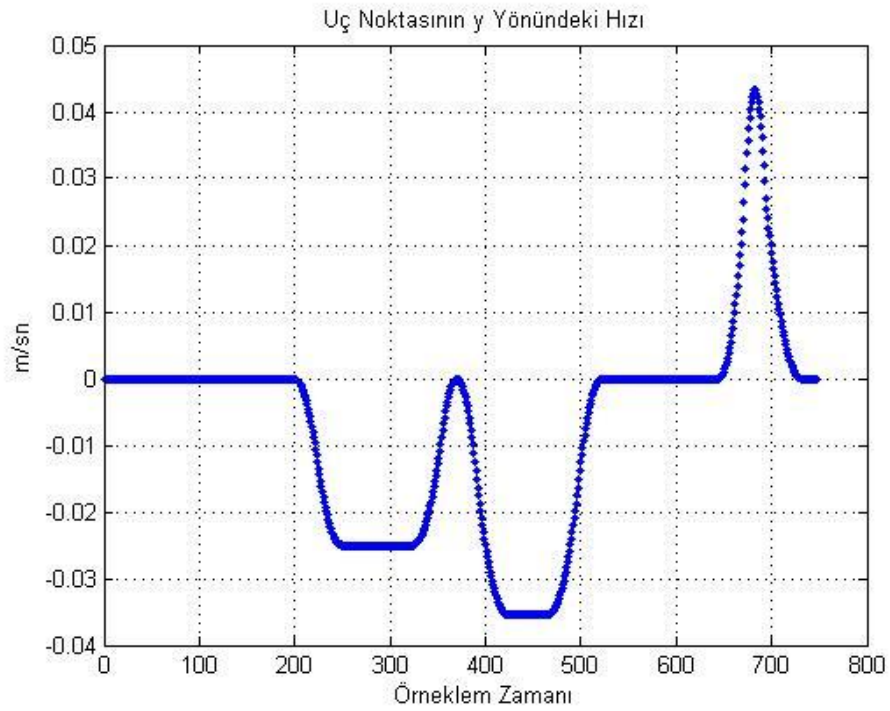
Şekil 7.13 İkinci ekleme uygulanması gereken tork



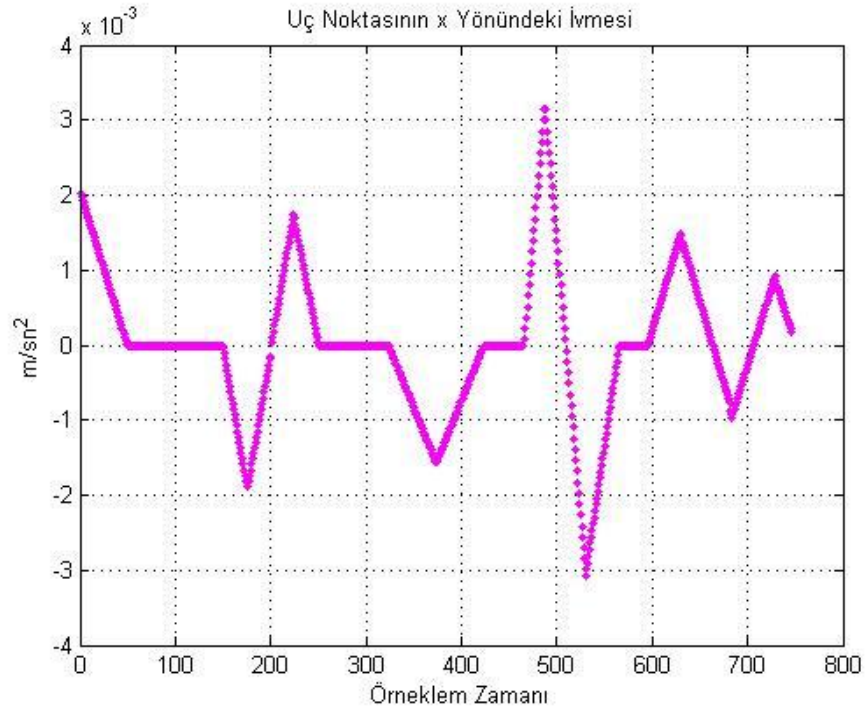
Şekil 7.13 Üçüncü ekleme uygulanması gereken tork



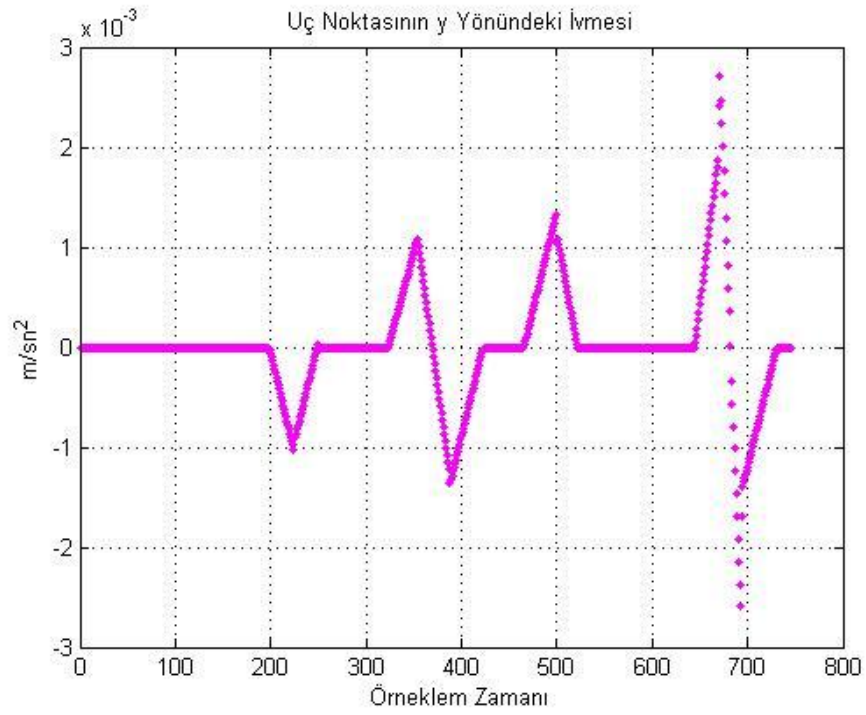
Şekil 7.15 Uç noktasının “x” yönündeki hızı



Şekil 7.16 Uç noktasının “y” yönündeki hızı



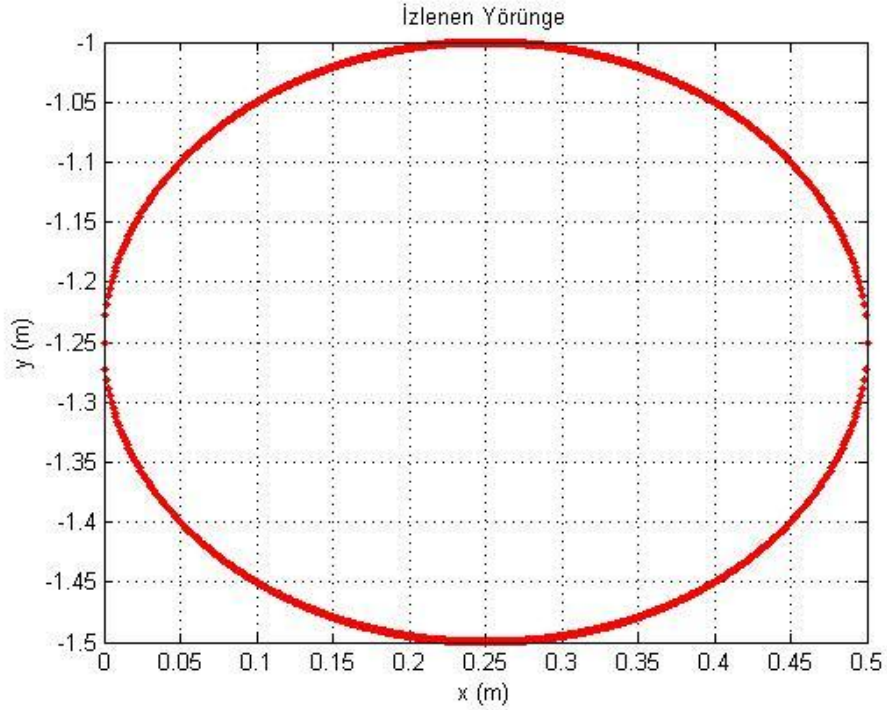
Şekil 7.17 Uç noktasının “x” yönündeki ivmesi



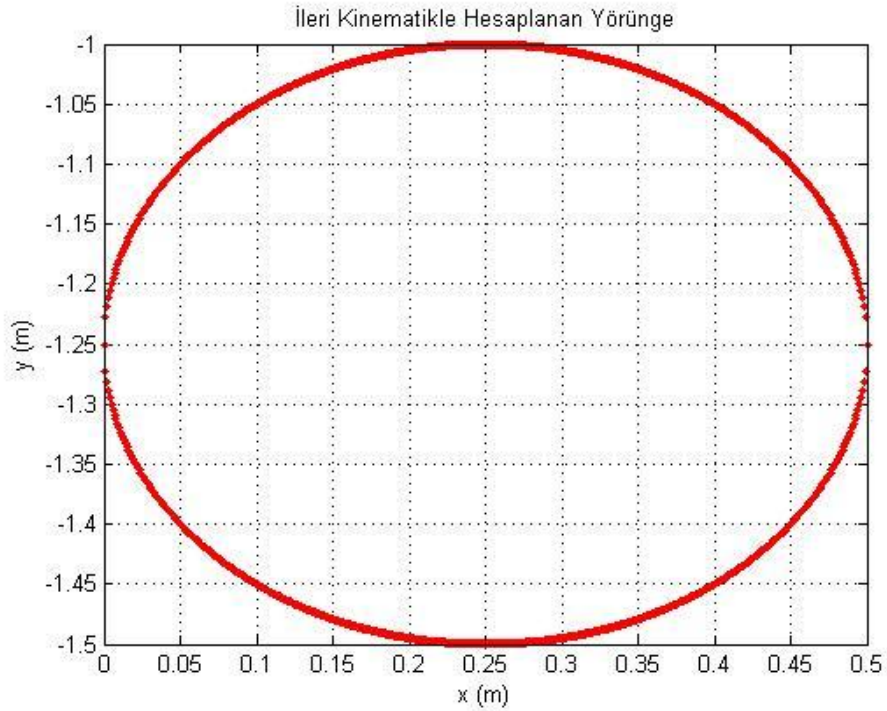
Şekil 7.18 Uç noktasının “y” yönündeki ivmesi

Yukarıdaki uygulamanın çıktılarından yola çıkılarak izlenen yörünge ile ileri kinematikte hesaplanan yörünge aynı olduğu görülmektedir. Ters kinematikte kullanılan eklem değişkenleri ters kinematikte bulunduğu için ileri ve ters kinematik denklemlerinin birbirini sağladığı görülmektedir. Eklem değişken grafikleri incelendiğinde ise teta1 açısının 0 ile 19 derece arasında değiştiği, d2 uzunluğunun da maksimum 0.35m'ye kadar çıktığı görülmektedir. Birinci türev grafikleri eklem hızlarının maksimum 0.045m/s olduğunu ifade etmekte ve süreksizlik ya da sıçramalar oluşmamaktadır. İkinci türev grafikleri de sürekli şekilde ivmenin devam ettiğini vermektedir. Bu sonuçlar çapak alma robotu eklemlerinin bu yörüngeyi sorunsuz izleyebildiğini göstermektedir. Tork grafikleri ise belirli bir seviyeden başlayıp sürekli şekilde sıçramalar yapmadan aynı seviyeye dönerek hareketin tamamlandığını göstermektedir. Sayısal değerleri de eklemleri hareket ettirmek için çok büyük torklara gerek olmadığını ortaya koymaktadır. Bu da eklemler için motor seçimini kolaylaştırmaktadır. Hız ve ivme grafikleri uç noktasının hız bileşenlerinin modellemeye uygun şekilde değiştiğini göstermekte ve bu sayede de uç noktasının ivme bileşenlerinin belirli bir bant aralığında ve sürekli olmasını sağladığını ortaya koymaktadır.

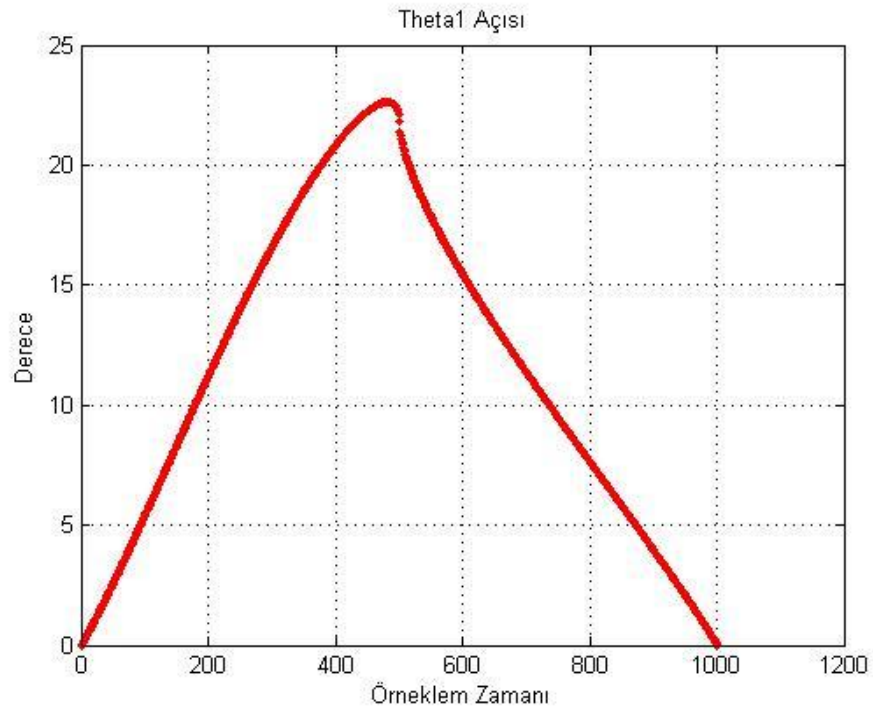
2. Çembersel bir yörünge seçilerek parametreler ekrana çizdirilmiştir.



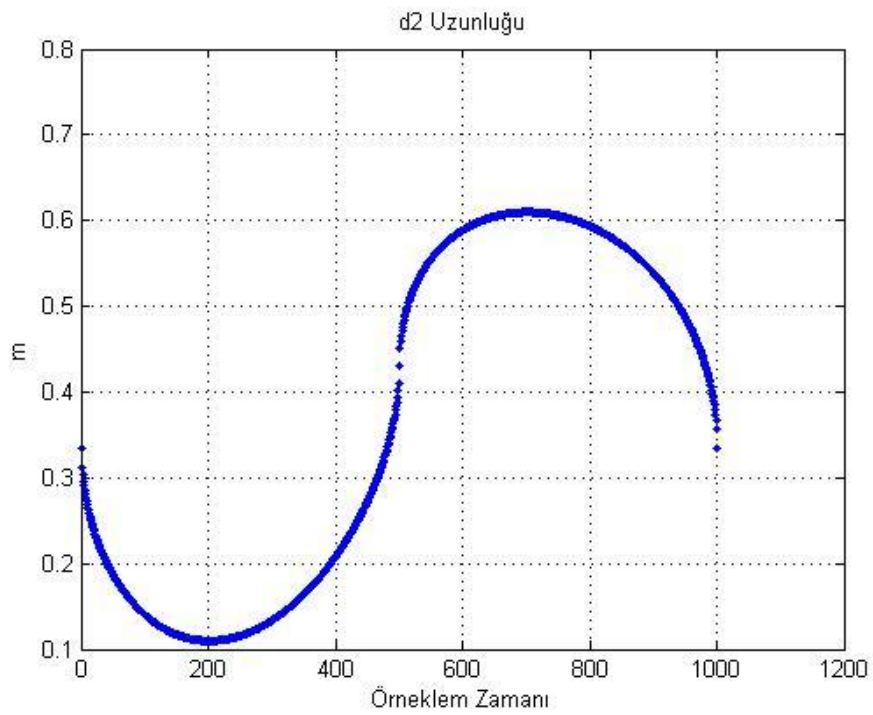
Şekil 7.19 Çembersel yörünge



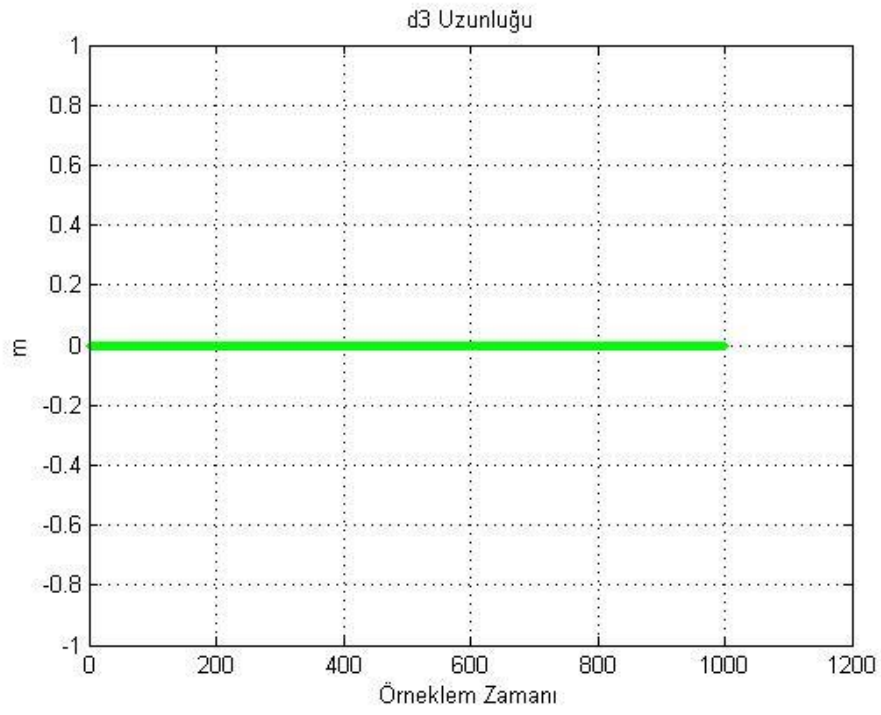
Şekil 7.20 İleri kinematikle hesaplanan yörünge



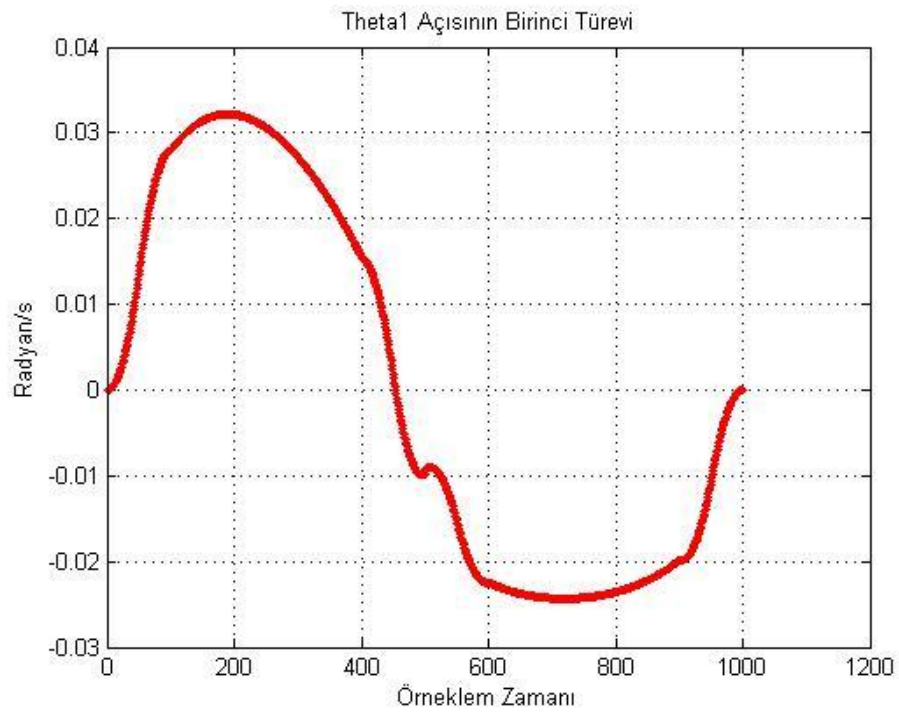
Şekil 7.21 Birinci eklem açısındaki değişim



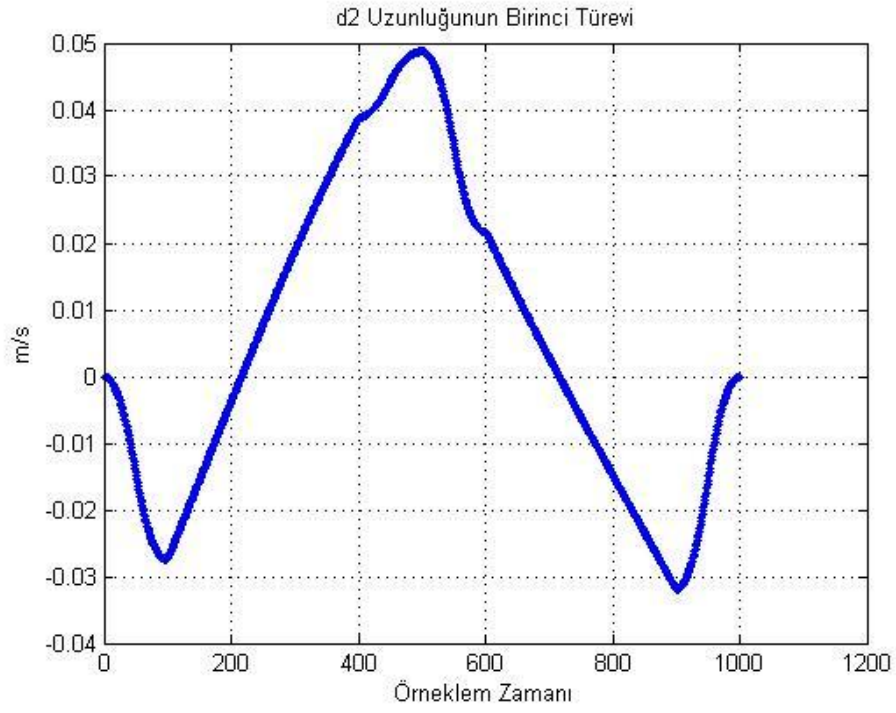
Şekil 7.22 İkinci bağıın uzunluğundaki değişim



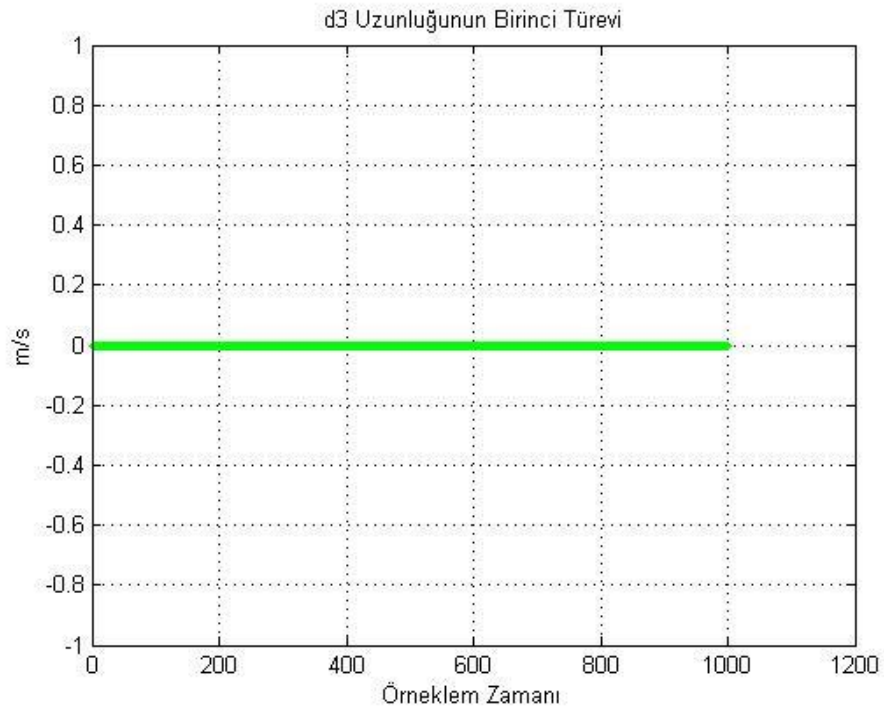
Şekil 7.23 Üçüncü bağıın uzunluğundaki değişim



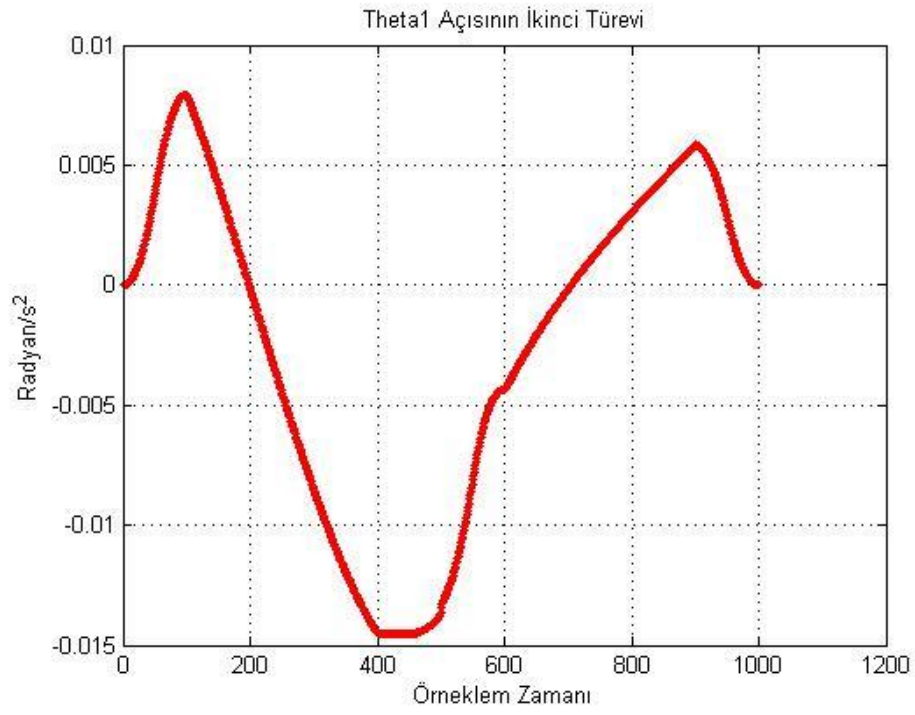
Şekil 7.24 Birinci eklemın hızı



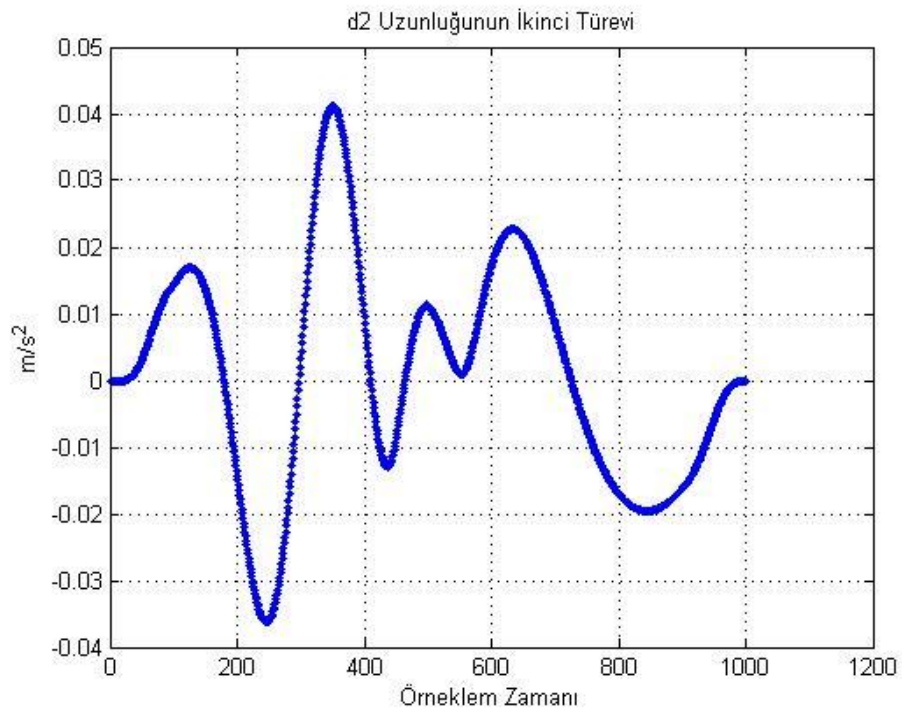
Şekil 7.25 İkinci eklem hızı



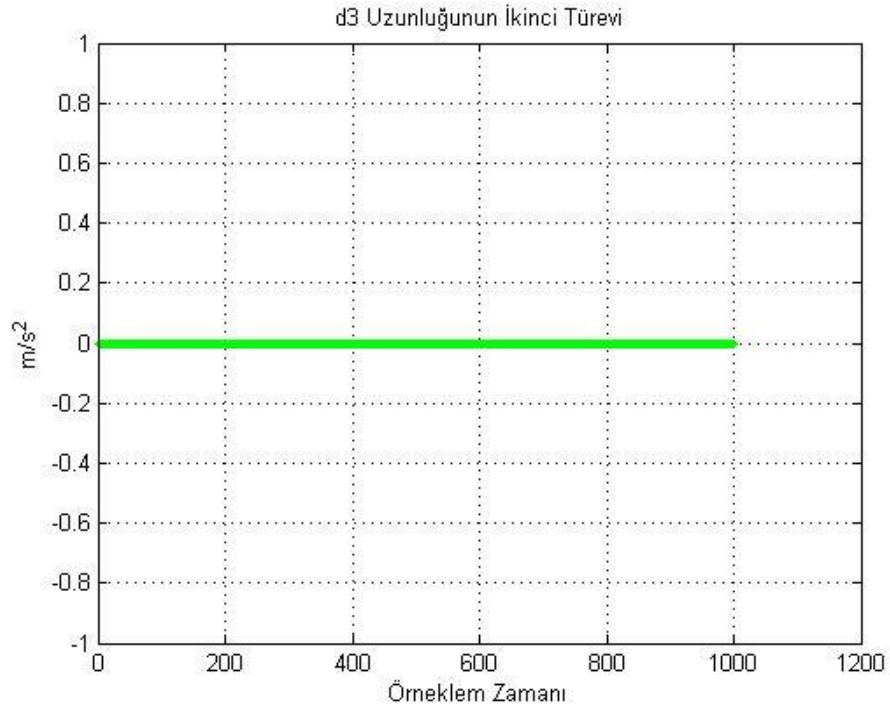
Şekil 7.26 Üçüncü eklem hızı



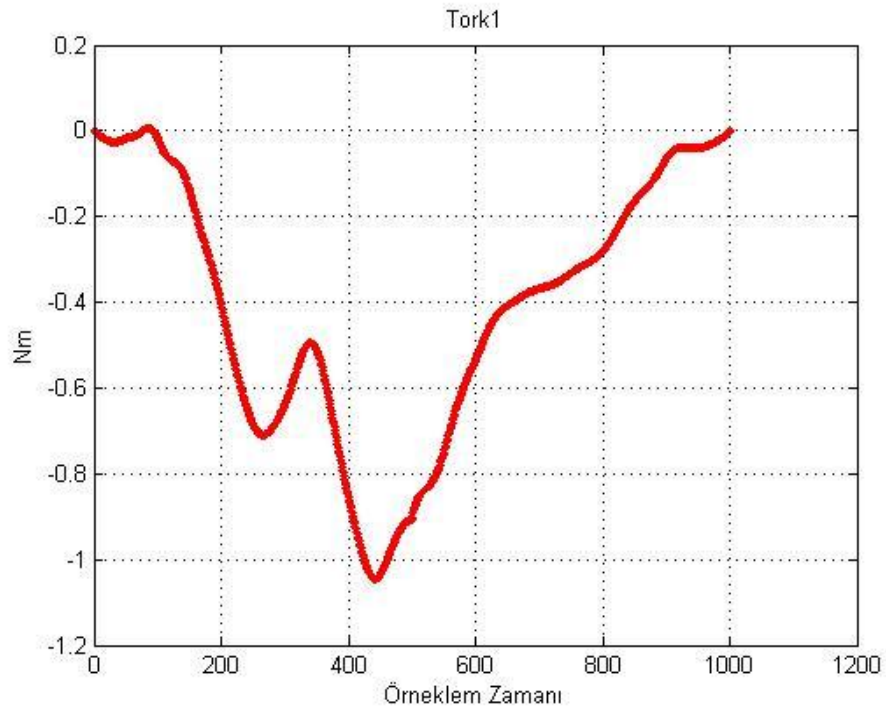
Şekil 7.27 Birinci eklem ivmesi



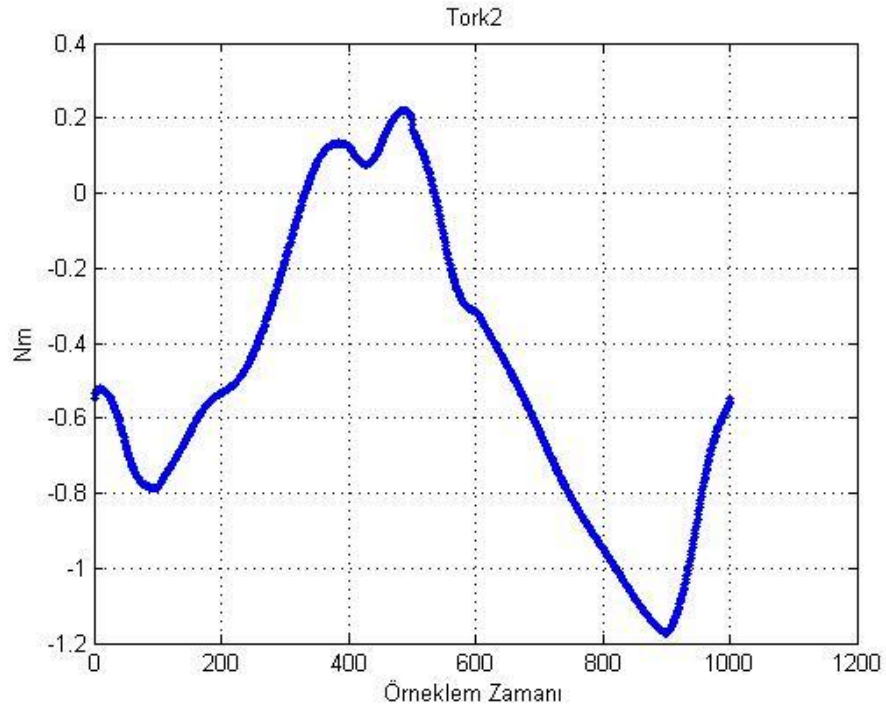
Şekil 7.28 İkinci eklem ivmesi



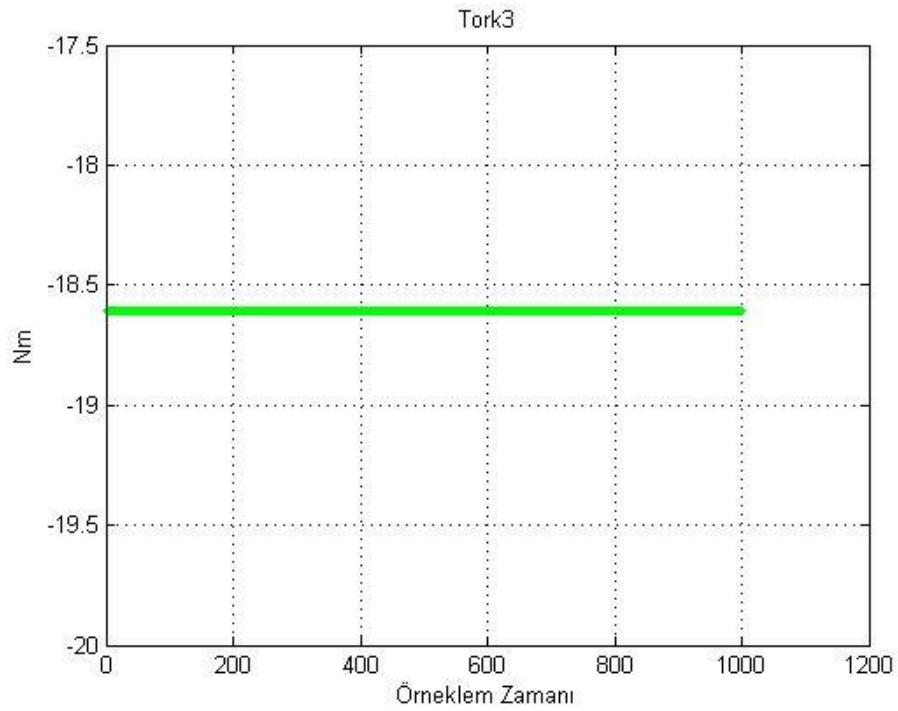
Şekil 7.29 Üçüncü eklem ivmesi



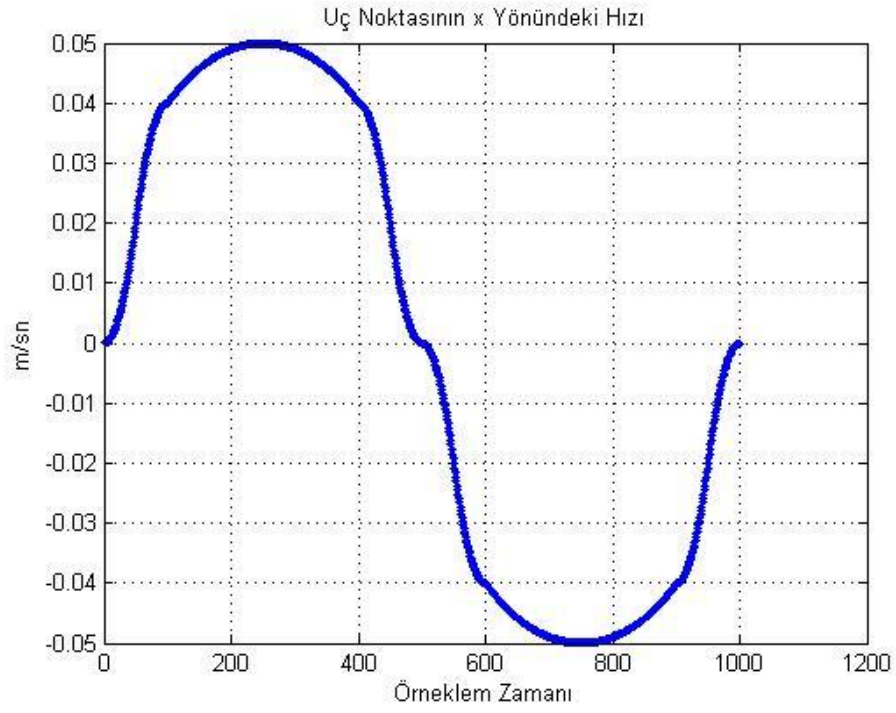
Şekil 7.30 Birinci ekleme uygulanması gereken tork



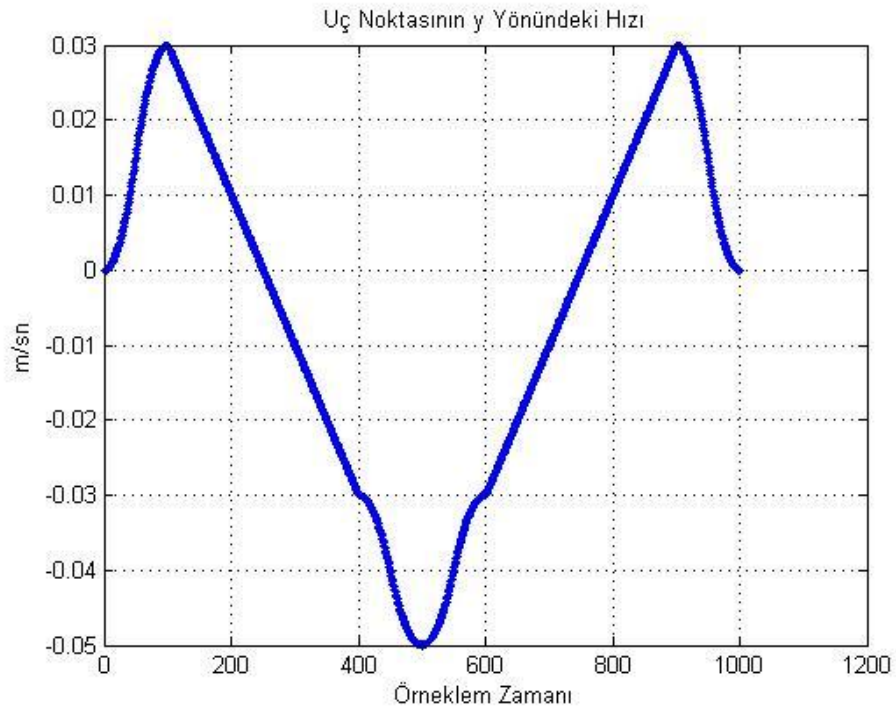
Şekil 7.31 İkinci ekleme uygulanması gereken tork



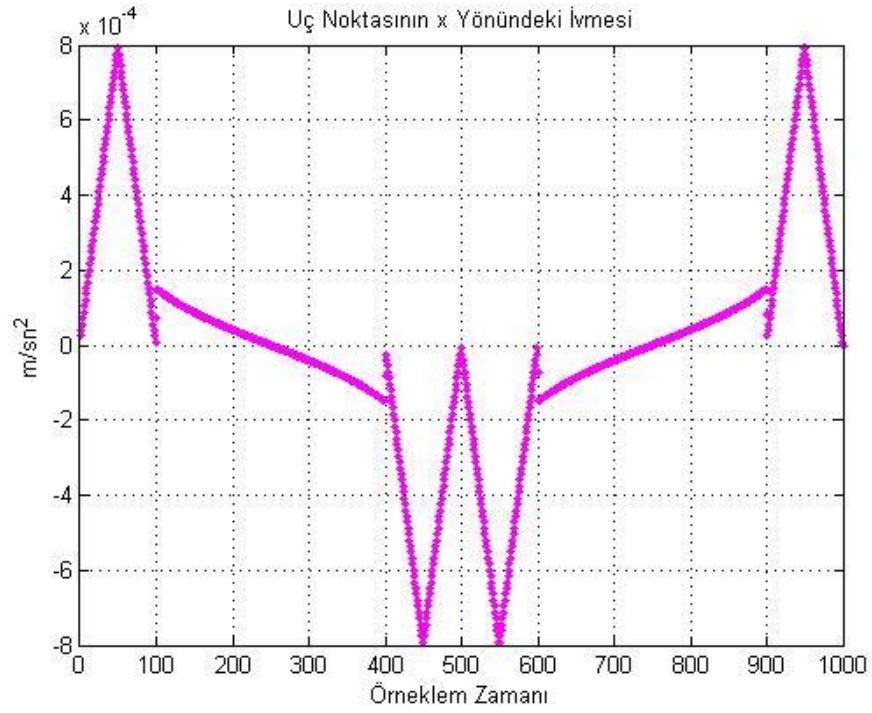
Şekil 7.32 Üçüncü ekleme uygulanması gereken tork



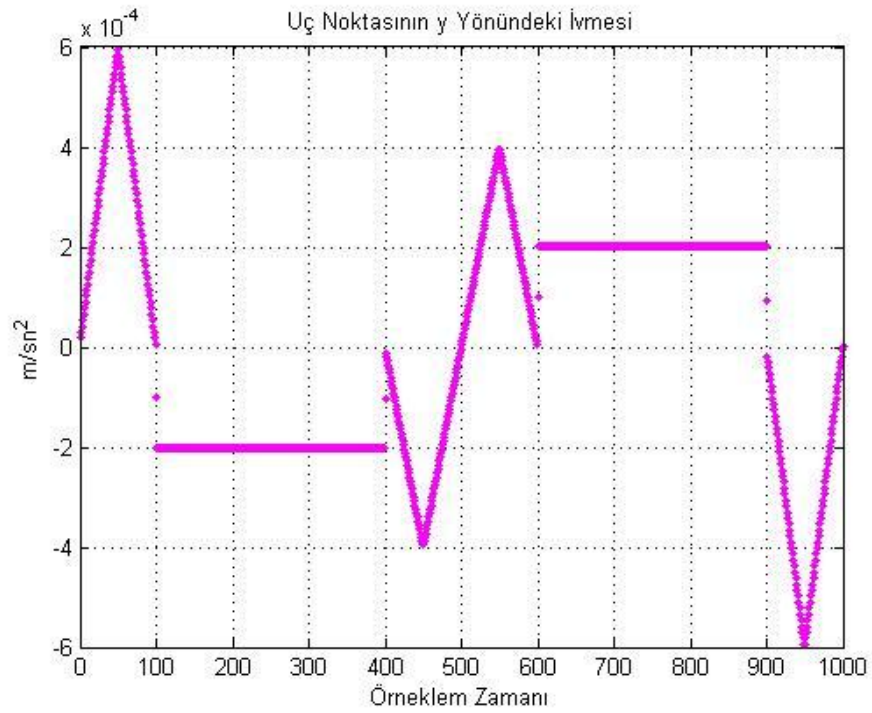
Şekil 7.33 Uç noktasının “x” yönündeki hızı



Şekil 7.34 Uç noktasının “y” yönündeki hızı



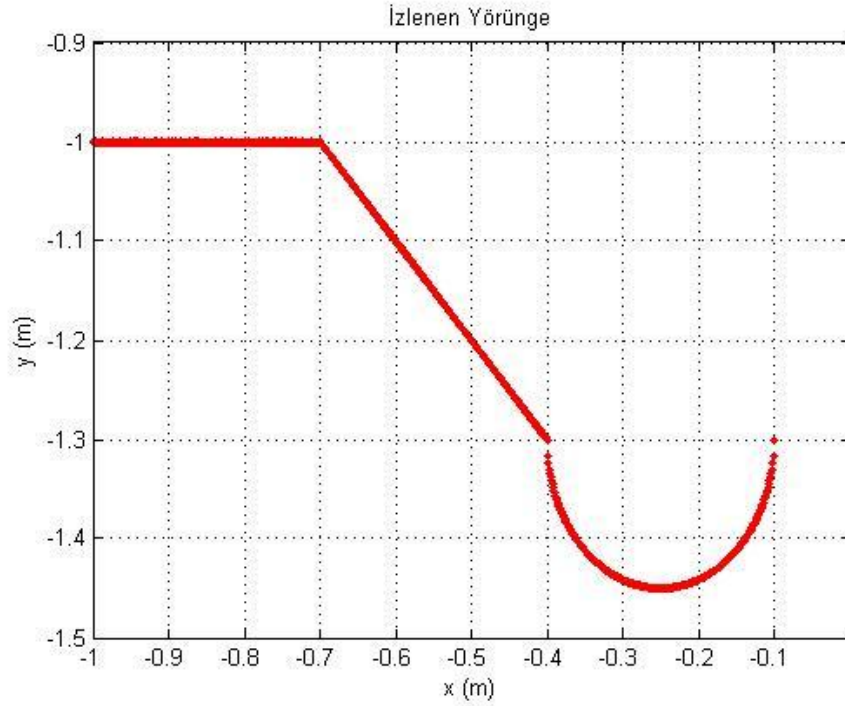
Şekil 7.35 Uç noktasının “x” yönündeki ivmesi



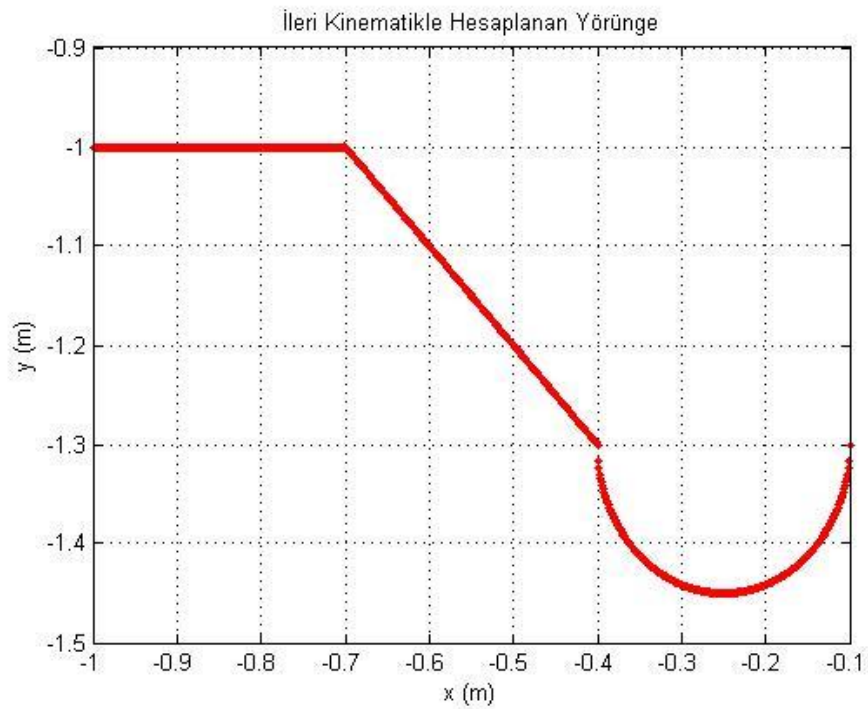
Şekil 7.36 Uç noktasının “y” yönündeki ivmesi

Yukarıdaki uygulamanın da çıktıları ileri kinematik ile ters kinematik denklemlerinin birbirini sağladığını belirtmektedir. Eklem değişkenlerinden teta1 açısı 0 ile 23 derece arasında, d2 uzunluğu da maksimum 0.62m'ye kadar ulaşmaktadır. Bu değerler robot kolunun çalışma uzayı içerisinde hareket ettiğini göstermektedir. Birinci ve ikinci türev grafikleri eklemlerin hareketlerini sorunsuz bir şekilde tamamlayabildiğini ortaya koymaktadır. Tork grafikleri ise belirli bir seviyeden başlayıp sürekli şekilde sıçramalar yapmadan aynı seviyeye dönerek hareketin tamamlandığını göstermektedir. Üçüncü eklem torku, eklem hareket etmediği için yalnızca yer çekimine karşı koyar ve değer bu nedenle sabittir. Hız ve ivme grafikleri uç noktasının hız bileşenlerinin modellemeye uygun şekilde değiştiğini göstermekte ve bu sayede de uç noktasının ivme bileşenlerinin belirli bir bant aralığında ve sürekli olmasını sağladığını ortaya koymaktadır. Uç noktasının y yönündeki hız bileşen grafiğindeki örneklem zamanının 100., 400., 600. ve 900. biriminde görülen hızlı değişimlerin nedeni, parabolik modelleme ile ulaşılan noktadaki hızın sonraki birimlerde ters bir eğimle hareketine devam etmesidir. Bu durumu değiştirmek pek mümkün değildir. Bunun sebebi de y yönündeki hız bileşeninin önce belirli bir noktaya ulaşması daha sonra da bu noktadan azalması gerektiğidir. Sadece daha fazla birim kullanılarak parabolik modelleme uygulanırsa ivmedeki geçiş bir miktar daha yumuşatılabilir; ancak bu durumda da uç noktasının bileşke hızının istenilen 3 m/dk'ya ulaşması daha fazla zaman alacaktır. Bu da yapılan iş için yeni bir kayıp olarak karşımıza çıkacaktır. Tüm bu sebeplerden parabolik modelleme bu şekilde seçilmiştir.

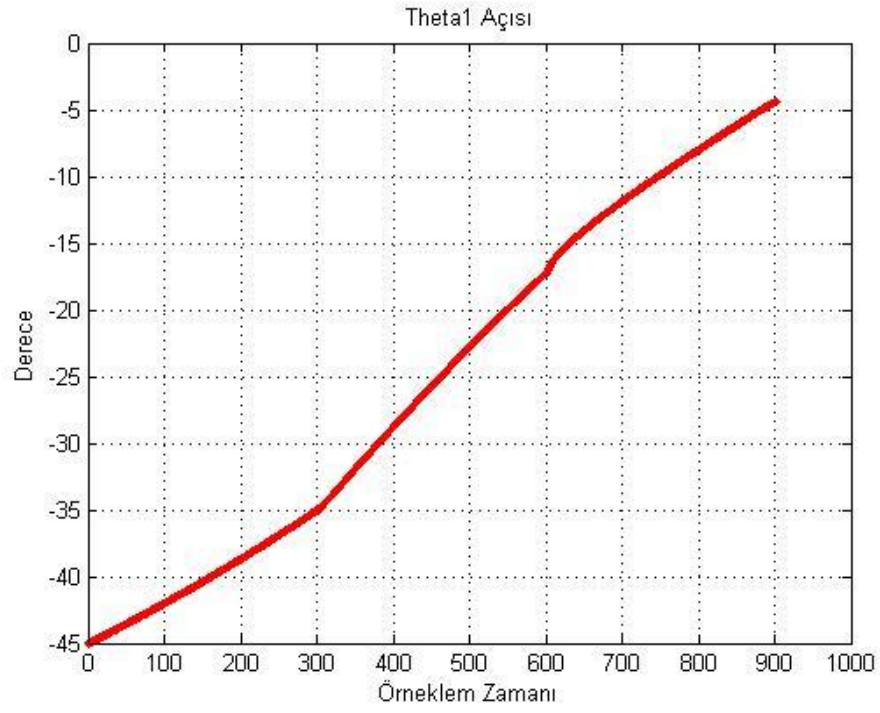
3. Hem doğrusal hem de eğri parçalar içeren bir yörünge için parametrelerin grafikleri aşağıda verilmiştir.



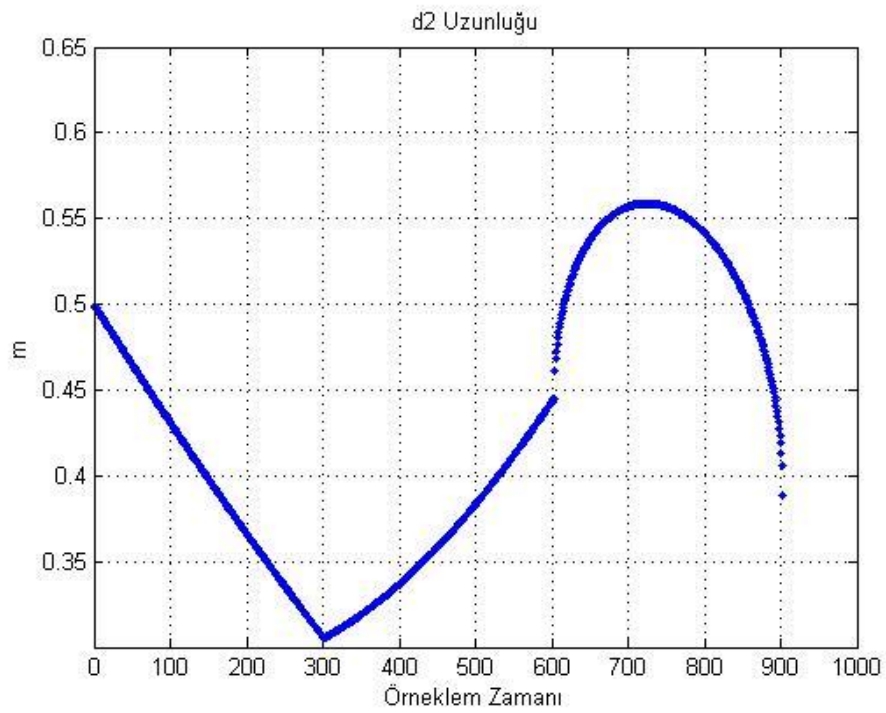
Şekil 7.37 Doğru ve çember parçalarından oluşan yörünge



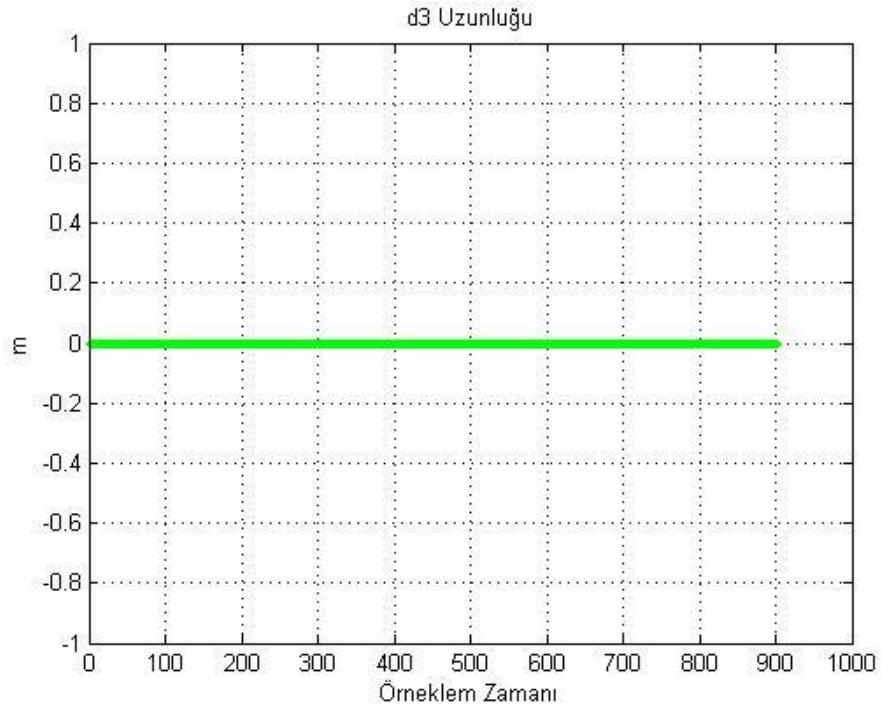
Şekil 7.38 İleri kinematikle hesaplanan yörünge



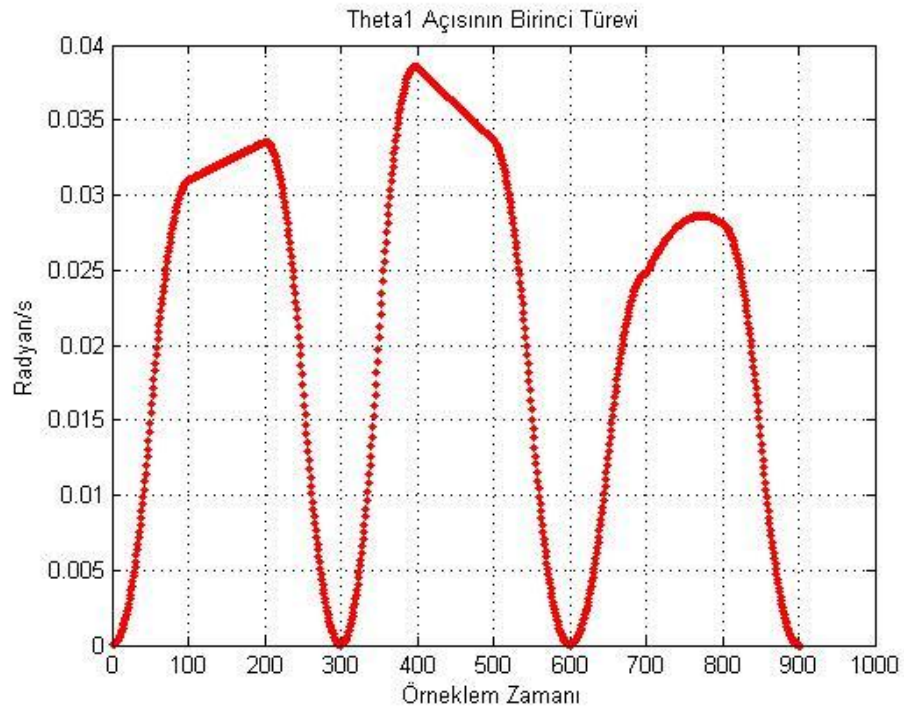
Şekil 7.39 Birinci eklem açısındaki değişim



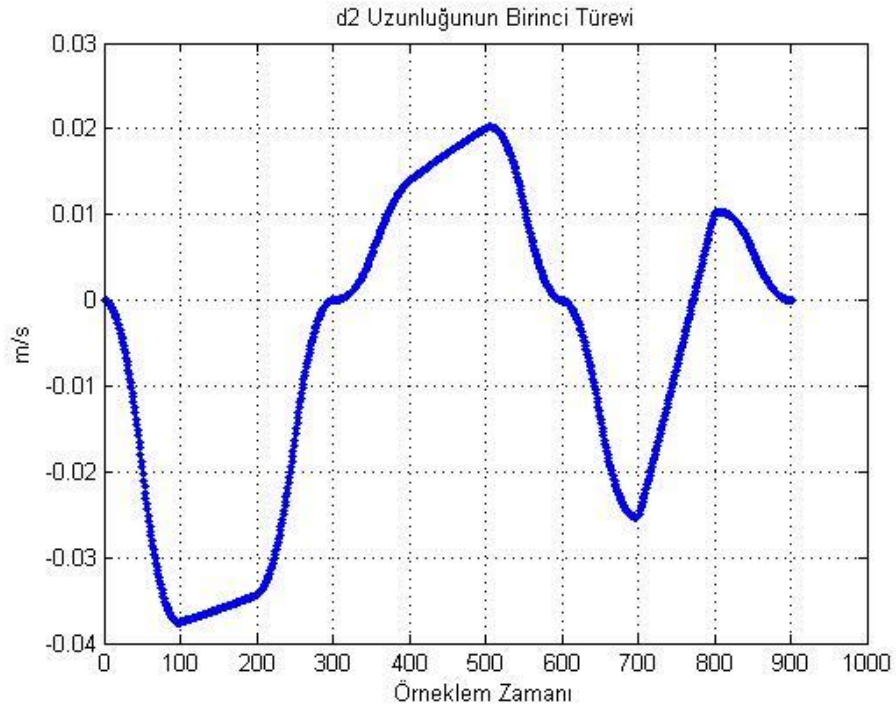
Şekil 7.40 İkinci bağıın uzunluğundaki değişim



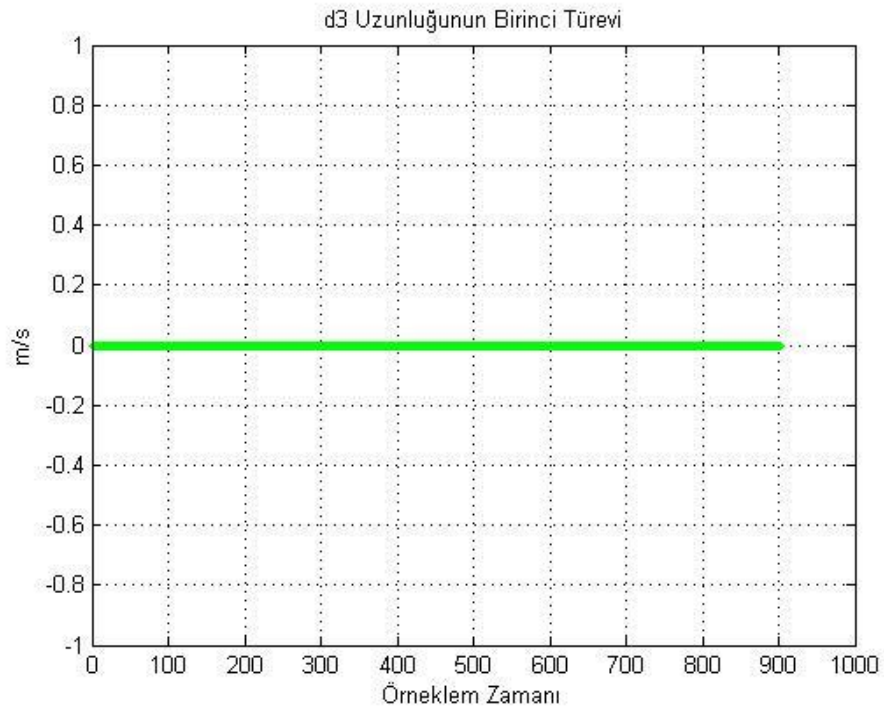
Şekil 7.41 Üçüncü bağın uzunluğundaki değişim



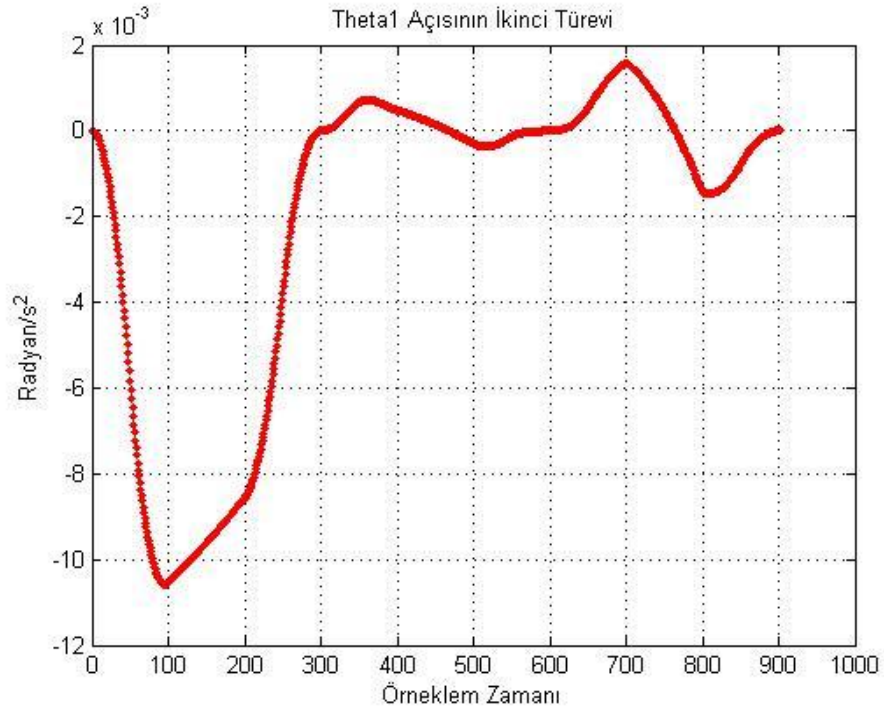
Şekil 7.42 Birinci eklem hızı



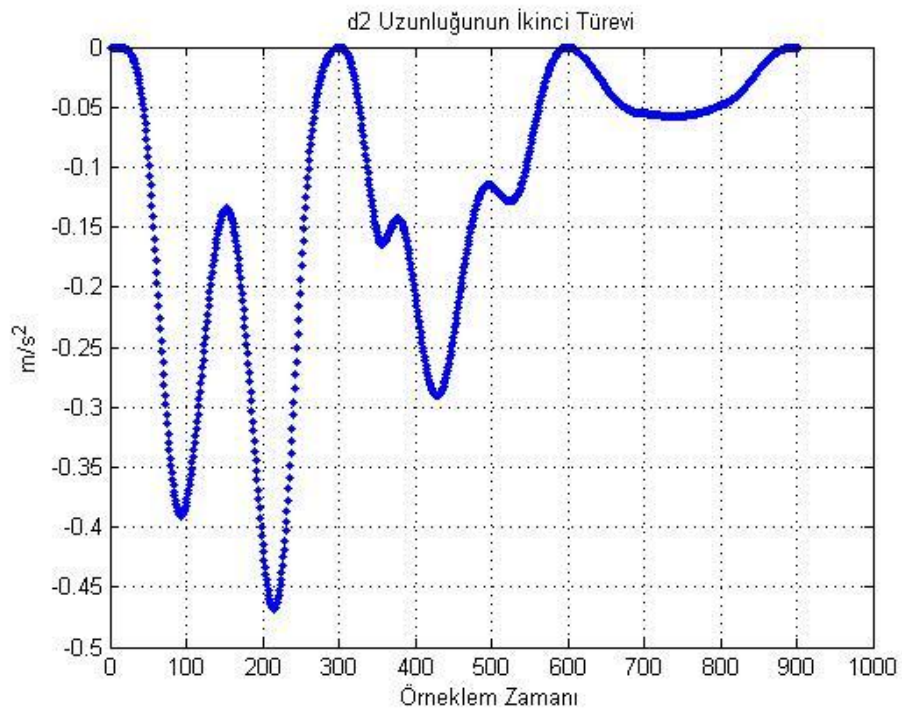
Şekil 7.43 İkinci eklemin hızı



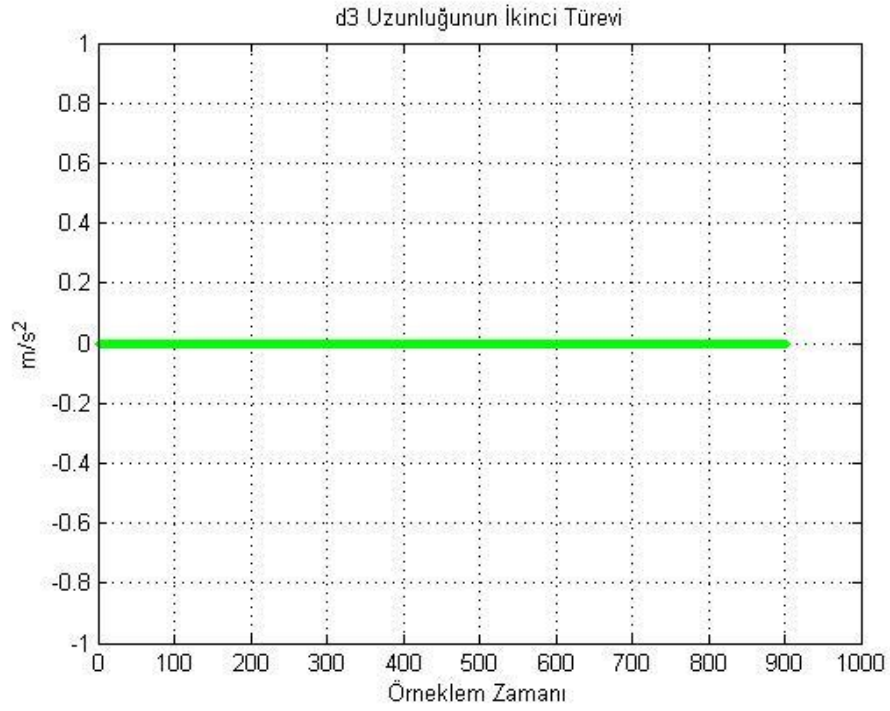
Şekil 7.44 Üçüncü eklemin hızı



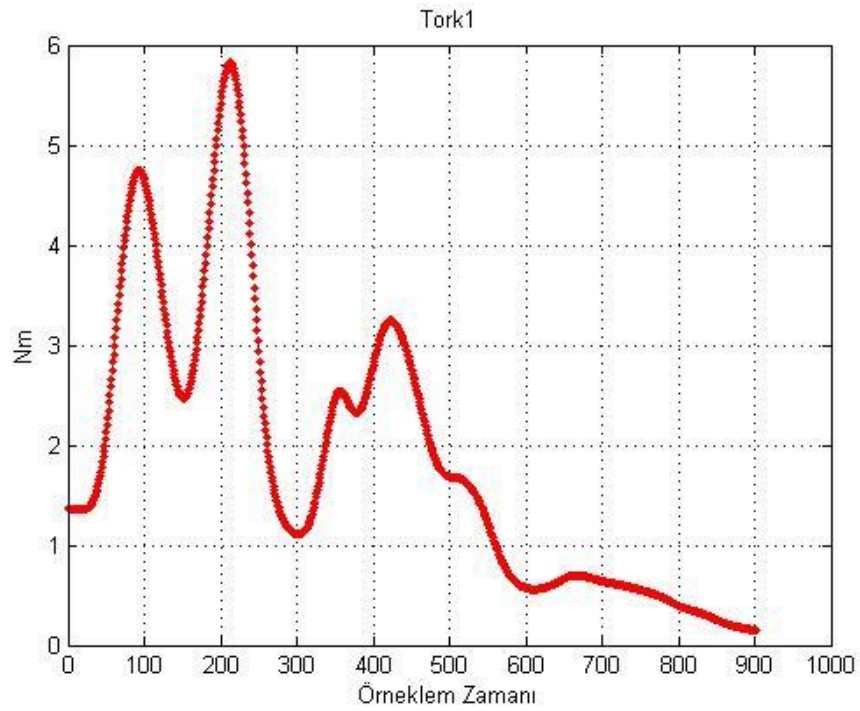
Şekil 7.45 Birinci eklem ivmesi



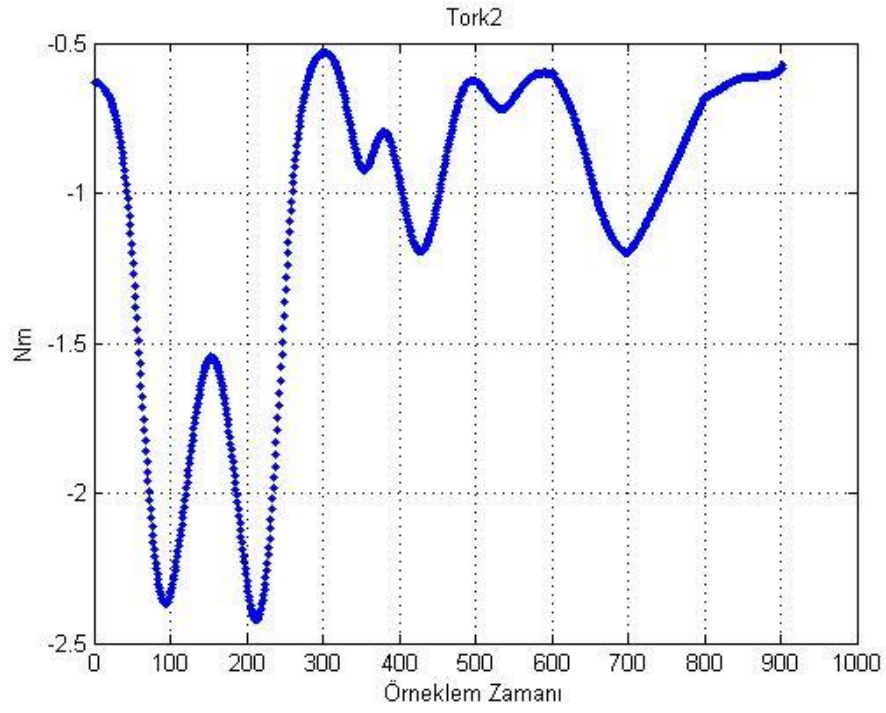
Şekil 7.46 İkinci eklem ivmesi



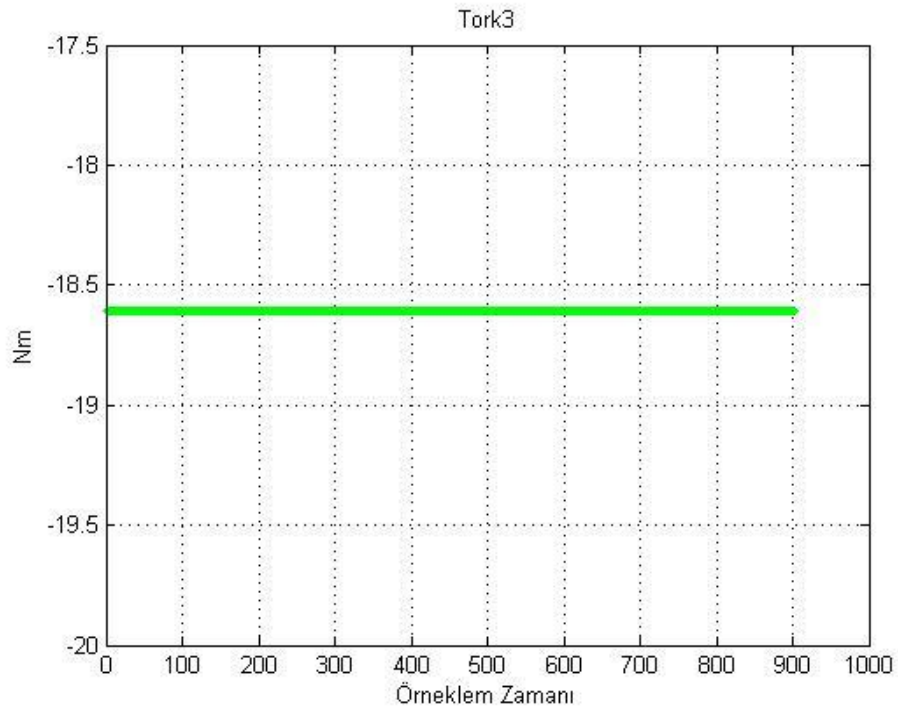
Şekil 7.47 Üçüncü eklem ivmesi



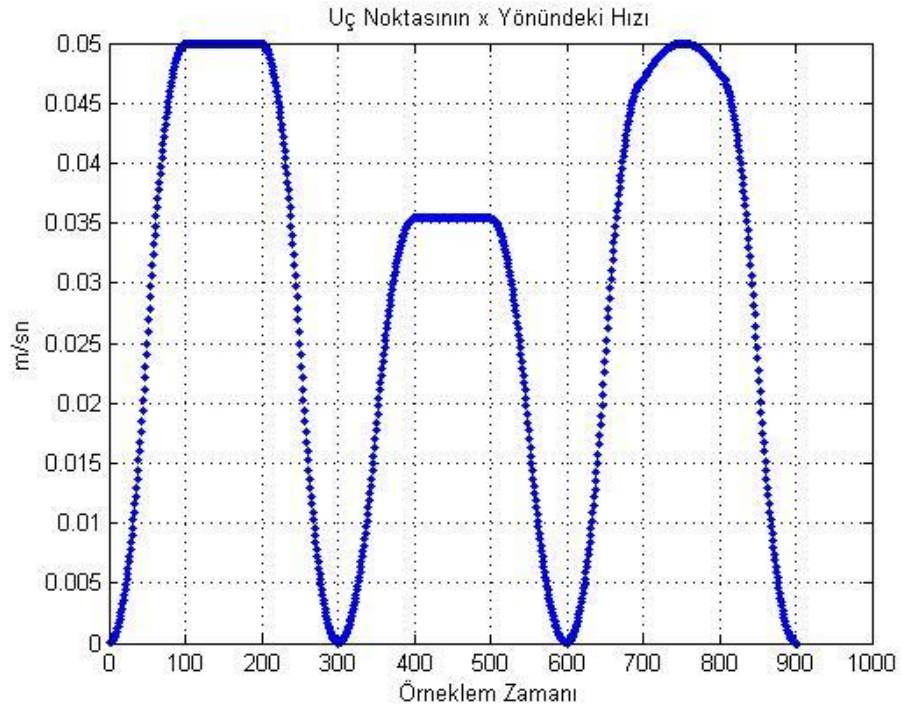
Şekil 7.48 Birinci ekleme uygulanması gereken tork



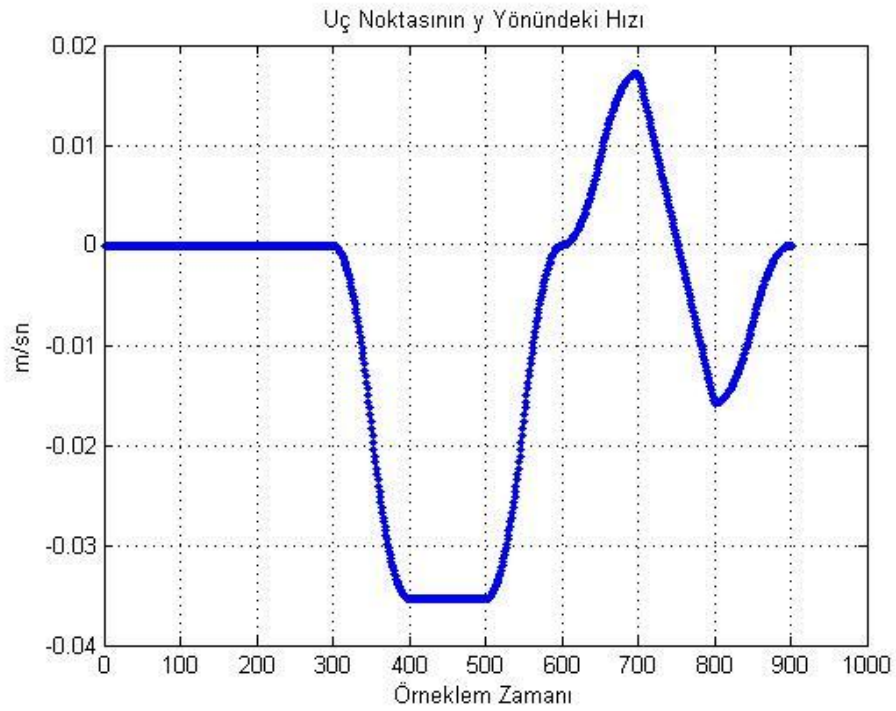
Şekil 7.49 İkinci ekleme uygulanması gereken tork



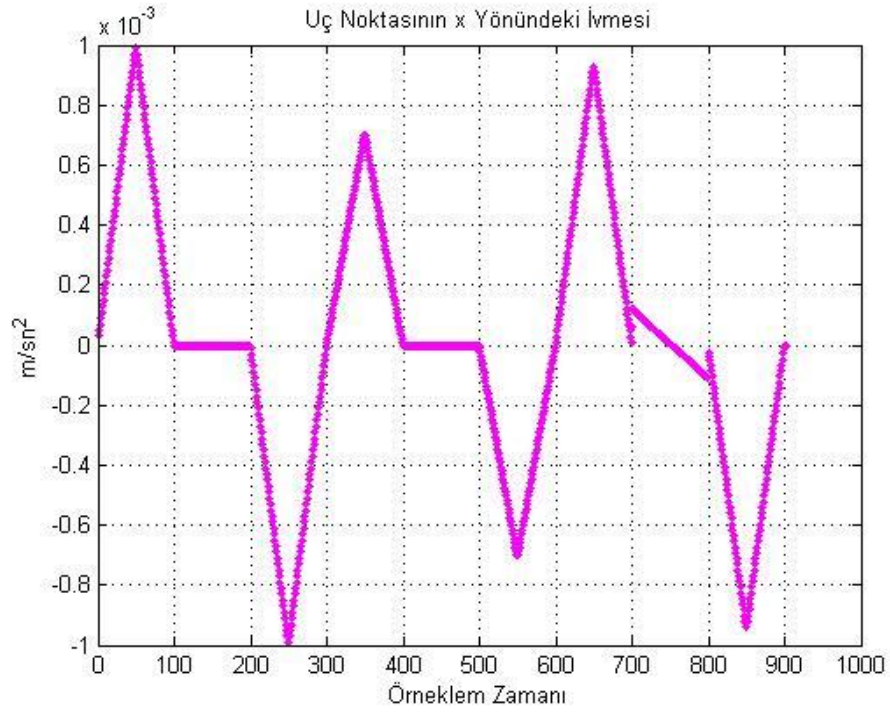
Şekil 7.50 Üçüncü ekleme uygulanması gereken tork



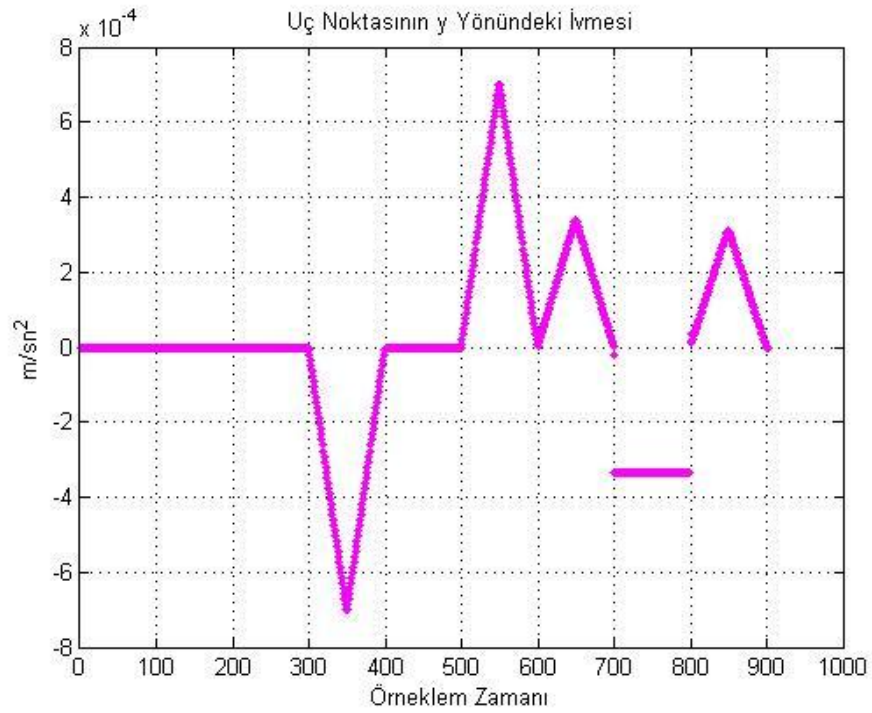
Şekil 7.51 Uç noktasının “x” yönündeki hızı



Şekil 7.52 Uç noktasının “y” yönündeki hızı



Şekil 7.53 Uç noktasının “x” yönündeki ivmesi



Şekil 7.54 Uç noktasının “y” yönündeki ivmesi

Son uygulamada da tüm çıktılar daha önceki uygulamalardaki gibi yorumlanabilir. İleri ve ters kinematığın birbiriyle örtüştüğü, hız ve ivmelerin kabul edilebilir aralıklarda oluşu, tork ifadelerinin sürekli ve motor seçimini kolaylaştıran bir yapıya sahip olduğu son olarak da hız modellemesinin uygun çalışıp istenilen ivmelere ulaşıldığı tüm çıktılardan görülebilmektedir. Uç noktasının y yönündeki ivmesinin örneklem zamanının 700. ve 800. birimleri arasındaki düz çizgi de, ivmenin bu birimler arasında değişmediğini ve bir önceki uygulamanın yorumunda anlatıldığı şekilde hızın farklı eğimle devam ettiğini açıklamaktadır. Uç noktasının y yönündeki hız grafiği incelendiğinde bu durum kolayca görülebilmektedir. Hızın bu şekilde olmasının nedeni de izlenen bölgenin 700. biriminden sonra yapılan çembersel hareketin modellenişidir. Modelleme yapılırken çember denklemi kullanılmıştır. Çember denkleminin çıktısı da, yörüngenin bu biriminde iki nokta arasındaki mesafenin fazla olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bu modellemeyle modellenmiş bu yörünge üzerinde hareket ederken parabolik modellemenin verdiği sonuçlar grafikte görüldüğü şekildedir. Tüm bu sonuçlar değerlendirilirse tasarlanan çapak alma robotunun gerçek hayata uygulanabilir olduğu desteklenmektedir.

BÖLÜM 8

SONUÇ

Bu çalışmada set üstü ocaklarda kullanılan döküm demir parçalarının üretimi sırasında üzerlerinde oluşan çapakları temizleyebilecek bir robot kolu tasarımı yapılmıştır. Bu nedenle de robot koluna çapak alma robotu denilmiştir. Tasarımı yapabilmek için, robot kolu tasarımında gerekli olan bir dizi bilgiye ihtiyaç vardır. Günümüze kadar robot kolu tasarımcılarının robotik uygulamalarda kullandıkları yöntemler incelenmiş, gerekli ve yararlı olanlar amacımız doğrultusunda bu tezde uygulanmıştır.

Robot kolu tasarımı yapabilmek için öncelikle konum, yönelim ve koordinat sistemleri gibi robotun üç boyutlu uzayda tanımlanmasını sağlayacak ve durumunu açıklayacak bilgilere başvurulmuştur. Bunların yanında üç boyutlu uzayda matematiksel işlemlere ve koordinat sistemlerinin birbiriyle ilişkilerine de değinilmiştir. Pozisyona ve uzaydaki duruma bağlı açıklamalardan sonra gerekli olan, tasarlanan robot kolunun kinematik incelenmesidir. Kinematik de önceki bölümlerde bahsedildiği şekilde iki ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar önceki bölümde sözü geçen ileri kinematik ile daha sonraki değinilen ters kinematiktir. İleri kinematikte, tasarlanmak istenilen robotun eklem değişkenlerini değiştirerek robotun uç noktasının hareketine bakılırken, ters kinematik ile de robotun uç noktası belirli bir yörüngeyi izlerken eklem değişkenlerinin aldığı değerler incelenmiştir. Bu noktaya kadar çapakları temizlenmesi istenilen parça üzerinde robot kolunun uç noktasının döküm parçanın her noktasına ulaşması amaçlanmış, istenilen bu noktalara ulaşılırken de eklemlerin gerçek hayata uyarlanabilecek değerler arasında değişip değişmediğine bakılmıştır. Çapak alma robotunun hareket ve yetenekleri incelendikten sonra kolun parça üzerinde hareket ederken belirli bir hıza sahip olması gerektiği de düşünülmektedir. Bunu sağlayabilmek için de eklemlerin pozisyonlarındaki değişimi irdelemeyi sağlayan **Jakobiyen** matrisine başvurulmuştur. **Jakobiyen** matrisinin bize sağladığı bilgi ile çapak alma robotunun uç noktasını belirli bir hızla hareket ettirirken her bir eklem hızı ve ivmesi ayrı ayrı hesaplanmıştır. Artık çapak alma robotunun hareket şekline, eklem

değişkenlerine, uç noktasının hızına ve uç noktasının ivmesine erişilebilmektedir. Ancak kolun her eklemının hareketini sağlayacak olan motorların seçilebilmesi için her ekleme uygulanması gereken torklar da bilinmelidir. Çapak alma robotunun belirli bir yörüngede belirli bir hızla hareket ederken her bir eklemine uygulanması gereken torku hesaplayabilmek için robot kolunun dinamik analizine ihtiyaç duyulmuştur. İhtiyaç duyulan dinamik analiz açıklanmış, bahsedilen iki yöntemden uygun olan Lagrange-Euler yöntemi seçilerek çapak alma robotuna uygulanmıştır. Bu sayede her bir eklem için gerekli olan tork bilgisine de erişilmiştir. Bu noktaya kadar çapak alma robotunun her bir eklemının açısız ya da uzunluk değişimleri, hızları, ivmeleri ve torkları hesaplanabilir duruma gelmiştir. Hesaplanan tüm matematiksel ifadeler Matlab ortamına aktarılarak işlemlerin bilgisayar yardımı ile hızlı ve izlenebilir olması sağlanmıştır.

Şu ana kadar olan hesaplamalar tamamlandıktan sonra elde edilen matematiksel ifadeler yardımıyla farklı yörüngeler seçilerek çapak alma robotunun her bir eklemının değişkenleri incelenmiştir. Öncelikle istenilen yörüngeler bir matris şeklinde oluşturulmuş, matrisin birinci sütunu üç boyutlu uzayda x eksenini, ikinci sütunu y eksenini, üçüncü sütunu da z eksenini temsil edecek şekilde kurgulanmıştır. Matrisin her bir satırı üç boyutlu uzayda bir nokta temsil etmektedir. Hazırlanan bu matris Matlab ortamına aktarılan matematiksel ifadeler içerisinde kullanılarak iki boyutlu uzaydaki ardışık her iki nokta arasındaki eklem değişkenleri, eklem hız ve ivmeleri, torklar hesaplanmıştır. İlk etapta görülmüştür ki, yörüngenin köşe noktaları olarak düşünülebilen değişim yerlerinde hızlarda ve ivmelerde ani değişimler olmakta torklarda da süreksizlik meydana gelmektedir. Bu durumun nedeni çapak alma robotunun yörünge üzerinde sürekli sabit bir hızla hareket etmesinin istenmesidir. Yani çapak alma robotu x eksenini yönünde hareket ederken bir köşeyi dönüp y eksenini boyunca hareket ettirmek istenirse, uç noktasının hızının x bileşeni birden sıfıra düşmeli y bileşenin hızı da birden belirli bir seviyeye çıkmalıdır. Bu durum da hızlarda ve ivmelerde ani değişimlere neden olmaktadır. Tork ifadeleri de hız ve ivmeler yardımıyla bulunduğu için torklarda da süreksizlik meydana gelmektedir. Sorunu gidermek için parabolik bir modelleme yöntemi kullanılmıştır. Uç noktasının hızı yörüngenin her noktasında sabit seçilmemiş, köşe noktalarına yaklaşırken parabolik olarak azalmış, köşe

noktalarından uzaklaşırken parabolik olarak arttırılmıştır. Uygulanan bu yöntemle her bir eklemin hız ve ivmelerindeki ani değişimlerin önüne geçilmiş, torklar da sürekli hal almıştır. Yapılan bu ekleme ve değişikliklerin sonucunda üç farklı yörünge için çapak alma robotunun her bir ekleminin açı veya uzunluk değişimleri, hızları, ivmeleri, uygulanması gereken torklar, uç noktasının hızı ve uç noktasının ivmesi Matlab ortamında hesaplanarak grafiksel olarak çizdirilmiştir.

Grafiklere bakıldığında çapak alma robotunun istenilen yörüngeler üzerinde belirtilen hızlarla hareket etmesi sonucu eklemlerin açı ya da uzunluk değişimleri kabul edilebilir aralıklardadır. Ayrıca eklemlerin hız ve ivmeleri beklenen bant aralığı içerisindeydir. Torklar incelendiğinde ise sürekli ve ani sıçramalar yapmayan bir halde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar çapak alma robotunun belirtilen ölçüler, belirtilen eklem yapıları ve uygun malzeme ile gerçek hayatta uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Tasarlanan çapak alma robotu şuan fabrika ortamında bir işçinin bir günde yapabildiği iş miktarını çok daha kısa sürede ve aynı standartta yapmak için kullanılabilir. Gerekli olan şey kullanılacak ortamın detaylıca incelenmesi ve robot kolunun bu fiziksel ortama uygun hale getirilmesidir.

Şimdiye kadar gelinen noktada çapak alma robotunun tasarımı yapılmış ve elde edilen sonuçlarla da hayata uygulanabilir olduğu ortaya konmuştur. Fakat birkaç noktanın geliştirilmesi uygulamada kolaylık sağlamanın yanında günlük hayatta karşılaşılabilecek bazı sorunların çözümünü de gerçekleştirebilir. Örneğin hesaplamalarda robotun bilek oryantasyonunun sabit olduğu kabul edilmiş tüm sonuçlar bu doğrultuda elde edilmiştir. Bilek oryantasyonu değişken olarak kabul edilip aktif bir biçimde hesaplamalara eklenebilirse çapak alma robotunun genel hareketlerini daha az güç harcayarak gerçekleştirebileceği düşünülmektedir. Örneğin robot kolunun X eksenini boyunca hareket etmesi gereken kısa mesafelerde yalnızca beşinci eklem tork uygulanarak istenilen hareketi yapması yeterli olabilir. Yani uygun durumlarda büyük ve yüksek kütleli eklemler yerine küçük ve az kütleli eklemlerle aynı işin yapılması mümkün olabilir.

Yukarıdaki hesaplamalarda çapak alma robotunun uç noktasının hızı başta her noktada sabit düşünölmüş; ancak hız ve ivmelerde meydana gelen ani değişimler nedeniyle parabolik olarak modellendiğinden bahsedilmiştir. Bu modelleme şekli

hız ve ivmelerdeki değişimleri kabul edilebilir seviyeye çekerken her noktadaki hızın aynı olmasının önüne geçmiştir. Farklı bir modelleme yöntemi ile veya bu soruna farklı açıdan yaklaşarak uç noktasının hızının yörüngedeki her noktada sabit ya da sabite yakın olması mümkün olabilir. Eğer bu durum sağlanırsa da robotun çalıştığı yörünge üzerindeki her noktada aynı sürede aynı işi yapması sağlanabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Asada, H. and Slotine, J. J. E., 1986, Robot Analysis and Control, Wiley-Interscience Publication, USA.

Bingül, Z. ve Küçük, S., 2005, Robot Tekniği 1, Birsen Yayınevi, 4-6 s.

Bingül, Z. ve Küçük, S., 2005, Robot Tekniği 1, Birsen Yayınevi, 23 s.

Bingül, Z. ve Küçük, S., 2005, Robot Tekniği 1, Birsen Yayınevi, 36-37 s.

Bingül, Z. ve Küçük, S., 2005, Robot Tekniği 1, Birsen Yayınevi, 104-112 s.

Bingül, Z. ve Küçük, S., 2005, Robot Tekniği 1, Birsen Yayınevi, 158-159 s.

Bingül, Z. ve Küçük, S., 2005, Robot Tekniği 1, Birsen Yayınevi, 211 s.

Bingül, Z. ve Küçük, S., 2005, Robot Tekniği 1, Birsen Yayınevi, 216-218 s.

Bingül, Z. ve Küçük, S., 2005, Robot Tekniği 1, Birsen Yayınevi, 229-235 s.

Chang, S. F., and Bone, G. M., 2005, Burr size reduction in drilling by ultrasonic assistance. Robotics Comput-Integrated Manuf; 21:442–50 p..

Craig, J. J., 2005, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Pearson Prentice Hall, 4-5 p.

Craig, J. J., 2005, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Pearson Prentice Hall, 20-21 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Craig, J. J., 2005, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Pearson Prentice Hall, 24 p.
- Craig, J. J., 2005, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Pearson Prentice Hall, 69 p.
- Craig, J. J., 2005, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Pearson Prentice Hall, 101 p.
- Craig, J. J., 2005, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Pearson Prentice Hall, 103 p.
- Craig, J. J., 2005, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Pearson Prentice Hall, 150-151 p.
- Craig, J. J., 2005, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Pearson Prentice Hall, 165 p.
- Denavit, J. and Hartenberg, R. S., 1955, A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices, *Asme j. Appl. Mechanics*, 215-221 p.
- Duffy, J., 1980, *Analysis of Mechanisms and Robot Manipulators*, John Wiley and Sons, USA.
- Hsu, F. Y. and Fu, L. C., 2000, Intelligent Robot Deburring Using Adaptive Fuzzy Hybrid Position/Force Control, 1-11 p.
- Jayaweera, N. and Webb. P., 2011, Robotic Edge Profiling of Complex Components, Vol. 38 Iss: 1 pp. 38 - 47

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Karahan, O., 2007, S60 Robot'unun Dinamik Modelinin Çıkarılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 21-22 s.
- Karahan, O., 2007, S60 Robot'unun Dinamik Modelinin Çıkarılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 24-31 s.
- Kerrow, F. J. M., 1991, Introduction to Robotics, Addison-Wesley Publishing, USA.
- Lewis, F. L., 1993, Abdallah C.T.,and Dawson: Control Of Robot Manipulators, Macmillan Publishing Company, 63-71 pp.
- Mohammad, M., 2008, Modeling a Deburring Process, Using DELMIA V5®, School of Engineering, University of Bridgeport, Bridgeport CT 06604, USA, J. Eng. Applied Sci., 3 (11): 835-847 p.
- Murphy, K. M., Norcross, R. J. and Proctor, F. M., 1998, Cad Directed Robotic Deburring, 1-8 p.
- Rejc, J., Cinkelj, J. and Munih, M., 2009, Dimensional Measurements Of A Gray-Iron Object Using A Robot and a Laser Displacement Sensor, 155–167 p.
- Schilling, R. J., 1990, Fundamentals of Robotics, Prentice Hall, USA.
- Spong, M. W. and Vidyasagar, M., 1989, Robot Dynamics and Control, John Wiley and Sons, USA.
- Wang, L. C. T. and Chen, C. C., 1991, A Combined Optimization Method for Solving the Inverse Kinematics Problem of Mechanical Manipulators. IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 7, No 4.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Wolovich, W. A., 1987, Robotics: Basic Analysis and Design, CBS College Publishing, USA.

Yang, A. T. and Freudenstein, F., 1964, Application of Dual-Number Quaternion Algebra to the Analysis of Spatial Mechanisms, Tran. Asme, J. Appl. Mechanics, Vol. 31, 300-308 p.

Beş Eklemlı Çapak Alma Robotu Tasarımı

Hüseyin Karaçalı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKLER

Ekim 2012

Ek.1. apak Alma Robotunun alışma Uzayının Matlab Kodu

Matlab program kodları tezle birlikte verilen cd içerisinde “calismauzayi.m” dosyasındadır.

Ek.2. apak Alma Robotunun Dinamik Denklemleri

Matlab program kodları tezle birlikte verilen cd içerisinde “torklar.m” dosyasındadır.
Word versiyonu Ek2 klasörü içerisindedir.