

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PID VE KAYAN KİPLİ DENETLEYİCİ KULLANARAK DELTA ROBOT  
MANİPÜLATÖRÜN YÖRÜNGE KONTROLÜ**

**Veysel Karam YILMAZ**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Umut TILKI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA- 2023**



© 2023 [Veysel Karam YILMAZ]

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI .....	3
3. DELTA ROBOT MATEMATİKSEL MODEL.....	8
3.1. Delta Robot İleri Kinematığı .....	10
3.2. Delta Robot Ters Kinematığı .....	15
3.3. Delta Robot Dinamik Denklemleri .....	17
3.4. Delta Robot Simscape Model ve Denetleyici Yapılar.....	19
3.4.1. PID (Oransal-İntegral-Türevsel Kontrolcü) Denetleyici.....	19
3.4.2. Kayan Kipli Denetleyici.....	21
4. SİMÜLASYON SONUÇLARI .....	24
4.1. Z Eksenli Sabit 2 Boyutlu Yörünge Kontrolü .....	24
4.2. Dairesel 3 Boyutlu Yörünge Kontrolü.....	29
4.3. Yay Şeklinde Üç Boyutlu Yörünge Kontrolü .....	34
5. TARTIŞMA.....	41
KAYNAKLAR .....	42
ÖZGEÇMİŞ.....	44

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **PID VE KAYAN KIPLİ DENETLEYİCİ KULLANARAK DELTA ROBOT MANİPÜLATÖRÜN YÖRÜNGE KONTROLÜ**

**Veysel Karam YILMAZ**

**Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Umut TİLKİ**

Bu tez çalışmasında, Delta robot manipülatörlerin yörünge takibinde farklı denetleyici yapıları kullanılarak, bu denetleyicilerin performansının ölçülmesi ve karşılaştırmalı analizi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan araştırmalarda endüstride yaygın olarak kullanılan Delta robot manipülatörlerin kontrolünde farklı denetleyici yapılarının kullanıldığı görülmüştür. Önerilen bu çalışmada, Delta manipülatörün yörünge takip kontrolünde geleneksel denetleyici yapılarından olan Oransal-İntegral-Türevsel (PID) ve anahtarlamalı denetleyici yapılardan birisi olan Kayan Kipli Denetleyici (SMC) yapısı kullanılarak, sistemin yörünge takibindeki hassasiyetinin analizleri yapılmıştır. SMC doğrusal olmayan bir sistemin dinamiklerini sürekli bir kontrol sinyali uygulayarak değiştiren ve sistemin davranışını bir kesit boyunca kaydırarak kesit üzerinde tutmaya çalışan doğrusal olmayan bir kontrol yöntemidir. Bu teknik belirsizlikler ve ölçülemez dış bozukluklar altında doğrusal olmayan sistemler için kontrol yaklaşımları tasarlamakta etkili bir yöntemdir. Bu çalışma kapsamında, Delta robotun dinamik modeli Solidworks kullanılarak çizilmiş, MATLAB/Simulink ortamına Simscape model olarak aktarılmıştır. Sistem MATLAB/Simulink ortamında, Delta robotun dinamik modeli için benzetim yoluyla elde edilen Simscape modeli, alçak geçiren filtre, kinematik denklemler, SMC ve PID denetleyici yapıları kullanılarak ayrı ayrı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu iki ayrı yörünge takip sisteminde tork kontrolü yapılmıştır. Her iki sistemde aynı referans yörüngeler üzerinde test edilmiştir. Yörünge seçiminde ilk olarak Z eksenini sabit bir değerde tutulmuş ve iki boyutlu dairesel bir yörünge seçilmiştir. İkinci olarak ise Z eksenini değişken değerler olarak üç boyutlu dairesel bir yörünge seçilmiştir. Son olarak ise yay benzeri üç boyutlu bir yörünge seçilerek PID ve SMC kullanılan sistemlerin performansları ölçülmüştür. Denetleyici yapılarının birbirlerine karşı olan avantajları ve dezavantajları yapılan simülasyon çalışmaları ile ortaya koyulmuştur. MATLAB/Simulink uygulaması üzerinde tasarlanan sistemin X-Y-Z yörüngelerinde yaptığı hareketler ayrı ayrı elde edilerek referans, SMC, PID çözümlerine ait sonuçlar zamana bağlı karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Robot manipülatörün üst tablasına bağlı her bir aktif linke uygulanan tork büyüklüklerinin değişimleri de incelenmiştir. SMC ve PID denetleyici kullanılan sistemlerin X-Y-Z yörüngelerindeki hata değişim miktarları ayrı grafiklerde karşılaştırmalı olarak

verilmiştir. Kayan Kipli Denetleyici kullanılan sistem ve PID denetleyici kullanılan sistemin yörünge takibi grafik üzerinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yörünge takip performansında Karekök Ortalama Hatası (RMSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAD) kullanılarak elde edilen sonuçlar tablo halinde verilmiştir SMC için kararlılık analizinde Lyapunov kararlılık analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında tasarlanan iki ayrı sistem performansı karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kayan Kipli Denetleyici, PID, Tork kontrolü, Delta Robot, Simscape

**2023, 44 sayfa**



## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **TRAJECTORY CONTROL OF DELTA ROBOT MANIPULATOR USING PID AND SLIDING MODE CONTROL**

**Veysel Karam YILMAZ**

**Süleyman Demirel University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Department**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Umut TILKI**

Using different controller structures in trajectory tracking of Delta robotic manipulators, a study was conducted on measuring and comparative analysis of the performance of these controllers used. Research in literature has shown the use of different controller structures in controlling Delta robotic manipulators, which are widely used in the industry. In this proposed study, analyses of the system's precision in trajectory tracking using one of the traditional controller structures, Proportional-Integral-Derivative (PID), and one of the switched controller structures, the Sliding Mode Controller (SMC) structure, were performed in the Delta manipulator's trajectory tracking. The SMC is a nonlinear control method that changes the dynamics of a nonlinear system by continuously applying a control signal and attempts to keep the system's behavior on the cross-section by shifting it across a cross-section. This technique is an effective tool in designing control approaches for nonlinear systems under uncertainties and immeasurable external disturbance. As part of this study, the dynamic model of the Delta robot was drawn using Solidworks and transferred to the MATLAB/Simulink environment as a Simscape model. In the System MATLAB/Simulink environment, the Simscape model obtained through simulation for the dynamic model of the Delta robot is used using low-pass filter, kinematic equations and SMC and PID controller structures designed separately. Torque control was performed on these two separate trajectory tracking systems that were designed. First, the Z axis was kept at a fixed value and a two-dimensional circular trajectory was selected. Secondly, a three-dimensional circular trajectory was selected by taking variable values for the Z axis. Finally, an arc-like three-dimensional trajectory was selected and the performances of the systems using PID and SMC were measured. Both systems tested on the same reference trajectory. The advantages and disadvantages of controller structures against each other have been demonstrated by simulation studies. The motions of the system designed on MATLAB/Simulink's X-Y-Z trajectories are separately obtained and given in reference, SMC, PID time-dependent comparison. Variations of torque exchanges applied to each active link attached to the top table of the robot manipulator were also studied. The amount of error changes in the X-Y-Z trajectories of systems used as SMC and PID controllers are given in comparison to separate graphics. The system using the SMC and the trajectory tracking of the system using the PID controller are compared to the graphic.

Results obtained using Root Mean Square Error (RMSE) and Median absolute deviation (MAD) in trajectory tracking performance are tabulated. The Lyapunov stability analysis approach was used in the stability analysis for the SMC. Two separate system performances designed in light of the results achieved were compared.

**Keywords:** Sliding Mode Controller, PID, Torque control, Delta Robot, Simscape

**2023, 44 pages**



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında fikirleriyle beni yönlendiren, çalışmanın en başından en sonuna kadar karşılaőtığım her türlü zorluk ve problemi aőmamda ve sonuca ulaşmamda ayrıca tezimin sonuçlanmasına kadar bütün aőamalarda bana yardımcı olan ve bana yol gösteren değerli danışman hocam Dr.Öğr.Üyesi Umut TİLKI'ye sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme çok teşekkür ederim.

Veysel Karam YILMAZ  
ISPARTA,2023



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Delta Robot Tasarımı .....	8
Şekil 3.2. Delta Robot Vektörel Gösterim .....	9
Şekil 3.3. Delta robot kesit gösterimi .....	10
Şekil 3.4. İleri ve ters kinematik bağlantısı .....	10
Şekil 3.5. Delta robot ileri kinematik gösterimi .....	11
Şekil 3.6. Delta robot fiziksel parametreleri .....	11
Şekil 3.7. Delta robot ileri kinematik vektörel gösterimi .....	12
Şekil 3.8. Taban plakası üçgeni .....	12
Şekil 3.9. Delta Robot Ters Kinematığı .....	15
Şekil 3.10. Eklemlerin Dönme Hareketi ile Küre Oluşturması .....	16
Şekil 3.11. Delta Robot Simscape Model .....	19
Şekil 3.12. Delta Robot PID Sistem .....	20
Şekil 3.13. Delta Robot PID Denetleyici ve Simscape Model .....	20
Şekil 3.14. Delta Robot Kayan Kipli Denetleyici Sistem .....	20
Şekil 3.15. Delta Robot Kayan Kipli Denetleyici ve Simscape Model .....	21
Şekil 4.1. İBYK PID ve SMC sistemler Theta Açısı Karşılaştırması .....	25
Şekil 4.2. İBYK PID ve SMC sistemler X-Y-Z Yörünge Hareketi .....	25
Şekil 4.3. İBYK PID ve SMC sistemler Hata Miktarları .....	26
Şekil 4.4. İki Boyutlu Düzlemde Yörünge Takibi .....	26
Şekil 4.5. İBYK PID Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar .....	27
Şekil 4.6. İBYK SMC Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar (Sign) .....	28
Şekil 4.7. İBYK SMC Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar .....	28
Şekil 4.8. Dairesel ÜBYK PID ve SMC sistemler Theta Açısı Karşılaştırması .....	30
Şekil 4.9. Dairesel ÜBYK PID ve SMC sistemler X-Y-Z Yörünge Hareketi .....	31
Şekil 4.10. Dairesel ÜBYK PID ve SMC sistemler Hata Miktarları .....	31
Şekil 4.11. Dairesel Üç Boyutlu Düzlemde Yörünge Takibi .....	32
Şekil 4.12. Dairesel ÜBYK PID Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar .....	33
Şekil 4.13. Dairesel ÜBYK SMC Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar (sign) .....	33
Şekil 4.14. Dairesel ÜBYK SMC Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar .....	34
Şekil 4.15. Yay Yörünge Kontrolünde PID ve SMC sistemler Theta Açısı Karşılaştırması .....	35
Şekil 4.16. Yay Yörünge Kontrolünde PID ve SMC sistemler X-Y-Z Yörünge Hareketi .....	36
Şekil 4.17. Yay Yörünge Kontrolünde PID ve SMC sistemler Hata Miktarları .....	37
Şekil 4.18. Yay Şeklinde Üç Boyutlu Yörünge Takibi .....	37
Şekil 4.19. Yay Yörünge Kontrolünde PID Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar .....	38
Şekil 4.20. Yay Yörünge Kontrolünde SMC Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar(sign) .....	38
Şekil 4.21. Yay Yörünge Kontrolünde SMC Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar .....	39

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Tasarımda Kullanılan Parametreler .....	11
Çizelge 4.1. Z Eksenli Sabit İBYK Sisteminde Takip Edilmesi İstenen Yörünge....	24
Çizelge 4.2. Z Eksenli Sabit İBYK Sisteminde Kullanılan PID Katsayıları .....	29
Çizelge 4.3 ÜBYK Sisteminde Takip Edilmesi İstenen Yörünge.....	29
Çizelge 4.4 ÜBYK Sisteminde Kullanılan PID Katsayıları .....	34
Çizelge 4.5 Yay Şeklinde Yörünge Sisteminde Takip Edilmesi İstenen Yörünge	35
Çizelge 4.6. Yay Şeklinde Yörünge Takip Sisteminde Kullanılan PID Katsayıları	39
Çizelge 4.7. Karekök Ortalama Hata (RMSE) ve Ortalama Mutlak Sapma (MAD).....	40



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

İBYK	İki Boyutlu Yörünge Kontrolü
MAD	Ortalama Mutlak Sapma
PID	Oransal-İntegral-Türevsel Kontrolcü
RMSE	Karekök Ortalama Hata
SMC	Kayan Kipli Kontrolcü
ÜBYK	Üç Boyutlu Yörünge Kontrolü



## 1. GİRİŞ

Robot terimi, emek veya angarya anlamında olan Slavca “robota” kelimesinden gelir. İnsansı makineler için terim olarak kullanılan “robot” ilk olarak Çek yazar Čapek'in (1890–1938) Rossums Universal Robots adlı oyununda ortaya çıktı. (Robotik Nedir?) Tarihin ilk dönemlerinden beri insanoğlu hayatını devam ettirirken yaptığı her türlü eylemde işlemleri biraz daha nasıl basite indirgerim ya da mevcut yapılan işlemi daha basit ve az enerji harcayarak nasıl yapabilirim düşüncesinde olmuştur. Örneğin basit makinelerin icadı insan enerjisini daha az kullanarak daha fazla iş yapma prensibine dayanır. Arşimet'in basit makineler üzerine yaptığı çalışmaları, Heron tarafından daha da geliştirilmiş ve 1600'de Galileo Galilei, basit makinelerin enerji yaratamayacağını ancak basitçe dönüştüreceğini kanıtlamıştır. Daha sonraları bilim adamları insan kollarından esinlenerek robot manipülatörleri geliştirmişler ve bir insanın bir yerden başka bir yere kaldıramayacağı eşya ve gereçleri robot manipülatörler yardımıyla hareket ettirmişlerdir. Robot manipülatörler kendi ağırlıklarının düşük olmasına rağmen genellikle yüksek ağırlıklı yükler ile hızlı hareket edebilen robotik sistemler olarak tasarlanmıştır. Delta Robotlar endüstride yaygın olarak birçok alanda kullanılan robotlardır. Örneğin elektronik kart tasarımında kullanılan SMD (Yüzey Montaj Elemanı) malzemeler Delta robotlar yardımı ile kart üzerine çok hızlı bir şekilde montajlanmaktadır. Endüstride kullanım amacına göre farklı büyüklükte ve farklı özelliklerde robot manipülatörler bulunmaktadır. Robot manipülatörler eklemlerinin serbestlik derecelerine göre isimlendirilirler. Eklemlerinin serbestlik dereceleri DOF (Degree of Freedom) sayısı ile temsil edilir. Delta Robotun serbestlik derecesi 3 tür. Robot manipülatörlerin uç kısımlarında Uç-Efektör bulunmaktadır. Uç-Efektör robot manipülatörün amaçlanan, yani kullanım senaryosundaki işlevi yapması için farklı özelliklerde olmaktadır. Uç-Efektör yardımı ile robot manipülatör kullanıcı tarafından istenilen yörünge takibini yapabilmektedir.

Genel olarak yörünge takip probleminde amaç istenilen yörüngeyi en az hata ile takip edebilmek ve sistemin kararlılığını sürekli hale getirmektir. Ayrıca farklı yörüngelerde kontrolcüde değişiklik yapmayarak sistemin daha gürbüz

çalıştığını göstermektedir. Bu çalışma kapsamında MATLAB/Simulink ortamında Delta Robotun Simscape modeli, ileri ve ters kinematik denklemler ayrıca denetleyici yapılar kullanılarak oluşturulan sistemler ile yörünge takibi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Simscape model gerçek robotun MATLAB/Simulink ortamına aktarılmış bir modelidir. Bu çalışma da Delta robotun simscape modeli kullanılarak kontrolcü tasarımı ve yörünge kontrolünün literatüre kazandırılması ayrıca gelecek çalışmalara katkıda bulunması hedeflenmiştir. Delta robotta Uç-Efektör' ün istenilen yörüngeyi takibinde SMC ve PID denetleyici yapıları kullanılarak sistemler ayrı ayrı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu sistemlerde istenilen yörünge ilk olarak 2 boyutta yani X-Y yörüngeleri değişken ancak Z yörüngesi sabit olan dairesel bir yörüngedir. Diğer sistemde ise 3 boyutlu bir kontrol yani X-Y-Z yörüngelerinin hepsi zamanla değişen değerler almıştır ve tekrar dairesel bir yörünge seçilmiştir. Son olarak ise yay benzeri bir yörünge 3 boyutlu olarak kontrol edilmiştir. Bu üç farklı yörünge üzerinde PID ve SMC kontrolörler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Birbirlerine karşı üstün ve zayıf noktaları verilmiştir. Son olarak hata karşılaştırması Karekök Ortalama Hata (RMSE) ve Ortalama Mutlak Sapma (MAD) hata katsayıları kullanılarak tablo halinde verilmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde Delta robot manipulatörlerin PID ve SMC yapıları kullanılarak dış bozukluklar altında kontrol edilen birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar genellikle ters kinematik, ileri kinematik denklemler ve Delta robotun matematiksel modeli çıkarılarak yapılan çalışmalardır, Azad (2020). Matlab Simmechanics kütüphanesi kullanılarak kinematik denklemler ile entegre edilen sistemlerde bulunmaktadır. Simmechanics kütüphanesi gerçek robot eklemleri ve robotik aksamaları kullandığı için gerçek robot tasarımlarına yakın sonuçlar vermektedir. Halen günümüzde Delta robot için farklı denetleyici yapıları üzerine çalışmalar devam etmektedir. Böylelikle robotik gelişmeler hız kesmeden devam etmektedir. Aşağıda Delta robot ve denetleyici yapıları üzerine yapılan çalışmalar araştırılmış ve özetleri verilmiştir.

Chems Eddine Boudjedir ve Djamel Boukhetala (2020) yaptıkları çalışmada; dışarıdan bozucu etkilere maruz kalan ve tekrarlayan işlemlerdeki performansını gösteren bir Delta robotun yörünge takibi için uyarlanabilir güçlü bir ILC (Iterative Learning Control) algoritması önermişlerdir. Önerilen kontrolör üç bölümden oluşmaktadır: İlki, orantılı ve türevsel kazançların yakınsama oranını artırmak için zaman içinde ayarlandığı uyarlanabilir bir PD kontrolörüdür. İkinci bölüm, yinelemeler yoluyla izleme hatasını iyileştirmek için önceki izleme hatalarını kullanan bir PD-tipi ILC ileri besleme kontrolüdür. Son kısımda ise tekrarlayan dış bozuklukları telafi etmeye izin veren gürbüz bir yapı yer almaktadır.

Anh Tuan Vo ve Hee-Jun Kang (2020) yaptıkları çalışmada; robot manipulatörleri için yeni bir Hata Toleranslı Kontrol Metodolojisi (Fault-Tolerant Control Methodology-FTCM) geliştirmişlerdir. İlk olarak, tekillik sorununun üstesinden gelmek ve geleneksel Terminal Kayan Kipli Denetleyicinin (TSMC) yakınsama süresini iyileştirmek için yeni bir Hızlı Terminal Kayan Kipli Denetleyici (Fast Terminal Sliding Mode Control) (FTSMC) için kayma yüzeyleri oluşturmuşlardır. Son olarak, robot manipulatörlerin sistemin kararlılığının artması, öngörülen

performansa ulaşması, doğrusal olmama durumlarının ve hataların etkilerinin üstesinden gelmeleri için yeni, sağlam bir FTSMC geliştirilmiştir.

Azad ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada; çevikliği korurken kompakt bir formda tam hassas ters kinematik denklemleri türetmek için Screw teorisini kullanmışlardır. Delta robot paralel bir manipülatördür, bu nedenle robotun hareket denklemleri karmaşıktır, kinematik ve dinamik denklemler yüksek oranda birbirine bağlıdır. Bu nedenle, Delta robotun simülasyonu ve kontrolü karmaşıktır. Screw teorisinden türetilen kompaktlık denklemleri, Delta paralel robotun daha az karmaşık simülasyonunu ve kontrolünü sağlar. SMC sayesinde belirsizliklerin ve harici gürültülerin üstesinden gelmişlerdir.

Sun ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada; paralel robotun hareket performansını daha da iyileştirmek için bir kablo bağlantısı, seri-paralel paletleme robotunun (CSPR) mekanizma tasarımı, dinamik modellemesi ve hata analizi çalışmasına odaklanmışlardır. İlk olarak, CSPR, ataleti etkili bir şekilde azaltabilen ve dinamik yanıtı geliştirebilen esnek kablolarla çalıştırılan seri-paralel hibrit bir mekanizma olarak tasarlanmıştır. Uyumlu mekanizmaların kinematik tasarım optimizasyonunun doğru ancak verimli matematiksel modeller gerektirdiği bilindiği gibi, kinematik ve dinamik modeller homojen koordinat dönüştürme yöntemi ve Lagrange denklemi ile oluşturulmuştur. Robotun dinamik matematiksel modeline bağlı olarak, donanım kontrol sistemini oluşturmak için çeşitli sensörler seçilmiş ve kayan mod değişken yapı kontrol stratejisi de (sliding mode variable structure) hareket hatalarına göre tasarlanmıştır. Ardından, CSPR'nin hareket performansı ve yük taşıma kapasitesi sırasıyla analizi ve farklı çalışma koşullarında karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile mekanizmanın geçerliliği ve verimliliği doğrulanmıştır.

Azmoun ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada, MATLAB yazılımı ile SimMechanics ortamında Ters Kinematik Problemini (Inverse Kinematic Problem-IKP) ele almışlardır. Bu çalışmada delta paralel manipülatör robotun simülasyonu gerçekleştirilerek SMC ve PID tipindeki kontrolörlerin

performanslarını incelemişlerdir. Simülasyon ortamında bu manipülatör için kullanılan SMC, diğer yaklaşımlara göre yeni bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Sonuç olarak; bir 4-DOF paralel manipülatörün simülasyon çalışması ele alınmıştır. IKP vektörel yöntemden hesaplanmış ve IKP'ye dayalı bir PID ve SMC tasarlanmıştır. Denklemleri doğrulamak için, IKP'nin girişi olarak dairesel bir yörünge belirlenmiş, sonunda robotun izlediği yol ile, giriş olarak verilen yol karşılaştırılmıştır. Sonuçta SMC kontrolörün kalıcı durum hatası kabul edilebilir olarak yorumlanmıştır.

Rahmani ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada, paralel robotun hareketli plakasını yönlendirmek için bir projeksiyon sinir ağı ile bağlantılı olarak ikinci denetleyici olarak bir SMC kullanmışlardır. Kontrol algoritmasının çok yönlülüğünü arttırmak için, Lyapunov kararlılık teorisi kullanılarak anahtarlama kazancı için uyarlanabilir bir kural belirlenmiştir. Bu araştırmada, önerilen algoritma, sinir ağı tarafından oluşturulan yolu izlemek için yüksek performansa sahip olarak ortaya çıkmıştır.

Su ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada; Delta robotun dinamik modelini oluşturmuş ve analiz etmişlerdir. Delta robot sisteminde sistem arızası olduğunda veya model parametreleri belirsiz olduğunda, Delta robotunun gürbüz bir şekilde yörünge takibini gerçekleştirmek amacıyla, SMC önerilmiştir. Dinamik model kullanılarak Uç-Efektör'ün istenen yörüngeyi izleyebilmesi için kontrolör, SMC yöntemine göre tasarlanmıştır. Simülasyon deneyinin sonuçları, önerilen yöntemin paralel Delta robotun Uç-Efektör'ün yörünge izlemesini gerçekleştirmek için kullanılabileceğini ve tasarlanan kontrolörün basit, sağlam ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

Tolgay Kara ve Ali Hussien Mary (2018) yaptıkları çalışmada, doğrusal olmayan bir robot manipülatörün yörünge izleme problemi için PID ve SMC yöntemine dayanan sağlam bir kontrolör tasarlamışlardır. Lyapunov'un kararlılık yöntemi, sistem belirsizliklerine ve dış müdahaleye maruz kalan robot manipülatör için önerilen denetleyicinin sağlamlığını kanıtlamak için kullanılır. Önerilen kontrolörün performansı MATLAB/Simulink ortamında elde edilen simülasyon

sonuçlarına göre yapılmıştır. Ayrıca robot manipülatörlerde yaygın olarak tercih edilen çeşitli kontrol yöntemleriyle verimliliğini doğrulamak için diğer kontrol şemalarıyla karşılaştırılmıştır.

Doan ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada, Delta robotun denetlenmesi için belirsizliklere karşı hızlı yanıt verebilen, yakınsama süresini ve izleme konumunun doğruluğunu geliştirmek için yeni Hızlı Terminal Kayar Mod Manifoldu (FTSMM) denetleyici geliştirdiler. Sonuç olarak, yüksek performans ve sağlamlık kriterleri garanti edilmektedir. Önerilen kontrolör, belirsiz bileşenlerin varlığında bile kesin bir dinamik model olmadan çalışır. Nümerik simülasyonlar ile 3 serbestlik dereceli (DOF) robotik manipülatörün yörünge izleme kontrolü için önerilen kontrol yönteminin etkinliği gösterilmiştir.

Zhang ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada, tekillik probleminden kaçınırken hızlı yakınsamanın avantajlarını korumayı amaçlayan yeni bir doğrusal olmayan SMC önermişlerdir. Önerdikleri denetleyiciyi manipülatör sistemlerinde uygulamışlardır. Manipülatör sistemlerinde daha hızlı izleme kontrolünü sağlamak için sürekli üstel erişim yasaasının geliştirilmiş bir versiyonu önerilmiştir. Kararlılık analizi Lyapunov teorisi kullanılarak yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen yaklaşımın sürekli kontrol, tekillik ile ilgili sorunları ortadan kaldırmada daha hızlı ve etkili olduğunu göstermektedir.

Kuo (2016), Delta robotun kinematik ve dinamik modellerini, denklemleri analiz etmiştir Robotun matematiksel denklemleri kısmi diferansiyel denklemler ile temsil edilmemiştir. Bu yüzden denklemler bulunurken, Kineto-elasto-dinamiklerini ve sonlu elemanlar yöntemini kullanır. Doğal Frekans analizi ve yakınsama analizi ilk önce yapılır ve ardından uç-efektörün hareketleri için dairesel bir yol tasarlanmıştır.

Jaime Gallardo-Alvarado (2020), Gough-Stewart tipin de olan paralel manipülatöre 3 yeni serbestlik derecesi ekleyerek robotun hareket kabiliyetini test etmişlerdir. Robotun ileri ve ters kinematik denklemleri screw teorisi kullanılarak türetilmiştir.

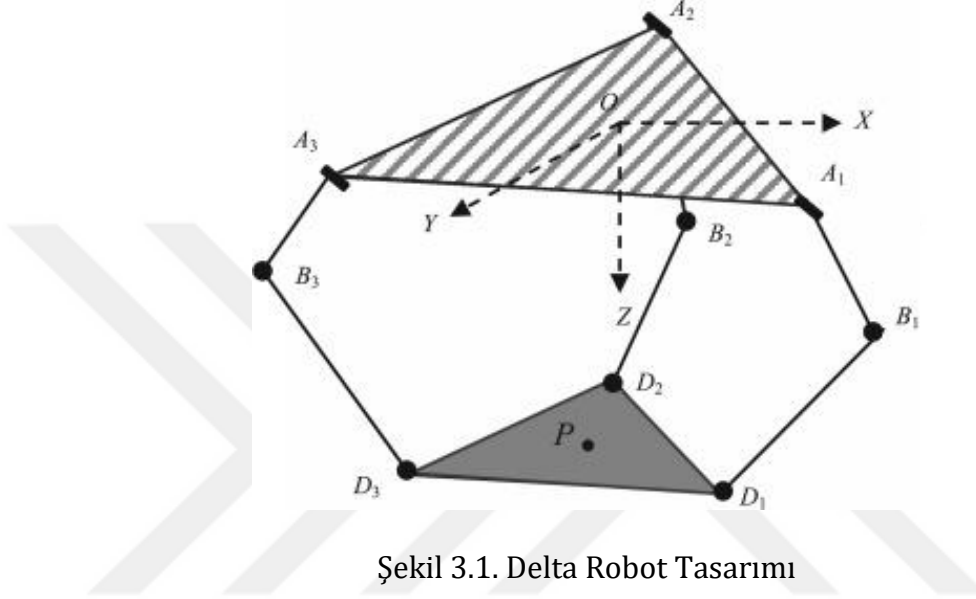
Xin-Jun Liu ve Jongwon Kim (2002), 3 serbestlik derecesine sahip paralel manipölatörün kinematik analizi ve 3 çeşit tekillik problemi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak ters kinematiğin çözümünün 8'e, ileri kinematiğin çözümünün ise 4'e ulaştığını göstermişlerdir.

Mohsen Heydarzadeh ve arkadaşları (2018), ayrıştırılmış 3 serbestlik derecesine sahip Tripteron denen paralel robotun kontrolü üzerine bir çalışma yapmışlardır. Uç-Efektör'ün konumunu bulmak için Kinect sensörü kullanılmıştır. Kinect sensörünü kalibre etmek için nöro-bulanık bir algoritma olan "LoLiMoT" kullanılmıştır. PID ve SMC' nin performansları karşılaştırılmıştır.



### 3. DELTA ROBOT MATEMATİKSEL MODEL

Delta robotun yörünge takibinde öncelikle literatürde bulunan çalışmalar ve sistemin tasarımları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Kullanılacak tasarım ve elemanlar belirlenerek Şekil 3.1’de (Kuo) gösterilmiştir. Daha sonrasında tasarımdaki sistem parametreleri belirlenerek sistemin matematiksel modeli çıkarılmıştır.



Şekil 3.1. Delta Robot Tasarımı

Robotun serbestlik derecesi yani DOF sayısı aşağıdaki Denklem (3.1) ile bulunabilir. Bu matematiksel gösterimde n toplam link sayısını,

$J_1$  Revolute ve Prismatic eklemler için serbestlik derecesi 1 olan eklemlerin sayısı

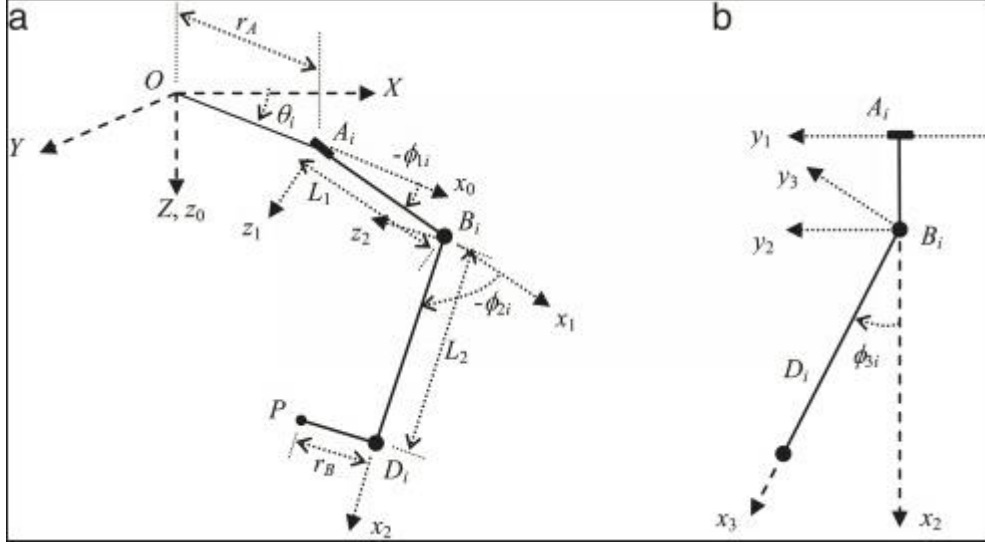
$J_2$  Universal eklemler için serbestlik derecesi 2 olan eklemlerin sayısı

$J_3$  Spherical eklemler için serbestlik derecesi 3 olan eklemlerin sayısı

n zemin dahil toplan link sayısını göstermektedir.

Burada robotun serbestlik derecesi (m) yukarıdaki eklem sayıları kullanılarak Denklem (3.1)’e göre şu şekilde elde edilir:

$$\begin{aligned} m &= 6(n - 1) - 5J_1 - 4J_2 - 3J_3 & (3.1) \\ m &= 6(14 - 1) - 5 \times 15 - 4 \times 0 - 3 \times 0 \\ m &= 3 \text{ DOF olarak bulunur} \end{aligned}$$



Şekil 3.2. Delta Robot Vektörel Gösterim

Denavit Hertenberg gösterimi ile aşağıda verilen Denklem (3.2) kullanılarak, Delta robot için Rotasyon, Pozisyon ve Yönelim matrisleri elde edilir.

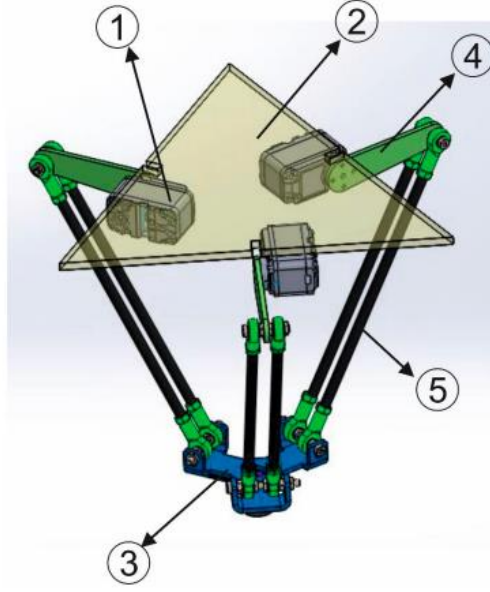
$$R_z(\theta_i) T_x(r_A) R_y(\phi_{1i}) T_x(L_1) R_y(\phi_{2i}) R_z(\phi_{3i}) T_x(L_2) R_z(-\phi_{3i}) R_y(-\phi_{2i}) T_x(-r_B) = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ O_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Şekil 3.2 de  $\theta_i$  açısı üst tabla orta noktası ile aktif linklere giden açıları temsil eder.  $\phi_{1i}$  açıları 3 adet aktif linkin üst tabla ile yaptıkları açıları temsil eder.  $\phi_{2i}$  açıları 3 adet aktif link ile 3 adet pasif link arasında ki açıları temsil eder.  $\phi_{3i}$  açıları ise pasif link ile Uç-Efektör arasındaki açıları temsil eder.  $\tau_A$  üst tabla orta nokta ile aktif link başlangıç noktası arasındaki mesafe,  $\tau_B$  ise Uç-Efektörün başlangıç noktası ile orta noktası arasındaki mesafeyi temsil eder.  $L_1$  ve  $L_2$  sırası ile aktif ve pasif link uzunluklarıdır.

Elde edilen 3.2 denkleminde değişkenler yerine yerleştirilir ise pozisyon matrisi, yani uç-efektörün konumu;

$$P_{3 \times 1} \begin{bmatrix} \cos\theta_i(\tau_A - \tau_B + L_1 \cos\phi_{1i} + L_2 \cos(\phi_{1i} + \phi_{2i}) \cos\phi_{3i} - L_2 \sin\theta_i \sin\phi_{3i}) \\ \sin\theta_i(\tau_A - \tau_B + L_1 \cos\phi_{1i} + L_2 \cos(\phi_{1i} + \phi_{2i}) \cos\phi_{3i} + L_2 \sin\theta_i \cos\phi_{3i}) \\ L_1 \sin\phi_{1i} + L_2 \sin(\phi_{1i} + \phi_{2i}) \cos\phi_{3i} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

biçiminde elde edilir.



Şekil 3.3. Delta robot kesit gösterimi.

Yukarıda gösterilen Şekil 3.3'te Delta robotun bileşenleri Servo Motorlar (1), Taban Plakası (2), Uç-Efektör (3), Üst kol (aktif) (4), Alt kol (pasif) (5) olarak gösterilmiştir.

### 3.1. Delta Robot İleri Kinematığı

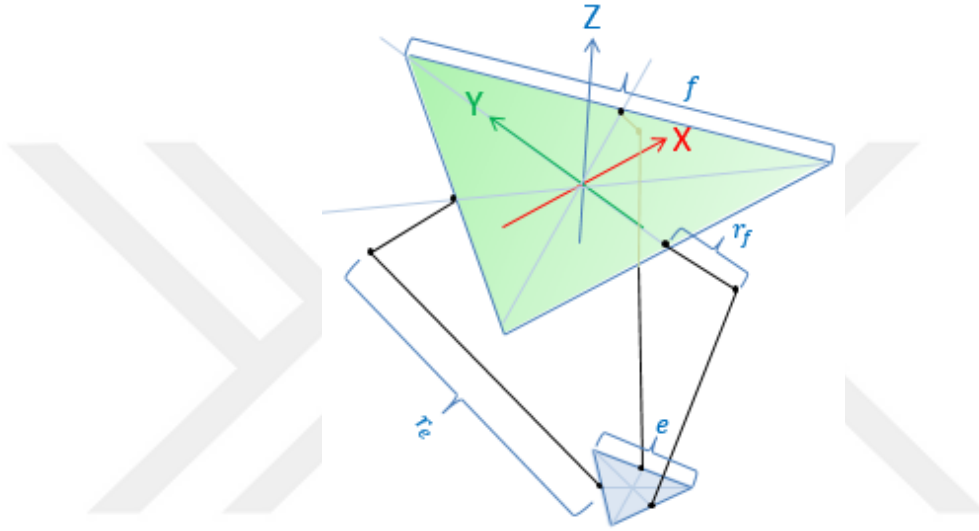
Delta robotun ileri kinematik denklemlerinde aşağıdaki Şekil 3.4'te açıklandığı üzere üç eklem açısı ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ) servo motorlara uygulanır ve Şekil 3.5'te gösterilen Kartezyen Koordinatlar ile ifade edilen  $(x, y, z)$  konumları elde edilir.



Şekil 3.4. İleri ve ters kinematik bağlantısı.



Şekil 3.5. Delta robot ileri kinematik gösterimi.



Şekil 3.6. Delta robot fiziksel parametreleri.

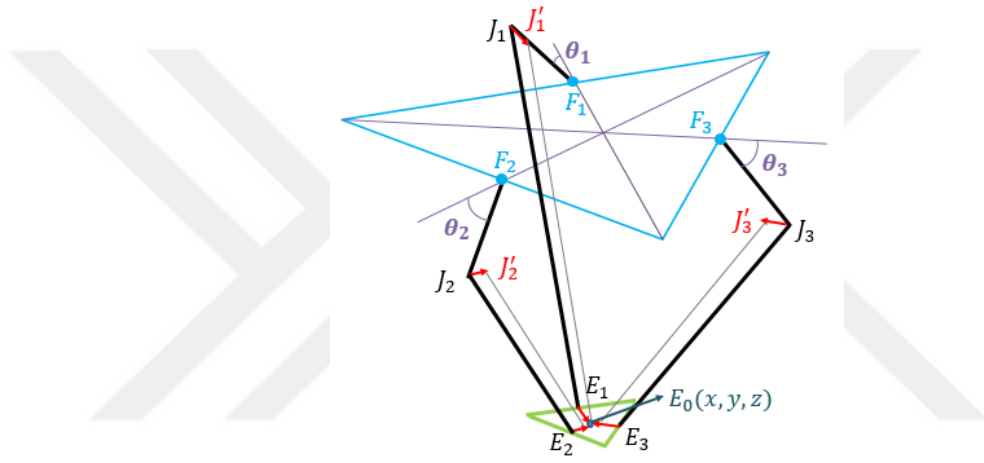
Şekil 3.6' da Delta robota ait fiziksel parametreler gösterilmektedir. Bu şekle göre tanımlanan fiziksel parametreler şu şekildedir:

- $f$  Taban plakası üçgeninin yan kısmı,
- $e$  Uç-efektör yan kısmı,
- $r_f$  Üst kol uzunluğu,
- $r_e$  Alt kol uzunluğu.

Çizelge 3.1. Tasarımda Kullanılan Parametreler

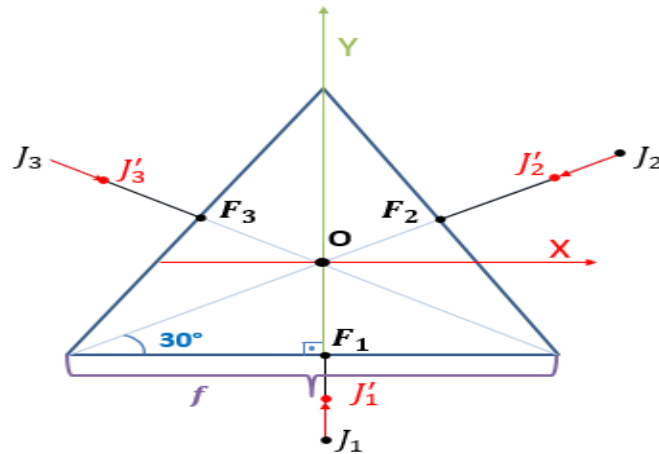
Taban plakası üçgeninin yan kısmı ( $f$ )	840 mm
Uç-efektör yan kısmı ( $e$ )	190 mm
Üst kol uzunluğu $r_f$	300 mm
Alt kol uzunluğu $r_e$	800 mm

Çizelge 3.1'de sistem tasarlanırken kullanılan parametreler verilmiştir. Genel olarak paralel robotların ileri kinematik çözümleri zordur. Fakat Delta robot sadece koordinat dönüşümü yapar. Bu yüzden ileri kinematik denklemlerle benzersiz ve doğru bir analitik çözüm bulunabilir. İleri kinematik çözümü elde etmek için ilk olarak  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  açılarını kullanarak  $J_1, J_2, J_3$  koordinat noktalarını bulmamız gereklidir. Alt kollar  $J_1, J_2, J_3$  noktalarının etrafında dönerken  $r_e$  yarıçaplı 3 adet küre elde edilir. Bu küreleri bir noktada kesiştirmek için kürelerin merkezleri  $J_1, J_2, J_3$  noktalarından  $J'_1, J'_2, J'_3$  noktalarına taşınır. Bu dönüşüm işlemleri Şekil 3.7' de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Delta robot ileri kinematik vektörel gösterimi

Üç kürenin kesişme noktası  $E_0(x, y, z)$  noktasıdır ve bu kesişme noktası, ileri kinematiğin kartezyen uzay çözümüdür.



Şekil 3.8. Taban plakası üçgeni.

Kesişim noktasını bulmak için merkez ve her kürenin yarıçapı bulunmalıdır. Taban plakasının üçgeni Şekil 3.8' de gösterilmiştir. Böylece  $F_i$  ve taban üçgeninin merkezi arasındaki mesafeleri hesaplayabiliriz.

$$|OF_1| = |OF_2| = |OF_3| = \frac{f}{2} \tan 30 \quad (3.4)$$

Benzer olarak  $J_i$  ve  $J_i^1$  arasındaki mesafe aşağıdaki gibidir.

$$|J_1 J_1^1| = |J_2 J_2^1| = |J_3 J_3^1| = |OF_3| = \frac{e}{2} \tan 30 \quad (3.5)$$

$F_i$  ve  $J_i$  Arasındaki mesafe;

$$|F_1 J_1| = r_f \cos \theta_1 \quad |F_2 J_2| = r_f \cos \theta_2 \quad |F_3 J_3| = r_f \cos \theta_3 \quad (3.6)$$

3.4, 3.5 ve 3.6 numaralı denklemleri beraber çözümlersek;

$$\left\{ \begin{matrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{matrix} \right\}, r_1 = \left\{ \begin{matrix} -\left(\frac{f-e}{2} \tan 30\right) - r_f \cos \theta_1 \\ -r_f \sin \theta_1 \end{matrix} \right\}, r_e \quad (3.7)$$

$$\left\{ \begin{matrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{matrix} \right\}, r_3 = \left\{ \begin{matrix} \left[\left(\frac{f-e}{2} \tan 30\right) + r_f \cos \theta_3\right] \cos 30 \\ -\left[\left(\frac{f-e}{2} \tan 30\right) + r_f \cos \theta_3\right] \sin 30 \\ -r_f \sin \theta_3 \end{matrix} \right\}, r_e \quad (3.8)$$

$$\left\{ \begin{matrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{matrix} \right\}, r_3 = \left\{ \begin{matrix} \left[\left(\frac{f-e}{2} \tan 30\right) + r_f \cos \theta_3\right] \cos 30 \\ -\left[\left(\frac{f-e}{2} \tan 30\right) + r_f \cos \theta_3\right] \sin 30 \\ -r_f \sin \theta_3 \end{matrix} \right\}, r_e \quad (3.9)$$

Aşağıda kartezyen koordinatlar kullanılarak elde edilen küre denklemi verilmiştir.

$$\left\{ \begin{matrix} (x)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_e^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_e^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_e^2 \end{matrix} \right\} \quad (3.10)$$

3.10'daki formüller daha açık olarak yazılacak olursa;

$$(x)^2 + (y)^2 + (z)^2 - 2y_1y - 2z_1z = r_e^2 - y_1^2 - z_1^2 \quad (3.11)$$

$$(x)^2 + (y)^2 + (z)^2 - 2x_2x - 2y_2y - 2z_2z = r_e^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \quad (3.12)$$

$$(x)^2 + (y)^2 + (z)^2 - 2x_3x - 2y_3y - 2z_3z = r_e^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \quad (3.13)$$

3.11, 3.12 ve 3.13'teki denklemleri basitleştirmek için

$w_i = (x_i)^2 + (y_i)^2 + (z_i)^2$  Şeklinde yazabiliriz.

$$(x)^2 + (y)^2 + (z)^2 - 2y_1y - 2z_1z = r_e^2 - w_1 \quad (3.14)$$

$$(x)^2 + (y)^2 + (z)^2 - 2x_2x - 2y_2y - 2z_2z = r_e^2 - w_2 \quad (3.15)$$

$$(x)^2 + (y)^2 + (z)^2 - 2x_3x - 2y_3y - 2z_3z = r_e^2 - w_3 \quad (3.16)$$

Denklemleri sadeleştirmek için 3.15 ve 3.16, 3.14'ten çıkarılır.

$$x_2x + (y_1 - y_2)y + (z_1 - z_2)z = \frac{w_1 - w_2}{2} \quad (3.17)$$

$$x_3x + (y_1 - y_3)y + (z_1 - z_3)z = \frac{w_1 - w_3}{2} \quad (3.18)$$

3.17 ve 3.18 taraf tarafa çıkarılır ise iki denklem elde edilir;

$$x = \frac{a_1z + b_1}{d} \quad (3.19)$$

$$y = \frac{a_2z + b_2}{d} \quad (3.20)$$

Denklemleri basitleştirmek için 3.21 deki yeni denklem tanımlanır.

$$d = x_3(y_1 - y_2)y + x_2(y_3 - y_1) \quad (3.21)$$

Sonuç olarak 3.19, 3.20 ve 3.21 kullanılarak  $a_1, b_1, a_2, b_2$  elde edilir.

$$a_1 = (z_1 - z_2)(y_3 - y_1) - (z_3 - z_1)(y_2 - y_1) \quad (3.22)$$

$$b_1 = -0.5[(w_2 - w_1)(y_3 - y_1) - (w_3 - w_1)(y_2 - y_1)] \quad (3.23)$$

$$a_2 = (z_2 - z_1)x_3 - (z_3 - z_1)x_2 \quad (3.24)$$

$$b_1 = -0.5[(w_2 - w_1)x_3 - (w_3 - w_1)x_2] \quad (3.25)$$

Buraya kadar x ve y'nin ifadesini z cinsinden elde etmeye çalıştık. Bu yüzden 3.19 ve 3.20'ye sahibiz. Şimdi x ve y için ifadeler 3.10'da kullanılır.

$$a = (a_1^2 + a_2^2 + d^2) \quad (3.26)$$

$$b = 2(a_1b_1 + a_2(b_2 - dy_1) - z_1d^2) \quad (3.27)$$

$$c = b_1^2(b_2 - dy_1)^2 + d^2(z_1^2 - r_e^2) \quad (3.28)$$

$$az^2 + bz + c = 0 \quad (3.29)$$

Görüldüğü üzere 3.29 2.dereceden bir denklemdir. Eğer diskriminant sıfırdan büyükse çözüm vardır.

$$z_{+-} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.30)$$

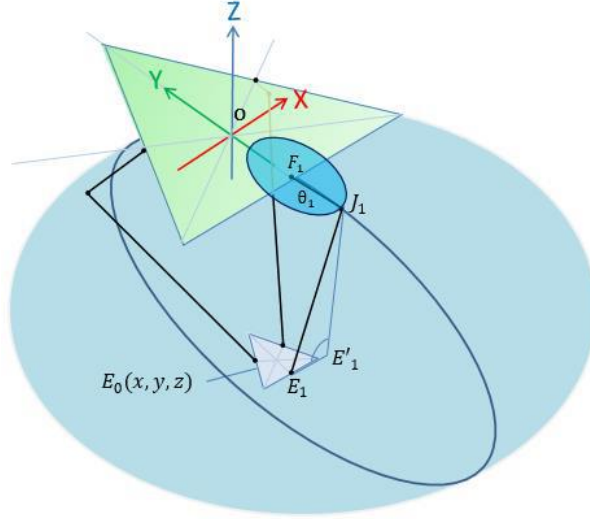
Delta robotunun ileri kinematik çözümünü tamamlamak için Z bulunduktan sonra 3.30'dan 3.19 ve 3.20 denklemlerine geçilir.

### 3.2. Delta Robot Ters Kinematığı

Uç-Efektörün uzaydaki bir konumda iken eklemlerin açılarını tespit etmemiz gerekir. Bu açılar ters kinematik denklemler yardımı ile bulunabilir. Şekil 3.9' da (x y z) noktalarına karşılık gelen eklem açıları gösterilmiştir. Şekil 3.7'de  $F_1J_1$  Joint'i  $r_f$  yarıçaplı  $F_1$  merkezli daire YZ düzleminde dönebilir.  $F_1, J_1$  ve  $E_1$ 'in aksine,  $E_1J_1$ 'in  $E_1'e$  göre serbestçe dönebileceği anlamına gelen ve Şekil 3.10' da gösterilen  $E_1$  merkezli  $r_e$  yarıçaplı bir küre oluşturan evrensel eklemlerdir.



Şekil 3.9. Delta Robot Ters Kinematığı



Şekil 3.10. Eklemlerin Dönme Hareketi ile Küre Oluşturması

Bu kürenin kesişimi Şekil 3.10'da gösterilen YZ düzleminde  $E_1^I$  noktasında  $E_1^I J_1$  yarıçaplı,  $E_1$  noktasının yansıması olan  $E_1^I$  noktasında bir dairedir.  $J_1$  Yarıçapları bilinen,  $E_1^I F_1$  merkezli ve iki dairenin kesiştiği noktadır ve  $\theta_1$  açısını hesaplayabiliriz.

$E_0(x, y, z)$  Koordinatları End effector' ün koordinatlarının taban üçgeninin merkez koordinatlarından çıkarılması ile elde edilir.

$$EE_1 = \frac{e \tan \frac{\pi}{6}}{2} = \frac{e}{2\sqrt{3}} \quad (3.31)$$

$$E_1 \left( x, y - \frac{e}{2\sqrt{3}}, z \right) E_1^I \left( 0, y - \frac{e}{2\sqrt{3}}, z \right) \quad (3.32)$$

$$E_1 E_1^I = x E_1^I J_1 = \sqrt{E_1^I J_1^2 - E_1 E_1^I^2} = \sqrt{r_e^2 - x^2} \quad (3.33)$$

$F_1$  Noktasının koordinatları aşağıdaki gibidir:

$$F_1 \left( 0, -\frac{f}{2\sqrt{3}}, 0 \right) \quad (3.34)$$

Öklid formülleri kullanılarak;

$$(y_{J1} - y_{F1})^2 + (z_{J1} - z_{F1})^2 = r_f^2 \left( y_{J1} + \frac{f}{2\sqrt{3}} \right)^2 + z_{J1} = r_f^2 \quad (3.35)$$

$$(y_{J1} - y_{E1})^2 + (z_{J1} - z_{E1})^2 = r_e^2 - x^2 \left( y_{J1} - y + \frac{e}{2\sqrt{3}} \right)^2 + (z_{J1} - z)^2 = r_e^2 \quad (3.36)$$

Son olarak, ilk eklem için ters kinematik çözümü:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{z_{J1}}{y_{F1}-y_{J1}}\right) \quad (3.37)$$

Kalan açılar  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  için, koordinat sistemini Z eksenini etrafındaki XY düzleminde 120 ve -120 derece döndürelim.

$$x^1 = x \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + y \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.38)$$

$$y^1 = -x \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + y \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.39)$$

$E_0(x, y, z)$  başlangıç parametrelerinden  $(x^1 y^1 z)$  elde edilir.

### 3.3. Delta Robot Dinamik Denklemleri

Robotun dinamik denklemleri Euler-Lagrange denklemleriyle şu şekilde türetilebilir:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_m}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L_m}{\partial q} = Q \quad (3.40)$$

$X_p, Y_p, Z_p$  Uç-Efektörün uzaydaki konumunun Kartezyen koordinat sistemindeki gösterimini ifade eder, Ayrıca,

$\phi_i = (i = 1,2,3)$  Eklem açılarını temsil eder.  $Q, F_{PX}, F_{PY}, F_{PZ}$  P noktasında uygulanan kuvvetleri ifade eder.  $\tau_i (i=0,1,2,3)$  uygulanan torkları ifade eder.  $L_m$  Lagrange denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$L_m = T_m - V_m \quad (3.41)$$

$T_m$  Kinetik enerji,  $V_m$  potansiyel enerjiyi aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz.

$$T_m = \frac{1}{2}m_p (\dot{X}_p^2 + \dot{Y}_p^2 + \dot{Z}_p^2) + \frac{1}{6} m_1 L_1^2 \sum_i \dot{\phi}_{1i}^2 + \frac{1}{2} m_2 \sum_i (\dot{X}_p^2 + \dot{Y}_p^2 + \dot{Z}_p^2 + L_1^2 \dot{\phi}_{1i}^2) \quad (3.42)$$

$$V_m = m_p g Z_p + \frac{1}{2} m_1 g L_1 \sum_i \sin \phi_{1i} + m_2 g \sum_i (Z_p + L_1 \sin \phi_{1i}) \quad (3.43)$$

$m_p, m_1$  ve  $m_2$  sırası ile Uç-Efektör, üst ve alt bağlantının kütleleridir.

Denklemleri değiştirerek (3.42) , (3.43) ve (3.44) (3.41)'e girildiğinde, Delta robotun hareket denklemleri şu şekilde yazılabilir:

$$(m_p + 3m_2) \ddot{X}_p - 2 \sum_i \lambda_i (X_p + r \cos \theta_i - L_1 \cos \phi_{1i} \cos \theta_i) = F_{PX} \quad (3.44)$$

$$(m_p + 3m_2) \ddot{Y}_p - 2 \sum_i \lambda_i (Y_p + r \sin \theta_i - L_1 \cos \phi_{1i} \sin \theta_i) = F_{PY} \quad (3.45)$$

$$(m_p + 3m_2) \ddot{Z}_p - 2 \sum_i \lambda_i (Z_p - L_1 \sin \phi_{1i}) + (m_p + 3m_2)g = F_{PZ} \quad (3.46)$$

$$\left(\frac{1}{3}m_1 + m_2\right) L_1^2 \ddot{\phi}_{1i} + \left(\frac{1}{2}m_1 + m_2\right) g L_1 \cos \phi_{1i} - 2\lambda_i L_1 [(X_p \cos \theta_i + Y_p \sin \theta_i + r) \sin \phi_{1i} - Z_p \cos \phi_{1i}] = \tau_i \quad (i=0,1,2,3) \quad (3.47)$$

Delta robotunun üç serbestlik derecesi olduğundan, robotun konfigürasyonu robotun uzaydaki konumu  $X_p, Y_p, Z_p$  veya eklem açıları  $\phi_i (i = 1,2,3)$  ile tanımlanabilir.

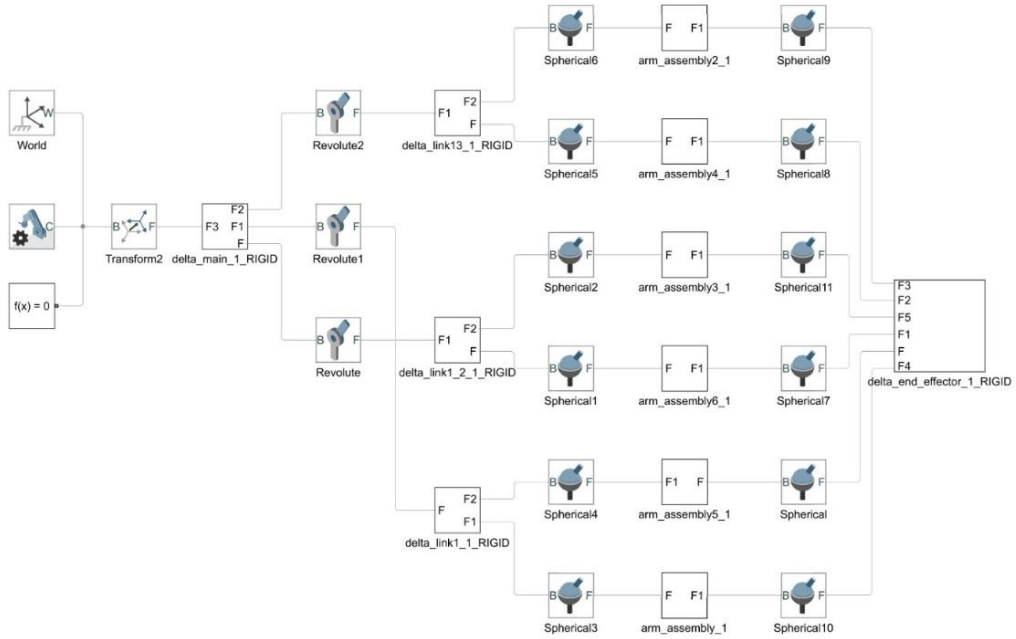
Pratik uygulamalar için, uygulanan torklar, motorların tork kontrolünü gerçekleştirmek için komut sinyalleri olarak ele alınabilir (motorlar aktif açılara monte edilirken) ve komut sinyalleri (uygulanan torklar), aşağıdaki yollar izlenerek belirlenebilir.

Uç-Efektör' ün yörüngesi planlanarak, uzaydaki konumu  $(X_p, Y_p, Z_p)$  elde edilebilir. Ters kinematik uygulanarak aktif eklem açıları  $\phi_{1i} (i = 1,2,3)$  elde edilebilir. Pasif eklem açıları  $\phi_{2i}, \phi_{3i}, (i = 1,2,3)$  elde edilebilir.  $X_p, Y_p, Z_p, \phi_{1i}, \phi_{2i}, \phi_{3i}, (i = 1,2,3)$  Değişkenlerin zaman türevleri alınarak (3.44), (3.45), (3.46), ve (3.47) de yerine yazılır.

### 3.4. Delta Robot Simscape Model ve Denetleyici Yapılar

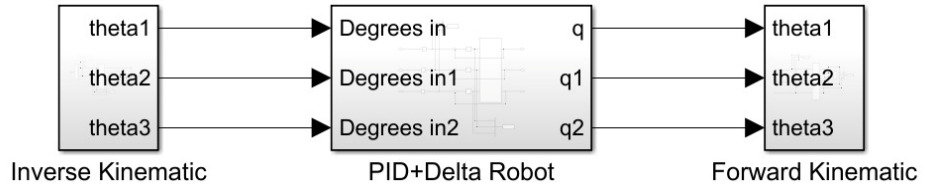
Delta robot tasarımında literatürde farklı model gösterimleri mevcuttur. Bu tez kapsamında Delta robot Solidworks' te tasarlandı ve Simscape model olarak MATLAB/Simulink ortamına aktarıldı. Böylelikle gerçeğe yakın bir model elde edilmiş olundu. MATLAB/Simulink ortamında tasarladığımız sisteme kinematik denklemler ile Simscape modeli entegre ederek denetleyici yapılar ile Delta robot kontrol edildi. Delta robot kontrol yaklaşımları olarak geleneksel PID ve SMC kullanıldı. SMC tasarımında sign fonksiyonu yerine titreme etkisini azaltıcı olarak hiperbolik tanjant (tanh) fonksiyon kullanıldı.

#### 3.4.1. PID (Oransal-İntegral-Türevsel Kontrolcü) Denetleyici

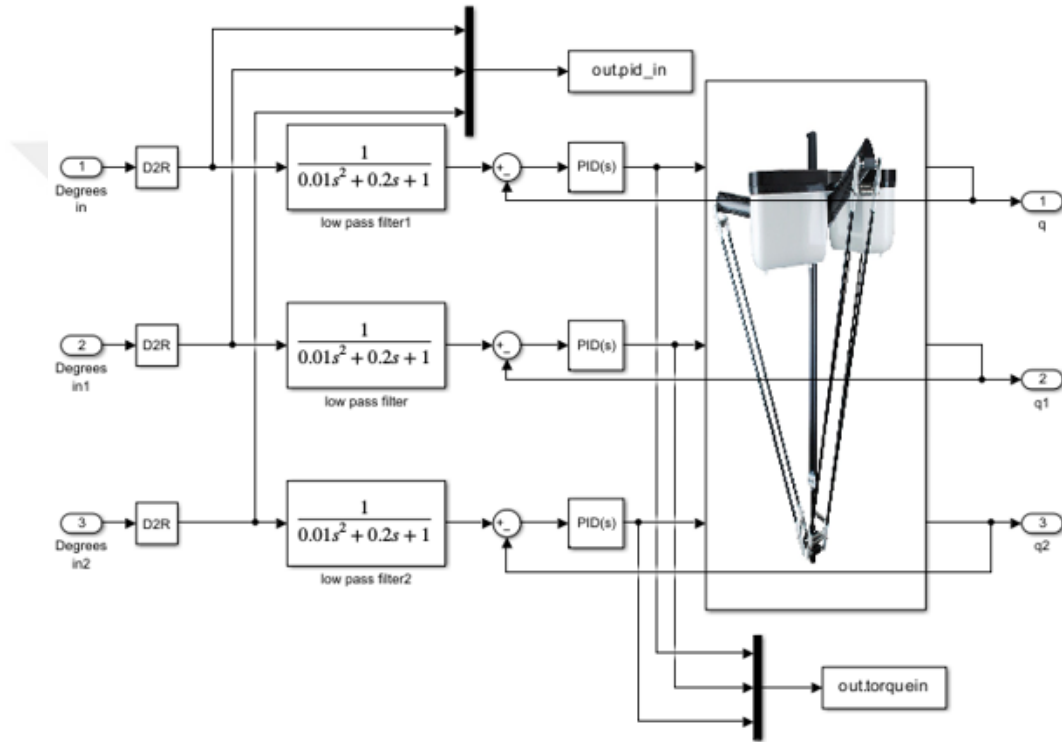


Şekil 3.11. Delta Robot Simscape Model

Şekil 3.11' de Solidworks' te çizilen Delta robotun MATLAB/Simulink ortamına aktarılmış şekli verilmiştir.

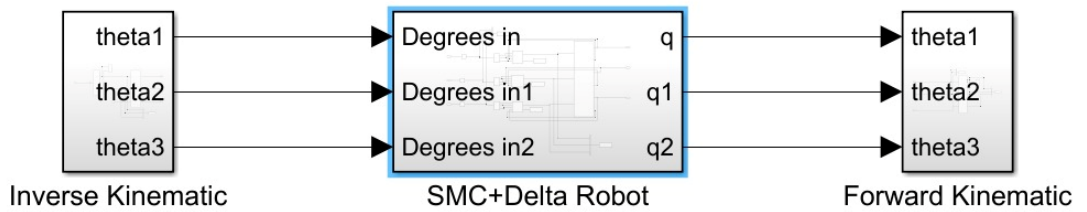


Şekil 3.12. Delta Robot PID Sistem

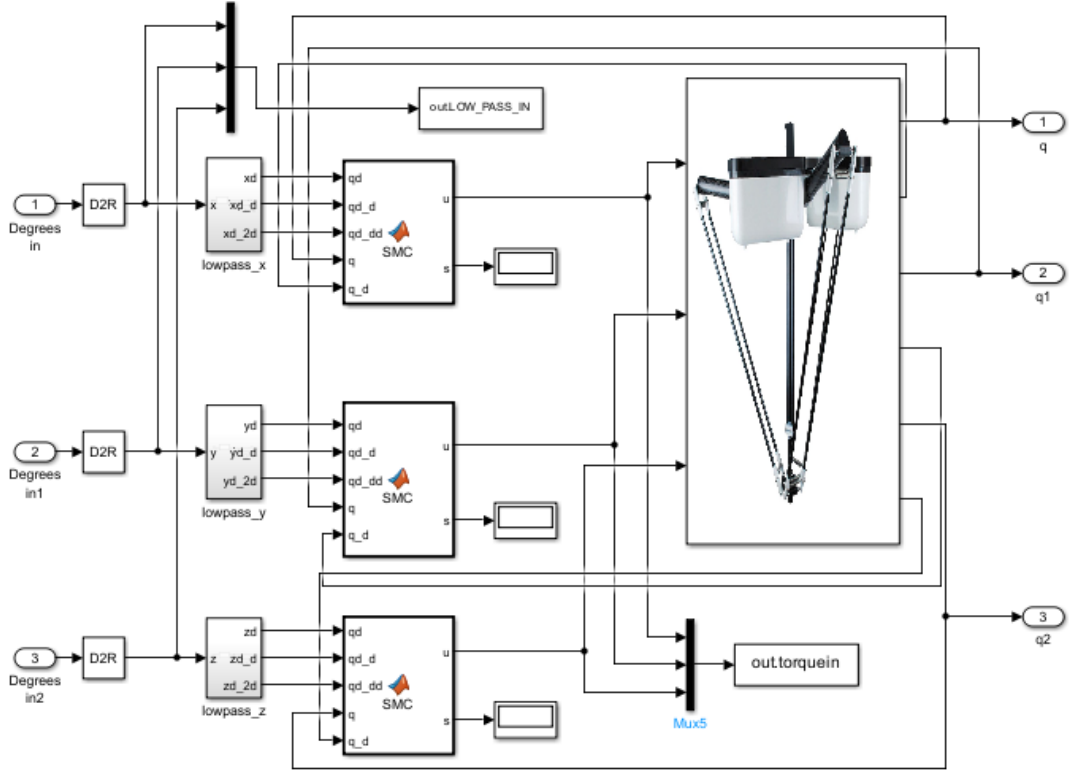


Şekil 3.13. Delta Robot PID Denetleyici ve Simscape Model

Şekil 3.12 ve 3.13' de Delta robot kinematik denklemler, Delta robot simscape model ve PID denetletici yapısı bir arada verilmiştir.



Şekil 3.14. Delta Robot Kayan Kipli Denetleyici Sistem



Şekil 3.15. Delta Robot Kayan Kipli Denetleyici ve Simscape Model

Şekil 3.14 ve 3.15'te Delta robot kinematik denklemler, Delta robot simscape model ve SMC denetleyici yapısı bir arada verilmiştir.

### 3.4.2. Kayan Kipli Denetleyici

SMC genelde üç bölümde incelenir. Birinci bölüm de yörüngeler sınırlı zamanda kayma yüzeyine yakınsar, ikinci kısım da yörüngeler kayma yüzeyinde salınım yapar ve üçüncü kısımda ise sistem denge noktasında sabit kalır. SMC değişkenleri aşağıdaki gibi seçilir. Burada her bir link için durum değişkenleri denklem 3.4.1 de gösterilmiştir. Denklem 3.4.2  $f(x)$  Düzgün doğrusal olmayan fonksiyon,  $g(x)$  Düzgün doğrusal olmayan ve sıfırdan farklı fonksiyon,  $d(t)$  dış belirsizlikler toplamı olarak tanımlanabilir.  $e(t)$  kontrol izleme hatası, bu hatanın sıfıra yaklaştırılması hedeflenmektedir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.4.1)$$

$$\dot{x}_2 = f(x) + g(x)u + d(t) \quad (3.4.2)$$

$$x = [x_1, x_2]^T \quad (3.4.3)$$

$$e(t) = y(t) - y_d(t) \quad (3.4.4)$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} e(t) = 0 \quad (3.4.5)$$

$$s = \lambda e + \dot{e} \quad (3.4.6)$$

$$e = x_1 - x_d \quad (3.4.7)$$

$$\dot{e} = x_2 - \dot{x}_d \quad \lambda > 0 \quad (3.4.8)$$

Kayma yüzeyi denklemi 3.4.6'daki gibi seçilir. Burada SMC' de kayma yüzeyine ait denklemin zamana göre türevi alınır:

$$\dot{s} = \lambda \dot{e} + \ddot{e} \quad (3.4.9)$$

$$= \lambda \dot{e} + \dot{x}_2 - \ddot{x}_d \quad (3.4.10)$$

$$= \lambda \dot{e} + f(x) + g(x)u + d(t) - \ddot{x}_d \quad (3.4.11)$$

SMC denge ve sağlamlık olmak üzere iki terimden oluşur.

$$U_{eq} = \text{denge terimi} \quad (3.4.12)$$

$$U_R = \text{sağlamlık terimi} \quad (3.4.13)$$

$$U = U_{eq} + U_R \quad (3.4.14)$$

$\dot{s} = -ks$  ve  $d(t) = 0$  olarak ayarlandığında  $U_{eq}$  belirlenir.

$$U_{eq} = g^{-1}(x)(\ddot{x}_d - \lambda \dot{e} - f(x) - ks) \quad (3.4.15) \quad U_R = -g^{-1}(x)\eta \text{sign}(s) \quad (3.4.16)$$

$$\eta \geq \|d(t)\|_{\infty} \quad (3.4.17)$$

Kontrol sisteminin kararlılığını açıklamak için 3.4.9, 3.4.10, 3.4.11 ve 3.4.14 beraber çözülür ise,

$$\dot{s} = -ks - \eta \text{sign } s + d(t) \quad (3.4.18)$$

3.4.18 deki denklem elde edilir. Bu çalışmada Chattering etkisini azaltmak için sign fonksiyonu yerine tanh fonksiyon kullanılmıştır.

Kontrol sisteminin kararlılığını ispatlamak için aşağıdaki gibi bir Lyapunov fonksiyonu seçilir.

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (3.4.19)$$

Lyapunov teorisine dayanarak bu sistemin kararlı olduğunu söyleyebiliriz. Kayan değişken sonlu zamanda kayma yüzeyine yaklaşır. Pozisyon hatası ve hız hatası sifıra yakınsar.



#### 4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

MATLAB/Simulink ortamında 3 farklı yörünge tanımlanmış ve bu 3 farklı yörüngeye ait deney sonuçları aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

Birinci yörüngede Z eksenin sabit olduğu, 2 boyutlu dairesel bir yörünge takip edildiği denetleyicinin simülasyon sonuçları gösterilmektedir. İkinci yörüngede ise bir önceki yörüngede sabit olan Z bileşeni değişken hale getirilmiştir. Bu yörünge için geliştirilen denetleyicilere ait simülasyon sonuçları verilmektedir. Son yörüngede ise yine Z bileşeninin değişken olduğu yay şekline benzer bir yörünge takip etmesine ait simülasyon sonuçları gösterilmiştir.

Her bir farklı yörünge için PID ve SMC denetleyici yapıları kullanılmıştır. SMC tork grafiklerinde sign ve tanh fonksiyon sonuçları ayrı ayrı verilmiştir. Aşağıda her bir sistem için deney sonuçları verilmiştir.

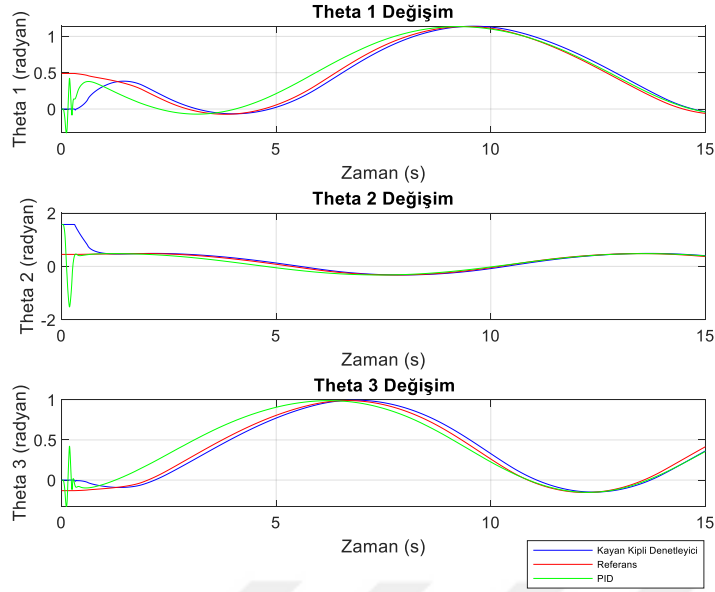
##### 4.1. Z Eksenin Sabit 2 Boyutlu Yörünge Kontrolü

Aşağıdaki çizelge 4.1 de Delta robotun takip etmesi istenen yörünge bileşenleri verilmiştir. Burada Z eksenin sabit bir değerde tutulduğu için iki boyutlu bir yörünge kontrol edilmiştir.

Çizelge 4.1. Z Eksenin Sabit İBYK Sisteminde Takip Edilmesi İstenen Yörünge

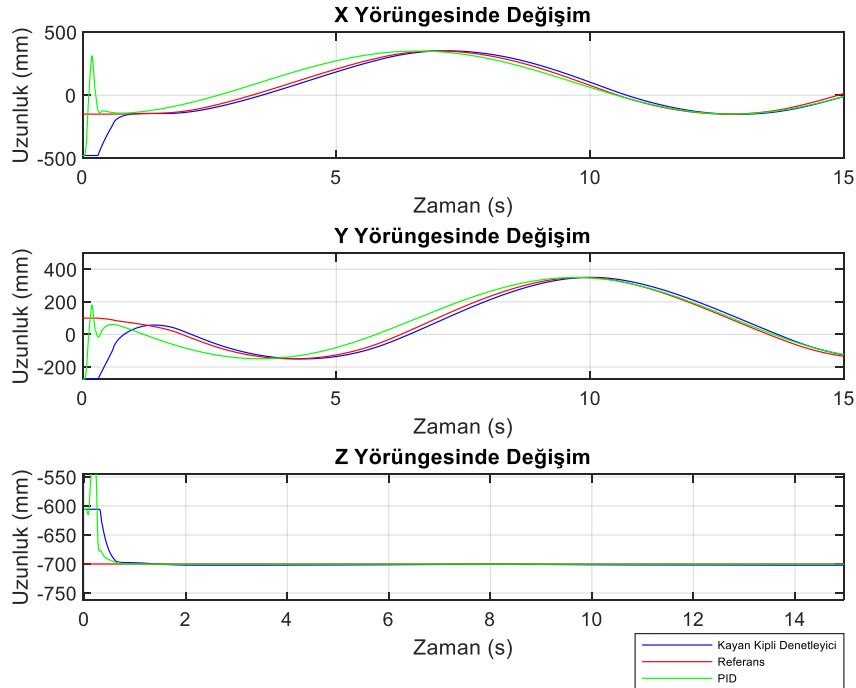
X	$100 - 250 \times \cos(t)$
Y	$100 - 250 \times \sin(t)$
Z	-700

SMC ve PID kullanılarak oluşturulan sistemlerin MATLAB/Simulink ortamında performans deneyleri tamamlanmıştır. Şekil 4.1' de  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  açılarının PID kullanılan sistem ve SMC kullanılan sistem tarafından hangi karakteristik şekilde takip edildiği referansa göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. SMC' nin 3 yörüngede de daha iyi takip ettiği ama PID denetleyicinin de yaklaşık 10. saniyeden sonra yörüngeye yaklaştığı görülmektedir. Şekil 4.1' de verilen  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  açılarının iki ayrı sistem tarafından takip edilmesinde SMC uygulanan sistemin hata payı PID uygulanan sisteme göre daha kabul edilebilir miktardadır.



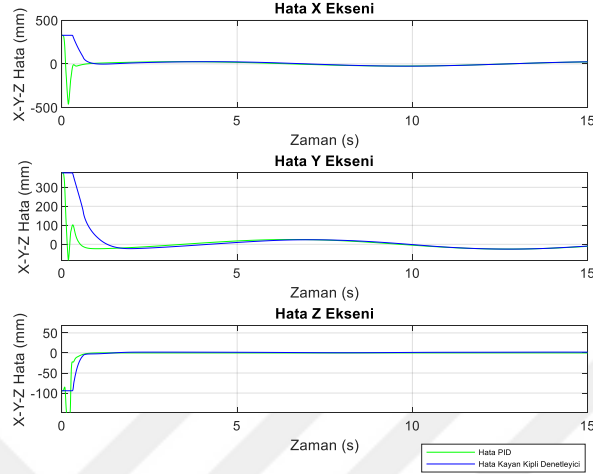
Şekil 4.1. İBYK PID ve SMC sistemler Theta Açısı Karşılaştırması

Şekil 4.2' de X-Y-Z yörüngelerinde robotun hareket kabiliyeti verilmiştir. SMC kullanılan sistemde robotun yörüngeleri PID ye göre daha yakın takip ettiği görülmektedir. Başlangıçta her iki sistemde istenen noktaya ulaşmaya çalışmışlar burada SMC' nin daha kısa sürede yörüngeye yaklaştığı görülmektedir.



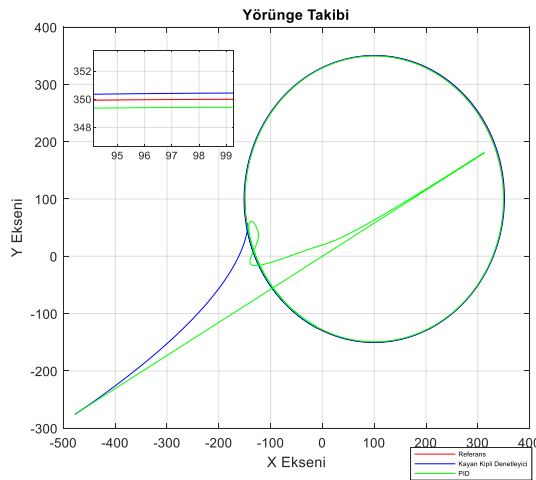
Şekil 4.2. İBYK PID ve SMC sistemler X-Y-Z Yörünge Hareketi

Şekil 4.3'te SMC ve PID kullanılan sistemlerin istenilen yörüngeyi takip ettikleri süre içinde X-Y-Z eksenlerinde ne kadar hata yaptıkları, yörünge takiplerindeki performansları verilmiştir. Görüldüğü üzere 3 yörüngede de 2. saniye civarında hata 0 civarında salınım yapmaktadır.



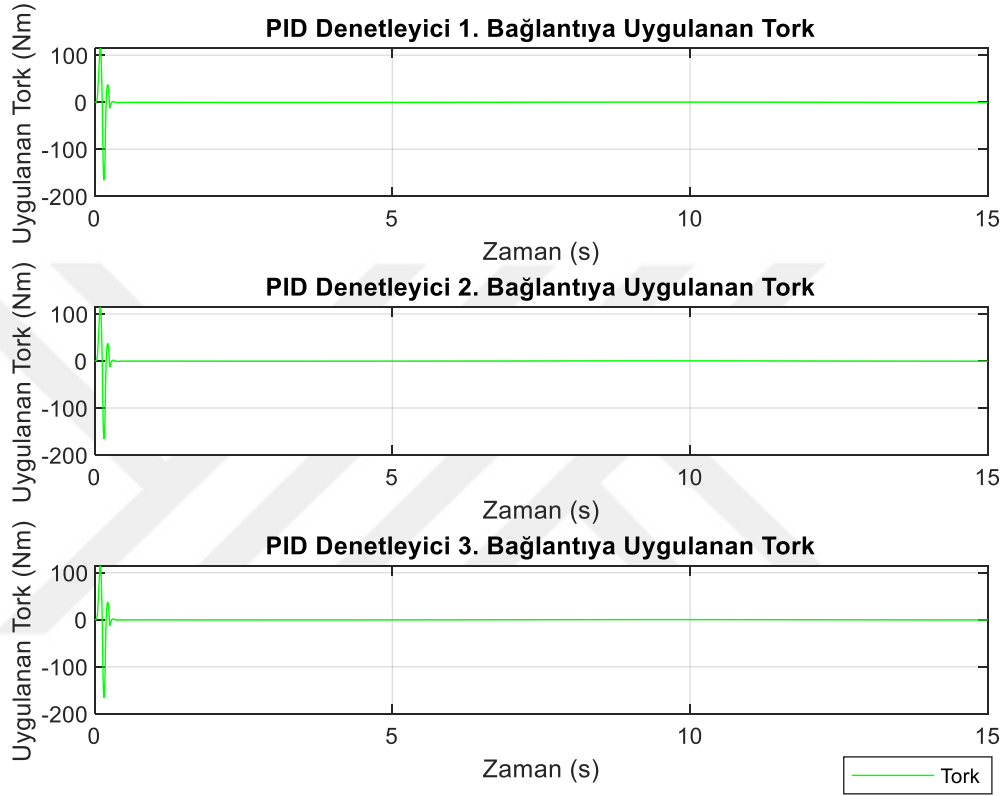
Şekil 4.3. İBYK PID ve SMC sistemler Hata Miktarları

Şekil 4.4'te SMC ve PID kullanılan sistemlerin istenilen yörüngeyi takip etme performansları ölçülmüştür. SMC kullanılan sistem PID kullanılan sistem göre istenilen yörüngeyi takip etme performansında özellikle hata grafiğinden anlaşılacağı üzere 0-2. saniye aralığında daha az hata yapmıştır. PID denetleyici başlangıçta çok fazla hata yapmış fakat daha sonra yörüngeye yakınsamıştır. SMC ise PID ye göre başlangıçta daha az hata yapmış ve daha sonra yörüngeyi yakın takip etmeye devam etmiştir.



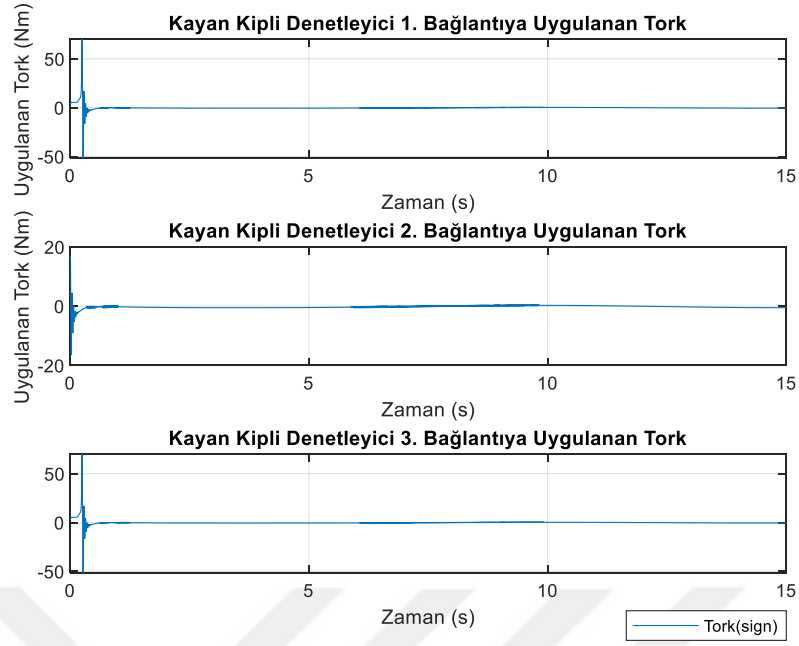
Şekil 4.4. İki Boyutlu Düzlemde Yörünge Takibi

Şekil 4.5'te PID denetleyici kullanılan sistemde Delta robotun 1,2 ve 3. bağlantılarda ürettiği tork miktarları verilmiştir. Başlangıçta her üç bağlantıda da yüksek torklar üretilmiş fakat daha sonra tork miktarları kabul edilebilir değerlere yakınsamıştır. Çok yüksek miktarlarda üretilen torklar uygulama noktasında zor olacağı için fazla istenmemektedir.

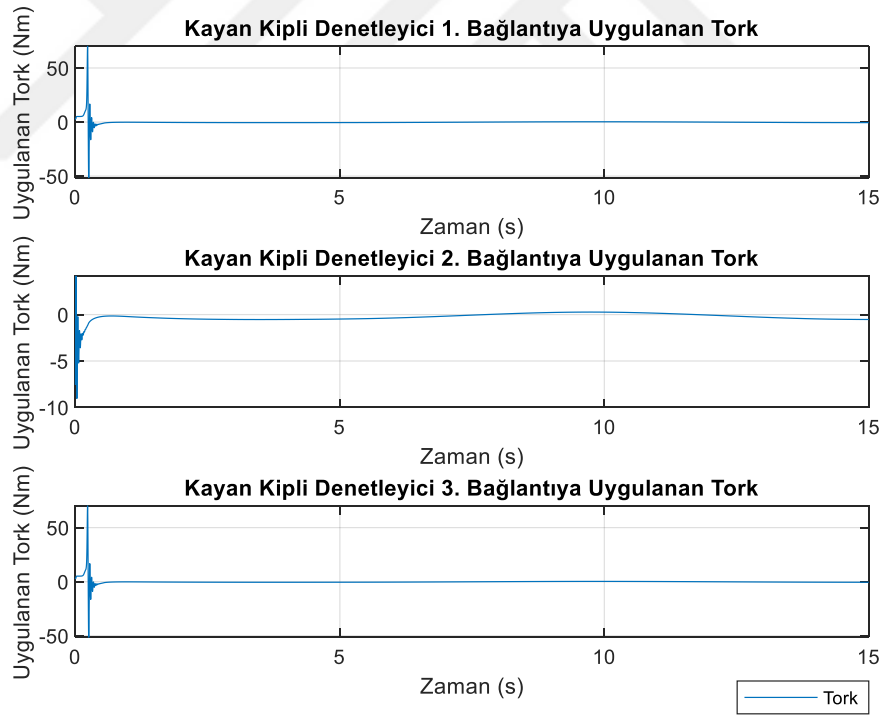


Şekil 4.5. İBYK PID Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar

Şekil 4.6'da SMC' de sign fonksiyonu kullanılarak oluşturulan sistem de Delta robotun 1,2 ve 3. bağlantılarda ürettiği tork miktarları verilmiştir. Her 3 linkte' de titremler görülmektedir.



Şekil 4.6. İBYK SMC Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar (Sign)



Şekil 4.7. İBYK SMC Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar

Şekil 4.7 de tanh fonksiyonun kullanıldığı SMC kullanılan sistemde üretilen tork miktarları üzerinde belli aralıklarda kayma yüzeyinin üzerindeki titremelerin özellikle 2. link üzerinde 0-2 saniye arasında en az seviyeye indiği görülmüştür.

Çizelge 4.2. Z Eksenli Sabit İBYK Sisteminde Kullanılan PID Katsayıları

P	50
I	500
D	2.9

Yukarıdaki çizelge 4.2 de bu yörünge için deneme yanılma yöntemiyle bulunan PID katsayıları verilmiştir.

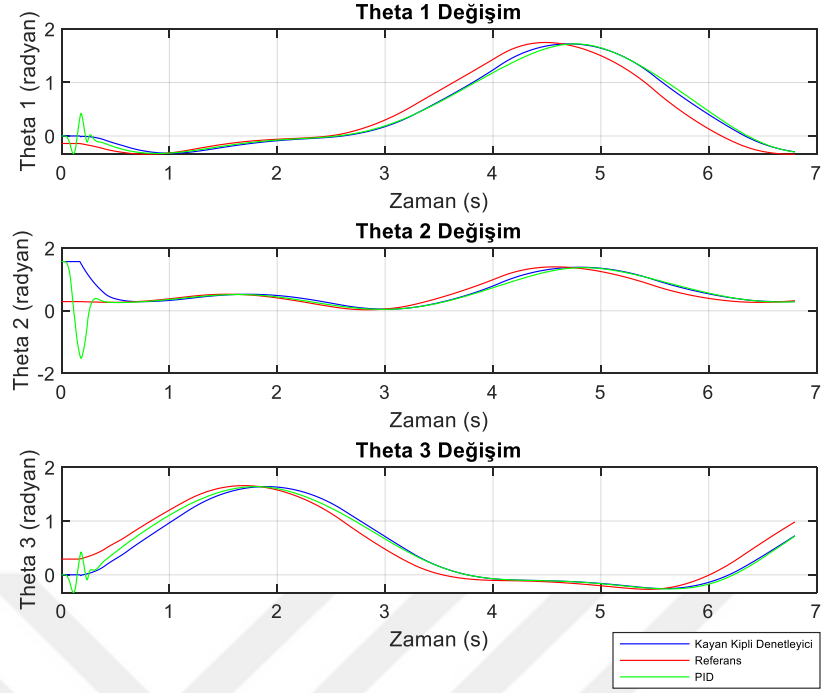
#### 4.2. Dairesel 3 Boyutlu Yörünge Kontrolü

Aşağıdaki çizelge 4.3 de Delta robotun takip etmesi istenen yörünge bileşenleri verilmiştir. Burada Z eksenli değişken değerler aldığı için üç boyutlu bir yörünge kontrol edilmiştir.

Çizelge 4.3 ÜBYK Sisteminde Takip Edilmesi İstenen Yörünge

X	$400 \times \sin(t)$
Y	$400 \times \sin(t + 60)$
Z	$50 \times \sin(t + 120) - 700$

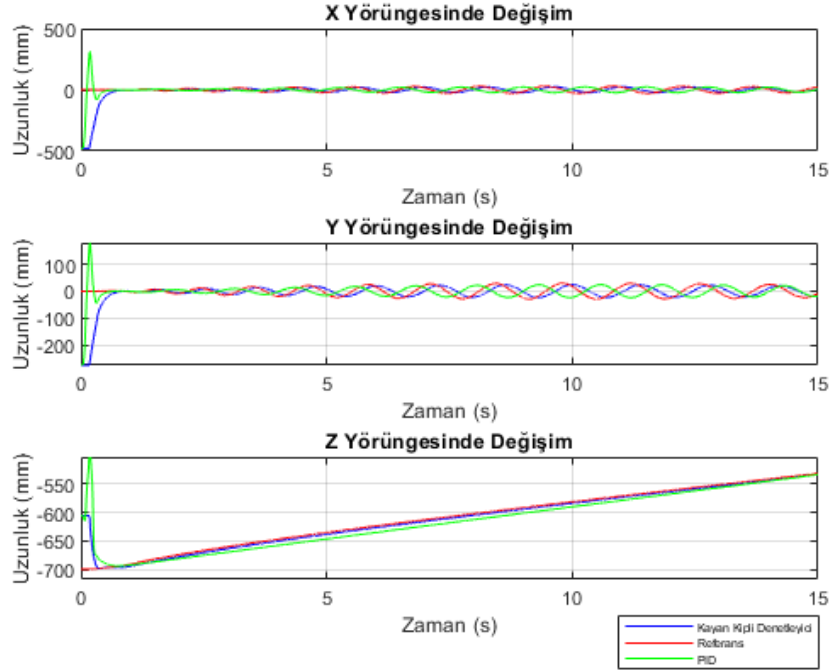
Dairesel 3 boyutlu yörünge kontrolü için SMC ve PID denetleyici kullanılarak oluşturulan sistemlerin MATLAB/Simulink ortamında performans deneyleri tamamlanmıştır. Şekil 4.8' de  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  açılarının PID denetleyici kullanılan sistem ve SMC kullanılan sistem tarafından hangi karakteristik şekilde takip edildiği referansa göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.8. Dairesel ÜBYK PID ve SMC sistemler Theta Açısı Karşılaştırması

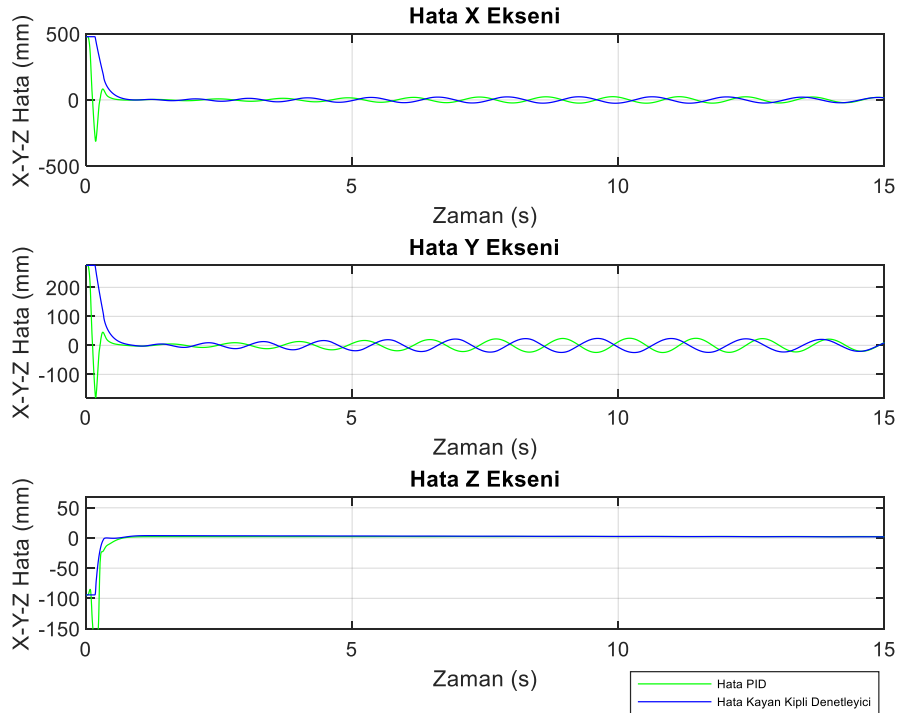
Yukarıda Şekil 4.8' de verilen  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  açılarının iki ayrı sistem tarafından takip edilmesinde SMC uygulanan sistemin hata payı PID denetleyici uygulanan sisteme göre daha fazla miktardadır. Fakat bu yörüngede SMC' de hiçbir değişiklik yapılmamasına karşın, PID denetleyici katsayıları tekrar belirlenmek zorunda kalmıştır. Çünkü bir önceki yörünge de tespit edilen katsayılar PID üzerinde bırakılsa idi Delta robot istenen yörüngeyi takip edemeyecekti. Buda bize SMC' nin PID' ye göre daha güçlü çalıştığını, yörünge veya sistemin kendisinde değişiklikler olsa bile PID gibi tekrar denetleyici içinde bir değişiklik yapmak zorunda olmadığımızı göstermiştir.

Şekil 4.9' da X-Y-Z yörüngelerinde robotun hareket kabiliyeti verilmiştir. SMC kullanılan sistemde robotun yörüngeleri PID ye göre daha uzak takip ettiği görülmektedir. Fakat unutulmamalıdır ki PID katsayıları sistem için tekrar deneme yanılma yöntemi ile tespit edilmiştir. Buna karşın SMC' de herhangi bir değişiklik yapılmamasına rağmen yörüngeyi PID ye yakın performansta takip etmiştir. Buda denetleyicimizin gürbüz çalıştığını bir kez daha ispatlamıştır.



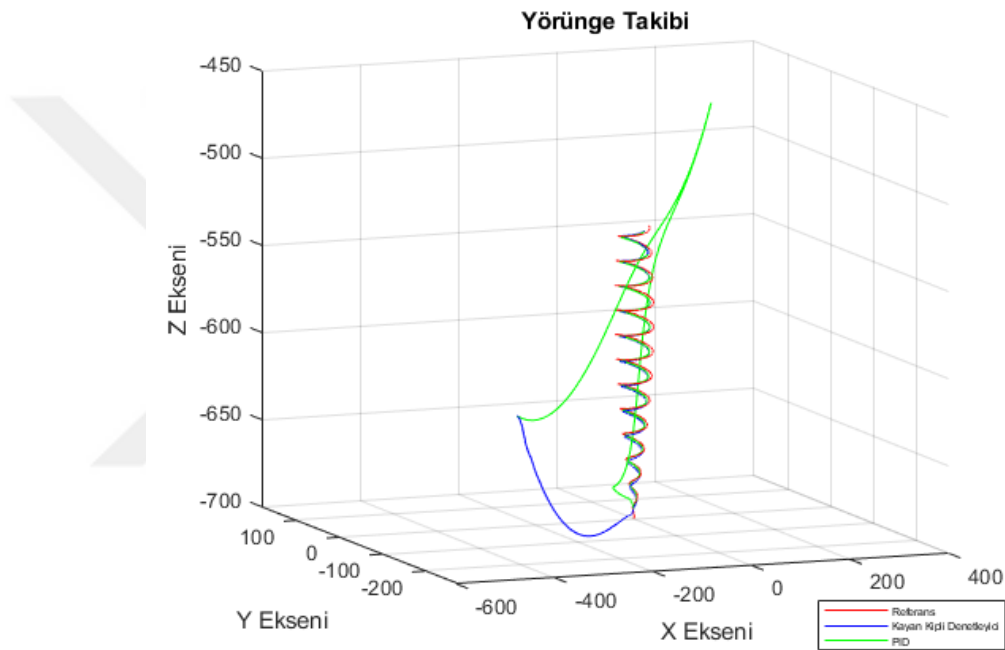
Şekil 4.9. Dairesel ÜBYK PID ve SMC sistemler X-Y-Z Yörünge Hareketi

Şekil 4.10'da SMC ve PID denetleyici kullanılan sistemlerin istenilen yörüngeyi takip ettikleri süre içinde X-Y-Z eksenlerinde ne kadar hata yaptıkları, yörünge takiplerindeki performansları verilmiştir.



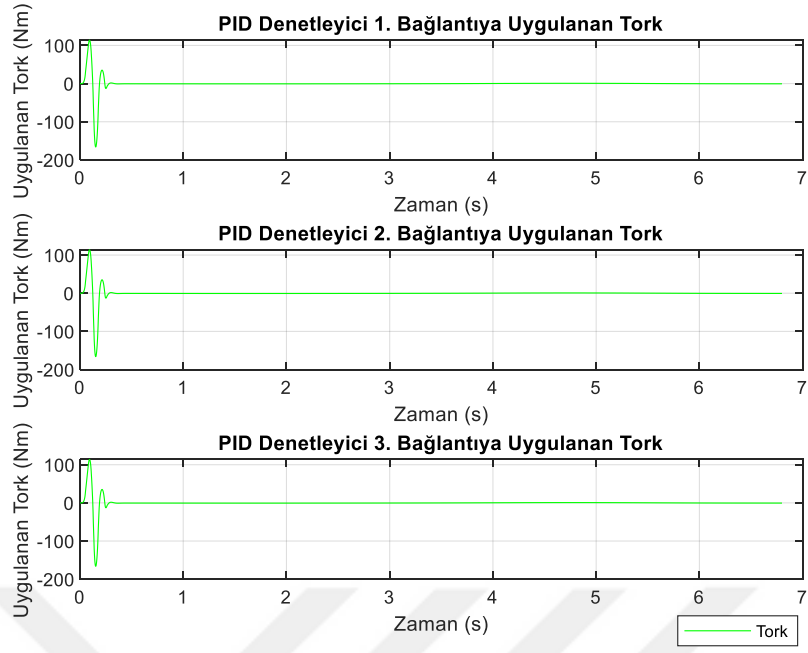
Şekil 4.10. Dairesel ÜBYK PID ve SMC sistemler Hata Miktarları

Şekil 4.11'de SMC ve PID sistemlerin istenilen yörüngeyi takip etme performansları ölçülmüştür. SMC' nin PID' ye göre istenilen yörüngeyi takip etme performansı daha kabul edilebilir bir orandadır. Çünkü PID denetleyicinin katsayıları bu yörünge için tekrar belirlenmesine rağmen başlangıçta yaptığı hata miktarı SMC' ye göre daha fazladır. Fakat yörüngeye ulaştıktan sonra iki sistemde benzer şekilde takip etmiştir. Burada önemli olan nokta SMC kullanılan sistemde herhangi bir değişiklik olmamasına rağmen PID benzer karakteristikte bir yörünge takibi yapmış olmasıdır.



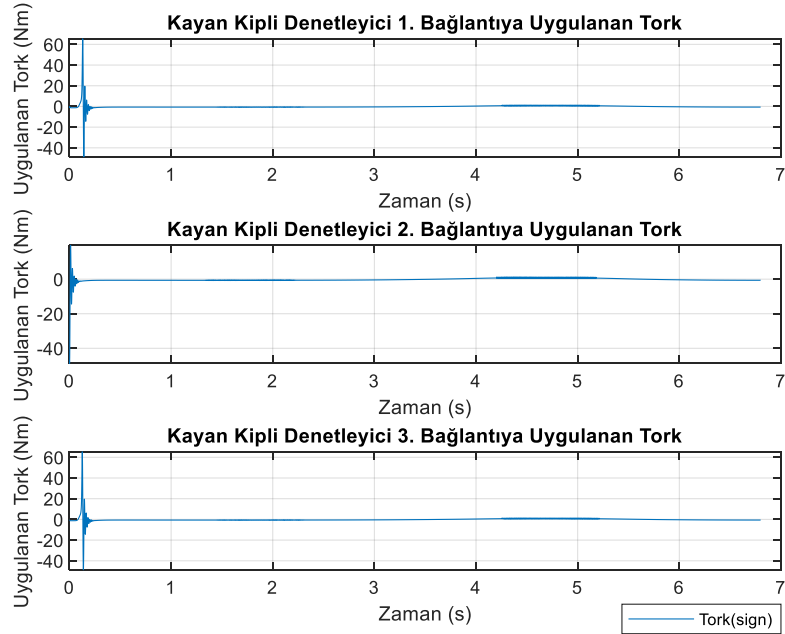
Şekil 4.11. Dairesel Üç Boyutlu Düzlemde Yörünge Takibi

Şekil 4.12'de PID denetleyici kullanılan sistem de Delta robotun 1,2 ve 3. bağlantılarda ürettiği tork miktarları verilmiştir. Başlangıçta her üç bağlantıda da yüksek torklar üretilmiş fakat daha sonra tork miktarları sıfır civarında salınım yapmıştır.

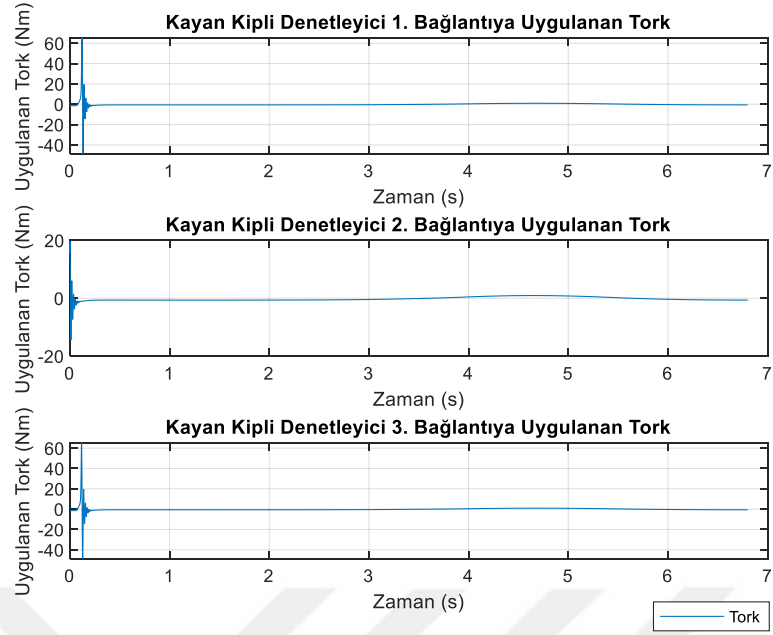


Şekil 4.12. Dairesel ÜBYK PID Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar

Şekil 4.13' te sign fonksiyonu kullanılarak elde edilen SMC kullanılarak oluşturulan sistem de Delta robotun 1,2 ve 3. bağlantılarda ürettiği tork miktarları verilmiştir.



Şekil 4.13. Dairesel ÜBYK SMC Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar (sign)



Şekil 4.14. Dairesel ÜBYK SMC Kullanılan Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar

Şekil 4.14 de tanh fonksiyon kullanılarak elde edilen SMC kullanılarak oluşturulan sistemde üretilen tork miktarları üzerinde belli aralıklarda kayma yüzeyinin üzerinde titremelerin azaldığı görülmektedir. Özellikle 2. linkte 4-5 saniye aralığında titremelerin azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.4 ÜBYK Sisteminde Kullanılan PID Katsayıları

P	60
I	300
D	1.5

Yukarıdaki çizelge 4.4 de bu yörünge için deneme yanılma yöntemiyle bulunan PID katsayıları verilmiştir.

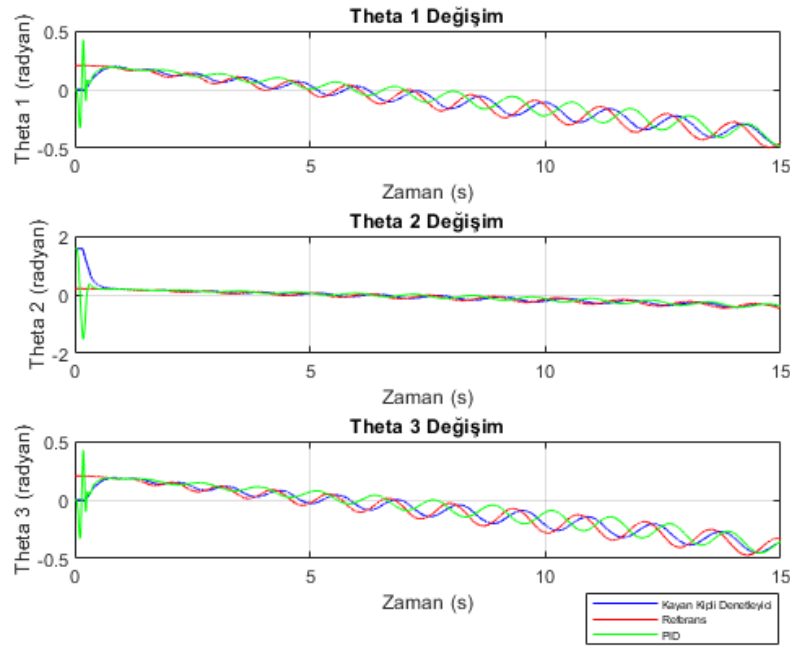
### 4.3 Yay Şeklinde Üç Boyutlu Yörünge Kontrolü

Aşağıdaki çizelge 4.5 de Delta robotun takip etmesi istenen yay şeklindeki yörünge bileşenleri verilmiştir. Burada Z eksenini değişken değerler aldığı için üç boyutlu bir yörünge kontrol edilmiştir.

Çizelge 4.5 Yay Şeklinde Yörünge Sisteminde Takip Edilmesi İstenen Yörünge

X	$30 \times \sin(0.3t) \times \cos(10t)$
Y	$30 \times \sin(0.3t) \times \sin(10t)$
Z	$-700 + 22.5t$

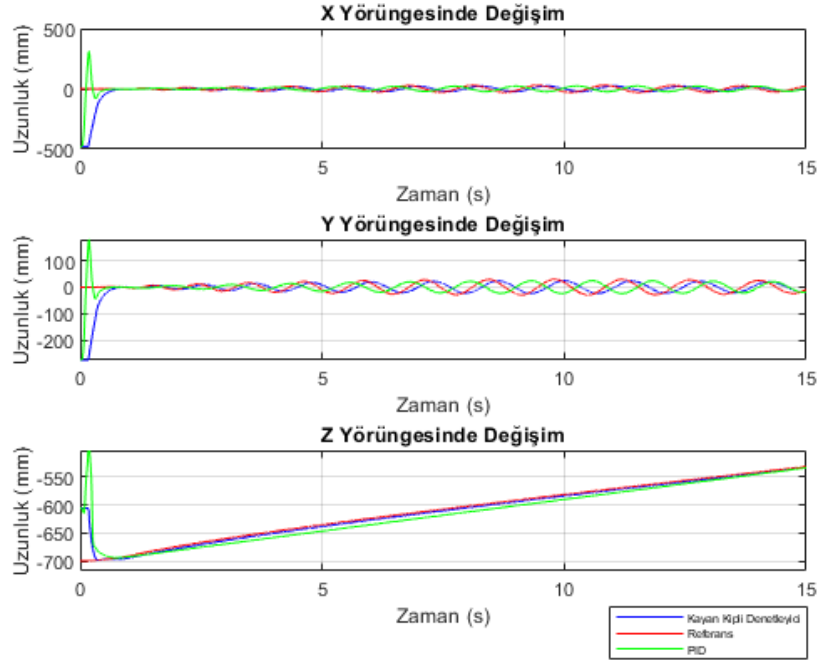
Yay şeklinde 3 boyutlu yörünge kontrolü için SMC ve PID denetleyici kullanılarak oluşturulan sistemlerin MATLAB/Simulink ortamında performans deneyleri tamamlanmıştır. Şekil 4.14' te  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  açılarının PID denetleyici kullanılan sistem ve SMC kullanılan sistem tarafından hangi karakteristik şekilde takip edildiği referansa göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Burada theta değişiminin diğer 2 yörüngeye göre daha karakteristik şekilde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15. Yay Yörünge Kontrolünde PID ve SMC sistemler Theta Açısı Karşılaştırması

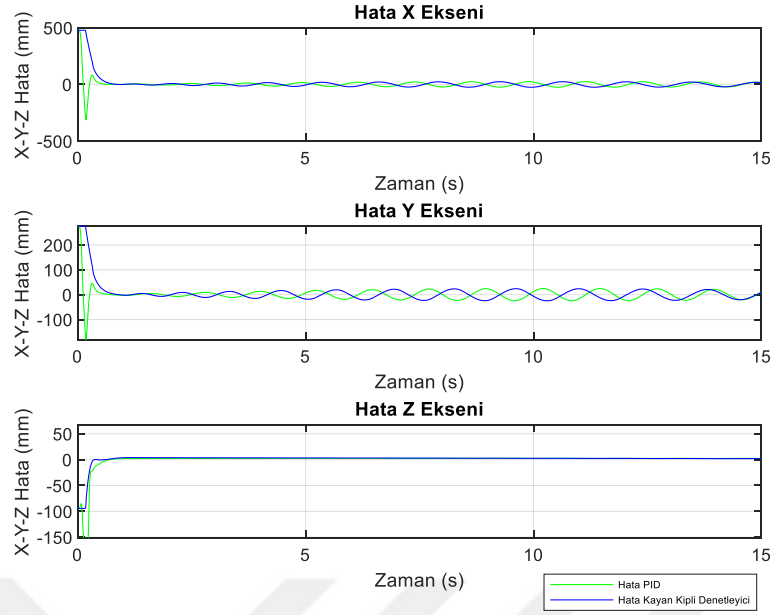
Yukarıda Şekil 4.15' te verilen  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  açılarının iki ayrı sistem tarafından takip edilmesinde SMC uygulanan sistemin hata payı PID denetleyici uygulanan sisteme göre daha kabul edilebilir miktardadır. Özellikle Theta1 ve Theta3 açılarında PID kullanılan sistemin referansa göre daha gecikmeli geldiği görülmektedir.

Şekil 4.16' da X-Y-Z yörüngelerinde robotun hareket kabiliyeti verilmiştir. SMC kullanılan sistemde robotun yörüngeleri PID ye göre daha yakın takip ettiği görülmektedir. Başlangıçta her iki sistemde istenen noktaya gitmeye çalışmışlar burada SMC' nin daha kısa sürede yörüngeye yaklaştığı görülmektedir. Bu uygulamada PID katsayıları değiştirilerek optimum takip elde edilmeye çalışılmıştır.



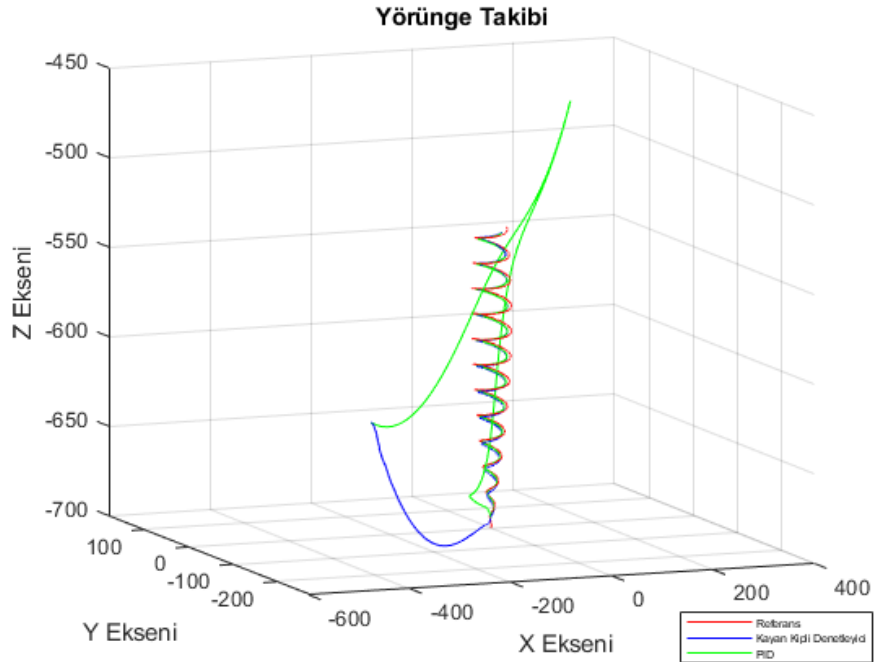
Şekil 4.16. Yay Yörünge Kontrolünde PID ve SMC sistemler X-Y-Z Yörünge Hareketi

Şekil 4.17'de SMC ve PID denetleyici kullanılan sistemlerin istenilen yörüngeyi takip ettikleri süre içinde X-Y-Z eksenlerinde ne kadar hata yaptıkları, yörünge takiplerindeki performansları verilmiştir. Burada da görüleceği üzere PID sinyalleri üzerindeki faz farkı özellikle X ve Y eksenlerinde belirgin şekildedir.



Şekil 4.17. Yay Yörünge Kontrolünde PID ve SMC sistemler Hata Miktarları

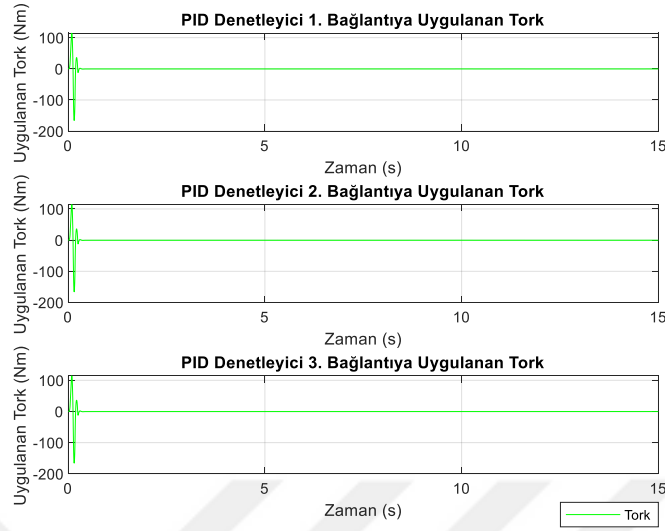
Şekil 4.18’de SMC ve PID denetleyici sistemlerin istenilen yörüngeyi takip etme performansları ölçülmüştür. SMC’ nin PID denetleyiciye göre istenilen yörüngeyi takip etme performansı daha kabul edilebilir bir orandadır.



Şekil 4.18. Yay Şeklinde Üç Boyutlu Yörünge Takibi

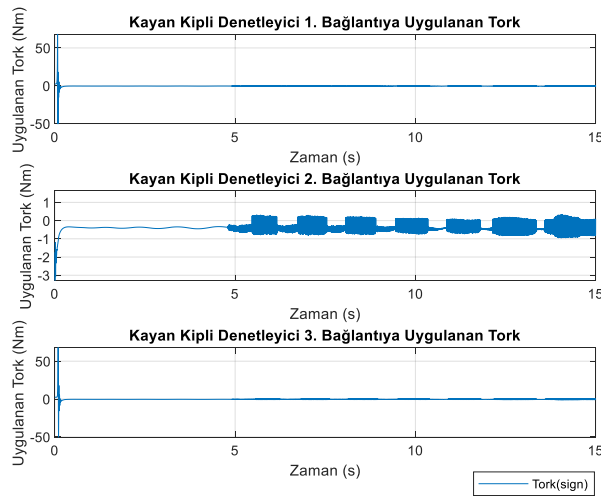
Şekil 4.19’ da PID denetleyici kullanılan sistem de Delta robotun 1,2 ve 3. bağlantılarda ürettiği tork miktarları verilmiştir. Başlangıçta her üç bağlantıda da

yüksek torklar üretilmiş fakat daha sonra tork miktarları kabul edilebilir değerlere yakınsamıştır.

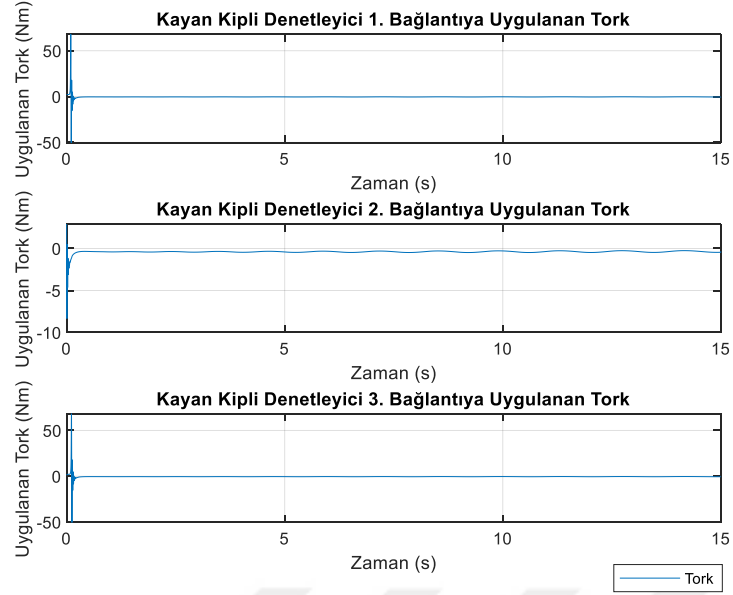


Şekil 4.19. Yay Yörünge Kontrolünde PID Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar

Şekil 4.20' de sign fonksiyonu kullanılarak elde edilen SMC kullanılarak oluşturulan sistem de Delta robotun 1,2 ve 3. bağlantılarda ürettiği tork miktarları verilmiştir. Özellikle 2. Linkte 5-15. saniyeler arasında fazla miktarda titreme olduğu görülmektedir. Bu titremeleri engellemek için SMC içerisinde sign fonksiyonu yerine tanh fonksiyon kullanılmış ve şekil 4.21 'de özellikle 2. linkte 5-15. saniyeler arasında azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.20. Yay Yörünge Kontrolünde SMC Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar(sign)



Şekil 4.21. Yay Yörünge Kontrolünde SMC Sistemde Bağlantılara Uygulanan Torklar

Çizelge 4.6. Yay Şeklinde Yörünge Takip Sisteminde Kullanılan PID Katsayıları

P	70
I	280
D	1.3

Yukarıdaki çizelge 4.6 de bu yörünge için deneme yanılma yöntemiyle bulunan PID katsayıları verilmiştir.

Denetleyici sistemlerin analizinde sadece grafik çözümlerinin yeterli olamayacağı bir gerçektir. Bu yüzden Çizelge 4.7 de Karekök Ortalama Hata (RMSE) ve Ortalama Mutlak Sapma (MAD) değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Denklem 4.1 ve 4.2 de RMSE ve MAD hata değişimlerinin formülleri verilmiştir. Burada  $A_t$  gerçek değer  $Y_t$  ise beklenen değerdir. Bu tez çalışması kapsamında  $A_t$  gerçek Theta açısı ve  $Y_t$  istenen Theta açısı olarak kullanıldı.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (A_t - Y_t)^2} \quad (4.1)$$

$$MAD = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |A_t - Y_t|} \quad (4.2)$$

Burada PID denetleyicinin değerlerinin RMSE ve MAD değerlerine göre SMC' ye göre daha iyi olduğu görülür. Fakat PID katsayıları 3 farklı yörünge içinde tekrar tespit edilmiştir. Gerçek hayat uygulamalarında her farklı yörüngede PID katsayısı tespit etme olanağı bulunmamaktadır. SMC denetleyici yapısında takip edilmesi istenen yörüngenin değiştirilmesinde kullanılan katsayıların belirlenmesinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. SMC' de değişiklik yapılmamasına karşın özellikle başlangıç hataları PID sistemden daha azdır. Ayrıca yörünge takip performansı PID ye benzerdir. Z eksenin değiştirilmesi 3 boyutlu dairesel yörünge kontrolünde, 2 boyutlu yörünge kontrolüne göre RMSE ve MAD değerlerinde artışa neden olmasına rağmen, 3 boyutlu yay kontrolünde, 3 boyutlu dairesel yörünge kontrolüne göre değerlerde düşüşe neden olmuştur.

Çizelge 4.7. Karekök Ortalama Hata (RMSE) ve Ortalama Mutlak Sapma (MAD)

		RMSE	MAD	
2 Boyutlu Yörünge kontrolü	PID Denetleyici	1. Link	0.0062	0.0495
		2. Link	0.0078	0.0435
		3. Link	0.0035	0.0403
2 Boyutlu Yörünge kontrolü	Kayan Kipli Denetleyici	1. Link	0.0134	0.0607
		2. Link	0.0460	0.0623
		3. Link	0.0048	0.0403
3 Boyutlu Daire Yörünge kontrolü	PID Denetleyici	1. Link	0.0129	0.1331
		2. Link	0.0096	0.1332
		3. Link	0.0322	0.1421
3 Boyutlu Daire Yörünge kontrolü	Kayan Kipli Denetleyici	1. Link	0.0237	0.1277
		2. Link	0.0706	0.1471
		3. Link	0.0359	0.1430
3 Boyutlu Yay Yörünge kontrolü	PID Denetleyici	1. Link	0.0034	0.0391
		2. Link	0.0057	0.0523
		3. Link	0.0017	0.0389
3 Boyutlu Yay Yörünge kontrolü	Kayan Kipli Denetleyici	1. Link	0.0053	0.0405
		2. Link	0.0373	0.0644
		3. Link	0.0035	0.0401

## 5. TARTIŞMA

PID denetleyici ve SMC kullanılan iki ayrı Delta robot için 3 farklı yörünge takip sistemi oluşturulmuştur. Delta robot dinamik kısmı Solidworks'te oluşturulmuş ve MATLAB/Simulink ortamına aktarılmıştır. PID katsayıları deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. PID kullanılan sistem başlangıçta 3 farklı yörüngeyi tam olarak takip edemese de daha sonra yörüngelere yakın bir takip sağlamıştır. Bu 3 farklı yörüngede SMC' de herhangi bir değişiklik yapılmamış fakat PID kullanılan sistemlerde PID katsayıları deneme yanılma metodu ile optimum yörünge takibi için ayarlanmaya çalışılmıştır. PID katsayılarının her yörüngede değiştirilmesi bu sistemin gerçek hayatta uygulanmasının zor olduğunu göstermektedir. Çünkü gerçek hayat sistemlerinde robotlar sadece kurulum aşamasında programlanmalı aksi takdirde hem zaman hem de maddi kayıplar artmaktadır. Dolayısı ile PID kullanılan sistemler sabit yörüngelerde verimli olabilir. Fakat dinamik yörünge değişimlerinde çok fazla performans gösteremeyeceklerdir. Buna karşın kullanılan 3 farklı yörüngede tasarlanan SMC bütün sistemlerde hiçbir değişiklik yapmadan kullanılmıştır. Bu da SMC'nin gürbüz bir denetleyici olduğunu göstermekte ve gerçek hayat uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir. PID denetleyiciler esasen robotik sistemlerin ilk aşamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Fakat teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak çok farklı denetleyici yapıları keşfedilmiştir. SMC' de bu yeni tip denetleme sistemlerinin en bilinen ve uygulanan çeşitlerindedir. SMC kullanılan sistem başlangıç hatası PID ye göre daha düşüktür ve yörüngeyi sabit olarak takip etmiştir. Her 3 yörünge sisteminde de çalışmanın gelecek sürecinde SMC' ye adaptif terimler eklenerek daha iyi bir performans elde edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca farklı türdeki SMC denetleyiciler (Fast SMC, Terminal SMC) üzerinde çalışmalar yapılacaktır. PID kullanılan sistemlerde ise farklı algoritmalar kullanılarak PID katsayılarının tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. Gelecek çalışmalarda ayrıca kullanılan SMC' nin gerçek robot üzerinde farklı yörüngelerde test edilmesi amaçlanmaktadır. Yapılan bu çalışma ile literatüre simscape model kullanılarak denetleyici tasarım çalışması kazandırılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Azad F.A., Rahimi S., Yazdi M.R.H., Masouleh M., T., Design and Evaluation of Adaptive and Sliding Mode Control for a 3-DOF Delta Parallel Robot, 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)
- Azmoun M., Rouhollahi A., Masouleh M., T., Kalhor A., Kinematics and Control of a 4-DOF Delta Parallel Manipulator, Proceedings of the 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM 2018) October 23-25, 2018, Tehran, Iran
- Boudjedir C. E., Boukhetala D., Adaptive robust iterative learning control with application to a Delta robot, Proc IMechE Part I: J Systems and Control Engineering
- Delta Robot, [https://en.wikipedia.org/wiki/Delta\\_robot](https://en.wikipedia.org/wiki/Delta_robot), 01.09.2020
- Delta Robot, <https://acrome.net/product/delta-robot>, 01.09.2020
- Doan Q., V., Vo A., T., Le T.D., Kang H., Nguyen N., H., A., A Novel Fast Terminal Sliding Mode Tracking Control Methodology for Robot Manipulators, Received: 23 March 2020; Accepted: 21 April 2020; Published: 26 April 2020, applied sciences
- Kara T., Mary A., Robust trajectory tracking control of robotic manipulators based on model-free PID-SMC approach, Article in Journal of Engineering Research · September 2018
- Kuo Y.L., Mathematical modeling and analysis of the Delta robot with flexible links, Computers and Mathematics with Applications 71 (2016) 1973–1989
- Rahmani R., Mobayen S., Barhaghtalab M., H., Position Tracking of Parallel Robot by an Adaptive Second Order Sliding Mode Control based on Projection Neural Network, 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)
- Robotik Nedir? <https://www.karel.com.tr/blog/robotik-nedir-gelecekte-robotlar-nasil-olacak>, 01.09.2020
- SUN H., ZHANG Y., XIE B., ZI B., Dynamic Modeling and Error Analysis of a Cable-Linkage Serial-Parallel Palletizing Robot, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.3047650
- Su T., Liang X., He G., Zhao Q., Zhao L., Robust Trajectory Tracking of Delta Parallel Robot Using Sliding Mode Control, 2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI) December 6-9 2019, Xiamen, China
- Vo A.T., Kang H.J., A Novel Fault-Tolerant Control Method for Robot Manipulators Based on Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Control and Disturbance Observer, DOI 10.1109/ACCESS.2020.3001391, IEEE Access

Zhang B., Yang X., Zhao D., Spurgeon S., K., Yang X., Sliding Mode Control for Nonlinear Manipulator Systems, IFAC PapersOnLine 50-1 (2017) 5127–5132

