

BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MODEL ÖNGÖRÜLÜ DENETLEYİCİ (MPC) İLE ROBOT KOLU DENETİMİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

AYTAÇ ALTAN

ŞUBAT 2018

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MODEL ÖNGÖRÜLÜ DENETLEYİCİ (MPC) İLE ROBOT KOLU DENETİMİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Aytaç ALTAN

DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU

ZONGULDAK

Şubat 2018

KABUL:

Aytaç ALTAN tarafından hazırlanan “Model Öngörülü Denetleyici (MPC) ile Robot Kolu Denetimi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 02/02/2018


Danışman: Yrd. Doç. Dr. Rıfat HACIOĞLU

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Bölümü



Üye: Prof. Dr. Zehra SARAÇ

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Bölümü



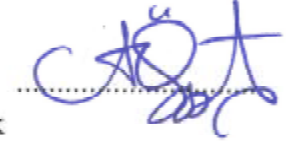
Üye: Prof. Dr. Raif BAYIR

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik
Mühendisliği Bölümü



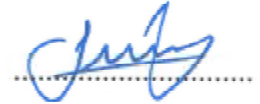
Üye: Doç. Dr. Hamdi Alper ÖZYİĞİT

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik
Mühendisliği Bölümü



Üye: Yrd. Doç. Dr. Fecir DURAN

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar
Mühendisliği Bölümü



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./.../2018



Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

"Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim."


Aytaç ALTAN

ÖZET

Doktora Tezi

MODEL ÖNGÖRÜLÜ DENETLEYİCİ (MPC) İLE ROBOT KOLU DENETİMİ

Aytaç ALTAN

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU

Şubat 2018, 147 sayfa

Çok eklemlili robot kolları, insansız otonom araç uygulamalarında ve endüstrinin bir çok alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Robot kollarının dinamik ve kinematik denklemlerinden elde edilen teorik modellerin parametre karmaşıklığı eklem sayısına bağlı olarak artmaktadır. Model parametre karmaşıklığı hassasiyeti yüksek uygulamalar için robot kolunun denetiminde önemli rol oynamaktadır. Bu duruma ek olarak bağlar arası sürtünme, içsel bozucu ve dış bozucu etki robot kolunun etkin denetiminde önemli bir araştırma konusudur.

Bu doktora tez çalışmasında, Dönel Dönel (Revolute Revolute-RR), Dönel Dönel Dönel (Revolute Revolute Revolute-RRR) ve Dönel Prizmatik Dönel (Revolute Prismatic Revolute-RPR) eklem yapısına sahip robot kollarının teorik modelleri tüm parametreleri içerecek şekilde vektör matris formda oluşturulmaktadır. Matris formda elde edilen $M(q)$ kütle, $V(q, \dot{q})$ coriolis-merkezkaç ve $G(q)$ yer çekimi denklemlerinin doğrusal olmayan yapıda olduğu belirlenmektedir. Dış bozucu etkinin iyi tanımlanamadığı veya ortamda değişken dış bozucu etki altında robot kolunun çalışma noktalarındaki kaymalar ortaya konulmaktadır.

ÖZET (devam ediyor)

Değişken dış bozucu etki altında çok eklemlı robot kolunun gürbüz denetimi için klasik denetim yerine modele dayalı denetim yapılmaktadır. Farklı eklem yapılarında çok eklemlı robot kolunun hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sistem tanımlama yöntemleri ile modelleri elde edilmekte ve model parametreleri kestirilmektedir. Elde edilen model parametreleri ile RR ve RRR eklem yapısına sahip robot kolunun Model Öngörülü Denetimi (Model Predictive Control-MPC) gerçekleştirilmektedir.

Dış bozucu altında elde edilen robot kolu modeli için geliştirilen algoritma İnsansız Hava Aracı (İHA) üzerinde bulunan RRR eklem yapılı robot kolu (yalpa) üzerine gömülmüş ve yalpanın MPC denetimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar klasik denetim yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmakta ve önerilen algoritmanın performansı farklı koşullar altında test edilmektedir. MPC'nin hız, gürbüzlük, hassasiyet ve kısıtlara izin verme gibi performans kriterlerinde başarılı olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Model öngörülü denetim, sistem tanımlama, robot kol, modelleme.

Bilim Kodu: 608.05.02, 608.05.03

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) OF ROBOT ARM

Aytaç ALTAN

Bülent Ecevit University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Rifat HACIOĞLU

February 2018, 147 pages

Multi joint robot arms are frequently used in unmanned autonomous vehicle applications and in many areas of the industry. The theoretical models parameter complexity obtained from the dynamic and kinematic equations of the robot arms increases with the number of joints. For high-precision applications, the model parameter complexity in model is important in the control of the robot arm. In addition to that linkage friction, internal disturbance, and external disturbance effect have been important research topics in the effective control of the robotic arm.

In this thesis study, the theoretical models of robot arms which have RR (Revolute Revolute), RRR (Revolute Revolute Revolute) and RPR (Revolute Prismatic Revolute) joints structure are constructed in vector-matrix form to include all parameters. It has been determined that the $M(q)$ mass, $V(q, \dot{q})$ coriolis-centrifugal and $G(q)$ gravity equations obtained in the matrix form are nonlinear. The slip at the operating point of the robot arm is determined when the external disturbance effect was not well defined or when there are variable external disturbance effects in the environment.

ABSTRACT (continued)

In order to control the robustness of the multi-jointed robot arm under different variable external disturbances, model-based control is carried out instead of a conventional control. The model of multi-joint robot arm is obtained by not only linear but also nonlinear system identification methods and the model parameters are estimated. Model Predictive Control (MPC) of robot arm with RR and RRR joint structure is performed with the obtained model parameters.

The developed algorithm for the robotic arm model obtained under the external disturbance was embedded on the RRR jointed robot arm (gimbal) on the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and the MPC control of the gimbal was performed. The experimental results are compared with the results from the conventional control methods and the performance of the proposed algorithm has been tested under different conditions. It seems that the MPC has succeeded in performance criteria such as speed, robustness, sensitivity and allowing constraints.

Keywords: Model predictive control, system identification, robot arm, modelling.

Science Code: 608.05.02, 608.05.03

TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aşamasında yönlendirici ve yol gösterici olan, değerli fikir ve deneyimlerini benden esirgemeyen hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Rıfat HACIOĞLU'na, ilgi ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Doktora tez çalıőmamı 2014-75737790-01 numaralı proje kapsamında destekleyen Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teőekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 ÇOK EKLEMLİ ROBOT KOLU	17
2.1 ÇOK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN DİNAMİK MODELİ	19
2.2 ÇOK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN KİNEMATİK MODELİ	44
2.2.1 Robot Kolunun İleri Kinematığı	45
2.2.2 Robot Kolunun Ters Kinematığı	48
BÖLÜM 3 ROBOT KOLU DENETİMİ	55
3.1 KLASİK DENETİM YÖNTEMLERİ İLE ROBOT KOLU DENETİMİ.....	55
3.2 ROBOT KOLUNUN MODEL ÖNGÖRÜLÜ DENETİMİ	57
BÖLÜM 4 SİSTEM TANIMLAMA VE MODELLEME.....	69
4.1 SİSTEM TANIMLAMA	71
4.2 SİSTEM TANIMLAMA AŞAMALARI.....	71

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

4.3 DOĞRUSAL MODEL YAPILARI.....	73
4.3.1 ARX Model Yapısı ve Eşitlik Hatası Yaklaşımı.....	74
4.3.2 OE Model Yapısı.....	76
4.4 DOĞRUSAL OLMAYAN MODEL YAPILARI.....	79
4.4.1 Blok Tabanlı Wiener ve Hammerstein Model Yapıları	79
4.5 RR VE RRR EKLEM YAPISINA SAHİP YALPANIN OE VE HAMMERSTEIN MODEL YAPISI İLE MODELLENMESİ.....	82
4.5.1 RR Eklem Yapısına Sahip Yalpanın OE ve Hammerstein Model Yapısı ile Modellenmesi	84
4.5.2 RRR Eklem Yapısına Sahip Yalpanın OE ve Hammerstein Model Yapısı ile Modellenmesi	86
BÖLÜM 5 ÇOK EKLEMLİ ROBOT KOL DÜZENEGİ VE DENEYSEL SONUÇLAR.....	97
5.1 RR EKLEM YAPISINA SAHİP ROBOT KOLUNUN PID PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	97
5.2 RRR EKLEM YAPISINA SAHİP ROBOT KOLUNUN PID PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	102
5.3 RPR EKLEM YAPISINA SAHİP ROBOT KOLUNUN PID PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	106
5.4 RR VE RRR EKLEM YAPISINA SAHİP ROBOT KOLU PID VE MPC DENETİMİ	110
5.4.1 RR ve RRR Eklem Yapısına Sahip Yalpanın Dış Bozucu Olmadığı Durumda PID ve MPC Denetimi	114
5.4.2 RR ve RRR Eklem Yapısına Sahip Yalpanın Dış Bozucu Etki Altında PID ve MPC Denetimi	120
BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	129

KAYNAKLAR..... 133

ÖZGEÇMİŞ 147





ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Dönel robot mekanik yapısı ve çalışma uzayı	18
Şekil 2.2 Robot kolu eklemleri ve koordinat eksenini ataması	20
Şekil 2.3 RR eklem yapısına sahip robot kolu	29
Şekil 2.4 RRR eklem yapısına sahip robot kolunun geometrik gösterimi	31
Şekil 2.5 RPR eklem yapısına sahip robot kolunun katı gövde yapısı.....	36
Şekil 2.6 RPR eklem yapısına sahip robot kolunun geometrik gösterimi.....	38
Şekil 2.7 Robot koluna ve nesnelere koordinat sisteminin yerleştirilmesi	45
Şekil 2.8 Çok eklemlili robot kolu Denavit-Hartenberg değişkenleri	46
Şekil 2.9 Robot kolunun dönme ve kayma yönleri için eksen değişkenleri	48
Şekil 2.10 Robot kolu {P}, {Q} ve {R} ara çerçevelerinin konumu	48
Şekil 2.11 RRR eklem yapısına sahip düzlemsel robot kolunun geometrisi	51
Şekil 2.12 RRR eklem yapısına sahip robot koluna koordinat sisteminin yerleştirilmesi	52
Şekil 3.1 Geribeslemeli denetim sistemi	55
Şekil 3.2 DC motor blok diyagramı	56
Şekil 3.3 Temel MPC stratejisi	58
Şekil 3.4 MPC temel yapısı.....	59
Şekil 3.5 MPC blok yapısı.....	62
Şekil 3.6 Referans yörünge takibi	64
Şekil 4.1 Dinamik sistem modeli blok yapısı.....	70
Şekil 4.2 Sistem tanımlama aşamaları akış şeması	72
Şekil 4.3 SISO doğrusal sistem için ARX model yaklaşımı	76
Şekil 4.4 OE model blok yapısı.....	77
Şekil 4.5 Wiener ve Hammerstein blok yapıları	79
Şekil 4.6 Hammerstein model doğrusal ve doğrusal olmayan blok yapısı	80
Şekil 4.7 İHA üzerine monte edilen RR eklem yapısına sahip yalpa ve mekanik yapısı	83
Şekil 4.8 İHA üzerine monte edilen RRR eklem yapısına sahip yalpa ve mekanik yapısı....	83
Şekil 4.9 OE model yapıları RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında modeli	85

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.10 Hammerstein model yapılı RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında modeli.....	86
Şekil 4.11 RR eklem yapısına sahip yalpanın otokorelasyon ve çapraz korelasyonu.....	86
Şekil 4.12 RRR eklem yapısına sahip yalpanın giriş ve çıkış sinyalleri.....	88
Şekil 4.13 OE model yapılı RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu olmadığı durumda modeli.....	88
Şekil 4.14 Hammerstein model yapılı RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu olmadığı durumda modeli.....	89
Şekil 4.15 RRR eklem yapısına sahip yalpanın kutup-sıfır haritası.....	89
Şekil 4.16 RRR eklem yapısına sahip yalpanın yunuslama ve yatış eksenlerine uygulanan dış bozucu altında sistemin doğrusal yapılı OE modeli.....	91
Şekil 4.17 RRR eklem yapısına sahip yalpanın yunuslama ve yatış eksenlerine uygulanan dış bozucu altında sistemin Hammerstein modeli.....	91
Şekil 4.18 OE model yapılı RRR eklem yapısına sahip yalpa modeli.....	92
Şekil 4.19 Hammerstein model yapılı RRR eklem yapısına sahip yalpa modeli.....	92
Şekil 4.20 RRR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin otokorelasyon ve çapraz korelasyon analizi.....	93
Şekil 4.21 İHA görev uçuş rotası.....	94
Şekil 4.22 Dış bozucu altında rota takibi için İHA üzerindeki yalpa sisteminin Hammerstein modeli.....	95
Şekil 5.1 RR eklem yapısına sahip yalpa.....	98
Şekil 5.2 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın θ_1 ve θ_2 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 10$).....	100
Şekil 5.3 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın θ_1 ve θ_2 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 20$).....	100
Şekil 5.4 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$ ve $e_2(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 10$).....	101
Şekil 5.5 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$ ve $e_2(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 20$).....	101
Şekil 5.6 RRR eklem yapısına sahip yalpa.....	103
Şekil 5.7 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın θ_1 , θ_2 ve θ_3 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 10$).....	104

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.8 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın θ_1 , θ_2 ve θ_3 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 20$)	104
Şekil 5.9 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$, $e_2(t)$ ve $e_3(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 10$).....	105
Şekil 5.10 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$, $e_2(t)$ ve $e_3(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 20$).....	105
Şekil 5.11 PID denetimli RPR eklem yapısına sahip yalpanın θ_1 , d_2 ve θ_3 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 10$)	108
Şekil 5.12 PID denetimli RPR eklem yapısına sahip yalpanın θ_1 , d_2 ve θ_3 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 20$)	108
Şekil 5.13 PID denetimli RPR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$, $e_2(t)$ ve $e_3(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 10$).....	109
Şekil 5.14 PID denetimli RPR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$, $e_2(t)$ ve $e_3(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 20$).....	109
Şekil 5.15 RRR eklem yapısına sahip (a) yalpa ve (b) yalpanın açılı hareketi	110
Şekil 5.16 RRR eklem yapısına sahip robot kol (yalpa)'nın mekanik yapısı	111
Şekil 5.17 RRR eklem yapısına sahip yalpanın dinamik benzetimi	111
Şekil 5.18 RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın PID denetim benzetimi	113
Şekil 5.19 RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın MPC denetim benzetimi	113
Şekil 5.20 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın konum değişimi.....	114
Şekil 5.21 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın konum değişimi.....	114
Şekil 5.22 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın konum değişimi.....	115
Şekil 5.23 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın konum değişimi.....	115
Şekil 5.24 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın hız değişimi.....	116
Şekil 5.25 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın hız değişimi.....	116
Şekil 5.26 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın hız değişimi.....	117
Şekil 5.27 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın hız değişimi	117
Şekil 5.28 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın ivme değişimi.....	118
Şekil 5.29 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın ivme değişimi.....	118
Şekil 5.30 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın ivme değişimi	119
Şekil 5.31 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın ivme değişimi	119

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.32 RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında MPC denetim benzetimi	120
Şekil 5.33 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında konum değişimi	121
Şekil 5.34 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında konum değişimi	121
Şekil 5.35 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında konum değişimi	122
Şekil 5.36 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında konum değişimi	122
Şekil 5.37 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında hız değişimi	123
Şekil 5.38 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında hız değişimi	123
Şekil 5.39 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında hız değişimi	124
Şekil 5.40 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında hız değişimi	124
Şekil 5.41 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında ivme değişimi	126
Şekil 5.42 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında ivme değişimi	126
Şekil 5.43 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında ivme değişimi	127
Şekil 5.44 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında ivme değişimi	127

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 RRR eklem yapısına sahip robot kolunun D-H parametreleri	52
Çizelge 3.1 PID parametrelerinin geçici hal parametrelerine etkisi.....	57





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

$M(q)$: Kütle matrisi
$V(q, \dot{q})$: Coriolis ve merkezkaç kuvvet vektörü
$G(q)$: Yer çekimi ivme vektörü
$L(q, \dot{q})$: Lagrange-Euler fonksiyonu
$K(q, \dot{q})$: Kinetik enerji vektörü
$P(q)$: Potansiyel enerji vektörü
\dot{q}	: Eklem hız değişkeni
ρ	: Kütle yoğunluğu
v	: Doğrusal hız
ω	: Açısal hız
m	: Kütle
I	: Atalet tensörü
${}^0_iT(q)$: Dönüşüm matrisi
J	: Jakobiyen matrisi
A	: Doğrusal hız Jakobiyen matrisi
B	: Açısal hız Jakobiyen matrisi
τ	: Tork
$F(\dot{q})$: Viskoz ve sürtünme vektörü
P	: Potansiyel enerji
τ_d	: Dış bozucu
θ_i	: Dönel eklem açısı
d_i	: Prizmatik eklem uzunluğu
α_i	: Eksenler arası bağ açısı
a_i	: Eksenler arası uzaklık
n	: Uç işlevcisi normal vektörü
s	: Kayma vektörü

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

p	: Konum vektörü
q^{-1}	: Gecikme operatörü
$H(z)$: Transfer fonksiyonu
$U(z)$: Giriş işareti
$Y(z)$: Çıkış işareti
φ^T	: Regresör vektör
$\hat{\theta}$: Parametre kestirim vektörü
$\hat{H}(z)$: Kestirilmiş transfer fonksiyonu
$\hat{y}(n)$: Kestirilmiş çıkış işareti
$G(s)$: Doğru akım motoru transfer fonksiyonu
K_m	: Moment sabiti
J_m	: Motor dişli takımı ataleti
R_a	: Motor endüvi direnci
K_b	: Elektromotor kuvvet sabiti
K_p	: Oransal kazanç katsayısı
K_d	: Türev kazanç katsayısı
K_i	: İntegral kazanç katsayısı
$u(t + k t)$: Kontrol değişken dizisi
$\hat{y}(t + k t)$: Öngörülen sistem çıkışı
N_p	: Öngörü ufku
N_c	: Kontrol ufku
Δu	: Şimdiki giriş işareti ile bir önceki giriş işareti arasındaki fark
y^r	: Sistemin referans değeri
w_i	: Sistem çıkışı ağırlık katsayısı
λ_i	: Δu 'nun etkisini belirleyen ağırlık katsayısı
u_{min}	: Sistem girişi minimum sınır koşulu
u_{maks}	: Sistem girişi maksimum sınır koşulu
y_{min}	: Sistem çıkışı minimum sınır koşulu
y_{maks}	: Sistem çıkışı maksimum sınır koşulu
$J(N)$: Maliyet fonksiyonu
$r(t + k)$: Gelecekteki referans sinyali

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

e	: Takip hatası
q_d	: Takip edilen referans yörünge
ω_n	: Kritik sönüm frekansı
$\hat{R}_\varepsilon(\tau)$: Otolorelasyon fonksiyonu
$\hat{R}_{\varepsilon u}(\tau)$: Çapraz korelasyon fonksiyonu

KISALTMALAR

AIC	: Akaike Information Criteria (Akaike Bilgi Kriteri)
ARMA	: Auto Regressive Moving Average (Hareketli Ortalama Alan Otoregresif)
ARMAX	: AutoRegressive Moving Average with eXogenous input (Ekojen Girişli Doğrusal Otoregresif Hareketli Ortalama)
ARX	: Auto Regressive with eXogeneous input (Harici Girişli Otoregresif)
ASYM	: Asymptotic Method (Asimptotik Yöntem)
BIBO	: Boundary Input Boundary Output (Sınırlı Giriş Sınırlı Çıkış)
BJ	: Box-Jenkins
BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
D-H	: Denavit-Hartenberg
DMC	: Dynamic Matrix Control (Dinamik Matris Kontrol)
EE	: Equation Error (Eşitlik Hatası)
EHAC	: Extended Horizon Adaptive Control (Genişletilmiş Uyarlamalı Kayan Ufuk Kontrol)
EPSAC	: Extended Prediction Self-Adaptive Control (Genişletilmiş Kendinden Uyarlamalı Kontrol)
FPE	: Final Prediction Error (Nihai Tahmin Hatası)
FPGA	: Field Programmable Gate Array (Alan Programlanabilir Kapı Dizisi)
GPC	: Generalized Predictive Control (Genelleştirilmiş Öngörülü Denetim)
IMU	: Inertial Measurement Unit (Atalet Ölçüm Ünitesi)
İHA	: İnsansız Hava Aracı
LPV	: Linear Parameter Varying (Doğrusal Parametre Değişimi)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

MAC	: Model Algorithmic Control (Model Algoritmik Kontrol)
MPC	: Model Predictive Control (Model Öngörülü Denetim)
MSE	: Mean Square Error (Ortalama Karesel Hata)
NARX	: Nonlinear AutoRegressive with eXternal input (Harici Girişli Doğrusal Olmayan Otoregresif)
NARMAX	: Nonlinear AutoRegressive Moving Average with eXogenous input (Ekojen Girişli Doğrusal Olmayan Otoregresif Hareketli Ortalama)
NMA	: Nonlinear Moving Average (Doğrusal Olmayan Hareketli Ortalama)
NMSE	: Normalized Mean Squared Error (Normalize Ortalama Karesel Hata)
OE	: Output Error (Çıkış Hatası)
PD	: Proportional-Derivative (Oransal-Türev)
PEM	: Prediction Error Method (Tahmini Hata Yöntemi)
PFC	: Predictive Functional Control (Öngörülü Fonksiyonel Kontrol)
PI	: Proportional-Integral (Oransal-İntegral)
PID	: Proportional-Integral-Derivative (Oransal-İntegral Türev)
PPP	: Prismatic-Prismatic-Prismatic (Prizmatik-Prizmatik-Prizmatik)
QDMC	: Quadratic Dynamic Matrix Control (İkinci Dereceden Dinamik Matris Kontrol)
QP	: Quadratic Performance (İkinci Dereceden Performans)
RLS	: Recursive Least Square (Özyinelemeli En Küçük Kareler)
RPP	: Revolute-Prismatic-Prismatic (Dönel-Prizmatik-Prizmatik)
RPR	: Revolute-Prismatic-Revolute (Dönel-Prizmatik-Dönel)
RR	: Revolute-Revolute (Dönel-Dönel)
RRP	: Revolute-Revolute-Prismatic (Dönel-Dönel-Prizmatik)
RRR	: Revolute-Revolute-Revolute (Dönel-Dönel-Dönel)
SCARA	: Selective Compliant Assembly Robot Arm (Seçici Uyumlu Montaj Robot Kolu)
SE	: South-East (Güney-Doğu)
SISO	: Single Input Single Output (Tek Giriş Tek Çıkış)
SVD	: Singular Value Decomposition (Tekil Bileşen Ayrışımı)
SW	: South-West (Güney-Batı)
YPR	: Yaw-Pitch-Roll (Sapma-Yunuslama-Yatış)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnsansız otonom araç uygulamaları başta olmak üzere endüstrinin bir çok alanında sıklıkla kullanılan robot kollarının belirlenen görevleri başarıyla yerine getirebilmesi için etkin bir denetim sistemine sahip olması gerekmektedir (Camacho and Bordons 2007). Yüksek hassasiyetli uygulamalarda ise denetim sisteminin başarımı daha büyük önem kazanmaktadır. Dış bozucu etkinin fazla olduğu çevresel ortamlarda, doğrusal olmayan yapıdaki robot kolunun klasik denetim sistemleri yerine ortamdaki koşullara uyarlanabilen denetim sistemleri ile denetlenmesi verilen görevin minimum hata ile yerine getirilebilmesi için oldukça önemlidir. Bu doktora tez çalışmasında, doğrusal olmayan yapıdaki çok eklemlili robot kollarının bağlar arası sürtünme ve içsel bozucu etki haricinde farklı dış bozucu etki altında sistem modeli deneysel veriler ile elde edilmekte ve model parametreleri kestirilmektedir. Çeşitli dış bozucu etki altında elde edilen robot kolu modeli için geliştirilen “modele dayalı tahmin algoritması” İnsansız Hava Aracı (İHA) üzerinde bulunan RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpalar üzerine gömülerek gürbüz Model Öngörülü Denetimi (Wang 2009) (Model Predictive Control-MPC) gerçekleştirilmektedir. Bu tez çalışmasında, dış bozucu etki altında klasik denetim yöntemleri ile MPC performansı robot kol denetimi için incelenmektedir. MPC denetimli robot kolunun çalışma noktalarındaki kaymalar ile klasik yöntemlerden PID denetimli robot kolunun çalışma noktalarındaki kaymalar deneysel olarak kıyaslanmaktadır.

Hiciv oyuncusu Çek yazar Karel Capek tarafından, 1921 yılında insanları andıran ancak yorulmadan çalışan olarak tanımlanan robotlar (Murray et al. 1994), 1960 yılların başında evrilme sürecinde başta imalat sanayinde kullanılan robotlar ve uzay araştırma çalışmalarında kullanılan robotlar olmak üzere kollara ayrılmaktadır. Endüstriyel alanda belli ihtiyaç doğrultusunda programlanarak fazla bakım gerektirmeden uzun süre çalışma kapasitesine sahip robotlar kullanırken, uzay çalışmalarında ise özel amaçlı gezegen izci robotlar kullanılmaktadır. Endüstriyel alanda kullanılan robotlar otomatik olarak çalışmakta ve herhangi bir problemi algılama zorunluluğu bulunmamaktadır. Çevresini algılayarak elde ettiği çevresel verileri

yorumlama ve karar verme yapısına sahip olan izci robotlar farklı ortamlara uyum sağlayacak şekilde hareketlerini uyarlayabilen yöntemlere sahiptir (Murphy 2000).

Bilgisayar, elektronik ve makine teknolojileri ile birlikte özellikle mikroişlemci teknolojisindeki hızlı gelişmeler robot teknolojisinin hızlı gelişmesinde önemli rol oynamaktadır. Günümüzde robotlar endüstri, savunma sanayi ve sağlık başta olmak üzere tarım, eğitim, denizcilik, havacılık vb. alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Springer 2013, Okamura et al. 2010, Hollingum 1999). Endüstriyel alanda kartezyen, silindirik, küresel ve dönele düzenleştirmede farklı serbestlik derecesine sahip robot kolları kullanılmaktadır (Sciavicco and Siciliano 2012). Savunma sanayi alanında uzaktan elle kontrol edilebilen veya otonom olarak çalışan, üzerindeki sensörler yardımıyla çevresel verileri algılayıp yorumlayabilen, hava, deniz ve kara gibi değişik platformlarda hareket edebilen gezgin robotlar kullanılmaktadır (Khurshid and Bing-Rong 2004, Nguyen et al. 2009, Springer 2013,). Sağlık alanında “doku kesme, dikme, ekleme, kapatma, örnekleme, dağlama, yakma, dondurma, düğüm atma” işlemlerini yapabilen hassas robotik el başta olmak üzere ortopedik, üroloji, onkolojik cerrahi robotlar ve nanorobotikler kullanılmaktadır (Camarillo et al. 2004, Thaly et al. 2007, Mavroidis and Ferreira 2013, Ng and Tam 2014).

Farklı alanlarda kullanılan robotlar uzaktan kumanda yardımıyla elle hareket edebildiği gibi otonom olarak da hareket edebilmektedir. Sensörleri sayesinde çevreden aldığı bilgi sinyallerini işleyerek hareket edebilen ve verilen görevleri kendi kendine yerine getirebilen robotlar otonom robot olarak ifade edilmektedir. Otonom robotlar bilgisayarlı görü ya da daha genel anlamda çevreyi algılayarak tanıma, karmaşık bir görevi etkili bir şekilde çözmek için eylem dizilerini sentezleyerek yüksek düzeyli akıl yürütme, istenilen hareketlerin gerçekleştirilebilmesi için hareket planlama ve planlanan hareketlerin yürütülebilmesi için denetim gibi birden fazla araştırma alanını kapsamaktadır (Righetti et al. 2014). Otonom robotların verilen görevleri yerine getirirken algıladıkları çevresel bilgilere göre önceden belirlenen yörüngeyi takip ederek hedefe en az hata ile gitmeleri oldukça önemlidir (Jiang and Nijmeijer 1997, Blazic 2011, Altan et al. 2016, Demir et al. 2016). Belirlenen görevleri önceden programlanmış hareketler ile uç işlevcisi yardımıyla gerçekleştiren, tabanı bir gövdeye monte edilebilen, birden fazla ekleme sahip elektromekanik sistemler robot kolu olarak ifade edilmektedir (Craig 2005). Otonom olarak hareket eden çok eklemlili robot kolunun farklı dış bozucular altında modele dayalı denetiminin gerçekleştirildiği bu tez çalışmasında öncelikle çok eklemlili robot kol sisteminden elde edilen deneysel veriler ile farklı dış bozucu etkilere karşı sistemin doğrusal Çıkış Hatası

(Output Error-OE) ve doğrusal olmayan blok yapılı Hammerstein modeli elde edilmektedir (Ljung 1999). Belirlenen yörünge için en az hata ile takip edebilmesi için başarımları OE modeline göre daha yüksek olan Hammerstein modeli yardımıyla RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemlerinin farklı dış bozucu etki altında MPC denetimi gerçekleştirilmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemleri İHA üzerine monte edilerek İHA'nın yalpanın uç işlevcisinde bulunan kameradan aldığı verilere göre engelden sakınacak şekilde belirlenen rotayı takip etmesi sağlanmaktadır.

Robot kol denetiminde amaç, referans yörünge sinyalinin uç işlevcisi tarafından takip edilerek belirlenen yörünge hareketinin en az hata ile gerçekleşmesinin sağlanmasıdır. Karmaşık ve doğrusal olmayan yapıya sahip olan çok eklemlili robot kolunun etkin denetimi için robot sistem dinamiğinin iyi modellenmesi önem arz etmektedir. Tam olarak bilinmeyen uç işlevciye bağlanan yük değeri veya yükteki ani değişimler, bağlantı elemanlarındaki sürtünme, boşluklar ve esnek eklemler dinamik modelde belirsizliklere yol açmaktadır. Dinamik modelde karşılaşılan bu belirsizlikler referans yörünge için uç işlevcisi tarafından hatalı takip edilmesine neden olmaktadır. Belirsizliklerden kaynaklanan sorunların ve modelleme hatalarının giderilerek robot kol sisteminin iyi bir dinamik davranış göstermesi gürbüz bir denetleyici ile mümkün olmaktadır (Abdallah et al. 1991, Spong 1992, Yao and Tomizuka 1997, Lin 1998, Sage et al. 1999, Bingül ve Küçük 2008, Altan ve Hacıoğlu 2014, Li et al. 2017, Lee and Jung 2018).

Bir robot kolunun dinamiği, robot kolunun kendi hareketinden dolayı oluşan eşitliklerin matematiksel olarak ifade edilmesidir. Başka bir deyişle, bir robot kolunun hareketinden üretilen dinamik eşitlikler, robot kolunun dinamik davranışını tanımlayan bir dizi matematiksel ifadeden oluşmaktadır. Robot kolunun dinamik analizi ise, eklemlere tahrik elemanları tarafından uygulanan moment veya kuvvet büyüklükleri ile robot kolunun zamana göre konumu, hızı ve ivmesi arasındaki ilişkilerin incelenmesi olarak tanımlanmaktadır. Eklemlere uygulanan moment veya kuvvet büyüklükleri ile robot kolunun konum, hız ve ivmesi değişmektedir (Bejczy 1974, Lewis et al. 2004, Bingül ve Küçük 2008). Robot kolunun dinamik denklemleri eklemler arası trigonometrik ilişkiden dolayı doğrusal olmayan yapıdadır. Elde edilen matematiksel denklemler, robot kolunun bilgisayar ortamında benzetimi, eklem uzayında en uygun tasarım parametreleri ile hareket edebilmesi, kararlı ve kontrollü bir davranış sergilemesi açısından oldukça önemlidir. Genel olarak bir robot kolunun dinamik performansı, etkili denetim algoritmasına ve uygun dinamik modelin elde edilmesine bağlıdır.

Denetim işleminde, elde edilen robot dinamik modelinin arzu edilen sistem cevap ve performansını sağlaması için uygun algoritma üretilmektedir. Çıkarılan dinamik modelin, robotun arzu edilen sistem yanıtını üretmesi aşamasındaki performansı denetim probleminin önemini ortaya koymaktadır (Bejczy and Paul 1981, Craig 2005, Spong et al. 2006, Bingül ve Küçük 2008, Altan ve Hacıoğlu 2015).

Robot kolları serbestlik derecelerine, denetim yöntemlerine ve eklem yapılarına göre çeşitli şekilde sınıflandırılmaktadır. Robot kolları serbestlik derecelerine göre sınıflandırılırken ilk üç eklem eklem özelliği dikkate alınmaktadır. İlk üç eklem tamamı prizmatik eklemlere sahipse oluşan kinematik düzenleme kartezyen, ilk eklem dönel diğer iki eklem prizmatik eklemlere sahipse oluşan kinematik düzenleme silindirik, ilk iki eklem dönel üçüncü eklem prizmatik eklem sahipse ve bütün eklemler paralel ise oluşan kinematik düzenleme seçici uyumlu montaj robot kolu (Selective Compliant Assembly Robot Arm-SCARA), ilk iki eklem döner üçüncü eklem prizmatik eklem sahipse oluşan kinematik düzenleme küresel, ilk üç eklem tamamı döner eklemlere sahipse oluşan kinematik düzenleme dönel düzenleme denilmektedir (Beek and Jager 1997, Craig 2005, Kucuk 2009, Altan 2011). Bu tez çalışmasında; otonom olarak hareket eden, farklı serbestlik derecesine ve farklı büyüklükte çalışma uzayına sahip dönel, silindirik ve küresel düzenlemedeki robot kollarının farklı dış bozucular altında modele dayalı denetiminin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

Robot kinematiği, üç boyutlu uzayda robotun kendi tasarımı ve çevresindeki nesnelerin yerleşimi ile ilgilenmektedir (Gupta 1986). Yerleşim bilgisi konum vektörü yönelim matrisi ile belirlenmektedir. Üç boyutlu uzayda bir nesnenin yönelimini ve konumunu tanımlamak için nesnenin merkezine koordinat sistemi yerleştirilmektedir. Yerleştirilen koordinat sistemi yardımıyla robot ile robotun çalışma uzayında bulunan nesneler arasındaki yönelim ve konum ilişkisi tanımlanmaktadır. Robot kinematiği ile çok eksenli robotun hız, ivme ve kuvvet analizi yapılmakta ve uç işlevci ile eklemler arasındaki ilişki tanımlanmaktadır. Robot kolunun ileri kinematiğinde, eklem değişkenlerine göre robot kolunun uç işlevcisinin kartezyen uzayda nerede olduğu ve yönelimi belirlenmektedir (Craig 2005). Çok eklemli robot kolunun eklem değişkenlerinin belirlenmesinde genellikle Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılmaktadır (Denavit and Hartenberg 1955). Robot kolunun ters kinematiğinde, uç işlevcisinin verilen konum ve yönelim verilerine göre robot kolunun denetimini mümkün kılacak eklem açıları ve öteleme miktarları belirlenmektedir (Wang and Chen 1991). Robot kolunun ters kinematik

çözümü, eksenlerde kullanılan motorların eklem torklarının hesaplanması, gerçek zamanlı kontrol ve yörünge planlaması için oldukça önem taşımaktadır (Asada and Slotine 1986).

Açık zincirli kinematik sistemlerden oluşan robotlarda robot dinamiği, robotların dinamik özelliklerini gösteren diferansiyel denklemlerle ifade edilmektedir. Bu denklemler, robot uzuvlarına uygulanan kuvvet ve/veya momentle konum, hız ve ivme arasındaki ilişkileri açıklamaktadır. Bu denklemlerin çözümü ile robotun hareketini kontrol etmek için gerekli olan değişkenler elde edilmektedir. Robot kolunun dinamik modelinin çıkarılması konusunda Lagrange-Euler ve Newton-Euler yöntemleri temel alınarak çalışmalar yapılmaktadır (Murphy et al. 1991, Min et al. 2011, Altan 2011, Djuric et al. 2012, Chen et al. 2013, Cai and Huang 2014). Robot kolunun dinamik modelinin çıkarılmasında kullanılan bir diğer yöntem ise geliştirilmiş d'Alembert yöntemidir. Günümüzde bilgisayar teknolojisinin hızlı ilerlemesinden dolayı denetleyici tasarımında etkili olan Lagrange-Euler yönteminin hesap yükünün daha ağır olması önemini kaybetmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalarda, dinamik modelin çıkarılmasında kullanılan matris işlemlerini Newton-Euler yöntemine göre daha kolay ve hızlı gerçekleştiren Lagrange-Euler yöntemi tercih edilmektedir (Min et al. 2011, Chen et al. 2013, Cai and Huang 2014).

Robotların mekanik özelliklerinin gelişmesi ve yaygın ve karmaşık kullanım alanlarına sahip olmaları, denetim stratejisi ile birlikte denetim birimlerinin de geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Robot kol denetimi, robotik konusunda yapılan araştırmaların en yoğun kısmını oluşturmaktadır. Robot kolunun denetiminde kullanılan denetim modeli geri besleme doğrusallaştırması, doğrusal denetim tekniği, uyarlamalı denetim tekniği ve gürbüz uyarlamalı denetim tekniğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Kurtoğlu 2011, Dong et al. 2017, Naderolasli and Tabatabaei 2017, Lee and Jung 2018). Geri besleme doğrusallaştırma tekniğinde, robot modeline göre bir kontrol yasasından hareketle hatanın doğrusal diferansiyel denklemi elde edilmektedir. Modele bağlı olarak geliştirilen bu teknik, parametrelerin hesaplanmasında belirsizlikler nedeniyle robot kolunun denetiminin her durum için tasarım kriterlerini sağlayacağını garanti etmemektedir (Luca and Lucibello 1998, Chwa 2010, Jazar 2010). Doğrusal denetim tekniği robot kolunun hareket denklemlerinin belirli bir çalışma noktasında doğrusallaştırılmasına dayanmaktadır. Doğrusallaştırma tekniği, robotun denetim açısından gürbüzlüğünü ancak belirli çalışma noktalarına bağlı kalarak güvenli kılmaktadır (Bhattacharyya et al. 2009). Uyarlamalı denetim tekniğinde robotun zamana bağlı kullanım değişiklikleri dikkate alınarak denetim algoritması geliştirilmektedir. Bu teknik serbestlik

derecesi fazla olmayan robot kol denetimi için uygundur (Åström and Wittenmark 2013, Altan and Hacıoğlu 2017a). Gürbüz ve uyarlamalı denetim tekniğinde, algoritma geliştirilen bir model üzerine kurulmakta ve sistemdeki belirsizlikler dikkate alınmaktadır (Slotine and Li 1989). Ayrıca, uyarlamalı robotlarda bulunan sensör donanımına ek olarak belleğe ve bulunduğu çevrenin ayrıntılı modeline sahip olan akıllı robotlar da bulunmaktadır (Siegwart et al. 2011).

MPC tek bir denetleyici tasarım yöntemini değil, çok geniş bir denetleyici tasarım yöntemleri bütünü tanımlamaktadır. Bu yöntemlerin ortak özelliği sistem modelinin doğrudan kullanılması ve kontrol işaretinin en iyileştirilen belirli bir ölçüte göre elde edilmesidir. Bu tasarım yöntemi ile elde edilen denetleyiciler genel olarak doğrusal olmayan yapıdadır. MPC, sistemin gelecekteki davranışını optimize etmek için uygulanması gereken kontrol dizisini hesaplayan bir denetleyici sınıfını nitelemektedir (Camacho and Bordons 2007). Bu doktora tez çalışmasının araştırma alanı ile ilgili yapılan makaleler, raporlar ve doktora tezi gibi çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

Klasik denetim yöntemlerinin sistemlerdeki ölü zamanı giderme, çok değişkenli sistemlerde zaman gecikmeleri, açık döngü kararsızlığı ve kısıtlamaların üstesinden gelme konusunda yetersiz kalması öngörülü kontrolün gelişmesinde önemli rol oynamıştır (Clarke et al. 1987). MPC yönteminde kullanılan teknikler, kısıtlamalar ile farklı uygulama ve süreçlerin denetiminde kullanılan öngörü algoritmalarından bahsedilmiştir (Camacho ve Bordons 2007).

Clarke ve arkadaşları (1987) tarafından önerilen Genelleştirilmiş Öngörülü Denetim (Generalized Predictive Control-GPC) hem endüstride hem de akademik çalışmalarda yoğun şekilde kullanılmıştır. Birçok endüstriyel uygulamada (Clarke 1988) başarıyla uygulanan yöntem iyi performans ve belli derece gürbüzlük göstermiştir. GPC'nin temel fikri gelecekteki denetim sinyallerinin bir dizisini, bir tahmin ufku üzerinden tanımlanan çok kademeli bir maliyet fonksiyonunu en aza indirecek şekilde hesaplamaktır. Optimize edilecek işaret, tahmin edilen sistem çıkışı ile ufukta bazı tahmin edilen referans dizisi arasındaki mesafeyi ölçen ikinci dereceden bir fonksiyonun beklentisi olarak ifade edilmektedir. GPC algoritması, kısıtlamaların olmadığı durumda analitik çözüm sağlamakta, kararsız ve minimum olmayan faz kontrol sistemlerini ele alabilmekte, kontrol ufku kavramı ve maliyet fonksiyonunun ağırlık kontrolü artışını göz önünde bulundurmaktadır. Ayrık zaman için önerilen GPC için sürekli zamanda tasarım algoritması geliştirilmiştir (Demircioğlu and Gawthrop 1991).

Cutler ve Ramaker (1980), Shell firması tarafından geliştirilen Dinamik Matris Kontrol (Dynamic Matrix Control-DMC) algoritması süreç bilgisayar uygulamalarında başarıyla kullanılmıştır. DMC algoritması, bir dizi sayısal katsayı ile süreç dinamiklerini temsil eden teknikten geliştirilmiştir. Sayısal teknik, geleneksel Oransal-İntegral-Türev (Proportional-Integral-Derivative-PID) kontrol kavramlarıyla çözülemeyen karmaşık bir kontrol problemini en küçük kareler yöntemi kullanarak hata/zaman eğrisinin integralini en aza indirmek suretiyle sayısal bilgisayarda çözmeyi mümkün kılmaktadır. Süreç dinamiklerinin DMC tasarımının sentezine dahil edilmesi, ölü zaman ve olağandışı dinamik davranış hakkında farkındalığın sürdürülmesine olanak sağlamaktadır. DMC algoritması kullanılarak sistem giriş ve çıkışlarındaki sınırlandırmaları göz önünde bulunduran ve ikinci dereceden algoritma kullanan ikinci dereceden Dinamik Matris Kontrol (Quadratic Dynamic Matrix Control-QDMC) yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin ayrık durum uzayı modeli için de uygulanabilir olduğu belirtilmiştir (Cutler ve Ramaker 1980).

MPC teknikleri, kullanılan model ve seçilen başarımlar ölçütleri bakımından birbirinde farklılık göstermektedir. GPC, DMC ve Model Algoritmik Kontrol (Model Algorithmic Control-MAC) algoritmaları ön plana çıkan MPC teknikleri arasında yer almaktadır (Camacho and Bordons 2007). Açık çevrimde kararlı sistemler için uygun olan darbe yanıtını kullanan MAC, sistem çıkışı ile birinci derece bir sistem olarak elde edilen giriş yörüngesi arasındaki farkı minimize etmektedir (Cutler ve Ramaker 1980). DMC, GPC, MAC, Öngörülü Fonksiyonel Kontrol (Predictive Functional Control-PFC), Genişletilmiş Kendinden Uyarlamalı Kontrol (Extended Prediction Self-Adaptive Control-EPSC) ve Genişletilmiş Uyarlamalı Kayan Ufuk Kontrol (Extended Horizon Adaptive Control-EHAC) gibi algoritmaların temel prensipleri ve denetleyici formulasyonları incelenmiştir (Holkar and Waghmare 2010). PFC, durum uzayı modelini kullanmakta, hızlı işlemler yürütmekte ve parametrelerin altındaki üstündeki modelleme hataları için gürbüzlük sağlamaktadır. PFC algoritması basit yapıda olup daha az hesaplama gerektirmekte ve yüksek denetim hassasiyeti sağlamaktadır. Algoritmanın başarımı, referans yörüngesinin zaman sabitinin ayarlanmasıyla belirlenmektedir. İkinci dereceden performans (Quadratic Performance-QP) indeksi kullanılmaktadır. Hızlı izleme kontrol problemlerinde ve hızlı işlemler için etkili bir denetleyici tasarımında PFC algoritması kullanılmaktadır (Maalouf 2006). Ayrık aktarım fonksiyonlu EPSC, basit kontrol yasasına sahiptir. Otomatik olarak ileri besleme davranışı içermekte ve ölçülebilir bozuklukları ele almaktadır. Minimum olmayan faz sistemlerinde set edilen sabit noktayı minimum hata ile izlemek için kullanılmaktadır (Altan et al. 2017d). Tahmin ufkunun çevrimiçi olarak

ayarlanması, çok adımlı tahmincinin ve denetleyicinin yapısını etkilemektedir. Olası ayar parametreleri, tahmin ufku, ağırlık faktörü ve filtre polinomundan oluşmaktadır (Keyser et al. 1988, Camacho and Bordons 2007). EHAC'de transfer fonksiyonu modeli kullanılmaktadır. Tek ayar parametresi tahmin ufku olduğundan kolay gerçekleştirilebilmektedir. Minimum olmayan faz sistemi için kararlılık sağlamaktadır. Çok değişkenli olarak çalışmakta ancak yüksek kontrol ufku için açık döngü denetim sistemlerinde düşük performans sergilemektedir (Ydstie 1984, Keyser et al. 1988).

Wang (2009) tarafından Durum Geribeslemeli Öngörülü Kontrol matrisleri elde edilmiş ve MPC'nin durum uzay gösterimi gerçekleştirilmiştir. Lee ve arkadaşları (1994) tarafından durum kestirim yöntemi kullanılarak ve basamak yanıtı temel alınarak öngörülü kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde, deneysel olarak elde edilen verilerle uygun modelin belirlenmesindeki başarımın MPC'nin performansını doğrudan etkilediği belirtilmiştir. Karasu ve arkadaşları (2017a, 2017b) tarafından uygun model yapısının belirlenmesinde harici girişli doğrusal olmayan otoregresif (Nonlinear AutoRegressive with eXternal input-NARX), ekoben girişli doğrusal olmayan otoregresif hareketli ortalama (Nonlinear AutoRegressive Moving Average with eXogenous input-NARMAX), doğrusal olmayan hareketli ortalama (Nonlinear Moving Average-NMA) gibi çeşitli yapılar arasındaki farklılıkların öneminden bahsedilmiştir. Ayrıca, Morari ve Lee (1999) tarafından ön bilgi ve sistem testlerinin hangilerinin uygun model yapısının belirlenmesinde gerekli olduğu ifade edilmiştir.

Low ve Zhuang (2000) tarafından bir sürücünün gürbüz konum kontrolü için durum uzay modeli kullanan MPC algoritması önerilmiştir. Önerilen denetleyici, bir durum geri besleme regülatörü ve bir ileri besleme denetleyicisinden oluşmaktadır. Kazançları, bazı kullanıcı tanımlı zaman dilimlerinde, konum izleme hataları ve denetim maliyetinin toplamı olan bir maliyet fonksiyonunun en aza indirgenmesi ile elde edilmektedir. Ayrıca, denetleyici parametrelerinin sürücü performansı ve gürbüzlüğü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yük bozulması durumunda durum değişkenlerinin iyi tahmin edilmesinin sağlanması için kayan ufuk kavramına dayanan yeni bir gözlemci formüle edilmiştir (Altan et al. 2017c).

Muske ve Badgwell (2002) tarafından endüstriyel MPC uygulamalarında, denkleştirmeden bağımsız genellikle bir basamaklı çıkış bozucu modeli kullanılarak denetim gerçekleştirilmiştir. Serbest denkleştirme doğrusal MPC için bozucu etki modellenmesi gerçekleştirilerek sistemin

girişlerine, durumlarına ve çıkışlarına etki eden ölçülemeyen bozucu etkiler incelenmiştir. Ölçülemeyen bozucuların sistemin herhangi bir noktasına girmesine izin veren daha genel bir bozucu modeli oluşturulmuştur.

Pannocchia ve Kerrigan (2005) tarafından serbest-denkleştirme kayan ufuk öngörülü denetim kısıtlamalı doğrusal sistemler için incelenmiştir. Gürbüz kısıt memnuniyeti, gürbüz kararlılığı, zamanla değişen çalışma noktası değeri ve ölçülemeyen bozucuların varlığında kısıtlı doğrusal sistemlerin denkleştirmeden bağımsız denetimi için dinamik durum geribeslemeli kayan ufuk denetleyicisi tasarlanmıştır. Ölçülemeyen bozucu etkilerin sistem davranışına etkisi incelenmiştir (Altan and Hacıoğlu 2017b, Jia et al. 2017). Ayrıca, problem formülasyonunda denetlenecek sistem belirsizliğinin açık bir şekilde tanımlanmasına olanak tanıyan kısıtlamalı gürbüz MPC sentezi için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Zaman gecikmesi, bozucu etki, referans noktası izleme, referans yörüngesi takibi gibi durumlar tasarlanan denetleyici üzerinde test edilmiştir (Kothare et al. 1996).

Xia ve arkadaşları (2013) tarafından akım düzenleme torqu dalgalanmasını azaltmak için kalıcı mıknatıslı fırçasız DC (BLDC) motorlarda sonlu durum MPC'ye dayanan bir yöntem önerilmiştir. Akım düzenleme torqu dalgalanmasını bastırmak için önerilen yöntemde; karmaşık akım denetleyicilerinden veya modülasyon modellerinden kaçınılarak, yüksek devir ile düşük devri birbirinden ayırmadan tüm hız aralığında çalışan ve komütasyonlu faz akım denetiminin zorluklarını aşan birleşik yaklaşım ele alınmıştır. Akım düzenleme torqu sırasında BLDC motorun ayırık zamanlı akım düzenleyicisiz faz-akım tahmin modeli oluşturulmaktadır. Önceden tanımlanmış maliyet fonksiyonuna göre optimal anahtarlama durumu direkt olarak seçilmekte ve bir sonraki örnekleme periyodunda uygulanmaktadır. Giren ve çıkan faz akımlarının eğim hızları komütasyon sırasında eşleşecek ve böylece akım düzenleme torqu dalgalanmasının en aza indirgenmesi sağlanmaktadır. Geleneksel oransal integral (Proportional Integral-PI) kontrolüne kıyasla MPC'nin akım kapalı çevrim kontrolü için BLDC motorun denetim hassasiyetini ve gürbüzlüğünü artırdığı gösterilmektedir. Ayrıca, MPC'nin kullanımıyla stator akımının iyileştirilebileceği ve torqu dalgalanmalarının azaltılabileceği ifade edilmektedir (Li and Cheng 2010, Doss et al. 2013). Joice ve arkadaşları (2013) tarafından torqu dalgalanmalarının azaltılması için BLDC motor tahriğinin dört kesit operasyonunun benzetim modelini tasarlayan bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemde modelde hız, moment ve geri elektromotor kuvveti özellikleri etkin bir şekilde izlenmekte ve analiz edilmektedir. Kullanılan MPC, gücü dört kesitte de güç kaybı olmadan kontrol etmeyi sağlamaktadır.

Geleneksel kaskat PI ve PID denetleyicileri genellikle hız, tork ve akımı kontrol etmek için kullanılmaktadır (Lewis et al. 2004, Caponetto and Xibilia 2017). Bununla birlikte, düşük ataletli motorlar için yüksek performans ve geniş bir hız aralığı elde etmek, bu denetleyicilerin tasarlandığı uygulama koşullarının çok ötesine geçmektedir. Kararlılık problemlerinden kaçınmak için düşük ataletli bir motorun hız/akım denetimi için iki kaskat PI ve PID denetleyicileri kullanılarak hız çalışma noktasındaki değişiklikler yavaş olarak uygulanmaktadır. Düşük ataletli BLDC motorun hızını, yüksek bant genişliği ve iyi bozucu reddine sahip özelliklerle denetleyebilen bir MPC algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma alan programlanabilir kapı dizisi (Field Programmable Gate Array-FPGA) üzerinde gerçekleştirilerek başarımlı doğrulanmıştır (Darba et al. 2016).

Mayne ve arkadaşları (2000) tarafından kararlılığı kanıtlanmış tüm öngörülü denetim formülasyonları özetlenmiş, kararlı ve sınırlandırılmış bir MPC tasarımı için gerekli olan durumlar ifade edilmiştir. Kısıtlı sistemlerin hem doğrusal hem de doğrusal olmayan model öngörülü denetimine odaklanılmış ve sınırlandırılmamış doğrusal olmayan ve/veya zamanla değişen sistemlerin MPC denetimi tartışılmıştır.

Birçok mühendislik probleminin çözümü için sistem modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem modeli fiziksel sistemin dinamik davranışını karakterize eden matematiksel fonksiyonların bütünü olarak tanımlanabilir. Sistem ise çeşitli girişler karşısında çıkışlar üreten nesne olarak tanımlanır. Bir sistem ile ilgili denetim problemi söz konusu olduğunda, sistem için giriş-çıkış ilişkisini gösteren transfer fonksiyonları kullanılır. Sistem tanımlama, deneysel olarak elde edilen giriş-çıkış verileri kullanılarak sonraki herhangi bir giriş sinyali için çıkış sinyalini tanımlayan sistem modelinin oluşturulması şeklinde tanımlanmaktadır (Clarke et al. 1987, Ljung 1999). Model oluşturmada sistem sınırlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Sistemin sınırları çok geniş seçildiğinde model parametrelerinin kestirilmesi işlemi zorlaşmakta, modelin doğru olarak analizi mümkün olmamaktadır. Sistemin sınırları dar seçildiğinde ise, sisteme ilişkin parametre verileri modelde yer almamakta ve eksik parametre verileri ile elde edilen modelin başarımlı düşük olmaktadır (Ljung 2010).

Model oluşturmada parametrik tanımlama ve parametrik olmayan tanımlama yaklaşımı uygulanmaktadır. Parametrik tanımlamada ön bilgiye dayalı model elde edilmektedir. Ön bilgiler sadece sistem giriş-çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi değil aynı zamanda model yapısına ilişkin bilgileri de içermektedir. Modele ait ön bilgi enerji ve kütle korunumu

gibi fizik yasalarına dayanmakta olup bu yasalar cebirsel eşitlikler veya diferansiyel eşitlikler ile tanımlanmaktadır (Welsch and Heunecke 2001, Ljung 2010). Sisteme ait yeterli ön bilgi bulunmaması durumunda sistem karmaşık yapı özelliği gösterebilmektedir. Bu durumda sistemin derecesi ve giriş-çıkış sinyallerinin seçiminde varsayımlar yapılmaktadır. Yapılan varsayımlara göre tanımlanan sistemin matematiksel modeli giriş-çıkış sinyallerinin sayısına bağlı olarak değişmektedir. Sisteme ait bilgilerin bu şekilde elde edilmesi parametrik olmayan tanımlama olarak ifade edilmektedir (Bosch and Klauw 1994). Parametrik olmayan tanımlamada, çapraz korelasyon analizinden faydalanılarak dinamik sistem çıkış sinyalinin giriş sinyaline olan tepkisinde herhangi bir gecikmenin olup olmadığı belirlenmektedir (Ljung 2010).

MPC yönteminin her aşamasında sistem tanımlama önemli rol oynamaktadır. Düşük maliyetli ve yüksek performanli bir MPC için sistem tanımlamanın önemi ortaya konulması için yapılan çalışmada; parametre tahmini, derece seçimi, model geçerliliği için hata sınır matrisi ile modelin derecelendirilmesi ifade edilmiştir (Zhu et al. 2013). Larson ve arkadaşları (2011) tarafından MPC’de sistem tanımlamasında optimal giriş tasarımı için yöntem önerilmiştir. Kullanıcıya belirli bir kontrol performansının sağlandığını yüksek ihtimalli olarak garanti eden bir model sunulmuştur. Önerilen yöntem, bir su deposu sisteminin tanımlanmasında minimum güç giriş sinyali tasarımı için gösterilmiştir. Privara ve arkadaşları (2011) tarafından bir binanın ısıtma sisteminde sıcaklık denetimi için uygulanan MPC ye ilişkin algoritma sunulmuştur. Sunulan MPC algoritması sıcaklık denetimi için binanın hava tahmini ve termal modelini kullanmaktadır. Önerilen MPC ile binanın termal kapasitesi kullanılmış ve %17-24 arasında enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Zhu (2006) tarafından denetlenecek sistemin testinden model doğrulamasına kadar olan sorunlara sistematik çözümler sağlayan asimptotik yöntem (Asymptotic Method-ASYM) açıklanmıştır. ASYM’nin tanımlama test süresi ve model oluşturma süresini %70’in üzerinde azalttığı, etkin denetim için yüksek model kalitesi sunduğu ifade edilmiş ve gerçek bir rafineri sisteminde MPC projesine uygulanarak yöntem test edilmiştir. Doğrusal olarak tanımlanmış değişen parametre (Linear Parameter Varying-LPV) modeline dayanan doğrusal olmayan MPC algoritması önerilmiştir (Xu et al. 2009). Süreç tanımlamasında LPV model yaklaşımı kullanılmaktadır. Önerilen MPC algoritmasında, tipik çalışma noktaları seçilmiş ve çeşitli çalışma noktalarında veri setleri kullanılarak doğrusal modeller tanımlanmıştır. LPV modeli, geçiş testi verilerini içeren toplam verinin kullanılarak doğrusal modellerin enterpolasyonu

tanımlanmaktadır. Denetim işlemi, doğrusal olmayan optimizasyon probleminin çok aşamalı doğrusallaştırma yöntemi ile hesaplanmaktadır. Önerilen yöntemin düşük maliyetli testler için kullanıldığı ve doğrusal MPC'ye göre başarımının daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Xu et al. 2009).

Harici girişli otoregresif (Auto Regressive with eXogeneous input-ARX) modellerine dayalı serbest denkleştirme için MPC algoritması geliştirilmiştir (Huusom et al. 2010). ARX modelleri konveks optimizasyon teknolojileri kullanılarak verilerden tanımlanabilmektedir. Diğer model parametrelerine kıyasla, bu özellik gürbüz ve otomatik sistem tanımlama için gömülü uygulamalarda avantaj sağlamaktadır. Standart MPC, sürekli, ölçülmemiş, sıfır olmayan ortalama dış bozucuyu reddedemeyebilir ve bu yüzden serbest denkleştirme izleme sağlayamamaktadır. Geliştirilen algoritmada, durum uzayı bir dış bozucu model durumu ile genişletilmektedir. Böylece, bu tür dış bozucu durumlar için serbest denkleştirme takibi sağlanabilmektedir (Muske and Badgwell 2002, Pannocchia and Kerrigan 2005, Huusom et al. 2010).

Robotikte sistem tanımlama için bir uygulama alanı, robotun kinematik tanımındaki parametrelerin elde edilmesi iken ikinci uygulama alanı, robotun dinamik modelindeki parametrelerin belirlenmesi problemi ile ilgilidir. Üçüncü uygulama alanı ise, sürtünme, dış bozucu etki ve motor karakteristikleri gibi ortak düzeydeki parametrelerin belirlenmesidir (Wang et al. 1996, Gautier and Poignet 2001, Grotjahn et al. 2001, Wit et al. 2012). Robot kolundaki mekanik esneklikler hem kara kutu hem de fiziksel olarak parametrelendirilmiş modeller tanımlanmış, yaylar ve amortisörlerle birleştirilen üç kütleli oluşan modelin robotun dinamiğini iyi bir şekilde tanımladığı gösterilmiştir (Östring et al. 2003). Ayrıca, çok eklemlili robot kolunun denetimi için uygun olan robot dinamik ve kinematik modelleri elde edilmiştir (Abderrahim and Whittaker 2000, Kostic et al. 2004, Swevers et al. 2007, Vuong and Ang 2009). Gerçekleştirilen çalışmalarda öncelikle, robot dinamik ve kinematik modelleri türetilmiş ve yapılarının doğruluğu belirlenmiştir. Model parametreleri deneysel olarak tahmin edilmiş ve model geçerliliği test edilmiştir. Robot dinamiklerinin tamamının model içerisinde tanımlanmadığı bildirilmiştir. Yeterli gürbüzlük ve yüksek performanslı robot çalışması için kalan dinamiklerin tanımlanmasının gerekliliğine vurgu yapılmıştır.

Ting ve arkadaşları (2011) tarafından giriş ve çıkış gürültüsü ile Bayes robot sistemi tanımlanmıştır. Doğrusal veya parçalı doğrusal sistemler için regresyon analiz faktöründen

esinlenilerek Bayes sistem tanımlama tekniği kullanılmıştır. Kötü koşullandırılmış verilere dayanıklı, ilişkisel özellikleri otomatik olarak algılayan ve giriş-çıkış gürültüsünü tanımlayan hesaplamalı olarak verimli değişken Bayes regresyon algoritması geliştirilerek test edilmiştir. Johansson ve arkadaşları (2000) tarafından endüstride kullanılan 4 eklemlili robot kol dinamiklerinin durum-uzay sistem tanımlaması yapılmıştır. Çalışmada sürtünme kuvveti parametresi dikkate alınmış, parametrenin tahmini için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Doğrusal modelin tanımlanması için test edilen tüm yöntemlerin arta kalanları sağlamadığı bildirilmiştir. Yüksek performansa sahip herhangi bir doğrusal stokastik yenilik modelinin formüle edilemediği ifade edilmiştir. Ancak, %2-5'lik bir modelleme doğruluğu içinde girdi-çıkış modellemesi için düşük model derecesinin tekil değerlere dayanan model derecesi testleri için yeterli olduğu belirtilmiştir.

Doktora tez çalışmasında, ilk olarak Dönel Dönel (Revolute Revolute-RR), Dönel Dönel Dönel (Revolute Revolute Revolute-RRR) ve Dönel Prizmatik Dönel (Revolute Prismatic Revolute-RPR) eklem yapısına sahip robot kollarının dinamik denklemleri tüm parametreler dikkate alınarak vektör-matris formda matris formda oluşturulmakta, matris formda elde edilen $M(q)$ kütle, $V(q, \dot{q})$ coriolis-merkezkaç ve $G(q)$ yer çekimi denklemlerinin doğrusal olmayan yapıda olduğu belirlenmektedir. Bu çalışmanın araştırma alanı olan çok eklemlili robot kolu modelleme ve denetim ile ilgili yapılan makaleler, konferans yayınları, raporlar ve doktora tezi gibi çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, robot kolunun modellenmesinde esnek eklem bağları arasındaki sürtünme, giriş-çıkış gürültüsü, motor karakteristiklerinden kaynaklanan içsel bozucu etki ile dış bozucu etkilerin robot kolunun etkili denetimi için oldukça önemli olduğu görülmektedir. Bu nedenle tez çalışmasında, çok eklemlili robot kolunun denetiminin sağlanabilmesi için tüm parametreleri içerecek şekilde dinamik ve kinematik denklemleri elde edilerek teorik modeli oluşturulmaktadır. Literatürde, teorik olarak elde edilen model ile çok eklemlili robot kolunun denetimi klasik denetim yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Ancak, teorik model içerisinde dış bozucular iyi tanımlanmadığında, yada ortamda farklı değişken dış bozucu etki olduğunda robot kolunun çalışma noktalarında kayma olmakta ve gürbüz bir denetim yapılamamaktadır. Bu problem çok eklemlili robot kolunun endüstriyel uygulamaların dışında hassas işler için kullanılmasına kısıt oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında, değişken dış bozucu etki altında yüksek hassasiyet gerektiren çok eklemlili robot kol denetiminde modele dayalı olarak öngörülü denetim algoritmalarının kullanılmasının etkin ve gürbüz bir denetim için başarılı olacağı düşünülerek bu probleme çözüm aranmaktadır. Bu nedenle, tez çalışmasında, sistem tanımlama yöntemleri ile denetlenecek sisteme ilişkin elde edilen modele

uygulanan öngörülü denetim ile elde edilen deneysel sonuçların literatüre katkı sağlayacağı kesindir. Ayrıca, tez çalışmasında farklı eklem yapılarına sahip çok eklemli robot kolunun dinamik modeli elde edilmekte, elde edilen dinamik modeller PID denetleyici ile denetlenmektedir. PID denetleyici kullanılarak, belirlenen yörünge boyunca her bir robot kolunun eklemlerinin pozisyon, hız ve ivme karakteristikleri incelenmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip BLDC motorlardan oluşan yalpalar üzerinde PID denetimi deneysel olarak gerçekleştirilmekte ve yalpanın farklı dış bozuculara verdiği tepkiler incelenmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpalar giriş-çıkış veri kümesi yardımıyla modellenmektedir. Sistem modeli oluşturulmakta, sistemin basamak, darbe ve frekans yanıtı incelenmektedir. Elde edilen sistem modelinin doğruluğunun test edilmesi amacıyla, arta-kalan yaklaşımı ile otokorelasyon, çapraz korelasyon ve sıfır-kutup çizimi elde edilmektedir. Farklı dış bozuculara karşı denetlenen sistemin parametreleri ölçülmektedir. MPC ve PID denetimli sistemin farklı dış bozucular altında elde edilen parametreleri ile sistemin gürbüzlük testleri yapılmakta ve elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Girişi takip eden ikinci bölümde, çok eklemli robot kollarının dinamik, ileri kinematik ve ters kinematik analizine ilişkin literatür bilgileri verilmekte, farklı eklem yapılarına sahip robot kollarının dinamik, ileri kinematik ve ters kinematik denklemleri türetilmekte ve dinamik modeli elde edilmektedir.

Üçüncü bölümde, ikinci bölümde teorik olarak türetilen dinamik modellerin klasik denetim yöntemlerinden PID ve modele dayalı yöntemlerden MPC ile denetimi gerçekleştirilmekte elde edilen sonuçlar beşinci bölümde sunulmaktadır.

Dördüncü bölümde, doğrusal olmayan model yaklaşımı için Hammerstein yapısına ek olarak doğrusal model yaklaşımlarından ARX ve OE model yapıları ile doğrusal olmayan model yaklaşımlarından Hammerstein model yapısı incelenmektedir. Doğrusal OE model yapısı ile birlikte doğrusal olmayan Hammerstein model yapısı üzerinde durulmakta ve giriş-çıkış verileri deneysel olarak elde edilen RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemi OE model yapısı ve Hammerstein model yapısı ile modellenerek parametre kestirimleri yapılmaktadır. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpaların dış bozucu etki altında modelleri oluşturulmaktadır. Oluşturulan modeller, deneysel olarak elde edilen giriş-çıkış veri seti üzerinde doğrulanmaktadır.

Beşinci bölümde, dış bozucu altında elde edilen model için İHA üzerinde bulunan dönel düzenleme sahip RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpalar yardımıyla deneysel çok eklemli robot kol düzeneği kurulmaktadır. Bu uygulamada amaç uç işlevcisinin değişik dış bozucu etki altında istenilen yörüngeye tasarım kriterlerini sağlayarak gelmesidir. Deney düzeneğinde rüzgar ve dışarıdan uygulanan kuvvet dış bozucu olarak kullanılmaktadır. Doğrusal OE ve doğrusal olmayan Hammerstein modelleri elde edilen RR ve RRR eklem yapısına sahip robot kollarının dış bozucu etki altında MPC ile denetimi gerçekleştirilmektedir. Dış bozucu etki altında model öngörülü olarak denetlenen sistem için elde edilen benzetim sonuçları klasik denetim uygulandığında elde edilen benzetim sonuçları ile kıyaslanmaktadır. Farklı dış bozucu etkilere karşı denetlenen RR ve RRR eklem yapısına sahip aynı özellikli her iki yalpa sisteminin parametreleri ölçülmektedir. MPC ve PID denetimli sistemlerin dış bozucu altında elde edilen parametreleri ile sistemin gürbüzlük testleri yapılmaktadır.

Sonuçlar ve öneriler bölümünde ise, bu doktora tez çalışmasında İHA üzerine monte edilen ve yüksek başarılı modellemesi yapılan RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin farklı dış bozucu etkiler altında belirlenen modele dayalı olarak yapılan MPC denetimine ilişkin sonuçlar klasik denetim yöntemlerinden PID ile elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmakta ve önerilen algoritmanın performansı farklı koşul şartlarında test edilmektedir.



BÖLÜM 2

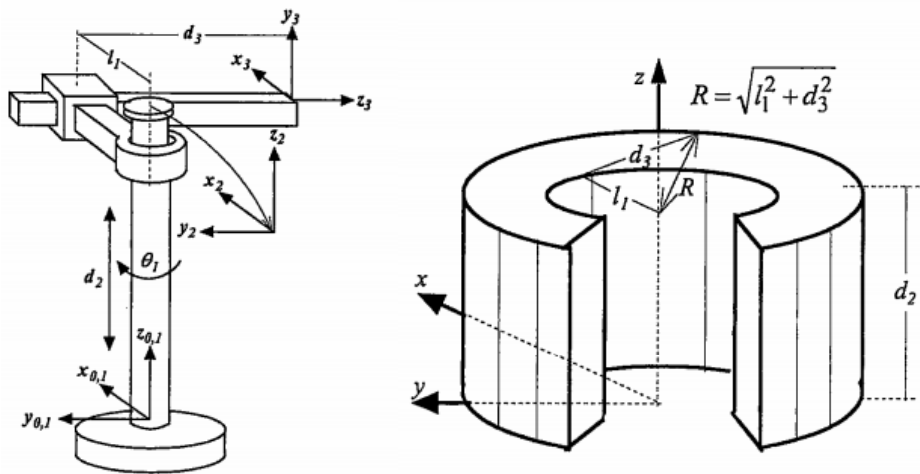
ÇOK EKLEMLİ ROBOT KOLU

Kendilerine verilen görevleri önceden programlanmış hareketler ile uç işlevcisi yardımıyla gerçekleştirebilen, tabanı bir gövdeye monte edilebilen, birden fazla ekleme sahip çok işlevli elektromekanik sistemler olarak ifade edilen robot kolları, serbestlik derecelerine ve eklem yapılarına göre çeşitli şekilde sınıflandırılmaktadırlar (Craig 2005). ISO 8373 standardına göre endüstriyel robot; endüstriyel otomasyon uygulamalarında kullanılmak üzere sabit veya hareketli olabilen, üç veya daha fazla programlanabilir eksene sahip, otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir çok amaçlı manipülatör olarak tanımlanmaktadır. Bu bölümde, farklı serbestlik derecelerine ve eklem yapılarına sahip çok eklemli robot kollarının dinamik, ileri kinematik ve ters kinematik analizleri ile dinamik modelinin elde edilmesine ilişkin bilgiler detaylı olarak verilmektedir.

Robotlar serbestlik derecelerine göre sınıflandırılırken ilk üç eklem eklem özelliği dikkate alınmaktadır. İlk üç eklem Prizmatik-Prizmatik-Prizmatik (Prismatic-Prismatic-Prismatic-PPP) yapıda ise kartezyen düzenleşim, Dönel-Prizmatik-Prizmatik (Revolute-Prismatic-Prismatic-RPP) yapıda ise silindirik düzenleşim, Dönel-Dönel-Prizmatik (Revolute-Revolute-Prismatic-RRP) yapıda ise küresel düzenleşim ve RRR yapıda ise dönel düzenleşime sahip olmaktadır. Robotların çalışma uzayları sahip oldukları düzenleşime göre belirlenmektedir (Craig 2005, Kucuk and Bingul 2005, Kucuk 2009). Her bir düzenleşimin avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Kartezyen düzenleşime sahip robot için kinematik denklemlerinin kolay hesaplanabilmesi, çalışma uzayının her noktasına eşit hareket kabiliyetine sahip olması bir avantaj iken kendi ana gövdesine ulaşamaması dezavantaj oluşturmaktadır. Silindirik düzenleşime sahip robot için uç işlevcisinin hızlı hareket etmesi ve kinematik denklemlerinin basit yapıda olmasından dolayı denetiminin kolaylığı bir avantaj iken hareket kabiliyetinin kol uzunluğuna bağlı olarak değişmesi ve çalışma uzayının küresel düzenleşime sahip robota göre küçük olması dezavantaj oluşturmaktadır. Küresel düzenleşime sahip robot için çok büyük çalışma uzayına sahip olması bir avantaj iken karmaşık kinematik denklemleri nedeniyle denetiminin zor olması, hareket kabiliyetinin her noktada farklılık göstermesi ve eklem

açılarındaki küçük bir değişimin uç işlevcisinde daha büyük konum değişimine neden olması dezavantaj oluşturmaktadır. Dönel düzenlemeye sahip robot için çok büyük çalışma uzayına sahip olması, dönel eklemlere sahip olmasından dolayı esnek ve hızlı olması bir avantaj iken karmaşık kinematik denklemleri nedeniyle denetiminin zor olması, hareket kabiliyetinin her noktada farklılık göstermesi, çalışma uzayında her noktaya ulaşamaması ve eklemlerde oluşan hataların uç işlevcisine daha büyük hataya neden olması dezavantaj oluşturmaktadır. Çalışmada, İHA üzerine monte edilen ve uç işlevcisine kamera bağlanan her bir eklemi farklı eksen etrafında hareket eden RR ve RRR eklem yapılı robot kolları kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan RR eklem yapısına sahip robot kolunun sapma ve yunuslama hareketleri sırasıyla z ve x eksenlerinde, dönel düzenlemeye sahip RRR eklem yapısına sahip robot kolunun sapma, yunuslama ve yatış hareketleri sırasıyla z , x ve y eksenlerinde, RPR eklem yapısına sahip robot kolunun dönme kayma ve dönme hareketleri sırasıyla z , y ve x eksenlerinde gerçekleşmektedir.

Robot kollarının çalışma uzaylarını, ulaşılabilir çalışma uzayı ve marifetli çalışma uzayı belirlemektedir (Kumar and Waldron 1981). Ulaşılabilir çalışma uzayı, bir robot kolunun uç işlevcisini rastgele hareket ettirip yönlendirdiği, robotların serbestlik derecelerinin azalmasına neden olan tekil noktaların bulunmadığı bölge olarak ifade edilmektedir (Tsai and Soni 1981, Craig 2005). Marifetli çalışma uzayı ise, robotun uç işlevcisinin yönelme ve öteleme hareketlerini yüksek kapasite ile gerçekleştirebildiği bölge olarak ifade edilmektedir (Gupta and Roth 1982, Kucuk 2009). Şekil 2.1'de dönel düzenlemeye sahip robot ve çalışma uzayı gösterilmektedir (Bingül ve Küçük 2009).



a) Dönel robot mekanik yapısı

b) Dönel robot çalışma uzayı

Şekil 2.1 Dönel robot mekanik yapısı ve çalışma uzayı (Bingül ve Küçük 2009).

İyi tasarlanmış bir robot, en kısa eklem uzunluğuna sahip olmasına rağmen, en büyük hacimli bir çalışma uzayını tarayan ve bu hacim içerisinde en iyi hareket kabiliyetinin gerçekleştirildiği en büyük marifetli çalışma uzayına sahip olan robottur (Kucuk and Bingul 2006).

2.1 ÇOK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN DİNAMİK MODELİ

Robot kol denetiminde amaç, robotun uç işlevcisinin istenilen referans yörüngeyi en az hata ile takip edebilmesini sağlamaktır. Çok eklemli robot kolunun etkin denetimi için uygun dinamik modelin elde edilmesi oldukça önem taşımaktadır. Denetim işleminde, çok eklemli robot kolunun dinamik modeli arzu edilen sistem cevap ve performansının sağlanması için uygun algoritma üretmektedir. Çok eklemli bir robot kolunun dinamik modelinin çıkarılabilmesi için, çok eklemli robot kolunun dinamik davranışını ifade eden doğrusal olmayan diferansiyel denklem setlerinin elde edilmesi ve çözümlenmesi gerekmektedir. Çok eklemli robot kolunun dinamik modeli, robotu meydana getiren katı cismin her bağlı parçasına etki eden tüm kuvvetlerin toplanması ile elde edilen Newton-Euler yöntemi veya her kolun kinetik ve potansiyel enerji farkı ile elde edilen Lagrange-Euler yöntemi kullanılarak elde edilmektedir (Min et al. 2011, Chen et al. 2013, Cai and Huang 2014). Bu tez çalışmasında, çok eklemli robot kolunun dinamik modelinin elde edilmesinde matris işlemlerini Newton-Euler yöntemine göre daha kolay ve hızlı gerçekleştiren Lagrange-Euler yöntemi kullanılmaktadır.

Kinetik ve potansiyel enerji farkından yararlanan Lagrange-Euler denklemi kullanılarak, çok eklemli robot kolu gibi karmaşık sistemler basit şekilde modellenabilmektedir (Schilling 1996). Robot kolunun kinetik ve potansiyel enerjileri arasındaki farkı ifade eden Lagrange-Euler fonksiyonu,

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - P(q) \quad (2.1)$$

ile tanımlanmaktadır. Eşitlik (2.1)'de $K(q, \dot{q})$ sistemin kinetik enerjisini, $P(q)$ sistemin potansiyel enerjisini, q dönel eklemler için eklem açısını / prizmatik eklemler için eklem uzunluğunu ve $\dot{q} = dq/dt$ eklem hızlarını ifade etmektedir.

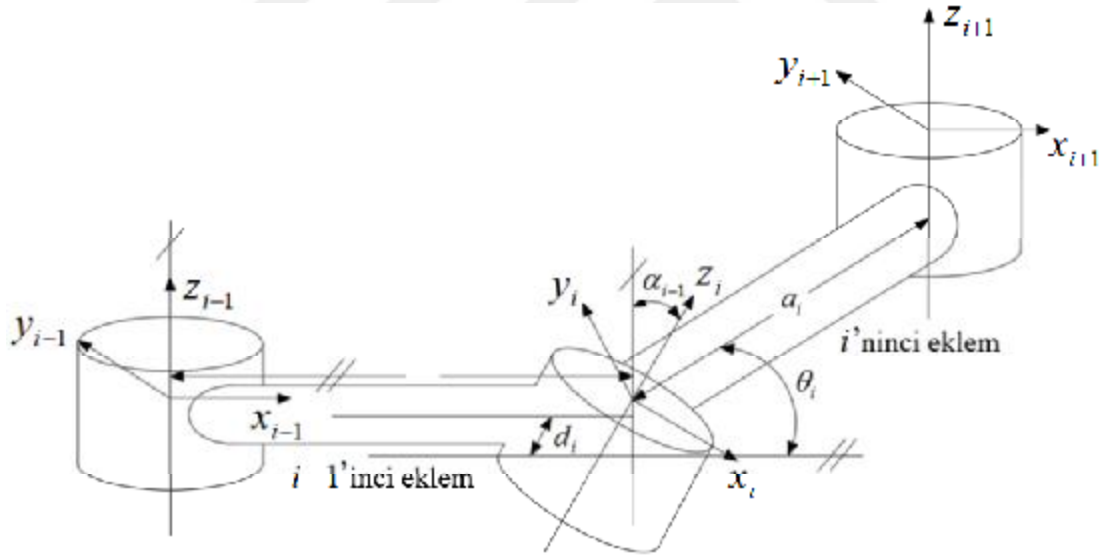
Eşitlik (2.1) ile ifade edilen Lagrange fonksiyonunda robot kolunun toplam kinetik enerjisini veren $K(q, \dot{q})$ terimi karmaşık yapıdadır. Robot kolunun toplam kinetik enerjisi i ve N pozitif tamsayı ve $1 \leq i \leq N$ olmak üzere Şekil 2.2'de gösterilen i 'ninci eklemin kinetik enerjisinin

incelenmesi ile elde edilmektedir. Burada, robot kolunun serbestlik derecesi N ile ifade edilmektedir (Cubero 2006).

Şekil 2.2’de gösterilen i ’ninci eklem, üç boyutlu uzayda hem doğrusal hem de açısal hızla hareket etmektedir. Robot kolunun toplam kinetik enerjisi, her bir eklemkin kinetik enerjilerinin toplamı olup

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (v_i)^T m_i v_i + (\omega_i)^T I_i \omega_i \quad (2.2)$$

ile verilmektedir. Eşitlik (2.2)’de $v_i \in \mathcal{R}^3$ olmak üzere $v_i = A_i(q)\dot{q}$ ve $\omega_i \in \mathcal{R}^3$ olmak üzere $\omega_i = B_i(q)\dot{q}$ sırasıyla i ’ninci eklemkin kütle merkezinin ana koordinat sistemine göre doğrusal ve açısal hızı, m_i i ’ninci eklemkin kütlesi ve I_i i ’ninci eklemkin kütle merkezinin ana koordinat sistemine göre 3x3 atalet tensörünü ifade etmektedir.



Şekil 2.2 Robot kolu eklemleri ve koordinat eksenini ataması.

Bir eklemkin atalet tensörü, katı bir nesnenin kütle dağılımını gösteren 3x3 boyutlu bir matristir. Katı bir nesnenin atalet tensörünün ana koordinat sistemine göre tanımlanması için öncelikle nesnenin kütle merkezine göre atalet tensörünün tanımlanması gerekmektedir. Katı nesnenin kendi kütle merkezine göre atalet tensörü

$$I_{mi} = \int_v \begin{bmatrix} y_i^2 + z_i^2 & x_i y_i & x_i z_i \\ x_i y_i & x_i^2 + z_i^2 & y_i z_i \\ x_i z_i & y_i z_i & x_i^2 + y_i^2 \end{bmatrix} \rho dv \quad (2.3)$$

$$I_m = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

ile ifade edilmektedir. Eşitlik (2.3)'te ρ ve v sırasıyla katı nesnenin kütle yoğunluğu ve hacmini göstermektedir. I_m matrisi altı adet birbirinden bağımsız eleman içeren simetrik matristir. Köşegende yer alan elemanlar atalet momenti, diğer elemanlar ise atalet çarpanlarıdır. Koordinat sisteminin kütle merkezine yerleştirilmesi durumunda atalet çarpanları prensip eksenler kuralına göre sıfır olmaktadır. Bu durumda, atalet tensörü köşegen matris olmakta ve

$$I_m = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

şeklinde gösterilmektedir. Geometrik şekli düzenli olan katı nesnelerin atalet tensörleri matematiksel olarak hesaplanabilmekte, düzensiz geometriye sahip katı nesnelerin atalet tensörleri ise deneysel olarak hesaplanabilmektedir (Klafter et al. 1989, Melnikov 2005). Bir robot eklemının atalet tensörü I_i , i 'ninci eklemın kütle merkezının robotun ana koordinat sistemine göre tanımlanmasıyla elde edilmektedir. Robotun dinamik analizinde kullanılan dönüşüm matrisi,

$${}^0_i T(q) = \begin{bmatrix} {}^0_i R(q) & P_i(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.6)$$

ile verilmektedir. Bu eşitlikte ${}^0_i R$ ve P_i sırasıyla i 'ninci eklemeye ait koordinat sisteminin ana koordinat sistemine göre yönelimini ve konumunu göstermektedir. Robot kolunun eklemının ana koordinat sistemine göre atalet tensörü ${}^0_i R = ({}^i_0 R)^{-1} = ({}^i_0 R)^T$ eşitliği kullanılarak

$$I_i = {}^0_i R I_m {}^0_i R^T \quad (2.7)$$

ile ifade edilmektedir. Robot kolunun toplam kinetik enerjisi, doğrusal hız v ve açısal hız ω terimlerinin q ve \dot{q} eklem değişkenleri cinsinden tanımlanmasıyla belirlenmektedir. Bunun için eklem Jakobiyen matrisi $J_i(q)$ 'nin

$$J_i(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.8)$$

hesaplanması gerekmektedir. Eşitlik (2.8)'de $v_i \in \mathcal{R}^3$ olmak üzere $v_i = A_i(q)\dot{q}$ ve $\omega_i \in \mathcal{R}^3$ olmak üzere $\omega_i = B_i(q)\dot{q}$ şeklindedir. $J(q)$ matrisinin $J_i(q)$ cinsinden ifade edilebilmesi için i 'ninci eklem kütle merkezi uç işlevcisi olarak kabul edilmekte ve robot kolunun eklem Jakobiyen matrisi

$$h_i = {}^0T \Delta h_i \quad (2.9)$$

$$J_i(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_i}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial h_i}{\partial q_i} & 0 \\ \zeta_1 z^1 & \dots & \zeta_i z^i & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i(q) \\ B_i(q) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

ile tanımlanmaktadır. Eşitlik (2.9)'da i 'ninci eklem kütle merkezinin ana koordinat sistemine göre konumu h_i , i 'ninci eklem yerleştirilen koordinat sistemine göre i 'ninci eklem kütle merkezinin koordinatı Δh_i ile gösterilmektedir. Eşitlik (2.10)'da A_i doğrusal, B_i açısal hızlardan kaynaklanan Jakobiyen matrislerini, ζ_i eklem tip değişkenini, z^i i 'ninci koordinat sisteminin üçüncü kolon birim vektörünü ifade etmekte ve

$$z_i(q) = {}^0R(q) i^3 \quad 0 \leq i \leq N \quad (2.11)$$

ile verilmektedir ki $i^3 = [0 \ 0 \ 1]^T$ dir. Robot kolunun toplam kinetik enerjisi q ve \dot{q} eklem değişkenleri cinsinden

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^N [(A_i)^T m_i A_i + (B_i)^T I_i B_i] \dot{q} \quad (2.12)$$

olarak elde edilmektedir. Eşitlik (2.12)'de i 'ninci eklem doğrusal hızı $v_i = A_i \dot{q}$, açısal hızı $\omega_i = B_i \dot{q}$, robot kolu atalet tensörü $M(q) = \sum_{i=1}^n [(A_i)^T m_i A_i + (B_i)^T I_i B_i]$ ile ifade

edilmektedir. Bir robot kolunun i 'ninci eklemının depoladığı potansiyel enerji, yer çekimi ivmesinin var olduğu ortamda i 'ninci eklem kütle merkezının yer değiştirmesini sağlayan iş miktarı kadar olup

$$P(q) = \sum_{i=1}^N m_i g^T h_i \quad (2.13)$$

ile gösterilmektedir. Eşitlik (2.13)'te $g \in \mathcal{R}^3$ yerçekimi ivmesi ve h_i i 'ninci eklem kütle merkezının ana koordinat sistemine göre konumudur. Eşitlik (2.12) ve (2.13) kullanılarak robot kolunun Lagrange fonksiyonu

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + mg^T h \quad (2.14)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Robot kolunun hareketinden dolayı oluşan dinamik denklem Lagrange fonksiyonu cinsinden

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} L(q, \dot{q}) - \frac{\partial}{\partial q_i} L(q, \dot{q}) = \tau_i \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.15)$$

ile ifade edilmektedir. Eşitlik (2.15)'de τ_i i 'ninci eklemde oluşan torktur (Tatlicioglu et al. 2007, Bingül ve Küçük 2008). Sürtünme kayıpları da göz önünde bulundurularak kinetik ve potansiyel enerjileri gösteren Eşitlik (2.12) ve (2.13), Eşitlik (2.15)'te yerine konulduğunda robot kolunun genel dinamik denklem ifadesi

$$\sum_{j=1}^N M_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N V_{kj}^i(q) \dot{q}_k \dot{q}_j + y_i(q) + b_i(\dot{q}) = \tau_i \quad 1 \leq i, j, k \leq N \quad (2.16)$$

olarak elde edilmektedir. Eşitlik (2.16) tork ifade eden ivme teriminden, eklem hızıyla ilişkilendirilen coriolis ve merkezkaç kuvvet vektöründen, yerçekimi ivmesini ifade eden yerçekimi vektöründen ve sürtünme teriminden oluşmaktadır. Coriolis ve merkezkaç kuvvet vektörü ve yerçekimi ivmesi sırasıyla

$$V_{kj}^i(q) = \frac{\partial}{\partial q_k} M_{ij}(q) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q_i} M_{kj}(q) \quad 1 \leq i, j, k \leq N \quad (2.17)$$

$$y_i(q) = - \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N g_k m_j A_{ki}^j(q) \quad 1 \leq i, j, k \leq N \quad (2.18)$$

ile verilmektedir.

Tanım 2.1 Sürtünme ve dış bozucu terimler de dikkate alınarak robot kolunun eklem uzayındaki dinamik denklemi

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = \tau \quad (2.19)$$

ile ifade edilmektedir (Schilling 1996). Burada, $M(q)\ddot{q}$ robot kolunun genel atalet tensörü veya kütle matrisi, $V(q, \dot{q})$ coriolis ve merkezkaç kuvvet vektörü, $F(\dot{q})$ viskoz ve dinamik sürtünme katsayılarından oluşan vektörü, $G(q)$ yerçekimi ivme vektörü ve τ_d dış bozucudur.

Tanım 2.1 ile verilen bir robot koluna uygulanan sınırlı tork girişe karşı uç işlevcisinin sınırlı tepki vermesi önemli bir kararlılık problemidir. Çok eklemli robot kolunun doğrusallaştırılmış durum-uzay gösterimi giriş tork ve çıkış eklem açıları olmak üzere

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2.20)$$

ile ifade edelim. Bu eşitlikte, $x(t)$ durum değişkenleri vektörünü, $u(t)$ giriş vektörünü, A , B ve C sırasıyla sistem, giriş ve çıkış matrisini göstermektedir. Sınırlı başlangıç koşullarında, robot koluna sınırlı bir $u(t)$ girişi uygulandığında $y(t)$ çıkışı sınırlı ise robot kolu Sınırlı Giriş Sınırlı Çıkış (Boundary Input Boundary Output – BIBO) kararlı olmaktadır (Lewis et al. 2004).

Teorem 2.1 (Meyer–Kalman–Yakubovich) $\gamma \geq 0$ bir skaler olmak üzere $B \in \mathbb{R}^n$ ve $C \in \mathbb{R}^n$ vektörleri ile asimptotik olarak kararlı $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ve simetrik pozitif tanımlı $L \in \mathbb{R}^{n \times n}$ matrisleri verildiğinde, $\epsilon > 0$ skaler ve $q \in \mathbb{R}^n$ vektör olmak üzere simetrik pozitif tanımlı $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ matrisi vardır. Öyle ki

$$\begin{aligned} A^T P + P A &= -q q^T - \epsilon L \\ P B &= C + \sqrt{\gamma} q \end{aligned} \quad (2.21)$$

ancak ve ancak $H: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ rasyonel fonksiyon olmak üzere

$$H(s) = \frac{\gamma}{2} + \mathbf{C}^T (s\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \quad (2.22)$$

kesinlikle pozitif gerçektir.

İspat: \mathbf{A} ve \mathbf{B} matrislerinin tamamen kontrol edilebilir olduğu varsayılarak sabit γ sıfır olarak alındığında, uyarlamalı sistemlerde ortaya çıkan problemlerin doğası gereği, ispat bu durum için sınırlandırılmaktadır.

Gerek şartın sağlanması: $\mathbf{m} = \mathbf{col}(m_1, \dots, m_n) : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}^n$ karmaşık vektör fonksiyon olarak tanımlansın ve $H(s) = \mathbf{C}^T \mathbf{m}(s)$ iken karmaşık vektör fonksiyon \mathbf{m} 'nin eşleniğinin transpozu $\mathbf{m}^* = \mathbf{row}(m_1, \dots, m_n) : \mathbb{C} \rightarrow \mathbf{row}(\mathbb{C}^n)$ dir. Yani,

$$\mathbf{m}(s) = (\sigma\mathbf{I}_n + j\omega\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \quad (2.23)$$

$$\mathbf{m}^*(s) = \mathbf{B}^T (\sigma\mathbf{I}_n - j\omega\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-T} \quad (2.24)$$

$$s \triangleq \sigma + j\omega \quad \sigma \in \mathbb{R}, \quad \omega \in \mathbb{R} \quad (2.25)$$

olur. Bunun ardından,

$$\mathbf{m}(s - \epsilon_1) = ((\sigma - \epsilon_1)\mathbf{I}_n + j\omega\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \quad (2.26)$$

$$\mathbf{m}^*(s - \epsilon_1) = \mathbf{B}^T ((\sigma - \epsilon_1)\mathbf{I}_n - j\omega\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-T} \quad \epsilon_1 > 0 \quad (2.27)$$

Lyapunov denkleminde (Ishihara and Terra 2002) göre herhangi $\epsilon_1 > 0$ ve $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ için Eşitlik (2.21)'i sağlayacak pozitif tanımlı simetrik \mathbf{P} matrisi vardır ve

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{q} \mathbf{q}^T - \epsilon \mathbf{L}$$

$$(-\mathbf{A})^T \mathbf{P} + \mathbf{P} (-\mathbf{A}) = -\mathbf{q} \mathbf{q}^T - \epsilon \mathbf{L}$$

$$\begin{aligned} ((\sigma - \epsilon_1)\mathbf{I}_n + j\omega\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^T \mathbf{P} + \mathbf{P} ((\sigma - \epsilon_1)\mathbf{I}_n + j\omega\mathbf{I}_n - \mathbf{A}) \\ = -\mathbf{q} \mathbf{q}^T + \epsilon \mathbf{L} + 2(\sigma - \epsilon_1) \mathbf{P} \end{aligned} \quad (2.28)$$

elde edilmektedir. Eşitlik (2.28) \mathbf{m}^* ile soldan \mathbf{m} ile sağdan çarpıldığında

$$\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{m} + \mathbf{m}^* \mathbf{P} \mathbf{B} = \mathbf{m}^* (\mathbf{q} \mathbf{q}^T + \epsilon \mathbf{L} + 2(\sigma - \epsilon_1) \mathbf{P}) \mathbf{m} \quad (2.29)$$

şeklinde olmakta ve Eşitlik (2.21)

$$\begin{aligned} 2\operatorname{Re}H(s - \epsilon_1) &= \mathbf{C}^T \mathbf{m}(s - \epsilon_1) + \mathbf{m}^*(s - \epsilon_1) \mathbf{C} \\ &= \mathbf{m}^*(s - \epsilon_1) (\mathbf{q} \mathbf{q}^T + \epsilon \mathbf{L} + 2(\sigma - \epsilon_1) \mathbf{P}) \mathbf{m}(s - \epsilon_1) \end{aligned} \quad (2.30)$$

olarak elde edilmektedir. $\mathbf{L} > 0$ ve $\mathbf{P} > 0$ olduğu için her $\sigma > 0$ ve $\omega \in (-\infty, \infty)$ için $2\operatorname{Re}H(s - \epsilon_1) > 0$ olacak şekilde $\epsilon_1 > 0$ küçük pozitif sayı vardır. Bu yüzden $H(s - \epsilon_1)$ pozitif gerçektir, $H(s)$ kesinlikle pozitif gerçektir.

Yeter şartın sağlanması: Genelliği kaybetmemek için (\mathbf{A}, \mathbf{B}) matrisleri kontrol edilebilir bir çift olması durumuyla sınırlandırılmakta ve kanonik formda denetleyici

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} u(t) \quad (2.31)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}^T \mathbf{x}(t) \quad (2.32)$$

ifade edilmektedir. Eşitlik (2.31)'de belirtilen \mathbf{A} ve \mathbf{B} matrisleri

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_{n-1} & \dots & -a_2 & -a_1 & -a_0 \\ 1 & & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & \\ 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

şeklindedir. $H(s) \triangleq \mathbf{C}^T \mathbf{m}(s)$ iken $\mathbf{m} : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}^n$ vektör fonksiyon olarak tanımlansın. Yani,

$$\mathbf{m} = \frac{1}{\psi(s)} \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ \vdots \\ s^{n-1} \end{bmatrix} \quad \psi(s) = s^n + a_{n-1}s^{-1} + \dots + a_0 \quad (2.35)$$

olmaktadır. Hipotez ile $\operatorname{Re} \mathbf{C}^T \mathbf{m}(s)$ kesinlikle pozitif gerçektir olmak üzere her $\omega \in (-\infty, \infty)$ için

$$\mathbf{C}^T \mathbf{m}(j\omega) + \mathbf{m}^*(j\omega) \mathbf{C} \geq 0 \quad (2.36)$$

olmakta ve $\delta_1, K_1 > 0$ sabitleri bulunmaktadır. Öyle ki,

$$\mathbf{C}^T \mathbf{m}(j\omega) + \mathbf{m}^*(j\omega) \mathbf{C} = \frac{\delta_1 \omega^{2n-2} + \dots}{\omega^{2n} + \dots} \leq \frac{K_1}{\omega^2} \quad (2.37)$$

dir. $\mathbf{m}^*(s) \mathbf{L} \mathbf{m}(s) \geq 0$ olduğu ve bunun birinci dereceden bağımlı olduğu görülmektedir.

$$\mathbf{m}^*(j\omega) \mathbf{L} \mathbf{m}(j\omega) = \frac{\delta_2 \omega^{2n-2} + \dots}{\omega^{2n} + \dots} \leq \frac{K_2}{\omega^2} \quad (2.38)$$

dir. Bu yüzden bir $\epsilon > 0$ var olmalıdır, öyle ki her $\omega \in (-\infty, \infty)$ için

$$\mathbf{C}^T \mathbf{m}(j\omega) + \mathbf{m}^*(j\omega) \mathbf{C} - \epsilon \mathbf{m}^*(j\omega) \mathbf{L} \mathbf{m}(j\omega) > 0 \quad (2.39)$$

olmak üzere bir polinom

$$\theta(s) = \sum_{i=1}^n q_i s^{i-1} \quad (2.40)$$

var olmalıdır. Yani,

$$\mathbf{C}^T \mathbf{m}(j\omega) + \mathbf{m}^*(j\omega) \mathbf{C} - \epsilon \mathbf{m}^*(j\omega) \mathbf{L} \mathbf{m}(j\omega) \equiv \frac{\theta(j\omega) \theta(-j\omega)}{\psi(j\omega) \psi(-j\omega)} \quad (2.41)$$

olmaktadır. Eşitlik (2.40)'a göre seçici vektör

$$\mathbf{q} = \mathbf{col}(q_1, \dots, q_n) \in \mathbb{R}^n \quad (2.42)$$

şeklinde belirlenmekte ve

$$\mathbf{q}^T \mathbf{m}(s) = \frac{\theta(s)}{\psi(s)} \quad (2.43)$$

olarak elde edilmektedir. Eşitlik (2.41) kullanılarak

$$\mathbf{C}^T \mathbf{m} + \mathbf{m}^* \mathbf{C} = \mathbf{m}^* (\mathbf{q} \mathbf{q}^T - \epsilon \mathbf{L}) \mathbf{m} \quad (2.44)$$

olmaktadır.

$qq^T - \epsilon L$ pozitif tanımlı olduğundan Lyapunov denkleminde (Ishihara and Terra 2002) göre $A^T P + PA = -qq^T - \epsilon L$ eşitliğini sağlayan simetrik pozitif tanımlı P matrisi vardır ve

$$C^T m + m^* C = -m^* (A^T P + PA) m \quad (2.45)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Eşitlik (2.45) yardımıyla

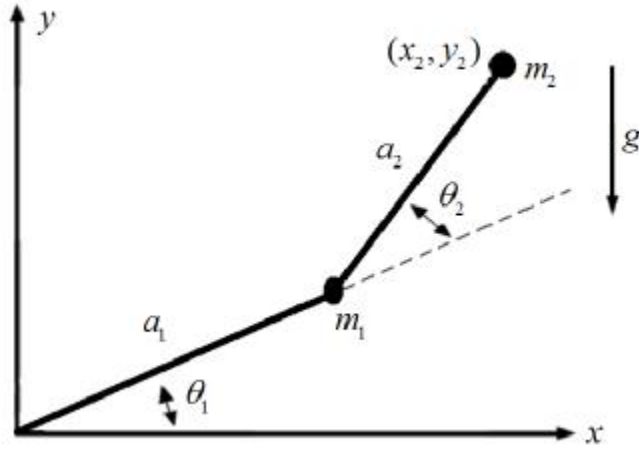
$$C^T m + m^* C = m^* PB + B^T P m \quad (2.46)$$

$$Re C^T m = Re B^T P m \quad (2.47)$$

elde edilmekte ve her ω için $PB = C$ olmakta ve Eşitlik (2.21) sağlanmaktadır.

Doktora tez çalışmasında kullanılan üç farklı (RR, RRR ve RPR) eklem yapısına sahip robot kollarının dinamik modelleri Tanım 2.1 ile ifade edilen vektör-matris formda elde edilmektedir. Bu durumdaki bir sistemin kararlı olabilmesi Teorem 2.1’de ispatlandığı gibi $M(q)$ matrisinin pozitif tanımlı olma şartının sağlanması gerekmektedir. Önceden belirlenen bir rotanın izlenmesi için vektör-matris formda elde edilen dinamik modeller yardımıyla RR, RRR ve RPR eklem yapısına sahip robot kollarının klasik denetim yöntemlerinden PID denetim ile benzetim çalışması yapılmaktadır. Benzetim çalışmasında, RR, RRR ve RPR eklem yapısına sahip robot kollarının eklem değişkenlerinin davranışı, eklem değişkenlerine uygulanması gereken tork miktarları ile eklem değişkenlerinin rota takip ve hız hata grafikleri elde edilmektedir. Belirlenen bir rotanın en az hata ile takip edilmesinde prizmatik eklem değişkeninin dönel eklem değişkenlerine göre rota takip ve hız hataları benzetim sonuçları yardımıyla belirlenmekte ve deneysel uygulamada otonom olarak hareket eden İHA üzerine monte edilecek olan robot kolunun eklem yapısına karar verilmektedir.

Doktora tez çalışmasında otonom olarak hareket eden İHA üzerine monte edilen ve Şekil 2.3’te geometrisi gösterilen RR eklem yapısına sahip robot kolunun dinamik modeli atalet veya kütle matrisi $M(q)$, coriolis-merkezkaç matrisi $V(q, \dot{q})$ ve yer çekimi matrisi $G(q)$ ’yi içeren vektör-matris formda elde edilmektedir. Şekil 2.3’te gösterilen RR eklem yapısına sahip robot kolunun eklem uzunlukları sırasıyla a_1 ve a_2 , yer çekimi ivmesi g , eklemlerdeki kütleler sırasıyla m_1 ve m_2 , eklem değişkenleri $q = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ ve tork ifadesi $\tau = [\tau_1 \ \tau_2]^T$ şeklinde belirtilmektedir.



Şekil 2.3 RR eklem yapısına sahip robot kolu.

Tanım 2.2 Şekil 2.3'te geometrisi gösterilen RR eklem yapısına sahip robot kolunun dinamik modelinin oluşturulması için hesaplanan $\tau = [\tau_1 \ \tau_2]^T$ ifadesi $M(q)$ matrisi simetrik pozitif tanımlı matris olmak üzere vektör-matris formda,

$$\begin{aligned}
 \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)a_1^2 + m_2a_2^2 + 2m_2a_1a_2 \cos \theta_2 & m_2a_2^2 + m_2a_1a_2 \cos \theta_2 \\ m_2a_2^2 + m_2a_1a_2 \cos \theta_2 & m_2a_2^2 \end{bmatrix}}_{M(q)} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\
 &+ \underbrace{\begin{bmatrix} -m_2a_1a_2(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 \\ m_2a_1a_2\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix}}_{V(q, \dot{q})} \\
 &+ \underbrace{\begin{bmatrix} (m_1 + m_2)ga_1 \cos \theta_1 + m_2ga_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2ga_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}}_{G(q)} \quad (2.48)
 \end{aligned}$$

ile ifade edilmektedir.

İspat: RR eklem yapısına sahip robot kolunun toplam kinetik ve potansiyel enerjilerinin belirlenmesi için her bir eklem için kinetik ve potansiyel enerjileri hesaplanmaktadır. Şekil 2.3'te gösterilen RR eklem yapısına sahip robot kolunun birinci eklemine ait kinetik ve potansiyel enerji

$$\omega_1 = \dot{\theta}_1 \quad (2.49)$$

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 a_1^2 \dot{\theta}_1^2 \quad (2.50)$$

$$P_1 = m_1 g a_1 \sin \theta_1 \quad (2.51)$$

olarak belirlenmektedir. RR eklem yapısına sahip robot kolunun ikinci eklemde bulunan m_2 kütesinin olduğu nokta

$$v_2^2 = (\dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_2)^2 = a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + a_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2a_1 a_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \quad (2.52)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Şekil 2.3'te gösterilen RR eklem yapısına sahip robot kolunun ikinci eklemine ait kinetik ve potansiyel enerji

$$\omega_2 = \dot{\theta}_2 \quad (2.53)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_2 a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 a_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 a_1 a_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \quad (2.54)$$

$$P_2 = m_2 g y_2 = m_2 g [a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (2.55)$$

olarak belirlenmektedir. Eşitlik (2.50), (2.51), (2.54) ve (2.55) yardımıyla Şekil 2.3'te gösterilen RR eklem yapısına sahip robot kolunun toplam kinetik ve potansiyel enerjisi sırasıyla

$$K = K_1 + K_2 = \frac{1}{2} m_1 a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 a_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 a_1 a_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \quad (2.56)$$

$$P = P_1 + P_2 = m_1 g a_1 \sin \theta_1 + m_2 g [a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (2.57)$$

şeklinde elde edilmektedir.

Toplam kinetik ve potansiyel enerjisi bulunan RR eklem yapısına sahip robot kolunun Lagrange fonksiyonu Eşitlik (2.1) yardımıyla

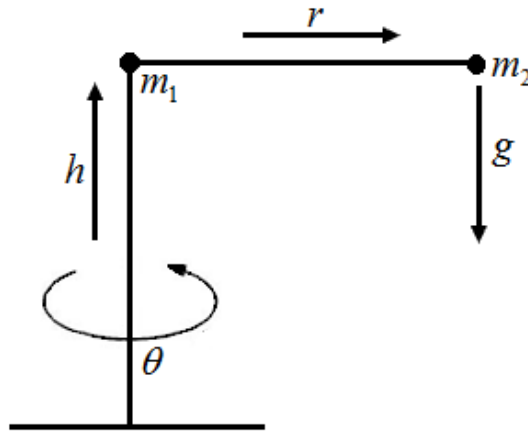
$$\begin{aligned}
L(q, \dot{q}) = & \frac{1}{2} m_1 a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 a_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\
& + m_2 a_1 a_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 - m_1 g a_1 \sin \theta_1 \\
& - m_2 g a_1 \sin \theta_1 + m_2 g a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)
\end{aligned} \tag{2.58}$$

olarak belirlenmekte ve RR eklem yapısına sahip robot kolunun $\tau = [\tau_1 \ \tau_2]^T$ ifadesi vektör-matris formda

$$\begin{aligned}
\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) a_1^2 + m_2 a_2^2 + 2 m_2 a_1 a_2 \cos \theta_2 & m_2 a_2^2 + m_2 a_1 a_2 \cos \theta_2 \\ m_2 a_2^2 + m_2 a_1 a_2 \cos \theta_2 & m_2 a_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} -m_2 a_1 a_2 (2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 \\ m_2 a_1 a_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) g a_1 \cos \theta_1 + m_2 g a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2 g a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.59}$$

olarak elde edilmektedir. Eşitlik (2.58)'de $q = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ ve $\dot{q} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T$ şeklindedir.

Şekil 2.4'te geometrisi gösterilen RRR eklem yapısına sahip m_1, m_2 kütleleri ile robot kolunun eklem değişkenleri $q = [\theta \ h \ r]^T$ olarak verilmekte ve tork ifadesi $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ ile belirtilmektedir.



Şekil 2.4 RRR eklem yapısına sahip robot kolunun geometrik gösterimi.

Tanım 2.3 Şekil 2.4'te gösterilen RRR eklem yapısına sahip robot kolunun dinamik modelinin oluşturulması için hesaplanan $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ ifadesi viskoz ve dinamik sürtünme

katsayılarından oluşan $F(\dot{q})$ vektörü ve τ_d dış bozucu etki ihmal edilerek vektör-matris formunda $M(q)$ matrisi simetrik ve pozitif tanımlı olmak üzere

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I + m_2 r^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 + m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{h} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2m_2 r \dot{r} \dot{\theta} \\ 0 \\ -m_2 r \dot{\theta}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (m_1 + m_2)g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

ile ifade edilmektedir.

İspat: RRR eklem yapısına sahip robot kolunun toplam kinetik ve potansiyel enerjilerinin belirlenmesi için her bir eklem kinetik ve potansiyel enerjileri bulunması gerekmektedir. Şekil 2.4'te gösterilen RRR eklem yapısına sahip robot kolunun birinci eklemine ait kinetik ve potansiyel enerji

$$\omega_1 = \dot{\theta} \quad (2.61)$$

$$K_{1rot} = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (2.62)$$

$$K_{1lin} = 0$$

$$K_1 = K_{1lin} + K_{1rot} = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (2.63)$$

$$P_1 = 0 \quad (2.64)$$

olarak bulunmaktadır. Eşitlik (2.62)'de I robot kolunun birinci eklemine ait atalet momentidir. Eşitlik (2.63) ve (2.64) sırasıyla robot kolunun birinci eklemine ait kinetik ve potansiyel enerjisini belirtmektedir. RRR eklem yapısına sahip robot kolunun ikinci eklemine ait bulunan m_1 kütle noktasının olduğu nokta

$$p_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ h \end{bmatrix} \Rightarrow v_2 = \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{h} \end{bmatrix}$$

$$v_2^2 = (\dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_2)^2 = \dot{h}^2 \quad (2.65)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Şekil 2.8'de gösterilen RRR eklem yapısına sahip robot kolunun ikinci eklemine ait kinetik ve potansiyel enerji

$$\omega_2 = \dot{\theta} \quad (2.66)$$

$$K_{2rot} = 0$$

$$K_{2lin} = \frac{1}{2} m_1 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 \dot{h}^2 \quad (2.67)$$

$$K_2 = K_{2lin} + K_{2rot} = \frac{1}{2} m_1 \dot{h}^2 \quad (2.68)$$

$$P_2 = m_1 g y_2 = m_1 g h \quad (2.69)$$

olarak bulunmaktadır. Eşitlik (2.67) ve (2.68)'de gösterilen \dot{h}^2 eklem uzunluğunu ifade etmektedir. RRR eklem yapısına sahip robot kolunun üçüncü eklemine bulunan m_2 kütesinin olduğu nokta

$$p_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \\ h \end{bmatrix} \Rightarrow v_2 = \begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{h} \end{bmatrix}$$

$$v_3^2 = (\dot{x}_3)^2 + (\dot{y}_3)^2 = \dot{r}^2 + \dot{h}^2 \quad (2.70)$$

şeklinde gösterilmektedir. Şekil 2.4'te gösterilen RRR eklem yapısına sahip robot kolunun üçüncü eklemine ait kinetik ve potansiyel enerji

$$\omega_3 = \dot{\theta} \quad (2.71)$$

$$K_{3rot} = \frac{1}{2} I_3 \omega_3^2 = \frac{1}{2} m_2 r^2 \dot{\theta}^2$$

$$K_{3lin} = \frac{1}{2} m_2 v_3^2 = \frac{1}{2} m_2 (\dot{r}^2 + \dot{h}^2) \quad (2.72)$$

$$K_3 = K_{3lin} + K_{3rot} = \frac{1}{2} m_2 (\dot{r}^2 + \dot{h}^2) + \frac{1}{2} m_2 r^2 \dot{\theta}^2 \quad (2.73)$$

$$P_3 = m_2 g y_3 = m_2 g h \quad (2.74)$$

olarak bulunmaktadır. Eşitlik (2.63), (2.64), (2.68), (2.69), (2.73) ve (2.74) yardımıyla Şekil 2.4'te gösterilen RRR eklem yapısına sahip robot kolunun toplam kinetik ve potansiyel enerjisi sırasıyla

$$K = K_1 + K_2 + K_3 = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{h}^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{r}^2 + \dot{h}^2) + \frac{1}{2} m_2 r^2 \dot{\theta}^2 \quad (2.75)$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = (m_1 + m_2) g h \quad (2.76)$$

olarak bulunmaktadır. Toplam kinetik ve potansiyel enerjileri bulunan RRR eklem yapısına sahip robot kolunun Lagrange fonksiyonu Eşitlik (2.1) yardımıyla

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{h}^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{r}^2 + \dot{h}^2) + \frac{1}{2} m_2 r^2 \dot{\theta}^2 - (m_1 + m_2) g h \quad (2.77)$$

olarak belirlenmektedir. Eşitlik (2.77)'de $q = [\theta \quad h \quad r]^T$ ve $\dot{q} = [\dot{\theta} \quad \dot{h} \quad \dot{r}]^T$ şeklindedir. Şekil 2.4'te gösterilen RRR eklem yapısına sahip robot kolunun her bir eklemine etki eden tork ifadesi

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = I \dot{\theta} + m_2 r^2 \dot{\theta}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = I \ddot{\theta} + m_2 r^2 \ddot{\theta} + 2m_2 r \dot{r} \dot{\theta}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = 0$$

$$\tau_1 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = (I + m_2 r^2) \ddot{\theta} + 2m_2 r \dot{r} \dot{\theta} \quad (2.78)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{h}} = m_1 \dot{h} + m_2 \dot{h}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{h}} = (m_1 + m_2) \ddot{h}$$

$$\frac{\partial L}{\partial h} = -(m_1 + m_2)g$$

$$\tau_2 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{h}} - \frac{\partial L}{\partial h} = (m_1 + m_2)\ddot{h} + (m_1 + m_2)g \quad (2.79)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{r}} = m_2\dot{r}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} = m_2\ddot{r}$$

$$\frac{\partial L}{\partial r} = m_2r\dot{\theta}^2$$

$$\tau_3 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} - \frac{\partial L}{\partial r} = m_2\ddot{r} - m_2r\dot{\theta}^2 \quad (2.80)$$

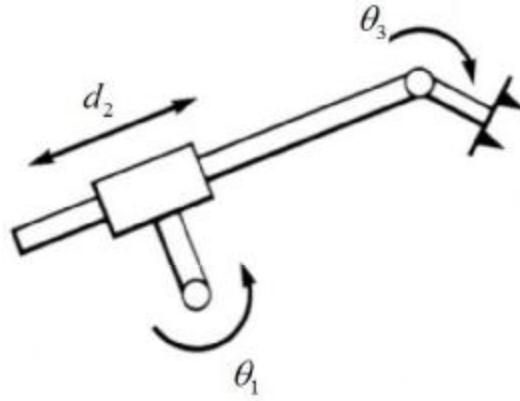
olarak hesaplanmaktadır. Şekil 2.4'te gösterilen RRR eklem yapısına sahip robot kolunun dinamik modelinin oluşturulması için hesaplanan $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ ifadesi Tanım 2.3'te belirtilen vektör-matris form

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} I + m_2r^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 + m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix}}_{M(q)} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{h} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 2m_2r\dot{r}\dot{\theta} \\ 0 \\ -m_2r\dot{\theta}^2 \end{bmatrix}}_{V(q, \dot{q})} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ (m_1 + m_2)g \\ 0 \end{bmatrix}}_{G(q)} \quad (2.81)$$

şeklinde elde edilmektedir. Eşitlik (2.81)'de $M(q)$ matrisi simetrik ve pozitif tanımlı matristir. Ayrıca, viskoz ve dinamik sürtünme katsayılarından oluşan $F(\dot{q})$ vektörü ve τ_d dış bozucu etki ihmal edilmektedir. Robot kolunun denetimi esnasında dinamik modele $F(\dot{q})$ ve τ_d vektör-matris formda eklenmektedir.

Şekil 2.5'te katı gövde yapısı gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolunun dinamik modeli oluşturulmaktadır. Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolunun

eklem değişkenleri $q = [\theta_1 \quad d_2 \quad \theta_3]^T$ olarak verilmekte ve tork ifadesi $\tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T$ şeklinde belirlenmektedir.



Şekil 2.5 RPR eklem yapısına sahip robot kolunun katı gövde yapısı.

Tanım 2.4 Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolunun dinamik modelinin oluşturulması için hesaplanan $\tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T$ ifadesi vektör-matris formda

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) \quad (2.82)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolu için $M(q)$ simetrik pozitif tanımlı matris olmak üzere atalet veya kütle matrisi $M(q)$, coriolis-merkezkaç matrisi $V(q, \dot{q})$ ve yer çekimi matrisi $G(q)$ vektör-matris formda

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (2.83)$$

$$M_{11} = m_1 L_1^2 + (m_2 + m_3)(L_1^2 + d_2^2) + 2m_3 L_3 (L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3) + m_3 L_3^2$$

$$M_{12} = -(m_2 + m_3)L_1 - m_3 L_3 \sin \theta_3$$

$$M_{13} = m_3 L_3 (L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3) + m_3 L_3^2$$

$$M_{21} = -(m_2 + m_3)L_1 - m_3L_3 \sin \theta_3$$

$$M_{22} = m_2 + m_3$$

$$M_{23} = -m_3L_3 \sin \theta_3$$

$$M_{31} = m_3L_3(L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3) + m_3L_3^2$$

$$M_{32} = -m_3L_3 \sin \theta_3$$

$$M_{33} = m_3L_3^2$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

$$V_1 = 2(m_2 + m_3)d_2\dot{d}_2\dot{\theta}_1 + 2m_3L_3 \cos \theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + m_3L_3(L_1 \cos \theta_3 - d_2 \sin \theta_3)(2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2)$$

$$V_2 = -m_3L_3 \cos \theta_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2 - (m_2 + m_3)d_2 \dot{\theta}_1^2$$

$$V_3 = 2m_3L_3 \cos \theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 - m_3L_3(L_1 \cos \theta_3 - d_2 \sin \theta_3) \dot{\theta}_1^2$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

$$G_1 = -m_1gL_1 \sin \theta_1 + m_2g(d_2 \cos \theta_1 - L_1 \sin \theta_1) + m_3g[d_2 \cos \theta_1 - L_1 \sin \theta_1 + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_3)]$$

$$G_2 = (m_2 + m_3)g \sin \theta_1$$

$$G_3 = m_3gL_3 \cos(\theta_1 + \theta_3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, $M(q)$ atalet matrisinin köşegeni dışındaki elemanları $M_{12} = M_{21}$, $M_{13} = M_{31}$ ve $M_{23} = M_{32}$ olarak elde edilmektedir. $M(q)$ simetrik pozitif tanımlı matristir.

İspat: Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolunun Şekil 2.6'daki geometrik gösterimi kullanılarak m_1 , m_2 ve m_3 kütlelerinin yer aldığı p_1 , p_2 ve p_3 noktalarının yatay ve düşey bileşenleri

$$\begin{aligned} x_1 &= L_1 \cos \alpha = L_1 \cos(90 - \theta_1) \Rightarrow x_1 = L_1 \sin \theta_1 \\ y_1 &= L_1 \sin \alpha = L_1 \sin(90 - \theta_1) \Rightarrow y_1 = L_1 \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (2.86)$$

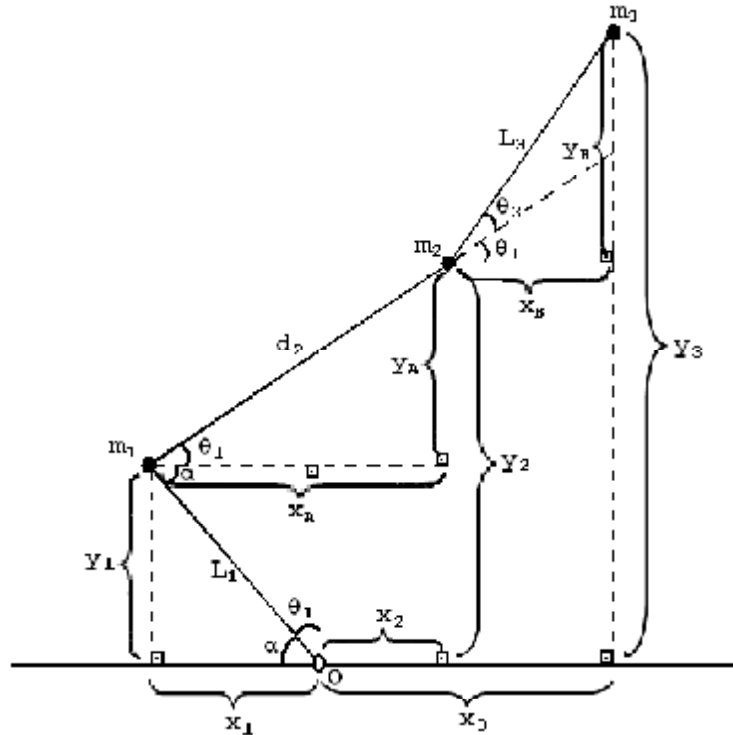
$$\begin{aligned} x_A &= d_2 \cos \theta_1 \\ y_A &= d_2 \sin \theta_1 \end{aligned} \quad (2.87)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= x_A - x_1 \Rightarrow x_2 = d_2 \cos \theta_1 - L_1 \sin \theta_1 \\ y_2 &= y_A + y_1 \Rightarrow y_2 = L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1 \end{aligned} \quad (2.88)$$

$$\begin{aligned} x_B &= L_3 \cos(\theta_1 + \theta_3) \\ y_B &= L_3 \sin(\theta_1 + \theta_3) \end{aligned} \quad (2.89)$$

$$\begin{aligned} x_3 &= x_2 + x_B \Rightarrow x_3 = d_2 \cos \theta_1 - L_1 \sin \theta_1 + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_3) \\ y_3 &= y_2 + y_B \Rightarrow y_3 = L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1 + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_3) \end{aligned} \quad (2.90)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 2.6 RPR eklem yapısına sahip robot kolunun geometrik gösterimi.

RPR eklem yapısına sahip robot kolunun toplam kinetik ve potansiyel enerjilerinin belirlenmesi için her bir eklemin kinetik ve potansiyel enerjileri bulunmaktadır. Robot kolunun birinci eklemine ait kinetik ve potansiyel enerji

$$\omega_1 = \dot{\theta}_1 \quad (2.91)$$

$$v_1 = \omega_1 L_1 = \dot{\theta}_1 L_1 \quad (2.92)$$

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 \quad (2.93)$$

$$P_1 = m_1 g y_1 = m_1 g L_1 \cos \theta_1 \quad (2.94)$$

olarak bulunmaktadır. Eşitlik (2.93) ve (2.94) sırasıyla robot kolunun birinci ekleminin kinetik ve potansiyel enerjisini belirtmektedir. Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolunun ikinci ekleminde bulunan m_2 kütesinin olduğu nokta

$$p_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_2 \cos \theta_1 - L_1 \sin \theta_1 \\ L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (2.95)$$

$$v_2 = \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d}_2 \cos \theta_1 - d_2 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - L_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 \\ -L_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 + \dot{d}_2 \sin \theta_1 + d_2 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

$$v_2 = \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d}_2 \cos \theta_1 - \dot{\theta}_1 (L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1) \\ \dot{d}_2 \sin \theta_1 + \dot{\theta}_1 (-L_1 \sin \theta_1 + d_2 \cos \theta_1) \end{bmatrix}$$

$$v_2^2 = (\dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_2)^2$$

$$v_2^2 = \dot{d}_2^2 \cos^2 \theta_1 - 2 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 (L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1) + \dot{\theta}_1^2 (L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1)^2 \\ + \dot{d}_2^2 \sin^2 \theta_1 + 2 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 (-L_1 \sin \theta_1 + d_2 \cos \theta_1) + \dot{\theta}_1^2 (-L_1 \sin \theta_1 + d_2 \cos \theta_1)^2$$

$$v_2^2 = \dot{d}_2^2 \cos^2 \theta_1 - 2L_1 \cos^2 \theta_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 - \cancel{2d_2 \sin \theta_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2} + L_1^2 \cos^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2 \\ + \cancel{2L_1 d_2 \sin \theta_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2} + d_2^2 \sin^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + \dot{d}_2^2 \sin^2 \theta_1 - 2L_1 \sin^2 \theta_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 \\ + \cancel{2d_2 \sin \theta_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2} + L_1^2 \sin^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2 - \cancel{2L_1 d_2 \sin \theta_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2} + d_2^2 \cos^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2$$

$$v_2^2 = \underbrace{\dot{d}_2^2(\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1)}_1 - 2L_1 \underbrace{\dot{\theta}_1 \dot{d}_2(\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1)}_1 + L_1^2 \underbrace{\dot{\theta}_1^2(\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1)}_1 + d_2^2 \underbrace{\dot{\theta}_1^2(\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1)}_1$$

$$v_2^2 = \dot{d}_2^2 - 2L_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + \dot{\theta}_1^2 (L_1^2 + d_2^2) \quad (2.96)$$

şeklinde gösterilmektedir. Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolunun ikinci eklemine ait kinetik ve potansiyel enerji

$$\omega_2 = \dot{\theta}_1 \quad (2.97)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_2 \left[\dot{d}_2^2 - 2L_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + \dot{\theta}_1^2 (L_1^2 + d_2^2) \right] \quad (2.98)$$

$$P_2 = m_2 g y_2 = m_2 g (L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1) \quad (2.99)$$

olarak bulunmaktadır. Eşitlik (2.98) ve (2.99)'da d_2 prizmatik eklem için eklem uzunluğunu ifade etmektedir. Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolunun üçüncü ekleminde bulunan m_3 kütesinin olduğu nokta

$$p_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_2 \cos \theta_1 - L_1 \sin \theta_1 + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_3) \\ L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1 + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_3) \end{bmatrix} \quad (2.100)$$

$$v_3 = \begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d}_2 \cos \theta_1 - d_2 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - L_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 - L_3 \sin(\theta_1 + \theta_3)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \\ -L_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 + \dot{d}_2 \sin \theta_1 + d_2 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_3)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \end{bmatrix}$$

$$v_3 = \begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underbrace{\dot{d}_2 \cos \theta_1 - \dot{\theta}_1 (L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1)}_{A_1} - \underbrace{L_3 \sin(\theta_1 + \theta_3)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)}_{B_1} \\ \underbrace{\dot{d}_2 \sin \theta_1 + \dot{\theta}_1 (-L_1 \sin \theta_1 + d_2 \cos \theta_1)}_{A_2} + \underbrace{L_3 \cos(\theta_1 + \theta_3)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)}_{B_2} \end{bmatrix}$$

$$v_3^2 = (\dot{x}_3)^2 + (\dot{y}_3)^2$$

$$v_3^2 = (A_1^2 - 2A_1B_1 + B_1^2) + (A_2^2 + 2A_2B_2 + B_2^2)$$

$$v_3^2 = (A_1^2 + A_2^2) + (-2A_1B_1 + 2A_2B_2) + (B_1^2 + B_2^2)$$

Eşitlik (2.96) kullanılarak,

$$(A_1^2 + A_2^2) = v_2^2 = \dot{d}_2^2 - 2L_1\dot{\theta}_1\dot{d}_2 + \dot{\theta}_1^2(L_1^2 + d_2^2)$$

$$\begin{aligned} -2A_1B_1 &= -2L_3 \cos\theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_3) \dot{d}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) + 2L_1L_3 \cos\theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_3) \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \\ &\quad + 2d_2L_3 \sin\theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_3) \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2A_2B_2 &= 2L_3 \sin\theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_3) \dot{d}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) - 2L_1L_3 \sin\theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_3) \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \\ &\quad + 2d_2L_3 \cos\theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_3) \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -2A_1B_1 + 2A_2B_2 &= 2L_3 \dot{d}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \underbrace{[\sin\theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_3) - \cos\theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_3)]}_{= \sin(\theta_1 - (\theta_1 + \theta_3)) = \sin(-\theta_3) = -\sin\theta_3} \\ &\quad + 2L_1L_3 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \underbrace{[\cos\theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_3) - \sin\theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_3)]}_{= -\sin(\theta_1 - (\theta_1 + \theta_3)) = -\sin(-\theta_3) = \sin\theta_3} \\ &\quad + 2d_2L_3 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \underbrace{[\sin\theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_3) + \cos\theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_3)]}_{= \cos(\theta_1 - (\theta_1 + \theta_3)) = \cos(-\theta_3) = \cos\theta_3} \end{aligned}$$

$$-2A_1B_1 + 2A_2B_2 = -2L_3 \sin\theta_3 \dot{d}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) + 2L_3 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) (L_1 \sin\theta_3 + d_2 \cos\theta_3)$$

$$B_1^2 + B_2^2 = L_3^2 \sin^2(\theta_1 + \theta_3) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2 + L_3^2 \cos^2(\theta_1 + \theta_3) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2 = L_3^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2$$

$$\begin{aligned} v_3^2 &= \dot{d}_2^2 - 2L_1\dot{\theta}_1\dot{d}_2 + \dot{\theta}_1^2(L_1^2 + d_2^2) - 2L_3 \sin\theta_3 \dot{d}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \\ &\quad + 2L_3 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_3) (L_1 \sin\theta_3 + d_2 \cos\theta_3) + L_3^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2 \end{aligned} \quad (2.101)$$

şeklinde gösterilmektedir. Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolunun üçüncü eklemine ait kinetik ve potansiyel enerji

$$\omega_3 = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3 \quad (2.102)$$

$$K_3 = \frac{1}{2} m_3 v_3^2 = \frac{1}{2} m_3 \left[\dot{d}_2^2 - 2L_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + \dot{\theta}_1^2 (L_1^2 + d_2^2) - 2L_3 \sin \theta_3 \dot{d}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) + 2L_3 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) (L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3) + L_3^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2 \right] \quad (2.103)$$

$$P_3 = m_3 g y_3 = m_3 g \left[L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1 + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_3) \right] \quad (2.104)$$

olarak bulunmaktadır. Eşitlik (2.93), (2.94), (2.98), (2.99), (2.103) ve (2.104) yardımıyla Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolunun toplam kinetik ve potansiyel enerjisi sırasıyla

$$K = \frac{1}{2} m_1 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left[\dot{d}_2^2 - 2L_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + \dot{\theta}_1^2 (L_1^2 + d_2^2) \right] + \frac{1}{2} m_3 \left[\dot{d}_2^2 - 2L_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + \dot{\theta}_1^2 (L_1^2 + d_2^2) - 2L_3 \sin \theta_3 \dot{d}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) + 2L_3 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) (L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3) + L_3^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2 \right] \quad (2.105)$$

$$P = m_1 g L_1 \cos \theta_1 + m_2 g (L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1) + m_3 g \left[L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1 + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_3) \right] \quad (2.106)$$

şeklinde elde edilmektedir. Toplam kinetik ve potansiyel enerjileri bulunan Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolunun Lagrange fonksiyonu Eşitlik (2.1) yardımıyla

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left[\dot{d}_2^2 - 2L_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + \dot{\theta}_1^2 (L_1^2 + d_2^2) \right] + \frac{1}{2} m_3 \left[\dot{d}_2^2 - 2L_1 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + \dot{\theta}_1^2 (L_1^2 + d_2^2) - 2L_3 \sin \theta_3 \dot{d}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) + 2L_3 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) (L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3) + L_3^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2 \right] - m_1 g L_1 \cos \theta_1 - m_2 g (L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1) - m_3 g \left[L_1 \cos \theta_1 + d_2 \sin \theta_1 + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_3) \right] \quad (2.107)$$

olarak belirlenmektedir. Eşitlik (2.107)'de $q = [\theta_1 \ d_2 \ \theta_3]^T$ ve $\dot{q} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{d}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$ şeklindedir. Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip robot kolunun her bir eklemine etki eden tork ifadesi

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} &= m_1 L_1^2 \dot{\theta}_1 - (m_2 + m_3) L_1 \dot{d}_2 + (m_2 + m_3)(L_1^2 + d_2^2) \dot{\theta}_1 - m_3 L_3 \sin \theta_3 \dot{d}_2 \\ &\quad + m_3 L_3 (L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3)(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) + m_3 L_3^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} &= m_1 L_1^2 \ddot{\theta}_1 - (m_2 + m_3) L_1 \ddot{d}_2 + (m_2 + m_3)(L_1^2 + d_2^2) \ddot{\theta}_1 + 2(m_2 + m_3) d_2 \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 \\ &\quad - m_3 L_3 \sin \theta_3 \ddot{d}_2 - \cancel{m_3 L_3 \cos \theta_3 \dot{\theta}_3 \dot{d}_2} + 2m_3 L_3 \cos \theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + \cancel{m_3 L_3 \cos \theta_3 \dot{\theta}_3 \dot{d}_2} \\ &\quad + m_3 L_3 (L_1 \cos \theta_3 - d_2 \sin \theta_3)(2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) + 2m_3 L_3 (L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3) \ddot{\theta}_1 \\ &\quad + m_3 L_3 (L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3) \ddot{\theta}_3 + m_3 L_3^2 \ddot{\theta}_1 + m_3 L_3^2 \ddot{\theta}_3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial \theta_1} &= m_1 g L_1 \sin \theta_1 - m_2 g (d_2 \cos \theta_1 - L_1 \sin \theta_1) \\ &\quad - m_3 g [d_2 \cos \theta_1 - L_1 \sin \theta_1 + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_3)]\end{aligned}$$

$$\tau_1 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial L}{\partial \theta_1}$$

$$\begin{aligned}\tau_1 &= [m_1 L_1^2 + (m_2 + m_3)(L_1^2 + d_2^2) + 2m_3 L_3 (L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3) + m_3 L_3^2] \ddot{\theta}_1 \\ &\quad + [-(m_2 + m_3) L_1 - m_3 L_3 \sin \theta_3] \ddot{d}_2 + [m_3 L_3 (L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3) + m_3 L_3^2] \ddot{\theta}_3 \\ &\quad + [2(m_2 + m_3) d_2 \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 + 2m_3 L_3 \cos \theta_3 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 + m_3 L_3 (L_1 \cos \theta_3 - d_2 \sin \theta_3)(2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2)] \\ &\quad - m_1 g L_1 \sin \theta_1 + m_2 g (d_2 \cos \theta_1 - L_1 \sin \theta_1) + m_3 g [d_2 \cos \theta_1 - L_1 \sin \theta_1 + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_3)]\end{aligned}\quad (2.108)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_2} = (m_2 + m_3) \dot{d}_2 - (m_2 + m_3) L_1 \dot{\theta}_1 - m_3 L_3 \sin \theta_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{d}_2} = (m_2 + m_3) \ddot{d}_2 - (m_2 + m_3) L_1 \ddot{\theta}_1 - m_3 L_3 \sin \theta_3 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_3) - m_3 L_3 \cos \theta_3 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial d_2} = (m_2 + m_3) d_2 \dot{\theta}_1^2 + m_3 L_3 \cos \theta_3 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3) - (m_2 + m_3) g \sin \theta_1$$

$$\tau_2 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{d}_2} - \frac{\partial L}{\partial d_2}$$

$$\begin{aligned}
\tau_2 = & \left[-(m_2 + m_3)L_1 - m_3L_3 \sin \theta_3 \right] \ddot{\theta}_1 + (m_2 + m_3)\ddot{d}_2 + (-m_3L_3 \sin \theta_3)\ddot{\theta}_3 \\
& + \left[-m_3L_3 \cos \theta_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2 - (m_2 + m_3)d_2 \dot{\theta}_1^2 \right] \\
& + [(m_2 + m_3)g \sin \theta_1]
\end{aligned} \tag{2.109}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} = -m_3L_3 \sin \theta_3 \dot{d}_2 + m_3L_3(L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3)\dot{\theta}_1 + m_3L_3^2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} = & -m_3L_3 \sin \theta_3 \ddot{d}_2 + m_3L_3 \cos \theta_3 \dot{d}_2 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_3) \\
& + m_3L_3(L_1 \cos \theta_3 - d_2 \sin \theta_3)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + m_3L_3(L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3)\ddot{\theta}_1 \\
& + m_3L_3^2\ddot{\theta}_1 + m_3L_3^2\ddot{\theta}_3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial \theta_3} = & -m_3L_3 \cos \theta_3 \dot{d}_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) + m_3L_3(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1\dot{\theta}_3)(L_1 \cos \theta_3 - d_2 \sin \theta_3) \\
& - m_3gL_3 \cos(\theta_1 + \theta_3)
\end{aligned}$$

$$\tau_3 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} - \frac{\partial L}{\partial \theta_3}$$

$$\begin{aligned}
\tau_3 = & \left[m_3L_3(L_1 \sin \theta_3 + d_2 \cos \theta_3) + m_3L_3^2 \right] \ddot{\theta}_1 + (-m_3L_3 \sin \theta_3)\ddot{d}_2 + (m_3L_3^2)\ddot{\theta}_3 \\
& + \left[2m_3L_3 \cos \theta_3 \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 - m_3L_3(L_1 \cos \theta_3 - d_2 \sin \theta_3)\dot{\theta}_1^2 \right] + [m_3gL_3 \cos(\theta_1 + \theta_3)]
\end{aligned} \tag{2.110}$$

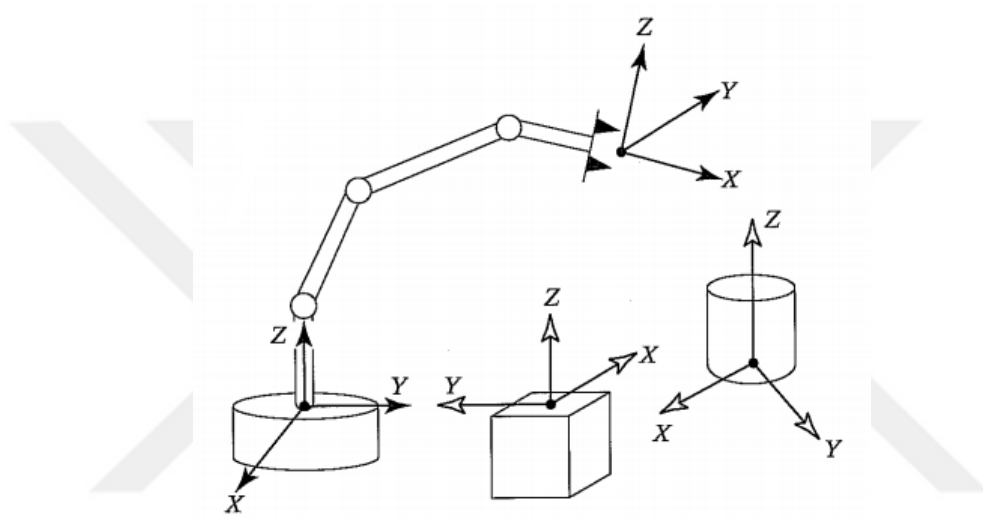
olarak elde edilmektedir.

2.2 ÇOK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN KİNEMATİK MODELİ

Kinematik, geometrisi belli bir sistemin yapısını ve hareketlerini inceleyen bilim dalı olarak adlandırılmaktadır (Crane and Duffy 2008). Robot kinematiği, üç boyutlu uzayda robotun kendi tasarımı ve çevresindeki nesnelerin yerleşimi ile ilgilenmektedir (Gupta 1986). Robot kinematiği ile robot kolunun kuvvet, hız ve ivme analizi gerçekleştirilme, uç işlevci ile eklemler arasındaki ilişki tanımlanmaktadır (Gupta 1997, Craig 2005, Mihelj et al. 2007, Sciavicco and Siciliano 2012, Latombe 2012). Yerleşim bilgisi konum vektörü yönelim matrisi ile belirlenmektedir. Üç boyutlu uzayda bir nesnenin yönelimini ve konumunu tanımlamak için

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi nesnenin merkezine koordinat sistemi yerleştirilmekte ve yerleştirilen koordinat sistemi yardımıyla robot ile robotun çalışma uzayında bulunan nesnelere arasındaki yönelim ve konum ilişkisi tanımlanmaktadır (Craig 2005, Bingül ve Küçük 2009).

Robot kolu yapısal olarak birbirinden bağımsız hareket eden öteleme ve dönme hareketi gerçekleştiren eklemlerle, bu eklemleri birleştiren bağlardan oluşmaktadır. Dönme hareketi nedeniyle gerçekleşen yer değiştirmeye eklem açısı, bağlar arası yer değiştirme nedeniyle oluşan ötelemeye eklem kaçıklığı denilmektedir (Craig 2005).



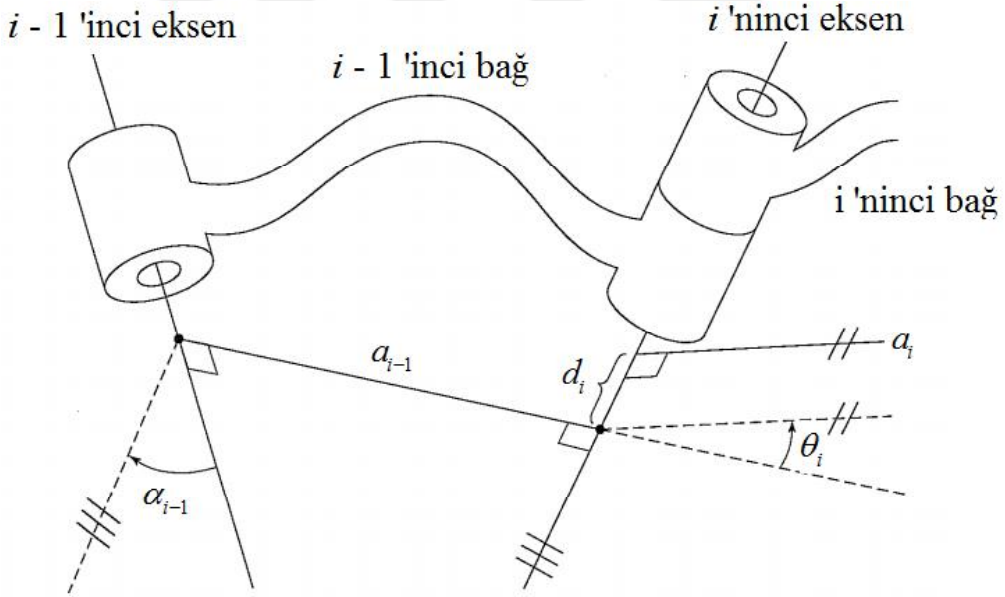
Şekil 2.7 Robot koluna ve nesnelere koordinat sisteminin yerleştirilmesi (Craig 2005).

2.2.1 Robot Kolunun İleri Kinematığı

Robot kolunun ileri kinematığında, robot kolunun uç işlevcinin konumu ve yönü eklem değişkenleri cinsinden bir referans koordinat sistemine göre tanımlanabilmektedir (Craig 2005). Robot kolunun her bir eklemine koordinat sistemi yerleştirilerek, komşu iki eklem arasındaki ilişki ${}^{i-1}T_i$ dönüşüm matrisi ile ifade edilmektedir. İlk eklemle ait dönüşüm matrisi, ilk eklemle ana çerçeve arasında bir ilişkiyi tanımlarken, son eklemle ait dönüşüm matrisi ise uç işlevci ile son eklem arasında bir ilişkiyi tanımlamaktadır. Arka arkaya oluşturulan bu ilişkiye açık kinematik zincir denilmektedir. Arka arkaya sıralanan eklem dönüşüm matrislerinden yararlanılarak ana çerçeve ile araç çerçevesi arasında bir ilişki tanımlanmaktadır. Bu ilişki ileri kinematik olarak adlandırılmakta ve araç çerçevesinin yönelimini ve konumunu ana çerçeveye göre

$${}^0_N T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T \cdots {}^{N-1}_N T \quad (2.111)$$

şeklinde ifade etmektedir. Her bir eklem matrisi ${}^{i-1}_i T$ bir eklem değişkeninin fonksiyonudur. ${}^{i-1}_i T$ dönüşüm matrisi ise N tane eklem birer fonksiyonudur (Bingül ve Küçük 2009). Çok eklemlili robot kolunun eklem değişkenlerinin belirlenmesinde genellikle Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılmaktadır (Denavit and Hartenberg 1955). Denavit-Hartenberg (D-H) yönteminde Şekil 2.8’de gösterilen dört ana parametre kullanılarak robot ileri kinematiği elde edilmektedir. Bu değişkenler iki eksen arasındaki bağ uzunluğu (a_{i-1}), $(i - 1)$ ile i eksenleri arasındaki bağ açısı (α_{i-1}), üst üste çakışan bağlar arasındaki eklem kaçıklığı (d_i) ve iki bağ arasında oluşan eklem açısı (θ_i) dir (Murray et al. 1994, Craig 2005). Belirtilen bu dört ana değişken D-H parametresi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.8’de gösterilen D-H parametrelerinin bulunabilmesi için robot kolunun dönme eksenlerinin belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 2.8 Çok eklemlili robot kolu Denavit-Hartenberg değişkenleri (Craig 2005).

Eklem eksenlerinin dönme ve kayma yönleri Z eksenine, Z eksenine dik ve kol boyunca olan bağ uzunluğu ise X eksenine olarak belirlenmektedir. Z ve X eksenlerinin belirlenmesini müteakip sağ el kuralına göre Y eksenine bulunmaktadır. Şekil 2.8’deki robot kolu için belirlenen eksenler Şekil 2.9’da gösterilmektedir. Eklemlere yerleştirilen koordinat sistemleri belirlendikten sonra eklem değişkenleri

- a_i : \hat{Z}_{i-1} den \hat{Z}_i ye \hat{X}_{i-1} boyunca ölçülen uzaklık,
 α_i : \hat{Z}_{i-1} den \hat{Z}_i ye \hat{X}_{i-1} boyunca ölçülen açı,
 d_i : \hat{X}_{i-1} den \hat{X}_i ye \hat{Z}_i boyunca ölçülen uzaklık,
 θ_i : \hat{X}_{i-1} den \hat{X}_i ye \hat{Z}_i boyunca ölçülen açı

ile isimlendirilmektedir.

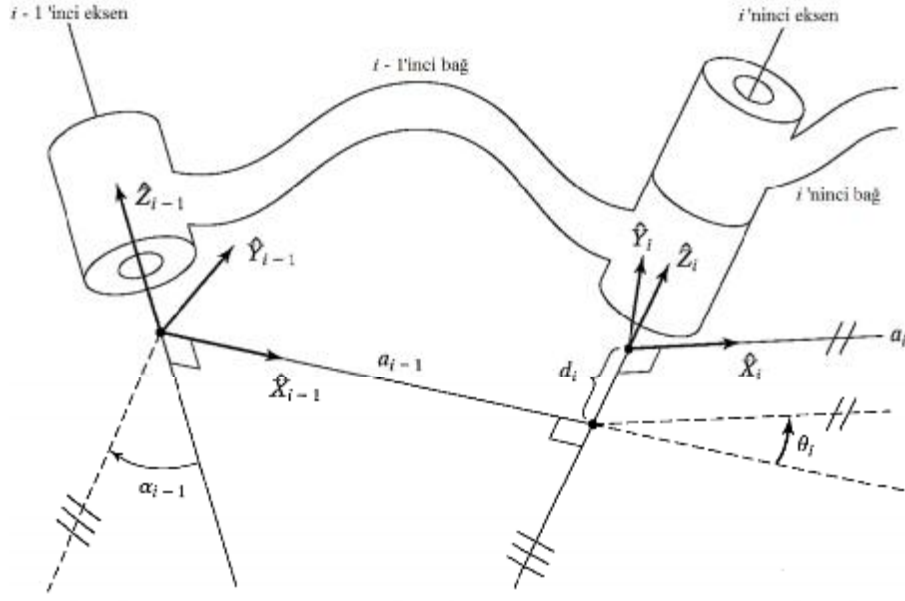
Robotun bir eklemine ait dönüşüm matrisi D-H parametreleri yardımıyla elde edilmektedir. Bu D-H parametreleri kullanılarak Şekil 2.10'da gösterilen ve her bir çerçevenin ($\{P\}$, $\{Q\}$ ve $\{R\}$) diğer çerçeveye dönüşümü şeklinde elde edilen matrisler birbiri ile çarpılarak, N serbestlik derecesine sahip robot kolunun bir eklemine ait dönüşüm matrisi genel formda

$${}^{i-1}T = {}^{i-1}T_R^R T_Q^Q T_P^P T_i^i \quad (2.112)$$

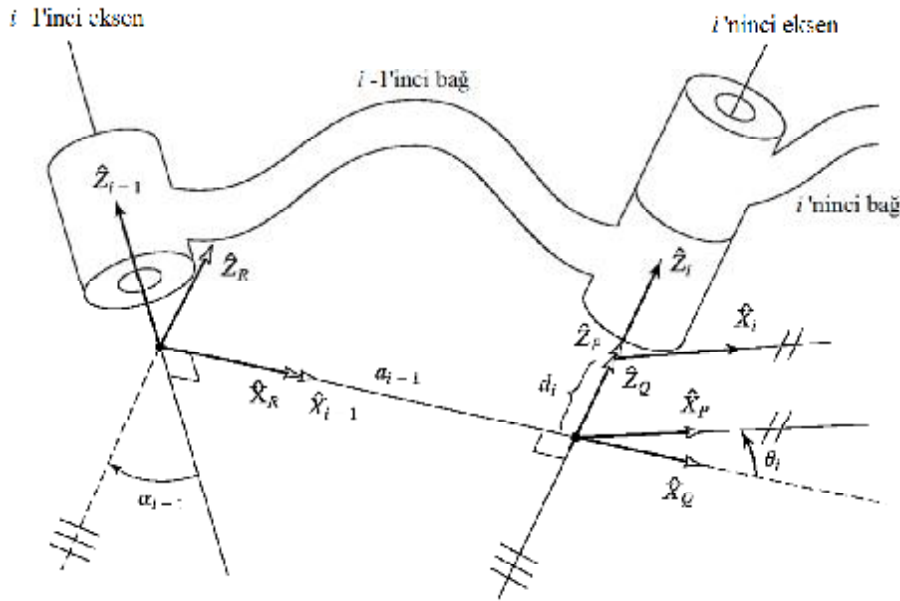
$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.113)$$

$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.114)$$

şeklinde elde edilmektedir. Elde edilen ${}^{i-1}T$ dönüşüm matrisi 3x3'lük dönme matrisinden ve 3x1'lik konum vektöründen oluşmaktadır.



Şekil 2.9 Robot kolunun dönme ve kayma yönleri için eksen değişkenleri (Craig 2005).



Şekil 2.10 Robot kolu {P}, {Q} ve {R} ara çerçevelerinin konumu (Craig 2005).

2.2.2 Robot Kolunun Ters Kinematığı

Robot kolunun ters kinematığında, robot kolunun uç işlevcisinin yönü ve koordinatlarının bilinmesi durumunda eklem değişkenlerinin değerleri belirlenmektedir (Bi and Jin 2011). Robot kolunun ters kinematik çözümü, eksenlerde kullanılan aktüatörlerin eklem torklarının hesaplanması, gerçek zamanlı kontrol ve yörünge planlaması için oldukça önem taşımaktadır (Asada and Slotine 1986, Jazar 2010). Kinematik denklemleri bulunan robot kolunun kontrol

edilmesini mümkün kılacak açıların veya öteleme miktarlarının belirlenmesi ters kinematik dönüşümler ile yapılmaktadır (Chiaverini et al. 1994, Aydın and Kucuk 2006, Spong and Vidyasagar 2008).

Doktora tez çalışmasının ileri ve ters kinematiği kısmında RR ve RRR eklem yapılarına sahip düzlemsel robot kolları kullanılmaktadır. Üç eklemlili bir robot kolunun ileri kinematiği,

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \quad (2.115)$$

şeklinde bulunmaktadır. Eşitlik (2.115) ile konum ve yönelim verilerini içeren matris elemanları cinsinden

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.116)$$

ifade edilmektedir. Eşitlik (2.116)'da $n = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ uç işlevcisinin normal vektörü, $s = [s_x \ s_y \ s_z]^T$ kayma vektörü ve $a = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ yaklaşma vektörüdür. ${}^{i-1}T_i$ matrisinde sol üst 3×3 'lük kısım uç işlevcisinin referansa göre yönelimini, $p = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ ise referans koordinat sistemine göre konumunu belirtmektedir. Kinematik problem çözümü

$$\left[{}^0T_1 \right]^{-1} {}^0T_3 = \left[{}^0T_1 \right]^{-1} {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \quad (2.117)$$

eşitliğinde, eşitliğin sağ ve sol tarafında bulunan matris elemanlarının

$$\left[{}^0T_1 {}^1T_2 \right]^{-1} {}^0T_3 = {}^2T_3 \quad (2.118)$$

şeklinde birbirine eşitlenmesiyle bulunmaktadır.

Doktora tez çalışmasında kullanılan ve Şekil 2.3'te gösterilen RR eklem yapısına sahip düzlemsel robot kolunun uç işlevcisinin referans koordinat sistemine göre konum ve yönlendirmesinin bulunması için ileri kinematik analizi

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \quad (2.119)$$

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.120)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & a_1 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.121)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.122)$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c_1c_2 + s_1s_2 & -s_1c_2 - c_1s_2 & 0 & a_1c_1 + a_2c_1c_2 - a_2s_1s_2 \\ s_1c_2 + c_1s_2 & c_1c_2 - s_1s_2 & 0 & a_1s_1 + a_2s_1c_2 + a_2c_1s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.123)$$

şeklinde gerçekleştirilmektedir. Eşitlik (2.123)'te s_1 ile $\sin(\theta_1)$, s_2 ile $\sin(\theta_2)$, c_1 ile $\cos(\theta_1)$ ve c_2 ile $\cos(\theta_2)$ belirtilmektedir. Şekil 2.3'te gösterilen RR eklem yapısına sahip düzlemsel robot koluna ait eklem açıları ters kinematik analiz ile

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \pm \beta \quad (2.124)$$

$$\theta_2 = \pi \pm \alpha \quad (2.125)$$

şeklinde bulunmaktadır. Eşitlik (2.124)'te

$$x = a_1 \cos(\theta_1) + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.126)$$

$$y = a_1 \sin(\theta_1) + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.127)$$

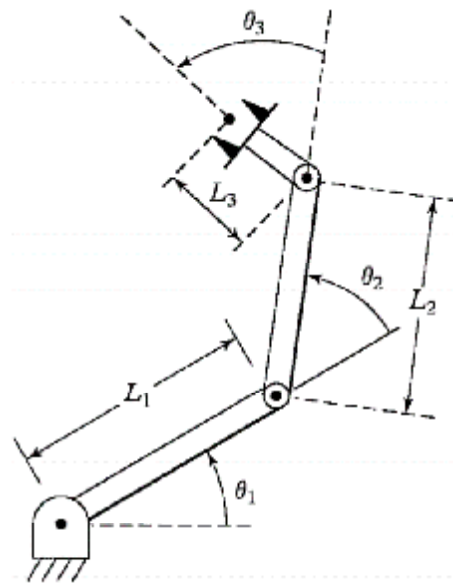
$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{r^2 + a_1^2 - a_2^2}{2a_1 r}\right), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.128)$$

şeklindedir. Eşitlik (2.125)'te

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{a_1^2 + a_2^2 - r^2}{2a_1 a_2}\right), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.129)$$

olarak ifade edilmektedir.

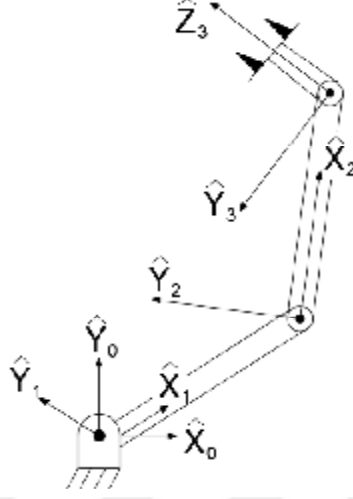
Doktora tez çalışmasında kullanılan ve Şekil 2.11'de gösterilen RRR eklem yapısına sahip robot kolunun ileri kinematik ve ters kinematik analizi gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.11'de gösterilen RRR eklem yapısına sahip düzlemsel robot koluna Şekil 2.12'de gösterildiği şekilde koordinat sistemi ataması yapılmakta ve elde edilen D-H parametreleri Çizelge 2.1'de sunulmaktadır.



Şekil 2.11 RRR eklem yapısına sahip düzlemsel robot kolunun geometrisi.

Çizelge 2.1 RRR eklem yapısına sahip robot kolunun D-H parametreleri.

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	L_1	0	θ_2
3	0	L_2	0	θ_3



Şekil 2.12 RRR eklem yapısına sahip robot koluna koordinat sisteminin yerleştirilmesi.

RRR eklem yapısına sahip düzlemsel robot kolunun ileri kinematik çözümü,

$${}_{taban}^{uç_işlevci}T = {}^0_3T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.130)$$

olarak elde edilmektedir. Ters kinematik çözümü ile dönel eklem değişkenleri

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \arctan\left(\frac{k_2}{k_1}\right) \quad (2.131)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{\sin(\theta_2)}{\cos(\theta_2)}\right) \quad (2.132)$$

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \arctan\left(\frac{\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)}{\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)}\right) \quad (2.133)$$

olarak bulunmaktadır. Eşitlik (2.131)'de belirtilen

$$x = k_1 \cos(\theta_1) - k_2 \sin(\theta_1) \quad (2.134)$$

$$y = k_1 \sin(\theta_1) - k_2 \cos(\theta_1) \quad (2.135)$$

$$k_1 = L_1 + L_2 \cos(\theta_2) \quad (2.136)$$

$$k_2 = L_2 \sin(\theta_2) \quad (2.137)$$

ile ifade edilmektedir.

RR ve RRR eklem yapısına sahip düzlemsel robot kollarının ileri ve ters kinematiği, robot kolunun etkin denetimi için eklem değişkenlerinin izleyeceği yörüngelerin belirlenmesinde önem taşımaktadır (Craig 2005, Spong et al. 2006, Altan 2013, Altan and Hacıoğlu 2014, Altan et al. 2017d). Doktora tez çalışmasında, dinamik modelleri ve kinematik analizi bu bölümde gerçekleştirilen RR ve RRR eklem yapılarına sahip robot kollarının hedef takibinde belirlenen bir yörüngeyi takip edebilmesi klasik ve modele dayalı denetimi gerçekleştirilmekte ve deneysel sonuçları beşinci bölümde sunulmaktadır.



BÖLÜM 3

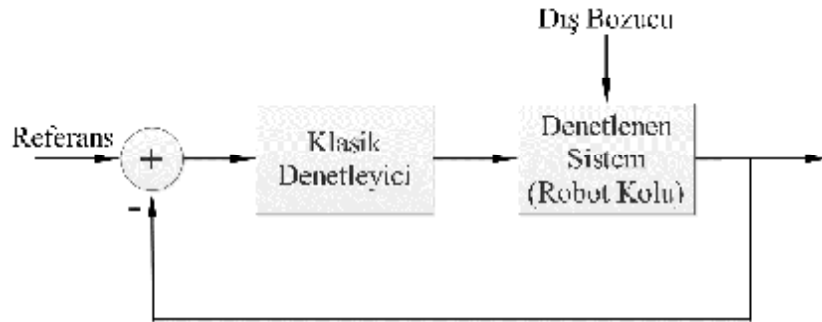
ROBOT KOLU DENETİMİ

Genel olarak bir robot kolunun dinamik performansı, etkili denetim algoritmasına ve uygun dinamik modelin elde edilmesine bağlıdır. Denetim işleminde, elde edilen robot dinamik modelinin arzu edilen sistem cevap ve performansını sağlaması için uygun algoritma üretilmektedir. Çıkarılan dinamik modelin, robotun arzu edilen sistem yanıtını üretmesi aşamasındaki performansı denetim probleminin önemini ortaya koymaktadır (Bejczy and Paul 1981, Craig 2005, Spong et al. 2006, Bingül ve Küçük 2008).

Bu bölümde, dinamik denklemleri türetilen RR ve RRR eklem yapısına sahip robot kollarının MPC ve klasik denetim yöntemlerinden PID ile denetimi gerçekleştirilmekte ve elde edilen sonuçlar beşinci bölümde sunulmaktadır.

3.1 KLASİK DENETİM YÖNTEMLERİ İLE ROBOT KOLU DENETİMİ

Denetimi gerçekleştirilen doğrusal bir sistemin dinamiği Şekil 3.1’de gösterilen blok diyagram ile ifade edilmektedir. Tasarımın amacı, denetlenen çıkış değişkeninin istenilen şekilde davranmasıdır. Klasik tasarım yöntemlerinde, tasarımcı denetleyicisini denetlenen sürece göre nereye yerleştirmesi gerektiğini genellikle önceden belirlemekte ve sisteme sabit yapıda bir tasarım uygulamaktadır. Bu durumda, denetleyici katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir (Kuo 1987).



Şekil 3.1 Geribeslemeli denetim sistemi.

Bu doktora tez çalışmasında, ikinci bölümde teorik olarak türetilen dinamik modellerin PID klasik denetimi gerçekleştirilmekte ve dış bozucu etki altında elde edilen benzetim sonuçları beşinci bölümde sunulmaktadır. Blok diyagramı Şekil 3.2’de verilen doğru akım (Direct Current-DC) motorun transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{K_m}{s(J_m R_a s + K_m K_b)} \quad (3.1)$$

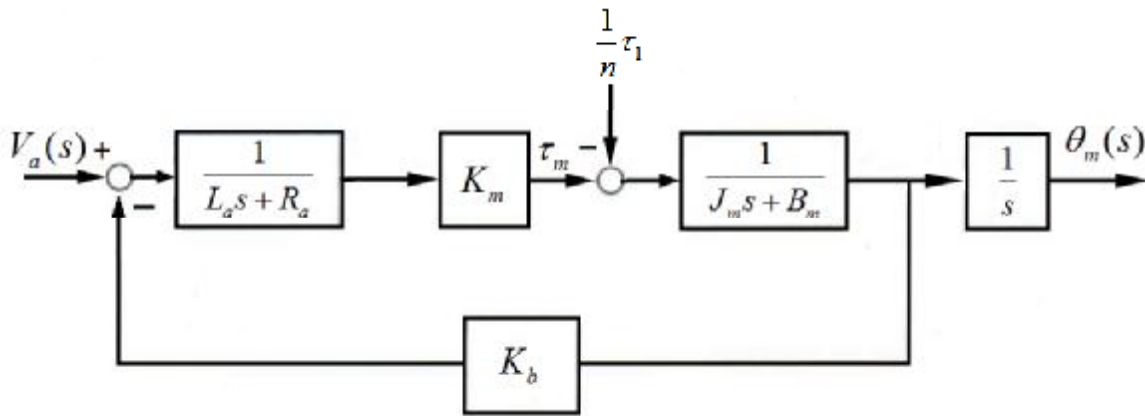
şeklinde belirtilmektedir. Eşitlik (3.1)’de K_m Nm/Amp cinsinden moment sabiti, J_m motor ve dişli takımının ataleti, R_a motor ve dişli takımının endüvi direnci ve K_b elektromotor kuvvet sabitidir. PID denetleyici Laplace formunda

$$D(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.2)$$

olarak ifade edilmektedir. Eşitlik (3.2)’de K_p , K_i ve K_d sırasıyla oransal, integral ve türev kazançtır. Doğru akım motoru transfer fonksiyonunun PID denetleyicinin transfer fonksiyonu ile açık çevrim kazancı

$$D(s)G(s) = (K_d s + K_p + K_i / s) \frac{s K_m}{(J_m R_a s + K_m K_b)} \quad (3.3)$$

ile ifade edilmektedir.



Şekil 3.2 DC motor blok diyagramı.

PID denetleyicinin başarımı, denetleyiciye ait K_p oransal parametresi, K_i integral denetim parametresi ve K_d türev denetim parametresi tarafından belirlenmektedir. Oransal denetim parametresi, sistem yanıtını hızlandırmakta ancak düşük değerleri için sistemi kararsız hale getirebilmektedir. İntegral denetim parametresi, sistem yanıtındaki sürekli hal hatasını azaltmakta ancak yüksek değerleri için aşım ve osilasyonu artırmaktadır. Türev denetim parametresi ise sistem yanıtının sönümünü artırarak, aşım ve osilasyonu azaltmakta bu da geçici hal yanıtında iyileşme sağlamaktadır. PID parametrelerinin geçici hal parametrelerine etkisi Çizelge 3.1’de verilmektedir. PID denetleyici parametrelerinin doğru şekilde seçilmesi yükselme ve yerleşme zamanı düşük, az aşımlı ve kalıcı hal hatası olmayan ideal cevaplar elde etmek için oldukça önemlidir (Åström and Hägglund 2001, Demir et al. 2016, Aslan et al. 2017). PD denetleyici ile yüksek aşım, yükselme ve yerleşme zamanının azaltılması sağlanmaktadır. PI denetleyici yükselme zamanını artırmakta, band genişliğini ve aşımı azaltmaktadır (Kuo 1987).

Çizelge 3.1 PID parametrelerinin geçici hal parametrelerine etkisi.

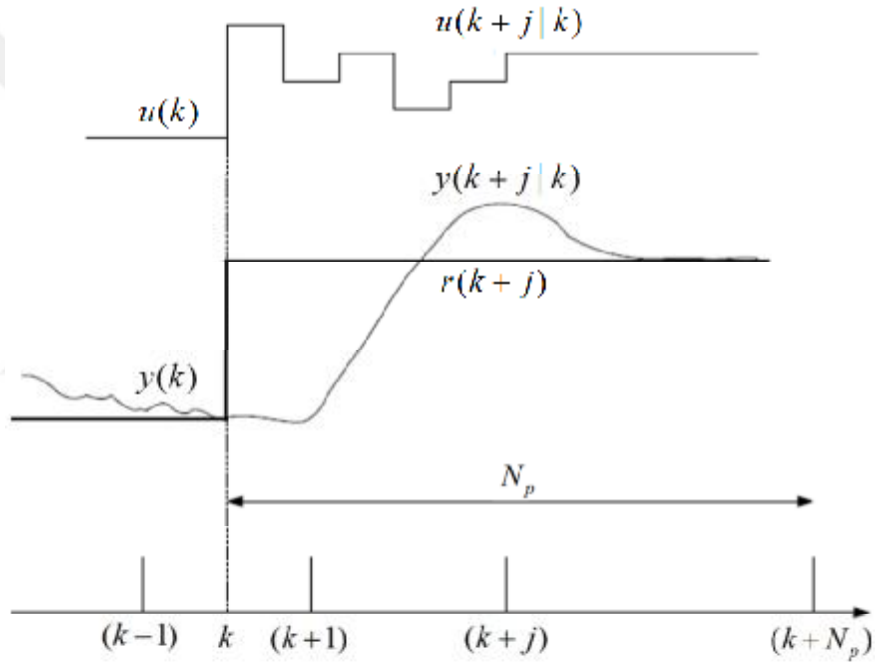
Parametre	Yükselme Zamanı	Sistem Ani Tepkisi	Yerleşme Zamanı	Kararlı Hal Hatası
K_p artarsa	Azalır	Artar	Çok az etkilenir	Azalır
K_i artarsa	Azalır	Artar	Artar	Yok olur
K_d azalırsa	Çok az etkilenir	Azalırsa	Azalırsa	Çok az etkilenir

Endüstriyel denetim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan PID geribeslemeli bir denetim yöntemidir. PID denetleyici, denetlenen sistemde referans değeri ile ölçülen değer arasında hata değeri hesaplamaktadır. Oransal, integral ve türev olmak üzere üç ayrı sabit parametre (P şimdiki hataya, I geçmiş hataların toplamına, D hatanın şimdiki değişim oranına dayanarak gelecek hataların tahminine dayanmaktadır) içeren PID denetleyici algoritması süreç denetim girişlerini ayarlayarak hatayı minimize etme eğiliminde davranış göstermektedir. Belirtilen bu hataların toplamı sisteme geri besleme olarak uygulanmaktadır (Lewis et al. 2004).

3.2 ROBOT KOLUNUN MODEL ÖNGÖRÜLÜ DENETİMİ

Klasik denetim yöntemlerinin denetlenen sistemlerdeki ölü zamanı giderme, çok değişkenli sistemlerde zaman gecikmeleri, açık döngü kararsızlığı ve kısıtlamaların üstesinden gelme konusunda yetersiz kalması Model Öngörülü Denetimin gelişmesinde önemli rol oynamaktadır

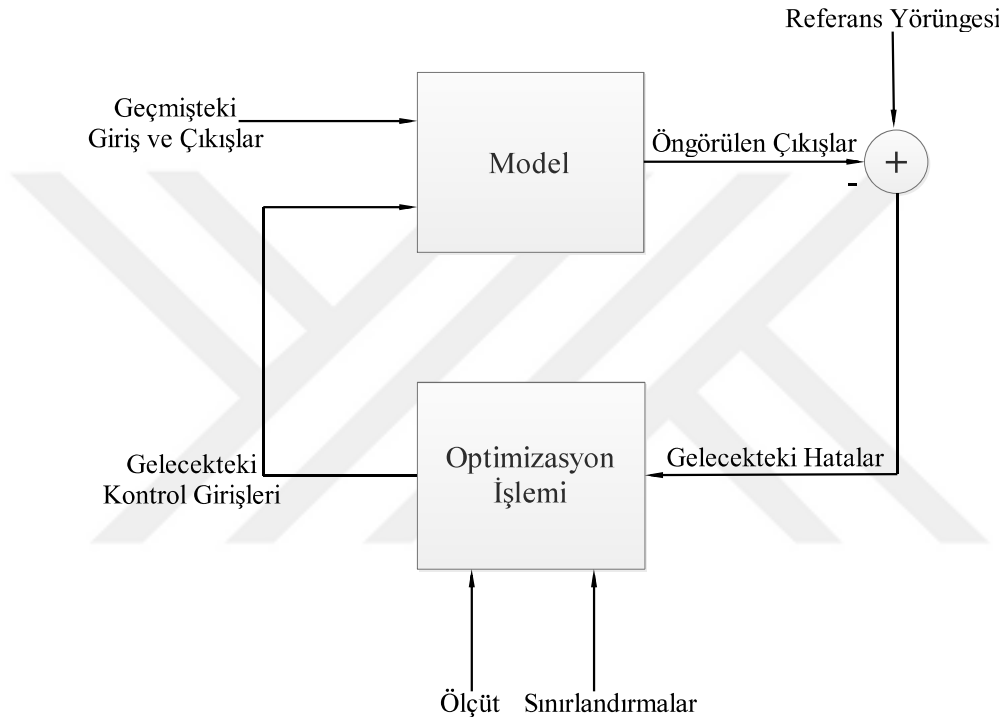
(Clarke et al. 1987). 1970'lerde ortaya çıkan ve günümüze kadar geliştirilen MPC terimi tek bir kontrolör tasarım yöntemini değil, çok geniş bir kontrol tasarım yöntemleri bütünü tanımlamaktadır. MPC'de sistem modeli doğrudan kullanılmakta ve kontrol işareti belirli bir ölçüte göre minimumlaştırılarak elde edilmektedir (Charos et al. 1991). Optimizasyon algoritmaları ile sistemin ileriki zamandaki girişlere yanıtları belirlenmektedir (Qin and Badgwell 2003). MPC, sistemin gelecekteki davranışını optimize etmek için uygulanması gereken kontrol dizisini hesaplayan bir denetleyici sınıfını nitelemektedir. Kullanılan sistem modeli, gürültü modeli ve en aza indirgenecek ölçütlere göre MPC algoritmaları farklılık göstermektedir. Bu yöntemin temel stratejisi örneklenen veri değerleriyle Şekil 3.3'te gösterilmektedir (Camacho and Bordons 2007).



Şekil 3.3 Temel MPC stratejisi.

Gelecek bir zaman dilimindeki sistem yanıtının öngörülebilmesi için sistem modeli kullanılmaktadır. Belirlenen bir ölçüt en aza indirgenerek kontrol değişken dizisi $u(k+j|k)$ hesaplanmaktadır. Kaydırma işlemi, yani her örnekleme anında ufkun geleceğe doğru bir kaydırılması, her adımda; elde edilen kontrol işareti dizisinin ilk elemanının uygulanması olarak ifade edilmektedir. Sistem modelinden yararlanılarak öngörü ufku N_p boyunca gelecekteki sistem yanıtları hesaplanmaktadır. Bu yanıtlar o ana kadar bilinen değerler (geçmişteki girişler ve sistem yanıtları), o andaki sistem yanıtı ve gelecekteki kontrol değişkenleri kullanılarak belirlenmektedir. Geleceğe ilişkin kontrol işareti dizisi, bir başarımlı

ölçütünü en aza indirgeyecek şekilde öngörülen sistem çıkışı $\hat{y}(k + j|k)$ ile referans yörüngesi arasındaki hatanın minimize edilmesi ile elde edilmektedir. En aza indirgenen performans ölçütü genellikle öngörülen çıkış ile referans yörüngesi arasındaki hatanın karesel fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Eğer model doğrusal, ölçüt karesel ve sınırlandırmalar yok ise analitik bir çözüm bulunabilmekte, aksi durumda çözüm iteratif optimizasyon yöntemleri ile elde edilmektedir (Camacho and Bordons 2007). MPC temel yapısı Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 MPC temel yapısı.

MPC algoritması her kontrol aralığında, sistemin gelecek zamandaki davranışlarını optimize etmektedir. MPC, sistem modelini ve sistemden alınan anlık ölçümleri kullanarak süreçle ilgili gelecek zamandaki giriş-çıkışları hesaplamaktadır. Bu hesaplama, istenilen kriterlere göre oluşturulmuş bir optimizasyon probleminin çözümü şeklinde gerçekleştirilmektedir. Tek giriş tek çıkış (Single Input Single Output-SISO) bir sistem için MPC optimizasyonu matematiksel (Camacho and Bordons 2007) olarak

$$\min_{u[k|k], \dots, u[k+N_c-1|k]} \sum_{j=1}^{N_p} w_j (y[k+j|k] - r(k+j))^2 + \sum_{j=1}^{N_c} \lambda_j \Delta u[k+j-1|k]^2 \quad (3.4)$$

$$u_{maks} \geq u[k + j - 1 | k] \geq u_{min}, j = 1, \dots, N_c \quad (3.5)$$

$$\Delta u_{maks} \geq \Delta u[k + j - 1 | k] \geq -\Delta u_{maks} \quad (3.6)$$

$$y_{maks} \geq y[k + j | k] \geq y_{min}, j = 1, \dots, N_p \quad (3.7)$$

elde edilmektedir. Eşitlik (3.4)-(3.7)'de N_p öngörü ufku (prediction horizon) ve N_c kontrol ufku (control horizon) ($N_c < N_p$); $u[k + j - 1 | k]$, $j = 1, \dots, N_c$, denetleyiciden denetlenecek olan sisteme gelecekte gönderilecek olan giriş işaretleri kümesini; y^r sistemin referans değerini; Δu şimdiki giriş işareti ile bir önceki giriş işareti arasındaki farkı,

$$\Delta u[k + j | k] = u[k + j | k] - u[k + j - 1 | k] \quad (3.8)$$

w_i , sistem çıkışının ağırlık katsayısını; λ_i , Δu 'nun etkisini belirleyen ağırlık katsayısı; y_{maks} , y_{min} , sistem çıkışının sınır koşullarını; u_{maks} , u_{min} , sistem girişinin sınır koşullarını ifade etmektedir.

Teorem 3.1 u sistem girişi ve y sistem çıkışı olmak üzere,

$$y(k+1) = y(k) + \sum_{i=1}^N g_i(k+1)\Delta u(k) \quad (3.9)$$

ile verilen sistem düşünüldüğünde, her bir k örnekleme zamanında eşitsizlik kısıtlamaları olmaksızın

$$\min_{\Delta u[k|k], \dots, \Delta u[k+N_c-1|k]} \max_{y[k+i|k], i=1, \dots, N+N_p-1} \Phi_k \quad (3.10)$$

optimizasyonu tüm sonlu $N_p \geq 1$ ve $1 \leq l \leq N+N_p-1$ ve

$$\Phi_k = \max_{i \in \{l, \dots, N+N_p-1\}} |\Gamma_y[r(k+i) - y(k+i|k)]|_1 + \sum_{j=0}^{N_p-1} |\Gamma_u \Delta u(k+j|k)|_1$$

için gürbüz BIBO kararlı kapalı çevrimli bir sisteme neden olmaktadır.

İspat: k zamanda

$$\Phi_k = \max_{i \in \{l, \dots, N+N_p-1\}} \|\Gamma_y [r(k+i) - y(k+i|k)]\|_1 + \sum_{j=0}^{N_p-1} \|\Gamma_u \Delta u(k+j|k)\|_1 \quad (3.11)$$

amaç fonksiyonunun optimal değeri J_k olsun. Burada,

$\Delta u(k+i|k) \in \mathfrak{R}^n$; $\Delta u(k) \equiv \Delta u(k|k)$ ve k zamanda ve hesaplanan $k+i$ zamandaki kontrol hareketini, $y(k+i|k) \in \mathfrak{R}^n$; k zamandaki ölçülen çıkış $y(k|k)$ olmak üzere k zamanda öngörülen $k+i$ zamandaki çıkışı, $r(k+i) \in \mathfrak{R}^n$ $k+i$ zamandaki referans noktasını ve l ; en küçük değerinin bulunması gereken öngörü ufkunun başlangıcını ifade etmektedir. Γ_y ve Γ_u sırasıyla pozitif kesin diyagonal ve pozitif yarı kesin $n \times n$ boyutunda matristir. Herhangi bir i tamsayısı için,

$$Y(k+i|k) = \{y(k+i|k) : y(k+i|k) = y(k+i-1|k) + g(k+i) \begin{bmatrix} \Delta u(k+i-N) \\ \vdots \\ \Delta u(k+i-1|k) \end{bmatrix}\} \quad (3.12)$$

$$g(k+i) \in \Pi \quad \Pi = \{g_i : |g_i - g_{i0}| = |\Delta g_i| \leq \Delta g_i^{\max}, \quad \Delta g_i \in \mathfrak{R}^{n \times n}, \quad i = 1, \dots, N\}$$

$$y(k+i-1|k) \in Y(k+i-1|k) \quad (3.13)$$

olup ve $Y(k|k) = \{y(k|k)\}$ dir. $J_{k+1} \leq J_k$ olduğunun gösterilmesi gerekmektedir. $k+1$ zamanında optimal kontrol hareketlerinin belirlenebilmesi için amaç fonksiyonu tekrar hesaplanmaktadır.

$$\Delta U_{k+1}^* = \begin{bmatrix} \Delta u^*(k+1|k+1) \\ \vdots \\ \Delta u^*(k+N_c-1|k+1) \\ \Delta u^*(k+N_c|k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta u(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c-1|k) \\ \Delta u(k+N_c|k) = 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

ΔU_{k+1}^* optimal çözüm olmayabileceğinden $J_{k+1} \leq J_{k+1}^*$ dir. Burada, J_{k+1}^* , ΔU_{k+1}^* için amaç fonksiyonunun değeridir.

$y(k+1|k+1)$, $k+1$ zamanda ölçülmektedir ve $Y(k+1|k+1) = \{y(k+1|k+1)\}$ dir. $y(k+1|k+1) \in Y(k+1|k)$ olduğu için $Y(k+1|k+1) \subseteq Y(k+1|k)$ dir. Benzer şekilde, $\Delta u^*(k+i|k+1) = \Delta u(k+i|k)$ ve Eşitlik (3.12)'deki $Y(k+i|k)$ tanımından

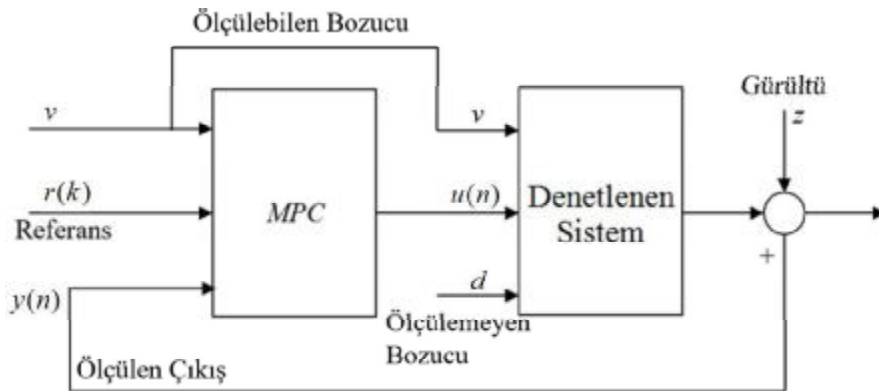
$$Y^*(k+i|k+1) \subseteq Y(k+i|k), \quad i = 2, \dots \quad (3.15)$$

sonucu elde edilebilmektedir. Bu yüzden $i = 1, 2, \dots$ için,

$$\max_{y(k+i|k+1) \in Y^*(k+i|k+1)} |\Gamma_y [r(k+i) - y(k+i|k+1)]|_1 \leq \max_{y(k+i|k) \in Y(k+i|k)} |\Gamma_y [r(k+i) - y(k+i|k)]|_1 \quad (3.16)$$

olup $J_{k+1}^* \leq J_k$ dir. Bu nedenle, $J_{k+1} \leq J_k$ ve amaç fonksiyonu her zaman için sınırlandırılmıştır. Γ_y pozitif kesin diyagonal matris olduğundan, çıkış her zaman için sınırlandırılmış olmalıdır. Herhangi bir sonlu N_p için, açık döngü sistem N adıma yerleştiğinden ve öngörü ufku sonsuz olduğundan u sistem girişi de sonlu olmalıdır.

MPC algoritması sistem modeli ve optimizasyon işlemi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır (Camacho and Bordons 2007). Sistem modeli kullanılarak Eşitlik (3.4)'ü minimize eden değerler belirlenmekte ve MPC çıkış işareti üretilmektedir. MPC ile denetimi gerçekleştirilen bir sistemin blok yapısı Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5 MPC blok yapısı.

MPC bloğuna giriş olarak referans değer, ölçülebilen bozucu işaret ve sistem çıkış işareti verilmekte, Eşitlik (3.4) yardımıyla sistemin gelecekteki giriş-çıkışları en uygun şekilde belirlenmektedir.

MPC algoritmaları kullanılan model ve seçilen başarımlar ölçütleri bakımından birbirinden farklılık göstermektedir. MPC algoritmaları arasında DMC, MAC ve GPC sıklıkla kullanılmaktadır (Camacho and Bordons 2007).

Farklı Model Öngörülü Denetim algoritmaları denetim kuralını belirlemek amacıyla farklı maliyet fonksiyonları belirlemektedir. Maliyet fonksiyonundaki genel amaç istenen öngörü ufkunda gelecekteki sistem çıkışının daha önceden belirlenmiş bir referans sinyalini takip etmesi ve gerekli kontrol sinyalinin belli sınırlar içinde tutulup cezalandırılmasıdır. Tüm bu amaçları sağlayan maliyet fonksiyonu

$$J(N_1, N_p, N_c) = \sum_{j=N_1}^{N_p} w_j [\hat{y}(k+j|k) - r(k+j)]^2 + \sum_{j=N_1}^{N_c} \lambda_j [\Delta u(k+j|k)]^2 \quad (3.17)$$

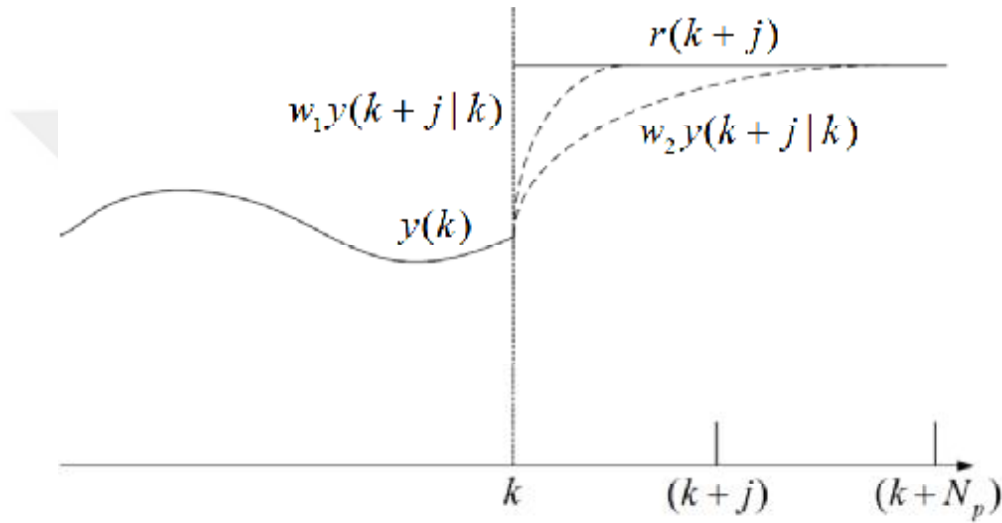
ile ifade edilmektedir (Camacho and Bordons 2007). Eşitlik (3.17)'de N_1 ve N_p sırasıyla minimum ve maksimum öngörü ufuklarını, N_c ise kontrol ufkunu ifade etmektedir. Maliyet fonksiyonunda yer alan w_j ve λ_j ağırlık katsayıları gelecekteki sistem davranışını belirlemektedir. Bu katsayılar genellikle sabit değer veya üstel fonksiyon olarak seçilmektedir. w_j ağırlık katsayısı üstel fonksiyon olarak

$$w_j = \alpha^{N_p - j} \quad (3.18)$$

seçildiğinde; $\alpha > 1$ durumu için k anına yakın hatalar, $0 < \alpha < 1$ durumu için k anından en uzaktaki hatalar k anına yakın hatalara göre daha fazla cezalandırılmaktadır (Camacho and Bordons 2007). Gelecekteki referans değerlerinin bilinmesi durumunda, referans değişikliğinde sistem bu değişikliğe kendini adapte ederek sistem yanıtını etkilemeden sistem yanıtında olabilecek gecikmelerin önüne öngörü denetim algoritmaları ile geçebilmektedir. Robot kol çalışmaları, servolar ve kesikli süreçler gibi pek çok uygulamada referansın gelecekteki durumu olan $r(k+j)$ önceden bilinmektedir. MPC algoritmalarının büyük bölümünde, sistemin o andaki çıkış değerinden istenilen referansa doğru düzgün yaklaşım olan

$$w_j y(k+j|k) = \alpha y(k+j|k) + (1-\alpha)r(k+j) \quad j=1 \dots N_p \quad (3.19)$$

kullanılmaktadır. $0 < \alpha < 1$ aralığında ayarlanabilmekte ve sistemin dinamik yanıtını etkilemektedir. $r(k+j)$ referans yörüngesi sabit seçilerek α parametresinin iki farklı değeri için incelenen durum Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Şekil 3.6'da gösterildiği gibi α parametresinin küçük değerleri için $w_1(k+j)$ ile referans yörünge takibi hızlı iken α parametresinin daha büyük değerleri için referans yörüngesine $w_2(k+j)$ ile daha düzgün bir yükselme yanıtı sağlanmaktadır (Camacho and Bordons 2007).



Şekil 3.6 Referans yörünge takibi.

Günümüze kadar geliştirilen bir çok MPC algoritmasında durum-uzay, transfer fonksiyonu, darbe yanıtı ve birim basamak yanıtı gibi farklı modeller kullanılmaktadır. Çok değişkenli sistemlerin tanımlanmasında kolaylık sağlayan durum-uzay modeli, Öngörülse Fonksiyonel Denetim gibi bazı MPC algoritmalarında kullanılmaktadır. Ayrık zaman durum uzay gösterimi (Camacho and Bordons 2007)

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3.20)$$

$$y(k) = Cx(k)$$

ile gösterilmektedir. Eşitlik (3.20)'deki x durum değişkeni, A, B, ve C sırasıyla sistem matrisi, giriş matrisi ve çıkış matrisi olarak ifade edilmektedir. Modelin öngörü ifadesi

$$\hat{y}(k+j|k) = C\hat{x}(k+j|k) = C \left[A^j x(k) + \sum_{i=1}^j A^{i-1} B u(k+j-i|k) \right] \quad (3.21)$$

ile ifade edilmektedir. Denetim kuralı, durum vektörünün doğrusal bir kombinasyonun geri beslemesi olarak elde edilmekte ve bazı durumların izlenememesi halinde bir gözlemleyicinin tasarlanarak öngörü algoritmasına eklenmesi gerekmektedir.

Parametre sayısının az olması ve her türlü doğrusal sisteme uygunluğu nedeniyle yaygın olarak kullanılan transfer fonksiyonu modeli GPC algoritması tarafından kullanılmaktadır (Camacho and Bordons 2007). Sistem çıkışı $y(k)$, sistem girişi $u(k)$ ve

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad (3.22)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b} \quad (3.23)$$

olmak üzere giriş-çıkış ilişkisi fark denklemi

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k) \quad (3.24)$$

ile verilmektedir. Modelin öngörü ifadesi (Camacho and Bordons 2007)

$$\hat{y}(k+j|k) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(k+j|k) \quad (3.25)$$

ile ifade edilmektedir. Eşitlik (3.25)'te $\hat{y}(k+j|k)$ ifadesi k anındaki bilgilerden ve modellerden yararlanılarak elde edilen j adım ilerideki optimum sistem çıkış öngörü değerini, $u(k+j|k)$ ifadesi k adım sonraki giriş değerini ifade etmektedir.

Darbe yanıtı modeli giriş-çıkış ilişkisi

$$y(k) = H(q^{-1})u(k) = \sum_{i=1}^M h_i u(k-i) \quad (3.26)$$

ile verilmektedir. Eşitlik (3.26)'da M sonlu hafıza ve h_i sisteme darbe girişi uygulandığında elde edilen çıkış işaretinin örneklenmiş değeridir. Darbe yanıtının katsayıları ile birim basamak yanıtı modelinin katsayıları arasında

$$h_i = g_i - g_{i-1} \quad (3.27)$$

$$g_i = \sum_{j=1}^i h_j \quad (3.28)$$

ilişkisi bulunmaktadır. Modelin öngörü ifadesi (Camacho and Bordons 2007)

$$\hat{y}(k+j|k) = \sum_{i=1}^{N_p} h_i \Delta u(k+j-i|k) = H(q^{-1})u(k+j|k) \quad (3.29)$$

ile ifade edilmektedir. Sisteme darbe girişi uygulanarak parametreleri belirlenen model MAC algoritmalarında kullanılmaktadır.

MPC algoritmalarında yaygın olarak kullanılan modellerden basamak yanıtı modeli DMC algoritmalarında ve çok değişkenli sistemlerde kullanılmaktadır. Bu modelin yaygın olarak kullanılmasının nedeni sisteme basamak girişi uygulanarak sistem çıkışı ölçülmekte ve model parametreleri kolaylıkla belirlenebilmektedir. Birim basamak yanıtı modeli çok sayıda parametreden oluşmakta ve açık çevrim olarak kararlı sistemlerde kullanılmaktadır. Birim basamak yanıtı modeli giriş-çıkış ilişkisi

$$y(k) = \sum_{i=1}^M h_i \Delta u(k-i) = H(q^{-1})(1-q^{-1})u(k) \quad (3.30)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (3.31)$$

ile verilmektedir. Eşitlik (3.30)'da $H(q^{-1})$ katsayıları, h_i sisteme basamak giriş olarak uygulandığında elde edilen çıkışın örneklenmiş değerleridir. Sistem çıkışına ilişkin sonlu hafıza M değeri göz önüne alınmakta ve sonsuz toplam yapılmamaktadır. Integrator içermeyen ve kararlı doğrusal sistemler için birim basamak yanıtı modelinin kullanımı uygun olmaktadır.

Δu kontrol sinyalindeki artım değeri, $H(q^{-1})$ sistemin ayrık transfer fonksiyonu ve q^{-1} geciktirme operatörüdür. Modelin öngörü ifadesi (Camacho and Bordons 2007)

$$\hat{y}(k+j|k) = \sum_{i=1}^{N_p} h_i \Delta u(k+j-i) \quad (3.32)$$

ile ifade edilmektedir.





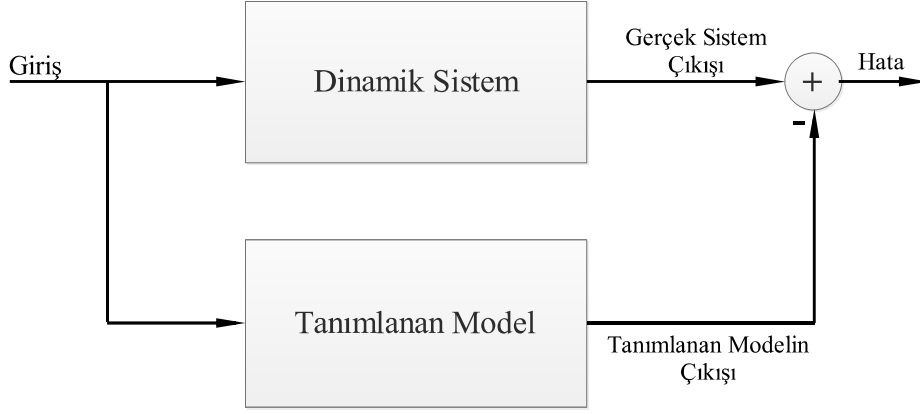
BÖLÜM 4

SİSTEM TANIMLAMA VE MODELLEME

Bir sistemin dinamik karakteristiğinin matematiksel olarak ifadesi sistemin matematiksel modeli olarak adlandırılmaktadır. Bu matematiksel denklemler, sürekli zamanlı sistemler için diferansiyel denklemler, ayrık zamanlı sistemler için de fark denklemleri olmaktadır (Corinthios 2009). Bir dinamik sistemin giriş fonksiyonuna karşı göstereceği tepki, bu diferansiyel denklem veya fark denkleminin çözümüyle belirlenmektedir. Bu denklemler, ele alınan sistem ile ilgili fiziksel yasalardan yararlanılarak elde edilmektedir (Franklin et al. 2015). Bu bölümde, doğrusal olmayan model yaklaşımı için Hammerstein model yapısına ek olarak doğrusal model yaklaşımlarından OE model yapısı incelenmektedir. Hammerstein model yapısı ile OE model yapısı üzerinde durulmakta ve deneysel olarak elde edilen giriş-çıkış verileri ile çok eklemli robot kollarının model parametre kestirimleri yapılmaktadır. Ayrıca, RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu altında modeli oluşturulmaktadır. Oluşturulan model, deneysel olarak elde edilen giriş-çıkış veri seti üzerinde doğrulanmaktadır.

Sistem tanımlama, giriş/çıkış verisi temelinde bir dinamik sistemde matematiksel model elde etme işlemleridir. Sistem kazancı ve sistemin dinamik davranışının belirlenmesi gerektiği durumlarda modelleme önem kazanmaktadır. Sisteme ait uygun bir matematiksel modelin elde edilmesi dinamik sistemin çözümlenmesini sağlamaktadır. Şekil 4.1'de dinamik sistem modeli blok yapısı gösterilmektedir. Fiziksel bir sistem için dinamik sistem modeli, giriş-çıkış parametreleri ile matematiksel model içermektedir (Ljung 1999).

Karmaşık bir mühendislik sisteminin tasarım kriterlerine uygun kabullerle ve pek çok durumda ideal devre elemanlarından oluştuğu varsayımıyla fiziksel modeli elde edilmektedir. Temel fizik yasaları ile sistem elemanlarının davranışı tanımlanmakta ve genellikle doğrusal diferansiyel veya fark denklemleri şeklinde matematiksel modeli elde edilmektedir. Sistemin çözümü elde edilen matematiksel modele uygun yöntemler kullanılarak bulunmaktadır (Franklin et al. 2015).



Şekil 4.1 Dinamik sistem modeli blok yapısı.

Fiziksel olarak gerçekleştirilen mühendislik sistemleri genellikle doğrusal olmayan yapıda tasarlanmaktadır. Mühendislik problemlerinin çözümünde doğrusal olarak ele alınan sistemler gerçekte doğrusal olmayan yapıda olup, belirli şartlar altında belirli bir çalışma bölgesi için doğrusal kabul edilmektedir. Doğrusal olmayan sistemlere ait matematiksel eşitliklerin ve çözümlerinin elde edilmesi her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, doğrusal olmayan sistemler belirli şartlar altında doğrusallaştırılmaktadır. Doğrusallaştırılan sistemin gerçek sisteme uygunluğu modelin başarımını belirlemektedir. (Khalil 1996).

Bir modelin elde edilmesinde, modelin basitliği ile çözümlene sonuçlarının doğruluğu arasında uygunluğun sağlanması gerekmektedir. Sistem çözümlemesinde elde edilen sonuçlar oluşturulan modelin fiziksel olarak gerçekleştirilen sisteme yakın olması durumuna göre değişmektedir. Karmaşık bir mühendislik problemi, basit bir model ile ifade edilebildiği gibi sistemi tanımlayan denklem setlerinden oluşan daha karmaşık bir model ile de ifade edilebilmektedir. Karmaşık bir modelin çözümünün elde edilmesinde yüksek hızlı aritmetik işlemler yapabilen bilgisayarlardan yararlanılmaktadır (Ljung 1999, Pillonetto 2013, Pillonetto et al. 2014). Basitleştirilmiş bir modelin elde edilmesinde ise genellikle sistemin belli fiziksel özelliklerinin ihmal edilmesi gerekmektedir (Juang 1994). Özellikle, eğer doğrusal yığılmış parametrelili matematiksel model elde edilmek isteniyorsa, fiziksel sistemin yapısında mevcut belli doğrusal olmayan durumların ve dağılımlı parametrelerin ihmal edilmesi gerekmektedir. İhmal edilen özelliklerin sistem yanıtı üzerindeki etki derecesi, matematiksel modelin çözümlenmesinden elde edilen sonuçlar ile fiziksel olarak gerçekleştirilen sistemin deneysel sonuçları arasındaki uyumu belirlemektedir. Genelde, yeni bir problemin çözümünde, çözüm hakkında genel bir görüş elde etmek için başlangıçta sistemin basitleştirilmiş bir modelinin tasarlanması daha uygun olmaktadır. Problemin çözümündeki hata aralığının azaltılması için

daha ayrıntılı bir matematiksel model ile karmaşık bir çözümlemenin yapılması gerekmektedir (Yüksel 2009).

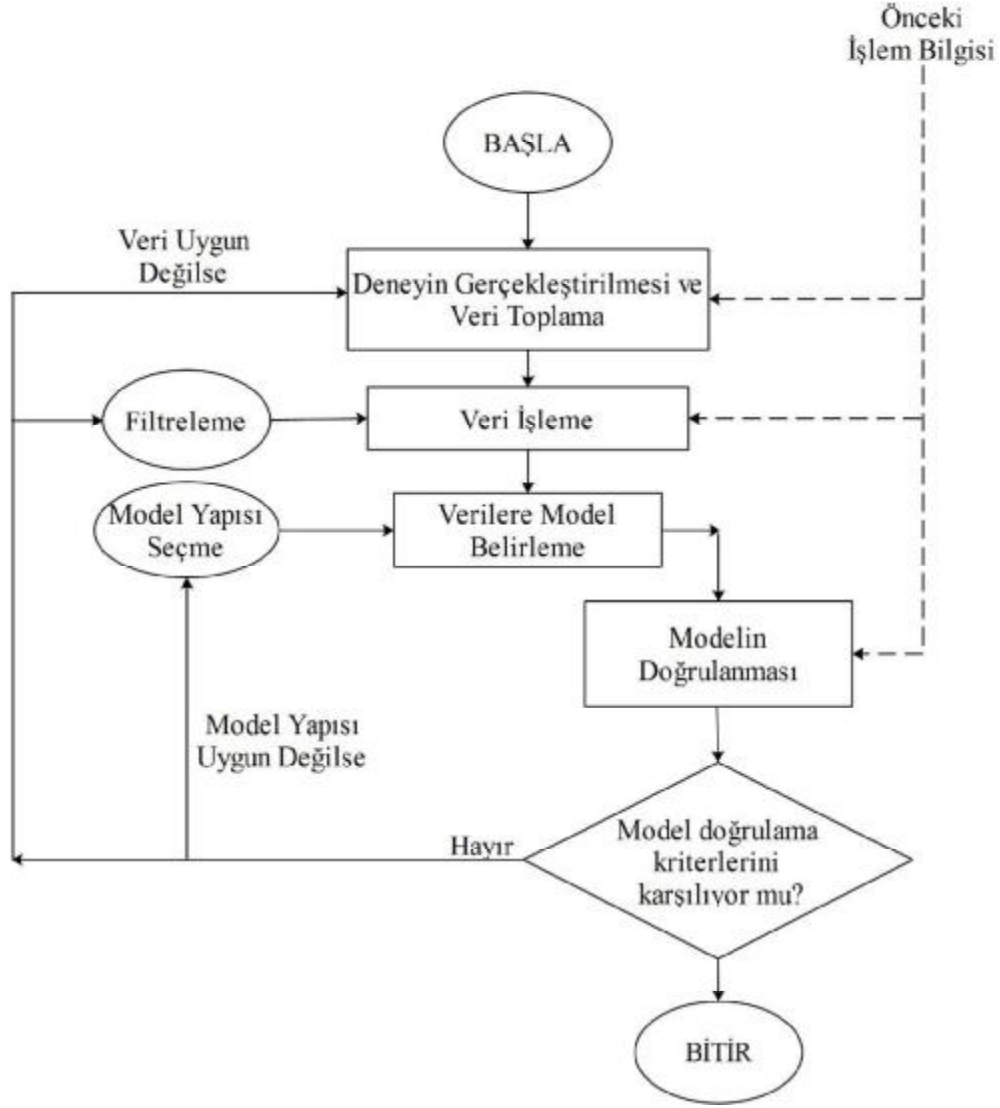
4.1 SİSTEM TANIMLAMA

Sistem tanımlama, giriş/çıkış verilerine dayanılarak dinamik sistemlerin matematiksel modelinin oluşturulması yöntemidir (Taghavi and Sadr 2008). Modelleme, sistem kazancı ve sistemin dinamik davranışının belirlenmesi gerektiği durumlar için büyük önem taşımaktadır (Ljung 1999, Atencia et al. 2004). Bu modellerin uygulamaları mühendislik, finans ve sağlık gibi bir çok alanda kullanılmaktadır (Forni et al. 2000, Atencia et al. 2004, Rodriguez et al. 2013, Huberts et al. 2013, Ranković et al. 2014). Verilerin örneklendiği ayrık zaman sistem modelleri sıklıkla kullanılmaktadır. Sistem tanımlamanın amacı, "ayarlanabilir parametrelerle bir model oluşturmak ve daha sonra bu parametreleri tahmin edilen çıkışın ölçülen çıkış ile eşleşmesi için ayarlamak" şeklinde ifade edilmektedir (Taghavi and Sadr 2008).

Sistemin matematiksel modelini oluşturmak için fiziksel önbilgi yoksa, sistemle ilgili giriş çıkış verileri kullanılarak, sistemin matematiksel modeli elde edilmektedir ki bu sistem tanımlama problemi olarak bilinmektedir (Ljung 2010). Sistem tanımlama probleminin çözümü ile Şekil 4.1'deki dinamik sistemin matematiksel modeli bulunmaktadır. Sistem tanımlamada, incelenen sistem için oluşturulan modelin karakteristik özelliklerine göre birçok farklı yöntem bulunmaktadır (Khalil and Dombre 2002). Sistem tanımlamada amaç doğrusal sistemler için bilinmeyen bir transfer fonksiyonunun belirlenmesi, doğrusal olmayan sistemler için giriş-çıkış ilişkisini veren matematiksel modelin elde edilmesidir. Deneysel olarak toplanan veriler kullanılarak dinamik sistem modelinin oluşturulabilmesi için veri işleme, model yapısı belirleme ve uygun model belirleme aşamalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Ljung 1999). Tanımlanan model, ideal durumda hata değerini sıfır yapmaktadır (Stone 1987, Flynn et al. 2002).

4.2 SİSTEM TANIMLAMA AŞAMALARI

Sistem tanımlama aşamaları Şekil 4.2'de gösterildiği gibi veri toplama, veri işleme, model yapısı seçimi, parametre tahmini ve model doğrulama adımlarından oluşmaktadır. Bu aşamaların tümü sistem dinamik davranışının doğru belirlenmesi için önem taşımaktadır.



Şekil 4.2 Sistem tanımlama aşamaları akış şeması.

Modeli oluşturulacak sistemle ilgili giriş-çıkış verileri sistem tanımlama için tasarlanmış özel deney düzenekleri yardımıyla elde edilmektedir. Sistemden veri toplanması için deney düzeneğinin kurulamadığı durumlarda, sistemin normal çalışması esnasındaki verileri alınarak analizlerde ve modelleme sürecinde kullanılmaktadır. Sistem tanımlama işleminin en zor ve en önemli aşaması sisteme ilişkin en uygun model yapısının belirlenmesidir. Model yapısı belirlenirken sistem ile ilgili matematiksel bilgiler, mühendislik beceriler ve sezilerin kullanımı önem kazanmaktadır. Sistemin tanımlanmasında kullanılacak olan model ile ilgili giriş-çıkış parametreleri, bozucu etki değerleri ve parametrelerin matematiksel olarak önceden hesaplanması modelin doğrusal olarak belirlenip belirlenmemesinde önemli rol oynamaktadır. Ölçülen giriş parametrelerinin oluşturulan modele uygulanması ile elde edilen çıkış değerleri ile sistemin ölçülen çıkış değerleri arasındaki uyumluluk tanımlanan sistem modelinin

başarımını göstermektedir. Tanımlanan modelin uygunluğu model doğrulama kriterlerine göre test edilmektedir (Ljung 1999).

Birçok araştırmacı sistem ön bilgilerine dayalı olarak kara kutu, gri kutu veya fiziksel modelleme ile sistem dinamiğini doğrusal veya doğrusal olmayan yapıda değerlendirmektedir. Doğrusal dinamik sistemler için sık kullanılan parametrik model yapıları arasında ARX, ekogen girişli doğrusal otoregresif hareketli ortalama (Auto Regressive Moving Average with exogenous input-ARMAX), hareketli ortalama alan otoregresif (Auto Regressive Moving Average-ARMA), Box-Jenkins (BJ) ve OE gibi birçok yapı bulunmaktadır (Ljung 1999, Weyer 2000, Rojo-Álvarez et al. 2004, Hjalmarsson et al. 2012, Huusom et al. 2012). Parametre tahmininde en küçük kareler, özyinelemeli en küçük kareler ve yığın en küçük kareler yöntemi gibi temel standart ve istatistiksel teknikler kullanılmaktadır (Flynn et al. 2002).

Parametrik tanımlama, daha önce belirli bir kalite kriterini gerçekleştirmek için hesaplanması gereken bir dizi parametre tarafından tanımlanan bir modele dayanmaktadır. Örneğin, sistem karakteristikleri bilinen bir dereceden ve sonlu bir polinom yoluyla parametrik bir gösterime sahip olabilir. Model yapısı fiziksel modelleme (gri kutu model) ile elde edilebilir veya standart bir yapı (kara kutu model) olabilir. Parametrik tanımlama teknikleri, çoğunlukla tahmini hata yöntemlerine (Prediction Error Method-PEM) bağlıdır (Ljung 1999).

4.3 DOĞRUSAL MODEL YAPILARI

Sistem tanımlama, iç yapısı bilinmeyen bir sistemin giriş çıkış verilerine bakılarak o sistemin yeniden oluşturulmaya çalışılmasıdır. Deneysel metotla iç yapısı bilinmeyen sisteme belirli girişler uygulanarak tanımlanacak model için giriş ve çıkış çiftleriyle veri kümesi oluşturulmaktadır. Sistemin veri kümesinden tekrar sentezlenerek model setleri belirlenmektedir ve uygun model yapısı seçilmektedir. Elde edilen modelin gerçek sistemle örtüşmesi incelenerek maliyet fonksiyonu hesaplanmaktadır. Maliyet fonksiyonunu minimize eden model yapısı oluşturulmakta ve model doğrulama yaklaşımları yardımıyla elde edilen sistem modelinin doğruluğu belirlenmektedir. Genel giriş-çıkış doğrusal modeli, girişi u çıkışı y olmak üzere tek çıkışlı bir sistem için

$$A(q)y(k) = [B(q)/F(q)]u(k) + e(k) + [C(q)/D(q)]e(k) \quad (4.1)$$

ile tanımlanmaktadır. Eşitlik (4.1)'de q^{-1} gecikme operatörü ve A, B, C, D, F kaydırma işlecindeki polinomlardır. Genel yapı, bu polinomların dereceleri verilerek tanımlanmaktadır. Bu aşamada model derecesine karar vererek parametre tahmini ile belirlenen polinom katsayıları kestirilmektedir. Ayrıca, kestirilen parametrelerin doğruluğu model doğrulama ile test edilmektedir.

4.3.1 ARX Model Yapısı ve Eşitlik Hatası Yaklaşımı

Giriş çıkış verileri bilinen bütün sistemlerin matematiksel modelleri, sistem tanımlama yöntemleri ile elde edilebilmektedir. Fakat bütün dinamik sistemler için aynı sistem tanımlama yönteminin kullanılması doğru sonuç vermemektedir. Sistem tanımlama yapılırken, o sisteme uygun yöntemin belirlenmesi gerekmektedir (Ljung 1999).

ARX model yapısı ile tanımlanan sistemler doğrusal özellik göstermektedir. Bu nedenle, ARX model yapıları kullanılarak doğrusal sistemler tanımlanabilmektedir (Peng et al. 2009, Mustafaraj et al. 2011). Şekil 4.3'te gösterilen doğrusal sistemde giriş çıkış ilişkisini ARX modeli ile ifade eden transfer fonksiyonu

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_N z^{-N}} \quad (4.2)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Eğer sistem giriş işareti Z -dönüşümü olan $U(z)$ Eşitlik (4.2)'deki transfer fonksiyonuna uygulanırsa sistemin çıkış işareti Z -dönüşümü

$$Y(z) = U(z)H(z) \quad (4.3)$$

elde edilmektedir. Eşitlik (4.2) ile verilen transfer fonksiyonu kullanılarak Eşitlik (4.3)

$$Y(z) = U(z) \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_N z^{-N}} \quad (4.4)$$

şeklinde elde edilmektedir. Eşitlik (4.4)'e ters Z dönüşümü uygulanarak

$$y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - \dots - a_Ny(k-N) + b_0u(k) + b_1u(k-1) + \dots + b_Mu(k-M) \quad (4.5)$$

çıkış işaretinin zaman bölgesindeki karşılığı elde edilmektedir. Bu denklem eşitlik hatası (Equation Error-EE) olarak bilinmektedir (Ljung 1999). Sistemin çıkış işaretinin mevcut ve daha önceki giriş işaretlerine, önceki çıkış işaretlerine ve a_i, b_j ($0 < i \leq N$, $0 \leq j \leq M$) transfer fonksiyonu katsayılarına bağlı olduğu Eşitlik (4.5)'te görülmektedir. Eşitlik (4.5)

$$y(k) = \underbrace{[-y(k-1) \quad -y(k-2) \quad \dots \quad -y(k-N) \quad u(k) \quad u(k-1) \quad \dots \quad u(k-M)]}_{\varphi^T(k)} \underbrace{\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \\ b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix}}_{\theta} \quad (4.6)$$

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta \quad (4.7)$$

ile doğrusal regresyon formunda gösterilmektedir. Eşitlik (4.7)'de regresör vektör olarak adlandırılan $\varphi^T(k)$ geçmişteki çıkış değerleri ile şimdiki ve geçmiş giriş değerlerine bağlıdır. Regresör vektörün tüm elemanları, sistem üzerinde ölçülerek kaydedilen giriş-çıkış verileridir. Eşitlik (4.7)'de ifade edilen θ vektörü ise parametre vektörü olarak adlandırılmaktadır (Huusom et al. 2012). Tüm K uzunluğunda giriş-çıkış verileri kullanılarak parametreleri kestirilmiş $\hat{\theta}$ vektörü

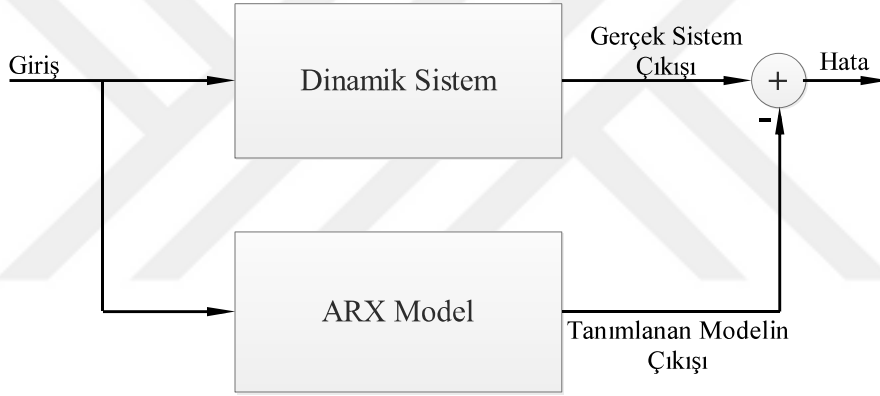
$$\hat{\theta} = \left[\sum_{k=0}^{K-1} \varphi^T(k)\varphi(k) \right]^{-1} \left[\sum_{k=0}^{K-1} \varphi(k)y(k) \right] \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (4.8)$$

olarak hesaplanmaktadır. Eşitlik (4.8)'deki $\hat{\theta}$ parametre kestirim vektörü, θ vektörünün en küçük kareler yöntemi ile yaklaşık olarak bulunan eşitidir. θ vektörünün parametreleri sistemin gerçek durumunu ifade etmektedir. Eşitlik (4.8) ile belirtilen parametre kestirim vektörü

kullanılarak Eşitlik (4.2)'deki form yapısındaki gibi sistemin kestirilmiş transfer fonksiyonu $\hat{H}(z)$ 'ye $u(k)$ işareti uygulanarak kestirilmiş çıkış işareti $\hat{y}(k)$ elde edilmektedir. Sistemin gerçek çıkış işareti $y(k)$ ile kestirilmiş çıkış işareti $\hat{y}(k)$ arasındaki normalize ortalama karesel hata (Normalized Mean Square Error-NMSE)

$$NMSE = \frac{\left[\sum_{k=0}^{K-1} y(k) - \hat{y}(k) \right]^2}{\sum_{k=0}^{K-1} y^2(k)} \quad (4.9)$$

ile belirlenmektedir. Kestirilmiş çıkış işaretinin değerinin sistemin gerçek çıkış işaretinin değerine yaklaşması ile NMSE değeri minimize edilmektedir.



Şekil 4.3 SISO doğrusal sistem için ARX model yaklaşımı.

4.3.2 OE Model Yapısı

Model yapıları arasındaki temel fark bozucu etkilerin modellenmeye etkilerinden kaynaklanmaktadır. Sistem dinamiklerinin ayrı ayrı tanımlanabileceği ve bir bozucu modelde herhangi bir parametrenin boşa gitmeme avantajına sahip OE modeli

$$y(k) = \frac{B(q)}{F(q)}u(k) + e(k) \quad (4.10)$$

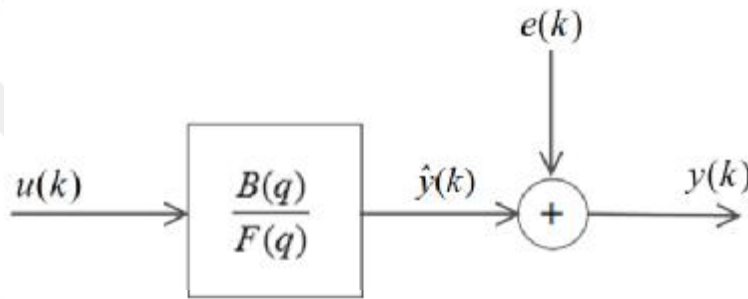
ile verilmektedir (Wang 2011). Eşitlik (4.10)'da $e(k)$ sisteme uygulanan dış bozucudur, $u(k)$ sistem girişi ve $y(k)$ sistem çıkışıdır.

Gecikme operatörü q^{-1} 'e göre polinom olan $B(q)$ ve $F(q)$ sırasıyla

$$B(q) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{k-1}q^{-(k-1)} \quad (4.11)$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + f_kq^{-k} \quad (4.12)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Eşitlik (4.10)'da belirtilen parametrik model, Eşitlik (4.1) ile tanımlanan genel modelin özel durumudur (Forssell and Ljung 2000). OE model yapısı blok yapı olarak Şekil 4.4'te gösterilmektedir. OE model yapısının parametreleri PEM kullanılarak tahmin edilmektedir.



Şekil 4.4 OE model blok yapısı.

Çıkış işaretinin zaman bölgesindeki karşılığı

$$y(k) = -f_1\hat{y}(k-1) - f_2\hat{y}(k-2) - \dots - f_N\hat{y}(k-N) + b_0u(k) + b_1u(k-1) + \dots + b_Mu(k-M) + e(k) \quad (4.13)$$

şeklinde elde edilmektedir. Sistemin çıkış işaretinin mevcut ve daha önceki giriş işaretlerine, önceki çıkış işaretlerine ve f_i, b_j ($0 < i \leq N$, $0 \leq j \leq M$) transfer fonksiyonu katsayılarına bağlı olduğu Eşitlik (4.13)'te görülmektedir. Eşitlik (4.13) vektörel formda

$$\hat{y}(k) = \begin{bmatrix} -\hat{y}(k-1) & -\hat{y}(k-2) & \dots & -\hat{y}(k-N) & u(k) & u(k-1) & \dots & u(k-M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \\ b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$y(k) = \hat{\varphi}^T(k)\theta + e(k) \quad (4.15)$$

ile gösterilmektedir. Eşitlik (4.15)'te

$$\hat{\varphi}^T(k) = [-\hat{y}(k-1) \quad -\hat{y}(k-2) \quad \cdots \quad -\hat{y}(k-N) \quad u(k) \quad u(k-1) \quad \cdots \quad u(k-M)] \quad (4.16)$$

$$\theta^T = [f_1 \quad f_2 \quad \cdots \quad f_N \quad b_0 \quad b_1 \quad \cdots \quad b_M] \quad (4.17)$$

olarak ifade edilmektedir. Eşitlik (4.16)'da regresör vektör olarak adlandırılan $\varphi^T(k)$ geçmişteki çıkış değerleri ile şimdiki ve geçmiş giriş değerlerine bağlıdır. Regresör vektörün tüm elemanları, sistem üzerinde ölçülerek kaydedilen giriş çıkış verileridir. Eşitlik (4.15)'te ifade edilen θ vektörü ise parametre vektörü olarak adlandırılmaktadır. Parametreleri kestirilmiş $\hat{\theta}$ vektörü

$$\hat{\theta} = \left[\sum_{k=0}^{K-1} \hat{\varphi}^T(k) \hat{\varphi}(k) \right]^{-1} \left[\sum_{k=0}^{K-1} \hat{\varphi}(k) y(k) \right] \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (4.18)$$

şeklinde elde edilmektedir. Eşitlik (4.18)'deki $\hat{\theta}$ parametre kestirim vektörü, parametreleri sistemin gerçek durumunu ifade eden θ vektörünün en küçük kareler yöntemi ile yaklaşık olarak bulunan eşitidir. OE model yaklaşımında sapma olmamaktadır, ancak maliyet fonksiyonu lokal minimumlara sahiptir (Söderström et al. 2010). Veri toplama işlemi sırasında sistem geri bildirim olmadan çalışırsa, bozucunun niteliğine bakılmaksızın Şekil 4.4'teki transfer fonksiyonunun tanımı elde edilmektedir. Sistemi etkileyen bozucu beyaz gürültü olduğunda

$$G(q^{-1}, \theta) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \quad (4.19)$$

olmakta ve kestirilen çıkış işareti

$$\hat{y}(k|\theta) = B(q^{-1}) u(k) + [1 - F(q^{-1})] y(k) \quad (4.20)$$

olarak elde edilmektedir. Eşitlik (4.19)'da q^{-d} dış bozucu gecikme operatörüdür.

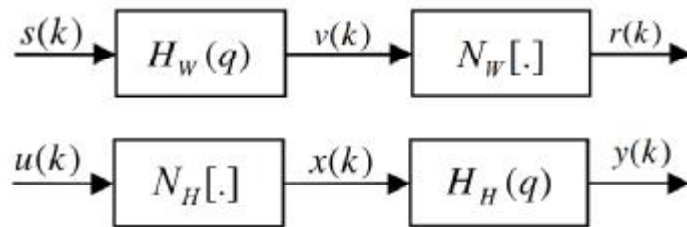
OE model yapısında Eşitlik (4.15) ile tanımlanan regresör vektörünün EE yaklaşımında Eşitlik (4.7) ile tanımlanan regresör vektöründen farklı olması, dış bozucudan etkilenmeyen ve gerçek değerinden sapmayan parametre kestirimi elde etmemizi sağlamaktadır.

4.4 DOĞRUSAL OLMAYAN MODEL YAPILARI

Fiziksel olarak gerçekleştirilen mühendislik sistemleri doğrusal olmayan yapıda tasarlanmaktadır. Mühendislik problemlerinin çözümünde doğrusal olarak ele alınan sistemler gerçekte doğrusal olmayan yapıda olup, belirli şartlar altında belirli bir çalışma bölgesi için doğrusal yapıda olduğu kabul edilmektedir. Doğrusal olmayan sistemlere ait matematiksel eşitliklerin ve analitik çözümlerinin elde edilmesi her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, doğrusal olmayan sistemler belirli şartlar altında doğrusallaştırılmaktadır. Doğrusallaştırılan sistemin gerçek sisteme uygunluğu oluşturulan modelin başarımını belirlemektedir (Khalil 1996).

4.4.1 Blok Tabanlı Wiener ve Hammerstein Model Yapıları

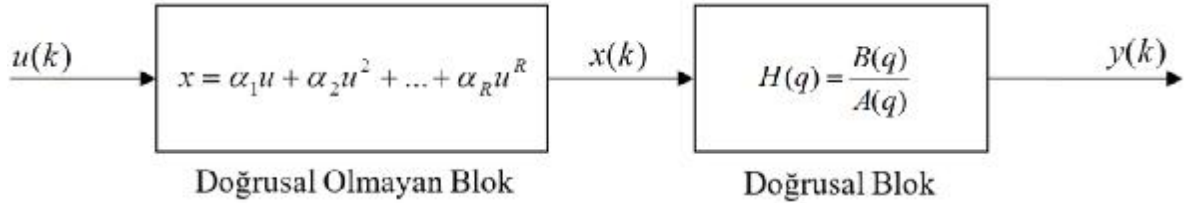
Çok eklemlili robot kollarının dinamik denklemleri incelendiğinde doğrusal olmayan bölgede çalıştıkları görülmektedir. Doğrusal olmayan çok eklemlili robot kol denetiminin sağlanması için denetlenecek sistemin modelinin elde edilmesinde Wiener ve Hammerstein blok yapıları ön plana çıkmaktadır (Bai and Li 2004). Doğrusal dinamik bloğun ardından doğrusal olmayan statik bir blok içeren Wiener ve doğrusal olmayan dinamik bloğun ardından doğrusal statik bir blok içeren Hammerstein blok yapıları Şekil 4.5'te sırasıyla gösterilmektedir. Wiener ve Hammerstein blok yapıları parametre vektörünün kestiriminde en küçük ortalama kareler ve öz yinmeli en küçük kareler yöntemi kullanılmaktadır (Ljung 1999).



Şekil 4.5 Wiener ve Hammerstein blok yapıları.

Hammerstein sistemi, Şekil 4.6'da gösterildiği gibi doğrusal bir dinamik alt sistem tarafından izlenen statik doğrusal olmayan bir bloktan oluşmaktadır (Liu and Bai 2007). $N_H[.]$ polinom

doğrusallığı (Narendra and Gallman 1966, Chang and Luus 1971, Haist et al. 1973, Zhu 2000), parçalı doğrusal olmayanlık (Voros 1999), monoton (tek) doğrusal olmayanlık (Bai and Li 2004, Liu and Bai 2007) gibi statik doğrusal olmayan bir işlevdir. Tanımlamanın amacı, mevcut giriş-çıkış verileri ile $\{u(k), y(k)\}$ $A(q)$ ve $B(q)$ polinomlarının a_i, b_i katsayılarının ve doğrusal olmayan $N_H[.]$ fonksiyonunun parametrelerinin tahmin edilmesidir (Ding et al. 2011).



Şekil 4.6 Hammerstein model doğrusal ve doğrusal olmayan blok yapısı.

Şekil 4.6'daki sisteme $u(k)$ giriş işareti uygulandığında, bu giriş işareti öncelikle sistemin doğrusal olmayan Hammerstein bloğu ile etkileşmekte ve elde edilen $x(k)$ işareti sistemin doğrusal bloğunun giriş işareti olmaktadır. Sistemin doğrusal bloğunun çıkışı sistem çıkışı $y(k)$ olarak elde edilmektedir (Fruzzetti et al. 1997, Yu et al. 2008). Şekil 4.6'da gösterilen sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan blokları matematiksel olarak

$$x(k) = \alpha_1 u(k) + \alpha_2 u^2(k) + \dots + \alpha_R u^R(k) \quad (4.21)$$

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - \dots - a_N y(k-N) + b_0 x(k) + b_1 x(k-1) + \dots + b_M x(k-M) \quad (4.22)$$

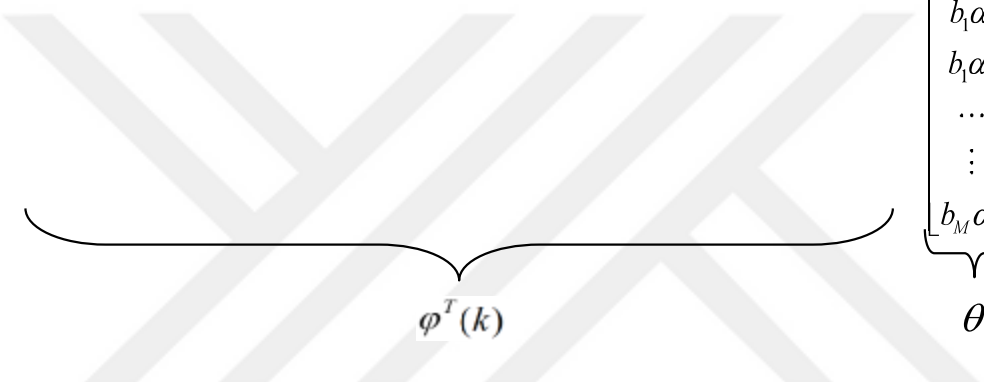
şeklinde ifade edilmektedir. Hammerstein model bloğunun doğrusal olmayan kısmı $N_H(u)$ R 'nci dereceden polinom yapıda Eşitlik (4.21) ile verilmektedir. Eşitlik (4.21) ile verilen ifade Eşitlik (4.22) içerisine yerleştirildiğinde

$$\begin{aligned} y(k) = & -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - \dots - a_N y(k-N) \\ & + b_0 [\alpha_1 u(k) + \alpha_2 u^2(k) + \dots + \alpha_R u^R(k)] \\ & + b_1 [\alpha_1 u(k-1) + \alpha_2 u^2(k-1) + \dots + \alpha_R u^R(k-1)] \\ & + \dots + b_M [\alpha_1 u(k-M) + \alpha_2 u^2(k-M) + \dots + \alpha_R u^R(k-M)] \end{aligned} \quad (4.23)$$

şeklinde elde edilmektedir.

Sistemin çıkış işaretinin mevcut ve daha önceki giriş işaretlerine, önceki çıkış işaretlerine, doğrusal olmayan blok çıkışındaki α_m ($0 < m \leq R$) katsayısına ve a_i, b_j ($0 < i \leq N, 0 < j \leq M$) transfer fonksiyonu katsayılarına bağlı olduğu Eşitlik (4.23)'te görülmektedir. Eşitlik (4.23) vektörel formda

$$y(k) = \left[-y(k-1) \cdots -y(k-N) \quad u(k) \quad u(k-1) \cdots u(k-M) \cdots u^R(k) \cdots u^R(k-M) \right] \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \\ b_0 \alpha_1 \\ \vdots \\ b_0 \alpha_R \\ b_1 \alpha_1 \\ b_1 \alpha_2 \\ \vdots \\ b_M \alpha_R \end{bmatrix} \quad (4.24)$$



$\underbrace{\hspace{15em}}_{\varphi^T(k)} \quad \underbrace{\hspace{2em}}_{\theta}$

$$y(k) = \varphi^T(k) \theta \quad (4.25)$$

şeklinde verilmektedir. Eşitlik (4.24)'te giriş işareti $u(k)$ ve çıkış işareti $y(k)$ yardımıyla θ parametre vektöründeki a_i, b_j ve α_m ($0 < i \leq N, 0 < j \leq M$ ve $0 < m \leq R$) katsayıları belirlenmektedir. Eşitlik (4.25)'te regresör vektör olarak adlandırılan $\varphi^T(k)$ geçmişteki çıkış değerleri ile şimdiki ve geçmiş giriş değerlerine bağlıdır. $\varphi^T(k)$ regresör vektörü, sistem üzerinde ölçülerek kaydedilen giriş çıkış verilerini içermektedir. Eşitlik (4.25)'te ifade edilen θ vektörü ise parametre vektörü olarak ifade edilmektedir (Huusom et al. 2012).

Parametreleri kestirilmiş olan $\hat{\theta}$ vektörü

$$\hat{\theta} = \left[\sum_{k=0}^{K-1} \varphi^T(k) \varphi(k) \right]^{-1} \left[\sum_{k=0}^{K-1} \varphi(k) y(k) \right] \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (4.26)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Hammerstein model yapısı için elde edilen çözüm ARX model yapısı ile elde edilen çözümler benzerlik göstermektedir. Kestirilen $\hat{\theta}$ vektörü ile a_i, b_j ve α_m ($0 < i \leq N, 0 < j \leq M$ ve $0 < m \leq R$) katsayıları kestirilmektedir. Eşitlik (4.24)'teki b_j ve α_m ($0 < j \leq M$ ve $0 < m \leq R$) katsayılarının belirlenebilmesi için $\hat{\theta}$ vektörünün b_j ve α_m katsayılarını içeren kısmi matris formda

$$B = \begin{bmatrix} b_0\alpha_1 & b_0\alpha_2 & b_0\alpha_R \\ b_1\alpha_1 & b_1\alpha_2 & b_1\alpha_R \\ \dots & \dots & \dots \\ b_M\alpha_1 & b_M\alpha_2 & b_M\alpha_R \end{bmatrix} \quad (0 < j \leq M \text{ ve } 0 < m \leq R) \quad (4.27)$$

olarak düzenlendiğinde Eşitlik (4.27)'deki matrisin elemanları tekil bileşen ayrışımı (Singular Value Decomposition-SVD) yöntemi ile hesaplanmaktadır (Hacıoğlu and Williamson 2003). Sistemin ürettiği çıkışla, aynı giriş altında elde edilen modelin ürettiği çıkış arasındaki fark kestirim hatası olarak ifade edilmektedir (Ljung 1999). Sistemin modellenmesinin doğruluğu kestirim hatasının Gauss dağılımlı olmasına ve giriş işaretinden bağımsız olmasına bağlıdır. Kestirim hatasının Gauss dağılımlı olup olmadığını test etmek için

$$\hat{R}_\varepsilon(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varepsilon(k)\varepsilon(k-\tau) \quad (4.27)$$

ile ifade edilen otokorelasyon fonksiyonuna, giriş işareti ile bir ilgisinin olup olmadığına belirlemek için

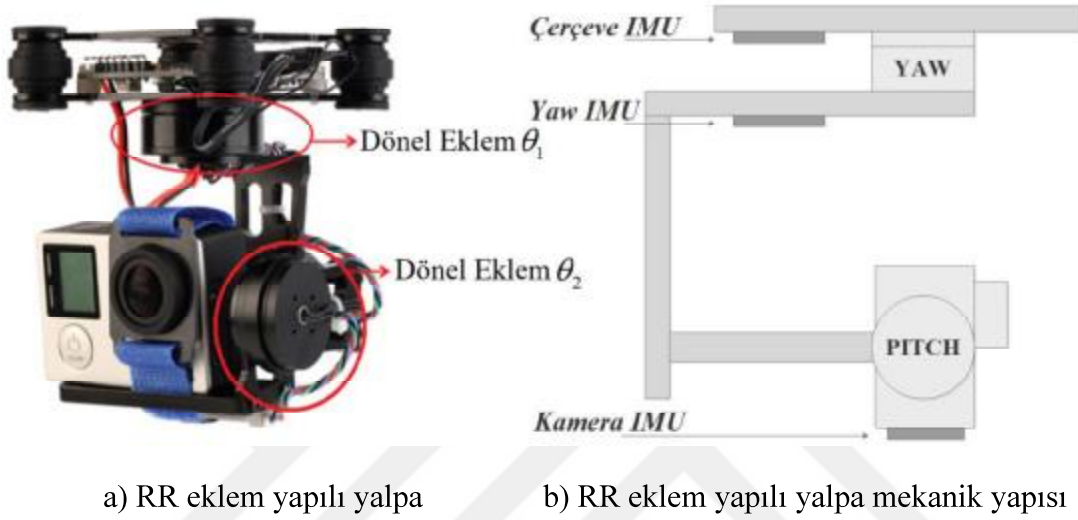
$$\hat{R}_{\varepsilon u}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varepsilon(k)u(k-\tau) \quad (4.28)$$

ile belirtilen çapraz korelasyon fonksiyonuna bakılmaktadır.

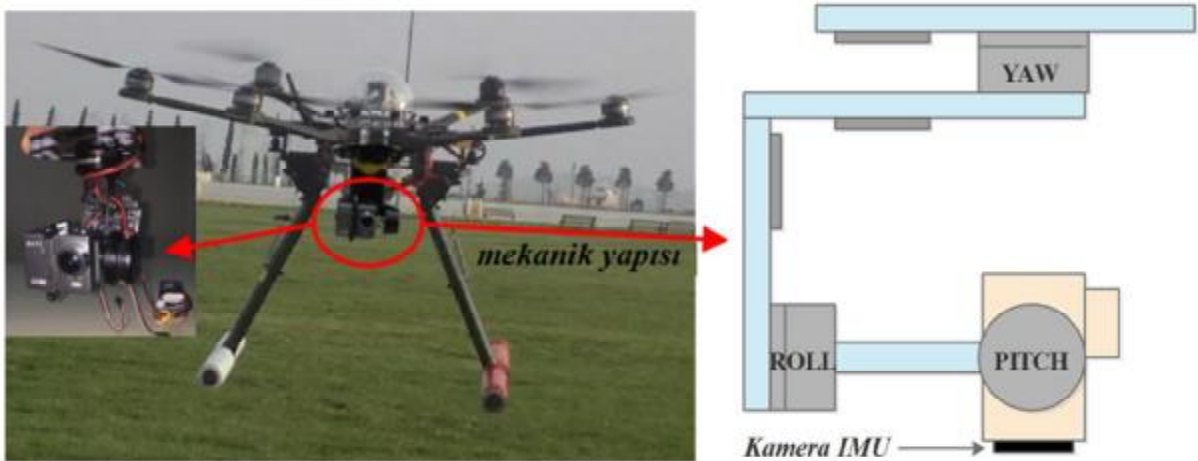
4.5 RR VE RRR EKLEM YAPISINA SAHİP YALPANIN OE VE HAMMERSTEIN MODEL YAPISI İLE MODELLENMESİ

Eklemleri ve mekanik yapısı sırasıyla Şekil 4.7 ve 4.8'de gösterilen RR sapma-yunuslama (Yaw Pitch-YP) ve RRR sapma-yunuslama-yatış (Yaw Pitch Roll-YPR) eklem yapısına sahip yalpanların dış bozucu etki altında modellenmesinde kullanılan giriş çıkış verileri deneysel

olarak elde edilmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpalara ait deneysel veriler Güney-Doğu (South East-SE) yönünden 5.6 m/sn hıza sahip rüzgarın olduğu ortamda alınmaktadır. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpaların dış bozucu etki altında modellerinin oluşturulabilmesi için ortamdaki rüzgara ilave olarak sırasıyla sapma-yunuslama ve yunuslama-yatış eksenlerine servo motor deney düzeneği yardımıyla darbe şeklinde bozucu kuvvet uygulanmaktadır.



Şekil 4.7 İHA üzerine monte edilen RR eklem yapısına sahip yalpa ve mekanik yapısı.



Şekil 4.8 İHA üzerine monte edilen RRR eklem yapısına sahip yalpa ve mekanik yapısı.

Elde edilen verilerden oluşan veri setleri iki kısma ayrılarak birinci kısımdaki sistem tanımlama verileri ile sistemin modeli, ikinci kısımdaki model doğrulama verileri ile elde edilen sistem modelinin geçerliliği test edilmektedir. Çalışmada, doğrusal OE ve doğrusal olmayan

Hammerstein model yapıları üzerinde durulmaktadır. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpalara OE ve Hammerstein model yapıları ile modellenmekte ve model derecelerinin belirlenmesinde sistem tanımlama için ayrılan veri seti kullanılmaktadır. Akaike Bilgi Kriteri (Akaike Information Criteria- AIC) ve Nihai Tahmin Hatası (Final Prediction Error- FPE) model derecesi belirleme kriterlerine (Ljung 1999) göre elde edilen sistem modellerinin derecesi belirlenmektedir. Çapraz korelasyon ve oto korelasyon ile elde edilen yalpa modellerinin geçerliliği belirlenmektedir.

4.5.1 RR Eklem Yapısına Sahip Yalpanın OE ve Hammerstein Model Yapısı ile Modellenmesi

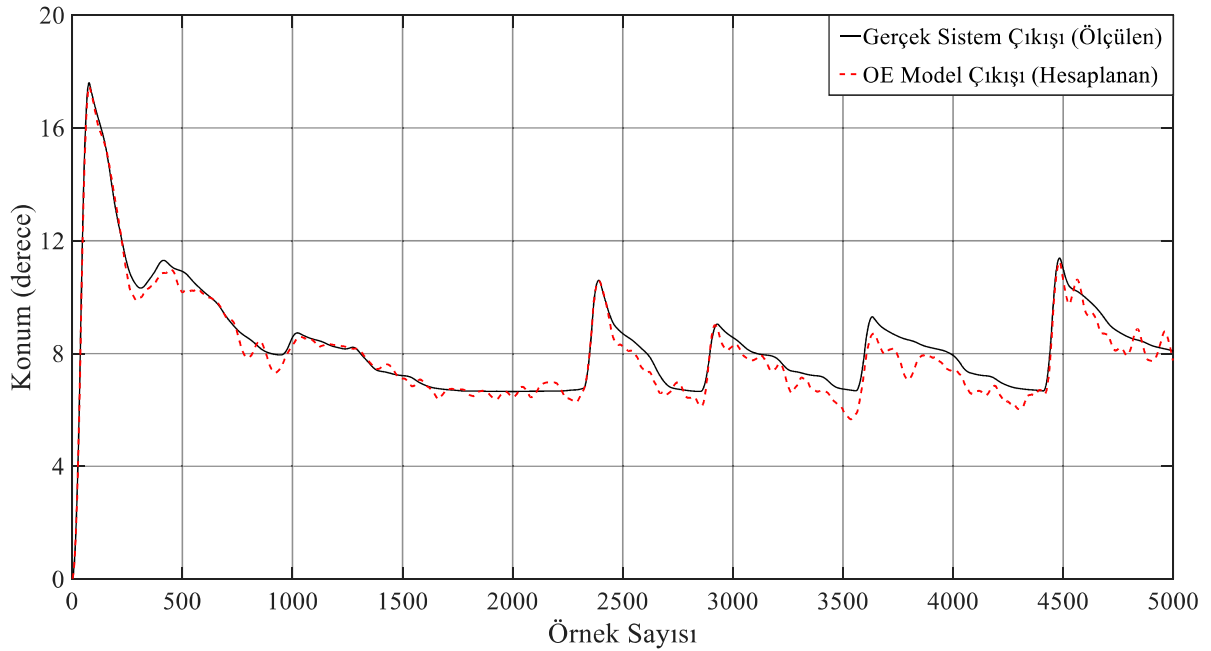
RR eklem yapısına sahip yalpanın eklemleri ve mekanik yapısı Şekil 4.7’de gösterilmektedir. RR eklem yapısına sahip yalpa İHA üzerine monte edilerek yalpanın modellenmesinde kullanılan deneysel giriş çıkış verileri elde edilmektedir. İHA üzerine monte edilmiş yalpaya ait veriler SE yönünden 5.6 m/sn hıza sahip rüzgarın olduğu ortamda alınmıştır. İHA üzerindeki RR eklem yapısına sahip yalpa 250 saniye çalıştırılmış ve 5000 veri alınmıştır. Örnekleme zamanı $T=0.05$ sn olarak belirlenmiştir. Çalışmanın 115’inci saniyesinde RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında modelinin oluşturulabilmesi için, 6 V’ta 70 rpm hıza ve 0.484 Nm torka sahip servo motor yardımıyla, öncelikle yalpanın yunuslama eksenine daha sonra da sapma eksenine üst üste 2 kere darbe şeklinde dış bozucu uygulanmıştır. RR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin maksimum düzeyde dış bozucu etkiye maruz kalması için darbe yunuslama ve sapma eksenine 45°’lik açı ile uygulanmıştır.

Çalışmada kullanılan RR eklem yapısına sahip yalpanın bağ uzunlukları birinci ve ikinci eklem için sırasıyla 30 mm ve 35 mm, kütle ağırlıkları birinci ve ikinci eklem için sırasıyla 25 g ve 155 g olarak belirlenmiştir. Yalpanın uç işlevcisinde 150 g ağırlığında kamera ve 5 g ağırlığında kamera montaj aparatı bulunmaktadır. RR eklem yapısına sahip yalpanın uç işlevcisinde bulunan kameranın konumu 7°’lik açıya ayarlanarak referans açı değeri belirlenmiştir. Eklemlerde bulunan BLDC motorların konum değerleri üzerlerindeki enkoderler yardımıyla elde edilmiştir. Dış bozucu uygulandığında, RR eklem yapısına sahip yalpanın yunuslama eksenindeki sapmanın 7°’lik referans açı değerine göre en yüksek 3.5° olduğu, sapma eksenindeki sapmanın 7°’lik referans açı değerine göre en yüksek 4.5° olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada kullanılan RR eklem yapısına sahip yalpanın modelinin elde edilmesinde 5000 veriden oluşan veri seti kullanılmıştır. Veri seti 3500 veriden oluşan birinci kısım ve 1500

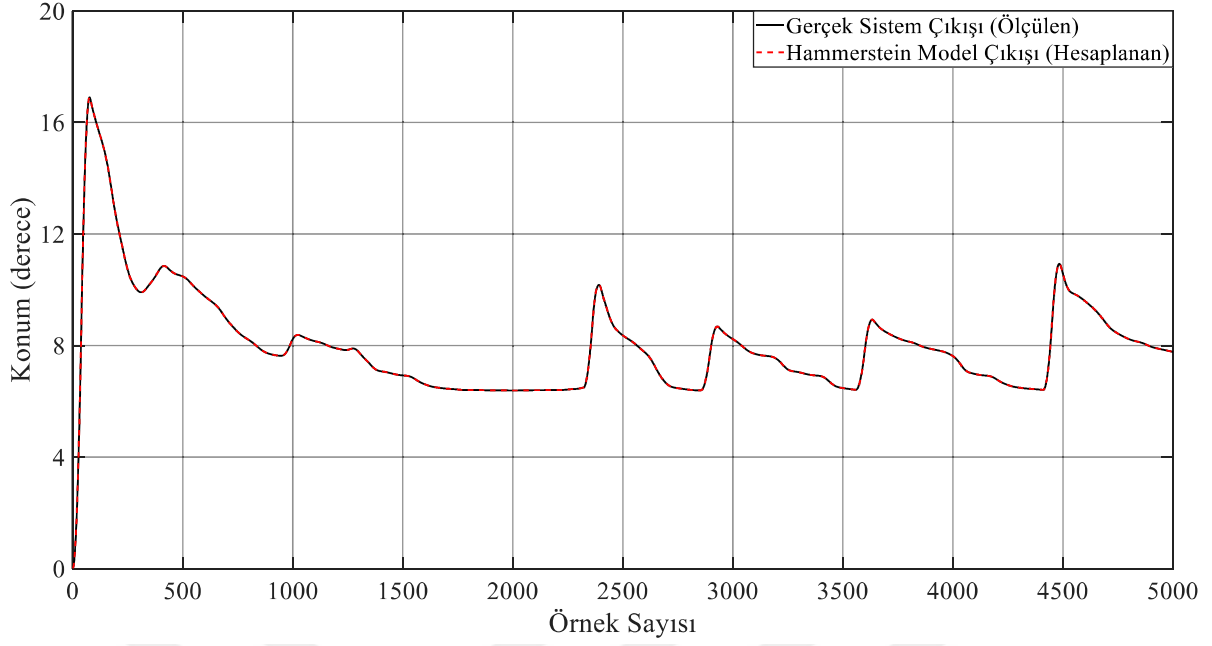
veriden oluşan ikinci kısım olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Birinci kısımdaki veriler (sistem tanımlama verileri) ile sistemin doğrusal OE ve doğrusal olmayan Hammerstein modeli elde edilmiş, elde edilen sistem modelinin doğrulanması ikinci kısımdaki veriler (model doğrulama verileri) ile gerçekleştirilmiştir.

Dış bozucu etki altında RR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilen doğrusal OE modeli ile doğrusal olmayan Hammerstein modelinin parametreleri en küçük kareler metodu ile kestirilmiştir. Dış bozucu etki altında RR eklem yapısına sahip yalpa sistemi OE model ile %86.38 ve Hammerstein model ile %98.76 başarıyla modellenmiştir. AIC ve FPE kriterlerine göre sistem modelinin (hem doğrusal hem de doğrusal olmayan blok) derecesi 3 olarak belirlenmiştir.

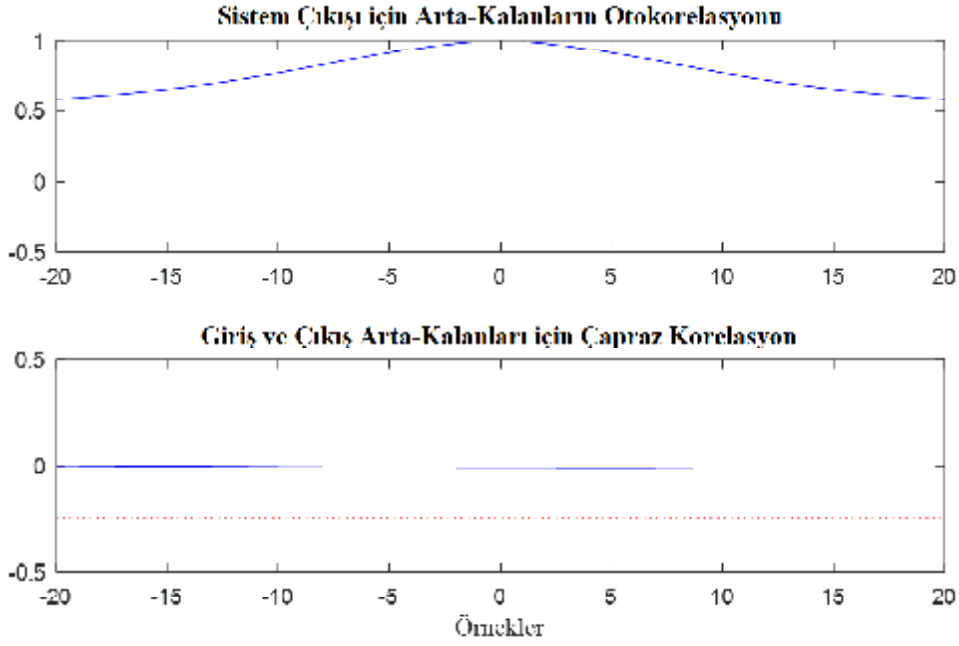
Arta-kalan yaklaşımı ile Hammerstein model doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Sistem doğru modellendiğinde fonksiyonun sıfıra yakın değerler üretmesi beklenmektedir. Elde edilen Hammerstein modelinin otokorelasyon ve çapraz korelasyon fonksiyonu Şekil 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.11'deki otokorelasyon ve çapraz korelasyon grafiklerinin belirlenen bant aralığı içinde olduğu, hataların otokorelasyon katsayılarının %95 güven düzeyinde ve $\pm 1.96/\sqrt{N}$ sınır değerleri içinde kaldığı görülmüştür.



Şekil 4.9 OE model yapılı RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında modeli.



Şekil 4.10 Hammerstein model yapılı RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında modeli.



Şekil 4.11 RR eklem yapısına sahip yalpanın otokorelasyon ve çapraz korelasyonu.

4.5.2 RRR Eklem Yapısına Sahip Yalpanın OE ve Hammerstein Model Yapısı ile Modellenmesi

RRR eklem yapısına sahip yalpanın eklemleri ve mekanik yapısı Şekil 4.8’de gösterilmektedir. RRR eklem yapısına sahip yalpa Şekil 4.8’deki İHA üzerine monte edilerek yalpanın

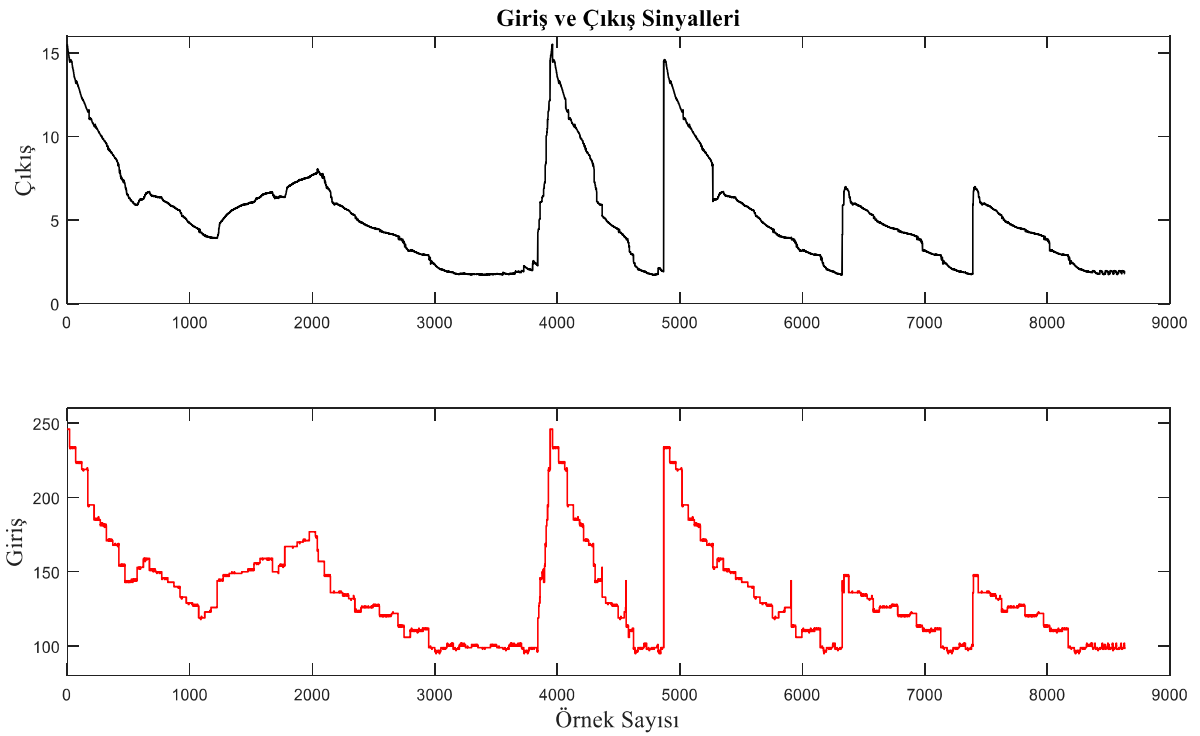
modellenmesinde kullanılan deneysel giriş çıkış verileri elde edilmiştir. İHA üzerine monte edilmiş yalpaya ait veriler SE yönünden 5.6 m/sn hıza sahip rüzgarın olduğu ortamda alınmıştır. İHA üzerindeki RRR eklem yapısına sahip yalpa 425 saniye çalıştırılmış ve 8500 veri alınmıştır. Örnekleme zamanı $T=0.05$ sn olarak belirlenmiştir. Çalışmanın 175'inci saniyesinde RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında modelinin oluşturulabilmesi için, 6 V'ta 70 rpm hıza ve 0.484 Nm torca sahip servo motor yardımıyla, öncelikle yalpanın yunuslama eksenine daha sonra da yatış eksenine üst üste 2 kere darbe şeklinde dış bozucu uygulanmıştır. RRR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin maksimum düzeyde dış bozucu etkiye maruz kalması için darbe yunuslama ve yatış eksenine 45° lik açı ile uygulanmıştır.

Çalışmada kullanılan RRR eklem yapısına sahip yalpanın bağ uzunlukları birinci, ikinci ve üçüncü eklem için sırasıyla 30 mm, 35 mm ve 25 mm olup kütle ağırlıkları birinci, ikinci ve üçüncü eklem için sırasıyla 25 g, 155 g ve 30 g olarak belirlenmiştir. Yalpanın yunuslama ekseninde 150 g ağırlığında kamera ve 5 g ağırlığında kamera montaj aparatı bulunmaktadır. RRR eklem yapısına sahip yalpanın yunuslama ekseninde bulunan kameranın konumu 1° lik açıya ayarlanarak referans açı değeri belirlenmiştir. Eklemlerde bulunan BLDC motorların konum değerleri üzerlerindeki enkoderler yardımıyla elde edilmiştir. Dış bozucu uygulandığında, RRR eklem yapısına sahip yalpanın yunuslama eksenindeki sapmanın 1° lik referans açı değerine göre en yüksek 14° olduğu, yatış eksenindeki sapmanın 1° lik referans açı değerine göre en yüksek 6° olduğu gözlemlenmiştir.

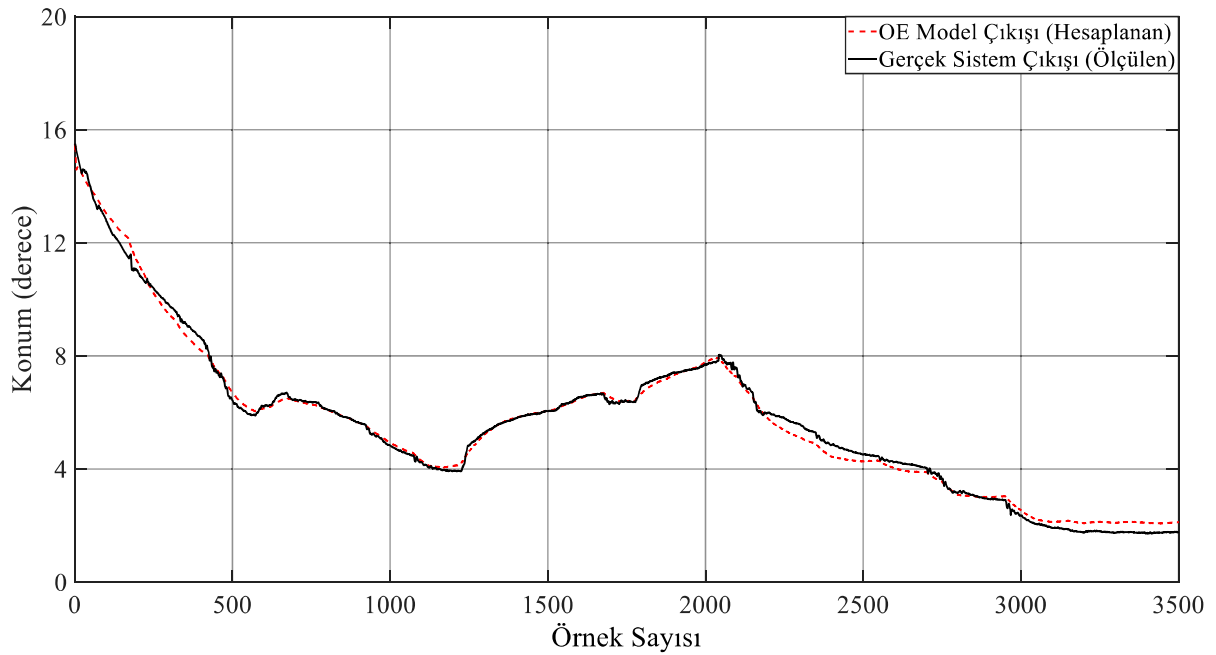
Çalışmada kullanılan RRR eklem yapısına sahip yalpanın modelinin elde edilmesinde 8500 veriden oluşan veri seti kullanılmıştır. Veri seti 3500 veriden oluşan birinci kısım ve 5000 veriden oluşan ikinci kısım olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Birinci kısımdaki veriler dış bozucu olarak SE yönünden 5.6 m/sn hıza sahip rüzgarın olduğu ortamda alınmıştır. İkinci kısımdaki veriler ortamdaki rüzgara ek olarak sırasıyla yalpanın yunuslama ve yatış eksenlerine 45° lik açı ile uygulanan dış bozucu darbe altında alınmıştır. Giriş-çıkış veri seti Şekil 4.12'de görülmektedir. Birinci kısımdaki sistem tanımlama verileri ile ortamdaki rüzgar dışında dış bozucu etkinin olmadığı durumda RRR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gösterilen doğrusal OE ve doğrusal olmayan Hammerstein modeli elde edilmiştir.

RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemi model parametreleri en küçük kareler metodu ile kestirilmiş ve sistem OE model ile %92.81 ve Hammerstein model ile %97.26 başarımla

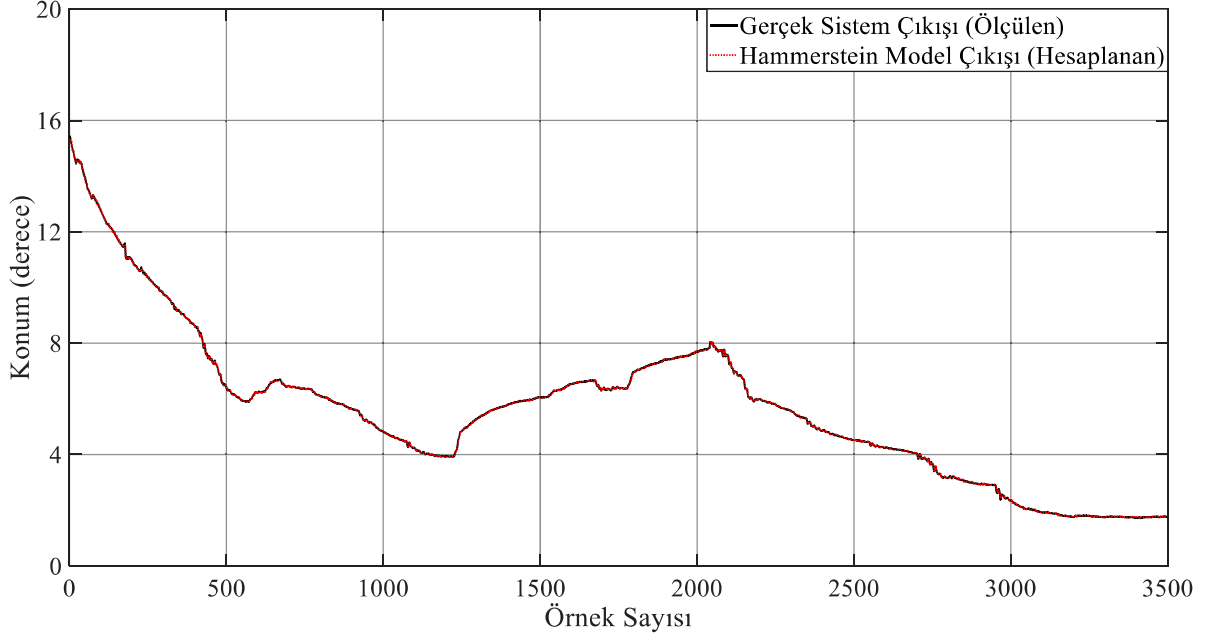
modellenmiştir. AIC ve FPE kriterlerine göre sistem modelinin (hem doğrusal hem de doğrusal olmayan blok) derecesi 3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.12 RRR eklem yapısına sahip yalpanın giriş ve çıkış sinyalleri.

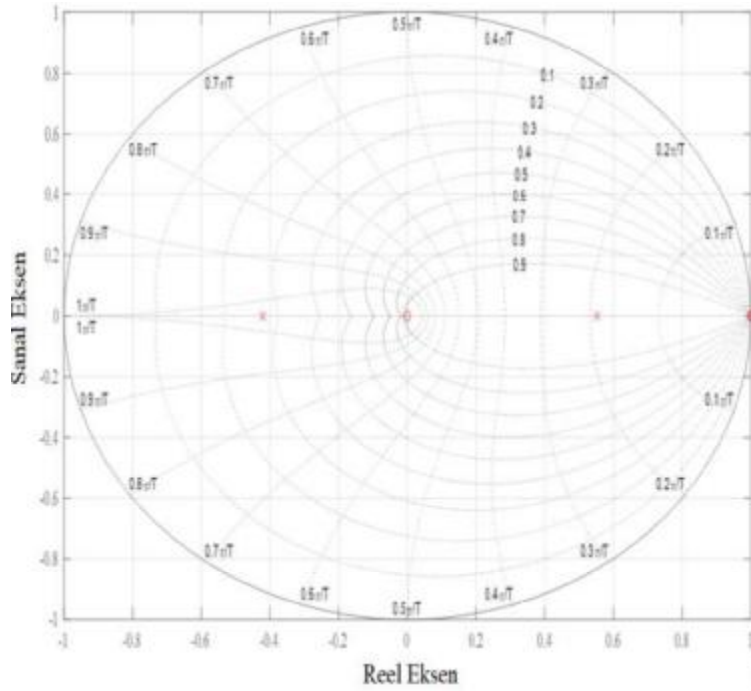


Şekil 4.13 OE model yapılı RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu olmadığı durumda modeli.



Şekil 4.14 Hammerstein model yapıli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu olmadığı durumda modeli.

Kutup-sıfır çizimi, model derecesinin çok büyük olup olmadığını göstermektedir. Model indirgenmesinin mümkün olduğu varsayıldığında, birbirine yakın yerleşmiş kutup ve sıfırlar olmaktadır. RRR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin elde edilen Hammerstein modelinin sıfır-kutup çizimi Şekil 4.15’te sunulmuştur.



Şekil 4.15 RRR eklem yapısına sahip yalpanın kutup-sıfır haritası.

Kutup-sıfır yerleri parametrik olmayan modellerden ve basit deneylerden elde edilebilmektedir. Kestirilen modelin de benzer kutup-sıfır yerlerine sahip olduğu doğrulanmalıdır. Eğer dış bozucu dominant frekanslara sahip olacak şekilde oluşursa, uygun frekanslarda dış bozucu modelinde tekrarlanan kutuplar olmaktadır.

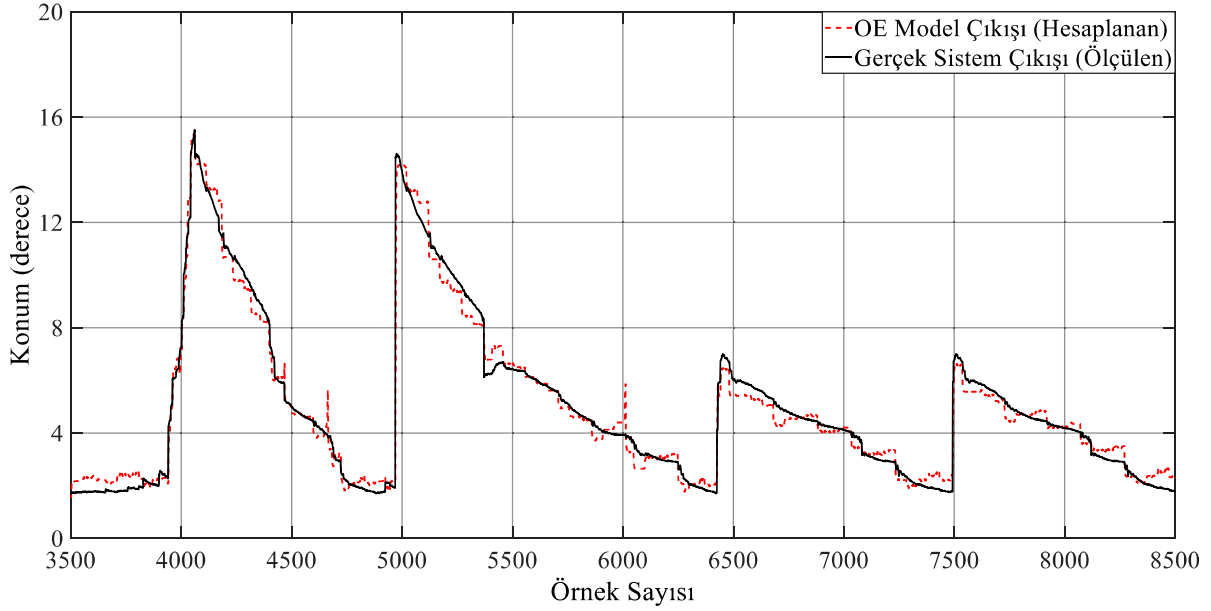
Parametrik model yapıları incelenerek, tanımlanan sistem ve denetlenecek sistem için OE ve Hammerstein model kestirim hatasına bakıldığında, kestirim hatasını minimize eden en az karmaşıklıkta model tanımlama yapısının Hammerstein model tanımlama yapısıyla elde edildiği görülmektedir. Giriş ve çıkış fonksiyonları için tanımlanan katsayılarla en yakın değerler Hammerstein model tanımlama yapısı ile bulunmakta ve en az karmaşıklıkta modeli Hammerstein model tanımlama yapısı sağlamaktadır. Teorikte Hammerstein model yapısında dış bozucuya bağlı değerlerin olması parametrelerin gerçek değerlerinden sapmasına neden olmaktadır. Hammerstein model tanımlama yapısında parametrelerin gerçek değerlerinden sapması iyileştirilmektedir. Benzetimle elde edilen sonuçlar ile analiz edilen sonuçlar uyumludur.

Çalışmada kullanılan RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında modelinin elde edilmesinde 8500 veriden oluşan veri setinin ikinci kısmındaki 5000 veri kullanılmıştır. İkinci kısımdaki veriler SE yönünden 5.6 m/sn hıza sahip rüzgara ek olarak sırasıyla yalpanın yunuslama ve yatış eksenlerine üst üste 2 kere 45°'lik açı ile uygulanan dış bozucu darbe altında alınmıştır. RRR eklem yapısına sahip yalpanın ikinci kısımdaki verilerle elde edilen doğrusal OE ve doğrusal olmayan Hammerstein modeli sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

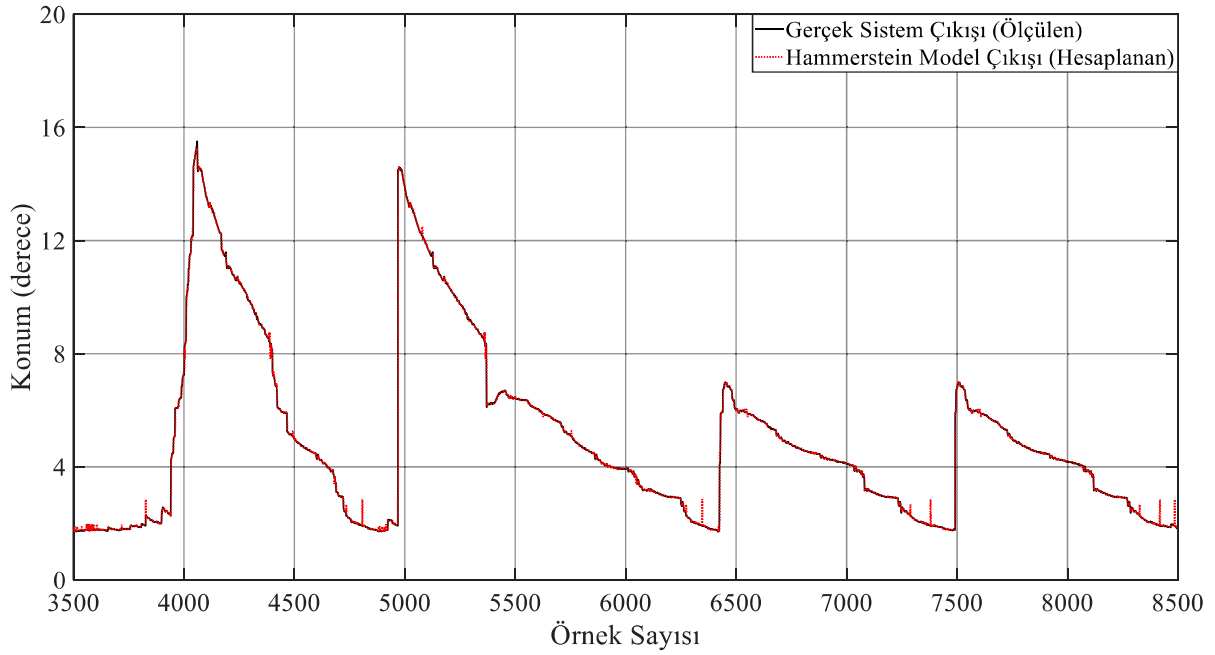
RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemi dış bozucu etki altında model parametreleri en küçük kareler metodu ile kestirilmiş ve sistem OE model ile %89.17 ve Hammerstein model ile %96.48 başarıyla modellenmiştir. AIC ve FPE kriterlerine göre sistem modelinin (hem doğrusal hem de doğrusal olmayan blok) derecesi 3 olarak belirlenmiştir.

Giriş ve çıkış sinyalleri Şekil 4.12'de verilen RRR eklem yapısına sahip yalpa için deneysel olarak elde edilen tüm veri setleri kullanılarak sistemin doğrusal OE ve doğrusal olmayan Hammerstein modeli elde edilmiş ve sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da sunulmuştur. Dış bozucu olmadığı ve dış bozucu olduğu durumda elde edilen RRR eklem yapısına ait sistem

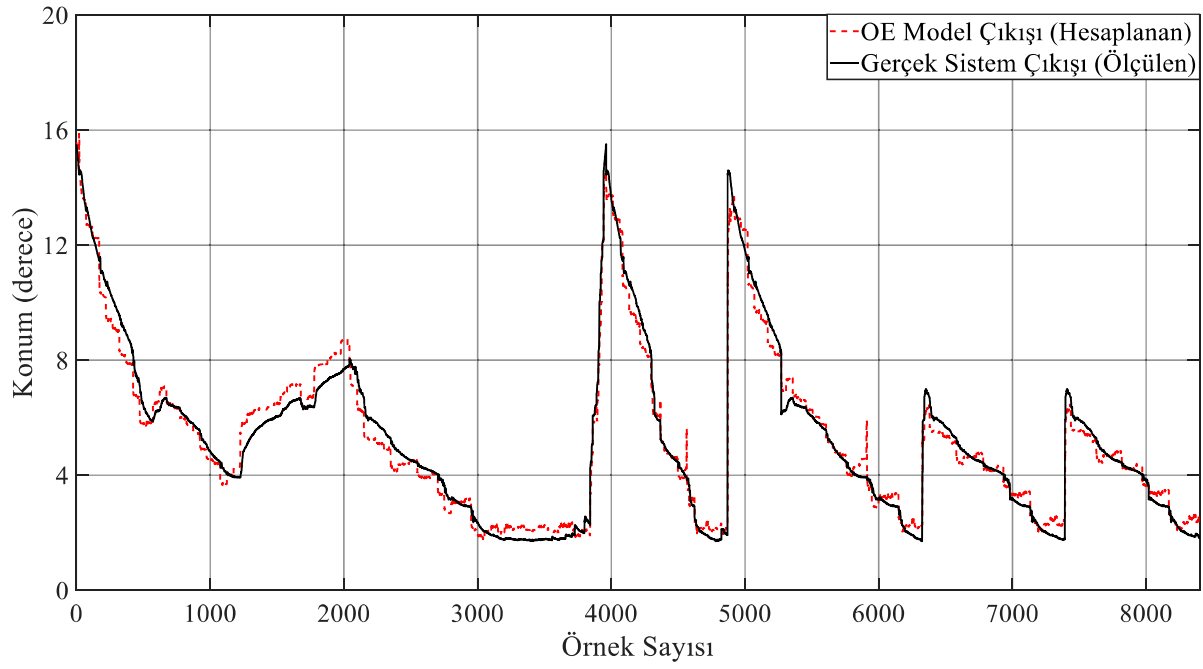
modeli tüm veri setleriyle tanımlanan RRR eklem yapısına ait sisteme uygulandığında başarımın doğrusal OE modeli için %91.46, doğrusal olmayan Hammerstein modeli için %96.98 olduğu belirlenmiştir.



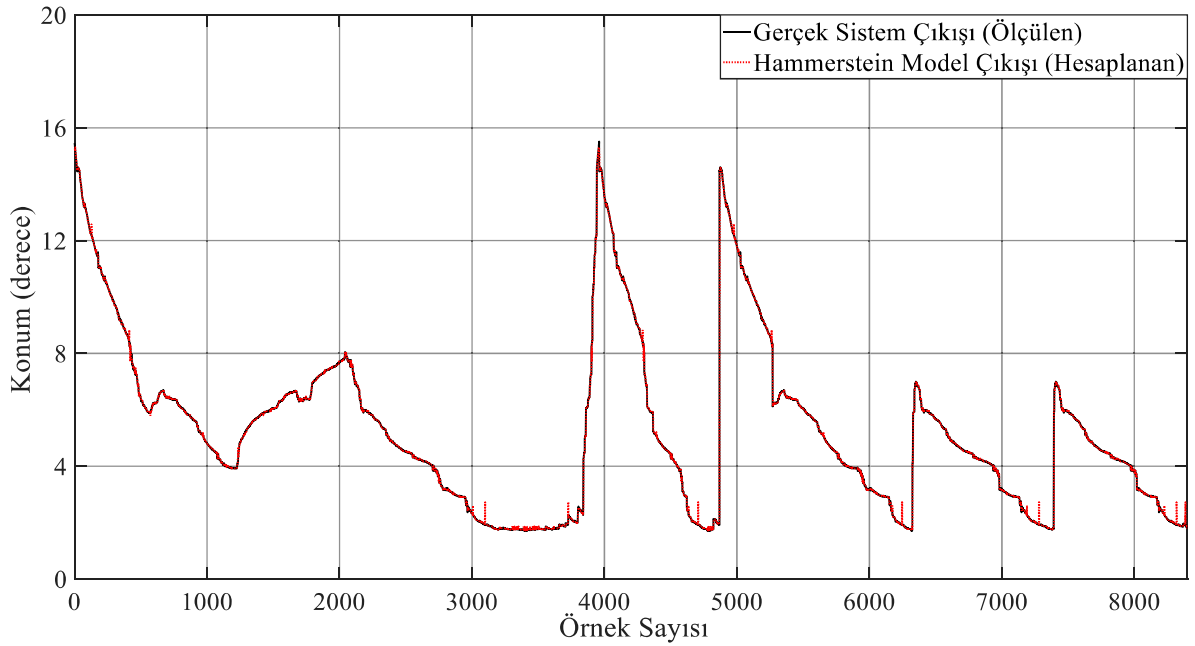
Şekil 4.16 RRR eklem yapısına sahip yalpanın yunuslama ve yatış eksenlerine uygulanan dış bozucu altında sistemin doğrusal yapıları OE modeli.



Şekil 4.17 RRR eklem yapısına sahip yalpanın yunuslama ve yatış eksenlerine uygulanan dış bozucu altında sistemin Hammerstein modeli.



Şekil 4.18 OE model yapılı RRR eklem yapısına sahip yalpa modeli.



Şekil 4.19 Hammerstein model yapılı RRR eklem yapısına sahip yalpa modeli.

AIC ve FPE kriterlerine göre sistem modelinin (hem doğrusal hem de doğrusal olmayan blok) derecesi 3 olarak belirlenmiştir. İHA üzerindeki 3 eksenli yalpa sisteminin dış bozucu altında üçüncü dereceden transfer fonksiyonu

$$\frac{B(q)}{F(q)} = \frac{0.05656q^{-1} - 0.5656q^{-2}}{1 - 1.131q^{-1} - 0.1015q^{-2} + 0.2325q^{-3}} \quad (4.29)$$

olarak elde edilmektedir. Eşitlik (4.29)'da, q^{-1} gecikme operatörüdür. Şekil 4.8'de gösterilen İHA üzerindeki RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemine ait Şekil 4.19'daki Hammerstein model arta-kalan yaklaşımı ile doğrulanmıştır. Elde edilen Hammerstein modelinin otokorelasyon ve çapraz korelasyon fonksiyonu Şekil 4.20'de verilmiştir.

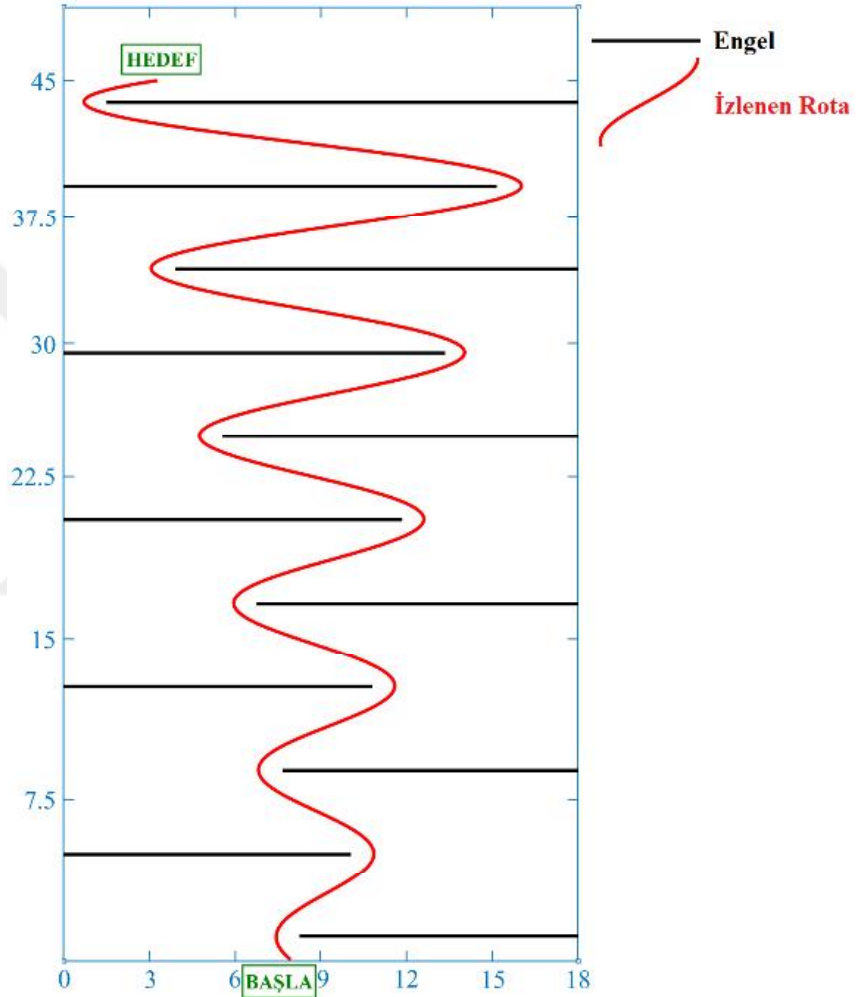


Şekil 4.20 RRR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin otokorelasyon ve çapraz korelasyon analizi.

Sistem doğru modellendiğinde fonksiyonun sıfıra yakın değerler üretmesi beklenmektedir. Şekil 4.20'deki otokorelasyon ve çapraz korelasyon grafiklerinin belirlenen bant aralığı içinde olduğu, hataların otokorelasyon katsayılarının %95 güven düzeyinde ve $\pm 1.96/\sqrt{N}$ sınır değerleri içinde kaldığı görülmüştür.

Tez çalışmasında, RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında elde edilen ve Şekil 4.19 ile gösterilen Hammerstein yalpa sistem modeli İHA'nın rota takibi probleminin çözümü için uygulanmıştır. Şekil 4.8'deki İHA'nın, üzerindeki RRR eklem yapısına sahip yalpa sisteminden elde edilen veriler yardımıyla otonom olarak Şekil 4.21'de gösterilen

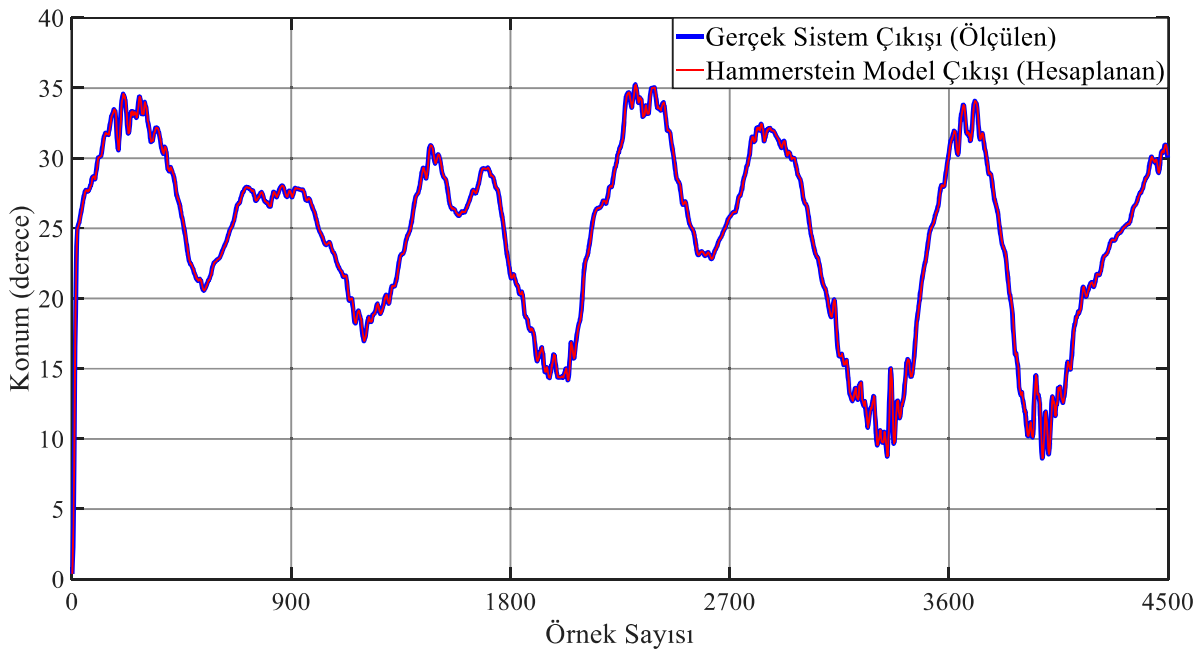
“BAŞLA” noktasından başlayarak engellerden sakınacak şekilde 45m x 18m’lik platformda artan sinüsoidal formda çizilen rota üzerinden “HEDEF” noktaya başarılı şekilde ulaşması görev olarak tanımlanmıştır. İHA’nın Bu görevin başarılı şekilde gerçekleşmesi için dış bozucu etkiler altında İHA üzerindeki RRR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin model tabanlı denetiminde de kullanılabilir yüksek başarımlı doğrusal olmayan modelin başarımının belirlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.21 İHA görev uçuş rotası.

Çalışmada, Şekil 4.8’deki altı rotorlu İHA üzerinde bulunan RRR eklem yapısına sahip yalpaya ait deneysel olarak elde edilen veri setleri kullanılmıştır. İHA üzerindeki yalpanın uç işlevcisinde bulunan kameranın Şekil 4.21’deki üstel olarak artan sinüsoidal formdaki rotayı engellerden sakınarak başarılı şekilde takip etmesini sağlayacak doğrusal olmayan modelin başarımının belirlenmesi için 4500 veriden oluşan veri seti iki kısma ayrılmıştır. İHA üzerindeki RRR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin ilk kısımdaki 3000 sistem tanımlama

verisine Şekil 4.19’da elde edilen Hammerstein model yapısı uygulanmış ve model başarımı belirlenmiştir. Birinci kısımdaki veri setine uygulanan Hammerstein modelin geçerliliği ikinci kısımdaki 1500 model doğrulama verisi ile test edilmiştir. Örnekleme zamanı $T=0.05$ sn olarak belirlenmiştir. Çalışma 5.6 m/sn hızında ve Güney-Batı (South West-SW) yönünden rüzgarın olduğu ortamda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, varyansı 0.9178 olan ve 300 veriden oluşan sıfır ortalamalı toplanır beyaz Gauss gürültüsü de sisteme dış bozucu etki olarak eklenmiştir. İHA üzerindeki RRR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin Hammerstein modeli Şekil 4.22’de gösterilmiştir. AIC ve FPE kriterlerine göre sistem modelinin (hem doğrusal hem de doğrusal olmayan blok) derecesi 3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.22 Dış bozucu altında rota takibi için İHA üzerindeki yalpa sisteminin Hammerstein modeli.

İHA üzerindeki RRR eklem yapısına sahip yalpa sisteminin Hammerstein model parametreleri özyinelemeli en küçük kareler (Recursive Least Square-RLS) algoritması (Ding et al. 2016) tarafından ortalama karesel hata (Mean Square Error-MSE) en aza indirilinceye kadar optimize edilmiştir. Bu işlem 3.34 sn’de gerçekleştirilmiştir. İHA üzerindeki RRR eklem yapısına sahip yalpa sistem çıkışı ile model çıkışı arasındaki farkın MSE değeri RLS algoritması ile 6.84×10^{-5} olarak belirlenmiştir.



BÖLÜM 5

ÇOK EKLEMLİ ROBOT KOL DÜZENEGİ VE DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışmada RR ve RRR eklem yapısına sahip robot kollarının denetimi klasik PID ve önerilen MPC yaklaşımları ile hız, gürbüzlük, kararlılık, hassasiyet, enerji verimliliği ve kısıtlara izin verme açısından incelenmektedir. Örnek uygulama olarak, İHA üzerindeki RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın uç işlevcisine bağlanan kamera ile hassas görüntü takibi yapılmaktadır. Bu bölümde, teorik olarak türetilen çok eklemli robot kolu dinamik modellerinin klasik denetim yöntemlerinden PID ve modele dayalı yöntemlerden MPC ile denetimine ilişkin deneysel sonuçlar incelenmektedir. İHA üzerindeki RR ve RRR eklem yapısına yalpanın dış bozucu etki altında MPC denetiminde doğrusal olmayan Hammerstein modeli kullanılmaktadır. Dış bozucu etki altında model öngörülü olarak denetlenen sistem için elde edilen benzetim sonuçları klasik denetim ile elde edilen benzetim sonuçları ile kıyaslanmaktadır. Dış bozucu etki altında elde edilen model ile İHA üzerinde bulunan dönel düzenleme sahip RR ve RRR eklem yapılı yalpanın MPC denetiminin gerçekleştirilebilmesi için deneysel robot kol düzeneği kurulmaktadır. Deney düzeneğinde rüzgar ve dışarıdan uygulanan kuvvet dış bozucu olarak kullanılmaktadır. Farklı dış bozucu etkilere karşı denetlenen RR ve RRR eklem yapısına sahip aynı özellikli her iki yalpa sisteminin parametreleri ölçülmektedir. MPC ve PID denetimli sistemlerin dış bozucu altında elde edilen parametreleri ile sistemin gürbüzlük testleri yapılmaktadır.

5.1 RR EKLEM YAPISINA SAHİP ROBOT KOLUNUN PID PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Çalışmada kullanılan RR eklem yapısına sahip yalpa Şekil 5.1’de gösterilmektedir. RR eklem yapısına sahip yalpanın dinamik modeli doktora tez çalışmasının ikinci bölümünde Eşitlik (2.59) ile verilmektedir. RR eklem yapısına sahip robot kolunun eklem değişkenleri $q = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ ve tork ifadesi $\tau = [\tau_1 \ \tau_2]^T$ şeklinde gösterilmektedir. Sürtünme ve dış bozucu etkiler de dikkate alınarak robot kolunun eklem uzayındaki dinamik denklemi

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = \tau \quad (5.1)$$

ile ifade edilmektedir (Schilling 1996). Eşitlik (5.1)'de $M(q)\ddot{q}$ robot kolunun genel atalet tensörü veya kütle matrisi, $V(q, \dot{q})$ coriolis ve merkezkaç kuvvet vektörü, $F(\dot{q})$ viskoz ve dinamik sürtünme katsayılarından oluşan vektörü, $G(q)$ yerçekimi ivme vektörü ve τ_d dış bozucudur. Şekil 5.1'deki RR eklem yapısına sahip yalpanın PID denetimi takip hatası ile birlikte gerçekleştirilmektedir. Her bir eklem değişkeninin izledikleri yörüngeler ve yörünge takip hataları farklı PID kazanç katsayıları için elde edilerek kıyaslanmaktadır. RR eklem yapısına sahip yalpanın PID denetimli dinamik modeli $\dot{\varepsilon} = e$ için

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d + K_d \dot{e} + K_p e + K_i \varepsilon) + V(q, \dot{q}) + G(q) \quad (5.2)$$

olarak ifade edilmektedir. Eşitlik (5.2)'de takip hatası $e = q_d - q$ şeklinde tanımlanmakta ve q_d takip edilmesi istenilen referans yörüngeyi belirtmektedir. Takip edilmesi istenilen q_d referans yörüngesi $\theta_{1d} = g_1 \sin(2\pi t / T)$ ve $\theta_{2d} = g_2 \sin(2\pi t / T)$ ile ifade edilen bileşenlerden oluşmaktadır. Çalışmada periyot 2 sn ve $g_i = 0.1 \text{ rad} \approx 6^\circ$ olarak alınmaktadır. Kapalı döngü sistemin zaman sabiti 0.1 sn seçilerek kritik sönümleme için $K_d = \text{diag}\{k_d\}$, $K_p = \text{diag}\{k_p\}$ ve $K_i = \text{diag}\{k_i\}$ olacak şekilde

$$\omega_n = 10 \text{ için } k_p = \omega_n^2 = 100, \quad k_d = 2\omega_n = 20, \quad k_i = 400 \quad (5.3)$$

$$\omega_n = 20 \text{ için } k_p = \omega_n^2 = 400, \quad k_d = 2\omega_n = 40, \quad k_i = 400 \quad (5.4)$$

olarak belirlenmektedir.



Şekil 5.1 RR eklem yapısına sahip yalpa.

Şekil 5.1’de gösterilen RR eklem yapısına sahip yalpa sistemine $F(q, \dot{q}) = F_v \dot{q} + K_d \text{sgn}(\dot{q})$ formunda bir viskoz ve dinamik sürtünme terimi dış bozucu etki olarak ilave edilmektedir. Ayrıca, $v_i = 0.1$ ve $k_i = 0.1$ olarak alınmaktadır. Viskoz ve dinamik sürtünme terimi

$$F_v = \text{diag}\{v_i\} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}; K_d = \text{diag}\{k_i\} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$F(q, \dot{q}) = F_v \dot{q} + K_d \text{sgn}(\dot{q}) \quad (5.6)$$

$$F(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{\theta}_1) \\ \text{sgn}(\dot{\theta}_2) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

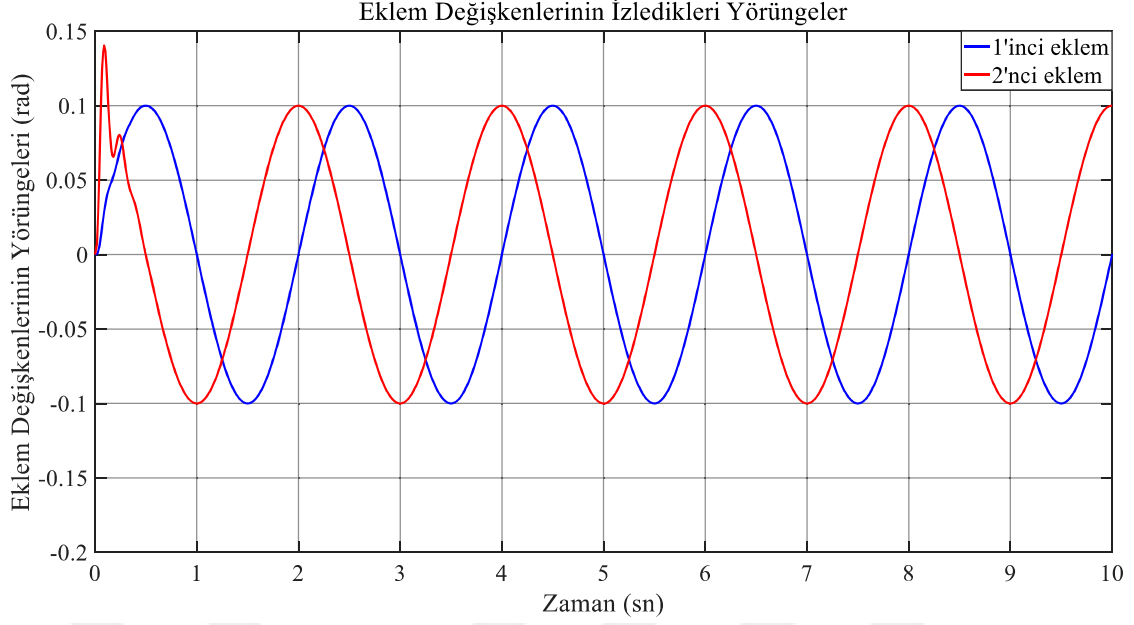
$$F_1 = 0.1\dot{\theta}_1 + 0.1\text{sgn}(\dot{\theta}_1) \quad (5.8)$$

$$F_2 = 0.1\dot{\theta}_2 + 0.1\text{sgn}(\dot{\theta}_2) \quad (5.9)$$

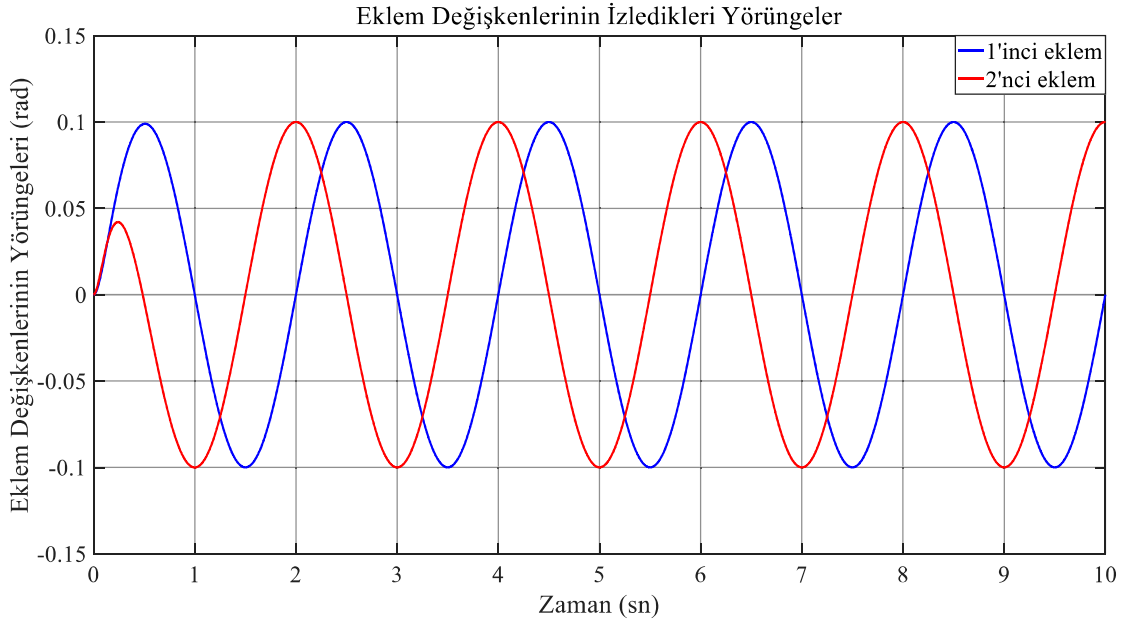
elde edilmektedir. Şekil 5.1’de gösterilen RR eklem yapısına sahip yalpanın viskoz ve dinamik sürtünme gibi dış bozucu etki altında performansının belirlenmesi amacıyla $\omega_n = 10$ ve $\omega_n = 20$ kritik sönüm frekanslarındaki PID denetimi için her bir eklem değişkeninin izledikleri yörüngeler ve yörünge takip hataları belirlenmektedir.

RR eklem yapısına sahip yalpanın dinamik sürtünme ve dış bozucu etki altında her bir eklemının yörünge takip hatalarının daha kısa sürede 0’a yaklaşmasında kritik sönüm frekansının etkisi incelenmektedir. Ayrıca, RR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin izledikleri yörüngeler incelenmekte ve sürtünme belirsizliğinin olduğu durumda denetleyici performansı Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 yardımıyla belirlenmektedir. Sistem kararlılığına yönelik olarak uygulanan Routh testinin sonuçları kullanılarak $k_i < k_p k_d$ koşulu sağlanmaktadır.

Şekil 5.1’de gösterilen RR eklem yapısına sahip yalpanın $\omega_n = 10$ ve $\omega_n = 20$ kritik sönüm frekanslarındaki PID katsayıları için her bir eklem değişkeninin izledikleri yörüngeler sırasıyla Şekil 5.2 ve 5.3’te gösterilmektedir.

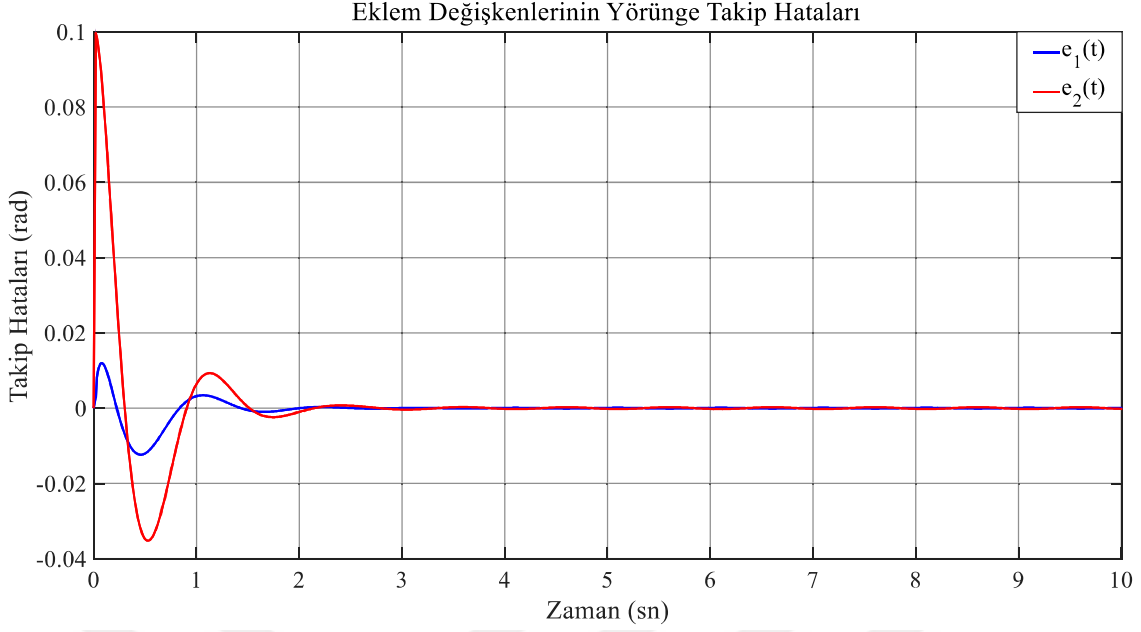


Şekil 5.2 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın θ_1 ve θ_2 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 10$).



Şekil 5.3 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın θ_1 ve θ_2 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 20$).

Şekil 5.1’de gösterilen RR eklem yapısına sahip yalpanın $\omega_n = 10$ ve $\omega_n = 20$ kritik sönüm frekanslarındaki PID katsayıları için her bir eklem değişkeninin yörünge takip hataları sırasıyla Şekil 5.4 ve 5.5’te verilmektedir.



Şekil 5.4 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$ ve $e_2(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 10$).



Şekil 5.5 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$ ve $e_2(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 20$).

Şekil 5.1’de gösterilen RR eklem yapısına sahip yalpanın farklı PID kazanç katsayıları için her bir eklem değişkeninin izledikleri yörüngeler ve yörünge takip hataları elde edilerek kıyaslanmaktadır. İntegral teriminin kritik sönüm frekansı ile ilişkisi $k_i = 400$ seçilerek $\omega_n = 10$

ve $\omega_n = 20$ kritik sönüm frekansları için ortaya konulmaktadır. RR eklem yapısına sahip yalpanın her bir eklem değişkeninin izledikleri yörünge takip hatalarının kritik sönüm frekans değerinin artırılmasıyla daha kısa sürede 0'a yakınsadığı, yakınsama süresinin kritik sönümleme frekans değerinin artırılarak iyileştirildiği Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te görülmektedir.

5.2 RRR EKLEM YAPISINA SAHİP ROBOT KOLUNUN PID PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Çalışmada kullanılan RRR eklem yapısına sahip yalpa Şekil 5.6'da gösterilmektedir. RRR eklem yapısına sahip yalpanın dinamik modeli doktora tez çalışmasının ikinci bölümünde Eşitlik (2.81) ile verilmektedir. RRR eklem yapısına sahip robot kolunun eklem değişkenleri $q = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ ve tork ifadesi $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ şeklinde gösterilmektedir. Sürtünme ve dış bozucu etkiler de dikkate alınarak robot kolunun eklem uzayındaki dinamik denklemi Eşitlik (5.1) ile ifade edilmektedir. Eşitlik (5.1)'de $M(q)\ddot{q}$ robot kolunun genel atalet tensörü veya kütle matrisi, $V(q, \dot{q})$ coriolis ve merkezkaç kuvvet vektörü, $F(\dot{q})$ viskoz ve dinamik sürtünme katsayılarından oluşan vektörü, $G(q)$ yerçekimi ivme vektörü ve τ_d dış bozucudur. Şekil 5.6'daki RRR eklem yapısına sahip yalpanın PID denetimi takip hatası ile birlikte gerçekleştirilmektedir. Her bir eklem değişkeninin izledikleri yörüngeler ve yörünge takip hataları farklı PID kazanç katsayıları için elde edilerek kıyaslanmaktadır. RRR eklem yapısına sahip yalpanın PID denetimli dinamik modeli $\dot{\varepsilon} = e$ için Eşitlik (5.2) ile ifade edilmektedir. Eşitlik (5.2)'de takip hatası $e = q_d - q$ şeklinde tanımlanmakta ve q_d takip edilmesi istenilen referans yörüngeyi belirtmektedir. Takip edilmesi istenilen q_d referans yörüngesi Eşitlik (5.10) ile ifade edilen bileşenlerden oluşmaktadır. Çalışmada periyot 3 sn ve $g_i = 0.1 \text{ rad} \approx 6^\circ$ olarak alınmaktadır. Kapalı döngü sistemin zaman sabiti 0.1 sn seçilerek kritik sönümleme için $K_d = \text{diag}\{k_d\}$, $K_p = \text{diag}\{k_p\}$ ve $K_i = \text{diag}\{k_i\}$ olacak şekilde

$$\theta_{1d} = 10 \sin 2t \quad \theta_{2d} = |\sin 2t| \quad \theta_{3d} = 5 \cos 2t \quad (5.10)$$

$$\omega_n = 10 \text{ için } k_p = \omega_n^2 = 100, \quad k_d = 2\omega_n = 20, \quad k_i = 400 \quad (5.11)$$

$$\omega_n = 20 \text{ için } k_p = \omega_n^2 = 400, \quad k_d = 2\omega_n = 40, \quad k_i = 400 \quad (5.12)$$

olarak belirlenmektedir.



Şekil 5.6 RRR eklem yapısına sahip yalpa.

Şekil 5.6'da gösterilen RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemine $F(q, \dot{q}) = F_v \dot{q} + K_d \text{sgn}(\dot{q})$ formunda bir viskoz ve dinamik sürtünme terimi dış bozucu etki olarak ilave edilmektedir. Ayrıca, $v_i = 0.1$ ve $k_i = 0.1$ olarak alınmaktadır. Viskoz ve dinamik sürtünme terimi

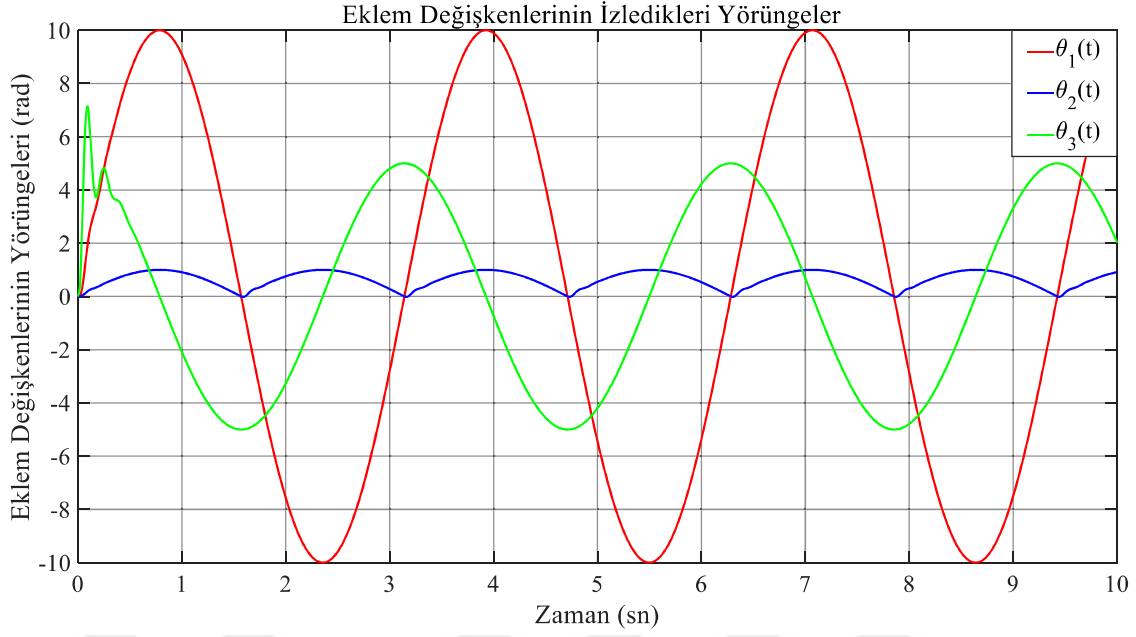
$$F_v = \text{diag}\{v_i\} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}; K_d = \text{diag}\{k_i\} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$$F(q, \dot{q}) = F_v \dot{q} + K_d \text{sgn}(\dot{q}) \quad (5.14)$$

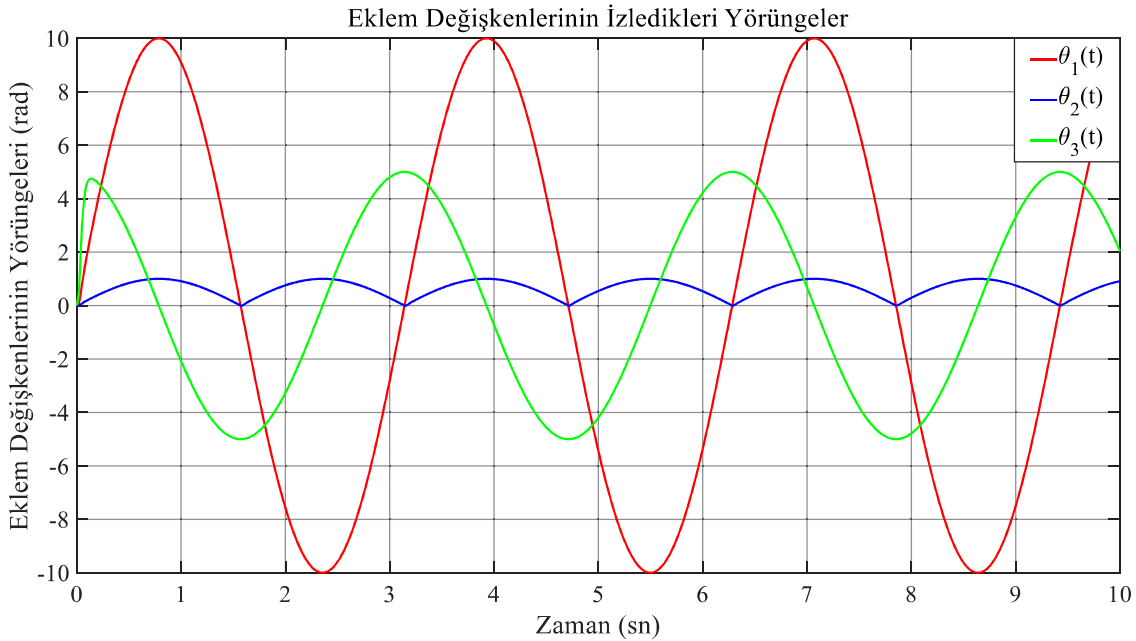
$$F(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{\theta}_1) \\ \text{sgn}(\dot{\theta}_2) \\ \text{sgn}(\dot{\theta}_3) \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

$$F_1 = 0.1\dot{\theta}_1 + 0.1\text{sgn}(\dot{\theta}_1) \quad F_2 = 0.1\dot{\theta}_2 + 0.1\text{sgn}(\dot{\theta}_2) \quad F_3 = 0.1\dot{\theta}_3 + 0.1\text{sgn}(\dot{\theta}_3) \quad (5.16)$$

elde edilmektedir. Şekil 5.6'da gösterilen RRR eklem yapısına sahip yalpanın $\omega_n = 10$ ve $\omega_n = 20$ kritik sönüm frekanslarındaki PID katsayıları için her bir eklem değişkeninin izledikleri yörüngeler sırasıyla Şekil 5.7 ve 5.8'de gösterilmektedir.



Şekil 5.7 PID denetimli RRR eklem yapılı yalpanın θ_1 , θ_2 ve θ_3 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 10$).



Şekil 5.8 PID denetimli RRR eklem yapılı yalpanın θ_1 , θ_2 ve θ_3 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 20$).

Şekil 5.6'da gösterilen RRR eklem yapısına sahip yalpanın $\omega_n = 10$ ve $\omega_n = 20$ kritik sönüm frekanslarındaki PID katsayıları için her bir eklem değişkeninin yörünge takip hataları sırasıyla Şekil 5.9 ve 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.9 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$, $e_2(t)$ ve $e_3(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 10$).



Şekil 5.10 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$, $e_2(t)$ ve $e_3(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 20$).

Şekil 5.6'da gösterilen RRR eklem yapısına sahip yalpanın farklı PID kazanç katsayıları için her bir eklem değişkeninin izledikleri yörüngeler ve yörünge takip hataları elde edilerek kıyaslanmaktadır. İntegral teriminin kritik sönüm frekansı ile ilişkisi $k_i = 400$ seçilerek $\omega_n = 10$

ve $\omega_n = 20$ kritik sönüm frekansları için ortaya konulmaktadır. RRR eklem yapısına sahip yalpanın her bir eklem değişkeninin izledikleri yörünge takip hatalarının kritik sönüm frekans değerinin artırılmasıyla daha kısa sürede 0'a yakınsadığı, yakınsama süresinin kritik sönümleme frekans değerinin artırılarak iyileştirildiği Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da görülmektedir.

5.3 RPR EKLEM YAPISINA SAHİP ROBOT KOLONUN PID PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Çalışmada kullanılan RPR eklem yapısına sahip yalpa Şekil 2.5'te gösterilmektedir. RPR eklem yapısına sahip yalpanın dinamik modeli doktora tez çalışmasının ikinci bölümünde Eşitlik (2.108), (2.109) ve (2.110) ile verilmektedir. RPR eklem yapısına sahip robot kolunun eklem değişkenleri $q = [\theta_1 \quad d_2 \quad \theta_3]^T$ ve tork ifadesi $\tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T$ şeklinde gösterilmektedir. Sürtünme ve dış bozucu etkiler de dikkate alınarak robot kolunun eklem uzayındaki dinamik denklemleri Eşitlik (5.1) ile ifade edilmektedir. Şekil 2.5'teki RPR eklem yapısına sahip yalpanın PID denetimi takip hatası ile birlikte gerçekleştirilmektedir. Her bir eklem değişkeninin izledikleri yörüngeler ve yörünge takip hataları farklı PID kazanç katsayıları için elde edilerek kıyaslanmaktadır. RPR eklem yapısına sahip yalpanın PID denetimli dinamik modeli $\dot{e} = e$ için Eşitlik (5.2) ile ifade edilmektedir. Eşitlik (5.2)'de takip hatası $e = q_d - q$ şeklinde tanımlanmakta ve q_d takip edilmesi istenilen referans yörüngeyi belirtmektedir. Takip edilmesi istenilen q_d referans yörüngesi Eşitlik (5.10) ile ifade edilen bileşenlerden oluşmaktadır. Çalışmada periyot 3 sn ve $g_i = 0.1 \text{ rad} \approx 6^\circ$ olarak alınmaktadır. Kapalı döngü sistemin zaman sabiti 0.1 sn seçilerek kritik sönümleme için $K_d = \text{diag}\{k_d\}$, $K_p = \text{diag}\{k_p\}$ ve $K_i = \text{diag}\{k_i\}$ olacak şekilde

$$\omega_n = 10 \text{ için } k_p = \omega_n^2 = 100, \quad k_d = 2\omega_n = 20, \quad k_i = 400 \quad (5.17)$$

$$\omega_n = 20 \text{ için } k_p = \omega_n^2 = 400, \quad k_d = 2\omega_n = 40, \quad k_i = 400 \quad (5.18)$$

olarak belirlenmektedir. Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip yalpa sistemine $F(q, \dot{q}) = F_v \dot{q} + K_d \text{sgn}(\dot{q})$ formunda bir viskoz ve dinamik sürtünme terimi dış bozucu etki olarak ilave edilmektedir. Ayrıca, $v_i = 0.1$ ve $k_i = 0.1$ olarak alınmaktadır. Viskoz ve dinamik sürtünme terimi

$$F_v = \text{diag}\{v_i\} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}; K_d = \text{diag}\{k_i\} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

$$F(q, \dot{q}) = F_v \dot{q} + K_d \text{sgn}(\dot{q}) \quad (5.20)$$

$$F(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{\theta}_1) \\ \text{sgn}(\dot{\theta}_2) \\ \text{sgn}(\dot{\theta}_3) \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

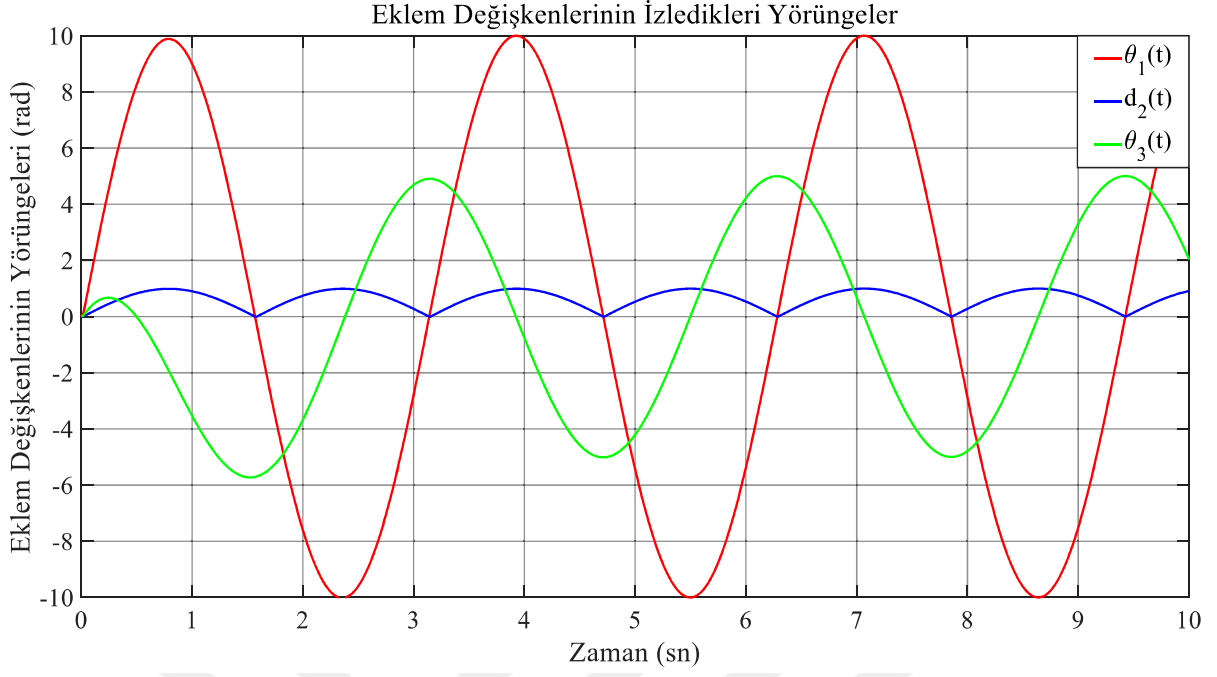
$$F_1 = 0.1\dot{\theta}_1 + 0.1\text{sgn}(\dot{\theta}_1) \quad (5.22)$$

$$F_2 = 0.1\dot{\theta}_2 + 0.1\text{sgn}(\dot{\theta}_2) \quad (5.23)$$

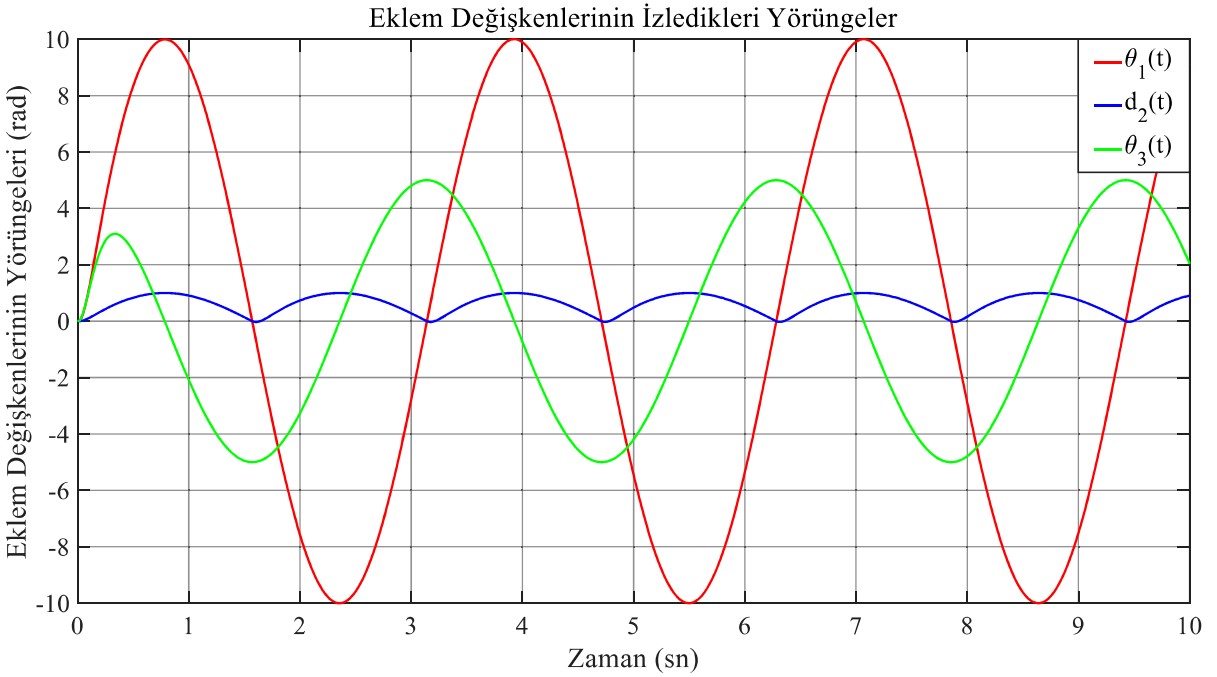
$$F_3 = 0.1\dot{\theta}_3 + 0.1\text{sgn}(\dot{\theta}_3) \quad (5.24)$$

elde edilmektedir. Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip yalpanın $\omega_n = 10$ ve $\omega_n = 20$ kritik sönüm frekanslarındaki PID katsayıları için her bir eklem değişkeninin izledikleri yörüngeler sırasıyla Şekil 5.11 ve 5.12'de, yörünge takip hataları ise sırasıyla Şekil 5.13 ve 5.14'te gösterilmektedir.

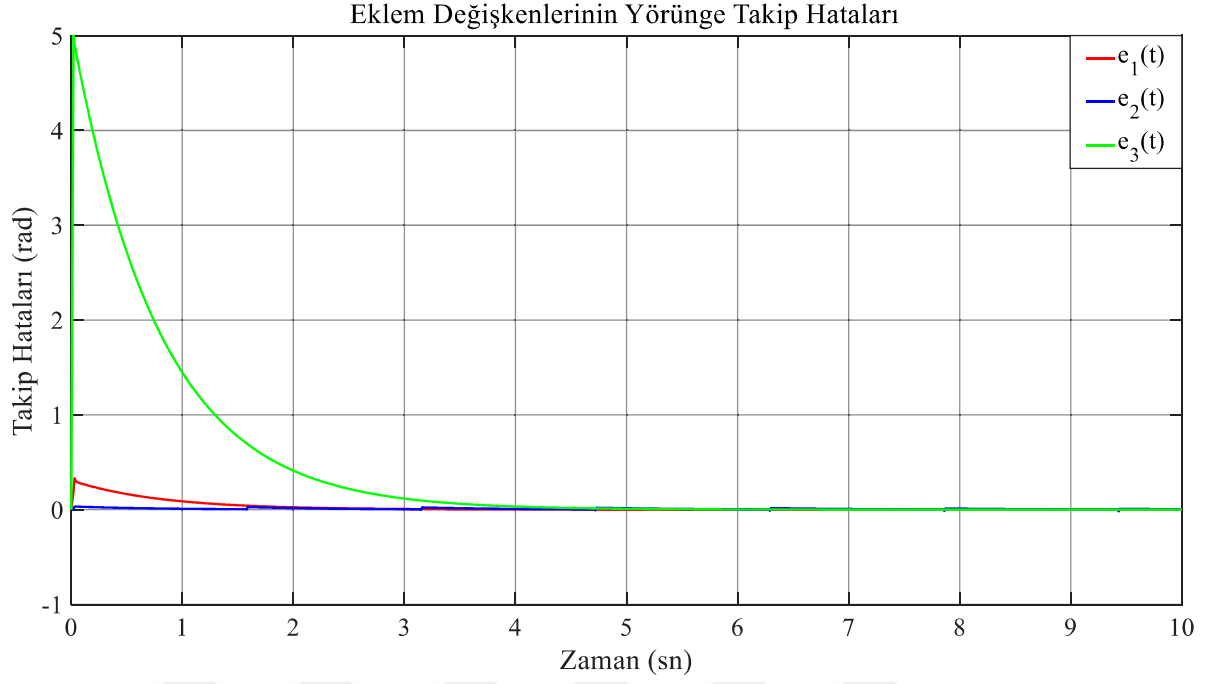
Şekil 2.5'te gösterilen RPR eklem yapısına sahip yalpanın farklı PID kazanç katsayıları için her bir eklem değişkeninin izledikleri yörüngeler ve yörünge takip hataları elde edilerek kıyaslanmaktadır. İntegral teriminin kritik sönüm frekansı ile ilişkisi $k_i = 400$ seçilerek $\omega_n = 10$ ve $\omega_n = 20$ kritik sönüm frekansları için ortaya konulmaktadır. RPR eklem yapısına sahip yalpanın her bir eklem değişkeninin izledikleri yörünge takip hatalarının kritik sönüm frekans değerinin artırılmasıyla daha kısa sürede 0'a yakınsadığı, yakınsama süresinin kritik sönümleme frekans değerinin artırılarak iyileştirildiği Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te görülmektedir.



Şekil 5.11 PID denetimli RPR eklem yapılı yalpanın θ_1 , d_2 ve θ_3 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 10$).



Şekil 5.12 PID denetimli RPR eklem yapılı yalpanın θ_1 , d_2 ve θ_3 eklem değişkenlerinin izlediği yörüngeler ($\omega_n = 20$).



Şekil 5.13 PID denetimli RPR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$, $e_2(t)$ ve $e_3(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 10$).



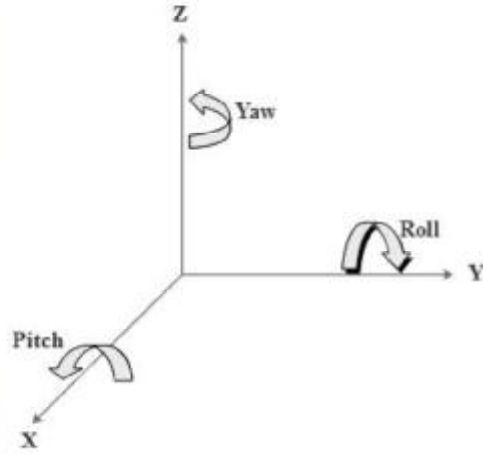
Şekil 5.14 PID denetimli RPR eklem yapısına sahip yalpanın eklem değişkenlerinin $e_1(t)$, $e_2(t)$ ve $e_3(t)$ yörünge takip hataları ($\omega_n = 20$).

5.4 RR VE RRR EKLEM YAPSINA SAHİP ROBOT KOLU PID VE MPC DENETİMİ

Doktora tez çalışmasında, Şekil 5.1’de gösterilen ve bağ uzunlukları birinci ve ikinci eklem için sırasıyla 30 mm ve 35 mm, kütle ağırlıkları 1 ve 2’nci eklem için sırasıyla 25 g ve 155 g olan RR eklem yapısına sahip yalpanın sıfır konumundan başlayarak 10 saniyelik süre içerisinde birinci eklemi 360 derece, uç işlevcisinin bulunduğu ikinci eklemi 20 derece hareket ettirilerek benzetimi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, Şekil 5.15 (a)’da gösterilen RRR eklem yapısına sahip yalpanın eklemleri sıfır konumundan başlamak suretiyle 10 saniyelik süre içerisinde sırasıyla, birinci eklem 360 derece, ikinci eklem 180 derece ve üçüncü eklem 20 derece hareket ettirilerek benzetimi yapılmaktadır. Benzetimde kullanılan yalpanın bağ uzunlukları birinci, ikinci ve üçüncü eklem için sırasıyla 30 mm, 25 mm ve 35 mm olup kütle ağırlıkları birinci, ikinci ve üçüncü eklem için sırasıyla 25 g, 30 g ve 155 g olarak belirlenmektedir.



(a)

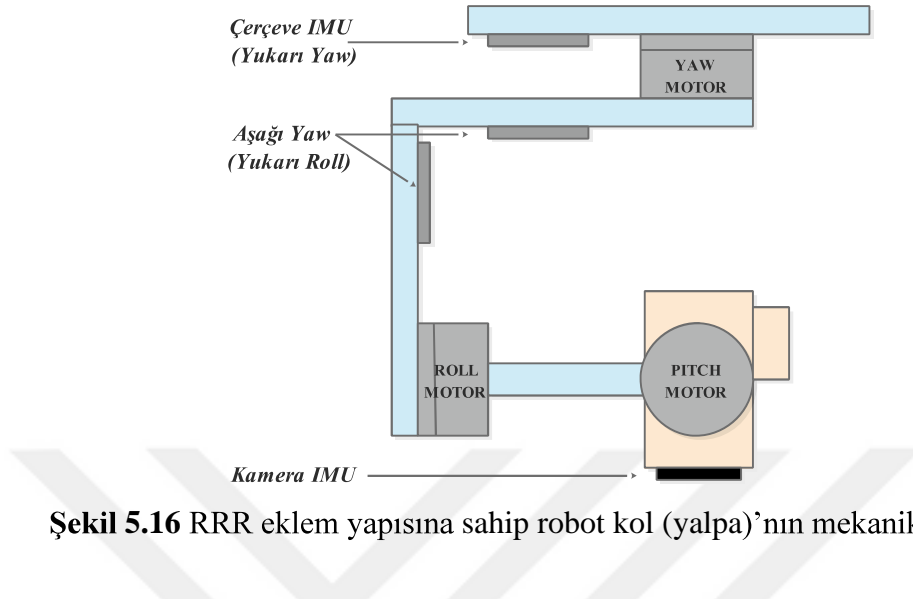


(b)

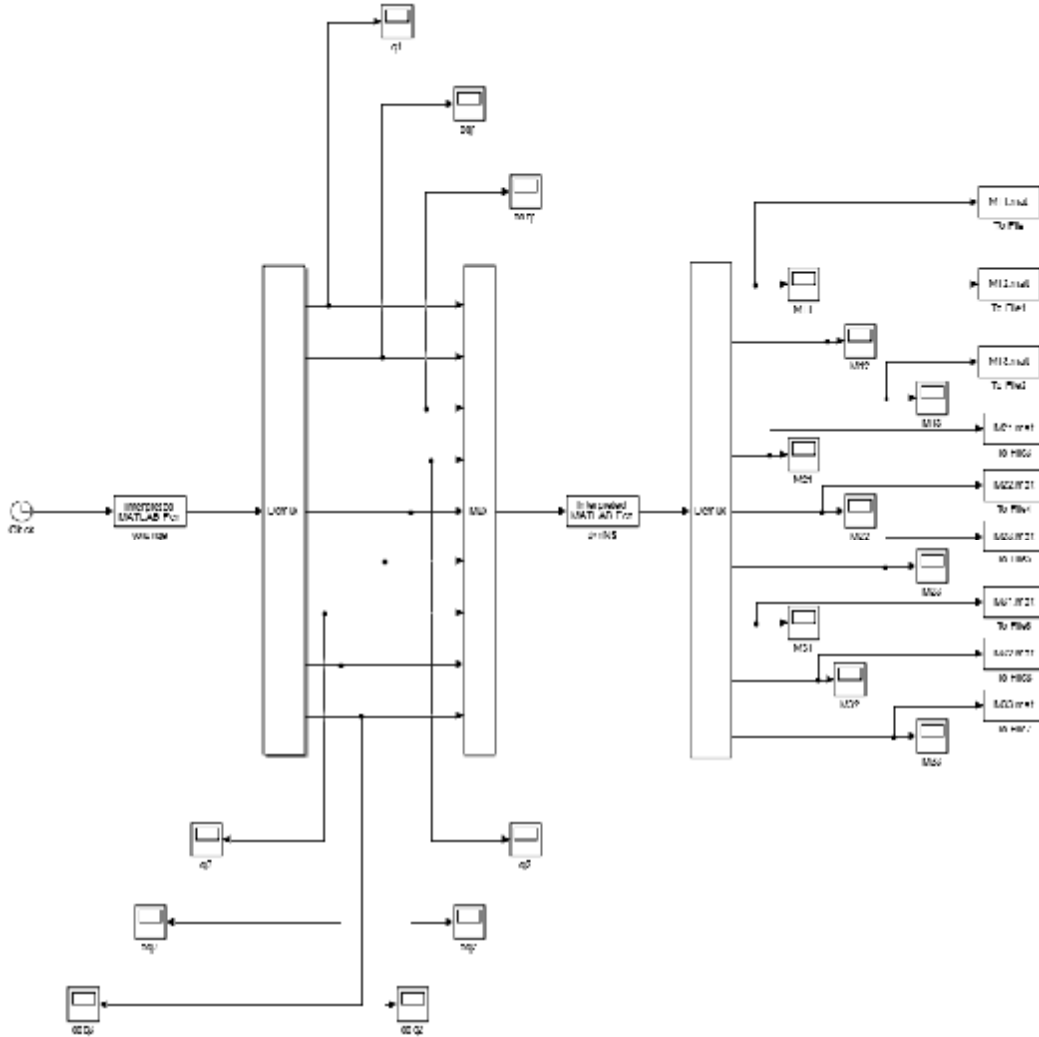
Şekil 5.15 RRR eklem yapısına sahip (a) yalpa ve (b) yalpanın açı hareketi.

RRR eklem yapısına sahip yalpanın açı hareketi Şekil 5.15 (b)’de verilmektedir. Yalpanın birinci eklemi sapma, ikinci eklemi yatış ve üçüncü eklemi ise yunuslama hareketini gerçekleştirmektedir. RRR eklem yapısına sahip yalpanın eklemlerinde bulunan motorların açı hareketi Şekil 5.16 ile gösterilmektedir. Çalışmada kullanılan kamera RR ve RRR eklem yapısına sahip yalparın yunuslama hareketini gerçekleştiren uç işlevcisine monte edilmiştir. RR eklem yapısına sahip yalpada kameranın monte edildiği yunuslama eksenine sapma eksenine açısal hız ve doğrusal ivme verisini ölçen, ivme ölçer ve jiroskoptan oluşan atalet ölçüm ünitesi (Inertial Measurement Unit-IMU) yerleştirilmiştir. Benzer şekilde, RRR eklem yapısına sahip yalpada kameranın bulunduğu yunuslama eksenine sapma ve yatış eksenlerine

açısal hız ve doğrusal ivme değerlerinin anlık olarak ölçülebilmesi için eksenlere paralel şekilde IMU monte edilmiştir.



Şekil 5.16 RRR eklem yapısına sahip robot kol (yalpa)'nın mekanik yapısı.



Şekil 5.17 RRR eklem yapısına sahip yalpanın dinamik benzetimi.

Her bir eklemdeki açısal hız ve doğrusal ivme eklemlerin bulunduğu eksenlere paralel şekilde yerleştirilen IMU yardımıyla anlık olarak ölçülmektedir. Hedef takibi için İHA üzerinde bulunan RRR eklem yapısına sahip yalpanın Şekil 5.15'te gösterilen dinamik denklemlerinden atalet matrisinin her bir elemanının matematiksel ifadesi elde edilmekte ve elde edilen atalet matrisinin her bir elemanının zamana göre değişimi Şekil 5.17'de MATLAB/Simulink benzetimi ile gösterilmektedir.

Problem tanımında yer alan doğru akım motoru değişkenleri ve besleme oranları

$$K_m = 0.809 N - m / amp$$

$$J_m = 0.006 kg - m^2$$

$$R_a = 7.5 \Omega$$

$$K_b = 0.809$$

alınmakta ve tork ifadesi

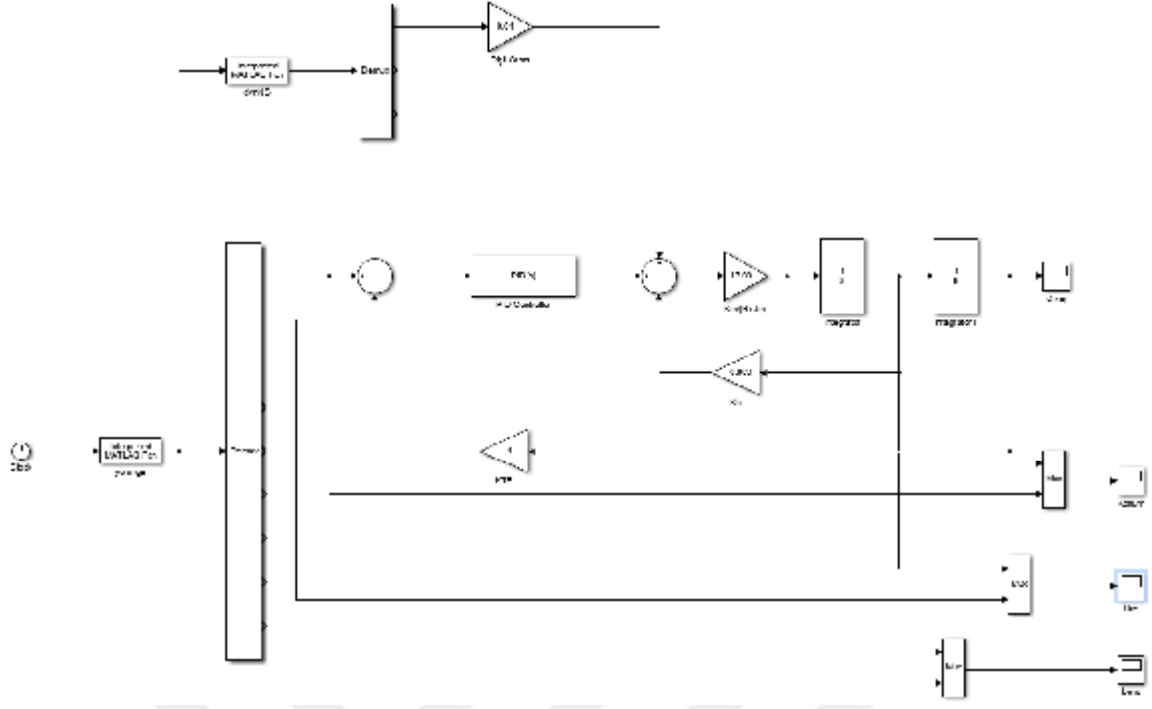
$$\tau = \frac{J_m R_a}{K_m K_b} = \frac{0.006 * 7.5}{0.809 * 0.809} = 0.0687 Nm \quad (5.25)$$

olarak belirlenmektedir. Açık çevrim transfer fonksiyonu $\tau_i = 0.1$ ve $\tau_d = 1$ alınarak

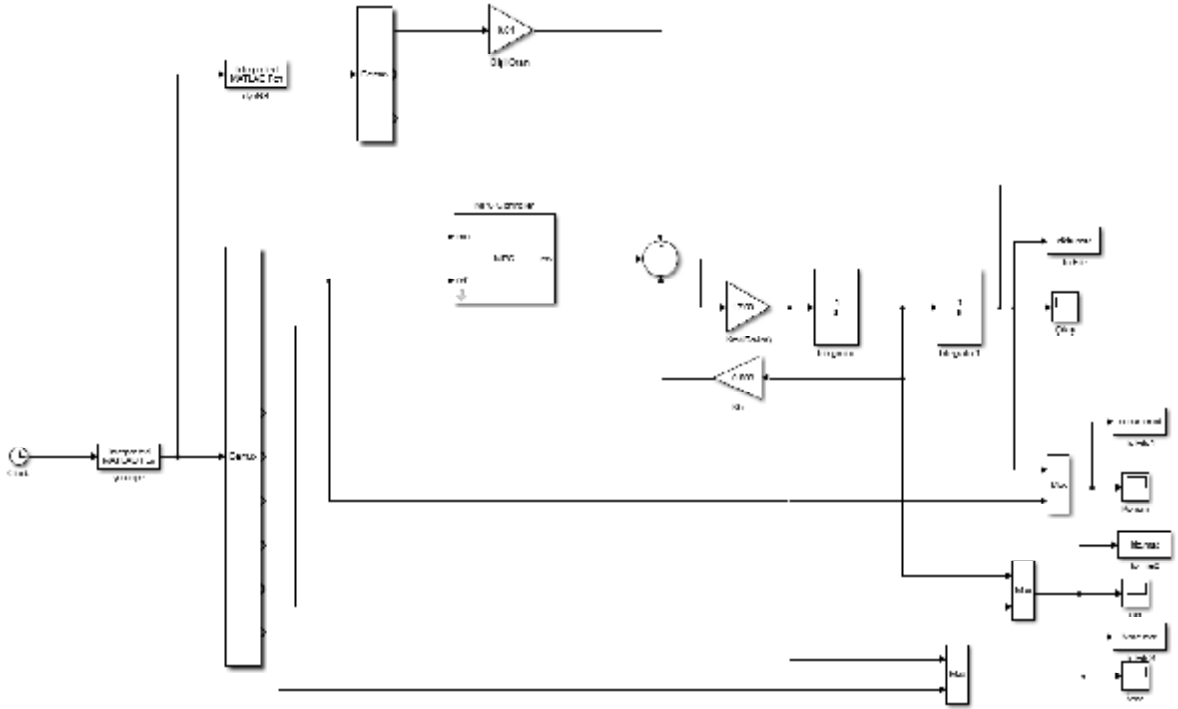
$$D(s)G(s) = \frac{(\frac{K_p}{\tau_i K_b})(\tau_i s + 1)(\tau_d s + 1)}{s^2(\tau_m s + 1)} = \frac{(\frac{K_p}{\tau_i * 0.809})(\tau_i s + 1)(\tau_d s + 1)}{s^2(0.0687s + 1)} \quad (5.26)$$

olarak elde edilmektedir.

RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın MATLAB/Simulink ortamında PID denetim düzeneği Şekil 5.18'de ve MPC denetim düzeneği Şekil 5.19'da gösterilmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın PID denetimi için, her bir yalpanın dinamik benzetimleri "Durum 1" ve "Durum 2" şeklinde MATLAB fonkiyon dosyası içerisine gömülmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın MPC denetimi için deneysel verilerden elde edilen Hammerstein sistem modeli MATLAB fonksiyon dosyası içerisine gömülmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanların en iyi PID denetimi için denetleyici katsayıları belirlenmektedir. İHA üzerine monte edilen RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanların MATLAB/Simulink ortamında PID ve $N_c = 5$, $N_p = 10$ alınarak MPC denetimi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.18 RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın PID denetim benzetimi.

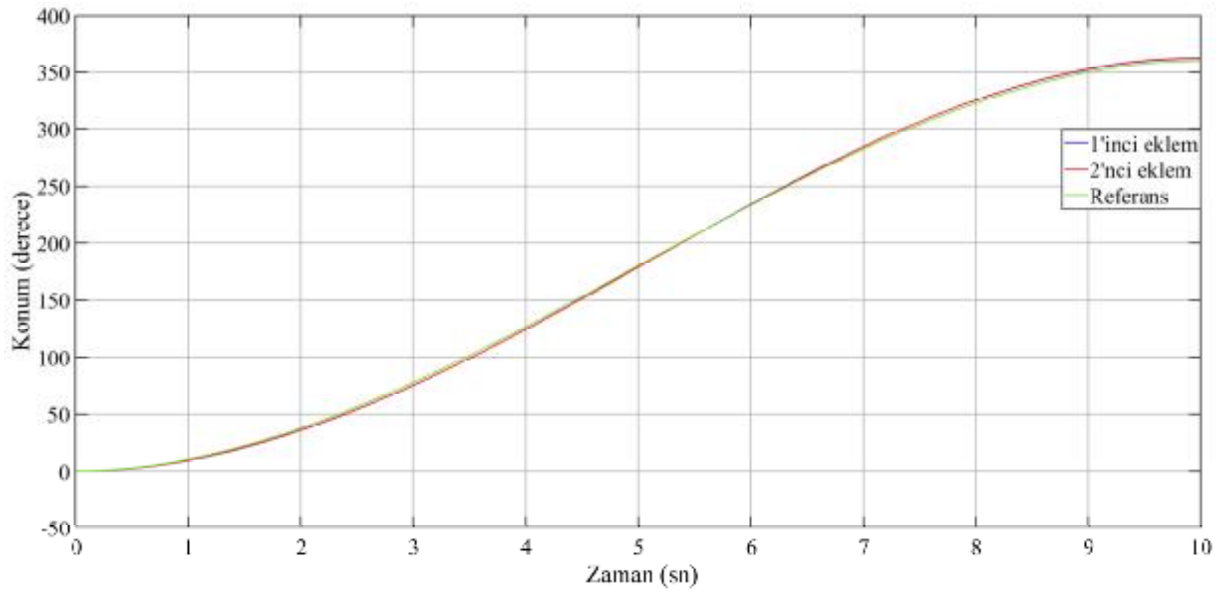


Şekil 5.19 RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın MPC denetim benzetimi.

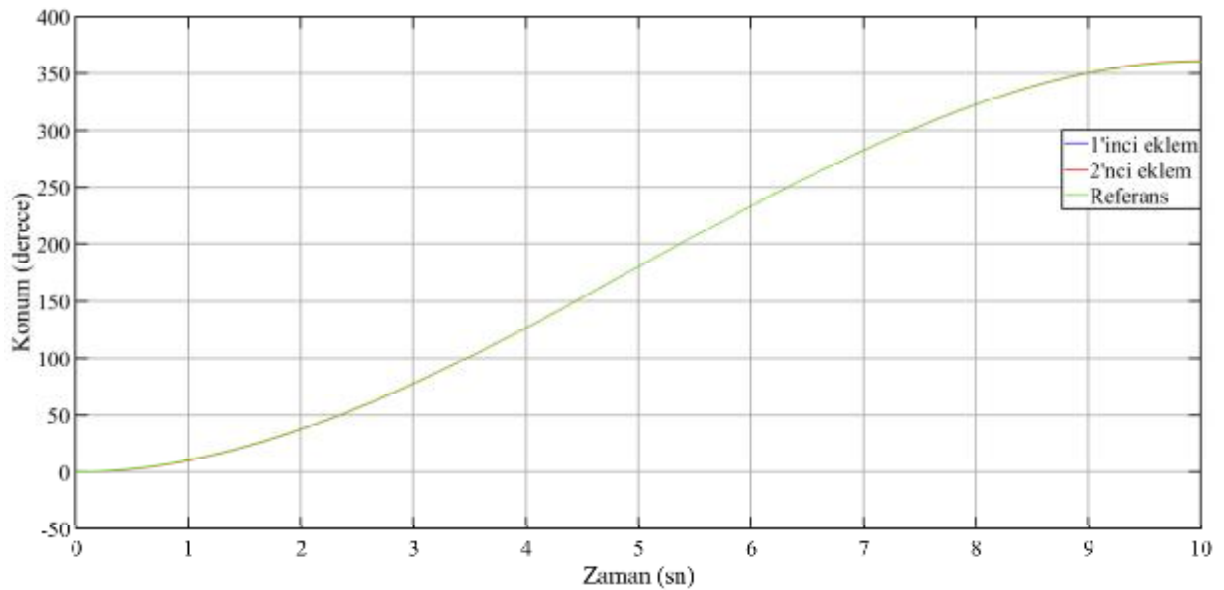
Dış bozucu olmadığı ve dış bozucu olduğu durumda RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanların hem en iyi PID hem de MPC denetimi için konum, hız ve ivme grafikleri elde edilmekte ve kıyaslanmaktadır.

5.4.1 RR ve RRR Eklem Yapısına Sahip Yalpanın Dış Bozucu Olmadığı Durumda PID ve MPC Denetimi

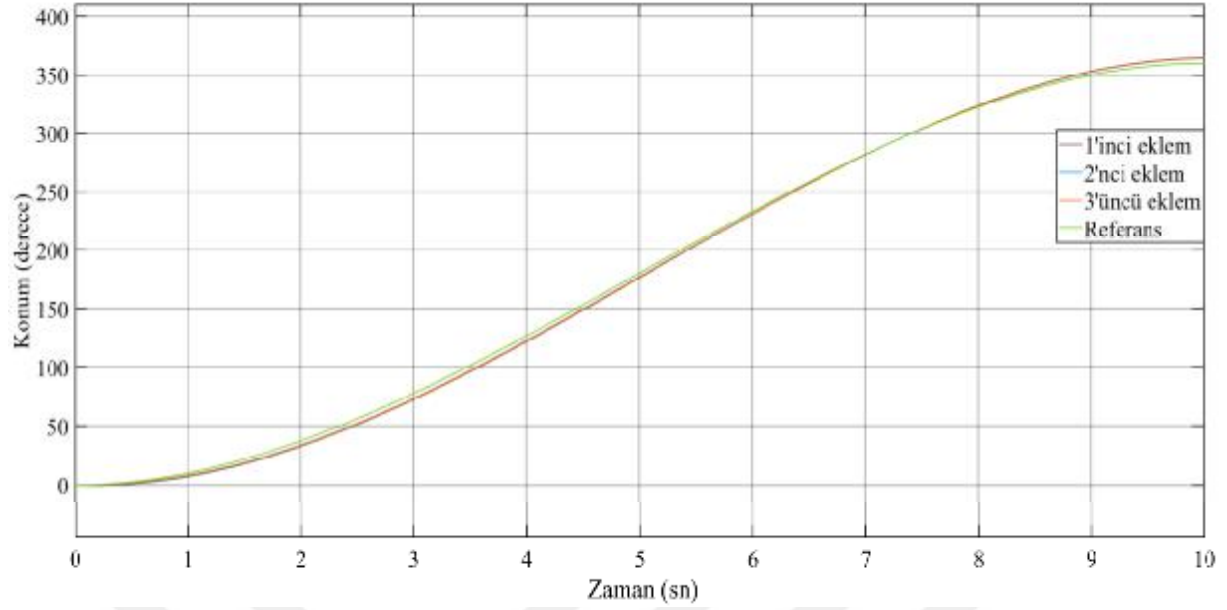
Çalışmada, İHA üzerindeki RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanların eklemelerinin daha önceden belirlenen rota üzerinden tanımlanan konuma tasarım kriterleri içerisinde ulaşip ulaşmadıkları test edilmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanların dış bozucu olmadığı durumdaki konum grafikleri Şekil 5.20-5.23'te sunulmaktadır.



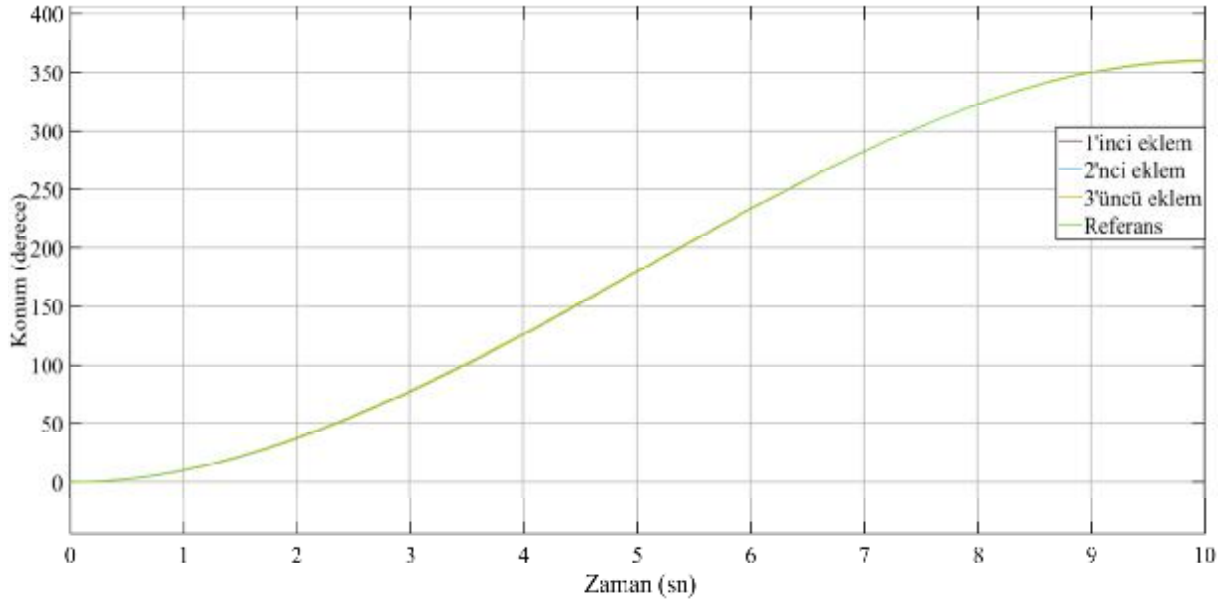
Şekil 5.20 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın konum değişimi.



Şekil 5.21 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın konum değişimi.



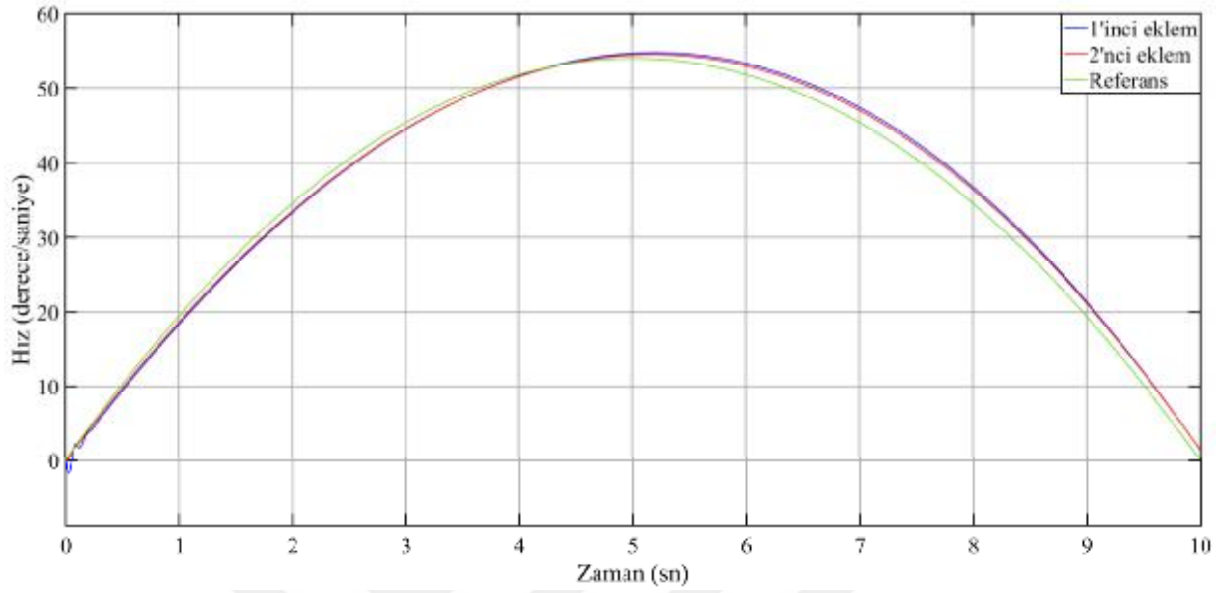
Şekil 5.22 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın konum değişimi.



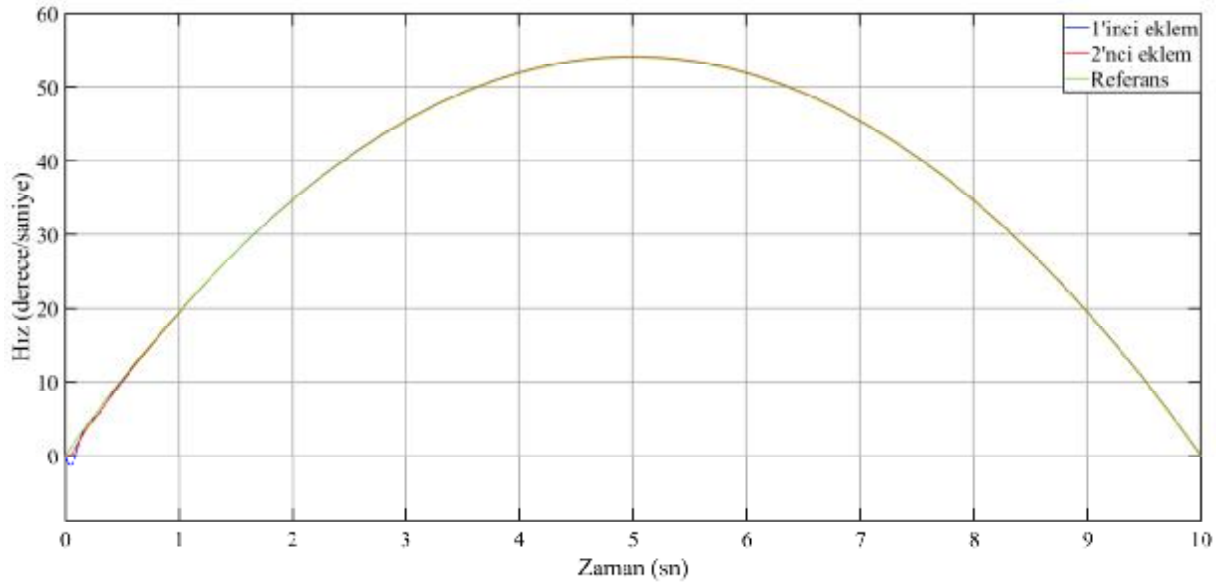
Şekil 5.23 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın konum değişimi.

RR ve RRR eklem yapısına sahip yalparların tüm eklemlerinin daha önceden belirlenen rota üzerinden tanımlanan konuma tasarım kriterleri içerisinde ulaştıkları görülmektedir. MPC denetimli RR ve RRR eklem yapısına sahip yalparların eklem değişkenlerinin en iyi PID denetimli RR ve RRR eklem yapısına sahip yalparların eklem değişkenlerine göre referans yörüngeyi daha az hata ile takip ettiği Şekil 5.21 ve Şekil 5.23'te görülmektedir.

RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanların dış bozucu olmadığı durumdaki hız grafikleri Şekil 5.24-5.27’de sunulmaktadır.

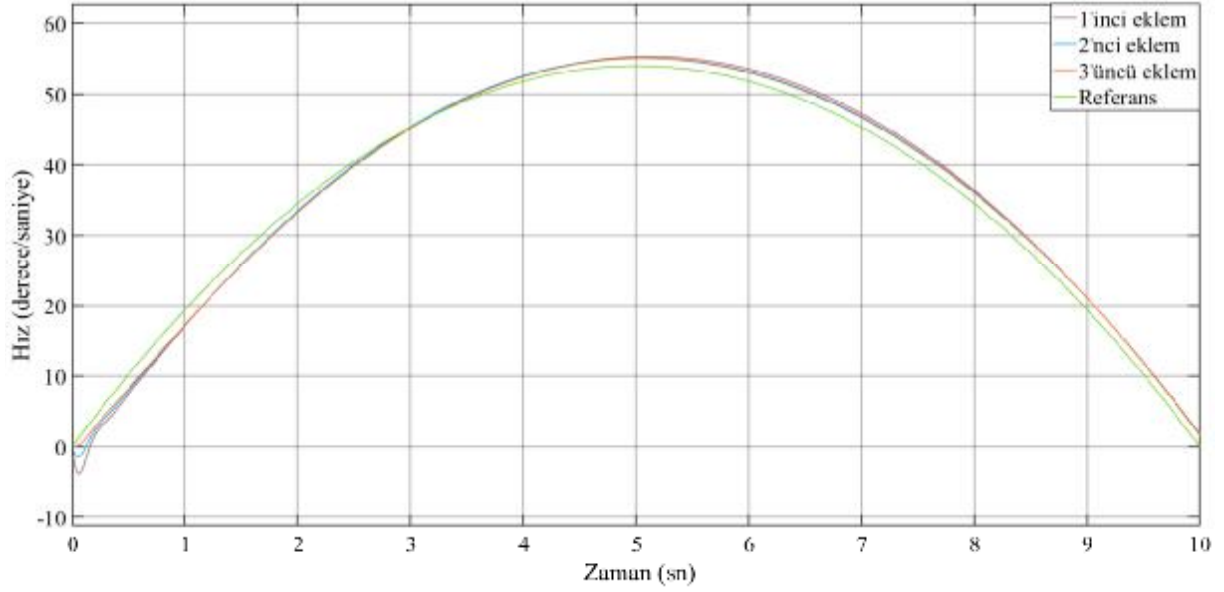


Şekil 5.24 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın hız değişimi.

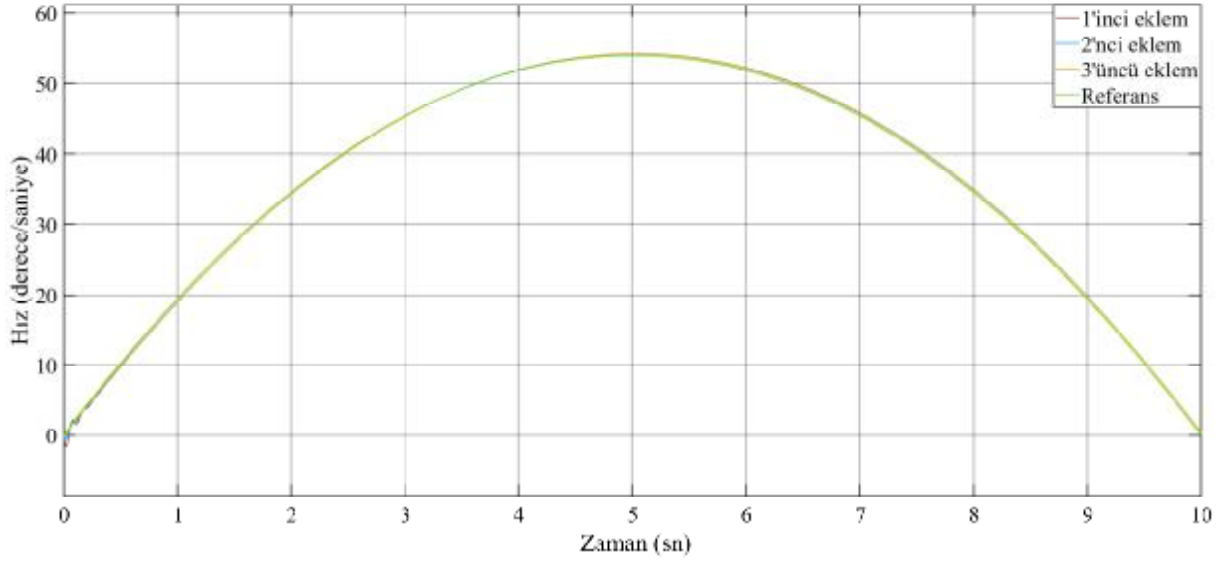


Şekil 5.25 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın hız değişimi.

Belirlenen rota üzerinden tanımlanan konuma ulaşmada, PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın eklem hızlarının MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın eklem hızlarına göre daha büyük hata ile referans yörüngeyi takip ettiği Şekil 5.24 ve Şekil 5.25’te görülmektedir.



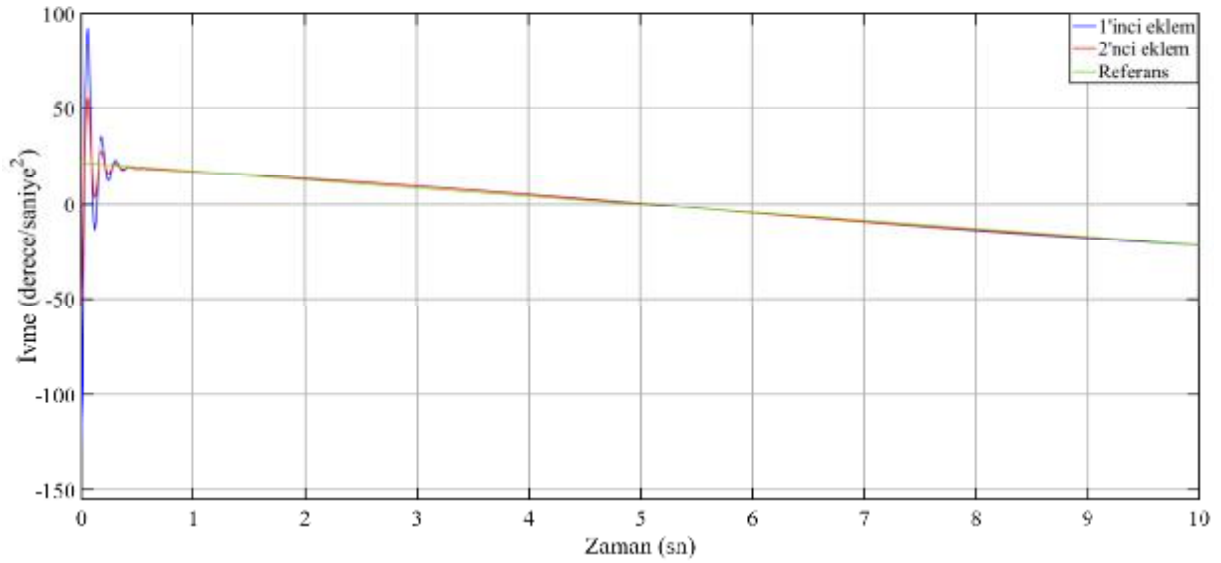
Şekil 5.26 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın hız değişimi.



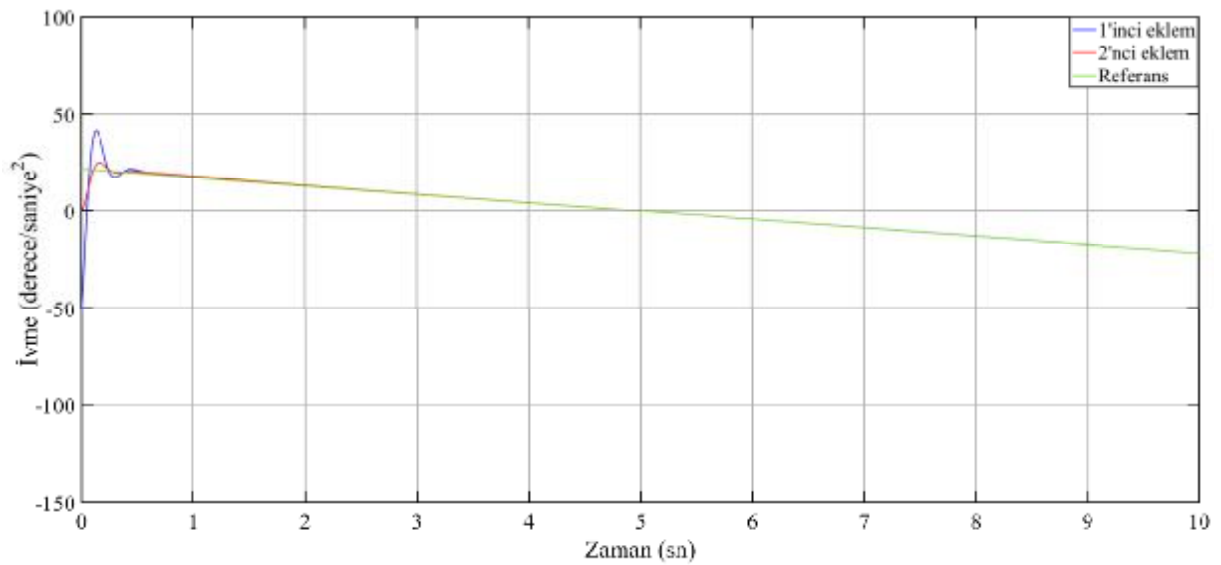
Şekil 5.27 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın hız değişimi.

Belirlenen rota üzerinden tanımlanan konuma ulaşmada, PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın başlangıçta eklem hızlarındaki hata dikkat çekmektedir. PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın eklem hız hataları, PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın eklem hız hataları ile kıyaslanmaktadır. Dönel eklem ilave edilmesiyle dinamik denklemleri RR eklem yapılı yalpaya göre daha karmaşık hale gelen RRR eklem yapılı yalpanın etkin denetimine klasik denetim yöntemlerinin maksimum başarımla cevap veremediği Şekil

5.24 ile Şekil 5.26 kıyaslandığında görülmektedir. MPC denetimli RR ve RRR eklem yapısına sahip yalparların eklem hız hataları kıyaslanmaktadır. Dönel eklem ilave edilmesiyle dinamik denklemleri RR eklem yapılı yalpaya göre daha karmaşık hale gelen RRR eklem yapılı yalpanın eklem hız hatalarının RR eklem yapılı yalpanın eklem hız hatalarına göre MPC denetimle azaldığı Şekil 5.25 ile Şekil 5.27 kıyaslandığında görülmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalparların dış bozucu olmadığı durumdaki ivme grafikleri Şekil 5.28-5.31'de sunulmaktadır.

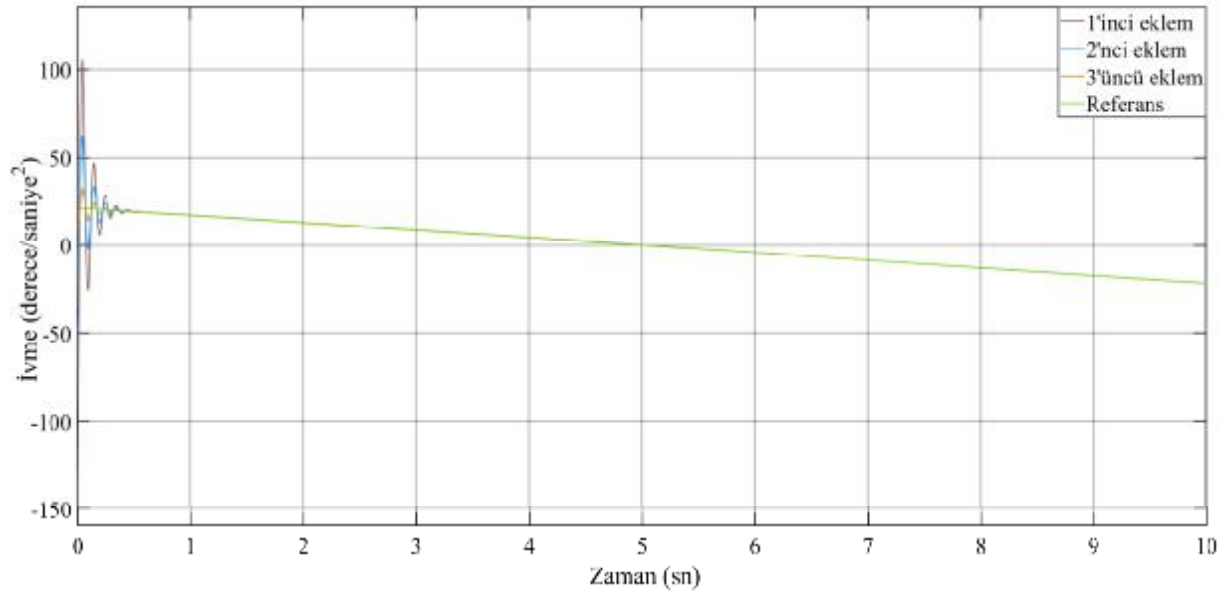


Şekil 5.28 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın ivme değişimi.

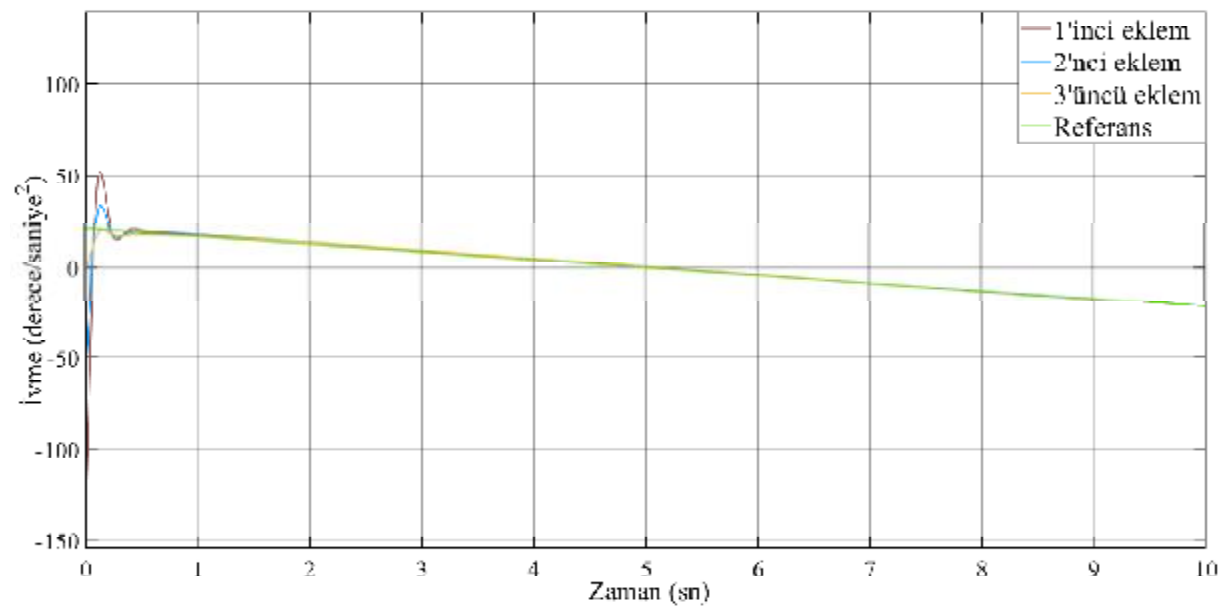


Şekil 5.29 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın ivme değişimi.

Belirlenen rota üzerinden tanımlanan konuma ulaşmada, PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın başlangıçta eklemlerde bulunan motorların üretmesi gereken tork miktarı dikkat çekmektedir. Eklemlerde bulunan motorların başlangıç anında üretmesi gereken tork miktarı bakımından, PID denetimli RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpaya göre MPC denetimli RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın performansının daha iyi olduğu Şekil 5.28 ile Şekil 5.29 ve Şekil 5.30 ile Şekil 5.31 kıyaslandığında görülmektedir.



Şekil 5.30 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın ivme değişimi.



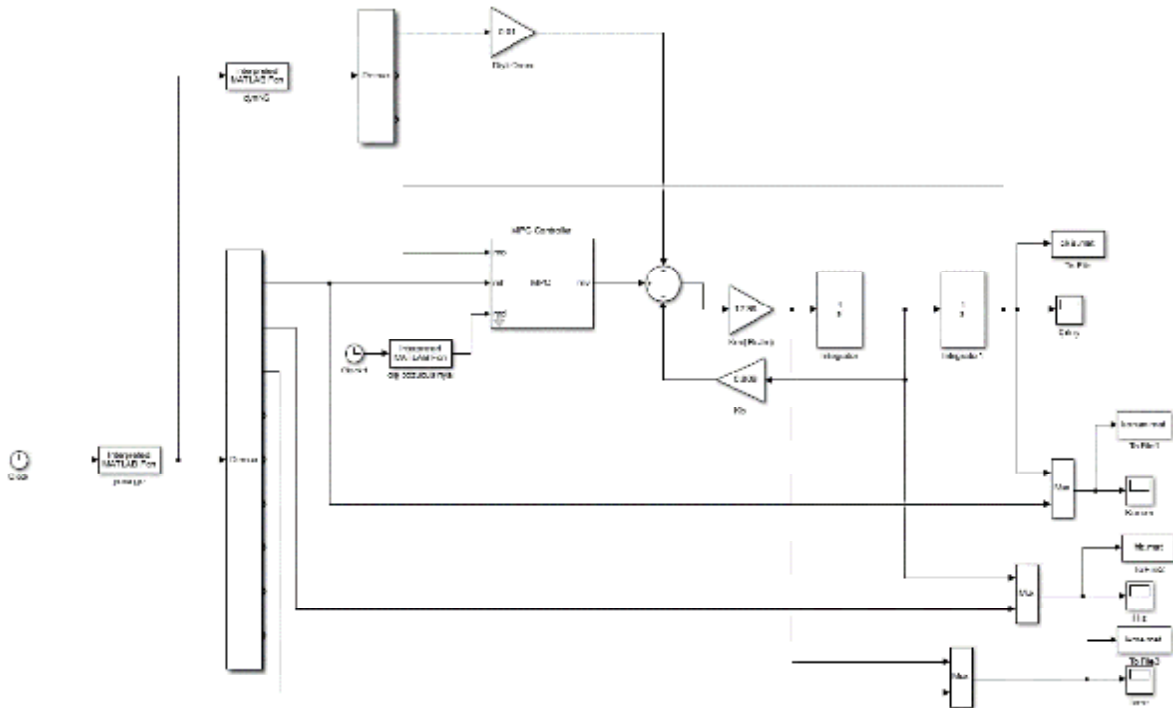
Şekil 5.31 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın ivme değişimi.

MPC denetim ile eklemlerde bulunan motorların üreteceği tork miktarlarının azaldığı dikkati çekmektedir. Ayrıca, belirlenen tork miktarlarının eklemlerdeki her bir motor tarafından üretilebilecek düzeyde olduğu görülmektedir. Özellikle ivme değişimlerinin 0-1 sn aralığında gözlemlenen bu farklılıklar hem RR hem de RRR eklem yapısında önerilen MPC yaklaşımının PID yaklaşımına göre daha az enerji ile daha iyi performans gösterdiğini işaret etmektedir.

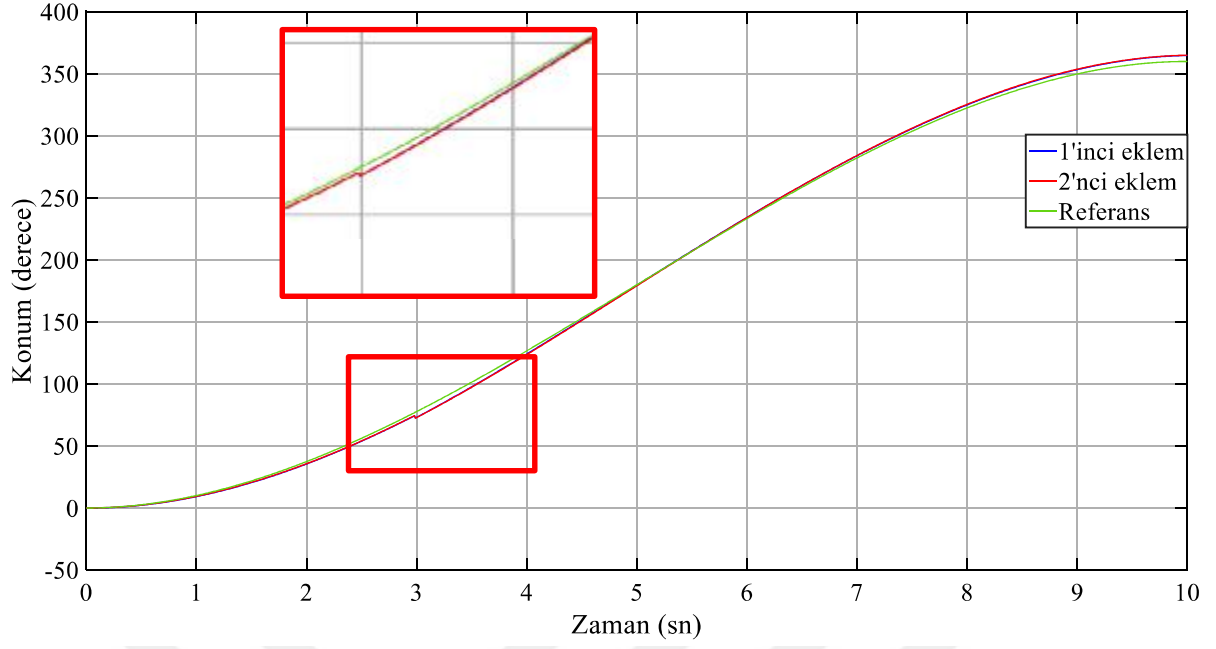
5.4.2 RR ve RRR Eklem Yapısına Sahip Yalpanın Dış Bozucu Etki Altında PID ve MPC Denetimi

Dış bozucu etki altında RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın PID ve MPC denetim performanslarının belirlenebilmesi için sistem çalıştıktan 3 sn sonra dış bozucu etki olarak SE yönünden 5.6 m/sn rüzgar hızı uygulanmaktadır. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında MATLAB/Simulink ortamında PID ve $N_c = 5$, $N_p = 10$ alınarak Şekil 5.32'deki deney düzeneğinde MPC denetimi gerçekleştirilmektedir.

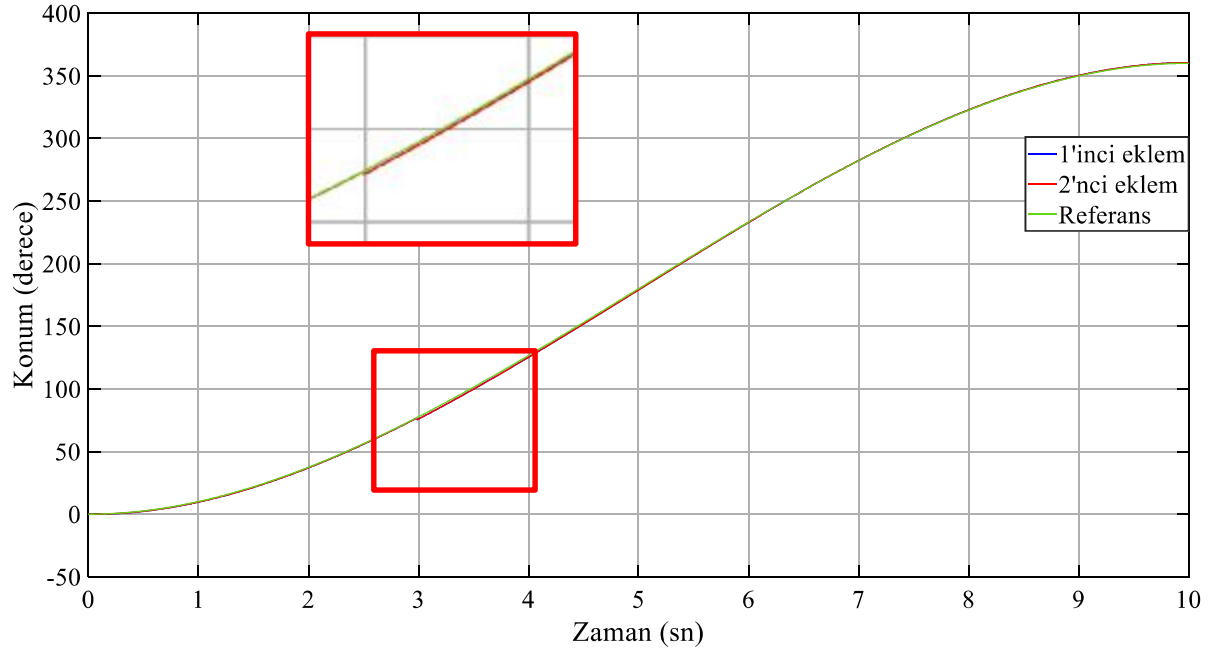
Çalışmada, İHA üzerindeki RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın eklemlerinin daha önceden belirlenen rota üzerinden tanımlanan konuma dış bozucu etki altında tasarım kriterleri içerisinde ulaşıp ulaşmadıkları test edilmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu altındaki konum grafikleri Şekil 5.33-5.36'da sunulmaktadır.



Şekil 5.32 RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında MPC denetim benzetimi.



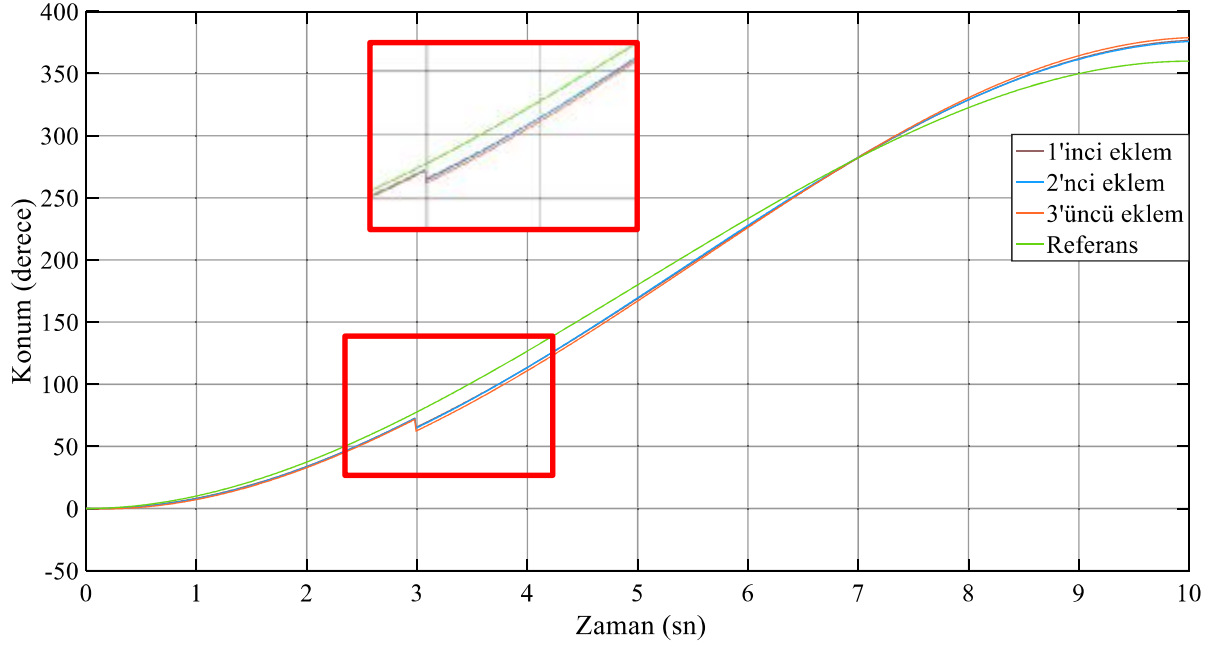
Şekil 5.33 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında konum değişimi.



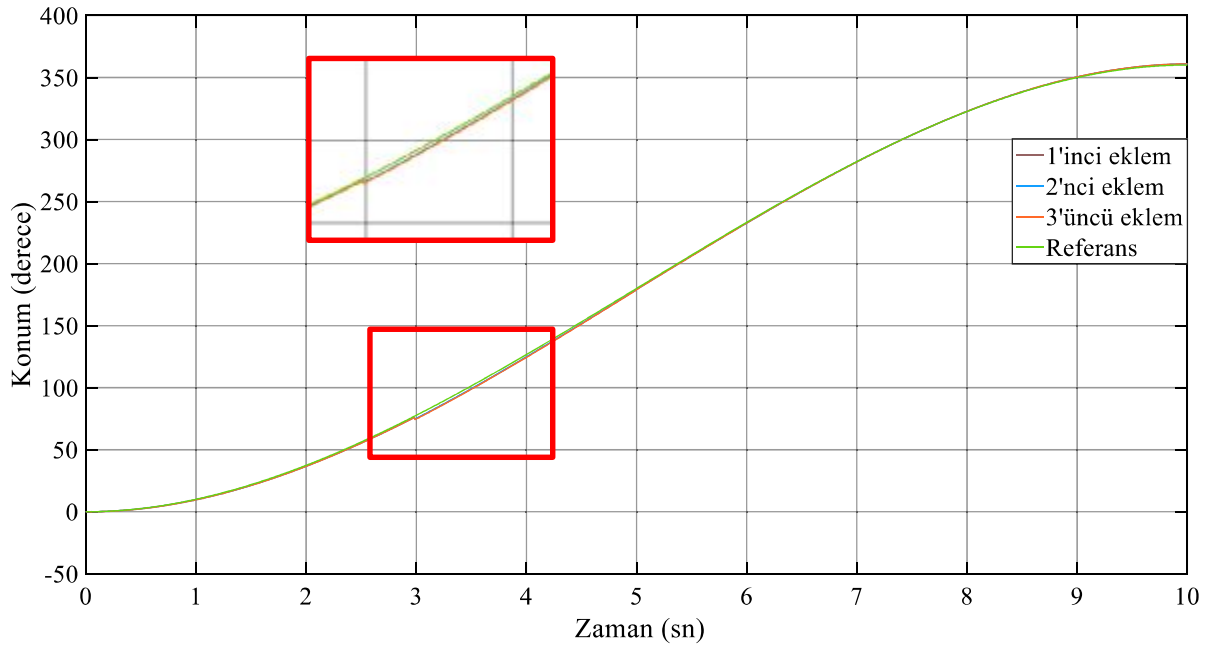
Şekil 5.34 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında konum değişimi.

RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemine 3'üncü saniyede dış bozucu etki olarak SE yönünden 5.6 m/sn rüzgar hızı uygulanmaktadır. MPC denetimli RR ve RRR eklem yapısına sahip yalparların eklem değişkenlerinin en iyi PID denetimli RR ve RRR eklem yapısına sahip yalparların eklem değişkenlerine göre dış bozucunun uygulandığı 3'üncü saniyeden itibaren

referans yörüngeyi daha az hata ile takip ettiği Şekil 5.34 ve Şekil 5.36’da görülmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanların tüm eklemelerinin daha önceden belirlenen rota üzerinden tanımlanan konuma dış bozucu etki altında tasarım kriterleri içerisinde ulaştıkları görülmektedir.

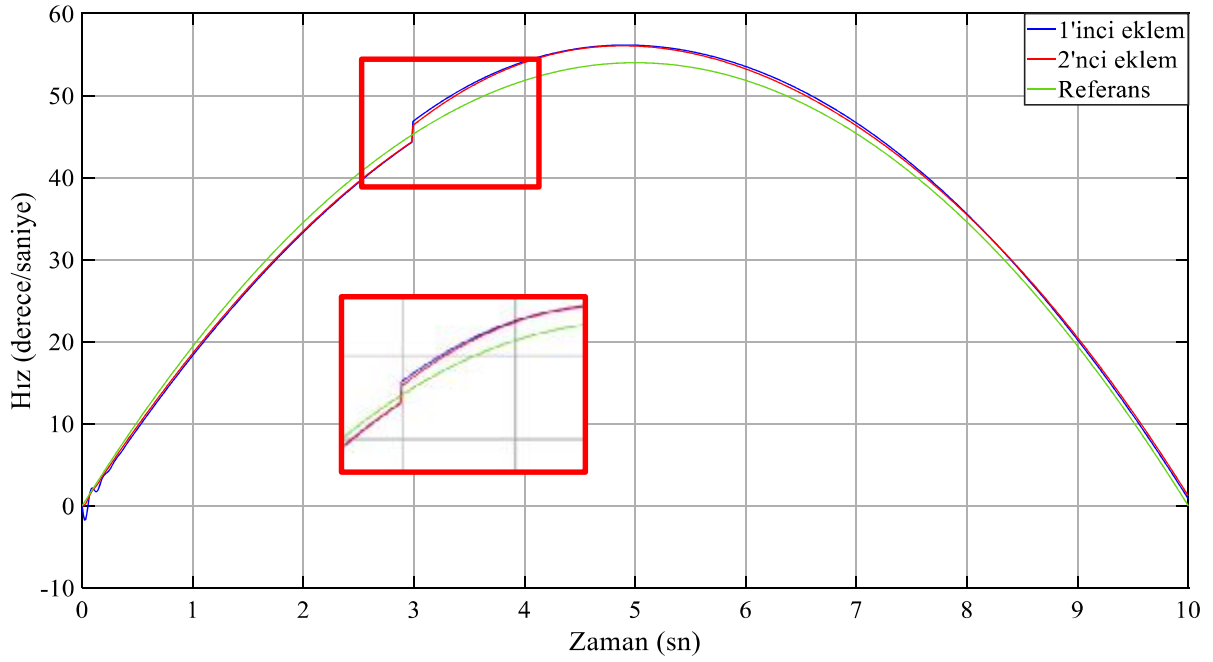


Şekil 5.35 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında konum değişimi.

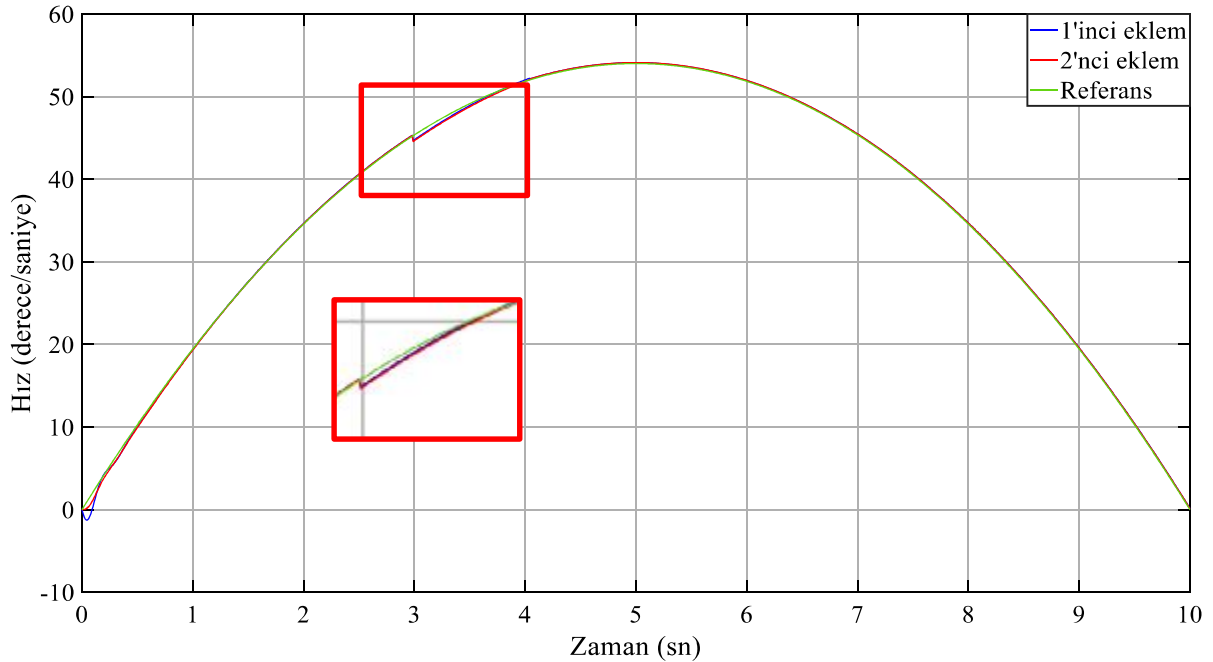


Şekil 5.36 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında konum değişimi.

RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanların dış bozucu altındaki hız grafikleri Şekil 5.37-5.40'da sunulmaktadır.



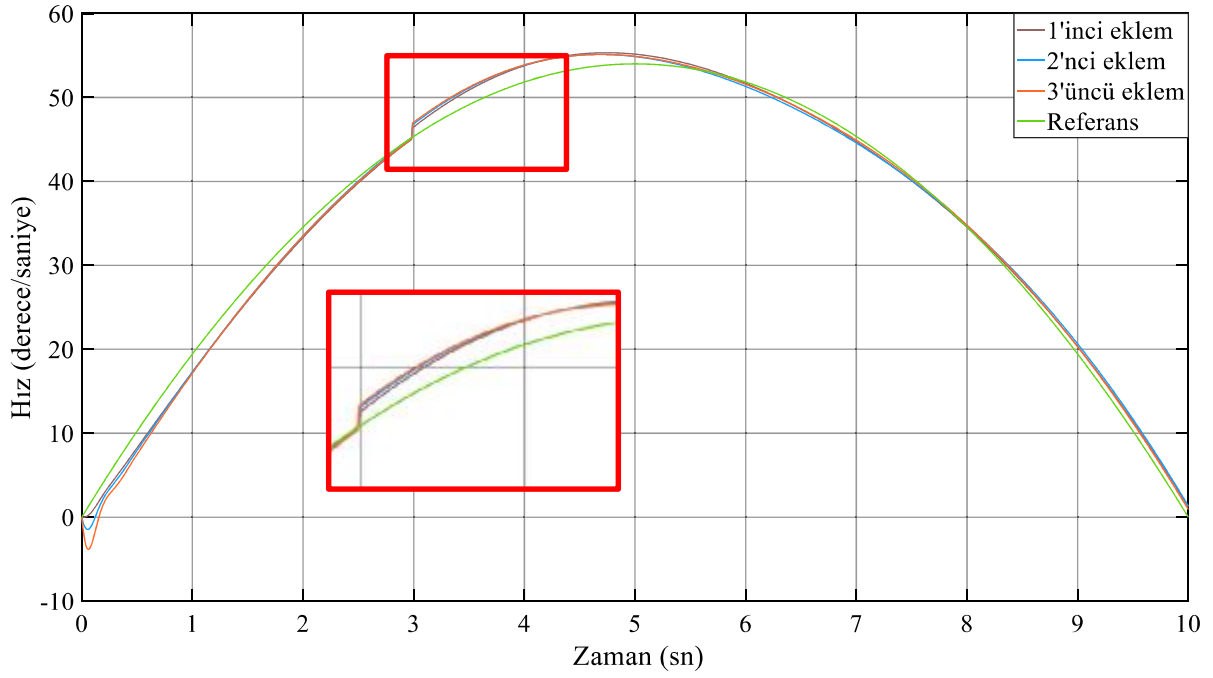
Şekil 5.37 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu altında hız değişimi.



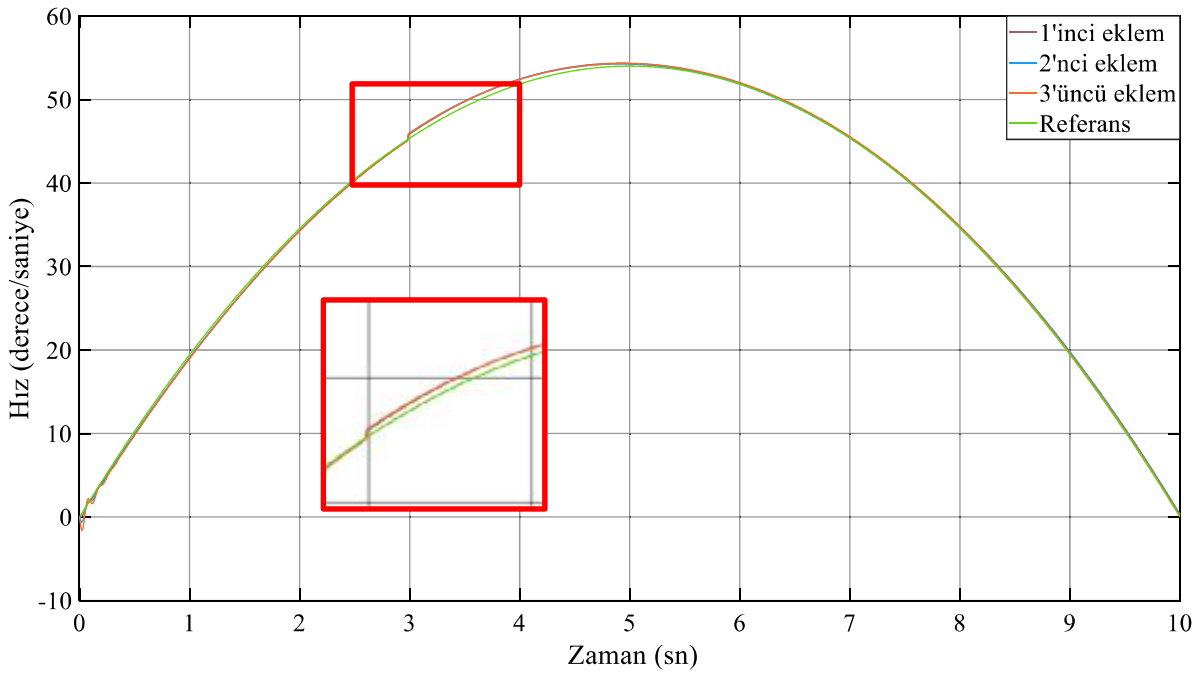
Şekil 5.38 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu altında hız değişimi.

Belirlenen rota üzerinden tanımlanan konuma dış bozucu etki altında ulaşmada, PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın eklem hızlarının MPC denetimli RR eklem yapısına sahip

yalpanın eklem hızlarına göre daha büyük hata ile referans yörüngeyi takip ettiği Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’de görülmektedir.



Şekil 5.39 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında hız değişimi.



Şekil 5.40 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında hız değişimi.

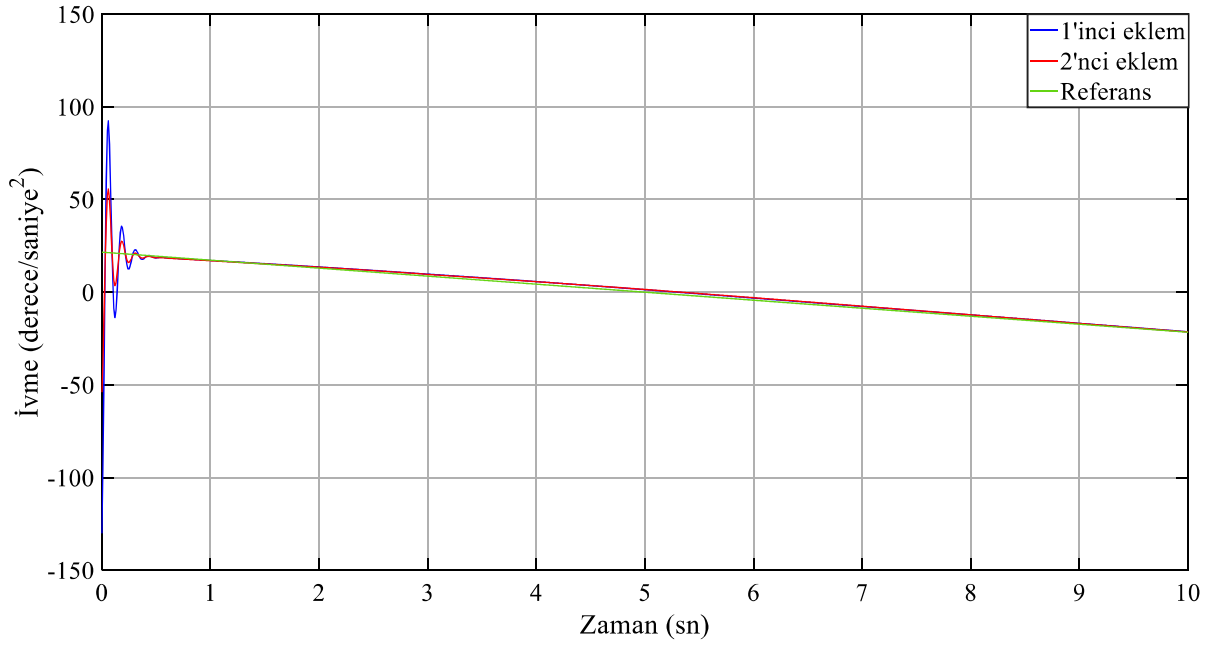
Belirlenen rota üzerinden tanımlanan konuma dış bozucu etki altında ulaşmada, PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın başlangıçta eklem hızlarındaki hata dikkat çekmektedir. PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın eklem hız hataları, PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın eklem hız hataları ile kıyaslanmaktadır. Dönel eklem ilave edilmesiyle dinamik denklemleri RR eklem yapılı yalpaya göre daha karmaşık hale gelen RRR eklem yapılı yalpanın etkin denetimine klasik denetim yöntemlerinin maksimum başarıyla cevap veremediği Şekil 5.37 ile Şekil 5.39 kıyaslandığında görülmektedir. MPC denetimli RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpaların eklem hız hataları kıyaslanmaktadır. Dönel eklem ilave edilmesiyle dinamik denklemleri RR eklem yapılı yalpaya göre daha karmaşık hale gelen RRR eklem yapılı yalpanın eklem hız hatalarının RR eklem yapılı yalpanın eklem hız hatalarına göre artmadığı ve belirlenen rotayı MPC denetimle başarıyla takip ettiği Şekil 5.38 ile Şekil 5.40 kıyaslandığında görülmektedir.

RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpaların dış bozucu etki altındaki ivme grafikleri Şekil 5.41-5.44'te sunulmaktadır. Belirlenen rota üzerinden tanımlanan konuma dış bozucu etki altında ulaşmada, PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın başlangıçta eklemlerde bulunan motorların üretmesi gereken tork miktarı dikkat çekmektedir.

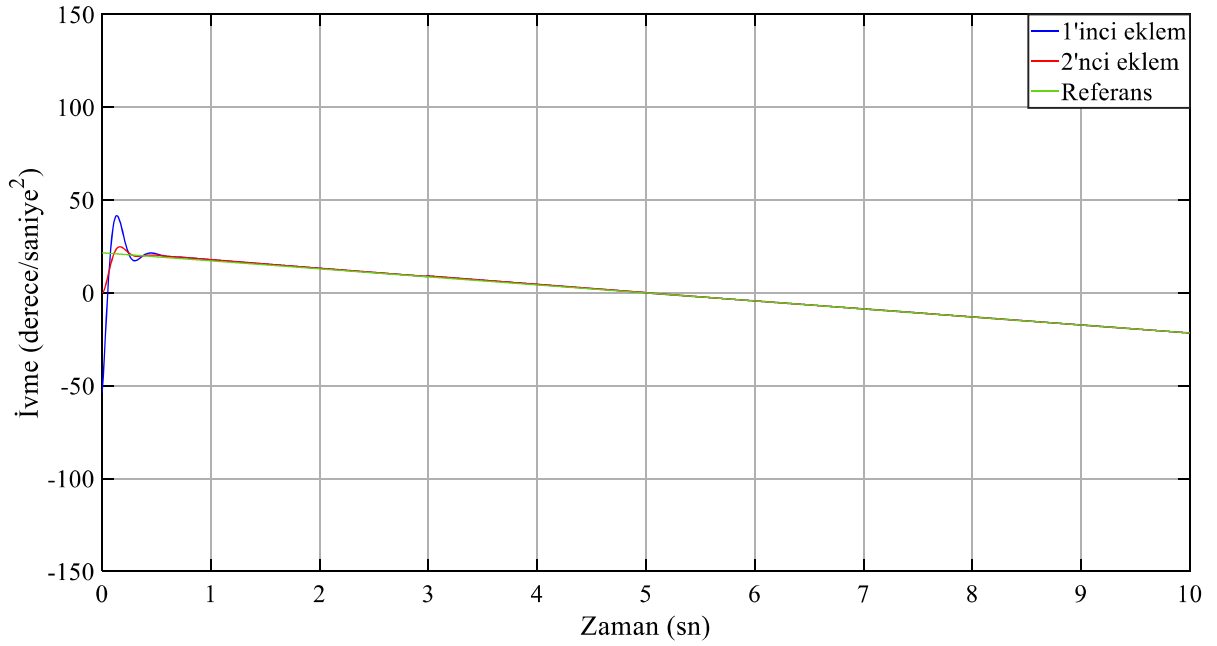
Eklemlerde bulunan motorların başlangıç anında üretmesi gereken tork miktarı bakımından, PID denetimli RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpaya göre MPC denetimli RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpanın performansının daha iyi olduğu Şekil 5.41 ile Şekil 5.42 ve Şekil 5.43 ile Şekil 5.44 kıyaslandığında görülmektedir. MPC denetim ile eklemlerde bulunan motorların üreteceği tork miktarlarının azaldığı dikkati çekmektedir. Ayrıca, belirlenen tork miktarlarının eklemlerdeki her bir motor tarafından üretilebilecek düzeyde olduğu ivme değişim grafiklerinden görülmektedir. İvme değişimlerinde 0-1 sn aralığında gözlemlenen farklılıklar ile birlikte dış bozucu uygulandığında oluşan farklılıklar göz önüne alındığında, MPC yaklaşımın PID yaklaşıma göre daha az enerji harcayarak daha iyi performans gösterdiği belirlenmektedir.

Belirlenen konuma RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpaların tüm eklemlerinin dış bozucu etki altında hem PID hem de MPC denetleyici ile tasarım kriterleri içinde ulaştıkları görülmektedir. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemlerine 3'üncü saniyede dış bozucu etki olarak SE yönünden 5.6 m/sn rüzgar hızı uygulandığında MPC denetimli yalpa

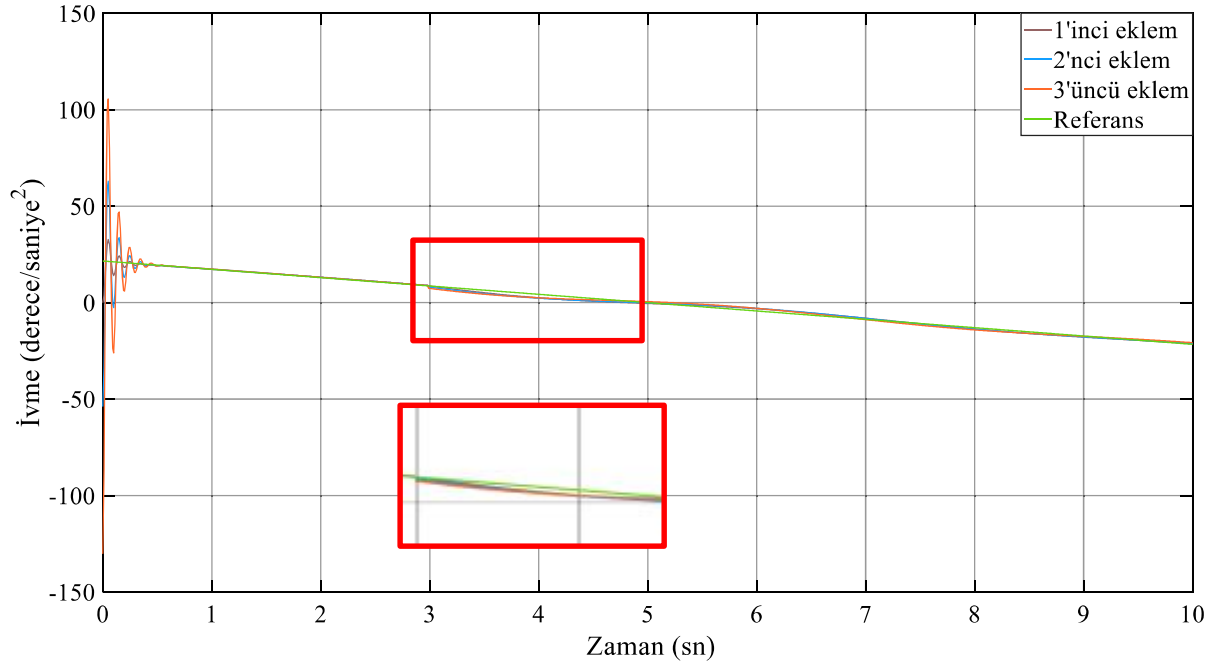
sistemlerinin PID denetimli yalpa sistemlerine göre dış bozucu etkilere karşı daha dayanıklı olduğu gözlemlenmektedir.



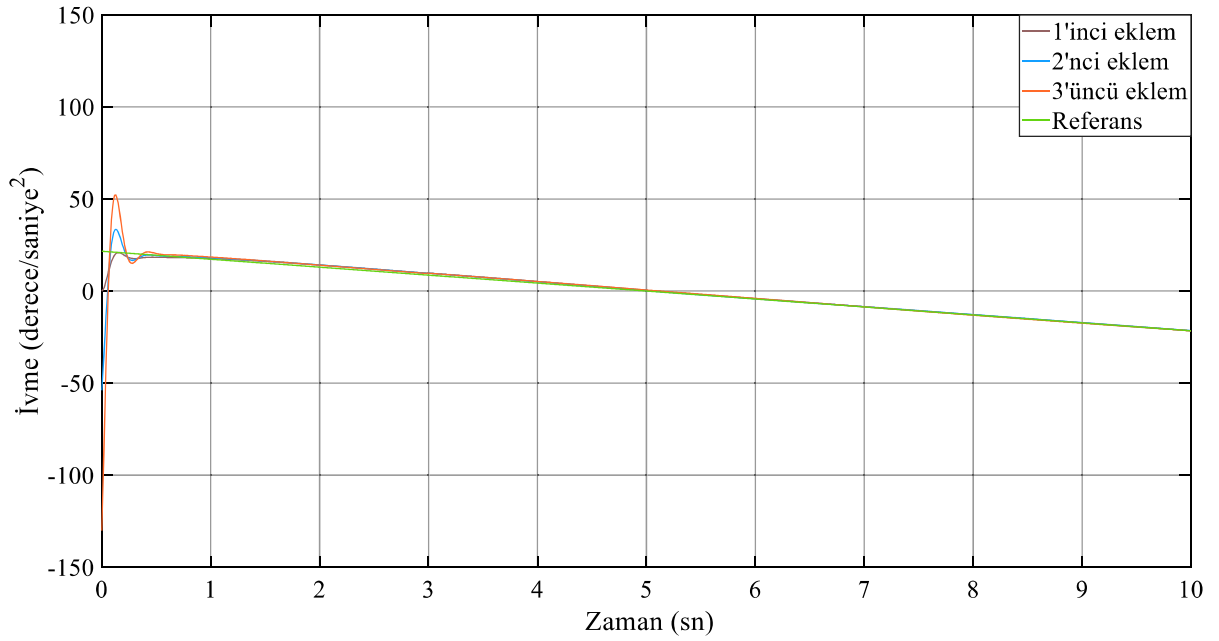
Şekil 5.41 PID denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında ivme değişimi.



Şekil 5.42 MPC denetimli RR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında ivme değişimi.



Şekil 5.43 PID denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında ivme değişimi.



Şekil 5.44 MPC denetimli RRR eklem yapısına sahip yalpanın dış bozucu etki altında ivme değişimi.



BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, çeşitli (RR, RRR ve RPR) eklem yapısına sahip robot kollarının dinamik denklemleri tüm parametreler dikkate alınarak vektör-matris formda oluşturulmuş, matris formda elde edilen $M(q)$ kütle, $V(q, \dot{q})$ coriolis-merkezkaç ve $G(q)$ yer çekimi denklemlerinin doğrusal olmayan yapıda olduğu belirlenmiştir. Robot kolunun modellenmesinde esnek eklem bağları arasındaki sürtünme, giriş-çıkış gürültüsü, motor karakteristiklerinden kaynaklanan içsel bozucu etki ile dış bozucu etkilerin robot kolunun etkili denetimi için oldukça önemli olduğu görülmüştür. Çok eklemlili robot kolunun denetiminin sağlanabilmesi için tüm parametreleri içerecek şekilde dinamik ve kinematik denklemler elde edilerek teorik model oluşturulmuştur.

Değişken dış bozucu etki altında yüksek hassasiyet gerektiren çok eklemlili robot kol denetiminde modele dayalı olarak öngörülü denetim algoritmalarının kullanılmasının etkin ve gürbüz bir denetim için başarılı olacağı düşünülerek bu probleme çözüm aranmıştır. Farklı eklem yapılarına sahip çok eklemlili robot kolunun dinamik modeli elde edilmiş, elde edilen dinamik modeller PID denetleyici ile denetlenmiştir. PID denetleyici kullanılarak, belirlenen yörünge boyunca her bir robot kolunun eklemlerinin pozisyon, hız ve ivme karakteristikleri incelenmiştir. RR ve RRR eklem yapısına sahip BLDC motorlardan oluşan yalpa sistemleri üzerinde PID denetim deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve yalpanın farklı dış bozuculara karşı verdiği tepkiler incelenmiştir.

RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpaların giriş-çıkış veri kümesi kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan modelleri elde edilmiştir. Elde edilen sistem modellerinin doğruluğunun test edilmesi amacıyla, arta-kalan yaklaşımı ile otokorelasyon, çapraz korelasyon ve sıfır-kutup çizimi elde edilmiştir. Ayrıca, deneysel olarak elde edilen veri seti iki kısma ayrılarak birinci kısımdaki sistem tanımlama verileri ile sistemin doğrusal doğrusal olmayan modelleri elde edilmiş ikinci kısımdaki model doğrulama verileri ile modellerin geçerliliği doğrulanmıştır. Farklı dış bozuculara karşı denetlenen sistemin parametreleri ölçülmüş, MPC ve PID denetimli

sistemin farklı dış bozucular altında elde edilen parametreleri ile sistemin gürbüzlük testleri yapılmıştır.

Doğrusal olmayan model yaklaşımı için Hammerstein yapısına ek olarak doğrusal model yaklaşımlarından OE model yapıları incelenmiştir. Giriş-çıkış verileri deneysel olarak elde edilen RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemleri OE ve Hammerstein model yapısı ile modellenmiş ve parametre kestirimleri yapılmıştır. RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemlerinin dış bozucu altında modelleri oluşturulmuş, oluşturulan modeller deneysel olarak elde edilen giriş-çıkış veri seti üzerinde doğrulanmıştır.

Türetilen dinamik modellerin klasik denetim yöntemlerinden PID ve modele dayalı yöntemlerden MPC ile denetimi gerçekleştirilmiştir. RR ve RRR eklem yapısına sahip robot yalpa sistemlerinin dış bozucu altında elde edilen modelleri MPC ile denetlenmiştir. Dış bozucu etki altında model öngörülü olarak denetlenen sistem için elde edilen benzetim sonuçları klasik denetim uygulandığında elde edilen benzetim sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Dış bozucu etki altında elde edilen model için İHA üzerinde bulunan dönel düzenleme sahip RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpa yardımıyla deneysel çok eklemli robot kol düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneğinde rüzgar ve dışarıdan uygulanan kuvvet dış bozucu etki olarak kullanılmıştır. Farklı dış bozucu etkilere karşı denetlenen RR ve RRR eklem yapısına sahip aynı özellikli her iki sistemin parametreleri ölçülmüştür. MPC ve PID denetimli sistemlerin dış bozucu altında elde edilen parametreleri ile sistemin gürbüzlük testleri yapılmıştır. MPC'nin PID'ye göre dış bozucudan daha az etkilendiği görülmüştür. Ayrıca, PID'ye göre MPC'nin geçici durumda daha az enerjiye ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. İHA gibi enerjinin oldukça önemli olduğu mobil uygulamalarda enerjinin verimli kullanımı sağlanmıştır.

Otonom olarak hedef takibi için hareket eden İHA üzerindeki RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpalardan farklı dış bozucu etkiler altında deneysel olarak elde edilen giriş-çıkış verileri ile sistemlerin hem doğrusal hem de doğrusal olmayan modelleri elde edilmiştir. En uygun modelin belirlenmesinde ve doğrulanmasında otokorelasyon ve çapraz korelasyon grafikleri ile AIC ve FPE model derecesi belirleme kriterlerinden faydalanılmıştır. İHA üzerindeki RR ve RRR eklem yapısına sahip yalpa sistemlerinin Hammerstein model yapısı ile yüksek başarımla modellendiği belirlenmiştir. Bu çalışma ile yüksek başarımlı hedef takibi için, İHA üzerindeki

yalpanın gerçek zamanlı ve model tabanlı denetimine katkı sağlanabilmektedir. Çalışmanın devamında, robot kolu ile birlikte robot kolunun monte edildiği insansız araç gibi hareketli platformların modele dayalı denetimi ortak denetim algoritması ile sağlanarak gerçek eşzamanlı insansız araç-robot kol denetimi etkin şekilde yapılabilecektir.





KAYNAKLAR

- Abdallah C, Dawson D, Dorato P and Jamshidi M** (1991) Survey of Robust Control for Rigid Robots. *IEEE Control Systems*, 11(2): 24-30.
- Abderrahim M and Whittaker A R** (2000) Kinematic Model Identification of Industrial Manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 16(1): 1-8.
- Altan A** (2011) RPR (Dönel Prizmatik Dönel) Eklem Yapısına Sahip Bir Robotun Dinamik Denklemlerinin Vektör-Matris Formda Türetilmesi. *Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu*, 5-7 Ekim 2011, Elazığ, Türkiye, *Sempozyum Kitiçığı*, e-kitap, 259-263.
- Altan A** (2013) RRPR (Dönel Dönel Prizmatik Dönel) Eklem Yapısına Sahip Bir Robotun Uç ve Eklem Değişkenlerinin İzleyeceği Yörüngelerin Belirlenmesi ve Analizi. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK)*, 26-28 Eylül 2013, Malatya, Türkiye, *Sempozyum Kitiçığı*, e-kitap, 1241-1246.
- Altan A and Hacıoğlu R** (2014) The Controller of the Camera used in Target Tracking for Unmanned Vehicle with Model Predictive Controller. *IEEE 22nd Signal Processing and Communication Application Conference*, April 23-25, Zonguldak, Turkey, *Conference Publications*, ISBN: 978-1-4799-4874-1, e-book, 1686-1689.
- Altan A ve Hacıoğlu R** (2015) İnsansız Hava Aracı (Hexacopter) Üzerindeki Yalpa İçin Model Öngörölü Denetleyici (MPC) Kullanımı. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK)*, 10-12 Eylül 2015, Denizli, Türkiye, *Sempozyum Kitiçığı*, ISBN: 978-975-6992-60-9, e-kitap, 960-965.
- Altan A, Bayraktar K and Hacıoğlu R** (2016) Simultaneous Localization and Mapping of Mines with Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE 24th Signal Processing and Communication Application Conference*, May 16-19, Zonguldak, Turkey, *Conference Publications*, ISBN: 978-1-5090-1679-2, e-book, 1-4.
- Altan A and Hacıoğlu R** (2017a) The Algorithm Development and Implementation for 3D Printers based on Adaptive PID Controller. *International Symposium on 3D Printing Technologies*, April 3-4, İstanbul, Turkey, 100-108.
- Altan A and Hacıoğlu R** (2017b) Modelling of Three-Axis Gimbal System on Unmanned Air Vehicle (UAV) under External Disturbances. *IEEE 25th Signal Processing and Communication Application Conference*, May 15-18, Antalya, Turkey, *Conference Publications*, ISBN: 978-1-5090-6494-6, e-book, 1-4.
- Altan A, Aslan Ö and Hacıoğlu R** (2017c) Model Predictive Control of Load Transporting System on Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *5th International Conference on Advances in Mechanical and Robotics Engineering (AMRE)*, May 27-28, Rome, Italy, *Conference Publications*, ISBN: 978-1-63248-123-8, e-book, 1-4.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Altan A, Köksal K ve Hacıoğlu R** (2017d) Vektör Alan Kılavuzu Yöntemi ile Görsel Çizgi Takibi için İnsansız Hava Aracı Üzerindeki Yalpanın Model Öngörülmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1): 218-227.
- Asada H and Slotine J J E** (1986) *Robot Analysis and Control*. ISBN: 0-471-83029-1, John Wiley & Sons, New York, 266 pp.
- Aslan Ö, Altan A and Hacıoğlu R** (2017) The Control of Blast Furnace Top Gas Pressure by using Fuzzy PID. *5th International Conference on Advances in Mechanical and Robotics Engineering (AMRE)*, May 27-28, Rome, Italy, *Conference Publications*, ISBN: 978-1-63248-123-8, e-book, 22-26.
- Åström K J and Hägglund T** (2001) The Future of PID Control. *Control Engineering Practice*, 9(11): 1163-1175.
- Åström K J and Wittenmark B** (2013) *Adaptive Control*. 2nd edition, ISBN: 978-0-486-46278-3, Dover Publications, New York, 575 pp.
- Atencia M, Joya G and Sandoval F** (2004) Parametric Identification of Robotic Systems with Stable Time-Varying Hopfield Networks. *Neural Computing and Applications*, 13(4): 270-280.
- Aydin Y and Kucuk S** (2006) Quaternion Based Inverse Kinematics for Industrial Robot Manipulators with Euler Wrist. *IEEE International Conference on Mechatronics*, July 3-5, Budapest, Hungary, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 0-7803-9712-6, e-book, 581-586.
- Bai E W and Li D** (2004) Convergence of the Iterative Hammerstein System Identification Algorithm. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(11): 1929-1940.
- Beek B and Jager B** (1997) RRR-Robot Design: Basic Outlines, Servo Sizing and Control. *IEEE International Conference on Control Applications*, October 5-7 1997, Hartford, USA, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 0-7803-3876-6, e-book, 36-41.
- Bejczy A K** (1974) *Robot Arm Dynamics and Control*. Jet Propulsion Laboratory Technical Memorandum 33-669, 101 pp.
- Bejczy A K and Paul R P** (1981) Simplified Robot Arm Dynamics for Control. *20th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes*, December 16-18 1981, San Diego, USA, *IEEE Conference Publications*, e-book, 261-262.
- Bhattacharyya S P, Datta A and Keel L H** (2009) *Linear Control Theory: Structure, Robustness, and Optimization*. 3rd edition, ISBN: 978-0-8493-4063-5, CRC Press, Boca Raton, 910 pp.
- Bi Z M and Jin Y** (2011) Kinematic Modeling of Exechon Parallel Kinematic Machine. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(1): 186-193.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Bingül Z ve Küçük S** (2008) *Robot Dinamiği ve Kontrolü*. ISBN: 978-975-511-516-0, Birsen Yayınevi, İstanbul, 423 s.
- Bingül Z ve Küçük S** (2009) *Robot Kinematığı*. ISBN: 978-975-511-424-6, Birsen Yayınevi, İstanbul, 348 s.
- Blazic S** (2011) A Novel Trajectory-Tracking Control Law for Wheeled Mobile Robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 59(11): 1001-1007.
- Bosch P P and Klauw A C** (1994) *Modeling, Identification and Simulation of Dynamical Systems*. ISBN: 0-8493-9181-4, CRC Press, Boca Raton, 199 pp.
- Cai H and Huang J** (2014) Leader-Following Consensus of Multiple Uncertain Euler-Lagrange Systems under Switching Network Topology. *International Journal of General Systems*, 43(3-4): 294-304.
- Camacho E F and Bordons C** (2007) *Model Predictive Control*. 2nd edition, ISBN: 978-1-85233-694-3, Springer Science & Business Media, London, 405 pp.
- Camarillo D B, Krummel T M and Salisbury J K** (2004) Robotic Technology in Surgery: Past, Present, and Future. *The American Journal of Surgery*, 188(4): 2-15.
- Caponetto R and Xibilia M G** (2017) Fractional Order PI Control of a Gimbal Platform. *IEEE European Conference on Circuit Theory and Design*, September 4-6, Catania, Italy, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 978-1-5386-3974-0, e-book, 1-4.
- Chang F and Luus R** (1971) A Noniterative Method for Identification Using Hammerstein Model. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 16(5): 464-468.
- Charos G N, Arkun Y and Taylor R A** (1991) Model Predictive Control of an Industrial Lime Kiln. *Tappi Journal*, 74(2): 203-211.
- Chen G, Yue Y and Song Y** (2013) Finite-Time Cooperative-Tracking Control for Networked Euler-Lagrange Systems. *IET Control Theory and Applications*, 7(11): 1487-1497.
- Chiaverini S, Siciliano B and Egeland O** (1994) Review of the Damped Least-Squares Inverse Kinematics with Experiments on an Industrial Robot Manipulator. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2(2): 123-134.
- Chwa D** (2010) Tracking Control of Differential-Drive Wheeled Mobile Robots Using a Backstepping-Like Feedback Linearization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 40(6): 1285-1295.
- Clarke D W** (1988) Application of Generalized Predictive Control to Industrial Processes. *IEEE Control Systems Magazine*, 8(2): 49-55.
- Clarke D W, Mohtadi C and Tuffs P S** (1987) Generalized Predictive Control-Part I. The Basic Algorithm. *Automatica*, 23(2): 137-148.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Corinthios M** (2009) *Signals, Systems, Ttransforms, and Digital Signal Processing with MATLAB*. ISBN: 978-1-4200-9049-9, CRC Press, Boca Raton, 1306 pp.
- Craig J J** (2005) *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. 3rd edition, ISBN: 978-0-2015-4361-2, Pearson Prentice Hall, 400 pp.
- Crane III C D and Duffy J** (2008) *Kinematic Analysis of Robot Manipulators*. ISBN: 978-0-521-57063-3, Cambridge University Press, New York, 429 pp.
- Cubero S** (2006) *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*. ISBN: 3-86611-285-8, Pro Literatur Verlag, Germany, 964 pp.
- Cutler C R and Ramaker B L** (1980) Dynamic Matrix Control-A Computer Control Algorithm. *In Automatic Control Conference*, San Francisco, 72-73.
- Darba A, Belie F, D'haese P and Melkebeek J A** (2016) Improved Dynamic Behavior in BLDC Drives using Model Predictive Speed and Current Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(2): 728-740.
- Demir B E, Bayır R and Duran F** (2016) Real-Time Trajectory Tracking of an Unmanned Aerial Vehicle using a Self-Tuning Fuzzy Proportional Integral Derivative Controller. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 8(4): 252-268.
- Demircioğlu H and Gawthrop P J** (1991) Continuous-Time Generalized Predictive Control (CGPC). *Automatica*, 27(1): 55-74.
- Denavit J and Hartenberg R S** (1955) A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 22: 215-221.
- Ding F, Liu X P and Liu G** (2011) Identification Methods for Hammerstein Nonlinear Systems. *Digital Signal Processing*, 21(2): 215-238.
- Ding F, Wang X, Chen Q and Xiao Y** (2016) Recursive Least Squares Parameter Estimation for a Class of Output Nonlinear Systems based on the Model Decomposition. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 35(9): 3323-3338.
- Djuric A, Al Saidi R and ElMaraghy W** (2012) Dynamics Solution of n-DOF Global Machinery Model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(5): 621-630.
- Dong F, Lei X and Chou W** (2017) A Dynamic Model and Control Method for a Two-Axis Inertially Stabilized Platform. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1): 432-439.
- Doss M A N, Dash S S, Mahesh D and Marthandan V** (2013) A Model Predictive Control to Reduce Torque Ripple for Brushless DC Motor with Inbuilt Stator Current Control. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 1(3): 59-67.
- Flynn A M and Sanders S R** (2002) Fundamental Limits on Energy Transfer and Circuit Considerations for Piezoelectric Transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(1): 8-14.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Forni M, Hallin M, Lippi M and Reichlin L** (2000) The Generalized Dynamic-Factor Model: Identification and Estimation. *The review of Economics and Statistics*, 82(4): 540-554.
- Forsell U and Ljung L** (2000) Identification of Unstable Systems using Output Error and Box-Jenkins Model Structures. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(1): 137-141.
- Franklin G F, Powell J D, Emami-Naeini A and Powell J D** (2015) *Feedback Control of Dynamic Systems*. 7th edition, ISBN: 978-0-1334-9660-4, Pearson, 880 pp.
- Fruzzetti K P, Palazoğlu A and McDonald K A** (1997) Nonlinear Model Predictive Control Using Hammerstein Models. *Journal of Process Control*, 7(1): 31-41.
- Gautier M and Poignet P** (2001) Extended Kalman Filtering and Weighted Least Squares Dynamic Identification of Robot. *Control Engineering Practice*, 9(12): 1361-1372.
- Grotjahn M, Daemi M and Heimann B** (2001) Friction and Rigid Body Identification of Robot Dynamics. *International Journal of Solids and Structures*, 38(10): 1889-1902.
- Gupta K C** (1986) Kinematic Analysis of Manipulators Using The Zero Reference Position Description. *The International Journal of Robotics Research*, 5(2): 5-13.
- Gupta K C** (1997) *Mechanics and Control of Robots*. ISBN: 0-387-94923-2, Springer, New York, 178 pp.
- Gupta K C and Roth B** (1982) Design Considerations for Manipulator Workspace. *Journal of Mechanical Design*, 104(4): 704-711.
- Hacıoğlu R and Williamson G A** (2003) Identification of Wiener Systems Using Reduced Complexity Volterra Models. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(16): 351-356.
- Haist N, Chang F and Luus R** (1973) Nonlinear Identification in the Presence of Correlated Noise Using a Hammerstein Model. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 18(5): 552-555.
- Hjalmarsson, H, Welsh J S and Rojas C R** (2012) Identification of Box-Jenkins Models using Structured ARX Models and Nuclear Norm Relaxation. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(16): 322-327.
- Holkar K S and Waghmare L M** (2010) An Overview of Model Predictive Control. *International Journal of Control and Automation*, 3(4): 47-63.
- Hollington J** (1999) Robots in Agriculture. *Industrial Robot: An International Journal*, 26(6): 438-446.
- Huberts W, Jonge C, Linden W P M, Inda M A, Tordoir J H M, Vosse F N and Bosboom E M H** (2013) A Sensitivity Analysis of a Personalized Pulse Wave Propagation Model for Arteriovenous Fistula Surgery. Part A: Identification of Most Influential Model Parameters. *Medical Engineering and Physics*, 35(6): 810-826.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Huusom J K, Poulsen N K, Jørgensen S B and Jørgensen J B** (2010) Tuning of Methods for Offset Free MPC based on ARX Model Representations. *American Control Conference*, June 30-July 2, Baltimore, USA, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 978-1-4244-7427-1, e-book, 2355-2360.
- Huusom J K, Poulsen N K, Jørgensen S B and Jørgensen J B** (2012) Tuning SISO Offset-Free Model Predictive Control based on ARX Models. *Journal of Process Control*, 22(10): 1997-2007.
- Ishihara J Y and Terra M H** (2002) On The Lyapunov Theorem for Singular Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(11): 1926-1930.
- Jazar R N** (2010) *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control*. 2nd edition, ISBN: 978-1-4419-1749-2, Springer Science & Business Media, London, 882 pp.
- Jia R, Nandikolla V K, Haggart G, Volk C and Tazartes D** (2017) System Performance of an Inertially Stabilized Gimbal Platform with Friction, Resonance, and Vibration Effects. *Journal of Nonlinear Dynamics*, 1-20.
- Jiang Z P and Nijmeijer H** (1997) Tracking Control of Mobile Robots: A Case Study in Backstepping. *Automatica*, 33(7): 1393-1399.
- Johansson R, Robertsson A, Nilsson K and Verhaegen M** (2000) State-Space System Identification of Robot Manipulator Dynamics. *Mechatronics*, 10(3): 403-418.
- Joice C S, Paranjothi S R and Kumar V J S** (2013) Digital Control Strategy for Four Quadrant Operation of Three Phase BLDC Motor with Load Variations. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(2): 974-982.
- Juang J N** (1994) *Applied System Identification*. ISBN: 978-0-1307-9211-2, Prentice Hall, New Jersey, 394 pp.
- Karasu S, Altan A, Saraç Z and Hacıoğlu R** (2017a) Estimation of Fast Varied Wind Speed based on NARX Neural Network by using Curve Fitting. *International Journal of Energy Application and Technologies*, 4(3): 137-146.
- Karasu S, Altan A, Saraç Z and Hacıoğlu R** (2017b) Prediction of Wind Speed with Non-Linear Autoregressive (NAR) Neural Network. *IEEE 25th Signal Processing and Communication Application Conference*, May 15-18, Antalya, Turkey, *Conference Publications*, ISBN: 978-1-5090-6494-6, e-book, 1-4.
- Keyser R M, Velde P G and Dumortier F A G** (1988) A Comparative Study of Self-Adaptive Long-Range Predictive Control Methods. *Automatica*, 24(2): 149-163.
- Khalil H K** (1996) *Nonlinear Systems*. 3rd edition, ISBN: 0-13-067389-7, Prentice-Hall, New Jersey, 742 pp.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Khalil W and Dombre E** (2002) *Modeling, Identification and Control of Robots*. ISBN: 978-1-903996-66-9, Hermes Penton, London, 480 pp.
- Khurshid J and Bing-Rong H** (2004) Military Robots-A Glimpse from Today and Tomorrow. *Control, Automation, Robotics and Vision Conference*, December 6-9, Kunming, China, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 0-7803-8653-1, e-book, 771-777.
- Klafter R D, Chmielewski T A and Negin M** (1989) *Robotic Engineering: An Integrated Approach*, ISBN: 978-0-1346-8752-0, Prentice-Hall, New Jersey, 744 pp.
- Kothare M V, Balakrishnan V and Morari M** (1996) Robust Constrained Model Predictive Control using Linear Matrix Inequalities. *Automatica*, 32(10): 1361-1379
- Kostic D, Jager B, Steinbuch M and Hensen R** (2004) Modeling and Identification for High-Performance Robot Control: An RRR-Robotic Arm Case Study. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12(6): 904-919.
- Kucuk S** (2009) A Dexterity Comparison for 3-DOF Planar Parallel Manipulators with Two Kinematic Chains using Genetic Algorithms. *Mechatronics*, 19(6): 868-877.
- Kucuk S and Bingul Z** (2005) Robot Workspace Optimization based on a Novel Local and Global Performance Indices. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, June 20-23, Dubrovnik, Croatia, 1593-1598.
- Kucuk S and Bingul Z** (2006) Comparative Study of Performance Indices for Fundamental Robot Manipulators. *Robotics and Autonomous Systems*, 54(7): 567-573.
- Kumar A and Waldron K J** (1981) The Workspaces of a Mechanical Manipulator. *Journal of Mechanical Design*, 103(3): 665-672.
- Kuo B C** (1987) *Automatic Control Systems*. 5th edition, ISBN: 0-130-55021-3, Prentice Hall, New Jersey, 736 pp.
- Kurtoğlu A** (2011) *Robot Tekniği*. ISBN: 978-605-4220-37-3, Papatya Yayıncılık, İstanbul, 284 s.
- Larsson C A, Annergren M and Hjalmarsson H** (2011) On Optimal Input Design in System Identification for Model Predictive Control. *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, December 12-15, Orlando, USA, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 978-1-61284-801-3, e-book, 805-810.
- Latombe J C** (2012) *Robot Motion Planning*. ISBN: 978-0-7923-9206-4, Springer Science & Business Media, New York, 650 pp.
- Lee S and Jung S** (2017) RLS Model Identification-based Robust Control for Gimbal Axis of Control Moment Gyroscope. *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, July 3-7, Munich, Germany, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 978-1-5090-6000-9, e-book, 584-589.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Lee S D and Jung S** (2018) A Compensation Approach for Nonlinear Gimbal Axis Drift of a Control Moment Gyroscope. *Mechatronics*, 50: 45-54.
- Lee J H, Morari M and Garcia C E** (1994) State-Space Interpretation of Model Predictive Control. *Automatica*, 30(4): 707-717.
- Lewis F L, Dawson D M and Abdallah C T** (2004) *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*. 2nd edition, ISBN: 0-8247-4072-6, Marcel Dekker, 607 pp.
- Li H, Ning X and Han B** (2017) Composite Decoupling Control of Gimbal Servo System in Double-Gimbaled Variable Speed CMG via Disturbance Observer. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(1): 312-320.
- Li Z and Cheng S** (2010) Torque Ripple Reduction in Brushless DC Motors Based on Model Predictive Control. *International Conference on Electrical and Control Engineering*, June 25-27, Wuhan, China, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 978-1-4244-6881-2, e-book, 4498-4501.
- Lin F and Brandt R D** (1998) An Optimal Control Approach to Robust Control of Robot Manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(1): 69-77.
- Liu Y and Bai E W** (2007) Iterative Identification of Hammerstein Systems. *Automatica*, 43(2): 346-354.
- Ljung L** (1999) *System Identification Theory for User*. 2nd edition, ISBN: 0-13-881640-9, Prentice Hall, New Jersey, 511 pp.
- Ljung L** (2010) Perspectives on System Identification. *Annual Reviews in Control*, 34(1): 1-12.
- Low K S and Zhuang H** (2000) Robust Model Predictive Control and Observer for Direct Drive Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15(6): 1018-1028.
- Luca A and Lucibello P** (1998) A General Algorithm for Dynamic Feedback Linearization of Robots with Elastic Joints. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 20-22, Leuven, Belgium, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 0-7803-4300-5, e-book, 504-510.
- Maalouf Aline I** (2006) Improving the Robustness of a Parallel Robot Using Predictive Functional Control (PFC) Tools. *45th IEEE Conference on Decision and Control*, December 13-15, San Diego, USA, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 1-4244-0171-2, e-book, 6468-6473.
- Mavroidis C and Ferreira A** (Ed.) (2013) *NanoRobotics: Current Approaches and Techniques*. ISBN: 978-1-4614-2118-4, Springer, New York, 467 pp.
- Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V and Scokaert P O** (2000) Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality. *Automatica*, 36(6): 789-814.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Melnikov V G** (2005) A New Method for Inertia Tensor and Center of Gravity Identification. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 63(5): 1377-1382.
- Mihelj M, Nef T and Riener R** (2007) ARMin II-7 DoF Rehabilitation Robot: Mechanics and Kinematics. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 10-14, Roma, Italy, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 1-4244-0601-3, e-book, 4120-4125.
- Min H, Sun F, Wang S and Li H** (2011) Distributed Adaptive Consensus Algorithm for Networked Euler-Lagrange Systems. *IET Control Theory and Applications*, 5(1): 145-154.
- Morari M and Lee J H** (1999) Model Predictive Control: Past, Present and Future. *Computers and Chemical Engineering*, 23(4): 667-682.
- Murphy R R** (2000) *Introduction to AI Robotics*. ISBN: 0-262-13383-0, The MIT Press, Massachusetts, 466 pp.
- Murphy S H, Wen J Y and Saridis G N** (1991) Simulation of Cooperating Robot Manipulators on a Mobile Platform. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(4): 468-478.
- Murray R M, Li Z and Sastry S S** (1994) *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. 1st edition, ISBN: 0-8493-7981-4, CRC Press, New York, 480 pp.
- Muske K R and Badgwell T A** (2002) Disturbance Modeling for Offset-Free Linear Model Predictive Control. *Journal of Process Control*, 12(5): 617-632.
- Mustafaraj G, Lowry G and Chen J** (2011) Prediction of Room Temperature and Relative Humidity by Autoregressive Linear and Nonlinear Neural Network Models for an Open Office. *Energy and Buildings*, 43(6): 1452-1460.
- Naderolasli A and Tabatabaei M** (2017) Stabilization of the Two-Axis Gimbal System based on an Adaptive Fractional-Order Sliding-Mode Controller. *IETE Journal of Research*, 63(1): 124-133.
- Narendra K and Gallman P** (1966) An Iterative Method for the Identification of Nonlinear Systems Using a Hammerstein Model. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11(3): 546-550.
- Ng A T and Tam P C** (2014) Current Status of Robot-Assisted Surgery. *Hong Kong Medical Journal*, 20(3): 241-250.
- Nguyen H G, Laird R, Kogut G, Andrews J, Fletcher B, Webber T, Arrieta R and Everett H R** (2009) Land, Sea, and Air Unmanned Systems Research and Development at SPAWAR Systems Center Pacific. *XI Unmanned Systems Technology*, April 14-17, Orlando, USA, 1-15.
- Okamura A M, Mataric M J and Christensen H I** (2010) Medical and Health-Care Robotics. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 17(3): 26-37.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Östring M, Gunnarsson S and Norrlöf M** (2003) Closed-Loop Identification of an Industrial Robot Containing Flexibilities. *Control Engineering Practice*, 11(3): 291-300.
- Pannocchia G and Kerrigan E C** (2005) Offset-Free Receding Horizon Control of Constrained Linear Systems. *AIChE Journal*, 51(12): 3134-3146.
- Peng H, Wu J, Inoussa G, Deng Q and Nakano K** (2009) Nonlinear System Modeling and Predictive Control using the RBF Nets-Based Quasi-Linear ARX Model. *Control Engineering Practice*, 17(1): 59-66.
- Pillonetto G** (2013) Consistent Identification of Wiener Systems: A Machine Learning Viewpoint. *Automatica*, 49(9): 2704-2712.
- Pillonetto G, Dinuzzo F, Chen T, De Nicolao G and Ljung L** (2014) Kernel Methods in System Identification, Machine Learning and Function Estimation: A Survey. *Automatica*, 50(3): 657-682.
- Privara S, Široký J, Ferkl L and Cigler J** (2011) Model Predictive Control of a Building Heating System: The First Experience. *Energy and Buildings*, 43(2): 564-572.
- Qin S J and Badgwell T A** (2003) A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice*, 11(7): 733-764.
- Ranković V, Grujović N, Divac D and Milivojević N** (2014) Development of Support Vector Regression Identification Model for Prediction of Dam Structural Behaviour. *Structural Safety*, 48: 33-39.
- Righetti L, Kalakrishnan M, Pastor P, Binney J, Kelly J, Voorhies R C, Sukhatme G S and Schaal S** (2014) An Autonomous Manipulation System Based on Force Control and Optimization. *Autonomous Robots*, 36(1-2): 11-30.
- Rodriguez J, Kazmierkowski M P, Espinoza J R, Zanchetta P, Abu-Rub H, Young H A and Rojas C A** (2013) State of the Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(2): 1003-1016.
- Rojo-Álvarez J L, Martínez-Ramón M, Prado-Cumplido M, Artés-Rodríguez A and Figueiras-Vidal A R** (2004) Support Vector Method for Robust ARMA System Identification. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52(1): 155-164.
- Sage H G, Mathelin M F and Ostertag E** (1999) Robust Control of Robot Manipulators: A Survey. *International Journal of Control*, 72(16): 1498-1522.
- Schilling R J** (1996) *Fundamentals of Robotics Analysis and Control*. ISBN: 0-1334-4433-3, Simon & Schuster Trade, 425 pp.
- Sciavicco L and Siciliano B** (2012) *Modelling and Control of Robot Manipulators*. 2nd edition, ISBN: 978-1-85233-221-1, Springer Science & Business Media, London, 377 pp.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Siegwart R, Nourbakhsh I R and Scaramuzza D** (2011) *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 2nd edition, ISBN: 978-0-262-01535-6, The MIT Press, Massachusetts, 455 pp.
- Slotine J J E and Li W** (1989) Composite Adaptive Control of Robot Manipulators. *Automatica*, 25(4): 509-519.
- Söderström T, Hong M, Schoukens J and Pintelon R** (2010) Accuracy Analysis of Time Domain Maximum Likelihood Method and Sample Maximum Likelihood Method for Errors-in-Variables and Output Error Identification. *Automatica*, 46(4): 721-727.
- Spong M W** (1992) On the Robust Control of Robot Manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(11): 1782-1786.
- Spong M W, Hutchinson S and Vidyasagar M** (2006) *Robot Modelling and Control*. 3rd edition, ISBN: 0-4717-6579-1, John Wiley&Sons, New York, 492 pp.
- Spong M W and Vidyasagar M** (2008) *Robot Dynamics and Control*. 3rd edition, ISBN: 978-8-1265-1780-0, John Wiley&Sons, New York, 352 pp.
- Springer P J** (2013) *Military Robots and Drones: A Reference Handbook*. ISBN: 978-1-59884-732-1, ABC-CLIO LLC, Santa Barbara, 299 pp.
- Stone H W** (1987) *Kinematic Modeling, Identification, and Control of Robotic Manipulators*. ISBN: 978-1-4612-9193-0, Kluwer Academic Publishers, Boston, 223 pp.
- Swevers J, Verdonck W and Schutter J** (2007) Dynamic Model Identification for Industrial Robots. *IEEE Control Systems*, 27(5): 58-71.
- Taghavi N and Sadr A** (2008) Piezoelectric Transducer Modeling: with System Identification (SI) Method. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 29: 296-301.
- Tatlicioglu E, Walker I D and Dawson D M** (2007) Dynamic Modelling for Planar Extensible Continuum Robot Manipulators. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 10-14, Roma, Italy, *IEEE Conference Publications*, ISBN: 1-4244-0601-3, e-book, 1357-1362.
- Thaly R, Shah K and Patel V R** (2007) Applications of Robots in Urology. *Journal of Robotic Surgery*, 1(1): 3-17.
- Ting J A, D'Souza A and Schaal S** (2011) Bayesian Robot System Identification with Input and Output Noise. *Neural Networks*, 24(1): 99-108.
- Tsai Y C and Soni A H** (1981) Accessible Region and Synthesis of Robot Arms. *Journal of Mechanical Design*, 103: 803-811.
- Voros J** (1999) Iterative Algorithm for Parameter Identification of Hammerstein Systems with Two-Segment Nonlinearities. *IEEE transactions on Automatic Control*, 44(11): 2145-2149.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Vuong N D and Ang M H** (2009) Dynamic Model Identification for Industrial robots. *Acta Polytechnica Hungarica*, 6(5): 51-68.
- Wang D Q** (2011) Least Squares-Based Recursive and Iterative Estimation for Output Error Moving Average Systems Using Data Filtering. *IET Control Theory and Applications*, 5(14): 1648-1657.
- Wang L** (2009) *Model Predictive Control System Design and Implementation using MATLAB*. ISBN: 978-1-84882-330-3, Springer, New York, 375 pp.
- Wang L C T and Chen C C** (1991) A Combined Optimization Method for Solving the Inverse Kinematics Problems of Mechanical Manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(4): 489-499.
- Wang Q G, Bi Q and Zou B** (1996) Parameter Identification of Continuous-Time Mechanical Systems without Sensing Accelerations. *Computers in Industry*, 28(3): 207-217.
- Welsch W M and Heunecke O** (2001) Models and Terminology for the Analysis of Geodetic Monitoring Observations. Official Report of the Ad-Hoc Committee of FIG Working Group, 6: 390-412.
- Weyer E** (2000) Finite Sample Properties of System Identification of ARX Models under Mixing Conditions. *Automatica*, 36(9): 1291-1299.
- Wit C C, Siciliano B and Bastin G** (2012) *Theory of Robot Control*. ISBN: 978-1-4471-1503-8, Springer Science & Business Media, London, 391 pp.
- Xia C, Wang Y and Shi T** (2013) Implementation of Finite-State Model Predictive Control for Commutation Torque Ripple Minimization of Permanent-Magnet Brushless DC Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(3): 896-905.
- Xu Z, Zhao J, Qian J and Zhu Y** (2009) Nonlinear MPC using an Identified LPV Model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(6): 3043-3051.
- Yao B and Tomizuka M** (1997) Adaptive Robust Control of SISO Nonlinear Systems in a Semi-Strict Feedback Form. *Automatica*, 33(5): 893-900.
- Ydstie B E** (1984) Extended Horizon Adaptive Control. *IFAC Proceedings Volumes*, 17(2): 911-915.
- Yu L, Zhang J, Liao Y and Ding J** (2008) Parameter Estimation Error Bounds for Hammerstein Nonlinear Finite Impulsive Response Models. *Applied Mathematics and Computation*, 202(2): 472-480.
- Yüksel İ** (2009) *Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri*. 6th edition, ISBN: 978-975-591-976-8, Nobel Yayın, Ankara, 403 s.
- Zhu Y** (2000) Identification of Hammerstein Models for Control Using ASYM. *International Journal of Control*, 73(18): 1692-1702.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Zhu Y** (2006) System Identification for Process Control: Recent Experience and Outlook. *International Federation of Automatic Control Proceedings Volumes*, 39(1): 20-32.
- Zhu Y, Patwardhan R, Wagner S B and Zhao J** (2013) Toward a Low Cost and High Performance MPC: The Role of System Identification. *Computers and Chemical Engineering*, 51: 124-135.





ÖZGEÇMİŞ

Aytaç ALTAN 1980 yılında Ankara’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Ankara’da tamamladı. Anadolu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden 2004 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. 2006 yılında Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektronik Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2013 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. Halen Bülent Ecevit Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Devreler ve Sistemler Teorisi Anabilim Dalında öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İncivez / Zonguldak

Tel : (+90) 372 291 25 50

E-posta : aytacaltan@beun.edu.tr