

39955

**İKİ SERBESTLİKLI DÜZLEMSEL MANİPULATÖRLERİN
ORTAK MANİPÜLASYONU**

**TEZİ HAZIRLAYAN
MAK. YÜK. MÜH. HÜRVET SARIKAYA**

**TEZ YÖNETİCİSİ
PROF. DR. İBRAHİM UZMAY**

**ERÇİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ'NE
MAKİNA ANABİLİM DALI'NDA DOKTORA TEZİ
OLARAK SUNULMUŞTUR.**

**AĞUSTOS - 1995
KAYSERİ**

Erciyes Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makina Anabilim Dalında
Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir. 20/11/1995

Başkan :

Prof. Dr. Ibrahim Uzun

Uye :

Y. Doç. Dr. Mehmet Eroğlu

Uye :

Y. Doç. Dr. Mustafa Yılmaz

ONAY :

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

17 4 ARALIK 1995



Ö Z G E Ç M İ Ş

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 Mühendisliği Bölümünden 1987 yılında mezun oldu.Bir yıl serbest Mühendis olarak çalıştı.Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde 1988 yılında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı.Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Makina Anabilim Dalında Yüksek Lisansa 1988 de başlayıp, 1990' da tamamladı. Ekim 1990'da ise, aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsünde Makina Anabilim Dalında Doktora öğretimine başladı.

T E Ş E K K ü R

Bana bu konuda çalışma imkanı sağlayan, çalışmalarım süresince büyük ilgi ve alaka ile destekleyen, sürekli bilgi ve yardımlarından faydalandığım değerli hocam Prof.Dr.İbrahim UZMAY bey' e en içten saygılarımı sunarım.

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

Hürvet SARIKAYA

Ö Z E T

Çeşitli üretim alanlarındaki otomasyonun geliştirilmesi, yüksek performans ve gerekli esnekliği sağlayabilen çözümlerin bulunmasını gerektirmektedir. Bu amaç doğrultusunda, birden fazla robot'un ortak çalışmalarının geliştirilmesiyle ilgili bir çok çalışmalar yapılmıştır. Robotik sistemlerin uygulama alanlarından biri de, iş parçasının çok ağır olması veya geometrik özelliğinden dolayı, bir robotun yetersiz kaldığı durumlarda birden fazla robot manipülatörlerin ortak amaca uygun bir şekilde kullanılmasıdır.

Bu çalışmada, ortak çalışan iki serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan iki robot manipülatörle cisim arasında bağıl hareket olmadığı kabul edilmiştir. Ortak çalışan robot manipülatörlerle cismin tanımlı yörünge boyunca yapmış olduğu hareketin, Newton-Euler dinamik formülasyonu ile kinematik analizi gerçekleştirildi. Robot manipülatörlerle cisim arasındaki etkileşim ifadelerinden hareketle, ortak robotik manipülasyonun dinamik modeli kuruldu.

Ortak robotik manipülasyon için geliştirilen dinamik model; robot manipülatörlerle cismin atalet momenti, coriolis ve merkezkaç kuvvetleriyle, ağırlık kuvvetleri ve eklemlere uygulanması gereken tork ifadelerinden meydana gelmektedir. Ortak manipülasyonda yer alan cismin istenen yörüngede hareketini hassas olarak gerçekleştirebilmesi için, manipülatör eklemlerine ait açısal konum ve açısal hız değerleri, hesaplanmış tork tekniği yardımı ile model esaslı PD kontrol ve model esaslı adaptif kontrol tekniğine göre kontrol edililerek, açısal konum ve açısal hız hata değerlerini hareket süresince minimum yapacak kontrol parametreleri araştırılmıştır.

S U M M A R Y

Developing automation in various production systems requires the solution satisfying high performance and flexibility. For this purpose several studies have been carried out for developing the cooperative robotic manipulation. One of the application areas of robotic systems is also the use of robot manipulators together for the same aim in the case of the workpiece is very heavy or has irregular geometrical dimensions.

In this study it is assumed that there is no relative motion between the end-effectors and the object being handled. Kinematic analysis of the motion concerning handling the object along a definite path by the cooperative robotic manipulation has been carried out using Newton-Euler dynamic formulation. Dynamic model of the cooperative manipulation has been established from dynamic equilibrium considerations between the robot manipulators and the object.

Dynamic model developed for cooperative manipulation has the terms related to the moments of inertia of the robot manipulators and object, centrifugal and coriolis forces, gravitational forces and the torque to be applied at the joints. In order to handle the object along a definite path by the cooperative robotic manipulation, angular position and velocity values belonging to manipulator joints are controlled by the model based PD control designed using the calculated torque technique and the adaptive control based on reference model. Control parameters which minimises the angular position and velocity error functions during the motion are investigated.

S E M B O L L E R

- m_i : Robot manipülatör i. uzuv kütlesi,
 m_o : Cismin kütlesi,
 I_o : Cimin kütleesel atalet matrisi,
 l_i : Robot manipülatör i. uzuv boyutu,
 P : Robot el konum vektörü,
 $[R]$: Koordinat eksen takımları arasındaki bağıl ötelemeyi ve dönmeyi tanımlayan homojen transformasyon matrisi,
 θ_i : Robot manipülatör i. eklem açısı,
 $\dot{\theta}_i$: Robot manipülatör i. eklem açısal hızı,
 $\ddot{\theta}_i$: Robot manipülatör i. eklem açısal ivmesi,
 F_i : i. manipülatör tarafından cisme uygulanan kuvvet vek.,
 M_i : i. manipülatör tarafından cisme uygulanan tork vek.,
 ω_o : Cismin açısal hızı,
 α_o : Cismin açısal ivmesi,
 a_o : Cismin lineer ivmesi,
 g : Verilen mutlak sistemdeki yerçekim ivmesi,
 $J(\theta)$: Jacobian matrisi,
 $H(\theta)$: $(n \times n)$ boyutunda, robot manipülatör atalet matrisi,
 $h(\theta, \dot{\theta})$: $(n \times 1)$ boyutunda, robot manipülatör coriolis, merkezkaç ve ağırlık kuvvetleri matrisi,
 $X(\theta)$: Ortak robotik manipülasyonda yer alan, robot manipülatörlerle cismin $(n \times n)$ boyutunda atalet matrisi,
 $V(\theta, \dot{\theta})$: Ortak robotik manipülasyonda yer alan, robot manipülatörlere ait $(n \times 1)$ boyutunda coriolis ve merkezkaç kuvvetleri matrisi,
 $G(\theta)$: Ortak robotik manipülasyonda yer alan, robot manipülatörlerle cismin $(n \times 1)$ boyutunda ağırlık kuvveti mat.,
 P_i : Ortak robotik manipülasyonda, $(n \times 1)$ boyutunda eklem torkları matrisi,
 q_1 : $(n \times 1)$ boyutunda genelleştirilmiş eklem değişkeni,
 e : Robot manipülatör eklem açıları konum hata fonksiyonu,
 $N-E$: Newton-Euler notasyonu,
 $D-H$: Denavit-Hartenberg notasyonu,

İ Ç İ N D E K İ L E R

Sayfa

BÖLÜM-I

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

BÖLÜM-II

2. ORTAK ROBOTİK MANİPULASYON	3
2.1. GİRİŞ	3
2.2. ORTAK ROBOTİK MANİPULASYON SİSTEMLERİNİN DİZAYN KRİTERLERİ	5
2.3. KOORDİNASYON KURALLARI	5
2.4. KONTROL YÖNTEMLERİ	6
2.5. KARŞILAŞMALARIN ÖNLENMESİ	7
2.6. İLETİŞİM YAPISI	8
2.7. İŞLEM PLANLAMASI	8
2.8. ORTAK ROBOTİK MANİPULASYONDA TEORİLER	9

BÖLÜM-III

3. SİSTEM MODELLEMESİ VE KONTROL	14
3.1. GİRİŞ	14
3.2. DÜZ KİNEMATİK	15
3.3. İNVERS KİNEMATİK	16
3.4. ORTAK ROBOTİK MANİPULASYONDA İNVERS KİNEMATİK ANALİZ	16
3.4.1. Ortak Robotik Manipülasyon Modeli	16
3.4.2. Ortak Robotik Manipülasyonda İnvers Kinematik	17
3.4.3. Yörünge Tayini	19
3.5. ORTAK ROBOTİK MANİPULASYONDA ROBOT-KOL DİNAMİĞİ	33
3.5.1. Newton-Euler (N-E) Formülasyonu	33
3.5.2. Dinamik Analiz	36

3.6. ORTAK ROBOTİK MANİPULASYONUN DİNAMİK MODELİ	45
3.6.1. Ortak Manipülasyon Parametreleri	45
3.6.2. Cismin Hareketi	46
3.6.3. Ortak Manipülasyonun Dinamik Modeli	50
3.7. KONTROL	51
3.7.1. Ortak Robotik Manipülasyonda Hesaplanmış Tork Tekniği Yardımı İle Model Esaslı PD Kontrol Uygulaması	52
3.7.2. Model Esaslı Adaptif Kontrol	55
3.7.3. Ortak Robotik Manipülasyonda Adaptif Kontrol Uygulaması	58

BÖLÜM-IV

4. SONUÇLAR VE İRDELEME	67
4.1. AÇISAL KONUMLAR	67
4.2. AÇISAL HIZLAR	70
4.3. AÇISAL İVMELER	71
4.4. ORTAK ROBOTİK MANİPULASYON DİNAMİK MODEL SONUÇLARI	73
4.5. ORTAK ROBOTİK MANİPULASYONDA HESAPLANMIŞ TORK TEKNİĞİ YARDIMI İLE MODEL ESASLI PD KONTROL SONUÇLARI	74
4.6. ORTAK ROBOTİK MANİPULASYONDA ADAPTİF KONTROL SONUÇLARI	79
4.7. İRDELEME	82

KAYNAKLAR	85
-----------	----

EKLER

EK-1	89
EK-2	92
EK-3	93
EK-4	94
EK-5	97
EK-6	99

BÖLÜM-I

GİRİŞ

1.1. KONUNUN ÖNEMİ

Robot manipülatörlerin günümüz endüstrisinde bir çok uygulama sahası mevcuttur. Bu uygulama sahalarından biri de bir robot manipülatörün iş ve çalışma ortamına göre yetersiz kalması durumunda birden fazla ortak çalışan robot manipülatörlerin kullanılmasıdır. İş parçası ağırlığı veya geometrik özelliğinden dolayı, tek bir robot manipülatör tarafından parça naklinin mümkün olmaması gibi durumlarda birden fazla robot manipülatör ortak amacı gerçekleştirmek üzere birbiriyle uyumlu tarzda kullanılabilir.

Günümüz endüstrisi gelişen teknolojiye bağlı olarak, verimliliğin artırılması ve üniform kalitede mamül üretilmesi amacıyla bilgisayar destekli otomasyona doğru kaymaktadır. Üretimin artırılması esnasında belli bir hızda tekrarlanan işlemlerin insan tarafından yerine getirilmesi veya insan sağlığının teh-

likeye girebileceği iş alanlarında, belli görevleri hassas, hızlı ve sürekli bir şekilde gerçekleştirebilecek özel makina ve sistemlere ihtiyaç doğmuştur. Bu amaç doğrultusunda, birden fazla robot manipülatörün ortak kullanımının geliştirilmesiyle; endüstri otomasyonundan, çevreye zararlı maddelerin taşınmasına, uzay çalışmalarından, denizaltı çalışmalarına ve nükleer reaktör sistemlerine kadar bir çok uygulama alanlarına yayılmıştır.

1.2. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmada, iki serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan iki robot manipülatörle, cismin tanımlı yörünge boyunca taşınması hareketinin kinematik ve dinamik parametreleri Newton-Euler dinamik formülasyonundan faydalanılarak tayin edilmeye çalışılmıştır. Ortak çalışan robot manipülatörlerle cisim arasında bağıl hareket olmadığı kabul edildi. Ortak manipülasyonun dinamik modeli; robot kollarla cismin yapmış oldukları harekette, kuvvetlerin ve momentlerin denge denklemlerinden hareketle kurulmaya çalışıldı.

Ortak manipülasyon için geliştirilen dinamik modelin; robot manipülatörlerle cismin atalet momenti, coriolis ve merkezkaç kuvvetleriyle, ağırlık kuvvetleri ve eklemlere uygulanması gereken tork/kuvvet ifadelerinden meydana geldiği görülmüştür. Ortak robotik manipülasyonda yer alan cismin, ön görülen yörüngede hareketini doğru ve hassas bir şekilde gerçekleştirebilmesi için, ortak manipülasyon sistemine hesaplanmış tork tekniği yardımı ile model esaslı PD kontrol ve model esaslı adaptif kontrol tekniği uygulanmıştır.

Kurulan dinamik modelin, tekil robot manipülatör modellerine büyük bir benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Ortak manipülasyon modelinin tekil robot manipülatör modeline göre farkı, ortak manipülasyonda cismin ve diğer robot manipülatörlerin etkilerinin ortak manipülasyon modelinde yer almasıdır. Böylelikle, tek robotlu manipülasyona göre gerek dinamik modelde gerekse uygulanan kontrol tekniklerinde ortaya temel özellikler ve farklılıklar belirlenmeye çalışılmıştır.

BÖLÜM-II

ORTAK ROBOTİK MANİPÜLASYON

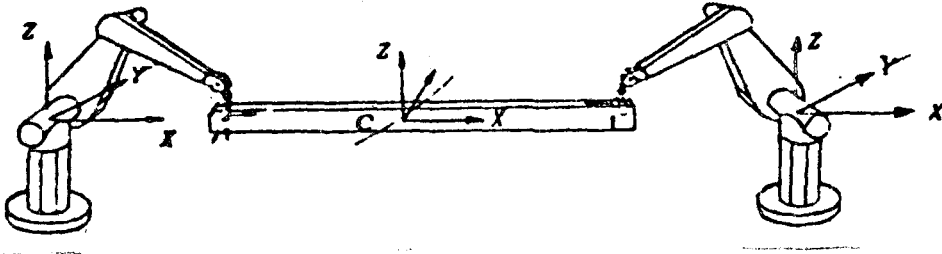
2.1. GİRİŞ

Çeşitli üretim alanlarındaki otomasyonun geliştirilmesi, yüksek iş verimi ve esnekliği sağlayabilen çözümlerin bulunmasını gerektirmektedir. Bu amaç doğrultusunda, birden fazla robot manipülatörün ortak kullanımının geliştirilmesiyle ilgili bir çok çalışmalar yapılmıştır. Bu tür sistemler; endüstri otomasyonundan, çevreye zararlı maddelerin taşınmasına, uzay çalışmalarından, denizaltı çalışmalarına ve nükleer reaktör sistemlerine kadar bir çok uygulama alanlarına yayılmıştır [1].

Birden fazla robotun ortak hareketiyle ilgili çalışmalar 10 yıldan beri sürdürülmektedir [2]. Tek bir manipülatör tarafından yapılamayan bir takım işlerin, birden fazla robotun ortak çalışmalarıyla gerçekleştirilebileceği çok uzun bir zamandan beri bilinmektedir [3]. Bu işlevler; ağır, uzun, geniş veya esnek cisimlerin taşınmalarını da içermektedir [4].

Son zamanlarda, birden fazla robotun bir arada çalışarak istenen bir takım özel görevleri yerine getirmesini sağlayan montaj birimleri ilgi odağı olmuştur [5]. Bu tür çalışmalar, önemli gelişmeye ışık tutmaktadır. Bunlardan birincisi, bazen birbirleriyle de çelişebilen farklı çalışma hareketlerinin bulunduğu montaj hatlarında azami taşıma kapasitesi, tekrarlayabilme, hassasiyet, hız vb. özelliklerin istendiği montaj birimlerinde önem kazanmaktadır. İkincisi, seri imalatların yapıldığı ve bir çok yerlerde hareket yerine kayma gerektiren montaj birimlerinde, ortak robotik manipüllerin üstün bir performans gösterdiği görülmüştür.

Robotların katkısıyla geliştirilen otomasyon, sistemlerin hem esnekliğini artırmakta hem de kapasitesinin yeniden düzenlenmesine imkan tanımaktadır. Bununla birlikte, robotların ortak kullanımı, bir takım teorik ve pratik problemlerin çözümünü de gerekli kılmaktadır. Bunlar daha çok koordinasyon, sıralama, çarpışmalar ve iletişim yapısına bağlı olarak gelişmektedir [6]. Burada, birden çok robotun bir arada kullanılmasının önemli yönleri ve olabilecek problemlere karşı geliştirilecek çözümler verilecektir. Şekil-2.1'de iki robot'un ortak manipülasyonu ile bir cismin taşınmasına ilişkin model görülmektedir [6].



Şekil-2.1 İki robot' un ortak manipülasyonu ile bir cismin taşınmasına ilişkin model [6].

2.2. ORTAK ROBOTİK MANİPULASYON SİSTEMLERİNİN DİZAYN KRİTERLERİ

Robotların ortak kullanımını içeren bir değerlendirme işlemi, bir takım alt işlemlerden meydana gelmektedir. Bu alt işlemler, bir takım temel hareket serilerine ayrılabilir. Bu açıklamalara bağlı olarak değerlendirme işlemi dört ana gruba ayırabiliriz [7].

1. Bağımsızlık,
2. Yarı bağılılık,
3. Serilik,
4. Sıkı bağılılık,

Eğer alt işlemlerde veya robotlar tarafından yapılan hareketler arasında herhangi bir kısıtlama (engelleme) yoksa bu işlemler bağımsızdır. Eğer hareketlerde bağımlılık var, fakat işlemlerde bağımsızlık var ise bu yarı bağılılık sınıfına girer. Serilikte ise, alt işlemler arasında kısıtlamalar olmaktadır. Sıkı bağımlı robotlarda ise işlemler ile hareketler arasında bağımlılık vardır.

Bu tür değerlendirmeler, genellikle robot manipülatörlerin yapısal özellikleri ve haberleşme yapıları hakkında bir takım bilgiler elde etmek için kullanılmaktadır. Yukarıda açıklanan değerlendirme işlemleri, alt işlemlerin özelliklerine göre değişir. Halbuki bu tür sistemler, sadece en olumsuz durumlarda tanımlanan işlem ve kısıtlama şartlarının yapısına bağlı olarak yapıldığında, ortak robot hareketlerinin optimizasyonunda daha yararlı olduğu görülmektedir. Bu durumda, hareketler arasındaki bağımsızlık temel alınarak değerlendirme işlemi tekrar geliştirilir [8].

2.3. KOORDİNASYON KURALLARI

Robotların ortak hareketleriyle ilgili olarak iki türlü koordinasyon tanımlanmıştır. Bunlar, noktasal ve eğrisel olarak iki türlü yörünge boyunca gerçekleşmektedir. Noktasal koordinasyonda ; yer değiştirmeler küçük aralıklarla artan noktalar boyunca koordine edilmektedir. Koordineli bir harekette, sanki her robot ayrı ayrı hareket ediyor gibi kabul edilebilir. Or-

tak hareketleri gerçekleştirebilmek için sadece, koordinasyon noktaları boyunca meydana gelen yer değiştirmeleri ve robot-el konum değerlerini doğru olarak seçmek gerekmektedir. Burada bu işlemleri hassas bir şekilde gerçekleştirebilmek için bir senkronize cihazına ihtiyaç vardır. Koordinasyon noktasındaki robotlar, kendi bulundukları pozisyonda hazır olduklarını bildiren sinyalleri merkezi kontrol organına gönderirler, karşılığında kontrol işlemi için gerekli sinyaller gönderilir. Eğer uyumlu kumanda komutları doğru zamanlarda verilebilirse koordineli hareket başarı ile elde edilmiş olur [9].

Eğrisel yörüngeli koordinasyonda, robotların izleyeceği yörüngede kinematik sınırlayıcıların önceden verilmesi gerekmektedir. Bir robotun pozisyonu, sürekli olarak diğer robotun fonksiyonudur. Sadece, kesin bir şekilde birbirlerine bağlı işlemlerde bu tür bir koordinasyon gerektirmektedir. Seri sistemler ve özellikle bağımsız sistemler için noktasal koordinasyon daha uygundur. Yarı bağlı işlemler için sıra takibi zorunludur. Bir çalışma alanında, robot manipülatörler arasında çarpışmaları engelleyebilmek için, uygun yörünge kontrolu uygulamak gereklidir.

2.4. KONTROL YÖNTEMLERİ

Birden fazla robotdan oluşan sistemlerin en basit konum veya yörünge kontrolü, robotların ortak hareketlerini kontrol için sadece bir kontrol organının kullanıldığı merkezi sistemlerdir. Bu yöntemde, bir robotun çalışma alanındaki bağıl konum ve hareketleri Denavit-Hartenberg notasyonu ile ifade edilir.

İkinci bir yol ise, uyumlu çalışma sinyallerini temel alarak dağınık konumlarda yerleştirilmiş robot manipülatörlere uygulanması işlemidir. Her bir operasyon için zamanın belirlenemediği hareketlerde "hazır" ve "bekle" komutları kontrol için kullanılmaktadır. Burada bazen "bekleme noktası" kavramı kullanılır. Bu noktada kontrol edicinin hesaplaması bir süre için durur ve beklenen giriş sinyali gelinceye kadar bekler.

Üçüncü bir kontrol metodu ise; hiyerarşik yapıdır. Bu metod,

robot kontrol mekanizmalarının alt seviyelere ayrılmalarını sağlar ve sistem kontrolüne, hiyerarşik düzen içinde daha fazla bir pay verir. Bunun avantajı ise, aynı tip robot sistemlerinden faydalanmayı sağlamasıdır [10].

2.5. KARŞILAŞMALARIN ÖNLENMESİ

Robot koordinasyonunun en önemli konularından birisi, robot manipülatörlerin çalışması esnasında çarpışmasını önlemektir. Bir çok durumlarda probleme, manipülatörlerin çalışma alanı içerisinde herhangi bir hareketsiz engelin olduğu düşünülerek yaklaşılmaktadır. Bu durumda problem sadece geometrik bir özellik taşımaktadır ve gereken şart, yörünge ile engelin hacminin kesişmemesini sağlayacak bir yörüngeyi tanımlanmasıdır.

Ortak robot manipülatörlerin çalışması esnasında, çalışma alanı içerisinde engellerin yerlerinin değişmesi durumunda problem daha karmaşık bir hal almaktadır. Robot konumuna bağlı olarak, farklı durumlarla karşılaşılabilir. Bunlar, bir eksen boyunca olan hareketlerdeki çarpışmanın önlenmesi veya robotların uzaydaki üç boyutlu hareketleri sırasında çarpışmaların önlenmesi şeklinde olabilir.

Karşılaşma kontrolü; sadece aynı iş hacminde çalışan yarı bağımlı robotlar için gereklidir. Montaj otomasyonu gibi, endüstriyel alanlarda eğrisel yörünge koordinasyonu gerekmemektedir. Aslında bir robotun her an için pozisyonunun da bilinmesi de gerekli değildir. Sınırlı sayıdaki uyumlu noktalarına bağlı yaklaşık bir yörünge kontrolü yeterli olacaktır.

Karşılaşmaların önlenmesiyle ilgili olarak ilk çalışmalar, robot ana gövdesine ve robot-el uzuvlarına yakın uzuvlarda büyük ve küçük uzuvlar kullanarak robot şekillendirmesini yapan Fu ve Hsu [11] tarafından yapılmıştır. Bu metod sadece küçük uzuvların çarpışacağını gözönünde bulundurmaktadır. Bu tür uzuvlar, genellikle küçük hacimlidirler ve onları her robota eklemek için bir takım düzenli geometrilerin kullanımı iyi sonuç vermektedir.

2.6. İLETİŞİM YAPISI

İletişim yapısı iki ana yapıda tanımlanabilir,

a) Yayılı Yapı :

Bu durumda robot kontrol edicileri yatay hat boyunca birbirlerine bağlıdırlar ve sonuç olarakta düşey integrasyon ve kaynak kullanımı için merkezi bir idareye bağlanırlar.

b) Hiyerarşik Yapı :

Bu sistemde bir veya daha fazla bilgisayar tek bir kontrol ediciyle iletişim kurarlar.

Bunlardan ilki, noktasal koordinasyonlarda uygulanabilir ve bu nedenle seri ve bağımsız işlemlerde kullanılır. Bu durumda farklı değerlendirme işlemleri arasındaki iletişim sadece çift türlü bilgi gerektirir. Yörüngesel koordinasyon hiyerarşik bir yapı gerektirir. Robotların invers kinematikleriyle ilgili hesaplamalar, genellikle kontrol organlarının hesaplama kapasiteleriyle uyuşmamaktadır.

Eğer sürekli yörünge kontrol organları kullanılıyorsa, tüm yörüngeyi farklı bölümlere ayırmak suretiyle yörüngeler arasında sıkı bir ilişki elde edilebilir. Bu yöntemde, yayılı bir yapıda kullanılabilir. Noktadan-noktaya kontrol organları kullanıldığında genellikle her iki sistem ortak olarak kullanılmaktadır [7].

2.7. İŞLEM PLANLAMASI

Bir planlama problemini tanımlamak için işlemin karakterinin doğru tanımlanması gereklidir. İş akış tekniklerine dayalı bir çok yaklaşımlarda bulunabilir. Bunların tamamında işlemlerin paralelliği ve öncelik, ilişkileri gösteren grafiklerle ifade edilir [12].

Genel olarak ifade edilecek olursa, her planlama probleminin esasını, hangi robotun ne zaman, nerede ne yapacağına karar vermek oluşturmaktadır. Bu amaçla, iki yaklaşım uygulanabilir [6] ;

1. On-line yaklaşım : Bu durumda kararlar, işlem sırasında,

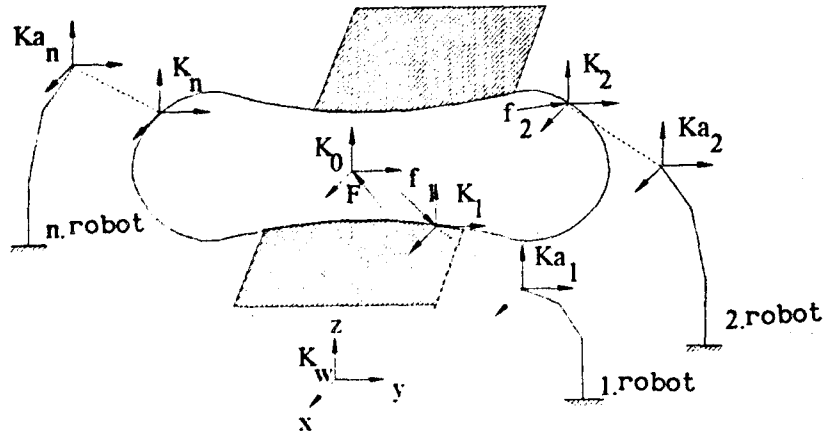
sistemin ve planın o andaki durumuna göre alınır.

2. Off-line yaklaşım: Karar,işlemin başlamasından önce alınır. On-line yaklaşım sadece belirsizlik (non-determine) durumlarda gereklidir. Mekanik montaj işlemleri bu gruba girmez. Off-line yaklaşımlar ise, zamansal (heuristic) algoritmaların uygulanmasını gerektirir [13].

2.8. ORTAK ROBOTİK MANİPÜLASYONDA TEORİLER

Endüstriyel otomasyonda, çeşitli amaçlar için robotik sistemlerden yararlanma yöntemlerinden biri de birden fazla robot' un belirli bir işi gerçekleştirebilmek üzere ortak kullanımıdır. Ortak robotik manipülasyon alanında, araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Arvind K. Ramadorai, Tyzh-John Tarn, Antal K. Bejczy ve Ning Xi araştırmacı grubunun "Çok Kollu Sistemlerin Hedefe Yönelik Kontrolü" başlığı altında yapmış oldukları çalışmada, cisimleri tutmak için kullanılan birden fazla ortak robot manipülatörlerin genel hedefe yönelik servo sistemi incelenmiş, ve robot manipülatörlerle cismin temas şekli Şekil-2.2' de gösterilmiştir [14].



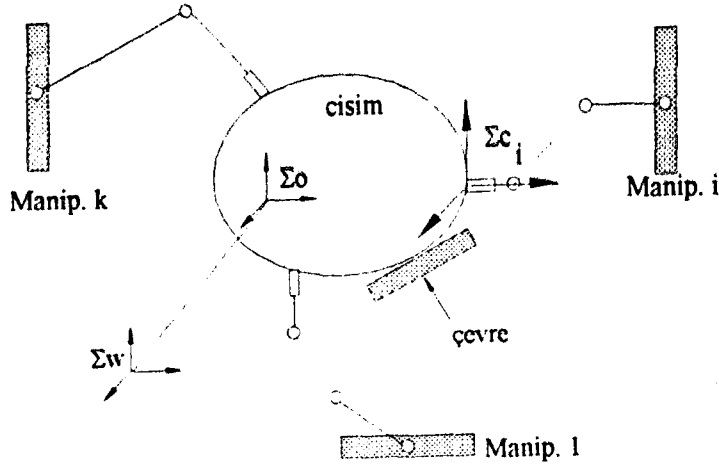
Şekil-2.2 Robot manipülatörlerle cismin temas şekli [14].

Burada asıl amaç, cismin herhangi bir ortamda daha önce planlanan yörünge boyunca hareketini gerçekleştirmesini sağlamaktır. Yapılan çalışmada cisim ile robot manipülatörün tayin edilen yörüngede hareketi esnasında meydana gelen, açısal po-

zasyonlar, çevresel reaksiyon kuvvetleri, atalet kuvvetleri ve yardımcı koordinatlar tayin edilmiştir. Amaçlanan konumdan meydana gelen sapmalar, non-lineer bir geri beslemeli kapalı çevrimli konum kontrol sistemiyle giderilmektedir. Cisim ve robot kolların hareketi esnasında meydana gelen bozucular tanımlanmıştır ve ortak hareket esnasında oluşan bozucuları tanımlayabilmek için yeni metodlar geliştirilmiştir. Bir çift el sistemi için nümerik simulasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, cismi tutmadaki pratik durumların analizi gerçekleştirilmiştir [14].

G.R. Luecke ve J.F. Gardner, bölgesel ortak manipülatör kontrol sistemlerinin koordinesinde kuvvet dağılımlarıyla ilgili yapmış oldukları çalışmada ; açık kinematik zincirli ve kapalı kinematik zincirli robot manipülatörlerin kontrolünde gereken kontrol kuvvetlerini üretmek amacıyla, sadece pozisyon ve hız hatalarını kullanan bölgesel kontrol sistemlerini incelemişlerdir. Bölgesel orantı etkili geri beslemeli kapalı çevrimli sistemin kullanımıyla üretilen ve ortak çalışan manipülatör sistemlerinin kontrolünde kullanılacak olan ortak kuvvetler vektörü, sonuçta minimum ağırlıklı Euclid normundaki ortak tork vektörüne dönüşmektedir. Bu kuvvet dağılımının elde edilmesini açıklayan ve analitik sonuçları doğrulayan deneysel çalışmalar yapılmıştır [15].

G. Song ve L. Cai, yapmış oldukları çalışmada ; hareketleri sınırlandırılmış bir cismin tutulması işleminde robot manipülatörlerin ortak hareketinin kontrolü konusu ele alınmıştır. Bu amaçla robot manipülatörle cismin tutulmasında cisim ile robot manipülatörler arasındaki temas kuvvetlerinin, cismin pozisyonunun ve cisme uygulanacak kavrama kuvvetlerinin aynı anda kontrol edilebileceği ifade edilmektedir [16]. Robot manipülatörlerle cismin tutulmasıyla ilgili model şekli Şekil 2.3' de verilmiştir.



Şekil-2.3 Robot manipülatörlerle cismin model şekli [16].

Burada; bilinmeyen robot uzuv kütleleri, cisim kütlesi ve hem robotun mafsallarında hemde çevredeki temas yüzeylerine etki eden sürtünme kuvvetlerinin olumsuz etkileri giderilebilir. Diğer robotik sistemlerin tersine, söz konusu ifadeler devamlı olarak türetilir. Böylece, düzenli bir kontrol girişi sağlanır. Geri beslemeli kapalı çevrimli sistemin global asimptotik kararlılığının isbatı için Lyapunov metodundan faydalanılmıştır [16].

Kleinfinger ve Khalil, ortak robotik manipülasyon modelinin kurulmasında uygun bir dinamik model oluşturabilmek için, sistemde yer alacak olan robot manipülatörlerle cismin ortak hareketinde meydana gelecek kinematik sınırlayıcıların doğru analizi gerektiğini belirtmektedirler. Kapalı kinematik zincirler içeren, ortak robot manipülatörlerin dinamik modeli için bir model geliştirdiler. Geliştirilen modelde, kinematik sınırlayıcıların analitik olarak bilindiği kabul edilmiştir.

Vukobratoviç ve Potkonjak, manipülatörlerle cisim arasında bağıl hareket olmaksızın dolaylı olarak iki taraftan tutucularla cismin hareket ettirildiğini kabul ederek manipülatörlerle cismin ortak çalışmasının dinamik modelini geliştirdiler. Tutucular arasındaki hareket, serbestlik derecesinin 2, 1 ve sıfır olduğu durumlarda ele alınmış ve kurulan modelde, yörünge ve tepki kuvvetlerinin verilmesi ile manipülatörlerin tahrik momentleri tayin edilmiştir [17]. Modelde görülen olumsuz-

luk ise, farklı cisimler için, manipölatör parametrelerinin yeniden belirlenmesi olarak açıklanabilir.

Luh ve Zheng, bir manipölatördeki kapalı bir dinamik model için sınırlayıcı denklemlerin tayini problemini analitik formda çözmüşlerdir. İki ortak robot kol sisteminin dinamik modeli ; rijit gövdeli cisim, bir çift kısıkaç ve küresel mafsallı cisim olmak üzere ele alınan cismin üç ayrı şekli için geliştirilmiştir. Kinematik sınırlayıcı analizi, Denavit-Hartenberg notasyonuna dayanarak tamamlanmıştır. Her iki manipölatörün eklem pozisyonları, hızları ve ivmeleri hesaplanmıştır. Ayrıca dinamik analiz, manipölatörlerin tekil dinamik modellerine ve ikisi arasındaki dinamik bağlantının modeline dayanarak tamamlanmıştır. Böylece, ortak manipölasyonun dinamik modeli, bağlantı kuvvet/tork vektörünün çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Modelde görülen mahsur ise, çalışma sırasında cismin etkilerinin dikkate alınmamasıdır [18].

Hayati, yönlendirilen bir cisim ve birden fazla ortak robot kolundan oluşmuş bir sistemin kontrolü üzerinde durmuştur. Cisim ile robot-el arasında herhangi bir bağıl hareket yoktur. Sistem hareketinin denklemleri, Kartezyen uzayda Lagrange formülizasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Modelin gelişimi esnasında, sadece robot kollarının cisme uyguladığı kuvvetler dikkate alınmıştır. Cismin ataletsel büyüklükleri ayrılmış ve bu büyüklüklerin etkisi robot-el' e dahil edilmiştir. Bu model, sınırlanmış cisim hareketinin etkilerini de dikkate almak amacıyla, Lagrange çarpanlar metodunu kullanarak geliştirilmiştir.

Tutucular ve cisim arasında herhangi bir bağıl hareketin olmadığı; cismi kuvvetli ve sıkı bir biçimde tutan iki ortak robot kol sisteminin Unseren ve Koivo tarafından ele alınmıştır. Manipölatörlerin eklem koordinatları arasındaki holonomik sınırlayıcı denklemler ortaya çıkarılır. Sistemin dinamik modeli ise daha sonra geliştirilir. Cisim ile tutucular arasındaki karşılıklı kuvvet/tork vektörü; verilen tahrik momentleri, dahili koordinatlar ve her iki manipölatörün hızlarına bağılı olarak incelenir. Netice itibarıyla her manipölatörün

hareketi, ayrı bir manip  lat  r dinamik modeliyle incelenebilir.



B Ö L Ü M - III

SİSTEM MODELLEMESİ VE KONTROL

3.1. GİRİŞ

Endüstriyel bir robot, kayar veya dönel mafsallarla bağlanmış olan çeşitli rijit elemanlardan oluşan çok serbestlik dereceli bir mekanizmadır. Bu mekanizma zincirinin bir ucu serbest ve robot manipülatörün kullanılma amacına göre değişik yapıdaki el mekanizmalarının bağlanabileceği bilek olup, bileğin gerçekleştirebileceği hareketler genel halde üç serbestlik derecesiyle sınırlıdır.

Kinematik analiz, temelde iki alt problemten meydana gelmiştir. Bunlar; düz kinematik problem ve invers kinematik problemidir. Düz kinematikte amaç açısal konum, açısal hız ve ivme gibi kinematik parametrelerle robot elin ulaşacağı konum ve yönelmenin veya izleyeceği yörüngenin belirlenmesidir. Invers kinematikte ise, çeşitli geometrik parametreler ve referans koordinat sistemine göre pozisyonu tanımlanan robot elin istenilen konuma ulaşabilmesi için gerekli olan eklem değişkenle-

rinin belirlenmesidir.

Robot kinematik denklemleri, komşu uzuvlar arasındaki bağıl konum ve hareketleri karakterize eden homojen dönüşüm matrislerinden meydana gelir [19].

3.2. DÜZ KİNEMATİK

Vektör ve matris cebri, sabit referans koordinat takımına göre bir robot kolun konumunu tarif etmek için genel bir yaklaşım ve sistematik geliştirmede kullanılır. Bir robot kolunun elemanları referans koordinat takımına göre dönebilir ve ötelenebilir olduğundan, her bir eleman için eklem koordinat takımı oluşturulur.

Böylece düz kinematik sistem, referans koordinat sistemi ile mafsalsal koordinat takımı arasında bir koordinat transformasyon matrisinin bulunmasına indirgenmiş olur. 4×4 boyutundaki homojen transformasyon matrisler, eklem koordinatlarının referans koordinat takımına göre dönmesini ve uzaydaki yer vektörlerini göstermede kullanılırlar.

Robot manipülatörler rijit olarak kabul edilen uzuvların birbirlerine göre bağıl hareket yapacak şekilde, eklemler vasıtasıyla bağlanmasıyla oluşan mekanizmalardır. Mafsallar, komşu uzuvların pozisyonlarını ölçmek amacıyla sensör denilen elemanlarla donatılır. Burada, döner çiftler veya mafsalların yer değiştirmeleri mafsalsal açısı denilen parametrelerle karakterize edilirler. Elemanların birbirlerine göre bağıl hareketleri öteleme ise kayar mafsallar söz konusudur. Robot kolun sahip olduğu serbestlik derecesi, mekanizmadaki bütün elemanların konumunu tanımlayabilmek için verilmesi gereken birbirinden bağımsız değişken sayısıdır.

Bu rijit mekanik elemanlar topluluğunun matrislerle tanımlanması ilk defa Denavit-Hartenberg tarafından gerçekleştirildi. Denavit-Hartenberg gösteriminin avantajı, bir robot kol mekanizmasının kinematik denkleminin çıkarılmasında genel bir algoritma olmasıdır [19].

3.3. İNVERS KİNEMATİK

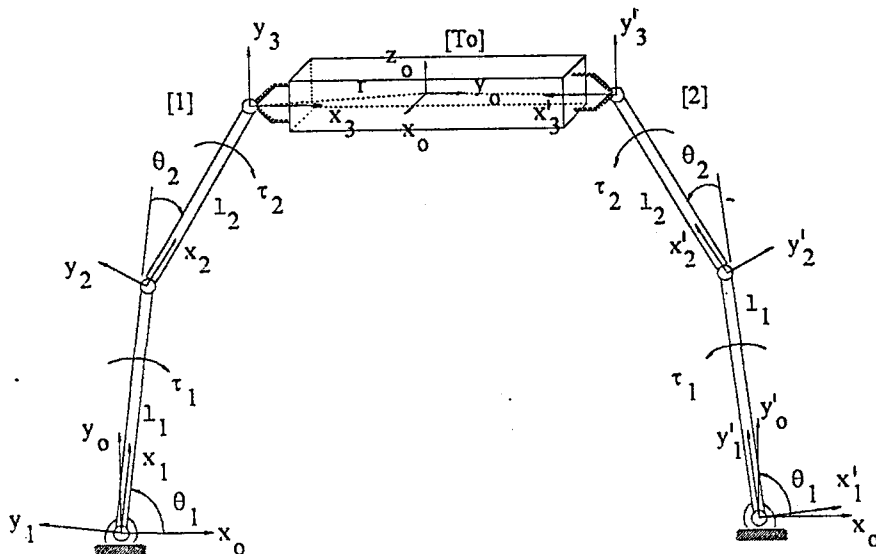
İnvers kinematiğin temel problemi robot elin verilen pozisyon ve oryantasyonu için istenilen hareketi sağlayacak gerekli eklem açılarının hesaplanması işlemidir. Uygun eklem açılarının hesaplanması, robot kolların pratik uygulamasında temel problemidir ve invers kinematik denklemler non-lineer olup bunların çözümü her zaman kolay ve mümkün değildir. Çözümün olmaması halinde robot kol istenen pozisyon ve hedefe ulaşamaz.

Robotlar, genelde eklem değişkenleri uzayında kontrol edilirler. Cisme ulaşmak robot elinin yerleşim pozisyonunu belirlemede invers kinematik çözümler çok önemlidir. Diğer bir deyişle, robot elin pozisyon ve açısal konumu Denavit-Hartenberg notasyonu (T_0^3) ile verilir ve buna eşdeğer eklem çözümleri olan $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T$ açılarının bulunması temel problemidir. Genelde invers kinematik problem hem cebrik hem de geometrik yaklaşımlarla incelenebilir.

3.4. ORTAK ROBOTİK MANİPÜLASYONDA İNVERS KİNEMATİK ANALİZ

3.4.1. Ortak Robotik Manipülasyon Modeli

Üç boyutlu bir cismin, iki serbetlikli düzlemsel iki robot tarafından taşınması işlemi, ortak robotik manipülasyon modeli olarak seçilmiş ve Şekil 3.1' de gösterilmiştir.

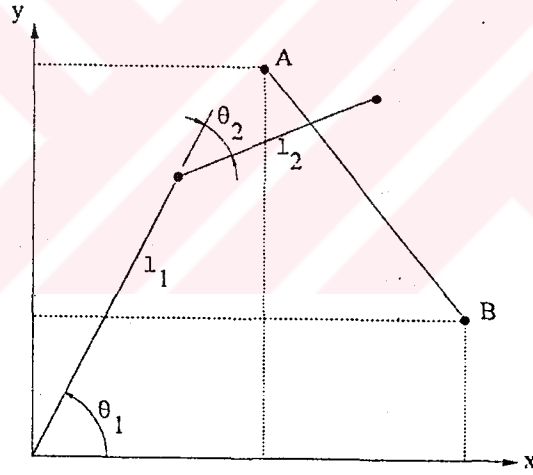


Şekil-3.1 : Ortak robotik manipülasyon modeli.

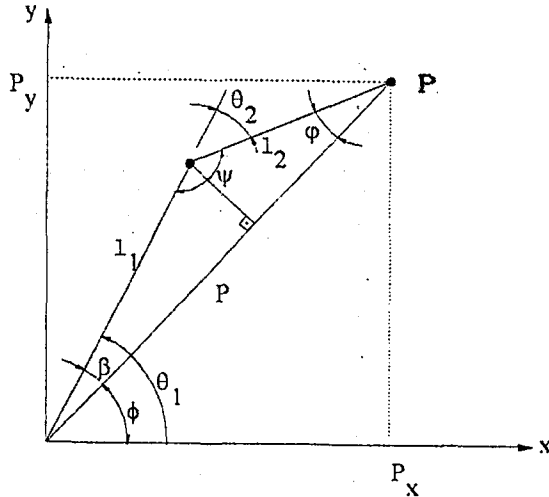
3.4.2. Ortak Robotik Manipülasyonda İnvers Kinematik

Ortak robotik manipülasyonda yer alan robot manipülatörlerin eklem açılarının, sistemdeki cismin öngörülen yörüngede taşınabilmesi için invers kinematik çözüm metoduna göre tayin edilmesi gerekmektedir. Eklem açılarının tayininde, invers kinematik çözüm metodu olarak geometrik çözüm metodundan yararlanılmıştır.

Ortak robotik manipülasyonda yer alan robot manipülatörlerden 1 nolu robot manipülatöre ait uzuv boyutları sırasıyla 0.5 m, 0.4 m ve 2 nolu robot manipülatör uzuv boyutları ise 0.6 m ve 0.3 m olarak seçildi. Ortak manipülasyon için seçilen yörünge şekil 3.2' de, robot kol mekenizmasının verilen bir konum için şematik gösterimi ve geometrik çözüm parametreleri ise şekil 3.3' de verilmiştir.



Şekil-3.2 : Cismin hareket yörüngesi



Şekil-3.3 : Model manipülatör uzuv konumlarının geometrik gösterimi

Şekil 3.3 esas alınarak, geometrik yaklaşımla invers kinematik problemi çözümlenecektir. Robot elin konumunu tanımlayan yer vektörü olarak;

$$P = l_1 \cos\beta + l_2 \cos\phi = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (3.1)$$

$$l_1 \sin\beta = l_2 \sin\phi \longrightarrow \sin\phi = \frac{l_1}{l_2} \sin\beta \quad (3.2)$$

(3.2) denkleminde,

$$\sqrt{1 - \cos^2\phi} = \frac{l_1}{l_2} \sin\beta$$

$$\left(\sqrt{1 - \cos^2\phi} \right)^2 = \left(\frac{l_1}{l_2} \sin\beta \right)^2$$

$$1 - \cos^2\phi = \left(\frac{l_1}{l_2} \sin\beta \right)^2$$

$$\cos\phi = \sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{l_2} \sin\beta \right)^2} \quad (3.3)$$

elde edilir.(3.3) denklemini (3.1) denkleminde yerine korsak,

$$P = l_1 \cos\beta + l_2 \sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{l_2} \sin\beta \right)^2} \quad (3.4)$$

(3.4) denkleminde uygun düzenlemeyle,

$$\beta = \arccos \left[\frac{P^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1P} \right] \quad (3.5)$$

elde edilir.

$$\tan\phi = \frac{P_y}{P_x} \longrightarrow \phi = \arctan \left(\frac{P_y}{P_x} \right) \quad (3.6)$$

Şekil-3.3'den,

$$\theta_1 = \phi + \beta$$

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{P_y}{P_x} \right) + \arccos \left(\frac{P^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1P} \right) \quad (3.7)$$

ayrıca,

$$\psi = 180 - (\beta + \varphi)$$

(3.1) denkleminde gerekli düzenlemeyle,

$$\varphi = \arccos \left(\frac{P}{l_2} - \frac{P^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1P} \right) \quad (3.8)$$

bulunur.

$$\theta_2 = 180 - \psi = 180 - [180 - (\beta + \varphi)]$$

$$\theta_2 = \beta + \varphi$$

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{P^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1P} \right) + \arccos \left(\frac{P}{l_2} - \frac{P^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1P} \right) \quad (3.9)$$

olarak bulunur.

3.4.3. Yörünge Tayini

Ortak manipülasyonda yer alan cismin, belirlenen yörüngede ilk konumdan son konuma hareketi esnasında ya düz ya da eğrisel bir yörünge izleyebilir. Söz konusu hareketin temel fonksiyonlarının nasıl hesaplanacağı problemi yörünge tayini olarak açıklanır. Cismin belirli bir doğrusal hattı veya herhangi bir geometrik şekle uygun yörüngeyi izlemesi amacıyla belirli bir kuvvet uygulanır ve hareketin eşdeğer eklem açıları tayin edilir.

İnvers kinematikte açısal konum fonksiyonu (θ) ifadesi üçüncü dereceden bir polinom vasıtasıyla tanımlanabilir. Bu özel durum bir kübik fonksiyonu tanımlar. Kübik fonksiyonu aşağıdaki şekilde kabul edebiliriz [20].

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (3.10)$$

Ortak manipülasyonla taşınan cismin, başlangıç konumundan alınıp, hedeflenen konuma ulaşması amacıyla her bir eklem için iki kübik fonksiyonun tanımlandığı kabul edilmiştir. Kartezyen uzayda ilk ve son noktalarla, ara noktanın eklem değişkenleri uzayında karşılığını bulmak için invers kinematik çözümünden yararlanılmıştır.

Cismin takip etmesi gereken toplam yörünge genel olarak n tane ($i = 1, \dots, n$) yörüngenin birleşmesinden oluştuğu için normalleştirilmiş zaman tanımının yapılması çözümün daha kolay bulunmasını sağlayacaktır. Normalleştirilmiş zaman t_f ; her bir yörünge parçasının başlangıcında $t_f=0$ sn ve sonunda $t_f=1$ sn olacaktır.

İki nokta arasındaki yörüngeyi oluşturan polinomları (i) nci eklem için ;

$$\theta_A(t) = a_{10} + a_{11} t + a_{12} t^2 + a_{13} t^3 \quad (3.11)$$

$$\theta_B(t) = a_{20} + a_{21} t + a_{22} t^2 + a_{23} t^3 \quad (3.12)$$

olarak tanımlayalım.

(3.11) ve (3.12) nolu denklemlerdeki sabit katsayıları başlangıç şartlarına bağlı olarak çözümü Ek-1 de verilmiştir. (3.11) ve (3.12) nolu denklemlerdeki katsayıların başlangıç şartlarına bağlı olarak çözümünden elde edilen değerleri ;

$$a_{10} = \theta_0$$

$$a_{11} = 0$$

$$a_{12} = \frac{12\theta_v - 3\theta_s - 9\theta_o}{4t_f^2}$$

$$a_{13} = \frac{-8\theta_v + 3\theta_s + 5\theta_o}{4t_f^3}$$

$$a_{20} = \theta_v$$

$$a_{21} = \frac{3\theta_s - 3\theta_o}{4t_f}$$

$$a_{22} = \frac{-12\theta_v + 6\theta_s + 6\theta_o}{4t_f^2}$$

$$a_{23} = \frac{8\theta_v - 5\theta_s - 3\theta_o}{4t_f^3}$$

(3.13)

Buradaki açı değerleri ; başlangıç açı değerleri (θ_o), ara nokta açı değerleri (θ_v) ve hedef nokta açı değerleri (θ_s) olarak tanımlandığında ;

$$\theta_o = a_{10}$$

$$\theta_v = a_{10} + a_{11}t_f + a_{12}t_f^2 + a_{13}t_f^3$$

$$\theta_s = a_{20} + a_{21}t_f + a_{22}t_f^2 + a_{23}t_f^3 \quad (3.14)$$

olarak yazabiliriz [20].

Ortak manipülasyonla taşınan cismin takip etmesi gereken yörüngeyi beş ayrı bölüme ayırmak suretiyle toplam yörünge meydana getirildi. Yörünge'nin son bölümünde verilen başlangıç

şartlarının değişmesiyle, yörüngeyi karakterize eden üçüncü dereceden polinom denkleminin katsayıları tekrar tayin edildi.

Yörünge'nin son bölümünde açısal konum fonksiyonu ;

$$\theta(t) = a_{20} + a_{21}t + a_{22}t^2 + a_{23}t^3 \quad (3.15)$$

olarak kabul edildi. Verilen konum fonksiyonunda başlangıç şartları :

$$\theta(t = 0) = \theta_o$$

$$\theta(t = t_f) = \theta_s$$

(3.16)

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

$$\ddot{\theta}(t = t_f) = 0$$

olarak tayin edildi. Verilen başlangıç şartlarına bağlı olarak (3.15) nolu denklemdaki katsayıların değeri aşağıdaki şekilde bulundu ;

$$a_{20} = \theta_o$$

$$a_{21} = 3 \frac{\theta_s - \theta_o}{t_f}$$

$$a_{22} = -3 \frac{\theta_s - \theta_o}{t_f^2}$$

$$a_{23} = \frac{\theta_s - \theta_o}{t_f^3}$$

(3.17)

Bulunan katsayılarla bağlı olarak (3.15) nolu denkleminizi şu şekilde ifade edebiliriz ;

$$\theta(t) = \theta_o + \frac{3}{5} (\theta_s - \theta_o) t - \frac{3}{25} (\theta_s - \theta_o) t^2$$

$$+ \frac{1}{125} (\theta_s - \theta_o) t^3$$

(3.18)

Ortak manipülasyonda yer alan cismin, kartezyen uzayda başlangıç konumundan son konuma ulaşmasında ara konumlarda verilen değerleri ve buna bağlı olarak ortak manipülasyonda yer alan 1 ve 2 nolu robot eklem açılarının değerleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.1 : Cisim yörünge konum değerlerine bağlı olarak manipülatörlerin θ_1 ve θ_2 açıları.

1 nolu Rob.ekl.açı.2 nolu Rob.ekl.açı.						
Adım	P_x (mm)	P_y (mm)	θ_1 (rd)	θ_2 (rd)	θ_1 (rd)	θ_2 (rd)
1	450	620	1.430	1.112	1.313	1.185
2	490	575	1.371	1.158	1.248	1.228
3	530	540	1.298	1.153	1.176	1.222
4	570	510	1.219	1.118	1.102	1.186
5	610	460	1.136	1.121	1.019	1.190
6	650	420	1.046	1.08	0.934	1.144
7	690	380	0.949	1.017	0.845	1.078
8	730	350	0.847	0.910	0.756	0.964
9	770	320	0.736	0.777	0.660	0.821
10	800	290	0.642	0.668	0.578	0.706
11	830	260	0.535	0.524	0.485	0.549

Ortak manipülasyonda yer alan 1 nolu robot manipülatöre ait yörünge denklemleri ;

θ_1 için elde edilen denklemler :

$$\theta_{11_o} = 1.430 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{11_v} = 1.430 - 0.078 t^2 + 0.019 t^3$$

$$\theta_{11_s} = 1.371 - 0.099 t - 0.021 t^2 + 0.047 t^3$$

$$\theta_{12_o} = 1.298 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{12_v} = 1.298 - 0.115 t^2 + 0.036 t^3$$

$$\theta_{12_s} = 1.219 - 0.121 t - 0.006 t^2 + 0.044 t^3$$

$$\theta_{13_o} = 1.136 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{13_v} = 1.136 - 0.129 t^2 + 0.039 t^3$$

$$\theta_{13_s} = 1.046 - 0.14 t - 0.01 t^2 + 0.053 t^3$$

$$\theta_{14_o} = 0.949 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{14_v} = 0.949 - 0.146 t^2 + 0.044 t^3$$

$$\theta_{14_s} = 0.847 - 0.159 t - 0.013 t^2 + 0.062 t^3$$

$$\theta_{15_o} = 0.736 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{15_v} = 0.736 - 0.131 t^2 + 0.037 t^3$$

$$\theta_{15_s} = 0.736 - 0.12 t + 0.024 t^2 - 0.0016 t^3 \quad (3.19)$$

θ_2 için elde edilen denklemler :

$$\theta_{21_o} = 1.112 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{21_v} = 1.112 + 0.107 t^2 - 0.061 t^3$$

$$\theta_{21_s} = 1.158 + 0.03 t - 0.076 t^2 + 0.04 t^3$$

$$\theta_{22_o} = 1.153 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{22_v} = 1.153 - 0.081 t^2 + 0.046 t^3$$

$$\theta_{22_s} = 1.118 - 0.024 t + 0.057 t^2 - 0.03 t^3$$

$$\theta_{23_o} = 1.121 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{23_v} = 1.121 - 0.045 t^2 + 0.004 t^3$$

$$\theta_{23_s} = 1.108 - 0.078 t - 0.033 t^2 + 0.048 t^3$$

$$\theta_{24_o} = 1.017 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{24_v} = 1.017 - 0.141 t^2 + 0.034 t^3$$

$$\theta_{24_s} = 0.910 - 0.18 t - 0.039 t^2 + 0.086 t^3$$

$$\theta_{25_o} = 0.777 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{25_v} = 0.777 - 0.137 t^2 + 0.028 t^3$$

$$\theta_{25_s} = 0.777 - 0.151 t + 0.03 t^2 - 0.002 t^3 \quad (3.20)$$

Elde edilen θ_1 ve θ_2 denklemlerinde zamana göre türevlerini almak suretiyle açısal hız ve açısal ivme değerlerini aşağıdaki şekilde elde ederiz.

θ_1 için elde edilen açısal hız değerleri :

$$\dot{\theta}_{11_v} = - 0.156 t + 0.057 t^2$$

$$\dot{\theta}_{11_s} = - 0.099 t - 0.042 t + 0.141 t^2$$

$$\dot{\theta}_{12_v} = - 0.23 t + 0.108 t^2$$

$$\dot{\theta}_{12_s} = - 0.121 - 0.012 t + 0.132 t^2$$

$$\dot{\theta}_{13_v} = - 0.258 t + 0.117 t^2$$

$$\dot{\theta}_{13_s} = - 0.14 - 0.02 t + 0.159 t^2$$

$$\dot{\theta}_{14_v} = - 0.292 t + 0.132 t^2$$

$$\dot{\theta}_{14_s} = - 0.159 - 0.026 t + 0.186 t^2$$

$$\dot{\theta}_{15_v} = - 0.262 t + 0.111 t^2$$

$$\dot{\theta}_{15_s} = - 0.12 + 0.048 t - 0.0048 t^2 \quad (3.21)$$

θ_1 için elde edilen açısal ivme değerleri :

$$\ddot{\theta}_{11_v} = - 0.156 + 0.114 t$$

$$\ddot{\theta}_{11_s} = - 0.042 + 0.282 t$$

$$\ddot{\theta}_{12_v} = - 0.23 + 0.216 t$$

$$\ddot{\theta}_{12_s} = - 0.012 + 0.264 t$$

$$\ddot{\theta}_{13_v} = - 0.258 + 0.234 t$$

$$\ddot{\theta}_{13_s} = - 0.02 + 0.318 t$$

$$\ddot{\theta}_{14_v} = - 0.292 + 0.264 t$$

$$\ddot{\theta}_{14_s} = - 0.026 + 0.372 t$$

$$\ddot{\theta}_{15_v} = - 0.262 + 0.222 t$$

$$\ddot{\theta}_{15_s} = 0.048 - 0.0096 t \quad (3.22)$$

θ_2 için elde edilen açısal hız değerleri :

$$\dot{\theta}_{21_v} = 0.214 t - 0.183 t^2$$

$$\dot{\theta}_{21_s} = 0.03 - 0.152 t + 0.12 t^2$$

$$\dot{\theta}_{22_v} = - 0.162 t + 0.138 t^2$$

$$\dot{\theta}_{22_s} = - 0.024 + 0.114 t - 0.09 t^2$$

$$\dot{\theta}_{23_v} = - 0.09 t + 0.012 t^2$$

$$\dot{\theta}_{23_s} = - 0.078 - 0.066 t + 0.144 t^2$$

$$\dot{\theta}_{24_v} = - 0.282 t + 0.102 t^2$$

$$\dot{\theta}_{24_s} = - 0.18 - 0.078 t + 0.258 t^2$$

$$\dot{\theta}_{25_v} = - 0.274 t + 0.084 t^2$$

$$\dot{\theta}_{25_s} = - 0.151 + 0.06 t - 0.006 t^2 \quad (3.23)$$

θ_2 için elde edilen açısal ivme değerleri :

$$\ddot{\theta}_{21_v} = 0.214 - 0.366 t$$

$$\ddot{\theta}_{21_s} = - 0.152 + 0.24 t$$

$$\ddot{\theta}_{22_v} = - 0.162 + 0.276 t$$

$$\ddot{\theta}_{22_s} = 0.114 - 0.18 t$$

$$\ddot{\theta}_{23_v} = - 0.09 + 0.024 t$$

$$\ddot{\theta}_{23_s} = - 0.066 + 0.288 t$$

$$\ddot{\theta}_{24_v} = - 0.282 + 0.204 t$$

$$\ddot{\theta}_{24_s} = - 0.078 + 0.516 t$$

$$\ddot{\theta}_{25_v} = - 0.274 + 0.168 t$$

$$\ddot{\theta}_{25_s} = 0.06 - 0.012 t \quad (3.24)$$

Ortak manipülasyonda yer alan 2 nolu robot manipülatörün, cismin takip ettiği aynı yörüngede $l_1 = 0.6$ m , $l_2 = 0.3$ m lik uzuv boyutlarına bağlı olarak elde edilen açısal konum, açısal hız ve açısal ivme fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

θ_1 açısal konum fonksiyonu için elde edilen denklemler :

$$\theta_{11_o} = 1.313 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{11_v} = 1.313 - 0.092 t^2 + 0.027 t^3$$

$$\theta_{11_s} = 1.248 - 0.102 t - 0.01 t^2 + 0.041 t^3$$

$$\theta_{12_o} = 1.176 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{12_v} = 1.176 - 0.104 t^2 + 0.03 t^3$$

$$\theta_{12_s} = 1.102 - 0.117 t - 0.013 t^2 + 0.048 t^3$$

$$\theta_{13_o} = 1.019 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{13_v} = 1.019 - 0.124 t^2 + 0.039 t^3$$

$$\theta_{13_s} = 0.934 - 0.13 t - 0.006 t^2 + 0.047 t^3$$

$$\theta_{14_o} = 0.845 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{14_v} = 0.845 - 0.128 t^2 + 0.039 t^3$$

$$\theta_{14_s} = 0.756 - 0.138 t - 0.01 t^2 + 0.053 t^3$$

$$\theta_{15_o} = 0.66 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{15_v} = 0.66 - 0.114 t^2 + 0.032 t^3$$

$$\theta_{15_s} = 0.66 - 0.105 t + 0.021 t^2 - 0.0014 t^3 \quad (3.25)$$

θ_1 açısal hız fonksiyonu için elde edilen denklemler :

$$\dot{\theta}_{11_v} = - 0.184 t + 0.081 t^2$$

$$\dot{\theta}_{11_s} = - 0.102 - 0.02 t + 0.123 t^2$$

$$\dot{\theta}_{12_v} = - 0.208 t + 0.09 t^2$$

$$\dot{\theta}_{12_s} = - 0.117 - 0.026 t + 0.144 t^2$$

$$\dot{\theta}_{13_v} = - 0.248 t + 0.117 t^2$$

$$\dot{\theta}_{13_s} = - 0.13 - 0.012 t + 0.141 t^2$$

$$\dot{\theta}_{14_v} = - 0.256 t + 0.117 t^2$$

$$\dot{\theta}_{14_s} = - 0.138 - 0.02 t + 0.159 t^2$$

$$\dot{\theta}_{15_v} = - 0.228 t + 0.096 t^2$$

$$\dot{\theta}_{15_s} = - 0.105 + 0.042 t - 0.0042 t^2 \quad (3.26)$$

θ_1 açısal ivme fonksiyonu için elde edilen denklemler :

$$\ddot{\theta}_{11_v} = - 0.184 + 0.162 t$$

$$\ddot{\theta}_{11_s} = - 0.02 + 0.246 t$$

$$\ddot{\theta}_{12_v} = - 0.208 + 0.18 t$$

$$\ddot{\theta}_{12_s} = - 0.026 + 0.288 t$$

$$\ddot{\theta}_{13_v} = - 0.248 + 0.234 t$$

$$\ddot{\theta}_{13_s} = - 0.012 + 0.282 t$$

$$\ddot{\theta}_{14_v} = - 0.256 + 0.234 t$$

$$\ddot{\theta}_{14_s} = - 0.02 + 0.318 t$$

$$\ddot{\theta}_{15_v} = - 0.228 + 0.192 t$$

$$\ddot{\theta}_{15_s} = 0.042 - 0.0084 t \quad (3.27)$$

θ_2 açısal konum fonksiyonu için elde edilen denklemler :

$$\theta_{21_o} = 1.185 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{21_v} = 1.185 + 0.101 t^2 - 0.058 t^3$$

$$\theta_{21_s} = 1.228 + 0.027 t - 0.073 t^2 + 0.039 t^3$$

$$\theta_{22_o} = 1.222 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{22_v} = 1.222 - 0.084 t^2 + 0.048 t^3$$

$$\theta_{22_s} = 1.186 - 0.024 t + 0.06 t^2 - 0.032 t^3$$

$$\theta_{23_o} = 1.190 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{23_v} = 1.190 - 0.054 t^2 + 0.008 t^3$$

$$\theta_{23_s} = 1.144 - 0.084 t - 0.03 t^2 + 0.048 t^3$$

$$\theta_{24_o} = 1.078 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{24_v} = 1.078 - 0.149 t^2 + 0.035 t^3$$

$$\theta_{24_s} = 0.964 - 0.192 t - 0.043 t^2 + 0.093 t^3$$

$$\theta_{25_o} = 0.821 \quad (\text{rd})$$

$$\theta_{25_v} = 0.821 - 0.141 t^2 + 0.026 t^3$$

$$\theta_{25_s} = 0.821 - 0.163 t + 0.032 t^2 - 0.0021 t^3 \quad (3.28)$$

θ_2 açısal hız fonksiyonu için elde edilen denklemler :

$$\dot{\theta}_{21_v} = 0.202 t - 0.174 t^2$$

$$\dot{\theta}_{21_s} = 0.027 - 0.146 t + 0.117 t^2$$

$$\dot{\theta}_{22_v} = - 0.168 t + 0.144 t^2$$

$$\dot{\theta}_{22_s} = - 0.024 + 0.12 t - 0.096 t^2$$

$$\dot{\theta}_{23_v} = - 0.108 t + 0.024 t^2$$

$$\dot{\theta}_{23_s} = -0.084 - 0.06 t + 0.144 t^2$$

$$\dot{\theta}_{24_v} = -0.298 t + 0.105 t^2$$

$$\dot{\theta}_{24_s} = -0.192 - 0.086 t + 0.279 t^2$$

$$\dot{\theta}_{25_v} = -0.282 t + 0.078 t^2$$

$$\dot{\theta}_{25_s} = -0.163 + 0.064 t - 0.0063 t^2 \quad (3.29)$$

θ_2 açısal ivme fonksiyonu için elde edilen denklemler :

$$\ddot{\theta}_{21_v} = 0.202 - 0.348 t$$

$$\ddot{\theta}_{21_s} = -0.146 + 0.234 t$$

$$\ddot{\theta}_{22_v} = -0.168 + 0.288 t$$

$$\ddot{\theta}_{22_s} = 0.12 - 0.192 t$$

$$\ddot{\theta}_{23_v} = -0.108 + 0.048 t$$

$$\ddot{\theta}_{23_s} = -0.06 + 0.288 t$$

$$\ddot{\theta}_{24_v} = -0.298 + 0.210 t$$

$$\ddot{\theta}_{24_s} = -0.086 + 0.558 t$$

$$\ddot{\theta}_{25_v} = -0.282 + 0.156 t$$

$$\ddot{\theta}_{25_s} = 0.064 - 0.0126 t \quad (3.30)$$

3.5. ORTAK ROBOTİK MANİPULASYONDA ROBOT-KOL DİNAMİĞİ

Robot kol dinamiği, manipülatörün hareketini tanımlayan matematiksel denklemleri (ilgili kuvvetleri dikkate alarak) oluşturma problemi ile uğraşır. Oluşturulan dinamik denklemler robot-kol hareketinin simüle edilmesini sağlar. Bu simülasyondan yola çıkılarak manipülatörün kontrolu gerçekleştirilebilmektedir.

Robot kol dinamiği, düz ve invers dinamik olmak üzere iki kısımda ele alınır. Düz (ileri) dinamik problemi ; eklem kuvvet ve torklarının bilinmesi halinde "eklemlerin açısal konum, hız ve ivmelerinin bulunması" olup manipülatörün simülasyonunu sağlar. Ters (invers) dinamik ise ; robotun istenilen koordinatları takip etmesini sağlayan eklem kuvvet ve torklarının hesaplanmasını sağlar. Invers dinamik yaklaşım, robot kolların kontrol probleminin çözümünde daha uygundur.

Bir robot kolun dinamik modelini kurmak için temel fiziksel kanunlardan faydalanılır. Bu amaçla, Newton ve Lagrange mekanik prensipleri kullanılır. Problemin çözümünde kullanılan temel yaklaşımlar, Lagrange-Euler (L-E) ve Newton-Euler (N-E) formülasyonunun uygulamasıdır [21,22].

3.5.1. Newton-Euler (N-E) Formülasyonu

Robot-kol dinamiğini incelemeye geliştirilen en önemli metodlardan biri, Newton'un ikinci temel kanunundan yola çıkarak bir açık kinematik zincirin hareketini tanımlamak gayesiyle oluşturulan N-E formülleridir [21,23]. Bu formülasyon, bir robot kola tatbik edilirse ileri yönlü ve geri yönlü tekrarlı denklemler takımı elde edilir. Bu denklem takımının kullanışlı bir formu, Lee ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen ve uzuvların hareketini kendi koordinat sistemlerinde ifade eden formülasyondur [20,21,23]. Referans (temel) koordinat sistemini durgun (sabit kaideli robot) kabul ederek n serbestlik dereceli bir robot için N-E formülasyonu aşağıdaki gibi sıralanabilir [20],

İleri-yönlü denklemler :

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_i R \ {}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1} \ {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} &= {}^{i+1}_i R \ {}^i\dot{\omega}_i + {}^{i+1}_i R \ {}^i\omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} \ {}^{i+1}Z_{i+1} \\ &+ \ddot{\theta}_{i+1} \ {}^{i+1}Z_{i+1} \end{aligned} \quad (3.32)$$

$${}^{i+1}\dot{V}_{i+1} = {}^{i+1}_i R \left[{}^i\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + {}^i\omega_i \times \left({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1} \right) + {}^i\dot{V}_i \right] \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{V}_{C_{i+1}} &= {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \\ &\times \left({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} \right) + {}^{i+1}\dot{V}_{i+1} \end{aligned} \quad (3.34)$$

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} \ {}^{i+1}\dot{V}_{C_{i+1}} \quad (3.35)$$

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{C_{i+1}}_{I_{i+1}} \ {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}_{I_{i+1}} \ {}^{i+1}\omega_{i+1} \quad (3.36)$$

Geri-yönlü denklemler :

$${}^i_f = {}^{i+1}_i R \ {}^{i+1}_f + {}^iF_i \quad (3.37)$$

$${}^i_n = {}^i_{N_{i+1}} \ {}^{i+1}_n + {}^iP_{C_i} \times {}^iF_i + {}^iP_{i+1} \times {}^{i+1}_f + {}^iR \ {}^{i+1}_f \quad (3.38)$$

$$\tau_i = {}^i n_i^T {}^i \hat{Z}_i \quad (3.39)$$

Burada, verilen başlangıç şartlarından :

$$\omega_o = \dot{\omega}_o = v_o = 0$$

$$\dot{v}_o = (\xi_x, \xi_y, \xi_z)^T$$

$$\xi = 9.81 \quad m/s^2$$

alınacaktır. Yazılan formülasyonda bulunan terimlerin anlamlarını şöyle sıralayabiliriz :

${}^{i+1}_i R$: (i). eksen takımında verilen vektörel büyüklükleri (i+1). eksen takımına dönüştürmek için kullanılan dönüşüm matrisi,

m_{i+1} : (i+1). uzvun toplam kütlesi,

${}^i p_{i+1}$: (i+1). ekleme yerleştirilen eksen takımının orijininin (i). eklemdaki eksen takımının orijinine olan uzaklığının yer vektörü,

${}^{i+1} Z_{i+1}$: Birim vektör,

${}^{i+1} p_{c_{i+1}}$: (i+1). uzvun ağırlık merkezine yerleştirilen eksen takımının orijininin, (i+1). eklemin orijinine göre yer vektörü,

${}^{i+1} F_{i+1}$: (i+1).uzvun kütle merkezine etkiyen atalet kuvveti,

${}^{i+1} N_{i+1}$: (i+1). uzvun kütle merkezindeki atalet kuvvetleri momenti,

${}^{i+1} \dot{v}_{i+1}$: (i+1). uzvun, (i+1). ekleme göre tanımlanan lineer ivmesi,

${}^{i+1}\dot{v}_{c_{i+1}}$: (i+1). uzvun kütle merkezine tanımlanan lineer ivme,

${}^i f_i$: (i-1). uzuvdan, (i). uzva etkiyen mafsalsal kuvveti,

${}^{i+1}I_{i+1}$: (i+1). uzvun ağırlık merkezinden geçen eksene göre kütlelesel atalet momenti,

${}^i n_i$: (i-1). uzuvdan, (i). uzva uygulanan tork,

τ_i : (i). mafsalsal torku,

N-E formüllerini kullanırken dönme ile ilgili dönüşüm matrisi genel ifadesi ise ;

$${}^{i+1}_i R = \begin{bmatrix} C_{i+1} & -S_{i+1} & 0 \\ S_{i+1} & C_{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3.40)

$${}^{i+1}_i R = \begin{bmatrix} C_{i+1} & S_{i+1} & 0 \\ -S_{i+1} & C_{i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Burada ;

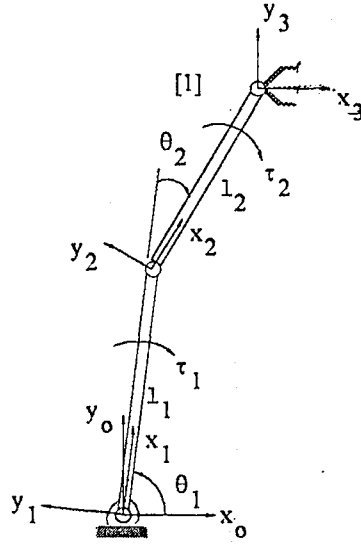
$$C_{i+1} = \cos_{i+1}$$

$$S_{i+1} = \sin_{i+1}$$

kısaltmaları yapılmıştır.

3.5.2. Dinamik Analiz

Dinamik analiz işlemi olarak, ortak robotik manipülasyonda yer alan robot manipülatörlerin mafsalsal noktalarında lineer ivme, atalet kuvveti ve manipülatörleri boştaki çalıştırmak için gerekli tahrik momenti değerleri hesaplanmıştır.



Şekil-3.4 : Model manipulatör eklem eksen takımları

Euler denklemlerine göre en genel halde lineer ivme ifadesi (3.33) nolu denklemden,

$i = 0$ ise,

$${}^1\dot{V}_1 = {}^1R_0 \left[{}^0\dot{\omega}_0 \times {}^0P_1 + {}^0\omega_0 \times \left[{}^0\omega_0 \times {}^0P_1 \right] + {}^0\dot{V}_0 \right] \quad (2.41)$$

burada,

$${}^0\dot{\omega}_0 = 0$$

$${}^0\omega_0 = 0$$

$${}^0\dot{V}_0 = \varepsilon \hat{Y}_0$$

$${}^1R_0 = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

${}^1R_0$: T_0 eksen takımından T_1 eksen takımına dönüşümü sağlayan dönüşüm matrisi.

Verilen değerler (2.41) nolu denklemde yerine konursa, 1 nolu ekleme ait lineer ivme değeri bulunur.

$${}^1\ddot{V}_1 = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 \\ -S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \xi \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi S_1 \\ \xi C_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

1 nolu uzvun ağırlık merkezindeki lineer ivme, (3.34) nolu denklemde ;

i = 0 ise

$${}^1\ddot{V}_{c_1} = {}^1\dot{\omega}_1 \times {}^1P_{c_1} + {}^1\omega_1 \times \left({}^1\omega_1 \times {}^1P_{c_1} \right) + {}^1\ddot{V}_1 \quad (3.43)$$

burada,

$${}^1\dot{\omega}_1 \times {}^1P_{c_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_1 \ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1\omega_1 \times {}^1P_{c_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_1 \dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1\omega_1 \times \left({}^1\omega_1 \times {}^1P_{c_1} \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ l_1 \dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \dot{\theta}_1^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1\ddot{V}_{c_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_1 \ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l_1 \dot{\theta}_1^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} gS_1 \\ gC_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \dot{\theta}_1^2 + gS_1 \\ l_1 \ddot{\theta}_1 + gC_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

1 nolu uzvun ağırlık merkezindeki atalet kuvveti, (3.35) no-
lu denklemden :

i = 0 için,

$${}^1F_{c_1} = m_1 {}^1\ddot{V}_{c_1}$$

$${}^1F_{c_1} = m_1 \begin{bmatrix} -l_1 \ddot{\theta}_1^2 + gS_1 \\ l_1 \ddot{\theta}_1 + gC_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1 l_1 \ddot{\theta}_1^2 + m_1 gS_1 \\ m_1 l_1 \ddot{\theta}_1 + m_1 gC_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

2 nolu mafsalda lineer ivme değeri ise, (3.33) nolu denklemden:

i = 1 için,

$${}^2\ddot{V}_2 = {}^2R \left({}^1\dot{\omega}_1 \times {}^1P_2 + {}^1\omega_1 \times \left({}^1\omega_1 \times {}^1P_2 \right) + {}^1\ddot{V}_1 \right) \quad (3.46)$$

denklemini elde edilir. Burada,

$${}^1\dot{\omega}_1 \times {}^1P_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_1 \ddot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1\omega_1 \times {}^1P_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_1 \dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1\omega_1 \times \left({}^1\omega_1 \times {}^1P_2 \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ l_1 \dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \dot{\theta}_1^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2_1R = \begin{bmatrix} c_2 & s_2 & 0 \\ -s_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Yukarıda verilen ifadeler, (3.46) nolu denklemde yerine koyulursa ;

$${}^2\ddot{v}_2 = \begin{bmatrix} {}^1_1\ddot{\theta}_1 s_2 - {}^1_1\dot{\theta}_1^2 c_2 + \xi s_{12} \\ {}^1_1\ddot{\theta}_1 c_2 + {}^1_1\dot{\theta}_1^2 s_2 + \xi c_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

elde edilir. 2 nolu uzvun ağırlık merkezindeki lineer ivmesi ise, (3.34) nolu denklemde :

i = 1 için,

$${}^2\dot{v}_{c_2} = {}^2\dot{\omega}_2 \times {}^2P_{c_2} + {}^2\omega_2 \times \left({}^2\omega_2 \times {}^2P_{c_2} \right) + {}^2\dot{v}_2 \quad (3.48)$$

elde edilir. Burada ;

$${}^2\omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}$$

$${}^2\dot{\omega}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix}$$

$${}^2\dot{\omega}_2 \times {}^2P_{c_2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2\omega_2 \times {}^2P_{c_2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2\omega_2 \times ({}^2\omega_2 \times {}^2P_{c_2}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Yukarıda yazılan ifadeleri (3.48) nolu denklemde yerine koyduğumuzda;

$${}^2\ddot{V}_{c_2} = \begin{bmatrix} -l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + l_1\ddot{\theta}_1 S_2 - l_1\dot{\theta}_1^2 C_2 + gS_{12} \\ l_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + l_1\ddot{\theta}_1 C_2 + l_1\dot{\theta}_1^2 S_2 + gC_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

elde edilir. 2 nolu uzvun ağırlık merkezindeki atalet kuvveti ise;

$${}^2F_{c_2} = m_2 {}^2\ddot{V}_{c_2} \quad (3.50)$$

$${}^2F_{c_2} = \begin{bmatrix} -m_2 l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1\ddot{\theta}_1 S_2 - m_2 l_1\dot{\theta}_1^2 C_2 + m_2 gS_{12} \\ m_2 l_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1\ddot{\theta}_1 C_2 + m_2 l_1\dot{\theta}_1^2 S_2 + m_2 gC_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

olarak bulunur.

Robot kolların uç noktasındaki (3 nolu eklemden) lineer ivme değerini bulabilmek için (3.33) nolu denklemde $i=2$ için gerekli düzenleme yapılırsa,

$${}^3\dot{V}_3 = {}^3R_2 \left[{}^2\dot{\omega}_2 \times {}^2P_3 + {}^2\omega_2 \times \left({}^2\omega_2 \times {}^2P_3 \right) + {}^2\dot{V}_2 \right] \quad (3.52)$$

denklemini elde edilir. Burada,

$${}^2\omega_2 \times {}^2P_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2\omega_2 \times \left({}^2\omega_2 \times {}^2P_3 \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2\ddot{\omega}_2 \times {}^2P_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^3R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

yazılan ifadeleri (3.52)'de yerine korsak,

$${}^3\dot{V}_3 = \begin{bmatrix} -l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + l_1\ddot{\theta}_1S_2 - l_1\dot{\theta}_1^2C_2 + \xi S_{12} \\ l_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + l_1\ddot{\theta}_1C_2 + l_1\dot{\theta}_1^2S_2 + \xi C_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

elde edilir.

Robot manipölatörleri boşta çalıştırmak için gerekli tahrik momenti, (3.38) nolu denklemde $i=2$ için gerekli düzenleme sonucunda;

$${}^2n_2 = {}^2N_2 + {}^2R_3 {}^3n_3 + {}^2P_{c_2} \times {}^2F_2 + {}^2P_3 \times {}^2R_3 {}^3f_3 \quad (3.54)$$

olarak elde edilir. Burada;

$${}^2N_2 = 0 \quad (2 \text{ nolu uzvun ağırlık merkezine etki eden atalet kuvvetleri momenti})$$

$${}^3n_3 = 0 \quad (\text{Robot uç noktasına etki eden mafsalsal torku})$$

$${}^3f_3 = 0 \quad (\text{Robot uç noktasına etki eden tahrik kuvveti})$$

$${}^2P_{c_2} = l_2 \hat{x}_2$$

Yukarıda verilen ifadeleri (3.54) nolu denklemde yerine yazarsak,

$${}^2n_2 = {}^2P_{c_2} \times {}^2F_2$$

$${}^2n_2 = \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -m_2 l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1 \ddot{\theta}_1 S_2 - m_2 l_1 \dot{\theta}_1^2 C_2 + m_2 g S_{12} \\ m_2 l_2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 \ddot{\theta}_1 C_2 + m_2 l_1 \dot{\theta}_1^2 S_2 + m_2 g C_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$\tau_1 = {}^1n_1^T {}^1Z_1$$

ifadesine göre ;

$$\tau_2 = m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 C_2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 S_2 + m_2 l_2 g C_{12} + m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \quad (3.56)$$

2 nolu robot kolu boşta çalıştırmak için gerekli tahrik momenti tayin edilir.

1 nolu robot kolu boşta çalıştırmak için gerekli tahrik momentini bulabilmek için (3.38) nolu denklemi $i = 1$ için yeniden düzenlersek,

$${}^1n_1 = {}^1N_1 + {}^1R_2 {}^2n_2 + {}^1P_{c_1} \times {}^1F_1 + {}^1P_2 \times {}^1R_2 {}^2f_2 \quad (3.57)$$

$${}^1N_1 = 0$$

$${}^2f_2 = {}^2F_2$$

$${}^1R_2 {}^2n_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 C_2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 S_2 + m_2 l_2 g C_{12} + m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \end{bmatrix}$$

$${}^1P_{c_1} \times {}^1F_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_1 l_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_1 l_1 g C_1 \end{bmatrix}$$

$${}^1P_2 \times {}^1R_2 {}^2f_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \left(m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1 S_2^2 - m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 C_2 S_2 + m_2 g l_1 S_{12} S_2 - m_2 l_1 l_2 S_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \right. \\ \left. + m_2 l_1^2 \ddot{\theta}_1 C_2^2 + m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 S_2 C_2 + m_2 g l_1 C_{12} C_2 + m_2 l_1 l_2 C_2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \right) \end{bmatrix}$$

Yukarıda yazılan ifadeleri (3.57) nolu denklemde yerine koyup gerekli düzenlemeleri yapıp (3.39) nolu denklemde yazarsak,

$$\begin{aligned} \tau_1 = & m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 C_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\theta}_1 - m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_2^2 \\ & - 2m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_2 l_2^2 C_{12} + (m_1 + m_2) l_1^2 C_1 \end{aligned} \quad (3.58)$$

1 nolu robot kolu boşta çalıştırmak için gerekli tahrik momenti ifadesi elde edilir.

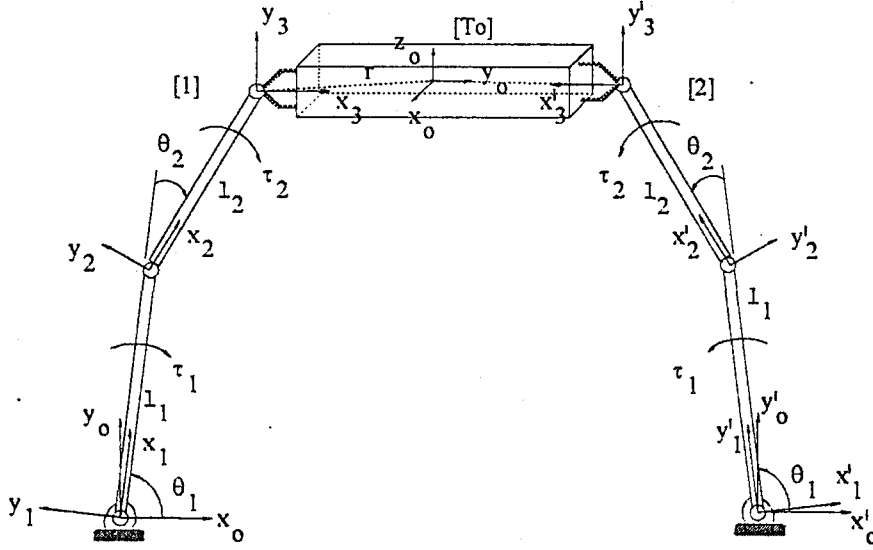
3.6. ORTAK ROBOTİK MANİPÜLASYONUN DİNAMİK MODELİ

İş parçasının ağırlığı veya geometrik özelliğinden dolayı, tek bir robot manipülatör tarafından parça naklinin mümkün olmaması gibi durumlarda birden fazla robot manipülatör ortak amacı gerçekleştirmek üzere birbirleriyle uyumlu tarzda kullanılabilir.

Yapılan bu çalışmada, ortak çalışan iki serbestlik dereceli düzlemsel iki robot manipülatörle cisim arasında bağıl hareket olmadığı kabul edildi. Ortak çalışan robot manipülatörlerle cismin tanımlı yörünge boyunca yapmış olduğu hareketin, Newton-Euler dinamik formülasyonunu kullanarak dinamik modeli kurulmuştur ve dolayısıyla ortak manipülasyonun dinamik modeli belirlenmiştir.

3.6.1. ORTAK MANİPÜLASYON PARAMETRELERİ

Ortak manipülasyona katılan manipülatörlerin temel parametrelerinin yanında, cisim ve cismin manipülatör tutucularına bağlı pozisyonu nu ve manipülatörlerin kendi pozisyonlarını tanımlayacak parametreleri de açıklamak gereklidir. Bu amaçla, M_1 karşılık gelen manipülatörlerin son uç noktasında bulunacak n. bağıl referans eksen takımını tanımlar. Orijini cismin kütle merkezinde ve eksenini esas atalet eksenini boyunca olan T_0 eksen takımında tanımlanması gerekir. Ortak manipülasyonda temel parametreler ve eksen takımları Şekil-3.4'de verilmiştir.



Şekil-3.4 : Ortak robotik manipülasyon modeli.

Model parametreleri olarak;

r_i : T_i sistemine bağlı olarak T_0 sisteminin bağlı pozisyonu,

R_i^0 : Vektörel büyüklükleri T_0 sisteminden, T_i sistemindeki vektörlere dönüştüren dönüşüm matrisi,

M_i : i . manipülatör,

A_1^i : Vektörel büyüklükleri, M_i' nin esas koordinat sisteminde M_1 'in esas koordinat sistemindeki vektörlere dönüştüren dönüşüm matrisi,

m_0 : Cismin kütlesi,

I_0 : T_0 sisteminde cismin kütlelesel atalet matrisi,

i : Tam sayılar kümesindeki $\{1, \dots, n\}$ bütün değerler,

Her bir dönüşüm matrisi üç bağımsız parametrenin (Euler açıları) bir fonksiyonunu gösterir.

3.6.2. CİSMİN HAREKETİ

Cismin öngörülen yörüngede, manipülatörler tarafından uygulanan kuvvet ve torkların etkisi altındaki hareketi incelenecektir. Burada;

F_i, M_i : Verilen T_i sisteminde ve T_i orijinine indirgenen, M_i

manipülâtörû tarafından cisme uygulanan kuvvet ve tork vektörleri,

a_o, α_o, ω_o : T_o sisteminde cismin sırasıyla lineer, açısal ivmesi ve açısal hızı,

R_M^3 : T_3 sistemi ve M_1 ' in temelîne bağı mutlak sistem arasındakî dönüşüm matrisi,

ξ : Verilen mutlak sistemdeki yerçekim ivmesi vektörü,

T_3 sisteminde, cisme etkiyen kuvvetlerin denge denklemi [24];

$$\sum_{i=1} R_3^o R_i^o F_i = m_o R_3^o a_o - m_o R_M^3 \xi \quad (3.59)$$

burada,

$$R_3^o a_o = a_3 + \alpha_3 \times r_1 + \omega_3 \times (\omega_3 \times r_1)$$

son olarak,

$$\sum_{i=1} R_3^o R_i^o F_i = m_o \left[a_3 + \alpha_3 \times r_1 + \omega_3 \times (\omega_3 \times r_1) - R_M^3 \xi \right] \quad (3.60)$$

T_3 sisteminde, T_o sisteminin orijinine bağı olarak cisme etkiyen tork denge denklemi [24];

$$\sum_{i=1} R_3^o R_i^o \left[M_i - r_i \times F_i \right] = R_3^o \left[I_o \alpha_o - (I_o \omega_o) \times \omega_o \right] \quad (3.61)$$

şayet α_o ve ω_o büyüklüklerini, T_3 eksen takımına göre yazarsak,

$$\sum_{i=1} R_3^o R_i^o \left[M_i - r_i \times F_i \right] = R_3^o I_o R_3^o \alpha_3 - \left[R_3^o I_o R_3^o \omega_3 \right] \times \left[R_3^o \omega_3 \right] \quad (3.62)$$

Aşağıdaki notasyonları kullanarak (3.60) ve (3.62) nolu denklemlerdeki kuvvetlerin ve torkların denge denklemini düzenleyelim:

$$K_1(\dot{q}_1) = \omega_3 \times (\omega_3 \times r_1)$$

$$K_2(\dot{q}_1) = (I_o \omega_3) \times (R_3^{oT} \omega_3)$$

$$r_1 \times F_1 \iff V_1 F_1 \Rightarrow V_1 = \begin{bmatrix} 0 & -r_{1z} & r_{1y} \\ r_{1z} & 0 & -r_{1x} \\ r_{1y} & r_{1x} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

$$\sum_{i=1} R_3^o R_i^{oT} F_i = m_o \left[\ddot{a}_3 - V_1 \ddot{\alpha}_3 + K_1 \right] - m_o R_M^{3T} \ddot{\xi}$$

$$\sum_{i=1} R_3^o R_i^{oT} \left[\ddot{M}_1 - V_1 \times F_i \right] = I_o \ddot{\alpha}_3 - K_2 \quad (3.64)$$

Cisim için yazmış olduğumuz hareket denklemlerini genel halde matris formunda yazabilmek için aşağıdaki notasyonları tanımlayalım;

$$B_1 = \begin{bmatrix} R_3^o & R_i^{oT} & 0_3 \\ R_3^o & R_i^{oT} & V_1 \\ R_3^o & R_i^{oT} \end{bmatrix}$$

$$C^* = \begin{bmatrix} m_o I_o - m_o & V_1 \\ 0_3 & I_o \end{bmatrix}$$

$$C = C^* J(q_1)$$

$$D = C^* J(q_1, q_1) - \begin{bmatrix} m_o R_M^{3T}(q_1)g - m_o K_1 \\ K_2 \end{bmatrix}$$

$$f_i = \begin{bmatrix} F_i \\ M_i \end{bmatrix}$$

Yukarıda tanımlanan notasyonlara bağlı olarak genel halde cismin hareket denklemlerini matris formunda yazabiliriz.

$$\sum_{i=1} B_i f_i = C \ddot{q}_1 + D \quad (3.65)$$

burada,

I_3 : Uç sıralı sütun matrisi,

O_3 : Uç sıralı boş matris (sıfır matris)

J : Jacobian matrisi,

3.6.3. Ortak Manipülasyonun Dinamik Modeli

Ortak manipülasyonun dinamik modelini elde etmek için (3.65) nolu denklemde gösterilen karşılıklı etkileşim modeli ve manipülatörlerin dinamik modellerini bir araya getirmek gereklidir. Bu ise sözü edilen modellerden karşılıklı temas kuvvetlerini (f_i) çıkarmakla olur.

M_1 manipülatörünün dinamik modeli ;

$$H_1(q_1) \ddot{q}_1 + h_1(q_1, \dot{q}_1) = P_1 - J_1^T(q_1) f_1 \quad (3.66)$$

Eğer f_1 etkileşim büyüklüğünü (3.65) nolu denklemde çözüp, (3.66) nolu denklemde yerine koyarsak, aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$H_1 \ddot{q}_1 + h_1 = P_1 - J_1^T B_1^{-1} [C \ddot{q}_1 + D - \sum_{i=2} B_i f_i] \quad (3.67)$$

bu ise,

$$\begin{aligned} [H_1 + J_1^T B_1^{-1} C] \ddot{q}_1 + h_1 + J_1^T B_1^{-1} D &= P_1 \\ &+ J_1^T B_1^{-1} \sum_{i=2} B_i f_i \end{aligned} \quad (3.68)$$

$$\begin{aligned} [H_1 + J_1^T B_1^{-1} C] \ddot{q}_1 + h_1 + J_1^T B_1^{-1} D &= P_1 \\ &+ J_1^T B_1^{-1} \sum_{i=2} B_i (J_1^T)^{-1} P_i \end{aligned} \quad (3.69)$$

elde edilir. Elde edilen son ifade de gerekli düzenleme ile ortak manipülasyonun dinamik modeli genel şekli ile matris formunda şu şekilde yazabiliriz. Burada ;

$$\phi_i = J_1^T B_1^{-1} B_i (J_1^T)^{-1}$$

$$X = H_1 + J_1^T B_1^{-1} C$$

$$x = h_1 + J_1^T B_1^{-1} D$$

$$X \ddot{q}_1 + x = \sum_{i=1} \phi_i P_i \quad (3.70)$$

böylece ortak manipülasyonun dinamik modelini elde ederiz. Burada ;

$X \ddot{q}_1$: Ortak manipülasyon sisteminin atalet kuvvetlerini,

x : Ortak manipülasyon sisteminin coriolis, santrifüj ve yerçekim kuvvetlerini,

$\phi_i P_i$: Ortak manipülasyon sisteminde, i manipülatör tarafından sisteme uygulanması gereken moment değerini ifade eder.

3.7. KONTROL

Belli bir amaç için geliştirilmiş bir fiziksel sistemin görevini arzulanan bir doğrulukta ve güvenilirlikle gerçekleştirebilmesi problemi sistemin kontrol edilmesi gereğini ortaya koyar. Kontrol problemi, kontrol edilecek sistemin yapısına göre belirlenir. Robot-kol gibi karmaşık bir sistemin kontrolü de oldukça gelişmiş bir kapalı çevrimli kontrol sistemi ile yapılabilir.

Robot-kol'un konum kontrolü, teklif edilen referans yörünge-nin istenen bir yaklaşımla takip edilmesini amaçlar. Bu gayeyle geliştirilmiş çok çeşitli kontrol yöntemleri vardır. Bu kontrol yöntemleri üç ana grupta incelenebilir ;

1. Eklem uzayında kontrol,
2. Kartezyen uzayda kontrol,
3. Adaptif kontrol.

Ayrıca, bu temel kontrol yöntemleri içinde gösterilebilen çeşitli kontrol teknikleri vardır. Çok bilinen, minimum - zaman kontrolü [25,26] ve hesaplanmış-tork tekniği [25,26,27] eklem bazında yapılan kontrol çeşitleridir. Hız ve ivme kontrolü yapılan kontrol çeşitleridir. Hız ve ivme çözümlemesine dayanan kontrol teknikleri ise kartezyen uzayda yapılır. Adaptif kontrol tekniğinde bir çok yaklaşım vardır : Bunlar; model esaslı adaptif kontrol [25,28,29], kendi-kendine ayarlamalı adaptif kontrol [25,29] pertürbasyonlu adaptif kontrol [25,30] bunlardan bir kaçıdır. Robotun tahriki eklem bazında yapıldığından

eklem uzayında kontrol daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca, bu yöntem çevrim içinde ters kinematik çözümleri gerektirmedikten hesaplamaya zorluklarını büyük oranda azaltmaktadır. Gerek kartezyen uzayda, gerekse eklem uzayında gerçekleştirilen klasik kontrol yöntemleri robotun karakteristiklerinin ve çevre özelliklerinin çok iyi bilinmesini gerektirir. Halbuki, adaptif kontrol yöntemleri, çevrim içinde sistem parametrelerini ve etkilerini tanıyarak bozucuların olumsuz etkilerini sağlamaktadır. Adaptif kontrol tekniği uygulamalarında, yeni şartlara hızlı adaptasyonun gerçekleşebilmesi için gelişmiş bilgisayar donanımına ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada, hesaplanmış tork tekniği yardımı ile model esaslı PD kontrol tekniği ve model esaslı adaptif kontrol tekniği metodu, ortak robotik manipülasyonun eklem açıları ile açısal hızlarının kontrolü amacıyla geliştirilen modele uygulanmaya çalışılmıştır.

3.7.1. Ortak Robotik Manipülasyonda Hesaplanmış Tork Tekniği Yardımı ile Model Esaslı PD Kontrol Uygulaması

Ortak robotik manipülasyon modeli olarak seçilen, iki serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan iki robot manipülatörle taşınan cismin, ön görülen yörüngede yapmış olduğu ortak harekette, robot manipülatörlerin eklem açıları ve açısal hızları hesaplanmış tork tekniği yardımı ile model esaslı PD kontrol metoduna göre kontrol edilmeye çalışıldı. Hesaplanmış tork tekniği yardımı ile model esaslı PD kontrol, ortak manipülasyonda yer alan 1 nolu robot manipülatör eklemlerinde konum kontrolü ve hız kontrolü amacıyla uygulanmış olup, 2 nolu robot manipülatör için de benzer işlemler tekrarlanabilir.

Ortak robotik manipülasyon dinamik modeli;

$$X \ddot{q}_1 + x = \sum_{i=1} \phi_i P_i$$

şeklinde sistem parametrelerine bağlı olarak kurulmuştu. Burada;

$X(\theta)$: Ortak robotik manipölasyonda yer alan robot manipölätörlerle taşınan cismin $(n \times n)$ boyutundaki atalet matrisi,

$x = V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)$ şeklinde tanımlarsak,

$V(\theta, \dot{\theta})$: Ortak manipölasyonda yer alan manipölätörlere ait $(n \times 1)$ boyutunda coriolis ve merkezkaç kuvvetleri matrisi,

$G(\theta)$: Ortak manipölasyonda yer alan robot manipölätörlerle cismin $(n \times 1)$ boyutunda ağırlık kuvveti matrisi,

$\phi_1 P_1$: Ortak robotik manipölasyonda, $(n \times 1)$ boyutunda eklem torkları matrisi,

Dinamik modelden hareketle ortak robotik manipölasyonun genel dinamik modeli;

$$X(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = P \quad (3.71)$$

şeklinde elde edilir. Böylece karmaşık bir sistemin kontrolunda "bölünmüş kontrol metodu" kullanılabilir. Bölünmüş kontrol metoduna göre,

$$P = \alpha P' + \beta \quad (3.72)$$

olarak ifade edebiliriz. Burada,

$$\alpha = X(\theta) \quad (3.73)$$

$$\beta = V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (3.74)$$

$$P' = \ddot{\theta} \quad (3.75)$$

olarak tanımlanır.

β sadece ortak robotik manipölasyon sistem parametrelerine bağılı olup, kontrol kuralının "model-esaslı" kısmıdır. P' ise,

$$C(E, \dot{E}) = K_p E + K_v \dot{E} \quad (3.77)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, K_p ve K_v sırasıyla konum kazanç ve hız kazanç katsayıları olup, n serbestlik dereceli bir robot için $(n \times n)$ boyutlu köşegen matrisleridir. Matrislerin köşegeni üzerinde, eklemlere ait sabit kazanç değerleri yer alır. Böylece, servo-kontrol kısmı formül (3.76)' dan,

$$P' = \ddot{\theta}_d + K_p E + K_v \dot{E}$$

olarak yazılabilir. (3.76) ve (3.75) denklemleri beraber dikkate alınırsa,

$$\ddot{E} + K_v \dot{E} + K_p E = 0 \quad (3.78)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem, sistemin kapalı çevrimli denklemini olup "hata dinamiği" olarak bilinir. (3.78) denkleminde kritik sönüm şartından,

$$K_v = 2 (K_p)^{1/2} \quad (3.79)$$

denklemini elde edilir.

Ortak robotik manipülasyon dinamiği ifadesine ve uygun konum ve hız kazanç katsayılarına bağlı olarak, ortak robotik manipülasyonda yer alan 1 nolu robot manipülatörün eklemlerine ait açısal konum ve açısal hız hata fonksiyonlarını, hesaplanmış tork tekniği yardımı ile model-esaslı PD kontrol metoduna göre kontrol eden Fortran 77 dilinde bir bilgisayar programı yazılarak, Ek-5'de verilmiştir.

3.7.2. Model Esaslı Adaptif Kontrol

Manipülatör kontrolünde temel amaç, istenen pozisyon ve hızlarda eklemleri hareket ettirecek giriş parametrelerini (kuvvet/tork veya voltaj) belirlemektir. Ancak dinamik denklemlerin ikinci dereceden diferansiyel denklem olmaları, doğrusal olmamaları ve etkileşimli olmaları robot kolların kontrolünü

zorlaştırmaktadır. Bu nedenlerden dolayı klasik kontrol sistemlerini kullanan manipülatörler, belirli bir hız limitinin üzerine çıkamamakta, istenilen hassasiyet ve verimlilik elde edilememektedir.

Son yıllarda önerilen adaptif kontrol teknikleri, robotik manipülatörlerin performansında önemli gelişmeler sağlamakla birlikte onlara eğitilebilir özelliklerde kazandırmıştır. Değişik şartlar altında özellikle tekrarlı görevlerde büyük performans özellikleri göstermektedirler ve yüksek çalışma hızları ve taşınan yükteki değişmeler durumunda ortaya çıkacak istenmeyen etkileri dengelemektedir.

Önerilen adaptif kontrol metodları içinde en yaygın olanı model referanslı adaptif kontrol (MRAC sistemler) kuralıdır [31, 32]. Bu metodda manipülatörün eklem hareketlerine ait referans model, ikinci dereceden bir sistem olarak seçilmiştir [31].

i. eklem için referans model ;

$$a_1 \ddot{y}_1(t) + b_1 \dot{y}_1(t) + y_1(t) = r_1(t) \quad (3.80)$$

burada a_1 ve b_1 şu şekilde tanımlanmıştır ;

$$a_1 = \frac{1}{\omega_{ni}^2}, \quad b_1 = \frac{2 \xi_1}{\omega_{ni}} \quad (3.81)$$

$r_1(t)$ referans giriş, $y_1(t)$ ise referans model cevabıdır. Manipülatörün konum ve hız geri besleme kazançları ile kontrol edildiği kabul edilirse,

i. eklem için manipülatör dinamiği ;

$$\alpha_1(t) \ddot{x}_1(t) + \beta_1(t) \dot{x}_1(t) + x_1(t) = r_1(t) \quad (3.82)$$

buradaki $\alpha_1(t)$ ve $\beta_1(t)$ ayarlanabilir sistem parametreleri olup, zamana göre çok yavaş değiştikleri kabul edilir. $r_1(t)$

birim basamak giriş değeri ve $x_1(t)$ manipülatör dinamiği olarak tanımlanır. Kontrollü sistemin geri besleme kazançlarını ayarlamak için çeşitli tekniklerden yararlanılır. Basitliği nedeniyle, gerçek sistem ile referans model cevapları arasındaki fark olan sistem hata fonksiyonunu minimum yapacak olan bir metoddan yararlanılır. Söz konusu metodu kullanarak sistem hatasını minimize edecek olan sistem parametrelerini ayarlama mekanizması aşağıdaki denklemlerle düzenlenir.

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_1(t) &= \left[k_2^i \ddot{e}_1(t) + k_1^i \dot{e}_1(t) + k_0^i e_1(t) \right] \\ &\quad \left[k_2^i \ddot{u}_1(t) + k_1^i \dot{u}_1(t) + k_0^i u_1(t) \right] \end{aligned} \quad (3.83)$$

$$\begin{aligned} \dot{\beta}_1(t) &= \left[k_2^i \ddot{e}_1(t) + k_1^i \dot{e}_1(t) + k_0^i e_1(t) \right] \\ &\quad \left[k_2^i \ddot{w}_1(t) + k_1^i \dot{w}_1(t) + k_0^i w_1(t) \right] \end{aligned} \quad (3.84)$$

burada $e_1 = y_1 - x_1$, k_j^i ağırlık faktör değerleri olup kararlı sistem davranışını sağlayan kararlılık kriterlerinden seçilir. Yukarıdaki denklemlerde yer alan $u_1(t)$ ve $w_1(t)$, aşağıdaki diferansiyel denklemlerin çözümünden elde edilir ;

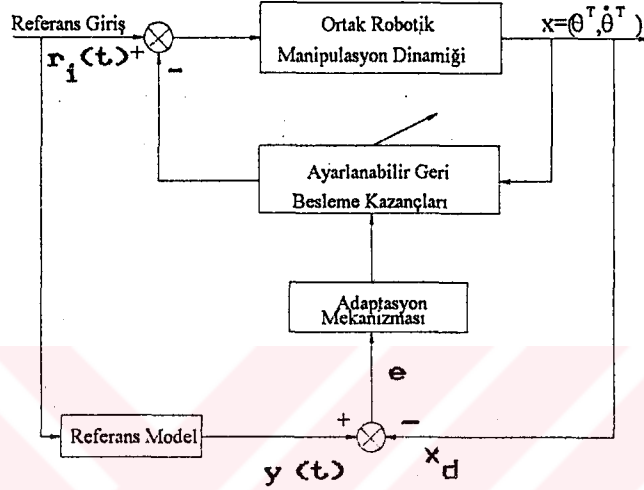
$$a_1 \ddot{u}_1(t) + b_1 \dot{u}_1(t) + u_1(t) = - \ddot{y}_1(t) \quad (3.85)$$

$$a_1 \ddot{w}_1(t) + b_1 \dot{w}_1(t) + w_1(t) = - \dot{y}_1(t) \quad (3.86)$$

Kapalı çevrimli adaptif sistem, belirli bir referans değer için referans model denklemlerinin çözümünü ihtiva eder. (3.85) ve (3.86) nolu diferansiyel denklemler $u_1(t)$ ve $w_1(t)$ değerlerinin elde edilmesi için çözülür.

(3.83) ve (3.84) nolu denklemlerin çözümünden $\alpha_1(t)$ ve $\beta_1(t)$ değerleri elde edilir. Elde edilen $\alpha_1(t)$ ve $\beta_1(t)$ değerlerine bağlı olarak (3.82) nolu denklemle verilen, i. eklem için manipülatör dinamik denklemi çözülür.

Yukarıda bahsedilen, model esaslı adaptif kontrol tekniğinin, referans model ve manipölatör dinamiğine bağlı olarak adaptasyon mekanizmasını gösteren kapalı çevrimli blok diyagramının, ortak manipölasyon için geliştirilen modeli şekil 3.5' de verilmiştir.



Şekil-3.6 : Model-referanslı adaptif kontrol için genel bir kontrol blok diyagramı.

3.7.3. Ortak Robotik Manipölasyonda Adaptif Kontrol Uygulaması

Ortak robotik manipölasyon modeli olarak seçilen, iki serbestlik dereceli düzlemsel iki robot manipölatörlerle, taşınan cismin ön görülen yörüngede yapmış olduğu harekette, robot kolların ekleme açıları ve açısal hızları model esaslı adaptif kontrol tekniğine göre kontrol edilmeye çalışıldı. Model esaslı adaptif kontrol tekniği, ortak manipölasyonda yer alan 1 nolu robot manipölatör eklemlerinde konum kontrol amacıyla uygulanmış olup, diğeri içinde benzer işlemler tekrarlanabilir.

Ortak robotik manipölasyona ait dinamik model;

$$x \ddot{q}_1 + x = \sum_{i=1} \phi_i P_i$$

şeklinde kurulmuştu. Burada;

$X(\theta)$: Ortak robotik manipülasyonda yer alan robot manipültörlerle, taşınan cismin $(n \times n)$ boyutundaki atalet matrisi,

$x = V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)$ şeklinde tanımlarsak,

$V(\theta, \dot{\theta})$: Ortak manipülasyonda yer alan, manipültörlere ait $(n \times 1)$ boyutunda coriolis ve merkezkaç kuvvetleri matrisi,

$G(\theta)$: Ortak manipülasyonda yer alan robot manipültörlerle cismin $(n \times 1)$ boyutunda ağırlık kuvveti matrisi,

$\phi_1 P_1$: Ortak robotik manipülasyonda, $(n \times 1)$ boyutunda eklem torkları matrisi,

q_1 : Ortak manipülasyonda, $(n \times 1)$ boyutunda genelleştirilmiş eklem değişkeni.

Ortak robotik manipülasyonun dinamik modelinde yer alan robot manipültörlerle, taşınan cismin etkilerini T_3 eksen takımına göre ifade edelim:

1 nolu robot manipültöre ait sistem parametreleri;

Atalet matrisi,

$$X_1(\theta) = \begin{bmatrix} l_2^2 m_2 + 2l_1 l_2 m_2 C_2 + l_1^2 (m_1 + m_2) & l_2^2 m_2 + l_1 l_2 m_2 C_2 \\ l_2^2 m_2 + l_1 l_2 m_2 C_2 & l_2^2 m_2 \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

Coriolis ve merkezkaç kuvvetleri,

$$V_1(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_2^2 - 2m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \quad (3.88)$$

Ağırlık kuvveti,

$$G_1(\theta) = \begin{bmatrix} m_2 l_2 \xi C_{12} + (m_1 + m_2) l_1 \xi C_1 \\ m_2 l_2 \xi C_{12} \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

2 nolu robot manipülatöre ait vektörel büyüklükleri T_3 eksen takımında gösterebilmek için, T_3^1 eksen takımından T_3 eksen takımına dönüşümü sağlayan dönüşüm matrisinin tayin edilmesi gerekmektedir. Bu işlem için;

$${}^3_3R = {}^0_3R {}^3_0R$$

dönüşüm matrisi tanımlanır. Burada,

${}^3_0R$ = Vektörel büyüklükleri T_3^1 eksen takımından T_0 eksen takımına dönüştüren dönüşüm matrisi,

${}^0_3R$ = Vektörel büyüklükleri T_0 eksen takımından T_3 eksen takımına dönüştüren dönüşüm matrisi,

${}^3_3R$ = Vektörel büyüklükleri T_3^1 eksen takımından T_3 eksen takımına dönüştüren dönüşüm matrisi,

$${}^3_0R = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^0_3R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^3_3R = {}^0_3R {}^3_0R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olarak elde edilir. 2 nolu robot manipülatöre ait vektörel büyüklüklerin T_3 eksen takımında etkileri ;

Atalet matrisi,

$$x_2(\theta) = {}^3_3^I x_2'(\theta)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_2^2 m_2 + 2l_1 l_2 m_2 C_2 + l_1^2 (m_1 + m_2) & l_2^2 m_2 + l_1 l_2 m_2 C_2 & 0 \\ l_2^2 m_2 + l_1 l_2 m_2 C_2 & l_2^2 m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$x_2(\theta) = \begin{bmatrix} l_2^2 m_2 + 2l_1 l_2 m_2 C_2 + l_1^2 (m_1 + m_2) & l_2^2 m_2 + l_1 l_2 m_2 C_2 & 0 \\ -l_2^2 m_2 - l_1 l_2 m_2 C_2 & -l_2^2 m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

Coriolis ve merkezkaç kuvvetleri,

$$v_2(\theta, \dot{\theta}) = {}^3_3^I v_2'(\theta, \dot{\theta})$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_2^2 - 2m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1^2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$v_2(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_2^2 - 2m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ -m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{\theta}_1^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

Ağırlık kuvveti,

$$g_2(\theta) = {}^3_3^I g_2'(\theta)$$

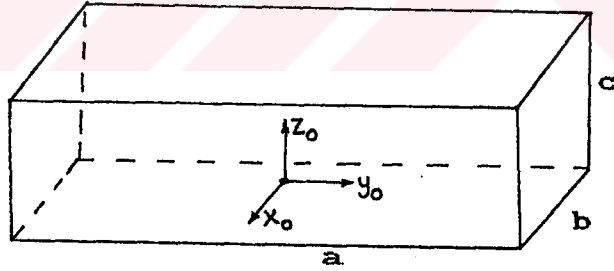
$$G_2(\theta) = \begin{bmatrix} m_2 l_2^2 \xi C_{12} + (m_1 + m_2) l_1^2 \xi C_1 \\ -m_2 l_2^2 \xi C_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.92)$$

Cismin Kütlesel Atalet Momenti

Cismin kütlesel atalet momentini matris formunda şu şekilde ifade edebiliriz [23] ;

$$I_o = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} \\ -I_{xy} & I_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.93)$$

verilen matris formundaki atalet momenti değerlerini cismin geometrisine bağlı olarak şu şekilde hesaplanır ;



$$I_{xx} = \int_0^c \int_0^a \int_0^b (y^2 + z^2) \rho \, dx \, dy \, dz = \frac{m_o}{12} (a^2 + c^2)$$

$$I_{yy} = \int_0^c \int_0^a \int_0^b (x^2 + z^2) \rho \, dx \, dy \, dz = \frac{m_o}{12} (b^2 + c^2)$$

$$I_{xy} = \int \int \int \rho \, xy \, dx \, dy \, dz = 0$$

Cismin, T_o eksen takımına göre tayin edilen kütlesel atalet matrisi değerini, T_3 eksen takımında ifade edersek,

$$I_3 = {}^o_3 R I_o$$

burada ;

$${}^0_3R = \text{Rot}(y, 90) \cdot \text{Rot}(z, 90)$$

$$\text{Rot}(y, 90) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\text{Rot}(z, 90) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$${}^0_3R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$I_3 = {}^0_3R I_0 = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 \\ 0 & I_{yy} \end{bmatrix}$$

olarak bulunur. Cismin ağırlığının T_3 eksen takımındaki etkisi ise ;

$$G_3 = {}^0_3R G_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ G_0 \end{bmatrix}$$

elde edilir.

Ortak robotik manipülasyonu oluşturan, robot manipüllerle cismin, yukarıda T_3 eksen takımına göre bulunan değerlerini, dinamik modelde yerine koymak suretiyle, ortak robotik manipülasyonun ön görülen yörüngede hareketini gerçekleştirecek mafsallı torkları tayin edilir.

Dinamik modelden hareketle, ortak robotik manipülasyonun düz dinamik modelinden,

$$\ddot{\theta} = X(\theta)^{-1} [\tau - V(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta)] \quad (3.94)$$

açısal ivme değerleri bulunur. Bu ivme değerleri kullanılarak, uygun nümerik integrasyon tekniğiyle hız ve konum değerleri bulunur.

Bulunan hız ve konum değerleri, cismin ön görülen yörüngede hareketini istenen hassasiyette gerçekleştirebilmesi için kontrol edilmesi gereken büyüklüklerdir. (3.94) nolu denklemden elde edilen açısal ivmeyi kullanarak, gerçekleşen açısal hız ve konum değerlerinin bulunmasında basit ve pratik bir yöntem olan Euler integral alma yöntemi kullanılabilir [20];

$$\dot{\theta}(t + \Delta t) = \dot{\theta}(t) + \ddot{\theta}(t) \Delta t$$

$$\theta(t + \Delta t) = \theta(t) + \dot{\theta}(t) \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{\theta}(t) \Delta t^2 \quad (3.95)$$

şeklinde ifade edilir.

Ortak robotik manipülasyonun düz dinamik modelinden hesaplanan, açısal konum, hız ve ivme değerlerini adaptif kontrol tekniğine göre kontrol işlemini gerçekleştirebilmek için, (3.80) nolu denklemlerle verilen i. eklem için referans modeli karakterize eden diferansiyel denklemin çözülmesi gerekmektedir. Referans modelin başlangıç şartlarına bağlı olarak çözümü ;

$$y_1(t) = 1 - e^{-t} - t e^{-t} \quad (3.96)$$

olarak elde edilir. i. eklem için referans modelin diferansiyel denkleminin çözümü Ek-2 de verilmiştir. Referans modelin çözümüne bağlı olarak, (3.85) ve (3.86) nolu diferansiyel denklemlerin çözümü de aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$u_1(t) = \frac{1}{6} t^3 e^{-t} - \frac{1}{2} t^2 e^{-t} \quad (3.97)$$

$$w_1(t) = - \frac{1}{6} t^3 e^{-t} \quad (3.98)$$

Elde edilen, (3.97) ve (3.98) nolu denklemlerin çözümü Ek-3'de verilmiştir.

Adaptif kontrol kuralında, sistem hatasını minimize edecek olan sistem parametrelerini ayarlama mekanizmasını karakterize eden (3.83) ve (3.84) nolu denklemler, $u_1(t)$ ve $w_1(t)$ denklemlerine bağlı olarak çözülür. Nümerik çözüm neticesinde elde edilen $\alpha_1(t)$ ve $\beta_1(t)$ ifadesindeki, $e_1 = y_1 - x_1$ değerine eşittir. Burada ;

- e_1 : Referans model ile gerçek sistem arasındaki fark,
- y_1 : Referans model cevabı,
- x_1 : Manipölatör dinamiğinin cevabı,

Hata dinamiği denkleminde ;

$$k_2 \ddot{e}_1(t) + k_1 \dot{e}_1(t) + k_0 e_1(t) = 0 \quad (3.99)$$

Kritik sönüm şartından, kontrol kazançları arasında aşağıda tanımlanan eşitlik elde edilir.

$$\Delta = k_1^2 - 4 k_0 k_2 = 0$$

$$k_1 = 2 \sqrt{k_0 k_2} \quad (3.100)$$

Elde edilen $\alpha_1(t)$ ve $\beta_1(t)$ değerlerine bağlı olarak, (3.82) nolu denklemle verilen manipölatör dinamiği denklemi çözülür. i. eklem için manipölatör dinamiği denkleminin çözümü Ek-4'de verildi.

Değişken parametrelili (3.82) nolu manipölatör dinamiği denklemi, aşağıdaki şekilde daha önce tanımlanmıştı.

$$\alpha_1(t) \ddot{x}_1(t) + \beta_1(t) \dot{x}_1(t) + x_1(t) = r_1(t)$$

Denklemin çözümünde ;

$$\Delta = \beta^2 - 4\alpha$$

Tanımlanan Δ 'nın alacağı değerlere göre üç farklı çözüm elde edilir.

$\Delta > 0$ ise ;

$$x_1(t) = -x_0 \frac{a_2}{a_1 - a_2} e^{a_1 t} + x_0 \frac{a_1}{a_1 - a_2} e^{a_2 t} + 1 \quad (3.101)$$

$\Delta = 0$ ise ;

$$x_1(t) = x_0 (1 - at) e^{at} + 1 \quad (3.102)$$

$\Delta < 0$ ise ;

$$x_1(t) = x_0 e^{At} \left[\cos Bt - \frac{A}{B} \sin Bt \right] + 1 \quad (3.103)$$

Elde edilen, i. eklem manipölatör dinamiği ifadelerine ve i. eklem referans model değerlerine bağı olarak, uygun kararlılık katsayılarına göre ortak robotik manipölasyonda yer alan 1 nolu robot manipölatörün açısai konum ve hız değerlerinin, model esasli adaptif kontrol tekniğine göre kontrol işlemini gerçekleştiren Fortran 77 dilinde bir bilgisayar programı yazılarak Ek-6' da verilmiştir.

BÖLÜM-IV

SONUÇLAR VE İRDELEME

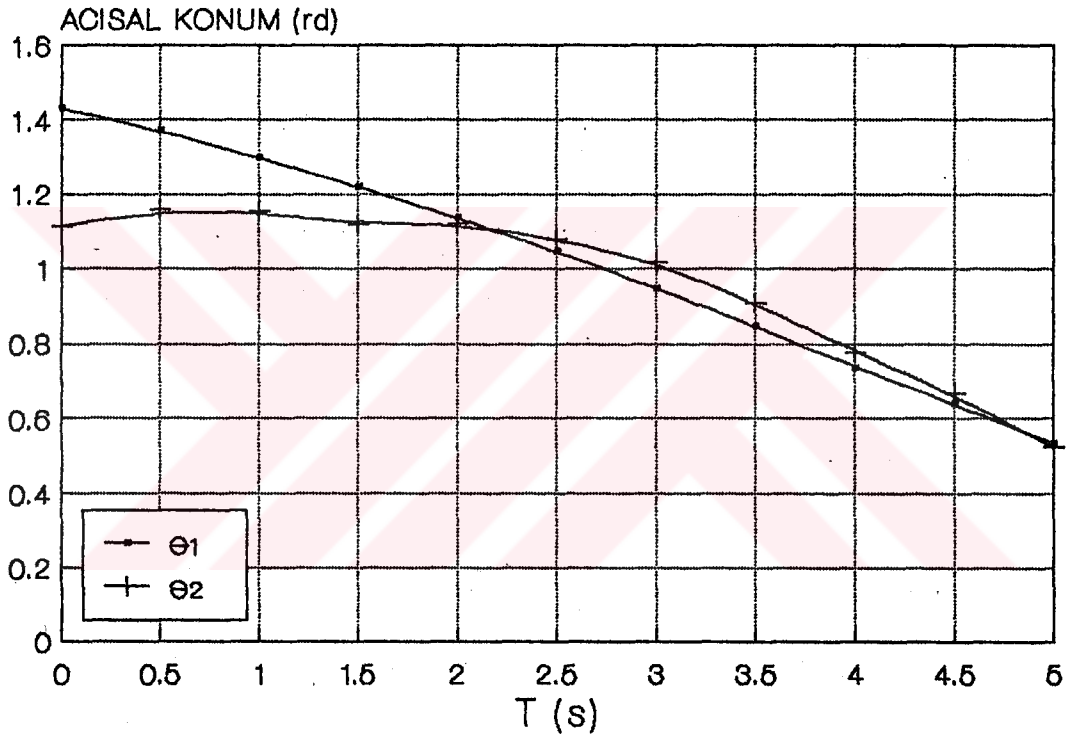
4.1. AÇISAL KONUMLAR

Robot kol mekanizmalarında uzuvların birbirlerine göre bağıl hareketlerini tanımlamada temel parametre olan eklemlerdeki dönme açıları, homojen transformasyonları kullanmak suretiyle cebirsel yöntemle veya uzuvların konumlarının yer vektörüyle tanımlandığı geometrik yaklaşımla ayrı ayrı belirlenerek, hareket süresince değişim karakterleri incelenir.

Ortak robotik manipülasyonda yer alan robot manipülatörler için, uzuvların birbirlerine göre bağıl hareketlerini tanımlayan temel parametre olan eklemlerdeki dönme açıları, uzuvların konumlarının yer vektörleriyle tanımlanmasına esas olan geometrik çözüm metoduna göre tayin edilmiştir. Ortak robotik manipülasyonla taşınan cismin, kartezyen yörüngede başlangıç konumundan hedeflenen konuma hareketini sağlayacak robot eklemlerinin açıları, 3.11 ve 3.12 denklemleriyle tanımlı iki kübik

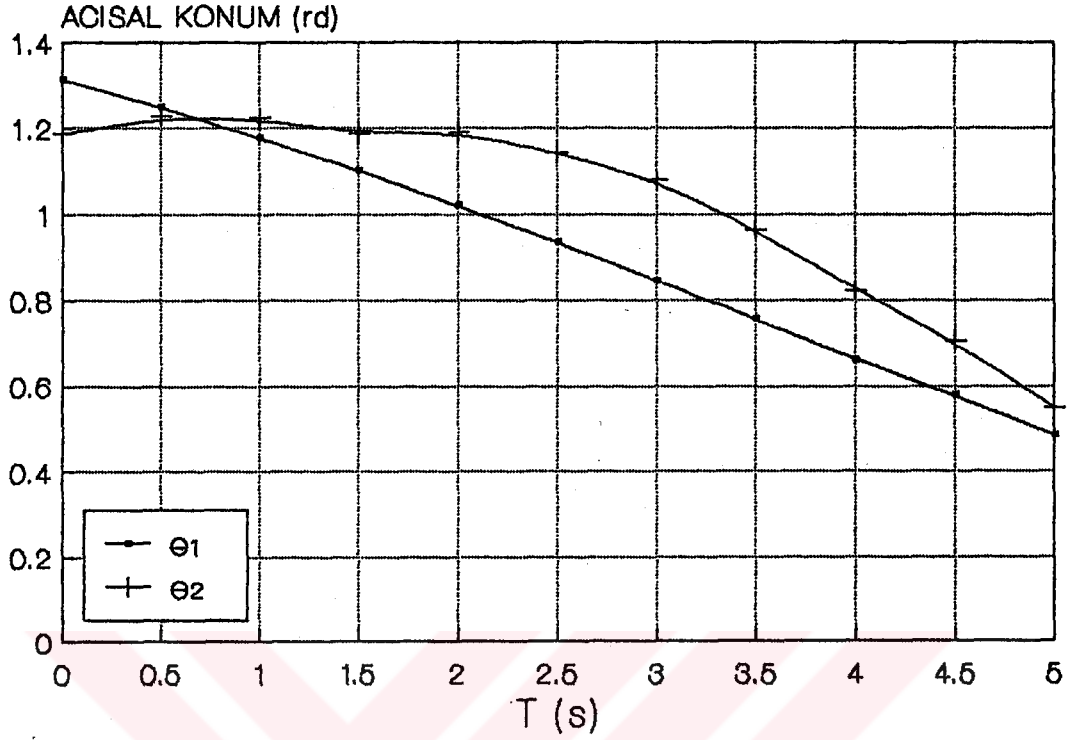
fonksiyon ile karakterize edilmektedir. Bu denklemlerle ifade edilen kübik fonksiyonun sabit katsayıları verilen başlangıç şartlarına göre belirlenmek suretiyle, eklem açılarının zamana bağlı yörünge polinomları elde edilmiştir.

Elde edilen yörünge denklemlerinde, 1 nolu robot manipülatör uzuv boyutları $l_1=0.5$ m ve $l_2=0.4$ m seçilerek, cismin istenen yörüngede hareketini gerçekleştirecek eklem açılarının zamana bağlı değişimleri şekil 4.1' deki gibi belirlenmiştir.



Şekil 4.1. 1 nolu robot manipülatörün eklem açıları

Ortak robotik manipülasyonda yer alan 2 nolu robot manipülatörün, aynı yörüngede hareketinde uzuv boyutları $l_1=0.6$ m ve $l_2=0.3$ m alınmak suretiyle elde edilen eklem açılarının zamana bağlı değişim eğrileri şekil 4.2' de görülmektedir.



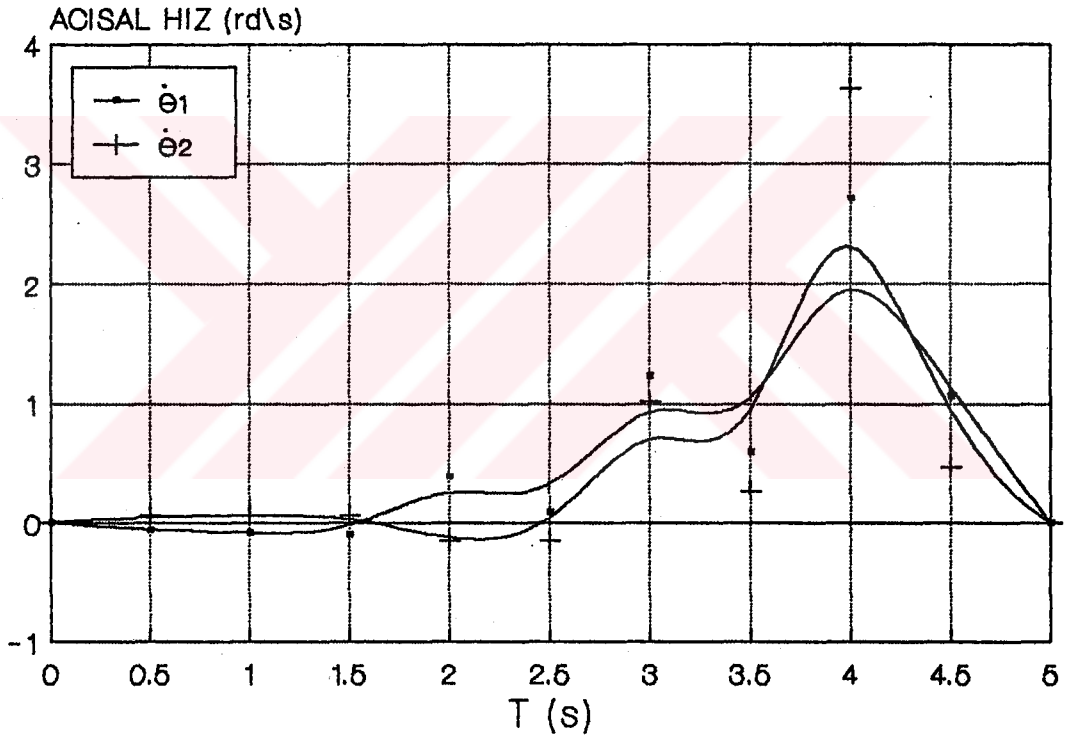
Şekil 4.2. 2 nolu robot manipülatör θ_1 ve θ_2 eklem açıları

Robotik manipülasyon sisteminde, 1 nolu robot manipülatöre ait birinci uzuv 0.5 m ve 2 nolu robot manipülatöre ait birinci uzuv 0.6 m alınmak suretiyle hesaplanan θ_1 eklem açıları; 1 nolu robot manipülatör eklem açısının 2 nolu robot manipülatör eklem açılarıyla birbirlerine oldukça yakın değerde olduğu görülmüştür. Buna neden ise, birinci manipülatör uzuv boyut değerinin ikinci manipülatör uzuv boyut değerine yakın değerde olmasındandır. θ_2 eklem açıları ise, ikinci manipülatör l_2 uzuv değerinin, birinci manipülatör l_1 uzuv değerinden biraz daha küçük olmasından dolayı, ikinci manipülatör θ_2 eklem açısı, birinci manipülatör θ_1 açısından biraz daha büyük değerde olduğu görülmüştür.

4.2. AÇISAL HIZLAR

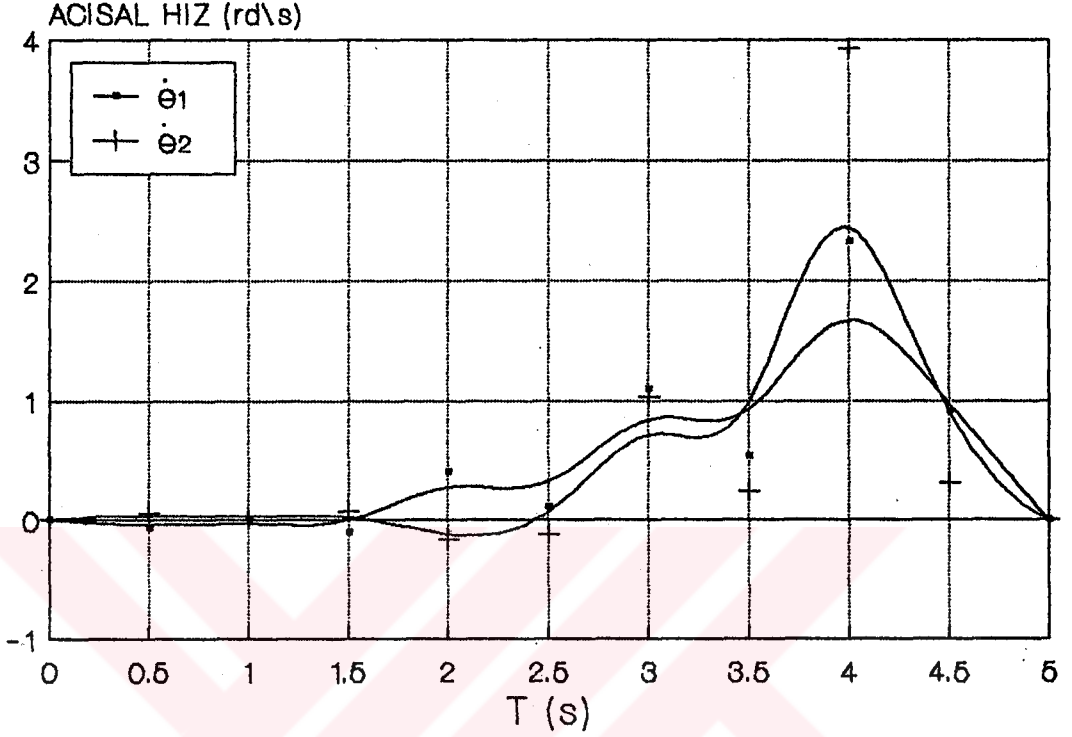
Ortak robotik manipülasyonda yer alan, 1 ve 2 nolu robot manipülatörler için elde edilen açısai konum fonksiyonlarının zamana göre türevlerini almak suretiyle robot manipülatörlerin açısai hız ifadeleri elde edilir.

1 nolu robot manipülatöre ait, (3.21) ve (3.23) nolu denklemlerle ifade edilen eklem açısai hız ifadelerinin zamana bağılı olarak değişimleri aşağıdaki şekil 4.3' de görölmektedir.



Şekil 4.3. 1 nolu robot manipülatöre ait $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ açısai hızları

Aynı şekilde 2 nolu robot manipülatöre ait açısai hız değişimleri ise, (3.26) ve (3.29) nolu denklemlerin sonucu olarak şekil 4.4' de verilmiştir.

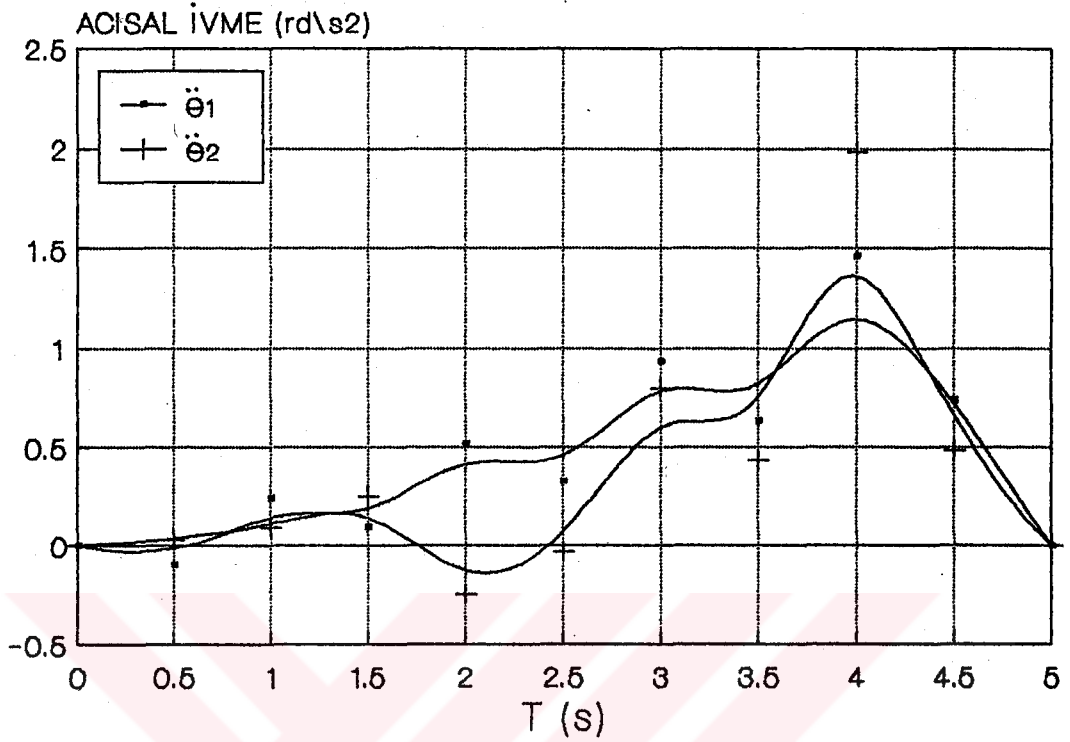


Şekil 4.4 2 nolu robot manipülatöre ait $\dot{\theta}_1$ ve $\dot{\theta}_2$ açısal hızları

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' den de görüleceği gibi manipülatörlerle ait açısal hız eğrileri, hareketin başlangıcından 1.5 sn' ye kadar sabit bir değerde, 1.5 sn'den sonra 4 sn' ye kadar geçen sürede max. değere ulaşmaktadır. Hareketin sonunda da doğal olarak hız değerinin sıfır olduğu görülmektedir.

4.3. AÇISAL İVMELER

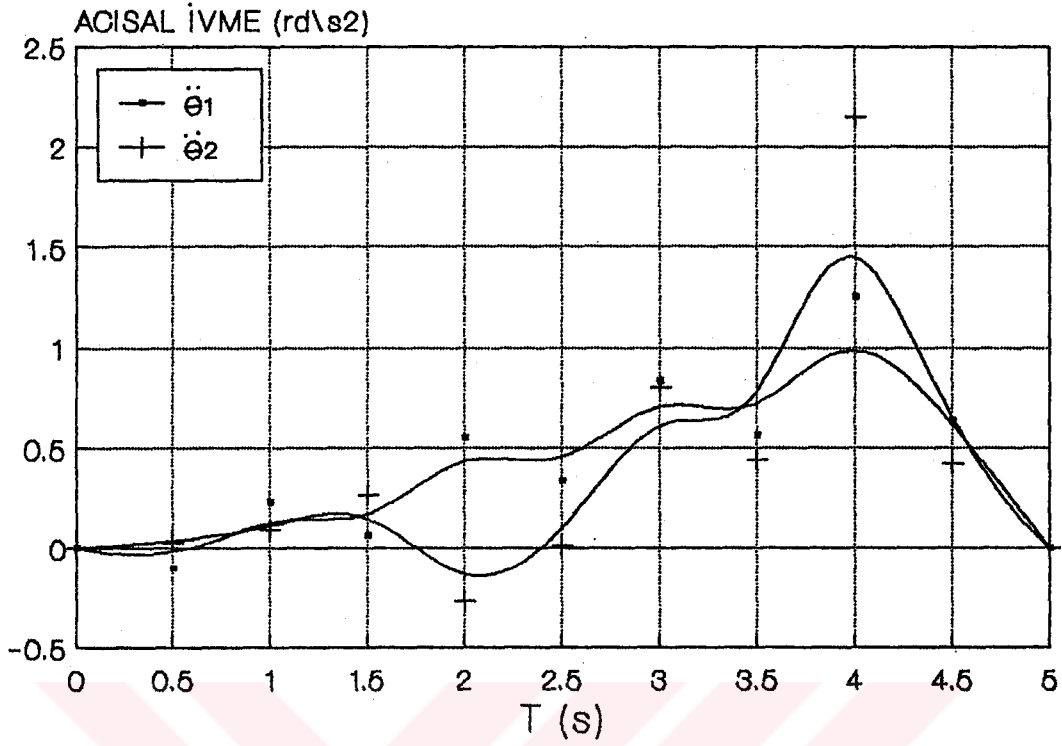
Robot manipülatörler için belirlenen açısal hız denklemlerinde zamana göre türev almak suretiyle, manipülatörlere ait açısal ivme ifadeleri elde edilir. 1 nolu robot manipülatöre ait, (3.22) ve (3.24) nolu açısal ivme fonksiyonlarının zamana bağlı değişimleri Şekil 4.5' de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. 1 nolu robot manipülatöre ait θ_1 ve θ_2 açısal ivmeleri

2 nolu robot manipülatöre ait açısal ivme fonksiyonlarının zamana bağlı değişim eğrileri ise, (3.27) ve (3.30) nolu denklemlerden elde edilmiş ve ilgili sonuçlar Şekil 4.6' da özetlenmiştir.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6' dan da görüleceği gibi, açısal ivme değerleri hareketin başlangıcında yaklaşık olarak sabit bir değerde kalmakta, toplam hareket süresinin büyük bir bölümünde hızla artarak maksimum değere ulaşmakta ve hareketin son bölümünde doğrusal (lineer) bir azalmayla sıfıra yaklaşmaktadır.



Şekil 4.6. 2 nolu robot manipülatöre ait $\ddot{\theta}_1$ ve $\ddot{\theta}_2$ açısal ivmeleri

4.4. ORTAK ROBOTİK MANİPÜLASYON DİNAMİK MODEL SONUÇLARI

İki serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan iki ayrı robot manipülatörle cismin, tanımlı yörünge boyunca yapmış oldukları ortak harekette, manipülatörlerle cismin karşılıklı etkileşim ifadelerinden hareketle ortak robotik manipülasyon sisteminin dinamik modeli kuruldu. Kurulan dinamik modelin bazı önemli özelliklerini şu şekilde özetleyebiliriz:

Kurulan dinamik modelin önemli sonuçlarından biri, tekil robot manipülatör modellerine büyük bir benzerlik göstermesidir. Ortak manipülasyon modelinin tekil robot manipülatör modeline göre farkı, ortak manipülasyonda cismin ve diğer robot manipülatörlerin etkilerinin ortak manipülasyon modelinde yer almasıdır.

Geliştirilen dinamik modelle, belirli bir amaç için birden fazla robot' un koordineli çalışmasının sağlanabilmesi diğer bir sonuçtur.

Ortak manipülasyon dinamik model parametreleri; robot manipulatorler ve taşınan cismin atalet etkileri, coriolis ve merkezkaç kuvvetleriyle, ağırlık kuvvetleri ve eklemlere uygulanması gereken tork büyüklüklerinden meydana gelmektedir.

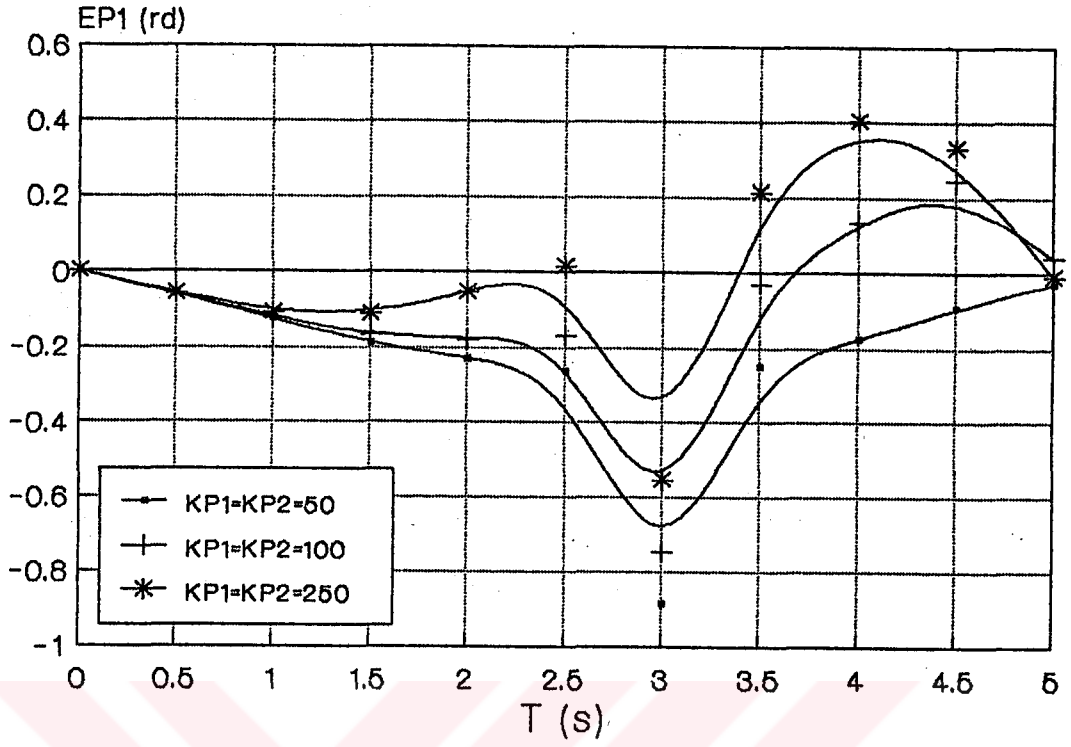
Ortak manipülasyonda yer alan cismin geometrisi veya ağırlığındaki değişikliğin, dinamik modelin özelliğinin değişmesine bir etkisinin olmadığı tesbit edilmiştir. Sadece değişen cismin ağırlığına bağlı olarak manipulatorlere uygulanması gereken tork değeridir.

Ortak manipülasyon dinamik modelinin, robot manipulatorlerle cismin karşılıklı etkileşimleri neticesinde ortaya çıkan dinamik parametreleri ihtiva etmesi, tek robotlu manipülasyondan farklı olan diğer bir sonuçtur.

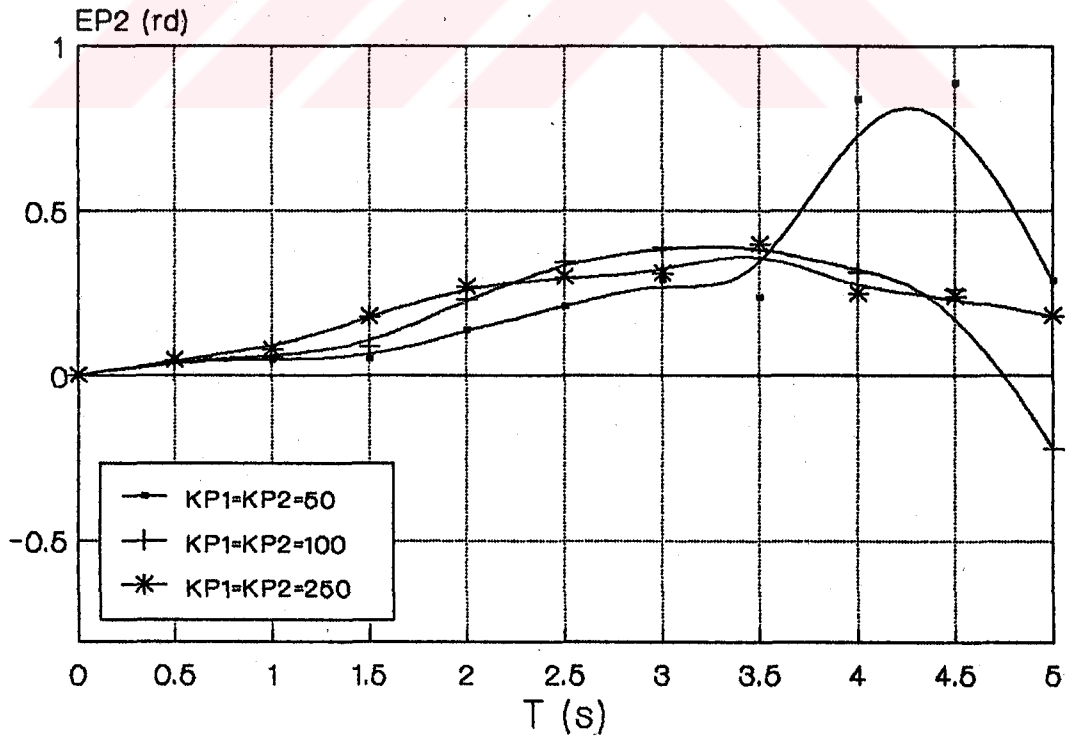
4.5. ORTAK ROBOTİK MANİPÜLASYONDA HESAPLANMIŞ TORK TEKNİĞİ YARDIMI İLE MODEL ESASLI PD KONTROL SONUÇLARI

Ortak robotik manipülasyon modeli olarak seçilen, iki serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan iki robot manipulatorle taşınan cismin, ön görülen yörüngede hareketini hassas olarak gerçekleştirebilmesi için, ortak robotik manipülasyonda yer alan 1 nolu robot manipulatorle ait eklem açıları ile açısal hızlarının kontrol işlemi için hesaplanmış tork tekniği yardımı ile model-esaslı PD kontrol tekniği metodu uygulanmıştır.

Hesaplanmış tork tekniği yardımı ile model-esaslı PD kontrol tekniğine göre eklem açılarının kontrolü işleminde istenen değer ile gerçekleşen değer arasındaki fark olan açısal konum ve açısal hız hata fonksiyonunu minimum yapacak kontrol parametreleri araştırıldı. Yapılan incelemede; model-esaslı PD kontrol tekniği metodunda servo kontrol parametreleri olan konum kontrol ve hız kontrol kazanç değerleri, hata dinamiği denkleminde kritik sönüm şartından hareketle, açısal konum hata fonksiyonunu, konum kontrol kazanç değerinin 50, 100 ve 250 değerlerinde hareket süresince değişimleri incelendi ve 1. ve 2. ekleme ait açısal konum hata fonksiyonunun değişimi şekil 4.7 ve 4.8' de verilmiştir.



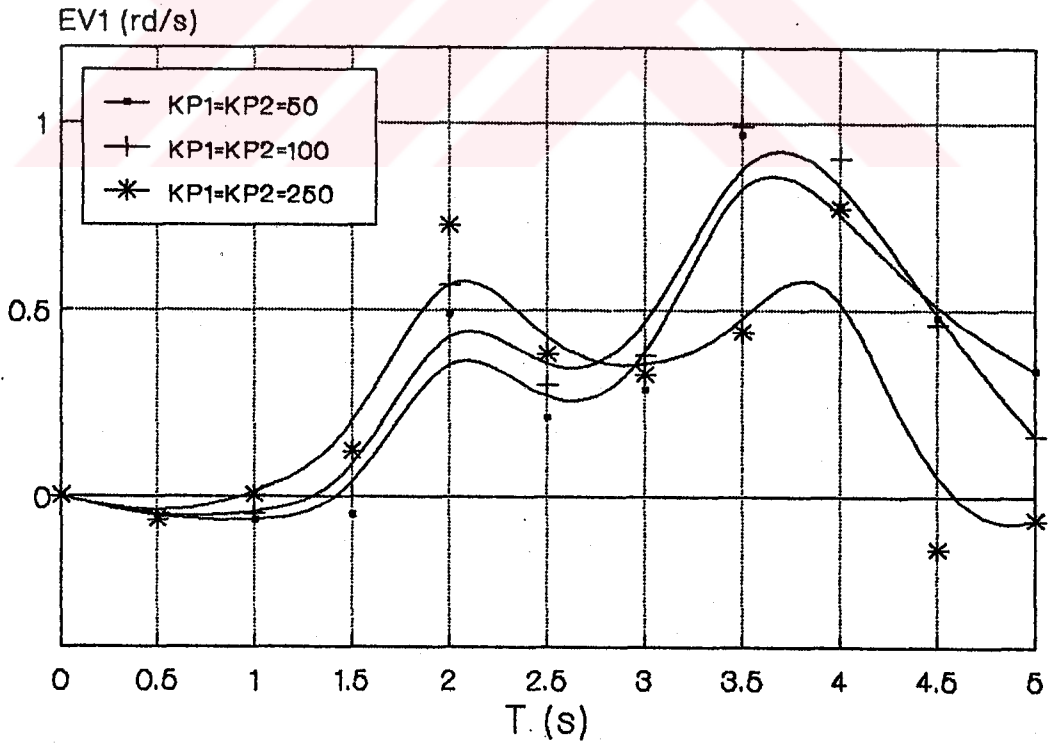
Şekil 4.7. 1 nolu ekleme ait açısal konum hata fonksiyonunun değişik konum kontrol kazanç değerlerinde değişimi.



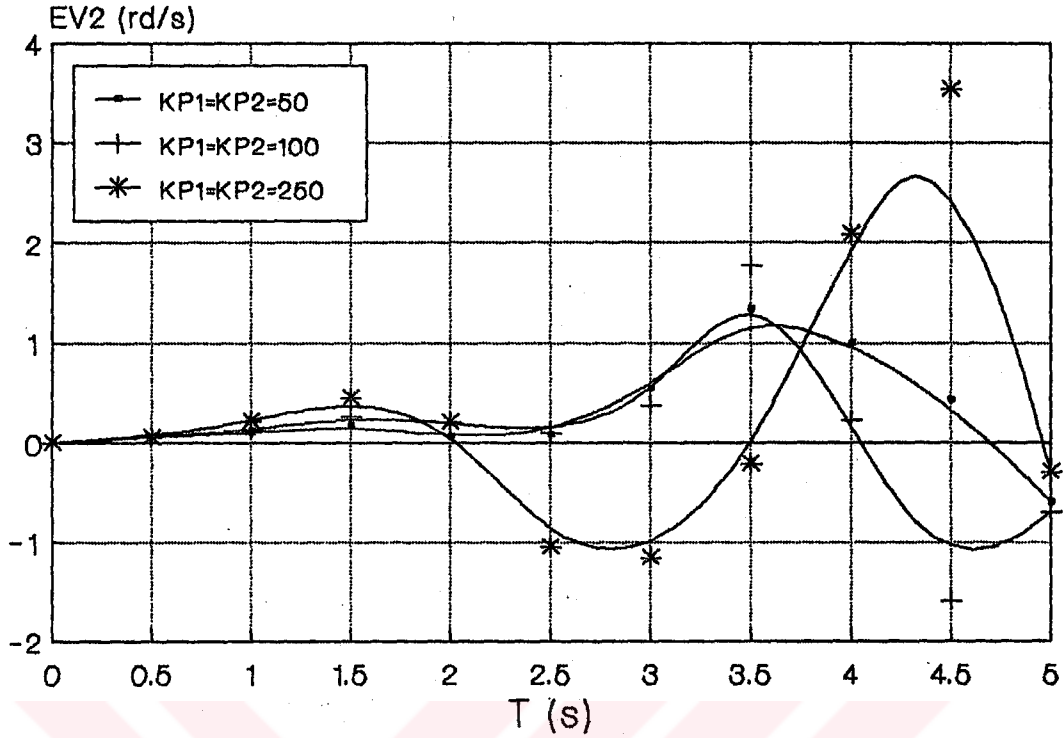
Şekil 4.8. 2 nolu ekleme ait açısal konum hata fonksiyonunun değişik konum kontrol kazanç değerlerinde değişimi.

Şekil 4.7 ve 4.8' den görüldüğü gibi açısal konum hata fonksiyonlarında artan konum kontrol kazanç değerlerinde, açısal konum hata fonksiyonu hareket süresince daha düşük değerlerde kalmaktadır. K_p , konum kontrol kazanç değerini verilen 250 değerinin üzerinde büyütmenin konum hatasını fazla etkilemediği belirlenmiştir. Ayrıca, konum kontrol kazanç değerinin açısal konum hata fonksiyonunu doğrudan etkilediği de belirlenmiştir. 1 nolu ekleme meydana gelen konum hata fonksiyonu hareketin sonunda sıfır olurken, 2 nolu ekleme meydana gelen konum hata fonksiyonunda bir miktar sapma görülmektedir. Bu da model ve gerçek sistem parametrelerinin farklılığı, bozucu tesirlerin tam ve gerçek değerleriyle temsil edilememesinden ileri gelmektedir.

1 ve 2 nolu eklemlere ait açısal hız hata fonksiyonunun hareket süresince değişimleri, konum kontrol kazanç değerinin 50, 100 ve 250 değerlerinde incelenmiş olup, şekil 4.9 ve 4.10'da verilmiştir.



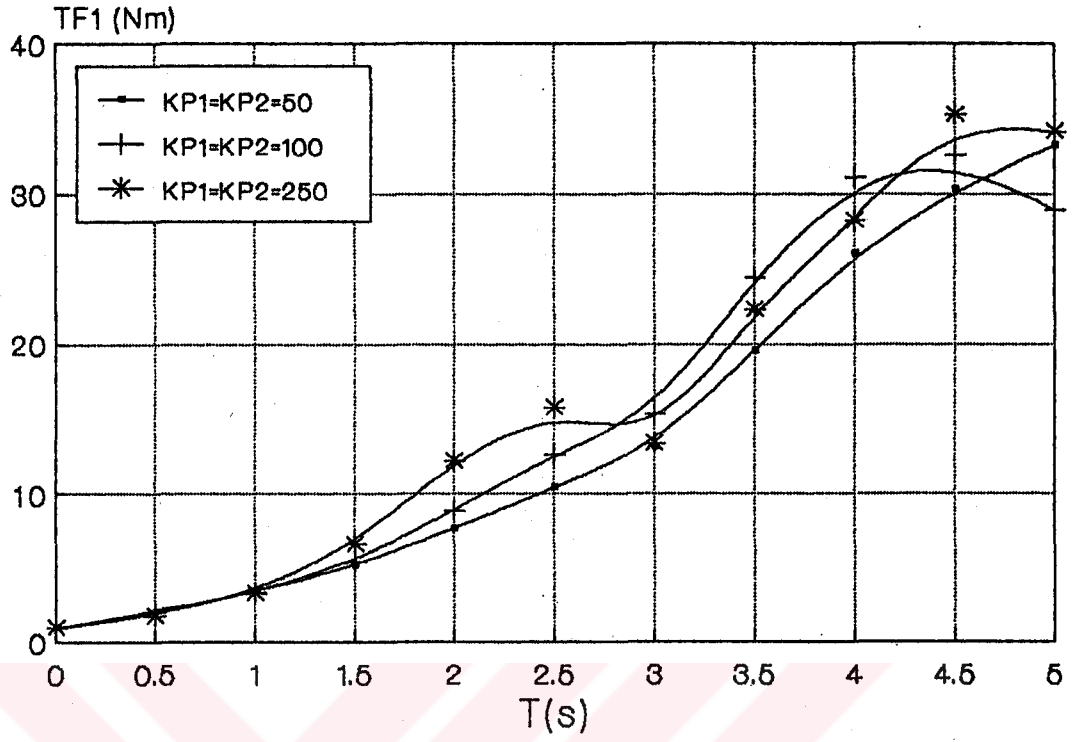
Şekil 4.9. 1 nolu ekleme ait açısal hız hata fonksiyonunun zamana göre değişimi.



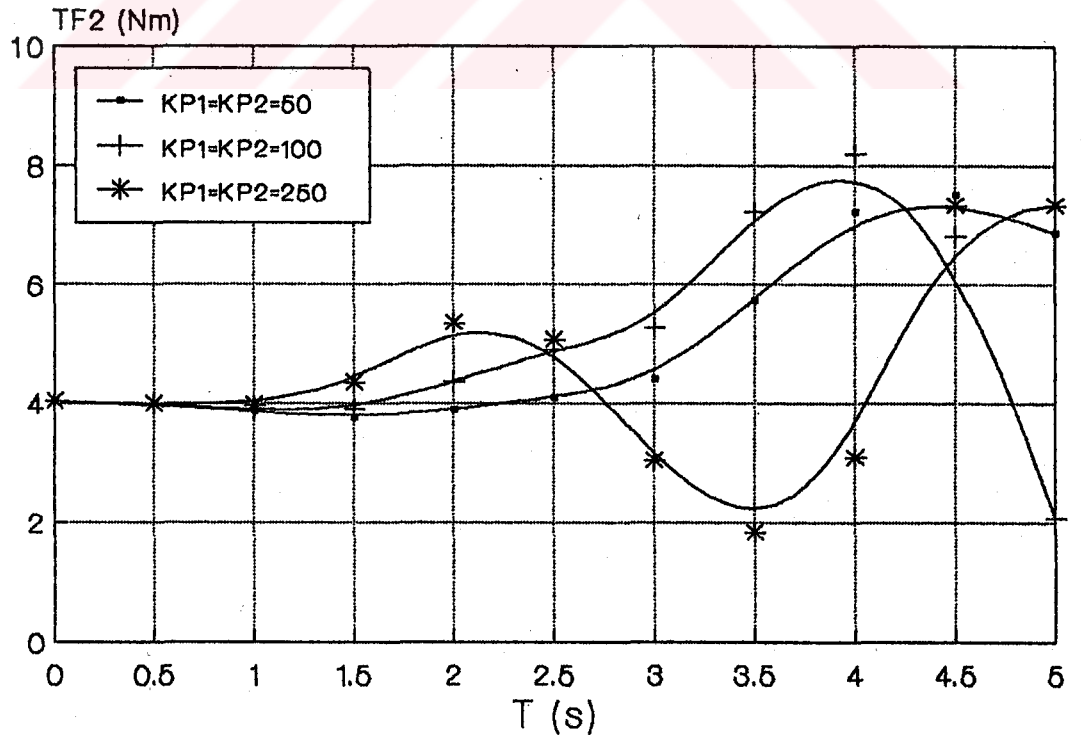
Şekil 4.10. 2 nolu ekleme ait açısal hız hata fonksiyonunun zamana göre değişimi.

1 ve 2 nolu eklemlerde meydana gelen açısal hız hata fonksiyonları, konum kontrol kazanç değerlerinin 50,100 ve 250 değerlerinde hareket süresince birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Hız hata fonksiyonlarında hareketin sonuna doğru eğrilerin yön değiştirdiği görülmektedir, bu ise bu andan itibaren hareketin durdurulması amacıyla karşı bir etki olarak yorumlanabilir.

Ortak robotik manipülasyon sisteminin istenen yörüngede hareketini gerçekleştirebilmesi için robot eklemlerine uygulanması gereken tork değerleri, konum kontrol kazanç değerlerinin 50,100 ve 250 değerleri için hesaplanmış olup, hareket süresince zamana bağlı değişimleri Şekil 4.11 ve 4.12' de verilmiştir.



Şekil 4.11. 1 nolu ekleme uygulanması gereken tork değerinin değişik konum kontrol kazanç değerlerinde değişimi.



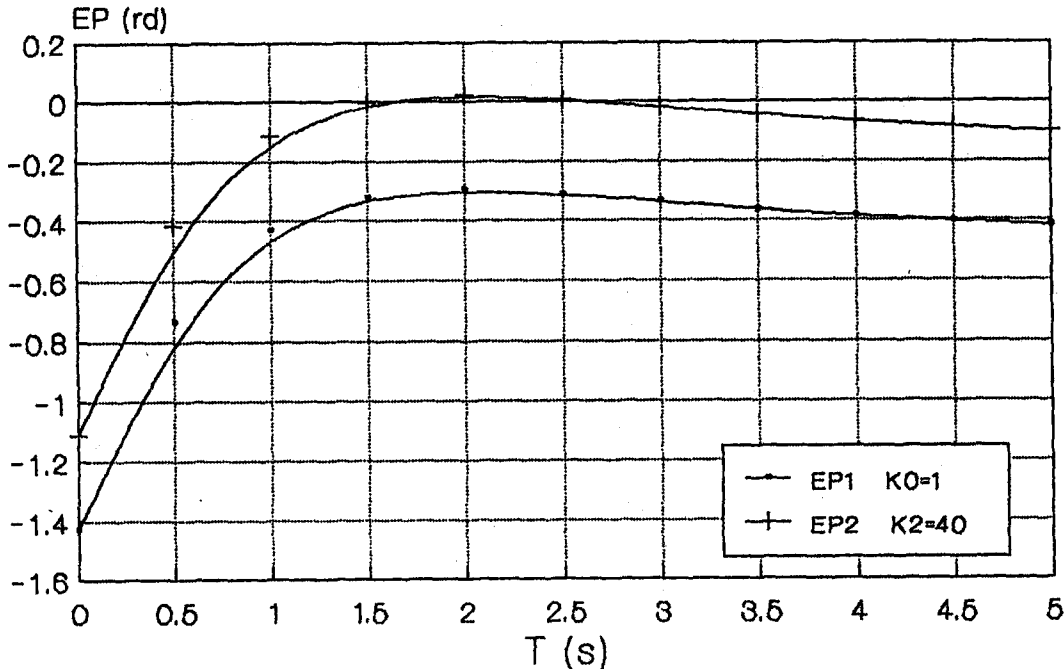
Şekil 4.12. 2 nolu ekleme uygulanması gereken tork değerinin değişik konum kontrol kazanç değerlerinde değişimi.

ortak robotik manipülasyon sisteminde taşınan cismin, istenen yörüngede hareketini gerçekleştirebilmesi için, robot manipülatörlerde birinci ekleme uygulanması gereken tork değeri; cismin ataleti, robot manipülatörlerin ataleti, coriolis ve merkezkaç kuvvetleriyle, ağırlık kuvvetlerini karşılaması gerektiğinden ikinci ekleme uygulanması gereken tork değerinden daha büyük değerde olmaktadır.

4.6. ORTAK ROBOTİK MANİPÜLASYONDA ADAPTİF KONTROL SONUÇLARI

Ortak robotik manipülasyon modeli olarak seçilen, iki serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan iki robot manipülatörle cismin, ön görülen yörüngede hareketini hassas bir şekilde gerçekleştirebilmesi için, 1 nolu robot manipülatöre ait eklem açıları ile açısal hızlarının kontrol işlemi için model-esaslı adaptif kontrol tekniği metodu uygulanmıştır.

Model-esaslı adaptif kontrol tekniğine göre eklem açılarının kontrolü işleminde, referans model ile gerçek sistem çıkış büyüklükleri arasındaki fark olan açısal konum hata fonksiyonunu, minimum yapacak kontrol parametreleri araştırıldı. İnceleme sonucunda; adaptif kontrol tekniği mekanizmasında, kontrol kazançları olarak $k_0=1$, $k_2=40$ değerlerinde, açısal konum hata fonksiyonunun en düşük değere ulaştığı görülmüştür.

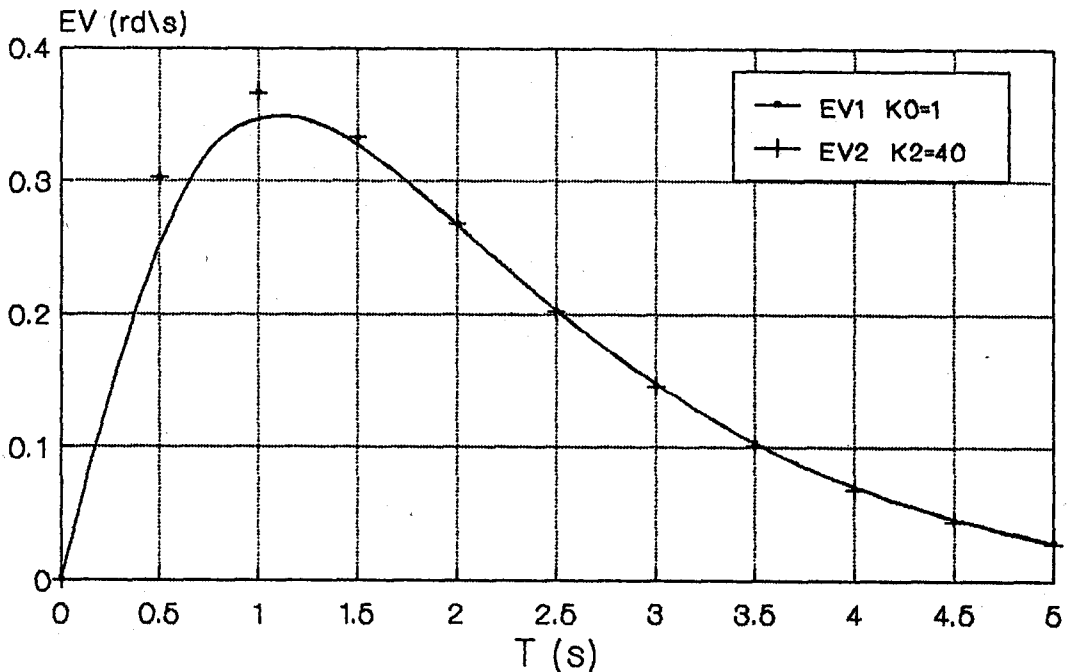


Şekil 4.13. Açısal konum hata fonk. zamana göre değişimi.

Şekil-4.13' den görüleceği üzere konumda oluşan hatalar,bozucuların etkisiyle başlangıçta oluşan sapmalar 1 sn gibi çok kısa bir sürede bastırılmıştır. Konum hata değerinin, bu andan sonra hareketin sonuna kadar oldukça küçük bir değerde kaldığı görülmüştür.1 nolu eklem açısında meydana gelen konum hata değerinin, 2 nolu eklem açısında meydana gelen konum hata değerinden biraz daha büyük değerde olduğu belirlenmiştir. 1 nolu robot kolun, cismin ataleti ve 2 nolu robot kolda oluşan atalet kuvvetleriyle olumsuz etkilenmesi, konum hatasının büyümesine neden olacaktır.

uygulanan adaptif kontrol mekanizmasında $k_0=1$, $k_2=40$ değerlerinde konum hata fonksiyonunun en uygun değerleri aldığı görülmüştür. k_2 kontrol parametresini verilen değerin üzerinde büyütmenin konum hatasını fazla etkilemediği belirlenmiştir.

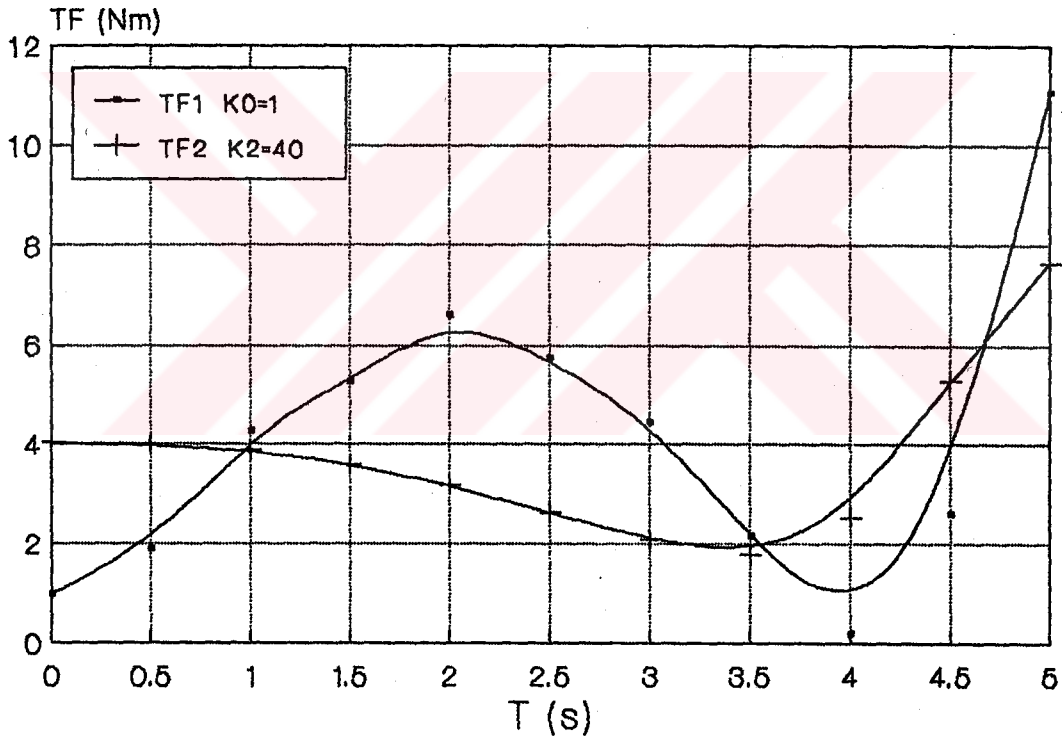
Şekil 4.14'den, 1 ve 2 nolu ekleme ait açısal hız hata fonksiyonunun hareket süresince birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Eklem açısal hız hata fonksiyonunda, bozuculardan dolayı meydana gelen sapmanın, hareketin başlangıcı sayılabilecek 1 sn gibi kısa sürede bastırıldığı ve hareketin sonuna doğru sabit bir değerde kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.14. Açısal hız hata fonksiyonunun zamana göre değişimi.

Kontrol parametrelerinin $k_0=1$, $k_2=40$ değerlerinde hız hata fonksiyonu için en iyi sonuçların alındığı belirlenmiştir. Yine burada k_2 değerinin verilen değerden daha büyük alınmasının hız hata fonksiyonuna herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Ortak robotik manipülasyon sisteminin, istenen yörüngede hareketini gerçekleştirebilmek için robot eklemlerine uygulanması gereken tork değeri, $k_0=1$, $k_2=40$ kontrol parametre değerleri için hesaplanmış olup, hareket süresince zamana bağlı değişimi şekil 4.15' de verilmiştir.



Şekil 4.15. Robotik manipülasyonda robot manipülatör eklemlerinin torkları.

Ortak robotik manipülasyon sisteminde yer alan robot manipülatörlerde birinci ekleme uygulanması gereken tork değeri; cismin ataletini, robot uzuvlarının atalet etkilerini, Coriolis ve merkezkaç kuvvetleriyle, ağırlık kuvvetlerini karşılaması gerektiğinden ikinci ekleme uygulanması gereken tork de-

ğerinden daha büyük değerde olmaktadır. Şekil 4.9'dan görüldüğü gibi, robot manipülatörlerin birinci eklemlerine uygulanan tork değeri 1-11 Nm, ikinci eklemlere uygulanan tork değeri de 2-7 Nm' lik değerler arasında değişmektedir. Bu tork değerleri ise, sistemin çalıştırılması için gereken optimum tork değerleridir. Ayrıca şekilden de görüleceği gibi 3.5 sn' den sonra tork eğrilerinin yön değiştirmesi, hareketi sona erdirmeyi amaçlayan karşı etki olarak yorumlanabilir.

4.7. İRDELEME

İki serbestlik dereceli düzlemsel hareket yapan iki ayrı robot manipülatörle bir cismin taşınması işleminde tanımlı yörünge boyunca yapmış oldukları ortak harekette, manipülatörlerle cismin karşılıklı etkileşim ifadelerinden hareketle kurulan ortak robotik manipülasyon sisteminin dinamik modelinde; yapılacak işin özelliğine göre birden fazla robot manipülatörün uyumlu çalışmasını sağlayacak parametrelerin belirlenmesi, taşınan cismin geometrisi veya ağırlığının dinamik modelin yapısına bir etkisinin olmaması, kurulan dinamik modelin önemli sonuçlarından bazılarıdır.

Ortak robotik manipülasyon sisteminde taşınan cismin, ön görülen yörüngede hareketini hassas bir şekilde gerçekleştirebilmesi için, manipülasyon sisteminde yer alan robot manipülatörlerin eklem açılarına ve açısal hızlarına hesaplanmış tork tekniği yardımı ile model-esaslı PD kontrol metodu uygulanmıştır. Yapılan incelemede; servo kontrol parametreleri olan, konum kontrol ve hız kontrol kazanç değerleri (k_p , k_v) hata dinamiği ifadesinden hareketle kritik sönüm şartına bağlı olarak tayin edildi. Açısal Konum hata fonksiyonunun konum kontrol kazanç değerlerinin artan değerlerinde azalmakta olup özellikle 250 değerinde açısal konum hata fonksiyonu çok küçük bir sapma göstermektedir. Açısal hız hata fonksiyonunda ise; konum kontrol kazanç değerinin artan değerlerinde, hız hata fonksiyonu olumsuz olarak etkilenmekte olup, hız kontrol kazanç değerinin düşük değerlerinde optimum sonuçlar elde edilmiştir. Açısal konum hata fonksiyonunda, konum kontrol kazanç değeri 250' den büyük değerlerinin hata fonksiyonuna

herhangi bir etkisinin olmadığı tesbit edilmiştir. Eklemlere uygulanması gereken tork değerleri ise, 1 nolu ekleme uygulanması gereken tork değerinin 2 nolu ekleme uygulanması gereken tork değerinden daha büyük olarak elde edilmesi beklenen bir sonuçtur.

Ortak robotik manipülasyonda yer alan robot manipülatörlerin model esaslı adaptif kontrol tekniğine göre kontrolunda, eklemlerdeki açısal konum ve açısal hız hata fonksiyonlarının hareket süresince değişimini minimum yapacak kontrol parametreleri, hata dinamiği ifadesinde kritik sönüm şartına bağlı olarak araştırıldı. Yapılan çalışmada, kontrol kazançları olarak $k_0=1$, $k_2=40$ ve k_1 değeri de, kritik sönüm şartından diğer kontrol kazançlarına bağlı olarak belirlendi. Verilen kontrol kazanç değerlerinde, açısal konum ve açısal hız hata fonksiyonlarının minimum değerleri aldığı belirlenmiştir. Burada, k_0 ve k_2 değerlerinin verilen değerden daha büyük alınmasının hata fonksiyonlarını azaltıcı bir etki sağlamadığı görülmüştür. Eklemlere ait açısal konum ve açısal hız hata fonksiyonlarında meydana gelen sapmaların, yukarıda açıklanan kontrol parametreleri için hareketin başlangıcı sayılabilecek 1 sn gibi kısa sürede bastırıldığı ve hareketin sonuna doğru çok küçük bir değerde sabit kaldığı görülmüştür.

Ortak robotik manipülasyon sisteminde yer alan robot manipülatörlerin eklemlerine ait açısal konum ve açısal hız fonksiyonlarının kontrol işlemi için uygulanan haseplanmış tork tekniği yardımı ile model esaslı PD kontrol ve model esaslı adaptif kontrol metodları işlemi sonucunda, açısal konum ve açısal hız hata fonksiyonlarında adaptif kontrol metodu işlemi sonucunda optimum sonuçlar elde edilmiştir. Adaptif kontrol işlemi sonucunda; açısal konum ve açısal hız fonksiyonlarında meydana gelen hatalar, bozucuların etkisiyle oluşan sapmalar 1 sn gibi çok kısa bir sürede bastırılmıştır. Model esaslı PD kontrol işlemi sonucunda ise; açısal konum ve açısal hız fonksiyonlarında meydana gelen sapmalar, hareket süresince belirli bir değerde tutulmuştur.

Model ve gerçek sistem parametrelerinin farklılığı, bozucu tesirlerin tam ve gerçek değerleriyle temsil edilememesi veya tamamen belirlenememesinden dolayı, eklemlere ait açısal konum ve açısal hız hata fonksiyonlarında bir miktar sapma meydana gelmektedir. 1 nolu eklemden meydana gelen açısal konum ve açısal hız hata değerleri, 2 nolu eklemden meydana gelen açısal konum ve açısal hız hata değerinden biraz daha büyük değerleri almaktadır. Gövdeye veya sabit uzva yakın uzuvların kendisinden sonra gelen diğer uzuvların atalet, ağırlık ve sürtünme kuvveti gibi karşı etkilerin tesiri altında kalması, bu durumun nedenleri olarak açıklanabilir.

Ortak robotik manipülasyon sisteminde, her bir eklem birbirinden bağımsız olarak tahrik edilmekle birlikte, kinematik ve dinamik denklemler uzuvların birbirlerine göre bağıl hareketleri esas alınarak belirlendiği için, temel tahrik elemanı olarak kabul edebileceğimiz birinci uzuvların hız ve ivmesi gibi kinematik parametreler, diğer uzuvların dinamik dengesini ve dolayısıyla eklemlere uygulanacak tahrik momenti değerlerini önemli oranda etkilemektedir.

Sonuç olarak, ortak manipülasyon modellenmesinde, tek robotlu manipülasyondan farklı olarak, bir robotun diğer robot ve sistem unsurları üzerine etkilerini dikkate almak, yani ortak temas noktalarında eşdeğer temas kuvvetlerini hesaba katmak gereklidir. Robot el tarafından cisme uygulanması gereken bileşke kuvvetin manipülasyona katılan robot manipülatörler tarafından eşit olarak karşılandığı kabul edildi. Ayrıca, genelleştirilmiş dinamik model nedeniyle kontrol işleminde de, tek robotlu manipülasyona göre uygulama yönünden belirgin farklılıklar oluşmamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Xi. N., Tarn, T.J. and Bejczy, A.K., "Event-Based Planning and Control for Multi-Robot Coordination", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1, pp. 251-259, 1993.
- [2] Paljug, E. and Yun, X., "Experimental Results of Two Robot Arms Manipulating Large Objects", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1, pp.517-539, 1993.
- [3] Koivo, A.J. and Bekey, G. A., "Report of Workshop on Coordinated Multiple Robot Manipulators: Planning, Control and Application", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.4 No.1, pp.91-94, February 1988.
- [4] Zheng, Y.F. and Chen, M.Z., "Trajectory Planning for two Manipulators to Deform Flexible Beams", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.3, pp. 1019-1043, 1993.
- [5] Coupez, D., Delchambre, A. and Gaspart, P., "The Scheduling of a Multiple Robots Assembly Cell", Proceedings of the 5th CIM Europe Conference, pp.185-280, 1989.
- [6] Cardarelli, G., Palumbo, M. and Pelagagge, P.M., "Some Criteria to Help the Experimental Setup of Assembly Cells with Cooperating Robots", 3rd IEEE International Conference on Systems Integration, ICSI'94, pp. 235-286, Sao Paulo, Brazil, August 1994.
- [7] Shin, K.G., Epstein, M.E. and Volz, R.A., "A Module Architecture for an Integrated Multi-Robot System", Proceedings of the 8th International Conference on Systems Sciences, pp.120-129, 1985.

- [8] Cardarelli, G., Palumbo, M. and Pelagagge, P.M., "A Design Approach to Assembly Processes with Cooperating Robots", Internal Report, Faculty of Eng., University of L'Aquila Italy, 1994.
- [9] Zheng, Y.F., Luh, J.Y.S. and Jia, P.F., "Integrating Two Industrial Robot into a Coordinated System", Computers in Industry, Vol.12, pp.285-383, 1989.
- [10] Duffy, N.D., Herd, J.T. and Philip, G.P., "A Structured Approach to the Control of Parallel Acting Cooperating Robots", Proceedings of the 18th International Symposium on Industrial Robots, pp.65-112, Lausanne, April, 1988.
- [11] Fu, L.C., and Hsu, Y.J., "Fully Automated Two-Robot Flexible Assembly Cell", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.3, pp. 332-370, Atlanta, GA, May 1993.
- [12] Homem de Mello, L.S. and Sanderson, A.C., "Representation of Mechanical Assembly Sequences", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.7 No.2, pp.211-238, 1991.
- [13] Wilhelm, W.E., "Complexity of Sequencing Tasks in Assembly Cells Attended by One or Two Robots", Naval Research Logistics, Vol.34, pp.721-759, 1987.
- [14] Ramadorai, A.K., Tarn, T.J., Bejczy, A.K., and Xi, N., "Task Driven Control of Multi-Arm Systems", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.2 No.3, pp.198-205, September 1994.
- [15] Luecke, G.R. and Gardner J.F., "Experimental Results for Force Distribution in Cooperating Manipulator Systems Using Local Joint Control", The International of Robotics Research, Vol.13 No.6, pp.471-480, Dec. 1994.
- [16] Song, G. and Cai, L., "Smooth Robust Control of Cooperating Robot Manipulators Handling a Constrained Object",

- IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.1 No.3, pp.931-936, Texas 1994.
- [17] Vukobratović, M. and Potkonjak, V., Applied Dynamics and CAD of Manipulation Robots, Springer, Berlin, 1985.
- [18] Luh, J.Y.S., and Zheng, Y.F., IEEE J Robotics Automatic and Automation 2", pp.95, 1985.
- [19] Kocabaş, H., "Modüler Robot Konstrüksiyonu ve Kinematığı" IV.Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, say. 525-534, İTÜ., İstanbul, 1990.
- [20] Craig, J.J., "Introduction to Robotics Mechanical & Control", Addison-Wesley Publishing Company, 1986.
- [21] Denavit, J., and Hartenberg, R.S., "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices", Trans. of ASME, J. of Applied Mechanics, pp.215-221, June 1955.
- [22] Luh, J.Y.S., Walker, M.W., and Paul, R.P., "On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulators", Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.102, pp.69-76, June 1980.
- [23] Lee, C.S.G., "Robot Arm Kinematics, Dynamics and Control", Computer, Vol.15, No.12, pp.62-80, Dec. 1982.
- [24] Djurovic, M.D., and Vukobratovic, M.K., "A Contribution to Dynamic Modeling of Cooperative Manipulation", Mech. Mach. Theory, Vol.25, No.4, pp.407-415, G.Britain, 1990.
- [25] Balkan, T., "Modelling Trajectory Planning and Control of Computer Controlled Manipulators", Doktora Tezi, ODTU Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1988.
- [26] Kahn, M.E., and Roth, B., "The Near-Minimum-Time Control of Open-Loop Articulated Kinematic Chains", Trans. ASME, pp.164-172, Sept. 1971.

- [27] Luh, J.Y.S., Fisher, W.D., and Paul, R.P.C., "Joint Torque control by a Direct Feedback for Industrial Robots", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-28, No.2, pp.153-161, Feb. 1983.
- [28] Craig, J.J., Hsu, P., and Sastry, S.S., "Adaptive Control of Mechanical Manipulators", The International J. of Robotics, Research, Vol.6, No.2, pp.157-169, Summer 1987.
- [29] Dubowsky, S., and Des Forges, D.T., "The Application of Model-Referenced Adaptive control to Robotic Manipulators", Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.101, pp.193-200, Sept. 1989.
- [30] Koivo, A.J., and Gwa, T.H., "Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulators", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-28, No.1, pp.162-171, Feb. 1983.
- [31] Fu, K.S., Gonzales, R.C., and Lee, C.S.G., "Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence", McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [32] Chalam, V.V., "Adaptive Control Systems Techniques and Applications", Marcel Dekker, Inc., New York, America, 1987.
- [33] Seto, W.W., "Mekanik Titreşimler", Çeviren Toprak, T., İTÜ. Makina Fakültesi Mukavemet Kürsüsü, İstanbul, 1977.

E K L E R

EK-1 : (3.11) VE (3.12) nolu denklemlerin çözümü.

EK-2 : (3.80) nolu diferansiyel denklemin çözümü.

EK-3 : (3.85) ve (3.86) nolu diferansiyel denkl. çözümü.

EK-4 : (3.82) nolu diferansiyel denklemin çözümü.

EK-5 : Hesaplanmış tork tekniği yardımı ile model esaslı PD kontrol programı.

EK-6 : Model esaslı adaptif kontrol programı.

EK-1

İki nokta arasındaki yörüngeyi oluşturan (3.11) ve (3.12) nolu polinomların çözümü :

$$\theta_A(t) = a_{10} + a_{11}t + a_{12}t^2 + a_{13}t^3 \quad (3.11)$$

$$\theta_B(t) = a_{20} + a_{21}t + a_{22}t^2 + a_{23}t^3 \quad (3.12)$$

Verilen başlangıç şartlarına bağlı olarak [23] ;

$$\theta_o = a_{10} \quad (1)$$

$$\theta_v = a_{10} + a_{11}t_f + a_{12}t_f^2 + a_{13}t_f^3 \quad (2)$$

$$\theta_v = a_{20} \quad (3)$$

$$\theta_s = a_{20} + a_{21}t_f + a_{22}t_f^2 + a_{23}t_f^3 \quad (4)$$

$$a_{11} = 0 \quad (5)$$

$$a_{21} + 2 a_{22}t_f + 3 a_{23}t_f^2 = 0 \quad (6)$$

$$a_{11} + 2 a_{12}t_f + 3 a_{13}t_f^2 = a_{21} \quad (7)$$

$$2 a_{12} + 6 a_{13}t_f = 2 a_{22} \quad (8)$$

(2) nolu denklemden,

$$a_{12}t_f^2 + a_{13}t_f^3 = \theta_v - \theta_o \quad (9)$$

(7) ve (8) nolu denklemdeki a_{21} ve a_{22} değerlerini (4) nolu denklemde yazarsak,

$$\theta_s - \theta_v = \left[2a_{12}t_f + 3a_{13}t_f^2 \right] t_f + \left[a_{12} + 3 a_{13}t_f \right] t_f^2 + a_{23}t_f^3 \quad (10)$$

elde edilir. (6) nolu denklemden;

$$a_{23}t_f^2 = \frac{-a_{21}-2a_{22}t_f}{3}$$

$$a_{23}t_f^2 = \frac{-(2a_{12}t_f+3a_{13}t_f^2) - 2(a_{12}+3a_{13}t_f)t_f}{3}$$

$$a_{23}t_f^2 = \frac{-4a_{12}t_f-9a_{13}t_f^2}{3} \quad (11)$$

(11) nolu denklemi t_f ile çarpıp (10) nolu denklemde yerine korsak,

$$\theta_s - \theta_v = 3a_{12}t_f^2 + 6a_{13}t_f^3 + a_{23}t_f^3$$

$$\theta_s - \theta_v = 3a_{12}t_f^2 + 6a_{13}t_f^3 + \left[\frac{-4a_{12}t_f^2 - 9a_{13}t_f^3}{3} \right]$$

$$\theta_s - \theta_v = \frac{5}{3} a_{12}t_f^2 + 3a_{13}t_f^3 \quad (12)$$

elde edilir. Böylece,

$$\frac{5}{3} a_{12}t_f^2 + 3a_{13}t_f^3 = \theta_s - \theta_v$$

$$a_{12}t_f^2 + a_{13}t_f^3 = \theta_v - \theta_o$$

denklem sistemini elde ederiz. Bu denklem sisteminin çözümünden,

$$a_{12} = \frac{12\theta_v - 3\theta_s - 9\theta_o}{4t_f^2} \quad (13)$$

$$a_{13} = \frac{-8\theta_v + 5\theta_o + 3\theta_s}{4t_f^3} \quad (14)$$

olarak bulunur. (7), (8) ve (11) nolu denklemlerde a_{12} ve a_{13} değerlerini yazarsak,

$$a_{21} = \frac{3\theta_s - 3\theta_o}{4t_f} \quad (15)$$

$$a_{22} = \frac{-12\theta_v + 6\theta_s + 6\theta_o}{4t_f^2} \quad (16)$$

$$a_{23} = \frac{8\theta_v - 5\theta_s - 3\theta_o}{4t_f^3} \quad (17)$$

elde edilir.

EK-2

(3.80) nolu, i. eklem için referans model diferansiyel denklemin çözümü:

$$a_1 \ddot{y}_1(t) + b_1 \dot{y}_1(t) + y_1(t) = r_1(t) \quad (3.80)$$

burada;

$$a_1 = \frac{1}{\omega_{ni}^2}, \quad b_1 = \frac{2\zeta_i}{\omega_{ni}}$$

$\omega = 1$, $\zeta = 1$ [33], alınmak suretiyle, $a_1=1$, $b_1=2$ değerleri tayin edildi.

$r_1(t)$: Referans giriş değeri, birim basamak giriş değeri olarak alındı.

$$\ddot{y}_1(t) + 2\dot{y}_1(t) + y_1(t) = r_1(t) \quad (1)$$

$$(D^2 + 2D + 1) y_1(t) = r_1(t) \quad (2)$$

Her iki tarafın Laplace' nın alınmasıyla,

$$Y_1(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} R(s) \quad (3)$$

$R(s) = 1/s$ (birim basamak cevabı)

$$Y_1(s) = \frac{1}{s(s+1)^2} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s+1} + \frac{C}{(s+1)^2} \quad (4)$$

denkleminde; $A=1$, $B=-1$, $C=-1$ değerleri bulunur.

$$Y_1(s) = \frac{1}{s} + \frac{-1}{s+1} + \frac{-1}{(s+1)^2} \quad (5)$$

$$y_1(t) = 1 - e^{-t} - te^{-t} \quad (6)$$

olarak bulunur.

EK-3

(3.85) ve (3.86) nolu diferansiyel denklemlerin çözümü :

(3.85) nolu diferansiyel denklem ;

$$a_1 \ddot{u}_1(t) + b_1 \dot{u}_1(t) + u_1(t) = -\ddot{y}_1(t) \quad (1)$$

burada;

$$y_1(t) = 1 - e^{-t} - te^{-t}$$

$$\ddot{y}_1(t) = e^{-t} - te^{-t}$$

$$\ddot{u}_1(t) + 2 \dot{u}_1(t) + u_1(t) = te^{-t} - e^{-t}$$

$$u_1(s) = \frac{1}{s^2+2s+1} \left[\frac{1}{(s+1)^2} \right] - \frac{1}{s^2+2s+1} \left[\frac{1}{(s+1)} \right] \quad (2)$$

$$u_1(t) = \frac{1}{6} t^3 e^{-t} - \frac{1}{2} t^2 e^{-t} \quad (3)$$

(3.86) nolu diferansiyel denklem :

$$a_1 \ddot{w}_1(t) + b_1 \dot{w}_1(t) + w_1(t) = -\dot{y}_1(t)$$

$$\dot{y}_1(t) = t e^{-t}$$

$$\ddot{w}_1(t) + 2 \dot{w}_1(t) + w_1(t) = -t e^{-t} \quad (4)$$

$$w_1(s) = \frac{1}{s^2+2s+1} \left[\frac{-1}{(s+1)^2} \right] \quad (5)$$

$$w_1(t) = \frac{-1}{6} t^3 e^{-t} \quad (6)$$

olarak elde edilir.

EK-4

(3.82) nolu diferansiyel denklemin çözümü :

$$\alpha_1(t) \ddot{x}_1(t) + \beta_1(t) \dot{x}_1(t) + x_1(t) = r_1(t)$$

burada, $\alpha_1(t)$ ve $\beta_1(t)$ 'yi sabit değer almak suretiyle çözüme gidildi.

$$(\alpha_1 D^2 + \beta_1 D + 1) = r_1(t) \quad (1)$$

$$\alpha_1 a^2 + \beta_1 a + 1 = 0 \quad (\text{karakteristik denklem}) \quad (2)$$

$$\Delta = \beta_1^2 - 4\alpha_1 \quad (3)$$

$\Delta > 0$ ise,

$$a_{1,2} = \frac{-\beta_1 \pm \sqrt{\Delta}}{2\alpha_1} \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{-\beta_1 + \sqrt{\Delta}}{2\alpha_1} \quad (5)$$

$$a_2 = \frac{-\beta_1 - \sqrt{\Delta}}{2\alpha_1} \quad (6)$$

a_1 ve a_2 değerlerine bağlı olarak, genel çözüm;

$$u(t) = C_1 e^{a_1 t} + C_2 e^{a_2 t} \quad (7)$$

$$t = 0 \text{ ise } u(t) = x_0$$

$$t = 0 \text{ ise } \dot{u}(t) = 0 \quad \text{başlangıç şartlarına göre,}$$

$$C_1 = -x_0 \frac{a_2}{a_1 - a_2}, \quad C_2 = x_0 \frac{a_1}{a_1 - a_2}$$

$$u(t) = -x_0 \frac{a_2}{a_1 - a_2} e^{a_1 t} + x_0 \frac{a_1}{a_1 - a_2} e^{a_2 t} \quad (8)$$

olarak bulunur. Özel çözüm,

$$v(t) = \frac{1}{\alpha_1 D^2 + \beta_1 D + 1} (1) = \frac{1}{\alpha_1 D^2 + \beta_1 D + 1} (e^{0t}) = 1 \quad (9)$$

$$x_1(t) = u(t) + v(t) \quad (10)$$

$$x_1(t) = -x_0 \frac{a_2}{a_1 - a_2} e^{a_1 t} + x_0 \frac{a_1}{a_1 - a_2} e^{a_2 t} + 1 \quad (11)$$

$\Delta = 0$ ise,

$$a_{1,2} = \frac{-\beta_1}{2\alpha_1} = a \quad (12)$$

genel çözüm,

$$u(t) = (C_0 + C_1 t) e^{at} \quad (13)$$

$$t=0 \text{ ise } u(t) = x_0$$

$$t=0 \text{ ise } \dot{u}(t) = 0 \text{ şartlarından,}$$

$$C_0 = x_0, \quad C_1 = -a x_0 \text{ bulunur.}$$

$$u(t) = (x_0 - a x_0 t) e^{at} \quad (14)$$

$$x_1(t) = x_0 (1 - at) e^{at} + 1 \quad (15)$$

$\Delta < 0$ ise,

$$a_{1,2} = \frac{-\beta_1 \pm \sqrt{\Delta}}{2\alpha_1} = \frac{-\beta_1}{2\alpha_1} \pm \sqrt{\frac{\beta_1^2 - 4\alpha_1}{4\alpha_1^2}} \quad (16)$$

$$A = \frac{-\beta_1}{2\alpha_1}, \quad B = \sqrt{\frac{\beta_1^2 - 4\alpha_1}{4\alpha_1^2}}$$

$$u(t) = e^{At} (C_1 \cos Bt + C_2 \sin Bt) \quad (17)$$

$$t=0 \text{ ise } u(t) = x_0$$

$$t=0 \text{ ise } \dot{u}(t) = 0 \text{ başlangıç şartlarından,}$$

$$C_1 = x_0, \quad C_2 = -\frac{A}{B} x_0 \text{ olarak bulunur.}$$

$$u(t) = e^{At} (x_0 \cos Bt - \frac{A}{B} x_0 \sin Bt) \quad (18)$$

$$x_i(t) = x_0 e^{At} (\cos Bt - \frac{A}{B} \sin Bt) + 1 \quad (19)$$

x_0 : başlangıç konum değeri.

EK-5

HESAPLANMIŞ TORK TEKNİĞİ YARDIMI İLE MODEL ESASLI PD KONTROL PROGRAMI

```

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION PD1(90),PD2(90),VD1(90),VD2(90),T(2,1),M(2,2),A1(90),
*A(2,1),TF1(90),TF2(90),AD1(90),AD2(90),P1(90),P2(90),V1(90),
*EP1(90),EP2(90),EV1(90),EV2(90),A2(90),V2(90)
AM0=0.5
AIYY=AM0*3.54E-3
AIZZ=AM0*0.024
OPEN(7,FILE='HUR3.OUT')
OPEN(8,FILE='HUR4.OUT')
OPEN(5,FILE='HUR3.DAT')
OPEN(9,FILE='HUR4.DAT')
WRITE(*,*)'AKP1 AKP2 DEGERLERINI GIRINIZ'
READ(*,*)AKP1,AKP2
IU=11
DT=.5
DO 10 I=1,IU
AKV1=2*(AKP1)**0.5
AKV2=2*(AKP2)**0.5
READ(5,*)AD1(I),AD2(I),VD1(I),VD2(I),PD1(I),PD2(I)
10 CONTINUE
I=1
P1(I)=PD1(I)
P2(I)=PD2(I)
V1(I)=VD1(I)
V2(I)=VD2(I)
250 READ(9,*)AT2,AT1,VT2,VT1,PT2,PT1
EP1(I)=PD1(I)-P1(I)
EP2(I)=PD2(I)-P2(I)
EV1(I)=VD1(I)-V1(I)
EV2(I)=VD2(I)-V2(I)
A1(I)=AD1(I)+AKV1*EV1(I)+AKP1*EP1(I)
A2(I)=AD2(I)+AKV2*EV2(I)+AKP2*EP2(I)
C1=COS(P1(I))
C2=COS(P2(I))
C12=COS(P1(I)+P2(I))
S2=SIN(P2(I))
CC11=-.2*S2*V2(I)**2-.4*S2*V1(I)*V2(I)
CC12=.2*S2*V1(I)**2
H11=.91+.4*C2+AIYY
H12=.16+.2*C2
H13=.16+.2*C2
H14=.16+AIZZ
G11=3.92*C12+14.71*C1
G12=3.92*C12+9.81*AM0

H21=0.36*COS(PT2)+1.17
H22=0.18*COS(PT2)+0.09
H23=0.18*COS(PT2)+0.09
H24=0.09
G21=2.943*COS(PT1+PT2)+17.658*COS(PT1)
G22=2.943*COS(PT1+PT2)
CC21=-0.18*SIN(PT2)*VT2**2-0.36*SIN(PT2)*VT1*VT2
CC22=0.18*SIN(PT2)*VT1**2

```

```

H1=H11+H21
H2=H12+H22
H3=H13-H23
H4=H14-H24
G1=G11+G21
G2=G12-G22
CC1=CC11+CC21
CC2=CC12-CC22

```

C

```

TF1(I)=(H1*A1(I)+H2*A2(I)+CC1+G1)
TF2(I)=(H3*A1(I)+H4*A2(I)+CC2+G2)
WRITE(4,3)I,EP1(I),EP2(I),EV1(I),EV2(I),TF1(I),TF2(I)
3 FORMAT(I5,6(' ',1PE12.5))
T(1,1)=TF1(I)-CC1-G1
T(2,1)=TF2(I)-CC2-G2
A1(I)=(H4*T(1,1)-H2*T(2,1))/(H1*H4-H2*H3)
A2(I)=(H3*T(1,1)+H1*T(2,1))/(H1*H4-H2*H3)
K=I+1
P1(K)=P1(I)+V1(I)*DT+.5*A1(I)*DT**2
P2(K)=P2(I)+V2(I)*DT+.5*A2(I)*DT**2
V1(K)=V1(I)+A1(I)*DT
V2(K)=V2(I)+A2(I)*DT
I=K
IF(I.GT.IU)GOTO 740
GOTO 250
740 STOP
END

```

EK-6

C
C
C

MODEL ESASLI ADAPTIF KONTROL PROGRAMI

```

      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION PD1(90),PD2(90),VD1(90),VD2(90),A1(90),
      *TF1(90),TF2(90),AD1(90),AD2(90),P1(90),P2(90),V1(90),
      *EP1(90),EP2(90),EV1(90),EV2(90),A2(90),V2(90),
      *ALFA1(100),BETA1(100),ALFA2(100),BETA2(100)
      AMO=0.5
      AIYY=AMO*3.54E-3
      AIZZ=AMO*0.024
      OPEN(7,FILE='HUR3.OUT')
      OPEN(8,FILE='HUR4.OUT')
      OPEN(3,FILE='HUR3.DAT')
      OPEN(9,FILE='HUR4.DAT')
      DT=0.5
      IU=11
      DO 10 I=1,IU
      READ(3,*) AD1(I), AD2(I), VD1(I), VD2(I), PD1(I), PD2(I)
10  CONTINUE
      I=0
      P1(1)=PD1(1)
      P2(1)=PD2(1)
      V1(1)=VD1(1)
      V2(1)=VD2(1)
250  I=I+1
      READ(9,*) AT2, AT1, VT2, VT1, PT2, PT1
      EP1(I)=PD1(I)-P1(I)
      EP2(I)=PD2(I)-P2(I)
      EV1(I)=VD1(I)-V1(I)
      EV2(I)=VD2(I)-V2(I)
      A1(I)=AD1(I)
      A2(I)=AD2(I)
      C1=COS(P1(I))
      C2=COS(P2(I))
      C12=COS(P1(I)+P2(I))
      S2=SIN(P2(I))
      CC11=-0.2*S2*V2(I)**2-0.4*S2*V1(I)*V2(I)
      CC12=0.2*S2*V1(I)**2
      H11=0.91+0.4*C2+AIYY
      H12=0.16+0.2*C2
      H13=0.16+0.2*C2
      H14=0.16+AIZZ
      G11=3.92*C12+14.71*C1
      G12=3.92*C12+9.81*AMO
C
      H21=0.36*COS(PT2)+1.17
      H22=0.18*COS(PT2)+0.09
      H23=0.18*COS(PT2)+0.09
      H24=0.09
      G21=2.943*COS(PT1+PT2)+17.658*COS(PT1)
      G22=2.943*COS(PT1+PT2)
      CC21=-0.18*SIN(PT2)*VT2**2-0.36*SIN(PT2)*VT1*VT2
      CC22=0.18*SIN(PT2)*VT1**2
C
      H1=H11+H21
      H2=H12+H22
      H3=H13-H23

```

```

H4=H14-H24
G1=G11+G21
G2=G12-G22
CC1=CC11+CC21
CC2=CC12-CC22

```

C

```

TF1(I)=H1*A1(I)+H2*A2(I)+CC1+G1
TF2(I)=H3*A1(I)+H4*A2(I)+CC2+G2

```

C

```

WRITE(7,3) I, EP1(I), EP2(I), EV1(I), EV2(I)
3 FORMAT(I5,2X,6(1PE12.5))
T11=TF1(I)-CC1-G1
T22=TF2(I)-CC2-G2
A1(I)=(H4*T11-H2*T22)/(H1*H4-H2*H3)
A2(I)=(-H3*T11+H1*T22)/(H1*H4-H2*H3)
K=I+1
P1(K)=P1(I)+V1(I)*DT+0.5*A1(I)*DT**2
P2(K)=P2(I)+V2(I)*DT+0.5*A2(I)*DT**2
V1(K)=V1(I)+A1(I)*DT
V2(K)=V2(I)+A2(I)*DT
WRITE(8,11) A1(I), A2(I), V1(K), V2(K), P1(K), P2(K)
IF(I.EQ.IU) GOTO 740
GOTO 250

```

```

11 FORMAT(10(1X,1PE12.5))

```

C

```

740 REWIND 8
WRITE(*,*) 'AKO AK2 DEGERINI GIR'
READ(*,*) AK0, AK2
AK1=2*(AK0*AK2)**0.5
I=0
TT=0
100 READ(8,11,END=200) X2, XX2, X1, XX1, X, XX
I=I+1
Y=1-EXP(-TT)*(1-TT)
Y1=EXP(-TT)*TT
Y2=EXP(-TT)*(1-TT)
YY=1-EXP(-TT)*(1-TT)
YY1=EXP(-TT)*TT
YY2=EXP(-TT)*(1-TT)
W=- (EXP(-TT)*TT**3)/6
W1=-EXP(-TT)*(3*TT*TT-TT**3)/6
W2=-EXP(-TT)*(-6*TT*TT+TT**3+6*TT)/6
WW=- (EXP(-TT)*TT**3)/6
WW1=-EXP(-TT)*(3*TT*TT-TT**3)/6
WW2=-EXP(-TT)*(-6*TT*TT+TT**3+6*TT)/6
U=EXP(-TT)*(-0.5*TT*TT+(TT**3)/6)
U1=EXP(-TT)*(TT*TT-(TT**3)/6-TT)
U2=EXP(-TT)*(-1.5*TT*TT+(TT**3)/6-1+3*TT)
UU=EXP(-TT)*(-0.5*TT*TT+(TT**3)/6)
UU1=EXP(-TT)*(TT*TT-(TT**3)/6-TT)
UU2=EXP(-TT)*(-1.5*TT*TT+(TT**3)/6-1+3*TT)
E=Y-X
E1=Y1-X1
E2=Y2-X2
EE=YY-XX
EE1=YY1-XX1
EE2=YY2-XX2
AA=(AK2*E2+AK1*E1+AK0*E)*(AK2*U2+AK1*U1+AK0*U)
BB=(AK2*E2+AK1*E1+AK0*E)*(AK2*W2+AK1*W1+AK0*W)
AAA=(AK2*EE2+AK1*EE1+AK0*EE)*(AK2*UU2+AK1*UU1+AK0*UU)

```

```

BBB=(AK2*EE2+AK1*EE1+AK0*EE)*(AK2*WW2+AK1*WW1+AK0*WW)
ALFA1(I)=AA*DT+ALFA1(I-1)
BETA1(I)=BB*DT+BETA1(I-1)
ALFA2(I)=AAA*DT+ALFA2(I-1)
BETA2(I)=BBB*DT+BETA2(I-1)
C
SS1=-BETA1(I)/(2*ALFA1(I))
RK1=BETA1(I)**2-4*ALFA1(I)
IF(RK1.LT.0) GOTO 150
ADD1=SS1+SQRT(RK1)/(2*ALFA1(I))
ADD2=SS1-SQRT(RK1)/(2*ALFA1(I))
XH1=1.43*(-ADD2*EXP(ADD1*TT)+ADD1*EXP(ADD2*TT))/(ADD1-ADD2)
XHU1=1.43*(-ADD2*ADD1*EXP(ADD1*TT)+ADD1*ADD2*EXP(ADD2*TT))/
*(ADD1-ADD2)
GO TO 151
C
150 RR1=SQRT(BETA1(I)**2-4*ALFA1(I))/(2*ALFA1(I))
XH1=1.43*EXP(SS1*TT)*(COS(RR1*TT)-SS1/RR1*SIN(RR1*TT))
XHU1=-1.43*EXP(SS1*TT)*SIN(RR1*TT)*((SS1**2)/RR1+RR1)
C
151 SS2=-BETA2(I)/(2*ALFA2(I))
RK2=BETA2(I)**2-4*ALFA2(I)
IF(RK2.LT.0) GOTO 153
ADD1=SS2+SQRT(RK2)/(2*ALFA2(I))
ADD2=SS2-SQRT(RK2)/(2*ALFA2(I))
XH2=1.112*(-ADD2*EXP(ADD1*TT)+ADD1*EXP(ADD2*TT))/(ADD1-ADD2)
XHU2=1.112*(-ADD2*ADD1*EXP(ADD1*TT)+ADD1*ADD2*EXP(ADD2*TT))/
*(ADD1-ADD2)
GO TO 154
C
153 RR2=SQRT(BETA2(I)**2-4*ALFA2(I))/(2*ALFA2(I))
XH2=1.112*EXP(SS2*TT)*(COS(RR2*TT)-SS2/RR2*SIN(RR2*TT))
XHU2=-1.112*EXP(SS2*TT)*SIN(RR2*TT)*((SS2**2)/RR2+RR2)
C
C 154 WRITE(6,*)TT,ALFA1(I),BETA1(I),ADD1,ADD2,' EE '
154 WRITE(6,1)TT,Y-XH1,YY-XH2,Y1-XHU1,YY1-XHU2,TF1(I),TF2(I)
TT=TT+DT
GO TO 100
1 FORMAT(10(1X,1PE12.5))
200 STOP
END

```