

TÜRKİYE CUMHURİYETİ
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PAN-TILT SİSTEMİ İÇİN ÇOK DEĞİŞKENLİ ORANSAL
İNTEGRAL TÜREVSEL KONTROL TASARIMI

Muhammed Taha KAYAOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Danışman
Doç. Dr. Akın DELİBAŞI

Mart, 2019

TÜRKİYE CUMHURİYETİ
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PAN-TILT SİSTEMİ İÇİN ÇOK DEĞİŞKENLİ ORANSAL İNTEGRAL
TÜREVSEL KONTROL TASARIMI

Muhammed Taha KAYAOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 27.03.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Akın DELİBAŞI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Akın DELİBAŞI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Şeref Naci ENGİN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi S. Murat YEŞİLOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Akın DELİBAŞI sorumluluğunda tarafımda hazırlanan PAN-TILT SİSTEMİ İÇİN ÇOK DEĞİŞKENLİ ORANSAL İNTEGRAL TÜREVSEL KONTROL TASARIMI başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammed Taha KAYAOĞLU

İmza

Aileme;



İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xii
1 Giriş	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Orijinal Katkı	4
2 Pan-tilt Sistemi Genel Yapısı	5
2.1 Pan-tilt Sisteminin Mekanik Yapısı	5
2.1.1 Hareket Mekanizması	5
2.1.2 Eyleyiciler	6
2.2 Pan-tilt Sisteminin Elektronik Yapısı	7
2.2.1 STM Mikro İşlemcisi	7
2.2.2 IMU Sensörü ve Arduino Mikro İşlemcisi	8
3 Pan-tilt Sistemi Modellemesi	12
3.1 Fiziksel Denklemlerle Modelleme	12
3.2 Sistem Tanımlama ile Modelleme	13
3.2.1 TGTÇ Sistem Tanımlama	13
3.2.2 ÇGÇÇ Sistem Tanımlama	16
4 Kontrol Tasarımı	19
4.1 TGTÇ Kontrol Tasarımı	19
4.1.1 LQR yöntemi ile TGTÇ Kontrol Tasarımı	19

4.1.2	Ziegler Nichols yöntemi ile TGTÇ Kontrol Tasarımı	21
4.1.3	TGTÇ Kontrolcülerin Karşılaştırılması	22
4.2	ÇGÇÇ Kontrol Tasarımı	23
5	Sonuç Ve Öneriler	27
A	SÇG Yöntemi Matlab Kodu	29
	Referanslar	32
	Tezden Üretilmiş Yayınlar	34



SİMGE LİSTESİ

ϕ	Yuvarlanma (roll) açısı
θ	Yunuslama (pitch) açısı
ψ	Yalpalama (yaw) açısı



KISALTMA LİSTESİ

ADC	Analog to Digital Converter
BMI	Bilinear Matrix Inequality
CPR	Counts Per Revolution
ÇGÇÇ	Çok Girişli Çok Çıkışlı
FIFO	First Input First Output
IMU	Inertial Measurement Unit
LMI	Linear Matrix Inequality
LQR	Linear Quadratic Regulator
MEMS	Mikro Elektriksel Mekaniksel Sistem
MIMO	Multi Input Multi Output
PWM	Pulse Width Modulation
SÇG	Statik Çıkış Geri Besleme
SDG	Statik Durum Geri Besleme
SISO	Single Input Single Output
SOF	Static Output Feedback
SSF	Static State Feedback
TGTÇ	Tek Girişli Tek Çıkışlı
ZN	Ziegler Nichols

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Pan-tilt sistemi	1
Şekil 1.2	Euler açıları	1
Şekil 2.1	Sistem bileşenleri	5
Şekil 2.2	SolidWORKS programında oluşturulan pan-tilt sistemi	6
Şekil 2.3	Eyleyici teknik çizimi	7
Şekil 2.4	STM32F407 geliştirme kiti	8
Şekil 2.5	Waijung yazılım yükleme arayüzü	9
Şekil 2.6	MPU9250 IMU sensörü	9
Şekil 3.1	Karışık sinüzoidal sinyal uygulanan model 1, model 5 ve gerçek sistemin karşılaştırılması	15
Şekil 3.2	Model 1 ile deney çıktılarının karşılaştırma grafiği	18
Şekil 4.1	Türev korumalı ayrık zamanlı PID yapısı	22
Şekil 4.2	Bozucu etki altında LQR-PID kontrol karşılaştırması	23
Şekil 5.1	Pan eksenine etki eden bozucuya karşı kontrolcü yanıtları	28

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Eyleyici genel özellikleri	6
Tablo 2.2	MPU9250 sensörünün temel karakteristiği	10
Tablo 3.1	TGTÇ modellerin hata normları	15
Tablo 3.2	ÇGÇÇ modellerin hata normları	17
Tablo 4.1	ZN PID kontrol katsayı tablosu	22
Tablo 4.2	ÇGÇÇ PID kontrol katsayıları	26

PAN-TILT SİSTEMİ İÇİN ÇOK DEĞİŞKENLİ ORANSAL İNTEGRAL TÜREVSEL KONTROL TASARIMI

Muhammed Taha KAYAOĞLU

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Akın DELİBAŞI

Bu çalışmada, pan-tilt sistemine etki eden harici kuvvetlere karşı kararlılık, farklı kontrol yapıları ile sağlanmaya çalışılmaktadır. Pan-tilt sistemi oldukça geniş alanlarda ve farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle, bulunduğu platform hareket ederken belirli bir hedefe bir sensörle (kamera, lazer mesafe bulucu vb.) işaret etme ihtiyacı için kullanılabilir. Pan-tilt sistemi, eyleyiciler tarafından tahrik edilen iki döner (pan ve tilt) ekleme sahiptir. Matematiksel eksen takımına göre, pan kısmı sistemi z ekseninde (yalpalama) ve tilt kısmı sistemi x ekseninde (yuvarlanma) döndürmektedir.

Kontrol yapısı tasarlamak için sistem yapısı hakkında bilgiye ihtiyacımız vardır. Bu çalışmada sistem modeli iki yöntem kullanılarak elde edilmektedir. Birinci yöntem, sistemi matematiksel denklemlerle ifade etmektir. Pan-tilt sistemi, iki serbestlik dereceli bir robotik sistem olduğundan dolayı, Lagrange-Euler denklemi ile modellenmektedir. Sistem modellemede ikinci yöntem ise sistem tanımlama (system identification) ve parametre kestirimi (parameter estimation) yöntemidir. Sistem tanımlama yönteminde, sistem modelinin transfer fonksiyonunu elde etmek için deneysel verilerden yararlanılmaktadır. Parametre kestirim yönteminde ise, matematiksel denklemlerle parametrik olarak tanımlanan sistem yapısının (transfer fonksiyonu veya durum uzay modeli) parametre değerleri kestirilmeye çalışılmaktadır.

Pan tilt sisteminin donanım yapısı; iki adet eyleyici, ana mekanik platform, iki adet programlanabilir kart ve MEMS (Mikro-Elektriksel-Mekaniksel Sistem) sensöründen oluşmaktadır. Sistemin eyleyicisi için, enkoderli ve redüktörlü dc motor tercih

edilmiştir. Deneylerde kullanılan pan tilt sisteminin mekanik parçaları, SOLIDWORKS programında tasarlanarak üç boyutlu yazıcıdan çıktı alınmaktadır. Pan tilt sisteminin ana işlemcisi, STMicroelectronics yarıiletken firmasının ürettiği STM32F407 arm tabanlı mikro işlemcidir. Diğer programlanabilir kart ise açık kaynak elektronik platform olan Arduino'dur. Bu çalışmada Arduino, platformun aç bilgilerini MEMS sensöründen okumak için kullanılmaktadır. MEMS sensörü; açı ölçer, ivme ölçer ve pesula sensörlerinin bir bordda birleştirilmesiyle oluşmaktadır.

Pan tilt sistemi iki girişli üç çıkışlı olmak üzere ÇGÇÇ bir sistemdir. Bu sistemi kontrol etmek için farklı yapılarıdaki iki yöntem (merkezi-coupled ve merkezi olmayan-decoupled ÇGÇÇ) karşılaştırılmaktadır. Birinci yöntem; sistem temel olarak iki ortagonal yapının yanca ve yükselişcedeki hareketinin kontrolü olarak kabul edildiğinde iki sistem birbirinden ayrılabilir. Bu şekilde sistem iki tane tek giriş tek çıkış (TGTÇ) yapı olarak ayrıştırılıp incelenerek kontrol yapısı tasarlanabilmektedir. Böylece bu iki yapı birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Bu TGTÇ kontrolcü için PID ve LQR yöntemleri karşılaştırılmaktadır. İkinci yöntem ise; sistem mükemmele yakın imal edilerek ortagonal konumlandırılırsa bile, eksenlerin açısız hız etkileri yüksek atalette ihmal edilemez boyutlara gelebilmektedir. Yani herhangi bir eksene uygulanan giriş gerilimi sadece kendi eksenini değil diğer eksenleri de etkileyebilmektedir. Bu yapı merkezi ÇGÇÇ sistem olarak isimlendirilmektedir. ÇGÇÇ kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi için literatürde birçok yöntem bulunmaktadır. Statik Çıkış Geri Besleme (SÇG) ve Statik Durum Geri Besleme (SDG) yöntemleri araştırılmaktadır.

Bu çalışmada; merkezi ÇGÇÇ kontrol yapılarından SÇG yöntemi ve merkezi olmayan ÇGÇÇ kontrolcü yapıları için Ziegler-Nichols tabanlı PID yöntemi karşılaştırılıp sonuçlar sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Pan tilt sistemi, statik çıkış geribesleme, ÇGÇÇ PID, sistem tanımlama, parametre kestirimi

ABSTRACT

MULTIVARIABLE PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE CONTROL DESIGN FOR PAN-TILT SYSTEM

Muhammed Taha KAYAOĞLU

Control and Automation Engineering
Master of Science Thesis

Advisor: Doç. Dr. Akın DELİBAŞI

In this study, the stability against external forces acting on pan-tilt system is tried to be provided with different control structures. Pan-tilt system is used in very large areas and different applications. In particular, The platform where it is located can be used for the need to indicate a sensor(camera, laser, etc.) to a specific target while moving. The pan-tilt system has two rotary part (pan and tilt), driven by actuators, with two degrees of freedom. According to the mathematical axis set, the pan part rotates the system in the z-axis (yawing) and the tilt part rotates the system in the x-axis (rolling).

We need information about the system model to design the control structure. In this study, the system model is obtained by using two methods. The first method is to express the system with mathematical equations. Since the pan-tilt system is a two degree of freedom robot system, it can be modeled by the Lagrange-Euler equation. The second methods for system modeling are system identification and parameter estimation. In the system identification method, experimental data are used to obtain the transfer function of the system model. In the parameter estimation method, the parameter values of the system structure (transfer function or state space model) which is defined parametrically with mathematical equations are tried to be estimated.

Hardware structure of pan tilt system; two actuators, main mechanical platform, two programmable cards and MEMS (Micro-Electrical-Mechanical System) sensor. For the actuator of the system, dc motor with encoder and gearbox is preferred. Mechanical parts of the pan tilt system used in the experiments are designed in the SOLIDWORKS program and output is printed on the three-dimensional printer. The main processor

of the pan tilt system is the STM32F407 arm based microprocessor manufactured by the STMicroelectronics semiconductor company. The other programmable card is Arduino, an open-source electronic platform. In this study, Arduino is used to read the angle information of the platform from the MEMS sensor. MEMS sensor; gyroscope, accelerometer and magnetometer sensors are formed by combining a board.

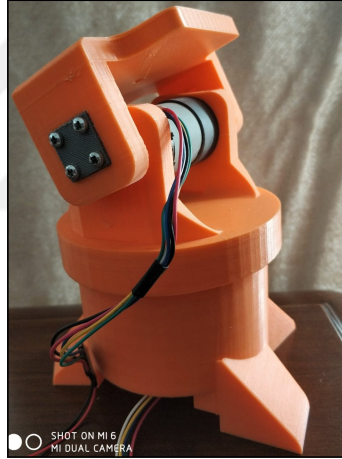
Pan tilt is a system with two inputs and three outputs. In order to control this system, two methods in different structures (coupled and decoupled MIMO) are compared. The first method; the two systems can be separated as the system is basically considered as the control of the movement of the two orthogonal structures in the highway and sideway movement. In this way, the system can be divided into two single input single output (SISO) structures and the control structure can be designed. Thus, these two structures can be controlled independently of each other. PID and LQR methods are compared for this SISO control. The second method; Even if the system is positioned close to perfection and positioned orthogonal, the angular velocity effects of the axes can be negligible in high inertia. That is, the input voltage applied to any axis can affect not only its axis but also other axes. This structure is called as the coupled MIMO system. There are many methods in the literature for the determination of the MIMO control parameters. Static output feedback (SOF) and static state feedback (SSF) methods are investigated.

In this study; SOF base method of coupled MIMO methods are compared with Ziegler-Nichols based PID method for decoupled SISO controller design.

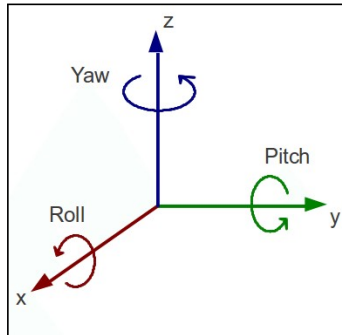
Keywords: Pan tilt system, static output feedback, MIMO PID, system identification, parameter estimation

1.1 Literatür Özeti

Pan tilt sistemi, iki serbestlik dereceli olmak üzere, eyleyicilerin tahrik ettiği iki döner ekleme sahiptir. Şekil 1.2’de pan-tilt sisteminin matematiksel eksen takımı verilmektedir. Şekil 1.1’de verilen pan-tilt sistemi için, pan kısmı sistemi z ekseninde (ψ) ve tilt kısmı ise sistemi x ekseninde (ϕ) döndürmektedir [1].



Şekil 1.1 Pan-tilt sistemi



Şekil 1.2 Euler açıları

Pan tilt sistemi oldukça geniş alanda ve farklı uygulamalarda kullanılabilmektedir. Özellikle bulunduğu platform hareket ederken belirli bir hedefe bir sensör (kamera,

lazer mesafe bulucu vb.) işaret etme ihtiyacı için kullanılabilir [2]. Pan tilt sisteminin en yaygın kullanıldığı alan güvenlidir. İnsan hayatını riske atmadan tehditleri güvenilir şekilde bertaraf etmek için kullanılmaktadır. İnsansız sistemlerin (insansız araçların üzerindeki Pan-tilt sistemleri), kritik güvenlik rolleri için insan gücüne olan ihtiyacı azaltarak insan hayatını korumaktadır. Güvenlik ve savunma uygulamalarından bazıları; hedef algılama, istihbarat, keşif ve gözetleme, sınır devriyesi, arama ve kurtarma, eğlence ve çevresel izleme örnek olarak verilebilmektedir.

Pan tilt sistemine uygun bir kontrol yapısı tasarlamak için sistem yapısı hakkında bilgiye ihtiyacımız vardır. Bu çalışmada sistem modeli, iki yöntem kullanılarak elde edilmektedir. Birinci yöntem, sistemi matematiksel denklemlerle ifade etmektir. Lagrange-Euler denklemi, robotik sistemlerin matematiksel formülasyonu olarak kabul görmektedir. Pan tilt sistemi iki serbestlik dereceli bir robotik sistem olduğundan dolayı Lagrange-Euler denklemi ile modellenmektedir [3]. Sistem modellemede ikinci yöntem ise sistem tanımlama (system identification) yöntemidir. Sistem tanımlama yönteminde, sistem modelinin transfer fonksiyonunu elde etmek için deneysel verilerden yararlanılmaktadır. Uygulaması kolay ve işlem yükü fizik kanunlarıyla karşılaştırıldığında daha azdır. Pan tilt modelinin transfer fonksiyonu, açık çevrim sistemin giriş ve çıkış deneysel verileri kullanılarak elde edilmektedir. Giriş sinyali frekans ve genlik açısından zengin olmalıdır [4].

Pan tilt sisteminin donanım yapısı iki adet eyleyici, ana mekanik platform, iki adet programlanabilir kart ve MEMS sensöründen oluşmaktadır. Sistem eyleyicileri boyut, şekil, güç ve maliyet bakımından kapsamlı bir araştırma sonucunda, enkoderli ve redüktörlü dc motor tercih edilmektedir [5][6]. Deneylerde kullanılan pan tilt sisteminin mekanik parçaları, SOLIDWORKS programında tasarlanarak üç boyutlu yazıcıdan çıktı alınmaktadır. Bu parçalar eyleyicilerden tahrik alacak şekilde birleştirilerek Şekil 1.1'deki yapı oluşmaktadır. Pan tilt sisteminin ana işlemcisi, STMicroelectronics yarıiletken firmasının ürettiği STM32F407 arm tabanlı mikro işlemci, dünyanın en yüksek performansa sahip korteks (cortex) M4 serisi, 32 bit ve 168 MHz frekansa kadar çıkabilen mikro işlemcilerindendir [7]. Diğer programlanabilir kart ise açık kaynak elektronik platform olan Arduino'dur [8]. Bu çalışmada Arduino, platformun açılı bilgilerini MEMS sensöründen okumak için kullanılmaktadır. MEMS sensörü; açı ölçer, ivme ölçer ve pusula sensörlerinin bir bordda birleştirilmesiyle oluşmaktadır [9].

Pan tilt sistemi iki girişli üç çıkışlı bir sistemdir. Sistem temel olarak iki ortogonal yapının yancadaki ve yükselişcedeki hareketinin kontrolü olarak kabul edildiğinde iki sistem birbirinden ayrılabilir. Bu şekilde sistem iki tane tek giriş tek çıkış (TGTC)

yapı olarak ayrıştırılıp incelenerek kontrol yapısı tasarlanabilmektedir [10]. Bu iki yapıyı ayrı ayrı kontrol etmek için iki adet PID kontrol yapısı kullanılmaktadır. Bu kısımda (ayrık sistemin) PID katsayıları deneysel olarak Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanmaktadır [11].

Pan tilt sistemi çok girişli çok çıkışlı (ÇGÇÇ) bir sistem olmak üzere her ne kadar sistem mükemmele yakın imal edilerek ortagonal konumlandırılrsa da, eksenlerin açısız hız etkileri yüksek atalette ihmal edilemez boyutlara gelebilmektedir. Yani, herhangi bir eksene uygulanan giriş gerilimi sadece kendi eksenini değil diğer eksenleri de etkileyebilmektedir. Bu durum merkezi ÇGÇÇ sistem olarak isimlendirilmektedir. ÇGÇÇ kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi için literatürde birçok yöntem bulunmaktadır. [12], [10] çalışmalarının ana fikri, kontrolcü parametresini belirleme problemini statik çıkış geri besleme (SÇG) problemine dönüştürmektir. Daha sonra kontrolcü parametreleri, optimizasyon problemine dönüşen bu yapı sayesinde, doğrusal olmayan matris eşitsizlikleri (BMI) kullanılarak belirlenmektedir [13]. Bir diğer yöntem, PID kontrol tasarım problemini, LQR (linear Quadratic Regulator) tabanlı optimizasyon yöntemi ile statik durum geri besleme (SDG) tasarımına dönüştürmektir [14] [15]. Bir diğer SDG çalışması ise, lineer matris eşitsizlikleri (LMI) tabanlı dışbükey optimizasyon yöntemlerinin etkinliğini PID kontrol yapısı ile birleştirmektedir [16]. [17] numaralı çalışmada, ÇGÇÇ sistemler için yeni dayanıklı PID kontrol tasarımından bahsedilmektedir.

Bu tezin içeriği şu şekilde tasarlanmıştır: Birinci bölüm; Literatür özeti, amacı ve orijinal katkı verilmektedir. İkinci bölüm; pan-tilt sistemini oluşturan komponentler ve açıklamaları sunulmaktadır. Üçüncü bölüm; pan-tilt sistem modelinin eldesi için kullanılan yöntemler sunulmaktadır. Dördüncü bölüm; araştırılan veya hem araştırılıp hemde uygulanan kontrol tasarımları hakkında bilgi verilmektedir. Beşinci bölümde ise; farklı kontrolcü yapıları performans bakımından karşılaştırılmaktadır.

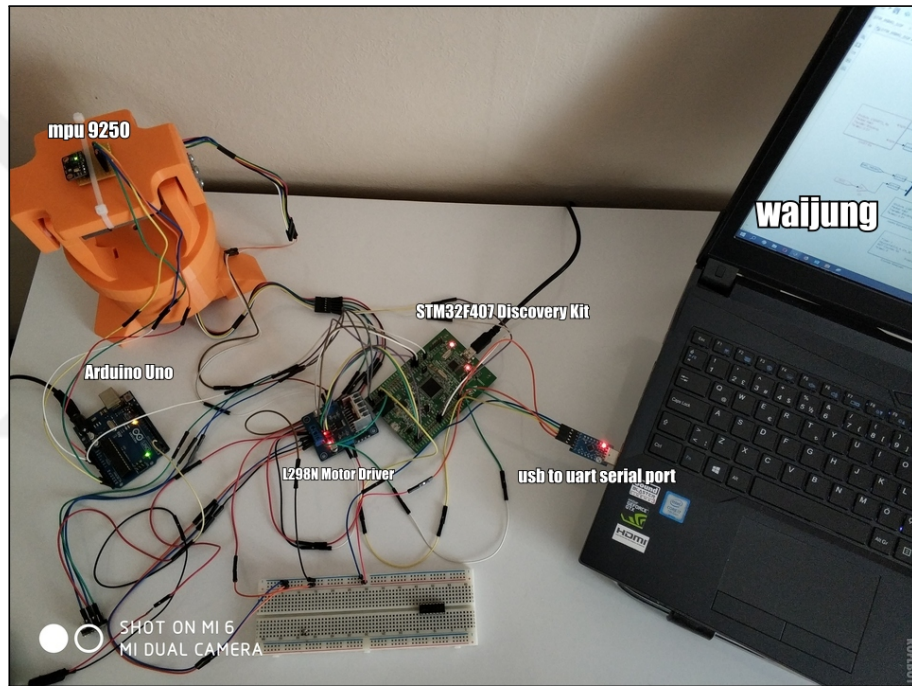
1.2 Tezin Amacı

Bu çalışma, Pan tilt sistemi için TGTÇ mantığı ile yaygın yapılan tasarımın, ÇGÇÇ mantığı ile yapılan tasarıma göre eksikliklerinin araştırılması ve bu iki yöntemin uygulama üzerinde karşılaştırılmasına dayanmaktadır.

1.3 Orijinal Katkı

PID kontrolün endüstri dünyasındaki ününden dolayı, PID kontrol katsayılarını belirleme alanında birçok yaklaşım bulunmaktadır. Mevcut yaklaşımların çoğu arasında, iki genel varsayım geçerlidir: (i) sistem yapısı, TGTÇ sistemler şeklinde veya ayrıştırılabilmektedir; (ii) muhtemelen artı ölü zaman olan birinci veya ikinci dereceden sistemler olarak modellenebilmektedir. Çok sayıda endüstriyel işlemde bu varsayımlar yeterince iyi karşılanmasına rağmen, birleşik (coupled) ÇGÇÇ formda olan ve birinci veya ikinci dereceden sistemler tarafından iyi bir şekilde tanımlanamayan birçok sistem bulunmaktadır. Bu nedenle, ÇGÇÇ yüksek dereceli sistemlerde kullanılacak, PID kontrol parametrelerini belirlemek için etkili yöntemler geliştirmek oldukça arzu edilmektedir [10]. Bizim katkımız ise bu yaklaşımın pan tilt sistemi üzerindeki başarısının doğrulanmasıdır.

Şekil 2.1’de sunulan pan-tilt sistemi bileşenleri bu bölümde açıklanmaktadır.



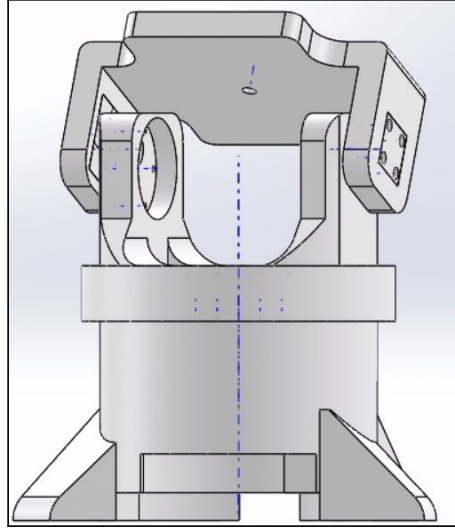
Şekil 2.1 Sistem bileşenleri

2.1 Pan-tilt Sisteminin Mekanik Yapısı

2.1.1 Hareket Mekanizması

Deneylerde kullanılan pan tilt sisteminin mekanik parçaları, SolidWORKS (üç boyutlu çizim programı) programında tasarlanarak üç boyutlu yazıcıdan çıktı alınmaktadır.

Süreç şu şekilde ilerlemiştir: Sistemin üç boyutlu çizimi tamamlanarak Şekil 2.2’deki gibi montajı yapılmaktadır. Bundan sonraki süreçte, çizimler üç boyutlu yazıcının anlayacağı .STL formatına dönüştürülmektedir. Daha sonra, mekanizmanın hangi malzemeden oluşturulacağı ve malzeme yoğunluğunun ne olacağı ayarlanmaktadır.



Şekil 2.2 SolidWORKS programında oluşturulan pan-tilt sistemi

Son olarak, bu parçalar eyleyicilerden tahrik alacak şekilde birleştirilerek Şekil 1.1'deki yapı oluşmaktadır.

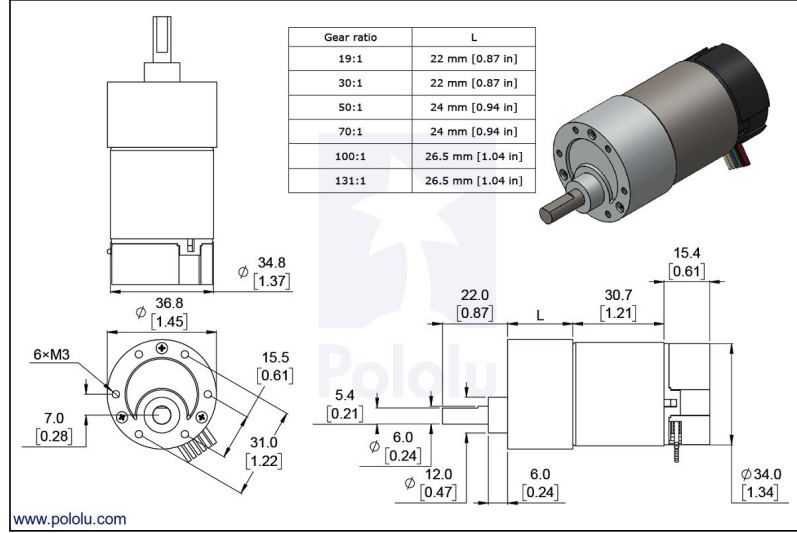
2.1.2 Eyleyiciler

Çalışmada kullanılmak amacıyla en uygun eyleyici; boyut, şekil, güç ve maliyet bakımından araştırılarak tercih edilmiştir. Eyleyici, pan-tilt sisteminde elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirerek eksenlerde dönme hareketi sağlamaktadır. 12 volt metal redüktörlü fırçalı eyleyici, 18,75:1 redüktör oranına sahiptir. Ayrıca şaft miline sabitlenmiş encoder ile eyleyici şaftının her dönüşünde 64 (CPR) sayım (counts) çözünürlük sağlamaktadır.

Tablo 2.1 Eyleyici genel özellikleri

	12 V gerilimde	6 V gerilimde
Yüksüz hız	500 rpm	256 rpm
Yüksüz akım	300 mA	250 mA
Yüklü akım	5000 mA	2500 mA
Yüklü tork	84 oz·in	42 oz·in

Tablo 2.1'de eyleyici %100 ve %50 PWM'de farklı durumlar (yüklü ve yüksüz) için üretilen hız, akım ve tork değerleri sunulmaktadır. Pan-tilt sisteminin üç boyutlu tasarımında, eyleyicilerin teknik çizimleri (Şekil 2.3) ve konumlandırılmaları yapının kilit noktalarındandır [18].



Şekil 2.3 Eyleyici teknik çizimi

2.2 Pan-tilt Sisteminin Elektronik Yapısı

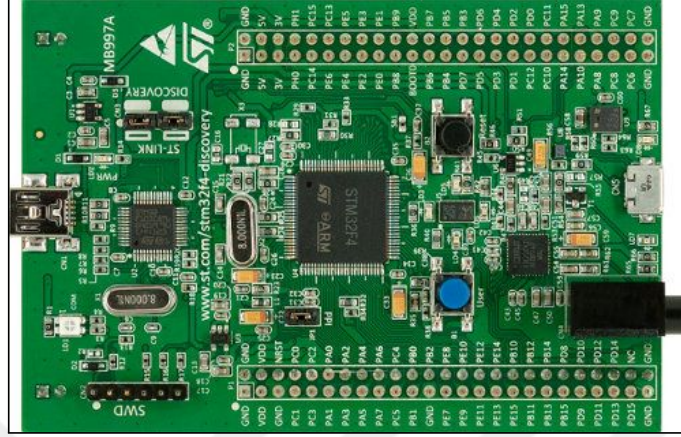
Bu çalışmada L298N çift tam köprü (dual full-bridge) motor sürücüsü, MPU 9250 9 serbestlik dereceli (DOF) hareket sensörü, Arduino UNO ve ARM tabanlı STM32F407 geliştirme kiti kullanılmaktadır.

2.2.1 STM Mikro İşlemcisi

STMicroelectronics yarıiletken firmasının ürettiği STM32F407 arm tabanlı mikro işlemci, dünyanın en yüksek performansa sahip korteks (cortex) M4 serisi, 32 bit ve 168 MHz frekansa kadar çıkabilen mikro işlemcilerindendir. Şekil 2.4'deki STM32F407 geliştirme kitinin genel özellikleri [7];

1. 1 Mbyte flash bellek ve 192 KB RAM,
2. Harici uygulama gerilimi 3 ve 5 volt,
3. Kullanıcı ve reset olmak üzere iki buton,
4. Elektronik kart iki şekilde beslenebilmektedir: USB ile bilgisayardan yada 5 V harici güç kaynağıyla,
5. 1,8 V'dan 3,6 V'a kadar uygulama gerilimi, çıkış ve giriş pinleri,
6. 4-26 Mhz kristal osilatör,
7. Uyku (sleep), durdurma (stop) ve bekleme (standby) modları,
8. 2x12 bit dijitalden analoğa dönüştürücü

9. 3x12 bit analogdan dijitala dönüştürücü
10. 17 zamanlayıcı (timer): 168 Mhz frekansa kadar ayarlanabilen 12 tanesi 16 bit, 2 tanesi ise 32 bit.



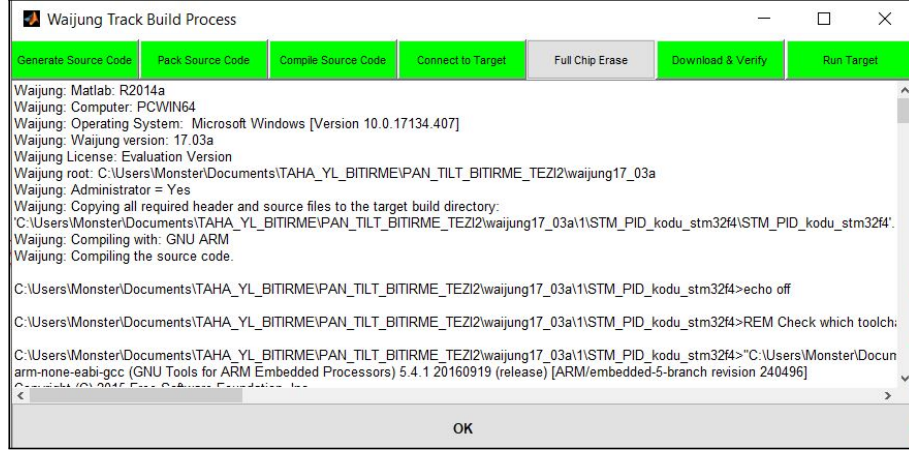
Şekil 2.4 STM32F407 geliştirme kiti

Geliştirici Matlab Simulink ortamı üzerinden Waijung bloklarını kullanarak model dosyası oluşturmaktadır. Daha sonra, oluşturulan model derlenerek gömülü işlemcinin anlayabileceği C kodunu dönüştürülmekte ve STM32F4 geliştirme kitinin mikro kontrolörüne yüklenmektedir. Waijung, kullanıcıların bu geliştirme kitinde Simulink modelleri oluşturmasını ve gerçek zamanlı çalıştırmasına olanak sağlayan bir (STM32F4 geliştirme kiti için) destek paketidir. Waijung, kart çevre birimlerini yapılandırmak ve erişmek için Simulink bloklarından oluşan bir kütüphane içermektedir. STM32F4 için gömülü kodlayıcılardan biri olan Matlab tabanlı Waijung blok seti ile birlikte diğer işleyiş araçlarını kullanarak, gerçek zamanlı olarak geliştirilmiş simulink modeli, kolaylıkla işlemciye yüklenebilmektedir. Waijung'dan Simulink'e taşınan ADC, DAC, GPIO ve zamanlayıcılar gibi her bir blok için gereksinimlere göre parametre ayarı yapılabilmektedir [19] [20].

Modeli işletebilmek için STM32F4 geliştirme kiti ve USB kablosu (tip A'dan mini B'ye) olmak üzere iki donanıma ihtiyaç duyulmaktadır. Waijung blok setini kullanabilmek için STM link utility sürücüsü ve Waijung yazılımı yüklenmelidir. Simulink'te model oluşturulduktan sonra derleme tuşuna basılarak Şekil 2.5'deki arayüz ortaya çıkmaktadır. Bu arayüzde, modelin kaynak kodunun oluşturulmasından başlayıp işlemciye yüklenmesine kadar bütün süreçler sunulmaktadır.

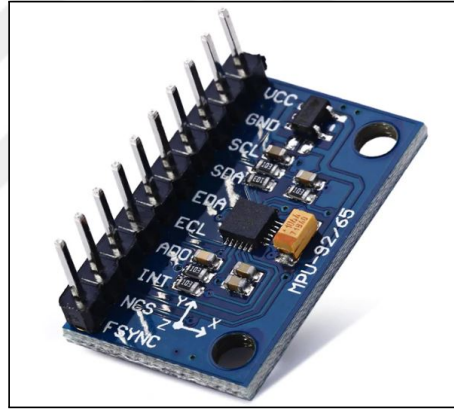
2.2.2 IMU Sensörü ve Arduino Mikro İşlemcisi

İki serbestlik dereceli platformun hareket açıları Şekil 2.6'da sunulan MPU9250 isimli IMU (Inertial Measurement Unit) sensörüyle ölçülmektedir. Bu sensör ivme ölçer ve



Şekil 2.5 Waijung yazılım yükleme arayüzü

açı ölçer birimlerini bir çipte birleştiren MPU6050 [21] ve üç eksenli dijital pusula (manyetik alan ölçer olarak da bilinir) AK8963 [22] sensörlerinin birleşiminden oluşan elektronik devredir.



Şekil 2.6 MPU9250 IMU sensörü

MPU9250 sensörünü tercih etmemizin sebebi, arduino ile sensör gereksinimleri tarafından talep edilen özellikleri sağlaması ve birbiriyle uyumlu bir şekilde çalışmalarınıdır. Bu sensör ve ATmega328 (Arduino CPU'su) birlikte geniş uygulama alanına sahip olması tercih sebeplerinden başka biridir. Ayrıca ihtiyaçlarımız için kullanılabilecek birçok örnek Arduino kütüphanesi bulunmaktadır. Diğer bir önemli özelliği, çalışmadaki gereksinimleri karşılayacak şekilde boyut olarak küçük ve hafif olmasıdır.

MPU9250; ivme ölçer, açı ölçer ve pusula çıktılarını ayırklaştırmak için 16 bit ADC (analogdan dijitale çevirici) kullanmaktadır. Bu sensör, ATmega328 ile 400 kHz frekansta I^2C iletişim şekli ile veri aktarımında bulunabilmektedir. ATmega328, MPU9250 ölçümlerini FIFO (ilk giren ilk çıkar) buffer kullanarak okuyabilmektedir. MPU9250 farklı yönlere döndürülerek Arduino'nun arayüzünden beklenen değerlere

[23]

Tablo 2.2 MPU9250 sensörünün temel karakteristiği

	İvme Ölçer	Açı Ölçer	Pusula
Menzil	$\pm 2, \pm 4, \pm 8$ ve ± 16 g	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000$ ve $\pm 2000^\circ/s$	$\pm 4800 \mu T$
Çözünürlük	0,0006 - 0,00479 m/s^2	0,00763 - 0,06098° /s	0,6 $\mu T/LSB$ (14 bit) veya 15 $\mu T/LSB$ (16 bit)
Başlangıç Kayma	X, Y: 60 mg; Z: 80 mg	$\pm 5^\circ /s$	5%
Başlangıç Ölçek Etmen Dağılımı	3%	3%	
Doğrusallık Oranı	99,9%	99,9%	

uygunluğu gerçek zamanlı olarak takip edilmektedir. Böylece I^2C haberleşme protokolü test edilmektedir. Tablo 2.2’de MPU9250 9 serbestlik dereceli sensörünün başlangıç temel parametre değerleri verilmektedir [9].

2.2.2.1 IMU Sensörünün Kalibrasyonu

Bu bölümde ivme ölçer, açı ölçer ve pusulanın ofset, kayma (drift) ve gürültü (noise) hataları açıklanmakta ve düzeltilme yöntemlerinden bahsedilmektedir.

Ofset, ölçümün ortalama değerinin sıfıra olan uzaklığıdır. Her ne kadar sensörler üretildiğinde kalibrasyon yapılsada, sensörün borda yerleştirilme esnasında yanlış hizalama hatası ortaya çıkmaktadır. Açı ölçerin ofset hatası, sensör hareketsiz bir platforma sabitlenerek üç ekseninde açısal hız ölçülerek bulunmaktadır. Bu ofseti düzeltmek için ortalama değer ölçülen verilerden çıkartılmalıdır. İvme ölçer, yer çekimi kuvvetinden kaynaklanan oldukça büyük ofset değerlerine sahiptir. Fakat bu yer çekimi katsayısı, MPU9250 sensörünün z ekseninde konumlandırılmasıyla kolaylıkla ulaşılabilir. Yerçekiminden başka ofset değerleri açı ölçerdeki yöntemle hesaplanmaktadır [9].

Pusula, ivme ölçere benzer olarak daha küçük fakat farkedilebilir ofset algılamaktadır. Pusulalar yönelimi hesaplamak için kullanılmaktadır ve bunun için yeryüzündeki manyetik alanın algılanması gerekmektedir. Etki eden bozucular, hard-iron ve soft-iron kayıpları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Hard-iron kayıpları, çiplerin kalıcı olarak mıknatıslanmış bileşenlerinden ve soft-iron kayıpları, akımları normalde manyetik olmayan bileşenlerin indüklenen jeomanyetik alanından kaynaklanmaktadır. hard-iron kayıplarının hesaplanması ve düzeltilmesi kolaydır,

Çünkü cihazın oryantasyonuna ve konumuna bakılmaksızın sabit kalmaktadırlar [9].

Özellikle ivme ölçer ve pusula ölçümleri oldukça gürültürlüdür. Bu gürültüleri engellemek için ölçümler filtrelenmektedir. Alçak geçiren filtrenin yanıt süresi uzun olduğu için farklı koşullar eklenerek daha gelişmiş ve hızlı yapıya dönüştürölerek bu çalışmada kullanılmaktadır. Ayrıntılı bilgi için [9] yayını incelenebilir.

Platformun oryantasyonunu hesaplamak için MPU9250'nin mevcut açı / oryantasyon değeri bilinmelidir. Açı ölçer ve ivme ölçer değeri birleştirilerek sensörün göreceli yönünü hesaplamak mümkündür, ancak ivme ölçerler zaman içinde kayma eğilimindedir. İvme ölçer ve pusula, yerçekimi ve yeryüzü manyetik alanına göre yönelimi belirlemek için kullanılabilir, ancak çok gürültürlüdürler. Complementary filtre, ivme ölçer ve pusula ölçümlerini kullanarak açı ölçer sapmasını telafi etmek için kullanılabilir. Açı ölçerlerin ölçümleri kısa vadede güvenilir olmasına rağmen uzun vadede güvenilirmezdir. İvme ölçerlerde ve pusulalarda kaymadan dolayı kısa vadede güvenilirmez ancak uzun vadede güvenilirlerdir. Bu nedenle, açı ölçerlerin güvenilirliğini kısa vadede, ivme ölçerlerin ve pusulaların güvenilirliğini, uzun vadede tamamlayıcı bir filtre kullanarak birleştirmek doğru bir yönlendirme tahmini vermektedir.

Çalışmada kullanılan pan/tilt sistemi iki yöntem ile modellenmektedir. Bu yöntemlerden birincisi, sistemin fiziksel hareketlerini matematiksel eşitlikler kullanarak modelleme yöntemidir. Diğer yöntem ise sistem tanımlama (system identification) ile modellemedir. Sistem tanımlama yönteminde pan/tilt yapısı kara kutu (black box) olarak göz önüne alınmakta ve sistemin giriş ve çıkışlarına göre transfer fonksiyonu elde edilmektedir.

3.1 Fiziksel Denklemlerle Modelleme

Pan-tilt yapısındaki eksenel hareketler, iki ekseninde bulunan eyleyiciler tarafından oluşturulmaktadır. Eyleyicilerin sistemdeki görevi, elektrik enerjisini harekete dönüştürmektir. Eyleyici hareketini ifade eden genel diferansiyel denklemleri (3.1), (3.2)'de verilmektedir .

$$V = L \frac{di}{dt} + iR + k_b w \quad (3.1)$$

$$J = \frac{dw}{dt} k_t i + T_d \quad (3.2)$$

Burada [6];

w : motor sürati, V : motor terminal gerilimi, i : sarım (winding) akımı

k_b : motorun geri elektro motor kuvvet sabiti, k_t : moment sabiti,

R : terminal direnci L : terminal indüktansı,

J : motor ve yük ataleti, T_d : bozucu moment

Bir eksenin parametrik transfer fonksiyonu, (3.1) ve (3.2) denklemlerinin Laplace dönüşümü ile elde edilmektedir. Matlab Simulink programı kullanılarak parametre kestirim (parameter estimation) yöntemi ile bilinmeyen denklem sabitlerine ulaşılmaktadır. Eksenler ayrı ayrı tek giriş tek çıkış model olarak düşünülerek parametre kestirimi yapılmaktadır. Bu yöntem sistem tanımlama yöntemlerinden biridir.

Pan-tilt sistemi iki eksenli bir robot olarak düşünülebilir. Bundan dolayı, robotik sistemlerin matematiksel formülasyonu olarak kabul edilen Lagrange-Euler denklemi pan-tilt sistemi için de kullanılabilir. Bu denklem, robot eklemlerine harici olarak etki eden kuvvet ve momentlere göre sistemin nasıl hareket edeceğini ifade etmektedir. Doğrusal olmayan Lagrange-Euler denklemi, (3.3)'de verilmektedir.

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + b(\dot{\theta}) + h(\theta) \quad (3.3)$$

Burada,

- $M(\theta)$: atalet matrisi
- $C(\theta, \dot{\theta})$: Coriolis matrisi
- $b(\dot{\theta})$: merkezkaç matrisi
- $h(\theta)$: yerçekimi vektörü
- θ : eklem açıları ve

τ ; harekete geçirme (actuation) momentini, $M(\theta)$; simetrik ve pozitif tanımlı atalet matrisini, θ ; hem eklemlerin vektörel gösterimi hem de sistemin durumlarını ifade etmektedir.

3.2 Sistem Tanımlama ile Modelleme

Pan-tilt sistemi iki giriş üç çıkışa sahip ÇGÇÇ bir sistemdir. Eyleyicilere uygulanan gerilim, sistemin girişlerini oluşturmaktadır. Sistemin çıkışları ise Şekil 1.2'de ifade edilen yalpalama (z eksenindeki dönme açısı), yunuslama (y eksenindeki dönme açısı), yuvarlanma (x eksenindeki dönme açısı) açılarıdır.

Pan-tilt sistemi, simulasyon ve deneylerle belirlenen giriş sinyalleri ile kontrol edilmektedir. Eyleyicilerin çalışma frekans ve genlikleri; mekanik sisteme zarar vermeyecek şekilde girişlere farklı frekanslarda sinyaller uygulanarak belirlenmektedir. Belirlenen frekans ve genlik aralıkları baz alınarak randomize bir şekilde giriş sinyalleri üretilmektedir. Giriş sinyalleri gerçek sisteme uygulanarak çıkış sinyalleri kayıt edilmektedir. Bu giriş ve çıkış sinyalleri, Matlab Sistem Tanımlama Aracı (System Identification Toolbox) kullanılarak sistemin durum uzay modelleri ve/veya transfer fonksiyonları üretilmektedir.

3.2.1 TGTÇ Sistem Tanımlama

Sistem modelini oluşturmak için sistem tanımlamada ve parametre kestiriminde kullanılabilecek birçok doğrulama ve geçerlemesi yapılmış ürün bulunmaktadır. Bir sistemin yapı (structer) ve derecesini girdi-çıkı verilerinden belirleme sorunu,

özellikle doğrusal sistemler için birkaç tane uygulanabilir çözüm sunmaktadır. Sistem tanımlamanın ve parametre kestiriminin kaba tanımı; ölçülen giriş-çıkış veri seti ve matematiksel modeller kullanılarak çıkarımda bulunma sürecidir. Parametre kestirimi, yanlış bir modelin seçiminden etkilenebileceği için, sistem modellemesi hakkında ön bilgi gerekmektedir. Bu amaçla, model yapısı ve tasarımı hakkında yararlı bilgiler elde etmek için deneysel ölçümlerden ve simülasyon tekniklerinden faydalanılmaktadır. Sistem tanımlama, sistem dinamiklerini belirlemek amacıyla dört adımda uygulanan bir deneysel yaklaşımdır [24]:

1. Sisteme uygulanan girişler ve elde edilen çıkışların kayıt altına alınması,
2. Model yapısının seçilmesi,
3. Model parametrelerinin tahmini,
4. Tanımlanan modelin gerçek sisteme uygunluğunun test edilmesi

Sistem tanımlama için en önemli aşama, giriş sinyalinin belirlenmesi durumudur. Amaç, sistemin model yapısını en iyi tanımlayacak bir giriş sinyali uygulamaktır. Bu çalışmada, (3.4)'de sunulduğu gibi giriş sinyali; 20 tane farklı frekans, faz ve genlikteki sinüzoidal sinyalin toplanmasıyla oluşmaktadır. Böylece sistem, karakteristiğini yansıtacak randomize girişler ile beslenerek farklı genlik ve frekanslardaki dinamiklere ulaşılması sağlanacak, bu sayede sisteme uygun bir model ortaya çıkmış olacaktır [25].

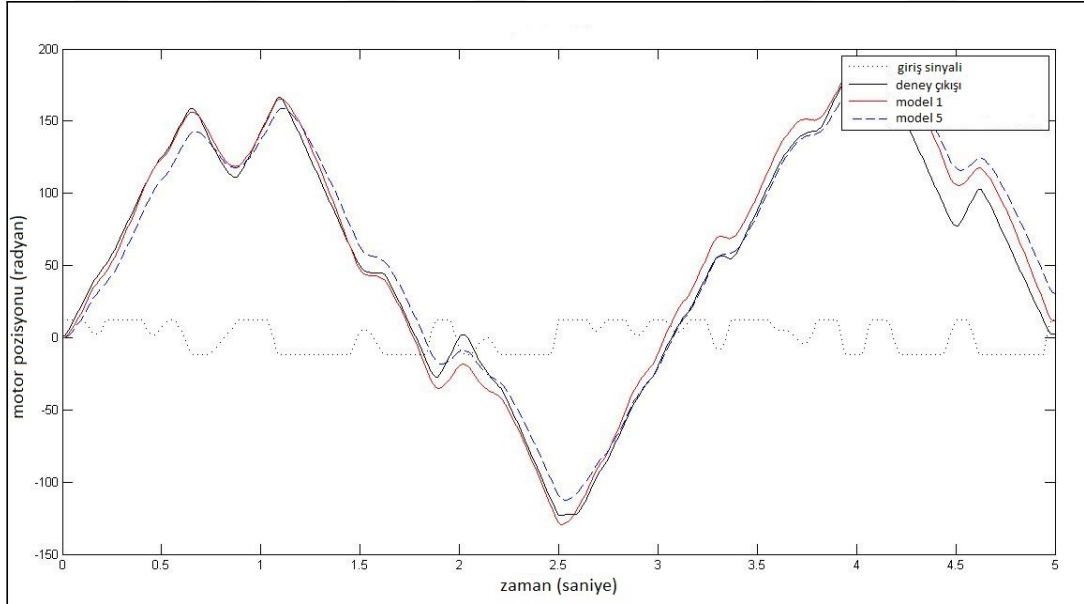
$$w(k) = \sum_{i=1}^{20} \alpha_i \cos(w_i t_s k + \phi_i) \quad (3.4)$$

Sistemin giriş frekans aralığı, deneysel olarak genlik sabit tutulmak şartı ile farklı değerler denenerek belirlenmektedir. Böylece sistem dinamiklerini zorlayacak veya bozacak frekans değerlerinden uzak durulmaya çalışılmaktadır. Sinyalin genlik değeri ise PWM yüzdesine bağlıdır. Bu durumun dezavantajı, eyleyici girişi %100 PWM oranını geçemeyeceğinden dolayı genlik değeri dikkatli seçilmelidir. Çünkü fazla miktarda uygulanan gerilim sisteme aynı orantıda etki sağlamayacağından modelde doğrusal olmayan etkiler türeyecektir.

Tablo 3.1'de sunulan modeller, MATLAB Sistem Tanımlama (System Identification) aracı ile elde edilen ayırık zamanlı transfer fonksiyonlarıdır. Model tranfer fonksiyonlarının pay ve payda dereceleri tablonun modeller sekmesinde sunulmaktadır. Ayrıca bu sekmede, sistem tanımlama için oluşturulan giriş sinyalinin frekansının hangi değerler arasında randomize bir şekilde dağıldığıda belirtilmektedir. Bütün modellerde sistem tanımlama yöntemi kullanılmasına rağmen model 4'de parametre kestirimi yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 3.1 TGTÇ modellerin hata normları

Modeller		Hata Sinyalinin 2 Normu				
		1 Hz Sin	3 Hz Sin	5 Hz Sin	Mix Sin	Mix Sin
Model 1	0-3 Hz pay 3, payda 4	130,48	72,18	48,78	1067,70	329,53
Model 2	0-5 Hz pay 2, payda 3	253,18	75,98	83,43	1390,30	975,08
Model 3	2-4 Hz pay 1, payda 2	397,66	168,21	94,62	1541,10	1076,90
Model 4	0-5 Hz Param_kest	118,82	110,94	71,18	1124,20	274,86
Model 5	0-5 Hz (özk) pay 2, payda 3	117,64	101,23	62,75	689,08	310,45



Şekil 3.1 Karışık sinüzoidal sinyal uygulanan model 1, model 5 ve gerçek sistemin karşılaştırılması

Hata normları bölümü, aynı giriş sinyali uygulanan model (simülasyon) ve gerçek sistem (deney) çıktıları arasındaki farkların normlarından oluşmaktadır. Burada sin-K Hz, genliği 12 volt ve frekansı K Hz olan giriş sinyalini ifade etmektedir. Sin-Mix giriş sinyali; genliği 0 ile 12 volt arasında, frekansı ise 0 ile 5 Hz arasında değişen sinyal anlamına gelmektedir. Modeller hata normlarına, yani gerçek verilere benzerliklerine göre karşılaştırıldığında 1. model öne çıkmaktadır. Kontrolcü tasarımında bu model kullanılmaktadır.

0 ile 5 Hz arasında randomize değişen giriş sinyali; model 1, model 5 ve gerçek sisteme uygulanmakta ve sonuçlar Şekil 3.1'de sunulmaktadır. Şekile göre model 1 gerçek sisteme daha yakın sonuçlar vermektedir.

3.2.2 ÇGÇÇ Sistem Tanımlama

Sistemin pan kısmının motor girişleri, genliği 0 ile 10 volt gerilim arasında ve frekans değeri 0 ile 20 Hz arasında randomize bir şekilde değişen 20 tane sinüzoidal sinyalin toplanmasıyla oluşmaktadır. Tilt kısmının motor girişleri ise, genliği 0 ile 10 volt gerilim arasında ve frekansı değeri 0 ile 5 Hz arasında randomize bir şekilde değişen 20 tane sinüzoidal sinyalin toplanmasıyla oluşmaktadır. Bu giriş sinyalleri sisteme uygulanarak çıkış sinyalleri üretilmektedir. Bu sinyallere, Matlab sistem tanımlama aracında bulunan, farklı ÇGÇÇ sistem tanımlama yöntemleri uygulanarak, sistem analiz edildiğinde en iyi benzeşim sonucuna Tahmin Hatası Azaltma (Prediction Error Minimization) yöntemi ile ulaşılmaktadır.

3.2.2.1 Tahmin Hatası Azaltma Yöntemi

(3.5) denklemindeki LTI sistemi göz önüne alınırsa:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Burada, $y \in R^p$; çıkış vektörü, $u \in R^m$; giriş vektörü, $x \in R^n$; durum vektörü, $e \in R^p$; sıfır ortalamalı kovaryans matrisini ($R > 0$) içerisinde barındıran yineleme vektörü ve A, B, C, D, K matrislerinin boyutları birbirleriyle uyumludur. State space modelindeki bilinmeyen parametreler, yineleme sürecinin sistem matrislerini ve kovaryans matrisini içermektedir.

ÇGÇÇ sistem modeli için tasarlanan giriş sinyalleri ve modelinden üretilen çıkış sinyalleri tahmin hatası azaltma yöntemine giriş olarak verilmektedir. Tahmin hatası, doğrusal durum uzay modelinden hesaplanan ve girişleri $u(t), y(t)$ olan $\epsilon(t, \theta)$, (3.6)

ve (3.7) denklemlerinden türeyen formdadır.

$$\hat{x}(t+1, \theta) = [A(\theta) - K(\theta)C]\hat{x}(t, \theta) + B(\theta)u(t) + K(\theta)y(t) \quad (3.6)$$

$$\epsilon(t, \theta) = -C\hat{x}(t, \theta) - D(\theta)u(t) + y(t) \quad (3.7)$$

Durumların ilk değeri $\hat{x}(0, \theta) = 0$ 'dır. $\epsilon(t, \theta)$ 'ya göre performans katsayıları (3.8)'de verilmektedir.

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} \|\epsilon(t, \theta)\|^2 \quad (3.8)$$

Tahmin hatası azaltma yöntemi $V_N(\theta)$ 'yı minimize etmeye çalışmaktadır. Ek olarak, kovaryans matrisinin R , yineleme vektörü $e(t)$, kovaryans matrisinin $\epsilon(t)$, $t = 0, 1, \dots, N-1$ 'e göre hesaplanmasıyla tahmin edilmektedir [26].

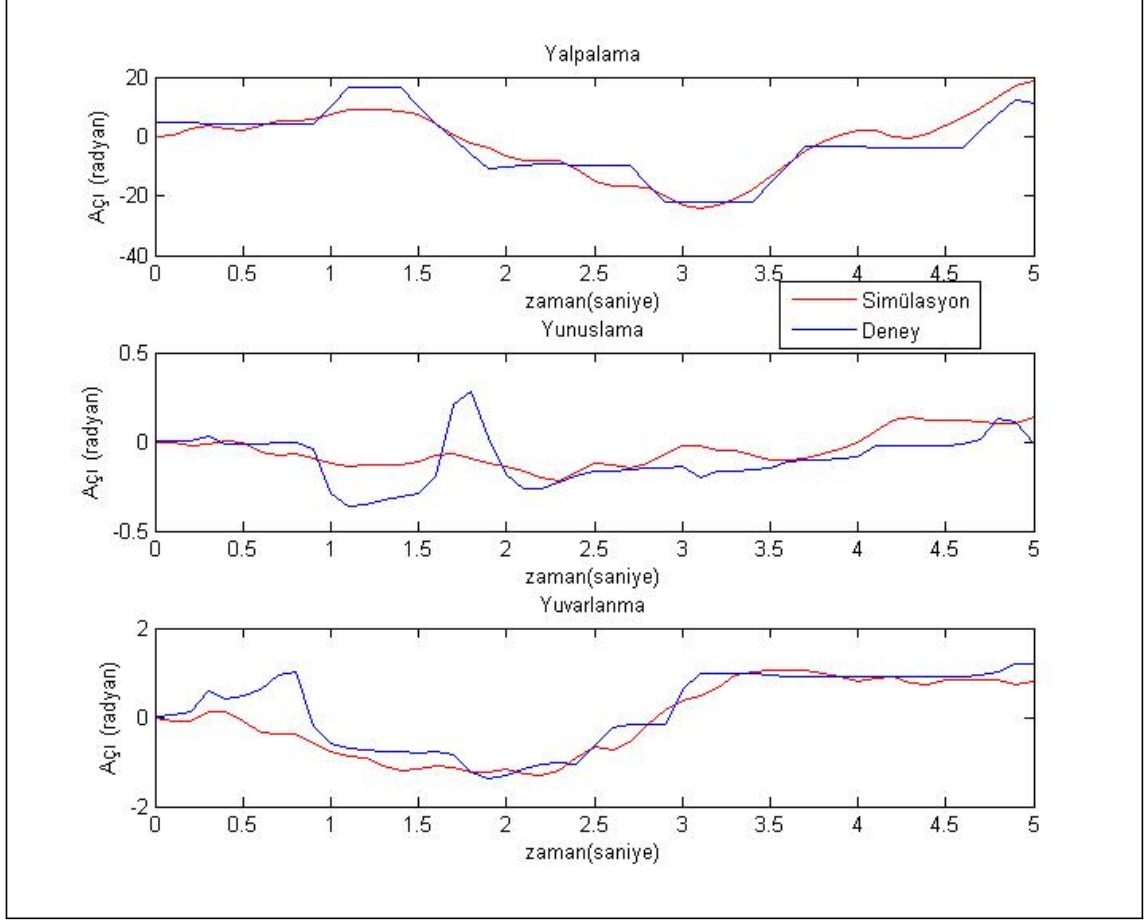
Tablo 3.2 ÇGÇÇ modellerin hata normları

Modeller		Hata Sinyalinin 2 Normu		
		Yalpalama	Yunuslama	Yuvarlanma
Pan Giriş Sinyali: 18Hz 8v Tilt Giriş Sinyali: 5Hz 10v	1. Model	31,48	0,86	2,79
Pan Giriş Sinyali: 18Hz 8v Tilt Giriş Sinyali: 3Hz 10v	2. Model	39,52	0,19	3,87
Pan Giriş Sinyali: 16Hz 10v Tilt Giriş Sinyali: 5Hz 10v	3. Model	273,05	1,86	5,23
Pan Giriş Sinyali: 16Hz 10v Tilt Giriş Sinyali: 5Hz 10v	4. Model	231,88	1,82	4,88
Pan Giriş Sinyali: 16Hz 10v Tilt Giriş Sinyali: 3Hz 10v	5. Model	103,67	0,39	3,35
Pan Giriş Sinyali: 16Hz 8v Tilt Giriş Sinyali: 5Hz 10v	6. Model	98,69	0,17	7,89

Tablo 3.2'de sonuçları sunulan ÇGÇÇ modeller Matlab sistem tanımlama aracından elde edilmektedir. Yani simülasyon verileri, sistem tanımlama aracından elde edilen durum uzay modelleri kullanılarak üretilmektedir. Pan / Tilt Giriş Sinyali XHz Yv: Pan veya tilt döner ekleminin giriş sinyali, 0-Y volt gerilim arasında rasgele (randomize) değişen genlik ve 0-X Hz arasında rasgele (randomize) değişen frekansdan oluştuğunu ifade etmektedir.

Hata normları bölümü, gerçek pan tilt sistemi ile simülasyon verilerinin 3 eksen üzerindeki açısal konumları arasındaki fark normlarının alınmasıyla oluşmaktadır. 3 ekseninde açısal konum değişimleri; z-ekseninde dönme (yalpalama) açısı, y-ekseninde dönme (yunuslama) açısı, x-ekseninde dönme (yuvarlanma) açısı olarak ifade

edilmektedir. Tablodaki hata normları karşılaştırıldığında, 1. modelin pan tilt sistemini en iyi ifade ettiği sonucuna varılmaktadır.



Şekil 3.2 Model 1 ile deney çıktılarının karşılaştırma grafiği

Karışık sinüzoidal sinyalin hem sistem tanımlama ile elde edilen ÇGÇÇ modellerden 1.'sine hem de gerçek sisteme uygulanarak gerçek sistem ile simülasyon sisteminin benzeşim grafiği Şekil 3.2'de sunulmaktadır.

4

Kontrol Tasarımı

Bu çalışmada, ÇGÇÇ bir sistem için TGTÇ tasarımının handikapları değerlendirilmektedir. Eğer ÇGÇÇ sistemde her giriş yalnızca bir tane çıkışı etkiliyorsa bu durum merkezi olmayan (decoupled) ÇGÇÇ sistem olarak isimlendirilmektedir. ÇGÇÇ yapıda olan Pan-tilt sistemi iki tane TGTÇ sistemin birleşimi olarak düşünülebilir. Bu durumda pan-tilt yapısı merkezi olmayan (decoupled) ÇGÇÇ sistem olarak tasarlanmış olmaktadır. TGTÇ kontrolör tasarımı için PID ve LQR kontrolcü tasarımı üzerine çalışılmaktadır.

Merkezi sistem (coupled) de ise bir eyleyici birden fazla çıkışı etkilemektedir. Yani ÇGÇÇ bir sistemde her giriş sistemin birden fazla çıkışını etkilemektedir. Merkezi ÇGÇÇ kontrolör tasarımı için statik durum geri besleme (SDG) yöntemi ve statik çıkış geri besleme (SÇG) yöntemi araştırılmıştır.

PID kontrol tasarım problemi, LQR (linear Quadratic Regulator) tabanlı optimizasyon yöntemi ile statik durum geri besleme (SDG) tasarımına dönüştürülmektedir [14] [15]. Bir diğer SDG çalışması ise, lineer matris eşitsizlikleri (LMI) tabanlı dışbükey optimizasyon yöntemlerinin etkinliğini PID kontrol yapısı ile birleştirmektir [16].

Bu çalışmada, statik çıkışlı geri besleme yöntemi kullanılarak ÇGÇÇ PID kontrolör tasarlanmakta ve artımlı doğrusal matris eşitlikleri yöntemi kullanılarak kontrolcü katsayıları hesaplanmaktadır.

4.1 TGTÇ Kontrol Tasarımı

4.1.1 LQR yöntemi ile TGTÇ Kontrol Tasarımı

Lineer Quadratik Düzenleyici (LQR) kontrol tasarımında ana fikir, quadratik maliyet fonksiyonunu minimize etmektir. LQR uygulanacak sistemin vektör-matris diferansiyel denklemi (e matrisi hariç) (3.5)'de verilmektedir.

$$u(t) = -Gx(t) \quad (4.1)$$

G , boyutları sisteme uygun kazanç matrisini ifade etmektedir. Belirtilen kapalı çevrim kutup konumlarını kararlı yapacak bir kazanç matrisi aramak yerine, sipesifik performans kriterini J (maliyet fonksiyonu) minimize edecek bir kazanç matrisi aranmaktadır.

$$J = \int_t^T [x^T(\tau)Q(\tau)x(\tau) + u^T(\tau)Ru(\tau)]d\tau \quad (4.2)$$

(4.2) denklemindeki $Q \geq 0$ ve $R > 0$ matrisleri, simetrik pozitif yarı tanımlı matrislerdir. Q ve R matrislerinin değerleri ne olursa olsun, maliyet fonksiyonunun Cebirsel Riccati Denklemini (ARE) çözerek elde edilebilecek eşsiz bir minimum değerini bulmak amaçlanmaktadır.

Maksimum prensip denklemleri ile çözüm:

$$H = x^T Qx + u^T Ru + \lambda^T (Ax + Bu) \quad (4.3)$$

$$\dot{x} = \left(\frac{\partial H}{\partial \lambda}\right)^T = Ax + Bu, \quad x(0) = x_0 \quad (4.4)$$

$$-\dot{\lambda} = \left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^T = Qx + A^T \lambda, \quad \lambda(T) = P_1 x(T) \quad (4.5)$$

$$0 = \frac{\partial H}{\partial u} = Ru + \lambda^T B \Rightarrow u = -R^{-1} B^T \lambda \quad (4.6)$$

Denklem (4.6), optimal çözümü vermektedir.

$\lambda(t) = P(t)x(t)$ formatında olsun;

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} &= \dot{P}x + P\dot{x} \\ &= \dot{P}x + P(Ax - BR^{-1}B^T P)x - \dot{P}x - PAx + PBR^{-1}BPx \\ &= Qx + A^T Px \end{aligned} \quad (4.7)$$

Eğer $P(t)$, denklem (4.8)'den elde edilebilirse, (4.7) denklemi sağlanmış olmaktadır.

$$-\dot{P} = PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q \quad (4.8)$$

LQR kazançlarının (Q, R) seçimi için Bryson kuralı uygulanmıştır [27]: Q ve R diagonal matrisler olarak seçilmektedir.

$$Q_{ii} = \frac{1}{\text{maksimum olabilecek } z_i^2 \text{ degeri}} \quad i \in 1, 2, \dots, k, \quad (4.9)$$

$$R_{jj} = \frac{1}{\text{maksimum olabilecek } z_j^2 \text{ degeri}} \quad j \in 1, 2, \dots, k, \quad (4.10)$$

Maliyet fonksiyonu (4.9) ve (4.10) denklemleri türünden tekrar yazıldığında, (4.11) denklemi oluşmaktadır.

$$J := \int_0^{\inf} \left(\sum_{i=1}^n Q_{ii} z_i(t)^2 + \rho \sum_{j=1}^m R_{jj} u(t)^2 \right) dt. \quad (4.11)$$

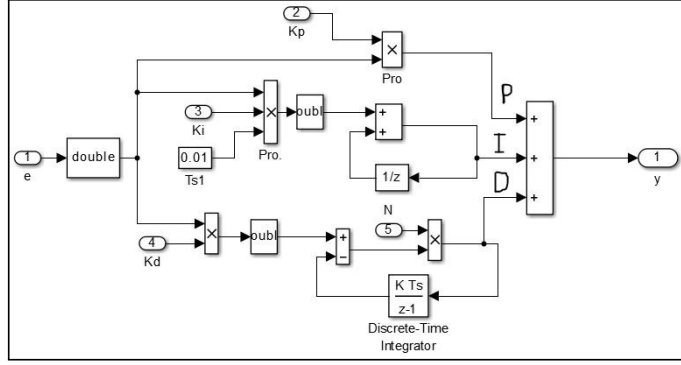
Bu kural, maliyet fonksiyonundaki değişkenleri ölçeklendirmekte, böylece her terim için kabul edilebilir maksimum değer bir olmaktadır. Özellikle u ve x 'in farklı değişkenlerinin birimleri, bu değişkenler için değerleri sayısal olarak birbirlerinden çok farklı olduğunda önem kazanmaktadır.

4.1.2 Ziegler Nichols yöntemi ile TGTÇ Kontrol Tasarımı

Bazı sistemlerin durum uzay modellerini elde etmedeki zorluk, tasarımcıların optimal kontrolcü katsayılarını belirlemenin deneysel yöntemini bulmaya itmektedir. Bu çalışmada, ÇGÇÇ kontrol yapısı ile karşılaştırılacak TGTÇ kontrolcü yapısı, Ziegler-Nichols tabanlı PID yöntemidir. Sistem tanımlama ile elde edilen TGTÇ modeller, çoklu döngüler olarak birleştirilerek kontrol katsayıları uygulanmaktadır. 1942 yılında, John Ziegler and Nathaniel Nichols adında iki müdendis, PID kontrolör katsayılarını belirlemek için iki yöntem sunmuştur. Bu iki yöntem küçük değişikliklerle hala geniş alanlarda kullanılmaktadır [11].

ZN yöntemi, PID kontrol katsayılarını deneysel yollarla bulunması üzerine oluşturulmuş bir metoddur. İleri seviye PID kontrolör algoritması ayrık zamanlı olarak Matlab Simulink programında Şekil 4.1'de verildiği gibi kodlanmaktadır. Burada, hata sinyalinin ani bir şekilde büyük ölçüde değişmesi gibi istenmeyen davranışlardan kaçınmak için filtre PID kontrolünün türev kısmına eklenmektedir. Bu şekilde motor girişinin aşırı ve ani artması sonucu, sisteme aşırı yüklenme önlenmiş olmaktadır.

Basamak yanıtı yöntemi, ilk Ziegler-Nichols metodudur. Bu yöntemde göre kontrolör parametreleri, sistemin açık çevrim basamak yanıtından elde edilen değerlere göre belirlenmektedir. Sistem basamak yanıtında, eğimin en büyük olduğu nokta belirlenerek bu noktadan geçen bir teğet çizilmektedir. Bu teğetin basamak girdisinin öncesindeki ve sonrasındaki sistem çıkış değerlerini kestiği noktalar belirlenmektedir. Bu şekilde ölü zaman ve sistem zaman sabiti yaklaşık olarak belirlenmektedir. Bu çalışma için uygulanabilir bir yöntem değildir. Çünkü; PID



Şekil 4.1 Türev korumalı ayırık zamanlı PID yapısı

katsayıları, dc motorun gecikme zamanının azlığından dolayı ölü zaman oluşmadığı için hesaplanamamaktadır [11].

İkinci Ziegler-Nichols metodu ise frekans yanıtı yöntemidir. Bu yöntemde, kontrolör katsayılarına sistemin frekansı değiştirilerek ulaşılmaktadır. Frekans yanıt testi, $-\pi$ radyan kadar faz kaymasına neden olan sistemin frekans değerini elde etmeyi amaçlamaktadır. Basamak yanıtı testinde, deney sisteme açık döngüde uygulanmasına rağmen, frekans yanıtı yönteminde ise yalnızca oransal kontrolör deney sisteminde mevcut olduğunda gerçekleştirilmektedir. Oransal kontrolör kazancı, kararlılık sınırı aşılana kadar arttırılmaktadır. Bu aşamada salınım periyodu T_π ölçülmektedir. Kontrol parametreleri, Tablo 4.1’de verildiği gibi, salınım periyodu T_π ve sistemin salınımına başladığı andaki P kontrolörünün K_π kazancı kullanılarak elde edilmektedir.

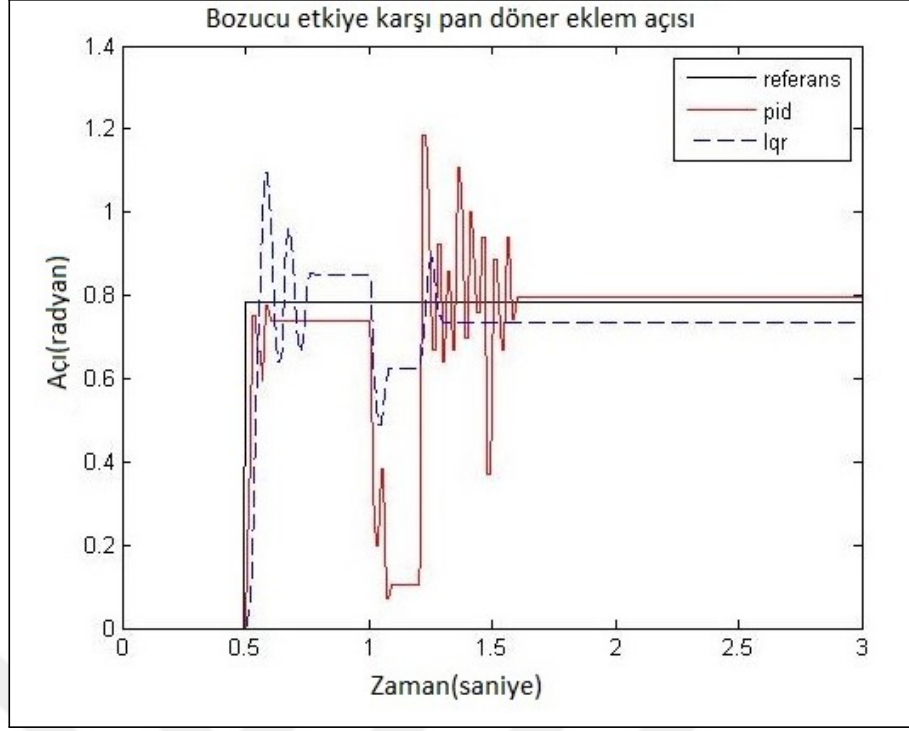
Tablo 4.1 ZN PID kontrol katsayı tablosu

Kontrolcü	K	T_i	T_d
P	$0,5K_\pi$	-	-
PI	$0,4K_\pi$	$0,8T_\pi$	-
PID (paralel)	$0,4K_\pi$	$0,5T_\pi$	$0,125T_\pi$

Deney sonuçlarına göre $K_\pi = 2,2$ ve $T_\pi = 0,06$ saniye olarak bulunmaktadır. Bu sonuçlara göre $K = 0,88$, $T_i = 0,88$ ve $T_d = 0,0075$ olarak hesaplanmaktadır.

4.1.3 TGTÇ Kontrolcülerin Karşılaştırılması

Şekil 4.2’de sistemin pan girişine 1’inci ve 1,2’nci saniyeler arasında 0,1745 radyan büyüklüğünde bozucu etki uygulanmaktadır. PID ve LQR kontrolcü uygulanmış sistemler, ayrı ayrı bu bozucu etkiye tepkileri ölçülerek şekilde sunulmaktadır.



Şekil 4.2 Bozucu etki altında LQR-PID kontrol karşılaştırması

4.2 ÇGÇÇ Kontrol Tasarımı

Bu çalışmada sistem tanımlama yöntemiyle elde edilen merkezi pan-tilt durum uzay modeli, SÇG yöntemi kullanılarak kontrol edilmektedir. Bu yöntemin ana fikri, PID kontrol tasarım problemini SÇG kontrol tasarımına dönüştürmektir. Sistem PID kontrol yapısı ile geri beslenerek, genişletilmiş sistem (augmented system) oluşturulmaktadır. Böylece PID kontrol kazançları bu yapıya göre hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar, lineer matris eşitsizlik (LMI) problemlerinden oluştuğu için SeDuMi aracı kullanılarak çözülmektedir. SeDuMi, optimizasyon problemlerini lineer, ikinci dereceden (quadratic) ve yarı tanımlı kısıtlamalarla çözülmesine olanak sağlayan MATLAB için oluşturulmuş bir eklentidir. SeDuMi’de karmaşık değerli veri ve değişkenler kullanılabilir. Ayrıca, büyük ölçekli optimizasyon problemleri, seyreklikten yararlanılarak verimli bir şekilde çözülebilmektedir [Sturm-1999]. Bu araç hem verimli Yarı Tanımlı Programlama (SDP) algoritmalarını hem de Doğrusal Matris Eşitsizliği (LMI) formülasyonunu ilişkilendirmek için tasarlanmıştır [28].

Standart PID kontrol yapısından SÇG yapısına dönüşüm:

(3.5)’deki lineer zamanla değişmeyen sistem göz önüne alındığında standart PID kontrol yapısı, (4.12) denklemindeki gibidir [10].

$$u = F_1 y + F_2 \int_t^0 (y dt) + F_3 \frac{dy}{dt} \quad (4.12)$$

Burada, $F_1, F_2, F_3 \in R^{m \times p}$ matrisleri ideal PID kontrol katsayılarıdır ve SÇG yöntemi ile tasarlanmaktadır.

$$z_1 = x, \quad z_2 = \int_t^0 (y dt) \quad (4.13)$$

$z = [z_1^T, z_2^T]^T$ olmak üzere, z vektörü genişletilmiş sistemin durum vektörü olarak ifade edilmektedir.

$$\dot{z}_1 = \dot{x} = Az_1 + Bu, \quad \dot{z}_2 = y = Cz_1 \quad (4.14)$$

Genişletilmiş sistem durum uzay modeli;

$$\dot{z} = \hat{A}z + \hat{B}u, \quad \hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

(3.5) ve (4.13) denklemlerinin birleştirilmesiyle;

$$y = Cz_1 = [C \quad 0]z = C_1z \quad (4.16)$$

$$\int_0^t (y dt) = z_2 = [0 \quad I]z = C_2z \quad (4.17)$$

$$\frac{dy}{dt} = C\dot{x} = CAx + CBu = [CA \quad 0]z + CBu = C_3z + CBu \quad (4.18)$$

$\hat{y}_i := \hat{C}_i z, i = 1, 2, 3$ olmak üzere güncellenmiş kontrol girişleri;

$$u = F_1\hat{y}_1 + F_2\hat{y}_2 + F_3\hat{y}_3 + F_3CBu \quad (4.19)$$

Denklem (4.19)'a göre $I - F_3CB$ tersi alınabilir olmalıdır.

$$\hat{y} = [\hat{y}_1^T \quad \hat{y}_2^T \quad \hat{y}_3^T]^T, \quad \hat{C} = [\hat{C}_1^T \quad \hat{C}_2^T \quad \hat{C}_3^T]^T, \quad (4.20)$$

$$\hat{F} = [\hat{F}_1^T \quad \hat{F}_2^T \quad \hat{F}_3^T]^T, \quad \hat{F}_1 = (I - F_3CB)^{-1}F_1, \quad (4.21)$$

$$\hat{F}_2 = (I - F_3CB)^{-1}F_2, \quad \hat{F}_3 = (I - F_3CB)^{-1}F_3 \quad (4.22)$$

Standart PID kontrol yapısı yukardaki işlemler (4.20, 4.21, 4.22) ile SOF kontrol tasarımına dönüşmektedir.

$$\dot{z} = \hat{A}z + \hat{B}u, \quad \hat{y} = \hat{C}z, \quad u = \hat{F}\hat{y} \quad (4.23)$$

Bileşik $\hat{F} = [\hat{F}_1 \quad \hat{F}_2 \quad \hat{F}_3]$ matrisi tekrarlı lineer matris eşitsizlikleri yöntemi ile bulunduktan sonra, ideal PID kazançları (4.24), (4.25) ve (4.26) denklemleri ile hesaplanmaktadır.

$$F_3 = \hat{F}_3(I + CB\hat{F}_3)^{-1}, \quad (4.24)$$

$$F_2 = (I - F_3CB)^{-1}\hat{F}_2, \quad (4.25)$$

$$F_1 = (I - F_3CB)\hat{F}_1 \quad (4.26)$$

SÇG problemini çözmek için aşağıdaki yinelemeli doğrusal matris eşitsizliği (ILMI) algoritması önerilmektedir [29]:

- Başlangıç verileri: Sistem durum uzay matrisleri
- Adım 1: Q_0 ağırlık matrisi seçilmeli ve (4.27) denklemi (Riccati denklemi) P matrisi için çözülmelidir.

$$A^TP + PA - PBB^TP + Q_0 = 0, \quad P > 0 \quad (4.27)$$

$i = 1$ ve $X_1 = P$ olmak üzere

- Adım 2: Denklem (4.28) ve (4.29)'daki optimizasyon problemleri çözülerek α_i minimize edilmeye çalışılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \psi_{1i} & (B^TP_i + FC)^T \\ B^TP_i + FC & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.28)$$

$$P_i > 0 \quad (4.29)$$

Burada $\psi_{1i} = A^TP_i + P_iA - X_iBB^TP_i - P_iBB^TX_i + X_iBB^TX_i - \alpha_iP_i$. α_i 'nin minimize edilmiş değeri α_i^* ile ifade edilmektedir.

- Adım 3: Eğer $\alpha_i^* < 0$ eşitsizliği sağlanırsa, işlemler burada kesilmektedir. Çünkü elde edilen (P_i, F) matris çifti SÇG problemini çözmektedir. Aksi takdirde 4. adıma geçilmelidir.
- Adım 4: Aşağıdaki optimizasyon problemi P_i ve F matrisleri için çözülmelidir. $\alpha_i = \alpha_i^*$ eşitliği ile (4.28) ve (4.29) denklemlerindeki LMI kısıtlamaları göz

önüne alınarak $tr(P_i)$ minimize edilmektedir. Burada tr kare matrisin izini (trace) temsil etmektedir. Optimal P matrisi, P_i^* ile gösterilmektedir.

- Adım 5: Eğer $\|X_i B - P_i^*\| < \epsilon$ (ϵ , öngörülen bir toleransdır) eşitsizliği sağlanmaktaysa, 6. adıma geçilmelidir. Aksi takdirde; $i := i + 1$, $X_i = P_{i-1}^*$ atamalarını yapıp 2. adıma dönmelidir.
- Adım 6: Bu algoritma ile SÇG probleminin sistem için çözülebilir olup olmadığına karar verilememektedir. Adımlar burada sonlanmaktadır.

Bölüm 3.2.2’de ifade edildiği gibi pan-tilt sisteminin durum uzay modelleri, belirtilen sistem tanımlama yöntemi kullanılarak elde edilmektedir. Bu durum uzay modelleri kullanılarak, ek A’da verilen matlab kodu çalıştırılmakta ve Tablo 4.2’deki PID kontrol kazançlarına ulaşılmaktadır. Ek A’daki matlab kodunda, denklem (4.28) ve (4.29)’daki koşulların sağlandığı negatif bir α değerine ulaşılmaya çalışılmaktadır. Yani ILMI yönteminin üçüncü adımı kararlılığı sağladığından dolayı, bu adıma kadar kodlanmıştır. ILMI yönteminin 3. adımında elde edilen α ’nın değeri, sıfırdan küçük olduğundan dolayı, SÇG yapısındaki pan-tilt sistemi bu α değerinde kararlılığı sağlamaktadır.

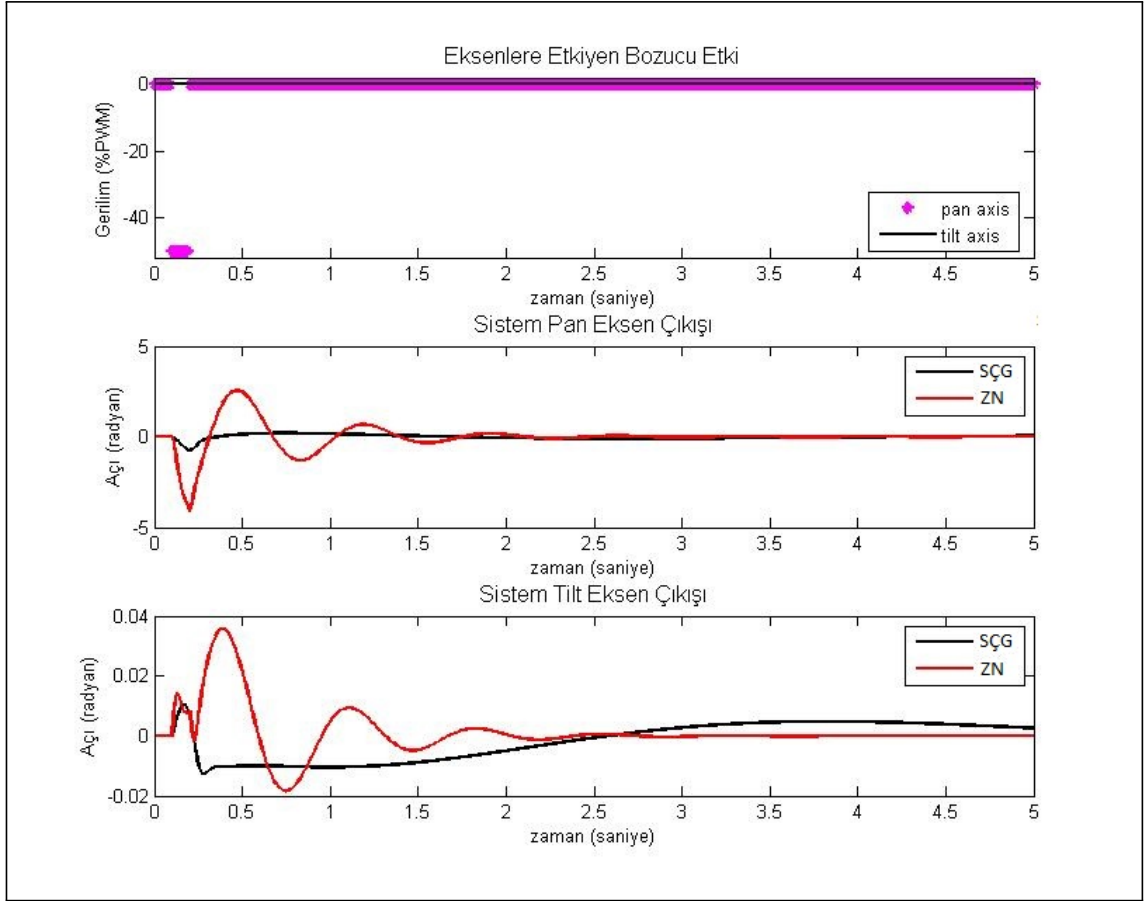
Tablo 4.2 ÇGÇÇ PID kontrol katsayıları

	$F_1 (K_p)$	$F_2 (K_i)$	$F_3 (K_d)$
Model 1	$\begin{bmatrix} -0,2303 & -16,2004 \\ -0,4876 & -7,8854 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,2126 & -2,8870 \\ -0,0429 & -1,0353 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,8918 & 0,3164 \\ -0,3399 & 5,5653 \end{bmatrix}$
Model 8	$\begin{bmatrix} 0,2118 & -1,7448 \\ 0,5783 & -3,5057 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,0728 & -1,0406 \\ 0,0539 & -23,1312 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,0583 & -4,6942 \\ 1,5951 & -30,8647 \end{bmatrix}$

5 Sonuç Ve Öneriler

Deney seneryosu; sadece pan eksenine harici bozucu kuvvet uygulanmakta ve tüm eksenlerde oluşan tepki araştırılmaktadır. İki farklı kontrol yapısı ile sistem kararlı duruma getirilmeye çalışılmaktadır. Merkezi (coupled) ÇGÇÇ kontrol yapılarından SÇG tabanlı ÇGÇÇ kontrol tasarımı ile merkezi olmayan (decoupled) ÇGÇÇ kontrol yapılarından ZN tabanlı ÇGÇÇ kontrol tasarımı karşılaştırılmakta ve pan-tilt yapısına uygunluğu araştırılmaktadır. SÇG tabanlı PID kontrol yapısı, pan-tilt sisteminin ÇGÇÇ durum uzay modelinden türemektedir. Diğer yandan ZN tabanlı PID yapısı ise tek eksene etkiyen giriş ve sistem çıkışlarından üretilen transfer fonksiyonu kullanılarak tasarlanmaktadır. Bir eksene etkiyen harici kuvvetler diğer eksenleri etkilemediği varsayımında bulunarak kontrol yapısı tasarlanmakta ve bu kontrol yapısı birbirleri ile ilişkisi bulunmayan ve ZN tabanlı PID ile kontrol edilen iki farklı TGTÇ sistemden oluşmaktadır.

Şekil 5.1'deki en üst çizimden de anlaşılacağı gibi pan eksenine 0,1 saniye boyunca 50% PWM şiddetinde bozucu etki uygulanmaktadır. Farklı kontrol yapılarına göre iki eksenle ilgili ayrı ayrı oluşan yanıtlar Şekil 5.1'in orta (pan eksen) ve en alttaki (tilt eksen) çizimlerinde verilmektedir. Bir eksene uygulanan kuvvetler ve momentler Şekil 5.1'de sunulduğu gibi diğer eksenleri de etkilemektedir. Bu deneyden çıkarılacak sonuçlardan biri; pan-tilt merkezi (coupled) ÇGÇÇ bir sistem olduğudur. Diğer sonuç ise SÇG tabanlı PID kontrol yapısı, ZN tabanlı PID kontrol yapısından performans bakımından daha iyi sonuç vermektedir. Çünkü SÇG kontrolü sistemin çıkış açılarını hızlı bir şekilde ve osilasyon yapmadan kararlı hale getirmektedir. Diğer yandan ZN kontrolü sistemin çıkış açılarını daha yavaş ve osilasyonlu bir şekilde kararlı duruma getirmektedir.



Şekil 5.1 Pan eksenine etki eden bozucuya karşı kontrolcü yanıtları

A

SÇG Yöntemi Matlab Kodu

% Written by M. Taha KAYAOĞLU, January 1, 2018.

clear all; clc;

% sistem identfication ile elde edilen sistem state space matrisleri

load('outOfInputPan18Hz8v_Tilt5Hz10v_MIMO.mat'); % model 1

% load('outOfInputPan16Hz10v_Tilt3Hz10v.mat'); % model 8

$A = \text{css_model1_PEM_2inx2out.A}; \quad B = \text{css_model1_PEM_2inx2out.B};$

$C = \text{css_model1_PEM_2inx2out.C}; \quad D = \text{css_model1_PEM_2inx2out.D};$

% Genişletilmiş sistem durum uzay matrisleri

$A_hat = [A \quad \text{zeros}(4,2); C \quad \text{zeros}(2,2)];$

$B_hat = [B; \text{zeros}(2,2)];$

$C1_hat = [C \quad \text{zeros}(2,2)];$

$C2_hat = [\text{zeros}(2,4) \quad \text{eye}(2)];$

$C3_hat = [C * A \quad \text{zeros}(2,2)];$

$C_hat = [C1_hat.' \quad C2_hat.' \quad C3_hat.'].';$

% $y1_hat = C1_hat * z, y2_hat = C2_hat * z, y3_hat = C3_hat * z$

% $u = F1 * y1_hat + F2 * y2_hat + F3 * y3_hat + F3 * C * B * u;$

% ILMI (iterative linear matrix inequality) yöntemi

% Adım 1

```

Q0 = .01*eyes(6); % Q0 ağırlık matrisi azaldıkça osilasyon da azalmaktadır.

[P,L,G] = care(A_hat,B_hat,Q0);

% Adım 2

n = length(A_hat);

X1 = P;

alfa1 = -0.5; % model8 için => -0,0310, % model1 için => -0,009;

dr = .001;

% while döngüsü ile alfa1 değişkeninin SOF problemini çözebilen değeri
% araştırılmaktadır.

while(1)

clc;

F = sdpvar(2,6);

P1 = sdpvar(n,n);

sum1 = A_hat' * P1 + P1 * A_hat - X1 * B_hat * B_hat' * P1 - P1 * B_hat * B_hat' *
X1 + X1 * B_hat * B_hat' * X1 - alfa1 * P1;

LMI1 = [sum1 (B_hat' * P1 + F * C_hat)'; B_hat' * P1 + F * C_hat - eye(2)];

Constraints = [LMI1 < 0, P1 > 0];

% Amaç (objective) tanımlama

Objective = [];

% YALMIP ve solver ayarları

options = sdpsettings('solver', 'sedumi');

% Problemin çözümü

sol = optimize(Constraints,Objective,options)

sol_P = value(P1); sol_F = value(F);

```

```

if ( ( (min(eig(value(P1)))>0) && (max(eig(value(LMI1)))<0) && (0 >
max(eig(A_hat + B_hat * sol_F * C_hat))) ) || (alfa1 > 0) ) && (
strcmp(sol.info,'Infeasible problem (SeDuMi-1.3)') )

```

```

F1_hat = [sol_F(:,1) sol_F(:,2)];

```

```

F2_hat = [sol_F(:,3) sol_F(:,4)];

```

```

F3_hat = [sol_F(:,5) sol_F(:,6)];

```

```

% PID kontrolcü katsayıları

```

```

F3 = F3_hat * inv(eye(2) + C * B * F3_hat)

```

```

F2 = (eye(2) - F3 * C * B) * F2_hat

```

```

F1 = (eye(2) - F3 * C * B) * F1_hat

```

```

break;

```

```

end

```

- [1] I. S. Salwar, J. Iqbal, and A. M. Malik, "Modeling, analysis and motion control of a pan tilt platform based on linear and nonlinear systems," *WSEAS Transactions on Systems and Control*, vol. 4, no. 8, pp. 389–398, 2009.
- [2] M. B. Özkök and A. O. Boyacı, "Development of a stabilized pan/tilt platform and the state of the art," *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, pp. 618–626, 2013.
- [3] F. Piltan, S. Emamzadeh, Z. Hivand, F. Shahriyari, and M. Mirzaei, "Puma-560 robot manipulator position sliding mode control methods using matlab/simulink and their integration into graduate/undergraduate nonlinear control, robotics and matlab courses," *International Journal of Robotic and Automation*, vol. 6, no. 3, pp. 106–150, 2012.
- [4] T. G. Ling, M. F. Rahmat, and A. R. Husain, "System identification and control of an electro-hydraulic actuator system," *IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications*, pp. 85–88, 2012.
- [5] K. Hameyer and R. J. M. Belmans, "Permanent magnet excited brushed dc motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 2, pp. 247–255, 1996.
- [6] W. Wu, "Dc motor parameter identification using speed step responses," *Hindawi Publishing Corporation Modelling and Simulation in Engineering*, 2012.
- [7] *Datasheet and production data for STM32F405xx, STM32F407xx*, <http://wajung.aimagin.com/DM00037051.pdf>, Erişim: 2019-01-26.
- [8] Y. A. Badamasi, "The working principle of an arduino," *IEEE*, 2014.
- [9] C. Treffers and L. V. Wietmarschen, "Position and orientation determination of a probe with use of the imu mpu9250 and a ATmega328 microcontroller," 2016.
- [10] F. Zheng, Q. G. Wang, and T. H. Lee, "On the design of multivariable pid controllers via lmi approach," *Automatica*, vol. 38, pp. 517–526, 2002.
- [11] H. Develi, "Ziegler Nichols Yöntemi ve migo Yaklaşımı," 2004.
- [12] C. Lin, Q. G. Wang, and T. H. Lee, "An improvement on multivariable pid controller design via iterative lmi approach," *Automatica*, vol. 40, pp. 519–525, 2003.
- [13] F. D. Bianchi, R. J. Mantz, and C. F. Christiansen, "Multivariable pid control with set-point weighting via bmi optimisation," *Automatica*, vol. 44, pp. 472–478, 2008.
- [14] E. I. Silva and D. A. Erraz, "An lqr based mimo pid controller synthesis method for unconstrained lagrangian mechanical systems," *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 472–478, 2006.

- [15] J. K. Pradhan and A. Ghosh, "Multi-input and multi-output proportional-integral-derivative controller design via linear quadratic regulator-linear matrix inequality approach," *IET Control Theory and Applications*, vol. 9, no. 14, pp. 2140–2145, 2015.
- [16] A. Delibasi, I. B. Kucukdemiral, and G. Cansever, "A robust pid like state-feedback control via lmi approach: An application on a double inverted pendulum system," *Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 374–379, 2007.
- [17] M. Ge, M. S. Chiu, and Q. G. Wang, "Robust pid controller design via lmi approach," *Journal of Process Control*, vol. 12, pp. 3–13, 2002.
- [18] Pololu - 19:1 metal gearmotor 37Dx68L mm with 64 cpr encoder, <https://www.pololu.com/product/2822>, Erişim: 2019-01-26.
- [19] K. Rao, "Effectuation in spwm technique for 3-phase vsi using STM32F4 discovery board interfaced with matlab," *IEEE*, 2016.
- [20] Y. Yeniaydın, B. Sakacı, T. Yaren, V. Süel, and S. Kizir, "Dc motor hız kontrolü için model referans uyarlamalı pid denetleyici tasarımı," *TOK 2014*, pp. 313–319, 2014.
- [21] Mpu-6050 six-axis (gyro + accelerometer) mems motiontracking devices, <http://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050>, Erişim: 2019-01-26.
- [22] Mpu-9250 nine-axis (gyro + accelerometer + compass) mems motiontracking device, <http://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250>, Erişim: 2019-01-26.
- [23] Main characteristics of the inertial sensor MPU-9250, https://www.researchgate.net/figure/Main-characteristics-of-the-inertial-sensor-MPU-9250_tbl1_316463738, Erişim: 2019-01-26.
- [24] S. Yaacob and F. A. Mohamed, "Black-box modelling of the induction motors," *SICE*, pp. 883–886, 1998.
- [25] B. Erol and A. Delibaşı, "Aktif Süspansiyon Sistem Modelinin Kestirimi," *TOK 2014*, pp. 207–212, 2014.
- [26] T. Katayama, "Subspace methods for system identification," 2005.
- [27] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, "Feedback control of dynamic systems," 2002.
- [28] Y. Labit, D. Peaucelle, and D. Henrion, "SEDUMI Interface 1.02 a tool for solving lmi problems with SEDUMI," *IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design Proceedings*, pp. 272–277, 2002.
- [29] Y.-Y. Cao, Y.-X. Sun, and J. Lam, "Simultaneous stabilization via static output feedback and state feedback," *IEEE Transaction on Automatic Control*, vol. 44, no. 6, pp. 1277–1282, 1999.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgileri: taha.kayaoglu@tubitak.gov.tr

Konferans Bildirisi

1. M. T. KAYAOĞLU and A. DELİBAŞI, “Multivariable pid controller design for pan-tilt system,” Fourth International Conference on Advances in Mechanical Engineering: ICAME, 2018, pp. 1780-1788.