

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNSAN-MAKİNE ARAYÜZÜ OLARAK 3X3 STEWART
PLATFORMUNUN EMPEDANS KUVVET KONTROLÜ**

Makine Müh. Alper GÜNEY

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Teorisi ve Kontrol Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Vasfi Emre ÖMÜRLÜ

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Hususlar	1
1.1.1 Paralel Mekanizmalar	2
1.1.2 Paralel ve Seri Mekanizmaların Karşılaştırılması	3
1.1.3 Stewart Platformu Mekanizması (SPM)	4
1.2 Stewart Platform Uygulamaları	6
1.2.1 Ölçüm cihazları	6
1.2.2 Paralel Manipulatörler	7
1.2.3 Simulatörler	7
1.3 Literatür incelemesi	9
1.4 Özgün Katkıları	16
2. KİNEMATİK ANALİZ	18
2.1 Ters Kinematik Analiz	18
2.2 Düz Kinematik Analiz	23
2.3 Jakobian Matrisi	25
2.4 Hata Analizleri.....	32
2.5 Sonuç.....	49
3. KUVVET KONTROLÜ	51
3.1 Robot Manipulatörlerin Kontrolü	51
3.2 Kuvvet Kontrolü	53
3.2.1 Esnek Hareket Kontrolü (Katılık Kontrolü).....	55
3.2.1.1 Pasif Esneklik	56
3.2.1.2 Aktif Esneklik.....	57
3.2.2 Melez(Hibrit) Pozisyon/Kuvvet Kontrolü	61
3.2.3 Empedans Kontrol	63
3.2.3.1 Anlık Empedans Kontrol	67
3.2.3.2 Uyarlamalı ve Dayanıklı Empedans Kontrol	68
3.2.3.3 Kayan Kipli Empedans Kontrol	68
3.2.3.4 Melez(Hibrit) Empedans Kontrol.....	69
3.2.3.5 Genişletilmiş Empedans Kontrol.....	69

3.2.3.6	Uzaysal Empedans Kontrol.....	69
3.2.3.7	Yapay Sinir Ağları Tabanlı Empedans Kontrol	70
3.2.4	Çözümlemiş İvme Kuvvet Kontrolü.....	70
3.2.5	Hesaplanmış Tork Kontrolü.....	72
3.2.6	Paralel Kuvvet / Pozisyon Kontrolü	73
4.	SİSTEM KONTROL MODELİ VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI.....	74
4.1	Giriş	74
4.2	Sistem Kontrol Modeli.....	76
4.3	Sistemin MATLAB®/Simulink® Yapısının Tanıtılması	80
4.4	Simülasyon Çalışmaları	86
4.5	Sonuç.....	102
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	104
KAYNAKLAR.....		105
EKLER.....		115
Ek 1 Ters Kinematik - Düz Kinematik Analiz Program Kodları (Matlab M-File)		116
Ek 2 Jakobian Matrisine ait S-Function Program Kodları (2.41-2.46 denklemleri)		122
Ek 3 Gerçek sistemde kullanılan ekipmanların özellikleri (Lineer Motor, Kuvvet Sensörü)		133
ÖZGEÇMİŞ.....		136

SİMGE LİSTESİ

B	Sönüm katsayısı (Ns/m)
$\{B\}$	Platform tabanının merkezine ait koordinat takımı
F_i	Platforma etkiyen 3 eksen kuvvet 3 eksen moment vektörü, $i=[1,6]$
f_i	Eyleyici kuvveti, $i=[1,6]$ (N)
J	Jakobian matrisi (6x6)
K	Katılık katsayısı (“stiffness”) (N/m)
K_p	Oransal kontrol katsayısı
K_I	Integral kontrol katsayısı
K_D	Türevsel kontrol katsayısı
\dot{l}_i	Eyleyici hızı (m/s)
\dot{P}_i	Hareketli tablanın sabit koordinatlara göre hız vektörü, $i=[1,6]$
$\{P\}$	Hareketli tablanın merkezine ait koordinat takımı
${}^B_p R$	Rotasyon matrisi (6x6)
u	Eyleyici sürücü sinyali
V	Hareketli tablanın çizgisel hızı (m/s)
ω	Hareketli tablanın Z,Y,X eksenleri etrafındaki açısal hızı (rad/s)
α	\vec{Z}_b etrafında $\{B\}$ koordinat takımına göre $\{P\}$ koordinat takımının rotasyonu (rad)
β	\vec{Y}_b etrafında $\{B\}$ koordinat takımına göre $\{P\}$ koordinat takımının rotasyonu (rad)
γ	\vec{X}_b etrafında $\{B\}$ koordinat takımına göre $\{P\}$ koordinat takımının rotasyonu(rad)
ε	Hata

KISALTMA LİSTESİ

PM	Paralel Mekanizma
SD	Serbestlik Derecesi
SPM	Stewart Platform Mekanizması
SPS	Küresel-Prizmatik-Küresel Mafsallı
UPS	Üniversal-Prizmatik-Küresel Mafsallı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Bir uçuş simülatorü	2
Şekil 1.2 Robot uygulamasında kullanılan melez (seri ve paralel birlikte kullanılan) bir mekanizma	3
Şekil 1.3 Seri manipülatör ve paralel manipülatör (Yao Wang, 2008).....	4
Şekil 1.4 Genel 6-6 Stewart Platform Mekanizması.....	5
Şekil 1.5 Stewart Platformunun ölçüm cihazı olarak kullanımı.....	6
Şekil 1.6 Stewart Platformunun uzaktan uygulamalar (teleoperation) için kullanımı.....	7
Şekil 1.7 SPM'nin standart duruş şekli.....	8
Şekil 1.8 SPM'nin ters yönde kullanımı	8
Şekil 1.9 İki SPM'nin yan yana kullanımı (fizyoterapi uygulaması)	8
Şekil 1.10 Diş tedavi uygulamalarında kullanılmak üzere sanal prototip (Yonggang Cao, Yuru Zhang, Yunzhong Ma and Dangxiao Wang, 2007)	15
Şekil 2.1 6X6 Stewart Platformu Koordinat Sistemi (François Comin, 2006)	19
Şekil 2.2 Eyleyici Uzunluğu (François Comin, 2006).....	21
Şekil 2.3 Newton-Raphson yöntemi (François Comin, 2006)	23
Şekil 2.4 Genel görünüm.....	26
Şekil 2.5 6-6 Stewart Platformu (Yıldız, İbrahim., 2007).....	27
Şekil 2.6 Kinematik analiz blok şeması.....	32
Şekil 2.7 Kinematik analiz genel blok diyagramı.....	33
Şekil 2.8 Kinematik hata analizi için simülasyon giriş değerleri (her yönde aynı anda giriş var)34	
Şekil 2.9 Kinematik hata analizi için simülasyon giriş değerleri (sırasıyla sadece tek yönde giriş var).....	35
Şekil 2.10 Düz kinematik hata sonuçları (her yönde aynı anda giriş var)	36
Şekil 2.11 Düz kinematik hata sonuçları (sadece +x girişi var)	36
Şekil 2.12 Düz kinematik hata sonuçları (sadece -x girişi var)	37
Şekil 2.13 Düz kinematik hata sonuçları (sadece +y girişi var)	37
Şekil 2.14 Düz kinematik hata sonuçları (sadece -y girişi var).....	38
Şekil 2.15 Düz kinematik hata sonuçları (sadece +z girişi var)	38
Şekil 2.16 Düz kinematik hata sonuçları (sadece -z girişi var)	39
Şekil 2.17 Düz kinematik hata sonuçları (sadece + α girişi var)	39
Şekil 2.18 Düz kinematik hata sonuçları (sadece - α girişi var)	40
Şekil 2.19 Düz kinematik hata sonuçları (sadece + β girişi var)	40
Şekil 2.20 Düz kinematik hata sonuçları (sadece - β girişi var)	41

Şekil 2.21 Düz kinematik hata sonuçları (sadece $+\gamma$ girişi var).....	41
Şekil 2.22 Düz kinematik hata sonuçları (sadece $-\gamma$ girişi var).....	42
Şekil 2.23 Jakobian matrisi hata sonuçları (her yönde aynı anda giriş var).....	43
Şekil 2.24 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $+x$ girişi var)	43
Şekil 2.25 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $-x$ girişi var)	44
Şekil 2.26 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $+y$ girişi var)	44
Şekil 2.27 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $-y$ girişi var)	45
Şekil 2.28 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $+z$ girişi var).....	45
Şekil 2.29 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $-z$ girişi var).....	46
Şekil 2.30 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $+\alpha$ girişi var).....	46
Şekil 2.31 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $-\alpha$ girişi var)	47
Şekil 2.32 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $+\beta$ girişi var).....	47
Şekil 2.33 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $-\beta$ girişi var)	48
Şekil 2.34 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $+\gamma$ girişi var)	48
Şekil 2.35 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $-\gamma$ girişi var).....	49
Şekil 3.1 Kuvvet tabanlı doğrudan kuvvet kontrolüne ait genel blok diyagramı (Yaltırık, Hüseyin., 2007).....	54
Şekil 3.2 Pozisyon tabanlı doğrudan kuvvet kontrolüne ait genel blok diyagramı (Yaltırık, Hüseyin., 2007).....	55
Şekil 3.3 RCC elinin kavramsal gösterimi (a) Yapısı, (b) Yatay yöndeki kuvvete karşı gösterilen esneklik, (c) Momente karşı gösterilen esneklik (Yoshikawa, T., 1990).....	57
Şekil 3.4 Robot manipülatörün sert yüzeyle teması (Yaltırık, Hüseyin, 2007).....	60
Şekil 3.5 Melez (hibrit) pozisyon / kuvvet kontrolü (Yaltırık, Hüseyin., 2007).....	61
Şekil 3.6 Empedans kontrol blok diyagramı (Almeida, F.; Lopes, A.; Abreu, P).....	66
Şekil 3.7 Anlık empedans kontrole ait blok diyagramı (Yaltırık, Hüseyin., 2007).....	68
Şekil 3.8 Çözümlenmiş ivme kuvvet kontrolü (Yaltırık, Hüseyin., 2007)	72
Şekil 3.9 Paralel kuvvet / pozisyon kontrolü (Yaltırık, Hüseyin., 2007).....	73
Şekil 4.1 3-3 SPM deneysel sistem (Ömürlü, Vasfi Emre., 2009).....	74
Şekil 4.2 Kuvvet/tork geribeslemeli bir 3x3 SP mekanizması.....	75
Şekil 4.3 Stewart Platformuna uygulanan kuvvet ve momentlerin eyleyiciler üzerindeki dağılımı.....	76
Şekil 4.4 Eyleyici kuvvetlerine geçiş.....	78

Şekil 4.5 Eyleyici yapısını temsil eden empedans modeli	78
Şekil 4.6 Eyleyici kontrolü genel yapısı (PD tabanlı-Empedans kontrol)	80
Şekil 4.6 Simülasyonun genel blok diyagramı	81
Şekil 4.7 Jakobian Model bloğunun içeriği.....	82
Şekil 4.8 Eyleyici dinamiğini ifade eden blok diyagramı	83
Şekil 4.9 PD tabanlı-Empedans kontrol bloğunun içeriği.....	84
Şekil 4.10 Her bir eyleyiciye indirgenen PD tabanlı-Empedans kontrol bloğunun içeriği.....	84
Şekil 4.11 3-3 SPM bloğunun içeriği.....	86
Şekil 4.12 (a) Empedans kontrol şematik gösterim (b) Katılık kontrol şematik gösterim.....	86
Şekil 4.13 PD tabanlı-Empedans kontrol blok diyagramı.....	87
Şekil 4.14 PD tabanlı-Katılık kontrol blok diyagramı	87
Şekil 4.15 Simülasyon için kuvvet-moment giriş değerleri	88
Şekil 4.16 F_x girişi için eyleyici konum hatası.....	89
Şekil 4.17 F_y girişi için eyleyici konum hatası.....	91
Şekil 4.18 F_z girişi için eyleyici konum hatası.....	93
Şekil 4.19 M_x girişi için eyleyici konum hatası.....	95
Şekil 4.20 M_y girişi için eyleyici konum hatası.....	97
Şekil 4.21 M_z girişi için eyleyici konum hatası.....	99
Şekil 4.22 F_x girişi için hareketli tabla pozisyonları.....	99
Şekil 4.23 F_y girişi için hareketli tabla pozisyonları.....	100
Şekil 4.24 F_z girişi için hareketli tabla pozisyonları.....	100
Şekil 4.25 M_x girişi için hareketli tabla pozisyonları.....	101
Şekil 4.26 M_y girişi için hareketli tabla pozisyonları.....	101
Şekil 4.27 M_z girişi için hareketli tabla pozisyonları	102

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Seri ve paralel manipölatörlerin karşılaştırılması (Yao Wang, 2008).....	4
Çizelge 4.1 3x3 SP mekanizması parametreleri.....	75
Çizelge 4.2 PD tabanlı-Empedans kontrol parametreleri.....	80
Çizelge Ek 3.1 Motorun Ölçüleri.....	133

ÖNSÖZ

Bu çalışma çerçevesinde uzaysal hareket eden herhangi bir cismin (taşıtın) tek noktadan bütün eksenlerinin pozisyon ve hız kontrolü, kuvvet geribeslenerek amaçlanmakta ve bu çerçevede Stewart Platform tabanlı kuvvet geribeslemeli bir insan-makine arayüzünün tasarlanıp hayata geçirilmesi düşünülmektedir.

Bu çalışmada insan-makine arayüzü olarak uzaysal altı eksenli hareket yapabilen bir 3-3 Stewart Platformu üzerinde kuvvet kontrolü uygulaması yapılmış olup, MATLAB®/Simulink® programları kullanılarak gerçek zamanlı sayısal çözümler gözlemlenmiştir. Ayrıca, sistemin gerçek zamanlı çalışabilmesi için ihtiyaç duyulan 3-3 Stewart Platformuna ait düz kinematik problemde çözülmüştür.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında bana her konuda yardımcı olan ve beni cesaretlendiren danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Vasfi Emre Ömürlü' ye ve Arş. Gör. İbrahim Yıldız' a teşekkür ederim.

Altınay firmasından Dr. Emre Çetin'e yardımlarını esirgemediği ve tecrübesini aktardığı için teşekkür ederim.

Son olarak çalışmalarım sırasında beni destekleyen aileme teşekkür ederim.

ÖZET

Stewart Platform tabanlı, uzaysal hareketin simüle edilmesine dair, birçok uygulama, bu kinematik paralel mekanizmaların 1965 teki ilk çıkışından itibaren, hayata geçirilmiştir. Başta uçak simülatörleri olmak üzere, üç boyutlu yüzeylerin işlenmesi gibi problemlerin çözümünde, Stewart Platform kullanılagelmiştir. Bu çalışmada, uzaysal hareketin, mesela uçak simülatörlerindeki gibi, simülasyonu yerine, uzaysal hareket yapan, 3 öteleme artı 3 dönme eksenli, herhangi fiziksel cismin tek noktadan Stewart Platform kullanılarak kontrolünü sağlayacak, kuvvet geribeslemeli bir insan-makine arayüzünün gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Böylece, hava, denizaltı veya uzayda hareket eden taşıtlarda tek noktadan bütün yönlendirmeler ve hız ve pozisyon kontrolleri gerçekleştirilebilecektir. Aynı zamanda kontrol edilen taşıta gelen ve taşıtı yönlendirme durumunda olan kullanıcının normalde hissetmediği dış, taşıtın maruz kaldığı, kuvvetler, kuvvet geribeslemesi yoluyla kullanıcıya iletilecektir. Bu arayüzün tıbbi uygulamaları da mümkündür.

Proje kapsamında, uzaysal altı eksenli hareket edebilen 3-3 Stewart Platformunun gerçek zamanlı insan-makine arayüzü olarak kullanımı incelenmiştir. Kullanıcı tarafından platform üzerine rijit bağlı kola uygulanacak olan altı eksenli kuvvet ve moment değerine göre platformun uyum göstererek hareket etmesi istenmektedir. Kullanıcı tarafından platforma uygulanan kuvvetin her bir eyleyici (tahrik elemanı) üzerindeki etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Bunun içinde 3-3 Stewart Platformuna ait Jakobian model tespit edilmiştir. Sonrasında her bir eyleyici empedans kontrol yöntemi kullanılarak ayrı ayrı kontrol edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada 3-3 Stewart Platformuna ait düz kinematik problemde gerçek zamanlı olarak Newton-Raphson yöntemiyle çözümlenmiştir. Bu çalışmanın devamında, bu arayüz vasıtasıyla uzaysal hareket yapan herhangi fiziksel cismin tek noktadan kontrol edilmesi amaçlanmaktadır.

Günümüzde uzaysal hareket eden cisimlerin kontrolünde direk 6 eksen birden tek bir noktadan kontrol edilemediğinden ve kuvvet geri beslemesi mevcut olmadığından, tasarlanacak insan-makine arayüzünün uluslararası düzeyde önemli bir boşluğu doldurması ve ulusal ekonomiye katkısı büyük olacaktır. Kaldı ki Stewart Platform konusunda fiziksel bazda uzmanımızın olmayışı ve bu teknolojide uzmanlaşmanın, kullanım alanları bakımından, ülke ekonomisine faydaları düşünüldüğünde, konunun önemi anlaşılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Stewart Platform, İnsan-Makine Arayüzü, Kuvvet Geribesleme, Empedans Kontrol, Düz Kinematik, Newton-Raphson Yöntemi, Manipülatör Jakobian Matrisi

ABSTRACT

Many applications related to physical simulation of spatial motion has been put into realization since the first emergence of Stewart Platform based kinematical parallel mechanisms in 1965. Stewart Platform has been used in the realization of flight simulators and in the solution of problems related to manufacturing 3D surfaces. In this project, instead of employing the simulation method like the one adopted, for example, for the flight simulators, a human-machine interface (HMI) with force feedback, which will provide single point control of any physical object doing spatial motions along 3 translational- and 3 rotational-axes by means of Stewart Platform, is aimed to be developed. Thus, single point, omni-directional position and velocity controls of vehicles moving in the air, under the sea and space can be put into affect. In addition to this, the outer forces that the vehicle driven is exposed to, will be transferred to the driver, who is in the position of controlling/directing the vehicle and normally is unaware of them, by means of the force feedback. Medical, aeronautical, marine, robotic and other similar mechatronic applications of this interface are also possible and each of which is an R&D topic on its own.

In this thesis, a spatial 6 DOF 3-3 Stewart platform as human-machine interface is examined. Depending on the six-axis force and torque input which is applied by the operator to the platform, platform is expected to move accordingly. Force applied by the user to the platform effecting the actuators is examined seperately. Therefore Jacobian model of the 3-3 Stewart Platform is identified. Then impedance control is used for the control of each actuator seperately. In addition, in this project real time direct kinematic problem is solved.

It is expected that the designed and realized human-machine interface would be extremely important in both national and international levels, since as the current literature indicates, in the control of spatial-moving objects, all 6 axes cannot be controlled from a single point, and also there is no force feedback. It is a fact that there is not any established expertise on creating Stewart Platform related applications in the country. Hence, it seems it is obvious that the selected subject is very important from the point that building know-how and expertise on the matter and consequently providing benefits to science, technology, industry and therefore to the national economy.

Keywords: Stewart Platform, Human-Machine Interface, Force Feedback, Impedance Control, Direct Kinematic, Newton-Raphson Method, Manipulator Jacobian

1. GİRİŞ

1.1 Genel Hususlar

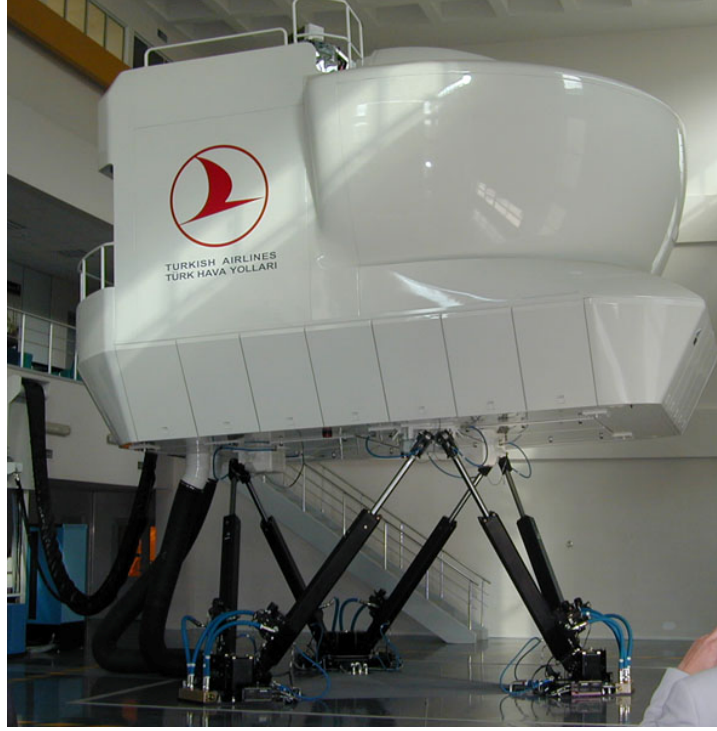
Havacılık sahasında pilot adaylarının eğitimi, önemli hususlardan biridir. Pilot adaylarının uçuş eğitimine başlamadan önce, öğrendikleri bilgileri, uçuş eğitimi vermek için tasarlanmış çeşitli simülatörlerde uygulayarak, tecrübe kazanmaları gerekmektedir. Bu sebeple, günümüzde askeri ve sivil sahada çeşitli uçaklara ait simülatörler yoğun olarak kullanılmaktadır. Örnek bir uçuş simulatörü Şekil 1.1'de verilmiştir. Simülatörlerin pilot adaylarının yetiştirilmesinde kullanılması, adayların eğitimde kullanacakları uçaklardaki maddi ve manevi kayıpları azaltmaktadır.

Uçuş eğitimi için kullanılan simülatörlerde, pilot adayının ötelenme ve dönme hareketlerini gerçeğe yakın bir şekilde algılaması çok önemlidir. Bu hareketlerden bazıları görsel olarak sağlanmaktadır. İnsan vücudunun algılaması gereken değişiklikler ise, simülatörün alt kısmında bulunan ve pilot adayının verdiği komutlara göre cevap veren, bir paralel mekanizma ile sağlanır.

Paralel mekanizmaların kullanıldığı başlıca alanlar,

- uçuş simülatörleri,
- robotik sahasında robot kol uç organlarının tasarımı,
- oyun simülatörleri,
- petrol platformları,
- helikopterle ağır yük taşımacılığı v.s.

olarak sıralanabilir. Son yıllarda, paralel mekanizmalar birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Bu konu, 1946 yılında bu yapının tekerlek test düzenlerinde kullanılması fikrinin ortaya atılmasıyla araştırılmaya başlanmıştır (Bhaskar Dasgupta ve T.S. Mruthyunjaya, 2000).



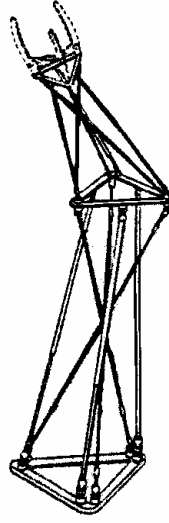
Şekil 1.1 Bir uçuş simülatörü

1.1.1 Paralel Mekanizmalar

Mekanik sistemlerin gelişmesiyle birlikte ortaya çıkan robotik teknolojisi ve bilimi, insan yapısında genelde varolan seri mekanizmalar sebebiyle, başlangıçta robot olarak seri mekanizmaları kullanmaya yöneldi. Seri mekanizmalar insan kolunun yaptığı bütün manevraları yapabilme ve bütün çalışma uzayını dolaşabilme gibi önemli avantajlara sahip olmakla beraber, yük taşıma kapasitesi olarak paralel mekanizmalara göre oldukça zayıftırlar. Seri mekanizmalar ağır yüklerde ve hızlı titreşimlerde burkulma eğilimindedir. Seri mekanizmaların büyük çalışma uzayları olmasına rağmen hassas konumlanma kapasiteleri düşüktür. Kısacası seri mekanizmalar insan kolunun avantajlarına ve dezavantajlarına sahiptirler.

Aşırı yük taşıma kapasitesi, iyi bir dinamik performans ve hassas konumlanma gerektiğinde paralel mekanizmalar, seri mekanizmalara karşı tercih edilen bir alternatif olurlar. Bu olayı biyolojik dünyaya baktığımızda görebiliriz. Şöyle ki; ağır yük taşıyan hayvanların paralel bacaklarla desteklenmiş vücutları iki ayaklı insana göre daha karardır. İnsan vücudu, ağır bir şeyi kaldırmak istediğinde iki kolunu birlikte kullanır. Yazı yazmak gibi hassaslık isteyen

işlerde kalemi paralel olarak tutan üç parmağımızı kullanırız.



Şekil 1.2 Robot uygulamasında kullanılan melez (seri ve paralel birlikte kullanılan) bir mekanizma

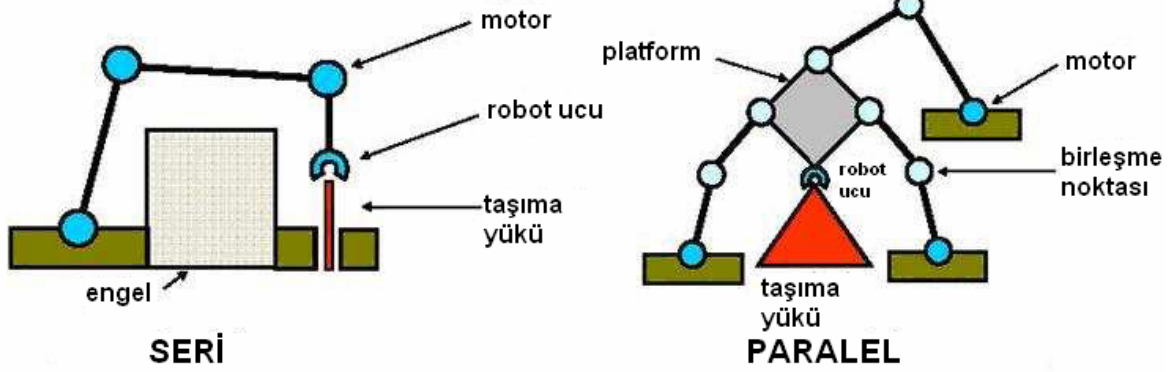
Aynı şekilde robot mekanizmaların uç kısımları, yüksek rijitlik ve iyi bir konumlanma elde etmek amacıyla, paralel olarak çalışan birçok bağlantı elemanı ile ana parçaya bağlanır. Bu sebeple son yirmi senede paralel mekanizmalar hakkında yapılan birçok çalışma robotik uygulamaları yönündedir (Şekil 1.2).

1.1.2 Paralel ve Seri Mekanizmaların Karşılaştırılması

Seri mekanizmalarda düz kinematik problemin çözülmesinin kolay olmasına karşın, ters kinematik problem doğrusal olmayan bir denklem sisteminin çözülmesini gerektirir. Paralel mekanizmalarda ise ters kinematik problem basit olmasına karşın, düz kinematik problem oldukça karmaşıktır. Paralel mekanizmaların düz kuvvet transformasyonu kolayca bulunabilirken, ters kuvvet transformasyonunu bulmak zordur. Bu iki tip mekanizma arasındaki dualite, tekillik konusunda da mevcuttur. Seri mekanizmalardaki tekillik, serbestlik derecesinin azalması ve kısmi kilitlenmelerle ilgilidir. Fakat, paralel mekanizmalarda baskın tekillikler serbestlik derecesinin artması ve kontrol edilemezlik ile ilgilidir. Yukarıda sayılan farklılıklar paralel mekanizmaların genel bütünlüğü içinde ele alınmalıdır. Çünkü paralel mekanizmaların her bir ayağı bir seri mekanizma olarak değerlendirilebilir. Çizelge 1 de iki farklı tip mekanizmanın karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 1.3 de iki farklı tip mekanizmanın kavramsal olarak elemanları tanımlanmıştır.

Çizelge 1.1 Seri ve paralel manipülatörlerin karşılaştırılması (Yao Wang, 2008)

	SERİ	PARALEL
Yükleme Kapasitesi	Düşük	Yüksek
Katılık	Düşük	Yüksek
Çalışma Uzayı	Geniş	Dar
Tekillik Durumu	Önemsiz	Karmaşık
Kinematik / Dinamik Analiz	Kolay	Zor
Birim yükte harcanan güç	Yüksek	Düşük
Atalet	Düşük	Yüksek
Ayarlanabilirlik	Kolay	Zor



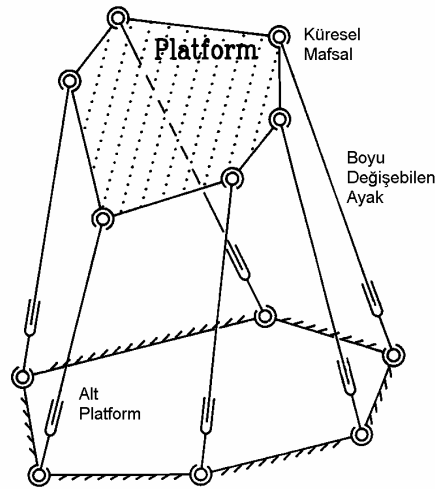
Şekil 1.3 Seri manipülatör ve paralel manipülatör (Yao Wang, 2008)

1.1.3 Stewart Platformu Mekanizması (SPM)

Stewart platformu 1965’de D. Stewart tarafından uçuşu ve uzaydaki genel hareketi simüle etmek için tasarlanan bir paralel mekanizmadır (Stewart, D., 1965). Literatürde bu mekanizmaya Stewart platformu dendiği gibi, tam paralel hal alması Gough’nun önerisiyle olduğundan mekanizmaya Gough-Stewart platformu da denmektedir. Bu ilk mekanizma üçgen şeklinde bir üst platform, kendisine küresel mafsallarla tutturulmuş boyları değişebilen

üç ayak ve bu ayaklara iki eksenli açısal hareket veren diğer üç ayakta oluşmakta idi. Bundan sonra Gough ve Whitehall altı adet doğrusal ve paralel ayak içeren bir platformu tekerlek test düzeneğinde kullandılar (Stewart, D., 1965). Daha sonra Hunt, uçuş simülatorü olarak kullanılan mekanizmayı robot manipulatorü olarak kullanmayı teklif etti.

SPM 1980'lerde robotik alanındaki popüler araştırma konuları arasına girmiştir. 1990'larda bu konu ile ilgilenen araştırmacı sayısı oldukça artmıştır. Stewart Platform mekanizması için zaman içinde genel bir yapı oluşturulmuştur (Şekil 1.4). Bu genelleştirilmiş yapı, altı adet boyları değişebilen bacakla birleştirilmiş, iki adet rijit tabla içermektedir. Ayakların her iki ucunda küresel mafsallar olabileceği gibi bir ucunda kardan mafsal diğer ucunda küresel mafsal olabilir. Genelde alt platform sabit üst platform hareketli kabul edilmekle beraber bazı uygulamalarda alt platform hareketli, üst platform sabit olabilir. Bu tip uygulamalar petrol platformları ve helikopterle ağır yüklerin taşınması sırasında kullanılır (Yurt, Sait N., 2002).



Şekil 1.4 Genel 6-6 Stewart Platform Mekanizması

Platformları birbirine bağlayan, boyları değişebilen ayaklar bir pistondan oluşabileceği gibi birbirine mafsallarla bağlanmış bir dizi elemandan da oluşabilir. Ayaklar istenilen serbestlik derecesine göre alt ve üst platforma küresel, kardan veya rulmanlı yataklarla bağlanabilirler. Alt taraftaki bağlantı noktaları eş düzlemlili olabileceği gibi farklı düzlemlerde de olabilir. Eş düzlemlili olmayan bağlantının kinematik çözümü için ekstra algılayıcılar gerekmektedir (Bonev, I.A., Ryu,J., 2000).

Ayakların birer pistondan oluştuğu durumda, pistonun orta kısmının bir prizmatik mafsal olduğu göz önünde bulundurularak, ayakların platformlara bağlanma şekline göre platforma SPS veya UPS vb. isimler verilir. Burada S küresel (Spherical), P prizmatik ve U kardan

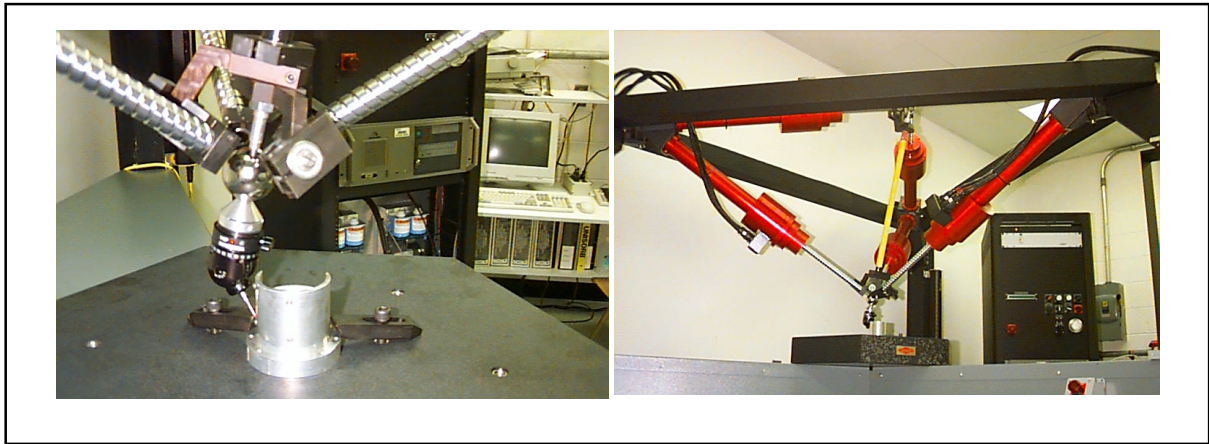
mafsalların kısaltması olarak kullanılmıştır. R olarak kısaca belirtilen rulmanlı yataklar, genellikle, birçok elemandan oluşan ayaklara sahip paralel mekanizmalarda kullanılır. Bu tür mekanizmalar için PRPS, PRPR, RPR gibi tasarımlar bulunmaktadır.

Stewart Platform Mekanizmaları ayakların bağlanma şekillerine göre de isimlendirilirler. Örneğin altı bacaklı bir platformda her bir bacak platformlara ayrı noktalardan bağlanmış ise 6-6 SPM, eğer üst taraftaki bacaklar ikişerli birleştirilmiş ve üç noktadan üst platforma bağlanmış ise 6-3 SPM olarak adlandırılır. Bu tip sınıflandırmada 5-5 SPM, 4-4 SPM ve 6-5 SPM incelenen mekanizmalar arasında sayılabilir.

1.2 Stewart Platform Uygulamaları

1.2.1 Ölçüm cihazları

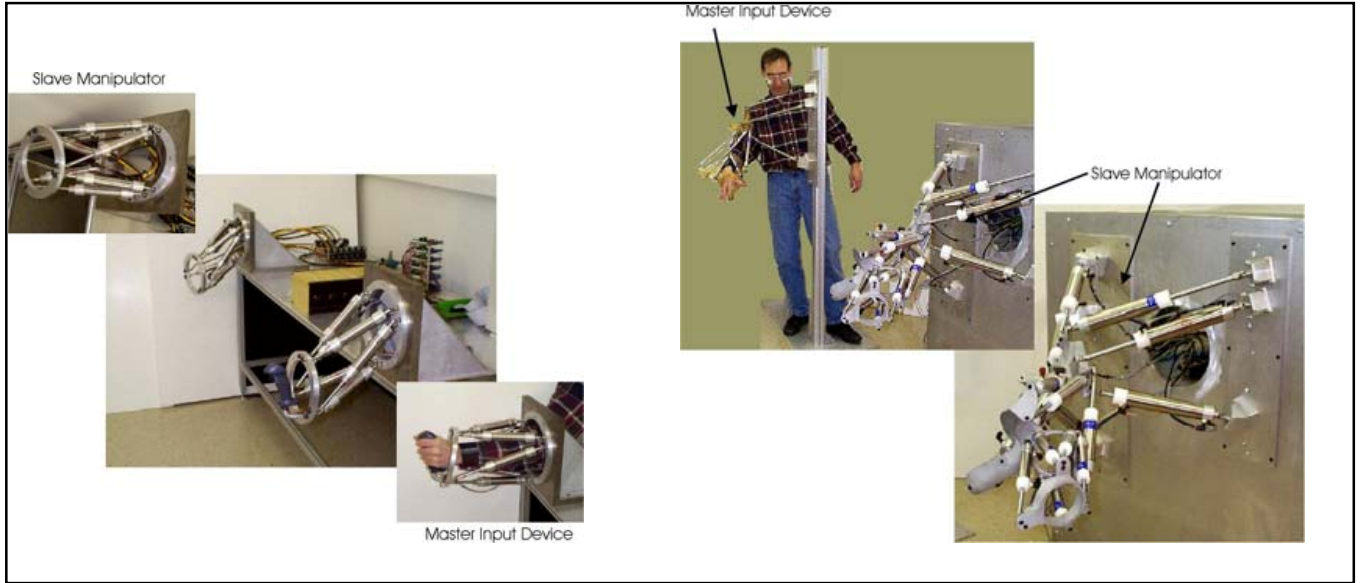
Stewart platform uygulamalarından biri de 5 eksen hassas koordinat ölçüm cihazıdır. Ölçüm cihazları sanayide üretilen parçaların ölçülmesinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Platform üzerine sabitlenen hassas basınç ölçüm sensörü, platform hareketleri ile önceden belirlenen noktalarda tetiklenerek platform konumuna göre ölçüm sağlar. Platform ayaklarındaki lazer mesafe okuyucuları ayak konumlarını vererek ölçüm sağlanmaktadır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 Stewart Platformunun ölçüm cihazı olarak kullanımı

1.2.2 Paralel Manipulatörler

Örnekte pnömatik eyleyici platform aynı kinematik yapıya sahip yönetici platformdan hareket komutlarını alarak işlem yapar. Büyük inşaat makinelerindeki hareket komutlarının verilmesinde çok daha işlevsel kullanımı söz konusu olabilir (Şekil 1.6).



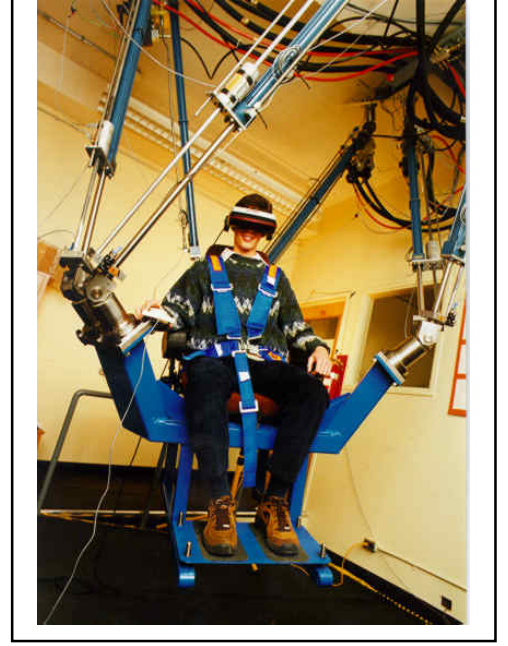
Şekil 1.6 Stewart Platformunun uzaktan uygulamalar (teleoperation) için kullanımı

1.2.3 Simülatörler

Simülatör tasarımında Stewart Platformları pek çok farklı biçimde kullanılmaktadır. Standart kullanım olan 6-3 SPM platformun 6'lık kısmı alta gelecek şekilde olabildiği gibi (Şekil 1.7), platform ters olarak tavana monte edilerek 3'lük kısmının altına olması da mümkündür (Şekil 1.8). Ayrıca iki platformun yan yana kullanımı (Şekil 1.9) daha farklı bir hareket uzayı sağlamaktadır.



Şekil 1.7 SPM'nin standart duruş şekli



Şekil 1.8 SPM'nin ters yönde kullanımı



Şekil 1.9 İki SPM'nin yan yana kullanımı (fizyoterapi uygulaması)

1.3 Literatür incelemesi

Bu kısımda tezde yer alan konulara ait literatür çalışmalarına yer verilecektir. Paralel robotlar ve mekanizmalarla ilgili şimdiye kadar yapılmış pek çok araştırma bulunmaktadır. Paralel manipülatörler, farklı tasarım yapıları, tahrik edilme biçimleri, kontrol algoritmaları ve analiz edilirken kullanılan araçlara göre incelenmiş, birbirleriyle karşılaştırılmışlardır. Paralel manipülatör tasarımlarıyla ilgili bilgi (Jason L. Pusey, 2006)'dan elde edilebilir. Robot manipülatör tasarımlarıyla ilgili diğer teknik bilgiler ve analizler (Bashar S. El-Khasawneh, 1998)'da bulunabilir. Mevcut çalışma 3-3 Stewart Platformu üzerinedir. 3-3 Stewart Platformu en çok bilinen Stewart Platform tiplerinin başında gelir ve endüstride birçok alanda kendine kullanım sahası bulur. FCS E-Cue 624-1800 ve E-Cue 660-12000 uçak simülatörleri, hareket tabanlı (motion base) MOOG 6DOF2000E, pozisyonlama PI M-850, çok yönlü Al Hexapod v.b. gibi çeşitli amaçlar için kullanılabilirler.

3-3 Stewart Platformunda üç çift bağlantı ucu hem taban plakasında hem de hareketli platformda üst üste gelmiştir. Bu konfigürasyon endüstride geniş bir kullanım alanı bulur çünkü sahip olduğu üçgensel yapı bu platformu daha güçlü ve dayanıklı yapmıştır. Bir diğer avantajı, kolay bir şekilde yapılandırılabilmesi ve kontrolünün diğer platformlara göre daha kolay olmasıdır.

Belirli bir robot tasarımını analiz etmenin ilk adımı, robotun kinematik ve dinamik eşitliklerinin bulunmasıdır.

Kinematik, kuvvet ve/veya moment etkisi olmaksızın hareketin incelenmesi çalışmasıdır. Robot manipülatörlerde kinematik eşitliklerin belirlenmesi amacıyla kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Bunlardan bazıları Kirchhoff kanunu (Davies, T. H., 1981), vida teorisi (Funda, J., and Paul, R. P., 1990), quaternion kinematiği (Chou, J. C. K., 1992), anlık kinematik (Dash, A. K., Chen, I. M., Yeo, S. H., and Yang, G., 2001)'dir. Kinematik eşitliğin karmaşıklığını azaltmak için kullanılan Grobner-Sylvester melez (hibrit) yöntemi (Dhingra, A. K., Almadi, A. N., and Kohli, D., 2000) gibi bazı tekniklerde vardır.

Kinematik eşitliklerin oluşturulmasında iki farklı yaklaşım kullanılır. Birincisi, ters kinematik diye adlandırdığımız robot uç noktasının konumundan tahrik elemanlarının hareketlerinin elde edilmesidir. Buradan robot uç noktasının belirlenen noktalara gitmesi için tahrik elemanlarının ne kadar hareket etmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Düz kinematik diye adlandırdığımız ikinci yaklaşım ise ters kinematiğin tam tersidir, tahrik değişkenlerinden

robot uç noktasının pozisyonu elde edilir.

Seri manipülatörlerde, düz kinematik çözüm ters kinematik çözümden çok daha kolaydır. Paralel manipülatörlerde bunun tam tersi olarak, ters kinematik çözüm düz kinematik çözümden çok daha kolaydır. Birçok paralel manipülatörde düz kinematik çözüm kompleks bir yapıya sahiptir ve kinematik eşitlikler lineer olmadığından çözümleri oldukça zordur. Şimdiye kadar farklı paralel manipülatörlerde kinematik eşitliklerin elde edilmesiyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Paralel manipülatörlerde düz kinematik çözümün zor olmasının nedeni çözümü kapalı formda elde etmenin güçlüğünden kaynaklanmaktadır. 6-6 paralel manipülatör için kinematik eşitlikler 20.dereceden polinoma kadar indirgenebilmiştir, burada çözüm sayısının 40'a ulaşması mümkündür (Dhingra, A. K., Almadi, A. N., and Kohli, D., 2000). 6-6 paralel manipülatör; bağlantı noktaları birbiriyle çakışmayan 6 adet lineer hareketli eyleyiciler vasıtasıyla sabit ve hareketli tablaların birbirine bağlandığı yapıdır. Diğer paralel manipülatörlere ait düz kinematik eşitliklerde türetilmiştir. Mesela 3-6 paralel manipülatöre ait düz kinematik çözüm 16.dereceden bir polinomdur (Nanua, P., Waldron, K. J., and Murthy, V., 1990). 3-3 paralel manipülatörde ise 8.dereceden polinoma karşılık gelmektedir (Griffis, M., and Duffy, J., 1989). 3 serbestlik dereceli ötelemeli 3UPU paralel manipülatörlerin düz kinematik çözümü yine 8.dereceden polinoma karşılık gelir ve 16 muhtemel sonuç ortaya çıkabilir (Ji, P., and Wu, H., 2003). Kinematik çözümlere ulaşmak için genellikle sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Farklı tip paralel manipülatörlerin kapalı haldeki kinematik çözümlerini tespit eden çalışmalarda yapılmıştır (Yang, J., and Geng, Z. J., 1998).

Kapalı haldeki kinematik çözümleri elde etmek için ilave sensör kullanılan yöntemler vardır. 6-6 paralel manipülatörde kapalı hal kinematik çözümü bulmak üzere üç ekstra lineer hareket sensörünün kullanıldığı çalışmalar vardır (Bonev, I. A., Ryu, J. K., Kim, S. G., and Lee, S. K., 2001). 6-6 paralel manipülatörlerde düz kinematik eşitliği çözmek için iki ekstra dönme sensörünün kullanıldığı farklı tasarımlar mevcuttur (Parenti-Castelli, V., and Di Gregorio, 2000). Paralel manipülatörlerde düz kinematik denklemi çözmek için sisteme kamera ilavesiyle en küçük kareler sayısal yönteminin kullanıldığı farklı tasarımlarda kullanılmıştır (Baron, L., and Angeles, J., 1995). Bir diğer makalede, kapalı kinematik yapıyı belirlemek için iki kızılötesi sensörü ve bir pozisyon sensörü kullanılmıştır (Kim, D. H., Oh, J. H., Lee, J. W., and Park, K. T., 2003). Paralel manipülatörlerde kinematik yapıyı çözmek için ekstra sensör kullanımını anlatan diğer makaleler kaynaklarda bulunmaktadır (Marquet, F., Company, O., Krut, S., and Pierrot, F., 2002). 6-6 Stewart Platformunun düz kinematik

analizinin çözümüyle ilgili yakın zamanda yeni bir algoritma daha sunulmuştur. Burada Gröbner tabanlı teori kullanılmıştır ve ileri kinematik problem 13×13 Sylvester matrisinden hareketli platformun 40 farklı konumunun türetilmediği 40.dereceden tek bilinmeyenli polinom eşitliğine dönüştürülmüştür. Sayısal örneklerle de etkinliği kanıtlanmıştır (Dongming Gan, Qizheng Liao, Jian S. Dai, Shimin Wei, L.D. Seneviratne, 2009). 6 serbestlik dereceli paralel manipulatörlerde (Stewart Platform) düz kinematik problemin çözümüne yönelik doğrusal olmayan gözlemleyici tabanlı yöntemde önerilmiştir. Sistemin açısız ve doğrusal konumları doğrusal olmayan gözlemleyici vasıtasıyla tahmin edilmektedir. Stewart Platformunun ileri kinematik probleminin çözümünde daha çok yinelemeli işlem yaparak doğru çözüme yakınsayan Newton-Raphson yöntemi kullanılır. Diğer çok kullanılan yaklaşım, yüksek dereceli polinomların çözümünde eleme tabanlı yöntemidir. Bütün yöntemlerin uygulaması da zordur çünkü formülasyon yapıları karmaşıktır. Doğrusal olmayan gözlemleyici tabanlı yöntemde karmaşık polinom yapısı ve yinelemeli çözümler yoktur, dolayısıyla hesaplama zamanı daha kısadır ve elde edilen ileri kinematik çözüm gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilir (Sung-Hua Chen, Chin-I Huang, and Li-Chen Fu, 2008).

Bunlara ilaveten, Maple programına ait DynaFlexPro modülü kullanılarak Genelleştirilmiş Stewart Platformunun düz kinematik çözümüne ulaşılmıştır (Yao Wang, 2008). DynaFlexPro verilen tanımlamalardan yola çıkarak sembolik kinematik ve dinamik eşitlikleri otomatik olarak oluşturan bir programdır.

Paralel manipulatörlerde kinematik çözümlemeden bahseden diğer makaleler kaynaklarda yer almaktadır (Yang, J., and Geng, Z. J., 1998).

Çok farklı tipteki paralel manipulatörlerle alakalı kinematik yapıları belirlemek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kendisine özgü karmaşık yapısından dolayı endüstride kullanımı çok yaygınlaşmamıştır. Yapılan araştırmaların artması ve endüstrinin de bu alana ilgi duymasıyla paralel manipulatörlerin analizi gelişmeye açık bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Genel olarak paralel manipulatörleri analiz eden tartışmalarda yapılmıştır (Merlet, J. P., 2002).

Dinamik, sistemin kuvvet ve/veya moment etkisi altındayken hareketinin incelenmesi çalışmasıdır. Uygulanan kuvvet ve/veya moment sistemde herhangi bir harekete sebebiyet vermiyorsa, sistem statik durumdadır denir. Paralel manipulatörlerin statik denge konumlarını içeren tartışmalar kaynaklarda yer almaktadır (Ebert-Uphoff, I., Gosselin, C. M., and Laliberte, T., 2000). Kablolu tahrik edilen bir düzlemsel paralel manipulatörün kinematik ve

statik yapısını inceleyen makale ilgili kaynak da yer almaktadır (Williams, R. L. II, and Gallina, P., 2001). Paralel manipülatörlerin dinamik eşitliklerinin belirlenmesi için kullanılan farklı yöntemler vardır.

Bunlardan bazıları; Newton-Euler kuvvet ve moment eşitlikleri (Lin, S. K., 1990), Lagrange enerji yöntemi (Cheng, H, Liu, Y. K., and Li, Z., 2003), Hamilton'un virtüel iş prensibi (Miller, K., 1995) ve Kane'nin yöntemi (Liu, M. J., Li, C. X., and Li, C. N., 2000) dir. Hareketin dinamik eşdeğerini hesaplamak için kullanılan tekniklere de kaynaklardan ulaşabiliriz (Chou, J. C. K., 1992). Robot manipülatörlerindeki bir diğer çalışma alanı da ileri ve geri kuvvet iletim analizleridir. İleri kuvvet analizi, eyleyici kuvvet ve moment etkisinin robot uç noktasında meydana getireceği kuvvet ve moment değerlerini hesap etmeye yarar. Ters kuvvet analizi ise, robot uç noktasına uygulanan kuvvet ve momentin etkisiyle eyleyici üzerinde oluşan kuvvet ve momentin hesaplanması işlemidir. Kuvvet iletimi analizi, manipülatör tasarımında ve kuvvet kontrolü hesaplamalarında kullanımı açısından önemlidir. Kuvvet iletim analizleriyle alakalı yapılmış çalışmalar vardır (Tzafestas, C., and Coiffet, P., 1997). Paralel manipülatörlerde atalet etkisi bir diğer önemli konudur. Bu konuyla alakalı bilgi kaynaklardan sağlanabilir (Zheng, Y. F., and Luh, J. Y. S., 1993).

Robot manipülatörlerle alakalı olarak, çalışma uzayı analizi, tekillik analizi, katılık analizi, kinematik ve dinamik eşitliklerin türetilmesi çalışmaları herhangi bir robot tasarımının analiz edilmesi açısından büyük öneme sahip konulardır. Bu çalışmalar genellikle yörünge belirlemede ve manipülatörün kontrolü aşamasında bize yardımcı olurlar. Robot manipülatörlerin kontrolü, her zaman en çok gelişen ve üzerinde çok geniş bir çalışma alanı barındıran bir konu olmuştur. Robot manipülatörlerin kontrolüyle alakalı birçok makale yayımlanmıştır. Bunların küçük bir kısmı paralel manipülatörlerle alakalıdır. Paralel manipülatörlerin kontrolü, robot alanında halen ilgi uyandıran ve gelişmeye devam eden bir konudur. Paralel manipülatörlerin kontrolüyle alakalı yapılmış birtakım çalışmalar vardır. Bunlardan bazıları şunlardır: Tersine dinamik ve H_{∞} pozisyon kontrolü (Lee, S. H., Song, J. B., Choi, W. C., and Hong, D., 2003), katılık kontrolü (Simaan, N., and Shoham, M., 2003], uyarlamalı denetim (Ting, Y., Chen, Y. S., and Wang, S. M., 1999), kuvvet ve ivme kontrolü (McInroy, J. E., and Hamann, J. C., 2000), pozisyon kontrolü (Marquet, F., Krut, S., Company, O., and Pierrot, F., 2001), anlık kinematik kontrol (Dash, A. K., Chen, I. M., Yeo, S. H., and Yang, G., 2001) ve pozisyon geri beslemeli kontrol (Alp, A. B., and Agrawal, S. K., 2002a) ve bu tezde sunulan çalışmayla alakalı olan kontrol alanı empedans kontrol (Fasse, E. D., and Gosselin, Clement M., 1999) olarak tanımlanabilir. Empedans kontrolün kendi

içinde farklı yapıları vardır: ki bunlar kuvvet geri beslemesiz empedans kontrol, kuvvet geri beslemeli empedans kontrol, kuvvet geri beslemeli ve pozisyona dayalı empedans kontrol, kuvvet gözlemcili ve pozisyona dayalı empedans kontroldür (Michael Strolz,, Alexander Mörtl, Michael Graf, and Martin Buss, 2009). Mevcut çalışma, kuvvet geri beslemeli ve pozisyona dayalı empedans kontrol yapısı temel alınarak yürütülmüştür. Empedans kontrol yöntemi baz alınarak yapılmış birçok farklı çalışma vardır: Parmak hareketini sağlayan kas yapısının kütle-yay-damper empedans modeliyle benzetilerek kontrolünün yapıldığı çalışmaya (Soichi Nakamura, Ryojun Ikeura, Takahiro Wasaka, Kazuki Mizutani, Hideki Sawai and Hitoshi Hirata, 2008) dan ulaşılabilir. Bu tezde kullanılmış olan kontrol yapısına benzerliği itibariyle empedans kontrolün PD kontrolüyle beraber kullanıldığı diğer bir çalışma kaynaklarda verilmiştir (Xiaohong Hao, Lei Zhang and Hengjie Li, 2008). Burada, titreşimin aktif kontrolü amacıyla bu kontrol yapısı kullanılmıştır. Ayak bileği iyileştirme çalışmalarını gerçeklemek üzere tasarım ve kontrolü yapılmış paralel robotlarda vardır (Y. H. Tsoi and S. Q. Xie, 2008). Kontrolcü performansını değerlendirebilmek için hem robotun hem de ayak bileğinin bilgisayar modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller üzerinden hareketle ayak bileği iyileştirme çalışmalarında değişken empedans kontrolcüsünün etkileri incelenmiştir. Kontrolcüye ait empedans parametreleri gerçek ayak bileğine uyumlu olacak şekilde seçilmiştir. İki seri robotun bütünlük çalışmasını ele alan ve 6 serbestlik dereceli empedans modeli kullanılan çalışmaya (Fabrizio Caccavale, Pasquale Chiacchio, Alessandro Marino and Luigi Villani, 2008)'dan ulaşılabilir.

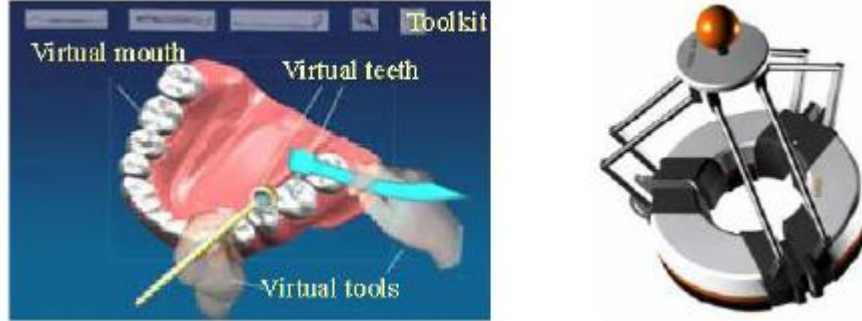
Bu çalışmadaki mantıktan farklı olarak Stewart Platformunun kontrolü sırasında platformun üzerinde sanal bir noktanın oluşturulduğu ve bunun etrafında 6 serbestlik dereceli bir admitans (admittance) kontrol modelinin uygulandığı çalışmaya (Chenthilvel M. Subramanian, 1993)'dan ulaşılabilir.

Pozisyon ve kuvvetin birlikte kontrol edildiği yerlerde vardır, bu tip kontrolcüler melez(hibrit) kuvvet/pozisyon kontrolcüsü olarak adlandırılırlar. Robot manipülatörlerin hassas montaj operasyonlarında kullanılması ilgi uyandıran bir kuvvet kontrolü işlemidir. Robot manipülatörlerin montaj operasyonlarında kullanımını inceleyen makaleler kaynaklarda yer almaktadır (Chai, K. S., and Young, K. ,2001). Kuvvet kontrolün popüler olduğu diğer alanlar; kuvvet yansıtan (haptic) uygulamalar (Laycock, S. D., and Day, A. M., 2003) ve nesne algılama uygulaması (Tsujimura, T., and Yabuta, T., 1989) olarak belirtilebilir. Endüstride, robot manipülatörler genellikle kuvvet kontrolü algoritması altında çalıştırılmazlar. Endüstride, pozisyon kontrolünün farklı tipleri ana kontrol yöntemi olarak

benimsenmiştir. Robot manipülatörlerin artan kapasitesi ve genişleyen kabiliyetleri endüstri tarafından hep takip edilmeye çalışılmıştır. Bilgisayar ve sensör teknolojisinin sağladığı avantajlarla birlikte kuvvet kontrolü çalışmaları son zamanlarda oldukça ilerleme sağlanan ve dikkat çeken çalışma konularının başında gelir. Bilgisayar teknolojisi oldukça karmaşık kontrol yapılarını çözümlenebilecek kadar gelişmiştir. Bazı farklı tip kuvvet kontrolü tasarımları; empedans kontrol (Fasse, E. D., and Gosselin, Clement M., 1999), kayan kipli kuvvet kontrolü (Lu, Z., Kawamura, S., and Goldenberg, A. A., 1995), aktif uyumlu kuvvet kontrolü (Luo, Z. W., and Ito, M., 1993) ve pasif uyumlu kuvvet kontrolü (Ang, M. H. Jr., Wang, W., Loh, R. N. K., and Low, T. S., 1997) olarak sıralanabilir. Melez kuvvet/pozisyon kontrolüyle alakalı yazılmış çeşitli makaleler kaynaklarda yer almaktadır (Yabuta, T., 1992). Diğer kuvvet kontrol yapıları; paralel kuvvet/pozisyon kontrolü (Sciavicco, L., and Siciliano, B., 2001), kararlı integral kuvvet kontrolü (Waldron, K. J., Raghavan, M., and Roth, B., 1989), melez kuvvet/görme kontrolü (Baeten, J., and De Schutter, J., 2002), kuvvet geri beslemeli uyarlamalı denetim (Herder, J. L., and de Visser, H., 2000), model bazlı kuvvet kontrolü (Landers, R. G., and Ulsoy, A.G., 2000), pozisyon/hız kontrollü robotlar için uyarlamalı kuvvet kontrolü (Roy, Jaydeep, and Whitcomb, Louis L., 2002) ve dinamik melez kuvvet/hız kontrolü (Goddard, R. E., Zheng, Y. F., and Hemami, H., 1992) olarak sıralanabilir.

Stewart Platformunun bu çalışmadakine benzer bir şekilde uzaktaki bir sistemi yönlendirdiği onun hareketlerini kontrol ettiği yani kumanda kolu gibi kullanıldığı durumlarda mevcuttur. Stewart Platformunu kumanda kolu gibi kullanarak uzaktaki bir cisim tek noktadan altı eksenle hareket ettirmemiz mümkündür, bu durumuyla bize büyük avantaj sağlamaktadır. Literatürde Stewart Platformunun kumanda kolu olarak kullanımına dair yapılmış çalışmalar vardır. (Yoshito Tanaka, Isao Yokomichi and Toshiaki Makino, 2008) daki çalışmada, yeni bir 6 serbestlik dereceli kuvvet yansıtıcı Stewart Platform mekanizması yapısında pnömatik eyleyicili paralel bağlayıcılara sahip kumanda kolu geliştirilmiştir. Pnömatik silindirlerin itme kuvvetinin kontrolü PIC kontrol yapısını kullanan selenoid valfler vasıtasıyla yapılmaktadır. Uzaktan kontrol teknolojilerinde kuvvet kontrollü manipülatörler büyük öneme sahiptir. Bu yolla, çalışma ortamından kullanıcıya gerçek zamanlı bilgiler aktarılabilir. (Tiehua Chen Zhuxin Zhang, 2008) daki çalışmada 6 serbestlik dereceli kuvvet geri beslemeli bir Stewart platformunun yapısı, performansı ve prensipleri sunulmuştur. Bu çalışmada uzaktaki bir sistem, kuvvet kontrol algoritması altında çalışan hidrolik silindirik eyleyicilerden oluşan Stewart platform tarafından kontrol edilmiştir. Uzaktaki aygıt tarafından yapılan operasyonlar Stewart platform üzerinden kullanıcının elinin hissedeceği şekilde iletilmektedir. Cerrahi

müdahalelerde kullanımına örnek verecek olursak, dişle ilgili uygulamalarda kullanılmak üzere hassas bir şekilde kullanılabilen paralel mekanizma yapısında bir arayüz geliştirilmiştir (Yonggang Cao, Yuru Zhang, Yunzhong Ma and Dangxiao Wang, 2007) (Şekil 1.10).



Şekil 1.10 Diş tedavi uygulamalarında kullanılmak üzere sanal prototip (Yonggang Cao, Yuru Zhang, Yunzhong Ma and Dangxiao Wang, 2007)

Bunlara ilaveten, (Abderraouf Benali Paul Richard Philippe Bidaud, 1999) da altı serbestlik dereceli Stewart Platform tabanlı yeni bir kuvvet yansıtıcı (heptik) arayüz geliştirilmiştir. Uzun dönemli amaç, endoskopik uygulamaları uzaktan yapabilmeyi sağlayacak bir sistem tasarlamaktır. Sistemin sanal gerçeklik uygulaması içerisinde kullanılarak kullanıcının el hareketlerine izin vermesi, dolayısıyla endoskopik hareketlere uyum göstermesi amaçlanmıştır. Kontrol yapısı iki kısımdan oluşmaktadır: (1) içerideki çevrim, kartezyen yer değişimi kontrolü ve (2) dışarıdaki çevrim endoskop aygıtının uç noktasıyla çalışma ortamı arasındaki temas kuvvetini ayarlayan kontroldür. Kontrol algoritmasının oluşturulmasında bu çalışmada kullanılan benzer bir empedans kontrol modeli kullanılmıştır. İki eksenli kuvvet yansıtıcı kumanda kolu tasarımına bir diğer örnek (L. Stocco and S. E. Salcudean, 1996) da verilmiştir.

Manipülâtör ve çevre arasındaki etkileşimi ölçmek amacıyla kullanılan sensörler genellikle gürültülü çalışırlar. Bu istenmeyen gürültünün kuvvet kontrolcünün kararlılığına etkisini inceleyen birçok makale yayımlanmıştır (Waibel, B. J., and Kazerooni, H., 1991). Kuvvet kontrolünün kararlılığına etkiyen bir diğer konuda bağlantıların esnek yapısıyla alakalıdır (Eppinger, S. D., and Seering, W. P., 1992). İlave olarak, robot uç noktasının çevreyle etkileşimini analiz eden birçok çalışma yapılmıştır (Mills, J. K., and Lokhorst, D. M., 1993). Robot uç noktasıyla çevre arasındaki etkileşimin analizi özellikle montaj operasyonu gibi durumlarda çok önemlidir. Robot manipülâtörler için montaj operasyonu ile alakalı birçok makale yayımlanmıştır (Chan, S. P., and Liaw, H. C., 2000). Kuvvet kontrolünde,

sürtünmeden kaynaklanan büyük hatalar ve kararsızlıklar ortaya çıkabilir. Sistemde kararsızlığa yol açan çeşitli sürtünmeler vardır. Bunlardan biri, manipülatörün kendi iç yapısından kaynaklanan sürtünme, diğeri manipülatör-çevre etkileşiminin ortaya çıkardığı sürtünme olarak belirtilebilir. Eğer sürtünmenin kaynağı bulunur, miktarı ölçülür ve modellenenirse sistem performansı geliştirilebilir. Fakat çevre parametreleri dinamik olarak değiştiği zaman bunu yapmak kolay bir işlem değildir. Sürtünmenin belirlenip modellenmesi üzerine yapılmış birkaç çalışmaya kaynaklardan ulaşılabilir (Schimmels, J. M., and Peshkin, M. A., 1994). Sürtünmenin kontrol edilmesiyle ilgili çalışmalar da kaynaklardan edinilebilir (Schimmels, J. M., and Peshkin, M. A., 1994).

Manipülatör ayarı, bütün robot manipülatörleri ilgilendiren genel bir çalışma alanıdır. Robot manipülatörün görevini belirlenen toleranslar dahilinde gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bu yüzden sistemin hassas olması önemlidir. Paralel manipülatörlerin kalibrasyonu ile ilgili yapılmış çalışmalara kaynaklardan ulaşılabilir (Khalil, W., and Besnard, S., 1999).

Paralel manipülatörlerin analiziyle ilgili şimdiye kadar yapılmış çalışmalar daha çok kinematik konusyla alakalıdır. Paralel manipülatörlerin dinamiği ve kontrolüyle ilgili yapılmış çalışmalar daha azdır. Tekillik ve çalışma uzayıyla bağlantılı konularda da araştırmalar artmıştır fakat çalışmalar daha özel yapıdaki manipülatörlere yönelmiştir. Günümüzde paralel manipülatörlerle ilgili araştırmalar büyük artış göstermektedir.

1.4 Özgün Katkıları

Uzaysal hareket eden gerek hava ve denizaltı, gerekse uzay araçlarında, tek noktadan 6 eksen kontrolü hali hazırda mevcut değildir, yani 6 eksen konum ve hızın aynı noktadan kumandası üzerine çalışma literatürde yer almış değildir. Şimdiye kadar yapılan incelemelerde bu çalışmada kullanılan eyleyici empedans benzetimine de rastlanmamıştır. Önceki yapılmış çalışmalarda, platform üzerinde oluşturulan sanal bir nokta etrafında 6 serbestlik dereceli empedans kontrol yapısıyla kuvvet kontrolü yapılmıştır. Bu çalışma,

- 1) Stewart Platform konusunda fiziksel manada çalışma,
- 2) Bu paralel mekanizmaların uzaysal hareket eden cisimlerin yönlendirilmesinde kullanılabilecek olması,
- 3) Newton-Raphson yöntemiyle 3X3 Stewart Platformuna ait düz kinematik problemin hassas bir şekilde çözümlenmesi,

4)Empedans kontrol yöntemiyle pozisyon ve hız geribeslemeli olarak Stewart Platform mekanizmalarının kullanımı,

açılarından önemlidir.

2. KİNEMATİK ANALİZ

Kinematik, platformun hareketlerinin bu hareketlere sebep olan kuvvet ve torklar hesaba katılmadan incelenmesidir. Bu çalışmada kullanılan mekanizmanın kinematiği, üç kısımda incelenecektir. Birincisi, hareketli platformun ötelenme ve dönmesine göre bacak boylarını hesaplamak amacıyla kullanılan ters kinematiktir. Ters kinematikte, hareketli platformun belirli ötelenme ve dönme değerleri için hareketli platform üzerindeki eklem merkezlerinin sabit eksen takımına göre konumları hesaplanmaktadır. Bu noktalar kullanılarak bacak boyları ve yatakların yönelmeleri bulunmaktadır. Ters kinematik problemin çözümü düz kinematik probleme göre daha kolaydır ve tek çözüm vermektedir. Bu durum seri mekanizmalar için tam bir zıtlık arz etmektedir. Bu çalışmada kullanılan mekanizmanın ters kinematik probleminin çözümü Bölüm 2.1’de anlatılmıştır.

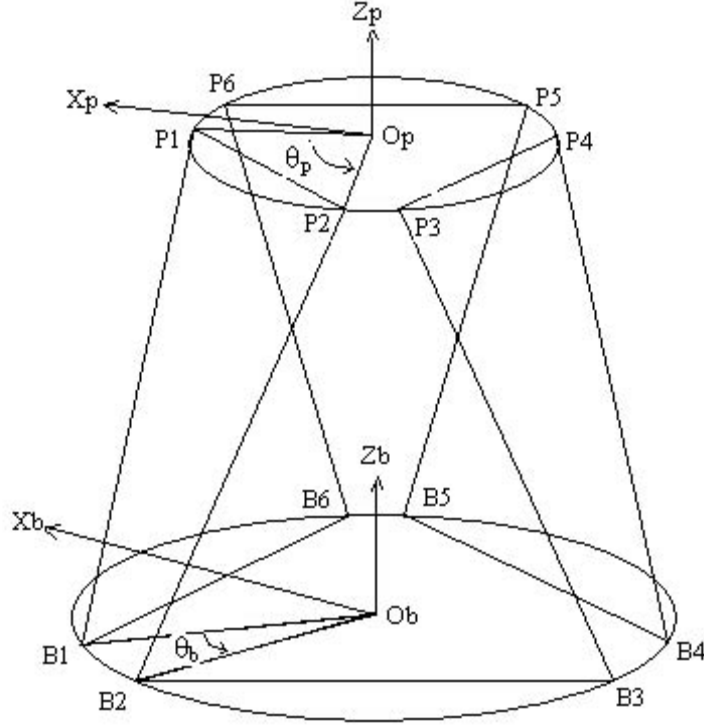
İkinci kısım, belirli bacak boyları ve yatak yönelmeleri için hareketli platformun ötelenmesi ve dönmesini hesaplamak amacıyla kullanılan düz kinematiktir. Düz kinematik problemin çözümü paralel mekanizmalar için oldukça zor ve karmaşıktır. Çözüm genelde tek değildir; bacakların bir konfigürasyonu için birden fazla çözüm çıkmaktadır. Bu çalışmada kullanılan mekanizmanın düz kinematik probleminin Newton-Raphson yöntemiyle çözümü Bölüm 2.2’de anlatılmıştır. Ters Kinematik - Düz Kinematik program koduna Matlab M-File biçiminde Ek 1’den ulaşılabilir.

Üçüncü kısım, platforma ait Jakobian matrisinin bulunmasını içerir. Jakobian matrisi, hareketli platformun doğrusal ve açısal hızlarıyla eyleyici hızları arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu çalışmada kullanılan Jakobian matrisinin çıkarılışı Bölüm 2.3’de anlatılmıştır. Jakobian Matrisine ait S-Function program kodlarına Ek 2’den ulaşılabilir.

2.1 Ters Kinematik Analiz

Ters kinematikte, hareketli platformun belirli ötelenme ve dönme değerleri için, hareketli platform üzerindeki eklem merkezlerinin sabit eksen takımına göre konumları hesaplanmaktadır. Bu noktalar kullanılarak bacak boyları ve yatakların yönelmeleri bulunmaktadır.

Hareketli tablanın belirli açısal ve doğrusal konumları için bacak uzunluklarını veren denklemleri belirleyelim. Bu durumda altı bilinmeyen vardır $l_i(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)$. Buradaki amaç, platformun belirli açısal ve doğrusal konumları için $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ bacak boylarını l_i bulmaktır (François Comin, 2006).



Şekil 2.1 6X6 Stewart Platformu Koordinat Sistemi (François Comin, 2006)

Sistemde iki koordinat takımı, $\{P\}$ ve $\{B\}$ bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla hareketli tabla ve tabana bağlıdır. $\{P\}$ koordinat takımının sıfırı platformun merkezinde yer almaktadır. \vec{Z}_p eksenini yukarıya doğrudur ve \vec{X}_p eksenini $(\vec{O}_p P_1, \vec{O}_p P_2)$ açısının açıortayıdır. $\{B\}$ koordinat takımının sıfırı tabanın merkezinde yer almaktadır, \vec{Z}_b eksenini yukarıya doğrudur ve \vec{X}_b eksenini $(\vec{O}_b B_1, \vec{O}_b B_6)$ açısının açıortayıdır.

Bu iki koordinat takımı, taban üzerindeki $(B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6)$ ve platform üzerindeki $(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6)$ bacak bağlantılarının pozisyonlarını tespit etmek için kullanılacaktır. $(\vec{O}_p P_1, \vec{O}_p P_2)$ açısı θ_p ile ifade edilsin. $(\vec{O}_p P_1, \vec{O}_p P_3)$, $(\vec{O}_p P_3, \vec{O}_p P_5)$ ve $(\vec{O}_p P_5, \vec{O}_p P_1)$ açıları 120° ye eşittir.

Benzer şekilde, $(\vec{O}_b B_1, \vec{O}_b B_2)$ açısı θ_b ile ifade edilsin. $(\vec{O}_b B_1, \vec{O}_b B_3)$, $(\vec{O}_b B_3, \vec{O}_b B_5)$ ve $(\vec{O}_b B_5, \vec{O}_b B_1)$ açıları 120° ye eşittir.

$i = 1, 2, \dots, 6$ için $(\vec{X}_p, \vec{O}_p P_i)$ açısı λ_i ve $(\vec{X}_b, \vec{O}_b B_i)$ açısı Λ_i ile ifade edilsin.

Bu nedenle:

$$\Lambda_i = 60i - \theta_b / 2 \quad \text{ve} \quad \lambda_i = 60i - \theta_p / 2, \quad i=1,3,5 \quad (2.1)$$

$$\Lambda_i = \Lambda_{i-1} + \theta_b \quad \text{ve} \quad \lambda_i = \lambda_{i-1} + \theta_p, \quad i=2,4,6 \quad (2.2)$$

Ayrıca:

$${}^P p_i = \{p_{ix}, p_{iy}, p_{iz}\}^T = \{r_p \cdot \cos(\lambda_i), r_p \cdot \sin(\lambda_i), 0\}^T, \quad i=1,2,\dots,6 \quad \text{için} \quad (2.3)$$

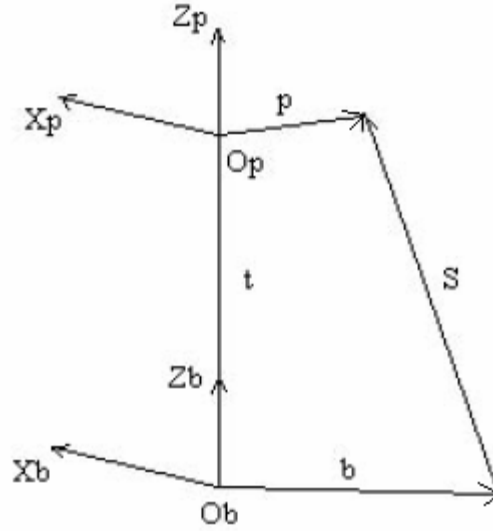
$\{P\}$ koordinat takımına göre P_i noktalarının pozisyonunu tanımlar.

$${}^B b_i = \{b_{ix}, b_{iy}, b_{iz}\}^T = \{r_b \cdot \cos(\Lambda_i), r_b \cdot \sin(\Lambda_i), 0\}^T, \quad i=1,2,\dots,6 \quad \text{için} \quad (2.4)$$

$\{B\}$ koordinat takımına göre B_i noktalarının pozisyonunu tanımlar.

r_b ve r_p sırasıyla tabanın ve platformun bağlantı noktalarını kesen dairenin yarıçapını temsil eder.

Artık, i . bacağın uzunluğu " l_i " hesaplanabilir.



Şekil 2.2 Eyleyici Uzunluğu (François Comin, 2006).

${}^B S_i$ ile ifade edilebilen vektörün uzunluğu :

$$l_i = \sqrt{S_{ix}^2 + S_{iy}^2 + S_{iz}^2} \quad (2.5)$$

$\{B\}$ koordinat takımına göre ${}^B S_i$ vektörünün uzunluğu :

$${}^B S_i = -{}^B b_i + {}^B t + {}^B p_i \quad (2.6)$$

şeklinde ayrıştırılabilir.

$\{B\}$ koordinat takımına göre $\{P\}$ koordinat takımının sıfırının pozisyonu :

$${}^B t = \{x, y, z\}^T \quad (2.7)$$

şeklinindedir. Yani, bu denklem $\{B\}$ koordinat takımına göre platform merkezinin pozisyonunu göstermektedir. $\{B\}$ koordinat takımına göre platform merkezinin dönmesi ise ;

$${}^B p_i = {}^B R \cdot {}^P p_i \quad (2.8)$$

şeklindedir.

${}^B P R$, $\{B\}$ koordinat takımına göre $\{P\}$ koordinat takımının sırasıyla X-Y-Z eksenleri etrafında dönme miktarını temsil eder ve rotasyon matrisi olarak adlandırılır.

$${}^B P R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \\ - \sin \beta \cos \beta \sin \gamma \\ \sin \gamma \sin \alpha + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha \\ \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

α , \vec{Z}_b etrafında $\{B\}$ koordinat takımına göre $\{P\}$ koordinat takımının rotasyonudur.

β , \vec{Y}_b etrafında $\{B\}$ koordinat takımına göre $\{P\}$ koordinat takımının rotasyonudur.

γ , \vec{X}_b etrafında $\{B\}$ koordinat takımına göre $\{P\}$ koordinat takımının rotasyonudur.

Böylece:

$${}^B p_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta \cdot r_p \cdot \cos(\lambda_i) + (\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) \cdot r_p \cdot \sin(\lambda_i) \\ \sin \alpha \cos \beta \cdot r_p \cdot \cos(\lambda_i) + (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) \cdot r_p \cdot \sin(\lambda_i) \\ - \sin \beta \cdot r_p \cdot \cos(\lambda_i) + \cos \beta \sin \gamma \cdot r_p \cdot \sin(\lambda_i) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Bacakların uzunluğu aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$l_i = \sqrt{S_{ix}^2 + S_{iy}^2 + S_{iz}^2} \quad \text{veya} \quad l_i^2 = S_{ix}^2 + S_{iy}^2 + S_{iz}^2 \quad (2.11)$$

${}^B S_i$ yerine $-{}^B b_i + {}^B t + {}^B p_i$ konulduğu zaman:

$$l_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 + r_p^2 + r_b^2 + 2(r_{11}p_{ix} + r_{12}p_{iy})(x - b_{ix}) + 2(r_{21}p_{ix} + r_{22}p_{iy})(y - b_{iy}) + 2(r_{31}p_{ix} + r_{32}p_{iy})(z) - 2(xb_{ix} + yb_{iy}) \quad (2.12)$$

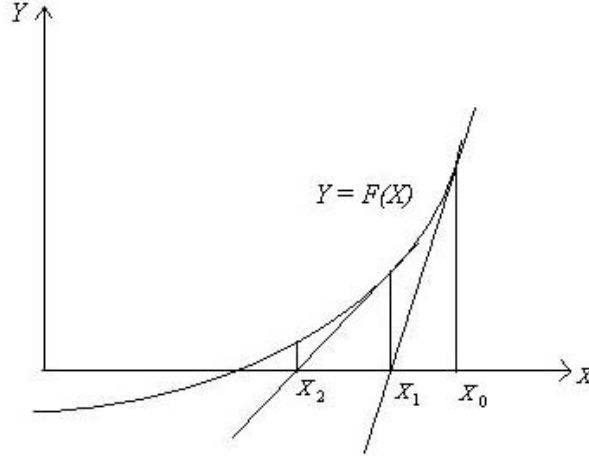
$i=1, \dots, 6$ için

Bu eşitlik, platformun açısal ve doğrusal konumlarından $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ altı bacak uzunluğunu " l_i " elde ettiğimiz bir denklemdir.

2.2 Düz Kinematik Analiz

Düz kinematikte, belirli bacak boyları ve yatak açıları için hareketli platformun ötelenmesi ve dönmesi hesaplanmaktadır. Yani, $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ değerleri altı bacak uzunluğundan (l_i) hareketle elde edilecektir. Bunun için, altı adet doğrusal olmayan denklemin eş zamanlı olarak çözülmesi gerekmektedir. Çözüm için Newton-Raphson yöntemi kullanılacaktır. (François Comin, 2006).

$F(X) = 0$ şeklindeki basit bir eşitlik Newton yöntemiyle çözülebilir. X_0 başlangıç noktası olarak seçilir.



Şekil 2.3 Newton-Raphson yöntemi (François Comin, 2006)

Eğer F 'nin X_0 da türevi varsa, X_0 'da F 'ye teğet olan düz çizgiye ait eşitlik:

$$Y = \dot{F}(X_0) \cdot (X - X_0) + F(X_0) \quad (2.13)$$

Bu eşitlikte X yerine X_1 , Y yerinede 0 koyduğumuzda X_1 'i elde edebiliriz.

$$0 = \dot{F}(X_0) \cdot (X_1 - X_0) + F(X_0) \quad (2.14)$$

$$X_1 = X_0 - \frac{F(X_0)}{\dot{F}(X_0)} \quad (2.15)$$

X_1 , çözüme X_0 'dan daha yakındır. Aynı hesaplama yöntemi X_2 içinde tekrarlanır. İterasyon yoluyla X_3, X_4, X_5, \dots bulunur. Çözümde istenen yakınsama sağlandığında iterasyon sonlandırılır.

Bu çözüm basit bir eşitlik için verilmiştir. Eğer bahsedilen daha karmaşık bir sisteme ait eşitlikse, yine aynı prosedür izlenmelidir.

Bu çalışmada; $F(X) = (F_1(X), \dots, F_6(X))$ olmak üzere,

$$X = x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$$

$$\begin{aligned} F_i(X) = & x^2 + y^2 + z^2 + R_p^2 + R_b^2 + 2(R_{11}P_{ix} + R_{12}P_{iy})(x - B_{ix}) + 2(R_{21}P_{ix} + R_{22}P_{iy})(y - B_{iy}) \\ & + 2(R_{31}P_{ix} + R_{32}P_{iy})z - 2(xB_{ix} + yB_{iy}) - l_i^2 \end{aligned} \quad (2.16)$$

çözülmesi gereken denklem takımıdır.

$\forall \{i, j\} \subset \{1, \dots, 6\}$ içeren J_{ij} matrisi şöyle tanımlansın:

$$J_{ij}(X) = \frac{dF_i}{dX_j}(X) \quad (2.17)$$

$\{X^{(n)}\}_{n \geq 0}$ şu şekilde bulunur:

$$\left. \begin{aligned} X^{(0)} &= (x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0) \\ X^{(n+1)} &= X^{(n)} - [J(X^{(n)})]^{-1} F(X^{(n)}) \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

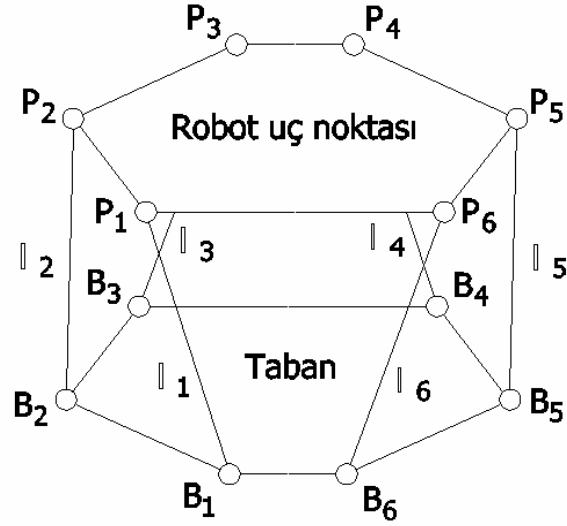
Bu yöntem Newton-Raphson yöntemi olarak adlandırılır. Yaklaşık çözüm iterasyon yoluyla bulunur. Çözüme yaklaşıldığında iterasyon durur. Yakınsama kriteri belirlenmiş olmalıdır.

$i = 1, 2, \dots, 6$ için $|F_i(X)| < \varepsilon$ olduğunda iterasyon durur.

ε keyfi olarak seçilir.

2.3 Jakobian Matrisi

Bu bölümde, paralel manipülatörün Jakobian matrisi elde edilecektir (Kazuhiro Kosuge, Minoru Okuda, Toshio Fukuda, Toshiki Koduka, Tomoo Mizuno, 1993). Jakobian matrisi, hareketli platformun doğrusal ve açısal hızlarıyla eyleyici hızları arasındaki ilişkiyi tanımlar. Şekil 2.4 de gözüktüğü üzere, Stewart Platformu $P_1 - P_6$ bağlantı noktalı hareketli tabla, $B_1 - B_6$ bağlantı noktalı sabit tabla ve bu iki kısmı birbirine bağlayan $l_1 - l_6$ eyleyicilerinden oluşmaktadır. Hareketli platformun kontrolü eyleyiciler vasıtasıyla sağlanır. Platforma ait iki tane koordinat sistemi vardır. Birincisi, sabit platforma bağlı olan $X_b - Y_b - Z_b$ koordinat sistemi, ikincisi ise hareketli platforma bağlı $X_p - Y_p - Z_p$ koordinat sistemidir.



Şekil 2.4 Genel görünüm

Eyleyicilerin uzunluklarını ifade etmek istersek :

$$\mathbf{l} = (l_1, \dots, l_6)^T$$

Hareketli platformun pozisyonunu ifade etmek istersek :

$$\mathbf{x} = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)^T \quad (2.19)$$

Aşağıda da gösterileceği gibi \mathbf{x} ile \mathbf{l} arasındaki ilişki şöyle tanımlanır.

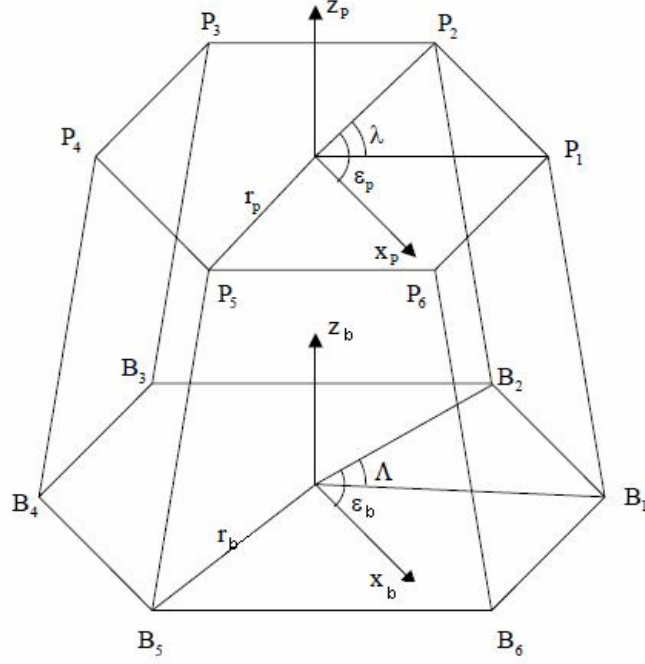
$$\mathbf{l} = g(\mathbf{x}) \quad (2.20)$$

(2.20) eşitliğini zamana göre türetirsek :

$$\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{x}} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{J} \equiv \frac{\partial g}{\partial \mathbf{x}} \quad (2.22)$$

(2.22) eşitliğiyle verilen \mathbf{J} , paralel manipülâtörün Jakobian matrisini temsil etmektedir. Dikkat edilecek olursa, buradaki Jakobian matrisi, seri bağılı manipülâtördeki Jakobian matrisinin tersidir. Jakobian matrisinin hesaplanması aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2.5 6-6 Stewart Platformu (Yıldız, İbrahim., 2007)

Şekil 2.5’de gösterilen r_b uzunluğu ve Λ_i açısı kullanılarak, eyleyicilerin sabit platform kısmına ait bağlantı noktaları $X_b - Y_b - Z_b$ koordinat sistemine göre (2.4) eşitliğindeki gibi ifade edilir.

$${}^B \mathbf{b}_i = \{b_{ix}, b_{iy}, b_{iz}\}^T = \{r_b \cdot \cos(\Lambda_i), r_b \cdot \sin(\Lambda_i), 0\}^T, i=1,2,\dots,6 \text{ için}$$

r_p uzunluğu ve λ_i açısı kullanılarak eyleyicilerin hareketli platform kısmına ait bağlantı noktaları $X_p - Y_p - Z_p$ koordinat sistemine göre (2.3) eşitliğindeki gibi ifade edilir.

$${}^P \mathbf{p}_i = \{p_{ix}, p_{iy}, p_{iz}\}^T = \{r_p \cdot \cos(\lambda_i), r_p \cdot \sin(\lambda_i), 0\}^T, i=1,2,\dots,6 \text{ için}$$

$X_p - Y_p - Z_p$ koordinat sisteminin $X_b - Y_b - Z_b$ koordinat sistemine göre hareketini Euler açılarıyla (2.19) eşitliğindeki gibi ifade ederiz ;

$$\mathbf{x} = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)^T$$

${}^B \mathbf{t}$ hareket vektörü (2.7) ve ${}^B_P \mathbf{R}$ rotasyon matrisi (2.9) eşitliğindeki gibi tanımlansın :

$${}^B \mathbf{t} = \{\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}\}^T$$

$${}^B_P \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sin \gamma \sin \alpha + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha \\ \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}$$

Burada, $\alpha \rightarrow z, \beta \rightarrow y, \gamma \rightarrow x$ etrafındaki dönme miktarlarını verdiği kabul edilmiştir.

${}^P \mathbf{p}_i, {}^B \mathbf{t}$ ve ${}^B_P \mathbf{R}$ pozisyon vektörlerini kullanarak, ${}^B \mathbf{p}_i$, hareketli platformun eyleyici bağlantı uçlarını $X_b - Y_b - Z_b$ koordinat sistemine göre tarif edelim :

$${}^B \mathbf{p}_i = {}^B_P \mathbf{R} {}^P \mathbf{p}_i + {}^B \mathbf{t} \quad (2.23)$$

${}^B \mathbf{p}_i$ pozisyon vektörünün elemanlarını yazacak olursak :

$${}^B \mathbf{p}_i = \begin{pmatrix} {}^B \mathbf{p}_{ix} \\ {}^B \mathbf{p}_{iy} \\ {}^B \mathbf{p}_{iz} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

$${}^B \mathbf{p}_{ix} = (c_\alpha c_\beta)^P \mathbf{p}_{ix} + (c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma)^P \mathbf{p}_{iy} + (c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma)^P \mathbf{p}_{iz} + \mathbf{x} \quad (2.25)$$

$${}^B \mathbf{p}_{iy} = (s_\alpha c_\beta)^P \mathbf{p}_{ix} + (s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma)^P \mathbf{p}_{iy} + (s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma)^P \mathbf{p}_{iz} + \mathbf{y} \quad (2.26)$$

$${}^B \mathbf{p}_{iz} = (-s_\beta)^P \mathbf{p}_{ix} + (c_\beta s_\gamma)^P \mathbf{p}_{iy} + (c_\beta c_\gamma)^P \mathbf{p}_{iz} + \mathbf{z} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= s_\alpha, \sin \beta = s_\beta, \sin \gamma = s_\gamma \\ \cos \alpha &= c_\alpha, \cos \beta = c_\beta, \cos \gamma = c_\gamma\end{aligned}$$

Eyleyicinin uzama miktarı \mathbf{l}_i , hareketli platformun bağlantı noktası ${}^B \mathbf{p}_i$ ile sabit platformun bağlantı noktası ${}^B \mathbf{b}_i$ arasındaki mesafe kadardır. Ve aşağıdaki şekilde hesaplanır :

$$\mathbf{l}_i^2 = ({}^B \mathbf{p}_{ix} - \mathbf{b}_{ix})^2 + ({}^B \mathbf{p}_{iy} - \mathbf{b}_{iy})^2 + ({}^B \mathbf{p}_{iz} - \mathbf{b}_{iz})^2 \quad (2.28)$$

$$\mathbf{l}_i = \sqrt{({}^B \mathbf{p}_{ix} - \mathbf{b}_{ix})^2 + ({}^B \mathbf{p}_{iy} - \mathbf{b}_{iy})^2 + ({}^B \mathbf{p}_{iz} - \mathbf{b}_{iz})^2} \quad (2.29)$$

Eşitlik 2.28'yi zamana göre türetirsek :

$$\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{x}} \quad (2.30)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{l}_1, \dots, \dot{l}_6 \end{bmatrix}^T = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma} \end{bmatrix}^T \text{ olur.} \quad (2.31)$$

Buradaki \mathbf{J} Jakobian matrisidir. Buradan \mathbf{J} 'nin ij 'inci elemanları $\mathbf{J}_{ij} = \frac{\partial \mathbf{l}_i}{\partial \mathbf{x}_j}$ şeklinde

hesaplanmaktadır. (2.31) eşitliğinden;

$$\dot{\mathbf{l}}_i = \sum_{j=1}^6 \mathbf{J}_{ij} \dot{\mathbf{x}}_j = \sum_{j=1}^6 \frac{\partial \mathbf{l}_i}{\partial \mathbf{x}_j} \dot{\mathbf{x}}_j \quad (2.32)$$

elde edilir.

$${}^B \vec{\mathbf{p}}_i = {}^B p_{ix} \vec{i} + {}^B p_{iy} \vec{j} + {}^B p_{iz} \vec{k} \quad (2.33)$$

$$\vec{\mathbf{b}}_i = b_{ix} \vec{i} + b_{iy} \vec{j} + b_{iz} \vec{k} \quad (2.34)$$

$$\mathbf{l}_i^2 = ({}^B \mathbf{p}_{ix} - \mathbf{b}_{ix})^2 + ({}^B \mathbf{p}_{iy} - \mathbf{b}_{iy})^2 + ({}^B \mathbf{p}_{iz} - \mathbf{b}_{iz})^2 = \mathbf{f}_i(x) \quad i=1,2,\dots,6 \quad (2.35)$$

diye tanımlayalım.

$$\frac{\partial^B \mathbf{p}_{ix}}{\partial x} = \frac{\partial^B \mathbf{p}_{iy}}{\partial y} = \frac{\partial^B \mathbf{p}_{iz}}{\partial z} = 1 \text{ olduğu da dikkate alınarak, (2.35) eşitliğinin her iki tarafının}$$

zamana göre türevi alınırsa (2.36) eşitliği elde edilir.

$$2\mathbf{l}_i \dot{\mathbf{l}}_i = \sum_{j=1}^6 \frac{\partial \mathbf{f}_i(x)}{\partial \mathbf{x}_j} \dot{\mathbf{x}}_j \quad (2.36)$$

Buradan $\dot{\mathbf{l}}_i$ yi çekersek;

$$\dot{\mathbf{l}}_i = \sum_{j=1}^6 \frac{1}{2\mathbf{l}_i} \frac{\partial \mathbf{f}_i(x)}{\partial \mathbf{x}_j} \dot{\mathbf{x}}_j \quad (2.37)$$

(2.32) ve (2.37) eşitlikleri kıyaslandığında (2.38) eşitliğine ulaşılmaktadır.

$$\mathbf{J}_{ij} = \frac{1}{2\mathbf{l}_i} \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}_j} \quad (2.38)$$

Şimdi de $\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}_j}$ kısmi türevlerini elde edelim;

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial x_1} = \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial x} = 2\mathbf{l}_{xi} \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial x_2} = \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial y} = 2\mathbf{l}_{yi}, \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial x_3} = \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial z} = 2\mathbf{l}_{zi}, \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial x_4} = \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \alpha} = 2 \left[\mathbf{l}_{xi} \left\{ (-s_\alpha c_\beta)^p \mathbf{p}_{ix} + (-s_\alpha s_\beta s_\gamma - c_\alpha c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (-s_\alpha s_\beta c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \right\} + \right. \\ \left. \mathbf{l}_{yi} \left\{ (c_\alpha c_\beta)^p \mathbf{p}_{ix} + (c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \right\} \right] \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial x_5} = \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \beta} = 2 \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{xi} \{ (-c_\alpha s_\beta)^p \mathbf{p}_{ix} + (c_\alpha c_\beta s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (c_\alpha c_\beta c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} + \\ \mathbf{l}_{yi} \{ (-s_\alpha s_\beta)^p \mathbf{p}_{ix} + (-s_\alpha c_\beta s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (s_\alpha c_\beta c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} + \\ \mathbf{l}_{zi} \{ (-c_\beta)^p \mathbf{p}_{ix} + (-s_\beta s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (-s_\beta c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial x_6} = \frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \gamma} = 2 \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{xi} \{ (c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (-c_\alpha s_\beta s_\gamma + s_\alpha c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} + \\ \mathbf{l}_{yi} \{ (s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (-s_\alpha s_\beta s_\gamma - c_\alpha c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} + \mathbf{l}_{zi} \{ (c_\beta c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} - (c_\beta s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Buna göre, (2.38) eşitliğinin bileşenleri şu şekilde oluşur:

$$\mathbf{J}_{i1} = \mathbf{l}_{xi} \frac{1}{\mathbf{l}_i} \quad (2.45)$$

$$\mathbf{J}_{i2} = \mathbf{l}_{yi} \frac{1}{\mathbf{l}_i} \quad (2.46)$$

$$\mathbf{J}_{i3} = \mathbf{l}_{zi} \frac{1}{\mathbf{l}_i} \quad (2.47)$$

$$\mathbf{J}_{i4} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{xi} \{ (-s_\alpha c_\beta)^p \mathbf{p}_{ix} + (-s_\alpha s_\beta s_\gamma - c_\alpha c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (-s_\alpha s_\beta c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} + \\ \mathbf{l}_{yi} \{ (c_\alpha c_\beta)^p \mathbf{p}_{ix} + (c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} \end{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{l}_i} \quad (2.48)$$

$$\mathbf{J}_{i5} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{xi} \{ (-c_\alpha s_\beta)^p \mathbf{p}_{ix} + (c_\alpha c_\beta s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (c_\alpha c_\beta c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} + \\ \mathbf{l}_{yi} \{ (-s_\alpha s_\beta)^p \mathbf{p}_{ix} + (-s_\alpha c_\beta s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (s_\alpha c_\beta c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} + \\ \mathbf{l}_{zi} \{ (-c_\beta)^p \mathbf{p}_{ix} + (-s_\beta s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (-s_\beta c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} \end{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{l}_i} \quad (2.49)$$

$$\mathbf{J}_{i6} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{xi} \{ (c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (-c_\alpha s_\beta s_\gamma + s_\alpha c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} + \\ \mathbf{l}_{yi} \{ (s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} + (-s_\alpha s_\beta s_\gamma - c_\alpha c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} + \mathbf{l}_{zi} \{ (c_\beta c_\gamma)^p \mathbf{p}_{iy} - (c_\beta s_\gamma)^p \mathbf{p}_{iz} \} \end{bmatrix} \frac{1}{\mathbf{l}_i} \quad (2.50)$$

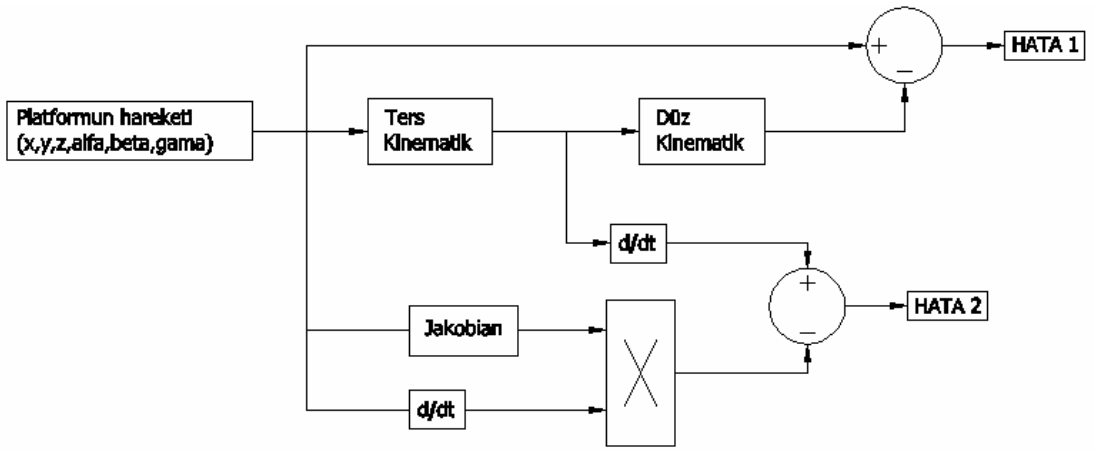
$$\mathbf{J} = [\mathbf{J}_{i1}, \mathbf{J}_{i2}, \mathbf{J}_{i3}, \mathbf{J}_{i4}, \mathbf{J}_{i5}, \mathbf{J}_{i6}] \quad i = (1,2,3,4,5,6)$$

Böylelikle Jakobian Matrisi (6X6) elde edilmiş olur. Jakobian Matrisine ait S-Function

program kodlarına Ek 2'den ulaşılabilir.

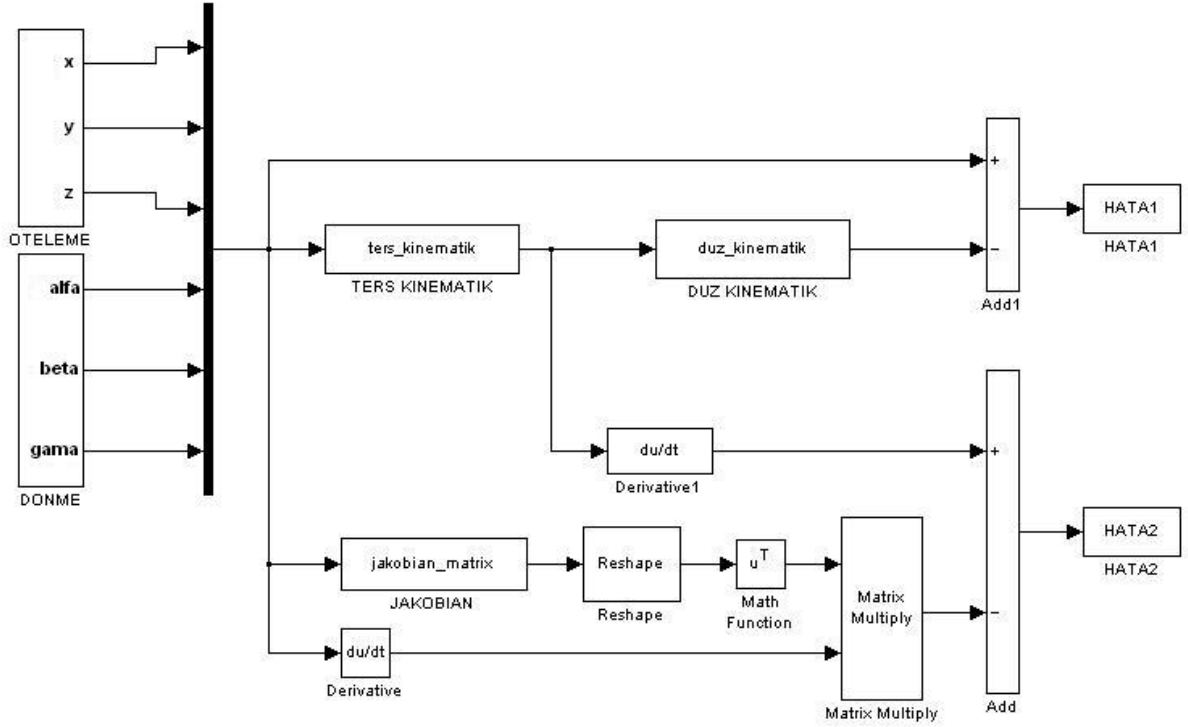
2.4 Hata Analizleri

Ters kinematik, Düz kinematik ve Jakobian matrisi bloklarını içeren kinematik analiz blok şeması Şekil 2.6'da verilmiştir. Bu yapıdan hareketle Düz kinematik ve Jakobian matrisi hata analizleri yapılmıştır. Ters kinematik çözümlerler daha önceki çalışmalarda hassas bir şekilde elde edilmiş olduğundan burada yer verilmemiştir.



Şekil 2.6 Kinematik analiz blok şeması

Matlab Simulink genel blok diyagramı oluşturulan kinematik analiz yapısı Şekil 2.7'de verilmiştir. Burada HATA1, Düz Kinematik yönteminde ortaya çıkan hataları, HATA2 ise Jakobian matrisi analizinde ortaya çıkan hataları göstermektedir.



Şekil 2.7 Kinematik analiz genel blok diyagramı

Buradaki kinematik hata analizlerinde iki tip simülasyon giriş değerleri için düz kinematik analiz ve jakobian matrisi hataları incelenecektir;

1) Sisteme uygulanabilecek en zor giriş değerlerini temsilen; $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ pozisyon ve dönme girişlerinin aynı anda sinüs eğrisi şeklinde uygulanması durumu (Şekil 2.8). Simülasyon giriş değerleri ötelemede 40mm/s hızında ve aşağıdaki maksimum değerlere sahip sinüs eğrisi şeklindedir, dönmelerde 20derece/s hızında ve aşağıdaki maksimum değerlere sahip sinüs eğrisi şeklindedir.

Öteleme: $x = \pm 40\text{mm}$ $y = \pm 40\text{mm}$ $z = \pm 40\text{mm}$

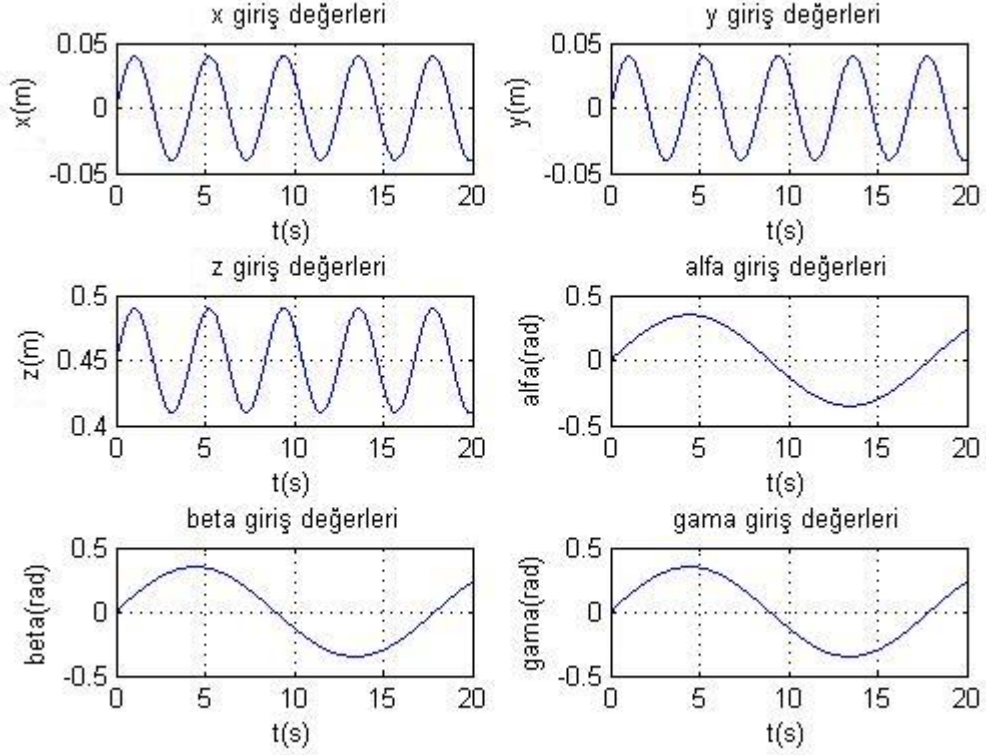
Dönme: $\alpha = \pm 20^\circ$ $\beta = \pm 20^\circ$ $\gamma = \pm 20^\circ$

Bu değerler platformun yaklaşık çalışma uzayını temsil edecek şekilde seçilmiştir.

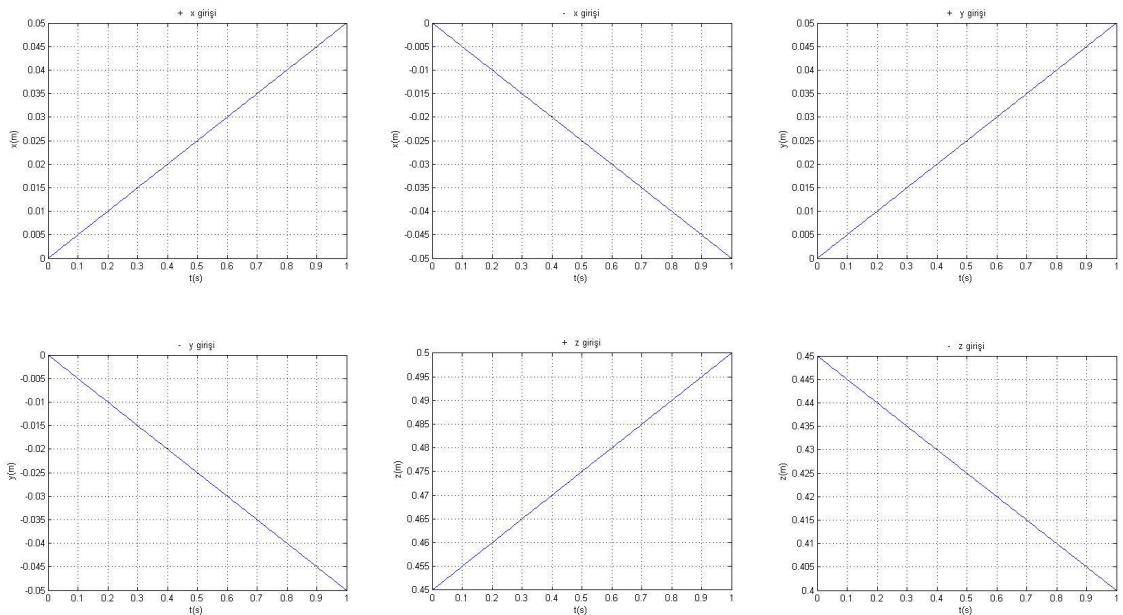
2) Sisteme normal çalışma şartları altında uygulanacak giriş değerlerini temsilen; $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ pozisyon ve dönme girişlerinin ayrı ayrı rampa pozisyonları şeklinde uygulanması durumu (Şekil 2.9). Sadece bir eksenle giriş olacağından diğer eksenler platform başlangıç konumunda bekletilecektir. Bu durum için ötelemede 50mm/s hızında, dönmelerde 20derece/s hızında rampa fonksiyonu şeklinde girişler belirlenmiştir. Hem artı hem de eksi yönde bu

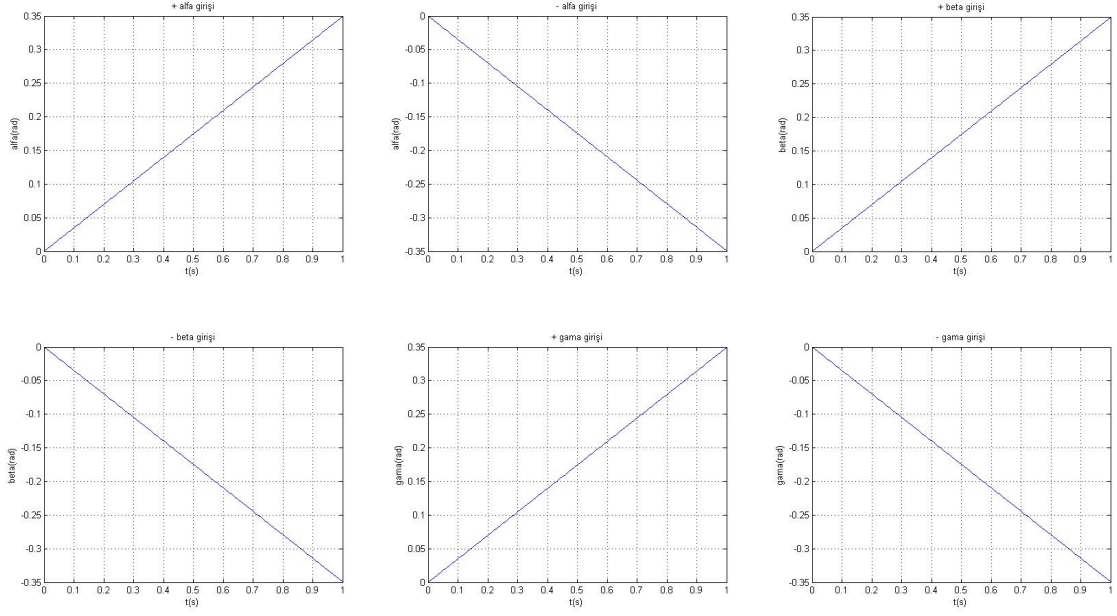
denemeler tekrarlanmıştır.

Platform başlangıç konumunun her iki durum içinde $x=0$, $y=0$, $z=450\text{mm}$, $\alpha=0$, $\beta=0$, $\gamma=0$ olduğu düşünülecektir. Bu nokta platform çalışma uzayının merkezi konumundadır. Dolayısıyla kinematik hata analizleri çalışma uzayının merkezinde yapılmaktadır.



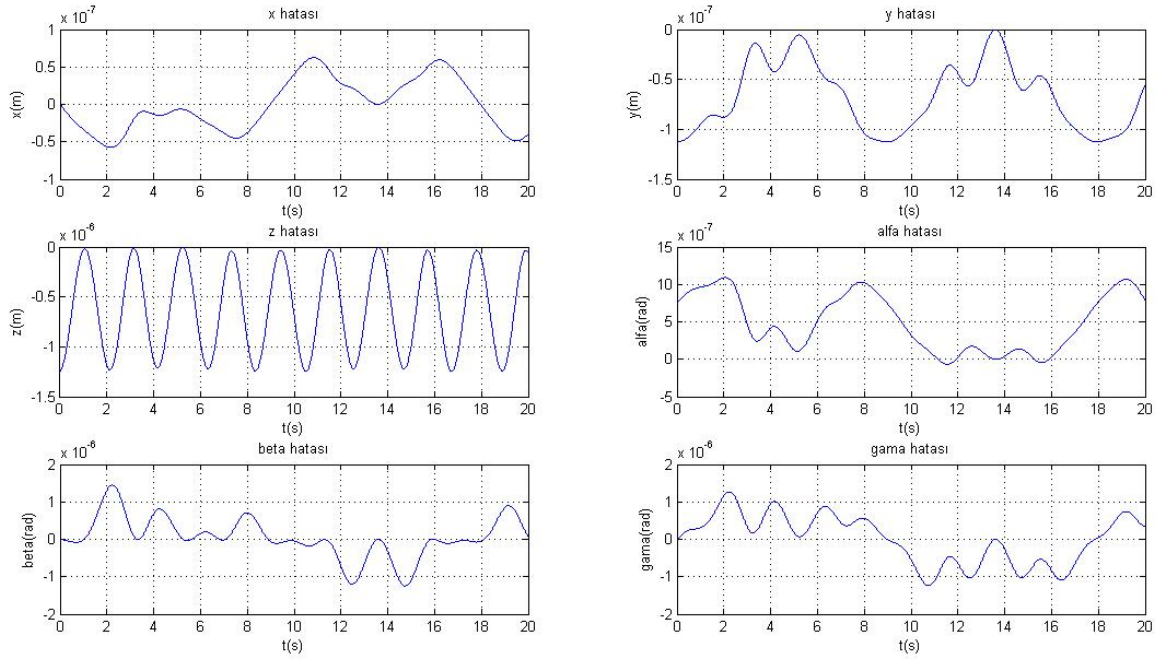
Şekil 2.8 Kinematik hata analizi için simülasyon giriş değerleri (her yönde aynı anda giriş var)



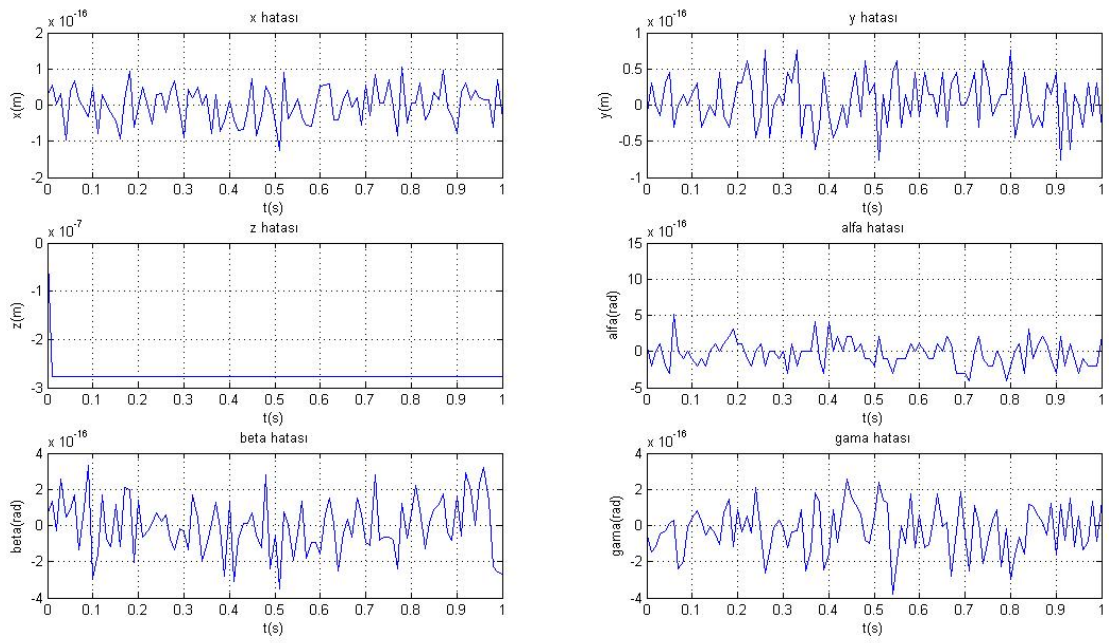


şekil 2.9 Kinematik hata analizi için simülasyon giriş değerleri (sırasıyla sadece tek yönde giriş var)

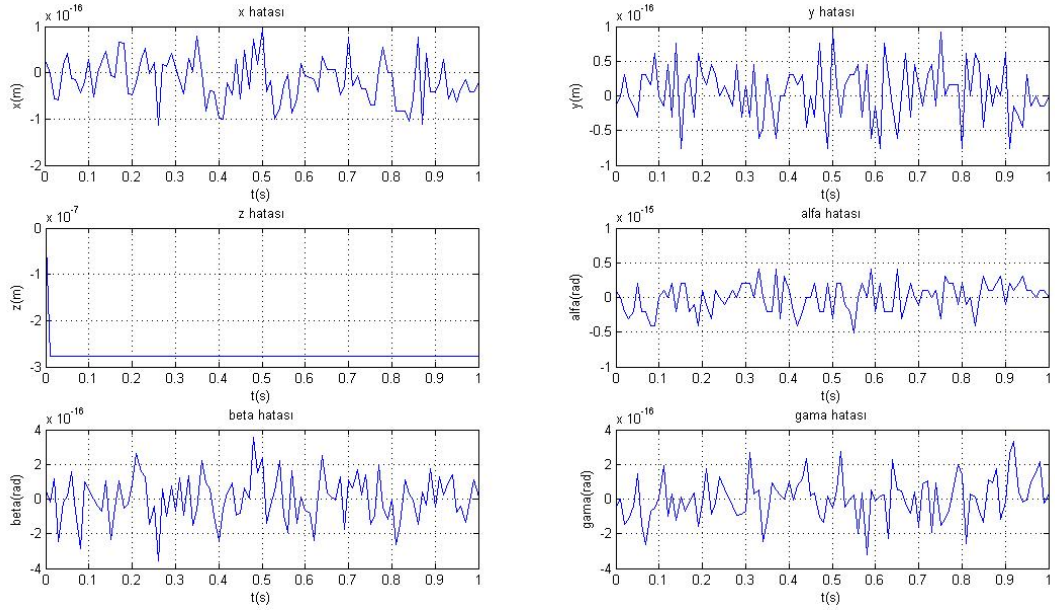
Buna göre, Newton-Raphson yöntemi kullanılarak elde edilen düz kinematik zmlemede her yönde aynı anda giriş durumunda ortaya çıkan hata miktarları şekil 2.10'da verilmiştir. Sadece tek yönde giriş durumunda ortaya çıkan hata miktarları ise şekil 2.11-2.22 de verilmiştir.



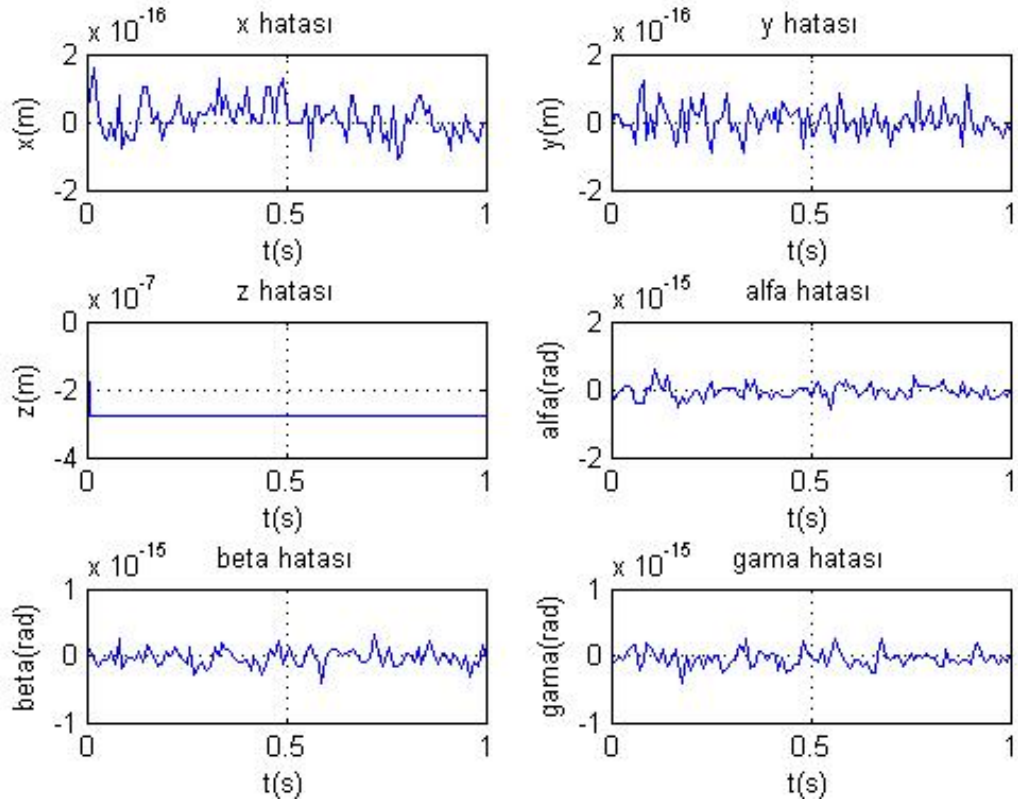
Şekil 2.10 Düz kinematik hata sonuçları (her yönde aynı anda giriş var)



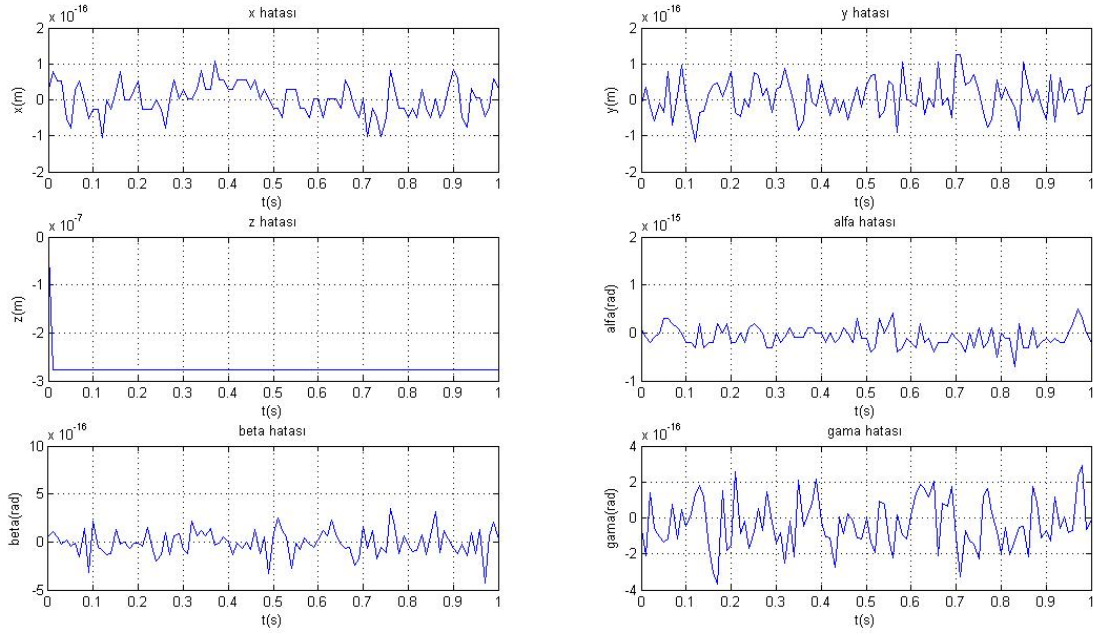
Şekil 2.11 Düz kinematik hata sonuçları (sadece +x girişi var)



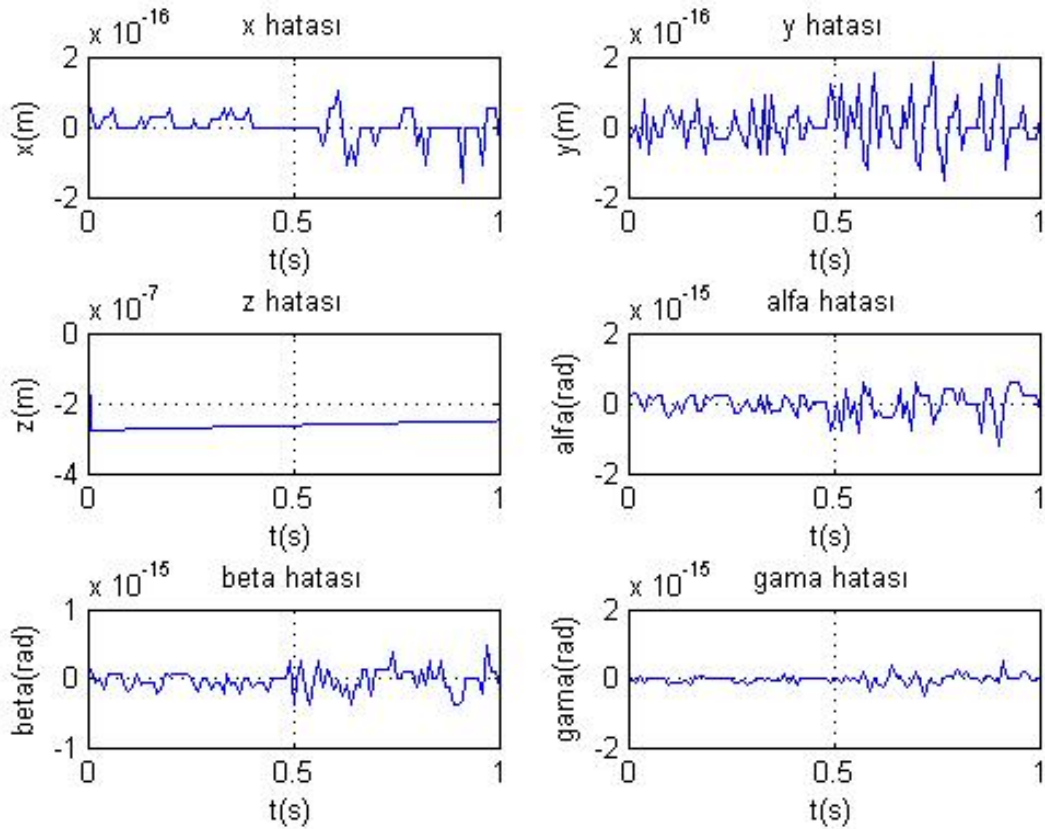
Şekil 2.12 Düz kinematik hata sonuçları (sadece -x girişi var)



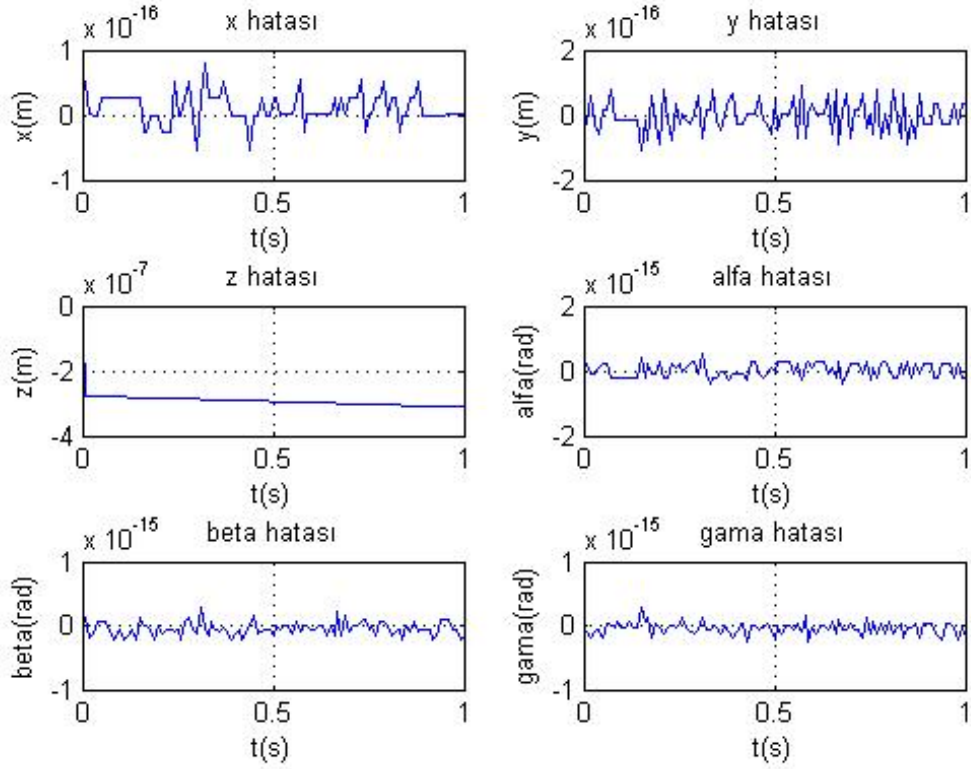
Şekil 2.13 Düz kinematik hata sonuçları (sadece +y girişi var)



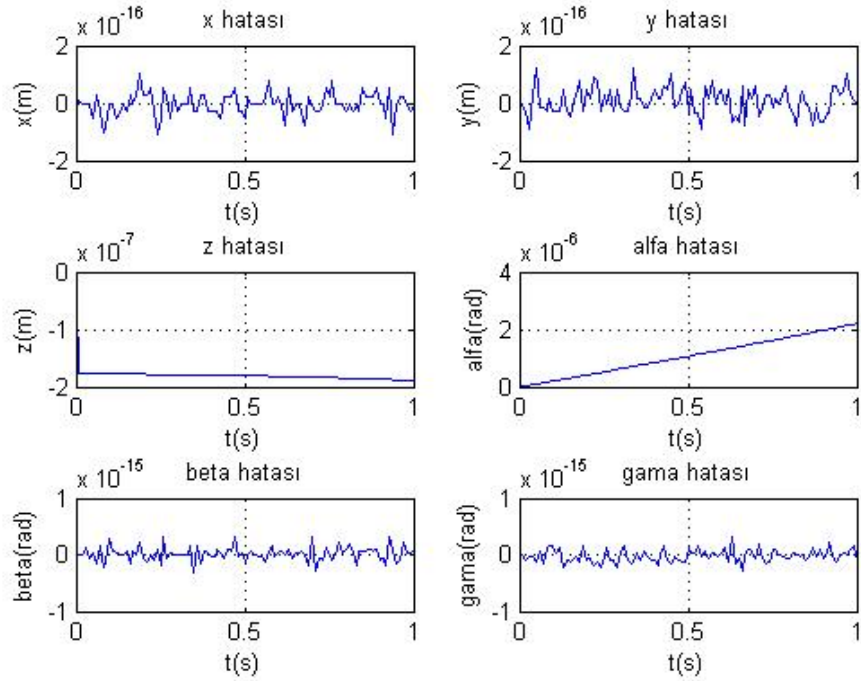
Şekil 2.14 Düz kinematik hata sonuçları (sadece -y girişi var)



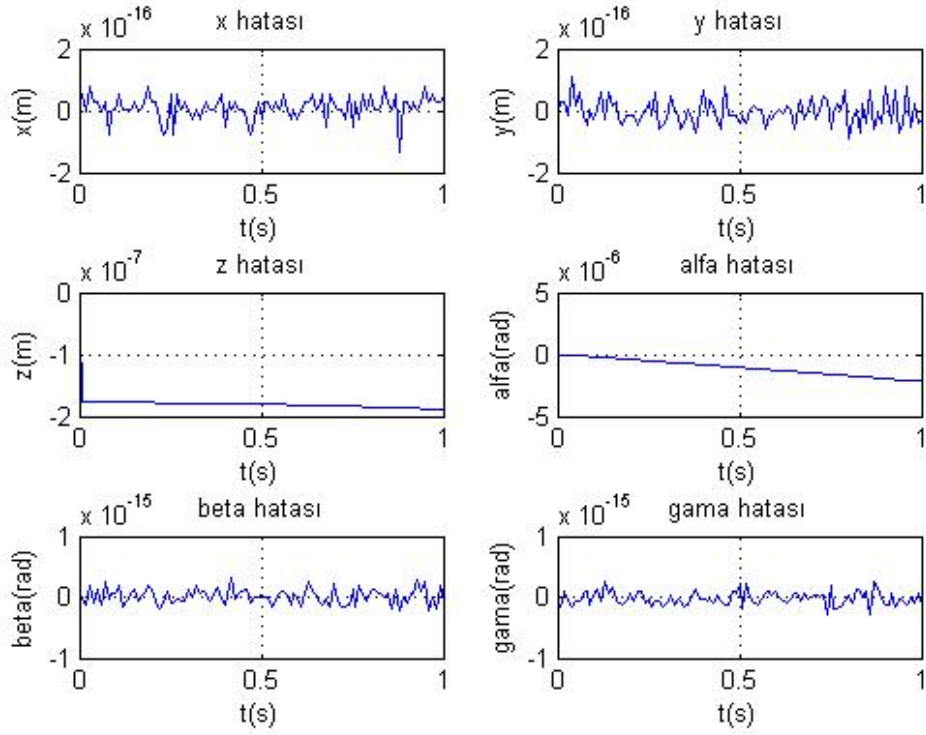
Şekil 2.15 Düz kinematik hata sonuçları (sadece +z girişi var)



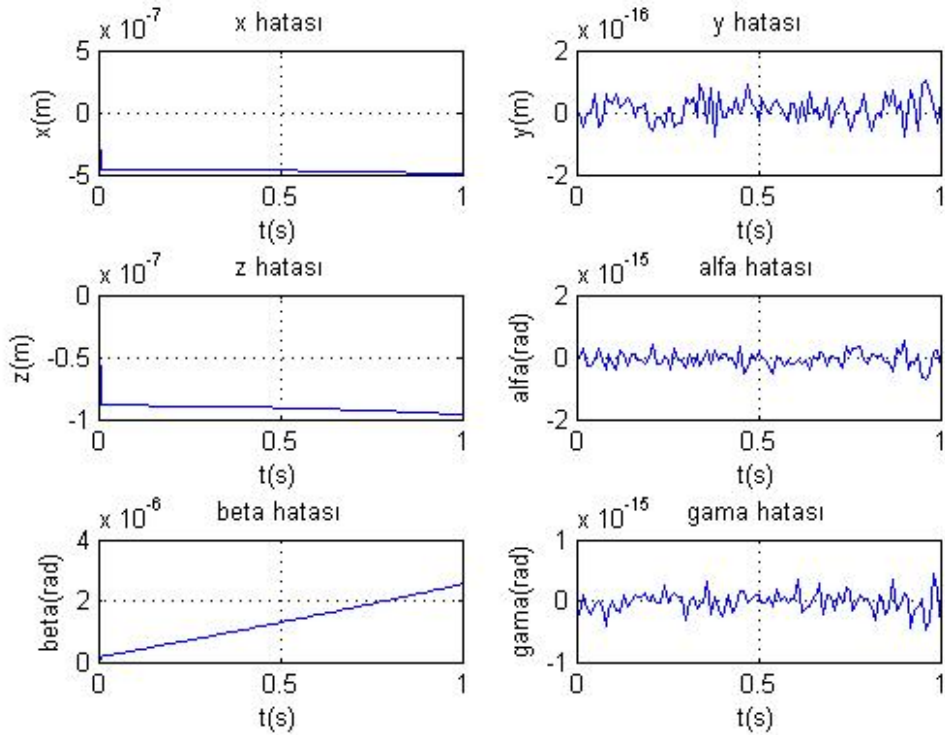
Şekil 2.16 Düz kinematik hata sonuçları (sadece -z girişi var)



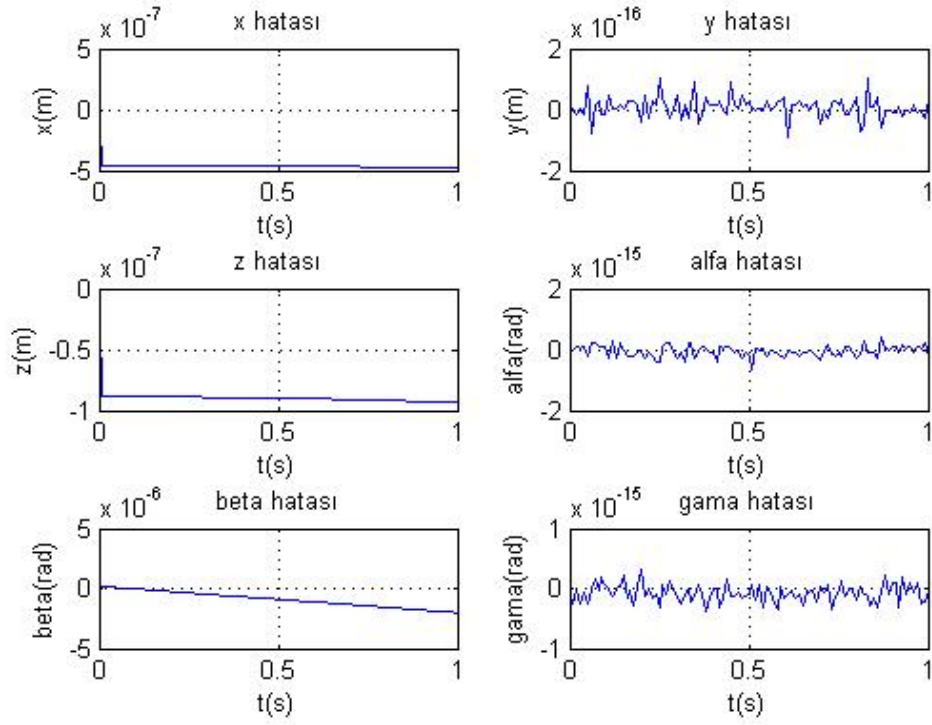
Şekil 2.17 Düz kinematik hata sonuçları (sadece + α girişi var)



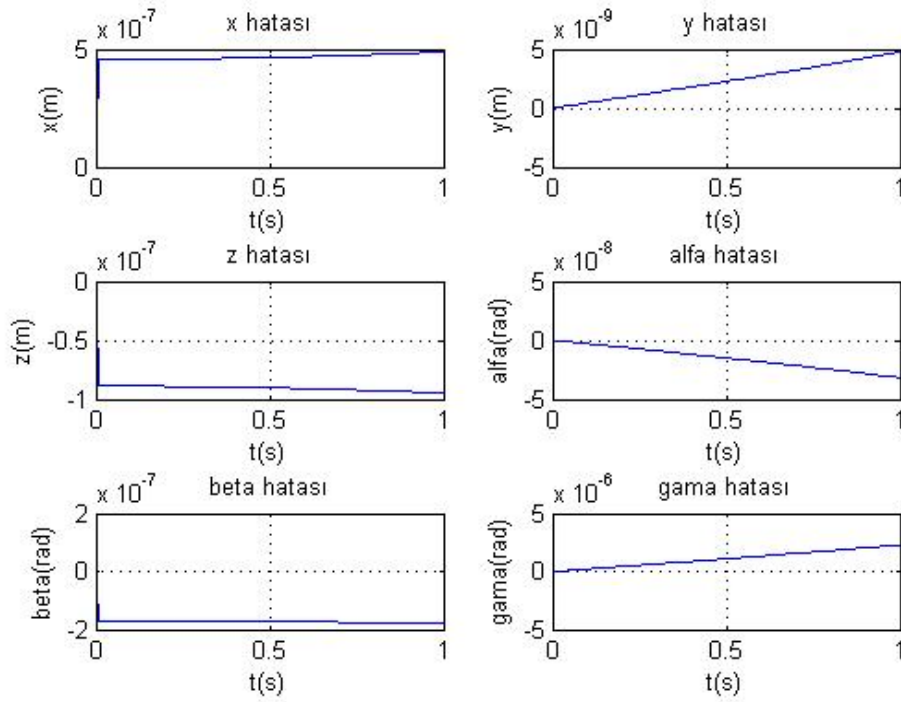
Şekil 2.18 Düz kinematik hata sonuçları (sadece $-\alpha$ girişi var)



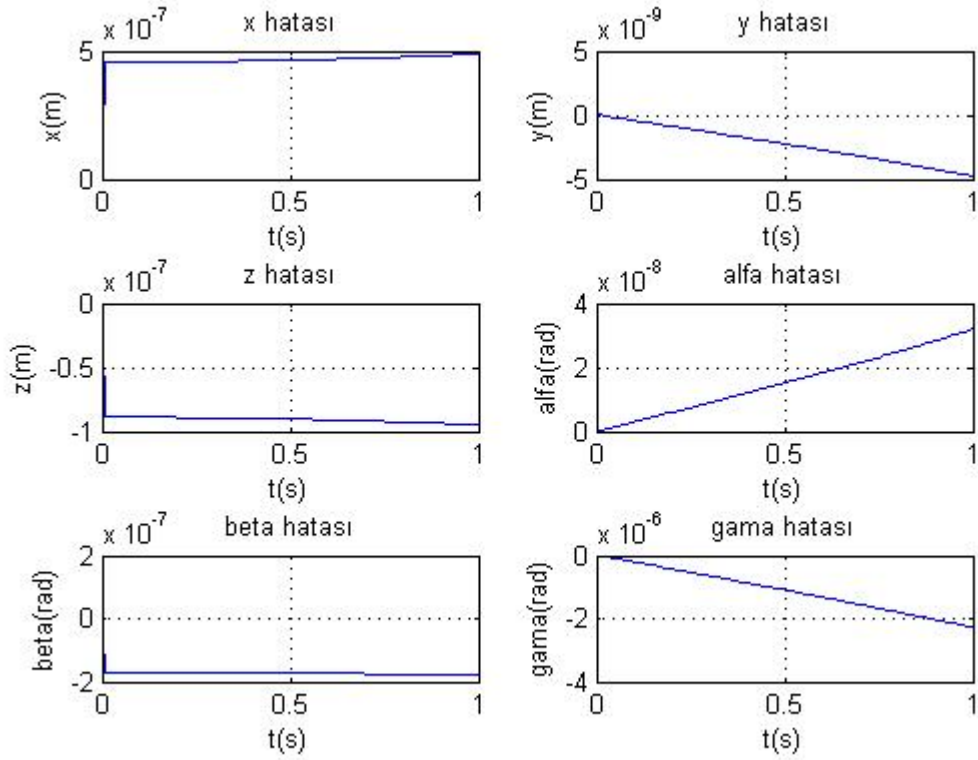
Şekil 2.19 Düz kinematik hata sonuçları (sadece $+\beta$ girişi var)



Şekil 2.20 Düz kinematik hata sonuçları (sadece $-\beta$ girişi var)

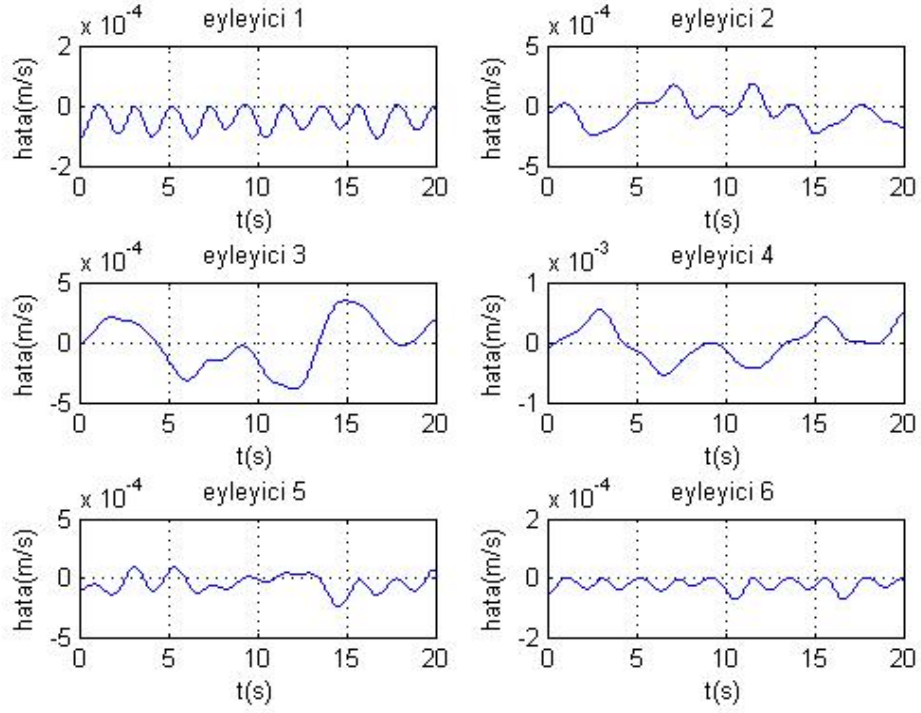


Şekil 2.21 Düz kinematik hata sonuçları (sadece $+\gamma$ girişi var)

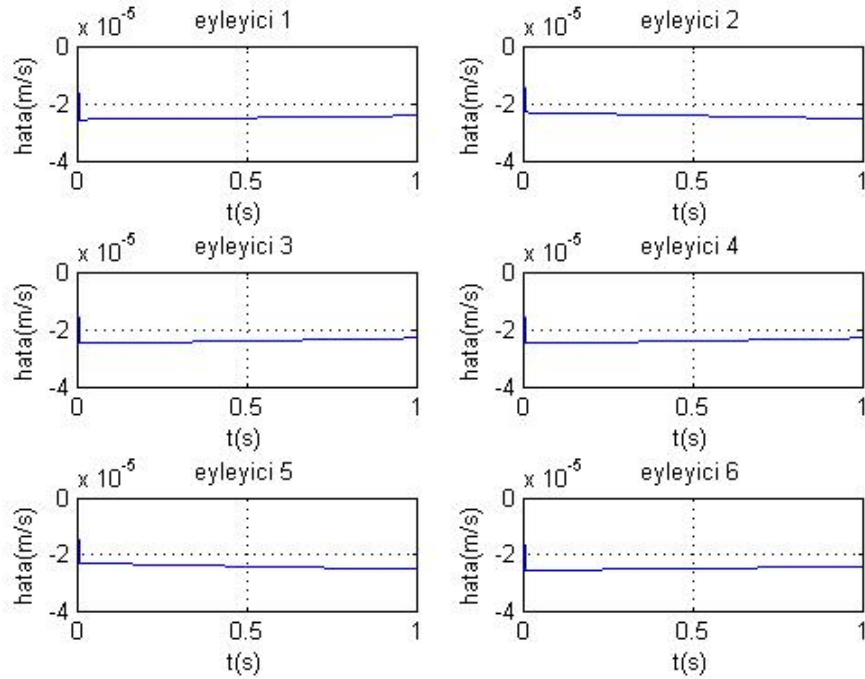


Şekil 2.22 Düz kinematik hata sonuçları (sadece - γ girişi var)

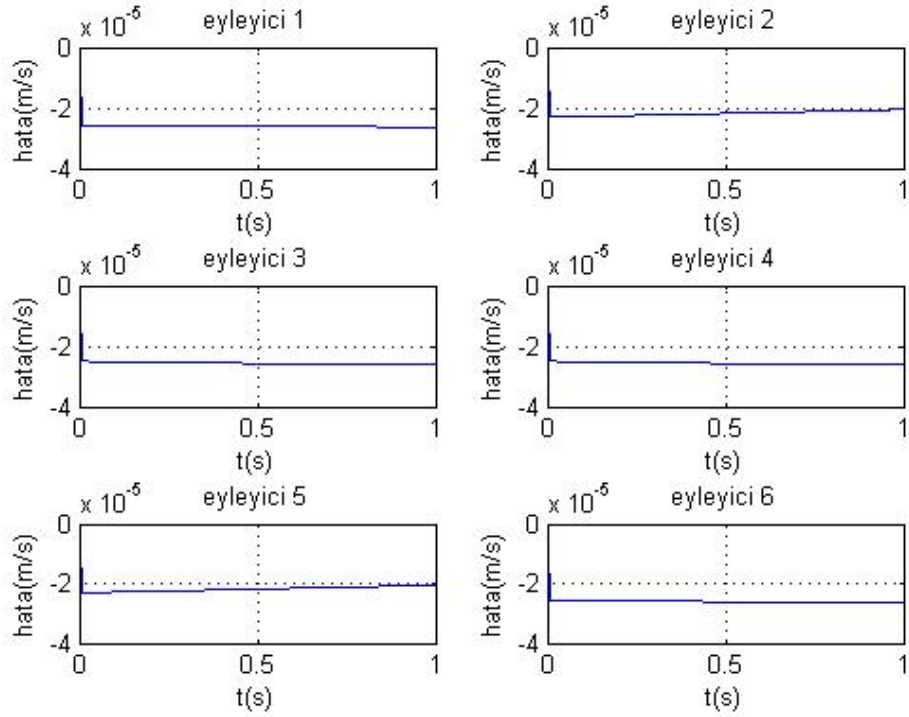
Jakobian matrisindeki hata miktarları eyleyici hızları cinsinden verilmiştir. Her yönde aynı anda giriş durumunda ortaya çıkan hata miktarları Şekil 2.23 de, sadece tek yönde giriş durumunda ortaya çıkan hata miktarları ise Şekil 2.24-2.35 de verilmiştir.



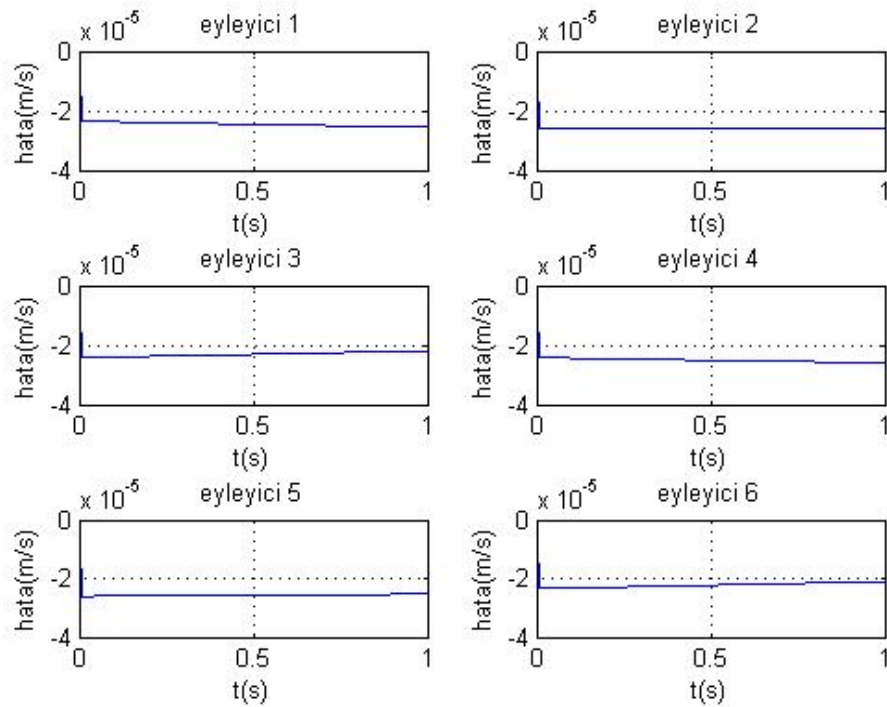
Şekil 2.23 Jakobian matrisi hata sonuçları (her yönde aynı anda giriş var)



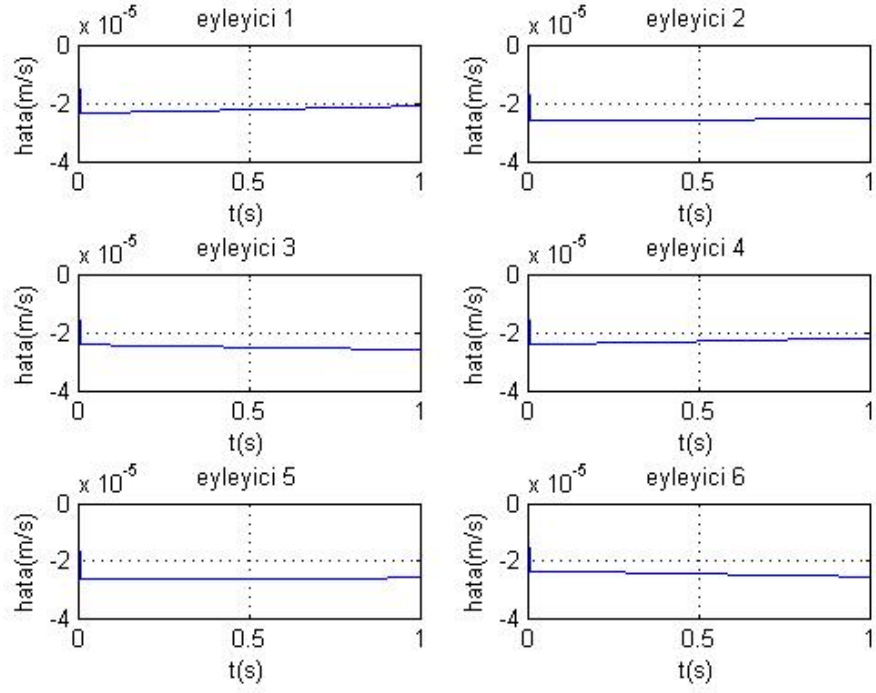
Şekil 2.24 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece +x girişi var)



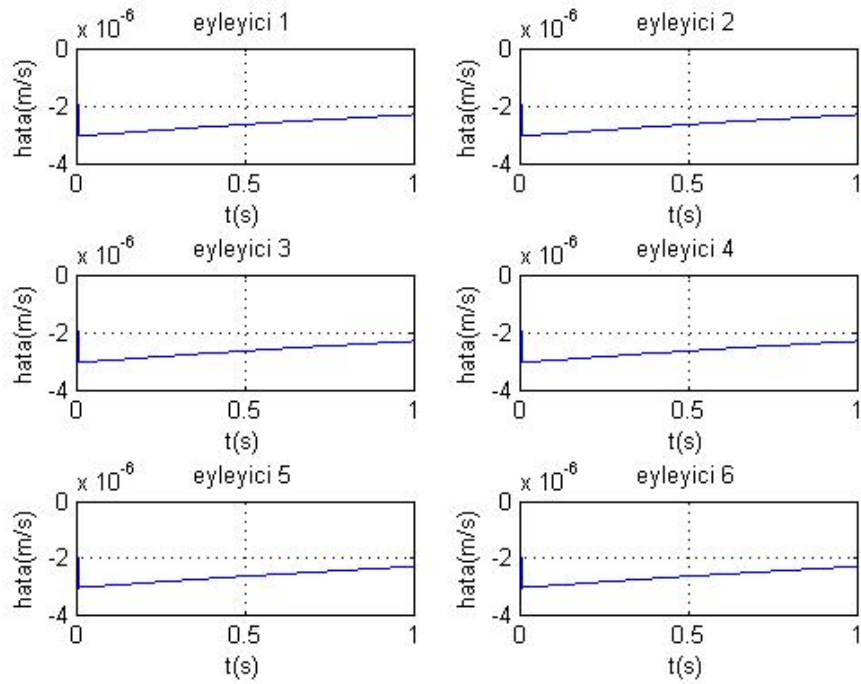
Şekil 2.25 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece -x girişi var)



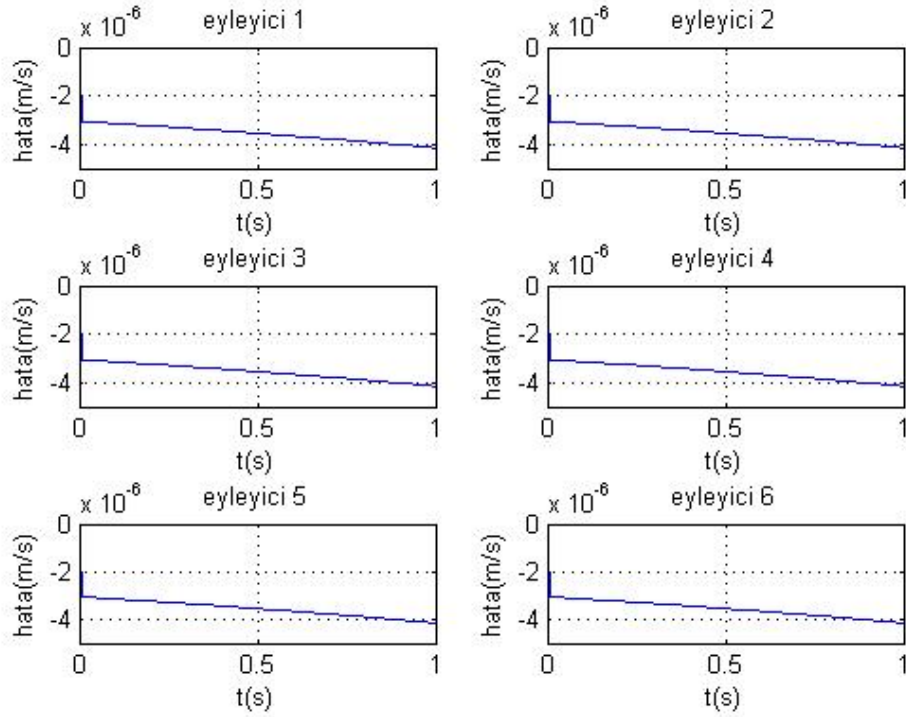
Şekil 2.26 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece +y girişi var)



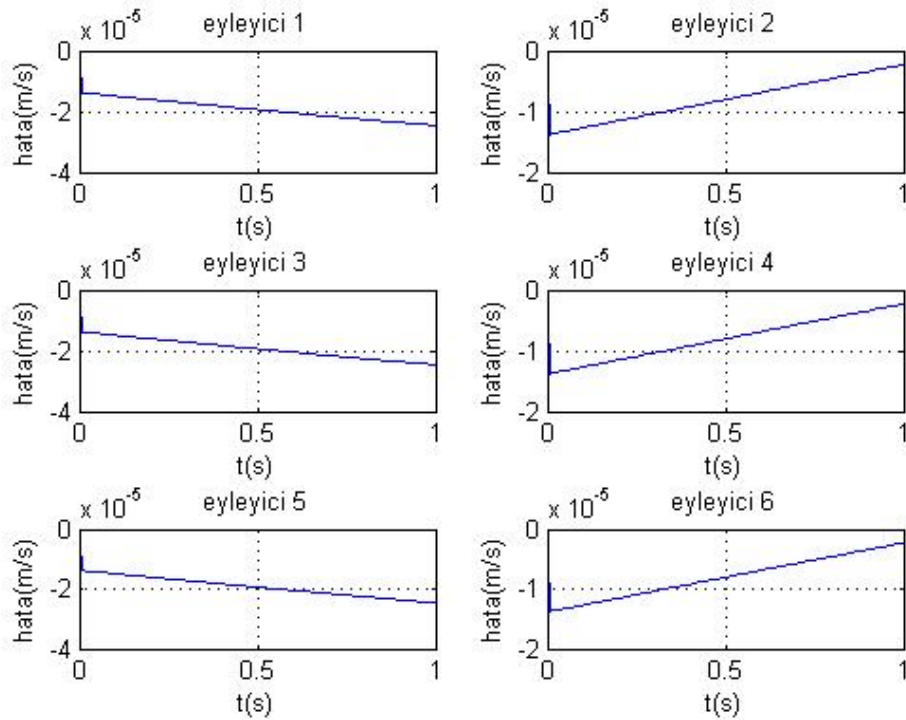
Şekil 2.27 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece -y girişi var)



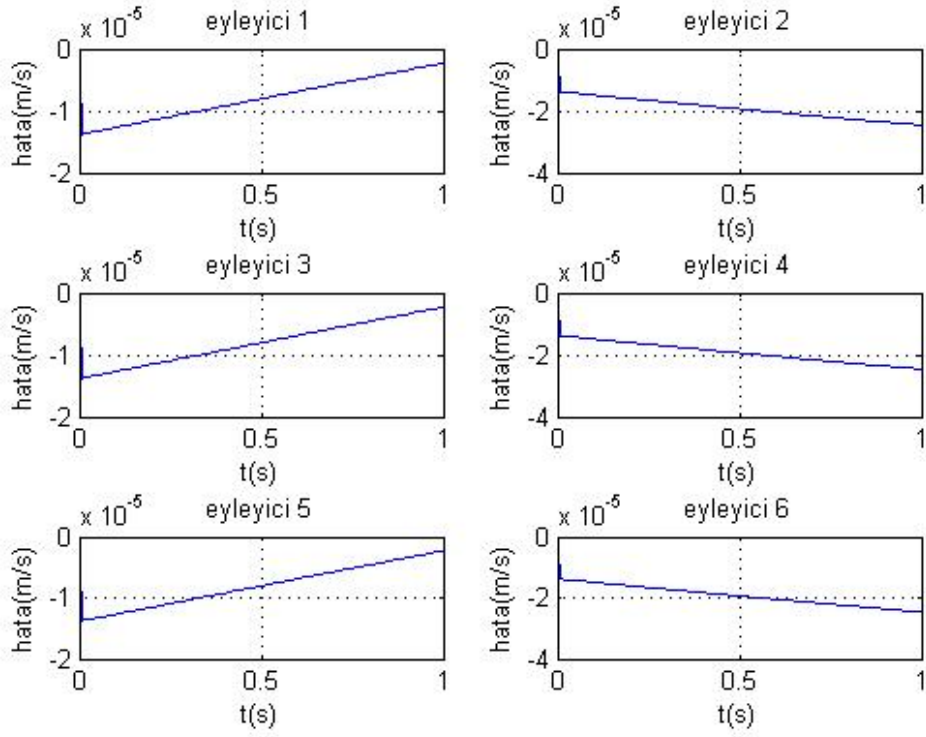
Şekil 2.28 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece +z girişi var)



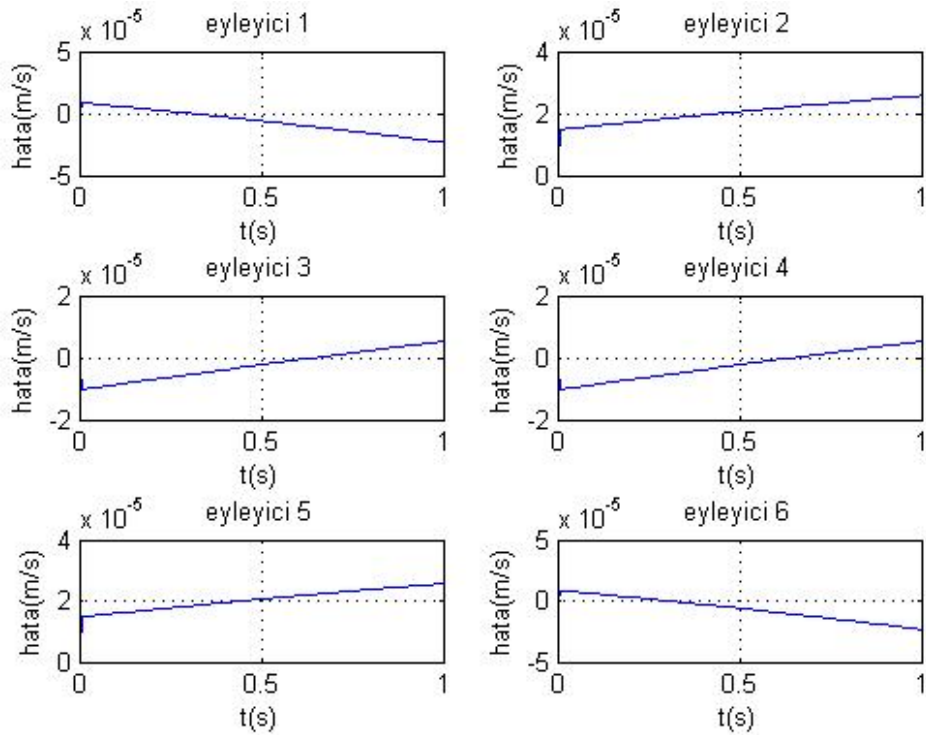
Şekil 2.29 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece -z girişi var)



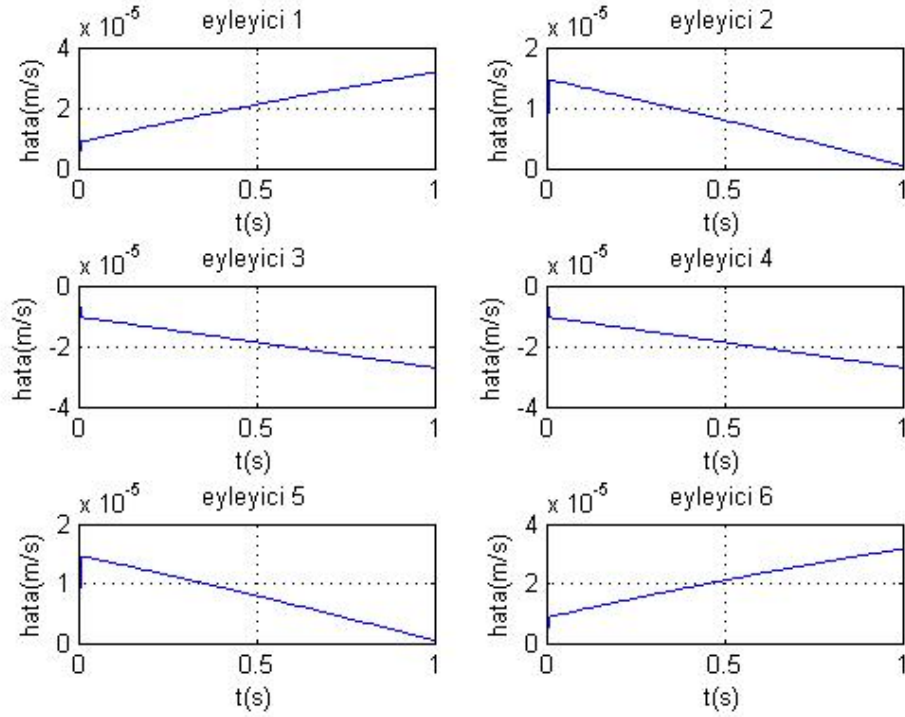
Şekil 2.30 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece + α girişi var)



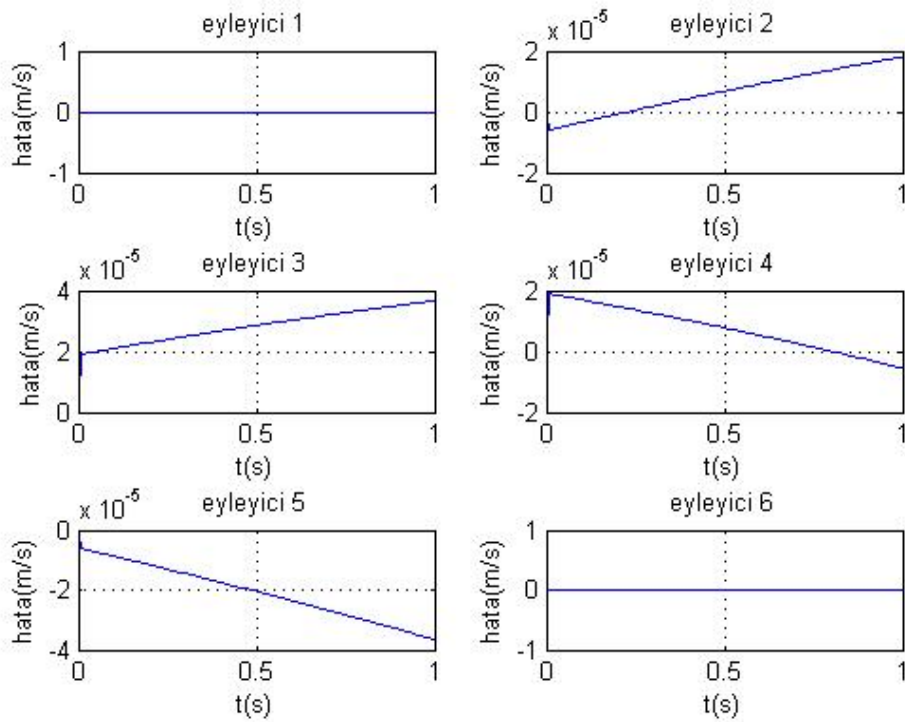
Şekil 2.31 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $-\alpha$ girişi var)



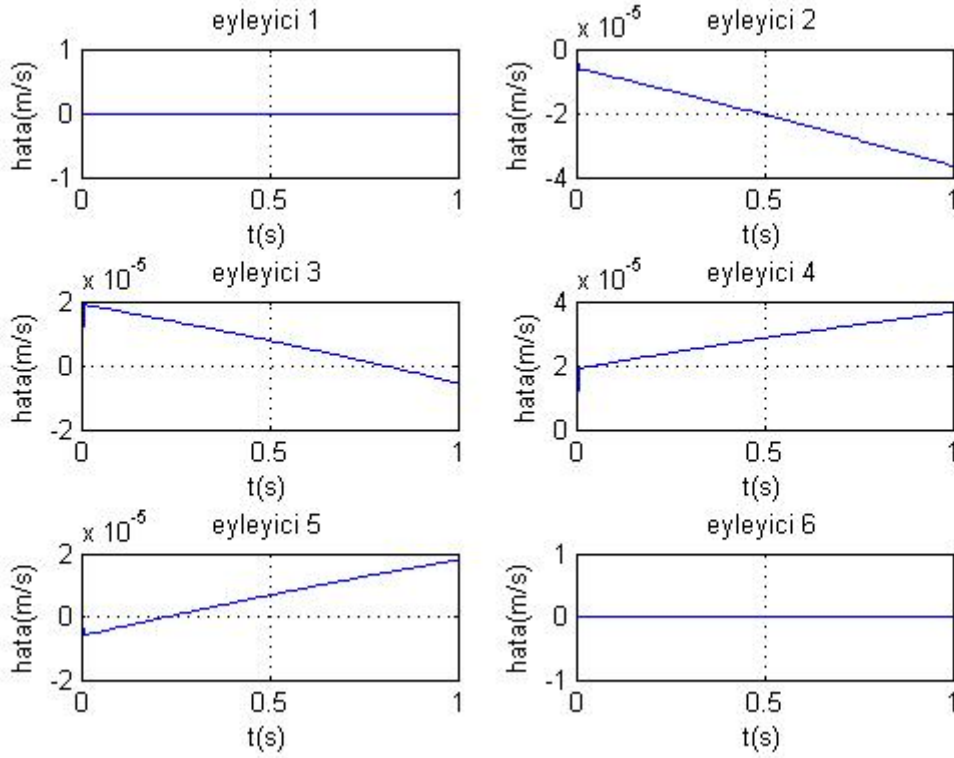
Şekil 2.32 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $+\beta$ girişi var)



Şekil 2.33 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $-\beta$ girişi var)



Şekil 2.34 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $+\gamma$ girişi var)



Şekil 2.35 Jakobian matrisi hata sonuçları (sadece $-\gamma$ girişi var)

2.5 Sonuç

Düz kinematik çözümlemede ortaya çıkan hata miktarları, olabilecek en zor yükleme şartlarını temsilen her yönde aynı anda giriş durumunda şöyle oluşmuştur;

$x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ pozisyon ve dönmelerinde sırasıyla; 0.6×10^{-7} m, -1.1×10^{-7} m, -1.25×10^{-6} m, 11×10^{-7} rad, 1.5×10^{-6} rad ve 1.2×10^{-6} rad şeklinde ortaya çıkmıştır.

Sadece tek yönde giriş olması durumunda ise burada ortaya çıkan hata miktarının da çok altında hatalar oluşmuştur. Buna göre oldukça hassas bir düz kinematik çözümleme yapıldığı anlaşılmaktadır.

Jakobian matrisinde ortaya çıkan hata miktarları, olabilecek en zor yükleme şartlarını temsilen her yönde aynı anda giriş durumunda eyleyici hızları cinsinden şöyle oluşmuştur;

$l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ eyleyicilerinde sırasıyla -1×10^{-4} m/s, -2.5×10^{-4} m/s, 4×10^{-4} m/s, 0.5×10^{-3} m/s, -2.5×10^{-4} m/s, -0.75×10^{-4} m/s olarak ortaya çıkmıştır.

Her yönde ayrı ayrı giriş olması durumunda ise maksimum eyleyici hızı hata miktarı yaklaşık

4×10^{-5} m/s olarak ortaya çıkmıştır.

Bu sonuçlara göre Jakobian matrisinin de çok düşük hatayla çalıştığı ve güvenilir olduğu anlaşılmıştır.

3. KUVVET KONTROLÜ

Bu bölümde, robotlarda kuvvet kontrolü ve kuvvet kontrol türleriyle alakalı literatür bilgisine yer verilecektir. Alt bölüm 3.1’de, robot manipülatörlerin kontrolü, kuvvet kontrol algoritmalarına neden gerek duyulduğu ve robot manipülatörlerinde kuvvet kontrolünün tarihsel gelişimiyle ilgili bilgiler verilecektir. Daha sonra, Alt bölüm 3.2’de, çeşitli kuvvet kontrol algoritmalarından bahsedilecektir (Yaltırık, Hüseyin, 2007).

3.1 Robot Manipülatörlerin Kontrolü

Robot manipülatörleri dinamik sistemlerdir ve diğer mekanik nesnelere, ekipmanlarla, diğer robotlarla ve insanlarla veya çevreyle etkileşim halindedirler. (Fasse, E. D.; Broenink, J. F., 1999)

Günümüzde robot manipülatörlerin büyük çoğunluğu malzeme taşınması, ark kaynağı, punta kaynağı, boyama ve lazer kesme gibi çevreyle temas gerektirmeyen uygulamalarda kullanılmaktadırlar (non-contact tasks) (Broenink, J. F.; Visser, M; Tiernejo, M. L. J., 1998). Bu uygulamalar için sadece pozisyon kontrolü yeterlidir. Fakat montaj, delik delme, taşlama, çapak alma, cilalama, kırılğan nesnelere tutulması v.b. gibi çevreyle temas gerektiren uygulamalarda temas kuvvetlerinin kontrol edilmesi gerekmektedir (constrained motion) (Jinno, M.; Ozaki, F.; Tatsuno, K.; Takahashi, M., 1995). Diğer bir deyişle, bu tür görevleri sadece pozisyon kontrolüyle kontrol etmeye çalışmak, çevresel dinamikler robotun pozisyon kontrol kararlılığını ve performansını etkileyeceğinden uygun değildir (Yoshikawa, T., 1990).

Manipülatörün çevreyle mekanik temasının kontrol edilmesi üzerine şimdiye kadar birçok araştırmacı uğraşmıştır. Klasik pozisyon kontrolünün eksiklikleri görülmüş ve bunun üzerine çeşitli kuvvet kontrol yöntemleri üzerine yoğunlaşmıştır (kuvvet kontrolü, esneklik (compliance), esnek hareket kontrolü (compliant motion control), hassas hareket kontrolü (fine motion control), empedans kontrol (impedance control)) (Hogan, N., 1985). Kısıtlı çalışma uzayına sahip bir bölgede sadece kuvvet kontrolü uygulamak da bazen yeterli olmayabilir çünkü temas süreksizliği kuvvet kontrol çevriminin bozulmasına yol açabilir ve robot belli bir kuvvet değerinde tekrar hareket ettirildiğinde çalışma ortamına çarpabilir. Çevresel dinamikler robotun pozisyon kontrol algoritmasının kararlılığını ve performansını etkileyebileceğinden tek başına kuvvet kontrolü uygulaması da bazen uygun olmayabilir

(Hogan, N., 1985).

Kuvvet kontrolü, katılık kontrolü (stiffness control), empedans kontrolü, melez pozisyon/kuvvet kontrolü, ayrıştırılmış ivme kuvvet kontrolü (resolved acceleration force control) temel kuvvet kontrol uygulamaları olarak kabul edilebilir.

Robot manipülatörlerde esnek hareket kontrolü (compliant motion control) üzerine araştırmalar 1970 yılında başlamıştır. O zamandan beri bu konu üzerinde birçok yaklaşımda bulunulmuştur. Salisbury ve Craig pozisyon yörüngesinin kuvvet geri beslemesine uygun olarak belirlendiği katılık (stiffness) kontrol yapısını geliştirmişlerdir. Whitney, Paul ve Shimano robot uç nokta hızının kontrol edilebildiği sönüm kontrolü (damping control) yöntemini önermişlerdir. Daha sonra, Hogan bu iki kontrol yöntemini de içeren empedans kontrol yapısını önermiştir. Hogan, empedans kontrolünü deneylerde temas noktasından çalışma ortamına geçişi belirtmek için kullanmıştır. Hogan'ın yaklaşımı sayesinde katı çevreye karşı kararlılık sağlanmış ve kontrolcü geçişleri ve ters kinematik hesaplamalarından kaçınılmıştır.

Vossoughi ve Donath empedans kontrol yöntemini değişen çevre katılık koşulları altında test etmişlerdir.

Ayrıca, Raibert, Craig ve Mason robot uç nokta pozisyonunu ve uç noktaya uygulanan kuvveti beraberce kontrol edebilen melez pozisyon/kuvvet adında bir kontrol algoritması geliştirmişlerdir. Bundan başka, Whitney tarafından kuvvet kontrolü ve melez empedans kontrolünü de içeren esnek hareket kontrolüyle ilgili çok geniş araştırmalar yapılmıştır. Günümüzde, melez pozisyon/kuvvet kontrolü (hibrit kontrol) ve empedans kontrol diğer esnek hareket kontrollerinden daha önde gelir ve kullanılır, bu yüzden esnek hareket analizlerinde temel yaklaşım haline gelmektedirler (Peng, Z., 1992).

Akışkan dolu parmak uçlarının ilk teması sırasında oluşacak titreşimi önlemek için sönüm kontrol yapısını kullanmış olan Akella, Siegwart ve Cutkosky elektro-akışkan (electrorheological) yapıya sahip parmak uçlarında etkin esneklik analizleri üzerine kapsamlı araştırmalar yapmışlardır (Hyde, J. M.; Cutkosky, M. R., 2000).

Yocef-Toumi ve Gutz, darbe etkisini temsil etmesi amacıyla boyutsuz bir ifade geliştirmişler

ve darbe cevabını iyileştirmek amacıyla hız geri beslemeli integral kuvvet yapısını kullanmışlardır (Hyde, J. M.; Cutkosky, M. R., 2000).

Khatib ve Burdick, kısa süreli darbeler için oransal ve türevsel kuvvet geri besleme kontrolcüsünün artan hız katsayılarını içeren darbe titreşimlerini dağıtmak için bir yöntem önermişlerdir. Darbe titreşiminin ardından yüksek hız, geri besleme katsayısını geçersiz kılınca, sonraki kuvvet komutlarının tepki süresi azalmıştır (Hyde, J. M.; Cutkosky, M. R., 2000).

Yakın zamanda, Qian ve De Schutter doğrusal olmayan aktif sönüm yaklaşımını ortaya koymuşlardır. Bu yöntem, kuvvet sinyalinin türevi eşik değerini aştığı durumlarda kuvvet sinyalinin türevini denetler ve çıkış kuvveti komutuna Coulomb sürtünme ifadesini ilave eder (Hyde, J. M.; Cutkosky, M. R., 2000).

3.2 Kuvvet Kontrolü

Kuvvet geri besleme uygulamalarını iki kısma ayırabiliriz:

- Temas kuvvetlerinin daha önemli olduğu uygulamalar (taşlama, cilalama, çapak alma v.b.).
- Robot uç noktasının pozisyonunun ve robot uç noktasının çalışma ortamına uyguladığı kuvvetin eş zamanlı olarak kontrol edilmesinin gerektiği uygulamalar.

Temas kuvvetlerinin robot uç noktasının çevreye göre pozisyonunu kontrol etmek için girdi olarak kullanıldığı uygulamalar da vardır. Montaj işlemleri sırasındaki birçok operasyon bu kategoriye dahildir. Kuvvet geri beslemesi, kararsızlık bölgesinin daha geniş olmasına izin vererek robotun ve çevrenin pozisyon hassasiyetine daha az gerek duyulmasına yol açar. Esneklik (compliance) kontrolü ve empedans kontrolü bu tür kuvvet kontrol yöntemlerine örnek olarak verilebilir (Simons, J.; Van Brussel, H).

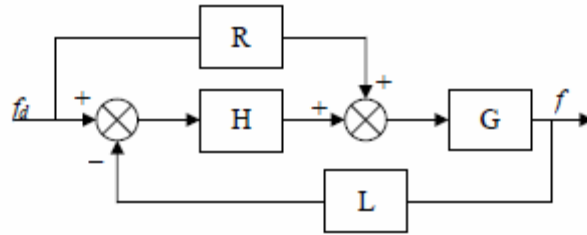
Oransal katsayıları (K_p) ve (K_v) içeren kuvvet kontrol yöntemi (3.1) eşitliğindeki gibi formüle edilebilir. Burada, f hesaplanan kuvvet değeri, f_d sistemden ölçülen kuvvet değerini, τ de kontrolcünün ürettiği kuvvet değerini vermektedir.

$$\tau = -K_V f + K_P (f - f_d) \quad (3.1)$$

Kuvvet kontrol teknikleri, kontrol sinyallerinin direk kuvvet sensöründen alındığı durumlar veya kontrol sinyallerinin dolaylı yollardan pozisyon ve hız bilgisi olarak alındığı durumlar olarak sınıflandırılabilir. Birincisi doğrudan (explicit) kuvvet kontrolü, ikincisi ise dolaylı (implicit) kuvvet kontrolü olarak adlandırılır.

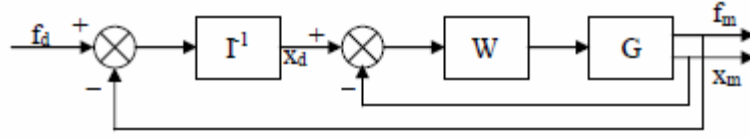
Doğrudan kuvvet kontrolü, kuvvet tabanlı ve pozisyon tabanlı doğrudan kuvvet kontrolü olarak ikiye ayrılır.

Kuvvet tabanlı doğrudan kuvvet kontrolü; referans ve ölçülen kuvvet sinyallerini karşılaştırır, işler ve eyleyici sinyal olarak doğrudan kontrol edilen ağıza gönderir. Genel blok diyagramı şu şekildedir; buradaki, f_d , referans kuvvet sinyali, f ölçülen kuvvet sinyali, R, H, L, G sinyal işleyici bloklardır.



Şekil 3.1 Kuvvet tabanlı doğrudan kuvvet kontrolüne ait genel blok diyagramı (Yaltırık, Hüseyin., 2007)

Pozisyon tabanlı doğrudan kuvvet kontrolü; Şekil 3.2 de görüldüğü gibi iç pozisyon çevriminden meydana gelir. Bu kontrolcüler pratikte daha çok kullanılırlar çünkü ticari manipulatörler pozisyon kontrol algoritmasına uygun tasarlanmıştır ve eyleyici kuvvetlerin sisteme doğrudan girişine izin vermezler. Uygulanan kuvvet, empedans yöntemin tersi olarak tanımlanan admitans (admittance) yöntemiyle uygulanan pozisyona dönüştürülebilir. Bağlantı noktaları üzerindeki tork ve kuvvetler Jakobian matrisinin transpozu alınarak elde edilebilir ve uygulanan kuvvetler bu yolla dengelenebilir (Volpe, R.; Khosla, P., 1992).



Şekil 3.2 Pozisyon tabanlı doğrudan kuvvet kontrolüne ait genel blok diyagramı (Yaltırık, Hüseyin., 2007)

Dolaylı kuvvet kontrolü, çevre katılığına uyumlu bir şekilde çalışırken pozisyon veya hız geri beslemesi gerektirir, kuvvet sensörü kullanmak gerekli değildir (Borowiec, J.; Tzes, A., 1995).

Bu klasik kontrol algoritmaları, değişen çevre şartlarına aktif bir uyum göstererek robotun kontrolünü sağlayamamıştır ve sensörün yapısından kaynaklanan mekanik vibrasyonun yol açtığı gecikme süresi hesaba katılmadıkça kesin sonuçlara ulaşılamamıştır. Bu yöntemler, dinamik modeldeki hassasiyetlere karşı oldukça duyarlıdır (Valency, T.; Zacksenhouse, M., 2000).

3.2.1 Esnek Hareket Kontrolü (Katılık Kontrolü)

Esnek hareket kontrolü, manipülâtörün çevreyle teması esnasındaki durumunun kontrolüyle ilgilendir ve robotik alanında bugünün en ilgi çeken çalışma konularının başında gelir. Manipülâtörün esneklik hareketi, manipülâtörün pozisyonu görev uzayı içerisinde kısıtlandığında ortaya çıkar.

Esneklik kontrolünü temsil eden durum, bir yaya kuvvet uygulanması durumundaki kuvvet ve pozisyon arasındaki ilişki şeklinde karakterize edilebilir. Bu bağıntı şöyle formüle edilebilir,

$$f = K_e(x - x_0) \quad (3.2)$$

K_e katılık katsayısı, x şimdiki pozisyon x_0 başlangıç pozisyonu ve f yay üzerine uygulanan kuvvet olarak belirtilebilir.

Eğer ilerleme miktarını biliyorsak, yay üzerine uygulanan kuvveti bulabiliriz. Bu eşitliğe dikkat edecek olursak, kuvvet kontrol edilirken dolaylı yoldan pozisyon da kontrol edilmiş

olmaktadır, bunun terside doğrudur. Temas kuvvetini kontrol etmek için pozisyon kontrolü gereklidir.

Robot manipülatörün temas halinde bulunduğu, yay özelliklerine sahip çevre ve etkileşim kuvveti 3.2 deki gibi belirtilebilir. Esneklik, katılık durumunun tersidir ve şu şekilde gösterilebilir,

$$C_e = K_e^{-1} \quad (3.3)$$

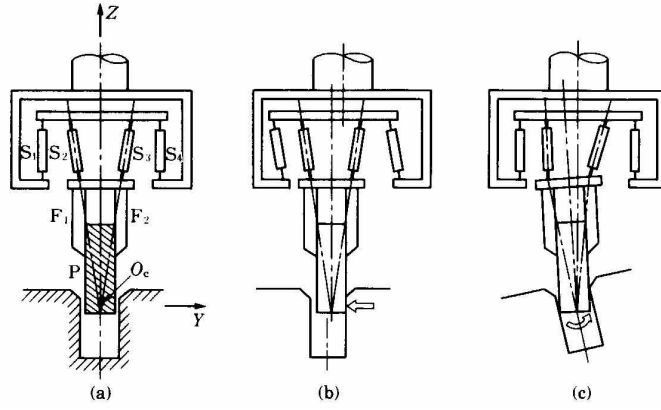
C_e ve K_e sırasıyla çalışma ortamının esnekliği ve katılığı olarak adlandırılırlar.

Birçok literatürde, esneklik ve katılık kontrolü aynı anlamda kullanılır.

Esneklik hareketi, hem manipülatörün kendi içinde oluşan pasif mekanik esnekliği hem de servo kontrol çevriminde kullanılan aktif esneklik uygulamasını içerir (Mason, M. T., 1981).

3.2.1.1 Pasif Esneklik

Manipülatörün yapısından dolayı üretilen esneklik hareketine pasif esneklik denir. RCC (dolaylı esneklik merkezi) adıyla da bilinen pasif esneklik, uç nokta katılığını azaltmak için yay ve sönüm elemanlarından oluşan mekanik bir yapı olarak düşünülebilir (Jinno, M.; Yoshimi, T.; Abe, A., 1992). Bu tür bir eleman kullanılarak, sadece pozisyon kontrolü algoritması altında deliğe tıkaç yerleştirilmesi gibi bir görev yerine getirilebilir. (Şekil 3.3) Pasif esneklik basit bir yapıya sahiptir ve bu yüzden pahalıya mal olmaz, temas kuvvetlerinin geri beslenmesine ve ilave hesaplamalara gerek duyulmaz. Fakat, bu elemanın dezavantajı sadece çok özel görevler için kullanılabilir olmasıdır.



Şekil 3.3 RCC elinin kavramsal gösterimi (a) Yapısı, (b) Yatay yöndeki kuvvete karşı gösterilen esneklik, (c) Momente karşı gösterilen esneklik (Yoshikawa, T., 1990)

Örneğin, pasif esneklik farklı bir deliğe tıkaç yerleştirme uygulaması için kullanılamaz. Daha geniş uygulama alanı için, aktif esneklik daha tercih edilen bir yöntemdir. Pasif esnekliğin tersine, aktif esneklik de temas kuvvetlerinin geri beslenmesi yoluyla kontrol çevrimi yapısının oluşturulması kaçınılmazdır. İleri boyuttaki kontrol uygulamalarında daha fazla tercih edilen, yeniden programlanıp farklı görevleri yerine getirebilen aktif esneklik daha avantajlı bir uygulamadır. Karmaşık kuvvet sensörleri ve ileri kontrol teknikleri kullanılmasına rağmen esneklik, hareket uygulamalarında günümüzde daha fazla önem verilen konumdadır (Yoshikawa, T., 1990, Mason, M. T., 1981).

3.2.1.2 Aktif Esneklik

Örnek olarak, insanın kağıt üzerine karakalemle çizgi çizmesini benzeten bir çizgi çizme esneklik hareketi düşünelim. Böyle bir durumda sadece pozisyon kontrolü uygulanamaz, çünkü kağıda dik doğrultuda oluşacak küçük hatalar dahi kağıtla temasın kaybolmasına yol açabilir veya kalemin çok kuvvetli bastırılması kalemin kırılmasına neden olabilir. Kalemin kırılmaması için kalemle kağıt arasındaki kağıda dik olan kuvvetin kontrol edilmesi gerekir, pozisyon kontrolü ise kağıt düzlemi üzerindeki hareket esnasında kullanılabilir. Esneklik hareketlerinde hem pozisyon kontrolü hem kuvvet kontrolünün kullanıldığı uygulamalarda vardır (Peng, Z., 1992).

Esnek hareket, kontrol edilen robota sadece serbest uzayda yörünge tanımlamakla kalmaz, kısıtlı çalışma uzayında esnek temasının da yer aldığı uyarlanabilir bir çevre üzerinde de çalışır (Luo, Z.; Ito, M., 1993).

Mason ilk olarak farklı temas durumları için esneklik koordinatını biçimlendirdi. Masonun esnek hareket tanımına göre manipülatörün pozisyonu çevre geometrisi tarafından kısıtlandığında (kinematik kısıtlama) hareket boyunca temas kuvvetleri manipülatör yörüngesini değiştirir (Luo, Z.; Ito, M., 1993).

Birçok etkileşim durumlarında, sadece serbest hal veya kinematik kısıtlanmış hallerle ilgilenmeyiz, dinamik çevreyle olan etkileşimde önemlidir. Çevrenin dinamik etkisi robot uç noktasının performansını etkileyecektir. Bu yüzden , dinamik çevreyle etkileşim halindeyken dinamik çevreyle robot ucu arasında nasıl bir esneklik belirleneceği de önemlidir. Waibel ve Kazerooni dinamik çevreyle etkileşim halindeyken robotun esneklik hareketiyle ilgili çalışmışlardır. (Luo, Z.; Ito, M., 1993).

Robot manipülatörün hareketini tanımlayan denklem şu şekildedir,

$$\mathbf{M}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{B}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}(\theta) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T \mathbf{f}_e \quad (3.4)$$

\mathbf{M} manipülatöre ait atalet matrisini, \mathbf{B} santrifüj ve koriolis kuvvet matrislerini, \mathbf{G} yerçekimi kuvvet vektörünü, $\boldsymbol{\tau}$ bağlantı noktası tork vektörünü, \mathbf{f}_e bağlantı noktası kuvvet vektörünü temsil ederler.

Bağlantı noktası üzerinde oluşan tork şöyle hesaplanabilir,

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_e \quad (3.5)$$

\mathbf{f}_e temas süresince robot uç noktasına çevrenin etkidiği kuvvet'dir. Ve bu kuvvet temas sırasında yüzeyin şekil değiştirmeye başlamasıyla birlikte ortaya çıkar ve temas boyunca robotun ucuna etkir. Bu bağıntıyı tanımlayan matematiksel ifade eşitlik (3.6) da verilmiştir.

$$\mathbf{f}_e = \mathbf{K}_e \mathbf{x}_e \quad (3.6)$$

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d \quad (3.7)$$

K_e çevre katılık katsayısı, x_e hareket miktarı, x şimdiki pozisyon ve x_d istenen pozisyon olarak belirtilebilir.

Bağlantı noktası üzerindeki tork artık şu hale gelmiştir,

$$\tau = \mathbf{J}^T K_e x_e \quad (3.8)$$

Birleşme noktası hızının ve çizgisel hızın türevsel dönüşümü olarak bilinen Jakobian matrisi şu şekilde hesaplanabilir,

$$\mathbf{J} = \delta x / \delta \theta \quad (3.9)$$

Eğer δx ve $\delta \theta$ çok küçükse şu bağıntıyı elde ederiz,

$$\delta x = \mathbf{J} \delta \theta \quad (3.10)$$

$$x_e = \delta x = \mathbf{J} \delta \theta \quad (3.11)$$

(3.9) eşitliğini (3.11) eşitliği içindeki yerine yazdığımızda,

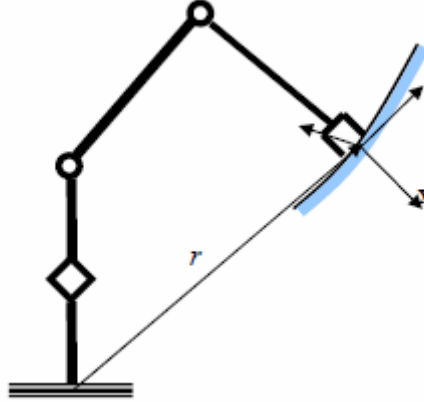
$$\tau = \mathbf{J}^T K_e \mathbf{J} \delta \theta \quad (3.12)$$

$$K_p = \mathbf{J}_T^T K_e \mathbf{J} \quad (3.13)$$

$$\tau = K_p \delta \theta \quad (3.14)$$

Bu bağıntı, Salisbury tarafından türetilmiş (Salisbury, J. K., 1980) ve aktif katılık (active stiffness) olarak isimlendirilmiştir (Siciliano, B.; Villani, L., 1999, Sciavicco, L.; Siciliano, B., 1996).

Örnek olarak, robot ucunun sert yüzeye temasının şekildeki gibi olduğunu düşünelim. (Şekil 3.4)



Şekil 3.4 Robot manipulatörün sert yüzeyle teması (Yaltırık, Hüseyin, 2007)

Burada çalışma ortamı, robot ucunun sert yüzeyin içine girmesini engelleyen doğal bir pozisyon kısıtlaması ortaya çıkarıyor. Manipulatör yüzeyle temasa geçtiği zaman, yüzeye dik olan x yönünde artık pozisyon kontrol edilmez. Bununla birlikte, alet ucunda x yönünde oluşan kuvveti kontrol edebiliriz, örneğin yüzeyle robot ucu arasındaki etkileşimi sağlayan temas kuvvetinin kontrol edilmesi gibi. Buna ilaveten uç noktayı eş zamanlı olarak yüzeye teğet doğrultuda kontrol edebiliriz. Yani, robot ucu yüzey boyunca teması kesmeden kayarak hareket edebilir (Shilling, R. J., 1990).

Bu yöntem, yüzey boyunca esneklik olarak isimlendirilir, çünkü burada robot yörüngesi yüzey boyunca uygulanan doğal kısıtlamaya uymaya zorlanıyor. (Shilling, R. J., 1990).

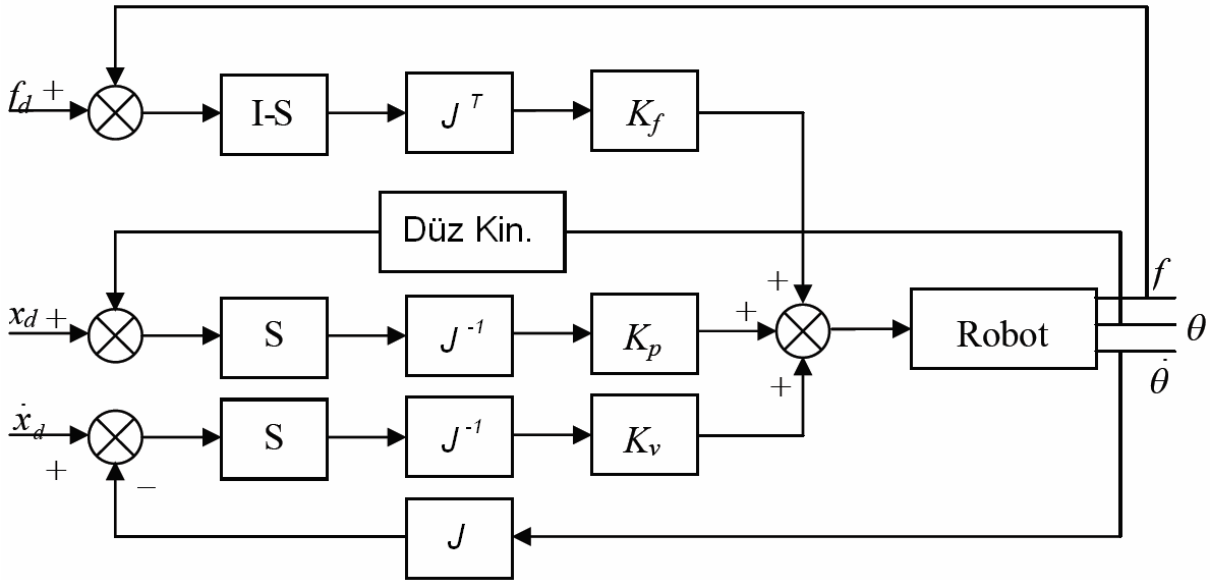
Esnek kontrol algoritmaları daha da geliştirilerek esneklik tabanlı bulanık kontrol (Kim, M. J.; Kwon, C.; Park, M. K.; Park, M., 1995, Kim, S.; Park, M., 1991), çok noktalı esneklik kontrolü (Jazidie, A.; Tsuji, T.; Ito, K., 1992), birleşik esnek kontrol (Yokoi, K.; Maekawa, H.; Tanie, K., 1992) ve kendini kontrol eden katılık fonksiyonu vasıtasıyla esnek kontrol (Oh, S. R.; Kim, H. C.; Suh, I. H.; You, B. J.; Lee, C. W., 1995) v.b.

3.2.2 Melez(Hibrit) Pozisyon/Kuvvet Kontrolü

Melez kontrol, görev uzayının ayrıştırılmasını esas alan bir yöntem olarak başlangıçta Raibert ve Craig tarafından önerildi (J. J. Craig and M. H. Raibert, 1979). Çünkü, robot uç noktasının pozisyonu ve tek ekseninde oluşan temas kuvveti birbirinden ayrı olarak kontrol edilemiyordu. Bu yüzden görev uzayı, pozisyon kontrol alt uzayı ve kuvvet kontrolü alt uzayı olarak ikiye ayrılarak kullanıldı.

Eşitlikteki bir hatadan dolayı, melez pozisyon/kuvvet blok şemasındaki pozisyon formülasyonunda bir düzeltmeye ihtiyaç duyuldu. Çünkü ilk pozisyon kontrol formülasyonunda, Kartezyen uzaydan bağlantı noktası uzayına geçmek için Jakobian matrisinin tersinin türetiminin cebrik olarak hatalı olduğu gösterildi (Yokoi, K.; Maekawa, H.; Tanie, K., 1992). Bu hatalı türetim, melez pozisyon/kuvvet blok şemasında kinematik kararsız bir yapı oluşturuyordu. Hatasız pozisyon formülasyonu ile melez pozisyon/kuvvet kontrol yapısının kinematik kararlı davranışı gösterildi ve uygulaması yapıldı.

Melez kontrole ait blok diyagramı Şekil 3.5 de verilmektedir ve bu kontrole ait kontrol kuralıda yine aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.5 Melez (hibrit) pozisyon / kuvvet kontrolü (Yaltırık, Hüseyin., 2007)

$$\tau = K_p \mathbf{J}^{-1} \mathbf{S} (x_d - x) + K_v \mathbf{J}^{-1} \mathbf{S} (\dot{x}_d - \dot{x}) + K_f \mathbf{J}^T (\mathbf{I} - \mathbf{S})(f_d - f) \quad (3.15)$$

Pozisyon kontrolü istenen yörüngeyi takip etmek için kullanılır. S seçim matrisi, hangi eksenlerde pozisyon hangi eksenlerde kuvvet kontrolü uygulanacağına karar vermek için kullanılır. Melez kontrolün ilk versiyonunda manipülatör dinamiği hesaba katılmıyordu. Daha sonra, melez kontrolde dinamik etkininde önemli olduğu fark edildi. Shin ve Lee, Khatib ve Yoshikawa hesaplanmış tork kontrol yöntemini esas alarak (computed torque control) dinamik melez kontrol modelini sundular (Yoshikawa, T., 1986). Bunun yanısıra, Yabuta ve Hollberbach melez kontrolünün kararlılığına ilişkin durumları incelediler. Deneyler sonunda görülmüştür ki, manipülatörlerin dinamik modelini kullanmak daha hassas ve kararlı kuvvet kontrolü yapılmasını sağlamaktadır (Peng, Z., 1992).

Son zamanlarda, melez kontrol ve kısıtlanmış hareket kontrolü arasındaki benzerlik ortaya konmuştur. Kısıtlanmış hareket, manipülatör rijit çevreyle temas halinde olduğu zaman manipülatörün hareketini tanımlayan bir ifadedir. Kankaanranta ve Koivo kısıtlanmış hareketin boyutunu azaltan bir yöntem önerdiler (Raimo K. Kankaanranta and Heikki N. Koivo, 1988), bu kontrol mimarisinde pozisyon ve kontrol yönlerinin ayrıştırılması tam ve düzgün olarak yapılmaktadır.

Benzer çalışmalar McClamroch (Kolmanovsky, I. And N.H. McClamroch, 1996), Wang (W. H. Liao and K. W. Wang, 1997) ve yakın zamanda Mills (James K. Mills, 2007) tarafından da yapılmıştır. Bu çalışmalar, melez pozisyon/kuvvet kontrolünün teorik temellerini vermektedir. Kısıtlanmış hareket halinde, melez kontrol kararlılığı kolayca ortaya konulabilir (Peng, Z., 1992).

Çalışma geometrisinin belirlenmesi çok kompleks bir iştir ve karmaşık bir program algoritması gerektirir. Her şeye rağmen bunun otomatik olarak belirlenmesi arzu edilir. Son yıllarda, çalışma geometrisinin otomatik olarak tahmin edilebilmesi için birçok araştırma yapılmıştır. Blauer ve Belanger çalışma geometrisindeki bazı bilinmeyen parametreleri tahmin edebilmek için Kalman filtresini kullanan bir yöntem önermiştir (Michael Blauer and Pierre R. Belanger, 1987). Merlet, Kazanzides, Yoshikawa ve Sudau robot uç noktasındaki

kuvvet ve hız ölçüm değerlerinden faydalanarak çalışma geometrisindeki dik ve teğet vektörleri belirleyen benzer bir yaklaşım ortaya koymuştur (Peng, Z., 1992).

Dayanıklı (robust) esnek hareket kontrolü elde etmek için Seraji, manipülatör

parametrelerindeki umulmadık değişimlere karşı dirençli uyarlamalı melez kontrol şeması oluşturmuştur (Seraji, H., 2000). Chen ve Pandey değişebilen sınırı belirsiz manipülatör parametrelerine karşı melez kontrol için dayanıklı bir kontrol yapısı sunmuştur. Bunun gibi, Kuo ve Wang benzer bir yaklaşımla lineer olmayan dayanıklı melez kontrol yapısı sunmuşlardır. Empedans kontrolde ise, robot uç noktasıyla çevre arasında arzu edilen bir empedans oluşturulur. Lu ve Meng, hareket kontrolü için Slotine ve Li'ye ait uyarlamalı mekanizmanın empedans kontrole uygulanabileceğini göstermişlerdir ve parametresel belirsizliklerden dolayı empedans kontrolde performans kaybı yaşanmaması için uyarlamalı empedans kontrol algoritmasını oluşturmuşlardır. Kazerooni de parametre belirsizliklerine karşı dayanıklı empedans kontrol yapısı ve yüksek frekanstaki modellenmemiş dinamikler üzerinde çalışmıştır (Peng, Z., 1992).

Melez pozisyon/kuvvet kontrolü üzerine birçok araştırmacı hala çalışmaktadır ve şimdiye kadar bu konuyla ilgili birçok sonuç alınmıştır. Bu kontrol yapısı birbirleriyle etkileşimdeki iki kollu manipülatöre (Luca, A. D.; Mattone, R., 1995) ve dayanıklı kontrol yapısıyla endüstriyel robotlara (Natale, C.; Siciliano, B.; Villani, L.) uygulanmıştır, gereğinden fazla serbestlik dereceli (redundant) manipülatörler için genişletilmiş melez pozisyon/kuvvet kontrolü geliştirilmiştir (Yoshikawa, T., 1990, Peng, Z., 1992). Ayrıca, frekans cevabını esas alan kararlı kuvvet kontrol tasarımı üzerinde çalışılmıştır (Oaki, J., 1991).

Birçok araştırma sonucunda melez pozisyon/kuvvet kontrol temelinde yeni kuvvet kontrol türleri geliştirilmiştir. Bunlar, bulanık mantık kurallı pozisyon/kuvvet kontrol (Hsu, F. Y.; Fu, L. C., 1995), uyarlanabilir melez pozisyon/kuvvet kontrol (Hsu, F. Y.; Fu, L. C., 1995) ve genişletilmiş melez pozisyon/kuvvet kontrol (Peng, Z., 1992) v.b. olarak belirtilebilir.

3.2.3 Empedans Kontrol

Melez kontrolden farklı olarak empedans kontrol pozisyon ve kuvvet yörüngelerini doğrudan takip etmez, mekanik empedans olarak isimlendirilen bir yapı ile temas kuvvetleri ve manipülatör pozisyonu arasında ayarlama yaparak düzenler. Empedans kontrol çevre üzerinde görüldüğü şekilde robotun dinamik davranışının (mekanik empedans) tasarımı üzerine odaklanmıştır. Robotun, serbest çalışma uzayından kısıtlı çalışma uzayına hareketi esnasında kontrol sistemi üzerinde herhangi bir değişikliğe ihtiyaç bulunmamaktadır. Kuvvet geri besleme çevrimi robot çalışma ortamıyla temas durumuna geçer geçmez oluşmaya başlar,

burada çalışma ortamından dolayı robotun empedansı değiştirilmiş olur (Hogan, N., 1985, Luo, Z. W., and Ito, M., 1993, Hogan, N., 1981, Caccavale, F.; Siciliano, B.; Villani, L., 1999, Chiaverini, S., 1999).

Manipülâtör pozisyonlarını kontrol ederek ve bunların temas kuvvetleriyle ilişkilerini ayarlayarak, uygun temas kuvvetleri üretilerek kontrol sağlanabilir ve esnek hareket görevi başarılmış olur. Daha öncede bahsedildiği gibi, empedans kontrol Hogan tarafından katılık ve sönüm kontrolünün genişletilmiş bir hali gibi tanıtıldı. Empedans kontrol yapısı, hem hareket kontrolü için hem esneklik kontrolü için hem de esnek hareket kontrolü için herhangi bir durum veya parametre değişikliğine gerek kalmaksızın uygun şekilde kullanılabilir (Peng, Z., 1992).

Uygun empedansın seçimi çevre üzerinden alınan çok seyrek bilgiler üzerinden yapılmaktadır.

1. Manipülâtör empedansının belirlenebilmesi için hemen hemen çalışma ortamıyla ilgili hiçbir bilgiye ihtiyaç yoktur.
2. Komutların çok hassas olma gerekliliği yoktur. Eğer kısıtlama olduğundan komut verilen pozisyona erişim sağlayamıyorsa, sistem kolayca belirtilen bölgeye en yakın yere gelir ve durur.
3. Çok düşük oranda denetim gerektirir.
4. Basit ekipmanlar kullanılır.

Empedans kontrollü manipülâtörler çok yönlü kullanılabilen parametre ayarlamalı makinalardır. Mekanik davranışları ani görev gerekliliklerine göre ayarlanabilir. Bundan dolayı empedans kontrol oldukça genel bir yapı olarak değerlendirilebilir (Valency, T.; Zacksenhouse, M., 2000).

Manipülâtör ve çevre arasındaki dinamik etkileşim bu empedans yoluyla ayarlanabilir ve kontrol edilebilir. Bundan dolayı, empedans kontrol özellikle etkileşim durumlarında, robotların birlikte çalışma durumlarında ve montaj operasyonlarında daha faydalıdır (Hogan, N., 1985, Valency, T.; Zacksenhouse, M., 2000).

Fiziksel sistemler iki farklı davranış gösterebilirler; bir etki girdisiyle (kuvvet gibi) akış (hareket) çıktısı veren admitans (admittance) durumu ve akış girdisi kabul edip etki ortaya çıkaran empedans durumu gibi.

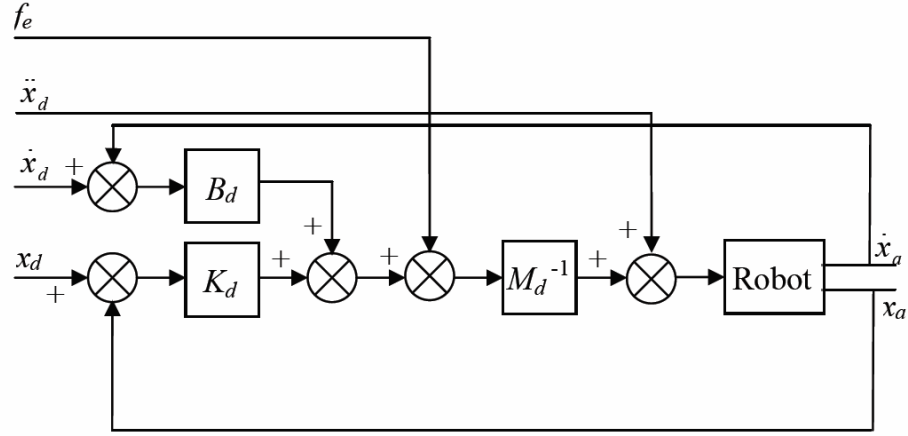
Fiziksel sistemler arasındaki dinamik etkileşim durumunda sistemlerin biri diğerini tamamlamaktadır. Herhangi bir serbestlik derecesinde sistemlerden biri empedans ise diğeri admitans durumu olmak zorundadır. Kısıtlanmış bir nesne her zaman itilebilir fakat her zaman hareket etmez, bu tür sistemler admitans sistemi olarak tanımlanabilir. Manipülâtör tarafından bakıldığında çevre bir admitansdır (Hogan, N., 1985).

Manipülâtör, çalışma ortamının admitansıyla fiziksel uyumundan emin olmak için çalışma ortamıyla mekanik olarak birleştiğinde, manipülâtör admitans davranışını farzedebilmelidir. Çünkü çalışma ortamıyla olan mekanik etkileşim farklı görevlerde değişecektir. Bundan dolayı, kontrolcü görevin belirli bölgeleri için uygun empedansı ayarlayabilir olmalıdır (Hogan, N., 1985).

Empedans yöntem, robot uç noktasının pozisyonunu, hızını, temas kuvvetini v.b. ölçüp geri beslemeyi kullanarak birleşme noktalarındaki eyleyicileri sürmek yoluyla istenen mekanik empedansa karar verir (Meer, D. W.; Rock, S. M., 1994). Robot uç noktasındaki istenen empedans eşitliği ve blok diyagramı Şekil 3.6 aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{M}_d \ddot{(x - \bar{x}_d)} + \mathbf{B}_d \dot{(x - \bar{x}_d)} + \mathbf{K}_d (x - \bar{x}_d) = -f_e \quad (3.16)$$

\mathbf{M}_d , \mathbf{B}_d ve \mathbf{K}_d sırasıyla manipülâtörden istenen atalet, sönüm ve katılık matrislerini belirtir (Almeida, F.; Lopes, A.; Abreu, P).



Şekil 3.6 Empedans kontrol blok diyagramı (Almeida, F.; Lopes, A.; Abreu, P)

Robot hareket planlaması ve kontrolündeki en önemli durum, minimum etki kuvveti ve sıçrama etkisiyle kararlı bir faz geçişi ve çıkış kuvvet ayarlanmasını başarabilmek için bir kontrolcü tasarımının yapılabilmesidir. Buradaki faz geçişi, robot ucu ile çevre arasındaki etkileşimi tariflemektedir. Empedans kontrol, fazlar arası geçişte kararlı ve birleşik bir kontrol yapısı sağlamaktadır. Empedans kontroldeki problem, temas gerçekleşikten sonra bütün çevresel model bilinmeden ve hareket planı içine dahil edilmeden çıkış kuvveti üzerinde ayarlama yapılamamasıdır. Empedans kontrolden farklı olarak, çeşitli kesintili (sürekli olmayan) kontrol yapıları da tartışılmıştır. Varılan en önemli sonuç, darbe sonrasında çıkış kuvvetinin ayarlanabilir olmasıdır. Fakat darbe esnasında sarsıntı ve sıçrama meydana geliyorsa bu mümkün olmayabilir. Diğer taraftan, robot ucuyla çevre arasındaki temas kontrolünün amaçlandığı kontrol tasarımlarının çoğu katılık ve yüzeyin pozisyonu gibi çevre parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Bazen farklı malzeme kullanılması, taşınması durumlarında bunlar gerçekçi olmayabilir. İlave olarak, faz geçişi kontrolündeki zorluk daha çok robot ve çalışma ortamı arasındaki darbenin mevcudiyetine bağlıdır (Wu, Y.; Tarn, T.; Xi, N., 1995).

Empedans kontrolün robot uygulamaları üzerinde çok önemli kazançları olmasına karşın bu strateji genişçe kullanılmamıştır. Bu durum esas olarak, arzu edilen empedansın kontrolündeki zorluklardan kaynaklanmaktadır. Bu zorluklar, kesin dinamik modelin elde edilemeyişinden ve önerilen dengeleme mekanizmasındaki eksikliklerden kaynaklanmaktadır (Valency, T.; Zacksenhouse, M., 2000).

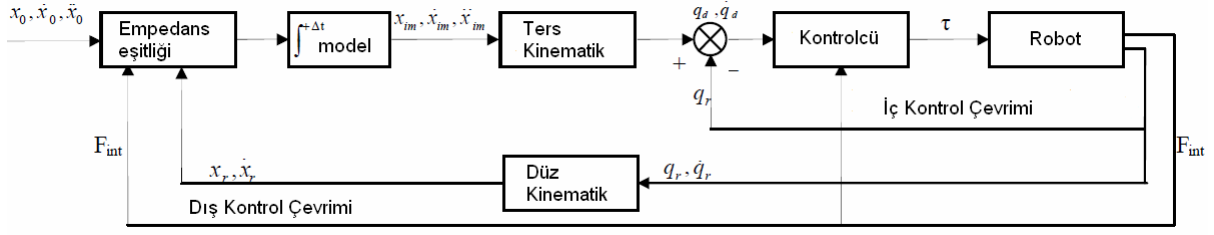
Bununla birlikte, robotun gerçek pozisyonu ile yukarda bahsedilen model arası farklılıklar olduğu zaman bu durum empedans hatası olarak karşımıza çıkar (Valency, T.; Zacksenhouse, M., 2000).

Empedans kontrolcüler daha çok robotun kesin modeline ihtiyaç duyulan hesaplanmış tork yöntemiyle uygulanmışlardır. Bu şekilde, kontrolcü model üzerindeki belirsizliklere karşı çok daha hassas davranabilmiştir. Belki de endüstride empedans kontrolünün geniş olarak kullanılmamasının sebebi bu durumdur (Meer, D. W.; Rock, S. M., 1994).

Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için yeni empedans kontrol algoritmaları araştırılıp geliştirilmiştir. Ayrıca, ortaya konmuş birçok kuvvet kontrol çeşitleri de vardır.

3.2.3.1 Anlık Empedans Kontrol

Önerilen anlık empedans kontrol, model belirsizliklerine karşı dinamik duyarlılık sorununun üstesinden gelebilmek ve pozisyon tabanlı yöntemde empedans takibini geliştirebilmek için tasarlanmıştır. Literatürde, iki tip empedans kontrol uygulaması belirtilmiştir: dinamik tabanlı yaklaşım (Hogan, N., 1985) ve pozisyon tabanlı yaklaşım (Simons, J.; Van Brussel, H). İkinci yöntem, ilk yöntemin dinamik modele karşı hassasiyetini ve doğal duyarlılığını bertaraf etmek için ortaya konulmuştur. Fakat bunda da robotun gerçek pozisyon bilgisiyle modelden alınan veriler farklı olursa bu durum empedans hatası olarak bize geri dönmektedir. Empedans kontrol uygulamasıyla ilgili, iyi bir şekilde empedans takip edebilme kapasitesine sahip olan pozisyon kontrolcülerinin hatalarını giderebilecek şekilde tasarlanmış yeni yöntem kaynaklarda verilmiştir (Valency, T.; Zacksenhouse, M., 2000). Anlık empedans kontrol, empedans modeli robotun en güncel pozisyonunda yeniden başlatır bundan dolayı modelde pozisyon hataları birikmemiş olur. Anlık empedans kontrole ait blok diyagramı Şekil 3.7 de verilmiştir.



Şekil 3.7 Anlık empedans kontrole ait blok diyagramı (Yaltırık, Hüseyin., 2007)

3.2.3.2 Uyarlamalı ve Dayanıklı Empedans Kontrol

Pratikte parametresel uyumsuzluklar her zaman yer alır ve değişken yük durumlarında bazı parametrelerin mevcut duruma göre değiştirilmesi gerekebilir. Böyle durumlarda, dinamik parametreleri hata miktarlarıyla ilişkili olarak doğrudan güncelleyerek tahmin eden uyarlamalı mekanizmalara başvurmak mümkündür. Bu amaca yönelik olarak, uyarlamalı kuvvet ve pozisyon kontrol yapıları geliştirilmiştir (Siciliano, B.; Villani, L., 1999, Jung, S.; Hsia, T. C., 1995).

3.2.3.3 Kayan Kipli Empedans Kontrol

Kayan kipli kontrol dayanıklı özelliği dolayısıyla daha belirgindir. Bu kontrol yönteminde, sistemin yörüngesi kayar bir yüzey üzerinde takip edilir ve de sürdürülür. Kayar yüzey tarafından belirlenen sistem dinamiği, düzensizlik ve model belirsizliği durumlarında değişmez. Buradaki amaç, kayan kipli kontrol ile empedans kontrolün özelliklerini birleştirerek daha iyi çalışan bir empedans kontrolü elde etmektir. Kayan kipli empedans kontrol nominal kısım ve dayanıklı kısım olarak ikiye ayrılır. Nominal kısım, robotun doğrusal olmayan durumlarını kısmen dengeleyen robotun nominal modeline dayalıdır. Dayanıklı olan kısım ise empedans uygulama üzerindeki gerçek robot modeliyle nominal model arasındaki farklılıkların etkisini dengelemeye yarar. Empedans kontrolün nihai hedefi, empedans hatasını hedef empedans veya görünürdeki empedans olarak tanımlamaktır. Yani, empedans hatası sıfır olduğu zaman görünür empedans hedef empedansa eşit olacaktır. Sıfır hatalı kayar yüzey hali, sistem kayar durum halindeyken durum yörüngesi aynen kalıyorsa veya kayar yüzeye çok yakın konumdaysa başarılabilir. Dayanıklı kısmın farklılaştırılması mümkündür (Lu, Z.; Kawamura, S.; Goldenberg, A. A., 1991).

Esnek malzemeler üzerinde uygulanacak empedans kontrole değinecek olursak; nesnel

empedans kontrol, birçok robot koluyla rijit bir nesneyi taşıyabilmek için nesnel tabanlı kontrol olarak geliştirildi. Esnek nesne tabanlı empedans kontrolün getirilerinden birisi, serbest uzay hareketlerini ve etkileşim hallerini kontrol durumunda herhangi bir dönüşüme gerek kalmadan gerçekleştirebilmektir. Esnek nesne tabanlı empedans kontrolcünün, rasgele pasif bir çalışma ortamıyla birleşmiş olduğu zamanki kararlılığı kaynaklarda incelenmiştir (Meer, D. W.; Rock, S. M., 1994). Nesnelere tutulup taşınması işlerinde kullanılan ikili robot operasyonlarıyla ilgili bilgiye de kaynaklardan ulaşılabilir (Caccavale, F.; Natale, C.; Siciliano, B.; Villani, L., 1999).

3.2.3.4 Melez(Hibrit) Empedans Kontrol

Melez empedans kontrol yapısı empedans kontrolü ve kuvvet geri beslemesini birleştirerek tek stratejiye indirgeyen bir yapı olarak kullanılmıştır. Melez empedans kontrolcüsü, manipülatörün dinamik özelliklerinin doğrusallaştırılması ve ayırım (decoupling) görevleri için dahili bir çevrim daha kullanır. Empedans kontrol, melez kontrol alt uzayında kullanılan pozisyon kontrol yerinde kullanılabilir. Bu durumda, arzu edilen manipülatör dinamiği sisteme kabul ettirilmiş olur (Sun, D.; Liu, Y., 1997, Almeida, F.; Lopes, A.; Abreu, P.).

3.2.3.5 Genişletilmiş Empedans Kontrol

Melez kontrol ve genişletilmiş empedans kontrol diye adlandırılan iki kontrol yapısı, gereğinden çok serbestlik dereceli manipülatörler için uyumlu hareket halini sağlamak için geliştirilmişlerdir. Esnek ve çarpışma önleyici kontrol yöntemi ayrıca sunulmuştur. Gereğinden fazla serbestlik dereceli manipülatörler için şu anki bilgisayar sistemlerinde daha verimli kullanılabilen uyumlu kontrol yöntemi önerilmiştir. Gereğinden fazla serbestlik dereceli manipülatörlerde esnek hareketin uygulanması için en uygun algoritma, algılamada ve kontrol çevrimindeki gecikme zamanını düşüren empedans kontrol yöntemi olarak önerilmiştir (Peng, Z., 1992, Hu, V.; Queiroz, M.; Burg, T.; Dawson, D., 1995, Inoue, Y.; Kitamura, S.; Kidawara, Y., 1991, Natale, C.; Siciliano, B.; Villani, L., 1999).

3.2.3.6 Uzaysal Empedans Kontrol

Uzaysal parametreler, örneğin dönüştürülebilir esnemezliğin başlıca yönleri, sezgisel ve uzaysal dönüşüm özellikleri robotun etkileşim halinde olacağı nesne konfigürasyonuna bağlı olarak seçilebilirler. Uzaysal uyumluluk kontrolü, sezgisel yolla parametrize edilmiş uyumlu

kontrolün öklid geometriksel şeklidir (Fasse, E. D.; Broenink, J. F., 1999, Natale, C.; Siciliano, B.; Villani, L., 1999).

3.2.3.7 Yapay Sinir Ağları Tabanlı Empedans Kontrol

Bu yöntemin amacı, robot modelindeki belirsizlikleri dengelemek için yapay sinir ağları yönteminin uygulanarak kontrolcü dayanıklılığını (robustness) geliştirmektir (Jung, S.; Hsia, T. C., 1995, Caccavale, F.; Natale, C.; Siciliano, B.; Villani, L., 1999).

Empedans kontrol, dokunsal aygıtların kontrolünde kullanılmaktadır. Dokunsal veya kuvvet yansıtıcılık, önemli ölçüde el hareketlerini kısıtlamadan kullanıcının el hareketlerini algılayabilen ara yüze sahip olan ve hissedilen kuvvet veya tork değerleriyle kullanıcıyı uyaran özelliklerdir. Bu aygıtlar, uzaktaki robot için teleoperasyon yöntemlerinde kullanılırlar, bu sistemin performansı dokunsal kontrol üzerine yapılan fiziksel deneylere ve kullanıcının sanal çalışma ortamıyla etkileşim durumuna bağlıdır (Carignan, C. R.; Cleary, K. R., 2000).

Değişken empedans kontrol (Ikeura, R.; Inooka, H., 1995), insan kolu uyarlamalı yay benzeri geliştirilmiş empedans kontrol (Love, L. J.; Book, W. J., 1995) kaynaklarında sunulmuştur. İnsan kolu modellerinde empedans uyarlaması (Yi, B. J.; Freeman, R. A., 1995), genelleştirilmiş temas kuvveti ve pozisyon durumları için empedans kontrol (Mills, J. K.; Liu, G. J., 1991)'da verilmiştir. Serbest hareketten kısıtlanmış harekete geçiş sırasında minimum titreşim oluşturacak biçimde kontrolü sağlamak için birçok yöntem sunulmuştur (Mills, J. K.; Liu, G. J., 1991). Robota ait hedeflenen empedansın seçimiyle ilgili çalışma (Hyde, J. M.; Cutkosky, M. R., 2000), açı/eksen tabanlı 6 serbestlik dereceli empedans kontrol yöntemi (Caccavale, F.; Natale, C.; Siciliano, B.; Villani, L., 1999) kaynaklarında verilmiştir.

3.2.4 Çözümlemiş İvme Kuvvet Kontrolü

Çözümlemiş ivme kuvvet kontrolü, çözümlemiş ivme pozisyon kontrolüne kuvvet çevrimi eklenerek basitçe genişletilmiş halidir.

Pozisyon kontrol kısmı

$$\ddot{x}^* = \ddot{x}_d + K_p(x_d - x) + K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) \quad (3.17)$$

$$\ddot{\theta}^* = \mathbf{J}^{-1}(\ddot{x}^* - \dot{\mathbf{J}}\dot{\theta}) \quad (3.18)$$

$$\tau = R^{-1}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}^*) \quad (3.19)$$

R^{-1} , robot manipülatöre ait ileri dinamik eşitliğini belirtir.

Kuvvet kontrol kısmı

$$\tau_f = \mathbf{J}^T(\mathbf{I} - \mathbf{S})K_f(f_d - f) \quad (3.20)$$

Çözümlemiş ivme kısmı

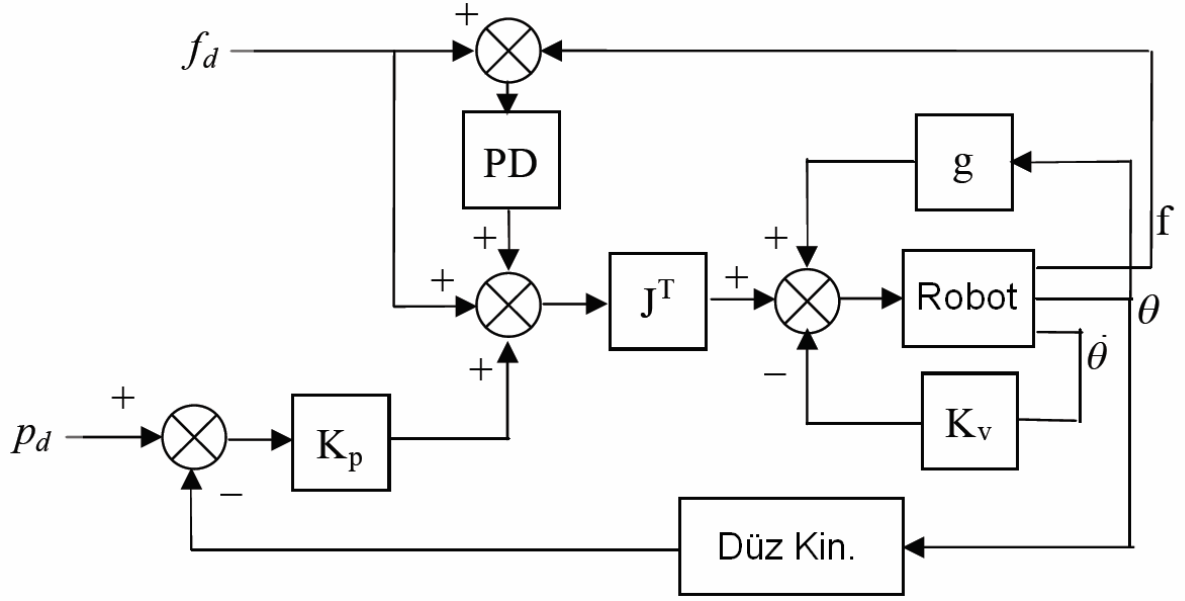
$$\tau = R^{-1}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}^*) + \tau_f \quad (3.21)$$

$$\tau = R^{-1}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}^*) + \mathbf{J}^T(\mathbf{I} - \mathbf{S})K_f(f_d - f) \quad (3.22)$$

Kuvvet hatası $f_d - f$, pozisyon ve kuvvet değişkenlerinin düzgün ayrıştırıldığından emin olmak için ilk olarak kuvvet kazancı K_f daha sonra seçim matrisi $\mathbf{I} - \mathbf{S}$ ile çarpılır. Birleşme noktalarındaki değerlere dönüşümde Jakobian matrisinin transpozesiyle \mathbf{J}^T çarpılarak elde edilir. Sonuç olarak, pozisyon ve kuvvet kontrolcileri çıkışları birleşme noktalarına ait torkları üretecek biçimde toplanır. Blok diyagramı Şekil 3.8 de verilmiştir. Çözümlemiş ivme kuvvet kontrolü yapısı, empedans kontrol gibi diğer kartezyen temelli kuvvet kontrolcüleriyile neredeyse aynıdır.

3.2.6 Paralel Kuvvet / Pozisyon Kontrolü

Kuvvet kontrolü ve pozisyon kontrolünün özelliklerini birleştirmek amacıyla kısıtlanmamış görev uzayı boyunca temas kuvvetlerini ve kısıtlanmış görev uzayı boyunca robot uç noktası pozisyonunu kontrol edebilme kapasitesine sahip olan paralel kuvvet/pozisyon kontrol algoritması tasarlanmıştır.



Şekil 3.9 Paralel kuvvet / pozisyon kontrolü (Yaltırık, Hüseyin., 2007)

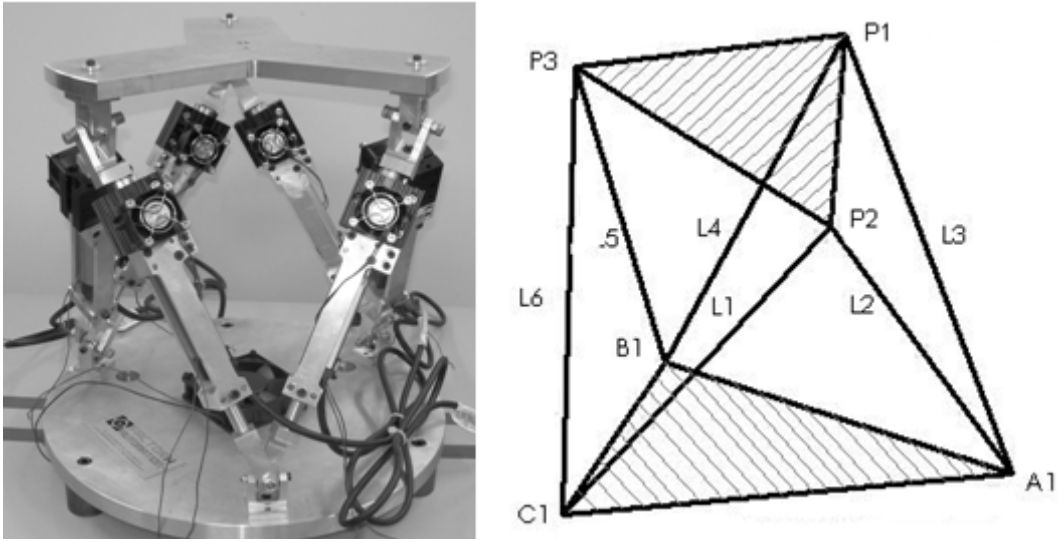
Kontrolcü girişi, pozisyon kontrolü ve kuvvet kontrolü hareketlerinin toplamı şeklindedir (Chiaverini, S.; Siciliano, B.; Villani, L., 1999). Motoru süren tork değeri eşitlik 3.23 ile hesaplanmıştır. Paralel kuvvet/pozisyon kontrolüne ait blok diyagramı da Şekil 3.9'da verilmiştir.

$$\tau = \mathbf{J}^T(\theta)(k_p(x_d - x) + f_d + k_f(f_d - f) + k_i \int_0^t (f_d - d) \partial t) - k_v \dot{\theta} + g(\theta) \quad (3.23)$$

4. SİSTEM KONTROL MODELİ VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

4.1 Giriş

Bu çalışmada, uzaysal altı eksenli hareket edebilen 3-3 Stewart Platformunun gerçek zamanlı insan-makine arayüzü olarak kullanımı incelenmiştir (Şekil 4.1). Kullanıcı tarafından platform üzerine rijit bağlı kola uygulanacak olan altı eksenli kuvvet ve moment değerine göre platformun uyum göstererek hareket etmesi istenmektedir. Dolayısıyla kullanıcının kumanda kolunu parmak ucuyla sadece mekanik sürtünmeleri yenerek hareket ettirebildiği bir sistem hedeflenmiştir.



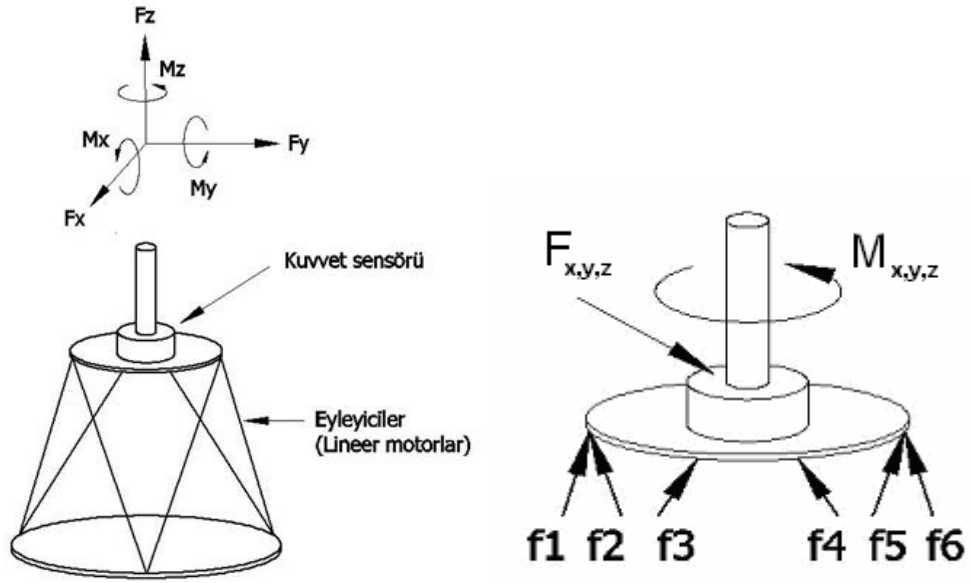
Şekil 4.1 3-3 SPM deneysel sistem (Ömürlü, Vasfi Emre., 2009)

Şekil 4.2 de görüldüğü üzere, deneysel sistem bir adet kumanda kolu, (A), ATI Nano25 altı eksenli kuvvet/tork algılayıcısı, (B), NI UMI-7774 hareket kontrol kartı arayüzü, (C), NI PCI-7356 altı eksenli hareket kontrol kartı, (D), E210-VF doğrusal motor sürücüler, (E), ve 3x3 SP mekanizmasını içermektedir. Mekanizma fiziksel parametreleri Çizelge 4.1 de verilmiştir. Kuvvet/tork algılayıcısı, kumanda koluna ve üst platforma rijit olarak bağlı olduğundan, kumanda kolu ile üst platform arasındaki kuvvet/tork geçişi ölçülebilmektedir. Bu tez çalışmasında doğrusal eyleyiciler buradaki kuvvet/tork değerini sıfırlayacak şekilde hareket edeceklerdir.

Bu çalışmanın devamında, bu arayüz vasıtasıyla uzaysal hareket yapan herhangi fiziksel cismin kuvvet geribeslemeli olarak tek noktadan kontrol edilmesi amaçlanmaktadır. Deneysel sistemde kullanılan kuvvet sensörü ve eyleyicilerle (lineer motor) ilgili ayrıntılı ekipman özellikleri Ek 3’de verilmiştir.

4.2 Sistem Kontrol Modeli

3-3 Stewart Platformunun hareketli üst plakasına bağlı kumanda koluna 6 eksenli kuvvet ve momentler $\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)$, kuvvet sensöründe okunan değerlere göre her bir eyleyici üzerine uygulanan kuvvet değerine $(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6)$ dönüştürülerek kontrol sağlanacaktır (Şekil 4.3). Bu dönüştürme işlemi aşağıdaki yolla yapılmaktadır.



Şekil 4.3 Stewart Platformuna uygulanan kuvvet ve momentlerin eyleyiciler üzerindeki dağılımı

Platforma ait eyleyici hızları;

$$\dot{\mathbf{i}} = (\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dot{l}_3, \dot{l}_4, \dot{l}_5, \dot{l}_6)^T (m/s) \quad (4.1)$$

Hareketli platform merkezinin hızı;

$$\mathbf{V} = (\dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{z}_p)^T (m/s) \quad (4.2)$$

Hareketli platformun Z, Y, X eksenleri etrafındaki açısal hızı;

$$\omega = (\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma})(rad/s) \quad (4.3)$$

Buna göre hareketli platformun hızı $\dot{\mathbf{t}} = [\mathbf{V}\omega]^T$ olarak ifade edilir. $\dot{\mathbf{i}}$ ve $\dot{\mathbf{t}}$ arasındaki ilişkiyi belirleyecek olursak,

$$\dot{\mathbf{i}} = \mathbf{J} \cdot \dot{\mathbf{t}} \quad (4.4)$$

Buradaki \mathbf{J} , Jakobian matrisini temsil eder.

Platformun düşük hızda hareket etmesinden dolayı ve Virtüel - İş prensibi prensibinden yola çıkarak aşağıdaki formülü yazabiliriz,

$$\mathbf{F}^T \cdot \dot{\mathbf{t}} = \mathbf{f}^T \cdot \dot{\mathbf{L}} \quad (4.5)$$

(4.4) teki ifadeyi (4.5)in içine yazarsak;

$$\mathbf{F}^T \cdot \dot{\mathbf{t}} = \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{J} \cdot \dot{\mathbf{t}} \quad (4.6)$$

(4.6) tekrar yazılırsa;

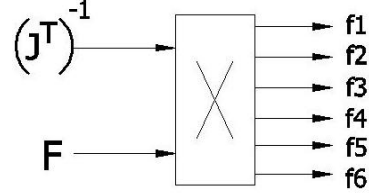
$$\mathbf{F}^T = \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{J} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \cdot \mathbf{f} \quad (4.8)$$

şeklinde de yazabiliriz.

Burada, bacaklara giden kuvvetleri bulmak için, \mathbf{J} nin tekil olmadığını da düşünerek aşağıdaki formülü yazabiliriz.

$$\mathbf{f} = (\mathbf{J}^T)^{-1} \cdot \mathbf{F} \quad (4.9)$$



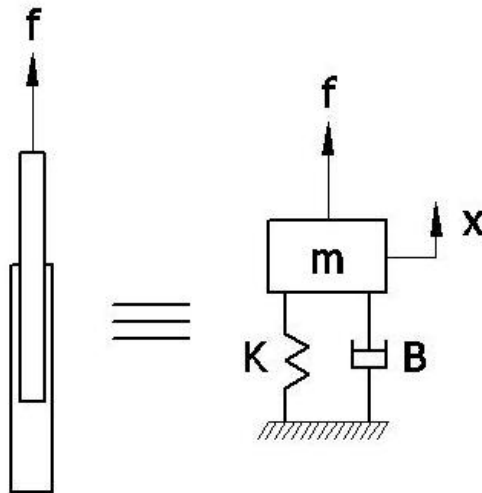
Şekil 4.4 Eyleyici kuvvetlerine geçiş

\mathbf{J} = Jakobian matrisi

$$\mathbf{F} = (\mathbf{F}_X, \mathbf{F}_Y, \mathbf{F}_Z, \mathbf{M}_X, \mathbf{M}_Y, \mathbf{M}_Z)^T$$

$$\mathbf{f} = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6)^T (N)$$

Burada eyleyici olarak kullanılan ekipman doğrusal motorlardır. Her bir eyleyicinin birer kütle-yay-damper empedans modeli gibi davrandığı kabul edilmiştir. (Şekil 4.5)

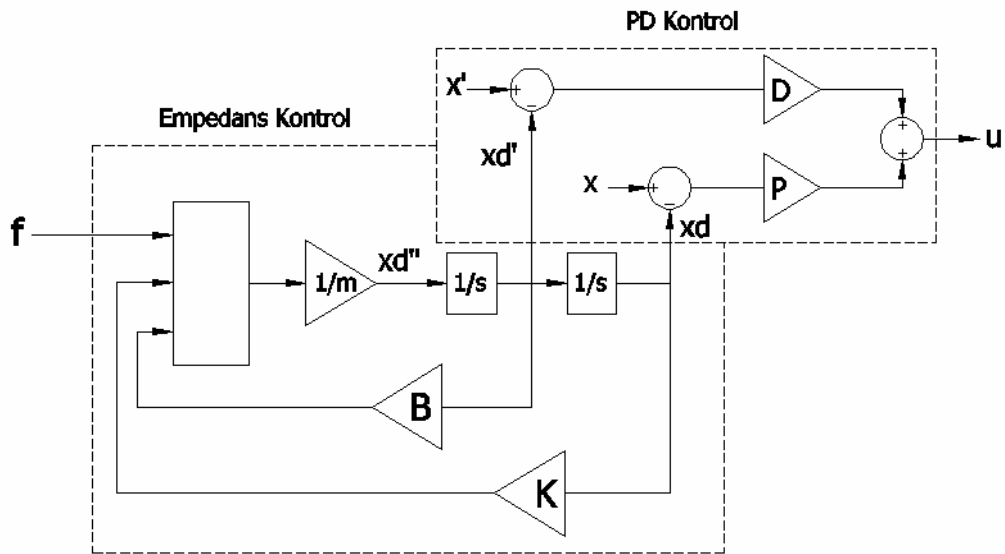


Şekil 4.5 Eyleyici yapısını temsil eden empedans modeli

Buradaki f eyleyici üzerine uyguladığımız kuvvet, x eyleyicinin hareket miktarı, K yay katsayısı, B sönüm katsayısını temsil eder. K ve B katsayılarını artırıp azaltarak sistemin sert veya yumuşak cevap vermesi ayarlanabilir. Hatta K katsayısı sıfır alınıp yay etkisi göstermeyen sadece sönüm özelliği gösteren bir eyleyici modeli de elde edebiliriz, böylece kumanda koluna kuvvet uygulandığında ilk konumuna gelmeye çalışmaz son geldiği noktada durur.

Burada kuvvet geri beslemeli pozisyon tabanlı empedans kontrol yöntemi kullanılmıştır. Bunun dışında, kuvvet geri beslemesiz empedans kontrol, kuvvet geri beslemeli empedans kontrol, kuvvet gözlemleyicili pozisyon tabanlı empedans kontrol gibi türleri de vardır (Michael Strolz,, Alexander Mörtl, Michael Graf, and Martin Buss, 2009).

Her bir bacağın empedans kontrolüne ilişkin kontrol yapısı Şekil 4.6'de, istenen empedans yapısında (4.10) denkleminde verilmiştir. Şekil 4.6'de sol taraf, kullanılan empedans modeli, sağ taraf ise sürücüye gönderilecek olan sinyalin oluşturulduğu PD kontrol yapısını göstermektedir. Gerçek sistemdeki eyleyicilerden gelen hız ve pozisyon değerleri, empedans model üzerinden gelen eyleyici hız ve eyleyici pozisyon değerinden çıkarılarak sırasıyla K_D ve K_P katsayılarıyla çarpılır. Bu değerler toplandığında sürücüye gönderilecek olan kontrol sinyali u 'yu elde etmiş oluruz. Kuvvet kontrolü algoritmalarında Integral faktörü K_I kullanılmaz çünkü bu sistemde kararsızlığa sebep olacaktır. Sistemde kullanılan parametreler Çizelge 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.6 Eyleyici kontrolü genel yapısı (PD tabanlı-Empedans kontrol)

$$m \ddot{x}_d + B \dot{x}_d + Kx_d = f \quad (4.10)$$

Çizelge 4.2 PD tabanlı-Empedans kontrol parametreleri

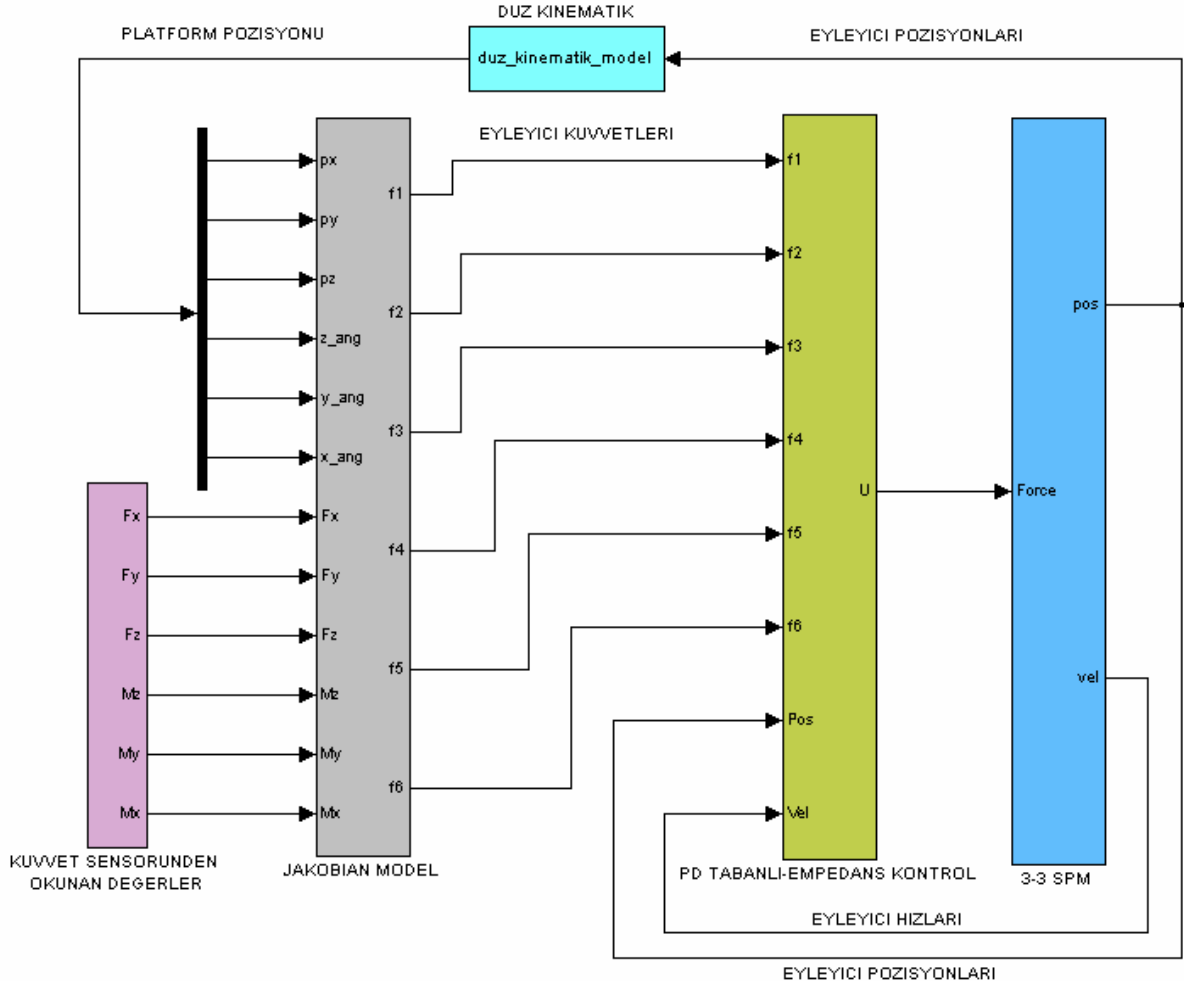
m	1 kg
K	200 N/m
B	80 Ns/m
K_d	48.5
K_p	6202

Çizelge 4.2’de yer alan sistem parametrelerinden eyleyici yapısını temsil eden m, K ve B değerleri tek eyleyici üzerinden yapılan analizler sonucu en uygun değerler olarak tespit edilmiştir. K_d ve K_p ise PD kontrol katsayıları olup yine tek eyleyici üzerinden yapılan denemeler sonucunda ortaya çıkmıştır.

4.3 Sistemin MATLAB®/Simulink® Yapısının Tanıtılması

Bu çalışmada insan-makine arayüzü olarak uzaysal altı eksenli hareket yapabilen bir 3-3 Stewart Platformu üzerinde kuvvet kontrolü uygulaması yapılmış olup, MATLAB®/Simulink® programları kullanılarak gerçek zamanlı sayısal çözümler gözlemlenmiştir. Ayrıca, sistemin gerçek zamanlı çalışabilmesi için ihtiyaç duyulan 3-3 Stewart Platformuna ait düz kinematik problemde çözülmüştür. (Bölüm 2.2)

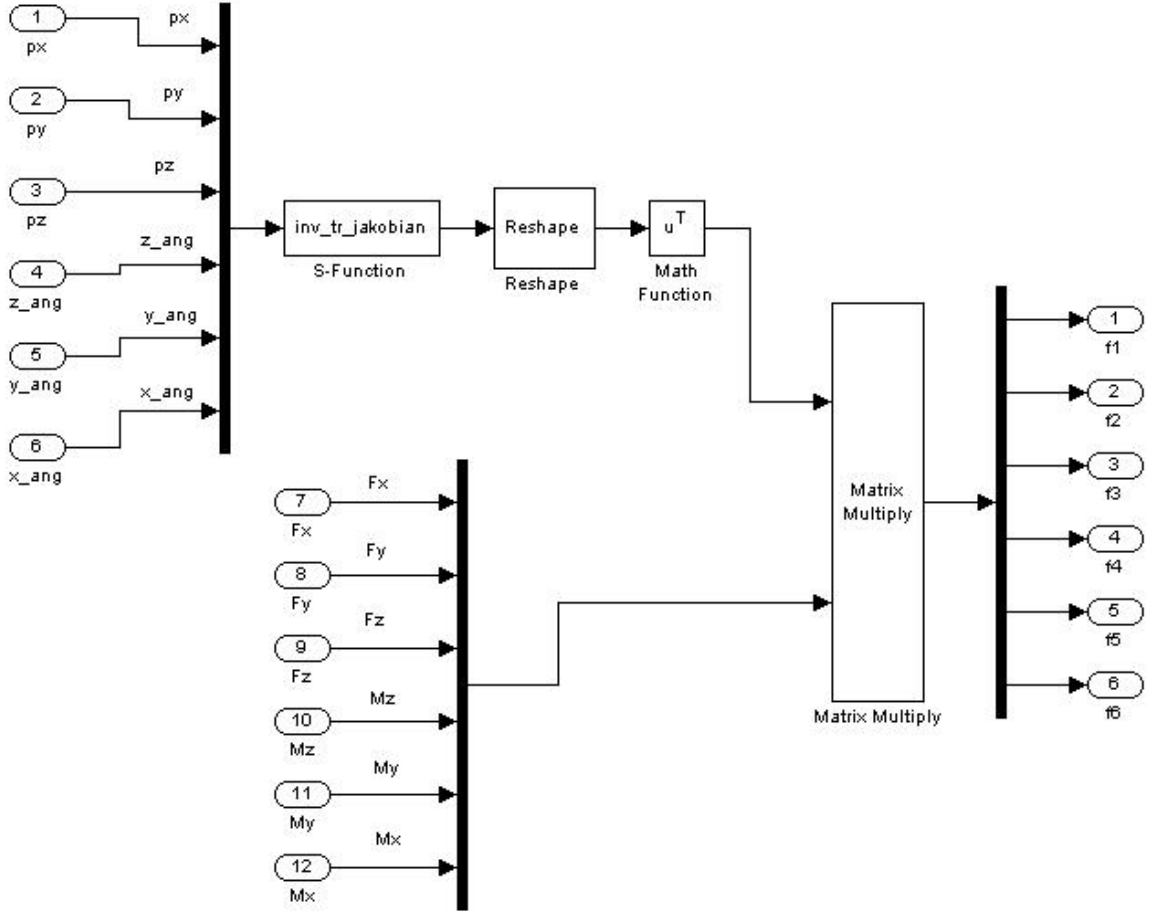
6 eksen uzaysal hareketli cisimleri tek noktadan yönlendirecek Stewart Platform tabanlı, kuvvet geribeslemeli insan-makine arayüzü oluşturulması amacıyla hazırlanan genel sistem blok diyagramı Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6 Simülasyonun genel blok diyagramı

Simülasyonun genel blok diyagramı; kuvvet sensöründen okunan değerleri, jakobian modelini, PD tabanlı-empedans kontrol yapısını, 3-3 Stewart Platformunu ve Newton Raphson düz kinematik modelini içermektedir.

Kuvvet sensöründen okunan değerler, platforma gelen kuvvet değerlerinin okunduğu kısımdır ve $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ değerlerinden oluşur. Jakobian model kısmı platforma uygulanan kuvvetin her bir eyleyiciye dönüştürüldüğü kısımdır ve $\mathbf{f} = (\mathbf{J}^T)^{-1} \cdot \mathbf{F}$ formülüyle gösterilir. Şekil 4.7'de Jakobian Model bloğunun içeriği verilmiştir. Buradaki $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ girişleri platform pozisyon ve dönüşlerini temsil eder.



Şekil 4.7 Jakobian Model bloğunun içeriği

Eyleyicilere indirgenen kuvvetler Empedans-PD kontrol yapısına göre ayrı ayrı kontrol edilmiştir. Burada bloğa beslenen değerler; eyleyici kuvvetleri, eyleyici pozisyonları ve eyleyici hızlarıdır, çıkış olarak tahrik elemanlarına uygulanacak gerilim değeri (U) oluşturulur (Şekil 4.9). Her bir eyleyiciye indirgenmiş PD tabanlı-Empedans kontrol bloğunun içeriği Şekil 4.10'da verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus; deneysel motor, kuvvet modunda çalıştığı için motor dinamiği k_f motor kuvvet katsayısına indirgenmiştir. Bu durumu ifade eden denklem (4.11 - 4.13) de verilmiştir. Eyleyici dinamiğini ifade eden blok diyagramı Şekil 4.8 de verilmiştir.

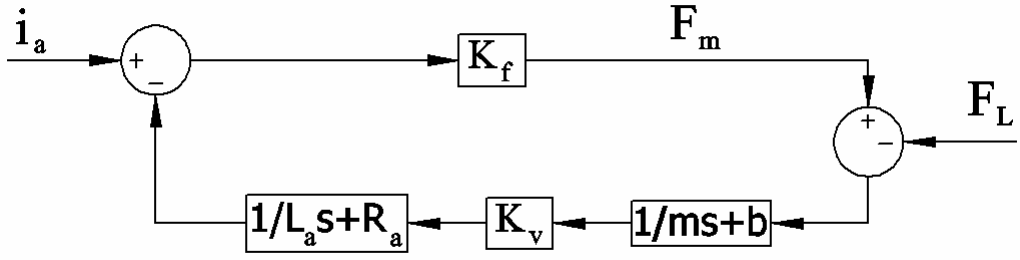
$$\frac{F_m}{I_a} = \frac{K_f}{1 + \frac{K_f K_v}{(L_a s + R_a)(ms + b)}} \quad (4.11)$$

$$\frac{K_f K_v}{(L_a s + R_a)(ms + b)} \cong 0 \quad (4.12)$$

olduğundan

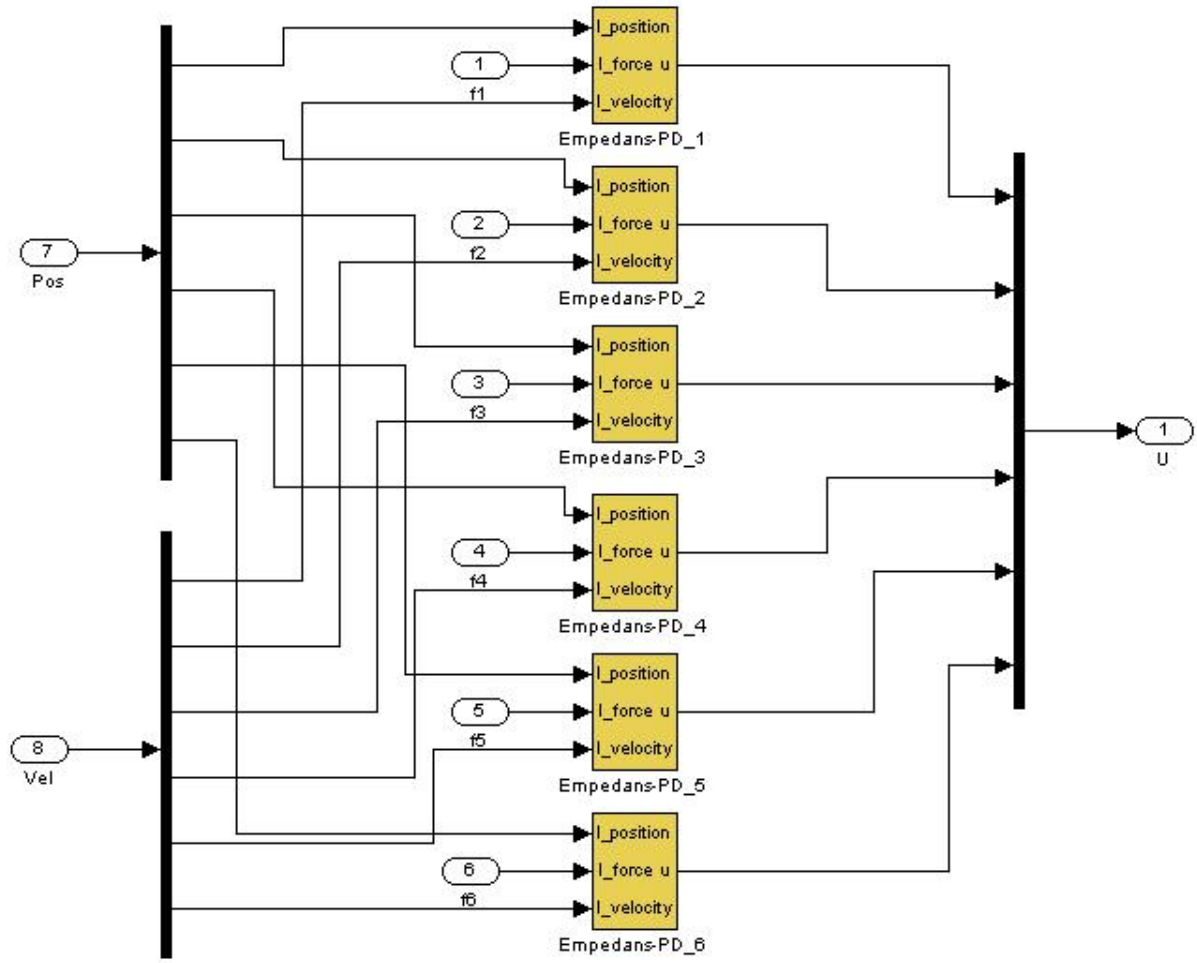
$$\frac{F_m}{I_a} = K_f \quad (4.13)$$

sabitine indirgenmiştir.

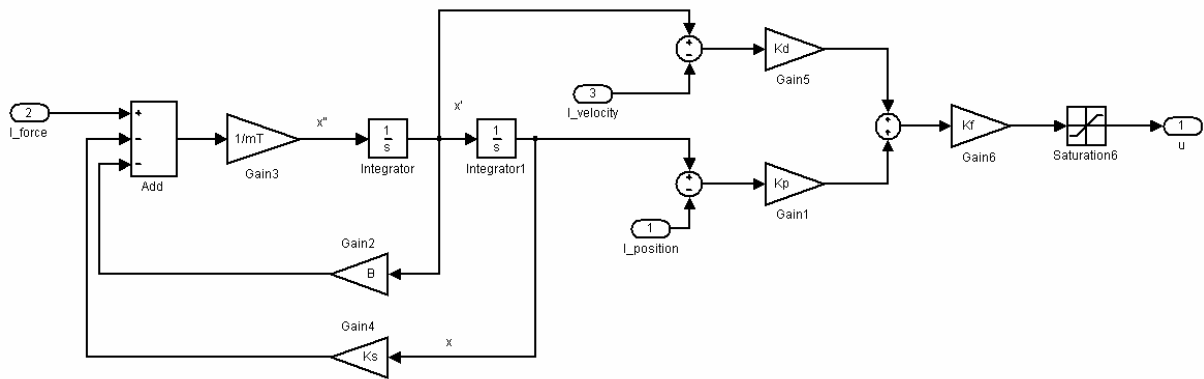


Şekil 4.8 Eyleyici dinamiğini ifade eden blok diyagramı

k_f , her bir eyleyici için PD kontrol sonrası ortaya çıkan gerilim sinyalini kuvvet değerine dönüştüren bir katsayıdır.

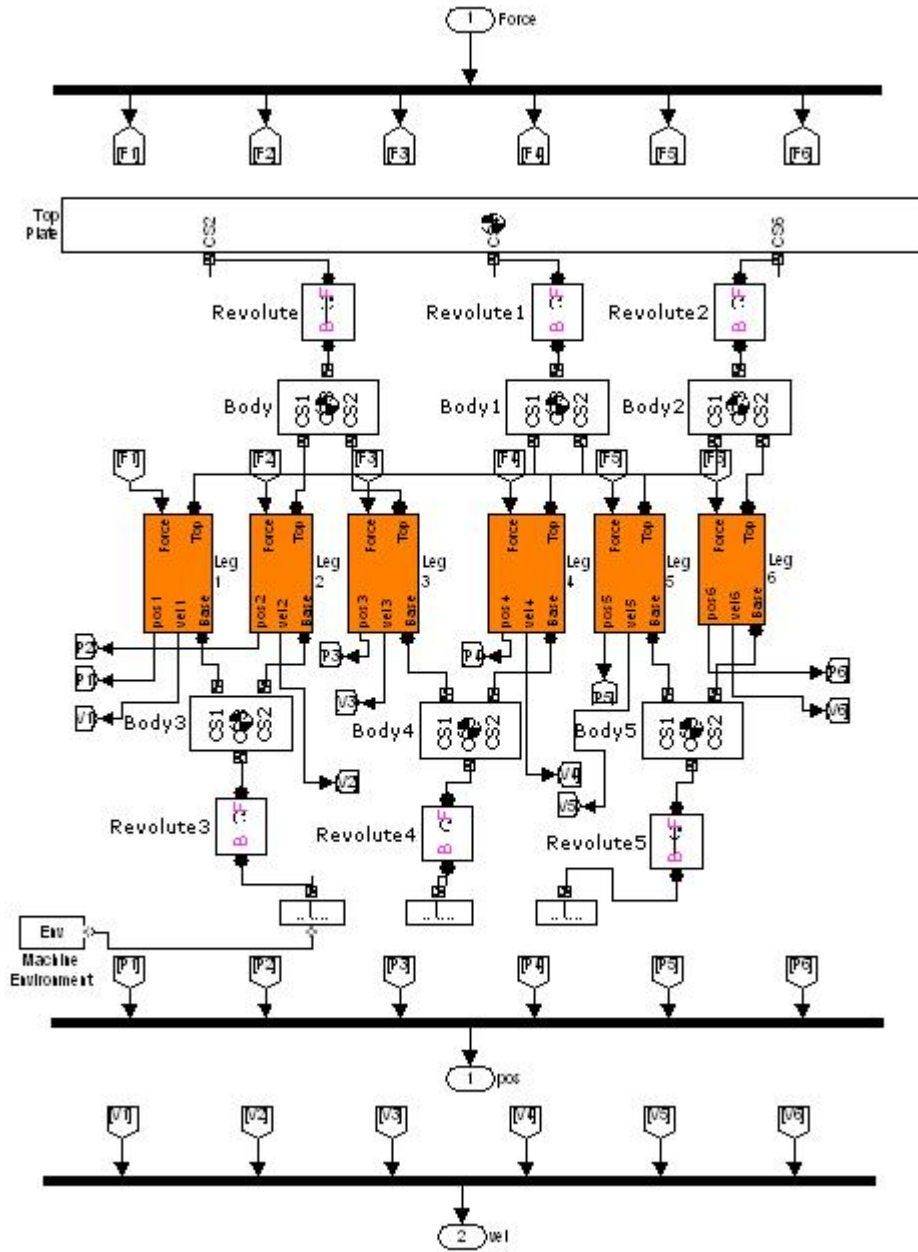


Şekil 4.9 PD tabanlı-Empedans kontrol bloğunun içeriği



Şekil 4.10 Her bir eyleyiciye indirgenen PD tabanlı-Empedans kontrol bloğunun içeriği

3-3 Stewart Platform Mekanizmasının dinamiklerini de içine alan gerçek zamanlı simülasyonu Matlab-SimMechanics blokları yardımıyla oluşturulmuştur. Sim-Mechanics, Matlab-Simulink altında çalışan mekanik sistemlerin dinamiklerini ve hareketlerini standart Newton yaklaşımı ile hesaplayan bloklardan oluşan bir arayüzdür. Genel olarak mekanik sistemlere ait girişler (moment, kuvvet) bu bloklara iletilir ve sisteme ait çıkış (ivme, hız, konum) bilgileri değerlendirilir (Yıldız, İbrahim., 2007). 3-3 SPM bloğunun içeriği Şekil 4.11’de verilmiştir. Burada, tahrik kuvvetleri şeklinde her bir eyleyiciye giriş olurken, çıkış olarak eyleyici pozisyon ve hızları elde edilmektedir.



Şekil 4.11 3-3 SPM bloğunun içeriği

Buradaki eyleyici pozisyonlarından platform pozisyon ve dönüşünün hesaplandığı düz kinematik çözümlemede Newton Raphson yöntemi kullanılmıştır (Ek 2). Hesaplanan değerler Jakobian model bloğuna geribeslenir ve böylece çevrim tamamlanmış olur.

4.4 Simülasyon Çalışmaları

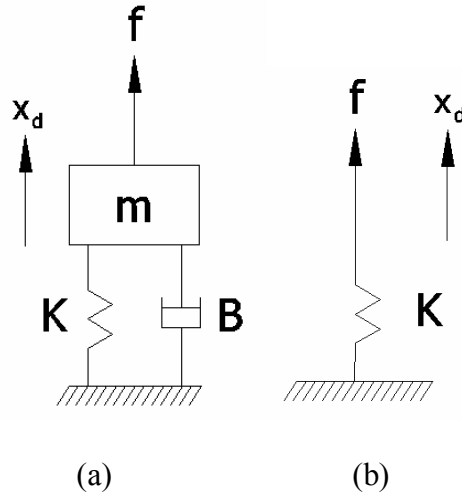
Bu bölümde, çalışmamıza konu olan empedans kontrol modeli, katılık kontrol modeliyle karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Bu kontrol yapılarının şematik olarak gösterimi Şekil 4.12 de verilmiştir. Yine sırasıyla empedans kontrol ve katılık kontrol modeline ait blok diyagramları Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 de verilmiştir.

Empedans kontrol yapısına ait denklem (4.10):

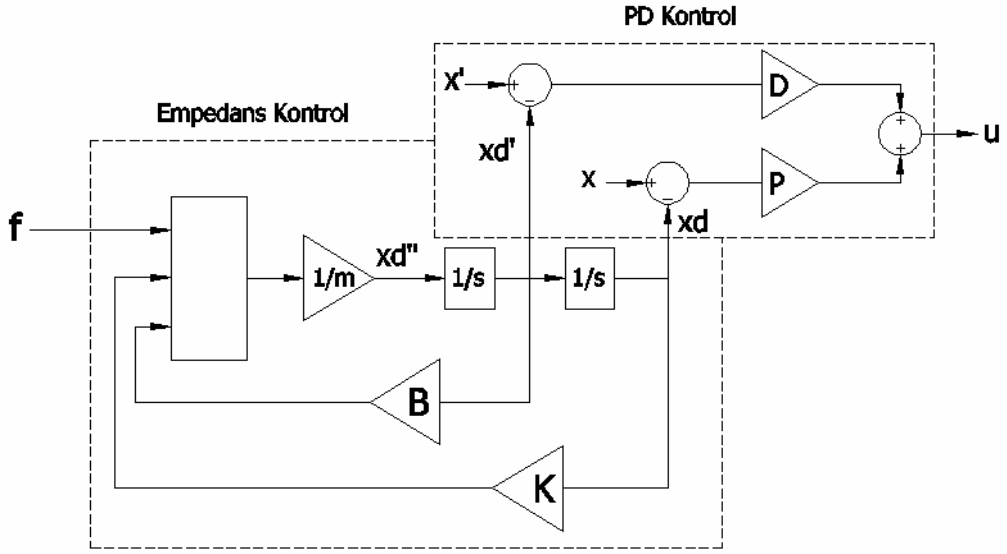
$$m\ddot{x}_d + B\dot{x}_d + Kx_d = f$$

Katılık kontrol yapısına ait denklem:

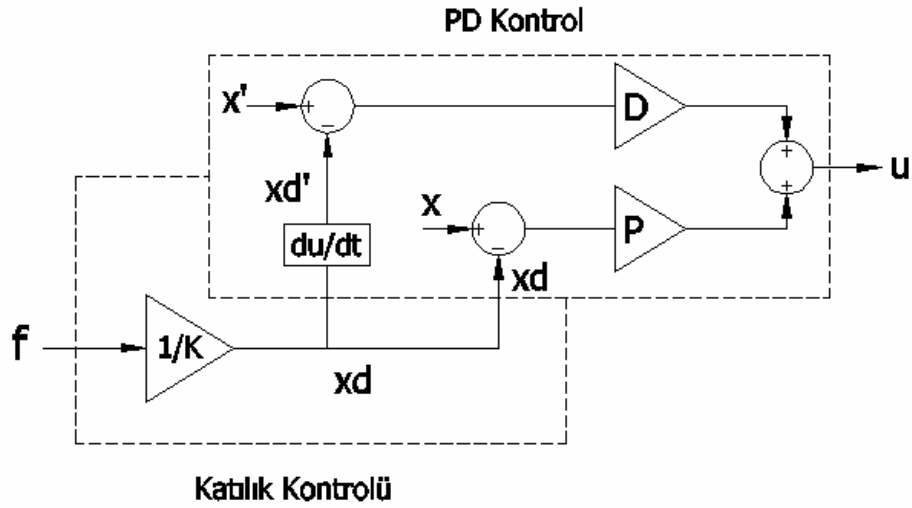
$$Kx_d = f \quad (4.14)$$



Şekil 4.12 (a) Empedans kontrol şematik gösterim (b) Katılık kontrol şematik gösterim



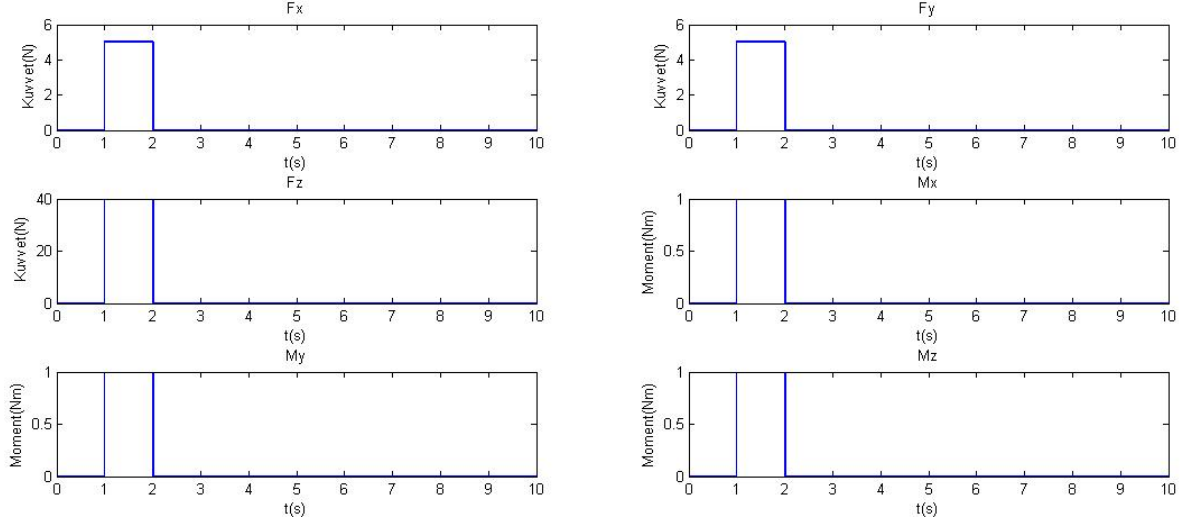
Şekil 4.13 PD tabanlı-Empedans kontrol blok diyagramı



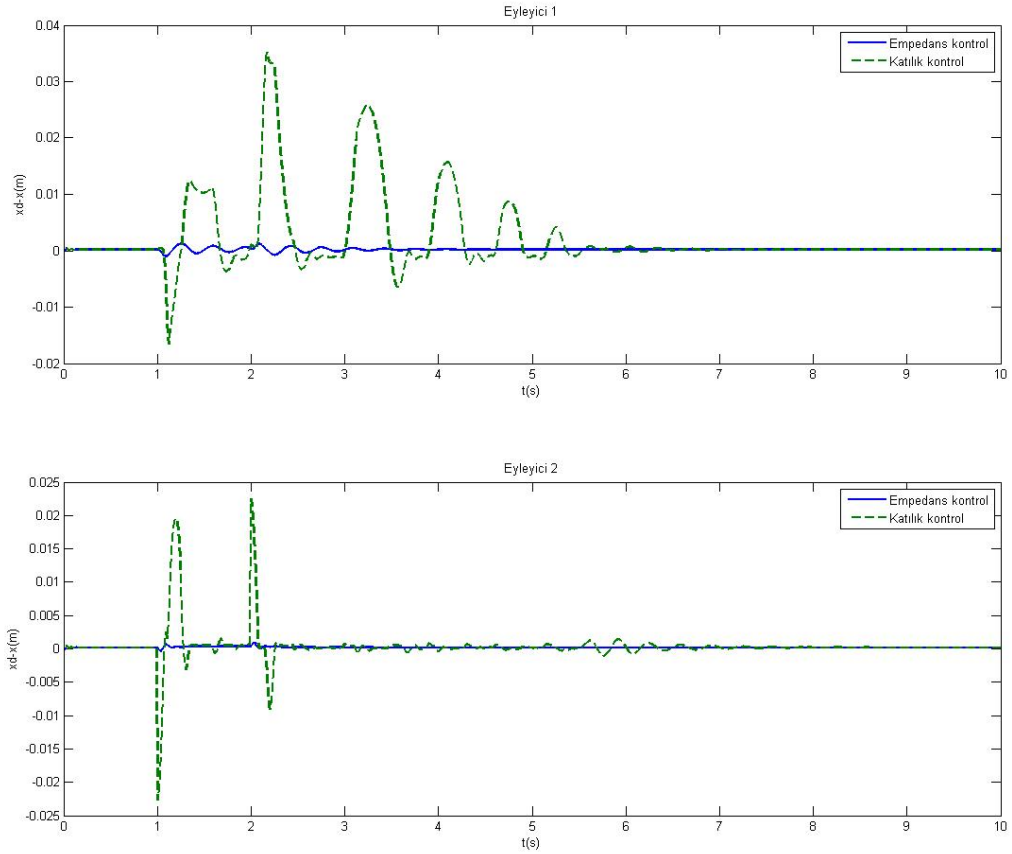
Şekil 4.14 PD tabanlı-Katılık kontrolü blok diyagramı

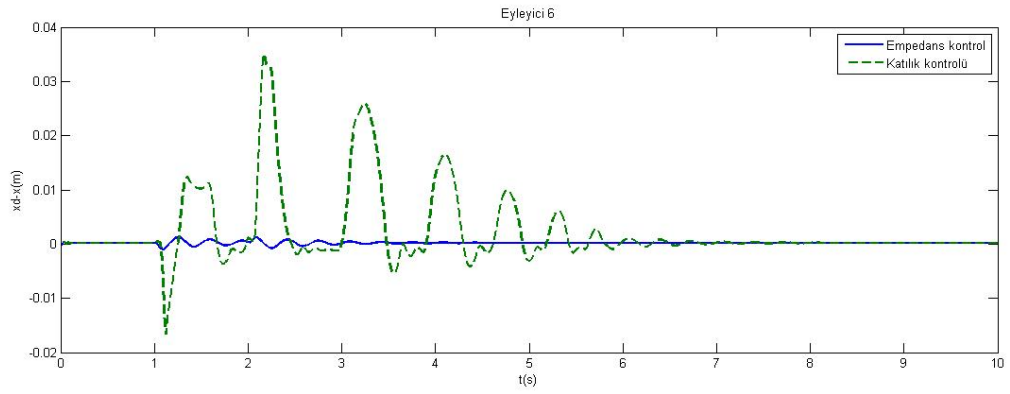
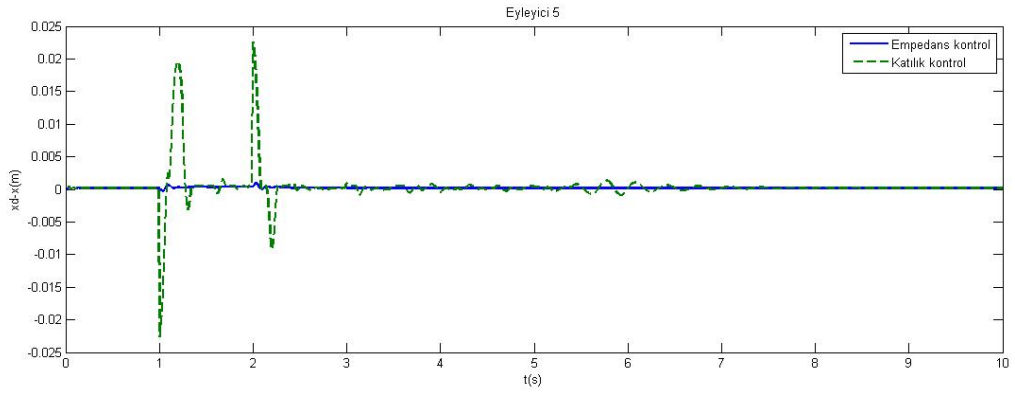
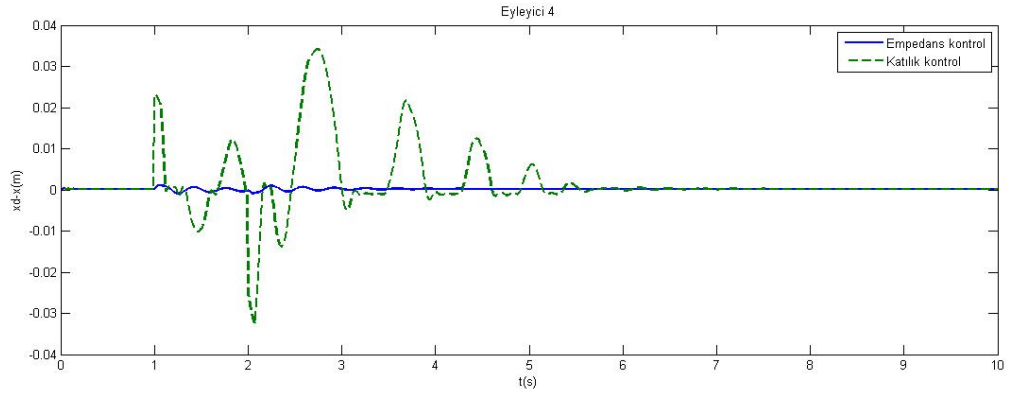
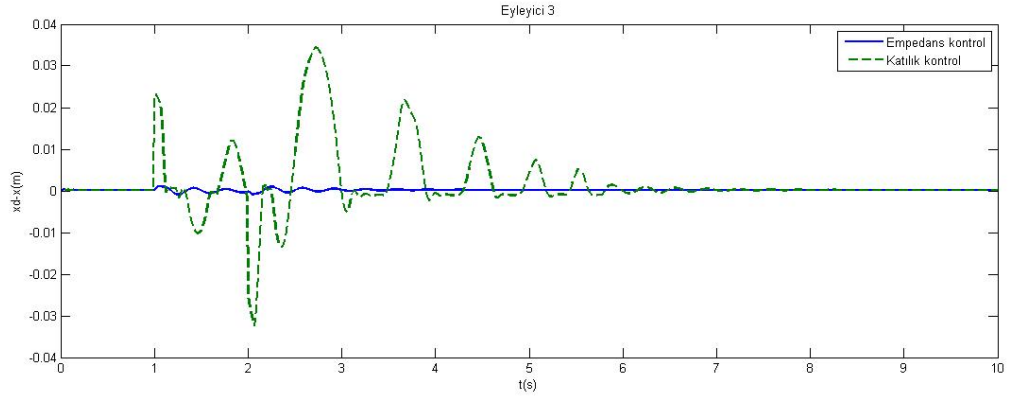
Simülasyon giriş kuvvet ve moment değerleri olarak kare dalga şeklinde girişler uygulanacaktır. Hareketli tabla üzerine sırasıyla F_x yönünde $+5N$, F_y yönünde $+5N$, F_z yönünde $+40N$, M_x yönünde $+1Nm$, M_y yönünde $+1Nm$, M_z yönünde $+1Nm$ değerinde girişler uygulanacaktır. Bu giriş değerlerine ait grafiksel gösterim Şekil 4.15-4.16 da verilmiştir. Kontrol modeli olarak pozisyon tabanlı empedans kontrol yapısı esas alındığından, sonuç olarak uygulanan aynı kuvvet-moment değerlerinde katılık kontrolü ve

empedans kontrolüne ait eyleyicilerdeki pozisyon hataları, hareketli tablanın öteleme ve dönme hareketleri birbirleriyle karşılaştırılacak, kararlılık durumları incelenecektir. Sistem parametreleri olarak Çizelge 4.2 deki değerler kullanılacaktır. Empedans kontroldeki kütle ve sönüm etkilerinin daha net görülebilmesi için katılık matrisiyle aynı esneklik katsayısı (K) değeri kullanılmaktadır.

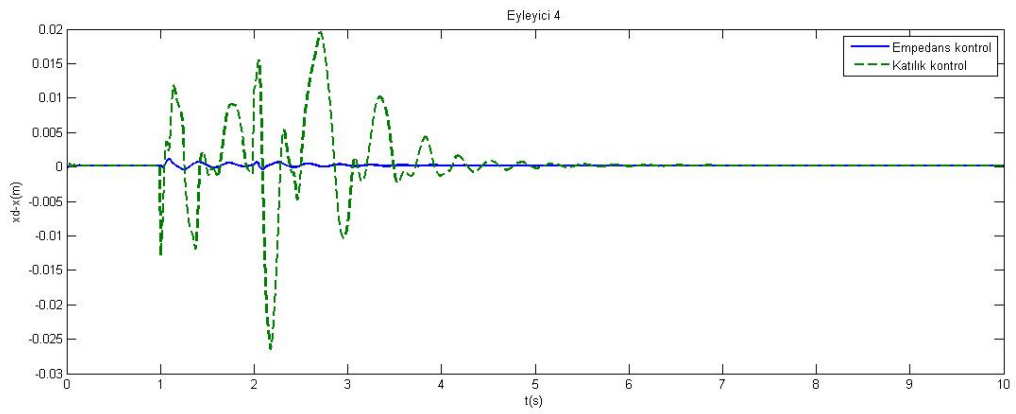
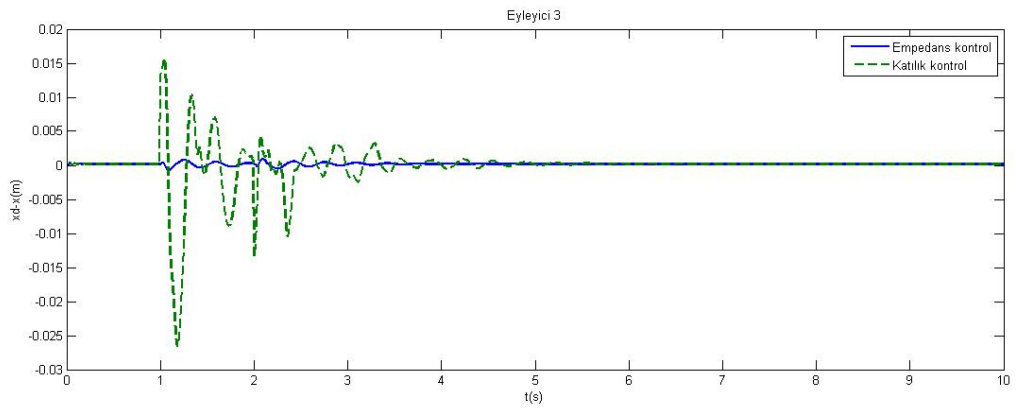
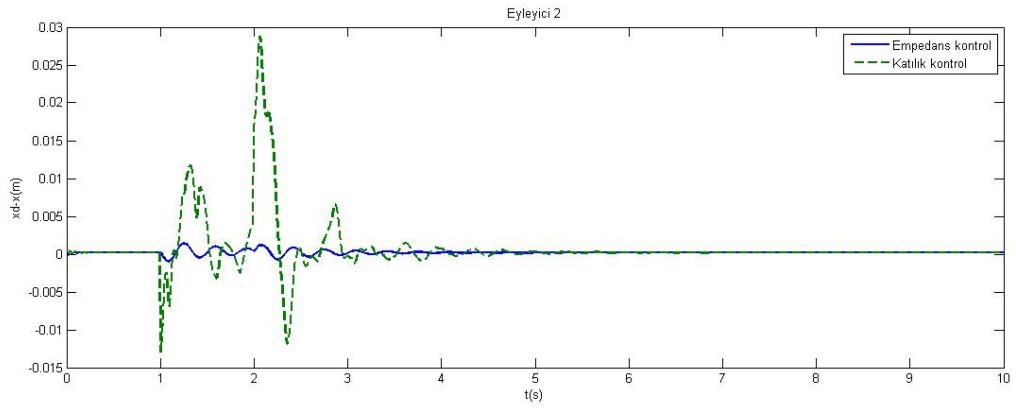
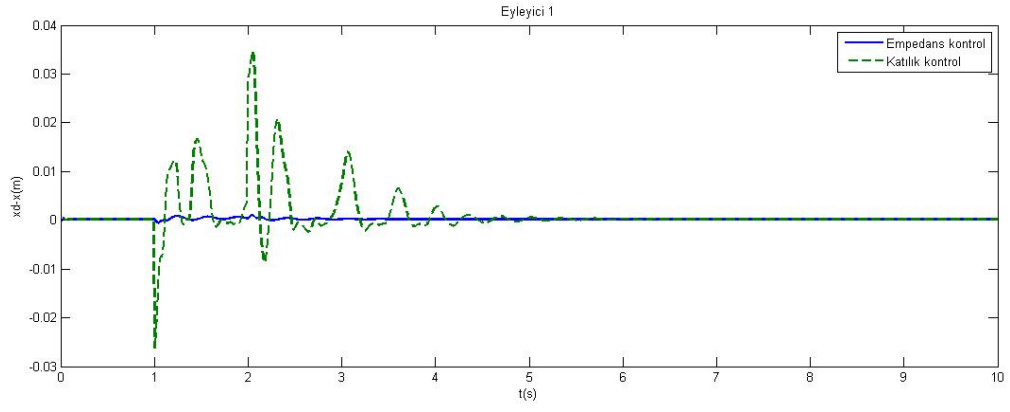


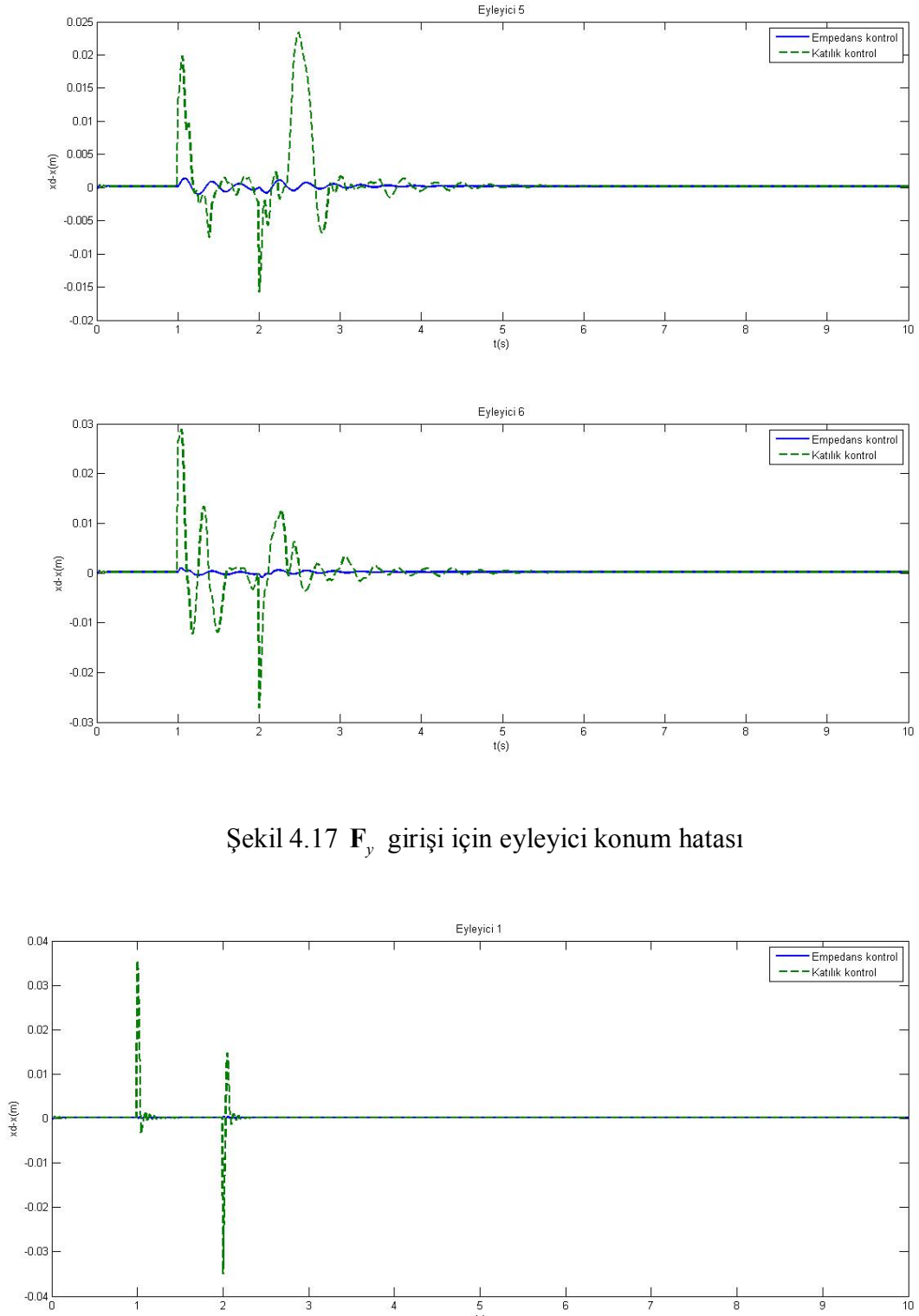
Şekil 4.15 Simülasyon için kuvvet-moment giriş değerleri



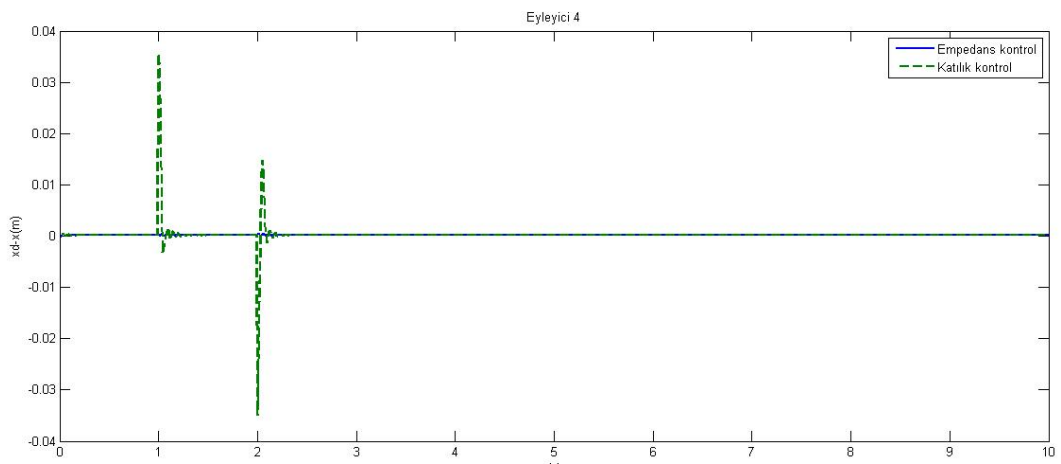
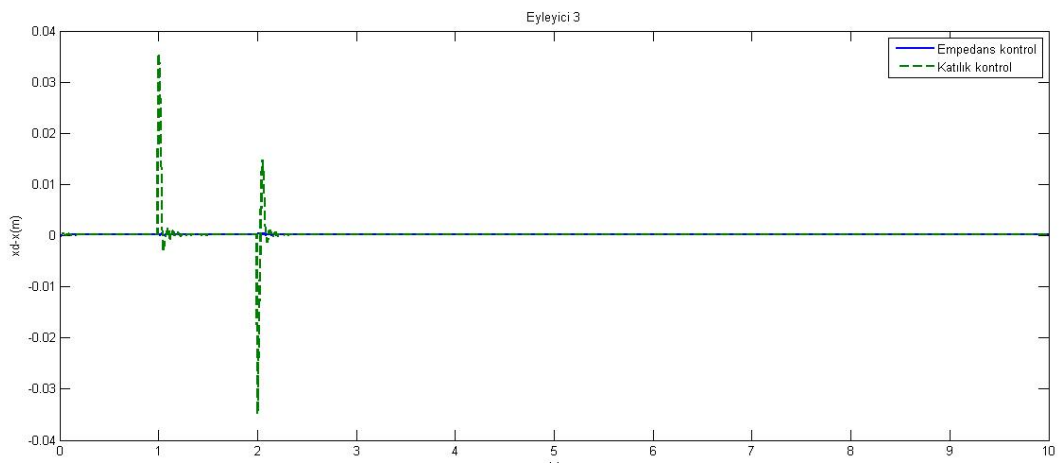
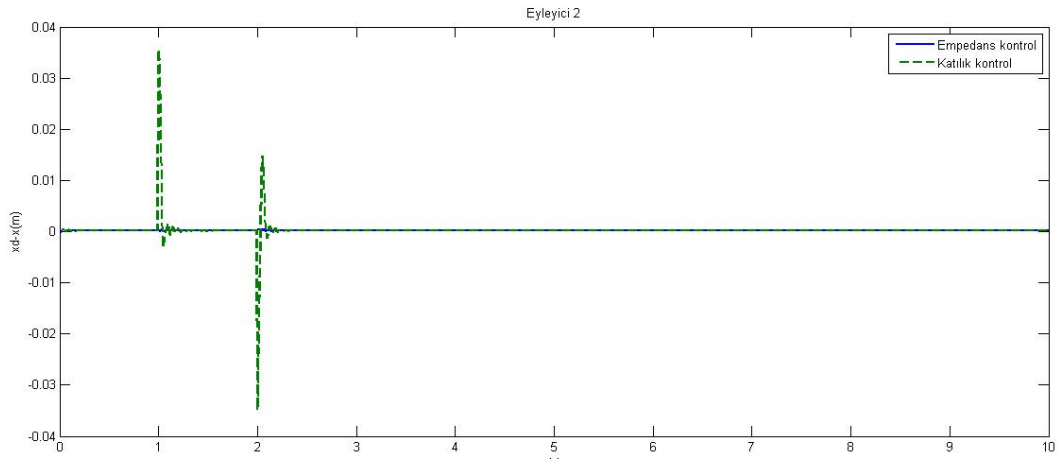


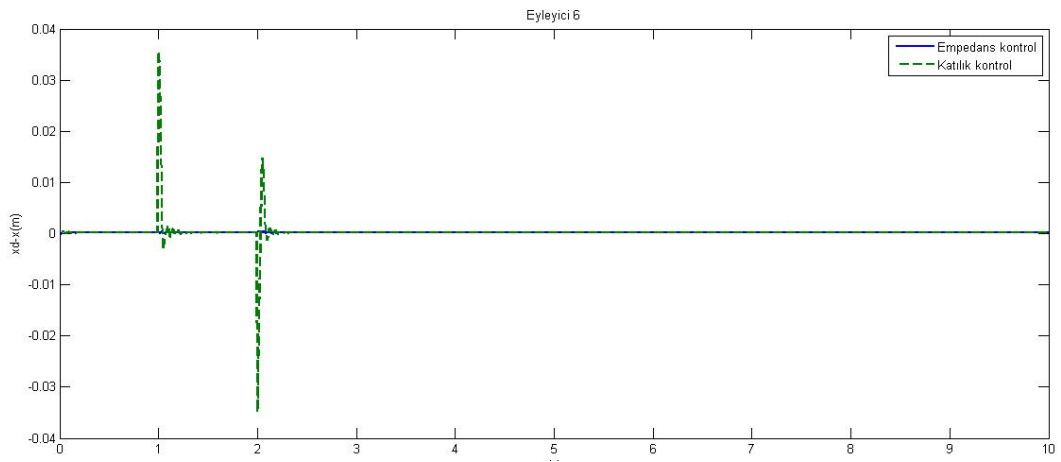
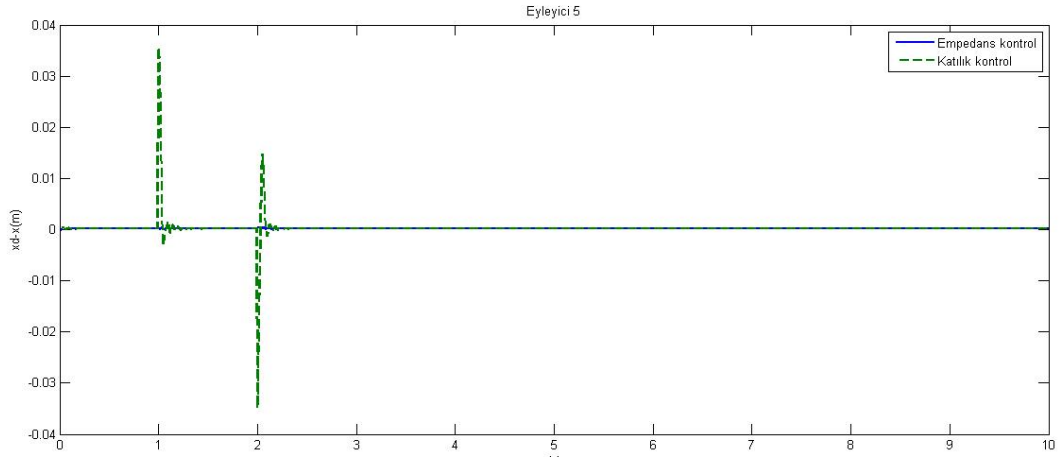
Şekil 4.16 F_x girişi için eyleyici konum hatası



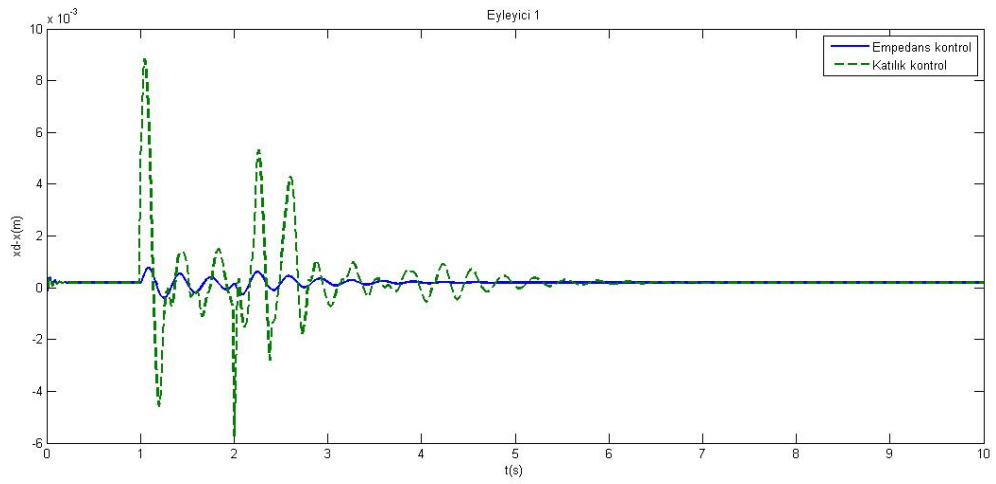


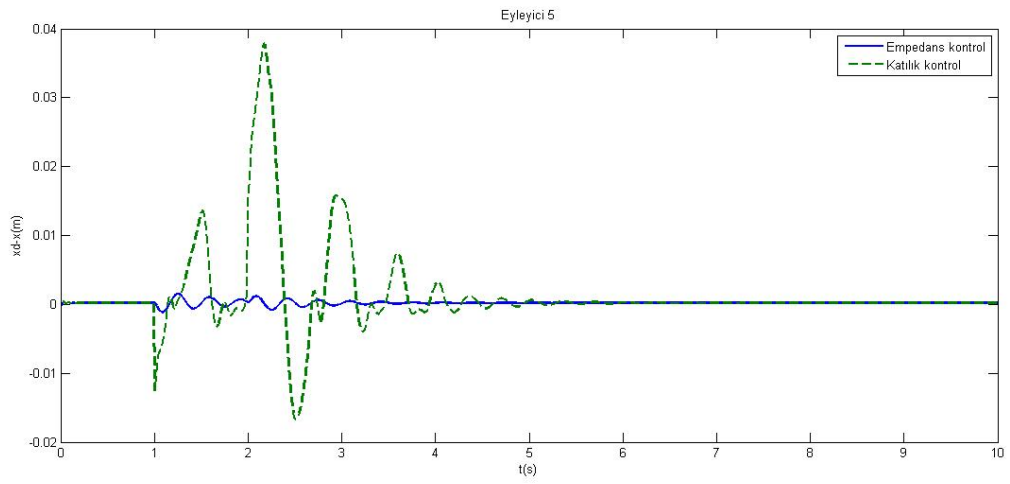
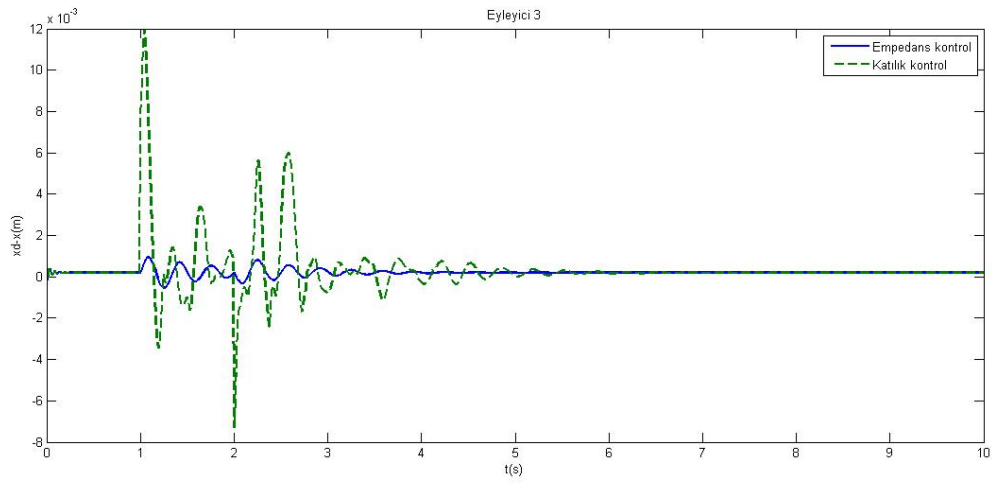
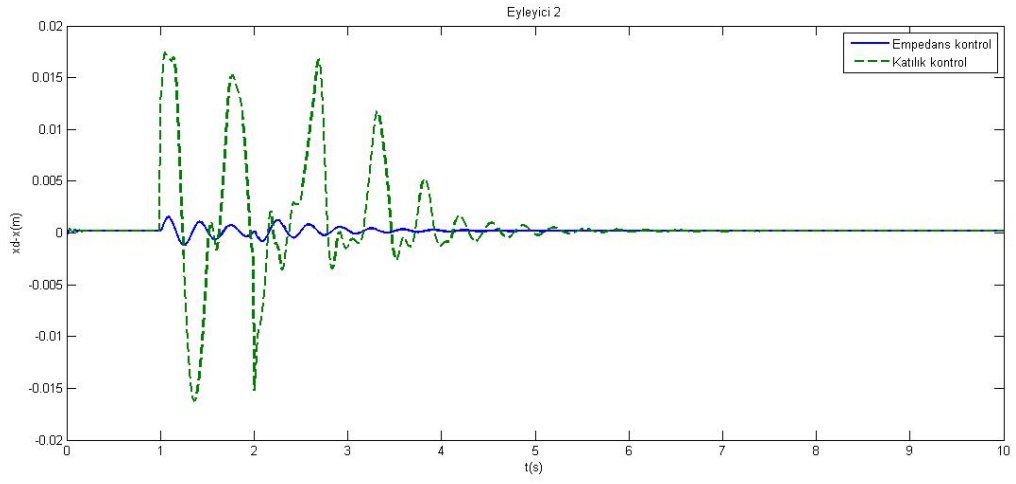
Şekil 4.17 F_y girişi için eyleyici konum hatası

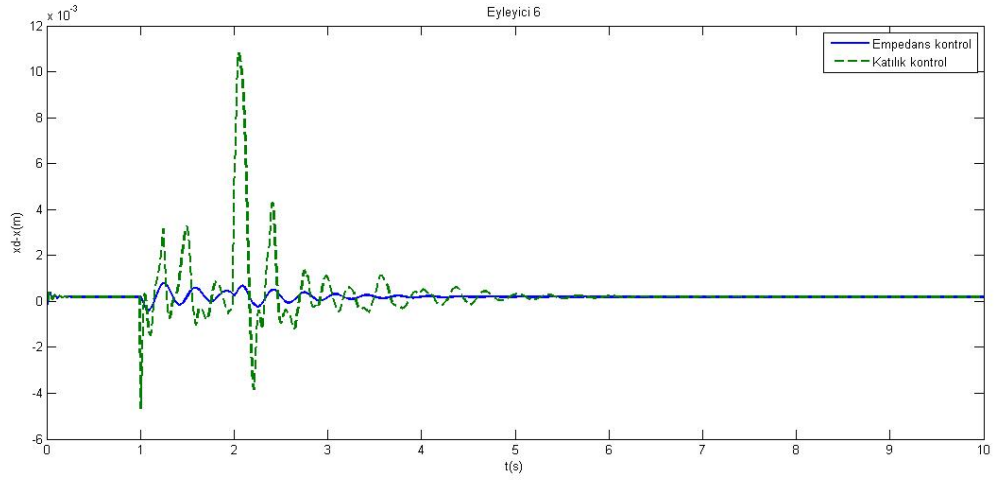




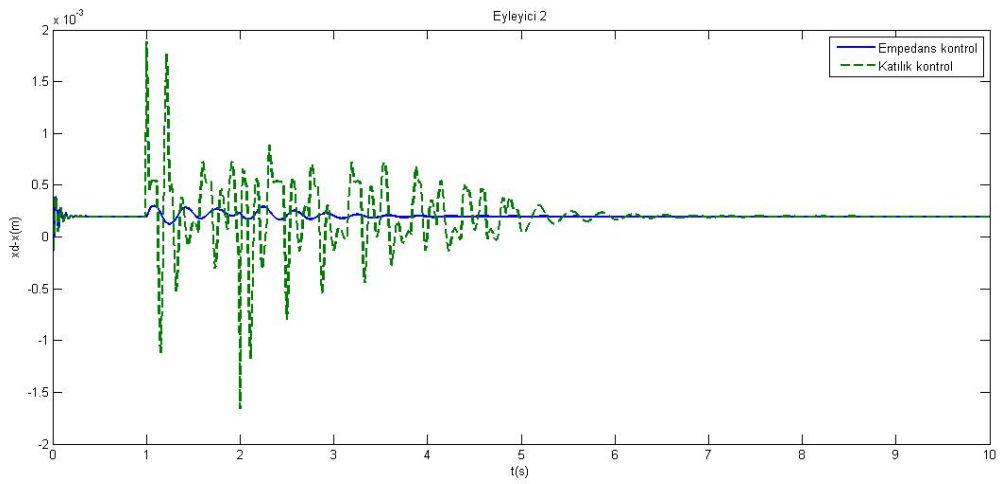
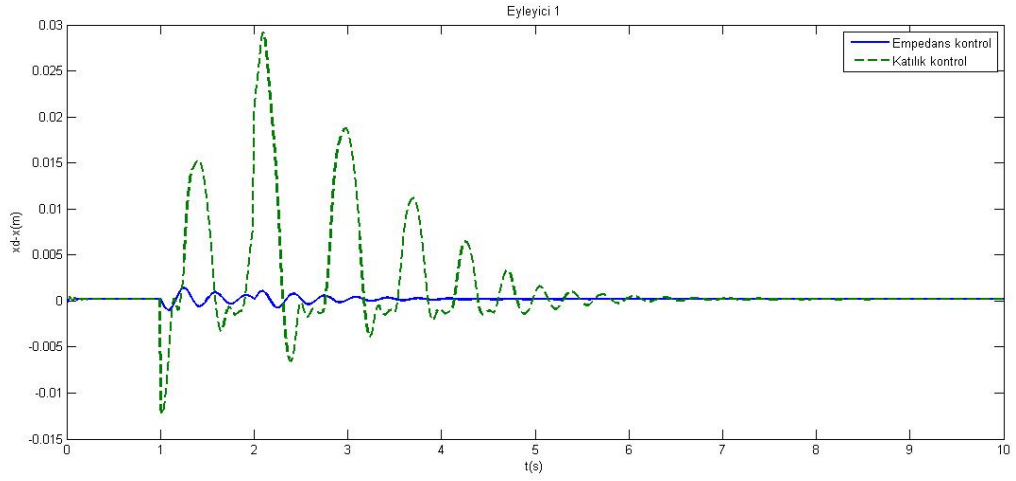
Şekil 4.18 F_z girişi için eyleyici konum hatası

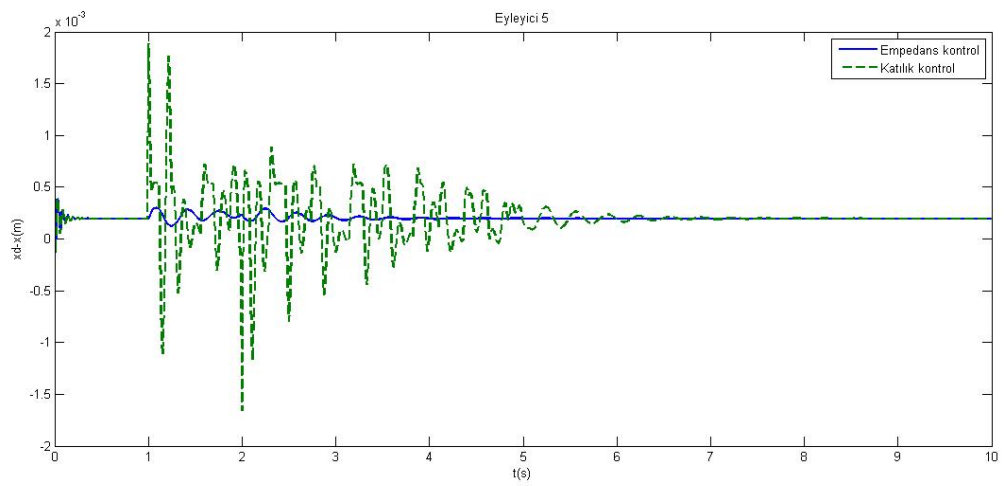
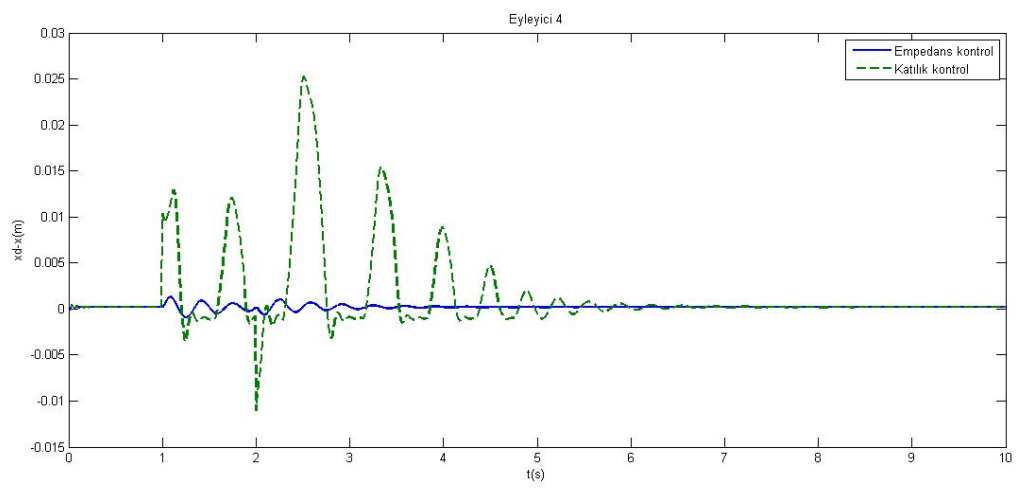
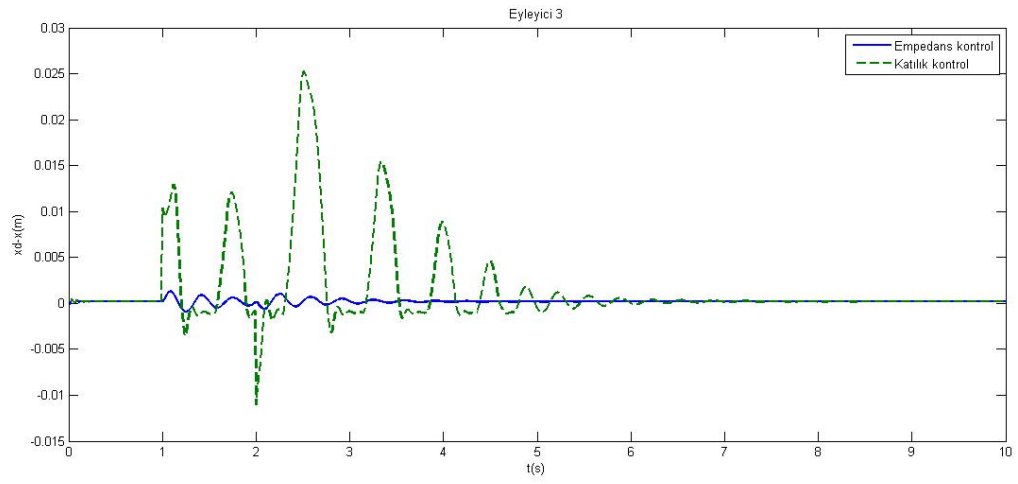


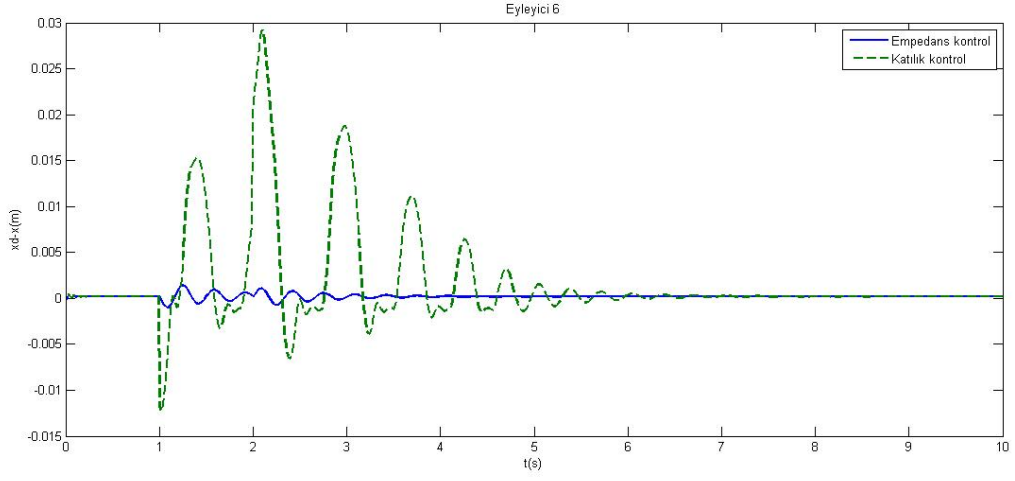




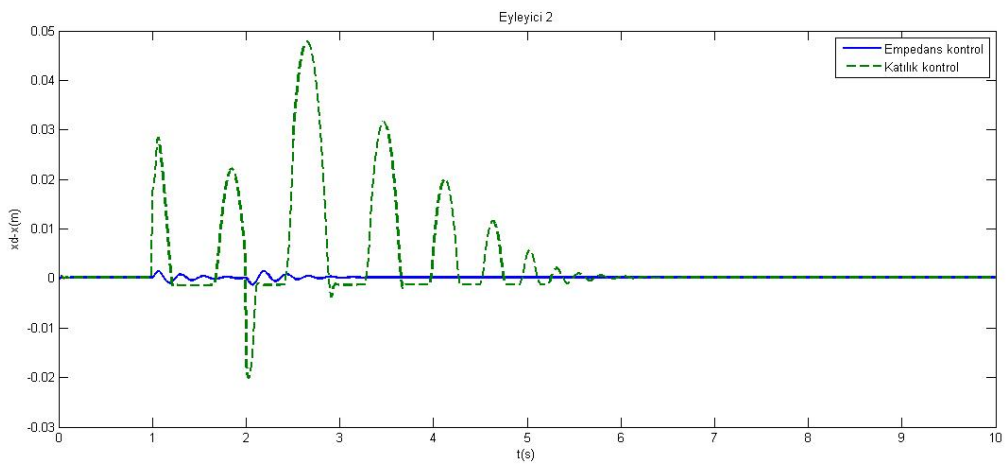
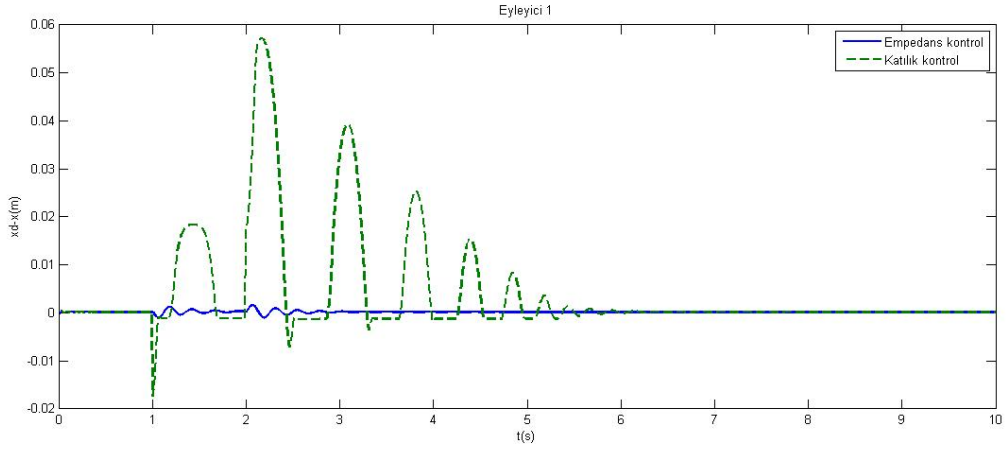
Şekil 4.19 M_x girişi için eyleyici konum hatası

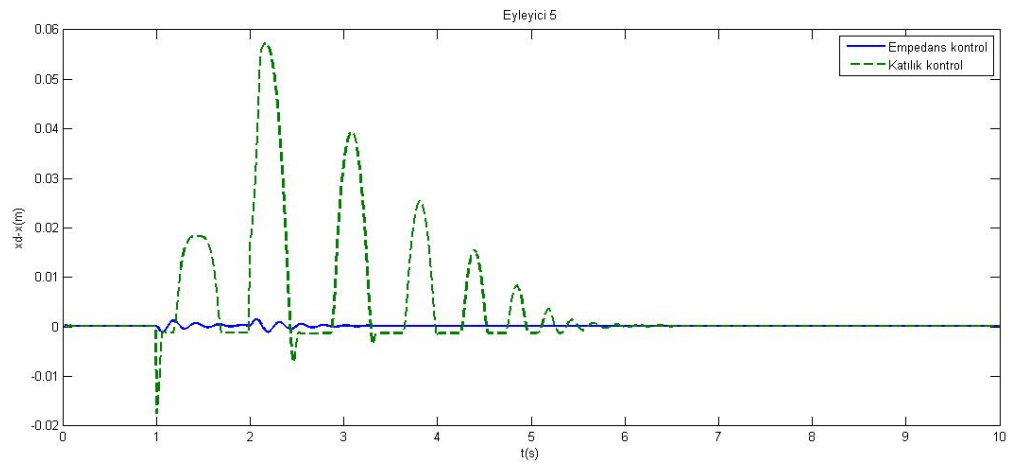
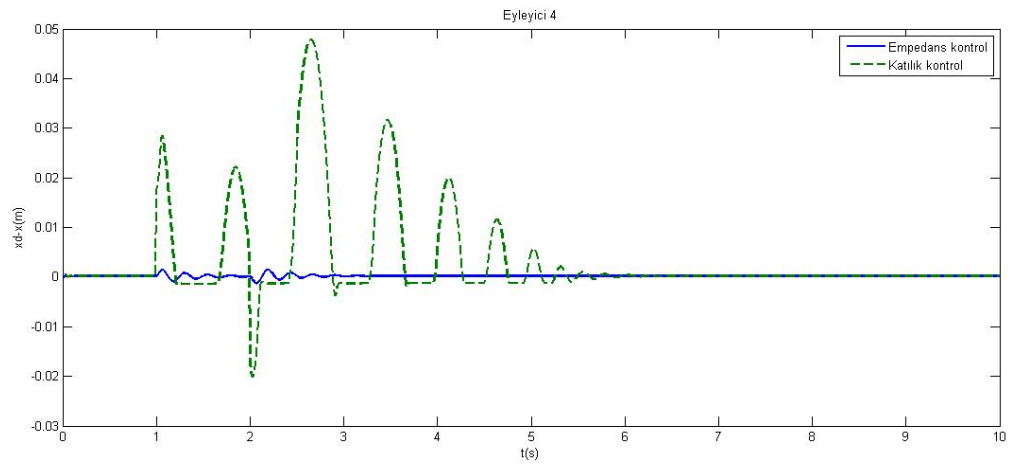
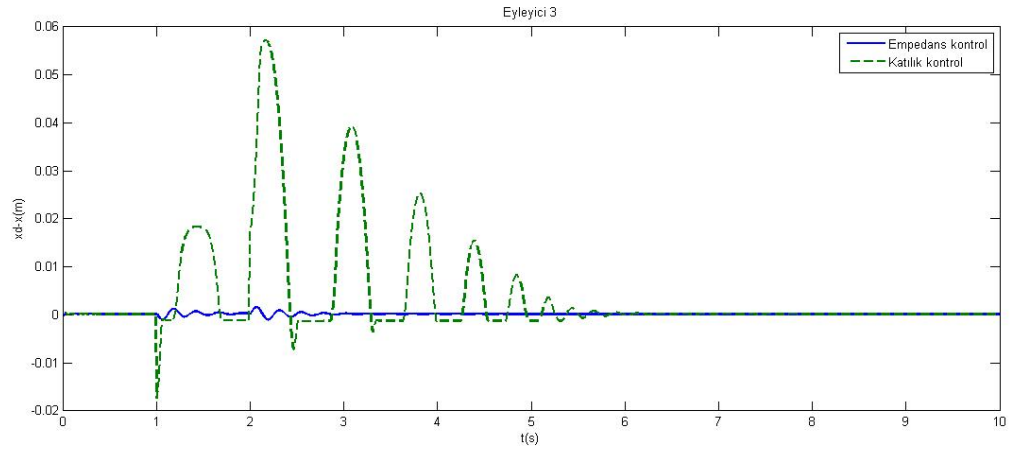


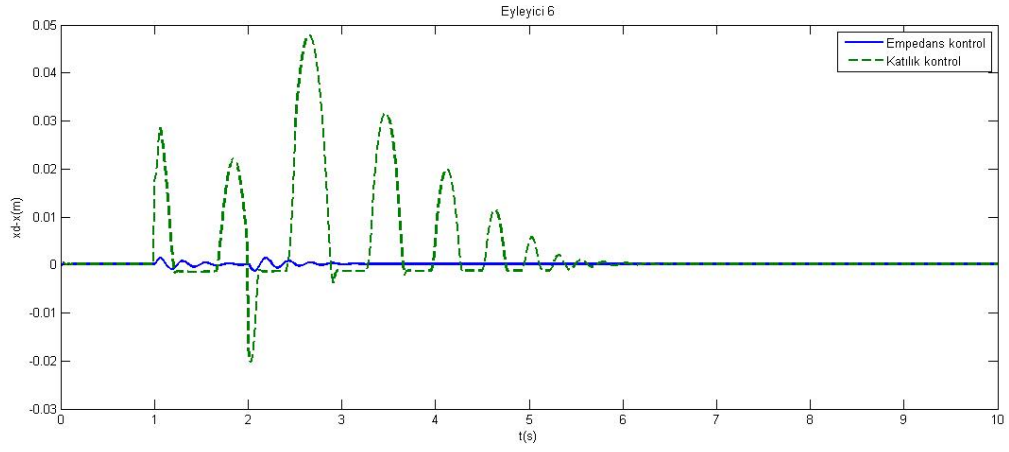




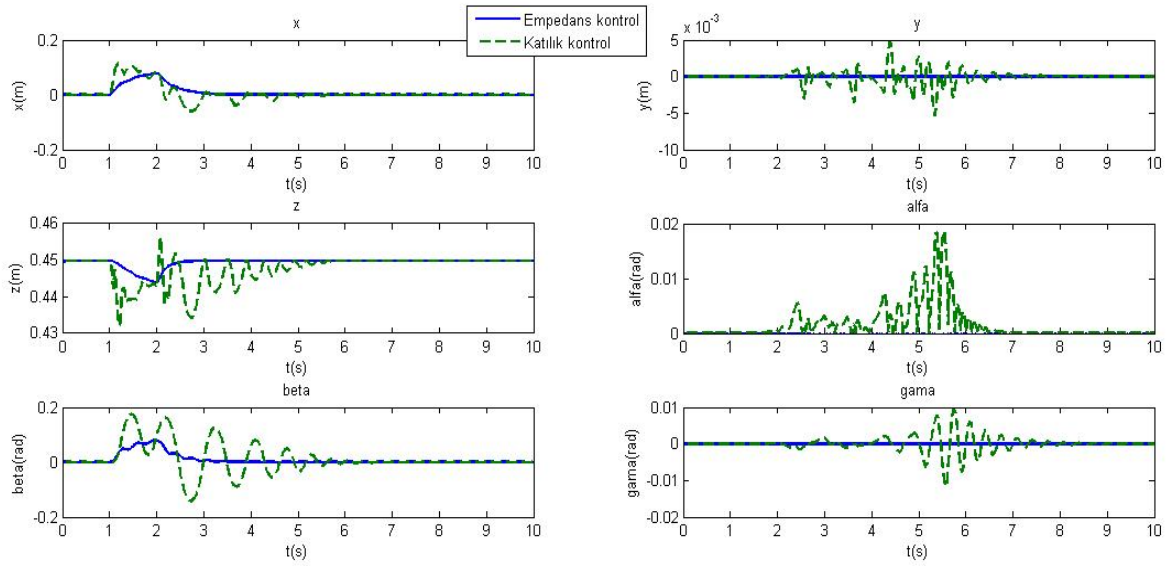
Şekil 4.20 M_y girişi için eyleyici konum hatası



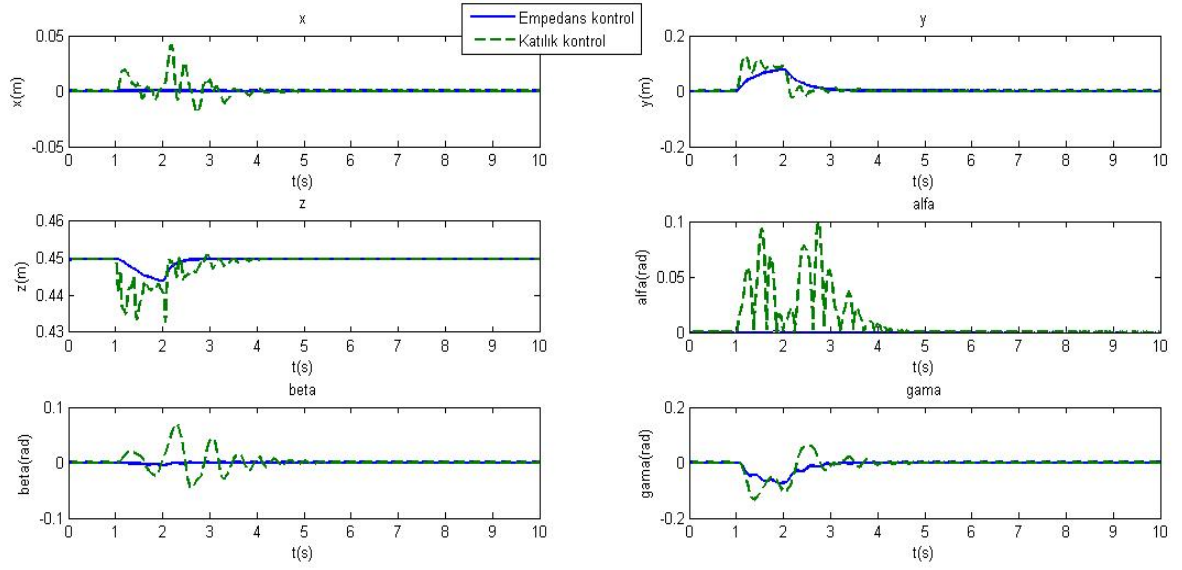




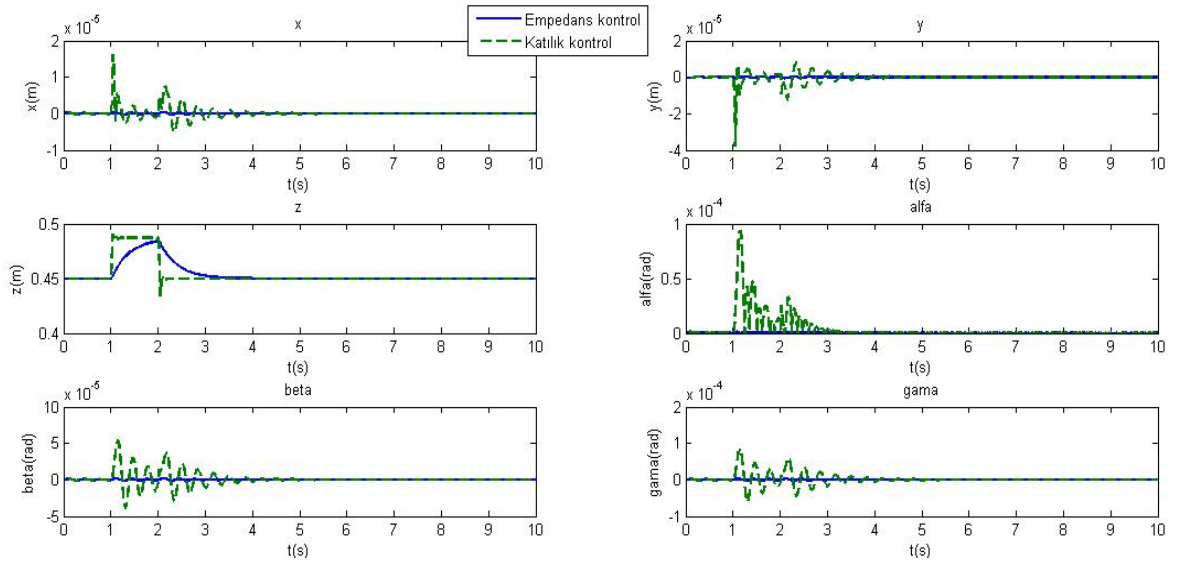
Şekil 4.21 M_z girişi için eyleyici konum hatası



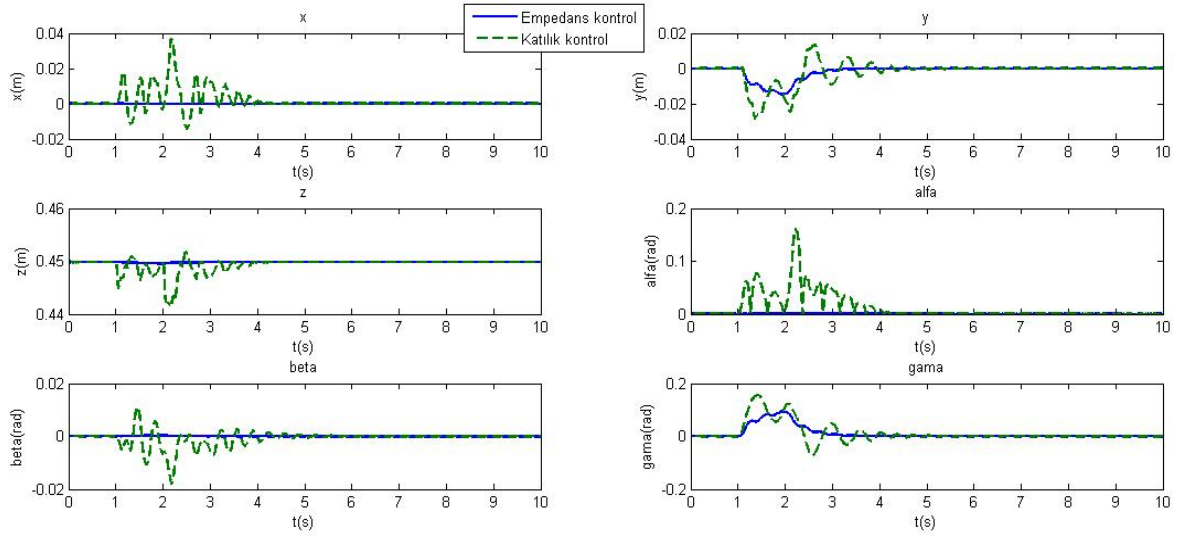
Şekil 4.22 F_x girişi için hareketli tabla pozisyonları



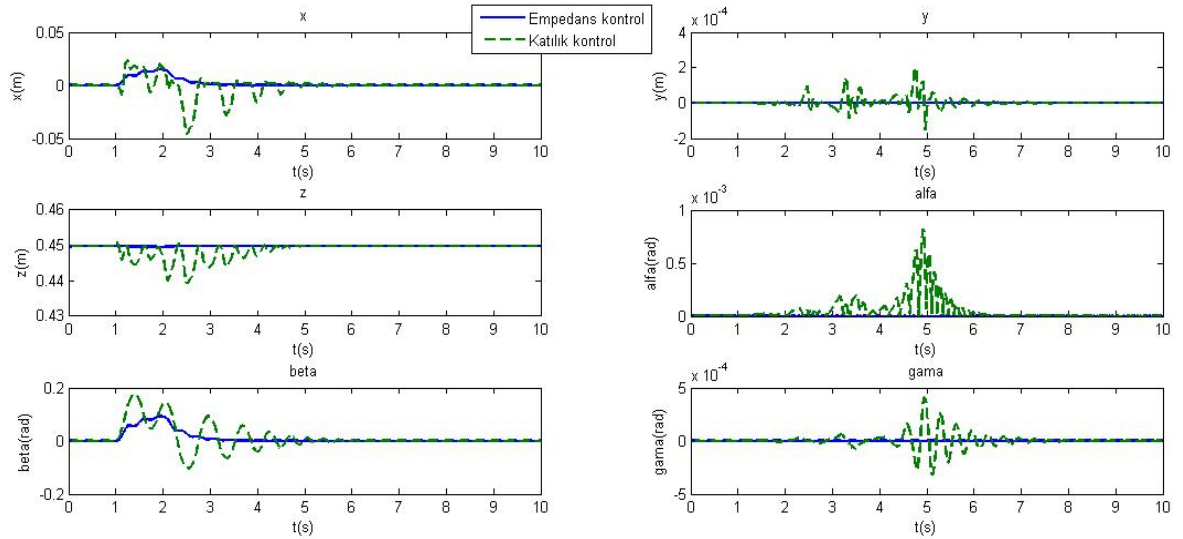
Şekil 4.23 F_y girişi için hareketli tabla pozisyonları



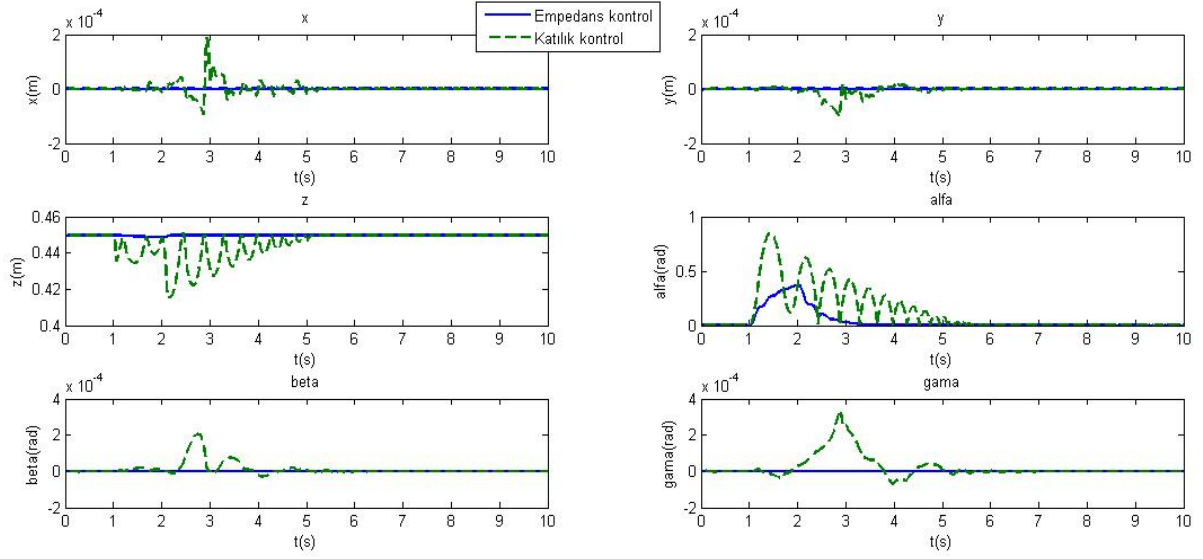
Şekil 4.24 F_z girişi için hareketli tabla pozisyonları



Şekil 4.25 M_x girişi için hareketli tabla pozisyonları



Şekil 4.26 M_y girişi için hareketli tabla pozisyonları



Şekil 4.27 M_z girişi için hareketli tabla pozisyonları

4.5 Sonuç

3-3 Stewart Platformuna uygulanan $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ kuvvet ve momentlerinin PD tabanlı-Empedans kontrol ve PD tabanlı-Katılık kontrolüyle kontrolleri sağlanmış, sistem cevapları elde edilmiştir. Buradaki kontrol yapısı geribeslenen kuvvetin, empedans ve katılık kontrol modelleri yardımıyla pozisyon ve hız bilgisine dönüştürülerek PD kontrol ile kontrolünü içermektedir. Bundan dolayı iki kontrol türünde incelenmesi ve karşılaştırılması gereken bilgiler; eyleyici üzerindeki kuvvet geribeslemesinden kaynaklanan pozisyon hataları ($x_d - x$) ve hareketli tabla pozisyonları ($x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$) olmalıdır. Sistem parametreleri olarak Çizelge 4.2 deki değerler kullanılmıştır. Empedans kontroldeki kütle ve sönüm etkilerinin daha net görülebilmesi için katılık matrisiyle aynı esneklik katsayısı (K) değeri kullanılmaktadır.

Simülasyon giriş kuvvet ve moment değerleri olarak kare dalga şeklinde girişler uygulanmıştır. Hareketli tabla üzerine sırasıyla F_x yönünde $+5N$, F_y yönünde $+5N$, F_z yönünde $+40N$, M_x yönünde $+1Nm$, M_y yönünde $+1Nm$, M_z yönünde $+1Nm$ değerinde girişler uygulanmıştır.

Buna göre, hareketli tabla pozisyonları incelendiğinde; katılık kontrolünde, tek ekseninde bir giriş olmasına karşın sistemin neredeyse her ekseninde düzensiz bir hareket gözlenmiştir. Bu istenmeyen bir durumdur. Katılık kontrolünde daha hızlı hareket elde edilmesine karşın

sistemin kararlı hale gelmesi zaman almakta ve belli bir süre salınım hareketi devam etmektedir. Empedans kontrolde ise sadece giriş uygulanan kısımda bir hareket gözlemlenmektedir. Katılık kontrolüne göre daha yavaş hareket elde edilmesine karşın daha düzenli bir hareket gözlemlenmiştir.

Empedans kontrolde ortaya çıkan eyleyici hata miktarlarının katılık kontrolüne göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Katılık kontrolündeki yay hareketi nedeniyle sistem uzun süre salınım yapmakta ve kararlı duruma çok geç ulaşmaktadır. Bundan dolayı ani ve seri hareketlerde Katılık kontrolü uygulaması sıkıntı yaratabilir. Empedans kontrol bu yönden de daha avantajlı gözükmektedir, yapısındaki kütle sönüm etkisi sistemin daha hassas girişlere cevap verebilmesini, ani ve seri hareketlere de bozulmadan uyum gösterebilmesini sağlamaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir paralel mekanizma olan 3-3 Stewart Platformunda gerçek zamanlı kuvvet uygulaması üzerinde durulmuştur. Kuvvet kontrolünde pozisyon tabanlı ve kuvvet geribeslemeli empedans kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Burada, platforma etkiyen kuvvetlerin her bir eyleyiciye etkisi Jakobian matrisi yardımıyla tespit edilmiş olup, bu kuvvetlerin bahsedilen empedans kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi sağlanmıştır. Buna ilaveten, katılık kontrolü üzerinde de durularak empedans kontrol yöntemiyle karşılaştırması yapılmıştır.

Ayrıca, gerçek zamanlı uygulamanın yapılabilmesi için ihtiyacımız olan düz kinematik problem hassas bir şekilde çözümlenmiştir. Düz kinematik çözümlemede Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Newton-Raphson yönteminde iterasyon yapılarak yakınsama yoluyla çözüme gidildiğinden sistemin bir miktar yavaşlamasına neden olabilir. Lineer olmayan denklemlerin çözümünde iterasyon kullanılmayan yöntemlerde denenerak hız açısından karşılaştırma yapılabilir.

Bundan sonraki çalışmalarda, eyleyiciyi modellemekte kullandığımız yay-sönüm empedans modeli üzerinde durularak değişik tipteki eyleyici kontrol modelleri denenebilir.

KAYNAKLAR

Abderraouf Benali Paul Richard Philippe Bidaud (1999) "Design, control and evaluation of a six DOF force feedback interface for virtual reality applications" Laboratoire de Robotique de Paris

Akentli, (2007a) "Nonlinear Programming 3: Constrained Optimization Techniques"

Almeida, F.; Lopes, A.; Abreu, P.: "Force-Impedance Control: a New Control Strategy of Robotic Manipulators", 126-137.

Alp, A. B., and Agrawal, S. K., (2002a) "Cable Suspended Robots: Design, Planning and Control", Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, D.C., May 11-15, 2002a, pp.4275-4280.

Ang, M. H. Jr., Wang, W., Loh, R. N. K., and Low, T. S. (1997) "Passive Compliance from Robot Limbs and Its Usefulness in Robotic Automation", Journal of Intelligent System, Vol. 20, 1997, pp. 1-21.

Baeten, J., and De Schutter, J. (2002) "Hybrid Vision/Force Control at Corners in Planar Robotic-Contour Following", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 7, No. 2, June 2002, pp. 143-151.

Bhaskar Dasgupta ve T.S. Mruthyunjaya, (2000) "The Stewart platform manipulator: a review", Mechanism and Machine Theory 35 (2000) 15-40,1998.

Baron, L., and Angeles, J. (1995) "A Linear Algebraic Solution to the Direct Kinematics of Parallel Manipulators Using a Camera", In Proceedings of the 9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milano, August 1995.

Bashar S. El-Khasawneh, (1998) "Design and Analysis of Paralel Link Machine Tools", University of Illionis, Urbana

Bonev, I. A., Ryu, J. K., Kim, S. G., and Lee, S. K. (2001) "A Closed-Form Solution to the Direct Kinematics of Nearly General Parallel Manipulators with Optimally Located Three Linear Extra Sensors", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 2, April 2001, pp. 148-156.

Bonev, I.A., Ryu,J., (2000) " A New method for solving the kinematics of general 6-6 Stewart Platforms using three linear extra sensors, Mechanism and Machine Theory, 35, 423-436

Borowiec, J.; Tzes, A. (1995) "Frequency-Shaped Implicit Force Control of Flexible Link Manipulators", IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1995) 913-918.

Broenink, J. F.; Visser, M; Tiernego, M. L. J. (1998) "Simulation of Sliding Mode Impedance Control for a 6 DOF Anthropomorphic Robot", Proceeding of the 12th European Simulation Multiconference, Manchester UK, June 16-17 (1998) 561-565.

Caccavale, F.; Natale, C.; Siciliano, B.; Villani, L.(1999) "Quaternion-Based Impedance Control for Dual-Robot Cooperation", 9th International Symposium of Robotics Research, Snowbird, UT, October (1999) 42-49.

Caccavale, F.; Natale, C.; Siciliano, B.; Villani, L.(1999) "Six-DOF Impedance Control Based on Angle/Axis Representations", IEEE Transections on Robotics and Automation, Vol. 15 (1999) 289-300.

- Caccavale, F.; Siciliano, B.; Villani, L.(1999) "Robot Impedance Control with Nondiagonal Stiffness", IEEE Transection on Automatic Control, Vol. 44 (1999) 1943-1946.
- Carignan, C. R.; Cleary, K. R.(2000) "Closed-Loop Force Control for Virtual Haptic Simulation of Virtual Environments", Haptics-e, www.haptics-e.org ,Vol. 1, No. 2 (2000).
- Chae, H. A.; Atkeson, C. G.; Hollerbach, J. M.(1982) "Model Based Control of A Robot Manipulator", The Mit Press, Cambridge, MA, (1982).
- Chai, K. S., and Young, K. (2001) "Designing a Stewart Platform-Based Cooperative System for Large Component Assembly", IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 2001.
- Chan, S. P., and Liaw, H. C. (2000) "Experimental Implementation of Impedance Based Control Schemes for Assembly Task", Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 29, 2000, pp. 93-110.
- Cheng, H, Liu, Y. K., and Li, Z., (2003) "Dynamics and Control of Redundantly Actuated Parallel Manipulators", IEEE / ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 8, No. 4, December 2003, pp. 483-491.
- Chenthilvel M. Subramanian (1993) "Development of a Graphical User Interface for a Stewart Platform" Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida, August 1993
- Chiaverini, S.(1999) "A Survey of Robot Interaction Control Schemes with Experimental Comperison", IEEE/ASME Transection on Mechatronics, Vol. 4 (1999) 273-285.
- Chiaverini, S.; Siciliano, B.; Villani, L.(1999) "A Survy of Robot Interaction Control Schemes with Experimental Comparison", Proc. IEEE/ASME Transections on Mechatronics, Vol. 4, (1999) 273-285.
- Chou, J. C. K., (1992) "Quaternion Kinematics and Dynamic Differential Equations", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 1, February 1992.
- Cin, Selçuk., (2007) "Uzaysal Hareket Eden Araçlara Kumanda Etmek Maksadıyla Bir İnsan-Makine Arayüzü Olarak 3-3 Stewart Gough Platformun Çalışma Uzayı Merkezli Tasarımı" Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Çetin, Ahmet Emre., (2002) "Handling Interaction Forces Between an Object and Cartesian Robot Arm in Planar Motion", Marmara University, İstanbul
- Dash, A. K., Chen, I. M., Yeo, S. H., and Yang, G., (2001) "Instantaneous Kinematics and Kinematic Control of In-Parallel Robots", In Proceedings of the Asian Conference on Robotics and its Applications, Singapore, June 6-8, 2001, pp. 7-12.
- Dash, A. K., Chen, I. M., Yeo, S. H., and Yang, G. (2001) "Instantaneous Kinematics and Singularity Analysis of Three-Legged Parallel Manipulator", Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Maui, Hawaii, USA, October 29-November 3, 2001, pp. 1275-1280.
- Davies, T. H. (1981) "Kirchhoff's Circulation Law Applied to Multi-Loop Kinematic Chains", Mechanism and Machine Theory, Vol. 16, 1981, pp. 171-183.
- Dhingra, A. K., Almadi, A. N., and Kohli, D. (2000) "A Grobner-Sylvester Hybrid Method for Closed-Form Displacement Analysis of Mechanisms", Transactions of the ASME Journal

of Mechanical Design, Vol. 122, December 2000, pp. 431-438.

Dongming Gan, Qizheng Liao, Jian S. Dai, Shimin Wei, L.D. Seneviratne (2009) "Forward displacement analysis of the general 6–6 Stewart mechanism using Gröbner bases", Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China, Department of Mechanical Engineering, School of Physical Sciences and Engineering, King's College London, University of London, Strand, London WC2R2LS, UK

Ebert-Uphoff, I., Gosselin, C. M., and Laliberte, T., (2000) "Static Balancing of Spatial Parallel Platform Mechanisms-Revisited", Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 122, March 2000, pp. 43-51.

Eppinger, S. D., and Seering, W. P. (1992) "Three Dynamic Problems in Robot Force Control", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 2, December 1992, pp. 751-758.

Fabrizio Caccavale, Ciro Natale, Bruno Siciliano and Luigi Villani, (1999) "Six-DOF Impedance Control Based on Angle/Axis Representations" IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, no. 2, april 1999

Fabrizio Caccavale, Pasquale Chiacchio, Alessandro Marino and Luigi Villani (2008) "Six-DOF Impedance Control of Dual-Arm Cooperative Manipulators" IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 13, no. 5, october 2008

Fasse, E. D., and Gosselin, Clement M. (1999) "Spatio-Geometric Impedance Control of Gough-Stewart Platforms", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 2, April 1999, pp. 281-288.

Fasse, E. D.; Broenink, J. F.(1999) "A Spatial Impedance Controller for Robotic Manipulation", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. XX (1999) 1-12.

François Comin, (2006) "Elbow Joint Measurement Using Stewart Parallel Mechanism", Brunel University, West London

Funda, J., and Paul, R. P. (1990) "A Computational Analysis of Screw Transformations in Robotics", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 3, June 1990, pp. 348-356.

Goddard, R. E., Zheng, Y. F., and Hemami, H. (1992) "Dynamic Hybrid Velocity/Force Control of Robot Compliant Motion Over Globally Unknown Objects", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8 No. 1, February 1992, pp. 132-138.

Griffis, M., and Duffy, J. (1989) "A Forward Displacement Analysis of a Class of Stewart Platforms", Journal of Robotic Systems, Vol. 6, No. 6, 1989, pp. 703-720.

Herder, J. L., and de Visser, H. (2000) "Force Directed Design of a Voluntary Closing Hand Prosthesis", Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference, Baltimore, Maryland, September 10-13, 2000.

Hogan, N.(1981) "Impedance Control of Robotic Manipulator", Winter Annual Meeting of the ASME, (1981).

- Hogan, N. (1985) "Impedance Control: An Approach o Manipulation: Part I-II-III", *Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, Vol. 107 (1985) 1-24.
- Hsu, F. Y.; Fu, L. C.(1995) "A New Design of Adaptive Fuzzy Hybrid Force/Position Controller for Robot Manipulators", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1995) 863-868.
- Hu, V.; Queiroz, M.; Burg, T.; Dawson, D.(1995) "Adaptive Position/Force Control of Robot Manipulator Without Velocity Measurements", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1995) 887-892.
- Hyde, J. M.; Cutkosky, M. R. (2000) "Contact Transition Control: An Experimental Study", Center for Design Research, Stanford University, Stanford, California, USA (Personal communication), (2000)
- Ikeura, R.; Inooka, H.(1995) "Variable Impedance Control of a Robot Cooperation with a Human", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1995) 3097-3102.
- Inoue, Y.; Kitamura, S.; Kidawara, Y.(1991) "Force Feedback Control and Collision Avoidance of Redundant Manipulator", *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS*, November 3-5 (1991) 149-152.
- Ivan J. Baiges-Valentin, (1996) "Dynamic Modeling of Parallel Manipulators" University of Florida
- James K. Mills, (2007) "Hybrid control: A constrained motion perspective" *Robotics and Automation Laboratory Department of Mechanical Engineering University of Toronto Toronto, Ontario Canada M5S 1A4*
- Jason L. Pusey, (2006) "Cable Suspended Paralel Robots: Design, Workspace and Control", Faculty of the University of Delaware
- Jazidie, A.; Tsuji, T.; Ito, K. (1992) "Multi-Point Compliance Control of Dual-Arm Robots", *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Raleigh, NC, July 7-10 (1992) 65-70.
- Jinno, M.; Ozaki, F.; Tatsuno, K.; Takahashi, M. et al (1995) "Development of a Force Controlled Robot for Grinding, Chamfering and Polishing", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1995) 1455-1460.
- Jinno, M.; Yoshimi, T.; Abe, A.(1992) "Force Controlled Grinding Robot System for Unstructured Tasks", *Proc. Of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, July 7-10 (1992) 1117-1124.
- Ji, P., and Wu, H. (2003) "Kinematics Analysis of an Offset 3-UPU Translational Paralel Robotic Manipulator", *Robotics and Automation*, Vol. 42, 2003, pp. 117-123.
- J. J. Craig and M. H. Raibert, (1979) "A Systematic Method of Hybrid Position/Force Control of a Manipulator" in *Computer Software and Applications Conference*, IEEE Computer Society. Chicago, Illinois, pp. 446-451, November 1979.
- Jung, S.; Hsia, T. C.(1995) "On Neural Network Application to Robust Impedance Control of Robot Manipulators", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1995) 869-874.
- Kazuhiro Kosuge, Minoru Okuda, Toshio Fukuda, Toshiki Koduka, Tomoo Mizuno, (1993)

“Input/Output Force Analysis of Stewart Platform Type of Manipulators”, proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Yokohama, Japan July 26-30, 1993

Khalil, W., and Besnard, S. (1999) “Self Calibration of Stewart-Gough Parallel Robots without Extra Sensors”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 6, December 1999, pp. 1116-1221.

Kim, D. H., Oh, J. H., Lee, J. W., and Park, K. T. (2003) “Closed-Form Kinematic Solution of a Non-Parallel Cable Reeving Crane System”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 217, Part C, 2003.

Kim, M. J.; Kwon, C.; Park, M. K.; Park, M. (1995) “A Stiffness Control of a Manipulator Using a Fuzzy Model”, IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems – IROS '95, (1995) 322-327.

Kim, S.; Park, M. (1991) “Fuzzy Compliance Robot Control”, IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS, November 3-5 (1991) 1628-1631.

Kolmanovsky, I. And N.H. McClamroch (1996) “Hybrid feedback laws for a class of nonlinear cascade systems” IEEE Transactions on Automatic Control 41, 1271-1281

Landers, R. G., and Ulsoy, A.G.(2000)“Model-Based Machining Force Control”, Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, Vol. 122, September 2000, pp. 521-527.

Laycock, S. D., and Day, A. M. (2003) “Recent Developments and Applications of Haptic Devices”, Published by The Eurographics Association and Blackwell Publishing Ltd. 2003, Computer Graphics Forum, Vol. 22, No. 2, 2003, pp. 117-132.

Lee, S. H., Song, J. B., Choi, W. C., and Hong, D., (2003) “Position Control of a Stewart Platform Using Inverse Dynamics Control with Approximate Dynamics”, Mechatronics, Vol. 13, 2003, pp. 605-619.

Liu, M. J., Li, C. X., and Li, C. N., (2000) “Dynamics Analysis of the Gough-Stewart Platform Manipulator”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 16, No. 1, February 2000, pp. 94-98.

Li, Q.; Tso, S. K.; Poo, A. N.(1998) “An Enhanced Computed-Torque Control Algorithm for Robot Manipulator”, Proceeding Instn. Mechanical Engineers, Vol. 212 Part I (1998) 11-15.

Lin, S. K., (1990)“Dynamics of the Manipulator with Closed Chains”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 4, August 1990, pp. 496-501.

Love, L. J.; Book, W. J.(1995) “Environment Estimation for Enhanced Impedance Control”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1995) 1854-1589.

Luca, A. D.; Mattone, R. (1995) “Modeling and Control Alternatives for Robots in Dynamic Cooperation”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1995) 138-145.

L. Stocco and S. E. Salcudean (1996) “A Coarse-Fine Approach to Force-Reflecting Hand Controller Design”, Department of Electrical Engineering The University of British Columbia Vancouver, British Columbia, Canada V6T 1Z4

Luo, Z.; Ito, M.(1993) “Control Design of Robot for Compliant Manipulation on Dynamic

- Environment”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 9 (June 1993) 286-296.
- Lu, Z.; Kawamura, S.; Goldenberg, A. A.(1991) “Sliding Mode Impedance Control and Its Application to Grinding Tasks”, IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS, November 3-5 (1991) 350-355.
- Lu, Z., Kawamura, S., and Goldenberg, A. A. (1995) “An Approach to Sliding Mode-Based Impedance Control”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.11, No. 5, October 1995, pp. 754-759.
- Luo, Z. W., and Ito, M. (1993) “Control Design of Robot Compliant Manipulation on Dynamic Environments”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 3, June 1993, pp. 286-296.
- Marquet, F., Company, O., Krut, S., and Pierrot, F. (2002) “Enhancing Parallel Robot Accuracy with Redundant Sensors”, ICRA 2002: 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington DC, USA, May 11-15, 2002, pp. 4114-4119.
- Marquet, F., Krut, S., Company, O., and Pierrot, F., (2001) “ARCHI: A New Redundant Parallel Mechanism: Modeling, Control, and First Results”, In Proceedings of the IROS 2001: 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Maui, Hawaii, USA, October 29 to November 3, 2001.
- Mason, M. T. (1981)“Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators”, IEEE Transection on Systems, Man, and Cybernetics SMC-11, June 6 (1981) 418-432.
- McInroy, J. E., and Hamann, J. C., (2000) “Design and Control of Flexure Jointed Hexapods”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 16, No. 4, August 2000, pp. 372-381.
- Meer, D. W.; Rock, S. M.,(1994) “Experiments in Object Impedance Control for Flexible Objects”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1994).
- Merlet, J. P., (2002) “An Initiative for the Kinematics Study of Parallel Manipulators”, In Proceedings of the Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, Quebec City, Quebec, Canada, October 3-4, 2002, pp. 2-9.
- Michael Blauer and Pierre R. Belanger, (1987) “State and Parameter Estimation for Robotic Manipulators Using Force Measurements” IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. Ac-32, No.12, December 1987
- Michael Strolz,, Alexander Mörtl, Michael Graf, and Martin Buss, (2009) “Development, Control, and Evaluation of an Actuated Car Door”
- Miller, K., (1995) “Experimental Verification of Modeling of DELTA Robot Dynamics by Direct Application of Hamilton’s Principle”, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995, pp. 532-537.
- Mills, J. K., and Lokhorst, D. M. (1993) “Stability and Control of Robotic Manipulators during Contact/Noncontact Task Transition”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 3, June 1993, pp. 335-345.
- Mills, J. K.; Liu, G. J.(1991) “Robotic Manipulator Impedance Control of Generalized Contact Force and Position”, IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and

Systems IROS, November 3-5 (1991) 1103-1108.

Natale, C.; Siciliano, B.; Villani, L.: “Robust Hybrid Force/Position control with Experiments on an Industrial Robot”, <http://disna.dis.unina.it/prisma>.

Nanua, P., Waldron, K. J., and Murthy, V. (1990) “Direct Kinematic Solution of a Stewart Platform”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 4, August 1990, pp. 438-444.

Natale, C.; Siciliano, B.; Villani, L.(1999) “Spatial Impedance Control of Redundant Manipulators”, Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, MI, (1999) 1788-1793.

Oaki, J.(1991) “Stable Force Controller Design Based on Frequency Response Identification”, IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS, November 3-5 (1991) 1116-1121.

Oh, S. R.; Kim, H. C.; Suh, I. H.; You, B. J.; Lee, C. W. (1995) “A Compliance Control Strategy for Robot manipulators Using a Self-Controlled Stiffness Function”, IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems – IROS '95, (1995) 179-184.

Ömürlü, Vasfi Emre., Büyükşahin, Utku., Yıldız, İbrahim., Ünsal, Ahmet., Sağırlı, Ahmet., Engin, Şeref Naci., Küçükdemiral, İbrahim Beklan (2009) “A Stewart Platform as a FBW Flight Control Unit for Space Vehicles” Yıldız Technical University, Istanbul, Türkiye

Parenti-Castelli, V., and Di Gregorio (2000) “A New Algorithm Based on Two Extra-Sensors for Real-Time Computation of the Actual Configuration of the Generalized Stewart-Gough Manipulator”, Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 122, September 2000, pp. 294-298.

Peng, Z. (1992) “Compliant Motion Control of Manipulators”, Thesis of Doctor of Philosophy, Niigata University, Niigata Japan, (1992).

Raimo K. Kankaanranta and Heikki N. Koivo, (1988) “Dynamics and Simulation of Compliant Motion of a Manipulator”, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 2, April 1988

Roy, Jaydeep, and Whitcomb, Louis L. (2002) “Adaptive Force Control of Position/Velocity Controlled Robots: Theory and Experiment”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 18, No. 2, April 2002, pp. 121-137.

Rudas, I. J.; Mester, G.(1991) “Industrial Robot Control in Case of Uncertain Dynamical Parameters”, IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS, November 3-5 (1991) 937-942.

Salisbury, J. K.(1980) “Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates”, Proceeding 19th IEEE Conference on Decision and Control, December (1980) 95-100.

Sciavicco, L., and Siciliano, B. (2001) “Modeling and Control of Robot Manipulators”, Second Edition, Springer-Verlag London Limited 2000, New York, 2001.

Sciavicco, L.; Siciliano, B.(1996) “Modeling and Control of Robot Manipulators”, The McGraw-Hill Companies Inc., (1996)

Seraji, H. (2000) “Adaptive Force Control in Compliant Motion”, California Institute of Technology, Pasadena, CA, (Personal communication), (2000).

- Shilling, R. J. (1990) "Fundamental of Robotics Analysis and Control", Prentice Hall, New York, (1990).
- Siciliano, B.; Villani, L. (1999) "Robot Force Control", Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, (1999)
- Simaan, N., and Shoham, M., (2003) "Geometric Interpretation of the Derivatives of Parallel Robots' Jacobian Matrix with Applications to Stiffness Control",
Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 125, March 2003, pp. 33-42.
- Soichi Nakamura, Ryojun Ikeura, Takahiro Wasaka, Kazuki Mizutani, Hideki Sawai and Hitoshi Hirata, (2008) "A Study on Impedance Control using Passive Elements for Human-Assist System" Mie University, Tsu, Mie, Japan
- Sun, D.; Liu, Y.(1997) "Modeling and Impedance Control of a Two-Manipulator System Handling a Flexible Beam", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 119 December (1997) 736-742.
- Sung-Hua Chen, Chin-I Huang, and Li-Chen Fu, (2008) "Applying a Nonlinear Observer to Solve Forward Kinematics of a Stewart Platform" San Antonio, Texas, USA, September 3-5, 2008
- Stewart, D., (1965) "A Platform with Six Degrees of Freedom" Proceedings Institution of Mechanical Engineers, 180, 371-386.
- Tiehua Chen Zhuxin Zhang (2008) "Design and Research of Tele-operation Manipulator with Force Feedback" Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130012, China
- Ting, Y., Chen, Y. S., and Wang, S. M., (1999) "Task-Space Control Algorithm for Stewart Platform", Proceedings of the IEEE 38th Conference on Decision and Control, Phoenix, Arizona, USA, December 1999, pp. 3857-3862.
- Tsujimura, T., and Yabuta, T. (1989) "Object Detection by Tactile Sensing Method Employing Force/Torque Information", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 4, August 1989, pp. 444-450.
- Tzafestas, C., and Coiffet, P., (1997) "Computing Optimal Forces for Generalized Kinesthetic Feedback on the Human Hand during Virtual Grasping and Manipulation", Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, April 1997, pp. 118-123.
- Ünsal, Ahmet., (2007) "Farklı Yapıdaki Stewart Platform Mekanizmalarının Düz ve Ters Kinematik Analizi", Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Valency, T.; Zacksenhouse, M. (2000) "Instantaneous Model Impedance Control for Robots", Sensory-Motor Integration Laboratory, Faculty of Mechanical Engineering, Technion- Israel Institute of Technology (Personal communication), (2000).
- Volpe, R.; Khosla, P. (1992) "An Analysis of Manipulator Force Control Strategies Applied to an Experimentally Derived Model", Proc. Of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, July 7-10 (1992) 1989-1997.
- Waibel, B. J., and Kazerooni, H. (1991) "Theory and Experiments on the Stability of Robot Compliance Control", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 1,

February 1991, pp. 95-104.

Waldron, K. J., Raghavan, M., and Roth, B. (1989) "Kinematics of a Hybrid Series-Parallel Manipulation System", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions ASME*, Vol. 111, No. 2, 1989, pp. 211-221.

W. H. Liao and K. W. Wang, (1997) "On the Active-Passive Hybrid Control Actions of Structures With Active Constrained Layer Treatments" *J. Vib. Acoust.* October 1997, Volume 119, Issue 4, 563

Williams, R. L. II, and Gallina, P., (2001) "Planar Cable-Direct-Driven Robots, Part 1: Kinematics and Statics", *Proceedings of the 2001 ASME Design Technical Conference 27th Design Automation Conference*, Pittsburgh, PA, September 9-12, 2001.

Wu, Y.; Tarn, T.; Xi, N. (1995) "Force and Transition Control with Environmental Uncertainties", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1995) 899-903 .

Xiaohong Hao, Lei Zhang and Hengjie Li, (2008) "A New PD Type Iterative Learning Control In Active Control for Vibration" *School of Electrical and Information Engineering Lanzhou University of Technology Lanzhou, Gansu, 730050, China*

Yabuta, T. (1992) "Nonlinear Basic Stability Concept of the Hybrid Position/Force Control Scheme for Robot Manipulators", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 5, October 1992, pp. 663-670.

Yaltırık Hüseyin, (2007) "Comparison of contact force control strategies on different robot arm types" *Marmara University, İstanbul*

Yang, J., and Geng, Z. J. (1998) "Closed Form Forward Kinematics Solution to a Class of Hexapod Robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 3, June 1998, pp. 503-508.

Yao Wang, (2008) "Symbolic Kinematics and Dynamics Analysis and Control of a General Stewart Parallel Manipulator" *Department of Mechanical and Aerospace Engineering State University of New York at Buffalo, New York 14260*

Y. H. Tsoi and S. Q. Xie, (2008) "Impedance Control of Ankle Rehabilitation Robot" *Medical and Rehabilitation Robotics Research Group Department of Mechanical Engineering The University of Auckland Auckland 1010, New Zealand*

Yıldız, İbrahim., (2007) "3-3 Kuvvet Geribeslemeli Bir Stewart Platformunun Kinematik Analizi, Bağ-Grafik Modellenmesi ve Simülasyonu", *Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul*

Yi, B. J.; Freeman, R. A (1995) "Feedforward Spring-like Modulation in Human Arm Models", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1995) 3121-3128.

Yokoi, K.; Maekawa, H.; Tanie, K. (1992) "A Method of Compliance Control for a Redundant Manipulator", *Proceeding of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Raleigh, NC, July 7-10 (1992) 1927-1934.

Yonggang Cao, Yuru Zhang, Yunzhong Ma and Dangxiao Wang (2007) "Design and Analysis of a New Six-DOF Haptic Device for Dental Training" *Robotics Institute, Beihang University, Beijing, P.R.China*

Yoshikawa, T. (1990) "Foundation of Robotics Analysis and Control", *MIT Press, Cambridge, Massachusetts*, (1990).

Yoshikawa, T., (1986) "Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators, description of hand constraints and calculation of joint driving force" Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco CA (1986) Vo1.3, pp 1393 - 1398

Yoshito Tanaka, Isao Yokomichi and Toshiaki Makino (2008) "Study of Force-Driven Pneumatic Joystick" Department of Control and Information Systems Engineering, Kitakyushu National College of Technology Kokuraminami, Kitakyusyu, Japan

Y. X. Su, B. Y. Duan (2000) "The Application of the Stewart Platform in LargeSpherical Radio Telescopes" School of Mechanical Electronic Engineering Xidian University Xi'an 710071, China

Yurt, Sait N., (2002) "6-3 Stewart Platform Mekanizmasının Kinematik, Dinamik Analizi ve Kontrolü" İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Zheng, Y. F., and Luh, J. Y. S., (1993) "On the Inertia Duality of Parallel-Series Connections of Two Robots in Operational Space", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 6, December 1993, pp. 846-854.

EKLER

- Ek 1 Ters Kinematik - Düz Kinematik Analiz Program Kodları (Matlab M-File)
- Ek 2 Jakobian Matrisine ait S-Function Program Kodları
- Ek 3 Gerçek sistemde kullanılan ekipmanların özellikleri (Lineer Motor, Kuvvet Sensörü)

Ek 1 Ters Kinematik - Düz Kinematik Analiz Program Kodları (Matlab M-File)

```
%Ters Kinematik-Düz Kinematik Analiz
```

```
%Ofset açılarının tanımlanması
```

```
alpha_b=0; % alt plakada 60 derecelik ofset açısının oluşturulması için bağlantı açısı
```

```
alpha_t =2*(pi/3); % üst plakada 60 derecelik ofset açısının oluşturulması için bağlantı açısı
```

```
x0=[0;0;0.45;0;0;0];
```

```
sifir=zeros(length(datam):6);
```

```
for ii=1:1:length(datam)
```

```
%Başlangıç pozisyonu
```

```
alfa=datam(ii,5);
```

```
beta=datam(ii,6);
```

```
gama=datam(ii,7);
```

```
ax=gama;
```

```
ay=beta;
```

```
az=alfa;
```

```
px=datam(ii,2);
```

```
py=datam(ii,3);
```

```
pz=datam(ii,4); % serbest durumda üst plakanın yüksekliği
```

```
xi=[px;py;pz;az;ay;ax];
```

```
%Ters Kinematik
```

```
radius_b = 0.175; % alt plaka yarıçapı
```

```
radius_t = 0.150; % üst plaka yarıçapı
```

```
%Üst platform bağlantı noktalarının x eksenine göre yaptığı açılar
```


lamda_1=(pi/3)-(alpha_t/2);

lamda_3=(3*pi/3)-(alpha_t/2);

lamda_5=(5*pi/3)-(alpha_t/2);

lamda_2=(lamda_1+alpha_t);

lamda_4=(lamda_3+alpha_t);

lamda_6=(lamda_5+alpha_t);

Blamda_1=(pi/3)-(alpha_b/2);

Blamda_3=(3*pi/3)-(alpha_b/2);

Blamda_5=(5*pi/3)-(alpha_b/2);

Blamda_2=(Blamda_1+alpha_b);

Blamda_4=(Blamda_3+alpha_b);

Blamda_6=(Blamda_5+alpha_b);

%Rotasyon Matrisi

R=[(cos(ay)*cos(az)) (cos(az)*sin(ay)*sin(ax)-sin(az)*cos(ax))

cos(ax)*sin(ay)*cos(az)+sin(ax)*sin(az);

(sin(az)*cos(ay)) sin(ax)*sin(ay)*sin(az)+cos(ax)*cos(az) sin(ay)*sin(az)*cos(ax)-
cos(az)*sin(ax);

-(sin(ay)) cos(ay)*sin(ax) (cos(ax)*cos(ay))];

%Üst Platform bağlantı noktalarının pozisyonları

p1=R*[radius_t*cos(lamda_1);radius_t*sin(lamda_1);0]+[px;py;pz];

p3=R*[radius_t*cos(lamda_3);radius_t*sin(lamda_3);0]+[px;py;pz];

p5=R*[radius_t*cos(lamda_5);radius_t*sin(lamda_5);0]+[px;py;pz];

%Alt Platform bağlantı noktalarının pozisyonları

b2=[radius_b*cos(Blamda_2);radius_b*sin(Blamda_2);0];

```
b4=[radius_b*cos(Blamda_4);radius_b*sin(Blamda_4);0];
```

```
b6=[radius_b*cos(Blamda_6);radius_b*sin(Blamda_6);0];
```

```
%Bacak Uzunlukları
```

```
L1=norm(p1-b2);L2=norm(p3-b2);L3=norm(p3-b4);
```

```
L4=norm(p5-b4);L5=norm(p5-b6);L6=norm(p1-b6);
```

```
%Düz Kinematik (Newton-Raphson yöntemi)
```

```
L(:,1)=[L1;L2;L3;L4;L5;L6];
```

```
alpha_b =0; % Alt plakada 60 derecelik ofset acisinin olusturulmasi icin baglanti acisi
```

```
alpha_t =2*(pi/3); % Ust plakada 60 derecelik ofset acisinin olusturulmasi icin baglanti acisi
```

```
radius_b = 0.175; % Alt plaka yaricapi
```

```
radius_t = 0.150; % Ust plaka yaricapi
```

```
Rp=radius_t;
```

```
Rb=radius_b;
```

```
lamda_1=(pi/3)-(alpha_t/2);
```

```
lamda_3=(3*pi/3)-(alpha_t/2);
```

```
lamda_5=(5*pi/3)-(alpha_t/2);
```

```
lamda_2=(lamda_1+alpha_t);
```

```
lamda_4=(lamda_3+alpha_t);
```

```
lamda_6=(lamda_5+alpha_t);
```

```
Blamda_1=(pi/3)-(alpha_b/2);
```

```
Blamda_3=(3*pi/3)-(alpha_b/2);
```

```
Blamda_5=(5*pi/3)-(alpha_b/2);
```

```
Blamda_2=(Blamda_1+alpha_b);
```

```
Blamda_4=(Blamda_3+alpha_b);
```

$$\text{Blamda_6}=(\text{Blamda_5}+\alpha_b);$$

$$P1x=Rp*\cos(\text{lamda_1});$$

$$P1y=Rp*\sin(\text{lamda_1});$$

$$P1z=0;$$

$$P2x=Rp*\cos(\text{lamda_3});$$

$$P2y=Rp*\sin(\text{lamda_3});$$

$$P2z=0;$$

$$P3x=Rp*\cos(\text{lamda_3});$$

$$P3y=Rp*\sin(\text{lamda_3});$$

$$P3z=0;$$

$$P4x=Rp*\cos(\text{lamda_5});$$

$$P4y=Rp*\sin(\text{lamda_5});$$

$$P4z=0;$$

$$P5x=Rp*\cos(\text{lamda_5});$$

$$P5y=Rp*\sin(\text{lamda_5});$$

$$P5z=0;$$

$$P6x=Rp*\cos(\text{lamda_1});$$

$$P6y=Rp*\sin(\text{lamda_1});$$

$$P6z=0;$$

$$B1x=Rb*\cos(\text{Blamda_2});$$

$$B1y=Rb*\sin(\text{Blamda_2});$$

$$B1z=0;$$

$$B2x=Rb*\cos(\text{Blamda_2});$$

$$B2y=Rb*\sin(\text{Blamda_2});$$

B2z=0;

B3x=Rb*cos(Blamda_4);

B3y=Rb*sin(Blamda_4);

B3z=0;

B4x=Rb*cos(Blamda_4);

B4y=Rb*sin(Blamda_4);

B4z=0;

B5x=Rb*cos(Blamda_6);

B5y=Rb*sin(Blamda_6);

B5z=0;

B6x=Rb*cos(Blamda_6);

B6y=Rb*sin(Blamda_6);

B6z=0;

P=[P1x P1y P1z;P2x P2y P2z;P3x P3y P3z;P4x P4y P4z;P5x P5y P5z;P6x P6y P6z];

B=[B1x B1y B1z;B2x B2y B2z;B3x B3y B3z;B4x B4y B4z;B5x B5y B5z;B6x B6y B6z];

x(:,1)=x0;

data=1;

for j=1:data

err=0.01;

ind=0;

while ind~=6

R=[cos(x(4,j))*cos(x(5,j)) cos(x(4,j))*sin(x(5,j))*sin(x(6,j))-sin(x(4,j))*cos(x(6,j))
cos(x(4,j))*sin(x(5,j))*cos(x(6,j))+sin(x(4,j))*sin(x(6,j));

```

sin(x(4,j))*cos(x(5,j))          sin(x(4,j))*sin(x(5,j))*sin(x(6,j))+cos(x(4,j))*cos(x(6,j))
sin(x(4,j))*sin(x(5,j))*cos(x(6,j))-cos(x(4,j))*sin(x(6,j));
-sin(x(5,j)) cos(x(5,j))*sin(x(6,j)) cos(x(5,j))*cos(x(6,j));

```

```

for i=1:6

```

```

f(i,j)=x(1,j)*x(1,j)+x(2,j)*x(2,j)+x(3,j)*x(3,j)+Rp*Rp+Rb*Rb+2*(R(1,1)*P(i,1)+R(1,2)*P(i,2)
))*x(1,j)-B(i,1))+2*(R(2,1)*P(i,1)+R(2,2)*P(i,2))*x(2,j)-
B(i,2))+2*(R(3,1)*P(i,1)+R(3,2)*P(i,2))*x(3,j)-2*(x(1,j)*B(i,1)+x(2,j)*B(i,2))-L(i,j)*L(i,j);

```

```

J(i,1)=[2*x(1,j)+2*(R(1,1)*P(i,1)+R(1,2)*P(i,2))-2*B(i,1)];

```

```

J(i,2)=[2*x(2,j)+2*(R(2,1)*P(i,1)+R(2,2)*P(i,2))-2*B(i,2)];

```

```

J(i,3)=[2*x(3,j)+2*(R(3,1)*P(i,1)+R(3,2)*P(i,2))];

```

```

J(i,4)=[2*(x(1,j)-B(i,1))*(-sin(x(4,j))*cos(x(5,j))*P(i,1)+(-sin(x(4,j))*sin(x(5,j))*sin(x(6,j))-
cos(x(4,j))*cos(x(6,j)))*P(i,2))+2*(x(2,j)-
B(i,2))*(cos(x(4,j))*cos(x(5,j))*P(i,1)+(cos(x(4,j))*sin(x(5,j))*sin(x(6,j))-
sin(x(4,j))*cos(x(6,j)))*P(i,2))];

```

```

J(i,5)=[2*(x(1,j)-B(i,1))*(-
cos(x(4,j))*sin(x(5,j))*P(i,1)+cos(x(4,j))*cos(x(5,j))*sin(x(6,j))*P(i,2))+2*(x(2,j)-B(i,2))*(-
sin(x(4,j))*sin(x(5,j))*P(i,1)+sin(x(4,j))*cos(x(5,j))*sin(x(6,j))*P(i,2))+2*x(3,j)*(-
cos(x(5,j))*P(i,1)-sin(x(5,j))*sin(x(6,j))*P(i,2))];

```

```

J(i,6)=[2*(x(1,j)-
B(i,1))*(cos(x(4,j))*sin(x(5,j))*cos(x(6,j))+sin(x(4,j))*sin(x(6,j)))*P(i,2)+2*(x(2,j)-
B(i,2))*(sin(x(4,j))*sin(x(5,j))*cos(x(6,j))-
cos(x(4,j))*sin(x(6,j)))*P(i,2)+2*x(3,j)*cos(x(5,j))*cos(x(6,j))*P(i,2)];

```

```

end

```

```

diff=inv(J);

```

```

x(:,j)=x(:,j)-diff*f(:,j);

```

```

hata=xi-x(:,j);

```

```

sifir(ii,:)=(hata)';

```

```

x0=x(:,j);

for i=1:6

f(i,j)=x(1,j)*x(1,j)+x(2,j)*x(2,j)+x(3,j)*x(3,j)+Rp*Rp+Rb*Rb+2*(R(1,1)*P(i,1)+R(1,2)*P(i,2
))*x(1,j)-B(i,1))+2*(R(2,1)*P(i,1)+R(2,2)*P(i,2))*x(2,j)-
B(i,2))+2*(R(3,1)*P(i,1)+R(3,2)*P(i,2))*x(3,j)-2*(x(1,j)*B(i,1)+x(2,j)*B(i,2))-L(i,j)*L(i,j);

end

ind=0;

for k=1:6

if (abs(f(k,j))<err)

ind=ind+1;

        end

        end

        end

end

end

```

Ek 2 Jakobian Matrisine ait S-Function Program Kodları (2.41-2.46 denklemleri)

```

function [sys,x0,str,ts] = jakobian_matrix(t,x,u,flag)

% Dispatch the flag. The switch function controls the calls to

% S-function routines at each simulation stage.

```

```
switch flag,
```

```
case 0
```

```
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes; % Initialization
```

```
case 3
```

```
    sys = mdlOutputs(t,x,u); % Calculate outputs
```

```
case { 1, 2, 4, 9 }
```

```
    sys = []; % Unused flags
```

```
otherwise
```

```
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]); % Error handling
```

```
end;
```

```
% End of function timestwo.
```

```
%=====
```

```
% Function mdlInitializeSizes initializes the states, sample
```

```
% times, state ordering strings (str), and sizes structure.
```

```
%=====
```

```
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes
```

```
% Call function simsizes to create the sizes structure.
```

```
sizes = simsizes;
```

```
% Load the sizes structure with the initialization information.
```

```

sizes.NumContStates= 0;

sizes.NumDiscStates= 0;

sizes.NumOutputs= 36;

sizes.NumInputs= 6;

sizes.DirFeedthrough=1;

sizes.NumSampleTimes=1;

% Load the sys vector with the sizes information.

sys = simsizes(sizes);

%

x0 = []; % No continuous states

%

str = []; % No state ordering

%

ts = [-1 0]; % Inherited sample time

function sys = mdlUpdate(t,x,u)

sys = u;

% End of mdlInitializeSizes.

%=====

% Function mdlOutputs performs the calculations.

%=====

function sys = mdlOutputs(t,x,u)

px = u(1);

```



```
py = u(2);
```

```
pz = u(3);
```

```
z_ang = u(4);
```

```
y_ang = u(5);
```

```
x_ang = u(6);
```

```
% Üst ve alt plakada bağlantı noktalarının tanımlanması
```

```
alpha_b=0; % alt plakada 60 derecelik ofset açısının oluşturulması için bağlantı açısı
```

```
alpha_t=2*(pi/3); % üst plakada 60 derecelik ofset açısının oluşturulması için bağlantı açısı
```

```
radius_b = 0.175; % alt plaka yarıçapı(0,15 m)
```

```
radius_t = 0.150; % üst plaka yarıçapı (0,1 m)
```

```
lamda_1=(pi/3)-(alpha_t/2);
```

```
lamda_3=(3*pi/3)-(alpha_t/2);
```

```
lamda_5=(5*pi/3)-(alpha_t/2);
```

```
lamda_2=(lamda_1+alpha_t);
```

```
lamda_4=(lamda_3+alpha_t);
```

```
lamda_6=(lamda_5+alpha_t);
```

```
Blamda_1=(pi/3)-(alpha_b/2);
```

```
Blamda_3=(3*pi/3)-(alpha_b/2);
```

```
Blamda_5=(5*pi/3)-(alpha_b/2);
```

```
Blamda_2=(Blamda_1+alpha_b);
```

```
Blamda_4=(Blamda_3+alpha_b);
```

```
Blamda_6=(Blamda_5+alpha_b);
```

```
q1=( [radius_t*cos(lamda_1) radius_t*sin(lamda_1) 0] );
```

```
q3=( [radius_t*cos(lamda_3) radius_t*sin(lamda_3) 0] );
```

q5=(radius_t*cos(lamda_5) radius_t*sin(lamda_5) 0);

b2=(radius_b*cos(Blamda_2) radius_b*sin(Blamda_2) 0);

b4=(radius_b*cos(Blamda_4) radius_b*sin(Blamda_4) 0);

b6=(radius_b*cos(Blamda_6) radius_b*sin(Blamda_6) 0);

%Bağlantı noktalarının tanımlanması

%Alt bağlantı noktaları

XB1=b2(1,1); YB1=b2(1,2); ZB1=b2(1,3);

XB2=b2(1,1); YB2=b2(1,2); ZB2=b2(1,3);

XB3=b4(1,1); YB3=b4(1,2); ZB3=b4(1,3);

XB4=b4(1,1); YB4=b4(1,2); ZB4=b4(1,3);

XB5=b6(1,1); YB5=b6(1,2); ZB5=b6(1,3);

XB6=b6(1,1); YB6=b6(1,2); ZB6=b6(1,3);

%Üst bağlantı noktaları

xT1=q1(1,1); yT1=q1(1,2); zT1=q1(1,3);

xT2=q3(1,1); yT2=q3(1,2); zT2=q3(1,3);

xT3=q3(1,1); yT3=q3(1,2); zT3=q3(1,3);

xT4=q5(1,1); yT4=q5(1,2); zT4=q5(1,3);

xT5=q5(1,1); yT5=q5(1,2); zT5=q5(1,3);

xT6=q1(1,1); yT6=q1(1,2); zT6=q1(1,3);

%Üst bağlantı noktalarının alt orjine göre koordinatlarının belirlenmesi

XT1=(cos(z_ang)*cos(y_ang))*xT1+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)-
sin(z_ang)*cos(x_ang))*yT1+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)+sin(z_ang)*sin(x_ang))*z
T1+px;

XT2=(cos(z_ang)*cos(y_ang))*xT2+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)-
sin(z_ang)*cos(x_ang))*yT2+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)+sin(z_ang)*sin(x_ang))*z

T2+px;

XT3=(cos(z_ang)*cos(y_ang))*xT3+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)-
sin(z_ang)*cos(x_ang))*yT3+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)+sin(z_ang)*sin(x_ang))*z
T3+px;

XT4=(cos(z_ang)*cos(y_ang))*xT4+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)-
sin(z_ang)*cos(x_ang))*yT4+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)+sin(z_ang)*sin(x_ang))*z
T4+px;

XT5=(cos(z_ang)*cos(y_ang))*xT5+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)-
sin(z_ang)*cos(x_ang))*yT5+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)+sin(z_ang)*sin(x_ang))*z
T5+px;

XT6=(cos(z_ang)*cos(y_ang))*xT6+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)-
sin(z_ang)*cos(x_ang))*yT6+(cos(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)+sin(z_ang)*sin(x_ang))*z
T6+px;

YT1=(sin(z_ang)*cos(y_ang))*xT1+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)+cos(z_ang)*cos(x_a
ng))*yT1+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)-cos(z_ang)*sin(x_ang))*zT1+py;

YT2=(sin(z_ang)*cos(y_ang))*xT2+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)+cos(z_ang)*cos(x_a
ng))*yT2+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)-cos(z_ang)*sin(x_ang))*zT2+py;

YT3=(sin(z_ang)*cos(y_ang))*xT3+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)+cos(z_ang)*cos(x_a
ng))*yT3+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)-cos(z_ang)*sin(x_ang))*zT3+py;

YT4=(sin(z_ang)*cos(y_ang))*xT4+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)+cos(z_ang)*cos(x_a
ng))*yT4+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)-cos(z_ang)*sin(x_ang))*zT4+py;

YT5=(sin(z_ang)*cos(y_ang))*xT5+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)+cos(z_ang)*cos(x_a
ng))*yT5+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)-cos(z_ang)*sin(x_ang))*zT5+py;

YT6=(sin(z_ang)*cos(y_ang))*xT6+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*sin(x_ang)+cos(z_ang)*cos(x_a
ng))*yT6+(sin(z_ang)*sin(y_ang)*cos(x_ang)-cos(z_ang)*sin(x_ang))*zT6+py;

ZT1=(-sin(y_ang))*xT1+(cos(y_ang)*sin(x_ang))*yT1+(cos(y_ang)*cos(x_ang))*zT1+pz;

ZT2=(-sin(y_ang))*xT2+(cos(y_ang)*sin(x_ang))*yT2+(cos(y_ang)*cos(x_ang))*zT2+pz;

ZT3=(-sin(y_ang))*xT3+(cos(y_ang)*sin(x_ang))*yT3+(cos(y_ang)*cos(x_ang))*zT3+pz;

$$ZT4=(-\sin(y_ang))*xT4+(\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT4+(\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT4+pz;$$

$$ZT5=(-\sin(y_ang))*xT5+(\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT5+(\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT5+pz;$$

$$ZT6=(-\sin(y_ang))*xT6+(\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT6+(\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT6+pz;$$

%Bacak boyları

$$L1=((XT1-XB1)^2+(YT1-YB1)^2+(ZT1-ZB1)^2)^(1/2);$$

$$L2=((XT2-XB2)^2+(YT2-YB2)^2+(ZT2-ZB2)^2)^(1/2);$$

$$L3=((XT3-XB3)^2+(YT3-YB3)^2+(ZT3-ZB3)^2)^(1/2);$$

$$L4=((XT4-XB4)^2+(YT4-YB4)^2+(ZT4-ZB4)^2)^(1/2);$$

$$L5=((XT5-XB5)^2+(YT5-YB5)^2+(ZT5-ZB5)^2)^(1/2);$$

$$L6=((XT6-XB6)^2+(YT6-YB6)^2+(ZT6-ZB6)^2)^(1/2);$$

%Jakobian Matrisinin bulunması

$$LX1=XT1-XB1; \quad LX2=XT2-XB2; \quad LX3=XT3-XB3; \quad LX4=XT4-XB4; \quad LX5=XT5-XB5; \\ LX6=XT6-XB6;$$

$$LY1=YT1-YB1; \quad LY2=YT2-YB2; \quad LY3=YT3-YB3; \quad LY4=YT4-YB4; \quad LY5=YT5-YB5; \\ LY6=YT6-YB6;$$

$$LZ1=ZT1-ZB1; \quad LZ2=ZT2-ZB2; \quad LZ3=ZT3-ZB3; \quad LZ4=ZT4-ZB4; \quad LZ5=ZT5-ZB5; \quad LZ6=ZT6- \\ ZB6;$$

$$J11=LX1/L1; \quad J21=LX2/L2; \quad J31=LX3/L3; \quad J41=LX4/L4; \quad J51=LX5/L5; \quad J61=LX6/L6;$$

$$J12=LY1/L1; \quad J22=LY2/L2; \quad J32=LY3/L3; \quad J42=LY4/L4; \quad J52=LY5/L5; \quad J62=LY6/L6;$$

$$J13=LZ1/L1; \quad J23=LZ2/L2; \quad J33=LZ3/L3; \quad J43=LZ4/L4; \quad J53=LZ5/L5; \quad J63=LZ6/L6;$$

$$J14=(LX1*((-\sin(z_ang))*\cos(y_ang))*xT1+(-\sin(z_ang))*\sin(y_ang))*\sin(x_ang)- \\ \cos(z_ang)*\cos(x_ang))*yT1+(- \\ \sin(z_ang))*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\cos(z_ang))*\sin(x_ang))*zT1)+LY1*((\cos(z_ang))*\cos(y_ \\ ang))*xT1+(\cos(z_ang))*\sin(y_ang))*\sin(x_ang)- \\ \sin(z_ang))*\cos(x_ang))*yT1+(\cos(z_ang))*\sin(y_ang))*\cos(x_ang)+\sin(z_ang))*\sin(x_ang))*z$$

T1))/L1;

$$J24=(LX2*((-\sin(z_ang)*\cos(y_ang))*xT2+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)-\cos(z_ang)*\cos(x_ang))*yT2+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\cos(z_ang)*\sin(x_ang))*zT2)+LY2*((\cos(z_ang)*\cos(y_ang))*xT2+(\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)-\sin(z_ang)*\cos(x_ang))*yT2+(\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\sin(z_ang)*\sin(x_ang))*zT2))/L2;$$

$$J34=(LX3*((-\sin(z_ang)*\cos(y_ang))*xT3+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)-\cos(z_ang)*\cos(x_ang))*yT3+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\cos(z_ang)*\sin(x_ang))*zT3)+LY3*((\cos(z_ang)*\cos(y_ang))*xT3+(\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)-\sin(z_ang)*\cos(x_ang))*yT3+(\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\sin(z_ang)*\sin(x_ang))*zT3))/L3;$$

$$J44=(LX4*((-\sin(z_ang)*\cos(y_ang))*xT4+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)-\cos(z_ang)*\cos(x_ang))*yT4+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\cos(z_ang)*\sin(x_ang))*zT4)+LY4*((\cos(z_ang)*\cos(y_ang))*xT4+(\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)-\sin(z_ang)*\cos(x_ang))*yT4+(\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\sin(z_ang)*\sin(x_ang))*zT4))/L4;$$

$$J54=(LX5*((-\sin(z_ang)*\cos(y_ang))*xT5+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)-\cos(z_ang)*\cos(x_ang))*yT5+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\cos(z_ang)*\sin(x_ang))*zT5)+LY5*((\cos(z_ang)*\cos(y_ang))*xT5+(\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)-\sin(z_ang)*\cos(x_ang))*yT5+(\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\sin(z_ang)*\sin(x_ang))*zT5))/L5;$$

$$J64=(LX6*((-\sin(z_ang)*\cos(y_ang))*xT6+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)-\cos(z_ang)*\cos(x_ang))*yT6+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\cos(z_ang)*\sin(x_ang))*zT6)+LY6*((\cos(z_ang)*\cos(y_ang))*xT6+(\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)-\sin(z_ang)*\cos(x_ang))*yT6+(\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\sin(z_ang)*\sin(x_ang))*zT6))/L6;$$

$$J15=(LX1*((-\cos(z_ang)*\sin(y_ang))*xT1+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT1+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT1)+LY1*((-\sin(z_ang)*\sin(y_ang))*xT1+(-\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT1+(\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT1)+LZ1*((-\cos(y_ang))*xT1+(-\sin(y_ang)*\sin(x_ang))*yT1+(-\sin(y_ang)*\cos(x_ang))*zT1))/L1;$$

$$J25=(LX2*((-\cos(z_ang)*\sin(y_ang))*xT2+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT2+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT2)+LY2*((-\sin(z_ang)*\sin(y_ang))*xT2+(-\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT2+(\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT2)+LZ2*((-\cos(y_ang))*xT2+(-\sin(y_ang)*\sin(x_ang))*yT2+(-\sin(y_ang)*\cos(x_ang))*zT2))/L2;$$

$$J35=(LX3*((-\cos(z_ang)*\sin(y_ang))*xT3+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT3+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT3)+LY3*((-\sin(z_ang)*\sin(y_ang))*xT3+(-\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT3+(\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT3)+LZ3*((-\cos(y_ang))*xT3+(-\sin(y_ang)*\sin(x_ang))*yT3+(-\sin(y_ang)*\cos(x_ang))*zT3))/L3;$$

$$J45=(LX4*((-\cos(z_ang)*\sin(y_ang))*xT4+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT4+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT4)+LY4*((-\sin(z_ang)*\sin(y_ang))*xT4+(-\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT4+(\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT4)+LZ4*((-\cos(y_ang))*xT4+(-\sin(y_ang)*\sin(x_ang))*yT4+(-\sin(y_ang)*\cos(x_ang))*zT4))/L4;$$

$$J55=(LX5*((-\cos(z_ang)*\sin(y_ang))*xT5+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT5+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT5)+LY5*((-\sin(z_ang)*\sin(y_ang))*xT5+(-\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT5+(\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT5)+LZ5*((-\cos(y_ang))*xT5+(-\sin(y_ang)*\sin(x_ang))*yT5+(-\sin(y_ang)*\cos(x_ang))*zT5))/L5;$$

$$J65=(LX6*((-\cos(z_ang)*\sin(y_ang))*xT6+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT6+(\cos(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT6)+LY6*((-\sin(z_ang)*\sin(y_ang))*xT6+(-\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*yT6+(\sin(z_ang)*\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*zT6)+LZ6*((-\cos(y_ang))*xT6+(-\sin(y_ang)*\sin(x_ang))*yT6+(-\sin(y_ang)*\cos(x_ang))*zT6))/L6;$$

$$J16=(LX1*((\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang))+\sin(z_ang)*\sin(x_ang))*yT1+(-$$

$$\begin{aligned} & \cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)+\sin(z_ang)*\cos(x_ang))*zT1)+LY1*((\sin(z_ang)*\sin(y_a \\ & ng)*\cos(x_ang)-\cos(z_ang)*\sin(x_ang))*yT1+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)- \\ & \cos(z_ang)*\cos(x_ang))*zT1)+LZ1*((\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*yT1- \\ & (\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*zT1))/L1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J26=& (LX2*((\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\sin(z_ang)*\sin(x_ang))*yT2+(- \\ & \cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)+\sin(z_ang)*\cos(x_ang))*zT2)+LY2*((\sin(z_ang)*\sin(y_a \\ & ng)*\cos(x_ang)-\cos(z_ang)*\sin(x_ang))*yT2+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)- \\ & \cos(z_ang)*\cos(x_ang))*zT2)+LZ2*((\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*yT2- \\ & (\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*zT2))/L2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J36=& (LX3*((\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\sin(z_ang)*\sin(x_ang))*yT3+(- \\ & \cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)+\sin(z_ang)*\cos(x_ang))*zT3)+LY3*((\sin(z_ang)*\sin(y_a \\ & ng)*\cos(x_ang)-\cos(z_ang)*\sin(x_ang))*yT3+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)- \\ & \cos(z_ang)*\cos(x_ang))*zT3)+LZ3*((\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*yT3- \\ & (\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*zT3))/L3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J46=& (LX4*((\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\sin(z_ang)*\sin(x_ang))*yT4+(- \\ & \cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)+\sin(z_ang)*\cos(x_ang))*zT4)+LY4*((\sin(z_ang)*\sin(y_a \\ & ng)*\cos(x_ang)-\cos(z_ang)*\sin(x_ang))*yT4+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)- \\ & \cos(z_ang)*\cos(x_ang))*zT4)+LZ4*((\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*yT4- \\ & (\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*zT4))/L4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J56=& (LX5*((\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\sin(z_ang)*\sin(x_ang))*yT5+(- \\ & \cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)+\sin(z_ang)*\cos(x_ang))*zT5)+LY5*((\sin(z_ang)*\sin(y_a \\ & ng)*\cos(x_ang)-\cos(z_ang)*\sin(x_ang))*yT5+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)- \\ & \cos(z_ang)*\cos(x_ang))*zT5)+LZ5*((\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*yT5- \\ & (\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*zT5))/L5; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J66=& (LX6*((\cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\cos(x_ang)+\sin(z_ang)*\sin(x_ang))*yT6+(- \\ & \cos(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)+\sin(z_ang)*\cos(x_ang))*zT6)+LY6*((\sin(z_ang)*\sin(y_a \\ & ng)*\cos(x_ang)-\cos(z_ang)*\sin(x_ang))*yT6+(-\sin(z_ang)*\sin(y_ang)*\sin(x_ang)- \\ & \cos(z_ang)*\cos(x_ang))*zT6)+LZ6*((\cos(y_ang)*\cos(x_ang))*yT6- \\ & (\cos(y_ang)*\sin(x_ang))*zT6))/L6; \end{aligned}$$

$$J=[J11 J12 J13 J14 J15 J16;J21 J22 J23 J24 J25 J26;J31 J32 J33 J34 J35 J36;J41 J42 J43 J44$$

```
J45 J46;J51 J52 J53 J54 J55 J56;J61 J62 J63 J64 J65 J66];
```

```
systemoutputs=[J11 J12 J13 J14 J15 J16 J21 J22 J23 J24 J25 J26 J31 J32 J33 J34 J35 J36 J41  
J42 J43 J44 J45 J46 J51 J52 J53 J54 J55 J56 J61 J62 J63 J64 J65 J66];
```

```
sys =systemoutputs;
```

```
% End of mdlOutputs.
```


Ek 3 Gerçek sistemde kullanılan ekipmanların özellikleri (Linear Motor, Kuvvet Sensörü)

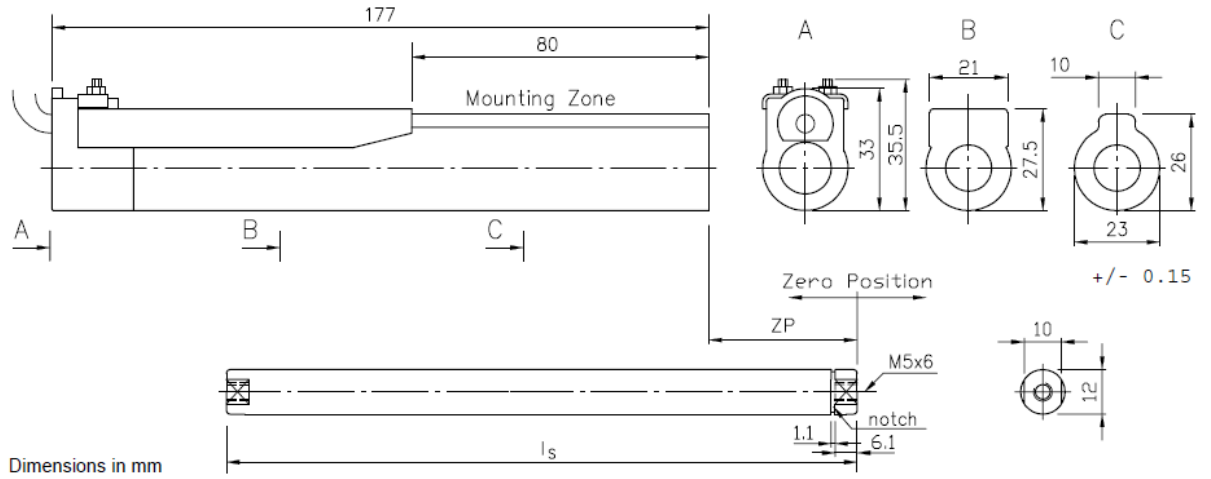
LinMot P01-23X80/50X110 DOĞRUSAL MOTORUN ÖZELLİKLERİ

Çizelge Ek 3.1 Motorun Ölçüleri

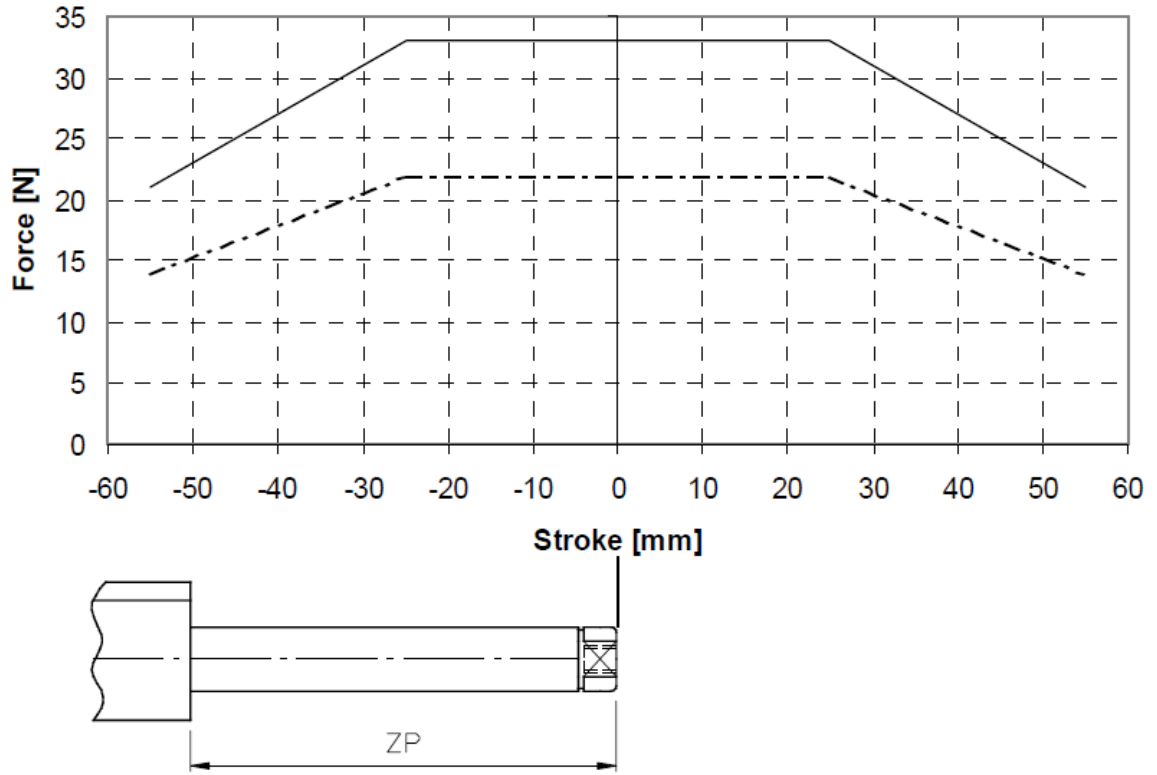
Özellik	Ölçü (mm)
Sabit parçanın boyu	177
Hareketli parçanın boyu	190
Azami strok	± 55
Kısaltılmış strok	± 25
0 konumunda motorun boyu	227

Strok değerleri 0 konumundaki motor boyundan ölçülmektedir.

Kısaltılmış strok boyunca motor sürekli aynı kuvveti üretmektedir.



Şekil Ek 3.1 Motorun Ölçüleri



Şekil Ek 3.2 Motorun kuvvet-konum özellikleri

ATI nano25 KUVVET SENSÖRÜNÜN ÖZELLİKLERİ

Quick-View Specification Table

Description	Nano17	Nano25	Nano43	Mini40	Mini45	Gamma
Max F _{xy} ±lb (±N)	12 (50)	50 (250)	8 (36)	20 (80)	120 (580)	30 (130)
Max T _{xy} ±lbf-in (±N-m)	4 (0.5)	50 (6)	4 (0.5)	40 (4)	160 (20)	100 (10)
Weight* lb (kg)	0.02 (0.01)	0.14 (0.07)	.09 (0.04)	0.11 (0.05)	0.20 (0.09)	0.56 (0.25)
Diameter* in (mm)	0.67 (17)	0.99 (25)	1.69 (43)	1.57 (40)	1.77 (45)	2.97 (75.4)
Height* in (mm)	0.57 (14.5)	0.85 (21.6)	0.45 (11.5)	0.48 (12.3)	0.62 (15.7)	1.31 (33.3)

Description	Delta	Theta	Omega160	Omega190	Omega250	Omega331
Max F _{xy} ±lb (±N)	150 (660)	600 (2500)	600 (2500)	1600 (7200)	3600 (16000)	9000 (40000)
Max T _{xy} ±in-lb (±N-m)	600 (60)	3600 (400)	3600 (400)	12000 (1400)	18000 (2030)	52000 (6000)
Weight* lb (kg)	2.0 (0.91)	11.0 (4.99)	6.0 (2.72)	14.0 (6.35)	66.0 (30.0)	95.0 (43.2)
Diameter* in (mm)	3.72 (94.5)	6.10 (155)	6.14 (156)	7.48 (190)	10.0 (254)	13.0 (330)
Height* in (mm)	1.31 (33.3)	2.41 (61.1)	2.20 (55.9)	2.20 (55.9)	3.74 (95.0)	4.22 (107.0)

*Specifications include standard interface plates

METRIC CALIBRATIONS	SENSING RANGES	Calibrations			
	Axes	SI-125-3		SI-250-6	
	F _x , F _y (±N)	125		250	
	F _z (±N)	500		1000	
	T _x , T _y (±Nm)	3		6	
	T _z (±Nm)	3		3.4	
RESOLUTION	Axes	System Type*			
		CON		DAQ	
	F _x , F _y (N)	1/24	1/192	1/12	1/96
	F _z (N)	1/8	1/64	1/4	1/32
	T _x , T _y (Nm)	1/660	1/5280	1/330	1/2640
	T _z (Nm)	1/1320	1/10560	1/660	1/5280

Contact ATI for complex loading information. Resolutions are typical. All Sensors calibrated by ATI.
*CON: Controller F/T System, DAQ: 16-bit DAQ F/T System



The Nano25 F/T transducer

The transducer is made of hardened stainless steel with integral interface plates made from high-strength stainless steel.

Şekil Ek 3.3 ATI nano25 Kuvvet Sensörünün Özellikleri

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 28.05.1984

Doğum yeri İstanbul

Lise 1998-2002 Kartal Köy Hizmetleri Anadolu Lisesi

Lisans 2002-2006 İstanbul Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2007-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı, Makine Teorisi ve Kontrol Programı

Çalıştığı kurum

2006-Devam ediyor Altınay Robot Teknolojileri San. Ve Tic. A.Ş.