

84304

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ SERBEST DERECELİ ROBOT KOLUNUN DİNAMİK
MODELLENMESİ SİMULASYONU VE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. - Elo. Müh. Mustafa NİL

Ana Bilim Dalı : Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Danışman : Prof . Dr . Doğan DİBEKÇİ

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM BAKANLIĞI
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

OCAK 1999

**İKİ SERBEST DERECELİ ROBOT KOLUNUN DİNAMİK
MODELLENMESİ SİMULASYONU VE KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. ve Elo. Müh. Mustafa NİL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Aralık 1998

Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Ocak 1999

Tez Danışmanı

Prof.Dr. Doğan DİBEKÇİ

(.....



Üye

Prof.Dr. Galip CANSEVER

(.....


Üye

Yrd.Doç.Dr. Bekir ÇAKIR

(.....


OCAK 1999

İKİ SERBEST DERECELİ ROBOT KOLUNUN DİNAMİK MODELLENMESİ SİMULASYONU VE KONTROLÜ

Mustafa NİL


Anahtar Kelimeler : İki serbestlik derecesi, dinamik modelleme, kontrol, simülasyon

Özet : Bu çalışmada robotlar hakkında genel bilgi verildikten sonra üç serbestlik derecesine sahip robot kolunun konum ve yönlenmesine ait simülasyonu gösterilmiştir. İki serbestlik derecesine sahip robotun hareketi belirlenerek uç noktasındaki hızı , konum ve hareketi incelenmiştir. Bu harekete göre uygulanması gereken kuvvet ya da moment ; bir başka deyişle dinamik modellenmesi ve simülasyonu yapılmıştır. Klasik kontrol yöntemlerinden PID ve PD kontrolörler ile kontrolü yapılmıştır. Bu kontrol yönteminde matematiksel modellemenin nasıl olacağı da belirtilmiştir.

DYNAMICS MODEL WITH SIMULATION AND CONTROL OF TWO DEGREES OF FREEDOM ROBOT ARMS

Mustafa NIL

Keywords : Two degrees of freedom , dynamics model , control , simulation



Abstract : In this study we have given a general knowledge . In the plane three joints are needed to give the manipulator three degrees of freedom . We have found the position of any point attached to the end effector and have done simulation for this equations. Consider the two degrees of freedom planar manipulator shown in Figure 2.4. and have done simulation and analysis for a end point velocity , position and movement. The dynamic behavior of two degrees of freedom robot arm was described in terms of the time rate of change of the arm configuration in relation to the joint torques using by the movements. Finally we have given the block digram of closed loop system with PD and PID control . For PD compensator shown mathematical model . Using PD and PID compensator , it was done simulation.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Günümüzde robotların endüstride nedenli önemli olduğu herkes tarafından bilinmektedir. Dünya üzerinde bu konuda bilimsel olarak oldukça fazla uygulama ve teorik çalışma yapılmaktadır. Bu alanda ileri giden ülkelerin yapmış oldukları yatırımın büyüklüğü olayın ciddiyetini göstermektedir. Ülkemizin robot teknolojisinde istenilen seviyeye gelmesi için yapılan çalışmaların yeterli olduğunu söylemek mümkün değildir. Çünkü mevcut olan şirketlerin sayısı ne yazık ki bir elin parmaklarını geçmemektedir. Yapılan teorik çalışmaların pratiğe dönüşmesi ülke ekonomisine büyük katkılar sağlayacaktır.

Tezin hazırlanmasında değerli katkılarını esirgemeyen danışman hocam Prof.Dr. Doğan DİBEKÇİ 'ye , Yrd.Doç.Dr. Bekir ÇAKIR'a , Y.Müh.Metin NİL'e Ar.Gör. Cihan KARAKUZU ile Ar.Gör.Uğur YÜZGEÇ 'e ve manevi desteklerinden dolayı arkadaşlarıma ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	x
BÖLÜM 1.GİRİŞ.....	1
1.1. Robotun Yapıları ve Sınıflandırılması.....	1
BÖLÜM 2. ROBOT KOL KİNEMATİĞİ.....	6
2.1. Üç Uzunlu Manipulatörün Konum ve Yönlenmesi.....	7
2.1.1. Konum ve Yönlenmeye İlişkin Simulasyon	8
2.2. İki Uzunlu Manipulatörün Uç Noktasındaki Hızı.....	10
2.3. İki Serbest Dereceli Manipulatörün Uç Noktasındaki Hızı , Konumu ve Hareketinin Simulasyonu.....	10
2.4. Robot Kolu Düz Kinematığı İçin Dönme Matrisleri.....	13
2.5. Denavit-Hartenberg Gösterimi.....	19
2.6. Ters Kinematik.....	22
BÖLÜM 3. ROBOT DİNAMİĞİ.....	24
3.1. Lagrange – Euler Formulasyonu.....	24

3.1.1 Tek Serbest Dereceli Robot Kolu İçin Lagrange - Euler Denklemleri.....	25
3.1.2. Kinetik ve Potansiyel Enerjilere İlişkin Tanımlamalar.....	27
3.1.3. Lagrange-Euler Denklemlerinde Gösterimi.....	31
3.2. Newton-Euler Formulasyonu.....	33
3.3. İki Eklemlili Planar Manipulatörün Dinamik Modellenmesi.....	33
3.3.1.Simulasyonu	37
BÖLÜM 4. ROBOT KOLUNUN KONTROLÜ.....	39
4.1. Eklemlerin Bağımsız Kontrolü.....	40
4.2.Eklemin Kontrolü ve Modellenmesi.....	40
4.3.Robotlarda PD Kontrol (Oran-Türev).....	47
4.4. Robotlarda PID Kontrol (Oran-Türev-İntegral).....	49
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	53
EK 1.....	54
EK 2.....	56
EK 3.....	58
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	61

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

- M_m : Motor momenti
 M_l : Yük momenti
 M_l' : Tahrik elemanı milindeki eşdeğer yük momenti (dişliler vasıtasıyla yüke iletilen)
 θ_m : Motor milindeki açısal yer değiştirme
 θ_l : Yük tarafındaki açısal yer değiştirme
 B_m : Motor milindeki sürtünme katsayısı
 B_l : Yük tarafındaki sürtünme katsayısı
 j_a : Eklem tahrik elemanının eylemsizlik momenti
 j_m : Motor milindeki eylemsizlik momenti
 j_l : Yükteki eylemsizlik momenti
 r_m : Motor mili çapı
 r_l : Yük mili çapı
 N_m : Motordaki dişli sayısı
 N_l : Yükteki dişli sayısı
 F : Sürtünme momenti
 j_{et} : Etkin eylemsizlik momenti
 B_{et} : Etkin sürtünme katsayısı
 L/R : Elektriksel zaman sabiti
 j_{et} / B_{et} : Mekaniksel zaman sabiti
CIM : Bilgisayarda bütünleşik imalat
CAD : Bilgisayar destekli dizayn (computer added design)
SD : Serbestlik derecesi
RPP : Dönel prizmatik prizmatik
RRP : Dönel dönel prizmatik
PPP : Prizmatik prizmatik prizmatik
 J_{11} : Birinci uzvun jakobyen matrisi
 P_{uvw} : Eklem eksen takımı
 P_{xyz} : Referans eksen takımı
D : Dönüşüm matrisi

- N : Vektörün fiziksel uzunluğu
 $M_{x,\alpha}$: Dönme matrisi (x eksenini etrafında α kadar döndüğünde)
 $M_{y,\phi}$: Dönme matrisi (y eksenini etrafında ϕ kadar döndüğünde)
 $M_{z,\theta}$: Dönme matrisi (z eksenini etrafında θ kadar döndüğünde)
 (i_x, j_y, k_z) : xyz eksen takımındaki birim vektör
 (i_u, j_v, k_w) : uvw eksen takımındaki birim vektör
 $P_{3 \times 1}$: Konum vektör matrisi
 $F_{1 \times 3}$: İzdüşüm matrisi
 $W_{1 \times 1}$: Ölçek matrisi
 M_0 : Öteleme matrisi
RPY : Roll pitch yaw
RPR : Roll pitch roll
 θ_i : z_{i-1} ekseninde x_i ile x_{i-1} arasındaki açı
 α_i : x_i ekseninde z_i ile z_{i-1} arasındaki açı
 d_i : z_{i-1} eksenini boyunca i-1. koordinat sistemi merkezinden x_i ve z_{i-1} eksenlerinin kesişme noktasına olan mesafesi
 a_i : x_i eksenini boyunca x_i ile z_{i-1} 'in kesişme noktasıyla i-1. Eksenin orijini arasındaki mesafe
 n : Elin normal vektörü
 s : Elin kayma vektörü
 a : Elin yaklaşım vektörü
 p : Elin konum vektörü
 T_0^6 : 6.Serbestlik derecesine sahip düz kinematik
L-E : Lagrange-Euler
N-E : Newton-Euler
R-L : Rekürsif-Lagrange
 K : Robotun kinetik enerjisi
 V : Robotun potansiyel enerjisi
 L : Lagrange fonksiyonu
 i : Serbestlik derecesi
 q_i : i.Eklemin genelleştirilmiş koordinatı
 \dot{q}_i : i.Eklemin genelleştirilmiş hızları

- X : Motorun anma momenti
S : Eğri simetrik matris
Tr : İz
G(q) : Yerçekiminden dolayı oluşan matrisleri gösteren $i \times 1$ boyutlu vektör
D(q) : $i \times i$ boyutlu atalet matrisi
 $h(q, \dot{q})$: $i \times 1$ boyutlu Merkezkaç ve Coriolis momentlerini gösteren vektör
B[q] : $i \times (i-1) / 2$ boyutlu Coriolis kuvvet matrisi
C[q] : $i \times i$ boyutlu merkezkaç kuvvet matrisi
PD : Oran-Türev
PID : Oran-Türev-İntegral



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Robot Eklemlerinin Sembolik Gösterimi.....	2
Şekil 1.2. Robot Sisteminin Komponentleri.....	2
Şekil 1.3. Kartezyen ,Silindirik , İnsan Benzeşimli Robotlar.....	4
Şekil 2.1. Planar Manipulatör ve Kinematik Denklemlerin Çözümü İçin Trigonometrinin Kullanılması	6
Şekil 2.2. Üç Uzunlu Robotun Açılı ve Zaman Kriterlerine Göre Konumu ve Hareketi.....	9
Şekil 2.3. İki Serbest Dereceli Planar Manipulatörün Uç Noktasındaki Hızları	9
Şekil 2.4. İki Serbest Dereceli Planar Manipulatörün x-y Düzlemindeki Hareketi.....	11
Şekil 2.5. θ_1 ve θ_2 Açılına İlişkin Örnek.....	12
Şekil 2.6. θ_1 ve θ_2 İçin Manipulatörün Uç Noktasındaki Hızı, Konumu ve Hareketi.....	12
Şekil 2.7. Referans ve Eklemler Eksen Takımları.....	13
Şekil 2.8. Denavit-Hartenberg Parametreleri.....	19
Şekil 3.1. Tek Eklemlili Robot.....	25
Şekil 3.2. İki Serbest Dereceli Planar Manipulatörün x-y Düzlemindeki Hareketi.....	33
Şekil 3.3. I. ve II.Uzva Uygulanacak Kuvvet ya da Moment.....	38
Şekil 4.1. Eklemlili Tahrik Eden DC Motor-Dişli Takımının Şematik Gösterimi	41
Şekil 4.2. DC Motorun Gösterimi.....	41
Şekil 4.3. Doğru Akım Motoru Blok Diagramı.....	46
Şekil 4.4. PD Kontrollü Doğru Akım Motoru Blok Diagramı	47
Şekil 4.5. PID Kontrollü Doğru Akım Motoru Blok Diagramı	50
Şekil 4.6. PD Kontrolör ile I. ve II. Uzva Ait Simulasyon Sonuçları.....	51
Şekil 4.7. PID Kontrolör ile I. ve II. Uzva Ait Simulasyon Sonuçları.....	52

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Üç Uzuvlu Manipulatörün Konum ve Yönlenmesi İçin Gerekli Açı Değerleri.....	9
Tablo 2.2. İki Serbest Dereceli Planar Manipulatörün A,B,C,D Konumları İçin Gerekli Açı Değerleri.....	11



BÖLÜM 1. GİRİŞ

Robot; kelime anlamı olarak köledir. Kendi sınıfı içinde değişik amaçlar için programlanabilen elektromekanik sistemlerdir. Başka bir ifadeyle tekrar programlanmak kaydıyla bir noktadan başka noktaya giden ya da sürekli yol izleyerek parçaları ve cisimleri taşıyabilen ve birden fazla uzvu bulunabilen mekaniksel aletlere robot denir.

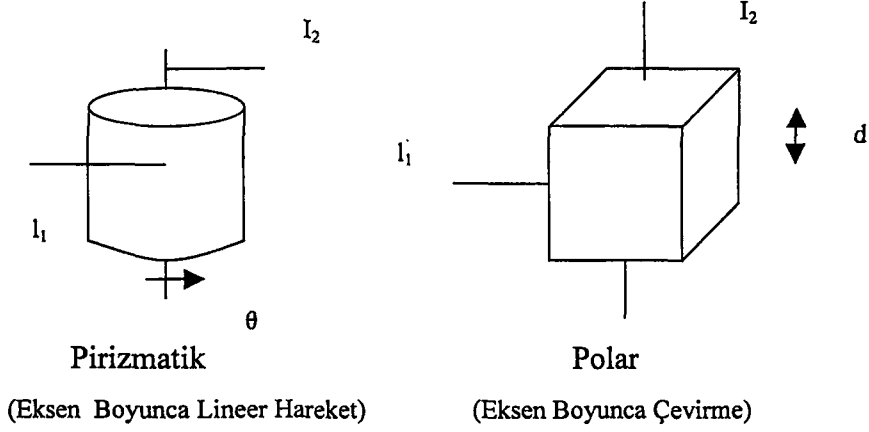
Robotun tarihçesine bakıldığında; 1920 'li yıllarda Karel Capek bu kavramı ortaya atarlardı [1]. 1949'lı yıllarda ilk gelişmeler olmasına rağmen 1954'te George Devol tarafından ilk programlanabilir robot tasarlanmıştır [1]. 1956'da fizik öğrencisi olan Joseph Engelberger ticari robotlar konusunda faaliyetlerde bulunmuştur [1]. 1961'de ise New Jersey-Trenton 'da General Motors tarafından bu yönde ciddi çalışmalar yapılmıştır. Daha sonraki yıllarda alınan mesafenin temelini buradan kaynaklandığı söylenebilir. 1961'de robot kolunun geri beslemeli kontrolü [5] 1963'de ilk robot görme sistemi ; 1971'de Stanford Üniversitesi tarafından Stanford Kolları geliştirilmiştir. 1973'de Stanford' da ilk programlama dili (WAVE) yazılmıştır. 1974'de Cincinnati Milacron T³ robotunun bilgisayarla kontrolünü gerçekleştirmiştir[1]. 1978'de Unimation temelinde General Motors'un çalışmalarından esinlenerek PUMA robotunu tasarlamıştır. Japonlar 1979'da SCARA robotunun tasarımını gerçekleştirmiştir. Carnegie-Mellon Üniversitesi tarafından ilk doğrudan sürülen robot 1981' de tasarlanmıştır [1] .

Robotların mekanik hareket yapısı (manipulatör) modern robot sistemlerinde önemli bir yere sahiptir. Sonraki bölümlerin amacı; robot eklemlerinin hareketinin irdelenmesi; sonuçlarına göre kontrol yapmaktır. Bu nedenle istenenlerin yaptırılması için kullanılacak robotun seçimi önem taşımaktadır. Robotun komponentleri ve yapısı tasarımcı tarafından doğru seçilmelidir.

1.1.Robotun Yapıları ve Sınıflandırılması

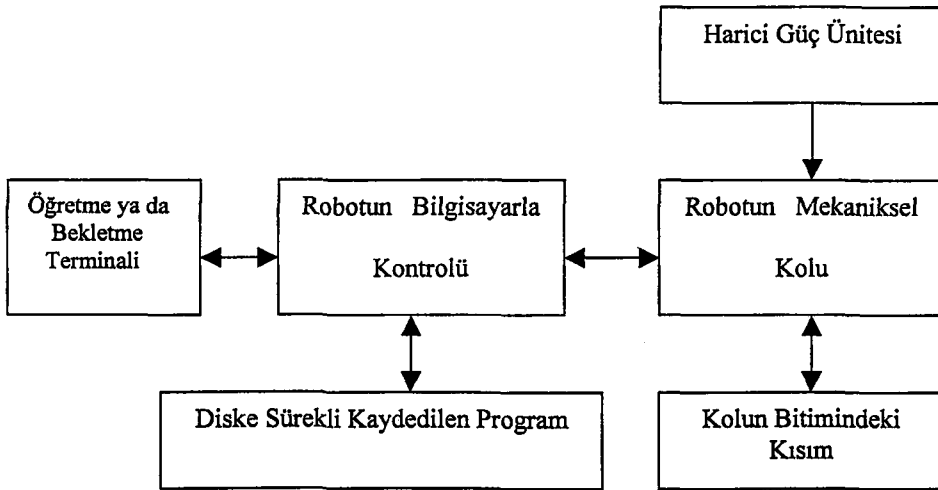
Robotun herbir uzvu birbirlerine eklemlerle bağlanmıştır. Eklemlerle birleştirilen uzuvların (linkler) sayısı ; serbestlik derecesi hakkında bilgi edinilmesini sağlar.

Eklemler prizmatik ya da polar yapıya sahiptir. Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi bu yapıdaki eklemler için eklem açıları,uzvun uzunluğu ve ekleme etkileyen kuvvet önemlidir. Robot kolu, bu uzuvların biraraya gelmesiyle oluşur.



Şekil 1.1. Robot Eklemlerinin Sembolik Gösterimi

Eklem değişkeni prizmatik yapıda θ dönme açısı olurken polar eklemlerde d mesafesidir. Robotik sistemin komponentleri denildiğinde akla mekaniksel kol gelmelidir. Çünkü tüm robotik sistemlerde tek bir mekaniksel kol vardır ve bu kol için gerekli olanlar Şekil 1.2.'de gösterildiği gibidir.



Şekil1.2. Robot Sisteminin Komponentleri

Robotların çalışmasında insan faktörü önemli olmayabilir. Birden fazla robotun birlikte çalışması sağlanabilir. Bu tür sistemlerde herbir robota üretim hücresi (job shop) adı verilir. Robotların çalışmasını CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) programlar. Bunların bütünleşik biçimde bulunduğu yere CIM (Bilgisayarda Bütünleşik İmalat) adı verilir.

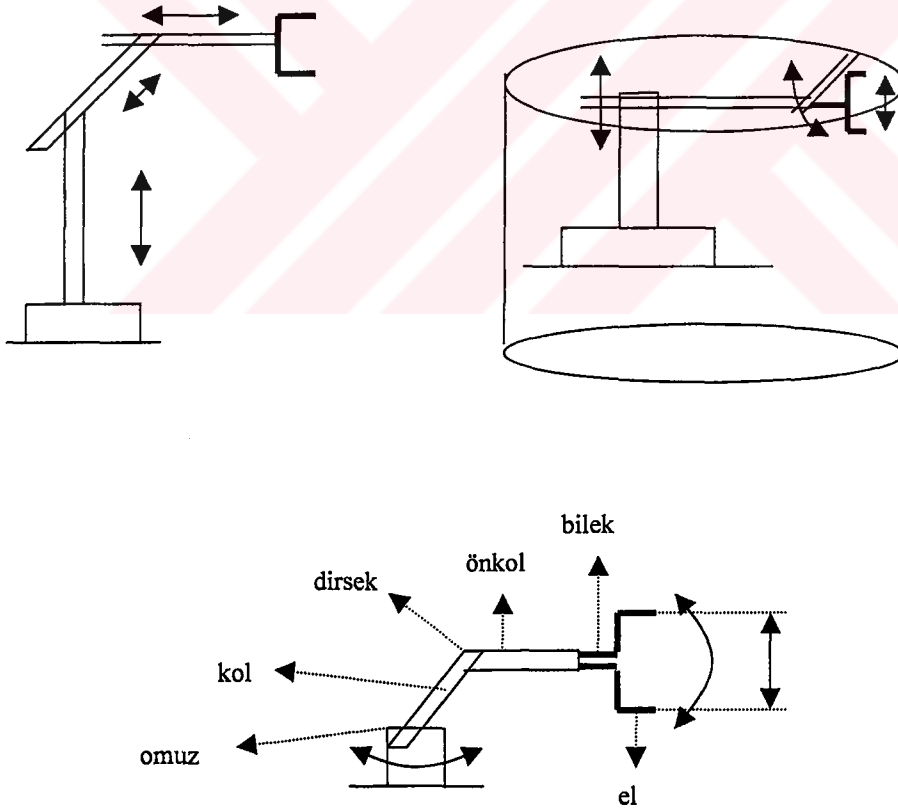
Robotlar aşağıdaki gibi sınıflandırılır.

* **Güç Kaynaklarına Göre** ; Elektrisel , Hidrolik ve Pinömatik (hava basıncı) ile çalışan robotlar vardır. Hidrolik robotlar ; ağır yüklerin kaldırılmasında önemli fonksiyonlara sahiptir. Moment üretme kapasitesi ve sisteme verdiği yanıt oldukça iyidir. Elektriksel güç kaynağı ile gerçekleştirilen robotlar ; AC ya da DC servo motorlar ile sürülebilir. Bu yöntem ucuz , temiz ve hızlı bir çözümdür. Pinömatik robotlar ; diğerlerine göre daha sınırlı kullanıma sahip olduğu söylenebilir. Bu robotlar basit yapıya sahip oldukları halde maliyetleri yüksektir.

* **Kontrol Metodlarına Göre** ; Servo ve servo olmayan robotlar şeklinde sınıflandırılabilir. İlk robotlar servo olmayan robotlardı ve açık döngüye sahipti. Çalışmaları önceden tanımlanmış mekaniksel hareketlerle sınırlıdır. Servo robotlar; kapalı döngü geri besleme özelliklerine sahiptir. Hareketleri bilgisayar tabanlı tekrar programlanabilir olmalıdır. Servo robotları kendi aralarında da sınıflandırmak mümkündür. Noktadan noktaya en basit türde olanıdır. Bu robotlarda ; izleyeceği yola ait noktalar set edilir ancak uç nokta ile öğretilen noktalar arasında kontrol yapılmamaktadır. Noktadan noktaya giden robotlar istenen noktalar dışında durmaz (ara noktalar için). Sürekli yol izleyen robotlarda ise , her noktadaki konuma müdahale edilebilir. Manipulatör üç boyutlu uzayda tanımlanmaktadır. Ancak kontrolün hareketin değişken olmasından dolayı kolay yapılması mümkün değildir. Belli bir yol boyunca her noktada durabilir.

* **Uygulama Alanlarına Göre** ; Kartezyen , silindirik , küresel , Scara ve insan kolu benzeşimli biçiminde sınıflandırma yapılabilir. Kartezyen robot da eksenler prizmatik yani eksen boyunca lineer hareket sergiler. 3SD+1 (SD:Serbestlik Derecesi) özelliğine sahiptir. Literatürde PPP (Prismatic- Prismatic- Prismatic)

biçimindeki rotasyonla gösterilir. Silindirik robot ise RPP (Revolute-Prismatic-Prismatic) rotasyonu ile gösterilir. Robotun ilk eklem yeri dönel yapıya sahiptir. Küresel robotta RRP (Revolute-Revolute-Prismatic) rotasyonuna sahiptir [1]. Yani silindirik robotta ikinci hareket eksen boyunca doğrusal yerine dönel biçimde tanımlanmıştır. Scara da aynı şekilde RRP yapısındadır. Ancak eksenlerin aldıkları açı bakımından farklılık gösterir. Bu robotta hareketin yatay bileşeni RR yani birinci ve ikinci eksen tayin eder. Hareketin dikey bileşeni üçüncü eksen oluşturur. Böylece kolun yukarı aşağı hareketi prizmatik eksen tarafından yapılmıştır. Eksenler birbirine diktir. İnsan benzeşimli robotlarda genellikle 6 SD yapıları göze çarpar. Eklem açılarının ilk pozisyonu oldukça önemlidir. Omuz, kol, dirsek, ön kol, bilek, el gibi kavramlar oldukça yaygın biçimde kullanılan terimlerdir. Omuz dikey eksen boyunca öne arkaya doğru hareket eder. Kol yatay eksen boyunca; ön kol ise yukarı ve aşağı yatay dirsek eksenini boyunca hareketinde kullanılır. Uygulama alanlarına göre açıklanan bu robotlara ilişkin yapı Şekil 1.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Kartezyen ,Silindirik , İnsan Benzeşimli Robotlar

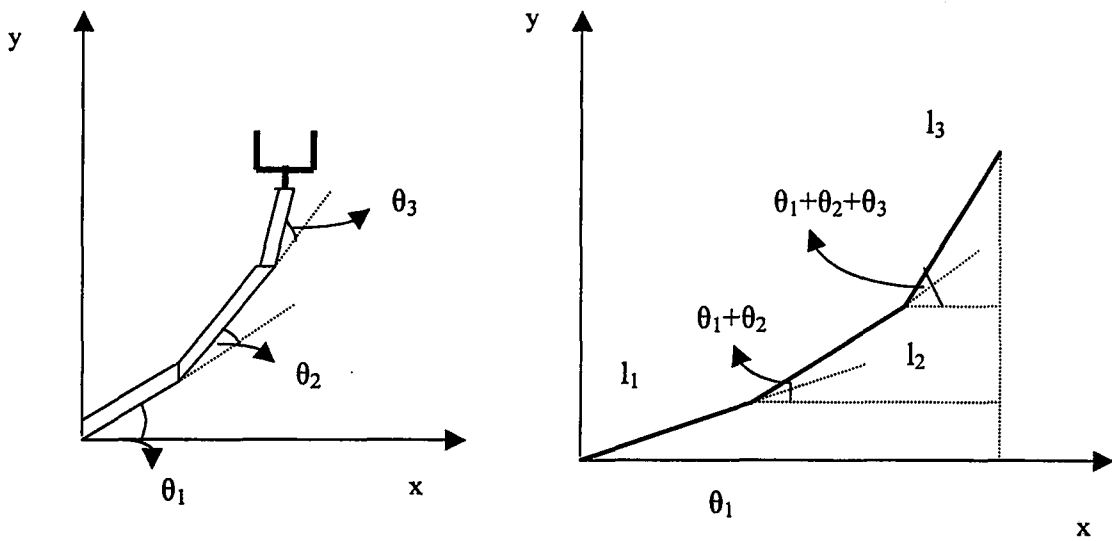
Daha sonraki bölümlerde robotun kinematik ve dinamik modellenmeleri ele alınarak klasik kontrol yöntemleri üzerinde durulacaktır. Robotun serbestlik derecesi arttıkça sistemin çözümü doğrusal olmadığı için kinematik denklemlerde ters modellenmenin yapılması oldukça zordur. Robotun dinamik özellikleri bilindiği takdirde robotun yeri kontrol edilebilir. Dinamik modellenme yapıldığında çok küçük kuvvetle bile robot kolu tepkide bulunabilir. Aşırı kuvvet uygulandığında robot kolu çatlayabilir ya da osilasyon yapabilir [2] . Robot imalatı yapılırken bu kriterler gözönüne alınır. [Gürbüz –dayanıklı (robust) kontrol]

Robotta aranan önemli özellikler, robotun kapasitesi, hızı, eklem sayısı, kesinliği, tekrarlanabilme yeteneği ve çalışma ortamı olarak sıralanabilir.



BÖLÜM 2.ROBOT KOL KİNEMATİĞİ

Kinematik, bir sistemin mümkün hareket ve kol konfigrasyonlarının davranışı olarak tanımlanabilir. Bu tanım sistemin geometrisiyle ilgilidir. Sistemin hareketinde kuvvet, direnç, enerji ve son konum önemlidir. Robotlar birbirine eklemlerle bağlanmıştır. Eklem ve bağların birbirine ardışık bağlanmaları ile zincir oluşur. Şekil 1.3.'den de görüleceği gibi zincirin bir ucu sabittir. Bu uca gövde denir. Diğer ucun açık olması halinde açık kinematik zincir adı verilir. Kendinden önceki eklemeye bağlı ise kapalı kinematik zincir adı verilir [2]. Kinematikte konum ve yön önemlidir. Robot kinematığı, eklem değişkenleri vektörü verilen bir robotun yerinin hesaplanması için gereklidir, yani robot kol kinematığı, kuvvet ve moment gözönüne alınmaksızın sabit eksen takımına göre zamanın fonksiyonu olarak kol hareketinin incelenmesidir. Düz kinematikte eklem bağ parametreleriyle referans eksen takımı kullanarak uç noktadaki uzvun konum ve yönlenmesinin hesaplanması gerekir. Ters kinematikte robot kolunun alacağı son konum ve hız bilinmektedir. Buna göre kinematik zincirin sondan başa doğru çözümü yapılmaktadır. Üç eklemlilik düzlemsel (planar) manipulatörün kinematik eşitliklerinin yazılabilmesi için açının bilinmesine ihtiyaç vardır. Uzun konumunu belirtirken düzlemde iki nokta kullanılmalıdır. Saat yönünün tersi pozitif kabul edilerek $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ bu eklemlerin açısı olarak alınmıştır. Herbir uzvunun uzunluğu sırasıyla l_1, l_2, l_3 olan manipulatör Şekil 2.1'deki gibidir



Şekil 2.1.Planar Manipulatör ve Kinematik Denklemlerin Çözümü İçin Trigonometrinin Kullanılması

2.1. Üç Uzunlu Manipulatörün Konum ve Yönlenmesi

Manipulatör önce θ_3 açısıyla döndüğü kabul edilmiştir. İki boyutlu rijit hareketlerin düzlem üzerinde dönme ve öteleme hareketlerinin 3x3 matris biçiminde genel gösterimi (2.1)'de verilmiştir.

$$A_3(\theta_3) = \begin{pmatrix} R(\theta_3) & t_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & t_x \\ \sin\theta & \cos\theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$R(\theta)$ dönme matrisini ve t konum vektörünü göstermektedir. t_3 ; referans eksen takımına göre dönen eksen takımına ait orjininin konum vektörüdür. Perspektif dönüşümü 0 (sıfır), ölçek faktörü 1 alınmalıdır.

Başlangıç konumunda üçüncü eklem koordinatı, dönen eksen takımının orjininin konum vektörü olup koordinatları $(l_1+l_2, 0)$ dir. Matris biçiminde gösterimi eşitlik (2.2)'deki gibidir.

$$A_3(\theta_3) = \begin{pmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & (1 - \cos\theta_3)(l_1 + l_2) \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & -\sin\theta_3(l_1 + l_2) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

(Bu dönme esnasında birinci ve ikinci uzvun konumları değişmemektedir)

İkinci uzuv θ_2 açısı kadar döndüğünde ;

$$A_2(\theta_2) = \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & (1 - \cos\theta_2)l_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & -l_1\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Son olarak θ_1 açısı kadar ilk uzuv döndüğünde ;

$$A_1(\theta_1) = \begin{pmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Bu üç matrisin çarpımıyla hareketin etkisi irdelendiğinde ;

$$A_1(\theta_1)A_2(\theta_2)A_3(\theta_3) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & k_x \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & k_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

$$k_x = l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - (l_1 + l_2) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

$$k_y = l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - (l_1 + l_2) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.6)$$

$$K(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = A_1(\theta_1)A_2(\theta_2)A_3(\theta_3)$$

K matrisi manipulatörün kinematiği hakkında bilgi edinilmesini sağlar. Böylece manipulatörün kinematik dönüşüm matrisleri elde edilebilir. Uç noktadaki konum vektörü, K matrisiyle başlangıç konum vektörünün çarpımı sonucu bulunur.

2.1.1. Konum ve Yönlenmeye İlişkin Simulasyon

2.1.'de verilen modellemeyi Matlab-Simulink 'te gerçekleştirmek mümkündür.

$(l_1 + l_2 + l_3, 0)$ noktası için hareketin genel denklemi şu şekildedir:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & k_x \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & k_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 + l_2 + l_3 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

$$x = l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.8)$$

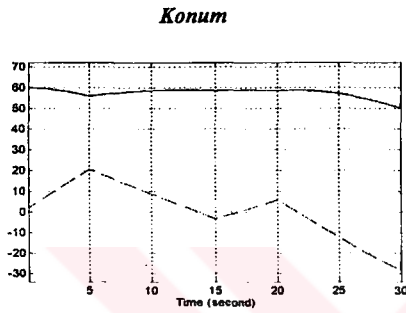
$$y = l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

Bu manipulatörün uzuvlarına ait açıları arttırıp ya da azaltmak suretiyle simulasyonunu görmek mümkündür. 25 saniyelik sürede Tablo 2.1'de verilen açılara

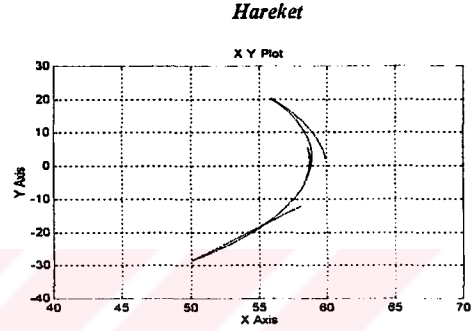
göre $(l_1 + l_2 + l_3, 0)$ noktası için simülasyon yapılsın.(Bu açı değerleri istenildiğinde değiştirilebilir)

Tablo 2.1. Üç Uzunlu Manipulatörün Konum ve Yönlenmesi İçin Gerekli Açı Değerleri

ZAMAN	θ_1	θ_2	θ_3
5 sn	10° artsın	10° artsın	10° artsın
10 sn	30° azalsın	20° artsın	20° azalsın
5 sn	10° artsın	10° azalsın	20° artsın
10 sn	40° azalsın	değişmesin	20° artsın



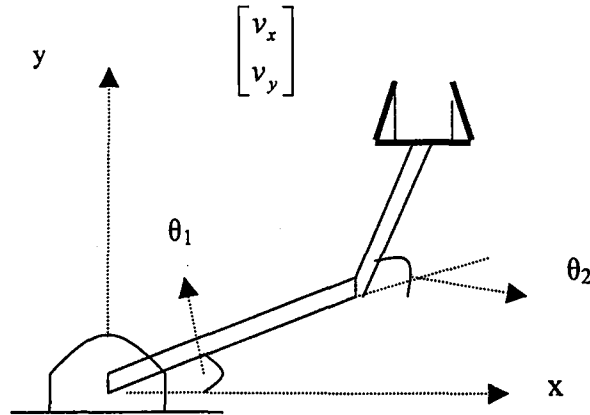
(a)



(b)

Şekil 2.2. Üç Uzunlu Robotun Açı ve Zaman Kriterlerine Göre Konumu ve Hareketi

Simülasyon yapılırken uzuvların uzunlukları eşit alınmıştır. Şekil 2.2.-b 'de x-y düzleminde konumun nasıl olacağı belirlenmiştir. Şekil 2.2.-a'da x ve y düzlemlerinde ki hareketi ele alınmıştır. Program EK 1 'de ki gibidir.



Şekil 2.3. İki Serbest Dereceli Planar Manipulatörün Uç Noktasındaki Hızları

2.2.İki Uzuylu Manipulatörün Uç Noktasındaki Hızı

Şekil 2.3.'de görülen iki serbest dereceli planar manipulatörün , uç noktadaki hızını hesaplamak mümkündür. Uç noktadaki doğrusal hızı ,

$$v = J_{11}\dot{q}_1 + \dots + J_{1n}\dot{q}_n \quad (2.9)$$

şeklindedir.

J_{11} :Birinci uzvun jakobyen matrisi

Planar manipulatör denklemlerinden iki serbest dereceli robotta jakobyen matrisi ve uç noktasındaki hızıyla ilgili aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

$$J = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 - \sin(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \cos\theta_1 + \cos(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

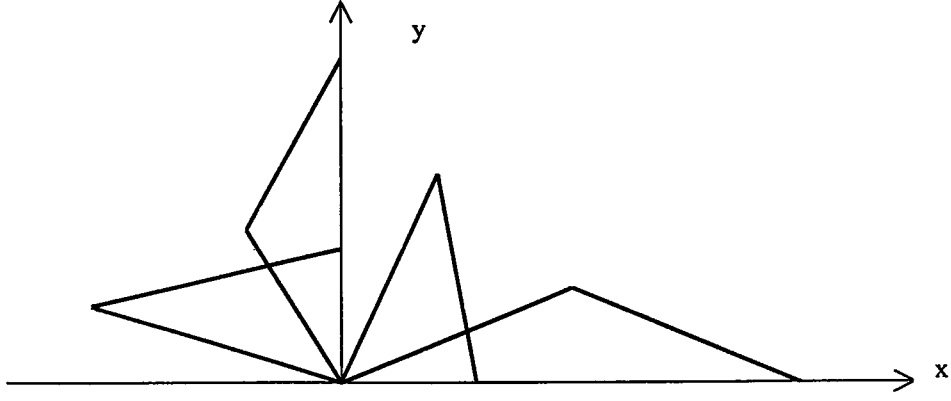
$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\sin(\theta_1) \\ -2\cos(\theta_1) \end{bmatrix} \dot{\theta}_1 + \begin{bmatrix} -\sin(\theta_1) \\ -\cos(\theta_1) \end{bmatrix} \dot{\theta}_2 \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_1) \\ -\cos(\theta_1) \end{bmatrix} (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

Planar manipulatörü , Şekil 2.4.' deki gibi hareket ettirerek robotun konumu,hareketi ve hızı irdelenecektir. Bölüm 3 ve Bölüm 4'de bu açı değerlerine göre dinamik modellenmesi ve klasik kontrol yöntemleri üzerinde durulacaktır.

2.3. İki Serbest Dereceli Manipulatörün Uç Noktasındaki Hızı , Konumu ve Hareketinin Simulasyonu

Manipulatör sırasıyla A,B,C,D biçiminde Şekil 2.4 'teki gibi hareket ettirilsin.



Şekil 2.4. İki Serbest Dereceli Planar Manipulatörün x-y Düzlemindeki Hareketi

Tablo 2.2.'de verilen açı değerleri arasında ilişki olmalıdır. θ_1 Açısına bağlı olarak θ_2 değerleri girilmelidir.

Tablo 2.2. İki Serbest Dereceli Planar Manipulatörün A,B,C,D Konumları İçin Gerekli Açı Değerleri

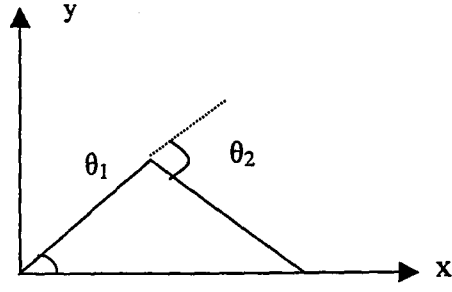
KONUM	θ_1 °	θ_2 °
A	15	30 (-) yönde t =0 sn anında
B	80	160 (-) yönde t =10 sn anında
C	150	120 (+) yönde t =20 sn anında
D	100	20 (+) yönde t =30 sn anında

Planar Manipulatörün her iki uzvunun uzunluğunun eşit alınmıştır. Bu nedenle θ_2 açısına ikizkenar üçgen özelliğine uygun değerler verilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

* Örneğin ;

$l_1=l_2$ ve $\theta_1=15^\circ$ alınırsa ,

θ_2 (-) yönde 30° olmalıdır.

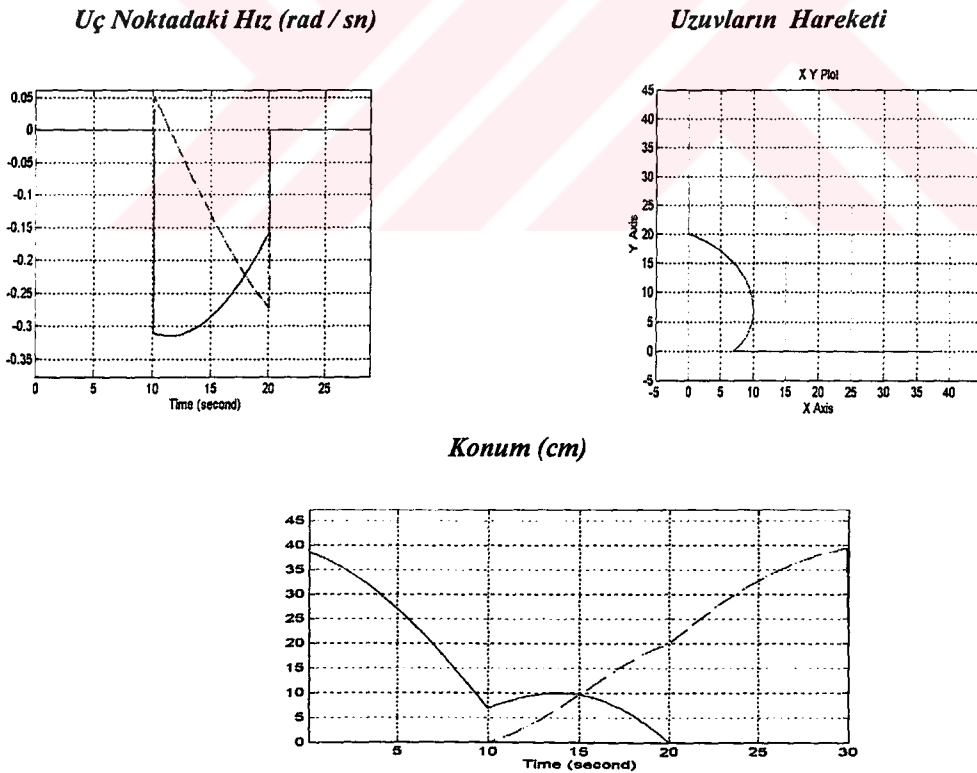


Şekil 2.5. θ_1 ve θ_2 Açılarına İlişkin Örnek

A,B,C,D konumları için tüm açılar hesaplanarak (yaklaşık doğru tahminlerde alınabilir. Bu durumda uzuvların uzunluklarının birbirine eşit olmadığı kabul edilebilir) Tablo 2.2.'deki değerlere göre simülasyonu yapılmıştır.

Matlab-Simulink'te yapılan program EK 1 ' de verilmiştir.

Şekil 2.6.'da θ_1 ve θ_2 değerlerine göre uç noktadaki hızı , konumu ve hareketi gösterilmiştir.



Şekil2.6. θ_1 ve θ_2 İçin Manipulatörün Uç Noktadaki Hızı, Konumu ve Hareketi

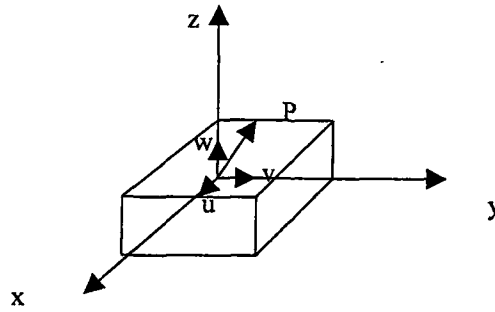
0-10 sn aralığında x düzleminde konum değişimi yoktur,y düzleminde hareket etmektedir. Robot uzuvlarının uzunlukları eşit olduğundan saat yönüne göre I. ve II.uzuvların hareketi birbirinin tersi yönündedir (x için).

Aynı şekilde 20-30 sn aralığında y düzleminde konum değişimi yoktur. Şekil 2.6.'da uzuvların hareketi incelendiğinde B'den C'ye geçerken konum değişimi olduğu görülmektedir.

Uç noktadaki hızı irdelendiğinde robot uzuvlarının açı değişimleri 10-20 sn. aralığında saat yönüne göre birbirini destekleyici yöndedir. Diğer durumlarda zıt yönde olduklarından dolayı hız değişimi Şekil 2.6.'daki gibi olacaktır.

2.4. Robot Kolu Düz Kinematığı İçin Dönme Matrisleri

Kinematik problemlerin çözümünde herbir eklem için eklem eksen takımı tanımlanarak referans eksen takımına göre dönüşüm yapılır. Referans eksen takımıyla eklem eksen takımı arasındaki zincirleme bağıntıyla kinematik problemler basitleştirilir. Dönme matrisine ötelenme hareketi ilave edilerek homojen dönüşüm matrisleri elde edilir ve $oxyz$ 'yi referans eklem takımı kabul ederek P noktası Şekil 2.7 'de ki gibi gösterilir.



Şekil 2.7. Referans ve Eklem Eksen Takımları

Referans eksen takımı ve eklem eksen takımları için eşitlik (2.12)'deki bağıntılar yazılabilir.

$P_{uvw}=(P_u, P_v, P_w)^T$ ya da $P_{xyz}=(P_x, P_y, P_z)^T$ olmak üzere;

$$P_{xyz} = D P_{uvw} \quad (2.12)$$

P_{uvw} , P noktasının uvw eksen takımına göre koordinatlarıdır. P_{uvw} 'nin vektörel olarak gösterimi;

$$P_{uvw} = P_u i_u + P_v j_v + P_w k_w \quad (2.13)$$

P 'nin x,y,z 'deki bileşenleri P_x, P_y, P_z olduğuna göre vektörel gösterimi

$$P_x = i_x \cdot P ; P_y = j_y \cdot P ; P_z = k_z \cdot P \quad (2.14)$$

biçiminde olacaktır. Bu ifadenin matris formunda yazılması gerekirse eşitlik (2.15)'deki gibi yazılmalıdır.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v & i_x \cdot k_w \\ j_y \cdot i_u & j_y \cdot j_v & j_y \cdot k_w \\ k_z \cdot i_u & k_z \cdot j_v & k_z \cdot k_w \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_w \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

D dönüşüm matrisi ;

$$\begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v & i_x \cdot k_w \\ j_y \cdot i_u & j_y \cdot j_v & j_y \cdot k_w \\ k_z \cdot i_u & k_z \cdot j_v & k_z \cdot k_w \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Referans eksen takımı için yazılanlar eklem eksen takımı içinde yazılabilir. Burda dönüşüm matrisini E ile göstermek gerekirse genel olarak eşitlik (2.17)'de verildiği gibi olmalıdır.

$$P_{uvw} = E P_{xyz} \quad (2.17)$$

Matris biçiminde yazılırsa ;

$$\begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_u i_x & i_u j_y & i_u k_z \\ j_v i_x & j_v j_y & j_v k_z \\ k_w i_x & k_w j_y & k_w k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

olur.

** Kısa Hatırlatma

Skaler Çarpım Özellikleri

$$\vec{x} \cdot \vec{x} = 0 \text{ ise } \vec{x} = 0$$

$$\vec{x} \cdot \vec{y} = \vec{y} \cdot \vec{x}$$

$$(\alpha \vec{x} + \beta \vec{y}) \cdot \vec{z} = \alpha(\vec{x} \cdot \vec{z}) + \beta(\vec{y} \cdot \vec{z})$$

Vektörel Çarpım Özellikleri

$\vec{x} \times \vec{y}$ ve $\vec{z} = \det M$ olsun

$$M = \begin{bmatrix} i_1 & i_2 & i_3 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{bmatrix}$$

i_1, i_2, i_3 birim vektörleri olmak üzere;

$$i_1 = i_2 \times i_3$$

$$i_2 = i_3 \times i_1$$

$$i_3 = i_1 \times i_2$$

$$N(\vec{x} \times \vec{y}) = N(\vec{x}) \cdot N(\vec{y}) \cdot \sin(\theta)$$

N: Vektörün Fiziksel Uzunluğu θ : İki Vektör Arasındaki Aç

Ortogonalite

$\vec{x} \cdot \vec{y}$ ortogonalsa $\vec{x} \cdot \vec{y} = 0$ ve $\vec{y} \cdot \vec{x} = 0$

Referans eksen takımı ile eklem eksen takımı arasında ;

$E=D^{-1}=E^T$ yazılabilir. D ve E matrisleri arasında ortogonal dönüşümden bahsetmek mümkündür. Bunun sonucunda ;

$$E.D=D^T . D = D^{-1} .D = 1 \quad (2.19)$$

yazılır. (2.19) ' a göre ters koordinat dönüşüm yapıldığı görülmektedir.

Asıl amaç ; referans eksen takımının uvw eklem eksen takımına dönüşünü temsil edecek dönme ya da dönüş matrisini bulmaktır ; uvw eksen takımını x eksen etrafında α kadar dönerse ;

$$i_u = i_x$$

$$j_v = \cos\alpha j_y + \sin\alpha k_z \quad (2.20)$$

$$k_w = -\sin\alpha j_y + \cos\alpha k_z$$

j_v ve k_w 'da i_x bileşenleri sıfırdır.

Bu eşitlikleri D dönüşüm matrisinde yerine koyulursa ; $M_{x,\alpha}$ dönme matrisi elde edilir.

$$M_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v & i_x k_w \\ j_y i_u & j_y j_v & j_y k_w \\ k_z i_u & k_z j_v & k_z k_w \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

(i_x, j_y, k_z) : xyz eksen takımındaki birim vektör

(i_u, j_v, k_w) : uvw eksen takımındaki birim vektör

$i_x . i_x = 1$ $j_y . k_z = 0$ oldukları hatırlatmalardan yararlanarak görülebilir.

Buna göre dönüşüm matrisi eşitlik (2.22)'deki gibidir.

$$M_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

uvw eksen takımı uzayda y eksenini etrafında ϕ kadar dönecek olursa;

$$i_u = \cos\phi.i_x - \sin\phi.k_z$$

$$j_v = j_y \quad (2.23)$$

$$k_w = \sin\phi.i_x + \cos\phi.k_z$$

z eksenini etrafında θ kadar dönerse ;

$$i_u = \cos\theta.i_x + \sin\theta.j_y$$

$$j_v = -\sin\theta.i_x + \cos\theta.j_y \quad (2.24)$$

$$k_w = k_z$$

Diğer dönme matrisleri, $M_{y,\phi}$ ve $M_{z,\theta}$ 'dir.

Bu matrisler birbirleriyle çarpılmalıdır. Çarpımların sırası değişikçe dönme yönünde değişir. Bulunan dönüşüm matrisleriyle istenen sonucu elde etmek mümkün değildir. Referans eksen takımıyla eklem eksen arasındaki geometrik ilişkiyi açıklayabilmek için 4x4 boyutunda dönüşüm matrisine ihtiyaç vardır. Çünkü homojen koordinatlarda tanımlanmış vektörün başka bir eksen takımında gösterilmesi gerekmektedir. 4x4 boyutundaki bir matrisde dönme matrisinin yanısıra, konum vektörü , izdüşüm vektörü ve ölçek faktörü olmalıdır. Robotik uygulamalarda izdüşüm ve ölçek faktörü önemlidir.İzdüşüm 0(sıfır) ; ölçek ise 1 alınmalıdır. Konum vektöründe referans eksen takımıyla eklem eksen takımının orijini arasında bir ilişki mevcuttur.

Genel anlamda M matrisi eşitlik (2.25) ' teki gibidir.

$$M = \begin{bmatrix} M_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ F_{1 \times 3} & W_{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$M = \begin{bmatrix} \text{Dönme Matrisi} & \text{Konum Vektörü} \\ \text{Izdüşüm} & \text{Ölçek} \end{bmatrix}_{4 \times 4}$$

4x4 Matris boyutunda x yönündeki homojen dönüşüm matrisi ;

$$M_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{'dir} \quad (2.26)$$

Öteleme matrisi ;

$$M_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{'dir} \quad (2.27)$$

Eklem eksen takımıyla referans eksen takımı arasındaki geometrik ilişki eşitlik (2.28) ' deki gibidir.

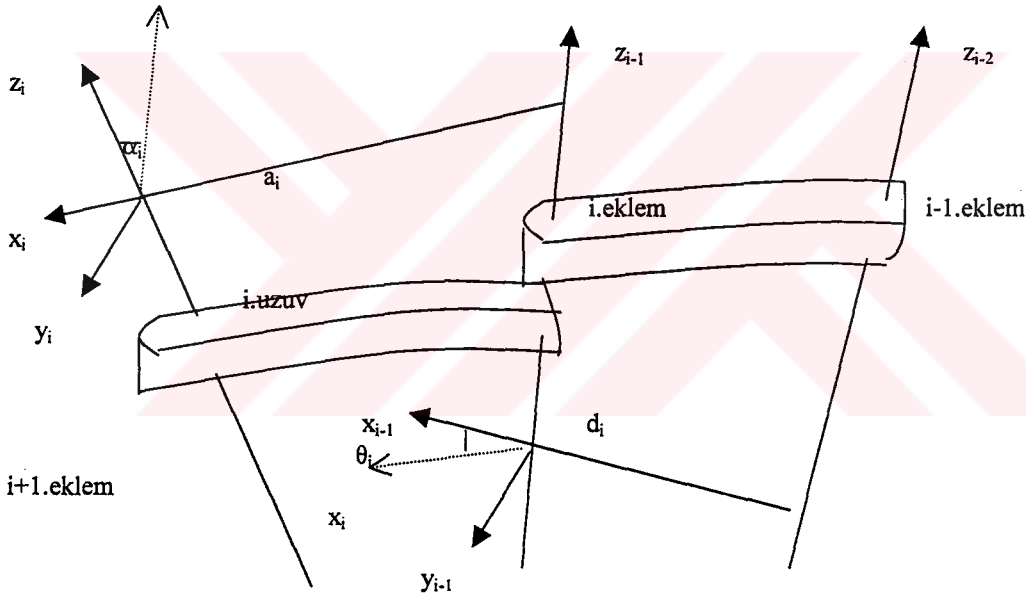
$$M = M_o \cdot M_{x,\alpha} \cdot M_{y,\phi} \cdot M_{z,\theta} \quad (2.28)$$

4 x 4 boyutundaki bu matrisin 16 elemanı mevcuttur. Yönlendirmeye ait 9 elemanın tamamı bilinmezse bile amaç, referans eksen takımıyla eklem eksen takımı arasındaki geometrik ilişkiyi çözebilmektir. Bu amaçla kullanılan metodların başında RPY (roll,pitch,yaw) metodu gelir. Endüstriyel robot uygulamalarında RPR yapısı yaygındır. Yaw roll ve pitchin bileşkesinden oluşur. RPY metodunda x,y,z

eksenlerinde belli açılarda dönme olacaktır ve bu açılar dönme matrisindekilerle aynı değildir.

2.5. Denavit-Hartenberg Gösterimi

Kinematik zincirde eklem sayısı arttıkça dönme ve ötelenmeden dolayı problemin çözümü güçleşir. Herbir eklem arasındaki bağı sistematik olarak matris metoduyla tanımlayarak geliştiren Denavit-Hartenberg olmuştur. Bu sayede kinematik çözüm karmaşası bir ölçüde ortadan kalkmıştır. Bağın konum ve yönlenmesi 4x4 boyutundaki matris üzerine kuran Denavit-Hartenberg her uzvun konum ve yönlenmesini bir önceki eksen takımı ile göstermiştir. Döner ya da ötelemeli bağı tanımlamak için Denavit-Hartenberg tarafından 4 parametre saptanmıştır.



Şekil 2.8. Denavit-Hartenberg Parametreleri

Bu parametreler ,

θ_i : z_{i-1} ekseninde x_i ile x_{i-1} arasındaki açı

α_i : x_i ekseninde z_i ile z_{i-1} arasındaki açı

d_i : z_{i-1} eksenini boyunca $i-1$. koordinat sistemi merkezinden x_i ve z_{i-1} eksenlerinin kesişme noktasına olan mesafesi

a_i : x_i eksenini boyunca x_i ile z_{i-1} 'in kesişme noktasıyla $i-1$. Eksenin orjini arasındaki mesafe

şeklinde tanımlanmıştır.

Herbir eklem eksen takımı homojen dönüşüm matrisinin elde edilmesiyle kolayca bulunacaktır. Bu nedenle x_i , y_i , z_i eksenleri doğru yerleştirilmelidir. z_i $i-1$. eklem hareket eksenine göre ve x_i ise z_{i-1} 'in normali şeklinde yerleştirilmelidir.

Homojen dönüşüm matrisini şu şekilde elde edilir.

1. x_i eksenini x_{i-1} 'in yönlerini aynı yapmak için z_{i-1} θ_i kadar döndürülür.
2. x_i ile x_{i-1} 'i aynı hizaya getirmek için d_i kadar öteleme yapılmalıdır.
3. İki orjini biraraya getirmek ve x eksenlerinin örtüşmesi için a_i kadar öteleme yapılmalıdır.
4. İki eksen takımını çakıştırmak için x_i etrafında α_i kadar döndürülür.

$$A_i = T_{z,d} \cdot T_{z,\theta} \cdot T_{x,a} T_{x,\alpha} \quad (2.29)$$

$T_{z,d} \cdot T_{z,\theta}$: z eksenini etrafında gerçekleştiğini gösterir.

θ ve α dönme matrislerini ; d ve a ise öteleme matrislerini belirtir.

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Kısaca eşitlik (2.32) 'deki gibi gösterilebilir.

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & S_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i C_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i S_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Eşitlik (2.25) 'te belirtilmiş olan homojen matrisinde n , s , a , p tanımlandığında ;

$$M = \begin{bmatrix} \text{Dönme Matrisi} & \text{Konum Vektörü} \\ \text{Izdüşüm} & \text{Ölçek} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

M matrisi şeklinde gösterilecektir.

n:Elin normal vektörü

s:Elin kayma vektörü

a:Elin yaklaşım vektörü

p:Elin konum vektörüdür

Robotik uygulamalarında izdüşüm 0 (sıfır) ; ölçeklendirme 1 'dir. Eklem sayısı arttıkça robotun serbestlik derecesi değişecektir. Homojen dönüşüm matrisini genel olarak eşitlik (2.33)'deki gibi yazılabilir.

$$A_{i-1}^i = T_{z,d} \cdot T_{z,\theta} \cdot T_{x,a} \cdot T_{x,\alpha} \quad (2.33)$$

Robotun serbestlik derecesi değiştikçe çarpım elemanlarında değişecektir. Örneğin 4 serbest dereceli robot için ;

$$T_0^4 = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 = \prod_{j=1}^4 A_{j-1}^j \quad (2.34)$$

olmalıdır. Her eklem arasındaki a , d , θ , α bilindiğinde; düz kinematik çözümü yapılabilir.

2.6. Ters Kinematik

Ters kinematik çözümde robot kolunun gideceği noktadaki konumun koordinatları biliniyor olması gerekmektedir. Örneğin 4 serbest dereceli robotun gideceği noktanın konum ve yönlenmesine karşın hesaplanacak eklem değişkenlerinin $q=(q_1, q_2, q_3, q_4)^T$ bulunması ters kinematiğin çözümü anlamına gelmektedir. Ters kinematik çözümde ;

- Cebir
- İterasyon
- Geometri

yollarından biri kullanılmaktadır. Ancak bu metodlardan hiçbiri tüm robotun ters kinematik problemlerinin çözümünde tam randıman vermez. Örneğin cebir yoluyla ters kinematik problem çözümünde birden fazla metod olabilir. Her uzuv için ayrı seçenekler sözkonusu olduğundan pek kullanışlı değildir. İterasyon yönteminde fazla hesaplama gerektirir ve özel durumlarda doğru çözüm vermeyebilir. Kol yapısının basit olduğu durumlarda geometrik çözüm en uygun olanıdır.

Ters kinematik çözümlerde denklemler karmaşık ve lineer olmayan çözümleri gerektirebilir. Robot uygulamalarında 6 serbestlik derecesi en ideal olanlardandır. Serbestlik derecesinin az olması durumunda keyfi konumlandırma mümkün olmamaktadır.

6 Serbestlik derecesine ait bir robottaki düz kinematik ,

$$T_0^6 = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 \cdot A_4^5 \cdot A_5^6 \quad (2.35)$$

ile ifade edilir.

Ters kinematik hesaplamalarda i.ekleme ait θ_i 'yi çözmek için ,

$$(A_0^1)^{-1} \cdot T_0^6 = A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 \cdot A_4^5 \cdot A_5^6$$

$$(A_1^2)^{-1} \cdot (A_0^1)^{-1} \cdot T_0^6 = A_2^3 \cdot A_3^4 \cdot A_4^5 \cdot A_5^6 \quad (2.36)$$

$$(A_2^3)^{-1} \cdot (A_1^2)^{-1} \cdot (A_0^1)^{-1} \cdot T_0^6 = A_3^4 \cdot A_4^5 \cdot A_5^6$$

denklemlerinden yararlanılması gerekir.



BÖLÜM 3. ROBOT DİNAMIĞI

Robot kolunun hareketi, eklemlerine uygulanan kuvvet ile belirlenir. Bu nedenle eklemlere uygulanan kuvvet ya da moment büyüklüklerinin zamana göre konumu, hızı ve ivmesi irdelenmelidir. Yapılan bu analize robot kolunun dinamik analizi denir. Dinamik analiz için lineer olmayan diferansiyel denklemlerin tanımlanması gerekir. Robot dinamiği düz ve ters olmak üzere ikiye ayrılır. Herhangi t anında istenen moment ve kuvvetler verildiğinde robot kolunun alacağı konum ve yönlenme için herbir durumdaki hız ve ivmenin bulunmasına düz dinamik problem denir. Ters dinamik problemde ise robot kolunun istenen konum ve yönlenmeye gelmesi için (hız ve ivmenin bilinmesi durumunda) tahrik elemanlarının üreteceği moment ve kuvvetlerin bulunması gerekir.

Robot kollarının dinamik denklemlerini elde etmek için kullanılan yöntemlerden bazıları;

- * Lagrange-Euler (L-E)
- * Newton-Euler (N-E)
- * Rekürsif Lagrange (R-L)
- * Genelleştirilmiş D'Alembert yöntemleridir.

Yaygın olarak kullanılanı ; Lagrange-Euler ve Newton –Euler yöntemleridir.

3.1. Lagrange – Euler Formulasyonu

Sistemin içerdiği toplam iş ve enerjiyle ifade edilir. M ; uygulanması gereken momenttir. Lagrange – Euler formulasyonu tanımlanarak dinamik modellenme yapılabilir. Bu nedenle kinetik ve potansiyel enerji ele alınacaktır.

$$M_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right] - \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} \right] \quad i = 1,2,3,\dots,n \quad (3.1)$$

K: Robotun kinetik enerjisi

V: Robotun potansiyel enerjisi

L: Lagrange fonksiyonu

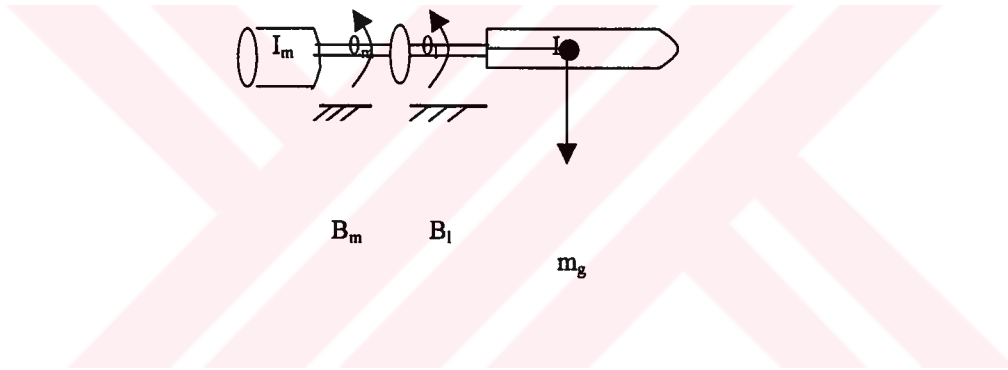
i : Serbestlik derecesi

q_i : i.Eklemin genelleştirilmiş koordinatı

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

3.1.1 Tek Serbest Dereceli Robot Kolu İçin Lagrange-Euler Denklemleri

Tek serbest dereceli robot kolunda Şekil 3.1. ' de gösterilen bir sistemin kinetik ve potansiyel enerji denklemleri yazılarak L-E metodu uygulanabilir.



Şekil 3.1. Tek ekleml robot

θ_m motor momentindeki açısal değişimi gösterir. Kinetik ve potansiyel enerji de B_m sürtünme katsayısı ; J_m motor milindeki eylemsizlik momenti ; n dişli oranıdır.

$$\theta_i = \frac{1}{n} \theta_m \quad (3.2)$$

Sistemin kinetik enerjisi;

$$K = \frac{1}{2} j_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} j_l \dot{\theta}_l^2 \quad (3.3)$$

$$K = \frac{1}{2} (j_m + j_l / n^2) \dot{\theta}_m^2$$

Sistemin potansiyel enerjisi ;

$$V = mgl(1 - \cos \theta_l) = mgl[1 - \cos(\theta_m / n)] \quad (3.4)$$

Lagrange fonksiyonu ;

$$L = \frac{1}{2} [j_m + j_l / n^2] \dot{\theta}_m^2 - mgl[1 - \cos(\theta_m / n)] \quad (3.5)$$

sonucu çıkar. Lagrange fonksiyonunun kinetik ve potansiyel enerjilerine ilişkin tanımlamalar bölüm 3.1.2.'de yapıldıktan sonra eşitlik (3.5) denklemini şu şekilde olmalıdır:

$$\text{Moment : } M = (j_m + j_l / n) \ddot{\theta}_m + \frac{mgl}{n} (\sin \theta_m / n)$$

$$M = X - (B_m + B_l / n^2) \dot{\theta}_m \quad \text{X: Motorun anma momenti} \quad (3.6)$$

$$X = j \ddot{\theta}_m + B \dot{\theta}_m + c \sin(\theta_m / n)$$

$$j = j_m + j_l / n^2 \quad ; \quad B = B_m + B_l / n^2 \quad ; \quad C = mgl / n^2$$

Böylece tek uzuvlu robotun momentine ilişkin tanımlamalar yapılmıştır.

3.1.2. Kinetik ve Potansiyel Enerjilere İlişkin Tanımlamalar

Robot kolunun 3 boyutlu uzayda hareket alanı B ile gösterilsin. Robot uzvunun kütlesi;

$$m = \int_B \rho(x, y, z) dx dy dz \quad (3.7)$$

Kinetik enerjiyi ; i. uzuvdaki sonsuz küçük dm kütesine bağlı eşitlik (3.8) denklemindeki gibi yazmak mümkündür:

$$K = \frac{1}{2} \int_B v^T(x, y, z) v(x, y, z) dm \quad (3.8)$$

3 Boyutlu uzayda ; maddenin kütle merkezi (x_c, y_c, z_c) olduğunda ;

$$x_c = \frac{1}{m} \int_B x dm \quad y_c = \frac{1}{m} \int_B y dm \quad z_c = \frac{1}{m} \int_B z dm \quad (3.9)$$

biçimindedir.

Gövde üzerindeki bir noktanın koordinat vektörü ;

$$r_c = \frac{1}{m} \int_B r dm \quad \text{'dir} \quad (3.10)$$

Kütle merkezi ;

$$\int_B (r_c - r) dm = 0 \quad (3.11)$$

olduğuna göre , manipulatörün hareketi hıza bağlı olarak eşitlik (3.12) 'de belirtildiği gibidir :

$$v = v_c + w.r \quad (3.12)$$

w :Açısal hız 'dır.Eğri simetrik matris kullanılarak hız vektörü şu şekilde olmalıdır:

$$v = v_c + S(w).r \quad (3.13)$$

Eğri simetrik matris ile ilgili tanımlamalar eşitlik (3.14) 'teki gibidir:

$$S^T + S = 0 \quad S_{ij} + S_{ji} = 0 \quad i,j=1,2,3 \quad (3.14)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -s_1 & s_2 \\ s_1 & 0 & -s_3 \\ s_2 & s_3 & 0 \end{bmatrix}$$

Eğri simetrik matrisi ve hıza göre kinetik enerji (3.15) 'teki gibi belirtilebilir:

$$K = \frac{1}{2} \int_B [v_c + S(w).r]^T \cdot [v_c + S(w).r] dm \quad (3.15)$$

İntegral içindeki terimler genişletildiğinde 4 terim elde edilir.

I.Terim:

$$\frac{1}{2} \int_B v_c^T \cdot v_c dm = \frac{1}{2} m.v_c^T \cdot v_c \quad (3.16.1)$$

v_c , B'ye bağlı olmadığından integralin dışına alınmıştır. Bu miktar m kütesinin mekezindeki bölgenin kinetik enerjisidir ve v_c ile hareket edecektir. Kinematik enerjinin dönüşebilen kısmı olarak adlandırılır.

II.Terim:

$$\frac{1}{2} \int_B v_c^T S(w) r \, dm = \frac{1}{2} v_c^T S(w) \int_B r \, dm = 0 \quad (3.16.2)$$

$$\int_B r \, dm = 0$$

olduğundan ikinci terim sıfırdır.

III.Terim:

$$\frac{1}{2} \int_B r^T S^T(w) \cdot v_c \, dm \quad (3.16.3)$$

Benzer şekilde bu terimde 0 (sıfır) 'dır.

Son olarak ; IV.Terim:

$$K_4 = \frac{1}{2} \int_B r^T S^T(w) \cdot S(w) \cdot r \, dm \quad \text{'dir.} \quad (3.16.4)$$

Tr matrisin bir izi (parçası) olarak düşünüldüğünde herhangi iki A ve B matrisleri için; $\text{Tr AB} = \text{Tr BA}$ söylenebilir. Buna istinaden bu matrisin herhangi iki vektörü için (a,b) ; $a^T b = \text{Tr ab}^T$ yazılabilir.

Bu doğrultuda 4.Terim ;

$$K_4 = \frac{1}{2} \int_B \text{Tr} S(w) r r^T S^T(w) \cdot dm$$

$$K_4 = \frac{1}{2} \text{Tr} S(w) \int_B r r^T \, dm \cdot S^T(w) \quad (3.17)$$

$$K_4 = \frac{1}{2} \text{Tr} S(w) j S^T(w)$$

Eylemsizlik momenti ;

$$j = \int_B r \cdot r^T dm \quad \text{'dir.} \quad (3.18)$$

3x3 Matris biçiminde tam olarak ; eşitlik (3.19) ' da gösterildiği gibidir.

$$j = \begin{bmatrix} \int x^2 dm & \int xy dm & \int xz dm \\ \int xy dm & \int y^2 dm & \int yz dm \\ \int xz dm & \int yz dm & \int z^2 dm \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Eğri simetrik matrisi açısal hıza bağlı olarak 3x3 matris boyutunda;

$$S(w) = \begin{bmatrix} 0 & -w_3 & w_2 \\ w_3 & 0 & -w_1 \\ -w_2 & w_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

şeklindedir.

(3.20) denklemini (3.17) 'de yerine korulduğunda (3.21) 'deki sonuca ulaşılır.

$$K_4 = \frac{1}{2} w^T \cdot I \cdot w \quad (3.21)$$

I ; 3x3 Boyutunda atalet matrisi olup eşitlik (3.22) 'deki gibidir.

$$I = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & - \int xy dm & - \int xz dm \\ - \int xy dm & \int (x^2 + z^2) dm & - \int yz dm \\ - \int xz dm & - \int yz dm & \int (x^2 + y^2) dm \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Kinetik enerji I. ve IV. Terimlerin toplamı olacaktır. Genel gösterimi eşitlik (3.23)'te verildiği gibi olacaktır.

$$K = \frac{1}{2} m v_c^T \cdot v_c + \frac{1}{2} w^T \cdot I \cdot w \quad (3.23)$$

i.Koordinat vektörünün hızını ve i.açısal hız vektörünü θ 'ya bağlı olarak;

$$v_{ci} = J_{vci}(q)\dot{q} \quad w_i = R_i^T(q)J_{wi}(q)\dot{q} \quad (3.24)$$

J_{vci} ve J_{wi} jakobyen matrisleridir.

Tüm kinetik enerji problemlerinin çözümünde ;

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_i^n [m_i j_v(q)^T j_v(q) + j_w(q)^T R_i(q)I_i R_i(q)^T J_w(q)] \cdot \dot{q} \quad (3.25)$$

denklemleri kullanılır. Kinetik enerji genel biçimde eşitlik (3.26) 'da ki gibidir.

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q)\dot{q} \quad (3.26)$$

$D(q)$, $i \times i$ boyutunda kütle matrisidir. Benzer şekilde potansiyel enerji eşitlik (3.27) 'deki gibidir.

$$V = \int_B g^T r dm = g^T \int_B r dm = g^T r_c \cdot m \quad (3.27)$$

3.1.3. Lagrange-Euler Denklemlerinde Gösterimi

Elde edilen kinetik ve potansiyel enerjiyi yerine koyarsak;

$$L=K-V \quad (3.28)$$

$$L = \left(\frac{1}{2} \sum_{i,j} d_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j - V(q) \right) \quad (3.29)$$

$$M_i = \left[\frac{d}{dt} \left[\frac{dL}{d\dot{q}_i} \right] \right] - \left[\left[\frac{\partial L}{\partial q_i} \right] \right] \quad (3.30)$$

$$M_i = \left[\sum_j dk_j(q) \dot{q}_j + \sum_{i,j} \frac{\partial dk_j}{\partial q_i} \dot{q}_i \dot{q}_j \right] - \left[\frac{1}{2} \sum \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \dot{q}_i \dot{q}_j - \frac{\partial V}{\partial q_k} \right] \quad (3.31)$$

$$M_k = \sum_j d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial^2 d_{ij}}{\partial q_i^2} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_i} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right] \dot{q}_i \dot{q}_j + \frac{\partial}{\partial q_k} V \quad (3.32)$$

\longleftrightarrow \longleftrightarrow \longleftrightarrow
 $D(q)$ $h(q, \dot{q})$ Φ_k

$$M = D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + G(q) \quad (3.33)$$

$G(q)$: Yerçekiminden dolayı oluşan matrisleri gösteren $i \times 1$ boyutlu vektör

$D(q)$: $i \times i$ boyutlu atalet matrisi

$h(q, \dot{q})$: $i \times 1$ boyutlu Merkezkaç ve Coriolis momentlerini gösteren vektör

$h(q, \dot{q})$ vektörünü daha açık yazılması gerekirse (3.34) 'teki gibidir:

$$h(q, \dot{q}) = C(\theta)\dot{\theta} + B(\theta)[\dot{\theta}\dot{\theta}] \quad (3.34)$$

$B[q]$: $i \times (i-1)/2$ boyutlu Coriolis kuvvet matrisi

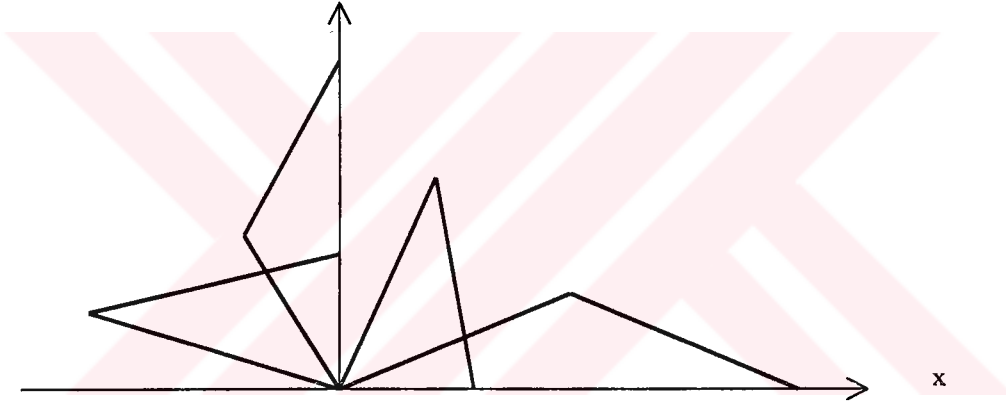
$C[q]$: $i \times i$ boyutlu merkezkaç kuvvet matrisi

Merkezkaç ve Coriolis momentleri , döner eksenli robotlarda sinüs ve kosinüsün fonksiyonlarıdır.

3.2. Newton-Euler Formulasyonu

Newton-Euler (N-E) formulasyonunda uygulanacak kuvvet momentlerinin hesaplama zamanı robot kolunun eklem sayısı ile doğru orantılı olarak bulunur. N-E hareket denklemleri ileri ve geri rekürsif (tekrarlamalı) denklemlerinden oluşur. Her uzuv üzerine etkiyen moment ve kuvvetleri baz alınarak gövdeye doğru hesaplamalar yapıldığından geri rekürsif ve her uzuv üzerine etkiyen açısal ve lineer (doğrusal) hız ile ivmesi baz alınarak uç noktaya doğru hesaplamalar yapıldığında ise ileri rekürsif denklemler ortaya çıkar.

3.3. İki Eklemlili Planar Manipulatörün Dinamik Modellenmesi



Şekil 3.2. İki Serbest Dereceli Planar Manipulatörün x-y Düzlemindeki Hareketi

İki eklemlili planar manipulatörün önceki bölümde kinematik denklemleri verilerek simülasyonları yapılmıştı. Bu kısımda verilen temel denklemlerden yararlanarak dinamik denklemler elde edilip , Matlab-Simulink'te simülasyonları yapılacak , ayrıca analizleri irdelenerek kontrol algoritmalarında kullanılacaktır.

Bu nedenle , uzuvlara uygulanması gereken kuvvet ya da momentlerin matematiksel ifadeleri ele alındığında ;

I.uzvun merkezine bağlı hızı ;

$$v_{c1} = j_{vc1} \cdot \dot{q} \quad (3.35)$$

$$j_{vc1} = \begin{bmatrix} -l_{c1} \text{Sin} q_1 & 0 \\ l_{c1} \text{Cos} q_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Benzer şekilde II.uzvun merkezine bağlı hızı ;

$$v_{c2} = j_{vc2} \cdot \dot{q} \quad (3.36)$$

$$j_{vc2} = \begin{bmatrix} -l_1 \text{Sin} q_1 - l_{c2} \text{Sin}(q_1 + q_2) & -l_{c2} \text{Sin}(q_1 + q_2) \\ l_1 \text{Cos} q_1 + l_{c2} \text{Cos}(q_1 + q_2) & l_{c2} \text{Cos}(q_1 + q_2) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Öteleme kısmına ait kinetik enerji ;

$$\frac{1}{2} m_1 v_{c1}^T v_{c1} + \frac{1}{2} m_2 v_{c2}^T v_{c2} = \frac{1}{2} \dot{q} \{ m_1 j_{vc1}^T j_{vc1} + m_2 j_{vc2}^T j_{vc2} \} \dot{q} \quad (3.37)$$

Dönme kısmına ait kinetik enerji ;

$$\frac{1}{2} \dot{q}^T \left\{ I_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + I_2 \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \right\} \dot{q} \quad (3.38)$$

Her uzvun açısal hızları ;

$$w_1 = \dot{q}_1 k \quad (3.39)$$

$$w_2 = (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) k$$

(3.37) ve (3.38) denklemlerinden yararlanarak atalet metrisi eşitlik (3.40) 'daki gibi olmalıdır.

$$D(q) = m_1 j_{vc1}^T j_{vc1} + m_2 j_{vc2}^T j_{vc2} + \begin{bmatrix} I_1 + I_2 & I_2 \\ I_2 & I_2 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

D(q) atalet matrisinin elemanları ,

$$\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1 \quad ; \quad \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta = \cos(\alpha - \beta)$$

trigonometrik bilgilerinden faydalanarak ; aşağıdaki gibi olmalıdır:

$$\begin{aligned} d_{11} &= m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos q_2) + I_1 + I_2 \\ d_{12} &= d_{21} = m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos q_2) + I_2 \\ d_{22} &= m_2 l_{c2}^2 + I_2 \end{aligned} \quad (3.41)$$

(3.42) 'de belirtilen Christoffel sembolleri kullanılarak sonuçları (3.43) 'te verilmiştir.

$$c_{ijk} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned}
c_{111} &= \frac{1}{2} \frac{\partial d_{11}}{\partial q_1} = 0 \\
c_{221} &= \frac{\partial d_{12}}{\partial q_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{22}}{\partial q_1} = h \\
c_{121} = c_{211} &= \frac{1}{2} \frac{\partial d_{11}}{\partial q_2} = -m_2 l_1 l_{c2} \text{Sin} q_2 = h
\end{aligned} \tag{3.43}$$

$$\begin{aligned}
c_{112} &= \frac{\partial d_{121}}{\partial q_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{11}}{\partial q_2} = -h \\
c_{122} = c_{212} &= \frac{1}{2} \frac{\partial d_{22}}{\partial q_1} = 0 \\
c_{222} &= \frac{1}{2} \frac{\partial d_{22}}{\partial q_2} = 0
\end{aligned}$$

Potansiyel enerji için de her iki uzuv için ayrı ayrı denklemler yazılarak q_1 ve q_2 'ye bağlı olarak türevleri alınmalıdır.

$$V_1 = m_1 \cdot g \cdot l_{c1} \cdot \text{Sin} q_1 \tag{3.44}$$

$$V_2 = m_2 \cdot g \cdot (l_1 \text{Sin} q_1 + l_{c2} \text{Sin}(q_1 + q_2)) \tag{3.45}$$

Lagrange-Euler Formulasyonunda toplam enerji önemli olduğundan ;

$$V = V_1 + V_2 = (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) \cdot g \cdot \text{Sin} q_1 + m_2 \cdot l_{c2} \cdot g \cdot \text{Sin}(q_1 + q_2) \tag{3.46}$$

yazılmalıdır.

$$\phi_1 = \frac{\partial V}{\partial q_1} = (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) \cdot g \cdot \text{Cos} q_1 + m_2 l_{c2} \cdot g \cdot \text{Cos}(q_1 + q_2) \tag{3.47}$$

$$\phi_2 = \frac{\partial V}{\partial q_2} = m_2 \cdot l_{c2} \cdot \text{Cos}(q_1 + q_2) \cdot g$$

Eşitlik (3.47) deki değerler kullanılarak (3.48) 'de dinamik denklemler elde edilir.

$$d_{11}\ddot{q}_1 + d_{12}\ddot{q}_2 + c_{121}\dot{q}_1\dot{q}_2 + c_{211}\dot{q}_2\dot{q}_1 + c_{221}\dot{q}_2^2 + \phi_1 = M_1 \quad (3.48)$$

$$d_{21}\ddot{q}_2 + d_{22}\ddot{q}_2 + c_{112}\dot{q}_1^2 + \phi_2 = M_2$$

Bu sebepten dolayı , C matrisi (3.49)'da verildiği gibidir.

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} h\dot{q}_2 & h\dot{q}_2 + h\dot{q}_1 \\ -h\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

3.3.1.Simulasyonu

Simulasyonu gerçekleştirebilmek için yukarıda elde edilen sonuçları matris biçiminde tekrar ele alınsın. Ancak burda kullanılan indisler aşağıda belirtildiği gibi olmalıdır:

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$c_{11} = (-m_2 l_1 l_{c2} \cdot \text{Sin}q_2) q_2$$

$$c_{12} = (-m_2 l_1 l_{c2} \cdot \text{Sin}q_2) (q_2 + q_1)$$

$$c_{21} = (m_2 l_1 l_{c2} \cdot \text{Sin}q_2) q_1$$

$$c_{22} = 0$$

d_{11} , d_{12} , d_{21} , d_{22} (3.41)'de belirtildiği gibidir.

ϕ_1 ve ϕ_2 (3.47) 'de belirtildiği gibidir.

*Açılar Şekil 3.2.'ye uygun olarak Tablo 2.2'deki veriler radyana çevrilerek alınmıştır.

*Robotun uzuvlarının kütlesi eşit alınmıştır. ($m_1 = m_2 = 0.1$ kg)

*Atalet momentleri $I_1 = I_2 = 50$ kgm²

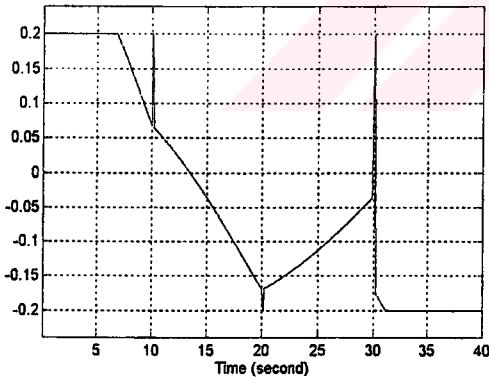
*Uzuvların uzunlukları ve merkeze olan uzunlukları eşit alınmıştır. ($l_1 = l_2 = 0.2$ m
 $l_{c1} = l_{c2} = 0.1$ m)

*Yerçekim ivmesi $g = 9.8$ m/sn² alınmıştır.

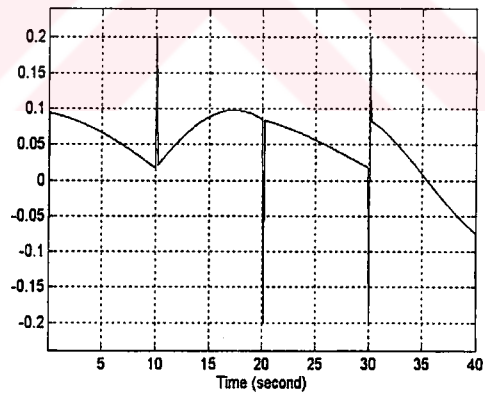
*Simulasyon sonuçları Şekil 3.3 'te gösterilmiştir.

Program EK-2 'de verildiği gibidir.

I. ve II. Uzva Uygulanacak Kuvvet ya da Moment



I. Uzuv



II. Uzuv

Şekil 3.3. I. ve II. Uzva Uygulanacak Kuvvet ya da Moment

BÖLÜM 4. ROBOT KOLUNUN KONTROLÜ

Robot kolunun kontrolünde , klasik yöntemlerin yanısıra geliştirilen yeni yöntemlerle de doğru sonuca ulaşılmaktadır. İstenen ve planlanmış yörüngeyi izlemesi robot kontrolünde en önemli unsurdur. Robotun verimli çalışması için doğru örnekleme ve yönlendirme yapılması gerekir. Klasik kontrol yönteminden kasıt ; bilinen PD, PID denetleçler ile yapılan kontrol yöntemleridir. Pekçok endüstriyel robotta, bilinen klasik kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Bu kontrolün çeşitli olumlu ve olumsuz yanları vardır. Örneğin PID ile kontrolde gerçekleştirme maliyeti düşüktür. Düşük hızda izleme yapabilir ve sabit girişe karşı sıfır hatalı çıkış verir. Buna karşın yüksek hızda izleme yapmaz ve değişken yerçekimi etkisi hesaba katılmaz. Benzer şekilde, PD kontrolde de; sabit girişe karşı sıfır hatalı çıkış okur ve yerçekimi etkisini hesaba katar. Olumsuz tarafı , değişken bir referans sinyali izleyemez. Klasik yöntemlerin yanısıra daha etkili algoritmalar da kullanılmaya başlamıştır. Bulanık mantık (fuzzy logic) ya da yapay sinir ağlarında belirtilen öğretim algoritmaları kullanılarak da kontrol yapılabilir. Bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının birlikte kullanıldığı neuro-fuzzy yöntemi de etkili kontrol yöntemidir. Robot kolunun kontrolünde robotun en az hatayla istenen yörüngeyi mümkün olduğunca izlemesini sağlayabilmek için robotun eylemsizlik , merkezkaç , coriolis , yerçekimi ve sürtünme gibi olumsuz faktörlerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu faktörlere verilen değer ölçüsünde yörüngeyi izlemekteki gecikme zamanının en aza inmesi sağlanmış olacaktır. Bir başka kontrol yöntemi de hesaplanmış moment kontrolüdür. Bu yöntem de yerçekimi etkisi, hız eşleşme momenti, eylemsizlik momenti , sürtünme kuvveti hesaba katılır. Bu metotta kol parametreleri açık ve kesin olarak bilindiğinde iyi tepki verir. Parametreler tahmini olduğundan hata ihtimali yüksektir. Ani referans sinyali değişimlerinden etkilendiğinden hızı düşüktür. Robot kol kontrolörlerinin performanslarının ölçülmesinde önemli olan kriterler , istenen yörüngeye verilen yanıt izleme duyarlılığı , cevap hızı , bozucu dış yükler , kullanılan matematiksel algoritma ve modelleme hatası olarak söylenebilir .

Robot kol kontrolü bir yörünge izleme problemi olarak düşünülebilir. (eşitlik (3.33) 'te ki denklem) n.serbestlik dereceli bir robot kolunun tam dinamik modeli , kapalı formda verilmiştir. Daha sonra iki serbestlik derecesine ait robot kolunun yörüngesine göre dinamik modelleme yapılmıştır. Bu bölümde , verilen yörüngeye göre manipulatörün klasik yöntemlerle kontrolü gerçekleştirilecektir [6,7]

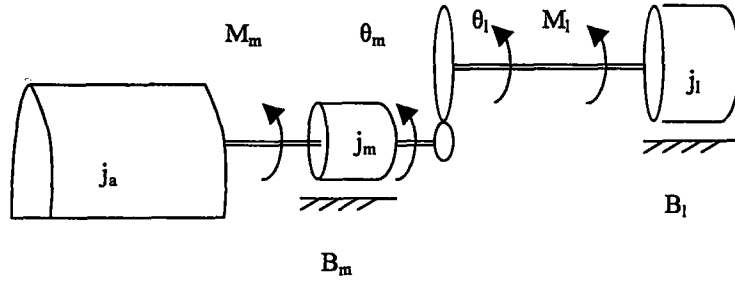
4.1. Eklemlerin Bağımsız Kontrolü

Robot kol dinamiğinin modellemede kullanılmasıyla , kontrol tasarımı eklem sayısı arttıkça zorlaşacaktır. Bu nedenle eklemlere ait yapılan dinamik modellemelerde bağımsız eklem kontrolü (Independent Joint Control) metodu dikkate alınır. Ancak yüksek hızlarda istenen sonuçlara ulaşamayacaktır. Eklemlerin yapılan dinamik modellemelerinde bağımsız ve lineer oldukları düşünülür. Dinamik denklemlerdeki zorluk , eklemlerin birbirlerine olan bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Düşük hızlarda ve dişli düzenekleri vasıtasıyla bu zorluğu azaltmak mümkündür. PID kontrolörlerinin dinamik modellerini kullanarak kontrol blok diyagramları oluşturulur. Yörünge kısıtlamaları yoksa kontrolör , robot kol ucunun istenen yörünge üzerinde tanımlanmış köşe noktalardan geçmesi gerekmektedir. Koordinatlardan yararlanarak robota , tanımlanmış bir noktadan diğerine konum kontrolü uygulanır. Pratik uygulamalarda herbir eklem için elektriksel, hidrolik ve pnömatik sürücülerden biri tercih edilir. Elektriksel sürücülerde de servo motor, adım (step) motor, sabit ya da serbest uyarmalı doğru akım motorları kullanılır.

4.2.Eklemin Kontrolü ve Modellenmesi

Robot kolunun her eklemi bağımsız düşünülerek PD konum kontrolü tasarımı yapılmıştır (Robotun doğrusal olmayan dinamiğini bozucu olarak kabul edilir)

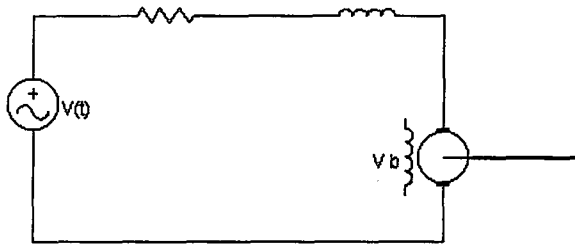
Robot kolunun katı cisim yapısına sahip olduğu düşünülerek , doğru akım motorunun dönüşüm oranı $1/n$ olan dişli takımı üzerinden eklemlerin birbirine bağlandıkları bilinmektedir. Şekil 4.1.'de doğru akım motoru ile dişliler arasında mevcut olan ilişki gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Eklemi Tahrik Eden DC Motor-Dişli Takımının Şematik Gösterimi

Aşağıda belirtilen denklemlere ilişkin kullanılan simgeler ; dizinde verilmiştir. B ; sürtünmeyi , M ; momenti , θ ; açısal yerdeğiştirmeyi , N ; dişli sayısını , j ; eylemsizlik momentini ifade etmektedir. m ve l indisleri ise , sırasıyla motor mili ve yük mili anlamındadır.

DC Motorunun elektriksel olarak gösterimi Şekil 4.2.'deki gibidir.



Şekil 4.2. DC Motorun Gösterimi

DC motorunun , matematiksel modellenmesi yapılabilmesi için aşağıdaki eşitliklerin bilinmesi gerekir:

$$M_m = K \cdot \phi \cdot i_a = K_m \cdot i_a \quad (4.1)$$

$$E = K_e \cdot \phi \cdot \omega_m = K_b \cdot \omega_m = K_b \cdot \frac{d\theta_m}{dt} \quad (4.2)$$

Motor milinde üretilen moment M_m , endüvi sargı uçlarında endüklenen gerilim E'dir. Motor milinde üretilen moment elektrik makinasının yapısal sabitiyle ve endüvi sargısından geçen akım ile orantılıdır. Endüvi sargısında endüklenen gerilim de devir sayısıyla doğru orantılıdır. Motor ile yükün dişlileri arasındaki oran ise (4.3) 'de belirtildiği gibidir.

$$n = \frac{r_m}{r_l} = \frac{N_m}{N_l} \leq 1 \quad (4.3)$$

Tahrik elemanı milindeki eşdeğer yük momenti (dişliler vasıtasıyla yüke iletilen) ve yük momenti aşağıda verilmiştir.

$$M_l' = F \cdot r_m \quad M_l = F \cdot r_l \quad (4.4)$$

Yük momentinin motor mili çapıyla ilgisi (4.5) 'de verilmiştir.

$$\frac{M_l'}{M_l} = \frac{r_m}{r_l} = n \quad \text{ve} \quad M_l' = n \cdot M_l \quad (4.5)$$

$\theta_m = 2\pi / N_m$ ve $\theta_l = 2\pi / N_l$ olduğuna göre ;

$$\frac{\theta_m}{\theta_l} = \frac{2 \cdot \pi / N_m}{2 \cdot \pi / N_l} \quad \Rightarrow \quad \theta_l = \frac{N_m}{N_l} \cdot \theta_m \quad (4.6)$$

$$\theta_l = n \cdot \theta_m$$

D'Alambert kanunu;

$$\sum \text{moment} = \sum (j.\theta) \text{ şeklindedir.}$$

Buna göre yük miline uygulanırsa , (4.7)'deki denklem elde edilir.

$$M_l - B_l.\dot{\theta}_l = j_l.\ddot{\theta}_l \quad (4.7)$$

Motor miline de uygulandığında ;

$$M_m - M_l' - B_m.\dot{\theta}_m = (j_a + j_m).\ddot{\theta}_m \quad (4.8)$$

olmalıdır. Eşitlik (4.6) 'daki yük ile motor mili arasındaki açısal yerdeğiştirmenin türevi alınarak eşitlik (4.7)'de yerine konulduğunda ;

$$M_l - B_l(n.\dot{\theta}_m) = j_l.(n.\ddot{\theta}_m) \quad (4.9)$$

$$M_l = n[B_l.\dot{\theta}_m + j_l.\ddot{\theta}_m]$$

elde edilir.

Eşitlik (4.5) 'teki yük momenti ile tahrik elemanı milindeki eşdeğer yük momenti arasındaki bağıntıdan yararlanarak ;

$$M_l' = n.[n(B_l.\dot{\theta}_m + j_l.\ddot{\theta}_m)] \quad (4.10)$$

$$M_l' = n^2.[B_l.\dot{\theta}_m + j_l.\ddot{\theta}_m]$$

yazılabilir.

Bu sonuç (4.8)'de konulduğunda ;

$$M_m - n^2[B_l \cdot \dot{\theta}_m + j_l \ddot{\theta}_m] - B_m \cdot \dot{\theta}_m = (j_a + j_m) \cdot \ddot{\theta}_m \quad (4.11)$$

$$M_m = (j_a + j_m + n^2 \cdot j_l) \cdot \ddot{\theta}_m + (B_m + n^2 \cdot B_l) \cdot \dot{\theta}_m \quad (4.12)$$

elde edilir. Bu ifadenin Laplace ' ı alınır ;

$$M_m(s) = [(j_a + j_m + n^2 \cdot j_l) \cdot s^2 + (B_m + n^2 \cdot B_l) \cdot s] \cdot \theta_m(s) \quad (4.13)$$

$$M_m(s) = [j_{et} \cdot s^2 + B_{et} \cdot s] \cdot \theta_m(s) \quad (4.14)$$

olmalıdır. j_{et} ; etkin eylemsizlik momenti , B_{et} ; etkin sürtünme katsayısıdır.

Yük momentinin 0 (sıfır) yani boşta çalışması durumunda ;

$M_m(s) = K_m \cdot i_a(s)$ olduğundan ;

$$i_a(s) = [j_{et} \cdot s^2 + B_{et} \cdot s] \cdot \frac{\theta_m(s)}{K_m} \quad (4.15)$$

şeklinde ifade edilebilir. Elektrik makinasının motor olarak çalışabilmesi için uygulanan gerilim , endüklenen gerilime göre daha büyüktür. Bundan dolayı

$$L \cdot \frac{di_a}{dt} + R \cdot i_a = V - E \quad (4.16)$$

yazılır. Uygulanan gerilim V'dir. Bu ifadenin Laplace ' ı alınır ;

$$(R + sL) \cdot i_a(s) = V(s) - K_b \cdot s \cdot \theta_m(s) \quad (4.17)$$

olmalıdır.

(4.15) (4.17) ' de yerine konulduğunda ;

$$(R + sL) \cdot [j_{et} \cdot s^2 + B_{et} \cdot s] \frac{\theta_m(s)}{K_m} + K_b \cdot s \cdot \theta_m(s) = V(s) \quad (4.18)$$

$$\theta_m(s) \left[(R + sL) \left\{ j_{et} \cdot s^2 + B_{et} \cdot s \right\} \cdot \frac{1}{K_m} + s \cdot K_b \right] = V(s)$$

$$\frac{\theta_m(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{(R + sL) [j_{et} \cdot s^2 + B_{et} \cdot s] + K_b \cdot K_m \cdot s} \quad (4.19)$$

$$\frac{\theta_m}{V}(s) = \frac{K_m}{R \cdot j_{et} \cdot s^2 + R \cdot B_{et} \cdot s + j_{et} \cdot L \cdot s^3 + B_{et} \cdot L \cdot s^2 + K_b \cdot K_m \cdot s} \quad (4.20)$$

$$\frac{\theta_m}{V}(s) = \frac{K_m}{s \cdot [K_b \cdot K_m + R \cdot B_{et} + s \cdot R \cdot j_{et} + sL \cdot B_{et} + s^2 L \cdot j_{et}]} \quad (4.21)$$

$$\frac{\theta_m}{V}(s) = \frac{K_m}{s \cdot [K_b \cdot K_m + (R + sL)(j_{et} \cdot s + B_{et})]} \quad (4.22)$$

sonucuna ulaşılır. Bulunan transfer fonksiyonunda yük momenti 0 (sıfır)'dır. Motor miline yük bağlandığı zaman ;

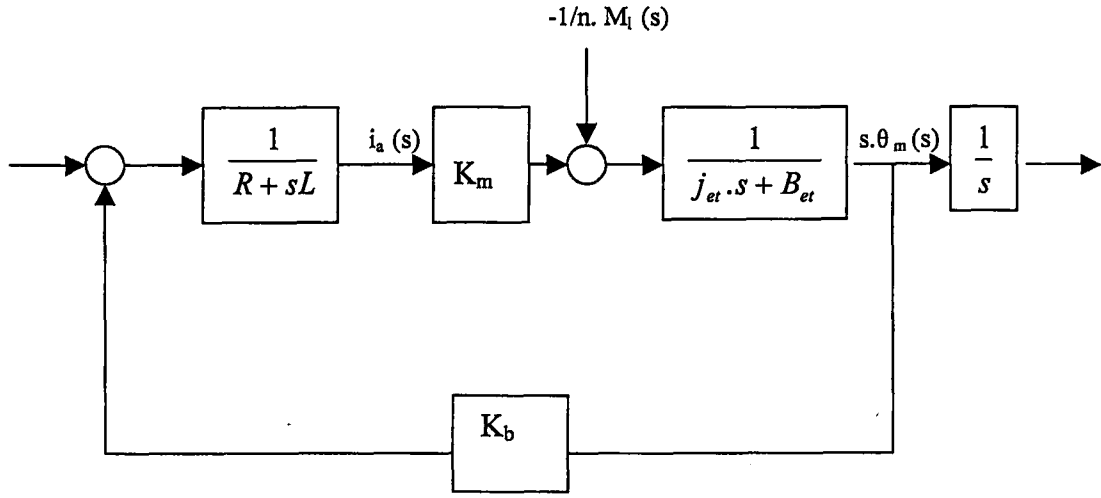
$$\frac{\theta_m}{M_l}(s) = \frac{-1 / n(R + sL)}{s \cdot [K_b \cdot K_m + (R + sL)(j_{et} \cdot s + B_{et})]} \quad (4.23)$$

$$(j_{et} \cdot s^2 + B_{et} \cdot s) \cdot \theta_m(s) = \frac{K_m [V(s) - K_b \cdot s \cdot \theta_m(s)]}{sL + R} - \frac{1}{n \cdot M_l(s)} \quad (4.24)$$

şeklinde ifade edilir.

$$s \cdot \theta_m(s) = \frac{1}{j_{et} \cdot s + B_{et}} \left[\frac{1}{R + sL} \cdot K_m (V(s) - K_b \cdot s \cdot \theta_m(s)) - \frac{1}{n} \cdot M_l \right] \quad (4.25)$$

Buna göre elde edilen matematiksel modelin blok digramı Şekil 4.3'te verildiği gibidir.



Şekil 4.3. Doğru Akım Motoru Blok Diagramı

L / R :Elektriksel zaman sabitidir.

J_{et} / B_{et} :Mekaniksel zaman sabitidir.

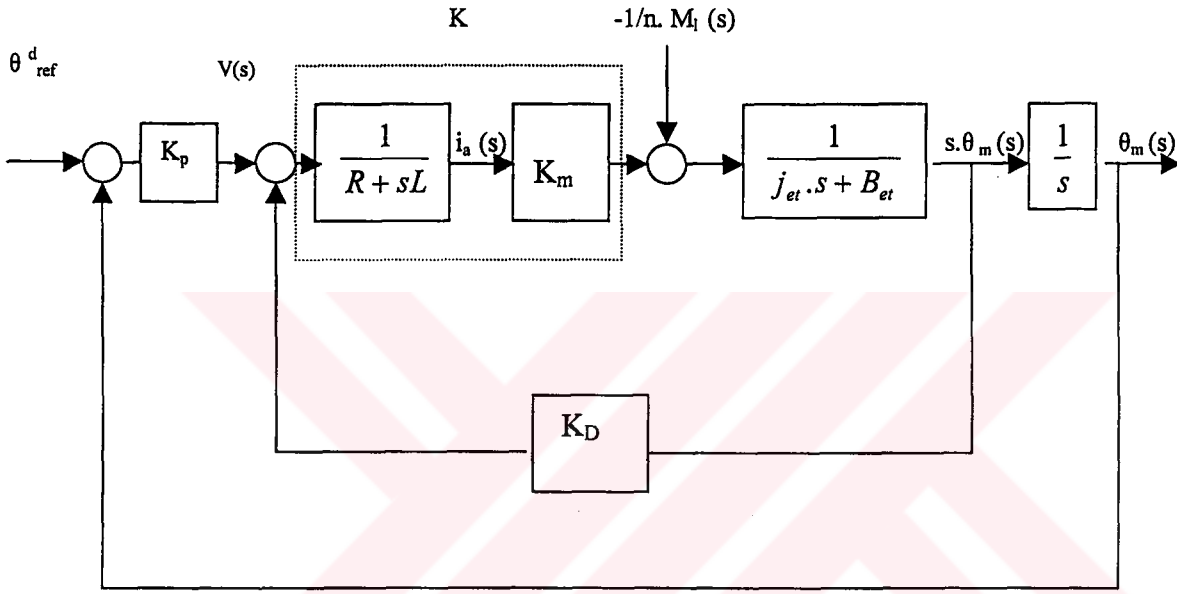
L / R 'nin çok küçük olması durumunda θ_m ile V arasındaki transfer fonksiyonu eşitlik (4.26) 'daki gibidir.

$$\frac{\theta_m(s)}{V} = \frac{K_m / R}{s \cdot [j_{et} \cdot s + B_{et} + K_b \cdot K_m / R]} \quad (4.26)$$

Motor miline gelen yük momenti dişli oranı kadar azalacaktır. Bozucunun büyümesi sistemi olumsuz yönde etkilediğinden bağımsız eklem kontrolü düşük hızlarda daha iyi sonuç verecektir.

4.3. Robotlarda PD Kontrol (Oran-Türev)

Şekil 4.3.'de verilen DC motor blok diagramını PD kontrolör ile denetlemek mümkündür ve Şekil 4.4'te verilmiştir. PD oransal-türev anlamına gelip sistemin daha kısa sürede istenilen değere ulaşmasını sağlar.



Şekil 4.4. PD Kontrollü Doğru Akım Motoru Blok Diagramı

$$K = \frac{K_m}{R + sL}$$

şeklinde kısaltma yapılarak (4.25) 'teki denklemini aşağıdaki gibi göstermek mümkündür.

$$s.\theta_m(s) = \frac{1}{s.j_{et} + B_{et}} \left[K.V(s) - s.K.K_D.\theta_m(s) - \frac{M_l}{n} \right] \quad (4.27)$$

$$\theta_m(s) \cdot (s^2 \cdot j_{et} + s \cdot B_{et}) = K \cdot V(s) - s \cdot K \cdot K_D \cdot \theta_m(s) - \frac{1}{n} \cdot M_l \quad (4.28)$$

$$\theta_m(s) \cdot [s^2 \cdot j_{et} + s \cdot (B_{et} + K \cdot K_D)] = K \cdot V(s) - \frac{1}{n} \cdot M_l \quad (4.29)$$

$$\theta_m(s) = \frac{K \cdot V(s) - \frac{1}{n} \cdot M_l}{s^2 \cdot j_{et} + s \cdot (B_{et} + K \cdot K_D)} \quad (4.30)$$

Şekil 4.4'teki blok diagramından ;

$$V(s) = K_p \cdot [\theta^d_{ref} - \theta_m(s)] \quad (4.31)$$

olduğuna göre ;

$$V(s) = K_p \cdot \theta^d_{ref} - K_p \cdot \frac{\left[K \cdot V(s) - \frac{1}{n} \cdot M_l \right]}{s^2 \cdot j_{et} + s \cdot (B_{et} + K \cdot K_D)} \quad (4.32)$$

$$V(s) = K_p \cdot \theta^d_{ref} - \frac{\left[K_p K \cdot V(s) - \frac{1}{n} \cdot M_l \cdot K_p \right]}{s^2 \cdot j_{et} + s \cdot (B_{et} + K \cdot K_D)} \quad (4.33)$$

$$V(s) \cdot [s^2 \cdot j_{et} + s \cdot (B_{et} + K \cdot K_D)] = K_p \cdot \theta^d_{ref} \cdot [s^2 \cdot j_{et} + s \cdot (B_{et} + K \cdot K_D)] - K \cdot K_p \cdot V(s) + \frac{1}{n} M_l \cdot K_p \quad (4.34)$$

$$V(s) \cdot [s^2 \cdot j_{et} + s \cdot (B_{et} + K \cdot K_D) + K \cdot K_D] = K_p \cdot \theta^d_{ref} \cdot [s^2 \cdot j_{et} + s \cdot (B_{et} + K \cdot K_D)] + \frac{1}{n} M_l \cdot K_p \quad (4.35)$$

$$V(s) = \frac{\left\{ K_p \cdot \theta^d_{ref} \cdot [s^2 \cdot j_{et} + s \cdot (B_{et} + K \cdot K_D)] + \frac{1}{n} \cdot M_l \cdot K_p \right\}}{s^2 + s \cdot \frac{(B_{et} + K \cdot K_D)}{j_{et}} + \frac{K \cdot K_p}{j_{et}}} \cdot j_{et} \quad (4.36)$$

şeklindedir.

Kapalı kontrol sisteminin çıkışı ile girişi arasında (4.37) 'deki gibi bir ilişki vardır.

$$\frac{C}{R}(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n \cdot s + w_n^2} \quad (4.37)$$

ξ ; Sönüm oranı , w_n ; sönümsüz doğal frekanstır.

$$2\xi w_n = \frac{B_{et} + K \cdot K_D}{j_{et}} \quad w_n^2 = \frac{K \cdot K_p}{j_{et}} \quad (4.38)$$

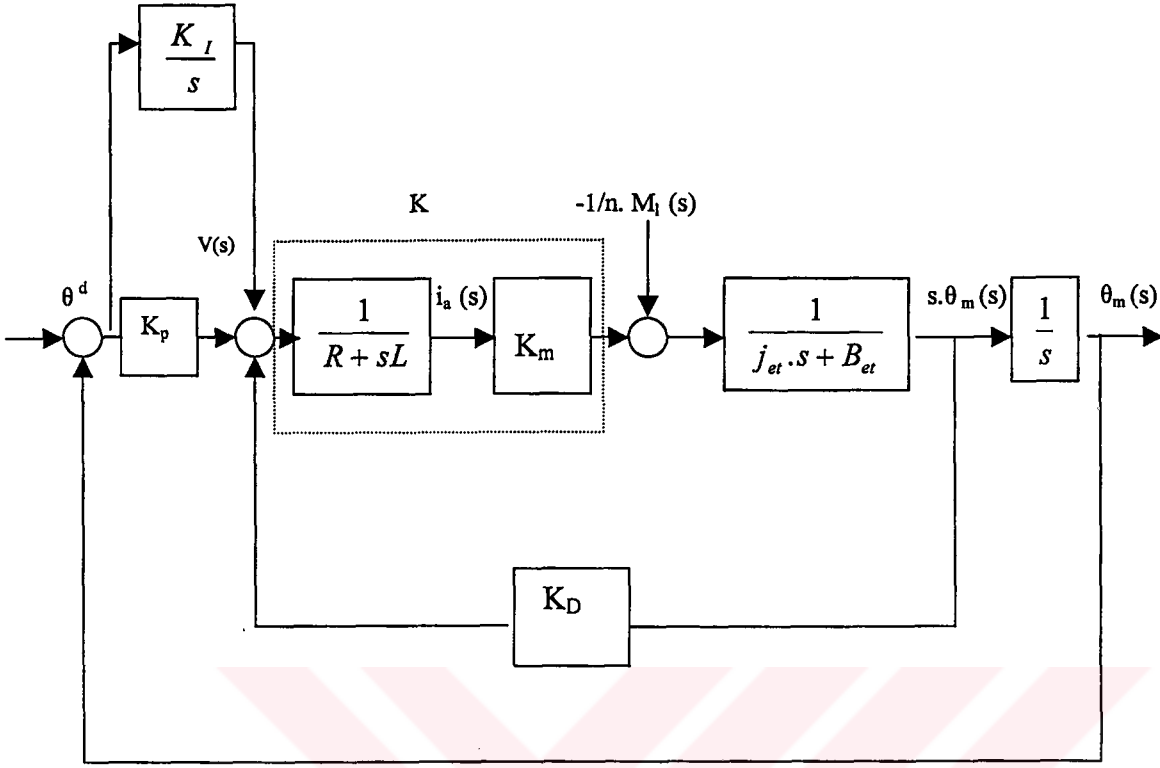
denklemleri çözüldüğünde ;

$$K_D = \frac{2\xi w_n \cdot j_{et} - B_{et}}{K} \quad K_p = \frac{w_n^2 \cdot j_{et}}{K} \quad (4.39)$$

elde edilir.

4.4. Robotlarda PID Kontrol (Oran-Türev-İntegral)

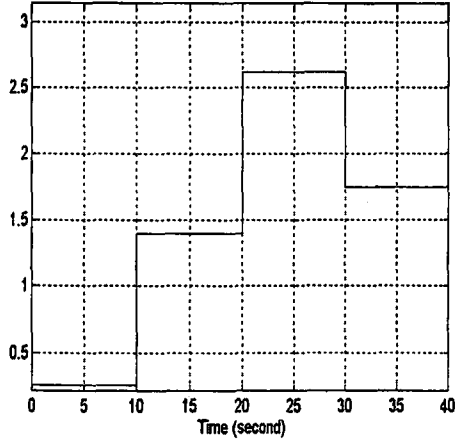
DC motor blok diagramını PID kontrolör ile de denetlemek mümkündür ve Şekil 4.5'te verilmiştir. PID oransal-türev anlamına gelip sistemin daha kısa sürede istenilen değere ulaşmasını sağlar.



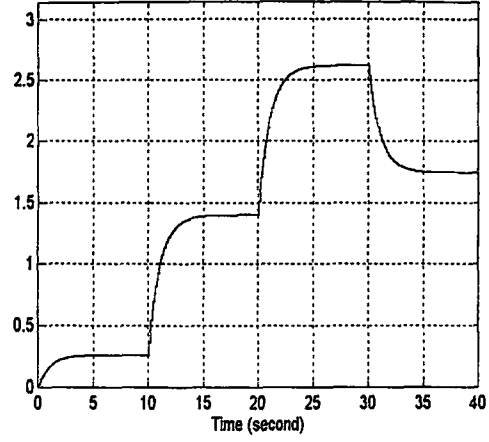
Şekil 4.5. PID Kontrollü Doğru Akım Motoru Blok Diagramı

PD ve PID kontrolörler için Matlab-Simulink'te yapılan programlar EK-3'te verildiği gibidir. Yapılan simülasyonlarda PD kontrolörünün PID 'ye göre daha az salınımda referans açısına oturduğu gözlemlenmiştir. Kazanç arttırıldıkça sistem daha kısa sürede oturacaktır. Ancak kazancın aşırı artması durumunda sistem osilasyon yapacaktır.

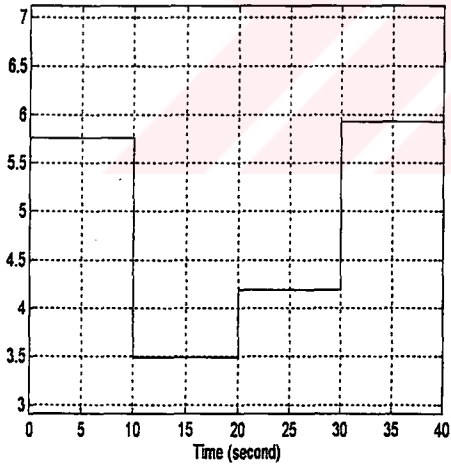
**I. UZVUN SET EDİLEN AÇI DEĞERİ
(Radyan)**



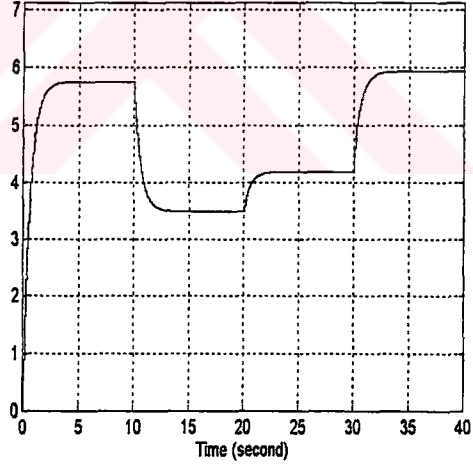
KONTROLÖRÜN YANITI



**II. UZVUN SET EDİLEN AÇI DEĞERİ
(Radyan)**

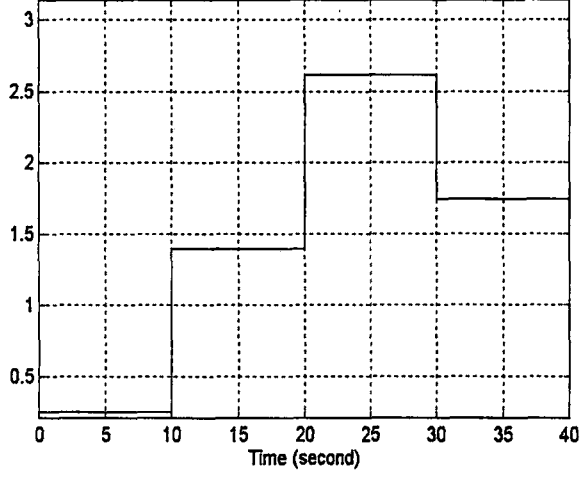


KONTROLÖRÜN YANITI

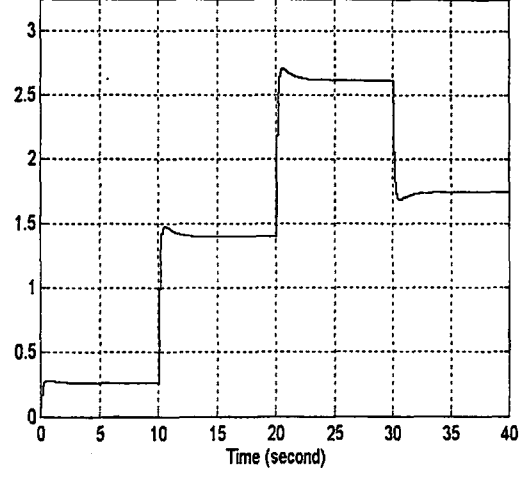


Şekil 4.6. PD Kontrolör ile I. ve II. Uzva Ait Simulasyon Sonuçları

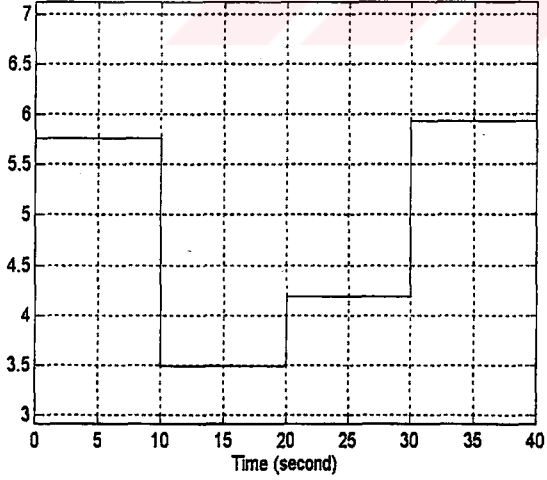
I. UZVUN SET EDİLEN AÇI DEĞERİ
(Radyan)



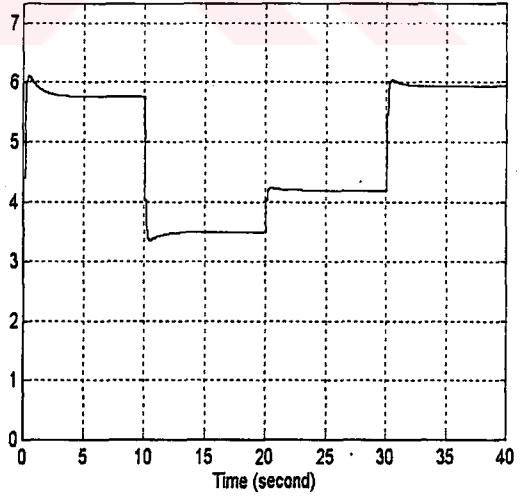
KONTROLÖRÜN YANITI



II. UZVUN SET EDİLEN AÇI DEĞERİ
(Radyan)



KONTROLÖRÜN YANITI



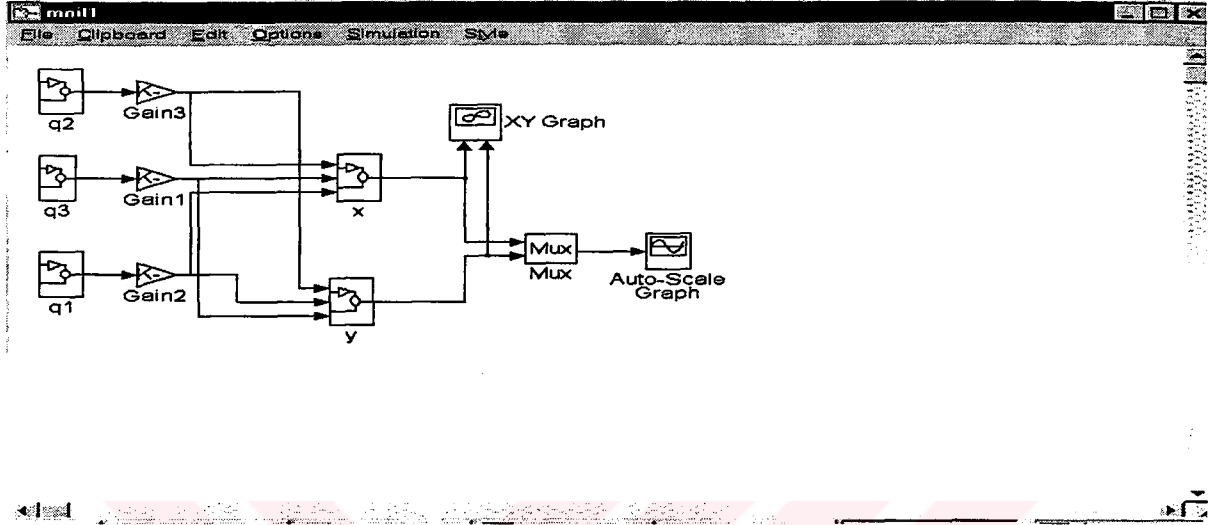
Şekil 4.7. PID Kontrolör ile I. ve II. Uzva Ait Simulasyon Sonuçları

SONUÇ ve ÖNERİLER

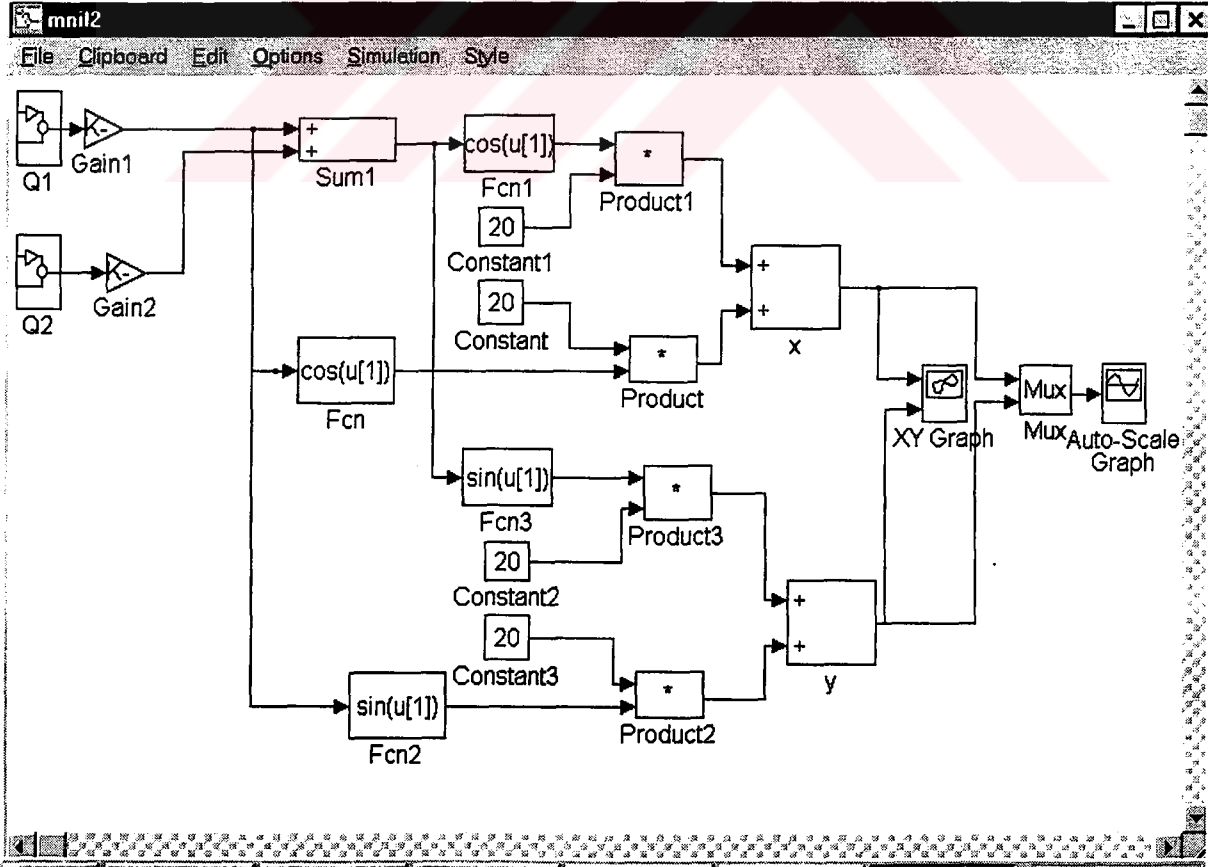
İki serbest dereceli robot kolunun düz kinematik denlemlerinin simülasyonları gerçekleştirildi. Şekil 2.4.'te tanımlanan hareket eksenine göre herbir uzva uygulanması gereken kuvvet ya da momentin modellenmesi yapılarak simülasyonları yapıldı. Bu simülasyon sayesinde verilerin daha fazla değiştirilerek her durum için uygulanması gereken kuvvet ya da momentin uygun olup olmadığı görülebilir. Herbir uzvun kontrolü PD ve PID kontrolörler yardımıyla gerçekleştirildi. Set edilen açı değerlerine, PD kontrolör ile daha geç ulaşılmıştır. Simülasyonda ; türev ve oran kazanç değerleri değiştirilerek gözlemlenen sonuçlar olması gereken değerlerdeydi. (Örneğin K_p kazancın aşırı artırıldığında osilasyon görülmüştür)

PID kontrolör ile sistemin daha çabuk set edilen değerlere ulaşılmıştır. Ancak PD'ye göre dalgalanmanın daha fazla olduğu da görülmüştür. Her iki kontrol yönteminde de bozucu etkenlerin daha fazla olması gerekir. Bu sayede sistemin gerçekte de bu kadar iyi bir sonuç verip veremeyeceği daha iyi anlaşılacaktır. Ayrıca diğer kontrol yöntemleriyle de nasıl sonuçlar elde edilebildiği görülmelidir. Böylece en doğru kontrol yöntemiyle pratik çalışma gerçekleştirilebilir.

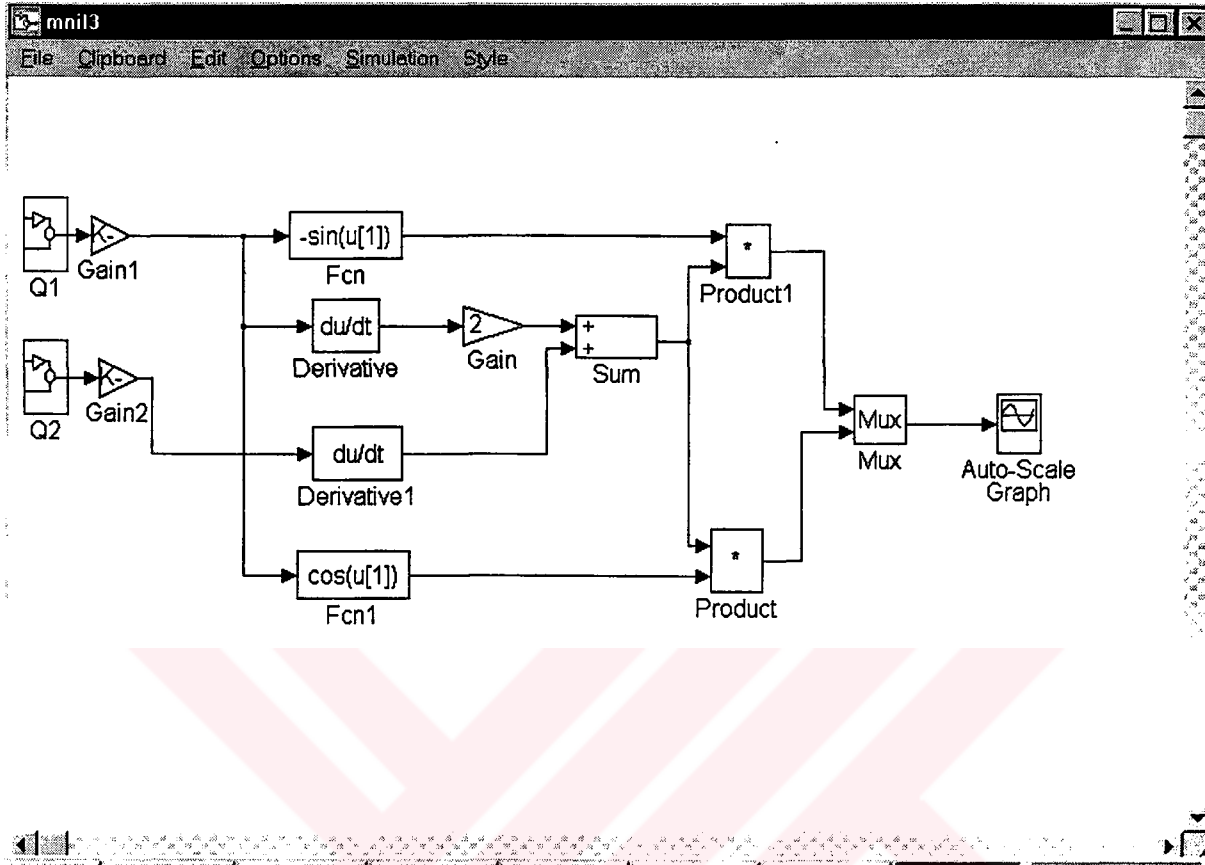
Şekil 2.2. ' de Üç Uzuvlu Robotun Açık ve Zaman Kriterlerine Göre Konumu ve Hareketi İçin Yapılan Program



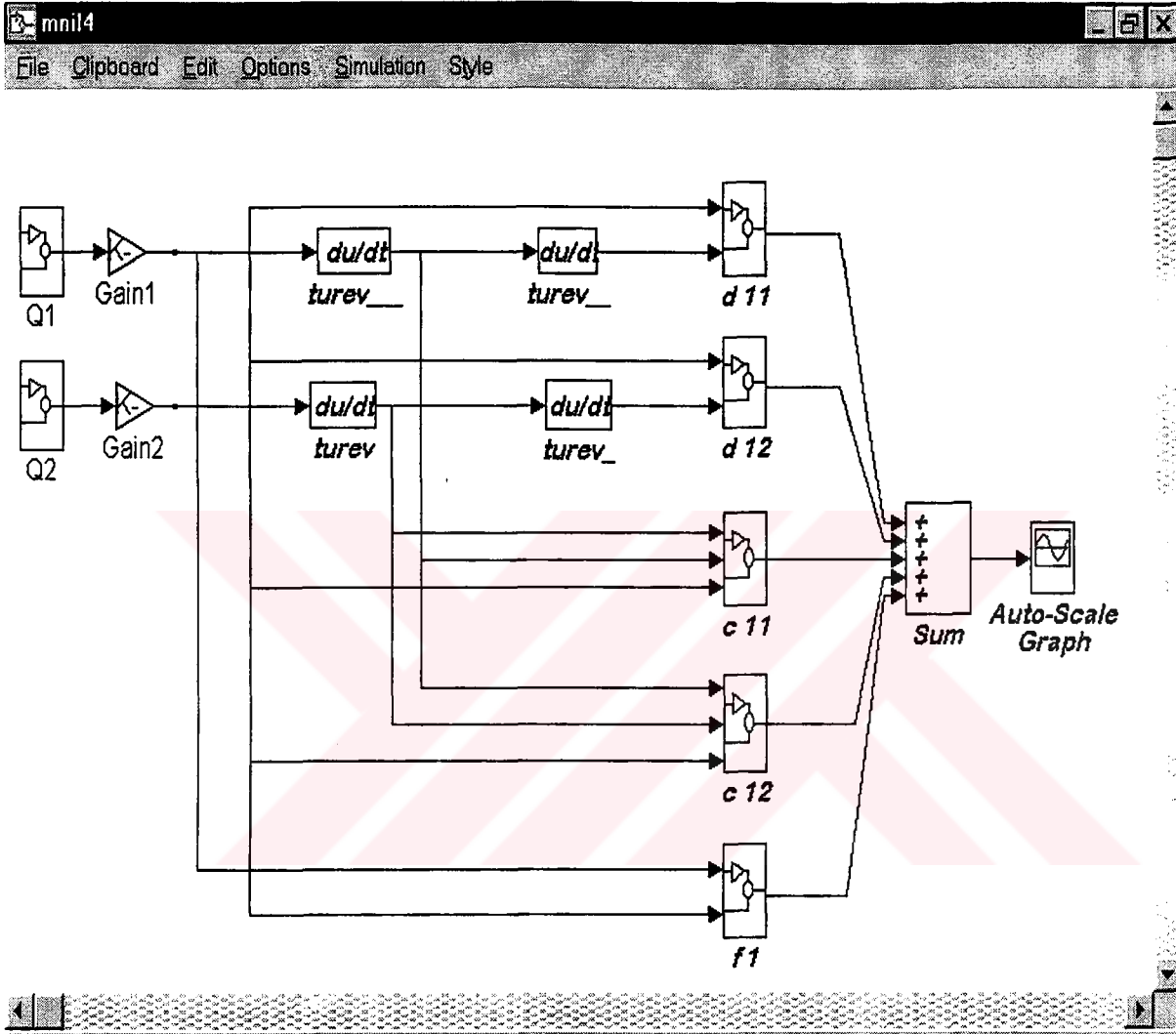
Şekil 2.6. 'da θ_1 ve θ_2 İçin Manipulatrörün Konumu ve Hareketi İçin Yapılan Program



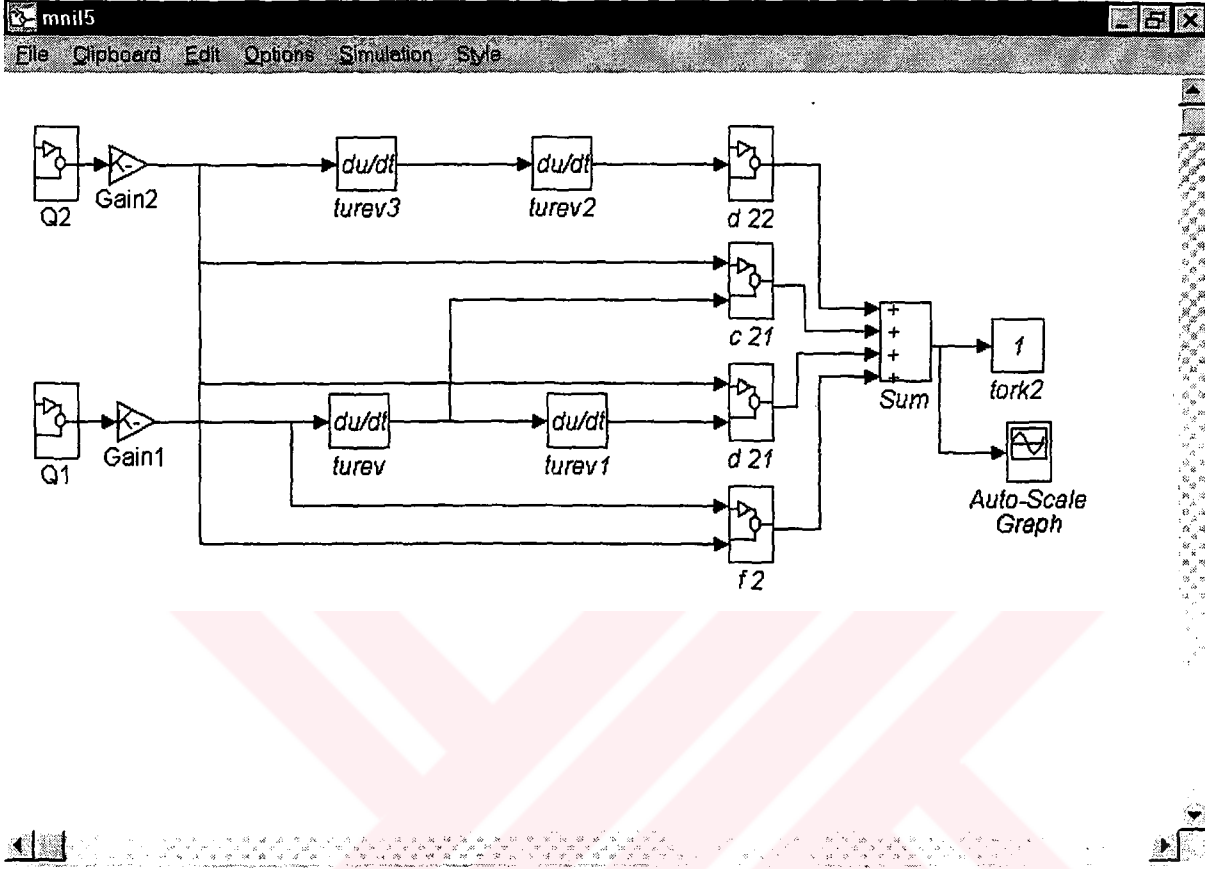
Şekil2.6. 'da θ_1 ve θ_2 için Manipulatörün Uç Noktadaki Hızı İçin Yapılan Program



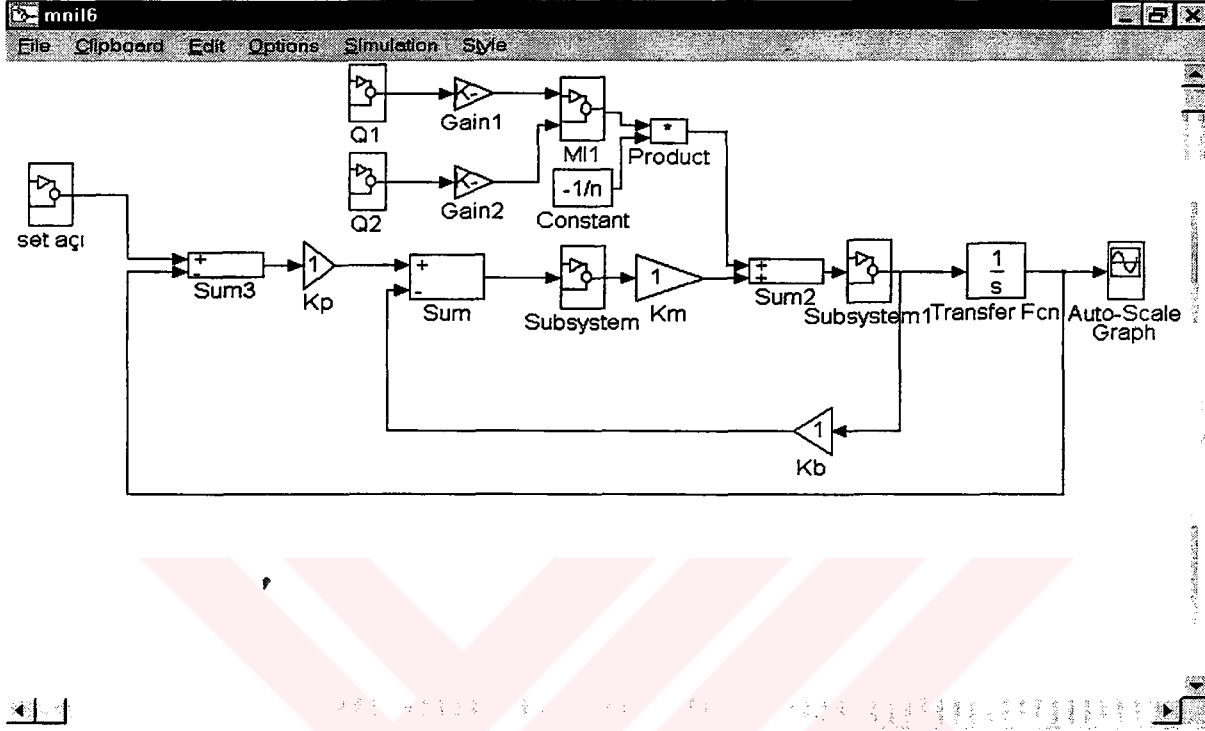
Şekil 3.3.'te I. Uzva Uygulanacak Kuvvet ya da Moment İçin Yapılan Program



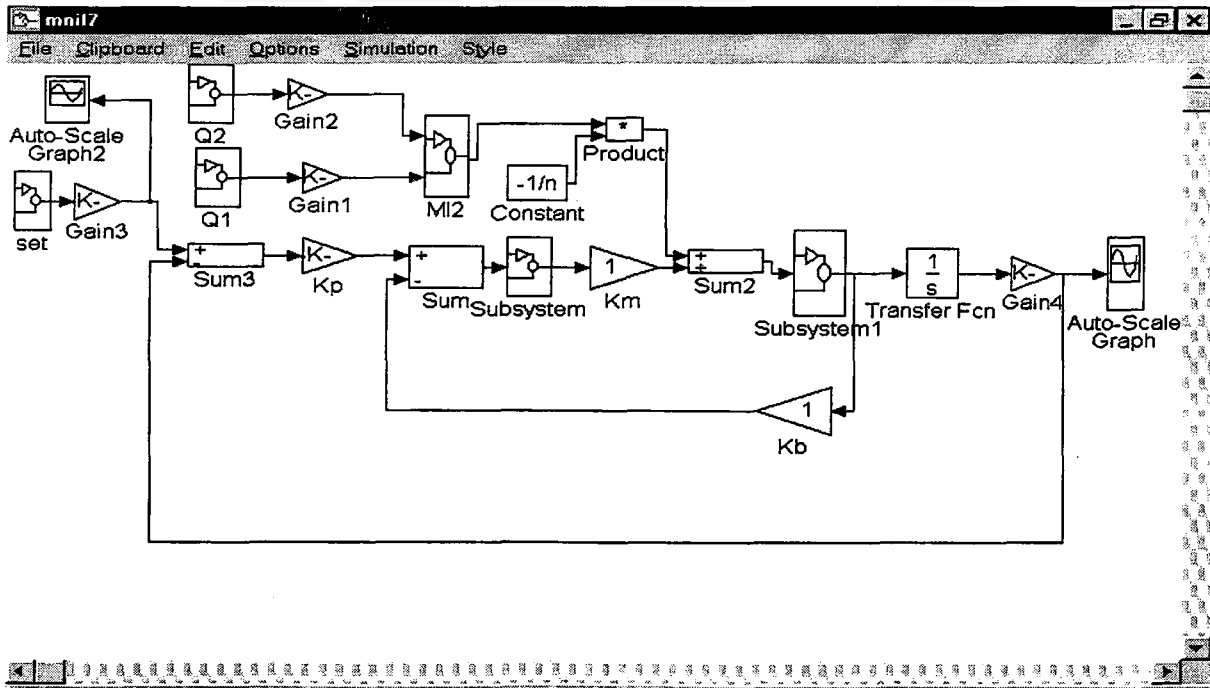
Şekil 3.3.'te II. Uzva Uygulanacak Kuvvet ya da Moment İçin Yapılan Program



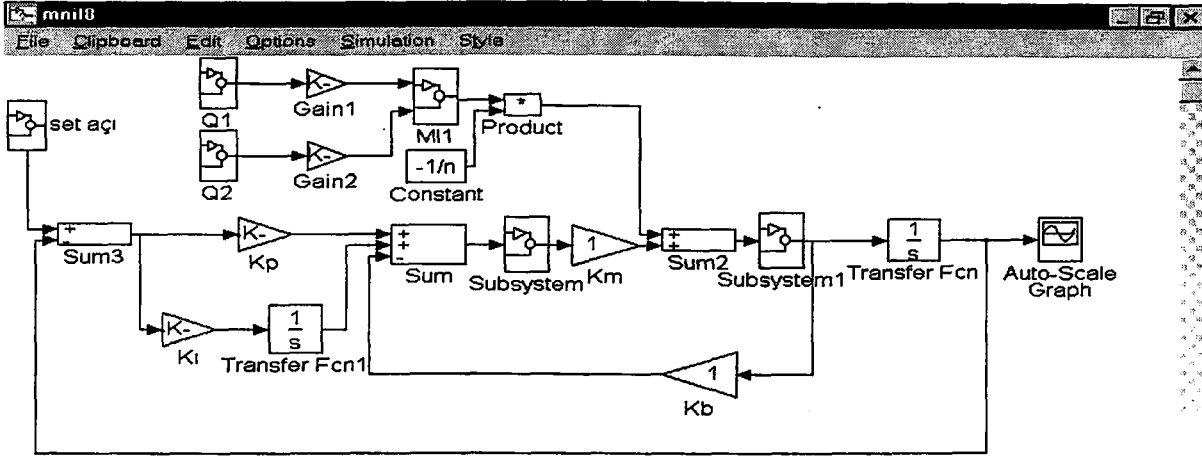
Şekil 4.6. 'da PD Kontrolör ile I. Uzva Ait Yapılan Program



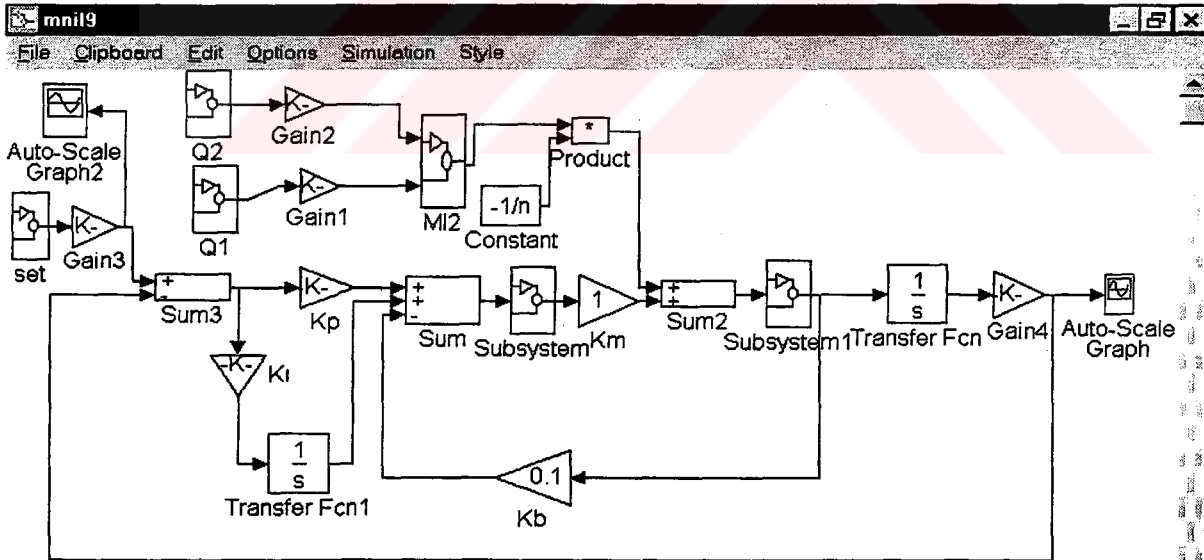
Şekil 4.6. 'da PD Kontrolör ile II. Uzva Ait Yapılan Program



Şekil 4.7. 'de PID Kontrolör ile I. Uzva Ait Yapılan Program



Şekil 4.7. 'de PID Kontrolör ile II. Uzva Ait Yapılan Program



T.C. YÜKSEKÖĞRETİM BAKANLIĞI
DOKÜMAN TAŞIYICI

KAYNAKLAR

1. SPONG , M. and VIDYASAGAR M., 1989, Robot Dynamics and Control , John Wiley & Sons , New York
2. ASADA , H. and SLOTINE J.E., 1986, Robot Analysis and Control , John Wiley & Sons , New York
3. SELIG , J.M. , 1992 , Introductory Robotics , Prentice Hall , New York
4. CAVALLO , A. , SETOLA , R. and VASCA F. , 1996 , Using Matlab , Simulink and Control System Toolbox , Prentice Hall , London
5. FU , K.S. , GONZALEZ , R.C. and LEE C.S.G. , 1987 , Robotics : Control , Sensing , Vision and Intelligence , McGraw – Hill Book Company , New York
6. YOO , D.S. , CHUNG M.J. and BIEN Z. , Real Time Implementation and Evaluation of Dynamic Control Algorithms for Industrial Manipulators , IEEE Trans. on Industrial Electronics , Vol.38 , No.1 , February 1991 ,26-31
7. MILLS , J.K. , Dynamics of Robotic Manipulators with Wrist –Mounted Force – Torque Sensor A Singular Perturbation Approach , IEEE Trans. on Robotics and Automation , Vol.7 , No.6 , December 1991 , 870-875
8. BAŞBUĞ , R.M., Bulanık Adaptif Kayan Kipli Robot Kontrolü , Doktora Tezi , Nisan 1995
9. PALAZ , H. , Robot Kollarının Geleneksel ve Dinamik Kontrolü , Y.Lisans Tezi , Eylül 1991
10. SPONG , M. , On the Robust Control of Robot Manipulators , IEEE Trans.on Automatic Control , Vol.37 , No.11 , November 1992 , 1782-1786

ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında İzmir 'de doğdu. İlk , orta ve lise eğitimini İzmir ' de tamamladı. 1996 yılında Fırat Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun olduktan sonra , İES – SAMSUNG (İzmir Elektronik Sanayi AŞ) 'ta Üretim Mühendisliği Bölümünde çalıştı. Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Bölümünde yüksek lisans programına başladıktan sonra Fen Bilimleri Enstitüsünde göreve başladı. Elektrik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.



T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON BÜYÜKLERİ