KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOP VE PLAKA SİSTEMİNİN GERÇEK ZAMANLI KONUM VE YÖRÜNGE KONTROLÜ

FATİH KÖSE

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOP VE PLAKA SİSTEMİNİN GERÇEK ZAMANLI KONUM VE YÖRÜNGE KONTROLÜ

FATİH KÖSE

Prof.Dr. H. Metin ERTUNÇ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof.Dr. Hasan OCAK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Doç.Dr. Şeref Naci ENGİN
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 29.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Hızla gelişen teknoloji ile birlikte karmaşık teknolojik sorunlar da artmaktadır. Oluşan sorunların disiplinler arası bir yaklaşım yöntemiyle algılanıp yorumlanması gerçeği, ülkemizde ve dünyada gün geçtikçe gelişen her alanda yer bulan mekatronik biliminin önemini göstermektedir. Dördüncü sanayi devrimiyle birlikte oluşturulması düşünülen çağdaş otomasyon sistemleri mekatronik biliminin konularını kapsayan farklı disiplinlerden yararlanılarak oluşturulmaktadır.

Mekatronik bir tasarım olan top ve plaka sistemi farklı disiplinlerden birçok araştırmacının dikkatini çekmektedir. Bu çalışmada, bir eğitim modeli olarak üzerinde kontrol algoritmalarının geliştirilip test edilebileceği top ve plaka sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem üzerinde kontrol algoritmaları geliştirilerek topun konum ve yörünge kontrolü gerçek zamanlı olarak yapılmıştır.

Mekatronik sistemler konusunda uzman ve daha nitelikli bir mühendis olma yolunda aldığım yüksek lisans eğitimim boyunca bana destek olan çok değerli hocam Prof.Dr. H. Metin Ertunç'a ve mesleğime ilk adımımı attığım yer olan Kocaeli Anadolu Teknik Lisesi Elektrik Bölümü'ndeki öğretmenlerime teşekkür ederim. Ayrıca her zaman olduğu gibi bu süreçte de yanımda olan aileme sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Haziran − 2018 Fatih KÖSE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Problemin Tanımı 3
1.2. Tezin Amacı ve Hedefleri 4
1.3. Tezin Katkıları 5
1.4. Tezin Ana Hatları 6
2. TOP VE PLAKA SİSTEMİ 7
2.1. Literatür Taraması 7
2.2. Top ve Plaka Sisteminin Fiziksel Modeli 9
2.3. Top ve Plaka Sisteminin Matematiksel Modeli 10
2.3.1. Lagrange hareket denklemleri 10
2.3.2. Sistemin matematiksel modeli 11
2.3.3. Sistemin doğrusallaştırılması ve transfer fonksiyonu 14
2.3.4. Sistemin durum uzayında gösterilmesi 15
2.3.5. Aktüatörlerin matematiksel modeli 16
3. DENEY DÜZENEĞİ 18
3.1. Mekanik Tasarım 19
3.2. Elektronik Tasarım 20
3.3. Yazılım Geliştirme 22
4. KONTROL ALGORİTMALARI 26
4.1. PID Kontrolör Tasarımı 27
4.2. Kayma Kipli Kontrolör Tasarımı 29
4.3. Bulanık Mantık Kontrolör Tasarımı 33
5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI 39
5.1. Konum Kontrolü 39
5.2. Yörünge Takibi 48
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 53
KAYNAKLAR 57
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 60
ÖZGEÇMİŞ 61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Top ve plaka sisteminin robot bilek ile kontrolü 8
Şekil 2.2. Top ve plaka sisteminin Stewart platformu ile kontrolü 9
Şekil 2.3. Top ve plaka sistemi fiziksel modeli 9
Şekil 2.4. Serbest cisim diyagramı 10
Şekil 2.5. DC servo motor genel blok diyagram 17
Şekil 3.1. Top ve plaka sistemi deney düzeneği 18
Şekil 3.2. Üst plaka ve alt plakanın birleştirilmesi 19
Şekil 3.3. Geliştirme kartı pin diyagramı 20
Şekil 3.4. Elektronik güç ve sürücü kartı 21
Şekil 3.5. Kontrol kartı 21
Şekil 3.6. Elektronik açık devre şeması 22
Şekil 3.7. Servo motor kontrol programı 24
Şekil 3.8. Top ve plaka sistemi PID kontrol ara yüz tasarımı 24
Şekil 4.1. Top ve plaka sistemi çift geri besleme döngüsü 26
Şekil 4.2. Top ve plaka sistemi PID kontrol genel şema 27
Şekil 4.3. Top ve plaka sistemi PID kontrol basitleştirilmiş şema 27
Şekil 4.4. PID bloğu ve giriş çıkışları 28
Şekil 4.5. Kayma yüzeyi 29
Şekil 4.6. Top ve plaka sistemi kayma kipli kontrol blok şema 31
Şekil 4.7. Top ve plaka sistemi kayma kipli kontrol genel şema 32
Şekil 4.8. Kayma kipli kontrolör LabVIEW tasarımı 32
Şekil 4.9. Bulanık mantık kontrolör genel yapısı 33
Şekil 4.10. x ekseni için hata üyelik fonksiyonu 35
Şekil 4.11. y ekseni için hata üyelik fonksiyonu 35
Şekil 4.12. x ve y eksenleri için hatanın değişimi üyelik fonksiyonu 35
Şekil 4.13. x ve y eksenleri için çıkış üyelik fonksiyonu 35
Şekil 4.14. Top ve plaka sistemi bulanık mantık kontrol genel şema 37
Şekil 4.15. Bulanık mantık ve anahtarlamalı integral kontrolör 37
Şekil 4.16. Labview bulanık mantık kontrolör ve anahtarlamalı integral kontrolör 38
Şekil 5.1. Deney 1 PID kontrol çıkış grafiği 39
Şekil 5.2. Deney 1 PID kontrol yörünge grafiği 40
Şekil 5.3. Deney 1 kayma kipli kontrol çıkış grafiği 40
Şekil 5.4. Deney 1 kayma kipli kontrol yörünge grafiği 40
Şekil 5.5. Deney 1 bulanık mantık kontrol çıkış grafiği 41
Şekil 5.6. Deney 1 bulanık mantık kontrol yörünge grafiği 41
Şekil 5.7. Deney 2 PID kontrol çıkış grafiği 42
Şekil 5.8. Deney 2 PID kontrol yörünge grafiği 43
Şekil 5.9. Deney 2 kayma kipli kontrol çıkış grafiği 43
Şekil 5.10. Deney 2 kayma kipli kontrol yörünge grafiği 44
Şekil 5.11. Deney 2 bulanık mantık kontrol çıkış grafiği 44
Şekil 5.12. Deney 2 bulanık mantık kontrol yörünge grafiği 44
Şekil 5.13. Deney 3 PID kontrol çıkış grafiği 46

Şekil 5.14. Deney 3 PID kontrol yörünge grafiği 46
Şekil 5.15. Deney 3 kayma kipli kontrol çıkış grafiği 46
Şekil 5.16. Deney 3 kayma kipli kontrol yörünge grafiği 47
Şekil 5.17. Deney 3 bulanık mantık kontrol çıkış grafiği 47
Şekil 5.18. Deney 3 bulanık mantık kontrol yörünge grafiği 48
Şekil 5.19. Deney 1 PID kontrol dikdörtgen yörünge takibi 49
Şekil 5.20. Deney 1 kayma kipli kontrol dikdörtgen yörünge takibi 49
Şekil 5.21. Deney 1 bulanık mantık kontrol dikdörtgen yörünge takibi 50
Şekil 5.22. Deney 2 PID kontrol kare yörünge takibi 51
Şekil 5.23. Deney 2 kayma kipli kontrol kare yörünge takibi 51
Şekil 5.24. Deney 2 bulanık mantık kontrol kare yörünge takibi 51

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Top ve plaka sistemi matematiksel model parametreleri..... 14
Tablo 4.1. Üyelik fonksiyonlarında kullanılan parametreler 34
Tablo 5.1. Deney 1 performans kriterleri karşılaştırması 42
Tablo 5.2. Deney 2 performans kriterleri karşılaştırması 45
Tablo 5.3. Deney 3 performans kriterleri karşılaştırması 48

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

D : Sönümleyici kuvvet, (N)
$e_{(t)}$: Hata sinyali
Fq_n : Genelleştirilmiş kuvvet
g : Yerçekimi ivmesi, (m/s^2)
$G_{x(s)}$: x ekseni sistem transfer fonksiyonu
$G_{y(s)}$: y ekseni sistem transfer fonksiyonu
m_b : Topun kütlesi, (kg)
J_b : Topun eylemsizlik momenti, (kgm^2)
J_{px} : Topun x eksenindeki eylemsizlik momenti, (kgm^2)
J_{py} : Topun y eksenindeki eylemsizlik momenti, (kgm^2)
K_D : Türevsel kazanç terimi
K_I : İntegral kazanç terimi
K_M : Sistem kazanç terimi
K_P : Oransal kazanç terimi
L_x : Plakanın x ekseni uzunluğu, (m)
L_y : Plakanın y ekseni uzunluğu, (m)
n : Serbestlik derecesi
$r_{(t)}$: Referans sinyali
r_b : Topun yarıçapı, (m)
r_m : Motor kol uzunluğu, (m)
q_n : Genelleştirilmiş koordinat
s : Kayma yüzeyi
T : Toplam kinetik enerji, (m^2kgs^{-2})
V : Potansiyel enerji, (m^2kgs^{-2})
x_b : Topun x eksenindeki konumu, (m)
x_r : Topun x eksenindeki referans konumu, (m)
y_b : Topun y eksenindeki konumu, (m)
$y_{(t)}$: Çıkış sinyali
α : Plakanın x eksenindeki açısı, (°)
β : Plakanın y eksenindeki açısı, (°)
θ_x : x eksenindeki motor açısı, (°)
θ_y : y eksenindeki motor açısı, (°)
τ : Zaman Sabiti, (s)
τ_α : Plakaya x ekseninde uygulanan tork değeri, (Nm)
τ_β : Plakaya x ekseninde uygulanan tork değeri, (Nm)

Kısaltmalar

ADC : Analog Digital Converter (Analog Dijital Konverter)
DC : Direct Current (Doğru Akım)
LQ : Linear Quadratic (Doğrusal Kuadratik)
NAB : Negatif Az Büyük
NB : Negatif Büyük
NÇB : Negatif Çok Büyük
NÇK : Negatif Çok Küçük
NK : Negatif Küçük
NO : Negatif Orta
NOÜ : Negatif Ortanın Üstü
PAB : Pozitif Az Büyük
PB : Pozitif Büyük
PÇK : Pozitif Çok Küçük
PID : Proportional İntegral Derivative (Oransal İntegral Türevsel)
PK : Pozitif Küçük
PO : Pozitif Orta
POÜ : Pozitif Ortanın Üstü
PWM : Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
RC : Radio Control (Radyo Kontrol)
S : Sıfır
USB : Universal Serial Bus (Evrensel Seri Veriyolu)

TOP VE PLAKA SİSTEMİNİN GERÇEK ZAMANLI KONUM VE YÖRÜNGE KONTROLÜ

ÖZET

Birden fazla değişkene sahip olan top ve plaka sistemi doğrusal olmayan bir sistemdir. Elektromekanik bir mekanizma yardımıyla gerçekleştirilebilen bu sistemde servo motor, dokunmatik ekran, metal top ve kontrol birimi kullanılmaktadır. x ve y olmak üzere iki eksene sahip olan plaka üzerindeki top, plakanın eğimine göre hareket etmektedir. Top ve plaka sistemindeki kararlılık topun plaka üzerinde istenilen herhangi bir koordinata gönderilmesi veya istenilen yörüngede hareket ettirilmesi ile gerçekleşmektedir.

Top ve plaka sisteminin serbestlik derecesi, sistemi hareket ettiren eyleyici sayısından fazladır bu sebeple sistemin kontrolü zor bir problemdir. Sistem kontrolünü olumsuz yönde etkileyebilecek sürtünme, ölçüm gecikmeleri ve kararsız parametreler mevcuttur. Bu sebeplerden dolayı bazı kabuller yapılarak sistemin matematiksel denklemleri çıkarılmıştır. Oluşturulan fiziksel modele LabVIEW programı üzerinden PID, kayma kipli ve bulanık mantık kontrol yöntemleri uygulanarak sistemin gerçek zamanlı kontrolü amaçlanmıştır. Bu bağlamda LabVIEW programı üzerinde bir kullanıcı ara yüzü oluşturulup kontrol parametrelerinin değiştirilebileceği veya farklı kontrol algoritmalarının kullanılabileceği bir sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Kontrol birimi olarak Arduino Uno geliştirme kiti kullanılmıştır. Ayrıca üzerinde güç katı ve motor sürücü birimlerini bulunduran bir elektronik devre tasarlanmıştır. Kontrol birimine yüklenecek olan kontrol fonksiyonlarını içeren yazılım LabVIEW ortamında kullanılan bloklar ile hazırlanmış ve kontrol birimine bu ara yüz üzerinden aktarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Arduino Uno R3, Bulanık Mantık Kontrolör, Kayma Kipli Kontrolör, PID Kontrolör, Top ve Plaka Mekanizması.

REAL-TIME POSITION AND TRAJECTORY CONTROL OF A BALL AND PLATE SYSTEM

ABSTRACT

The ball and plate system having more than one parameter is a nonlinear system. The system that can be realized by an electromechanical mechanism contains servo motors, a touch screen, a metal ball and a control unit. The ball on the plate with x and y axis moves according to the slope of the plate. The stability of the ball and plate system is achieved to make the ball move to a desired position or track a desired trajectory.

The degree of freedom of the ball and plate system is larger than the number of actuators that cause the movement. Therefore, controlling the system is a challenging problem. There are some facts such as friction, measurement delays and unstable parameters that impair the control performance of the system. Because of this, the mathematical model of the system is derived under certain assumptions. The real time control of the system is considered by applying PID, sliding mode and fuzzy logic control algorithms given the physical model built in the LabVIEW environment. Therefore, a user interface using LabView software is developed and a system design is realized to change the control parameters or to employ different control algorithms in this study.

Arduino Uno development kit is used as a control unit. Besides, an electronic circuit is designed that contains power supply and motor driver units. The software including control functions that will be loaded to control unit is prepared using the LabView blocks and transferred to the control unit via this interface.

Keywords: Arduino Uno R3, Fuzzy Logic Controller, Sliding Mode Controller, PID Controller, Ball and Plate Mechanism.

GİRİŞ

Teknolojik kurumlardaki laboratuvarlarda araştırma gruplarının belirli konularda geliştirdikleri kontrol algoritmalarının test edilmesini kolaylaştırmak için eğitim modelleri mevcuttur. Benzer olarak, bu modeller sektörüne göre ürünlerin seri üretiminden önce ön ölçüt araçları olarak da kullanılmaktadır. Hem kurumsal hem de ticari araştırma alanlarında eğitim modelleri üzerinden ürün geliştirilmesine artan eğilim, gerçek sistemlerin laboratuvar ortamında gerçeğine oldukça yakın fakat basitleştirilmiş modelleri üzerinde rahatça test edilebilme yeteneğinden doğan bir amaca dayanmaktadır. Genellikle kontrol algoritmalarının laboratuvar ortamında gerçek sistemler kullanılarak doğrudan test edilmesi ya imkansızdır yada maliyeti yüksektir [1]. Örneğin ileri teknoloji barındıran bir insansı robotun kontrol stratejisinin geliştirilmesi ve test edilmesi amacıyla robotun kendisiyle deney yapmak gereksiz olmakla birlikte ekonomik olmayacaktır; fakat yürüyen insanı basit bir şekilde taklit edebilen ters sarkaç üzerinden deneyler yapmak daha kabul edilebilir maliyetler ve riskler oluşturacağı için ön araştırmalarda tercih sebebi olacaktır. Benzer olarak bu çalışmanın konusu olan top ve plaka sistemi farklı disiplinlerden birçok araştırmacının dikkatini çekmekte ve popülerlik kazanmaktadır. Basit olarak sistem merkezden dönme özelliğine sahip dikdörtgen veya daire geometrisine sahip düz bir plakadan meydana gelmekte böylece plaka üzerinde top hareket ederken plaka iki eksende hareket edebilir. Bu nedenle temel hedef topun plaka üzerinde belirli bir koordinata konumlanabilmesi için topa komut vermek veya topun plaka üzerinde belirli bir yörüngeyi takip etmesini sağlayabilmektir.

Top ve plaka sistemi diğer eğitim modellerinden farklı olarak kararsız ve doğrusal olmayan sistemlerin çalışması açısından ilginç özelliklere sahiptir. İlk olarak top ve kiriş, ters sarkaç ve manyetik levitasyon mekanizmaları sırasıyla iki, iki ve bir serbestlik derecelerine sahipken top ve plaka mekanizması dört serbestlik derecesine sahiptir. İkinci olarak ise bu eğitim modelleriyle çalışılabilecek kararlılık problemlerine karşın top ve plaka mekanizması yörünge izleme problemlerini

inceleme fırsatları da sunabilmektedir. Ayrıca sistemin çok değişkenli olması, sistem üzerinde yapılan araştırmaların kapsamını genişletmek için kullanılabilir.

Top ve plaka sistemi ilk olarak 1990'larda Çekoslovakya Üniversitesi'nin Rockwell laboratuvarında kurulmuştur. Sonrasında Amerika'da bulunan Rensselaer Politeknik Enstitüsü'ndeki araştırmacılar top ve plaka sisteminin mekanik tasarımda yenilikler yapmıştır. Bu çalışmaları Güney Kore ve İran'da araştırmacılar tarafından top ve plaka sistemi üzerinde yapılan kapsamlı çalışmalar izlemiştir. Top ve plaka sistemi 2004 yılından sonra sırasıyla Tsinghua Üniversitesi ve Jilin Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yine bu üniversitelerde dinamik sistem modeli ve kontrol algoritmaları üzerine çalışmalar yapılmıştır [2].

Gunt Hamburg, Humusoft ve Googol Technology gibi firmalar top ve plaka sistemini ve farklı eğitim modellerini tasarlayıp üretmektedir [1].

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Problemin Tanımı

Top ve plaka sistemi doğrusal olmayan, iki giriş ve iki çıkışa sahip (çok değişkenli) elektromekanik bir sistemdir. İki boyuta sahip olan bu sistemin üzerinde bulunan aktüatörlerin sayısı, sistemin serbestlik derecesinden düşük olduğu için ise eksik tahrikli bir sistemdir [3]. Topun hareketinin dolaylı olarak iki eksen etrafında plaka eğimini değiştirerek kontrol edilmesi gerçeği bu sistemin dikkat çekici bir yönünü oluşturmaktadır. Plakanın herhangi bir ekseni üzerindeki eğimi açık çevrim sistemde topun durmamak üzere hareketini sağlamaktadır ve kararsız bir sistem oluşturmaktadır. Ayrıca iki eksenin aynı pivot üzerinde birleşmesi sistemin karmaşıklığını arttırmaktadır. Top ve plaka sistemine ait matematiksel model Euler-Lagrange hareket denklemleri kullanılarak oluşturulmakta ve bunun sonucunda sekiz durum değişkenine sahip denklem ortaya çıkmaktadır. Doğrusal olmayan terimler içeren bu matematiksel model makul varsayımlar ve yaklaşımlar ile basitleştirilebilmektedir.

Top ve plaka sisteminde daha etkin bir kontrol sağlayabilmek amacıyla çift geri besleme yapısına sahip döngü (bir döngü içinde başka bir döngü) kullanılır [4]. İç döngü plakaya eğimi veren aktüatörlerin açısal konumunu, dış döngü ise topun plaka üzerindeki konumunu kontrol etmek için tasarlanmaktadır. Böylelikle dış döngüde bulunan kontrolör topu dengede tutacak plakanın hareket açısını hesaplarken iç kontrol döngüsü ise aktüatörleri dolayısıyla plakayı hesaplanan açıda hareket ettirmeyi sağlamaktadır.

Sürtünme ve ölçüm gecikmeleri gibi belirsizliğe yol açabilecek faktörler pratik uygulamalarda dış döngü kontrol yapısının performansını etkileyebilmektedir. Bu sebeple dış döngüde bulanık mantık, yapay sinir ağları gibi doğrusal olmayan kontrol yöntemleri de tercih edilebilmektedir [5, 6].

Dinamik sistem uygulamalarında çoğunlukla tercih sebebi olan PID kontrol yöntemi genel olarak türev, integral ve oransal kazanç parametrelerine sahiptir. Bu kontrol yönteminde parametrelerin belirlenmesi önem arz etmektedir. Parametrelerin başlangıçta belirlenip çalışma sonuna kadar sabit kaldığı algoritmalar olduğu gibi başlangıçta belirlenen parametrelerin çalışma sırasında bulanık mantık veya yapay sinir ağlarından faydalanılarak değiştirilebildiği karmaşık algoritmalar da vardır [7].

Kayma kipli kontrol sistem üzerindeki belirsizliklere ve oluşan bozucu etkilere karşı duyarsız olma özelliği ile bilinmektedir. Doğası gereği süreksiz olan bu kontrol yönteminde sistem durumlarının kayma yüzeyine ulaşması beklenir. Eğer sistem durumları kayma yüzeyinin dışına çıkarsa kontrolör ani bir çıkış sinyali üreterek durumları kayma yüzeyine taşımaya çalışır. Kısa sürede çok fazla ani yön değişimlerine sebep olabilecek sınırlı frekansa sahip bu anahtarlama sinyaline 'çatırtı' denmektedir ve çalışılan uygulamaya göre problem oluşturabilecek bir durumdur [8].

Bulanık mantık kontrolü ilk olarak 1965 yılında L.A. Zadeh tarafından sunulan bir kontrol yöntemidir [3]. Bulanık mantık kontrolü geleneksel kontrol yöntemlerinden farklı olarak matematiksel bir modele ihtiyaç duymamaktadır. Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde de etkili olan bulanık mantık kontrol, dilsel değişkenleri kullanarak bulanık kümeleri oluşturur. Kontrolör giriş ve çıkışı oluşturulan bu bulanık kümeler ile tanımlanmaktadır. Bulanık mantık kontrolde giriş ve çıkış kümeleri arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için dilsel değişkenlerden oluşan kural tablosuna ihtiyaç vardır [7].

1.2. Tezin Amacı ve Hedefleri

Bu tez çalışmasının başlıca hedefleri:

i. Top ve plaka sistemini fiziksel olarak gerçekleştirmek ve geliştirilen sistem üzerinde PID kontrol algoritması kullanılarak topun hem statik konumunu hem de yörünge takibini gerçek zamanlı olarak kontrol etmek.
ii. Kayma Kipli Kontrol algoritmasından faydalanarak topun hem statik konumunu hem de yörünge takibini gerçek zamanlı olarak kontrol etmek.

iii. Bulanık Mantık Kontrol algoritması tasarlayarak topun hem statik konumunu hem de yörünge takibini gerçek zamanlı olarak kontrol etmek.

iv. Elektronik, mekanik ve yazılım anlamında geliştirmeye açık bir tasarım yaparak farklı kontrol algoritmalarının da üzerinde uygulanabileceği ve gözlemlenebileceği bir araştırma düzeneği oluşturmak.

v. Top ve plaka sistemine ait matematiksel bir model oluşturmak. Sistem transfer fonksiyonunu elde etmek.

vi. Sistem transfer fonksiyonundan yararlanarak bilgisayar üzerinde benzetim programları aracılığıyla kontrolör tasarımı yapmak.

vii. LabVIEW ortamında Arduino Uno geliştirme kitinin programlanmasını sağlamak ve aynı ortamda oluşturulan kontrolör tasarımını sisteme uygulayarak gerçek zamanlı kontrolünü sağlamak.

viii. LabVIEW ortamında tasarlanan bir kullanıcı arayüzü ile top ve plaka sistemi üzerindeki deneysel verileri gerçek zamanlı gözlemleyebilmek.

1.3. Tezin Katkıları

i. Bu tezde kayma kipli kontrol yöntemine (Sliding Mode Control) ve PID kontrol yöntemine ait parametrelerin seçilme prensipleri ve bulanık mantık kontrolörde oluşabilecek kalıcı durum hatalarını azaltmak için bir yöntem sunulmuştur.

ii. Bu tezde üç farklı kontrol algoritması aynı deney düzeneği üzerinde test edilmiştir ve sonuçlar üzerinden kontrolörlerin performansı değerlendirilerek benzer çalışmalara örnek oluşturulmuştur.

iii. Bu tez top ve plaka sisteminin doğrusallaştırılmış ve doğrusal olmayan matematiksel modeli üzerinden, LabVIEW ortamında kontrolör tasarımları oluşturulup simülasyon yapılmasına yönelik çalışmalara katkıda bulunmuştur.

iv. Bu tezde gerçek sistem için LabVIEW üzerinde programlama, kontrolör tasarımı, ara yüz tasarımı ve gerçek sistem ile haberleşme aşamalarından bahsedilerek benzer çalışmalara katkı sağlanmıştır.

v. Bu tezde mekatronik bir sistem tasarımına yönelik genel aşamalar verilmiştir.

vi. Bu tezde fiziksel olarak bir deney seti gerçekleştirilip bilgisayar ortamından gerçek zamanlı kontrolü sağlanarak, laboratuvar çalışmalarında farklı kontrolör yöntemlerinin üzerinde uygulanabileceği çalışmalara katkı sağlayacak bir ürün ortaya çıkarılmıştır.

1.4. Tezin Ana Hatları

Bölüm 1'de tez ile ilgili genel bilgiler verilmiş, problemin tanımı, tezin hedefleri ve katkıları üzerinde durulmuştur. Bölüm 2'de ise ayrıntılı bir literatür taraması yapılarak daha önce yapılmış top ve plaka sistemi modelleri incelenmiştir. Sonrasında top ve plaka sisteminin fiziksel modeli üzerinden matematiksel modellemeye geçilmiştir. Matematiksel model çıkarılmadan önce kullanılacak metot tanıtılmış ve denklemler ayrıntılı olarak sunulmuştur. Denklemlerin elde edilmesinden sonra top ve plaka sisteminin transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Matematiksel modelle birlikte sistemin durum uzayında gösterimi de ayrıca incelenmiştir. Bölüm 3'de genel olarak deney düzeneği tanıtılmıştır. Top ve plaka sisteminin mekanik ve elektronik tasarımı detaylı bir şekilde anlatılmış, kullanılan mekanik ve elektronik malzemeler ile ilgili bilgiler verilmiştir. Sonrasında programlama yöntemi anlatılarak LabVIEW üzerinden sistem kontrolüne ilişkin bilgiler verilmiştir. Bölüm 4'de deney düzeneği üzerinde test edilecek olan kontrol algoritmaları anlatılmıştır. Birbirinden farklı üç kontrol algoritmasının tasarım aşamaları üzerine durularak sisteme uygulanışı ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bölüm 5'de sistem üzerinde kararlılık ve yörünge takibi olmak üzere iki farklı deney metodu altında üç farklı kontrol algoritması için aynı deneyler yapılmış ve grafiksel çıktıları ile birlikte performans kriterlerine ilişkin tablolar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bölüm 6'da tez çalışması ile ilgili genel değerlendirme ve tartışmalara yer verilerek bu konuda yapılan çalışmalara katkı sağlamak amacı ile önerilerde bulunulmuştur.

2. TOP VE PLAKA SİSTEMİ

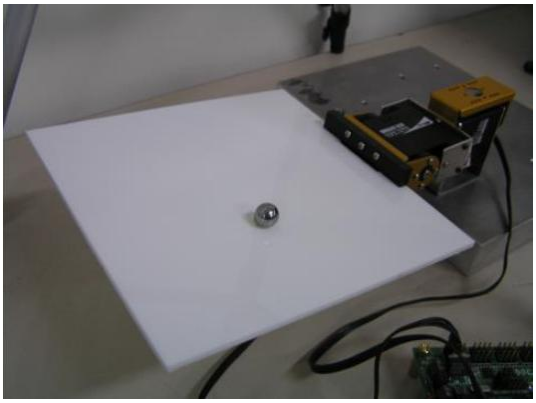
2.1. Literatür Taraması

Top ve plaka sistemi genel olarak merkezinde üniversal mafsal bulunan düz bir plakadan meydana gelmektedir. Plaka, merkezindeki mafsal ile iki serbestlik derecesi kazanmakta ve iki eksen etrafında hareket edebilmektedir. C.C. Cheng ve C.H. Tsai top ve plaka sisteminin genel tasarımından farklı olarak robot bilek mekanizması ile kare geometrisine sahip düz bir plakayı bir kenarının merkezinden tutarak plakaya iki eksende hareket özelliği kazandırmışlardır [9]. Top ve plaka sisteminde kullanılan plakanın geometrisinde de farklılıklar olabilmektedir. H. Wang ve arkadaşlarının yaptığı tasarımda dikdörtgen şeklinde bir plaka kullanılırken [10], J. Han ve F. Liu daire geometrisine sahip düz plaka ile tasarımlarını gerçekleştirmiştirler [11].

Top ve plaka sisteminde kontrol problemi olarak, topun statik konum kontrolü, dinamik konum kontrolü veya aynı anda her iki konum kontrolü yapılabilmektedir. Statik konum kontrolünde top plaka üzerinde belirli bir konumda tutulmaya çalışılırken dinamik kontrolde ise topa plaka üzerinde belirli bir yörünge takip ettirilmektedir. Top ve plaka sistemi için belirtilen bu kontrol problemleri farklı kontrolör algoritmalarıyla çözülebilmektedir. E. Börü tez çalışmasında faz ilerletici kontrolör tasarımı ile statik ve dinamik konum kontrolü yaparken, M. Bai ve arkadaşları bulanık mantık kontrol yönteminden faydalanarak topun plaka üzerindeki kontrolünü sağlamıştır [12, 13]. N. Aphiratsakun ve N. Otaryan yaptıkları top ve plaka sisteminde PID kontrol tekniğinden faydalanmışlar ve uygun PID parametrelerin seçimi için metotlar sunmuşlardır [14]. X. Dong ve arkadaşları ise çalışmalarında PID kontrolle birlikte yapay sinir ağlarını kullanarak topa daire yörüngesini takip ettirmişlerdir [15]. J. H. Jeon ve C. H. Hyun yaptıkları çalışmada adaptif kayma kipli kontrol yöntemini kullanarak topa yörünge takibi yaptırırken, L. Spacek ve arkadaşları LQ kontrol yöntemini benzetim çalışmalarında uygulamışlardır [16, 17]. Benzer olarak P. Roy ve arkadaşları topa konum ve yörünge takibini kayma kipli kontrol yöntemi kullanarak yaptırmışlardır [18].

Top ve plaka sisteminde plakaya iki eksen üzerindeki eğim açıları aktüatörler ile verilmektedir. Aktüatörlerin sayısı ve çeşidi uygulamaya göre değişebilmektedir. Örneğin, bazı uygulamalarda dijital servo motor kullanılırken bazı uygulamalarda redüktörlü adım motorlarından faydalanılmıştır [9, 10, 11, 12, 14]. Aktüatör olarak motor kullanılan uygulamalardan farklı olarak tasarımında elektromanyetik bobin kullanılan çalışmalar da mevcuttur [18]. Bu tez çalışmasında ise dijital servo motor kullanılmıştır. Servo motor içerisinde kendi kontrol devresi mevcutken, adım motoru veya manyetik bobin kullanımı durumunda kontrol devresi tasarlanmalıdır.

Top ve plaka sisteminin önemli konularından biri de plaka üzerindeki topun konumunun anlık olarak algılanabilmesidir. Topun konumunun algılanması sensörler yardımıyla olmaktadır. Sensörlerin çeşidi yapılan çalışmalara göre farklılıklar gösterebilmektedir. Yapılan bazı uygulamalarda topun konumu, plaka yüzeyinin tamamını görebilecek biçimde yerleştirilen kamera yardımıyla görüntü işleme metotları kullanılarak yapılmaktadır [3, 9, 10, 11, 14, 18, 19, 20]. Diğer bir metot ise dokunmatik ekrandan faydalanılarak topun konumunun anlık olarak algılanmasıdır [12, 21]. Bu metotlardan farklı olarak topun konumunu algılayabilmek için fotosensörlerden faydalanılarak yapılan uygulamalar da mevcuttur [22]. Kamera kullanılan uygulamalarda görüntü işleme teknikleri kullanılmakta böylece kontrol birimi üzerindeki hesapsal yük, dokunmatik ekran kullanılan uygulamalara göre daha fazla olmaktadır. Bu tez çalışmasında sensör olarak dokunmatik ekran kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Top ve plaka sisteminin robot bilek ile kontrolü [9]

Kullanılan algılama şekline göre topun kütlesi de önem kazanmaktadır. Kamera kullanılan uygulamalarda topun kütlesi problem oluşturmazken, dokunmatik ekran

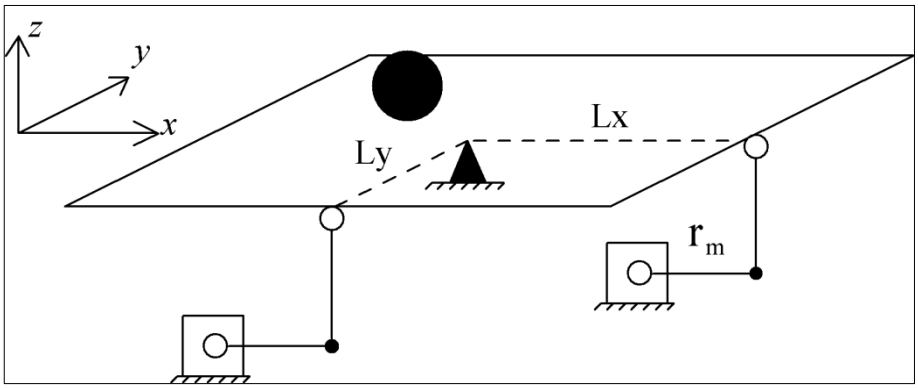
kullanılan uygulamalarda algılama işleminin sürekli bir biçimde sağlanabilmesi için topun kütlesinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de top ve plaka sistemi için daha önce yapılan çalışmalara örnekler gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Top ve plaka sisteminin Stewart platformu ile kontrolü [21]

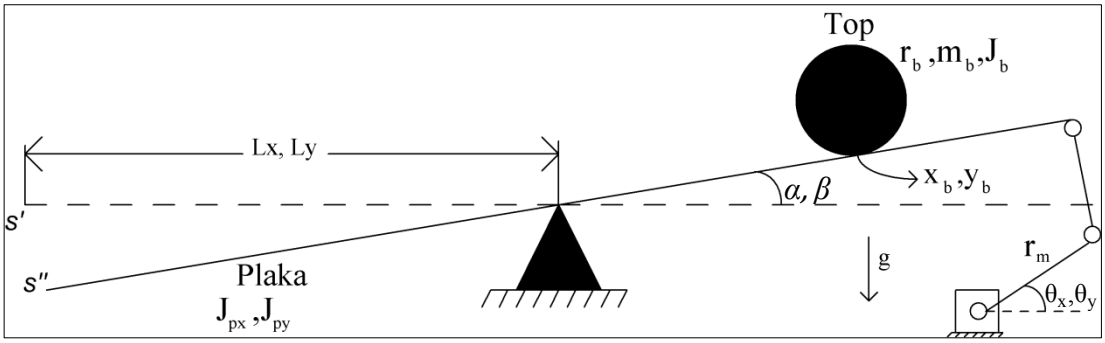
2.2. Top ve Plaka Sisteminin Fiziksel Modeli

Top ve plaka mekanizmasının kinematik sistemini açıklayan fiziksel modeli Şekil 2.3'de verilmiştir. Fiziksel model üzerinde görüldüğü gibi mekanizmada bulunan aktüatörler sistemin taban bölgesinde tutturulmuştur. Plaka merkezinde, plakanın iki eksende hareket etmesini sağlayan üniversal bir mafsal bulunmaktadır ve sistem tabanına bağlantısı ankastre mesnet üzerinden yapılmıştır. Plaka ile aktüatörler arasındaki bağlantılar ise iki serbestlik dereceli mafsallar ile yapılmıştır.



Şekil 2.3. Top ve plaka sistemi fiziksel modeli

Top ve plaka sisteminin herhangi bir anındaki durumuna ait serbest cisim diyagramı Şekil 2.4'de gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Serbest cisim diyagramı

Fiziksel model ve serbest cisim diyagramındaki sistem parametrelerinden faydalanılarak matematiksel model oluşturulmaktadır. Plakanın merkez noktası aynı zamanda x ve y koordinat ekseninin de merkezini oluşturmaktadır.

2.3. Top ve Plaka Sisteminin Matematiksel Modeli

2.3.1. Lagrange hareket denklemleri

Lagrange yönteminde hareket denklemleri, ele alınan sistemin kinetik ve potansiyel enerjisinden yararlanılarak türetilmektedir. Birden fazla serbestlik derecesine sahip sistemlerin hareket denklemleri bu metot kullanılarak çıkarılabilmektedir. Top ve plaka sisteminin Lagrange Denklemi (2.1)'de verilmiştir. Denklem (2.2)'de gösterildiği gibi L (Langrangian) fonksiyonu, kinetik enerji ve potansiyel enerjinin farkından oluşmaktadır [1]. Bu iki denklemden türetilen Langrangian metodu Denklem (2.3)'de verilmiştir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}i}\right) - \left(\frac{\partial T}{\partial qi}\right) + \left(\frac{\partial V}{\partial qi}\right) + \left(\frac{\partial D}{\partial qi}\right) = F_{qi} \tag{2.1}$$

Langrangian fonksiyonu;

$$L(qi, \dot{q}i, t) = T(\dot{q}i, t) - V(qi, t) \text{ olarak yazılabilir.} \tag{2.2}$$

Top ve plaka mekanizmasında sönümleyici bir kuvvet bulunmadığı için bu kuvvetlere ait fonksiyon Denklem 2.3'e eklenmemiştir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}i}\right) - \left(\frac{\partial L}{\partial qi}\right) = F_{qi},\ 1 \le i \le n \tag{2.3}$$

Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3'de verilen;

$T(\dot{q}i, t)$ sistemin toplam kinetik enerjisini,

$V(qi, t)$ sistemin toplam potansiyel enerjisi,

D sistemdeki sönümleyici kuvveti,

n sistemin serbestlik derecesini,

q_1 , q_n genelleştirilmiş koordinatlarını,

Fq_1, Fq_n genelleştirilmiş kuvvetlerini ifade etmektedir.

T kinetik enerjisinin içerisinde yüksek mertebeden türev içermeyen hız ifadelerini bulundurması, genelleştirilmiş kuvvetlerin hesabında bağ kuvvetlerine ihtiyaç duyulmaması ve sadece aktif kuvvetlerden yararlanılması, hareket denklemlerinin Lagrange metoduyla elde edilmesinin avantajlarındandır.

2.3.2. Sistemin matematiksel modeli

Top ve plaka sisteminin matematiksel modelini oluştururken modellemeyi basitleştirebilmek için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

i. Top ve plaka arasında kayma yoktur.
ii. Top ve plaka sürekli temas halindedir.
iii. Tüm sürtünme kuvvetleri ihmal edilmektedir.
iv. Top simetrik ve homojendir.

Plaka üzerinde dönerek ilerleme hareketi yapan topun toplam kinetik enerjisi Denklem (2.4)'de verilmiştir.

$$T_b = \frac{1}{2} m_b \left(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2\right) + \frac{1}{2} J_b \left(\omega_x^2 + \omega_y^2\right) \tag{2.4}$$

Denklem (2.4)'de m_b topun kütlesi ve $J_b$topun atalet momentidir. $\dot{x}_b$ ve $\dot{y}_b$ ise topun x ve y eksenlerindeki çizgisel hızları; $\dot{\omega}_x$ ve $\dot{\omega}_y$ ise topun x ve y eksenlerindeki açısal hızlarını göstermektedir.

$$\dot{x}_b = r_b\omega_y \ , \ \dot{y}_b = r_b\omega_x \tag{2.5}$$

Çizgisel ve açısal hızlar arasındaki dönüşüm bağıntısı Denklem (2.5)'deki gibi yazılıp Denklem (2.4) bu dönüşüme göre tekrar düzenlenirse, topun toplam kinetik enerjisi çizgisel hız cinsinden Denklem (2.6)'daki gibi elde edilir. Denklemdeki r_b ifadesi topun yarıçapını göstermektedir.

$$T_b = \frac{1}{2}\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)\left(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2\right) \tag{2.6}$$

Plakanın kinetik enerjisi için top, plaka üzerinde x_b ve y_b noktasında bir kütle olarak gösterilir ve merkeze göre olan öteleme ve dönme hareketi kinetik enerji denklemine eklenirse plakanın toplam kinetik enerjisi Denklem (2.7)'deki gibi yazılır.

$$T_p = \frac{1}{2}J_{px}\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}J_{py}\dot{\beta}^2 + \frac{1}{2}J_b\left(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2\right) + \frac{1}{2}m_b\left(x_b\dot{\alpha} + y_b\dot{\beta}\right)^2 \tag{2.7}$$

Denklem (2.7)'de J_{px} ve J_{py}, x ve y ekseninde plakanın atalet momentini göstermektedir. α ve β ise sırasıyla plakanın x ve y eksenlerine göre yaptığı açıyı ifade etmektedir. $\dot{\alpha}$ ve $\dot{\beta}$ ise plakanın x ve y eksenlerindeki açısal hızını göstermektedir.

Top ve plakaya ait kinetik enerjilerin toplanmasıyla sistemin toplam kinetik enerjisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$T = T_b + T_p$$

$$T = \frac{1}{2}\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)\left(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2\right) + \frac{1}{2}J_{px}\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}J_{py}\dot{\beta}^2 + \frac{1}{2}J_b\left(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2\right)$$

$$+ \frac{1}{2}m_b\left(x_b\dot{\alpha} + y_b\dot{\beta}\right)^2 \tag{2.8}$$

Topun potansiyel enerji denklemi (2.9)'da verilmiştir.

$$V = V_b = -m_b g\left(x_b \sin\alpha + y_b \sin\beta\right) \tag{2.9}$$

Sistemin kinetik ve potansiyel enerjileri bulunduktan sonra Lagrangian fonksiyonu Denklem (2.10)'daki gibi bulunur.

$$L = T - V$$

$$L = \frac{1}{2}\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)\left(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2\right) + \frac{1}{2}J_{px}\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}J_{py}\dot{\beta}^2 + \frac{1}{2}J_b\left(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2\right)$$

$$+ \frac{1}{2}m_b\left(x_b\dot{\alpha} + y_b\dot{\beta}\right)^2 - \left[-m_b g\left(x_b \sin\alpha + y_b \sin\beta\right)\right] \quad (2.10)$$

Bulunan denkleme x ve y eksenleri için Lagrange metodu uygulanırsa x ve y yönü için hareket denklemleri sırasıyla (2.11) ve (2.12)'deki gibi elde edilir. Lagrange metodu benzer şekilde α ve β açıları için uygulanırsa sisteme ait tork denklemleri (2.13) ve (2.14)'deki gibi bulunur. Denklemlerde τ_α ve τ_β sisteme uygulanan torkları ifade etmektedir.

$$\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)\ddot{x}_b - m_b x_b\dot{\alpha}^2 - m_b y_b\dot{\alpha}\dot{\beta} - m_b g\sin\alpha = 0 \quad (2.11)$$

$$\left(m_b + \frac{J_b}{r_b^2}\right)\ddot{y}_b - m_b y_b\dot{\beta}^2 - m_b x_b\dot{\alpha}\dot{\beta} - m_b g\sin\beta = 0 \quad (2.12)$$

$$\left(m_b x_b^2 + J_b + J_{px}\right)\ddot{\alpha} + 2m_b x_b\dot{x}_b\dot{\alpha} + m_b x_b y_b\ddot{\beta} + m_b\left(\dot{x}_b y + x\dot{y}_b\right)\dot{\beta}$$

$$= \tau_\alpha - m_b g x_b\cos\alpha \quad (2.13)$$

$$\left(m_b y_b^2 + J_b + J_{py}\right)\ddot{\beta} + 2m_b y_b\dot{y}_b\dot{\beta} + m_b x_b y_b\ddot{\alpha} + m_b\left(\dot{x}_b y + x\dot{y}_b\right)\dot{\alpha}$$

$$= \tau_\beta - m_b g y_b\cos\beta \quad (2.14)$$

Denklem (2.11) ve (2.12) top ve plaka arasındaki ilişkiyi, (2.13) ve (2.14)'deki denklemler ise sisteme etki eden torkları göstermektedir. (2.11)'deki denklem $\ddot{x}_b$ için çözülürse x ekseni için hareket denklemi (2.15)'deki gibi bulunur. Aynı şekilde (2.12)'deki denklem $\ddot{y}_b$ için çözülürse y ekseni için hareket denklemi (2.16)'daki gibi elde edilir.

$$\ddot{x}_b = \frac{m_b g r_b^2}{(m_b r_b^2 + J_b)}\sin\alpha \quad (2.15)$$

$$\ddot{y}_b = \frac{m_b g r_b^2}{(m_b r_b^2 + J_b)}\sin\beta \quad (2.16)$$

Son iki denklemdeki α ve β plaka açılarıyla aktüatör açıları θ_x ve θ_y arasındaki bağıntılar Denklem (2.17)'de gösterilmektedir.

$$\sin\alpha = \frac{r_m}{L_x}\sin\theta_x \ , \ \sin\beta = \frac{r_m}{L_y}\sin\theta_y \tag{2.17}$$

Hareket denklemleri (2.17)'ye göre düzenlenip motor açıları cinsinden tekrar yazılırsa Denklemler (2.18) ve (2.19)'daki gibi elde edilir.

$$\ddot{x}_b = \frac{m_b g r_b^2 r_m}{[(m_b r_b^2 + J_b)L_x]} \sin\theta_x \tag{2.18}$$

$$\ddot{y}_b = \frac{m_b g r_b^2 r_m}{[(m_b r_b^2 + J_b)L_y]} \sin\theta_y \tag{2.19}$$

Matematiksel modellemede kullanılan tüm parametreler Tablo 2.1'de sunulmuştur.

Tablo 2.1. Top ve plaka sistemi matematiksel model parametreleri

Sembol	**Değer**	**Birim**	**Açıklama**
m_b	0,263	kg	Topun kütlesi
r_b	0,02	m	Topun yarıçapı
r_m	0,02	m	Motor kol uzunluğu
g	9,81	m/s^2	Yerçekimi ivmesi
L_x	0.176	m	Plakanın x ekseni uzunluğu
L_y	0.1385	m	Plakanın y ekseni uzunluğu
x_b	Değişken	m	Topun x eksenindeki konumu
y_b	Değişken	m	Topun y eksenindeki konumu
α	Değişken	derece	Plakanın x eksenindeki açısı
β	Değişken	derece	Plakanın y eksenindeki açısı
θ_x	Değişken	derece	X ekseni motor açısı
θ_y	Değişken	derece	Y ekseni motor açısı
J_b	$4{,}208\text{x}10^{-5}$	kgm^2	Topun eylemsizlik momenti
J_{px}	$6{,}63\text{x}10^{-3}$	kgm^2	Plakanın x eksenindeki eylemsizlik momenti
J_{py}	$10{,}7\text{x}10^{-3}$	kgm^2	Plakanın y eksenindeki eylemsizlik momenti
τ_α	Değişken	Nm	Plakaya x ekseninde uygulanan tork değeri
τ_β	Değişken	Nm	Plakaya y ekseninde uygulanan tork değeri

2.3.3. Sistemin doğrusallaştırılması ve transfer fonksiyonu

Doğrusal olmayan terimlerden oluşan (2.18) ve (2.19)'daki hareket denklemleri bazı varsayımlar yapılarak basitleştirilebilmektedir. Bu denklemler çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılırsa küçük açılar için Denklem (2.20)'deki ifadeler yazılabilir.

$$\sin\theta_x \approx \theta_x, \quad \sin\theta_y \approx \theta_y \tag{2.20}$$

Hareket denklemlerin doğrusallaştırılmış hali Denklem (2.21) ve (2.22)'deki gibidir.

$$\ddot{x}_b = \frac{m_b g r_b^2 r_m}{[(m_b r_b^2 + J_b)L_x]}\theta_x = K_x\theta_x \tag{2.21}$$

$$\ddot{y}_b = \frac{m_b g r_b^2 r_m}{[(m_b r_b^2 + J_b)L_y]}\theta_y = K_y\theta_y \tag{2.22}$$

Sistem transfer fonksiyonunu bulmak için top ve plaka mekanizmasında giriş olarak aktüatör açıları θ_x ve θ_y, çıkış olarak topun konumu x_b ve y_b seçilirse ve Laplace dönüşümleri alınırsa, x ve y eksenleri için transfer fonksiyonları Denklem (2.23) ve (2.24)'deki gibi elde edilir.

$$G_X(s) = \frac{X_b(s)}{\theta_x(s)} = \frac{K_x}{s^2} \qquad K_x = \frac{m_b g r_b^2 r_m}{[(m_b r_b^2 + J_b)L_x]} \tag{2.23}$$

$$G_Y(s) = \frac{Y_b(s)}{\theta_y(s)} = \frac{K_y}{s^2} \qquad K_y = \frac{m_b g r_b^2 r_m}{[(m_b r_b^2 + J_b)L_y]} \tag{2.24}$$

2.3.4. Sistemin durum uzayında gösterilmesi

Top ve plaka sisteminin dinamik davranışları diferansiyel denklem formundan başka olarak durum uzayı formunda da gösterilebilmektedir. Bu yöntemde sistemin dinamik davranışlarını gösteren durum denklemleri oluşturulmaktadır. Sistemin durum uzayında gösterilebilmesi için durum değişkenleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$x_1 = x_b \tag{2.25}$$

$$x_2 = \dot{x}_b$$

$$x_3 = y_b$$

$$x_4 = \dot{y}_b$$

Denklem 2.25'de görüldüğü gibi durum değişkenleri olarak, topun x ve y eksenlerindeki konumu ve hızı seçilmiştir. Belirlenen bu değişkenler arasında gerekli

dönüşümler yapılıp denklemlerin tekrar düzenlenmesiyle (2.26)'daki denklemler elde edilir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \tag{2.26}$$

$$\dot{x}_2 = K_x\theta_x$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = K_y\theta_y$$

Bir sistemin durum uzayında gösterimi genel olarak Denklem (2.27)'deki gibi olmaktadır. Burada x durum değişkeni, u giriş vektörü (motorun x ve y eksenindeki açıları: θ_x ve θ_y) ve y çıkış vektörü olarak tanımlanmaktadır [23].

$$\dot{x} = Ax + Bu \qquad y = Cx + Du \tag{2.27}$$

Durum değişkenlerine ait denklemler düzenlenip matris formuna getirildikten sonra sistemin doğrusallaştırılmış durum uzay gösterimi aşağıdaki gibi elde edilir.

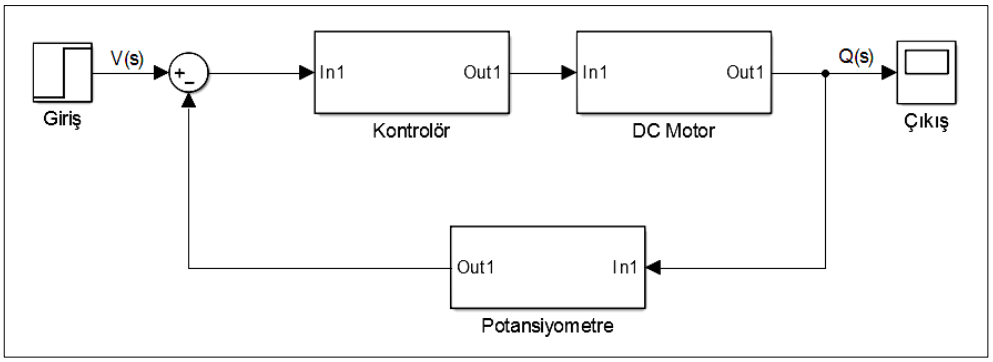
$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\\ \dot{x}_4\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\\ x_4\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0\\ K_x & 0\\ 0 & 0\\ 0 & K_y\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_x\\ u_y\end{bmatrix} \tag{2.28}$$

Top ve plaka sisteminde çıkış olarak topun x ve y eksenlerindeki konumu alındığı için y çıkış vektörü aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix}y_1\\ y_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\\ x_4\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_x\\ u_y\end{bmatrix} \tag{2.29}$$

2.3.5. Aktüatörlerin matematiksel modeli

Top ve plaka sisteminde aktüatör olarak DC servo motorlar kullanılmıştır. Servo motora ait genel blok diyagram Şekil 2.5'deki gibidir. Servo motorun birinci dereceden transfer fonksiyonu, K_M sistem kazancı ve τ zaman sabiti olmak üzere Denklem (2.30)'da verilmiştir.



Şekil 2.5. DC servo motor genel blok diyagram

Transfer fonksiyonunda sistemin girişi V_M motor armatür gerilimini, θ ise çıkışı yani motor milinin açısal konumunu ifade etmektedir.

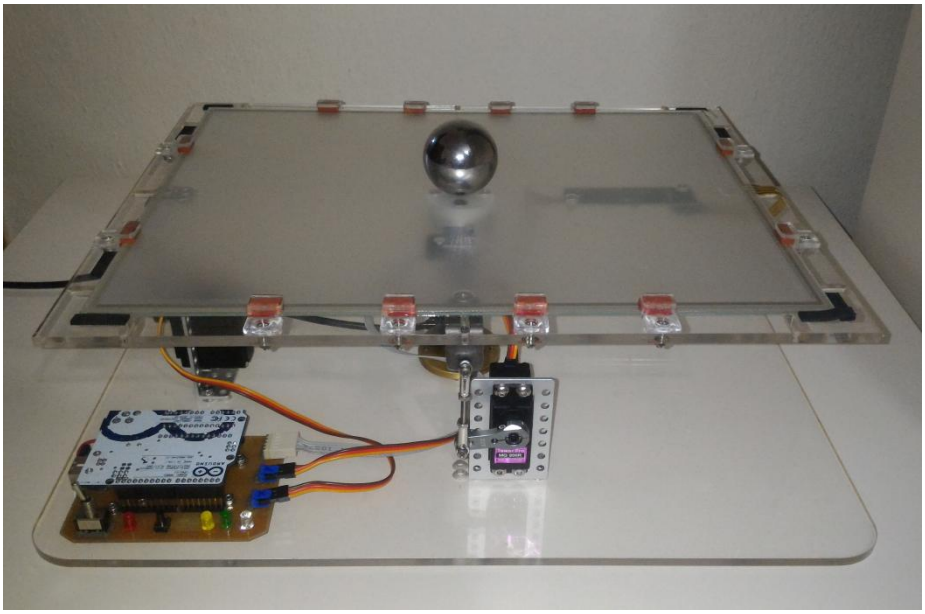
Sistem kazancı K_M ve zaman sabiti τ, top ve plaka sistemi için sırasıyla 120 ve 0,01 olarak hesaplanmıştır.

$$G_M(s) = \frac{\theta(s)}{V_M(s)} = \frac{K_M}{\tau s + 1} = \frac{100}{0{,}01 s + 1} \tag{2.30}$$

3. DENEY DÜZENEĞİ

Top ve plaka sistemi mekanik, elektronik ve otomatik kontrol gibi farklı disiplinleri içinde barından mekatronik bir tasarımdır. Sistem tasarımı için öncelikle detaylı bir literatür taraması yapılarak daha önce yapılan top ve plaka sistemi uygulamaları mekanik tasarım, elektronik tasarım ve programlama yöntemi gibi bazı kategoriler oluşturularak incelenmiştir. Bölüm 2'de bahsedildiği gibi yapılan çalışmaların birbirleriyle, sistemde kullanılan aktüatör tipleri ve sayıları, kullanılan plakanın geometrik şekli ve ebatları, kullanılan topun malzemesi ve çapı, elektronik altyapıları ve topu algılama sensörleri ve kullanılan kontrol algoritmaları gibi birçok kategoride farklılıkları veya benzerlikleri olabilmektedir.

Bu tez çalışması için tasarlanan top ve plaka sistemi Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Deney düzeneğinin tasarım aşamaları mekanik, elektronik ve yazılım geliştirme başlıkları altında incelenmiştir. Birbirinden farklı olan bu tasarım konularının birleştirilmesi ve birbirleriyle uyum içinde çalışması sağlanarak top ve plaka sistemi deney düzeneğinin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

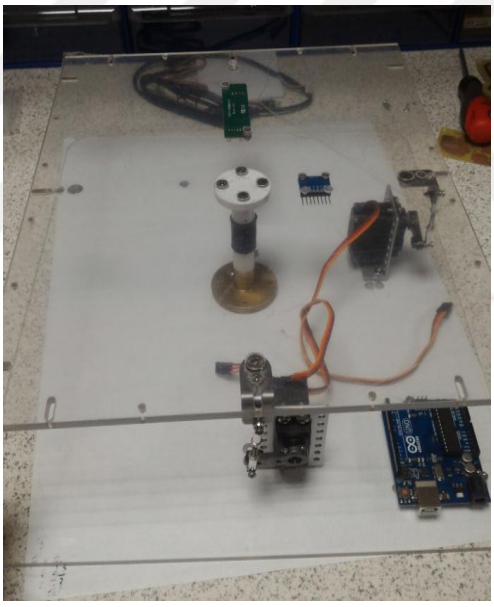


Şekil 3.1. Top ve plaka sistemi deney düzeneği

3.1. Mekanik Tasarım

Mekanik tasarımda ilk olarak sisteme ait hedef ölçüler belirlenmiştir. Belirlenen ölçülere göre bilgisayar üzerinde katı modelleme programı yardımıyla ön tasarımlar oluşturulmuştur.

Topun üzerinde hareket edeceği üst plakanın ve tüm sistemi üzerinde taşıyacak taban plakasının malzemesi şeffaf pleksiglas malzemeden seçilmiştir. Üst plakayı x ve y eksenlerinde hareket ettirmek için üniversal mafsal kullanılmıştır. Üniversal mafsal üst plakanın merkezine Şekil 3.2'deki gibi konumlandırılmıştır. Üst plakayı tabana bağlayabilmek için rijit bir çubuk üniversal mafsal ile taban plakasının merkezindeki ankastre mesnetin arasına konumlandırılmıştır.



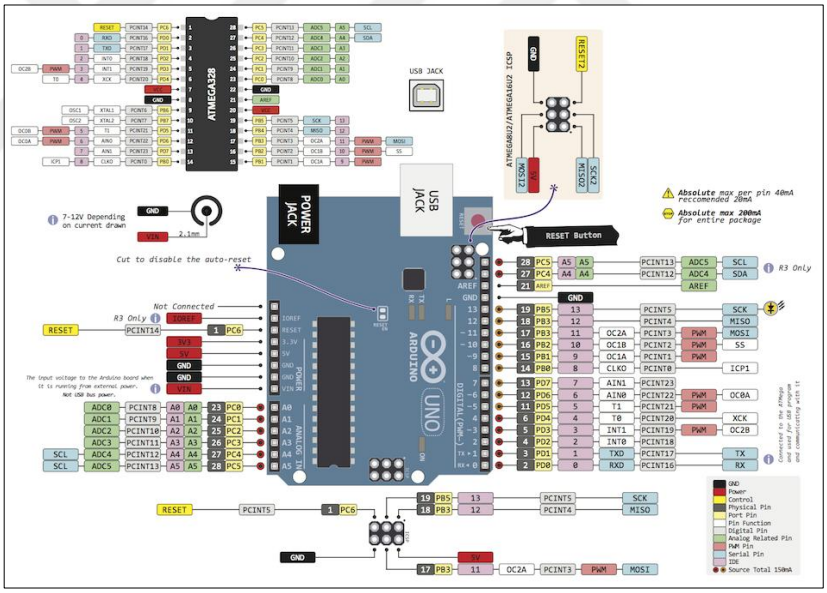
Şekil 3.2. Üst plaka ve alt plakanın birleştirilmesi

Sistemde kullanılan aktüatörler, braketler yardımıyla Şekil 3.2'de görüldüğü gibi alt plakaya tutturulmuştur. Motor kolları ile üst plakanın bağlantısı, üzerinde iki serbestlik dereceli mafsallar bulunduran iki adet rijit çubukla yapılmıştır. Böylece motor milinin konumundaki herhangi bir değişiklik üst plakanın x veya y ekseni üzerinde açısal hareketini sağlamakta ve plakaya eğim vermektedir. Servo motorlardaki redüktörlü yapı iyi bir durdurma torku sağlayarak sistemin boştayken son durumdaki konumunu korumasını sağlamaktadır.

3.2. Elektronik Tasarım

Top ve plaka sisteminde plakanın x ve y eksenleri üzerinde açısal hareketi sistemde bulunan iki adet standart RC servo motordan aldığı tahrikle sağlanmaktadır. Servo motorun kendi içerisinde Şekil 2.5'de gösterildiği gibi bir kapalı çevrim kontrol sistem yapısı vardır. Darbe genişlik modülasyonu (duty cycle) ile kontrol edilebilen bu servo motorlar giriş sinyalindeki doluluk oranına göre mil açılarını 0° ile 180° arasında konumlandırmaktadır [24]. Servo motor milinin konum geri beslemesi motor miline bağlı bir potansiyometre ile alınmaktadır.

Top ve plaka sisteminde elektronik kontrol ünitesi olarak Arduino Uno R3 model geliştirme kartı kullanılmıştır. Geliştirme kartı üzerinde Atmega328 mikrodenetleyicisi bulunmaktadır. Arduino Uno üzerindeki donanımı ve pin çıkışlarını gösteren ayrıntılı şema Şekil 3.3'de verilmiştir [25].

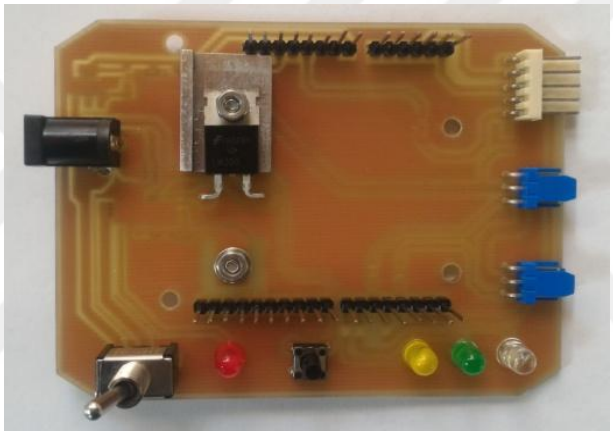


Şekil 3.3. Geliştirme kartı pin diyagramı

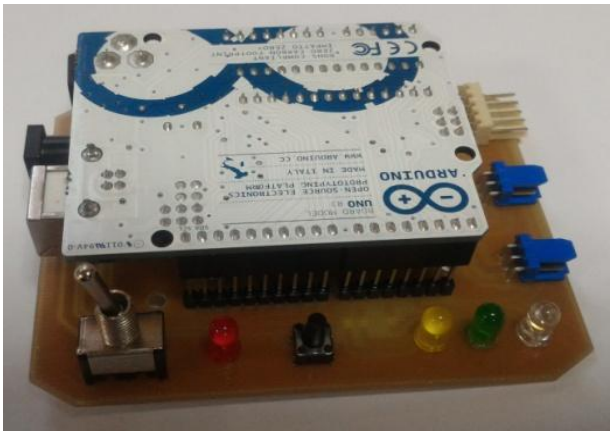
Geliştirme kartına ait bazı teknik özellikler aşağıdaki gibidir [25].

i. 16MHz Kristal
ii. 14 Adet Giriş/Çıkış pini (6Adet PWM)
iii. 6 Adet ADC pini
iv. 32Kb Flash Hafıza
v. 1Kb EEPROM

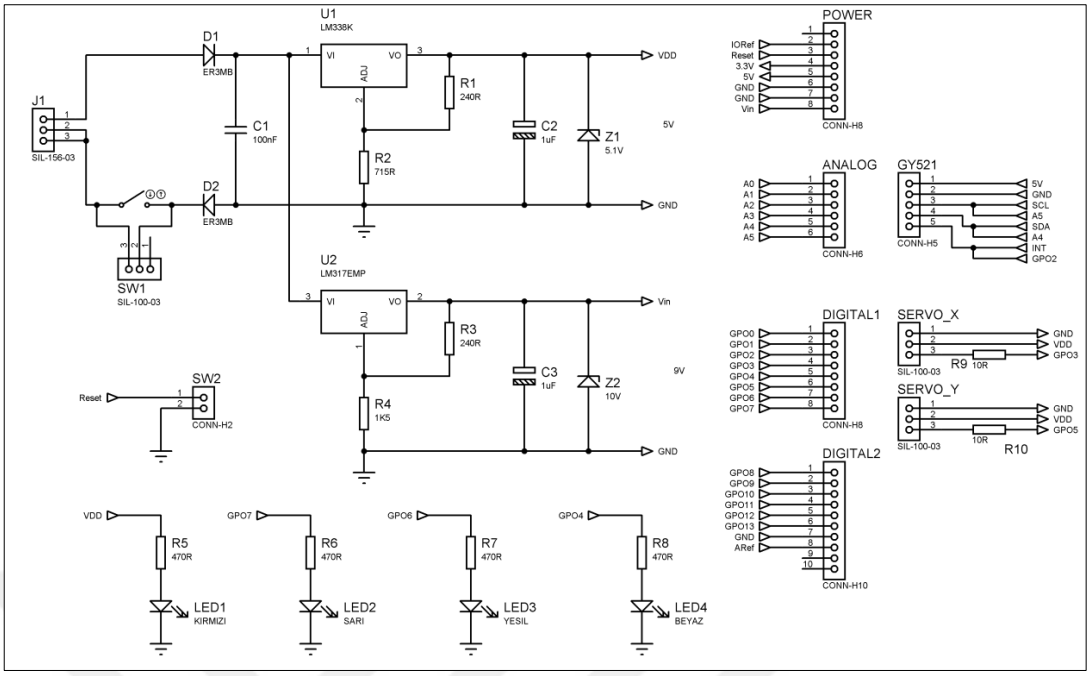
Top ve plaka sistemiyle geliştirme kartının bütünleşebilmesi amacıyla Şekil 3.4'deki elektronik kart tasarlanmıştır. Kart üzerinde regülatör ve sürücü birimleri bulunmakla beraber genel kullanım amaçlı led indikatörler de tasarıma eklenmiştir. Sistemin besleme gerilimi 12V DC ile 24V DC arasında olabilmektedir. Kart üzerinde x ve y eksenlerine ait iki adet servo motor çıkışı ve bir adet gyro sensör girişi bulunmaktadır. Modüler bir tasarım olması amacıyla tasarlanan kart ile geliştirme kitinin birbirleriyle bağlantısı Şekil 3.5'deki gibi header pinler üzerinden sağlanmıştır. Kontrol kartının bilgisayar ile haberleşmesi geliştirme kiti üzerinde bulunan USB bağlantı yolu ile sağlanmaktadır. Tasarıma ait açık devre şeması Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.4. Elektronik güç ve sürücü kartı



Şekil 3.5. Kontrol kartı



Şekil 3.6. Elektronik açık devre şeması

Açık devre şemasından görüldüğü gibi top ve plaka sistemi kontrol kartında GY521 tipi gyro ve ivmelenme sensörü için giriş eklenmiştir. GY521 üzerinde 3 eksenli bir gyro ve 3 eksenli bir açısal ivme ölçer bulundurmaktadır. I^2C protokolüyle haberleşebilen bu sensör her eksende 16 bitlik çözünürlüğe sahiptir [26]. GY521 sensörü, top ve plaka sisteminde plakanın alt yüzeyine ileriki çalışmalarda plaka eğiminin hassas bir biçimde ölçülebilmesi amacıyla konumlandırılmıştır.

Top ve plaka sisteminde topun plaka üzerindeki konumunun anlık algılanabilmesi önemli bir konudur. Bu çalışmada topun konumunun algılanabilmesi için dört telli rezistif yapıya sahip dokunmatik ekran kullanılmıştır. Dokunmatik ekran ebatı 15 inch (322mm × 247mm) olup algılama işlemi 310mm×236mm'lik bir alan içerisinde gerçekleşmektedir. Sistemde kullanılan dokunmatik ekran kendi kontrol kartına sahiptir. Bu kart ile dokunmatik ekrandan gelen konum sinyalleri işlenmekte ve işlenen sinyaller USB bağlantı yoluyla bilgisayara aktarılabilmektedir.

3.3. Yazılım Geliştirme

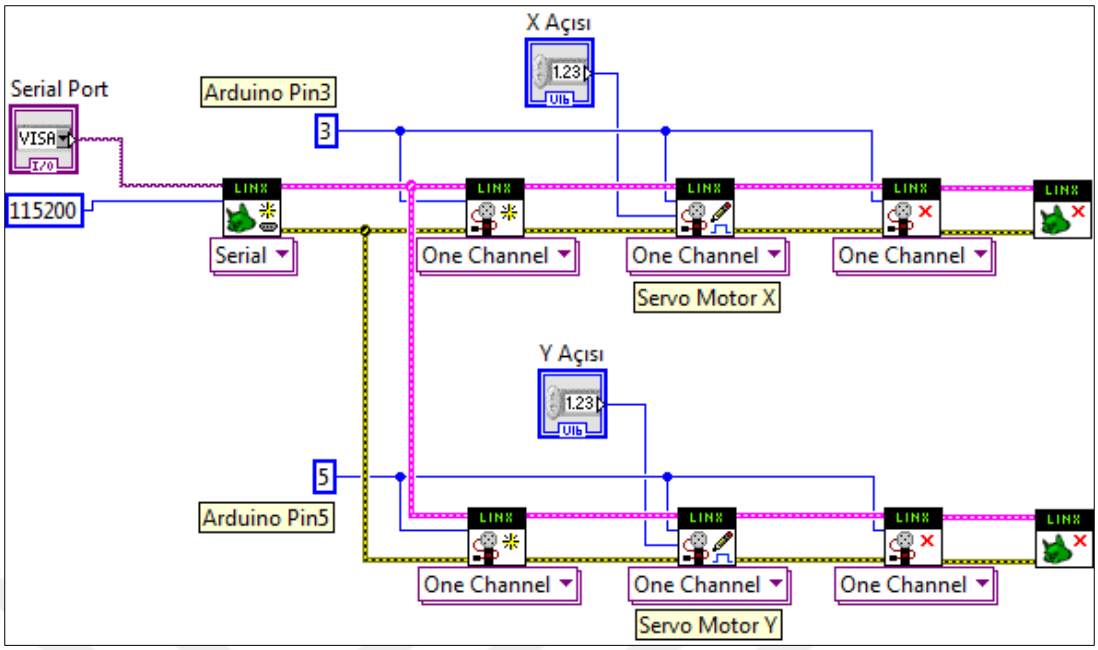
Top ve plaka sisteminde kullanılan Arduino Uno R3 geliştirme kiti açık kaynak yazılım olan Arduino IDE ile programlanabilmektedir. Derleyici, kullanıcıya hazır fonksiyonlar sunarak programlama kolaylığı sağlamaktadır; fakat karmaşık

algoritmalarda hazır fonksiyonlar veya programlamada kullanılan matematiksel işlemlerin karmaşıklığı sistemi yavaşlatabilmektedir. Böyle bir yavaşlama gerçek zamanda kontrol yapılması amaçlanan sistemlerde istenmeyen bir durumdur. Top ve plaka sisteminde hem karmaşık algoritmalar ile çalışabilmek hem de sistemi gerçek zamanda kontrol edebilmek için LabVIEW programı kullanılmıştır.

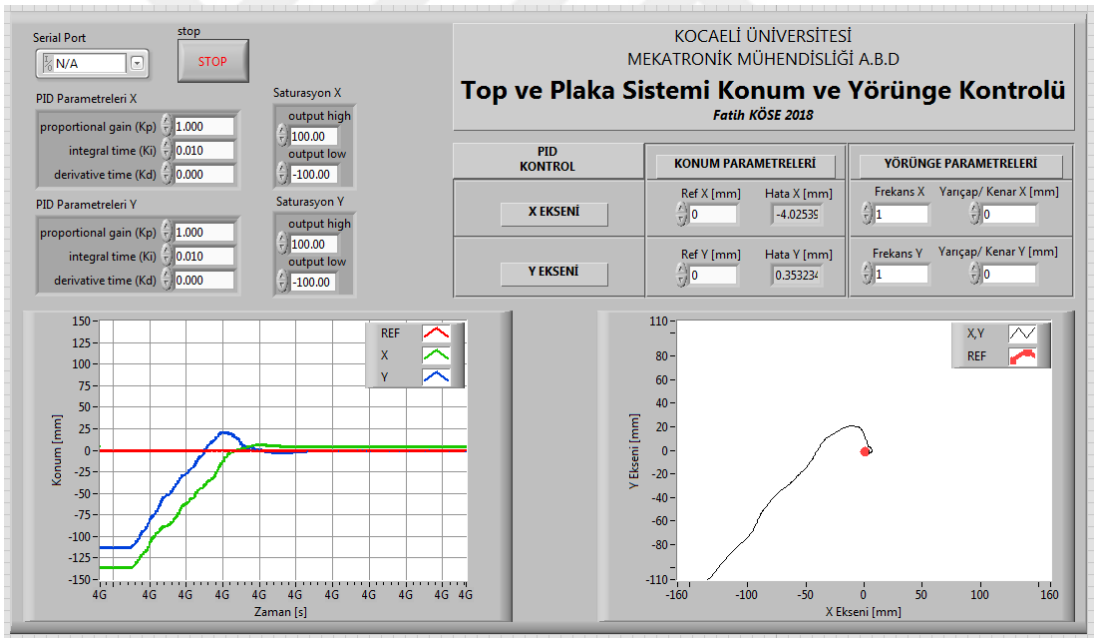
LabVIEW programının top ve plaka sistemi için en önemli özelliklerinden bir tanesi geleneksel programlama dillerinden farklı olarak grafik gösterim üzerinden programlama yapılabilmesi ve aynı zamanda kullanıcı ara yüzü oluşturulabilmesidir. Geleneksel programlama tekniklerinde kodlar metin şeklinde yazılmaktayken, LabVIEW üzerinde programlar farklı işlevsel özelliklere sahip blokların birbirlerine bağlanması ile oluşturulmaktadır. Geniş bir Arduino Uno kütüphanesine sahip olmakla birlikte farklı geliştirme kartlarını programlamak için hazırlanmış kütüphaneler de Arduino Uno üzerinde bir dizi işlemden sonra kullanılabilmektedir. Böylece Arduino kütüphanesinde bulunmayan özel bloklar bu yöntemle programlamaya dahil edilerek kolaylık ve esneklik sağlanmaktadır.

Programın koşturulması sırasında anlık olarak istenilen verilerin grafikleri ekranda çizdirilebilmekte, istenilen kaydedicilere ulaşılıp okunmakta veya içeriği değiştirilebilmektedir.

Top ve plaka sisteminde test edilen temel kontrol algoritması LabVIEW üzerinden bilgisayar ortamında koşturulmuştur. Topun konumu dokunmatik ekrandan USB bağlantı yoluyla bilgisayara ve LabVIEW programına aktarılmıştır. Dokunmatik ekran için özel bloklar kullanılarak gelen veriler programda dolayısıyla bilgisayar ortamında işlenmiştir. Böylece Arduino Uno'nun işlem yükü hafifletilmiştir. Top ve plaka sisteminde Arduino Uno servo motorları istenilen açı konumuna getirmek için kullanılmıştır. LabVIEW üzerinden gelen x ve y eksenleri için açı değerleri Arduino Uno üzerinde PWM sinyaline dönüştürülerek servo motorlar kontrol edilmektedir. Şekil 3.7'de servo motorların kontrolü için LabVIEW üzerinde tasarlanan program bloğu verilmiştir. Programda x eksenindeki motor Arduino Uno'nun 3 nolu dijital pinine, y eksenindeki motor ise 5 nolu dijital pinine tanımlanmıştır.



Şekil 3.7. Servo motor kontrol programı



Şekil 3.8. Top ve plaka sistemi PID kontrol ara yüz tasarımı

Şekil 3.8'de LabVIEW ortamında PID kontrol için hazırlanan kullanıcı ara yüz ekranı gösterilmektedir. Kayma kipli ve bulanık mantık kontrol için hazırlanan ara yüz ekranları da benzer özelliktedir; fakat kontrolör parametrelerini giriş ekranları farklıdır. Şekilde görüldüğü gibi ekranda gerçek zamanda iki grafik çizdirilmektedir. Bunlardan bir tanesi zamana bağlı olarak topun x ve y eksenlerinde yaptığı hareketi, diğeri ise plaka üzerindeki topun iki boyutlu konumunu ve referans konumu

göstermektedir. Böylece top ve plaka sisteminin kontrol performansı anlık olarak grafikler üzerinden gözlemlenebilmektedir.

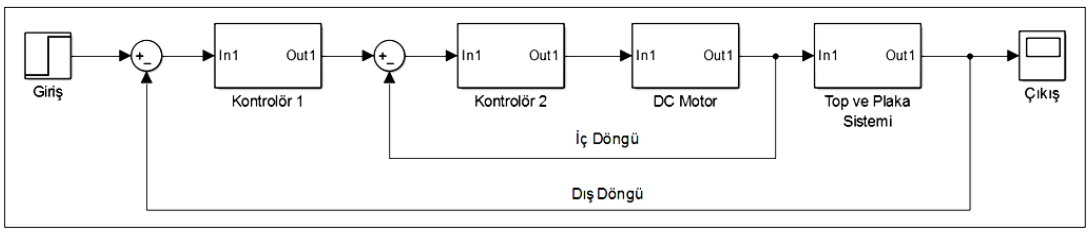
Konum kontrolü için x ve y eksenlerinde referans girişler ekran üzerinden verilebilmektedir. Aynı zamanda hata durumu da her bir eksen için nümerik olarak gösterilmektedir. Topa daire yörüngesi çizdirilmek istenirse referanslar yarıçap olarak x ve y eksenleri için girilir. Program kısmından sinyal jeneratörleri ‘sinüs’ olarak ayarlanmalıdır. Topa kare veya dikdörtgen yörüngesi çizdirilmek istenirse x ve y eksenlerindeki referans kenar uzunlukları girilir ve program kısmından sinyal jeneratörleri ‘kare’ olarak seçilir. Frekans parametresi referans sinyallerin çizdirilme hızını ifade etmektedir.

4. KONTROL ALGORİTMALARI

Top ve plaka sistemi iki giriş ve iki çıkışa sahip eksik tahrikli ve çok değişkenli bir sistemdir. Sistemin matematiksel modelinde elde edilen doğrusal olmayan denklemler kontrol tasarımını karmaşık hale getirmektedir.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi top ve plaka sisteminde daha etkin bir kontrol sağlamak amacıyla iç döngü ve dış döngü olmak üzere çift geri besleme yapısına sahip bir kontrol döngüsü kullanılmaktadır. Dış döngü topun konumuna göre plaka açı değerini hesaplamaktadır. İç döngü ise dış döngüden gelen açı değerine göre motor mil konumunu ayarlamaktadır.

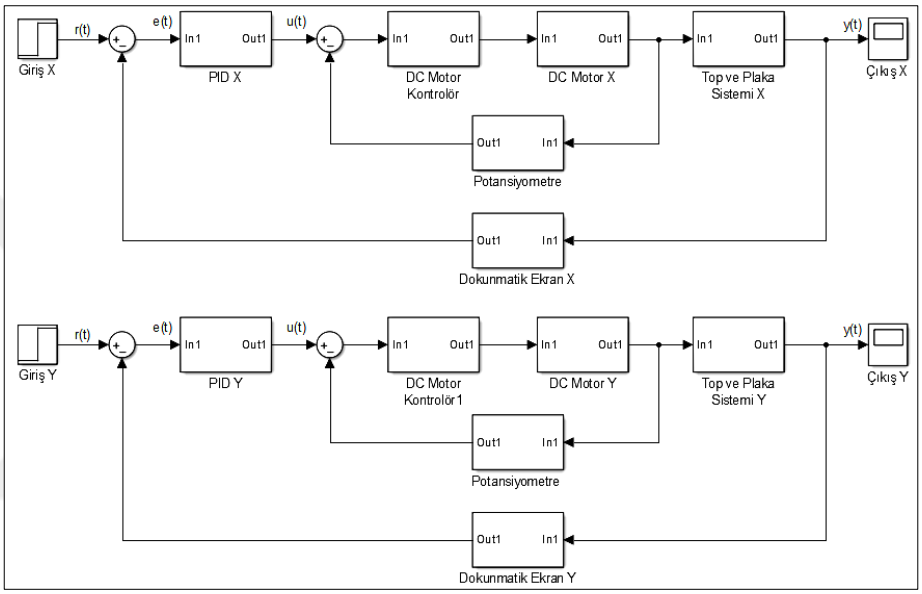
Bu tez çalışmasında hazırlanan top ve plaka sistemi için iç döngü servo motorlar ile oluşturulmuştur. Servo motorun iç kısmında sabit mıknatıslardan oluşan bir DC motor ve DC motorun miline bağlı bir potansiyometre bulunmaktadır. Potansiyometre motor milinin konumunu geri besleme olarak servo motorun içerisinde bulunan kontrol kartına aktarır ve motorun milinin konum kontrolü kendi kontrol kartı üzerinden yapılmış olur. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi dc motorun çıkışı sistem bloğunun girişini oluşturmaktadır. Top ve plaka sistem girişleri motor açıları, sistem çıkışları ise topun x ve y eksenleri üzerindeki konumudur. Dış döngüde geri besleme topun x ve y eksenleri üzerindeki konumudur. Topun konumu dokunmatik ekran ile geri besleme olarak alınmaktadır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi alınan geri besleme referans giriş ile karşılaştırılıp hata sinyali elde edilmekte ve bu hata sinyali kontrolöre girilerek uygun açı değerine karşılık gelen PWM sinyali oluşturulmaktadır.



Şekil 4.1. Top ve plaka sistemi çift geri besleme döngüsü

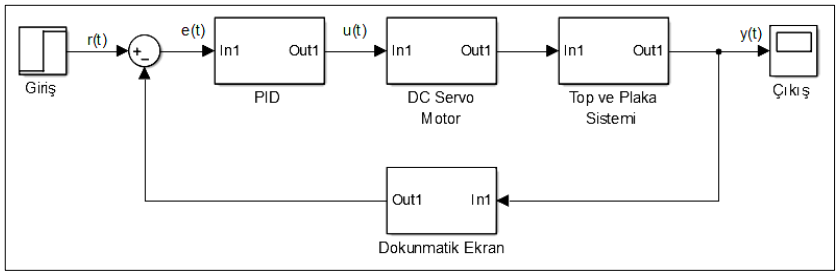
4.1. PID Kontrolör Tasarımı

Top ve plaka sisteminin Denklem (2.21) ve (2.22)'deki doğrusallaştırılmış matematiksel modeli üzerinden PID kontrol uygulanabilmektedir. Sistemin PID kontrol döngüsüne ait genel şeması Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi x ve y eksenleri için PID kontrolör tasarımları ayrıdır. PID kontrol parametreleri olan K_P, K_I ve K_D'nin alacağı değerler de her iki eksen için birbirinden bağımsız ayarlanmaktadır.



Şekil 4.2. Top ve plaka sistemi PID kontrol genel şema

Bu çalışmada kontrol döngüsünde iç döngüyü DC servo motorlar oluşturmaktadır. Servo motor kontrol çevrimini kendi içerisinde yapmaktadır. Bu ifade göz önüne alınarak her iki eksen için de kullanılabilecek döngü Şekil 4.3'deki gibi tekrardan düzenlenebilir. Şekilde görüldüğü gibi PID çıkışı servo motorların girişini oluşturmaktadır. Girişindeki sinyale göre servo motorlar eksenlerde θ_x ve θ_y çıkış açılarını oluşturmaktadır ve bu açılar da sistem bloğunun girişleridir.



Şekil 4.3. Top ve plaka sistemi PID kontrol basitleştirilmiş şema

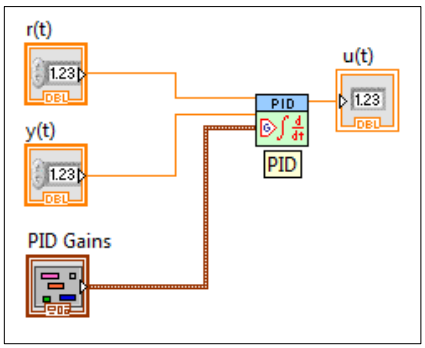
Top ve plaka sisteminde her iki eksen için kullanılan paralel PID kontrol algoritmasına ait çıkış değeri Denklem (4.2)'de verilmiştir. Hata sinyalinin gösterimi ise Denklem (4.1)'deki gibidir.

$$e(t) = r(t) - y(t) \tag{4.1}$$

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \tag{4.2}$$

Denklem (4.1)'de görüldüğü gibi hata sinyali e(t), referans girişi ile sistem çıkışının farkıdır. Hata sinyalinin hesaplanması ile K_P oransal terimi hata sinyaliyle, K_I integral terimi hata sinyalinin integraliyle ve K_D türev teriminin hata sinyalinin türevi ile çarpılarak hepsinin toplanmasıyla PID çıkış sinyali elde edilmektedir.

PID algoritmasının LabVIEW ortamında oluşturulabilmesi için farklı yöntemler mevcuttur. Bunlardan biri hazır PID bloğunu kullanmak diğeri ise Denklem (4.2)'deki matematiksel işlemi uygun bloklar yardımı ile tasarlamaktır. Sonuç olarak iki yöntem de aynı çıkış sinyali elde edilmektedir. Bu çalışmada Şekil 4.4'de verilen PID bloğu kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi PID parametreleri bloğa giriş olarak verilmektedir ve tasarlanan ara yüz üzerinden bu parametrelere ulaşılıp kontrol edilebilmektedir. Ayrıca referans sinyal ile sistemin geri beslemesi de PID bloğuna giriş olarak verilebilmektedir. Böylece Denklem (4.1)'deki hata sinyalinin bulunması işlemini blok kendi içerisinde hesaplamaktadır. u(t) çıkış sinyali eksenlerdeki servo motorların giriş sinyalini oluşturmaktadır; fakat bu sinyaller PID bloğundan PWM sinyali olarak gelmediği için öncelikle Arduino Uno kontrol kartına gönderilmekte ve oradan da PWM sinyaline çevrilerek servo motorlara iletilmektedir.



Şekil 4.4. PID bloğu ve giriş çıkışları

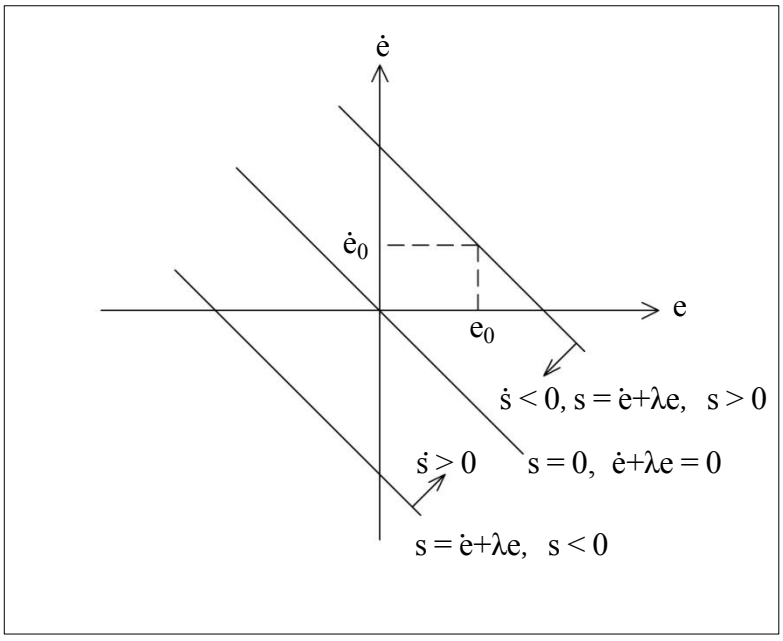
4.2. Kayma Kipli Kontrolör Tasarımı

Gerçek dinamik sistemler üzerinde tasarım hataları, çevresel ortam şartlarından gelebilecek istenmeyen basınç ve sıcaklık değişimleri, titreşim kaynaklı bozucu etkiler veya voltaj değişimi gibi elektriksel gürültülerin oluşturacağı kararsız durumlardan kaçınmak imkansız olabilmektedir. Kayma kipli kontrol, bozucu etkilere ve parametre değişimlerine karşı sistem üzerinde istenen dinamik davranışı sağlayan gürbüz bir kontrol tekniği özelliği ile bilinmektedir. Bu sebeple kayma kipli kontrol doğrusal veya doğrusal olmayan sistemlerde uygulanabilen bir kontrol biçimidir [8, 27]. Kayma kipli kontrol tasarımlarında amaç, kontrol edilecek sistemin belirlenen durum değişkenlerini "kayma yüzeyi" olarak ifade edilen bir yüzey üzerinde tutmak ve bu kayma yüzeyi ile sistem çıkışını istenilen değerlere taşımaktır [28]. Kayma kipli kontrol "erişme" ve "kayma" olmak üzere iki evreden oluşmaktadır. Erişme evresi için temel kurallar Denklem (4.3), (4.4) ve (4.5)'de verilmiştir. Kayma yüzeyi hareketleri Şekil 4.5'deki gibi olmaktadır [8].

Sabit değişimli erişim kuralı: $\dot{s} = -p.sign(s)$ (4.3)

Sabit-oransal değişimli erişim kuralı: $\dot{s} = -p.sign(s) - Ks$ (4.4)

Üstel değişimli erişim kuralı: $\dot{s} = -p.|s|^{a}sign(s)$ (4.5)



Şekil 4.5.Kayma yüzeyi [8]

Top ve plaka sistemine kayma kipli kontrolü uygulamak için öncelikle sistemin x ve y eksenlerindeki hareket denklemlerine ihtiyaç vardır. Bölüm 2'de bulunan hareket denklemleri (4.6) ve (4.7)'de tekrar verilmiştir.

$$\ddot{x}_b = \frac{m_b g r_b^2 r_m}{[(m_b r_b^2 + J_b)L_x]} \sin\theta_x \tag{4.6}$$

$$\ddot{y}_b = \frac{m_b g r_b^2 r_m}{[(m_b r_b^2 + J_b)L_y]} \sin\theta_y \tag{4.7}$$

Kayma kipli kontrol için kayma yüzeyi Denklem (4.8) ve (4.9)'daki gibi seçilmiştir.

$$s = \dot{e} + \lambda e \tag{4.8}$$

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} \tag{4.9}$$

Hata sinyali Denklem (4.10)'da tekrar yazılırsa ve x ekseni için r(t) topun referans konumu ve y(t) topun konumu olarak tekrar düzenlenirse Denklem (4.11) edilir. Bunların birinci ve ikinci türevleri de sırasıyla (4.12) ve (4.13)'deki gibi yazılabilir.

$$e(t) = r(t) - y(t) \tag{4.10}$$

$$e = x_r - x_b \tag{4.11}$$

$$\dot{e} = \dot{x}_r - \dot{x}_b \tag{4.12}$$

$$\ddot{e} = \ddot{x}_r - \ddot{x}_b \tag{4.13}$$

Burada belirtilen x_r topun referans konumu ve sabit sayı olmasından dolayı Denklem (4.14)'deki eşitlikler yazılabilir.

$$\dot{x}_r = 0, \quad \ddot{x}_r = 0 \tag{4.14}$$

Erişme kuralı için Denklem (4.3)'deki sabit değişimli erişim kuralı seçilirse aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\ddot{x}_r - \ddot{x}_b + \lambda(\dot{x}_r - \dot{x}_b) = -p.sign(s) \tag{4.15}$$

$$-\ddot{x}_b - \lambda \dot{x}_b = -p.sign(s) \tag{4.16}$$

$$\ddot{x}_b = p.sign(s) - \lambda \dot{x}_b \tag{4.17}$$

$$p.sign(s) - \lambda \dot{x}_b = \frac{m_b g r_b^2 r_m}{[(m_b r_b^2 + J_b)L_x]} \sin\theta_x \ , \qquad K_x = \frac{m_b g r_b^2 r_m}{[(m_b r_b^2 + J_b)L_x]} \tag{4.18}$$

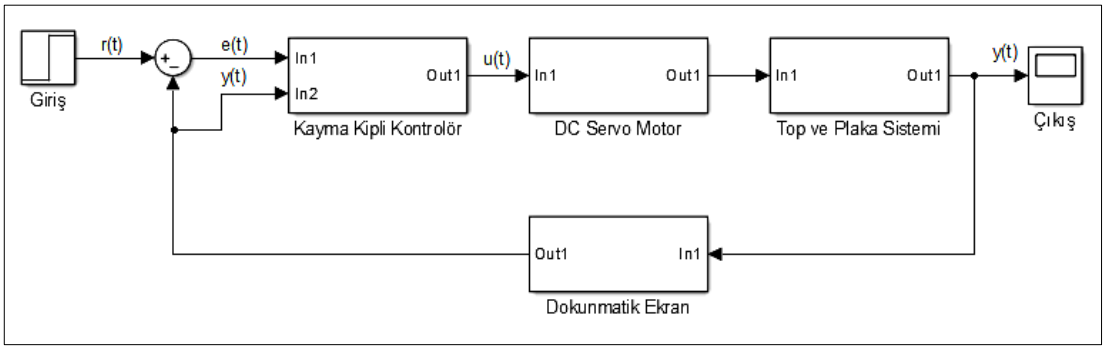
$$\sin^{-1}\left(\frac{p.sign(s)}{K_x} - \frac{\lambda \dot{x}_b}{K_x}\right) = \theta_x \tag{4.19}$$

Sisteme uygulanacak giriş sinyali x ekseni için Denklem (4.20)'de verilmiştir. Benzer şekilde y ekseni için aynı işlemler tekrarlanırsa giriş sinyali Denklem (4.21)'deki gibi elde edilir. Görüldüğü gibi giriş sinyalini oluşturan denklemler doğrusal olmayan terimler içermektedir.

$$u_x(t) = \theta_x = \sin^{-1}\left(\frac{p.sign(s)}{K_x} - \frac{\lambda \dot{x}_b}{K_x}\right) \tag{4.20}$$

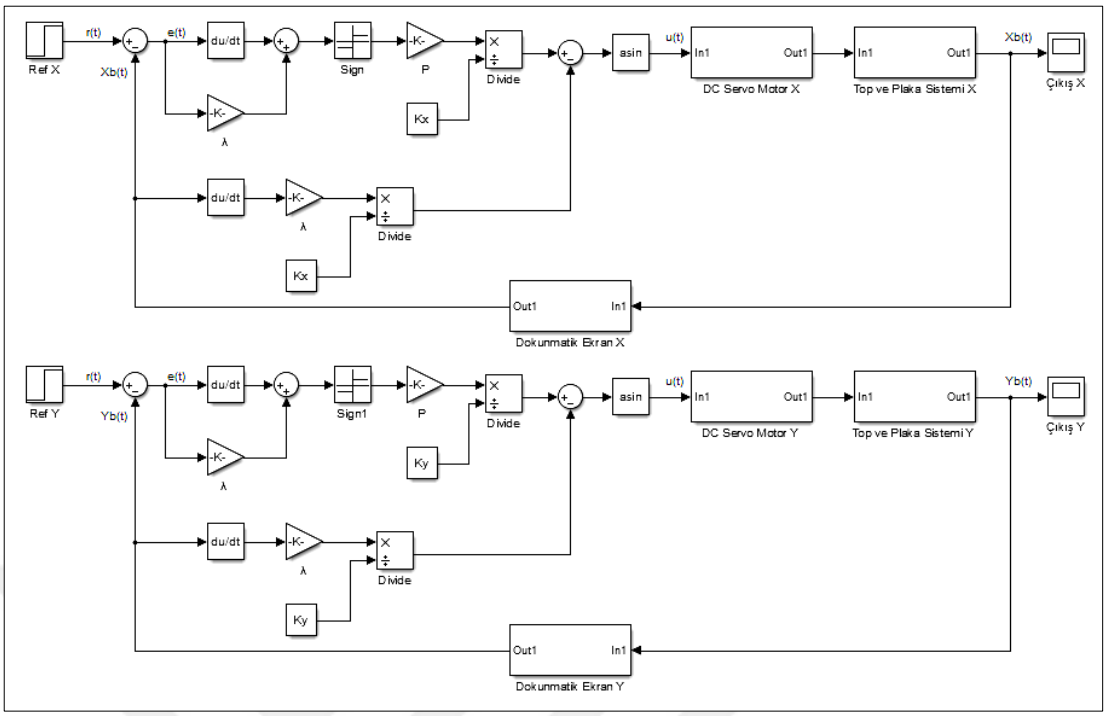
$$u_y(t) = \theta_y = \sin^{-1}\left(\frac{p.sign(s)}{K_y} - \frac{\lambda \dot{y}_b}{K_y}\right) \tag{4.21}$$

Şekil 4.6'da kayma kipli kontrolün top ve plaka sistemi için tasarlanmış blok şeması verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kontrolörün içine hata ve sistemin çıkış sinyali girilmiştir.



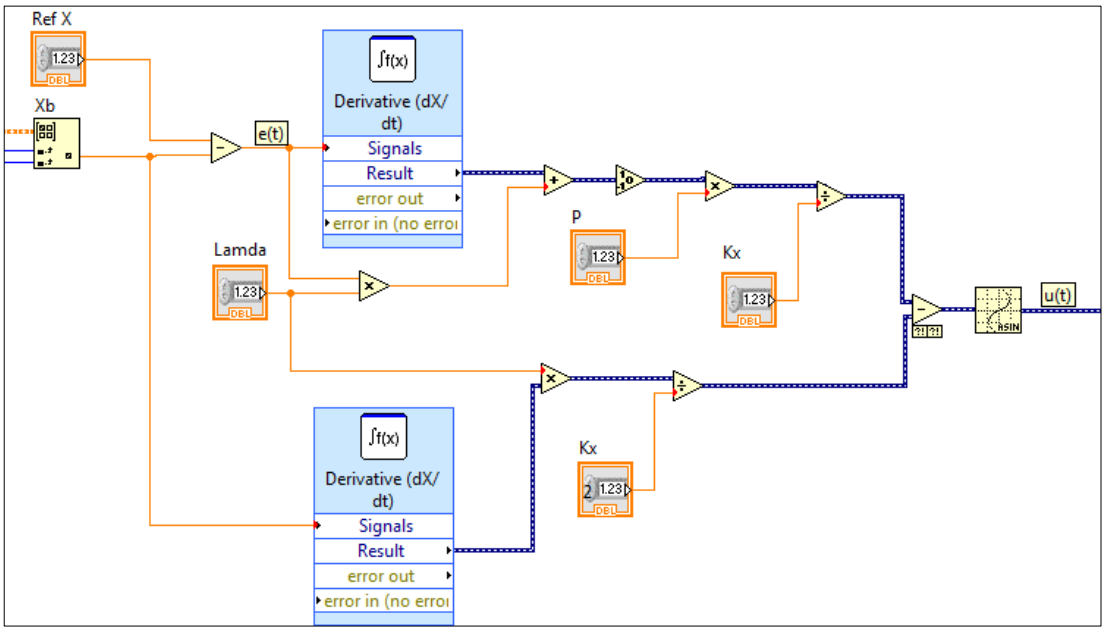
Şekil 4.6. Top ve plaka sistemi kayma kipli kontrol blok şema

Denklem (4.20) ve Denklem (4.21)'de elde edilen kontrolör çıkışlarına göre hazırlanan kayma kipli kontrolün top ve plaka sistemine uygulanışını gösteren blok diyagram Şekil 4.7'deki gibidir.



Şekil 4.7.Top ve plaka sistemi kayma kipli kontrol genel şema

LabVIEW ortamında gerçek sistem için hazırlanan kayma kipli kontrolör tasarımı Şekil 4.8'deki gibidir. Burada x_b dokunmatik ekran üzerinden alınan geri besleme sinyali olup topun x eksenindeki konumunu ifade etmektedir. K_x ise Denklem (4.18)'de gösterildiği gibi sistem transfer fonksiyonundan gelen sabitleri ifade etmektedir.

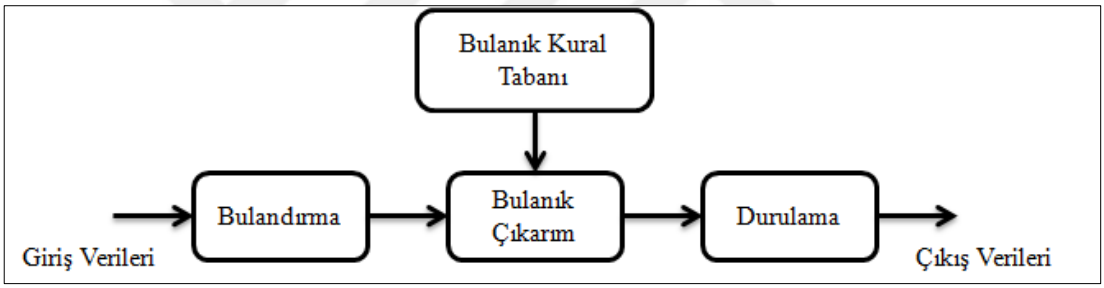


Şekil 4.8. Kayma kipli kontrolör LabVIEW tasarımı

4.3. Bulanık Mantık Kontrolör Tasarımı

Bulanık mantık kontrol geleneksel kontrol algoritmalarından farklı olarak matematiksel bir model gerektirmeyen ve dilsel değişkenlere sahip bulanık kümelerden oluşan bir kontrol yöntemidir. Standart lojik mantıkta bulunan 1 ve 0 kavramları yerine bulanık mantıkta bulunan giriş ve çıkışların birden fazla üyelik fonksiyonunda gösterilebildiği bir kontrol yöntemidir. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi bulanık mantık kontrolör tasarımı genel olarak dört aşamadan meydana gelmektedir. Bunlar;

- Denetlenecek sistemin giriş ve çıkış değişkenlerinin belirlenmesi
- Bulandırma işlemi
- Bulanık çıkarım işlemi
- Durulama işlemi olarak ayrılabilmektedir.



Şekil 4.9. Bulanık mantık kontrolör genel yapısı

Bulanık mantık kontrolörde giriş olarak hata (e) sinyali ve hatanın değişiminden (ė) faydalanılmaktadır. Top ve plaka sisteminde girişler aktüatör açıları, çıkış ise topun konumudur. Bundan dolayı bulanık mantık kontrolörün girişlerini topun konumunda meydana gelen hata parametresi ve oluşan bu hatanın değişimi meydana getirmektedir. Kontrolör çıkışını ise aktüatör açıları oluşturmaktadır. x ve y eksenleri için ayrı tasarlanacak olan bulanık mantık kontrolörler için belirlenen hata ve hatanın değişimi parametreleri aynıdır.

Bulandırma işleminde giriş ve çıkış verilerinin dilsel parametrelerle gösterilmesiyle bulanık kümeler oluşturulmaktadır. Oluşturulan bulanık kümelerde kullanılan parametre sayıları değişiklik göstermekle birlikte bu çalışmada girişler için yedi parametreli üyelik fonksiyonları oluşturulmuş, çıkış bulanık kümesi için ise on üç

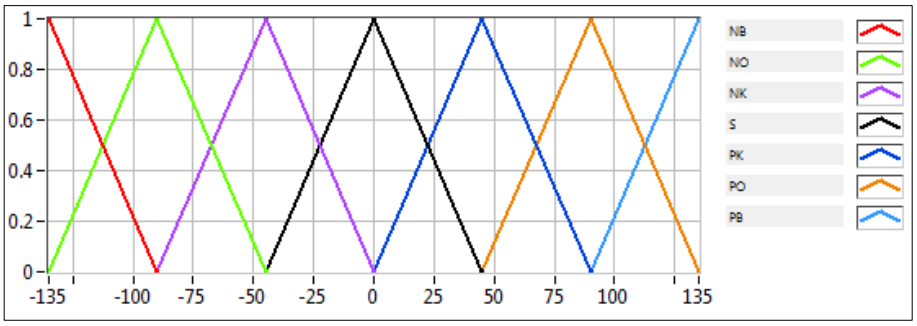
parametreden oluşan bulanık küme meydana getirilmiştir. Kullanılan parametrelerin açıklamaları Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Üyelik fonksiyonlarında kullanılan parametreler

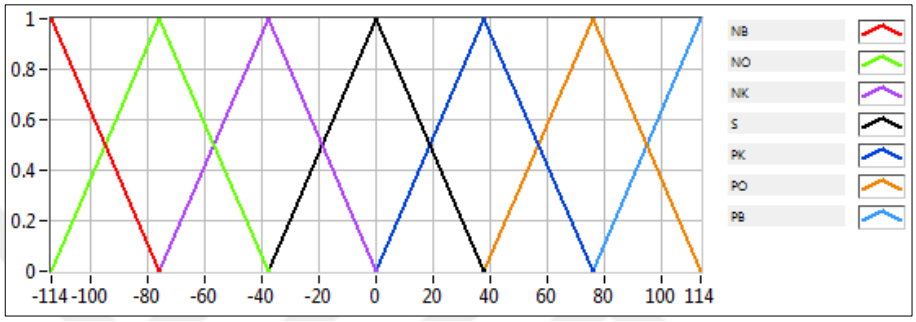
Üyelik Fonksiyon Adı	Açıklama
NB	Negatif Büyük
NAB	Negatif Az Büyük
NOÜ	Negatif Ortanın Üstü
NO	Negatif Orta
NK	Negatif Küçük
NÇK	Negatif Çok Küçük
S	Sıfır
PÇK	Pozitif Çok Küçük
PK	Pozitif Küçük
PO	Pozitif Orta
POÜ	Pozitif Ortanın Üstü
PAB	Pozitif Az Büyük
PB	Pozitif Büyük

Kontrolörün giriş ve çıkış bulanık kümeleri oluşturulurken üçgen fonksiyonundan yararlanılmıştır. Top ve plaka sistemi için LabVIEW ortamında x ve y eksenleri için oluşturulan topun konum hatası üyelik fonksiyonları Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir. Üyelik fonksiyonlarının sınırlarını oluştururken dokunmatik ekranın ölçülerinden faydalanılmıştır. Hatanın değişimi üyelik fonksiyonu ise iki eksen için Şekil 4.12'deki gibidir. Üyelik fonksiyonunun sınırları birkaç deneme yanılma metodundan sonra belirlenmiştir. Şekil 4.13'de çıkış üyelik fonksiyonu verilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonunda sınırlar LabVIEW ortamında servo motora verilen PWM değerine göre belirlenmiştir. 450 değeri yaklaşık olarak 45 dereceye denk gelmektedir.

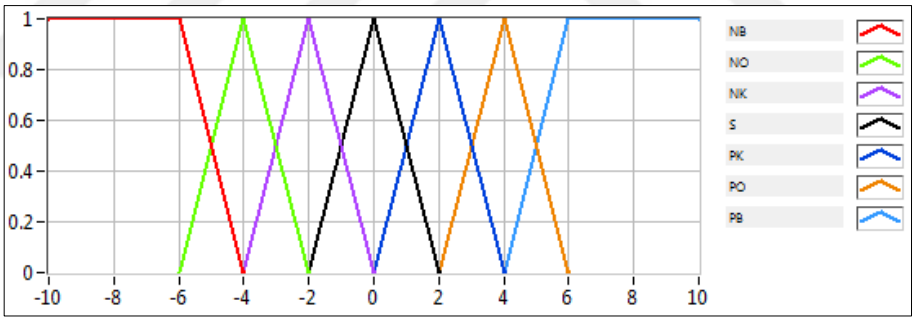
Şekillerden görüldüğü gibi üyelik fonksiyonlarını oluştururken üçgen fonksiyonu kullanılmıştır. Bunun nedenlerinden biri kontrolörün hesapsal yükünü diğer fonksiyon türlerine göre (gauss, yamuk vb) azaltmaktır. Diğeri ise bu tarz sistem kontrollerinde üçgen fonksiyonunun tercih edilmesidir. Hesapsal yükün azaltılması bu çalışmanın da konusu olan gerçek zamanlı kontrolde önemli bir yer tutmaktadır.



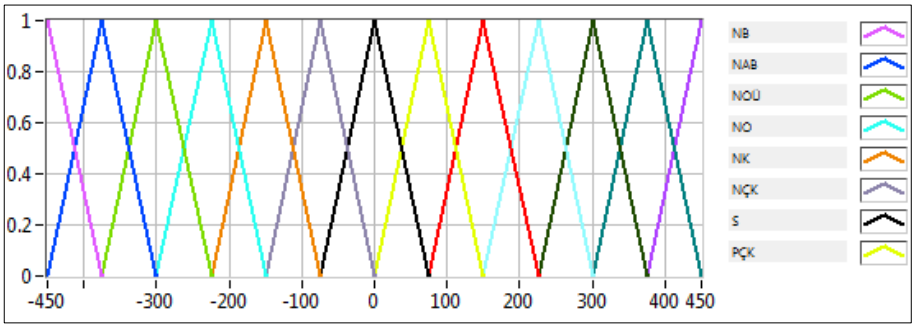
Şekil 4.10. x ekseni için hata üyelik fonksiyonu



Şekil 4.11. y ekseni için hata üyelik fonksiyonu



Şekil 4.12. x ve y eksenleri için hatanın değişimi üyelik fonksiyonu



Şekil 4.13. x ve y eksenleri için çıkış üyelik fonksiyonu

Bulanık mantık kontrolör tasarımının önemli aşamalarından biri de bulanık çıkarımdır. Bilgi tabanı ve karar verme mantığı kullanılarak bulanık kurallar üzerine bulanık mantık uygulanmasıyla bulanık çıkarım oluşturulur. Dilsel değişkenlerin mantıksal karşılaştırması Mamdani, Tsukamato gibi çıkarım yöntemleri kullanılarak yapılabilmektedir. Sistem davranışlarının çok iyi bilinmesi bu karşılaştırmanın yapılabilmesi için önemlidir. Sistem davranışına göre oluşturulan kural tablosu Tablo 4.2'deki gibidir [6]. Burada e hata, ė ise hatanın değişimini ifade etmektedir. Top ve plaka sistemi için giriş üyelik fonksiyonlarında bulandırılan hata ve hatanın değişimi verilerinin işlenip çıkış üyelik fonksiyonunda uygun kontrol sinyali elde edilebilmesi için bu kural tablosundan yararlanılmaktadır.

Tablo 4.2. Bulanık mantık kontrol kural tablosu

ė \ e	**NB**	**NO**	**NK**	**S**	**PK**	**PO**	**PB**
NB	NB	NAB	NOÜ	NO	NK	NÇK	S
NO	NAB	NOÜ	NO	NK	NÇK	S	PÇK
NK	NOÜ	NO	NK	NÇK	S	PÇK	PK
S	NO	NK	NÇK	S	PÇK	PK	PO
PK	NK	NÇK	S	PÇK	PK	PO	POÜ
PO	NÇK	S	PÇK	PK	PO	POÜ	PAB
PB	S	PÇK	PK	PO	POÜ	PAB	PB

Kural tablosuna göre LabVIEW ortamında 49 adet kural oluşturulmuştur. Tabloya göre oluşturulan bazı kurallar aşağıdaki gibidir.

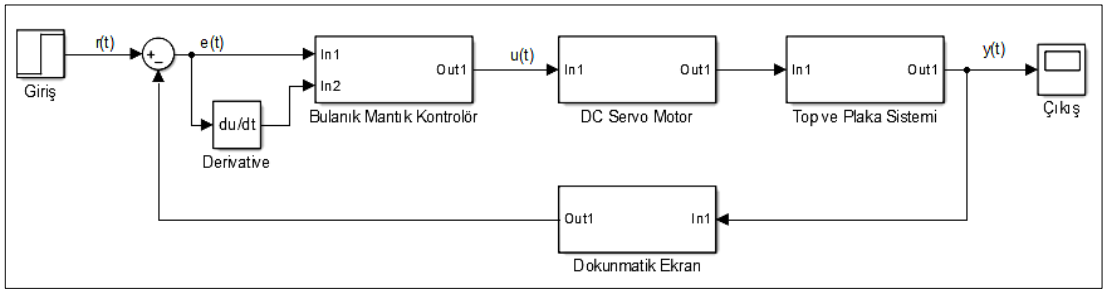
İf (e is NB) and (ė is NO) then (cikis is NAB)

İf (e is NK) and (ė is S) then (cikis is NÇK)

İf (e is PB) and (ė is PK) then (cikis is POÜ)

İf (e is PB) and (ė is PB) then (cikis is PB)

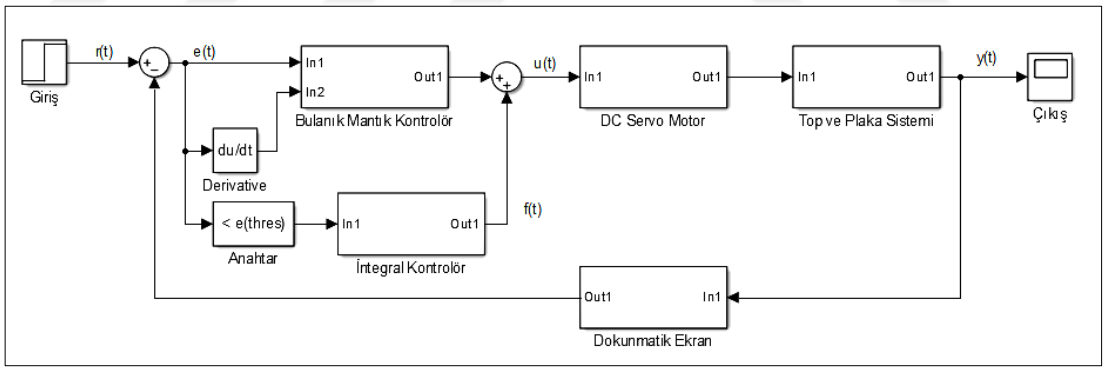
Bu çalışmada Mamdani bulanık modelinden yararlanılmıştır ve durulama yöntemi olarak ise gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek için ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 4.14. Top ve plaka sistemi bulanık mantık kontrol genel şema

Top ve plaka sistemine ait tek eksen üzerinden gösterilmiş genel bulanık mantık kontrol şeması Şekil 4.14'deki gibidir. Şekilde görüldüğü gibi bulanık mantık kontrolöre hata ve hatanın değişim sinyalleri girilmektedir. Bu sinyaller hazırlanan giriş üyelik fonksiyonları kullanılarak bulandırılır sonrasında kural tabanına göre kural çıkarımı yapılır ve durulandırma işleminden geçirilerek çıkış sinyali elde edilir.

Top ve plaka sisteminde bulanık mantık kontrol sonrası topun konumunda oluşabilecek kalıcı durum hatalarını önlemek amacıyla anahtarlamalı integral kontrolör tasarımı yapılmıştır. Anahtarlamalı integral kontrolün sisteme eklenmiş hali Şekil 4.15'deki gibidir.



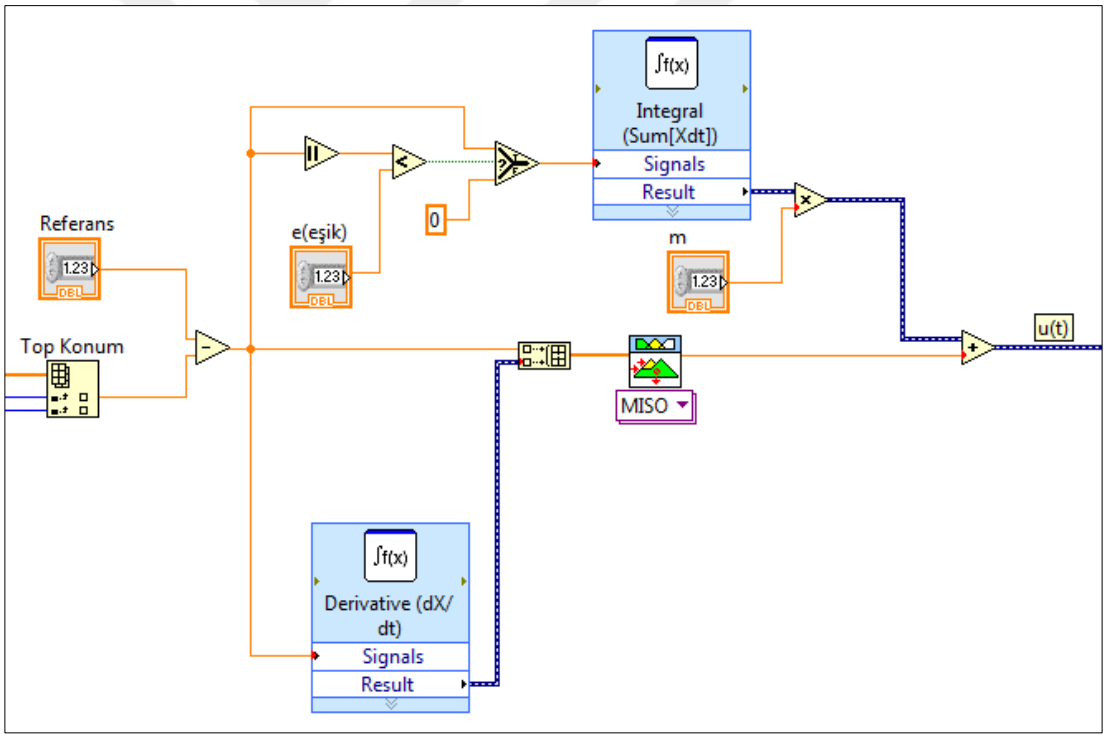
Şekil 4.15. Bulanık mantık ve anahtarlamalı integral kontrolör

Şekilde görüldüğü gibi tasarlanan anahtarlamalı integral kontrolörün girişini hata sinyali oluşturmaktadır. Kontrolörün çıkış sinyali ise Denklem (4.22)'deki gibi hesaplanır. Burada K_i integral kazancı, m ise sabit bir sayıdır. $e_{eşik}$ integral kontrolün devreye gireceği eşik hata değerini ifade etmektedir.

$$f(t) = K_i \int e(t)dt \qquad K_i = \begin{cases} m, & e(t) < e_{eşik} \\ 0, & e(t) \geq e_{eşik} \end{cases} \tag{4.22}$$

Denklem (4.22)'de gösterildiği gibi hata değeri eşik değerden büyük ise integral kontrolör devre dışıdır ve topun konum kontrolünü tamamen bulanık mantık kontrol sürdürmektedir. Top referans konuma yaklaştığında hata değeri belirlenen eşik değerden küçük ise integral kontrol devreye girer ve bulanık mantık kontrolöre yardım ederek kalıcı durum hatasını sıfıra doğru çekmeye başlar. Anahtarlamalı integral kontrol sadece gerekli olduğu durumlarda devre girerek sistemin daha performanslı çalışmasını sağlamış olur.

Şekil 4.16'da LabVIEW ortamında hazırlanan bulanık mantık kontrolör ve anahtarlamalı integral kontrol programı tek bir eksen için gösterilmektedir. Bulanık mantık kontrolör bloğuna yine LabVIEW ortamında Fuzzy System Designer aracı ile hazırlanan üyelik fonksiyonları, kural tablosu ve durulama yöntemi gibi verileri içeren dosya her iki eksen için de yüklenir.



Şekil 4.16. Labview bulanık mantık kontrolör ve anahtarlamalı integral kontrolör

5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

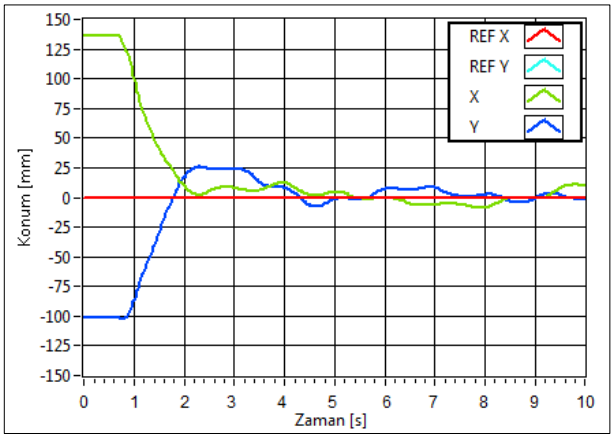
Bu bölümde top ve plaka sistemi deney düzeneği konum ve yörünge kontrolü olmak üzere iki farklı çalışma modunda PID, kayma kipli kontrol ve bulanık mantık kontrol için test edilmiş ve deneysel sonuçlar performans kriterleri bakımından karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan deneylerde kullanılan plaka 15 inch (322mm × 247mm) olup, metal topun çapı 40 mm ve kütlesi 263 gramdır.

5.1. Konum Kontrolü

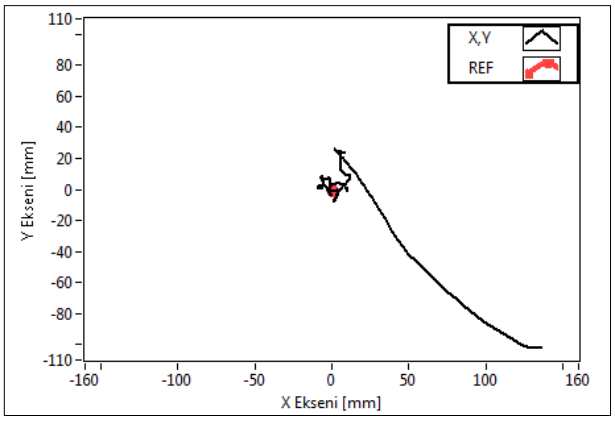
Konum kontrolünde sistemin kararlılığı test edilmiştir. Sistemin girişlerine farklı x ve y referans koordinatları girilmiş ve topun girilen referans koordinatlarda tutulması PID, kayma kipli kontrol ve bulanık mantık kontrol yöntemleri ile sağlanmıştır. Sistem çıkışı olarak topun konum ve hareket grafikleri LabVIEW üzerinde gerçek zamanlı olarak çizdirilmiştir.

Deney 1: Referans girişler x = 0 mm, y = 0 mm için PID, kayma kipli kontrol ve bulanık mantık kontrol ile topun konum kontrolünün yapılması.

Şekil 5.1'de top ve plaka sisteminin PID kontrol tekniği ile elde edilen çıkış grafiği gösterilmektedir. Top, plaka üzerine x = 135 mm ve y = −101 mm koordinatından bırakılmıştır.

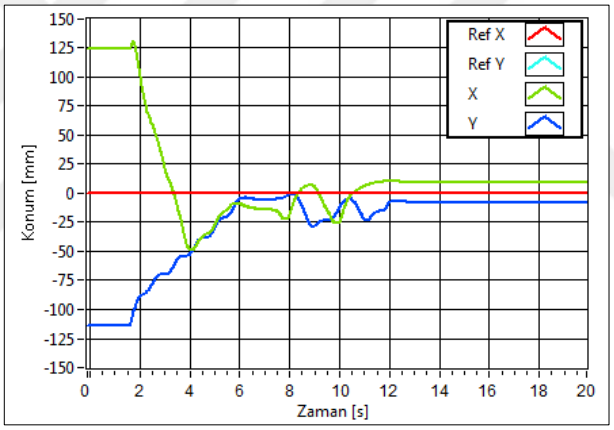


Şekil 5.1. Deney 1 PID kontrol çıkış grafiği

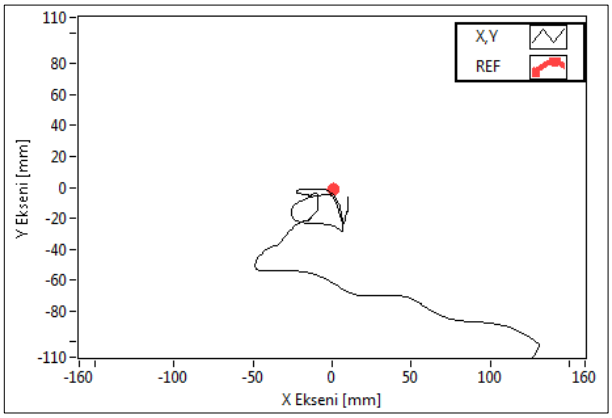


Şekil 5.2. Deney 1 PID kontrol yörünge grafiği

Şekil 5.2'de test esnasında topun x ve y düzlemindeki hareketi verilmiştir. PID parametreleri x ekseni için K_P = 2,35, K_I = 0,031, K_D = 0,01 ve y ekseni içinse K_P = 1,85, K_I = 0,04, K_D = 0,01 olarak belirlenmiştir.



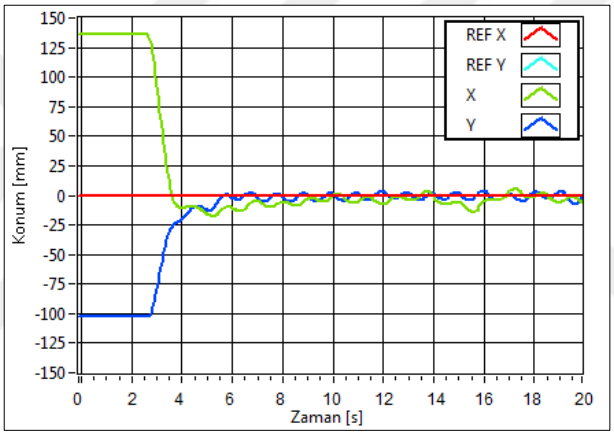
Şekil 5.3. Deney 1 kayma kipli kontrol çıkış grafiği



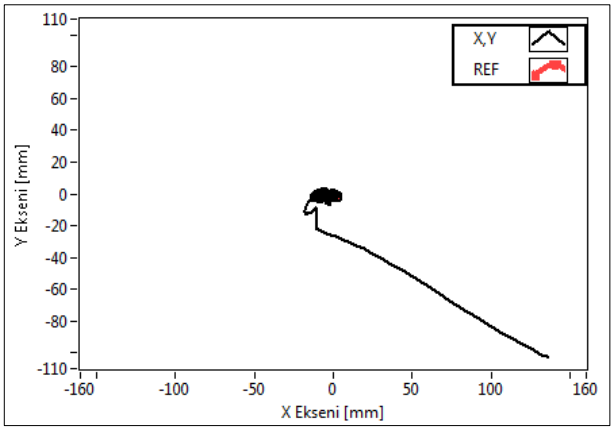
Şekil 5.4. Deney 1 kayma kipli kontrol yörünge grafiği

Şekil 5.3'de kayma kipli kontrol tekniği ile elde edile çıkış grafiği, Şekil 5.4'de ise x-y düzleminde gerçekleştirdiği hareketi gösterilmektedir. Top plaka üzerine x = 124 mm ve y = −113 mm koordinatından bırakılmıştır. Kayma kipli kontrol parametreleri olarak x ve y eksenleri için λ = 1 seçilmiştir. Ayrıca x ekseni için p = 1,5, y ekseni için ise p = 1,3 olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.5'de bulanık mantık kontrol tekniği uygulanması sonucu elde edilen çıkış grafiği, Şekil 5.6'da ise bu grafiğin x-y düzlemindeki yörüngesi verilmiştir. Top plaka üzerine x = 136 mm ve y = −102 mm koordinatından bırakılmıştır. Anahtarlamalı integral kontrol parametrelerinden $e_{eşik}$ = 15, x ve y eksenleri için K_I = 0,005 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.5. Deney 1 bulanık mantık kontrol çıkış grafiği



Şekil 5.6. Deney 1 bulanık mantık kontrol yörünge grafiği

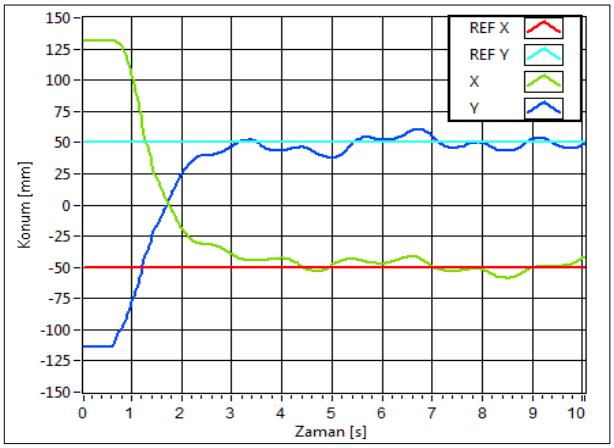
Tablo 5.1. Deney 1 performans kriterleri karşılaştırması

Deney 1	PID Kontrol		Kayma Kipli Kontrol		Bulanık Mantık Kontrol	
Performans Kriterleri	x ekseni	y ekseni	x ekseni	y ekseni	x ekseni	y ekseni
En büyük aşım	0	%25	%38,7	0	%9,5	0
Yükselme zamanı	1s	0,75s	1s	4,25s	0,6s	2,5s
Yerleşme zamanı (%5 bant aralığı)	4,3s	3,5s	9s	10s	6,25s	2,75s
Kalıcı-durum hatası	±8mm	±4mm	9,5mm	-8mm	±6mm	±4,5mm

Tablo 5.1'de deney 1 için top ve plaka sistemine uygulanan kontrol yöntemlerine göre elde edilen sonuçlar performans kriterleri bakımından karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablodan görüldüğü gibi en büyük aşım kayma kipli kontrol yönteminde gerçekleşmiştir. Bulanık mantık kontroldeki aşım miktarı ise daha düşüktür. Yükselme zamanı performansları eksenlere göre değişmekle birlikte PID ve bulanık mantık kontrol teknikleri için alınan sonuçlar kayma kipli kontrole göre daha iyi değerlere sahiptir. Yerleşme zamanı olarak ise %5'lik bant aralığında PID kontrol daha avantajlı durmaktadır. Kalıcı durum hatası olarak en iyi sonuç bulanık mantık kontrolde alınmıştır. Bulanık mantık kontrolde kalıcı durum hatasının daha az olması anahtarlamalı integral kontrolün başarılı olduğunu göstermektedir.

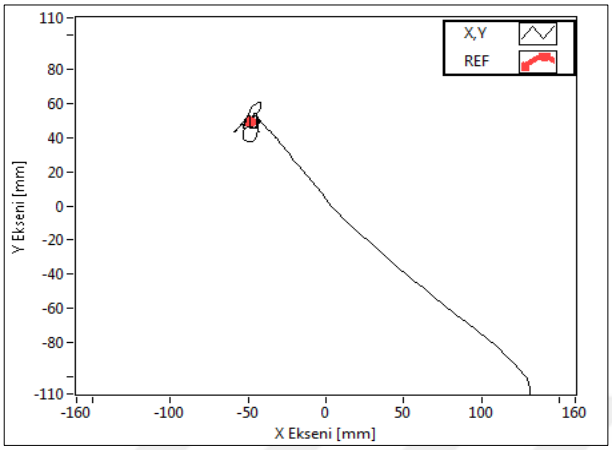
Deney 2: Referans girişler x = −50 mm, y = 50 mm için PID, kayma kipli kontrol ve bulanık mantık kontrol ile topun konum kontrolünün yapılması.

Şekil 5.7'de PID kontrol için çıkış grafiği gösterilmektedir. Top plaka üzerine x = 131 mm ve y = −113 mm koordinatından bırakılmıştır.



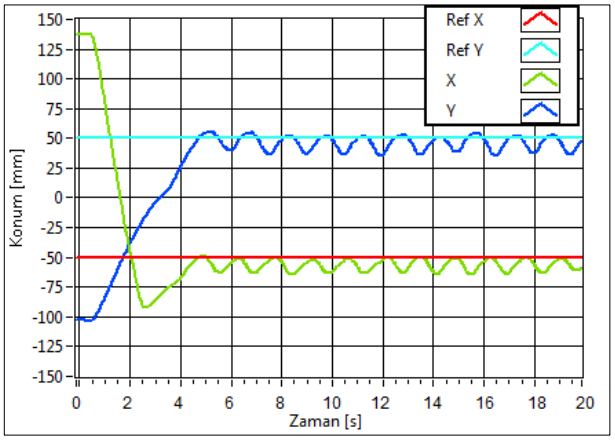
Şekil 5.7. Deney 2 PID kontrol çıkış grafiği

PID parametreleri x ekseni için K_P = 2,35, K_I = 0,031, K_D = 0,01 ve y ekseni içinse K_P = 1,85, K_I = 0,04, K_D = 0,01 olarak belirlenmiştir. Topun x-y düzlemindeki hareketi ise Şekil 5.8'deki gibidir.

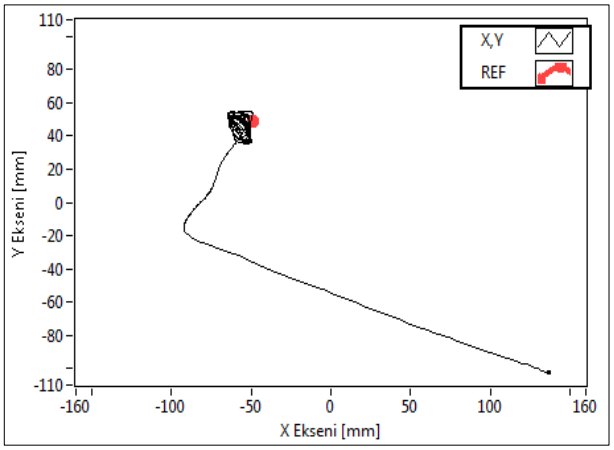


Şekil 5.8. Deney 2 PID kontrol yörünge grafiği

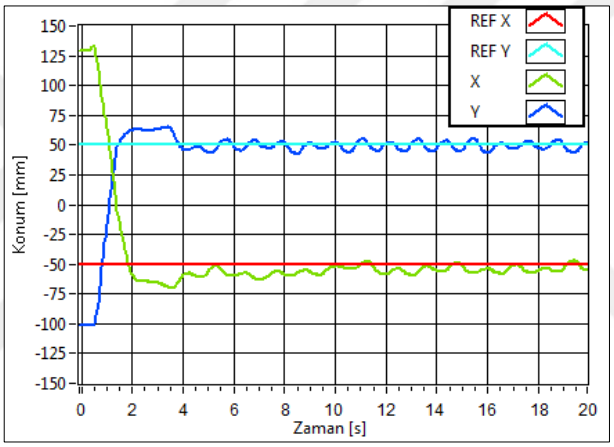
Şekil 5.9'da top ve plaka sisteminin kayma kipli kontrol yöntemi ile elde edilen çıkış grafiği verilmiştir. Top plaka üzerine x =137 mm ve y = −103 mm koordinatından bırakılmıştır. Kayma kipli kontrol parametreleri olarak x ve y eksenleri için $\lambda = 1$ seçilmiştir. Ayrıca x ekseni için p = 1,2, y ekseni için ise p =1,3 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.10'da ise topun x-y düzlemindeki hareketine ait çıkış grafiği verilmiştir.



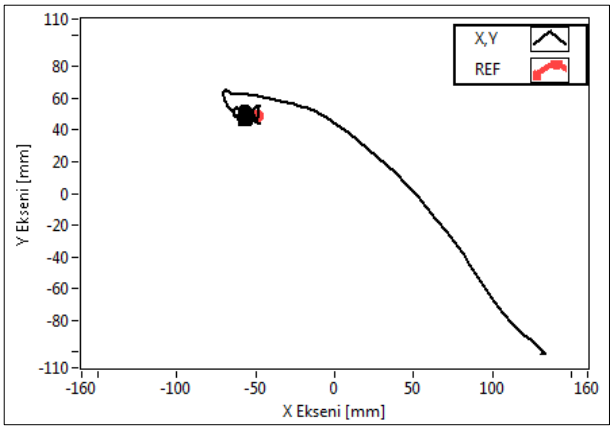
Şekil 5.9. Deney 2 kayma kipli kontrol çıkış grafiği



Şekil 5.10. Deney 2 kayma kipli kontrol yörünge grafiği



Şekil 5.11. Deney 2 bulanık mantık kontrol çıkış grafiği



Şekil 5.12. Deney 2 bulanık mantık kontrol yörünge grafiği

Şekil 5.11'de bulanık mantık kontrol ile elde edilen çıkış grafiği verilmiştir. Top plaka üzerine x = 129 mm ve y = −101 mm koordinatından bırakılmıştır. Anahtarlamalı integral kontrol parametrelerinden $e_{eşik} = 15$, x ve y eksenleri için $K_I = 0{,}005$ olarak belirlenmiştir. Topun x-y düzlemindeki hareketine ait grafik ise Şekil 5.12'deki gibidir.

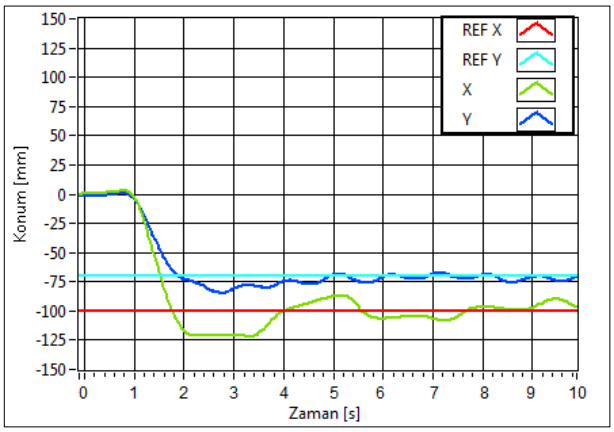
Tablo 5.2. Deney 2 performans kriterleri karşılaştırması

Deney 2	PID Kontrol		Kayma Kipli Kontrol		Bulanık Mantık Kontrol	
Performans Kriterleri	x ekseni	y ekseni	x ekseni	y ekseni	x ekseni	y ekseni
En büyük aşım	0	0	%22,4	0	%11,7	%9,9
Yükselme zamanı	2,1s	2s	1,3s	3,5s	1s	0,7s
Yerleşme zamanı (%8 bant aralığı)	2,6s	4,8s	4s	4s	4s	3,5s
Kalıcı-durum hatası	±8mm	±5mm	10mm	-9mm	±6mm	±6mm

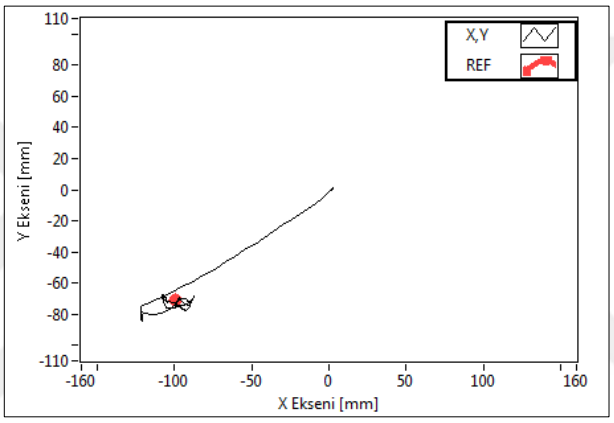
Tablo 5.2'de deney 2 için sisteme uygulanan kontrol yöntemleri sonucu elde edilen değerlerin performans kriterleri bakımından karşılaştırması sunulmuştur. Tabloda görüldüğü gibi en büyük aşım kategorisinde PID kontrolün performansı diğerlerine göre daha iyidir. Yükselme zamanı olarak en iyi performansı bulanık mantık kontrol göstermiştir. Yerleşme zamanları bakımından kayma kipli kontrol ve bulanık mantık kontrol yöntemleri yakın durmaktadır. Kalıcı durum olarak ise PID ve bulanık mantık kontrolün performansı kayma kipli kontrol yöntemine göre daha iyi gözükmektedir.

Deney 3: Referans girişler x = −100 mm, y = −70 mm için PID, kayma kipli kontrol ve bulanık mantık kontrol ile topun konum kontrolünün yapılması.

Şekil 5.13'de PID kontrol için çıkış grafiği gösterilmektedir. Top plaka üzerine x = 2 mm ve y = 0 mm koordinatından bırakılmıştır. PID parametreleri x ekseni için $K_P = 2{,}35$, $K_I = 0{,}031$, $K_D = 0{,}01$ ve y ekseni içinse $K_P = 2{,}35$, $K_I = 0{,}04$, $K_D = 0{,}011$ olarak belirlenmiştir. Şekil 5.14'de ise topun x-y düzlemindeki hareketine ait çıkış grafiği verilmiştir.

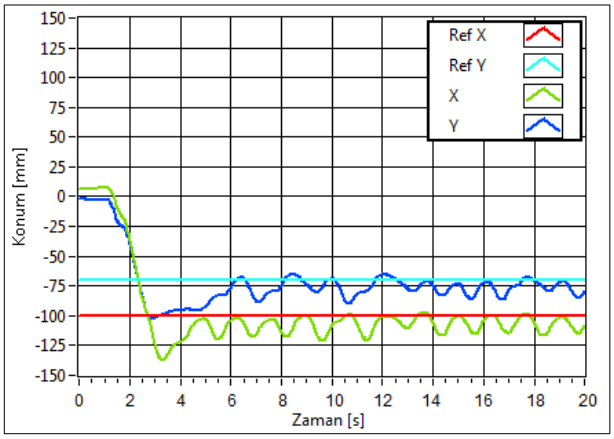


Şekil 5.13. Deney 3 PID kontrol çıkış grafiği



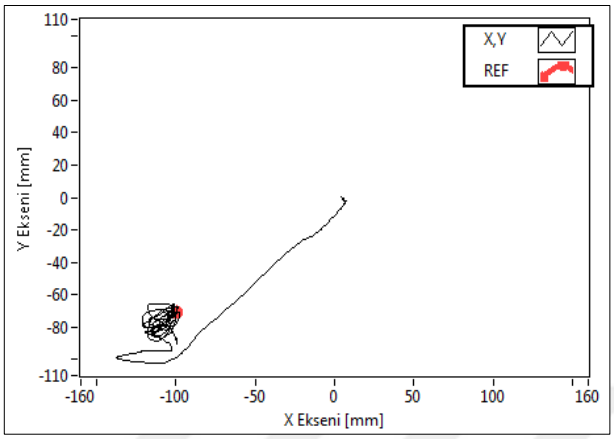
Şekil 5.14. Deney 3 PID kontrol yörünge grafiği

Şekil 5.15'de top ve plaka sisteminin kayma kipli kontrol yöntemi ile elde edilen çıkış grafiği verilmiştir. Top plaka üzerine x = 6 mm ve y = −2 mm koordinatından bırakılmıştır.



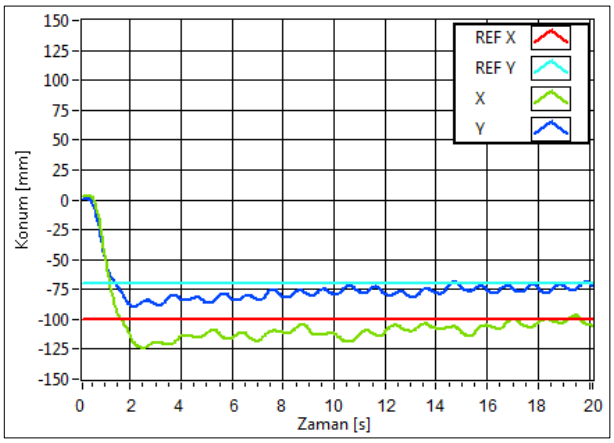
Şekil 5.15. Deney 3 kayma kipli kontrol çıkış grafiği

Kayma kipli kontrol parametreleri olarak x ve y eksenleri için $\lambda = 1$ seçilmiştir. Ayrıca x ekseni için p = 1,2, y ekseni için ise p =1,3 olarak belirlenmiştir. Topun x-y düzlemindeki hareketine ait çıkış grafiği Şekil 5.16'daki gibidir.

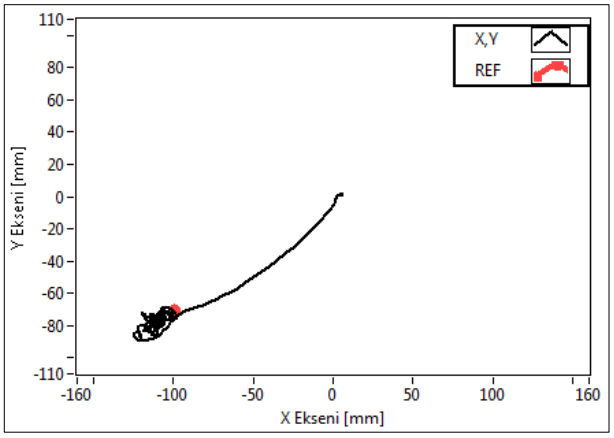


Şekil 5.16. Deney 3 kayma kipli kontrol yörünge grafiği

Şekil 5.17'de bulanık mantık kontrol ile elde edilen çıkış grafiği verilmiştir. Top plaka üzerine x = 3 mm ve y = 2 mm koordinatından bırakılmıştır. Anahtarlamalı integral kontrol parametrelerinden $e_{eşik}$ = 25, x ve y eksenleri için K_I = 0,005 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.18'de ise topun x-y düzlemindeki hareketine ait çıkış grafiği verilmiştir.



Şekil 5.17. Deney 3 bulanık mantık kontrol çıkış grafiği



Şekil 5.18. Deney 3 bulanık mantık kontrol yörünge grafiği

Tablo 5.3'de deney 3 için sisteme uygulanan kontrol yöntemleri sonucu elde edilen değerlerin performans kriterleri bakımından karşılaştırması sunulmuştur. Deney 3'de en büyük aşım miktarı kayma kipli kontrolde görülmüştür. Yükselme zamanı olarak PID kontrol ve bulanık mantık kontrol yakın olmakla birlikte kayma kipli kontrolden daha azdır. Yerleşme zamanı olarak %8'lik bant aralığı için PID kontrolün performansı Bulanık mantık kontrole göre daha iyi gözükmektedir. Bulanık mantık kontrolün yerleşme zamanının uzamasında anahtarlamalı integral kontrolün etkisi görülmektedir. Kayma kipli kontrolün %8'lik bant aralığına girememesinden dolayı %20'lik aralıkta değerlendirilmiştir.

Tablo 5.3. Deney 3 performans kriterleri karşılaştırması

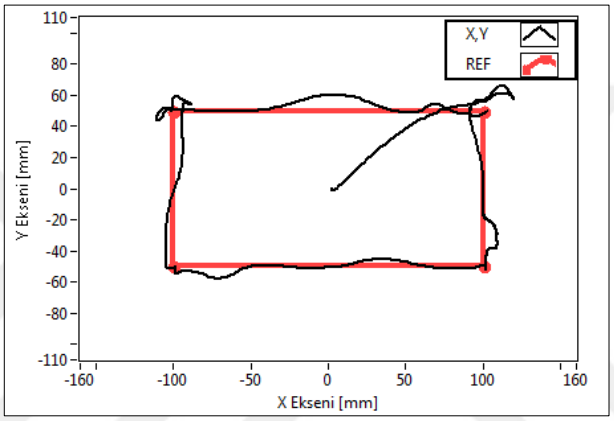
Deney 3	PID Kontrol		Kayma Kipli Kontrol		Bulanık Mantık Kontrol	
Performans Kriterleri	x ekseni	y ekseni	x ekseni	y ekseni	x ekseni	y ekseni
En büyük aşım	%21,7	%14,2	%29,6	%45,7	%25	%25
Yükselme zamanı	0,7s	0,5s	1,5s	1,4s	0,65s	0,6s
Yerleşme zamanı (%8 bant aralığı)	4,5s	3s	2,75s (%20 bant aralığı)	3,25s (%20 bant aralığı)	15s	14s
Kalıcı-durum hatası	±7mm	±5mm	+15mm	+14mm	+4mm	+7mm

5.2. Yörünge Takibi

Yörünge takibi kontrolünde topun plaka üzerinde tanımlı bir yörüngeyi minimum hata ile takip etmesi amaçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında yörünge olarak dikdörtgen ve kare çizdirilmiştir. PID, kayma kipli kontrol ve bulanık mantık kontrol tekniği ile topun yörüngeyi takip etmesi sağlanmıştır.

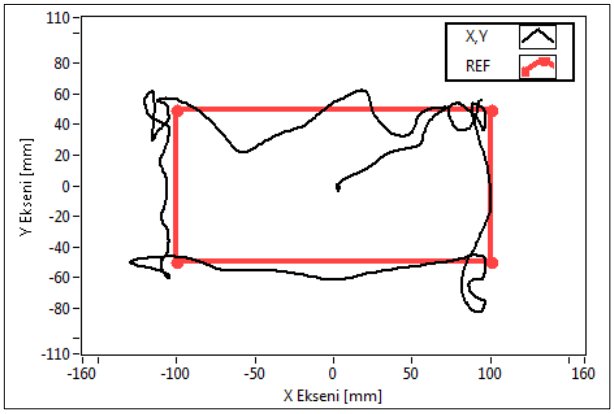
Deney 1: Referans olarak uzun kenarı 200 mm, kısa kenarı 100 mm olan dikdörtgen yörüngesinin PID, kayma kipli kontrol ve bulanık mantık kontrol ile yörünge takibinin yapılması.

Şekil 5.19'da PID kontrol için çıkış grafiği gösterilmektedir. Top plaka üzerine x = 0 mm ve y = 0 mm koordinatından bırakılmıştır. PID parametreleri x ekseni için K_P = 2,35, K_I = 0,031, K_D = 0,01 ve y ekseni içinse K_P = 2,35, K_I = 0,04, K_D = 0,011 olarak belirlenmiştir. Eksenlerdeki x kenar değeri 100 mm, y kenar değeri 50mm, frekans değerleri ise 0,015 Hz olarak girilmiştir.



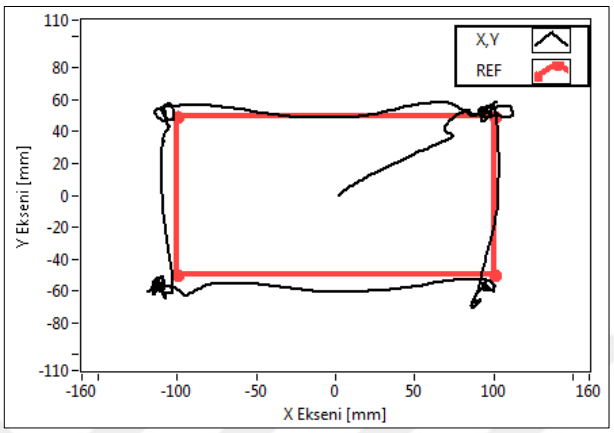
Şekil 5.19. Deney 1 PID kontrol dikdörtgen yörünge takibi

Şekil 5.20'de kayma kipli kontrol yöntemi için sistemin çıkış grafiği gösterilmektedir. Top plaka üzerine x = 0 mm ve y = 0 mm koordinatından bırakılmıştır. Kayma kipli kontrol parametreleri olarak x ve y eksenleri için λ = 1 seçilmiştir. Ayrıca x ekseni için p = 0,9, y ekseni için ise p =1,3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.20. Deney 1 kayma kipli kontrol dikdörtgen yörünge takibi

Şekil 5.21'de bulanık mantık kontrol yöntemi için sistemin çıkış grafiği verilmiştir. Top plaka üzerine x = 0 mm ve y = 0 mm koordinatından bırakılmıştır. Anahtarlamalı integral için kontrol parametreleri $e_{eşik} = 25$, x ve y eksenleri için $K_I = 0{,}005$ olarak belirlenmiştir.

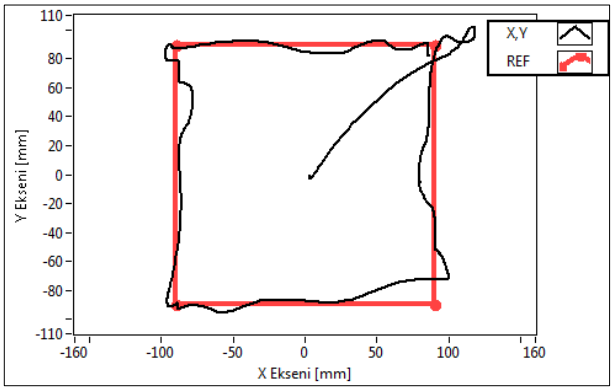


Şekil 5.21. Deney 1 bulanık mantık kontrol dikdörtgen yörünge takibi

Deney 1'deki grafik çıktılarından görüldüğü gibi PID ve bulanık mantık kontrolde top istenilen yörüngeyi iyi bir performansla takip etmiştir. Kayma kipli kontrolde ise birkaç noktadaki sapmalar dışında yörüngesini iyi bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Yörünge takibinde PID ve kayma kipli kontrolün takip hızının bulanık mantık kontrole göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bulanık mantık kontrolde uygulanan anahtarlamalı integral kontrol kalıcı durumu azaltırken sistemin oturma süresinde gecikmeye sebep olmuştur.

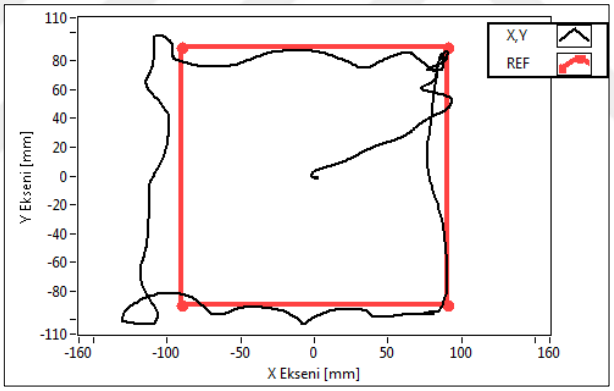
Deney 2: Referans olarak kenar uzunluğu 180 mm olan kare yörüngesinin PID, kayma kipli kontrol ve bulanık mantık kontrol ile yörünge takibinin yapılması.

Şekil 5.22'de PID kontrol için çıkış grafiği gösterilmektedir. Top plaka üzerine x = 0 mm ve y = 0 mm koordinatından bırakılmıştır. PID parametreleri x ekseni için $K_P = 2{,}2$, $K_I = 0{,}031$, $K_D = 0{,}01$ ve y ekseni içinse $K_P = 2{,}35$, $K_I = 0{,}04$, $K_D = 0{,}011$ olarak belirlenmiştir. Eksenlerdeki x kenar değeri 90 mm, y kenar değeri 90 mm, frekans değerleri ise 0,015 Hz olarak girilmiştir.

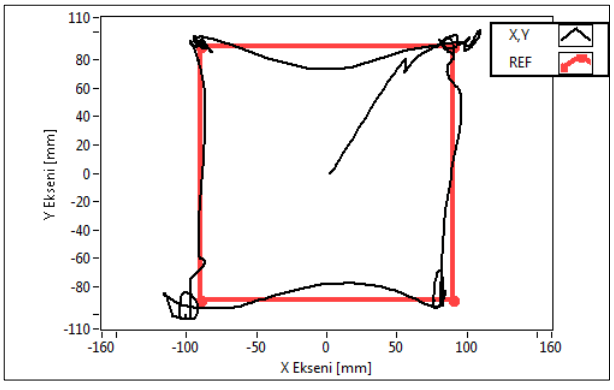


Şekil 5.22. Deney 2 PID kontrol kare yörünge takibi

Şekil 5.23'de kayma kipli kontrol ile gerçekleştirilen yörünge takibinin çıkış grafiği verilmiştir. Top plaka üzerine x = 0 mm ve y = 0 mm koordinatından bırakılmıştır. Kayma kipli kontrol parametreleri olarak x ve y eksenleri için $\lambda = 1$ seçilmiştir. Ayrıca x ekseni için p = 0,9, y ekseni için ise p = 1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.23. Deney 2 kayma kipli kontrol kare yörünge takibi



Şekil 5.24. Deney 2 bulanık mantık kontrol kare yörünge takibi

Şekil 5.24'de yörünge takibinin bulanık mantık kontrol ile elde edilen çıkış grafiği gösterilmektedir. Top plaka üzerine x = 0 mm ve y = 0 mm koordinatından bırakılmıştır. Anahtarlamalı integral için kontrol parametreleri $e_{eşik} = 25$, x ve y eksenleri için $K_I = 0{,}005$ olarak belirlenmiştir.

Deney 2'de plaka üzerindeki topa kare yörüngesi üç farklı kontrol yöntemi ile takip ettirilmiştir. Kontrol yöntemlerine ait çıkış grafiklerinden görüldüğü PID ve bulanık mantık kontrol yöntemlerinde top yörüngeyi iyi bir performansla takip etmiştir. Kayma kipli kontrolde bir kenarda 25 mm'lik hata ile de olsa yörünge takibi kalan diğer üç kenarda iyi bir performansla yapılmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada top ve plaka sisteminin gerçek zamanda konum ve yörünge kontrolü PID, kayma kipli kontrol ve bulanık mantık kontrol teknikleriyle gerçekleştirilmiştir. Top ve plaka sisteminin bir eğitim modeli olarak kullanılması amacıyla farklı kontrol algoritmalarının üzerinde uygulanabileceği bir platform tasarımı yapılmıştır. Bu amaca yönelik olarak gerçekleştirilen eğitim modeli, kontrol uygulamalarında sıkça kullanılan LabVIEW programı üzerinden gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilmektedir. Kontrolör olarak kullanımı basit, tedariği kolay ve fiyat performans bakımından uygun bir geliştirme kartı olan Arduino Uno R3 tercih edilmiştir.

Top ve plaka sistemi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde uygulamaların kontrolör algoritmalarının farklı yazılım platformlarında geliştirilerek kontrol kartına yüklendiği ve eğer varsa ara yüz tasarımlarının da farklı programlar üzerinde tasarlanarak sonrasında kontrol kartıyla haberleştirildiği görülmektedir. Bu tür uygulamalarda farklı bir kontrol algoritması denenmek istendiğinde tekrardan kontrolör kartı için uygun bir platformda yazılım geliştirilip yüklenmesi ve ara yüz üzerinde giriş çıkış verilerine ait düzenlemelerin tekrardan yapılıp doğrulanması gerekmektedir. Ayrıca hazırlanan kontrol algoritmaların kodlama şekliyle yazılması karmaşık kontrol algoritmalarında yazılım geliştirme aşamasında akış takibini zorlaştırabilmektedir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen top ve plaka sisteminde kontrolör kartı olarak kullanılan Arduino Uno R3 geliştirme kartının LabVIEW ortamında hazırlanan bir program altyapısı ile başka bir derleyici programa gerek kalmadan programlanabilmesi ve yazılımın kontrolöre yüklenebilmesi tasarlanan sistemin önemli avantajlarındandır. LabVIEW ortamında programın bloklar yardımıyla görsel olarak oluşturulması kontrol algoritmalarının ve tüm sistemin anlaşılabilirliğini ve takibini kolaylaştırmaktadır. Hazırlanan karmaşık kontrol algoritmaların LabVIEW

ortamında dolayısıyla bilgisayar ortamında çalıştırılması ve sadece gerekli verilerin kontrolör kartına aktarılması, kontrolör kartının işlem yükünü büyük ölçüde hafifletmektedir. Ayrıca isteğe bağlı olarak oluşturulmak istenen ara yüz tasarımı yine aynı platform üzerinde programlama aşamasında kolaylıkla yapılabilmekte, sistemin çalışması sırasında kontrol edilmesi veya gözlemlenmesi istenen giriş-çıkış verileri ve grafikleri ara yüz ekranına basitçe eklenebilmektedir. Bu çalışmada tasarlanan top ve plaka sisteminin farklı kontrol algoritmaları geliştirilmesi ve sisteme uygulanmasını kolaylaştıracak yapıya sahip olması, sistemin bir eğitim modeli veya ticari anlamda ön test modeli olarak kullanılmasını sağlayabilecek önemli avantajlardandır. Ayrıca tasarlanan platformun LabVIEW programından farklı olarak Matlab/Simulink üzerinde hazırlanan programlar ile çalıştırılması da mümkündür Böylece kullanıcıya farklı platformlar üzerinde çalışma esnekliği sağlanabilmektedir.

Top ve plaka sisteminde topun konumunu farklı yöntemlerle algılanabilmektedir. Literatür taramasında belirtildiği gibi bazı uygulamalarda sensör olarak kamera kullanılmaktadır. Kamera kullanımında topun konumunu algılayabilmek için yazılım geliştirme kısmına görüntü işleme teknikleri girmekte ve işlem yükünü artırmaktadır. Görüntü işleme kontrolör kartı üzerinde yapılacak ise buna uygun bir kontrolör kartı seçimi veya tasarımı yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada topun konumunu algılamak için sensör olarak rezistif dokunmatik ekran kullanılmış. Dokunmatik ekranın doğrudan bilgisayar ile bağlantısı kurulmuş ve LabVIEW ortamında kullanımı sağlanmıştır. Sensör olarak dokunmatik ekran kullanımı kontrol sistemini görüntü işleme yöntemlerindeki işlem yükü ve karmaşıklığından uzaklaştırsa da; rezistif ekran kullanılması sistem için dezavantaj oluşturabilmektedir. Kameranın sensör olarak kullanıldığı uygulamalarda topun kütlesi ve plakanın sınırları esnek olabilirken dokunmatik ekran kullanılan uygulamalarda plakanın sınırları dokunmatik ekran ile doğrudan ilişkilidir ve algılama hassasiyetinde problem olmaması için kullanılacak topun kütlesi önem kazanmaktadır. Bundan dolayı rezistif ekran kullanılan çalışmalarda, kamera kullanılan uygulamalara göre daha büyük kütleli topların tercih edilmesi gerekmektedir. Top kütlesinin artmasına bağlı olarak sistemi tahrik eden aktüatörlerdeki tork gereksinimleri de artabilmektedir. Top kütlesinin çok düşük olması ise rezistif ekran üzerinde hassasiyetin azalmasına ve

topu algılamamasına sebep olabilmektedir. Kamera kullanılan uygulamalarda gürültüler olduğu gibi dokunmatik ekrandan okunan sinyallerde de gürültüler olabilmektedir. Bu çalışmada dokunmatik ekrandan gelen sinyaller her iki eksen için alçak geçiren filtreden geçirilmiştir ve böylece sinyaller büyük ölçüde iyileştirilmiştir.

Top ve plaka sisteminde önceki bölümlerde belirtildiği gibi aktüatör olarak farklı tahrik sistemleri kullanılabilmektedir. DC motor, DC servo motor en çok kullanılan tahrik sistemleri olmakla birlikte manyetik levitasyon ile gerçekleştirilen sistemler vardır. DC motor kullanılan uygulamalarda motorun mil konumu potansiyometre veya enkoder gibi harici bir konum ölçer sensör yardımı ile ölçülmesi ve motorun konum kontrolünün yapılabilmesi için kontrol sisteminin iç döngüsüne ait kısımda kontrolör geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca sensör ve tahrik sistemi için elektronik olarak ek donanımlarda gerekebilmektedir. Aynı durum manyetik levitasyonun kullanıldığı tahrik sistemlerine sahip top ve plaka sistemleri için de geçerlidir. Bu çalışmada tahrik sistemi olarak aktüatörler DC servo motor olarak seçilmiştir. Servo motorların kontrolör birimlerinin kendi içinde bulunması top ve plaka sistemine ait kontrol döngüsünde iç döngü kısmını oluşturan tahrik sistemine ait kontrol döngüsünün yazılım geliştirme kısmını basitleştirmesini ve ayrıca donanımsal olarak da sistem yükünün azalmasını sağlamıştır. DC servo motor kullanımının sistem üzerinde bir takım dezavantajları da olabilmektedir. DC motor kullanımında yazılım aşamasında kontrolör tasarımı oluşturulacağı için kontrolör parametrelerine erişilebilmekte ve gerekli durumlarda esneklik sağlanabilmektedir. DC servo motorun kontrolör birimi kendi içerisinde olduğu için yazılımsal olarak bir esneklik veya kontrolör parametrelerine erişme söz konusu değildir. Bazı servo motorlarda küçük açı giriş değerleri için sistem çıkışı cevapsız kalabilmektedir. Top ve plaka sistemi gibi hassas kontrolün önemli olduğu uygulamalarda bu durum kontrolör performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu yüzden kullanılacak dc servo motorların kalitesi önemlidir.

Mekanik sistemde kullanılacak mafsalların boşluklu olması sistem performansını etkileyebilmektedir. Özellikle üniversal mafsallarda mevcut olan veya zamanla çalışmaya bağlı olarak oluşabilecek boşluklar eksenlerdeki hareketlerin birbirlerini

etkilemesine sebep olabilmekte ve kontrolör performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Bu tez çalışmasında tasarlanan top ve plaka sistemine PID kontrol, kayma kipli kontrol ve bulanık mantık kontrol olmak üzere üç farklı kontrol algoritması uygulanmıştır. Algoritmalardan PID kontrol ve kayma kipli kontrol yöntemi sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymaktadır; fakat PID kontrol doğrusal sistemlerin kontrolünde başarılı olan bir yöntemken kayma kipli kontrol yöntemi ise doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılabilen bir yöntemidir. Bulanık mantık kontrol ise diğer ikisinden farklı olarak matematiksel bir modele ihtiyaç duymamakta ve doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılabilmektedir. Değişik özellik ve yapılardaki bu algoritmalar tasarımı yapılan top ve plaka sistemi üzerinde test edilmiştir. Böylece platform üzerinde birbirinden çok farklı yapılara sahip olan kontrol algoritmalarının uygulanabilirliği gösterilmiş ve uygulanan kontrol algoritmalarının aynı platform üzerinde sergiledikleri performanslar grafiksel ve sayısal değerler ile desteklenmiştir. Konum kontrolü ve yörünge kontrolü olarak birçok deney yapılmış ve deney sonuçlarına göre kontrolör tasarımları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında top ve plaka sisteminin öncelikle matematiksel modeli detaylı bir biçimde çıkarılmıştır. Sonrasında fiziksel model geliştirme aşamaları mekanik, elektronik ve yazılım geliştirme olarak ayrıntılı biçimde anlatılmıştır. Kullanılacak kontrol algoritmalarına ait gerekli teorik altyapı oluşturulmuş ve sistem üzerine uygulanışı her algoritma için ayrı incelenmiştir. Tasarlanan algoritmalar gerçekleştirilen deney düzeneği üzerinde test edilerek sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Böylece mekatronik biliminin de konusu olan mekanik, elektronik ve programlama gibi farklı disiplinlerin birbirlerine entegrasyonu ile bu tezin konusu olan top ve plaka sistemi gerçekleştirilmiş, konum ve yörünge takibi kontrolü yapılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Hunde A. H., Design of Fuzzy Sliding Mode Controller for The Ball and Plate System, Master Thesis, Addis Ababa University, Institute of Technology, Addis Ababa, 2011.

[2] Liu H., Liang Y., Trajectory Tracking Sliding Mode Control of Ball and Plate system, *II. International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Wuhan, China, 6-7 March 2010.

[3] Pattanapong Y., Deelertpaiboon C., Ball and Plate Position Control Based on Fuzzy Logic with Adaptive Integral Control Action, *International Conference on Mechatronics and Automation*, Takamatsu, Japan, 4-7 August 2013.

[4] Farooq U., Gu J., Luo J., On the Interval Type-2 Fuzzy Logic Control of Ball and Plate System, *International Conference on Robotics and Biomimetics*, Shenzen, China, 12-14 December 2013.

[5] Bigharaz M. H., Safaei F., Afshar A., Suratgar A. A.,Identification and Nonlinear Control of a Ball-Plate Sysyem Using Neural Networks, *III. International Conference on Control, Instrumentation and Automation*, Tehran, Iran, 28-30 December 2013.

[6] Pour R. K., Khajvand H., Moosavian S. A. A, Fuzzy Logic Trajectory Control of a 3-RRS Ball and Plate Parallel Manipulator, *International Conference on Robotics and Mechatronics*, Tehran, Iran, 26-28 October 2016.

[7] Köse F., Kaplan K., Ertunç H. M., PID ve Bulanık Mantık ile DC Motorun Gerçek Zamanda STM32F407 Tabanlı Hız Kontrolü, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.

[8] Köse E., Abacı K., Aksoy S., Mekanik Sistemlerin PID ve Kayma Kipli Kontrol ile Modellenmesi ve Analizi, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 2-5 Aralık 2010.

[9] Cheng C. C., Tsai C. H., Visual Servo Control for Balancing a Ball-Plate System, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2016, **5**(1), 28-32.

[10] Wang H., Tian Y., Sui Z., Zhang X., Ding C., Tracking Control of Ball and Plate System with a Double Feedback Loop Structure, *International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, China, 5-8 August 2007.

[11] Han J., Liu F., Positioning Control Research on Ball&Plate System Based on Kalman Filter, *VIII. International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Hangzhou, China, 10-11 September 2016.

[12] Börü E., Modelling and Controlling of Ball and Plate System, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Enstitüsü, İstanbul, 2008, 252024.

[13] Bai M., Lu H., Su J., Tian Y., Motion Control of Ball and Plate System Using Supervisory Fuzzy Controller, *VI. World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, 21-23 June 2006.

[14] Aphiratsakun N., Otaryan N., Ball on The Plate Model on PID Tuning Methods, *XIII. International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Chiang Mai, Thailand, 28 June-1July 2016.

[15] Dong X., Zhang Z., Chen C., Applying genetic algorithm to on-line updated PID neural network controllers for ball and plate system, *IV. International Conference on Innovative Computing, Information and Control*, Kaohsiung, Taiwan, 7-9 December 2009.

[16] Jeon J. H., Hyun C. H., Adaptive Sliding Mode Control of Ball and Plate System for Its Practical Application, *II. International Conference on Control and Robotics Engineering*, Bangkok, Thailand, 1-3 April 2017.

[17] Spacek L., Bobal V., Vojtesek J., Digital Control of Ball & Plate Model Using LQ Controller, *XXI. International Conference on Process Control*, Strbske Pleso, Slovakia, 6-9 June 2017.

[18] Roy P., Acharjee S., Ram A., Das A., Sen T., Roy B. K., Cascaded Sliding Mode Control for Position Control of a Ball in a Ball and Plate System, *Student's Technology Symposium*, IIT Kharagpur, India, 30 September-2 October 2016.

[19] Adiprasetya A., Wibowo A. S., Implementation of PID Controller and Pre-Filter to Control Non-Linear Ball and Plate System, *International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications*, Bandung, Indonesia, 13-15 September 2016.

[20] Moarref M., Saadat M., Vossoughi G., Mechatronic Design and Position Control of a Novel Ball and Plate System, *Mediterranean Conference on Control and Automation*, Ajaccio, France, 25-27 June 2008.

[21] Kassem A., Haddad H., Albitar C., Commparison Between Different Methods of Control of Ball and Plate System with 6DOF Stewart Platform, *I. IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems*, Saint Petersburg, Russia, 24-26 June 2015.

[22] Zeeshan A., Nauman N., Khan M. J., Design, Control and Implementation of a Ball on Plate Balancing System, *IX. International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology*, Islamabad, Pakistan, 9-12 January 2012.

[23] Nokhbeh M., Khashabi D., Modelling and Control of Ball-Plate System, Final Project Report, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2011.

[24] MG996R Datasheet, http://www.towerpro.com.tw/product/mg995-robot-servo-180-rotation/ (Ziyaret tarihi: 28 Nisan 2018).

[25] Arduino Uno R3 Datasheet, https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3 (Ziyaret tarihi: 28 Nisan 2018).

[26] GY521 Datasheet, https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometers/RM-MPU-6000A.pdf (Ziyaret tarihi: 28 Nisan 2018).

[27] Kalaycı M. B., Yiğit İ., Pratikte Kullanılan Bazı Kayan Kipli Kontrol Tekniklerinin Teorik ve Deneysel İncelenmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi Universty*, 2015, **30**(1), 131-142.

[28] Özkan B., Değişken Kayma Yüzeyli Kayan Kipli Denetim Yönteminin Elektromekanik Bir Kanat Tahrik Sistemine Uygulanması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi Universty*, 2017, **32**(3), 987-998.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

[1] **Köse F**., Kaplan K., Ertunç H. M., Designing a Shooting System Using Ultrasonic Radar Sensor, *V. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Baku, Azerbaijan, 29-30 September 2017.

[2] **Köse F**.,Kaplan K., Ertunç H. M., PID ve Bulanık Mantık ile DC Motorun Gerçek Zamanda STM32F407 Tabanlı Hız Kontrolü, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.

[3] **Köse F**., Kuncan M., Ertunç H. M., Development of Rope Climbing Robot Manipulator with Caterpillar, *XVIII. International Conference,* Kaunas, Lithuanian, 4-5 April 2013.

[4] **Köse F**., Kuncan M., Ertunç H. M., İpe Tırmanan Robot Tırtıl, *Proje Tabanlı Mekatronik Eğitim Çalıştayı*, Çankırı, Türkiye, 25-27 Mayıs 2012.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Kocaeli'de doğdu. 2000 yılında girdiği Kocaeli Anadolu Teknik Lisesi elektrik bölümünde bir yıl İngilizce hazırlık eğitimi ve sonrasında dört yıllık teknik eğitim alarak 2005 yılında mezun oldu. 2005-2007 yılları arasında Kocaeli Meslek Yüksek Okulu endüstriyel otomasyon bölümünde ön lisans öğrenimini tamamladı. 2007-2009 yılları arasında otomasyon sektöründe faaliyet gösteren bir firmada plc programlama teknikeri olarak çalıştı. 2009 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun oldu. 2016-2018 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2013 yılında Ar-Ge Mühendisi olarak girdiği Askeri Savunma alanında faaliyet gösteren bir Ar-Ge firmasında çalışma hayatına 2017 yılından beri Elektronik Sistemler Müdürü olarak devam etmektedir.