

9870.

BİR VE İKİ SERBESTLİK DERECELİ
ROBOT MANİPULATÖRLERDE
KUVVET KONTROLÜ

Hürvet SARIKAYA

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü'ne
Makina Anabilim Dalında Yüksek Lisans
Tezi Olarak Sunulmuştur

HAZİRAN - 1990

9870.

BİR VE İKİ SERBESTLİK DERECELİ
ROBOT MANİPULATÖRLERDE KUVVET KONTROLU

Hürvet SARIKAYA

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü'ne
Makina Anabilim Dalında Yüksek Lisans
Tezi olarak sunulmuştur

HAZİRAN - 1990

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makina Anabilim Dalında Yüksek Lisans
Tezi olarak kabul edilmiştir. 12/ 6/1990

Başkan : Doç. Dr. Bekir Sami YILBAŞ Bel. İ. 4

Üye : Doç. Dr. İbrahim UZMAY Bel. İ. 7

Üye : Doç. Dr. Ali ERİŞEN Bel. İ. 10

ONAY :

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu
onaylarım.

/ /1990

Doç. Dr. B. Sami YILBAŞ
Bel. İ. Enstitü Müdürü

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hürvet SARIKAYA
Baba Adı : Durdu
Ana Adı : Rahime
Doğum Yeri ve Yılı : Paşalı - Pınarbaşı/KAYSERİ - 1964

Aslen Kayseri ili Pınarbaşı ilçesi Paşalı köyünden olup, 1964 yılında Kayseri'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kayseri'de tamamladı. 1983 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Bölümünden 1987 yılında mezun oldu. Bir yıl serbest mühendis olarak çalıştı. Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesine 1988 yılında Araştırma Görevlisi olarak girdi ve halen bu görevdedir.

TEŞEKKÜR

Bu konuda çalışma imkanı tanıyan, çalışmalarım süresince beni büyük bir ilgi ve alaka ile karşılayıp, kıymetli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç.Dr.İbrahim UZMAY Bey'e en içten şükranlarımı sunarım.

Ayrıca çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan Makina Bölümü Öğretim elemanlarına ve tezin yazımında yardımlarını esirgemeyen abim Suat SARIKAYA'yada teşekkürlerimi sunarım.

Hürvet SARIKAYA

Ö Z E T

Bu çalışmada, tek ve iki serbestlik dereceli robot manipulatörlerde kuvvet kontrol teorisi ve bu teoriye göre robot manipulatörlerin temas halinde olduğu cisim veya ortama uyguladığı f_e kuvveti, model ve servo kontrol parametrelerine bağlı olarak tayin edilmeye çalışılmıştır. Robot elin çevreye uyguladığı f_e kuvveti ile referans değer f_d kuvveti arasındaki kuvvet hata fonksiyonunun tanımlanmış hareket süresince değişimi incelenmiştir.

Model ve gerçek sistem parametreleri arasındaki farklılık ve değerleri tam olarak bilinmeyen diğer bozucu etkiler dışında kuvvet hata fonksiyonunu minimum değerlere götüren kontrol parametreleri belirlenmiştir.

S U M M A R Y

In this study, for the robot manipulator having one and two degree of freedom, force control theory and, taking into consideration this theory, the force the robot manipulator applied to the object or the environment (f_e), which is in contact with the robot, have been tried to determine with respect to the parameters of the model and the servo control. The changing of the function of the force error between the force applied (f_e) and the desired force (f_d) has been investigated during the period of the described motion.

With the exception of the difference between the model and the real system's parameters, and the other disturbances which is not known exactly, the optimum control parameters making the function of the force error to be minimum have been defined.

S E M B O L L E R

- { C } Görev veya işi tanımlayan eksen takımı
 e_f Kuvvet hatası
 \mathcal{F} Kuvvet moment vektörü
 f_e Robot manipulatörün temas halinde olduğu cisim veya ortama uyguladığı gerçek kuvvet değeri
 f_d Robot manipulatörün temas halinde olduğu cisim veya ortama uygulaması istenen referans kuvvet değeri
 $G(\theta)$ (nx1) boyutlu ağırlık matrisi
 $J(\theta)$ Robot manipulatör Jacobian matrisi
- k_e Yay sabiti
 k_{pf} Kontrol pozisyon kazancı
 k_{vf} Kontrol hız kazancı
 K_{px} Robot elin kartezyen bölgedeki istenilen rijitliği
 l Robot kol uzunluğu
 m Robot manipulatörün kütlesi
 $M(\theta)$ (nxn) boyutunda manipulatörün kütle matrisi
 S, S' Robot kolun kartezyen bölgesinde kuvvet - pozisyon matrisi
 v Robot el hız bileşenleri
 $V(\theta, \dot{\theta})$ (nx1) boyutlu Coriolis ve merkezkaç kuvvet matrisi
 α Efektif kuvvet geri besleme kazancı
 $\theta(t)$ Robot manipulatör mafsalsal açısı
 $\dot{\theta}(t)$ Robot manipulatör mafsalsal hızı
 $\ddot{\theta}(t)$ Robot manipulatör mafsalsal ivmesi
 τ (nx1) boyutlu robot kol mafsallarına uygulanması gereken moment matrisi
 f_{dist} Robot manipulatörde meydana gelen bozucu kuvvet değeri

İ Ç İ N D E K İ L E R

Sayfa

BÖLÜM-I

GİRİŞ	1
1.1. KONUNUN ÖNEMİ	1
1.2. ÇALIŞMANIN AMACI	2

BÖLÜM-II

ROBOT MANİPULATÖRLERDE KUVVET KONTROL TEORİSİ	3
2.1. GİRİŞ	3
2.2. KISMEN SINIRLI GÖREVLER İÇİN KONTROL EKSEN TAKIMI	4
2.3. KARMA POZİSYON/KUVVET KONTROLU	6
2.4. TEK KÜTLELİ SİSTEMİN KUVVET KONTROLU	7
2.5. POZİSYON/KUVVET KARMA KONTROL SİSTEMLERİ	9
2.5.1. {C} Koordinatlı Kartezyen Manipulatör	9
2.5.2. Genel Manipulatör	11
2.5.3. Değişken Rijitliğin Eklenmesi	12
2.6. KULLANILAN ENDÜSTRİYEL ROBOT KONTROL SİSTEMLERİ	14
2.6.1. Giriş	14
2.6.2. Pasif Esneklik (Uyumluluk)	14
2.6.3. Pozisyon Kazançlarını Yumuşatma Esnekliği	14
2.6.4. Kuvvet Ölçümü	16

BÖLÜM-III

BİR VE İKİ SERBESTLİK DERECELİ ROBOT MANİPULATÖRLERDE KUVVET KONTROLU	17
3.1. TEK SERBESTLİK DERECELİ ROBOT MANİPULATÖR	17
3.1.1. Fiziksel Model	17
3.2. İKİ SERBESTLİK DERECELİ ROBOT MANİPULATÖRDE KUVVET KONTROLU	23
3.2.1. Giriş	23
3.2.2. Robot Manipulatörde Mafsal Açılarının Tayini	23
3.2.3. Robot Kol Mafsal Momentleri	32
3.2.4. Kuvvet Kontrol Modeli	35

BÖLÜM-IV

SONUÇLAR VE İRDELEME	42
4.1. TEK KÜTLELİ SİSTEMDE KUVVET KONTROL PARAMETRELERİ	42
4.2. İKİ SERBESTLİK DERECELİ ROBOT MANİPULATÖRÜN KUVVET KONTROL SONUÇLARI	44
4.3. İRDELEME	48
KAYNAKLAR	49
EK-1	50
EK-2	51
EK-3	52



B Ö L Ü M - I

G İ R İ Ő

1.1. KONUNUN ÖNEMİ

Bilgisayar teknolojisindeki geliŐmeler ve kullanımın yaygınlaŐması ile endüstride de gerek dizayn kademesinde gerekse üretim planlaması ve gerçekleştirilmesinde hassasiyet ve verimlilik yükselmiş dolaylı ve dolaysız girdiler azalmıştır. Endüstriyel otomasyon olarak tanımlanan bu gelişmenin temel elemanlarından birisi de, insan tarafından gerçekleştirilen bir çok işi istenilen hassasiyette, daha kısa bir zamanda ve emniyetle gerçekleştiren robot manipulatörlerdir. Özellikle, insan sağlığı bakımından zararlı çalışma ortamlarında da yararlanılabilen, geniş programlama kapasitesi ile belirlenmiş işleri yapabilen kol mekanizmaları robot manipulatör olarak tanımlanabilir.

Endüstriyel robotlar ilk olarak 1960'lı yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. İlk robotlar değişik amaçlar için programlanabilir üniversal transfer makinaları şeklinde ortaya çıkmıştır. Robot ve bilgisayar teknolojilerinin gelişimi robotların esnekliğinin artmasına neden olmuştur. Genel olarak bir endüstriyel robot, pozisyon ve kuvvet kontrollu bir mekanizmadır.

Uygulamada, gerçekleştirilecek için özelliğine göre belirli bir koordinata ulaşmak amacıyla pozisyon ve yörünge kontrolunun yanısıra, robot el ile temas halinde olacağı cisim veya ortam arasındaki temas kuvvetinin de kontrolu birlikte veya ayrı ayrı gerekli olabilir. Bu nedenle, robot manipulatörlerde kontrol özellikle endüstriyel amaçlı kullanımda büyük öneme sahiptir.

1.2. ÇALIşMANIN AMACI

Bu çalışmada tek ve iki serbestlik derecesine sahip robot manipulatörlerde belli sınırlamalar altında robot elin uygulaması istenen kuvveti, lineer bir geri besleme kontrol kuralına bağlı olarak değerlendiren oran-tı kontrol yöntemi verilmeye çalışılacaktır. Kontrol olayı, nonlinear robot dinamik denklemlerine uygun boyut ve özellikte lineer bir sistem için tasarlanmıştır. Elde edilen lineer sistem ıkışları, nonlinear dinamik model ve lineer sistemin parametrelerinden yararlanılarak tasarlanan nonlinear bir dönüştürme işlemi ile düzeltme kuvveti olarak robot manipulatöre verilmektedir. Ancak, robot manipulatörün uyguladığı kuvvet ile referans kuvvet arasında teorik model ile gerçek sistem parametreleri arasındaki fark ve çeşitli bozucu tesirler nedeniyle sapmalar meydana gelir. Kuvvet hatası olarak tanımlanan bu sapmaları ortadan kaldırmak veya azaltmak amacıyla kontrol mekanizması için optimum parametrelerin tayinine çalışılacaktır.

B Ö L Ü M - II

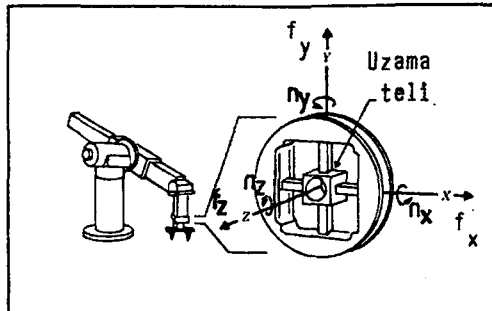
ROBOT MANİPULATÖRLERDE KUVVET KONTROL TEORİSİ

2.1. GİRİŞ

Kuvvet kontrolü, pozisyon kontrolünü tamamlayıcı bir olaydır ve genellikle pozisyon/kuvvet karma kontrolü şeklinde ele alınır. Kuvvet kontrolünde, kuvvetlerin ölçülmesi amacıyla kullanılan sensörler, manipulatörlerde aşağıdaki üç noktada kullanılırlar [1] ;

- 1) Mafsal tahrik noktalarında,
- 2) Robot el ile manipulatörün son mafsalı arasında (buna bilek sensörü denir),
- 3) Robot elin parmaklarında.

Bilek - kuvvet sensörünün çok yaygın kullanımına ait sistemin iç yapısı Şekil-2.1'de görülmektedir.

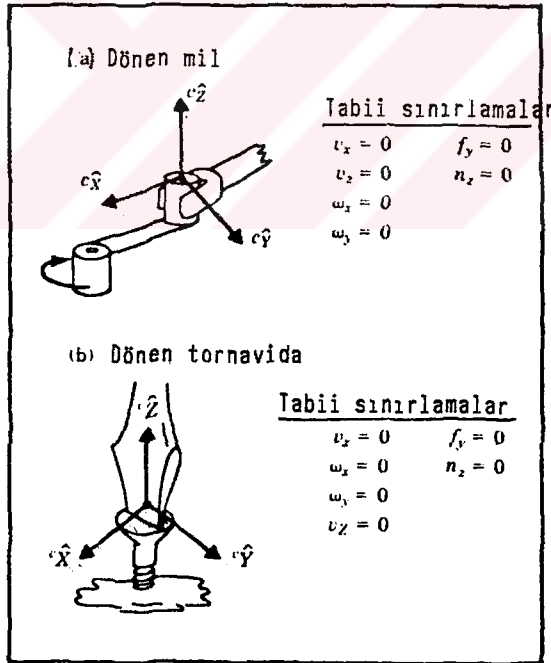


Şekil-2.1 : Bir bilek-kuvvet sensörü iç yapısı [4] .

2.2. KISMEN SINIRLI GÖREVLER İÇİN KONTROL EKSEN TAKIMI

Çeşitli iş veya görevlerin özel mekanik ve geometrik karakteristiklerinden dolayı tabii sınırlar olarak tanımlanan bazı sınır şartlar karşımıza çıkabilir. Mesela, bir elin rijit bir yüzeye temasta olması halinde elin yüzeye doğru herhangi bir hareket imkanı yoktur. Böylece doğal bir pozisyonu sınırlayıcı bir durum ortaya çıkar. Şayet yüzey sürtünmesiz ise el yüzeye teğet doğrultuda herhangi bir kuvvet uygulayamaz (sadece normal doğrultuda kuvvet uygular). Böylece doğal kuvvet sınırlaması ortaya çıkar [2] .

Genel olarak her bir yan iş veya görev için yüzeye normal doğrultu boyunca pozisyon sınırlaması ve teğet doğrultu boyunca ise kuvvet sınırlaması şartları altında genelleştirilmiş yüzey tanımlanabilir [3] . Şekil-2.2, söz konusu tabii sınırlara göre iki görevi veya işi göstermektedir.



Şekil-2.2.: İki değişik amaç için genel sınırlama [4] .

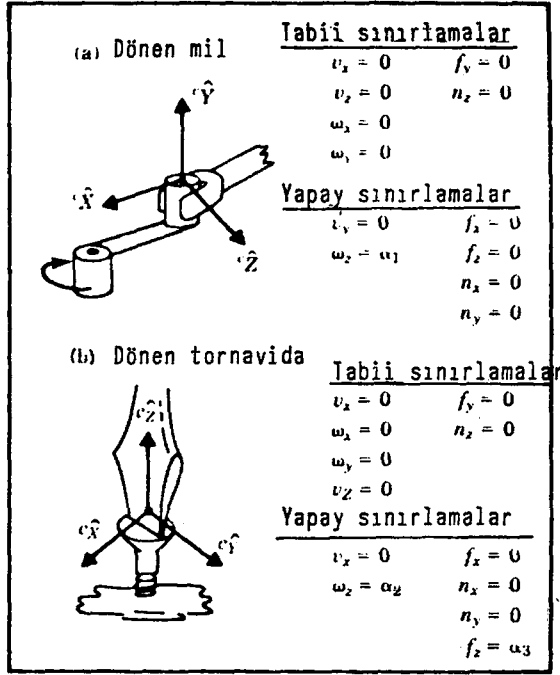
Her bir durumda görev veya iş { C } eksen takımının terimleri şeklinde tanımlanmıştır. İşe göre, {C} robot elle birlikte hareket edebilir veya

çevrede sabitleştirilebilir. Şekil-2.2 a'da eksen takımı kranka tesbit edilmiştir ve krank mili eksenine doğru yönelmiş x doğrultulu krankla hareket eder.

Şekil-2.2 b'de ise eksen takımı tornavidanın ucuna tesbit edilmiş olup yapılan işe uygun olarak hareket eder. y doğrultusunda vidanın hareketine uygun olarak kuvvet sıfır olacaktır. Bu örneklerdeki sınırlayıcı şartlar tüm iş süresince sürekli olacaktır. Şekil-2.2'de $\{C\}$ eksen takımında tanımlı robot el hız bileşenleri için (v) verilen değerlerle pozisyon sınırları tanımlanmıştır. Pozisyon sınırları genel olarak hızlardan çok pozisyon için verilen ifadelerle tanımlanmıştır. Çoğu hallerde hızı sıfırlayan sınır olarak bir pozisyon sınırını tanımlamak daha basittir. Benzer şekilde kuvvet sınırları kuvvet - moment vektörü (F) elemanlarına değerler vermek suretiyle tanımlanır. Bu F vektörü $\{C\}$ eksen takımında tanımlanan robot ele tesir eden kuvvet ve momentleri gösterir. Pozisyon sınırları dediğimizde kuvvet ve/veya yönlenme sınırları, kuvvet sınırlamaları denildiğinde ise kuvvet ve/veya moment sınırları anlaşılmalıdır. Tabii sınır terimi, bu sınırların veya sınırlamaların doğal olarak özel temas halinden meydana geldiğini belirtmek için kullanılır. Bu sınırlamalara ek olarak istenilen hareketleri veya kuvvet uygulamasını tanımlayan doğal sınırlarla uyum içinde olan suni sınırlamalar tanımlanır. Bu sınırlar veya sınırlamalar genelleştirilmiş sınır yüzeyinin teğeti veya normal boyunca meydana gelir. Tabii sınırlardan farklı olarak yapay kuvvet sınırları yüzey normalleri doğrultusunda tanımlanır ve yapay pozisyon sınırları ise teğet doğrultusundadır [4] .

Şekil-2.3'de iki görev veya iş için doğal ve yapay sınırları göstermektedir. $\{C\}$ deki özel bir serbestlik derecesi için bir doğal pozisyon sınırlamasının verilmesi halinde bir yapay kuvvet sınırlaması tanımlanmalıdır. Bunun akside geçerlidir.

Bu bölümde manipülatör kontrolünü sağlayan bir montaj stratejisinin planlayıcı tarafından tayin edildiğini ve tabii sınırlamaları tayin etmek amacıyla bir görevin analiz edildiğini kabul edeceğiz. Burada temas yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetleri genellikle ihmal edilir. Genellikle



Şekil-2.3 : İki değişik amaç için genel ve özel sınırlama [4] .

kayma sürtünme kuvvetleri pozisyon kontrollu doğrultularda etkiyor ve bu kuvvetler pozisyon servosuna bozucular olarak görülüyor.

2.3. KARMA POZİSYON/KUVVET KONTROLU

Şekil-2.4, iki temas şeklini göstermektedir. Şekil-2.4 a'da manipulatör uzayda serbest hareket etmektedir. Bu durumda tabii sınırlamalar tüm kuvvet sınırlamalarıdır, herhangi bir reaksiyon olmadığı için tüm kuvvetler sıfır olmaktadır. Altı serbestlik dereceli bir kol için konum açısından altı serbestlik derecesi vardır. Fakat herhangi bir doğrultuda kuvvet uygulayamayız. Şekil-2.4 b'de robot elin duvarla temasta olduğu bir durum görülmektedir. Burada manipulatör, pozisyon değişiminin mümkün olması nedeniyle altı tabii pozisyon sınırlamasına maruz kalır. Buna karşılık manipulatör altı serbestlik dereceli cisme kuvvet ve moment uygulama serbestliğine sahiptir [4] .

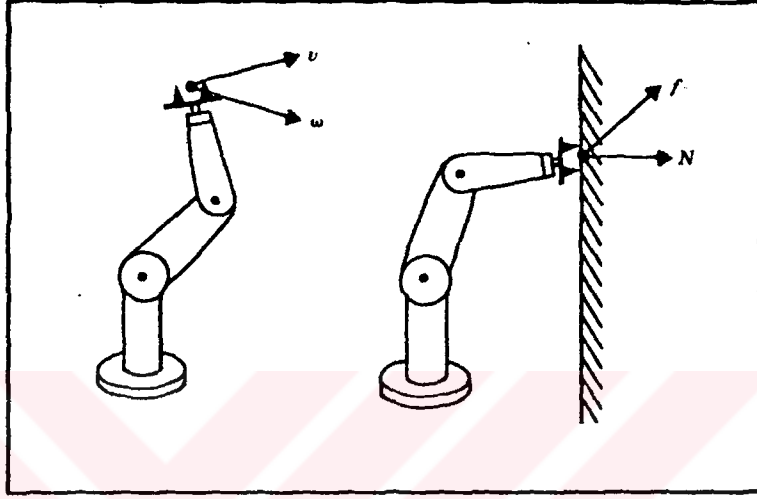
Bu bölümde aşağıdaki karma pozisyon/kuvvet kontrolleri ele alınacaktır. Bu kontroller aşağıdaki üç problemi çözmelidir.

1) Tabii kuvvet sınırlamalarının meydana geldiği doğrultular boyunca

manipulatörün pozisyon kontrolü,

2) Tabii pozisyon sınırlamalarının meydana geldiği doğrultu boyunca manipulatörün kuvvet kontrolü,

3) Herhangi bir {C} eksen takımının ortogonal serbestlik derecelerine uygun olarak kuvvet/pozisyon karışımının kullanılması.



Şekil-2.4 : Temas hallerine ait iki değişik sınır. Soldaki manipulatör yüzeyde hiç bir reaksiyonun olmadığı boşlukta hareket etmektedir. Sağdaki manipulatör serbest hareketin mümkün olmaması amacıyla duvarla temas halindedir [4] .

2.4. TEK KÜTLELİ SİSTEMİN KUVVET KONTROLU

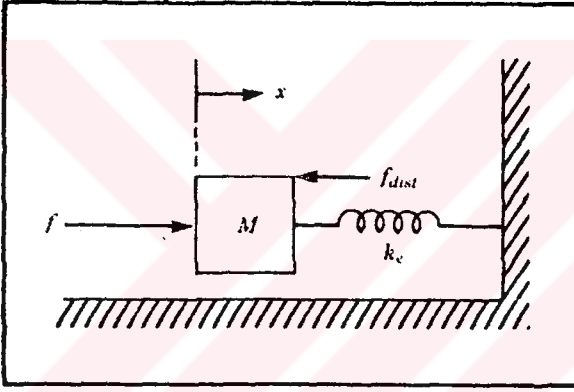
Tek bir kütlenin kontrolü problemini esas alarak manipulatör kontrolünü, n adet birbirinden bağımsız kütlenin kontrolüne (n mafsallı bir manipulatör için) eşdeğer kabul edebiliriz. Benzer tarzda kuvvet kontrolüne, bir serbestlik dereceli basit bir sisteme kuvvet uygulanması hali şeklinde bakabiliriz. Temas kuvvetlerini dikkate aldığımızda, tesir ettiğimiz bazı çevre modellerini gerçekleştirmeliyiz. Kontrol edilen cisimle çevre arasında çok basit bir etkileşme modeli kurulacaktır. Çevre ile teması bir yay olarak modelleyeceğiz, yani sistemimizi rijit kabul ederek çevrenin k_e yay sabitine sahip olduğu kabul edilecektir [5] . Şekil-2.5'deki gibi bir yaya tesbit edilmiş kütlenin kontrolü incelenmeye

çalışılacaktır. Ayrıca manipulator dişlilerindeki temas veya bilinmeyen sürtünme faktörlerini göstermek üzere, f_{dist} bilinmeyen bozucu kuvvetinin de sisteme dahil edilmesi gerekmektedir. Kontrol etmek istediğimiz değişken çevreye tesir eden f_e kuvvetidir. Bu kuvvet yayda meydana gelen reaksiyon kuvvetidir.

$$f_e = k_e \cdot x \quad (2.1)$$

Fiziksel sistemi tanımlayan denklem ise,

$$f = m \ddot{x} + k_e x + f_{dist} \quad (2.2)$$



Şekil-2.5 : Kütle - yay sistemi [4] .

f_e kuvvetini denklem (2.2)'de kontrol edilecek değişken cinsinden yazacak olursak,

$$x = k_e^{-1} \cdot f_e$$

$$\ddot{x} = k_e^{-1} \cdot \ddot{f}_e$$

$$f = m k_e^{-1} \ddot{f}_e + f_e + f_{dist} \quad (2.3)$$

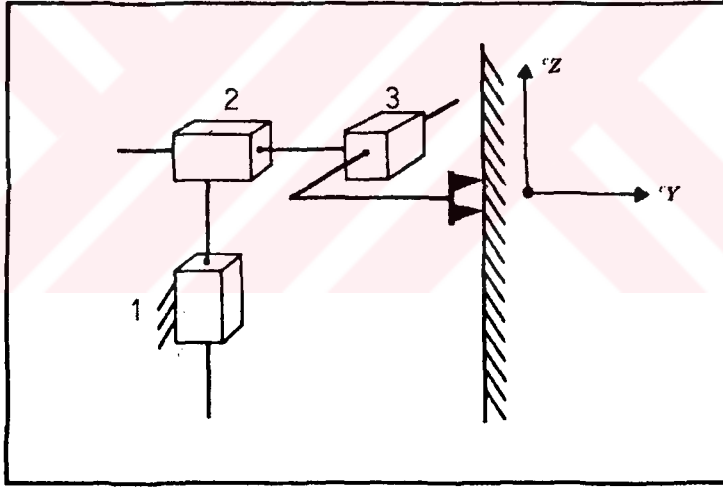
denklemini elde edilir. (2.3) denklemini sistemde kontrol edilmesi gereken

kuvvet değeridir.

2.5. POZİSYON/KUVVET KARMA KONTROL SİSTEMLERİ

2.5.1. { C } Koordinatlı Kartezyen Manipulatör

İlk olarak \hat{X} , \hat{Y} ve \hat{Z} doğrultularında etki eden (hareket eden) üç serbestlik dereceli bir manipulatörün basit hali ele alınacaktır. Basitleştirme amacıyla her bir uzvun m kütesine sahip olduğu ve yataklarda sürtünmesiz kaymanın olduğu kabul edilecektir. Ayrıca mafsal kuvvetlerini { C } eksen takımının eksenlerine göre gerçekleştiği kabul edilecektir. Robot el ${}^C\hat{Y}$ doğrultusundaki normalle yönlenmiş k_e rijitliğine sahip bir yüzeye temas halindedir. Böylece bu doğrultuda kuvvet kontrolü, ${}^C\hat{X}$, ve ${}^C\hat{Z}$ doğrultularında ise pozisyon kontrolü gereklidir.

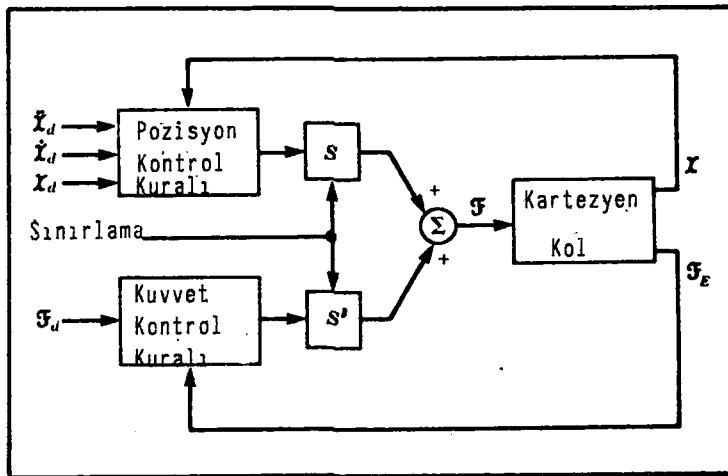


Şekil-2.6 : Üç serbestlik dereceli bir kartezyen manipulatörün bir yüzeye teması [4].

Bu durumda karma pozisyon/kuvvet kontrolü probleminin çözümü belirlidir. 1 ve 3 nolu mafsallara pozisyon kontrolünün uygulanması gerekir. Mafsal 2 ise (${}^C\hat{Y}$ doğrultusunda hareket eden) 2.3. bölümünde açıklanan kuvvet kontrolü ile kontrol edilmelidir.

Normali \hat{C}^X veya \hat{C}^Z doğrultularında da olan sınırlayıcı yüzeyin özelliğini değiştirebilirsek kartezyen kol kontrol sistemini aşağıdaki gibi biraz daha genelleştirebiliriz. Hem tüm pozisyon yörüngesini hem de kuvvet yörüngesini üç serbestlik derecesinde tanımlayabilecek şekilde bir kontrol yapısı kurulacaktır. Şüphesiz herhangi bir anda bu altı sınırlamayı belirlemek amacıyla kontrolü gerçekleştiremeyiz. Fakat verilen herhangi bir anda yörüngeleri izlenecek elemanları tayin eden bir usul veya yöntem geliştirilecektir. Şekil-2.7'de görülen kontrolü dikkate alan burada pozisyon ve kuvvet kontrolünü gösteren tek bir diyagramda basit kartezyen kolun her üç mafsalsının kontrolü gösterilmektedir.

S ve S' matrisleri kartezyen kolun her bir mafsalsını kontrol etmek için kullanılan pozisyon veya kuvvet kontrol tarzını belirlemek amacıyla tanımlanır. S matrisi köşeğindeki elemanları 1 ve 0 olan köşeğen matrisdir. 1 olduğu zaman S matrisi, 0 olduğu zaman S' matrisidir ve pozisyon kontrolü geçerlidir. S matrisindekiler 0 ve S' matrisindekiler 1 olduğu zaman kuvvet kontrolü geçerlidir. Böylece S ve S' matrisleri { C } kartezyenindeki her bir serbestlik derecesinin kontrol şeklini belirler. S matrislerine uygun olarak genellikle kontrol edilen üç bileşenli yörünge vardır. Ayrıca pozisyon ve kuvvet kontrolü arasındaki bağıl karışım rastgeledir. İstenilen yörüngenin diğer üç elemanı ve birleşik servo hatalar ihmal edilir. Böylece kuvvet kontrolü altındaki belirli serbestlik derecesi halinde, serbestlik derecesindeki pozisyon hataları ihmal edilir.



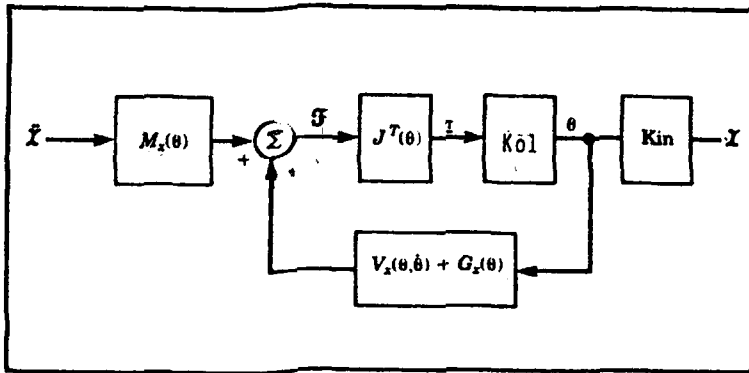
Şekil-2.7 : 3 serbestlik dereceli kartezyen kolu için karma kontrol [4] .

Şekil-2.7, mafsalların sınırlayıcı eksen takımı ile $\{C\}$ tanımlı olması hali için karma kontrolü gösterir. Aşağıdaki alt bölümde herhangi bir $\{C\}$ için ve genel bir manipulatör ile çalışmada kontrolü genelleştirmek amacıyla önceki bölümlerde açıklanan teknikler kullanılacaktır. Bununla birlikte, ideal halde manipulatör, $\{C\}$ deki her bir serbestlik derecesi ile (bağıntılı) sınırlı bir tahrik mekanizmasına sahipmiş gibi sistem çalışacaktır.

2.5.2. Genel Manipulatör

Bir genel manipulatörün kullanılabilceği, Şekil-2.7'de görülen genelleştirilmiş karma kontrol kartezyen esaslı kontrol kavramı kullanılıyor. Ana fikir kartezyen alanında yazılan dinamik bir modelin tam kullanılmasıdır. Gerçek manipulatör ve hesaplanmış modelin birleşik sistemi bağımsız bir birim kütle sistemi olarak görülecek şekilde kontrol etmek mümkündür.

Şekil-2.8 ; bağımsız birim kütle sistemi şeklinde kabul edilen manipulatör dinamiğinin kartezyen bölgedeki formülasyonuna dayalı dengelenmesini gösterir. Karma kontrol için kullanılmasında kartezyen dinamiği ve Jacobian $\{C\}$ eksen takımında yazılır. Benzer şekilde kinematikide bu sınırlayıcı eksen takımlarına göre hesaplanır. Sınırlayıcı eksen takımına göre bir kartezyen manipulatör için karma kontrolün dizayn edilmesi nedeniyle ve kartezyen ayrışma sistemi aynı giriş - çıkış özelliklerine sahip bir sistem sağladığı için, genelleştirilmiş pozisyon/kuvvet karma kontrolünü oluşturabilmek için bu ikisini birleştirmek ihtiyacını duyarız [7] .



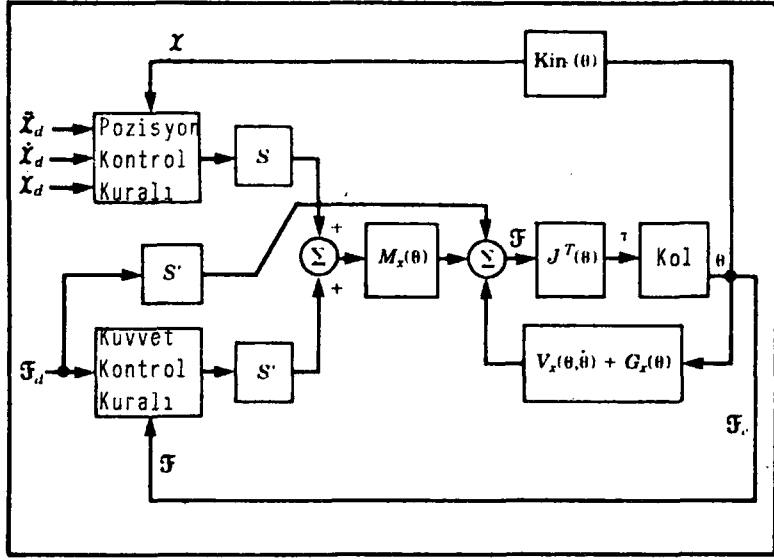
Şekil-2.8 : Genel bir manipulatörde karma kontrol [4] .

Şekil-2.9, genel bir manipulatörde karma kontrolün blok diyagramını gösterir. Manipulatör dinamiği Jacobian olarak sınırlayıcı eksen takımında belirlenir. Kinematiği ise koordinat transformasyonunu sınırlayıcı eksenlere dahil etmek amacıyla yazılır. Ve ölçülmüş kuvvetler benzer şekilde $\{ C \}$ ye dönüştürülür. Servo hatalar $\{ C \}$ de hesaplanır ve $\{ C \}$ içindeki kontrol şekli uygun S değerlerinin bir kombinasyonudur.

2.5.3. Değişken Rijitliğin Eklenmesi

Mutlak pozisyon veya kuvvet kontrolünde bir serbestlik derecesinin kontrolü, servo rijitlik spektrumunun iki ucundaki kontrolü olarak görülür. İdeal bir pozisyon servosu sınırsız rijitliklidir ve sisteme etkiyen tüm kuvvet bozucularını geri çevirir. Benzer olarak ideal bir kuvvet servosu sıfır rijitlik gösterir ve kuvvet bozucularından bağımsız olarak gerekli kuvvetin uygulanmasını sağlar. Sıfır ve sonsuzdan başka rijitsizliği sağlamak amacıyla robot eli kontrol edebilmek faydalı olabilir. Genelde robot elin mekanik empedansını kontrol etmek isteriz. Burada (temasta) çevrenin çok rijit olduğu kabul edilmektedir. Rijit bir çevre ile temas halinde sıfır rijitlik kuvvet kontrolü kullanılır. Sıfır rijitlikli temas halinde ise (serbest uzayda hareket halinde), yüksek rijitlik pozisyon kontrolü kullanılır. Böylece bölgesel çevrenin yaklaşık inversi olan bir rijitliği göstermek amacıyla robot elin kontrolü iyi bir yol olarak görülür. Bu nedenle plastik veya yay gibi parçalarda sıfır veya sonsuzdan ayrı servo rijitlik tayin edilebilir [7] .

Karma kontrolün sınırları dahilinde $\{ C \}$ deki uygun serbestlik derecesine bağlı olarak pozisyon kontrolünü kullanmak ve pozisyon kazancını düşürmek suretiyle bu işlem kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Genel olarak bu işlemin yapılması halinde, serbestlik derecesinin kritik sönümlü olarak kalması amacıyla uygun hız kazancı düşürülür. $\{ C \}$ nin serbestlik derecelerine uygun olarak pozisyon servosunun, pozisyon ve hız kazançlarını değiştirme kabiliyeti, karma pozisyon kuvvet kontrol sisteminin robot elin genelleştirilmiş empedansını kullanmasını mümkün kılar [6] . Bununla birlikte bir çok pratik halde, sadece pozisyon kontrolü



Şekil-2.9 : Genel bir manipulatör için hybrid pozisyon/kuvvet kontrolu. Basitleştirmek için hız geri besleme halkası gösterilmemiştir [4] .

veya sadece kuvvet kontrolu gerekli olduğu için rijit parçaların etkileşimleri üzerinde durulacaktır.

2.6. KULLANILAN ENDÜSTRİYEL ROBOT KONTROL SİSTEMLERİ

2.6.1. Giriş

Bu bölümde giriş yapılan karma pozisyon/kuvvet kontrolunda olduğu gibi tam bir kuvvet kontrolu, bugünkü endüstriyel robotlarda mevcut değildir. Pratikteki problemleri arasında gerekli hesaplamanın oldukça büyük boyutta olması, dinamik model için gerçek parametrelerin eksikliği, kuvvet sensörlerinin yetersizliği ve pozisyon/kuvvet stratejisinin tanımlanmasındaki güçlütür.

2.6.2. Pasif Esneklik (Uyumluluk)

Birçok rijit pozisyon servolu aşırı rijit manipulatörler, parçaların temasta olduğu ve temas kuvvetinin olduğu işlerde uygun değildir. Bu tür hallerde parçalar hasar görür. Bu tür manipulatörlerin dizaynı ile ilgili geçmiş denemelerde robot bu tür işleri yapabilecek şekilde düşünülüyordu. Bu ise parçaların, takımların veya kolun kendisinin esnekliğine veya uyum kabiliyetine bağlı olarak mümkün oluyordu.

Bu amaçla geliştirilen en başarılı cihaz RCC veya uzak merkez uyum cihazıdır. RCC belirli bir görevi düzgünce ve hızla yerine getirebilecek esneklikte dizayn edilmiştir. RCC manipulatör bileği ve robot el arasına yerleştirilen altı serbestlik dereceli bir yaydır. Altı yayın rijitliğini yerleştirmek suretiyle değişik miktarlardaki uyumluluk veya esneklik söz konusudur. Bu tür sistemler pasif uyumlu sistemler olarak adlandırılır ve bazı işler için manipulatörlerin endüstriyel uygulamalarında kullanılır [9].

2.6.3. Pozisyon Kazançlarını Yumuşatma Esnekliği

Bir pasifde esnekliği veya uyumluluğu belirlemekten ziyade pozisyon kontrol sisteminin kazançlarının ayarlanması ile manipulatör rijitliğinin değiştirildiği sistemleri tavsiye etmek mümkündür. Bir yüzeye temasın sürdürülmesinin gerekli olduğu fakat hassas bir kuvvet kontrolunun gerekli olmadığı taşıma gibi uygulamalarda bir kaç endüstriyel robot benzeri işleri gerçekleştirir.

Özel bir ilginç yaklaşım Salisbury [8] tarafından öne sürülmüştür. Bu taslakta servo sistem esaslı bir mafsaldaki pozisyon kazançları, robot el kartezyen serbestlik derecelerine göre belirli rijitliğe sahip olabilecek şekilde düzenlenir. Yani altı serbestlikli bir genel yay göz önüne alınır ve hareketi şu şekilde tanımlanır,

$$\mathcal{F} = K_{px} \cdot \delta x \quad (2.4)$$

Burada ; K_{px} ; 6x6'lık diagonal matris olup köşegen üzerindeki 3 lineer rijitliği 3 burulma rijitliği izler.

Manipulatör elinin bu rijitlik karakteristiğini nasıl gerçekleştirebiliriz?

Manipulatör, Jacobian'ın tanımına dönecek olursak,

$$\delta x = J(\theta) \delta(\theta) \quad (2.5)$$

bunu denklem (2.4) ile birleştirirsek,

$$\mathcal{F} = K_{px} \cdot J(\theta) \delta(\theta) \quad (2.6)$$

Statik kuvveti dikkate alırsak,

$$\tau = J^T(\theta) \cdot \mathcal{F} \quad (2.7)$$

(2.6) denklemi ile birleştirirsek,

$$\tau = J^T(\theta) \cdot K_{px} J(\theta) \delta(\theta) \quad (2.8)$$

Burada Jacobian denklem takımının koordinatlarına göre yazılır. (2.8) denklemi, θ mafsalsal açılarındaki küçük değişmelerin bir fonksiyonu olarak mafsalsal momentlerinin nasıl hesaplanacağını gösteren bir denklemdir.

Manipulatör eli 6 serbestlik dereceli bir kartezyen yay davranışı gösterir.

Pozisyon kontrol esaslı basit bir mafsal şu kontrol kuralını kullanır,

$$\tau = K_p E + K_v \dot{E} \quad (2.9)$$

Burada K_p ve K_v sabit diagonal kazanç matrisleridir ve $E = \theta_d - \theta$ Salisbury ise aşağıdaki kuralı tavsiye eder,

$$\tau = J^T(\theta) K_{px} J(\theta) E + K_v \dot{E} \quad (2.10)$$

Burada, K_{px} kartezyen bölgedeki robot elin istenilen rijitliğidir. Altı serbestlik dereceli bir manipulatörde, K_{px} : Robot elin üç öteleme ve üç dönme rijitliğini gösteren diagonal altı elemana sahip bir diagonal matrisdir. Özellikle Jacobian denklemlerinin kullanılması ile kartezyen rijitlik, bir mafsal bölge rijitliğine dönüştürülür.

2.6.4. Kuvvet Ölçümü

Kuvvet ölçümü (algılanması), bazı hareketleri gerçekleştirmek amacıyla bu algılamaya dayalı olarak manipulatörün yüzeyle temasını kontrol etmesini sağlar. Mesela korunmuş hareket terimi kuvvet hissedilinceye kadar pozisyon kontrolü altında hareket stratejisi anlamında kullanılır. Buna ilave kuvvet algılanması manipulatörün kaldırdığı cisimlerin ağırlığını belirlemek amacıyla da kullanılır. Parçaların taşınma işlemleri sırasında da basit kontrol olarak kullanılabilir. Kullanılabilen bazı ticari robotlar el mekanizmasında kuvvet sensörleri ile donatılırlar. Bu robotlar şartlara göre hareketi durdurmak veya diğer bir harekete geçmek amacıyla programlanabilir.

B Ö L Ü M - III

BİR VE İKİ SERBESTLİK DERECELİ ROBOT MANİPULATÖRLERDE KUVVET KONTROLU

3.1. TEK SERBESTLİK DERECELİ ROBOT MANİPULATÖR

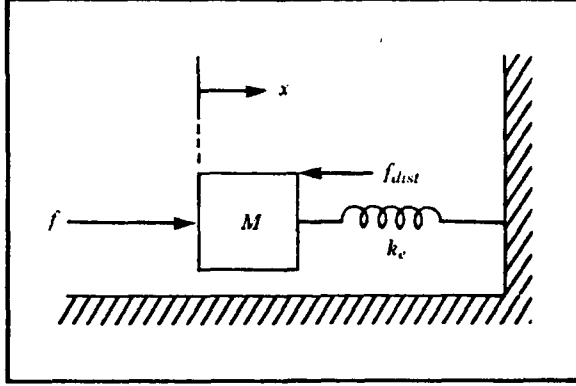
3.1.1. Fiziksel Model

Robot manipulatör, tek bir kütlede oluşmuş tek serbestlik dereceli rijit bir sistem olarak kabul edilmektedir. Robot manipulatör veya robot el ile çevre arasındaki etkileşimde ortaya çıkan kuvvetin büyüklüğü, (k_e) rijitliğine sahip bir yayın doğuracağı reaksiyon kuvveti ile temsil edilecektir. Yayın elastikliği, çevrenin rijitliğinin derecesini karakterize edecektir. Böylelikle Şekil-3.1'deki gibi bir yaya tesbit edilmiş kütlede kontrolü incelenmeye çalışılacaktır. Manipulatör mekanizmasındaki sürtünme kuvvetleri gibi bozucu tesirlerinde dikkate alınması gereklidir. Kontrol etmek istediğimiz değişken, çevreye tesir eden f_e kuvveti olup, bu kuvvet yayda meydana gelen reaksiyon kuvvetidir [5] . Yay kuvveti ise ;

$$f_e = k_e \cdot x \quad (3.1)$$

Fiziksel sistemi tanımlayan denklem ise,

$$f = m \ddot{x} + k_e x + f_{dist} \quad (3.2)$$



Şekil-3.1 : Kütle - yay sistemi [4] .

f_e 'yi denklem (3.2)'de kontrol edilecek değişken cinsinden yazacak olursak,

$$x = k_e^{-1} \cdot f_e$$

$$\dot{x} = k_e^{-1} \cdot \dot{f}_e$$

$$\ddot{x} = k_e^{-1} \cdot \ddot{f}_e$$

$$f = m k_e^{-1} \ddot{f}_e + f_e + f_{dist} \quad (3.3)$$

Bölünmüş kontrol kavramını kullanarak,

$$\alpha = m k_e^{-1}$$

$$\beta = f_e + f_{dist}$$

Kontrol kuralı ise,

$$f = m k_e^{-1} [\ddot{f}_d + k_{vf} \dot{e}_f + k_{pf} e_f] + f_e + f_{dist} \quad (3.4)$$

Burada $e_f = f_d - f_e$, istenilen f_d kuvveti ile ölçülen f_e arasındaki kuvvet hatasıdır. Denklem (3.4)'ü çözümlersek kapalı çevrimli sisteme sahip olacağız.

$$\ddot{e}_f + k_{vf} \dot{e}_f + k_{pf} e_f = 0 \quad (3.5)$$

Buna karşılık kontrol kuralında bozucu tesirleri gösteren f_{dist} terimini bilinen olarak kullanamayız. Bu terimi kontrol kuralı dışında bırakabiliriz. Fakat çevre rijitliği (k_e) yüksek olduğu zaman kararlı hal analizi iyi bir seçim olarak görülür. f_{dist} terimini kontrol kuralının dışına atmak için türevleri her zaman için sıfır alarak kararlı hal analizini yaptığımızda, (3.3) ve (3.4) denklemlerinin eşitliğinden ;

$$e_f = - \frac{f_{dist}}{\alpha} \quad (3.6)$$

Burada ; $\alpha = m k_e^{-1} \cdot k_{pf}$ efektif kuvvet geri besleme kazancıdır. (3.4) denklemindeki kontrol kuralında ($f_e + f_{dist}$) teriminin yerine f_d 'yi kullanmak istersek kararlı hal hatasını şu şekilde buluruz ;

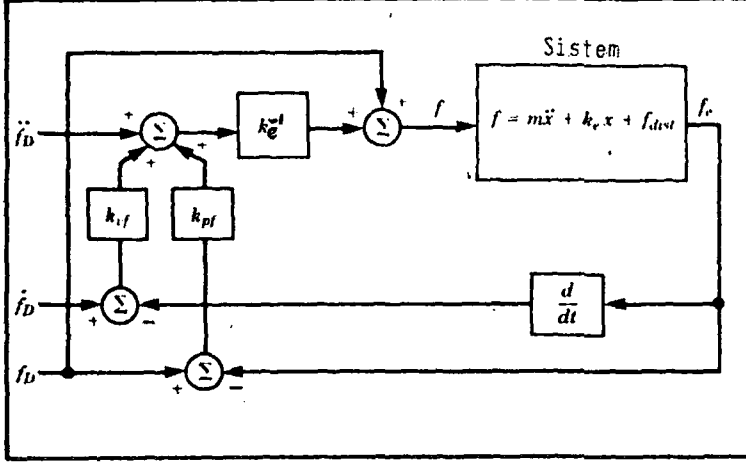
$$e_f = - \frac{f_{dist}}{1 + \alpha} \quad (3.7)$$

çoğu zaman olduğu gibi çevrenin rijit olması halinde α çok küçük olabilir ve böylece denklem (3.7)'de hesaplanan kararlı hal hatası (3.6) denklemine göre küçük bir fark gösterir. Böylece kontrol kuralımız ;

$$f = m k_e^{-1} [\ddot{f}_d + k_{vf} \dot{e}_f + k_{pf} e_f] + f_d \quad (3.8)$$

şeklinde olur.

Şekil-3.2, (3.8) denklemine göre kontrol kuralını kullanan kapalı çevrimli sistemin blok diyagramını göstermektedir [3] .



Şekil-3.2 : Kütle - yay sistemi için kuvvet kontrol sistemi [3] .

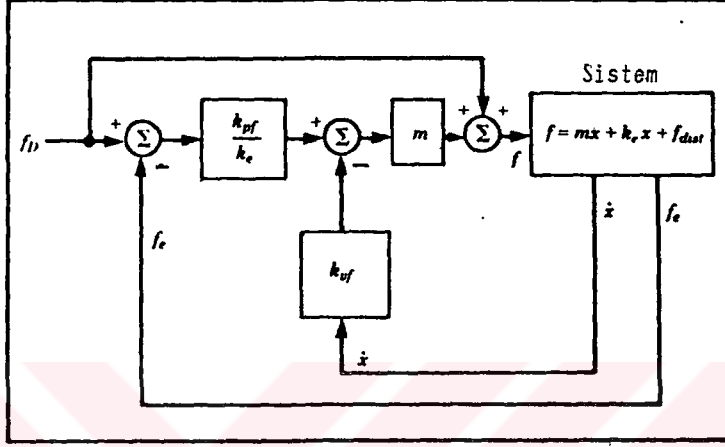
Genellikle kuvvet yörüngeleri sabittir, yani çeşitli sabit seviyelerde olan temas kuvvetinin kontrolü ile ilgilenilecektir. Herhangi bir zaman fonksiyonunu izlemesi gereken temas kuvveti uygulamaları ender olarak görülür. Böylelikle kontrol sisteminin \dot{f}_d ve \ddot{f}_d girdileri sürekli olarak sıfır olacaktır. Diğer bir gerçek ise ölçülen kuvvetlerin hassas olmadığı ve f_e hesaplamada kullanılan nümerik diferansiyelin tam sıhhatli olmadığıdır. Buna karşılık $f_e = k_e \cdot x$ olduğu için $f_e = k_e \cdot x$ şeklinde çevreye etkiyen kuvvetin türevini elde edebiliriz. Hızın iyi ölçülebildiği çoğu manipulatörlerde bu usul çok daha gerçekçidir. Böylelikle aşağıdaki kontrol kuralını yazabiliriz [4] ,

$$f = m [k_{pf} k_e^{-1} e_f - k_{vf} \dot{x}] + f_d \quad (3.9)$$

Buna uygun blok diyagramı ise Şekil-3.3'de görülmektedir.

Şekil-3.3'deki sistemde, k_{vf} kazançlı dahili hız kontrol çevriminde kuvvet hatalarının belirlediği bir ayarlama noktası mevcuttur. Kararlı hal performansını geliştirmek amacıyla bazı kuvvet kontrol kuralları integral teriminide ihtiva ederler. Kalan en önemli problem kontrol kuralımızda

görülen fakat genellikle bilinmeyen ve zaman zaman değişen çevrenin rijitliği (k_e) dir. Bununla birlikte bir robot mekanizması rijit parçalardan oluşur ve k_e oldukça yüksek tahmin edilebilir. Genellikle bu kabul yapılır ve kazançlar, sistem k_e 'deki değişimlere göre uygun olacak tarzda seçilir.



Şekil-3.3 : Yay - kütle sistemi için pratik kuvvet kontrol sistemi [4] .

(3.9) denklemi, robot manipulatörün çevreye uygulaması gereken f_e kuvvetini sağlayacak ve servo kısımdan gelen tahrik kuvveti olarak uygulanması gereken kuvvettir. Robot manipulatörün çevreye uygulaması gereken f_e kuvvetinin hesaplanmasında, servo kısımdan gelen f kuvveti, robot manipulatörde meydana gelen atalet kuvvetini ve çevreye uygulanması gereken f_e kuvvetini karşılamalıdır. Burada bozuculardan dolayı meydana gelen f_{dist} kuvveti ihmal edilmiştir.

Yukarıda anlatılmaya çalışılan ifadeyi aşağıdaki denklemlerle karakterize etmeye çalışırsak,

$$f_{tahrik} = f_{sistem} + f_{çevreye\ etki} \quad (3.10)$$

$$f_{tahrik} = m [k_{pf} \cdot k_e^{-1} e_f - k_{vf} \dot{x}] + f_d \quad (3.11)$$

$$f_{\text{system}} = m \ddot{x} \quad (3.12)$$

$$f_{\text{çevreye etki}} = f_e = k_e \cdot x \quad (3.13)$$

değerlerini (3.10) denkleminde yerine yazarsak,

$$m [k_{pf} k_e^{-1} e_f - k_{vf} \dot{x}] + f_d = m \ddot{x} + f_e \quad (3.14)$$

eşitliğinden f_e kuvvetini çekersek,

$$f_e = \frac{m \frac{k_{pf}}{k_e} f_d - m k_{vf} \dot{x} - m \ddot{x} + f_d}{(1 + m \frac{k_{pf}}{k_e})} \quad (3.15)$$

denklemini elde edilir. f_e robot manipulatörün çevreye uygulaması gereken kuvvet ifadesidir. Burada,

m : Robot manipulatörün kütlesi,

k_{pf}/k_e : Pozisyon kazancının çevre rijitliğine oranı,

k_{vf} : Kontrol hız kazancı

$m \ddot{x}$: Robot manipulatörde atalet kuvveti

f_d : Robot manipulatörün çevreye uygulaması istenen kuvvet değeri

Burada istenen f_d kuvveti ile ölçülen f_e kuvveti arasındaki $e_f = f_d - f_e$ kuvvet hatasını, kontrol hız kazancının (k_{vf}), hatayı sıfır yapan değerlerinde ve ayrıca hatayı k_{pf}/k_e oranına bağlı olarak zamana bağlı değişimini hesaplayan bir bilgisayar programı hazırlanmış olup EK-1'de verilmiştir.

3.2. İKİ SERBESTLİK DERECELİ ROBOT MANİPULATÖRDE KUVVET KONTROLU

3.2.1. Giriş

Bu bölümde iki serbestlik derecesi olan bir robot kolun, belli sınırlamalar altındaki davranışını incelemeye çalışacağız. Robot kol tipi olarak iki serbestlik dereceli iki döner mafsallı kol ele alınmıştır.

Bir robot kol amaçlanan görevleri yerine getirirken kolun bulunduğu bir ilk konumdan, erişilebilir bir son konuma belli bir yörünge biçimini izleyerek ulaşması istenir. İlk ve son konuları arasından sonsuz sayıda yörünge geçmesine rağmen, kolun kendi geometrisi, ortam sınırları ve diğer fiziksel engeller nedeniyle, bu yörüngelerden ancak bazıları izlenebilir. Bu nedenle, robot kolların istenilen bir hareketi yapması için, istenen eklem yörüngelerinin önceden saptanması gerekir.

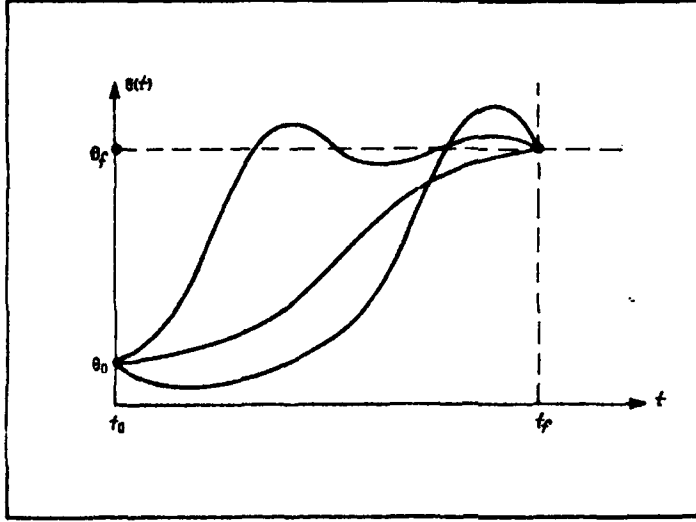
3.2.2. Robot Manipulatörde Mafsal Açılarının Tayini

Belirli bir zaman aralığında, robot manipulatörün ilk pozisyondan amaçlanan son pozisyona hareket ettirilmesi durumunu göz önüne alalım. İvers kinematiği kullanarak amaçlanan pozisyonu ve hareketi sağlayacak mafsal açıları hesaplanabilir. Manipulatörün ilk pozisyonu mafsal açıları şeklinde tanımlanabilir. Gerekli olan her mafsal için mafsal açıları fonksiyonel olarak tanımlanabilir. t_0 'daki değer mafsalın ilk pozisyonunu ve t_f 'deki değeri ise mafsalın arzu edilen son pozisyonudur. Şekil-3.4'de görüldüğü üzere mafsal değerlerini tanımlayan $\theta(t)$ şeklinde bir çok süreklili fonksiyonlar vardır.

Tek yönlü sürekli bir hareket durumunda $\theta(t)$ üzerine etki eden en az dört sınırlama vardır, bunlardan fonksiyon değerleri üzerine etki eden iki sınırlama ilk ve son değerlerin seçilmesinden gelir.

$$\theta(0) = \theta_0$$

$$\theta(t_f) = \theta_f \quad (3.16)$$



Şekil-3.4 : Tek mafsal için mümkün olabilen farklı yol yörüngeleri.

Diğer iki sınırlama ise mafsal açısının hızına bağlı olarak sürekli olması ile bulunabilir, bu durumda ilk ve son hızlar sıfırdır.

$$\dot{\theta}(0) = 0$$

$$\dot{\theta}(t_f) = 0 \quad (3.17)$$

Bu dört sınırlama ile θ ifadesi en azından bir üçüncü dereceden polinom vasıtasıyla tanımlanabilir. Bu sınırlamalar özel bir kübik fonksiyonu tanımlar. Kübik fonksiyon şu şekilde bir forma sahiptir [4] ,

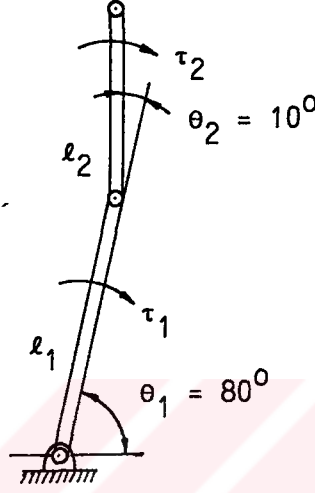
$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (3.18)$$

ve bu pozisyon boyunca mafsalın hızı ve ivmesi açık olarak şu şekildedir,

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2 a_2 t + 3 a_3 t^2 \quad (3.19)$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2 a_2 + 6 a_3 t \quad (3.20)$$

Bizim seçtiğimiz robot kolun fiziksel modeli aşağıdaki şekildeki gibi olup, iki kütleli iki serbestlik derecesine sahip iki uzuvdan meydana gelmiştir. Seçtiğimiz robot kolun başlangıç konumu şekilde görüldüğü gibidir.



Şekil-3.5 : Robot kol mekanizmasında başlangıç pozisyonu

Mafsalların ilk ve son konumları sırasıyla $(80^\circ, 30^\circ)$ ve $(10^\circ, 0^\circ)$, hareket süreleri ise 5 saniyedir. Robot kollar başlangıç konumunda ;

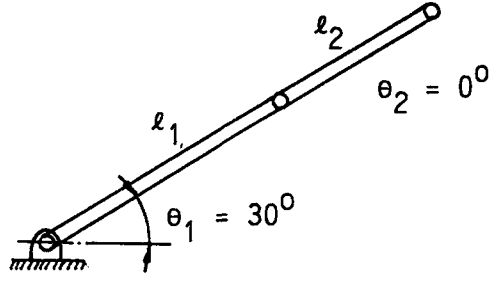
$$\theta_1(0) = 80^\circ$$

$$\theta_2(0) = 10^\circ$$

$$\dot{\theta}_1(0) = 0$$

$$\dot{\theta}_2(0) = 0$$

Robot kolun hareketi tamamlandığındaki son konumu ise ;



Şekil-3.6 : Robot kolun son pozisyonu

Robot kolların bu pozisyonunda ;

$$\theta_1(t_f) = 30^\circ$$

$$\dot{\theta}_1(t_f) = 0$$

$$\theta_2(t_f) = 0$$

$$\dot{\theta}_2(t_f) = 0$$

Burada, t_f robot kolun başlangıçtan son konuma varış zamanıdır. Eklem açılarının zamana bağlı değişimi ;

$$\theta_1(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (3.21)$$

$$\theta_2(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (3.22)$$

şeklinde seçilirse, eklem açılarında bulunan a_0 , a_1 , a_2 ve a_3 sabitlerinin başlangıç şartlarından bulunması gerekir. θ_1 açısında bulunan sabitleri başlangıç şartlarına bağlı olarak çözmeye çalışırsak ;

$$\theta_1(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

$$\theta_1(0) = 80^\circ \quad \longrightarrow \quad a_0 = 80^\circ \quad (3.23)$$

$$\theta_1(t_f) = 30^\circ \longrightarrow 80^\circ + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 = 30^\circ \quad (3.24)$$

$$a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 = -50^\circ \quad (3.25)$$

$$\dot{\theta}_1(0) = 0 \longrightarrow a_1 = 0 \quad (3.26)$$

$$\dot{\theta}_1(t_f) = 0 \longrightarrow a_1 + 2 a_2 t_f + 3 a_3 t_f^2 = 0 \quad (3.27)$$

(3.27) denkleminde a_2 'yi çekersek,

$$a_2 = -\frac{3}{2} a_3 t_f \quad (3.28)$$

(3.28) denklemini (3.25) denkleminde yerine yazarsak,

$$\left(-\frac{3}{2} a_3 t_f\right) t_f^2 + a_3 t_f^3 = -50 \quad (3.29)$$

$$a_3 = \frac{100}{t_f^3} \quad (3.30)$$

(3.30) denkleminde (3.28) denkleminde yerine koyarak yazarsak,

$$a_2 = \frac{-3}{2} \cdot \frac{100}{t_f^3} t_f = \frac{-150}{t_f^2} \quad (3.31)$$

olarak bulunur. Bulunan a_2 ve a_3 ifadelerinde $t_f = 5$ sn koymak suretiyle a_2 ve a_3 değerleri bulunur.

$$a_2 = \frac{-150}{t_f^2} = \frac{-150}{5^2} = -6 \quad (3.32)$$

$$a_3 = \frac{100}{t_f^3} = \frac{100}{5^3} = 0,8 \quad . \quad (3.33)$$

Başlangıç şartlarından bulunan sabitleri $\theta_1(t)$ ifadesinde yerine yazarsak ;

$$\theta_1(t) = 80 - 6 t^2 + 0,8 t^3 \quad (3.34)$$

bulunur. θ_1 'in açısal hızı ve açısal ivmesi ise ;

$$\dot{\theta}_1(t) = \frac{d\theta_1}{dt} = -12 t + 2,4 t^2 \quad (3.35)$$

$$\ddot{\theta}_1(t) = \frac{d^2\theta_1}{dt^2} = -12 + 4,8 t \quad (3.36)$$

olarak bulunur.

θ_2 açısını verilen başlangıç şartlarına bağlı olarak çözmeye çalışırsak;

$$\theta_2(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

$$\theta_2(0) = 10 \quad \longrightarrow \quad a_0 = 10^0 \quad (3.37)$$

$$\theta_2(t_f) = 0 \quad \longrightarrow \quad 10 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 = 0 \quad (3.38)$$

$$\dot{\theta}_2(0) = 0 \quad \longrightarrow \quad a_1 = 0 \quad (3.39)$$

$$\dot{\theta}_2(t_f) = 0 \quad \longrightarrow \quad a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 = 0 \quad (3.40)$$

(3.40) denkleminde a_2 değeri ;

$$a_2 = \frac{-3}{2} a_3 t_f \quad (3.41)$$

bulunan (3.41) denkleminde (3.38) denkleminde yerine yazmak suretiyle a_3 değerini buluruz.

$$10 + \left(\frac{-3}{2} a_3 t_f\right) t_f^2 + a_3 t_f^3 = 0 \quad (3.42)$$

$$a_3 = \frac{20}{t_f^3} \quad (3.43)$$

bulunan (3.43) denkleminde (3.41) denkleminde yazarak ;

$$a_2 = \frac{-3}{2} \frac{20}{t_f^3} t_f = \frac{-30}{t_f^2} \quad (3.44)$$

bulunur. Bulunan a_2 ve a_3 ifadelerinde $t_f = 5$ sn koymak suretiyle a_2 ve a_3 değerleri bulunur,

$$a_2 = \frac{-30}{t_f^2} = \frac{-30}{5^2} = -1,2 \quad (3.45)$$

$$a_3 = \frac{20}{t_f^3} = \frac{20}{5^3} = 0,16 \quad (3.46)$$

Bulunan sabit değerlerini θ_2 ifadesinde yerine yazarsak ;

$$\theta_2(t) = 10 - 1,2t^2 + 0,16t^3 \quad (3.47)$$

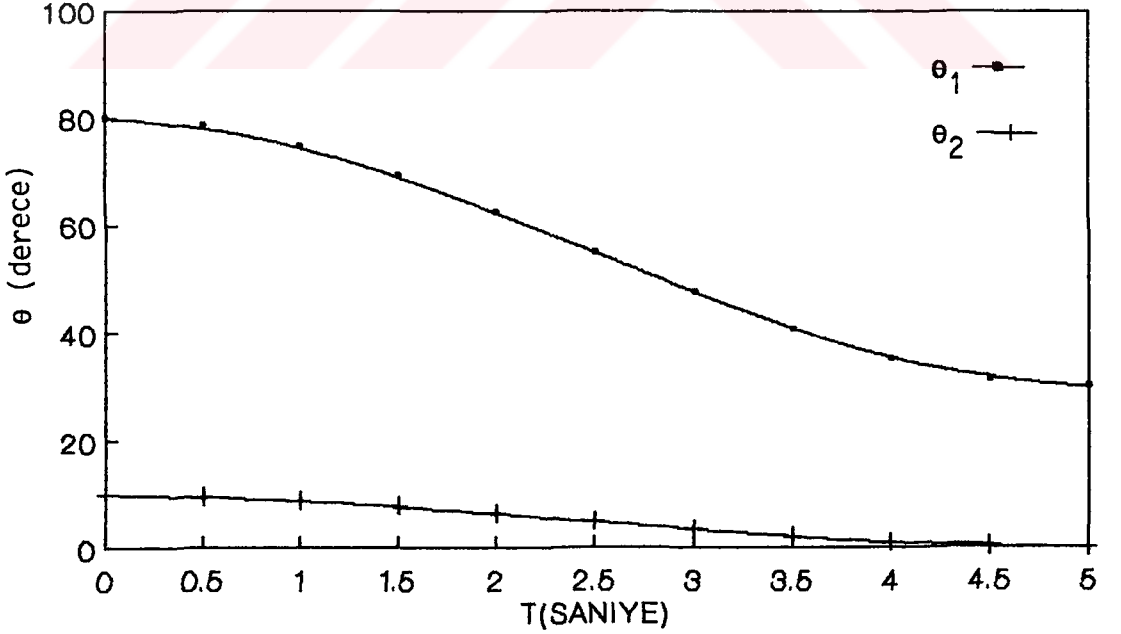
olarak bulunur. $\theta_2(t)$ 'nin açısal hızı ve açısal ivmesi ise,

$$\dot{\theta}_2(t) = \frac{d \theta_2}{dt} = - 2,4 t + 0,48 t^2 \quad (3.48)$$

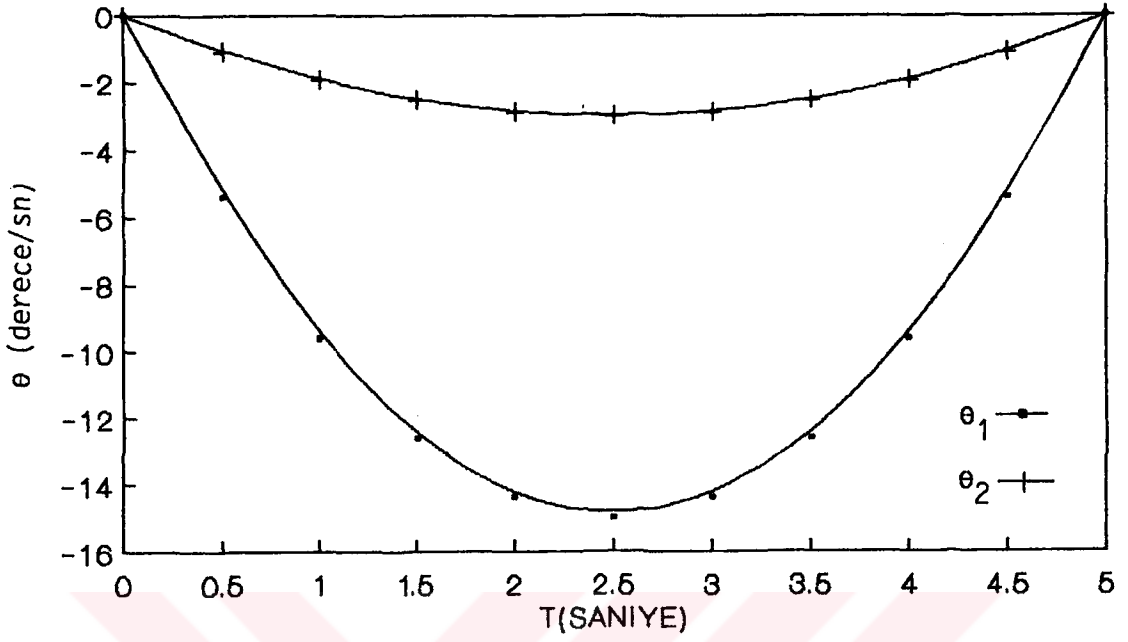
$$\ddot{\theta}_2(t) = \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} = - 2,4 + 0,96 t \quad (3.49)$$

olarak bulunur.

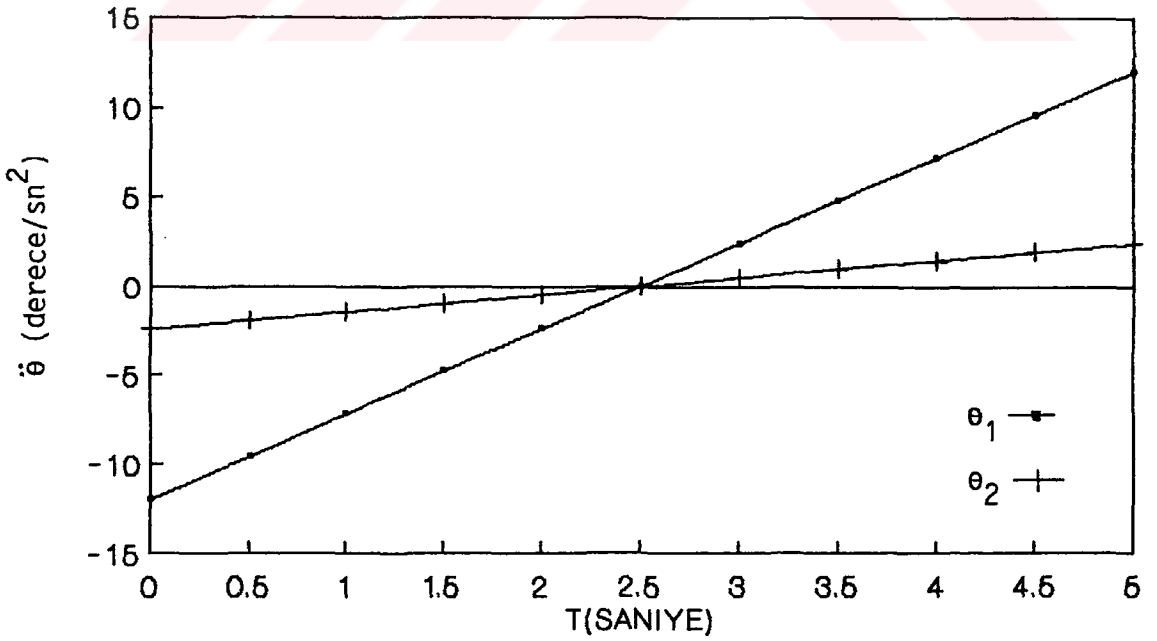
Inceleme esas olan robot manipulatör modelinde mafsal açılarının, hızlarının ve ivmelerinin hareket süresince değişimleri sırasıyla Şekil-3.7, Şekil-3.8 ve Şekil-3.9'da gösterilmiştir.



Şekil-3.7 : θ_1 ve θ_2 açılarının hareket süresi boyunca açısal pozisyonları.

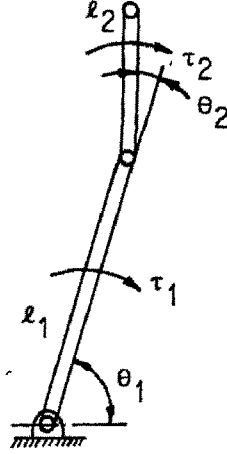


Şekil-3.8 : θ_1 ve θ_2 açılarının hareket süresi boyunca açısal hızları



Şekil-3.9 : θ_1 ve θ_2 açılarının hareket süresi boyunca açısal ivmesi

3.2.3. Robot Kol Mafsal Momentleri



Şekil-3.10 : Robot kolda mafsal momentleri

Manipulatörün, dinamik denklemlerinin genel yapısına bağlı olarak robot kol mafsallarına uygulanması gereken moment ifadesi aşağıdaki denklemlerle karakterize edebiliriz.

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad [10] \quad (3.50)$$

Burada ; τ : $(n \times 1)$ boyutlu robot kol mafsallarına uygulanması gereken moment matrisi,

$M(\theta)$: $(n \times n)$ boyutunda manipulatörün kütle matrisi,

$\ddot{\theta}$: $(n \times 1)$ boyutlu açısal ivme matrisi,

$V(\theta, \dot{\theta})$: $(n \times 1)$ boyutlu Coriolis ve merkezkaç kuvvet matrisi,

$G(\theta)$: $(n \times 1)$ boyutlu ağırlık matrisi.

Yukarıda verilen ifadelerin değerleri aşağıdaki şekilde olup [4], robot kol mafsalına uygulanması gereken moment ifadesini hesaplayabilmemiz için bu değerleri (3.50) ifadesinde yerine koyarak hesaplayabiliriz. Robot manipulatörün kütle matrisi ;

$$\underline{\underline{M}}(\theta) = \begin{bmatrix} \ell_2^2 m_2 + 2 \ell_1 \ell_2 m_2 C_2 + \ell_1^2 (m_1 + m_2) & \ell_2^2 m_2 + \ell_1 \ell_2 m_2 C_2 \\ \ell_2^2 m_2 + \ell_1 \ell_2 m_2 C_2 & \ell_2^2 m_2 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Coriolis ve merkezkaç kuvvet matrisi ;

$$\underline{\underline{V}}(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -m_2 \ell_1 \ell_2 S_2 \dot{\theta}_2^2 - 2 m_2 \ell_1 \ell_2 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ m_2 \ell_1 \ell_2 S_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Manipulatör ağırlık matrisi,

$$\underline{\underline{G}}(\theta) = \begin{bmatrix} m_2 \ell_2 g C_{12} + (m_1 + m_2) \ell_1 g C_1 \\ m_2 \ell_2 g C_{12} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Açısal ivme matrisi ise ;

$$\underline{\underline{\ddot{\theta}}} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Yukarıda verilen robot manipulatöre ait değerleri (3.50) ifadesinde yerine koyarak robot kol mafsalına uygulaması gereken moment ifadesini hesaplamaya çalışalım.

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (3.50)$$

$$\underline{\underline{\tau}} = \begin{bmatrix} \ell_2^2 m_2 + 2 \ell_1 \ell_2 m_2 C_2 + \ell_1^2 (m_1 + m_2) & \ell_2^2 m_2 + \ell_1 \ell_2 m_2 C_2 \\ \ell_2^2 m_2 + \ell_1 \ell_2 m_2 C_2 & \ell_2^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 S_2 \ddot{\theta}_2 - 2m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_2 l_2 g C_{12} + (m_1 + m_2) l_1 g C_1 \\ m_2 l_2 g C_{12} \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

işleminin sonucu ;

$$\underline{\tau} = \begin{bmatrix} m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 C_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\theta}_1 - m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1^2 - \\ 2m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_2 l_2 g C_{12} + (m_1 + m_2) l_1 g C_1 \\ m_2 l_1 l_2 C_2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 l_2 g C_{12} + m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

olarak bulunur.

Yukarıda hesapladığımız τ 'ya ait sütun matrisinde birinci satır τ_1 ifadesini ve ikinci satır ise τ_2 ifadesini göstermektedir. Burada τ_1 1 nolu kol, τ_2 ise 2 nolu kol mafsala uygulanması gereken moment değerleridir.

$$\tau_1 = m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 C_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\theta}_1 - m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1^2 - 2m_2 l_1 l_2$$

$$S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_2 l_2 g C_{12} + (m_1 + m_2) l_1 g C_1 \quad (3.57)$$

$$\tau_2 = m_2 l_1 l_2 C_2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 l_2 g C_{12} + m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \quad (3.58)$$

(3.57) ve (3.58) ifadelerindeki τ_1 ve τ_2 değerlerini θ_1 ve θ_2 değerlerine bağlı olarak ve sistem parametrelerinin de işleme katarak τ_1 ve τ_2 ifadesini zamana bağlı olarak hesaplayan bilgisayar programı ise EK-2'de verilmiştir.

3.2.4. Kuvvet Kontrol Modeli

Tek bir kütlenin kontrolü problemini esas alarak manipulatör kontrolünü, n adet birbirinden bağımsız kütlenin kontrolüne (n mafsallı bir manipulatör için) eşdeğer kabul edebiliriz. Benzer tarzda kuvvet kontrolünü, bir serbestlik dereceli tek kütleli bir sistemden, iki serbestlik dereceli iki kütleli bir sistemde uygulanan kuvvetin kontrolünde da kullanabiliriz.

Bölüm 2.4'de verilen bir serbestlik dereceli tek kütleli bir sisteme uygulanan kuvvet kontrol teorisinden hareketle, kendi modelimizdeki iki serbestlik dereceli iki kütleli sisteme kuvvet teorisini uygulamaya çalışalım. Bunun için Bölüm 3.1.1.de verilen (3.9) ifadeli kontrol kuralını kullanarak, kendi modelimize kontrol kuralını uygulamaya çalışalım. (3.9) denklemi ;

$$f = m [k_{pf} \cdot k_e^{-1} e_f - k_{vf} \dot{x}] + f_d$$

ifadesini genelleştirerek ve kendi modelimizden gelen $V_x(\theta, \dot{\theta})$ ve $G_x(\theta)$ ifadelerinde (3.9) denkleme eklemek suretiyle,

$$\mathcal{F} = M_x [\frac{k_{pf}}{k_e} e_f - k_{vf} \dot{x}] + f_d + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta) \quad (3.59)$$

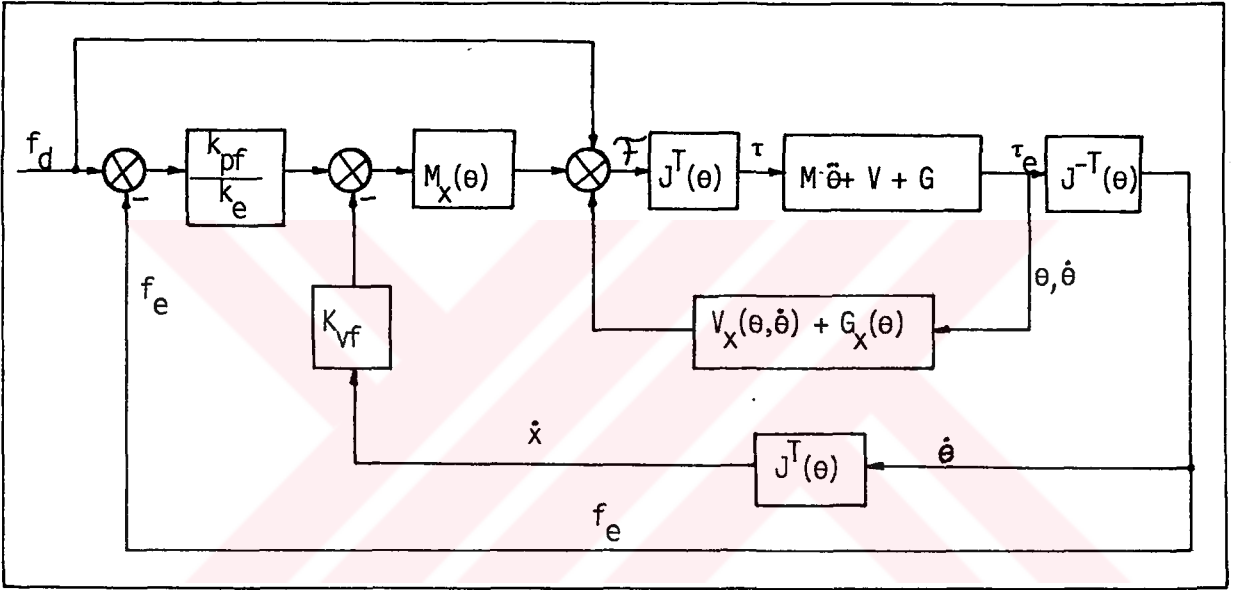
elde edilir. (3.59) denkleme göre verilen, kontrol kuralını gösteren blok diyagramı aşağıdaki Şekil-3.11'de verilmiştir.

Blok diyagramından da görüleceği gibi robot kol tarafından robot ele uygulanması gereken f_e kuvvetini, robot kola servo kısımdan girdi olarak uygulanan \mathcal{F} kuvveti karşılamalıdır. Robot kol tarafından robot ele uygulanması istenen f_d kuvveti ile, robot ele uygulanan f_e kuvveti arasında bir kuvvet hatası mevcuttur. Bu kuvvet hatasını, robot kolun robot ele uygulaması istenen f_e kuvveti ile bu kuvveti karşılaması için robot kola girdi olarak uygulanan \mathcal{F} kuvvetlerinin eşitliğinden hesaplamaya çalışalım,

bu eşitliği aşağıdaki gibi yazabiliriz,

$$\left(\frac{k_{pf}}{k_e} e_f - k_{vf} \dot{x}\right) M_x(\theta) + f_d + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta) = J^{-T} \cdot \tau_e \quad (3.60)$$

Robot manipulatörde meydana gelen kuvvet hatası olan e_f 'yi bu eşitlikten hesaplamaya çalışalım.



Şekil-3.11: Robot manipulatöre ait kontrol sistemi blok diyagramı.

$$e_f = \left(\frac{k_{pf}}{k_e}\right)^{-1} \left[M_x^{-1}(\theta) (J^{-T} \cdot \tau_e - f_d - V_x(\theta, \dot{\theta}) - G_x(\theta)) + k_{vf} \dot{x} \right] \quad (3.61)$$

(3.61) denklemindeki modelimize ait değerler aşağıdaki gibidir [4] .
 τ_e , robot manipulatör mafsalında meydana gelen moment ifadesi,

$$\tau_e = \begin{bmatrix} m_2 \ell_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 \ell_1 \ell_2 C_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + (m_1 + m_2) \ell_1^2 \ddot{\theta}_1 - m_2 \ell_1 \ell_2 S_2 \dot{\theta}_1^2 - \\ 2m_2 \ell_1 \ell_2 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_2 \ell_2 g C_{12} + (m_1 + m_2) \ell_1 g C_1 \\ m_2 \ell_1 \ell_2 C_2 \ddot{\theta}_1 + m_2 \ell_1 \ell_2 S_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 \ell_2 g C_{12} + m_2 \ell_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

Robot manipulatöre ait Jacobian transpozenin inversi,

$$J^{-T} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\ell_1 S_2} & -\frac{\ell_1 C_2 + \ell_2}{\ell_1 \ell_2 S_2} \\ 0 & \frac{1}{\ell_2} \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

Manipulatörün kartezyen koordinatta hız matrisi,

$$\underline{v}_x(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -(m_2 \ell_1 C_2 + m_2 \ell_2) \dot{\theta}_1^2 - m_2 \ell_2 \dot{\theta}_2^2 - (2m_2 \ell_2 + m_2 \ell_1 C_2 + m_1 \ell_1 C_2 / S_2^2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ m_2 \ell_1 S_2 \dot{\theta}_1^2 + \ell_1 m_2 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

Manipulatörün kartezyen koordinatta ağırlık matrisi,

$$\underline{G}_x(\theta) = \begin{bmatrix} m_1 g \frac{C_1}{S_2} + m_2 g S_{12} \\ m_2 g C_{12} \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Manipulatörün robot ele uygulaması istenen kuvvet matrisi,

$$\underline{f}_d = \begin{bmatrix} f_{d_1} \\ f_{d_2} \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Manipulatörün kartezyen koordinatta kütle matrisin inversi,

$$\underline{M}_x^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_2 + \frac{m_1}{s_2^2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2} \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Kontrol sisteminin hız kazancı,

$$\underline{K}_{vf} = \begin{bmatrix} K_{vf_1} & 0 \\ 0 & K_{vf_2} \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

Robot manipulatörde pozisyon kazancının çevre rijitliğine oranı,

$$K_{pf}/k_e = K_{pe} ,$$

$$(\underline{K}_{pe})^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_{pe_1}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_{pe_2}} \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

Robot manipulatörün kartezyen koordinatta hız ifadesi,

$$\underline{\dot{x}} = \underline{J}(\theta) \underline{\dot{\theta}} \quad (3.70)$$

Manipulatör Jacobian matrisi,

$$\underline{J}(\theta) = \begin{bmatrix} l_1 S_2 & 0 \\ l_1 C_2 + l_2 & l_2 \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

Robot manipulatöre ait açısal hız matrisi,

$$\underline{\dot{\theta}} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

$$\underline{\dot{x}} = \begin{bmatrix} l_1 S_2 & 0 \\ l_1 C_2 + l_2 & l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 S_2 \dot{\theta}_1 \\ (l_1 C_2 + l_2) \dot{\theta}_1 + l_2 \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Yukarıda verilen manipulatörümüze ait değerleri (3.71) denkleminde yerine koymak suretiyle aradığımız kuvvet hatasını (e_f) ifadesini bulabiliriz. Burada, e_f ifadesi sütun matrisi şeklinde olup matrisin birinci satırı 1 nolu mafsaldaki hatayı, matrisin ikinci satırı ise 2 nolu mafsaldaki hatayı ifade etmektedir.

$$e_f = \begin{bmatrix} 1/K_{pe_1} \{ 1/m_2 + (m_1/S_2^2) [\tau_1 / (\ell_1 S_2) - (\ell_1 C_2 + \ell_2) / (\ell_1 \ell_2 S_2) \tau_2 - f_{d1} + (m_2 \ell_1 C_2 + m_2 \ell_2) \dot{\theta}_1^2 \\ + m_2 \ell_2 \dot{\theta}_2^2 + (2m_2 \ell_2 + m_2 \ell_1 C_2 + m_1 \ell_1 (C_2/S_2^2)) \theta_1 \dot{\theta}_2 - m_1 g (C_1/S_2) - m_2 g S_{12}] + K_{vf_1} \ell_1 S_2 \dot{\theta}_1 \} \\ 1/K_{pe_2} [\tau_2 / (m_2 \ell_2) - f_{d2} / m_2 - \ell_1 S_2 \dot{\theta}_1^2 + \ell_1 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - g C_{12} + K_{vf_2} \theta_1 (\ell_1 C_2 + \ell_2) + K_{vf_2} \ell_2 \dot{\theta}_2] \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

(3.74) denkleminde 1 nolu mafsaldaki kuvvet hatası,

$$e_{f_1} = 1/K_{pe_1} \{ 1/m_2 + (m_1/S_2^2) [\tau_1 / \ell_1 S_2 - (\ell_1 C_2 + \ell_2) / (\ell_1 \ell_2 S_2) \tau_2 - f_{d1} \\ + (m_2 \ell_1 C_2 + m_2 \ell_2) \dot{\theta}_1^2 + m_2 \ell_2 \dot{\theta}_2^2 + (2m_2 \ell_2 + m_2 \ell_1 C_2 + m_1 \ell_1 (C_2/S_2^2)) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ - m_1 g (C_1/S_2) - m_2 g S_{12}] + K_{vf_1} \ell_1 S_2 \dot{\theta}_1 \} \quad (3.75)$$

2 nolu mafsaldaki kuvvet hatası,

$$e_{f_2} = 1/K_{pe_2} [\tau_2 / (m_2 \ell_2) - f_{d2} / m_2 - \ell_1 S_2 \dot{\theta}_1^2 + \ell_1 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - g C_{12} + K_{vf_2} \dot{\theta}_1 (\ell_1 C_2 + \ell_2) \\ + K_{vf_2} \ell_2 \dot{\theta}_2] \quad (3.76)$$

Yukarıdaki (3.75) ve (3.76) denklemlerindeki kuvvet hatası,

$$e_f = f_d - f_e \quad (3.77)$$

dir. Burada ;

f_d : Robot kolun robot ele uygulaması istenen kuvvet değeri,

f_e : Robot kolun robot ele uyguladığı gerçek kuvvet değeridir.

f_d kuvveti robot kolda istenen kuvvet değeri olduğundan büyüklük olarak bilinen değerdir, f_e değerinde hesaplanan e_f ifadesinden bulabiliriz.

1 nolu robot kol mafsasında meydana gelen f_e kuvveti ;

$$e_{f1} = f_{d1} - f_{e1} \longrightarrow f_{e1} = f_{d1} - e_{f1} \quad (3.78)$$

$$\begin{aligned} f_{e1} = f_{d1} - 1/K_{pe1} \{ & 1/m_2 + (m_1/S_2^2) [\tau_1 / (\ell_1 S_2) - (\ell_1 C_2 \ell_2) / (\ell_1 \ell_2 S_2) \tau_2 - f_{d1} \\ & + (m_2 \ell_1 C_2 + m_2 \ell_2) \dot{\theta}_1^2 + m_2 \ell_2 \dot{\theta}_2^2 + (2m_2 \ell_2 + m_2 \ell_1 C_2 + m_1 \ell_1 (C_2/S_2^2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_1 g (C_1/S_2) \\ & - m_2 g S_{12}] + K_{vf1} \ell_1 S_2 \dot{\theta}_1 \} \end{aligned} \quad (3.79)$$

2 nolu kol mafsasında meydana gelen f_e kuvveti ise ;

$$e_{f2} = f_{d2} - f_{e2} \longrightarrow f_{e2} = f_{d2} - e_{f2} \quad (3.80)$$

$$\begin{aligned} f_{e2} = f_{d2} - 1/K_{pe2} [& \tau_2 / (m_2 \ell_2) - (f_{d2}/m_2) - \ell_1 S_2 \dot{\theta}_1^2 + \ell_1 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - g C_{12} + K_{vf2} \dot{\theta}_1 \\ & (\ell_1 C_2 + \ell_2) + K_{vf2} \ell_2 \dot{\theta}_2] \end{aligned} \quad (3.81)$$

1 ve 2 nolu kollara ait f_e kuvvetini zamana ve sistem parametrelerine bağlı olarak hesaplayan ve istenen f_d kuvveti ile mukayese edip, mafsallardaki kuvvet hatasını veren bir bilgisayar programı hazırlanmış olup bu program EK-3'de verilmiştir.

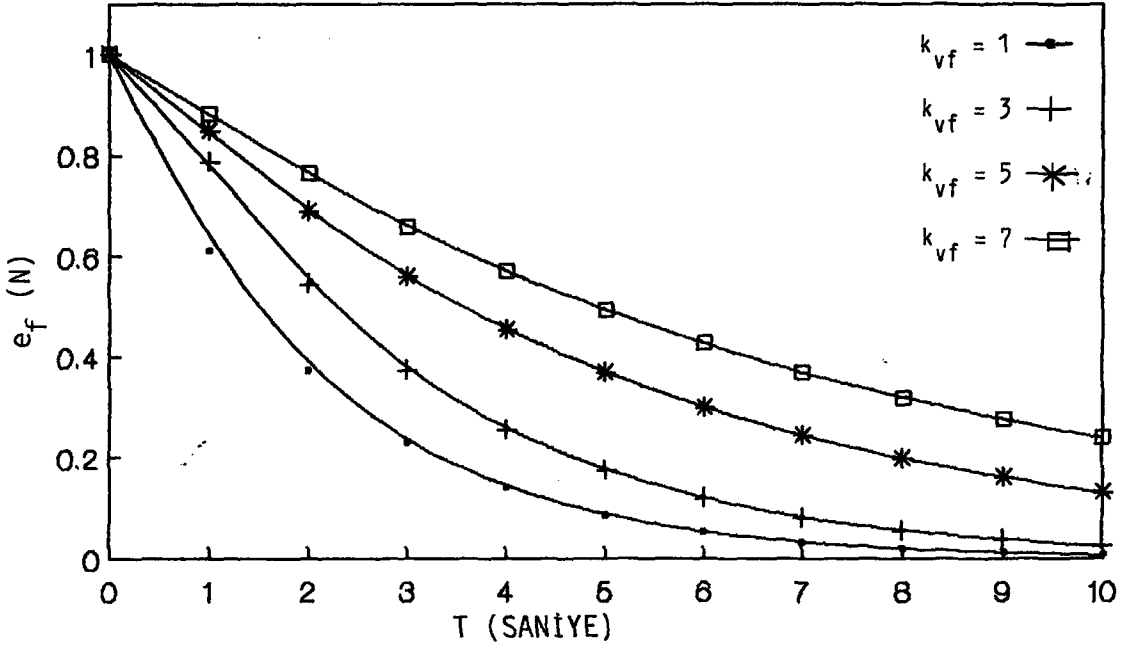
B Ö L Ü M - IV

SONUÇLAR VE İRDELEME

4.1. TEK KÜTLELİ SİSTEMDE KUVVET KONTROL PARAMETRELERİ

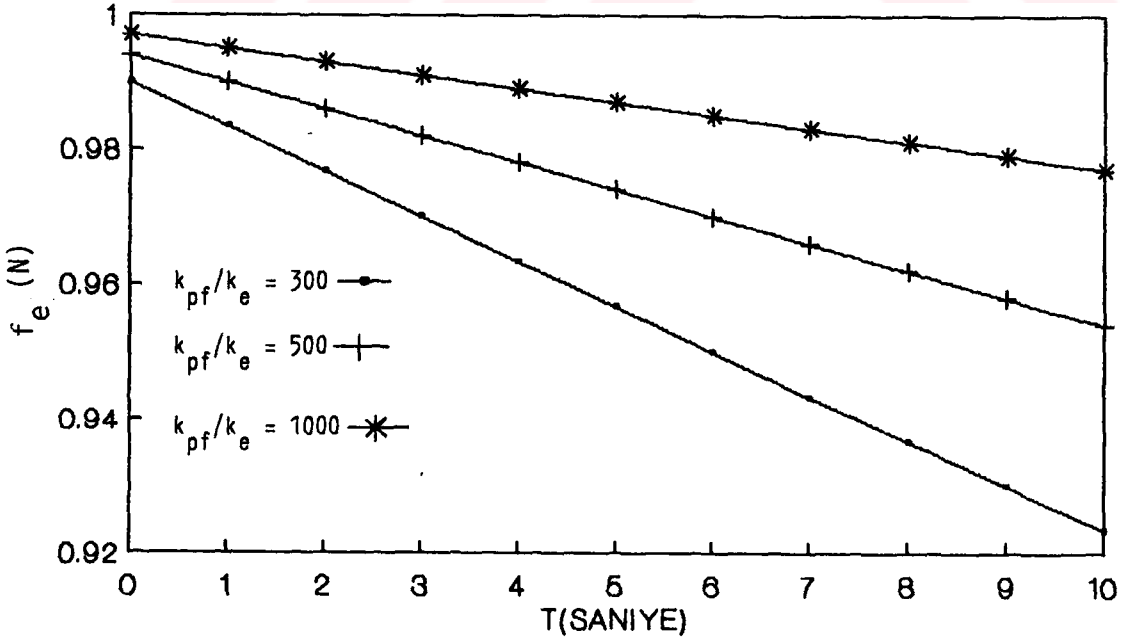
Tek kütleli, tek serbestlik derecesine sahip robot manipulatör için (m) kütlesi 2 kg, çevre rijitliği $k_e = 1$ ve robot manipulatörün $x = t + t^2$ şeklinde zamana bağlı bir yörünge izlediğini kabul ederek, manipulatörün çevreye uygulaması istenen f_d kuvvetini kontrol sistemine referans değer olarak girmek suretiyle manipulatörün gerçekte çevreye uyguladığı f_e kuvvetinin tayinine çalışılmıştır. Ayrıca manipulatörün çevreye uygulaması istenen f_d kuvveti ile çevreye uygulanan kuvvet f_e arasındaki kuvvet hatası model parametrelerine ve servo değerlerine bağlı olarak hesaplanmaya çalışılmıştır. Burada kuvvet hatasını, zamana bağlı olarak sifıra yaklaştıran kontrol hız kazancı (k_{vf}) değerleri araştırılmış olup, bu değer aşağıdaki şekilde görüleceği gibi k_{vf} 'in azalan değerleri ile birlikte hızla sifıra yaklaşmaktadır.

Şekil-4.1'den görüleceği gibi hata fonksiyonu özellikle ilk bir kaç saniye içinde hızla azalmakta ve belirli bir değerden sonra yaklaşık olarak çok küçük bir değerde sabit kalmaktadır. Hata tamamen sıfır olmamakla birlikte özellikle $k_{vf} = 1$ değerinde yaklaşık olarak yeterli sonuç sağlanmaktadır.



Şekil-4.1 : Hata fonksiyonunun farklı kontrol hız kazançları için değişimi.

Ayrıca, pozisyon kontrol kazancının, oldukça yüksek değer olarak kabul edilen çevre rijitliği (k_e) değerine göre bağlı değerini gösteren (k_{pf}/k_e) oranının değişik değerlerinin, uygulanan (f_e) kuvvetinde istenen değere göre meydana getirdiği sapmalar Şekil-4.2'de gösterilmiştir.



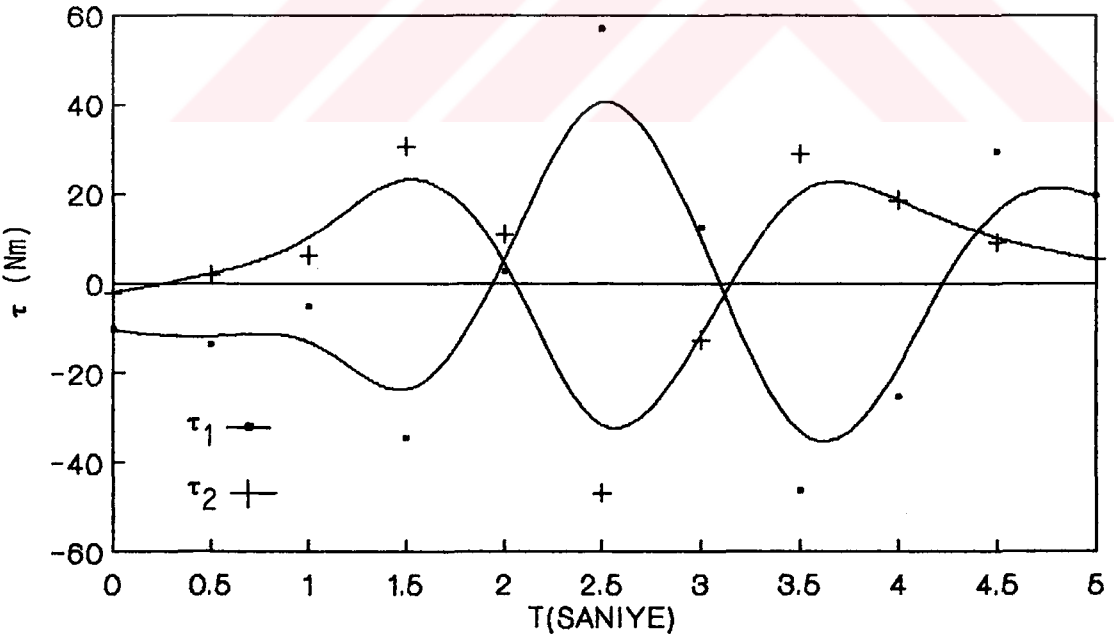
Şekil-4.2 : Kuvvet hatasının değişik kontrol kazançları için zamana bağlı değişimi.

(k_{pf}/k_e) oranı için kuvvet sapması değerini oldukça düşük mertebelerde tutan 300, 500 ve 1000 gibi yüksek değerler kullanılmıştır. Böylelikle, servo kontrol mekanizmasında (k_{pf}/k_e) kontrol kazancı parametresi için 1000 gibi yüksek bir değer kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

4.2. İKİ SERBESTLİK DERECELİ MANİPULATÖRÜN KUVVET KONTROL SONUÇLARI

İki kütleli, iki serbestlik dereceli robot manipulatörde 1 nolu kol için $m_1 = 2$ kg, $\ell_1 = 0.5$ m ve 2 nolu kol için ise $m_2 = 1$ kg, $\ell_2 = 0.4$ m olarak seçmek suretiyle 1 ve 2 nolu kol mafsalları için uygulanması gereken moment değerini (3.57) ve (3.58) denklemlerinden tayin edilmiştir. (3.57) ve (3.58) denklemlerindeki θ_1 ve θ_2 açısal pozisyonu, hızı ve ivmesi Bölüm-3.2.2.'de hesaplanmıştır.

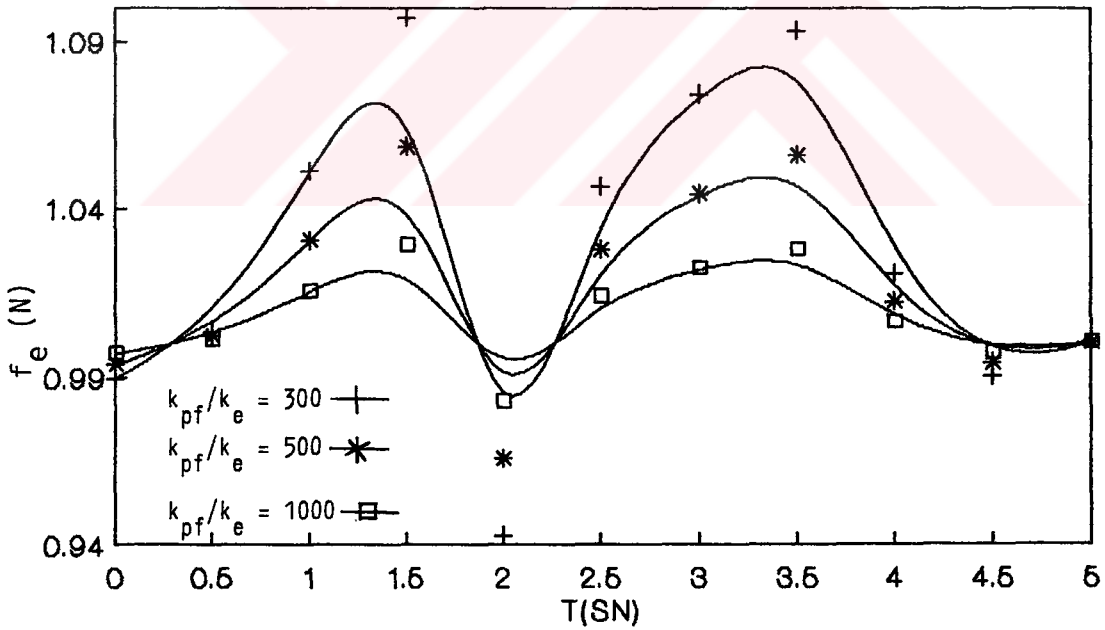
1 ve 2 nolu kol mafsallarına uygulanması gereken momentin zamana bağlı değişimi Şekil-4.3'de görüldüğü gibidir.



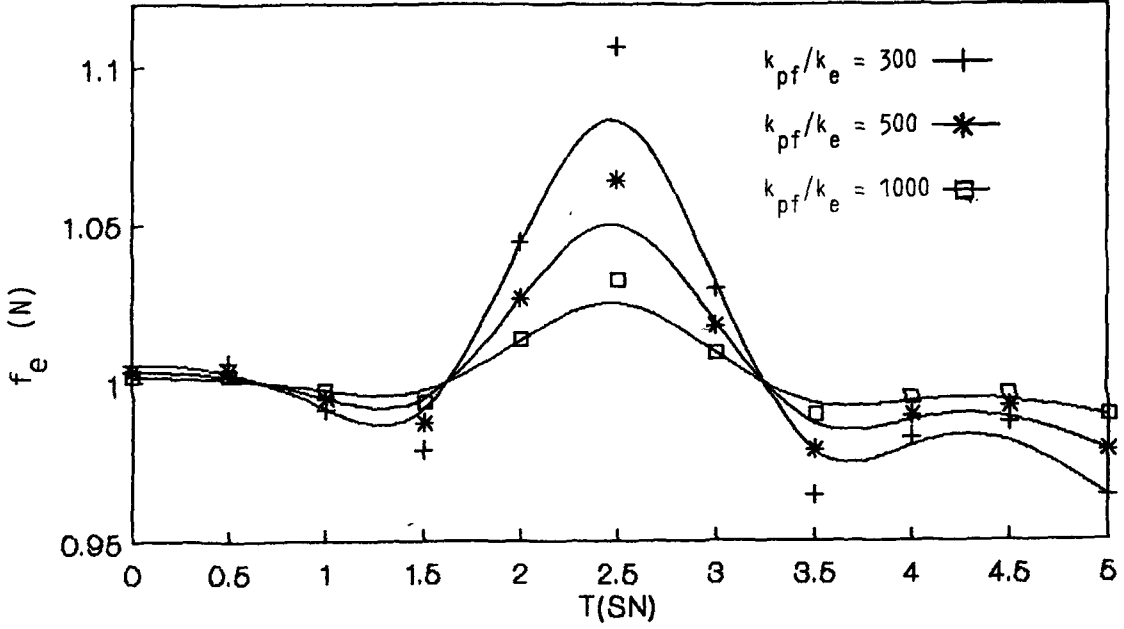
Şekil-4.3 : Mafsal momentlerinin zamana bağlı değişimi.

Şekil-4.3'den görüldüğü gibi, mafsallara uygulanması gereken moment değeri, kollardaki meydana gelen ataleti ve açısal ivmenin oluşturduğu momentleri karşılamalıdır. (3.57) ve (3.58) denklemlerinden de görüleceği gibi her iki mafsal momentide, iki uzva ait kütle, açısal pozisyon, hız ve açısal ivme gibi parametrelerle etkilenmekte olup, kütle faktörleri dikkate alınmaz ise en büyük etkiye sahip kinematik parametre açısal ivmelerdir. Şekil-3.9'dan görüleceği gibi birinci uzvun açısal ivmesinin, her iki mafsal momenti üzerinde büyük etkisi olacaktır. Çünkü, ikinci uzvun açısal ivme parametresi değerine göre belirgin şekilde küçük değerlerde kalmaktadır.

Mafsallara uygulanması gereken τ_1 ve τ_2 momentlerine bağlı olarak 1 ve 2 nolu kollardaki f_e kuvvetinin zamana bağlı değişimleri, 3 ayrı (k_{pf}/k_e) değerleri (300, 500, 1000) için incelenmiş ve sonuçlar sırasıyla Şekil-4.4 ve Şekil-4.5'de gösterilmiştir.



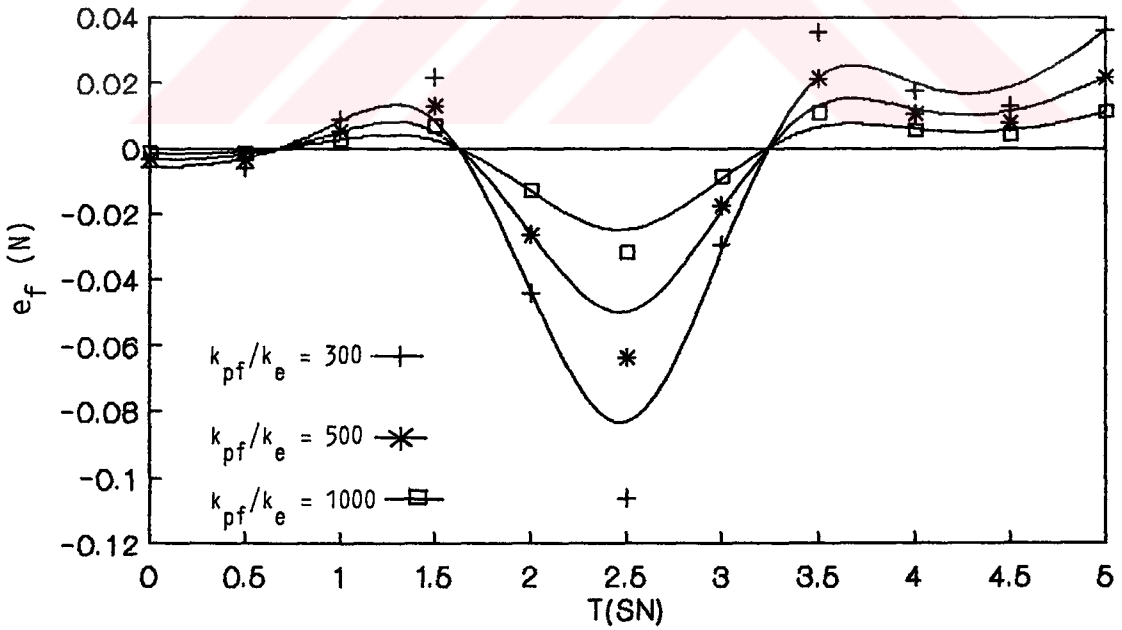
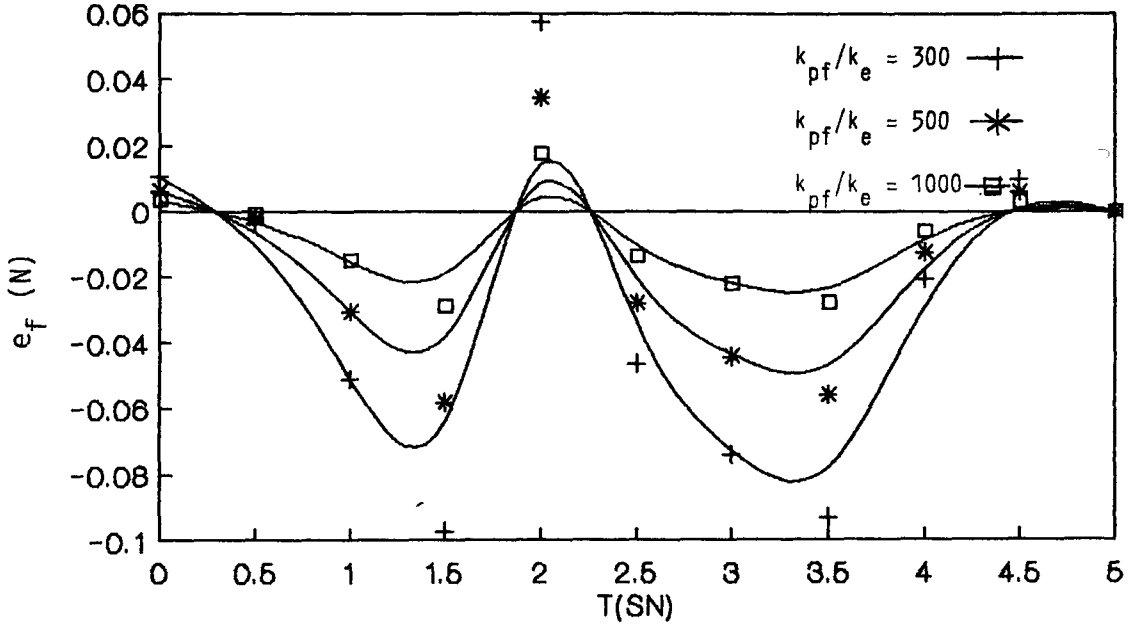
Şekil-4.4 : 1 nolu koldaki f_e kuvvetinin farklı k_{pf}/k_e değerlerinde hareket süresince değişimi.



Şekil-4.5 : 2 nolu koldaki f_e kuvvetinin farklı kontrol parametreleri için değişimi.

Özellikle 1 nolu kol kuvveti açısal ivmenin değişimine paralellik gösterecek şekilde bir değişim karakteri ortaya koymaktadır. İvmenin sıfıra yaklaştığı bölgelerde söz konusu kuvvet değeride yaklaşık minimum değerlere ulaşmaktadır. 2 nci kol kuvveti ise aynı aralıkta ataletin etkisinin azalması nedeniyle maksimum değerlere çıkmaktadır. Bunu izleyen aralıkta ise ilk mafsalları moment ve dolayısıyla kuvvet değerleri ivmedeki artışa paralel olarak yeniden artmakta ve hareketin bitiminde istenilen değere ulaşmaktadır. İkinci uzuv kuvveti ise belirli bir andan sonra yaklaşık olarak istenilen değer civarında sabit kalmaktadır.

Robot manipulatör tarafından uygulanan kuvvet ile referans değer arasındaki hatanın değişik kontrol parametreleri için aldığı değerlerin her iki kol mafsallarındaki değişim karakterleri Şekil-4.6 ve Şekil-4.7'de özetlenmiştir. Söz konusu (k_{pf}/k_e) değerleri, kuvvet için yapılan incelemede olduğu gibi 300, 500 ve 1000 olarak seçilmiştir.



Hata fonksiyonunda, referans değer sabit bir değer alındığı için kuvvet fonksiyonlarının değişimine benzer bir karakter gösterir. Kuvvet fonksiyonlarında belirtildiği gibi birinci mafsalsal için hata fonksiyonu hareket bitiminde sifira yaklaşıırken, ikinci mafsalsal hata fonksiyonu küçükde olsa sapmalar göstererek sifirdan farklı değerler almaktadır.

4.3. İRDELEME SONUÇLARI

Tek kütleli, tek serbestlik dereceli ve iki kütleli iki serbestlik derecesine sahip robot manipulatörlerde, çevreye uygulanan f_e kuvveti ile referans kuvvet f_d arasındaki kuvvet hatası e_f , (k_{pf}/k_e) 'nin artan değerlerinde azalmakta olup, özellikle 1000 değerinde kuvvet hatası çok küçük bir sapma göstermektedir. Ayrıca kuvvet hatası, servo kontrol hız kazancı $k_{vf} = 1$ değerinde hızla sifira yaklaşımaktadır. Ayrıca çevre rijitliği k_e 'nin pratikte yüksek değer olarak seçilmesi uygun olan bir değer olmakla birlikte, çevre rijitliği (k_e) kuvvet hatasına fazla bir etkisi yoktur. Bu da göstermektedirki, servo kontrol kazancı (k_{pf}) 'nin çevre rijitliğine göre artan bağıl değerleri, uygun ve optimum değerler olmaktadır. Orantı kontrolde, orantı kazancı (k_{pf}) 'in artan değerleri, otomatik kontrol teorisine göre hatayı azaltan bir büyüklüktür ve yapılan çalışmada da bu doğrultuda sonuçlar elde edilmiştir.

Özellikle 1 nolu mafsalsalda kuvvet hatası sifir olurken, 2 nolu mafsalsalda kuvvet hatasında bir miktar sapma görülmektedir. Bu da model ve gerçek sistem parametrelerinin farklılığı, bozucu tesirlerin tam, gerçek değerleriyle temsil edilememesi veya tamamen belirlenememesinden ileri gelmektedir.

Robot kol mekanizması her bir mafsalsalda birbirinden bağımsız olarak tahrik edilmekle birlikte, kinematik ve dinamik denklemler uzuvların birbirlerine göre bağıl hareketleri esas alınarak yazıldığı için temel tahrik elemanı olarak kabul edilebilecek birinci uzvun hız ve ivmesi gibi kinematik parametreler, diğer uzuvların dinamik dengesine ve dolayısıyla mafsallarda uygulanacak tahrik momenti değerlerini önemli oranda etkilerler.

K A Y N A K L A R

1. Scheinman, V., "Design of a Computer Controlled Manipulator", M.S. Thesis, Mechanical Engineering Dept., Stanford University, USA, 1969.
2. Mason, M., "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", M.S. Thesis, MIT AI Laboratory, USA, May 1978.
3. Raibert, M., and Craig, J., "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, USA, June 1981.
4. Craig, J., John, "Introduction to Robotics Mechanics and Control", Stanford University, USA, 1986.
5. Seering, P., and Eppinger, D., "The Dynamics of Robot Force Control", Artificial Intelligence Laboratory Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 1987.
6. Khatib, O., "The Operational Space Formulation in Robot Manipulator Control", 15th ISIR, Tokyo, Japan, September 1985.
7. Whitney, D., "Force Feedback Control of Manipulator in Cartesian Coordinates", 19th IEEE Conference on Decision and Control, December, 1980
8. Salisbury, J.K., and Craig, J., "Articulated Hands : Force Control and Kinematic Issues", International Journal of Robotics Research, Vol.1, Number 1, 1981.
9. Drake, S., "Using Compliance in Lieu of Sensory Feedback for Automatic Assembly", Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering Dept., MIT, September 1977.
10. Güzelkaya, M., Bir, A., "Adaptif bir Robot Kontrol Algoritması", Elektrik Mühendisliği III. Ulusal Kongresi, İTÜ, İstanbul, 1989.

EK-1

```

WRITE(*,*) 'FD M KE A B KPORAN KVF LERI SIRAYLA GIR'
READ(*,*) FD, AM, AKE, A, B, AKPORAN, AKVF
WRITE(*,*) 'KT1 VE KT2 YI GIR'
READ(*,*) KT1, KT2
EPS=0.1
WRITE(8,6) FD, AM, AKE, A, B, AKPORAN, AKVF
WRITE(8,*) '*****'
6  FORMAT(7F6.2)
   DO 20 I=KT1,KT2
   X=A*I+B*I**2
   XU=A+2*B*I
   FS=AM*2*B
50  FE=((FD-FS+AM*AKPORAN*FD-AM*AKVF*XU)/(1+AM*AKPORAN))
   IF (ABS(FD-FE).LE.EPS) GOTO 30
   IF (FE-FD) 1,2,2
1  AKVF=AKVF-.01
   GOTO 50
2  AKVF=AKVF+.01
   GOTO 50
30  WRITE(8,5) FE, XU, AKVF, I
   5  FORMAT(3F10.5, I4)
20  CONTINUE
   STOP
   END

```

EK-2

```

WRITE(*,*) 'M1 M2 L1 L2 G SIRASI ILE GIR'
READ(*,*)D1,D2,A1,A2,G
WRITE(2,*)' T T1 T1U T1UU T2 T2U
$ T2UU TO1 TO2'
WRITE(2,*)'=====
$=====
DO 10 I=0,10
T=I/2.
T1=80-6*T**2+0.8*T**3
T1U=-12*T+2.4*T**2
T1UU=-12+4.8*T
T2=10-1.2*T**2+0.16*T**3
T2U=-2.4*T+0.48*T**2
T2UU=-2.4+0.96*T
TO1=D2*A2**2*(T1UU+T2UU)+D2*A1*A2*COS(T2)*(2*T1UU+T2UU)+(D1+D2)*
$A1**2*T1UU-D2*A1*A2*SIN(T2)*T1U**2-2*D2*A1*A2*SIN(T2)*T1U*T2U+D2*
$D2*A2*G*COS(T1+T2)+(D1+D2)*A1*G*COS(T1)
TO2=D2*A1*A2*COS(T2)*T1UU+D2*A1*A2*SIN(T2)*T1U**2+D2*A2*G*
$COS(T1+T2)+D2*A2**2*(T1UU+T2UU)
WRITE(2,3)T,T1,T1U,T1UU,T2,T2U,T2UU,TO1,TO2
3 FORMAT(2(1X,F5.2),7(1X,F9.4))
10 CONTINUE
STOP
END

```

EK-3

```

WRITE(*,*) 'M1,M2,L1,L2,G,FD1,FD2,KV1,KV2,KPE1,KPE2 SIRASIYLA GIR'
READ(*,*)D1,D2,A1,A2,G,FD1,FD2,AKV1,AKV2,AKPE1,AKPE2
DO 10 I=0,10
T=I/2.
T1=80-6*T**2+0.8*T**3
T1U=-12*T+2.4*T**2
T1UU=-12+4.8*T
T2=10-1.2*T**2+0.16*T**3
T2U=-2.4*T+0.48*T**2
T2UU=-2.4+0.96*T
TO1=D2*A2**2*(T1UU+T2UU)+D2*A1*A2*COS(T2)*(2*T1UU+T2UU)+(D1+D2)*
*A1**2*T1UU-D2*A1*A2*SIN(T2)*T1U**2-2*D2*A1*A2*SIN(T2)*T1U*T2U+D2*
*D2*A2*G*COS(T1+T2)+(D1+D2)*A1*G*COS(T1)
TO2=D2*A1*A2*COS(T2)*T1UU+D2*A1*A2*SIN(T2)*T1U**2+D2*A2*G*
*COS(T1+T2)+D2*A2**2*(T1UU+T2UU)
C2=COS(T2)
S2=SIN(T2)
S12=SIN(T1+T2)
C12=COS(T1+T2)
S1=SIN(T1)
C1=COS(T1)
AA=A1*S2
BB=A2*D2
CC=A1*C2
DD=T1U*T2U
EE=2*BB+D2*CC+(D1*CC)/S2**2
FF=TO2*((CC+A2)/(AA*A2))
HH=S2**2/(D2*S2**2+D1)
TT1=TO1/AA
TT2=TO2/BB
MM1=FD2/D2
W=(D2*CC+BB)*T1U**2
W1=D1*G*C1/S2
W2=D2*G*S12
WW=(CC+A2)*T1U
TEB=BB*T2U**2
ATE=AA*T1U**2
TEL=A2*T2U
DA=AA*DD
DE=EE*DD
TW=W-W1-W2
FE1=FD1-(HH*(TT1-FF-FD1+TW+TEB+DE)+AA*T1U*AKV1)/AKPE1
FE2=FD2-(TT2-MM1-ATE+DA-G*C12+WW*AKV2+TEL*AKV2)/AKPE2
E1=FD1-FE1
E2=FD2-FE2
WRITE(2,3)T,FE1,E1,FE2,E2
3 FORMAT(1(1X,F9.5),4(1X,F9.5))
0 CONTINUE
STOP
END

```

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi