GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Gazi

1926

İKİ EKSENLİ HAREKET PLATFORMU İÇİN KONTROLCÜ TASARIMI VE UYGULAMASI

Özgür TUNCEL

YÜKSEK LİSANS
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2018

Özgür TUNCEL tarafından hazırlanan "İKİ EKSENLİ HAREKET PLATFORMU İÇİN KONTROLCÜ TASARIMI VE UYGULAMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. İbrahim USLAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Başkan: Prof. Dr. Mehmet ÇELİK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya Ticaret Odası Karatay Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……...

Üye: Prof. Dr. Metin Uymaz SALAMCI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……...

Üye: Prof. Dr. Mehmet Arif ADLI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……...

Üye: Prof. Dr. Ömer KELEŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ……...

Tez Savunma Tarihi: 07/06/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

…….…….

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Özgür TUNCEL
07/06/2018

İKİ EKSENLİ HAREKET PLATFORMU İÇİN
KONTROLCÜ TASARIMI VE UYGULAMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Özgür TUNCEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2018

ÖZET

Günümüzde, askeri ve sivil hayatta, güvenlik amacıyla kullanılan sistemlerin kullanımı yaygınlaşmakta ve bu cihazları verimli olarak kullanmak gün geçtikçe daha büyük önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, bu cihazları yönlendiren iki eksenli hareket platformlarının da ihtiyaçlara karşılık verebilmesi gerekmekte olup, taşıdıkları sistemleri doğru noktaya, hassas bir şekilde götürebilmeleri ve bakış hattını stabil tutabilmeleri gerekmektedir. Bunu yaparken hem kendi iç dinamiklerinden kaynaklı düzensizlikleri, hem de bağlı bulundukları ortamlarda üzerlerine etkiyen bozucu etkileri, taşıdıkları sistemlere ulaşmadan sönümlemeleri gerekmektedir. Bu çalışmada, Aselsan tarafından üretilen ve prototip aşamasında olan iki eksenli hareketli platform üzerine bağlanacak olan Aselsan ürünü bir elektro-optik sistemin bakış hattının kararlılığı sağlanmıştır. Bu amaca ulaşmak için ilk olarak, kontrolcü giriş-çıkışlarına uygun olarak bir matematik model ortaya konulmuştur. Bu model çıkarılırken sistemin içerdiği sürtünme düzensizliği, eyleyici dinamiği ve geri-besleme elemanlarının yapısı da göz önüne alınmıştır. Matematik modeli oluşturulan sisteme uygun olarak Matlab-Simulink ortamında blok diyagram oluşturulmuştur. Burada sistemin durağan durum hatasını sıfıra indirmek amacıyla, hız döngüsü için çift PI kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Son bölümde ise gerçek sistem üzerinde sistem tanımlaması yapılmış, sistemin bode diyagramı şekillendirilerek ardışık kontrolcü elde edilmiştir. Ayrıca hız döngülerinde kullanılan çift PI kontrolcülerinin performansını karşılaştırmak amacıyla aynı performans parametrelerine uygun olarak PID kontrolcü tasarlanmıştır. Elde edilen kontrolcüler birbirleri ile kıyaslanmış ve çift PI kontrolcünü üstün olduğu sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 91418
Anahtar Kelimeler : İki eksenli hareket platformu, kontrol sistemi, Simulink, çift PI, PID, bode şekillendirme
Sayfa Adedi : 111
Danışman : Prof. Dr. İbrahim USLAN

CONTROLLER DESIGN AND APPLICATION FOR
TWO AXIS MOTION PLATFORM
(M. Sc. Thesis)

Özgür TUNCEL

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2018

ABSTRACT

In recent days, in military and civilian life, the use of security systems is becoming widespread and the use of these devices is getting more and more important. However, the two-axis motion platforms that direct these devices must also be able to respond to the needs, and they need to be able to accurately position the systems they are carrying to, and keep them stable. While ensuring this task, both irregularities arising from their own internal dynamics, as well as disruptive effects that affect them in the environments they are bound to, need to be damped before reaching the electro-optical system they are carrying. In this thesis, the electro-optical system that produced by ASELSAN connected to a two axis motion platform has stabilized the line of view. In order to achieve this goal, a mathematical model has been developed in accordance with the controller inputs and outputs. When this model is developed, the system's frictional irregularity, actuator dynamics and the structure of the feedback elements are taken into account. In accordance with the mathematical modeling of the system, a block diagram was created in Matlab-Simulink program. Here, a double PI controller for the speed loop is designed to reduce the system's steady-state error to zero. In the last part, the system description is made on the real system, the bode diagram of the system is shaped and the sequential controller was obtained. And also, in order to compare the performance of the double PI controllers in the rate loops, the PID controller was designed according to the same performance requirements. The resulting controllers were compared with each other and conclusion was that the double PI control is better than the PID controller.

Science Code	:	91418
Key Words	:	Motion platform, two axis motion platform, control systems, Simulink, double PI, PID, bode shaping
Page Number	:	111
Supervisor	:	Prof. Dr. İbrahim USLAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca emeğini ve tecrübelerini esirgemeyen, yapıcı eleştirileri ve sabrıyla tez çalışmamı destekleyen, akademik hayatta bana yol gösteren danışmanım Prof. Dr. İbrahim USLAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Tez savunma jürisi üyeleri Prof. Dr. Metin Uymaz SALAMCI, Prof. Dr. Mehmet Arif ADLI, Prof. Dr. Ömer KELEŞ ve Prof. Dr. Mehmet ÇELİK'e değerli fikirleri ve yorumları ile çalışmama katkı koydukları için teşekkür ederim. Yüksek lisans süreci boyunca sabrı, ilgisi ve sevgisiyle her zaman yanımda olan ve beni destekleyen sevgili eşim Sena GÜLBAHAR TUNCEL'e yardımları ve desteği için teşekkür ederim. Hayatım boyunca beni seven, koruyan ve başaracağıma inanan annem Sıdıka TUNCEL, babam İbrahim TUNCEL ve kardeşim Ezgi TUNCEL'e ilgi ve sevgileri için teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Akın GÜNÖNÜ, Erhan POYRAZOĞLU, Gökhan ÖZDOĞAN, Semih GÖREN ve Ömer Kerem KILIÇ'a destekleri için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

2. İKİ EKSENLİ GİMBAL SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELİNİN ÇIKARILMASI 5

2.1. Referans Koordinatlar ve Transformasyon Matrisleri 6

2.2. İki Eksenli Hareket Platformu Kinematik Denklemleri 10

2.2.1. Açısal hız 10

2.2.2. Açısal ivme 11

2.3. Sürtünme 13

2.3.1. Sürtünme davranışları 14

2.3.2. Sürtünme modelleri 19

2.3.3. Sisteme uygun sürtünme modelinin seçimi 26

2.4. DC Motor Modeli 28

2.5. Ataletsel Ölçüm Birimi 30

2.6. Enkoder 31

Sayfa

2.7. İki Eksenli Hareket Platformu Dinamik Denklemleri 32

2.7.1. İç gimbal 33

2.7.2. Dış gimbal 36

3. SİSMÜLASYON ORTAMINDA KONTROLCÜ TASARIMI 41

3.1. Sistemin Blok Diyagramının Çıkarılması 41

3.2. Ardışık Kontrolcü Tasarımı 43

3.2.1. İç gimbal ardışık kontrolcüleri 46

3.2.2. Dış gimbal ardışık kontrolcüleri 50

3.3. Bölüm Değerlendirmesi 55

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 57

4.1. Test Platformu 58

4.1.1. İki eksenli hareket platformu 58

4.1.2. IO503 birimi 58

4.1.3. XPC Target birimi 59

4.2. İki Eksenli Hareket Platformunun Modal Analizi 59

4.3. İki Eksenli Hareket Platformunun Sistem Frekans Tepki Fonksiyonunun Çıkarılması 61

4.4. İki Eksenli Hareket Platformu İçin Kontrolcü Seçimi 65

4.4.1. Ardışık kontrolcü tasarımı 67

4.4.2. PID kontrolcü tasarımı 82

4.4.3. Çift PI ve PID kontrolcülerinin kıyaslanması 86

5. SONUÇ 99

KAYNAKLAR 103

EKLER 107

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ 115

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Farklı sürtünme modelleri için sürtünme davranışlarının karşılaştırılması 27

Çizelge 2.2. LuGre sürtünme parametreleri 28

Çizelge 2.3. İç ve dış eksenlerin motor modellerinin paremetreleri 30

Çizelge 2.4. Seçilen ataletsel ölçüm birimi parametreleri 31

Çizelge 2.5. Seçilen enkoder parametreleri 32

Çizelge 2.6. 3D model üzerinden alınan dış ve iç gimbal parametreleri 33

Çizelge 3.1. Seçilen ön filtre değerleri 45

Çizelge 3.2. Simülasyon ortamında, iç gimbal hız döngüsünün farklı K_p değerlerine göre kontrolcü performansı 46

Çizelge 3.3. Simülasyon ortamında, iç gimbal hız döngüsünün farklı K_i değerlerine göre kontrolcü performansı 47

Çizelge 3.4. Simülasyon ortamında, iç gimbal pozisyon döngüsünün farklı K_p değerlerine göre kontrolcü performansı 49

Çizelge 3.5. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün farklı K_p değerlerine göre kontrolcü performansı 52

Çizelge 3.6. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün çift kontrolcüyle K_p= 10 iken farklı K_i değerlerine göre kontrolcü performansı 52

Çizelge 3.7. Simülasyon ortamında, dış gimbal pozisyon döngüsünün farklı K_p değerlerine göre kontrolcü performansı 54

Çizelge 4.1. İki eksenli hareket platformunun modları 61

Çizelge 4.2. Tek PI kullanıldığındaki kontrolcü katsayıları ve kazanç - faz marjinleri. 69

Çizelge 4.3. Ardışık iki PI kullanıldığındaki kontrolcü katsayıları ve kazanç - faz marjinleri 70

Çizelge 4.4. Ardışık iki PI ve Lead filtre kullanıldığındaki kontrolcü, Lead filtre katsayıları ve kazanç - faz marjinleri 71

Çizelge 4.5. Ardışık iki PI kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanıldığındaki kontrolcü, Lead ve Notch filtre katsayıları ve kazanç - faz marjinleri 72

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.6. P kontrolcü ve Lag filtre kullanıldığındaki kontrolcü katsayıları ve kazanç-faz marjinleri 75

Çizelge 4.7. Ardışık iki PI kullanıldığındaki kontrolcü katsayıları ve kazanç – faz marjinleri 77

Çizelge 4.8. Ardışık iki PI kontrolcü ve Lead filtre kullanıldığındaki kontrolcü ve Lead filtre katsayıları ve kazanç - faz marjinleri 78

Çizelge 4.9. Ardışık iki PI kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanıldğındaki kontrolcü, Lead ve Notch filtre katsayıları ve kazanç - faz marjinleri 79

Çizelge 4.10. Tek P kullanıldığındaki kontrolcü katsayıları ve kazanç - faz marjinleri. 82

Çizelge 4.11. İç gimbal hız döngüsünde kullanılan PID kontrolcünün kontrolcü, Lead ve Notch filtre katsayıları ve kazanç – faz marjinleri 84

Çizelge 4.12. Dış gimbal hız döngüsünün PID kontrolcünün kontrolcü, Lead ve Notch filtre katsayıları ve kazanç – faz marjinleri 85

Çizelge 4.13. Farklı frekans aralıkları için iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün 2 birimlik bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 91

Çizelge 4.14. Farklı frekans aralıkları için dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün 2 birimlik bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 97

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Referans koordinat sistemleri ve aralarındaki ilişki 8

Şekil 2.2. (a) Beklenen yerdeğiştirme-zaman grafiği (b) Cismin ön kayma rejiminde göstermiş olduğu histeritik durum 15

Şekil 2.3. Ayrılma kuvveti – uygulanan kuvvet oranı grafiği..... 15

Şekil 2.4. Genelleştirilmiş stribeck eğrisi 16

Şekil 2.5. Statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçiş aşamasındaki sürtünme durumu 18

Şekil 2.6. Kayma rejiminde stribeck eğrisi etrafında gerçekleşen sürtünme gecikmesi. 19

Şekil 2.7. Kayma öncesi rejimdeki sürtünme kuvveti-yer değiştirme grafiği 19

Şekil 2.8. Çeşitli statik sürtünme kombinasyonları 20

Şekil 2.9. Karnopp modeli 22

Şekil 2.10. Tork dalgalanma etkisi 29

Şekil 2.11. Motor modeli 29

Şekil 3.1. İç gimbal ardışık kontrolcü blok diyagramı..... 42

Şekil 3.2. Dış gimbal ardışık kontrolcü blok diyagramı 43

Şekil 3.3. Simülasyon ortamında, ön filtre uygulanmamış sistemin dış gimbalinin referans girdiye vermiş olduğu cevap 44

Şekil 3.4. Simülasyon ortamında, ön filtre uygulanmış sistemin dış gimbalinin referans girdiye vermiş olduğu cevap 45

Şekil 3.5. Simülasyon ortamında, iç gimbal hız döngüsünün farklı K_p değerleri için tepkisi 46

Şekil 3.6. Simülasyon ortamında, iç gimbal hız döngüsünün farklı K_i değerleri için tepkisi 47

Şekil 3.7. Simülasyon ortamında, iç gimbal pozisyon döngüsünün farklı K_p değerleri için tepkisi 48

Şekil 3.8. Simülasyon ortamında, iç gimbal motor tork çıktısı 49

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.9. Simülasyon ortamında, iç gimbal hız çıktısı..... 50

Şekil 3.10. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün K_i=0 iken farklı K_p değerlerine tepkisi 50

Şekil 3.11. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün K_p= 80 iken farklı K_i değerlerine tepkisi 51

Şekil 3.12. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün çift kontrolcüyle K_i=0 iken farklı K_p değerlerine tepkisi..... 51

Şekil 3.13. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün çift kontrolcüyle K_p= 10 iken farklı K_i değerlerine tepkisi..... 52

Şekil 3.14. Simülasyon ortamında, dış gimbal pozisyon döngüsünün farklı K_p değerleri için tepkisi..... 53

Şekil 3.15. Simülasyon ortamında, dış gimbal motor tork çıktısı..... 54

Şekil 3.16. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız çıktısı..... 55

Şekil 4.1. İç gimbal bozucu sinyali 62

Şekil 4.2. İç gimbalin bozucu sinyale karşı ataletsel ölçüm biriminin karşılık gelen dönü ekseninden toplanan tepki çıktısı 62

Şekil 4.3. Dış gimbal bozucu sinyali 63

Şekil 4.4. Dış gimbalin bozucu sinyale karşı ataletsel ölçüm biriminin karşılık gelen dönü ekseninden toplanan tepki çıktısı 63

Şekil 4.5. İç gimbal frekans tepki fonksiyonunun bode diyagramı 67

Şekil 4.6. Hız döngüsünde tek PI kontrolcü kullanılan iç gimbal 69

Şekil 4.7. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü kullanılan iç gimbal 70

Şekil 4.8. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü ve Lead filtre kullanılan iç gimbal. 71

Şekil 4.9. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanılan iç gimbal..... 72

Şekil 4.10. Kontrol edilmemiş iç gimbal pozisyon döngüsü bode diyagramı 74

Şekil 4.11. Pozisyon döngüsünde P kontrolcü ve Lag filtre kullanılan iç gimbal..... 74

Şekil 4.12. Denetim altına alınmış iç gimbalin pozisyon takip grafiği..... 75

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.13. Dış gimbal frekans tepki fonksiyonunun bode diyagramı 76

Şekil 4.14. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü kullanılan dış gimbal 77

Şekil 4.15. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü ve Lead filtre kullanılan dış gimbal 78

Şekil 4.16. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanılan dış gimbal 79

Şekil 4.17. Kontrol edilmemiş dış gimbal pozisyon döngüsü bode diyagramı 81

Şekil 4.18. Pozisyon döngüsünde P kontrolcü kullanılan dış gimbal 81

Şekil 4.19. Denetim altına alınmış dış gimbalin pozisyon takip grafiği 82

Şekil 4.20. Hız döngüsünde ardışık PID kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanılan iç gimbal 83

Şekil 4.21. Hız döngüsünde ardışık PID kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanılan dış gimbal 85

Şekil 4.22. Çift PI ve PID kontrolcü için sistem çıktılarını karşılaştırma blok diyagramı 86

Şekil 4.23. 3 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 87

Şekil 4.24. 6 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 88

Şekil 4.25. 7 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 88

Şekil 4.26. 9.84 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 89

Şekil 4.27. 10 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 90

Şekil 4.28. 22.7 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 90

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.29. 3 Hz frekansında dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 93

Şekil 4.30. 5 Hz frekansında dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 94

Şekil 4.31. 7 Hz frekansında dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 94

Şekil 4.32. 9 Hz frekansında dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 95

Şekil 4.33. 14.3 Hz frekansında dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması 96

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. (a) İki eksenli hareket platformunun alt parçaları (b) İki eksenli hareket platformunun ölçüleri 5

Resim 2.2. Gerçek sistemin 3D modeli üzerinde referans koordinat düzlemlerinin gösterimi 7

Resim 2.3. İki serbestlik dereceli gimbalin dönme ekseni P'nin gösterimi 7

Resim 2.4. Sürtünmenin temel gösterimi ve yüzeylerin mikroskobik incelenmesi 14

Resim 2.5. Mikroskopik yapıda ön kayma rejimi 16

Resim 2.6. Mikroskopik yapıda sınır yağlama 17

Resim 2.7. Mikroskopik yapıda kısmi sıvı yağlama 17

Resim 2.8. Mikroskopik yapıda tam akışkan yağlama 18

Resim 2.9. Bristle sürtünme modeli 24

Resim 2.10. Kullanılan ataletsel ölçüm biriminin eksenlerinin gösterimi 30

Resim 2.11. İki eksenli hareket platformunun y ekseni üzerine düşen torklar 35

Resim 2.12. İki eksenli hareket platformunun z ekseni üzerine düşen torklar 38

Resim 4.1. Test altyapısı 58

Resim 4.2. İki eksenli hareket platformu mesh yapısı 60

Resim 4.3. (a-b) Modal analiz sonucunda iki eksenli hareket platformunun deplasman dağılımı 60

Resim 4.4. Sistem tanımlama ara yüzü 64

Resim 4.5. Veri atama ekranı 64

Resim 4.6. Veri türü değiştirme ekranı 65

Resim 4.7. Kontrol sistem tasarlayıcı arayüzü 66

Resim 4.8. Mimari yapı ara yüzü 66

Resim 4.9. Transfer fonksiyon modeli tahmin ekranı 68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
η	Sapma yönünde gerçekleşen açısal hareket
ϵ	Yunuslama yönünde gerçekleşen açısal hareket
ψ	Sapma yönündeki Euler açısı
θ	Yunuslama yönündeki Euler açısı
ϕ	Yalpalama yönündeki Euler açısı
e	Dünya üzerinde bir noktaya sabitlenmiş referans koordinat sistemi
m, n	Dünya ve gimbal tabanı arasındaki referans koordinat sistemi
B	Gimbal tabanına sabitlenmiş referans koordinat sistemi
O	Dış gimbal üzerine sabitlenmiş referans koordinat sistemi
I	İç gimbal üzerine sabitlenmiş referans koordinat sistemi
$\mathbf{u_x}$	x yönündeki birim vektör
$\mathbf{u_y}$	y yönündeki birim vektör
$\mathbf{u_z}$	z yönündeki birim vektör
T	Transformasyon matrisi
$\dot{\mathbf{T}}$	Transformasyon matrisinin türevi
$\mathbf{\Omega}$	Açısal hız vektörü
$\boldsymbol{\alpha}$	Açısal ivme vektörü
v	Bağıl açısal hzı
F	Kuvvet
$\mathbf{F_n}$	Normal kuvvet
$\boldsymbol{\mu}$	Sürtünme katsayısı
$\mathbf{F_C}$	Coulomb sürtünmesi kuvveti
$\mathbf{F_v}$	Viskoz sürtünmesi kuvveti
$\mathbf{F_s}$	Statik sürtünme kuvveti
$\mathbf{F_f}$	Sürtünme kuvveti
$\mathbf{v_s}$	Stribeck hızı

Simgeler	Açıklamalar
δ	Form faktörü
σ	Pürüzlü yüzeylerin rijitlik katsayısı
N	Fırça sayısını
x_i	Fırçaların bağıl konumu
b_i	Fırça bağlarının deforme olduğu konumu
z	Ortalama elastik fırça kayması
σ_0	Fırça sertlik katsayısı
σ_1	Fırça sönüm katsayısı
σ_2	Akışkan sönüm katsayısını
F_{ss}	Durağan durum sürtünmesi
δ	Stribeck eğrisi şekil faktörü
I_m	Rotor atalet momenti
$T_{sür_m}$	Motor sürtünme torku
T_r	Tork dalgalanması
T_m	Tork sabiti
L_m	İndüktans
R_m	Motor direnci
K_e	Geri elektro motor kuvveti (EMF; EMK) sabiti
CG	Ağırlık merkezi
F_{OI}	Dış gimbalin iç gimbal ağırlık merkezine uyguladığı doğrusal kuvvet
m_1	İç gimbalin kütlesi
A_{CG_I}	İç gimbalin ağırlık merkezinin doğrusal ivmesi
g	Yerçekimi kuvveti
$H_{I,P}$	İç gimbalin P noktası etrafındaki açısal momentumu
I_P^I	İç gimbalin, dönme ekseni P etrafındaki atalet tensörü
$I_{m_{iç}}$	İç gimbalde kullanılan motorun ataleti
Ω_{Ie}	İç gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre olan açısal hızı
α_{Ie}	İç gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal ivmesi
Ω_{Ie}	İç gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal hızı
M_{OI}	Dış gimbal tarafından iç gimbale uygulanan moment
T_{m_I}	İç gimbale iletilen motor torku

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{T_{sür_{OI}}}$	İç ve dış gimballer arasında oluşan sürtünme torku
$\mathbf{F_{BO}}$	Gimbal tabanının dış gimbalin ağırlık merkezine uyguladığı kuvvet
$\mathbf{F_{OI}}$	İç gimbalin dış gimbal ağırlık merkezine uyguladığı doğrusal kuvvet
$\mathbf{m_O}$	Dış gimbalin kütlesi
$\mathbf{A_{G_O}}$	Dış gimbalin ağırlık merkezinin doğrusal ivmesi
$\mathbf{H_{O,P}}$	P etrafındaki açısal momentumu
$\mathbf{I_P^O}$:	Dış gimbalin, dönme ekseni P etrafındaki atalet tensörü
$\mathbf{I_{m_{dış}}}$	Dış gimbalde kullanılan motorun ataleti
$\mathbf{\Omega_{Oe}}$	Dış gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre olan açısal hızı
$\mathbf{I_P^O}$	Dış gimbalin dönme ekseni etrafındaki atalet tensörü
$\mathbf{\alpha_{Ie}}$	İç gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal ivmesi
$\mathbf{\alpha_{Oe}}$	Dış gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal ivmesi
$\mathbf{\Omega_{Ie}}$	İç gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal hızı
$\mathbf{\Omega_{Oe}}$	Dış gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal hızı
$\mathbf{M_{BO}}$	Gimbal tabanından dış gimbale uygulanan moment
$\mathbf{M_{OI}}$	Dış gimbal tarafından iç gimbale uygulanan moment
$\mathbf{T_{m_O}}$	Dış gimbale iletilen motor torku
$\mathbf{T_{sür_{BO}}}$	Gimbal tabanı ile dış gimbal arasında oluşan sürtünme torku
$\mathbf{T_{sür_{IO}}}$	İç ve dış gimballer arasında oluşan sürtünme torku
$\mathbf{K_p}$	Oransal kazanç katsayısı
$\mathbf{K_i}$	İntegratör kazanç katsayısı
$\mathbf{C_{P_{OI}}}$	İç gimbal hız kontrolcüsü;
$\mathbf{C_{P_{Oe}}}$	Dış gimbal hız kontrolcüsü
$^{\mathbf{o}}$	Derece
G	Çevre bloğu

Kısaltmalar	Açıklamalar
Hz	Hertz
kg	Kilogram

Kısaltmalar	Açıklamalar
kg.m2	Kiliogram.metrekare
mrad	Miliradyan
rpm	Devir/dakika, revolution per minute

1. GİRİŞ

Sınır gözetleme ve şehir güvenliği uygulamalarında karada ve havada hedef yakalama ve takip edebilme günümüzde kritik öneme sahip olmuştur. Geliştirilen yüksek menzilli ve çözünürlüklü kameralar, lazer işaretleme cihazları veya silah sistemlerinin verimli çalışabilmesindeki en önemli nokta, bağlı bulundukları platformda oluşan titreşim ile cihazın ilişkisinin kesilmesi gerekliliğidir [1]. Özellikle yüksek hassasiyet beklenen çalışmalarda dışarıdan gelen bozucu etkilere rağmen hedefi kaybetmeden takip edebilmek kritik önem arz etmektedir.

Elektro-optik sistemler yardımı ile sınır gözetleme ve kent güvenliğini sağlama işlemlerinde, silah sistemleri ile hedefi ortadan kaldırmada veya son günlerde geliştirilen yüksek güçlü lazer sistemleri ile tehlikeli bir duruma müdahale edilmesinde genellikle hareket kabiliyeti, iki eksenli hareket platformları ile sağlanmaktadır. Denetim altına alınmış iki eksenli hareket platformları, üzerine bağlanan sistemin bakış alanının artırılmasını sağlamaktadır. Hareketli bir platforma bağlı bulunan veya dışarıdan gelecek olan bozucu etkilere maruz kalan sistemlerin, bakış hattını kaybetmemesi ve hedefte kalabilmesini sağlamak, hareket platformlarının temel amacı olmuştur [2]. Bu sistemler, bağlı oldukları platformların üretmiş olduğu titreşimlerin, üzerlerinde takılı bulunan birime aktarılmasına engel olarak, birimin hedefine odaklanması ve durağan şekilde kalabilmesi ihtiyacını karşılamalıdır [3, 4]. Burada bahsi geçen hareket platformları, çok eksenli ve birden fazla değişkenli servomekanizma sınıfının elemanıdır [5]. Bakış hattını sabit kılabilme amacı ile genellikle kullanılan iki eksenli hareket platformlarında iç ve dış gimbal olmak üzere iki eksen takımı bulunmaktadır.

İki eksenli hareket platformlarının beklenen hassasiyete ulaşabilmesi için sistemde bulunan bir takım belirsizliklerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Belirsizlikler, sistemin iç dinamiğinden kaynaklanabileceği gibi sistem dışından ve sistemin çalıştığı ortamdan da sisteme aktarılıyor olabilir. Bu düzensizlikler, sistem modelinin ortaya konulması aşamasında dikkatlice ele alınmadığı taktirde sistemde iyi bir denetim sağlamak mümkün olamayacaktır. Sistemin modelinin içerdiği belirsizlikler, parametre kaynaklı ve model basitleştirme kaynaklı olmak üzere iki grupta ele alınabilmektedir. Sistem tanımlaması yapılırken seçilen parametrelerdeki belirsizlikler veya seçilen parametrelerin sisteminkiler

ile tam olarak uyuşmaması, sistemin parametre kaynaklı belirsizlikleri olarak sayılabilmektedir. Bunun yanında sistemde sürtünme, motor tork dalgalanması gibi doğrusallığı bozan etkilerin basite indirgenerek modele dahil edilmesi ise basitleştirme kaynaklı belirsizlikler olarak sayılabilmektedir [6]. Sistemin dışından gelen bozucu etkiler ise bağlı bulunduğu platformun hareketi sırasında kendi yapısında meydana gelen tepkilerin iletilmesiyle olabileceği gibi, sistem açık alanda çalışacak ise ortamdaki rüzgar yüküyle de olabilir.

Hareketli platformların kullanımının yaygınlaşması ile birlikte, yukarıda belirtilen belirsizliklerin giderilerek, bakış hattının kararlı hale getirilmesi için farklı çalışma yöntemleri ile birçok kontrol metodu geliştirilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde hareket platformlarının kontrolünde genel olarak klasik kontrol yöntemleri üzerine çalışmalar bulunduğu gözlemlenmektedir [7]. Hareket platformlarında basit şekilde kendinden aktarma oranlı bir DC motor kontrolü ile bakış hattını kontrol altında tutmak mümkün olurken, sistemde kullanılan elemanlardaki ve hareketli parçalar arasındaki sürtünme ve sistemin içyapısında içerdiği doğrusal olmayan etkiler sebebiyle, beklenmedik hatalar meydana gelebilmektedir. Bu gibi durumlarda yalnızca sistemdeki belirsizlikler ve doğrusal olmayan etkilerden değil ayrıca çalışma ortamından sisteme aktarılan beklenmedik bozucu etkilerin ortadan kaldırılmasına yönelik, bakış hattı kontrolü için yüksek hassasiyetli, güçlü bir kontrolcü tasarımı yapmak gerekmektedir. [8]'de zaman ağırlıklı mutlak hatanın integralinin minimizasyonu amacıyla PI kontrolcü tasarımı üzerine çalışma yapılmıştır. [9]'da sisteme uygun seçilen PID parametreleri ile kontrolcünün asimptotik kararlı yapıya sokulabildiği görülmüş, kontrolcü parametre seçimi için bir algoritma türetilmiş ve bulunan veriler deney sonuçları ile pekiştirilmiştir. [10]'da jiroskop geri beslemeli elektro-optik platform için farklı bir yaklaşım olarak oransal, çift integral kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Burada durağan durum hatasını sıfır yapmak en önemli gereksinim olarak ön plana çıkmıştır. Başka bir çalışmada hız döngüsü ve pozisyon döngüsü için farklı döngüler tasarlanarak kontrolcü tasarımına gidilmiştir. Hız döngüsünde klasik PID kontrolcü tasarımı yapılmış iken pozisyon döngüsünde ise bulanık kontrol çalışması yapılarak klasik kontrol yöntemlerinin limitleri zorlanmaya çalışılmıştır [11].

Yapılan araştırmalar göz önünde bulundurulduğunda, hareket platformlarında klasik kontrol yöntemlerinin etkili bir çözüm sunabileceği görülmüştür.

Tezin İçeriği

Bu tez kapsamında ASELSAN tarafından tasarlanıp, üretilecek olan iki eksenli hareket platformu için hassas yönlenebilme ve hedef takibi yapabilme amacıyla kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Sistem, dönme eksenleri birbirini dik kesecek şekilde yerleştirilmiş iki gimbalden oluşmuştur. İç gimbalde termal ve gündüz olmak üzere iki kamera, bir lazer mesafe ölçer, bir DC motor, bir ataletsel ölçüm birimi ve bir enkoder bulunmaktadır. Dış gimbal ise yalnızca DC motor ve bir enkoder içermektedir. Burada bahsedilen birimler içerisinden kontrolcü sisteminde kullanılacak olanlar, tez içerisinde detaylı olarak anlatılmıştır.

Tez, matematik modelleme, kontrolcü tasarımı ve uygulama aşaması olmak üzere üç ana bölümden oluşmuştur. Bu bölümlerde kontrolcü tasarım ve uygulama aşamaları derinlemesine ele alınmıştır.

Birinci bölümde, hareket platformu için kontrolcü giriş ve çıkışlarına uygun olacak şekilde matematik model oluşturulmuştur. Hassas yönlenme ve hedef takibi yapılmak istenilen bir hareket platformunda sistemin karakterini iyi yansıtan bir matematik model ortaya koymak büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla bu bölümde sistemin kinematik ve dinamik denklemleri çıkarılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda sistemin doğrusal yapısını bozan en büyük etkinin sürtünme olduğu sonucuna varılmış ve sürtünme üzerine detaylı bir araştırma yapılarak sistem için en uygun sürtünme modeli olarak LuGre modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca kontrol işlemi sırasında kullanılacak olan eyleyiciler ve geri besleme elemanları ele alınmıştır.

İkinci bölüm olan simülasyon ortamında kontrolcü tasarım aşamasında, hız döngüsünde çift PI kontrolcü, pozisyon döngüsünde oransal kontrolcü olmak üzere iki eksenli hareket platformu için ardışık kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında ilk olarak sistem modeli Matlab-Simulink ortamında oluşturulmuştur. Modelleme işlemi iç ve dış gimbal için ayrı yapılmıştır. Daha sonra sistemin birim basamak girişe olan cevabı incelenerek kontrolcülerin ne kadar etkin bir biçimde işlevlerini yerine getirdiği incelenmiştir.

Son bölümde ise, ilk olarak gerçek sistem üzerinde, sistemin iç ve dış gimballerinin giriş -

çıkışları analiz edilmiş, bu analizlerden alınan sonuçlar kullanılarak bode diyagramları çıkarılmıştır. Seri üretimi planlanan hareket platformunun her biri birbirinin aynı olamayacağı için kontrolcü için bir ister çerçevesi ortaya konulmuştur. Daha sonra, ortaya çıkarılan bode diyagramları, belirlenen isterler çerçevesinde şekillendirilerek, iç ve dış gimballerin hız ve pozisyon döngüleri için ayrı ayrı kontrolcü parametreleri tasarlanmıştır Burada çalışmayı diğerlerinden farklı kılabilmek amacıyla gimballerin hız döngülerinde klasik kontrolcülerden farklı olarak çift PI kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Sonrasında gimballerin hız döngülerinde kullanılan çift PI kontrolcülerin performans yeterliliğini inceleyebilmek amacıyla, aynı isterler çerçevesinde, her bir eksenin hız döngüsü için ayrı ayrı klasik PID kontrolcüsü tasarımı yapılmıştır. Son olarak ortaya çıkan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün dışarıdan gelen farklı frekanslardaki bozucu etkileri sönümleme oranları üzerine bir simülasyon ortamı hazırlanarak karşılaştırma yapılmış ve çift PI kontrolcünün üstünlüğü grafikler ve çizelgeler yardımı ile ortaya konulmuştur.

Tezin Amacı

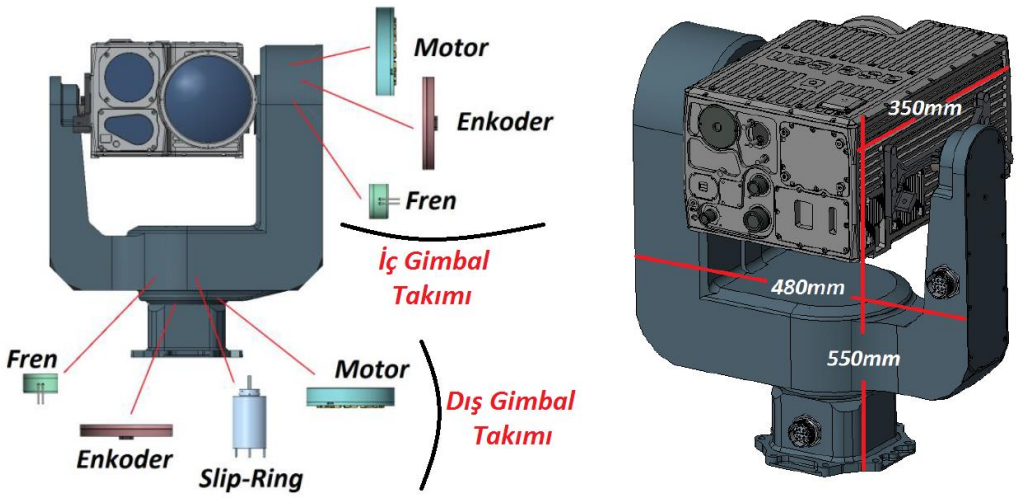
Tez kapsamında ele alınan hareket platformları, askeri alandan sivil alana kadar çok fazla kullanım alanına sahip olmuştur. Birçok kullanım alanına sahip olan bu sistemin, hassas ve kararlı bir biçimde çalışabilir olması, önemsenmiş ve tez çalışması bu doğrultuda yapılmıştır. Sistemin her koşulda veya her duruma uyarlanabilir şekilde tasarlanması, tezin temel amaçları arasında yer almıştır.

İki eksenli hareket platformları, savunma sanayinde sıklıkla elektro-optik sistemleri, radar sistemleri, lazer hedefleme ve silah sistemlerinin yönlendirilmesi amacıyla kullanılan platformlardır. Bu tez ile ASELSAN tarafından üretilecek olan iki eksenli hareketli platformlar için, üzerlerinde bağlı bulunan kameraların bakış hatlarını kaybetmeden hedef yakalama ve takibini yapabilecekleri bir kontrol sistem tasarımı yapılması amaçlanmıştır.

Süregelen sistem yapısında, geliştirilen görüntüleme birimlerinin hassasiyeti arttıkça kullanılan hareket platformlarının da önemi artmıştır. Bu sebeple iki eksenli hareket platformlarının kontrolü üzerine yapılan/yapılacak olan çalışmalar, güncelliklerini korumalı ve gelişip değişen durumlara adaptasyonu sağlanmalıdır. Yapılan bu çalışmanın, gelecekte yapılacak olan yeni çalışmalara bir basamak oluşturması ve değişen gelişmelere ayak uydurarak kendini güncel tutabilmesi hedeflenmiştir.

2. İKİ EKSENLİ GİMBAL SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELİNİN ÇIKARILMASI

Bu bölümde üzerinde kontrol sistemi tasarlanacak olan, detayları Resim 2.1.'de verilen, ASELSAN tarafından tasarlanan, iki eksenli gimbal sisteminin matematiksel modeli çıkarılmıştır. Sistemin beklenen seviyelerde, efektif şekilde kontrolünün sağlanabilmesinin temelinde doğru bir modelin ortaya konulması önem arz etmektedir. Ele alınan iki eksenli gimbalin sürtünme, tork dalgalanması, motor sürtünme torku, statik ve dinamik dengesizlik gibi birçok doğrusal olmayan düzensizlikleri vardır. Ortaya konulan matematiksel model ile birlikte bütün bu düzensizliklerin sistem üzerindeki etkileri de incelenerek, bu etkilerin ortadan kaldırılmasına çözüm yolu aramak mümkün olmaktadır.



(a) (b)

Resim 2.1. (a) İki eksenli hareket platformunun alt parçaları (b) İki eksenli hareket platformunun ölçüleri

Modelleme çalışmasının en başında model üzerinde referans koordinat sistemleri gösterilerek, bu koordinat sistemlerinin birbirleri ile arasındaki geçişlerde kullanılacak olan transformasyon matrisleri çıkarılmıştır. Daha sonra kinematik denklemler çıkarılmıştır.

[12]'da iki eksenli gimbal sistemleri için farklı bozucu kaynakların sistem üzerindeki etkileri üzerine bir çalışma ortaya konulmuştur. Bu çalışmada sistem üzerine etki eden bozucu kaynaklar olarak sensör gürültüleri, dinamik ve statik dengesizlikler ve sürtünme ele alınmıştır. Çalışmanın sonucunda dinamik dengesizliğin etkisinin sıfıra yakın çıktığı, sürtünmenin etkisinin ise sensör gürültüsü ve statik dengesizliğin etkisinin 7-8 katı

büyüklüğünde olduğu sonucuna varılmıştır. Bu tez kapsamında ele alınan iki eksenli hareket platformu ile [12]'da yapılan çalışmada irdelenen platformun birbirine benzer yapıda olduğu göz önüne alınarak sistem modellemede üzerinde durulması gereken noktanın sürtünme modeli olduğuna karar verilmiş ve bunun üzerine detaylı bir çalışma yapılmıştır. Sürtünme üzerine yapılan detaylı araştırma sonucunda sisteme etkisinin en efektif şekilde matematik modele nasıl aktarılacağı kararlaştırılmıştır. Bunun yanında DC eyleyici ve atalet ölçüm sensörü modellenmiştir. Son olarak dış gimbal ve iç gimbalin dinamik modelleri çıkarılmıştır.

2.1. Referans Koordinatlar ve Transformasyon Matrisleri

Gimbal sistemin matematik modelinin temelde iki tabanı bulunmaktadır. Bunlar dış gimbal tabanı ve iç gimbal tabanıdır. Dış gimbalin açısal hareketi, kendi hareket ekseninin z yönünde yani sapma (η) yönünde gerçekleşmekte iken iç gimbalin açısal hareketi, kendi hareket ekseninin y yönünde yani yunuslama (ϵ) yönünde gerçekleşmektedir. Bunların yanında hareket platformunun tabanına dışarıdan etkiyen bozucu kuvvetler ise sapma, yunuslama ve yalpalama yönünde gerçekleşmektedir. Bu yönlerde gerçekleşen açısal hareketler, sapma (ψ), yunuslama (θ) ve yalpalama (ϕ) Euler açıları olarak bilinir. Bütün referans koordinat sistemlerinin birbirine dik olduğu ve çakıştığı kabul edilmektedir. Aynı zamanda iki gimbal tabanının dönme merkezlerinin birbiri ile kesiştiği P noktası sistemin dönme noktası kabul edilmiştir. Resim 2.2. ve 2.3.'de modellemede kullanılan koordinat düzlemleri arasındaki bağlantı gösterimleri ve dönme noktası açıklanmıştır.

e: Dünya üzerinde bir noktaya sabitlenmiş referans koordinat sistemi

m, n: Platformun taban hareketini dünya ve gimbal tabanı arasında tanımlayan referans koordinat sistemi

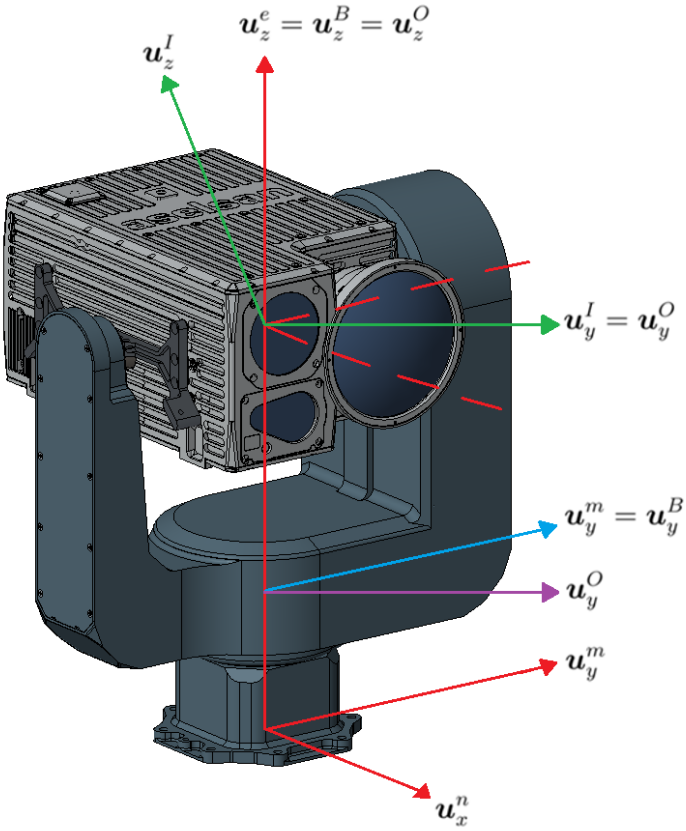
B: Gimbal tabanına sabitlenmiş referans koordinat sistemi

O: Dış gimbal üzerine sabitlenmiş referans koordinat sistemi

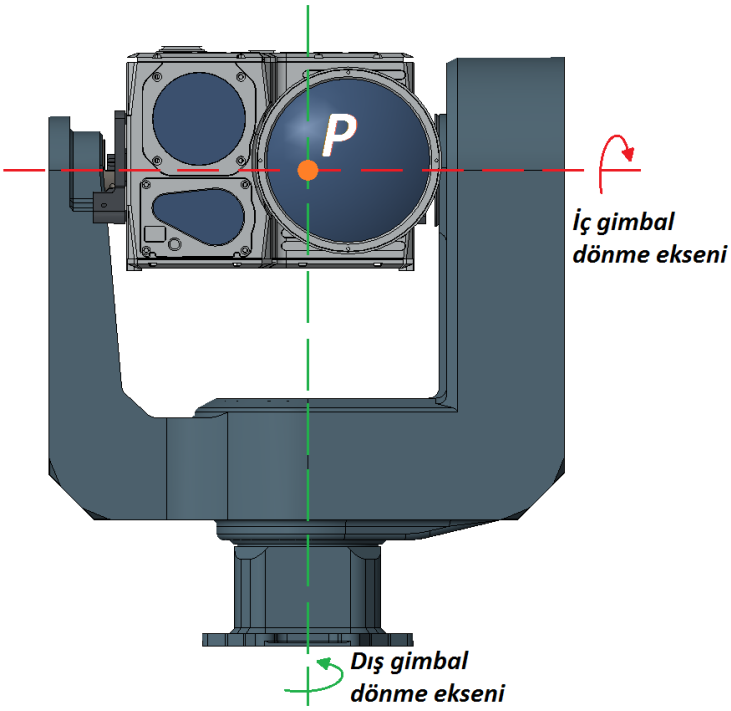
I: İç gimbal üzerine sabitlenmiş referans koordinat sistemi

Ek olarak x, y ve z yönlerindeki birim yön vektörleri de aşağıdaki gibidir.

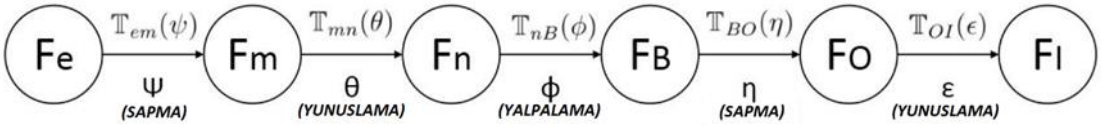
$$u_x=\begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix},\ u_y=\begin{bmatrix}0\\1\\0\end{bmatrix},\ u_z=\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix} \tag{2.1}$$



Resim 2.2. Gerçek sistemin 3D modeli üzerinde referans koordinat düzlemlerinin gösterimi



Resim 2.3. İki serbestlik dereceli gimbalin dönme ekseni P'nin gösterimi



Şekil 2.1. Referans koordinat sistemleri ve aralarındaki ilişki

Boiffier [13], çalışmasında referans koordinat sistemleri arasındaki transformasyon matrisleri ve bu matrislerin zamana göre türevlerinin elde edilmesini detaylı olarak göstermiştir. Koordinat sistemi (a)'yı koordinat sistemi (b) üzerinde göstermek için kullanılan transformasyon matrisi T_{ab} şeklinde gösterilir. Bu notasyona uygun olarak sistemde kullanılacak olan transformasyon matrisleri aşağıda verilmiştir.

$$T_{em}(\psi) = T^{T}_{me}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

$$T_{mn}(\theta) = T^{T}_{nm}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

$$T_{nB}(\theta) = T^{T}_{Bn}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

$$T_{BO}(\eta) = T^{T}_{OB}(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\eta) & -\sin(\eta) & 0 \\ \sin(\eta) & \cos(\eta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

$$T_{OI}(\epsilon) = T^{T}_{IO}(\epsilon) = \begin{bmatrix} \cos(\epsilon) & 0 & \sin(\epsilon) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\epsilon) & 0 & \cos(\epsilon) \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

Transformasyon matrisinin (T) ters simetrik matris (M_Ω) ile çarpımı, transformasyon matrisinin zamana göre türevini vermektedir. Burada kullanılan ters simetrik matris açısal hız vektörü $\Omega = [\Omega_x\ \Omega_y\ \Omega_z]^T$ ile ilişkilidir.

$$M_\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega z & \Omega y \\ \Omega z & 0 & -\Omega x \\ -\Omega y & \Omega x & 0 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

$$\frac{dT}{dt} = M_{\Omega} . T \tag{2.8}$$

Bu durumda denklem (2.7) ve (2.8)'i kullanarak transformasyon matrislerinin zamana bağlı türevleri, aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$\dot{T}_{IO} = M_{\Omega_{IO}} T_{IO} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_{IO_z} & \Omega_{IO_y} \\ \Omega_{IO_z} & 0 & -\Omega_{IO_x} \\ -\Omega_{IO_y} & \Omega_{IO_x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\epsilon) & 0 & -\sin(\epsilon) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\epsilon) & 0 & \cos(\epsilon) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \Omega_{IO_y}\sin(\epsilon) & -\Omega_{IO_z} & \Omega_{IO_y}\cos(\epsilon) \\ \Omega_{IO_z}\cos(\epsilon) - \Omega_{IO_x}\sin(\epsilon) & 0 & -\Omega_{IO_z}\sin(\epsilon) - \Omega_{IO_x}\cos(\epsilon) \\ -\Omega_{IO_y}\cos(\epsilon) & \Omega_{IO_x} & \Omega_{IO_y}\sin(\epsilon) \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

$$\dot{T}_{OB} = M_{\Omega_{OB}} T_{OB} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_{OB_z} & \Omega_{OB_y} \\ \Omega_{OB_z} & 0 & -\Omega_{OB_x} \\ -\Omega_{OB_y} & \Omega_{OB_x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\eta) & \sin(\eta) & 0 \\ -\sin(\eta) & \cos(\eta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \Omega_{OB_z}\sin(\eta) & -\Omega_{OB_z}\cos(\eta) & \Omega_{OB_y} \\ \Omega_{OB_z}\cos(\eta) & \Omega_{OB_z}\sin(\eta) & -\Omega_{OB_x} \\ -\Omega_{OB_y}\cos(\eta) - \Omega_{OB_x}\sin(\eta) & -\Omega_{OB_y}\sin(\eta) - \Omega_{OB_x}\cos(\eta) & 0 \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

$$\dot{T}_{Bn} = M_{\Omega_{Bn}} T_{Bn} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_{Bn_z} & \Omega_{Bn_y} \\ \Omega_{Bn_z} & 0 & -\Omega_{Bn_x} \\ -\Omega_{Bn_y} & \Omega_{Bn_x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_{Bn_z}\cos(\phi) - \Omega_{Bn_y}\sin(\phi) & -\Omega_{Bn_z}\sin(\phi) - \Omega_{Bn_y}\cos(\phi) \\ \Omega_{Bn_z} & \Omega_{Bn_x}\sin(\phi) & -\Omega_{Bn_x}\cos(\phi) \\ -\Omega_{Bn_y} & \Omega_{Bn_x}\cos(\phi) & \Omega_{Bn_x}\sin(\phi) \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

$$\dot{T}_{nm} = M_{\Omega_{nm}} T_{nm} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_{nm_z} & \Omega_{nm_y} \\ \Omega_{nm_z} & 0 & -\Omega_{nm_x} \\ -\Omega_{nm_y} & \Omega_{nm_x} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \Omega_{nm_y}\sin(\theta) & -\Omega_{nm_z} & \Omega_{nm_y}\cos(\theta) \\ \Omega_{nm_z}\cos(\theta) - \Omega_{nm_x}\sin(\theta) & 0 & -\Omega_{nm_z}\sin(\theta) - \Omega_{nm_x}\cos(\theta) \\ -\Omega_{nm_y}\cos(\theta) & \Omega_{nm_x} & \Omega_{nm_y}\sin(\theta) \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

2.2. İki Eksenli Hareket Platformu Kinematik Denklemleri

İki eksenli hareket platformunun dış ve iç gimbalinin hızı ve ivmesi olması sebebiyle kinematik denklemlerinin çıkarılması gerekmektedir. Dış ve iç gimballerin kinematik etkilerini dünya üzerindeki referans noktasına yansıtabilmek için ilk olarak taban referans noktasına taşınmaları gerekmektedir. Daha sonrasında ise x, y ve z eksenleri etrafında Euler açıları θ, ψ ve ϕ kadarlık dönme durumu incelenir.

2.2.1. Açısal hız

İlk önce dış gimbalin açısal hızı, $\Omega_{Oe} = [\Omega_{Oe_x} \quad \Omega_{Oe_y} \quad \Omega_{Oe_z}]^T$, dünya düzlemine göre aşağıdaki gibi bulunur:

$\Omega_{Oe} = \Omega_{OB} + \Omega_{Bn} + \Omega_{nm} + \Omega_{me}$ ve

$$\Omega_{Oe} = \dot{\eta}\, u_z + \dot{\phi}\, T_{OB}\, u_x + \dot{\theta}\, T_{OB}T_{Bn}\, u_y + \dot{\psi}\, T_{OB}T_{Bn}T_{nm}\, u_z$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_{Oe_x} \\ \Omega_{Oe_y} \\ \Omega_{Oe_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + T_{OB} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + T_{OB}T_{Bn} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + T_{OB}T_{Bn}T_{nm} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

Burada η dış gimbalin z ekseni etrafındaki açısal hızını göstermektedir. Dış gimbalin x, y ve z eksenleri etrafındaki hızları, Denklem 2.13'den çekilerek aşağıdaki gibi yazabilir.

$$\Omega_{Oe_x} = \dot{\phi}\cos\phi + \dot{\theta}\cos\theta\sin\theta + \dot{\psi}\,(\cos\theta\sin\eta\sin\phi + \cos\eta\sin\theta) \tag{2.14}$$

$$\Omega_{Oe_y} = -\,\dot{\phi}\sin\phi + \dot{\theta}\cos\phi\sin\eta + \dot{\psi}\,(\sin\eta\sin\theta + \cos\eta\cos\theta\sin\phi) \tag{2.15}$$

$$\Omega_{Oe_z} = \dot{\eta} \tag{2.16}$$

İç gimbalin açısal hızı, $\Omega_{Ie} = [\Omega_{Ie_x} \quad \Omega_{Ie_y} \quad \Omega_{Ie_z}]^T$, dünya düzlemine göre aşağıdaki gibi bulunur.

$$\Omega_{Ie} = \Omega_{IO} + T_{IO}\,\Omega_{Oe} \tag{2.17}$$

$$\Omega_{Ie} = \dot{\epsilon}\, u_z + T_{IO}\,(\dot{\eta}\, u_z + \dot{\phi}\, T_{OB}\, u_x + \dot{\theta}\, T_{OB}T_{Bn}\, u_y + \dot{\psi}\, T_{OB}T_{Bn}T_{nm}\, u_z) \tag{2.18}$$

$$\begin{bmatrix}\Omega_{Ie_x}\\ \Omega_{Ie_y}\\ \Omega_{Ie_z}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\\ \dot{\epsilon}\\ 0\end{bmatrix} + T_{IO}\begin{bmatrix}0\\ 0\\ \dot{\eta}\end{bmatrix} + T_{IO}T_{OB}\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ 0\\ 0\end{bmatrix} + T_{IO}T_{OB}T_{Bn}\begin{bmatrix}0\\ \dot{\theta}\\ 0\end{bmatrix} + T_{IO}T_{OB}T_{Bn}T_{nm}\begin{bmatrix}0\\ 0\\ \dot{\psi}\end{bmatrix} \tag{2.19}$$

Burada ϵ iç gimbalin y ekseni etrafındaki açısal hızını göstermektedir. İç gimbalin x, y ve z eksenleri etrafındaki hızları, Denklem 2.18'den çekilerek aşağıdaki gibi yazabilir.

$$\Omega_{Ie_x} = \dot{\phi}\ \cos\varepsilon\cos\eta - \dot{\psi}\,(\sin\varepsilon\cos\phi - \cos\varepsilon\sin\eta\sin\phi) + \dot{\theta}\,(\sin\varepsilon\sin\phi + \cos\varepsilon\sin\eta\cos\phi) + \dot{\eta}\sin\varepsilon \tag{2.20}$$

$$\Omega_{Ie_y} = \dot{\epsilon} \tag{2.21}$$

$$\Omega_{Ie_z} = \sin\varepsilon\cos\eta + \dot{\psi}(\cos\varepsilon\cos\phi + \sin\varepsilon\sin\eta\sin\phi) - \dot{\theta}(\cos\varepsilon\sin\phi - \sin\varepsilon\sin\eta\cos\phi) + \dot{\eta}\cos\varepsilon \tag{2.22}$$

2.2.2. Açısal ivme

İki eksenli hareket platformunun açısal ivmesi, açısal hızının zamana bağlı türevi alınarak bulunmaktadır. Dünya düzlemindeki referans noktasına göre dış gimbalin açısal ivmesi, $\alpha_{Oe} = [\alpha_{Oe_x}\ \ \alpha_{Oe_y}\ \ \alpha_{Oe_z}]^T$, aşağıdaki gibi çıkarılmıştır.

$$\begin{aligned}\alpha_{Oe} &= \ddot{\eta}\, u_z\\ &+ \ddot{\phi}\, T_{OB}\, u_x\\ &+ \ddot{\theta}\,(T_{OB}T_{Bn})\, u_y\\ &+ \ddot{\psi}\,(T_{OB}T_{Bn}T_{nm})\, u_z\\ &+ \dot{\phi}\,\dot{T}_{OB}\, u_x\\ &+ \dot{\theta}\,(\dot{T}_{OB}T_{Bn} + T_{OB}\dot{T}_{Bn})\, u_y\\ &+ \dot{\psi}\,(\dot{T}_{OB}T_{Bn}T_{nm} + T_{OB}\dot{T}_{Bn}T_{nm} + T_{OB}T_{Bn}\dot{T}_{nm})\, u_z\end{aligned} \tag{2.23}$$

Burada geçen daha önce bulunmuş olan transformasyon matrislerinin sadeleştirilmiş halleri aşağıdaki şekildedir.

$$\dot{T}_{OB} = M_{\Omega_{OB}}\, T_{OB} = \dot{\eta}\begin{bmatrix}\sin(\eta) & -\cos(\eta) & 0\\ \cos(\eta) & \sin(\eta) & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{2.24}$$

$$\dot{T}_{Bn} = M_{\Omega_{Bn}} T_{Bn} = \dot{\phi}\begin{bmatrix} 0 & \sin^2\phi & -\cos(\phi)\sin(\phi) \\ 0 & \cos(\phi)\sin(\phi) & -\cos^2\phi \\ \sin(\phi) & \cos^2\phi & \cos(\phi)\sin(\phi) \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

$$\dot{T}_{nm} = M_{\Omega_{nm}} T_{nm} =$$

$$\dot{\theta}\begin{bmatrix} \cos(\eta)\cos(\phi)\sin(\theta) & \sin(\theta) & \cos(\eta)\cos(\phi)\cos(\theta) \\ -\cos\theta\sin\phi - \cos\phi\sin\eta\sin\theta & 0 & \sin\phi\sin\theta - \cos\phi\cos\theta\sin\eta \\ -\cos(\eta)\cos(\phi)\cos(\theta) & 0 & \cos(\eta)\cos(\phi)\sin(\theta) \end{bmatrix} \tag{2.26}$$

İç gimbalin dünya üzerindeki referans eksen takımına göre açısal ivmesi, $\alpha_{Ie} = [\alpha_{Ie_x}\ \alpha_{Ie_y}\ \alpha_{Ie_z}]^T$, aşağıdaki gibi çıkarılmıştır.

$$\begin{aligned}
\alpha_{Ie} = {} & \ddot{\epsilon}\, u_y \\
& + \ddot{\eta}\, T_{IO}\, u_z \\
& + \dot{\eta}\, \dot{T}_{IO}\, u_z \\
& + \ddot{\phi}\, (T_{IO}\, T_{OB})\, u_x \\
& + \ddot{\theta}\, (T_{IO} T_{OB} T_{Bn})\, u_y \\
& + \ddot{\psi}\, (T_{IO} T_{OB} T_{Bn} T_{nm})\, u_z \\
& + \dot{\phi}\, (\dot{T}_{IO}\, T_{OB} + T_{IO} \dot{T}_{OB})\, u_x \\
& + \dot{\theta}\, (\dot{T}_{IO}\, T_{OB} T_{Bn} + T_{IO} \dot{T}_{OB} T_{Bn} + T_{IO} T_{OB} \dot{T}_{Bn})\, u_y \\
& + \dot{\psi}\, (\dot{T}_{IO} T_{OB} T_{Bn} T_{nm} + T_{IO} \dot{T}_{OB} T_{Bn} T_{nm} + T_{IO} T_{OB} \dot{T}_{Bn} T_{nm} + T_{IO} T_{OB} T_{Bn} \dot{T}_{nm})\, u_z
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Buradaki $\dot{T}_{IO}$ transformasyon matrisinin sadeleştirilmiş hali aşağıda verilmiştir.

$$\dot{T}_{IO} = M_{\Omega_{IO}} T_{IO} = \dot{\epsilon}\begin{bmatrix} \sin(\epsilon) & 0 & \cos(\epsilon) \\ 0 & 0 & 0 \\ -\cos(\epsilon) & 0 & \sin(\epsilon) \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

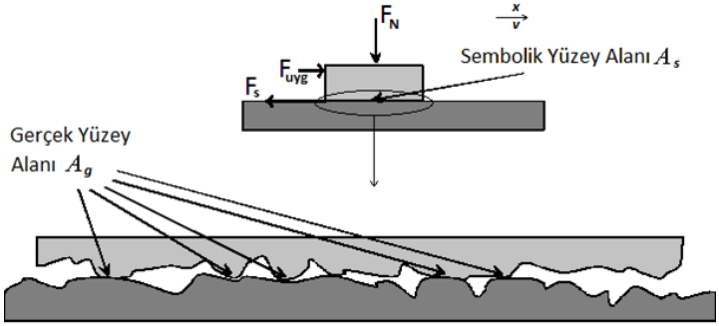
Transformasyon matrislerini denklem 2.23 ve 2.27'de yerine yerleştirilmesiyle α_{Oe} ve α_{Ie} açısal ivmelerinin x, y ve z eksenlerindeki eşitlikleri çıkarılmıştır.

2.3. Sürtünme

Birbiriyle temas halinde bulunan iki cisimden birinin diğerinin üzerindeki hareketi esnasında harekete karşı gösterilen dirence sürtünme denir. Makine elemanları arasında birçok temas noktası bulunmasından dolayı sürtünme, mekanizmaları farklı çalışma alanları üzerinden önemli derecede etkilemektedir. Bu alanlar arasında mekanizmaların kontrolü, yapısal dinamiği, tasarımı ve ömrü sayılabilir. Bu çalışma alanlarının her birinde sürtünmenin karmaşık yapısının derinliklerine girme ihtiyacına göre farklı bakış açıları sergilenmektedir. Sürtünmenin etkisinin, sistem performansına olan etkisinin az olduğu sistemlerde, sürtünme basit bir şekilde ele alınmaktadır. Öte yandan yüksek performans beklenen çalışmalarda çok daha karmaşık şekilde incelenmektedir [14].

Sürtünmeyi modellemedeki asıl amaç, sistem davranışında ortaya çıkan belirsizlikleri azaltmaktır. Ancak bilim adamları bu konu üzerine yıllardır çalışmasına rağmen hala genelleşmiş bir sürtünme modeli bulunmamaktadır. Çünkü kayma hareketinin gerçekleştiği esnada birbiri üzerinde kayan yüzeyler arasında nasıl bir etkileşim olduğu bilinmemektedir. Bu da ortaya etkili bir sürtünme modeli konulamamasına sebep olmaktadır. Birbiri üzerinde kayan parçaların temas halindeki yüzey yapıları oldukça karmaşıktır. Yüzeyleri düz bilinen parçalar, mikroskop altında incelendiği zaman aslında girintili çıkıntılı, çatlaklı bir yapıda olduğu gözlemlenmektedir. Bu girinti çıkıntılar, parçalar arasında temasın sağlandığı noktalardır. Bu noktaların birbirinden farklı düzende ve yapıda olması, modellemeyi zor kılmaktadır. Bunun yanında sürtünme sırasında ortaya çıkan ısı enerjisinin yüzey üzerinde düzenli olarak dağılmaması, oksidasyon, difüzyon ve yüzeyde birikme aşamalarında önemli değişimlere sebep olmaktadır [14, 15] .

Bu noktada sürtünme konusuna doğru yaklaşımları yapabilmek açısından öncelikli olarak sürtünme temas yüzeylerini incelemek doğru olacaktır.



Resim 2.4. Sürtünmenin temel gösterimi ve yüzeylerin mikroskobik incelenmesi [16]

Resim 2.4.'de görüldüğü gibi birbiri üzerinde kayan yüzeyler sürekli olarak temas halinde değillerdir. Aslında sürtünme birbirine temas eden girinti çıkıntılar sebebiyle ortaya çıkmaktadır. Bu girinti çıkıntıların ortaya koymuş olduğu dirençlerin toplamı bize sürtünme değerini vermektedir. Yüzeyler arasındaki bu pürüzler, yük altında hareket sırasında değişim göstermektedir. Sürtünmenin doğru sonuç veren bir modelinin olmaması bu nedenden kaynaklanmaktadır.

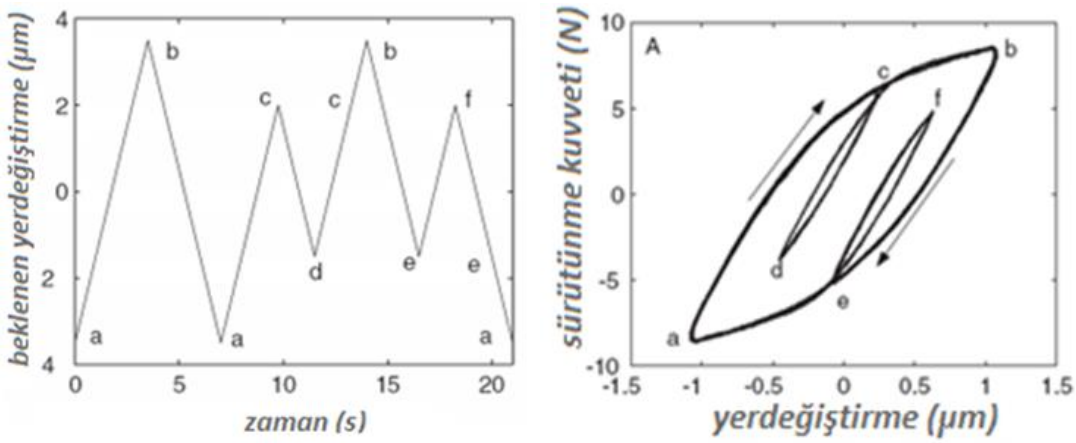
Bunun yanı sıra sürtünme, farklı davranışları içerisinde barındırmaktadır. Bu davranış çeşitlerinin de, model oluşturulurken göz önüne alınması gerekmektedir. Aynı zamanda bu davranış biçimleri, birbirleri ile etkileşim halindedir.

2.3.1. Sürtünme davranışları

<u>Kayma rejimi</u>

Genel sürtünme kanununda, sürtünme tek aşamada gerçekleşiyor gibi ele alınsa bile aslında sürtünme ön kayma ve kayma olmak üzere iki aşamada gerçekleşmektedir.

Temas halindeki cisimlere ufak kuvvetler uygulandığında, gözle görülmese bile detaya girildiğinde, etkileşim halindeki pürüz seviyesinde hareket olduğu gözlenmektedir. Hareket esnasında yüzeydeki pürüzlerde deformasyon meydana gelmektedir. Yük kaldırıldığı zaman, bu deformasyonların bazıları eski haline geri dönerken bazıları dönememektedir. Bu yüzden dolayı ön kayma rejimi, doğrusal olmayan histeritik davranış sergilemektedir.



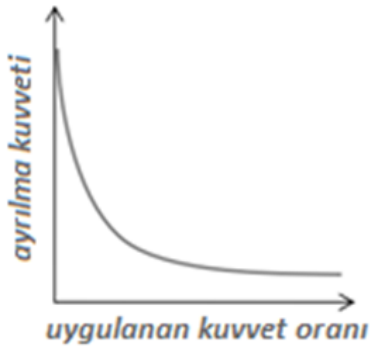
(a) (b)

Şekil 2.2. (a) Beklenen yerdeğiştirme-zaman grafiği (b) Cismin ön kayma rejiminde göstermiş olduğu histeritik durum [17]

Ancak cisimlere uygulanacak kuvvet, yeterli miktarda olduğu zaman yüzey pürüzlülükleri yok olacaktır ve kayma rejimine geçilecektir. Kayma rejiminde sürtünme kuvveti yalnızca hıza bağlı olarak değişim göstermektedir.

<u>Statik sürtünme ve ayrılma kuvveti</u>

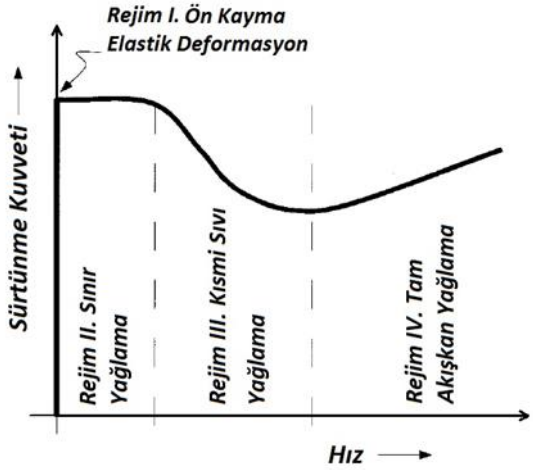
Temas halindeki parçalar, yüzey pürüzlülükleri nedeni ile uygulanan kuvvetin büyüklüğüne bağlı olarak birbirine yapışık halde bulunmaktadırlar. Kuvvet arttıkça bir noktada cisimler birbirinden kopmaya başlamaktadır. Kopmanın başlayacağı noktadaki sürtünme kuvvetine statik sürtünme, statik sürtünmeyi yenecek olan kuvvete ise ayrılma kuvveti denir. Önceki deneysel çalışmalar gösteriyor ki ayrılma kuvveti, uygulanan kuvvetin oranı arttıkça ters orantılı olarak azalmaktadır [18].



Şekil 2.3. Ayrılma kuvveti – uygulanan kuvvet oranı grafiği [14]

Yağlama ve Stribeck etkisi

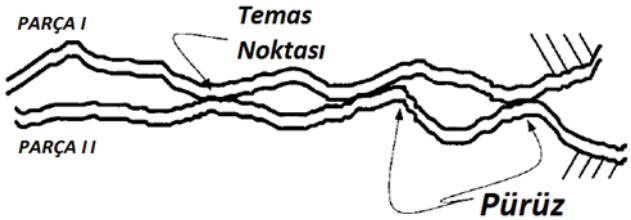
Birbiri ile temas durumundaki iki parça arasındaki sürtünmeyi azaltmak, kaymayı kolaylaştırmak ve aşınmayı azaltmak amacı ile parçalar arasına yağ sürülmektedir. Yağlanan parçalar şekilde görüldüğü gibi hızın büyüklüğü ile orantılı 4 farklı rejim ortaya çıkaracak şekilde sürtünme kuvveti oluşturmaktadır. Bu dört rejimin görüldüğü Şekil 2.4 Stribeck eğrisi olarak bilinir ve rejimlerden üçü hareket halini tanımlarken, ilk rejim hızdan bağımsız olup, statik sürtünme durumunu tanımlamaktadır. [19]



Şekil 2.4. Genelleştirilmiş stribeck eğrisi [14]

Ön kayma rejimi

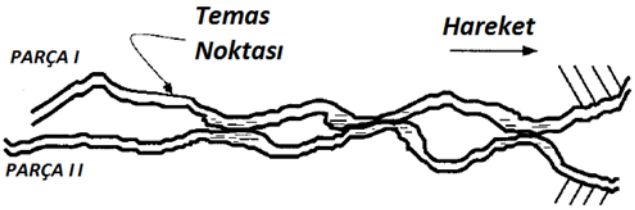
Ön kayma rejiminde ortaya çıkan sürtünme kuvveti, temas halindeki parçaların hareket etmesini engelleyen kuvvettir. Bu rejimde sürtünme, hızdan bağımsız olarak parçaların yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğündeki plastik deformasyon, statik sürtünmenin yükselmesine sebebiyet vermektedir [19].



Resim 2.5. Mikroskopik yapıda ön kayma rejimi [19]

Sınır yağlama

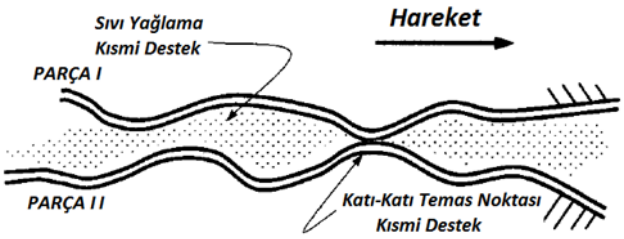
Sınır yağlama rejiminde, hız çok düşük olduğundan dolayı parçalar arasında yağ filmi oluşması sağlanamamaktadır ve parçalar arasında hala katı-katı teması bulunmaktadır. Bu da kayma gerilmesini arttıran bir etmen olmaktadır [19].



Resim 2.6. Mikroskopik yapıda sınır yağlama [19]

Kısmi sıvı yağlama

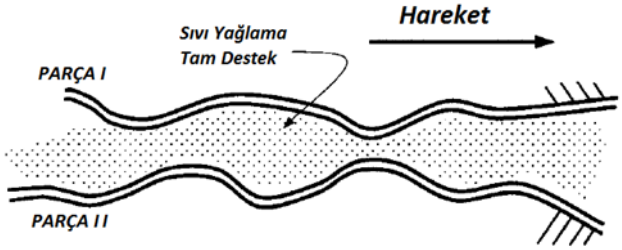
Hız, sınır yağlama rejimini geçecek kadar arttığında parçalar arasında ince bir tabaka yağ filmi oluşmaktadır. Bunun yanında yağ filmi yüksekliği, yüzey pürüzlerinin yüksekliğini geçemediği noktalarda ise bir miktar katı-katı temas oluşmaktadır. Bütün bunların sonucu olarak kısmi sıvı yağlama meydana gelmektedir [19]. Kısmi sıvı yağlama durumunda temas bir miktar da olsa kopmakta ve parçalar daha kolay kaymaya başlamaktadır. Bu sebeple sürtünme değeri azalmaya başlamaktadır.



Resim 2.7. Mikroskopik yapıda kısmi sıvı yağlama [19]

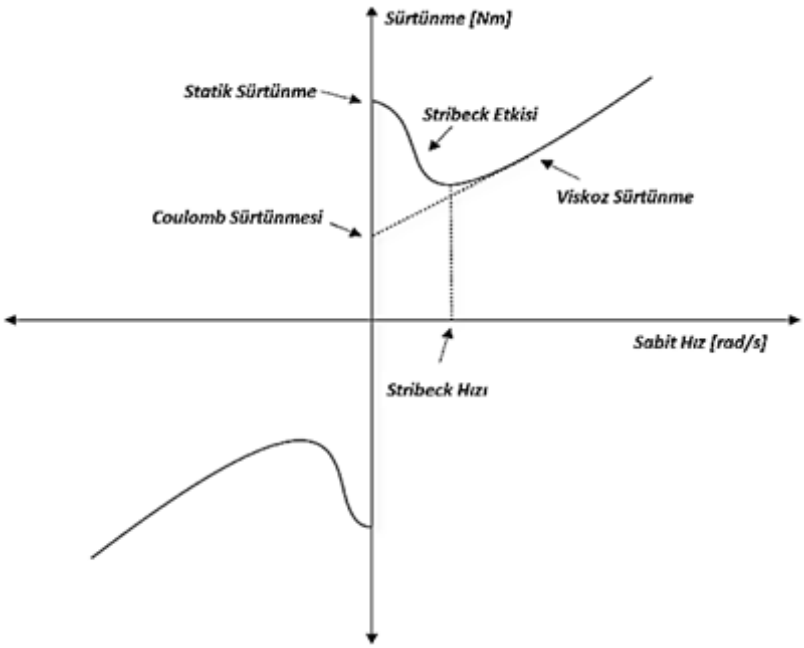
Tam akışkan yağlama

Tam akışkan yağlama durumunda parçalar arasındaki temas tamamen önlenmiştir. Parçalar yalnızca yağ filmi üzerinde hareket etmektedir. Ancak hız arttıkça yağın dinamiği nedeni ile sürtünme değeri artmaya başlamaktadır.



Resim 2.8. Mikroskopik yapıda tam akışkan yağlama [19]

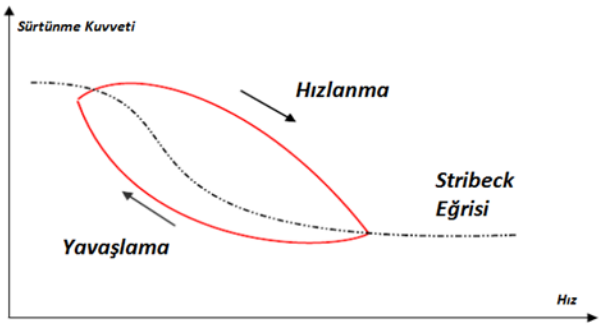
Yağlanmış parçalar için çok düşük hızlarda, temas yüzeyleri arasında bir yağ filmi oluşamamakta ve yüzey pürüzleri birbiri ile temas etmektedir. Hız arttığı vakit, yüzey pürüzlülüğünün etkisi gittikçe azalmaya başlamakta, bu sebeple sürtünme azalmaktadır. Hız daha da arttırıldığında tam anlamıyla yüzeyler birbirinden kopmakta ve yüzeyler arasında tam bir yağ filmi oluşmaktadır. Ancak bu seferde yağın hidrodinamik özellikleri sebebiyle bir miktar sürtünme kuvveti ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda aralarında yağlama olmayan, kuru sürtünme olan parçalarda da yukarıda belirtilen Stribeck etkisinin görüldüğü, çalışmalar sonucunda ortaya konmuştur [13,16]. Şekil 2.5'de görüldüğü gibi statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçiş aşamasındaki doğrusal olmayan geçiş, Stribeck etkisi olarak tanımlanmaktadır. Hız arttıkça sürtünme azalmaya başlamakta ve bir noktada minimum değerine ulaşmaktadır. Minimum değerine ulaştığı noktadaki hızı, Stribeck Hızı olarak adlandırılmaktadır [14].



Şekil 2.5. Statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçiş aşamasındaki sürtünme durumu [14]

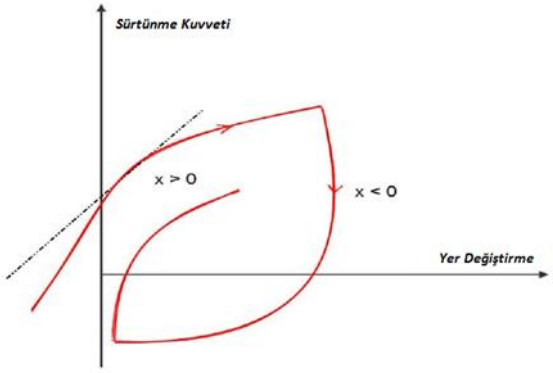
Sürtünme gecikmesi ve histerisis

Hareketin Stribeck eğrisi civarında sürtünme kuvveti ile kayma hızı arasında bir gecikme meydana gelmektedir. Hızın artması durumundaki sürtünme kuvveti, hızın azalması durumundaki sürtünme kuvvetinden daha büyüktür. Bu gecikmenin sebebi, pürüzlerin kırılması için geçen süre ve yüzeyler arasında yağ filmi oluşumu için geçen süredir.



Şekil 2.6. Kayma rejiminde stribeck eğrisi etrafında gerçekleşen sürtünme gecikmesi [14]

Bunun yanında hareketin ön kayma rejimi sırasında sürtünme gecikmesi histerisis bir davranış sergilemektedir. Bu rejimdeki sürtünme kuvveti ile konum değişikliği arasında gerçekleşen histerisis çevrimi, enerji kaybını göstermektedir. Ancak Stribeck eğrisi civarında oluşan sürtünme gecikmesi, enerji kaybından dolayı olamamaktadır.



Şekil 2.7. Kayma öncesi rejimdeki sürtünme kuvveti-yer değiştirme grafiği [14]

2.3.2. Sürtünme modelleri

Sürtünmenin sistem üzerindeki doğrusal olmayan etkilerini dengeleyebilmek için sürtünme modelleri oluşturulmuştur. Eğer ki sistemlerin sürtünme davranışlarını düzgün bir şekilde

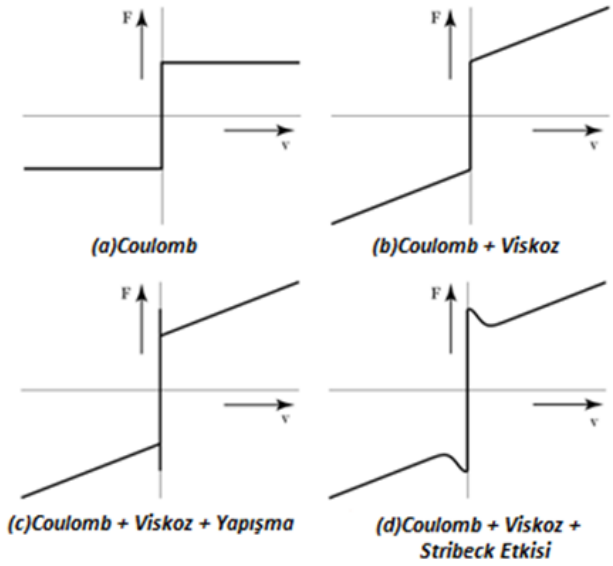
ortaya koyabilen bir model elde edilebilirse daha kararlı sistemler ortaya çıkarmak mümkün olacaktır.

Sürtünme genel olarak iki çeşittir: Statik sürtünme, Dinamik sürtünme. Bu bölümde incelenecek olan modeller, bu iki sürtünme çeşidine yönelik olmuştur.

Statik sürtünme modelleri

Klasik Sürtünme Modeli

Klasik sürtünme modeli, her biri sürtünmenin farklı bir açısını ele alan farklı bileşenlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler Coulomb sürtünmesi, viskoz sürtünme ve statik sürtünmedir. Klasik sürtünme modeli, bu komponentlerin hepsinin veya bazılarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Ayrıca son zamanlarda Stribeck etkisi de bu model içerisinde düşünülmektedir [20].



Şekil 2.8. Çeşitli statik sürtünme kombinasyonları [21]

Statik sürtünme modelleri hıza bağlı olarak sürtünme kuvvetlerini vermektedir. Ancak yalnızca durağan durumdaki hız sürtünme kuvveti ilişkisi elde edilebilmektedir. Bu modellin olumsuz yanı olarak, sıfır hızını geçiş anında modelin nasıl tepki vereceği bilmemektedir. Bu da sistemde hatalara, kararsızlıklara sebebiyet vermektedir.

Coulomb sürtünmesi

Coulomb sürtünmesi, temas eden yüzey alanından bağımsız olarak etki eden kuvvetin normal bileşeni ile orantılı olarak artan sürtünmedir. Coulomb sürtünmesi hızın yalnızca yönü ile ilgilenmektedir.

$$F = F_C \, \mathrm{sgn}(v) \tag{2.29}$$

$$F_C = \mu \, |f_n| \tag{2.30}$$

Burada μ sürtünme katsayısı, f_n ise normal kuvveti göstermektedir.

Viskoz sürtünme

Birbirine sürtünen iki parça arasındaki sıvı yağlamanın akışkan yapısından ötürü viskoz sürtünme ortaya çıkmaktadır. Viskoz sürtünme aşağıdaki denklemde görüldüğü gibi hız ile orantılı olarak değişmekte ve hızın sıfır olduğu noktada sıfır sürtünme değerini vermektedir.

$$F = F_v \, v \tag{2.31}$$

Statik sürtünme, yapışma

Bir cismi, durağan halden hareket haline geçirebilmek için iki yüzey arasındaki bağların koparılmasına ihtiyaç vardır. Bu sebeple karşılaşılan sürtünme kuvveti Coulomb sürtünmesinden daha yüksektir. Bu sürtünme kuvveti statik sürtünme olarak tanımlanır ve hızdan bağımsız, uygulanan kuvvetin oranına ise bağımlıdır.

$$F = \begin{cases} F_e, & v = 0 \text{ ve } |F_e| < F_s \\ F_s \mathrm{sgn}(F_e), & v = 0 \text{ ve } |F_e| \geq F_s \end{cases} \tag{2.32}$$

Stribeck etkisi

Stribeck eğrisi gösteriyor ki, sıfır hız durumundan kayma durumuna geçişte sürtünme kuvveti bir anda düşmemektedir. Hızın yavaş olduğu noktalarda sürtünme kuvveti,

devamlılığını koruyarak belli bir seviyeye kadar azalmaktadır. Bu bölgedeki sürtünme ise Stribeck sürtünmesidir.

Sonuç olarak Coulomb, viskoz, statik ve Stribeck sürtünmelerini içeren bir Klasik Sürtünme Modeli ortaya koymak gerekir ise aşağıdaki gibi olacaktır.

$$F = \begin{cases} F(v), & v \neq 0 \text{ ve } |F_e| < F_s \\ F_e, & v = 0 \text{ ve } |F_e| < F_s \\ F_s \mathrm{sgn}(F_e), & \text{diğer durumlar için} \end{cases} \tag{2.33}$$

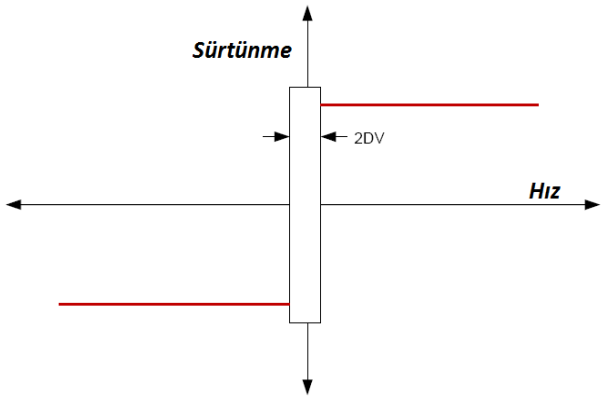
$$F(v) = F_C + (F_S - F_C)e^{-\left|\frac{v}{v_s}\right|^{\delta}} + F_v v \tag{2.34}$$

v_s: Stribeck hızı

δ: Form faktörü

Karnopp sürtünme modeli

Klasik sürtünme modelinde karşılaşılan, sıfır hızını geçiş sırasındaki belirsizliği ortadan kaldırmak için Karnopp yeni bir model oluşturmuştur [22]. Bu model hızın sıfır olduğu bölgeyi bir v<DV aralığı olarak incelemektedir. Bu aralık içerisinde sürtünme değeri, cismi sıfır hızda tutacak bir değer ya da cismin ayrılma kuvveti değerine eşit olarak seçilmektedir. Seçilecek olan değer, bu iki seçenekten küçük olanı olacaktır.



Şekil 2.9. Karnopp modeli [14]

Karnopp modeli simülasyon ortamında iyi sonuçlar vermektedir. Ancak model sistem ile

çok bağıntılıdır. Bu sebepten ötürü uygulamalarda iyi sonuçlar alınamamaktadır.

Armstrong sürtünme modeli

Armstrong sürtünme modeli, klasik sürtünme modeli geliştirmek amaçlı iki farklı model ortaya koymaktadır. Bu modellerden birisi yapışık durum için, diğeri ise kayma durumu için geçerlidir. Yapışık durum için sürtünme yay olarak modellenmiştir.

$$F_f(x) = \sigma x \tag{2.35}$$

Kayma rejimi için ise Coulomb, viskoz ve Stribeck etkisi dikkate alınarak bir model çıkarılmıştır.

$$F_f(\dot{x}, t) = \left(F_c + F_v|\dot{x}| + F_s(\gamma, t_2) \frac{1}{1+\left(\frac{\dot{x}(t-\tau_L)}{\dot{x}_s}\right)^2} \right) \mathrm{sgn}(\dot{x}) \tag{2.36}$$

$$F_s(\gamma, t_2) = F_{s,a} + (F_{s,\infty} - F_{s,a}) \frac{t_2}{t_2+\gamma} \tag{2.37}$$

Armstrong modeli yapışık durum ve kayma durumu için farklı iki alt modele ve bu modeller arasında mantıklı geçiş yapma mekanizmasına sahiptir. Ayrıca her geçiş sonrasında modelin hafızasındaki durumları sıfırlaması gerekmektedir. Sonuç olarak böyle bir geçiş mekanizmasını fiziksel olarak uygulamak çok mümkün değildir. Bu yüzden modelin kullanımı biraz karmaşıktır.

<u>Dinamik sürtünme modelleri</u>

Statik sürtünme modellerinde, kaymanın olmadığı rejimdeki yer değişimi ve kayma başladığındaki Stribeck eğrisi bölümündeki sürtünme gecikmesi ele alınamadığı için sürtünmeden dolayı ortaya çıkan kararsızlığın giderilmesi mümkün olmamaktadır. Bu yüzden yüksek hassasiyet gereksinimi duyulan çalışmalar için dinamik sürtünme modelleri geliştirilmiştir.

Dahl sürtünme modeli

Dahl sürtünme modelinde, yapışma durumu için dinamik model yay davranışı sergiliyor gibi düşünülmektedir [23]. Dahl modelinin temelinde Coulomb sürtünmesi, yer değiştirme ve parçanın hareket yönü bulunmaktadır. Yer değiştirmeyi hesaba katmasından dolayı statik sürtünme modellerinde ele alınamayan histeritik davranışı modellemektedir. Ancak Dahl model Stribeck etkisini ve anlık yapışma-hareket etme davranışlarını ele alamamaktadır. Model aşağıdaki gibi formüle edilmiştir.

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{\sigma_0 |v|}{F_c} z \tag{2.38}$$

$F_f = \sigma_0 z$

F_f: Sürtünme kuvveti

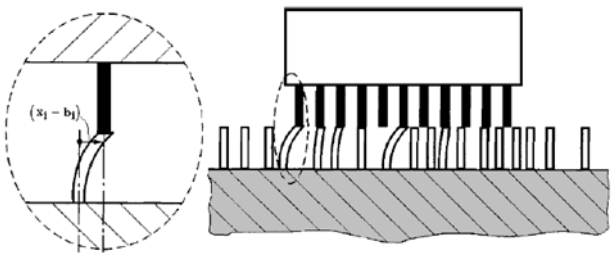
F_c: Coulomb sürtünmesi

v: Bağıl açısal hız

σ_0: Pürüzlü yüzeylerin rijitlik katsayısı

Bristle sürtünme modeli

Bristle sürtünme modelinde, yüzeylerin düzensiz olmasından dolayı temas noktası miktarı ve konumları rastgeledir. Bu modelde temas noktaları, parçaları birbirine bağlayan esnek fırçalar olarak modellenmiştir [24]. Fırçalar bir yüzeye sabit, diğer tarafa ise esnek olarak bağlanmaktadır. Hareket başlayınca bağlar kopmaya başlamakta ve yeni bağlar oluşmaktadır [14]. Hareketle beraber bağlarda biriken gerginlik artmaya başlayacak ve fırçalar sürtünme kuvvetine sebep olan yaylar gibi davranacaktır.



Resim 2.9. Bristle sürtünme modeli [20]

$$F = \sum_{i=1}^{N} \sigma_0 (x_i - b_i) \tag{2.39}$$

Resim 2.9'de görülen model, denklem 2.39'da görüldüğü gibi tanımlanır. Buradaki N fırça sayısını, σ_0 yüzeylerin rijitlik katsayısını, x_i fırçaların bağıl konumunu, b_i fırça bağlarının deforme olduğu konumu göstermektedir.

İhtiyaç duyulan hassasiyete bağlı olarak fırça sayısı artırılıp modelleme yapılır. İyi bir sonuç almak için 20-25 arası fırça kullanımı doğru olmaktadır ancak tek fırça olarak modelleme yapıldığı zamanda da yakın sonuçlara ulaşılmaktadır [24]. Modelin dezavantajı, fırça yapısını modellemenin karmaşık olması ve fırça sayısı arttıkça karmaşıklığın daha da artmasıdır.

LuGre Modeli

LuGre modeli, Dahl modelinin geliştirilmesi ile ortaya çıkmış bir modeldir. Dahl modeli sürtünmenin birçok özelliğini karşılayacak bir modelken, Stribeck etkisini ve yapışıp-ayrılma hareketini tahmin edememektedir. LuGre modeli ise Dahl modeline ek olarak Stribeck etkisini ve yapışıp-ayrılma hareketini etkili bir şekilde ele alabilmektedir [20]. Ayrıca bu model ile birlikte kayma öncesi rejimdeki histeritik davranışı, kayma rejimindeki sürtünme gecikmesini ve kayma öncesi durumdan kayma durumuna geçerken ki ayrılma kuvvetini tahmin etmek mümkün olmaktadır.

Bu modelde cisimler, aynı Bristle modelindeki gibi elastik fırçaların birbiri ile teması şeklinde düşünülmüştür. Cisimlere teğetsel bir kuvvet uygulandığı vakit elastik kılcallar bükülmeye başlayacaktır. Eğer bu kuvvet ayrılma kuvvetini yenecek kadar büyük olur ise hareket oluşacaktır. Bir bakıma elastik kılcallar esneme hareketi yapan yaylar gibi düşünülmektedir. Modelin temeli bu yaylardaki ortalama sapmaya dayanmaktadır [20].

$$\frac{dz}{dt} = v - \sigma_0 \frac{|v|}{s(v)} z \tag{2.40}$$

$$F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \tag{2.41}$$

Burada v temas halindeki iki yüzeyin bağıl hızı, F_f sürtünme kuvveti, z ortalama elastik fırça kaymasıdır. σ_0 fırça sertlik katsayısı, σ_1 fırça sönüm katsayısı ve σ_2 akışkan sönüm katsayısını göstermektedir.

Sabit hızda hareket için, durağan durum sürtünmesi F_{ss}:

$$F_{ss} = s(v)\mathrm{sgn}(v) + \sigma_2 v \tag{2.42}$$

olarak bulunur. Burada s(v) Coulomb sürtünmesini ve Stribeck etkisini içermektedir. Stribeck etkisi için iyi bir model çıkarmak için mantıklı bir s(v) seçimi yapılması önemli olmaktadır.

$$s(v) = F_c + (F_s - F_c)e^{-\left|\frac{v}{v_s}\right|^{\delta}} \tag{2.43}$$

F_s yapışma sürtünmesi, F_c Coulomb sürtünmesi, v_s Stribeck hızı ve δ Stribeck eğrisi şekil faktörüdür.

LuGre modeli, sürtünme dengelemekte [25], simülasyonlarda [26] ve tahminlerde [27] yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Model, yapışmayı, Stribeck etkisini, sürtünme gecikmesini, histeritik etkiyi ve yapışma durumundan hareket durumuna geçişi kullanarak iyi bir sürtünme modeli ortaya koyma konusundaki etkinliğini göstermektedir.

2.3.3. Sisteme uygun sürtünme modelinin seçimi

Sistem elemanlarının birbiri ile teması durumunda ortaya çıkan, doğrusal yapıyı bozucu etkiye sahip sürtünmeyi modelleme üzerine literatürde yapılmış olan modelleme çalışmaları, basitten karmaşık yapıda olanına kadar detaylıca incelenmiştir. Bu çalışmaların her biri karmaşık yapıdaki sürtünmeyi bir şekilde ele almaya ve bir model ortaya koymaya çalışmıştır. Her model anlayışı için en temel noktanın, modellerin içerdiği parametrelerin en doğru şekilde ölçülerek kullanılması gerekliliği olduğu görülmüştür. Ancak sürtünme sırasında ortaya çıkan yapışma durumu ve ön kayma rejimi değişkenlerini tahminden öteye taşımanın, sürtünme için yapılacak olan modeli oldukça karmaşık bir yapıya sokacağı görülmüştür. Bu sebepten hareket anında cisimler arasında gerçekleşen sürtünme değişkenini, tam olarak modellemek mümkün gözükmemektedir. Denetimi sağlanacak sistemin kontrolcüsü için sürtünme modeli seçiminin olabildiğince basitlikte ancak bunun yanında sürtünmenin bütün etkilerini içeren karmaşıklıkta olması önem arz etmektedir.

Çizelge 2.1. Farklı sürtünme modelleri için sürtünme davranışlarının karşılaştırılması

	Klasik Yöntem	Karnopp	Armstrong	Dahl	LuGre
Statik Özellikler					
Coulomb Sürtünmesi	+	+	+	+	+
Viskoz Sürtünme	+	+	+	-	+
Statik Sürtünme	+	+	+	+	+
Stribeck Etkisi	+	+	+	-	+
Dinamik Özellikler					
Sürtünme Kayması	-	-	-	-	+
Kopma Durumu	-	-	-	-	+
Yapışma Durumu	-	-	Tahmin	-	+
Ön Kayma Rejimi	-	-	-	Tahmin	Tahmin

İncelenen klasik sürtünme modelleri, sürtünmeyi oldukça basit olarak ele alırken, yapışma, kopma durumu gibi sürtünme davranışlarını ele almaması sebebiyle yetersiz kalmaktadır. Sürtünme durumunu en iyi şekilde dinamik modeller yansıtmaktadır. Bu sebepten dolayı hassas kontrol ve hedef takip uygulamalarında dinamik modeller kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1'de görüldüğü üzere LuGre modeli, sürtünmenin neredeyse bütün davranışlarını model üzerinde yansıtabilmektedir. Kontrolcü tasarımında sürtünmenin önemli bir kısıtlayıcı faktör olduğu göz önünde bulundurulunca, bu etkiyi en aza indirmek için olabildiğince gerçeğe yakın bir model kullanmak gerektiğinden, tez çalışmasında LuGre modeli kullanılarak sürtünme parametreleri seçilmiş ve model oluşturulmuştur. Tez çalışmasında kullanılmış olan LuGre parametreleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. LuGre sürtünme parmetreleri

Parametreler	Birimler	Semboller	$T_{sür_{BO}}$ Değerleri	$T_{sür_{IO}}$ Değerleri
Coulomb sürtünme torku	N.m	T_c	3,84	3.2
Statik sürtünme torku	N.m	T_s	4.8	4
Stribeck hızı	rad/s	v_s	0.001	0.001
Stribeck Eğrisi şekil faktörü	-	δ	2	2
Sertlik katsayısı	N.m/rad	σ_0	500	100
Sönüm katsayısı	N.m/rad	σ_1	22.36	10
Akışkan sönüm katsayısı	N.m s/rad	σ_2	0	0

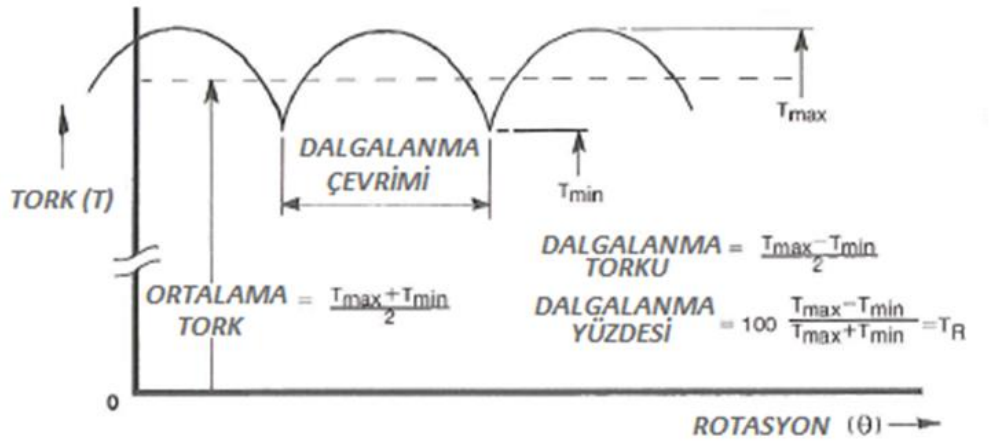
2.4. DC Motor Modeli

İç ve dış gimballere hareket veren eyleyiciler, Ruchservo Motor firmasından fırçasız DC motor olarak seçilmiştir. Mekanik ve elektronik parçalardan oluşan DC motorların matematik modelleri birçok bilimsel çalışma ile desteklenmiştir [28]. Bir motoru matematik olarak modellerken; mekanik olarak rotor atalet momenti I_m, motor sürtünme torku $T_{sür_m}$, tork dalgalanması T_r ve tork sabiti T_m, elektronik olarak indüktans L_m, motor direnci R_m ve geri elektro motor kuvveti (EMF; EMK) sabiti K_e parametreleri kullanılmaktadır.

Bir DC motor matematik modeli, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan etkiler barındırmaktadır. [29]'de, iki eksenli gimbal kontrolünde oluşturulan matematik modelde, motor modeli çok basit bir yapıda tutulmuştur. Bu çalışmada ise motorun Coulomb sürtünmesi, manyetik alanların birleşmesi, manyetik akının hareketine karşı koyan vuruntu momenti gibi etkilere sebep olan tork dalgalanma etkisi ve motor mekanik dengesizliği de modellemeye dahil edilmiştir.

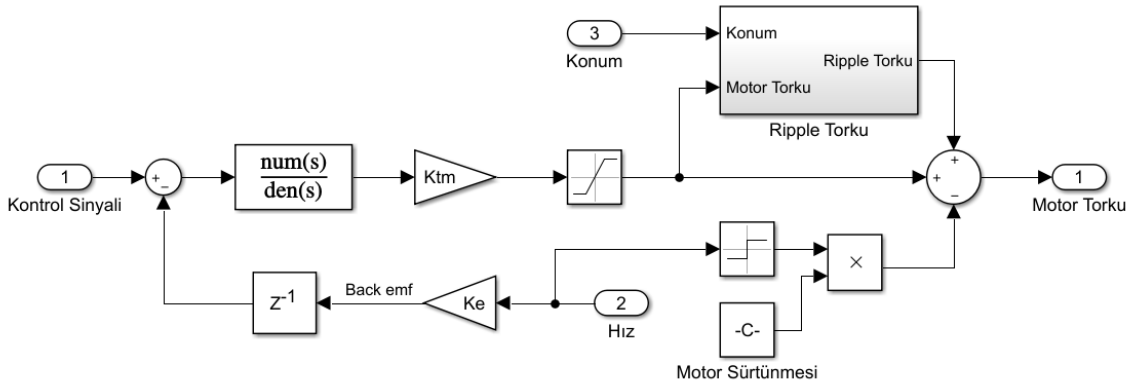
Tork dalgalanması akustik gürültüye, mekanik titreşime ve sonuç olarak pozisyon ve hız kontrollerinin istenilen doğrulukta olmamasına sebebiyet vermektedir [30]. Şekil 2.10'da görüldüğü üzere tork dalgalanmasının karakteri, dalgalanma frekansı ve açısal yer değiştirmenin fonksiyonu olan sinüs fonksiyonuna benzemektedir. Buradaki dalgalanma

torku değeri, ortalama tork ile maksimum tork değeri arasındaki farkın yüzde değişimi olmaktadır. Bunun yanında dalgalanma frekansı ise motorun bir dönüşü sırasındaki dalgalanma çevrimi sayısını göstermektedir [31].



Şekil 2.10. Tork dalgalanma etkisi [31]

Tasarlanan hareketli platformda her bir eksene hareket sağlama amacı ile farklı iki motor seçilmiştir. Simülasyonda kullanılan motor modeli Şekil 2.11'de verilmiştir. Ayrıca bu motorların özelliklerine ilişkin bilgiler Çizelge 2.3'de yer almaktadır. Modelde kullanılan ripple torkunun matematik modeli EK-1'de verilmiştir.



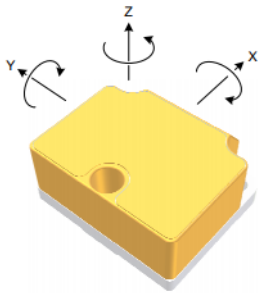
Şekil 2.11. Motor modeli

Çizelge 2.3. İç ve dış eksenlerin motor modellerinin paremetreleri

Parametreler	Birimler	Semboller	İç Gimbal	Dış Gimbal
Direnç	ohms	R_m	1.2	0.9
İndüktans	mH	L_m	1	1
Rotor Atalet Momenti	$kg.m^2$	I_m	0.0014	0.0011
Tork Sabiti	N.m/amp	K_m	1.2	1.2
Geri EMK Sabiti	V/(rad/s)	K_b	1	0.7
Tepe Torku	N.m	T_p	12.4	8.7
Motor Sürtünme Torku	N.m	$T_{sür_m}$	0.17	0.1
Tork Dalgalanması	%	T_r	0.05	0.03
Bir Tur içindeki Dalgalanma çevrimi	çevrim/tur	-	89	63

2.5. Ataletsel Ölçüm Birimi

Ataletsel ölçüm birimi, dünya üzerinde bir referans noktasına göre x, y ve z eksenlerindeki bağıl açısal hızları ölçen bütünleşik halde üç jiroskop içermektedir. Jiroskoplar navigasyon, yer bulma, izleme ve doğrulama sistemlerinde kullanılan, açısal momentumun korunma ilkesine bağlı olarak çalışan ve sistemdeki dönüyü ölçen aletlerdir. Geçmişten günümüze kadar gelen sürede birçok jiroskop tipi kullanılmıştır. Farklı jiroskop tipleri farklı amaçlarla, askeri ve endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılacak olan ataletsel ölçüm biriminin çıktıları kontrol döngülerini tamamlayarak sistemi kararlı hale getirmek için kullanılacaktır.



Resim 2.10. Kullanılan ataletsel ölçüm biriminin eksenlerinin gösterimi [32]

Çizelge 2.4. Seçilen ataletsel ölçüm birimi parametreleri [32]

Hız	º/s	±400
Çözünürlük	bit	24
Örnekleme oranı	örnek/s	2000
Güç ihtiyacı	V	5

2.6. Enkoder

Enkoderler, dönme eksenine yerleştirildiği elemanın hareket veya konum ölçümlerini sağlayan elektromekanik cihazlardır [33]. Bağlı bulundukları eksendeki hareketi, elektrik sinyalleri üreterek okunmasını sağlayacak olan kontrol devrelerine gönderirler. Bu özellikleri sayesinde kontrol sistemlerinde geri besleme olarak kullanılan bir elemandır [34]. Enkoder, kontrolcüye pozisyon, yön veya hız bilgisi gönderir, kontrolcü de bu bilgileri kullanarak sistem eyleyicilerine komut iletir.

Artımsal ve mutlak tip olmak üzere iki çeşit enkoder bulunmaktadır. Artımsal tip enkoderler her pozisyonda, çıkışta birbirinin aynısı olan kare dalgalar üretmektedir. Bu sinyaller de sayılarak pozisyon bilgisi elde edilmektedir. Artımsal tip enkoderler, enerji verildiği an ilk konumlarını sıfır kabul ederek sayım yapmaya başlamaktadır. Mutlak enkoderler ise her pozisyon için birbirine benzemeyen dijital sinyaller üreterek gerçek pozisyonu gösterebilmektedir. Mutlak enkoderler, enerji kesilince oldukları pozisyonu kaybetmedikleri için açıldıkları zaman da dahil olmak üzere her an oldukları konumu bilmektedirler [35].

Tasarlanan iki eksenli hareket platformunda enkoder olarak mutlak tip enkoder seçilmiştir. Çünkü platform gözetleme amaçlı kullanılacağı için enerji kesilse bile tekrar açıldığında, hangi konumda olduğuna göre yönlenmek istenilen noktaya gidebilmektedir. Seçilen enkoderin özellikleri Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Seçilen enkoder parametreleri

Çözünürlük	bit	21
Hassasiyet	mrad	0.32
Güvenirlik	-	1
Maksimum hız	rpm	5760
Haberleşme	-	RS422
Güç ihtiyacı	VDC	5
Akım ihtiyacı	miliamp	<100

2.7. İki Eksenli Hareket Platformu Dinamik Denklemleri

Gimbal platformlarını modellemek için birçok matematik formülasyon bulunmaktadır. Ancak hiçbiri sistemin bütün dinamiklerini karşılayamamaktadır [36]. Bu çalışmada Iki eksenli hareket platformunun iç ve dış gimbal eksenlerinin dinamik denklemlerinin çıkarılmasında Newton-Euler denklemleri kullanılmıştır. Burada iç ve dış gimballere etkiyen doğrusal kuvvetler, gimbal eksenleri üzerinde herhangi bir net tork üretmediğinden ve doğrusal bir hareket olmadığından dolayı, Newton denklemleri incelenmemiş ve yalnızca dönme hareketlerini inceleyen Euler denklemleri göz önüne alınmıştır [37]. Bu bölümde özellikle doğrusal olmayan durumlar ve bozucu etkiler üzerinde durulmuştur.

İç ve dış gimbal üzerinde etkili olan bozucu faktörler, başlıca sürtünme ve mekanik dengesizliklerdir. Sistem performansını mekanik dengesizliklerden çok sürtünme etkilemektedir. Eğer ki gimbal sistemlerinin kütle dağılımı, kendi eksenleri etrafında düzgün bir şekilde yapılmış ise mekanik dengesizlik ortadan kaldırılabilmektedir. Ele alınan sistemde kütle dağılımı, sisteme ekstra bir bozucu etki yapmaması adına dönme ekseni etrafında dengeli olarak yerleştirilmiştir. Bu sebeple mekanik dengesizlik nedeni ile ortaya çıkacak olan bozucu etkiler, ihmal edilecek seviyede olacağından, ortaya çıkarılan modele dahil edilmemiştir.

Çizelge 2.6. 3D model üzerinden alınan dış ve iç gimbal parametreleri

Gimbal	Parametreler	Birimler	Semboller	Değerler
Dış Gimbal	Atalet Matris Elemanları	$kg.m^2$	I^O_{xx} I^O_{yy} I^O_{zz} $I^O_{yz}=I^O_{zy}$ $I^O_{xy}=I^O_{yx}$ $I^O_{xz}=I^O_{zx}$	0.338 0.606 0.355 -0.034 0.002 -0.01
	Dış Gimbalin Kütlesi	kg	m_O	16.8
İç Gimbal	Atalet Matris Elemanları	$kg.m^2$	I^I_{xx} I^I_{yy} I^I_{zz} $I^I_{yz}=I^I_{zy}$ $I^I_{xy}=I^I_{yx}$ $I^I_{xz}=I^I_{zx}$	0.266 0.329 0.157 -0.01162 0.00017 0,00026
	İç Gimbalin Kütlesi	kg	m_I	16.3

2.7.1. İç gimbal

İç gimbal üzerinde gerçekleşen öteleme hareketi için Newton denklemi aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$F_{OI} = m_1 (A_{CG_I} - g) \tag{2.44}$$

CG: Ağırlık merkezi

F_{OI}: İç gimbali ağırlık merkezine dış gimbal tarafından uygulanan doğrusal kuvvet

m_1: İç gimbalin kütlesi

A_{CG_I}: İç gimbalin ağırlık merkezinin doğrusal ivmesi

g: yerçekimi kuvveti

İç gimbalin dönme noktası Resim 2.3'de gösterilen P etrafındaki açısal momentumu $H_{I,P}$

aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$H_{I,P} = I_P^I \cdot \Omega_{Ie} \tag{2.45}$$

I_P^I: İç gimbalin, dönme ekseni P etrafındaki atalet tensörü

Ω_{Ie}: İç gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre olan açısal hızı

Burada iç gimbale etkiyen toplam momenti bulmak için iç gimbalin açısal momentumunun zamana göre türevini almak yeterli olmaktadır. Hesaplamalar sonucunda iç gimbalin dönme noktası etrafındaki Euler denklemi aşağıda verilmiştir.

$$I_P^I \cdot \alpha_{Ie} + \Omega_{Ie} \times I_P^I \cdot \Omega_{Ie} = M_{OI} \tag{2.46}$$

α_{Ie}: İç gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal ivmesi

Ω_{Ie}: İç gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal hızı

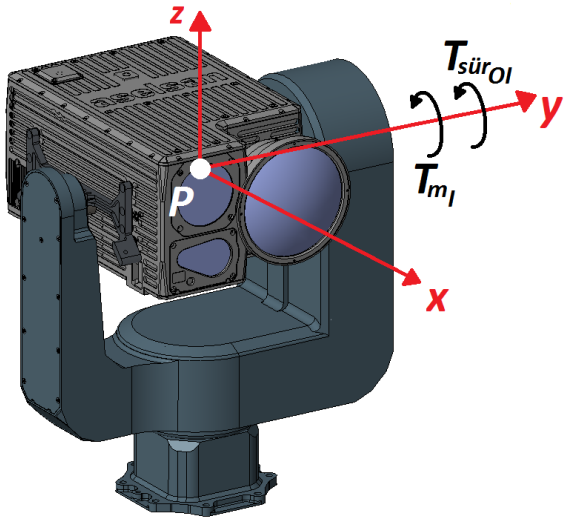
M_{OI}: Dış gimbal tarafından iç gimbale uygulanan moment

Bunun yanı sıra iç gimbale iletilen moment, Resim 2.11.'de gösterilen biçimde olup, 2.47'de verilen şekilde ifade edilmektedir.

$$M_{OI} = \begin{bmatrix} M_{OI_x} \\ T_{m_I} + T_{sür_{OI}} \\ M_{OI_z} \end{bmatrix} \tag{2.47}$$

T_{m_I}: İç gimbale iletilen motor torku

$T_{sür_{OI}}$: İç ve dış gimballer arasında oluşan sürtünme torku



Resim 2.11. İki eksenli hareket platformunun y ekseni üzerine düşen torklar

(2.47) denkleminde verilen T_{m_I} + $T_{sür_{OI}}$ tork ifadesi yalnızca y ekseni üzerinde iletildiği için x ve z eksenleri üzerinde dış gimbal tarafında iç gimbale iletilen tork terimleri ihmal edilmiştir. İç gimbalin atalet tensörü aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$I_P^I = \begin{bmatrix} I_{xx}^I & I_{xy}^I & I_{xz}^I \\ I_{yx}^I & I_{yy}^I & I_{yz}^I \\ I_{zx}^I & I_{xy}^I & I_{zz}^I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{m_{iç}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx}^I & I_{xy}^I & I_{xz}^I \\ I_{yx}^I & I_{yy}^I + I_{m_{iç}} & I_{yz}^I \\ I_{zx}^I & I_{xy}^I & I_{zz}^I \end{bmatrix} \tag{2.48}$$

$I_{m_{iç}}$: İç gimbalde kullanılan motorun ataleti

Euler denklemlerini, yukarıdaki denklemler dahilinde tekrar yazmak gerekirse aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} I_{xx}^I & I_{xy}^I & I_{xz}^I \\ I_{yx}^I & I_{yy}^I + I_{m_{iç}} & I_{yz}^I \\ I_{zx}^I & I_{zy}^I & I_{zz}^I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{Ie_x} \\ \alpha_{Ie_y} \\ \alpha_{Ie_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega_{Ie_x} \\ \Omega_{Ie_y} \\ \Omega_{Ie_z} \end{bmatrix} \mathrm{x} \begin{bmatrix} I_{xx}^I & I_{xy}^I & I_{xz}^I \\ I_{yx}^I & I_{yy}^I + I_{m_{iç}} & I_{yz}^I \\ I_{zx}^I & I_{xy}^I & I_{zz}^I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_{Ie_x} \\ \Omega_{Ie_y} \\ \Omega_{Ie_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ T_{m_I} + T_{sür_{OI}} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.49}$$

Bu eşitliğin sonucunda iç gimbalin x, y ve z eksenleri için açısal ivmeler ve açısal hızlardan oluşan üç denklem çıkarılabilmektedir.

$$I^I_{xx}\alpha_{Ie_x} + I^I_{xy}\alpha_{Ie_y} + I^I_{xz}\alpha_{Ie_z} + \Omega_{Ie_z}\left[(I^I_{yx}\Omega_{Ie_x} + (I^I_{yy} + I_{m_{iç}})\Omega_{Ie_y} + I^I_{yz}\Omega_{Ie_z})\right]$$
$$-\Omega_{Ie_y}\left[(I^I_{zx}\Omega_{Ie_x} + I^I_{zy}\Omega_{Ie_y} + I^I_{zz}\Omega_{Ie_z})\right] = 0 \qquad (2.50)$$

$$I^I_{xy}\alpha_{Ie_x} + (I^I_{yy} + I_{m_{iç}})\alpha_{Ie_y} + I^I_{yz}\alpha_{Ie_z} - \Omega_{Ie_z}\left[(I^I_{xx}\Omega_{Ie_x} + I^I_{xy}\Omega_{Ie_y} + I^I_{xz}\Omega_{Ie_z})\right]$$
$$+\Omega_{Ie_x}\left[(I^I_{zx}\Omega_{Ie_x} + I^I_{zy}\Omega_{Ie_y} + I^I_{zz}\Omega_{Ie_z})\right] = T_{m_I} + T_{sür_{OI}} \qquad (2.51)$$

$$I^I_{xz}\alpha_{Ie_x} + I^I_{zy}\alpha_{Ie_y} + I^I_{zz}\alpha_{Ie_z} + \Omega_{Ie_y}\left[(I^I_{xx}\Omega_{Ie_x} + I^I_{xy}\Omega_{Ie_y} + I^I_{xz}\Omega_{Ie_z})\right]$$
$$-\Omega_{Ie_x}\left[(I^I_{yx}\Omega_{Ie_x} + I^I_{zy}\Omega_{Ie_y} + I^I_{yz}\Omega_{Ie_z})\right] = 0 \qquad (2.52)$$

Sistem dinamik dengeli kabul edildiği için atalet matrisinin diagonal olması gerekmektedir. Bu bilgi göz önüne alındığında, üzerinde tork etkisi bulunan y ekseninde gerçekleşen dinamik denklem 2.51 aşağıdaki şekle indirgenebilir.

$$(I^I_{yy} + I_{m_{iç}})\alpha_{Ie_y} = T_{m_I} + T_{sür_{OI}} \qquad (2.53)$$

2.7.2. Dış gimbal

Dış gimbal için Newton denklemi aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$F_{IO} = - F_{OI} \qquad (2.54)$$

$$F_{BO} + F_{IO} = (m_O + m_1)\,(A_{G_O} - g) \qquad (2.55)$$

F_{BO}: Gimbal tabanından dış gimbalin ağırlık merkezine uygulanan doğrusal kuvvet

F_{OI}: Dış gimbali ağırlık merkezine iç gimbal tarafından uygulanan doğrusal kuvvet

m_O: Dış gimbalin kütlesi

A_{G_O}: Dış gimbalin ağırlık merkezinin doğrusal ivmesi

Dış gimbalin dönme noktası Resim 2.3'de gösterilen P etrafındaki açısal momentumu $H_{O,P}$ aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$H_{O,P} = I_P^O \cdot \Omega_{Oe} + T_{IO} \cdot I_P^I \cdot \Omega_{Ie} \tag{2.56}$$

I_P^O: Dış gimbalin, dönme ekseni P etrafındaki atalet tensörü

Ω_{Oe}: Dış gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre olan açısal hızı

Burada iç gimbale etkiyen toplam momenti bulmak için iç gimbalin açısal momentumunun zamana göre türevini almak yeterli olmaktadır. Dış gimbalin dönme noktası etrafındaki Euler denklemi aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$I_P^O \cdot \alpha_{Oe} + \dot{T}_{IO} \cdot I_P^I \cdot \Omega_{Ie} + T_{IO} \cdot I_P^I \cdot \alpha_{Ie} + \Omega_{Oe} x (I_P^O \cdot \Omega_{Oe} + T_{IO} \cdot I_P^I \cdot \Omega_{Ie}) = M_{BO} + M_{IO} \tag{2.57}$$

I_P^I: İç gimbalin dönme ekseni etrafındaki atalet tensörü

I_P^O: Dış gimbalin dönme ekseni etrafındaki atalet tensörü

α_{Ie}: İç gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal ivmesi

α_{Oe}: Dış gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal ivmesi

Ω_{Ie}: İç gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal hızı

Ω_{Oe}: Dış gimbalin dünya üzerindeki referans noktaya göre açısal hızı

M_{BO}: Gimbal tabanından dış gimbale uygulanan moment

M_{OI}: Dış gimbal tarafından iç gimbale uygulanan moment

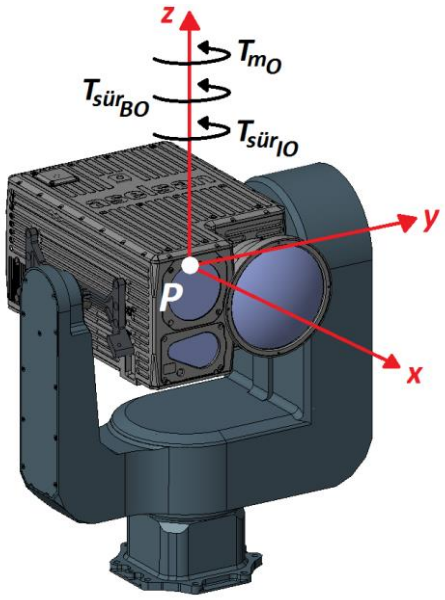
Bunun yanı sıra iç gimbale iletilen moment, Resim 2.12'de gösterilen biçimde olup, 2.58'de verilen şekilde ifade edilmektedir.

$$M_{IO} = \begin{bmatrix} M_{IO_x} \\ M_{IO_y} \\ T_{sür_{IO}} \end{bmatrix}, M_{BO} = \begin{bmatrix} M_{BO_x} \\ M_{BO_y} \\ T_{m_O} + T_{sür_{BO}} \end{bmatrix} \tag{2.58}$$

T_{m_O}: Dış gimbale iletilen motor torku

$T_{sür_{BO}}$: Gimbal tabanı ile dış gimbal arasında oluşan sürtünme torku

$T_{sür_{IO}}$: İç ve dış gimballer arasında oluşan sürtünme torku



Resim 2.12. İki eksenli hareket platformunun z ekseni üzerine düşen torklar

Gimbal tabanı ile dış gimbal arasındaki bağlantı noktalarında, hareket yalnızca z ekseni etrafında gerçekleşmektedir. Bu yüzden T_{m_O} + $T_{sür_{BO}}$ tork ifadesi dış gimbale doğrudan iletilen torklar iken $T_{sür_{IO}}$ dolaylı olarak iletilen torktur.

Dış gimbalin atalet tensörü ise aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$I_P^O = \begin{bmatrix} I_{xx}^O & I_{xy}^O & I_{xz}^O \\ I_{yx}^O & I_{yy}^O & I_{yz}^O \\ I_{zx}^O & I_{zy}^O & I_{zz}^O \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{m_{dış}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx}^O & I_{xy}^O & I_{xz}^O \\ I_{yx}^O & I_{yy}^O + I_{m_{dış}} & I_{yz}^O \\ I_{zx}^O & I_{xy}^O & I_{zz}^O \end{bmatrix} \tag{2.59}$$

$I_{m_{dış}}$: Dış gimbalde kullanılan motorun ataleti

Euler denklemleri, $M_{IO_x} = M_{IO_y} = 0$, $M_{BO_x} = M_{BO_y} = 0$ olarak kabul edilerek, yukarıdaki eşitlikler dahilinde tekrar yazıldığında aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$
\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} I^O_{xx} & I^O_{xy} & I^O_{xz} \\ I^O_{yx} & I^O_{yy} & I^O_{yz} \\ I^O_{zx} & I^O_{zy} & I^O_{zz}+I_{m_{dış}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \alpha_{Oe_x} \\ \alpha_{Oe_y} \\ \alpha_{Oe_z} \end{bmatrix}+\dot{\varepsilon}\begin{bmatrix} \sin\varepsilon & 0 & \cos\varepsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos\varepsilon & 0 & \sin\varepsilon \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I^I_{xx} & I^I_{xy} & I^I_{xz} \\ I^I_{yx} & I^I_{yy}+I_{m_{iç}} & I^I_{yz} \\ I^I_{zx} & I^I_{zy} & I^I_{zz} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Omega_{Ie_x} \\ \Omega_{Ie_y} \\ \Omega_{Ie_z} \end{bmatrix} \\
&+\begin{bmatrix} \cos\varepsilon & 0 & \sin\varepsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varepsilon & 0 & \cos\varepsilon \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I^I_{xx} & I^I_{xy} & I^I_{xz} \\ I^I_{yx} & I^I_{yy}+I_{m_{iç}} & I^I_{yz} \\ I^I_{zx} & I^I_{zy} & I^I_{zz} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \alpha_{Ie_x} \\ \alpha_{Ie_y} \\ \alpha_{Ie_z} \end{bmatrix} \\
&+\begin{bmatrix} \Omega_{Oe_x} \\ \Omega_{Oe_y} \\ \Omega_{Oe_z} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} I^O_{xx} & I^O_{xy} & I^O_{xz} \\ I^O_{yx} & I^O_{yy} & I^O_{yz} \\ I^O_{zx} & I^O_{zy} & I^O_{zz}+I_{m_{dış}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Omega_{Oe_x} \\ \Omega_{Oe_y} \\ \Omega_{Oe_z} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \Omega_{Ie_x} \\ \Omega_{Ie_y} \\ \Omega_{Ie_z} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \cos\varepsilon & 0 & \sin\varepsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varepsilon & 0 & \cos\varepsilon \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I^I_{xx} & I^I_{xy} & I^I_{xz} \\ I^I_{yx} & I^I_{yy}+I_{m_{iç}} & I^I_{yz} \\ I^I_{zx} & I^I_{zy} & I^I_{zz} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Omega_{Ie_x} \\ \Omega_{Ie_y} \\ \Omega_{Ie_z} \end{bmatrix} \\
&=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_{m_O}+T_{sür_{BO}} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_{sür_{IO}} \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{2.60}
$$

Bu eşitliğin sonucunda iç gimbalin x, y ve z eksenleri için açısal ivmeler ve açısal hızlardan oluşan üç denklemi çıkarılabilmektedir

$$
\begin{aligned}
&I^O_{xx}\alpha_{Oe_x}+I^O_{xy}\alpha_{Oe_y}+I^O_{xz}\alpha_{Oe_z}+\Omega_{Ie_x}(I^I_{xx}\sin\varepsilon+I^I_{zx}\cos\varepsilon) \\
&+\Omega_{Ie_y}(I^I_{xy}\sin\varepsilon+I^I_{zy}\cos\varepsilon)+\Omega_{Ie_z}(I^I_{xz}\sin\varepsilon+I^I_{zz}\cos\varepsilon) \\
&+\alpha_{Ie_x}(I^I_{xx}\cos\varepsilon+I^I_{zx}\sin\varepsilon)+\alpha_{Ie_y}(I^I_{xy}\cos\varepsilon+I^I_{zy}\sin\varepsilon)+\alpha_{Ie_z}(-I^I_{xz}\sin\varepsilon+I^I_{zz}\cos\varepsilon) \\
&+\Omega_{Oe_z}(I^O_{yx}\Omega_{Oe_x}+I^O_{yy}\Omega_{Oe_y}+I^O_{yz}\Omega_{Oe_z})-\Omega_{Oe_y}(I^O_{zx}\Omega_{Oe_x}++I^O_{zy}\Omega_{Oe_y}+(I^O_{zz}+I_{m_{dış}})\Omega_{Oe_z}) \\
&+\Omega_{Ie_z}(I^I_{yx}\Omega_{Ie_x}+(I^I_{yy}+I_{m_{iç}})\Omega_{Ie_y}+I^I_{yz}\Omega_{Ie_z}) \\
&+\Omega_{Ie_y}((I^I_{xx}\Omega_{Ie_x}+I^I_{xy}\Omega_{Ie_y}+I^I_{xz}\Omega_{Ie_z})\sin\varepsilon-(I^I_{zx}\Omega_{Ie_x}+I^I_{zy}\Omega_{Ie_y}+I^I_{zz}\Omega_{Ie_z})\cos\varepsilon)=0
\end{aligned}
\tag{2.61}
$$

$$
\begin{aligned}
&I^O_{yx}\alpha_{Oe_x}+I^O_{yy}\alpha_{Oe_y}+I^O_{yz}\alpha_{Oe_z}+\Omega_{Ie_x}I^I_{yx}+\Omega_{Ie_y}(I^I_{yy}+I_{m_{iç}})+\Omega_{Ie_z}I^I_{yz} \\
&+\alpha_{Ie_x}I^I_{yx}+\alpha_{Ie_y}(I^I_{yy}+I_{m_{iç}})+\alpha_{Ie_z}I^I_{yz} \\
&-\Omega_{Oe_z}(I^O_{xx}\Omega_{Oe_x}+I^O_{xy}\Omega_{Oe_y}+I^O_{xz}\Omega_{Oe_z})+\Omega_{Oe_x}(I^O_{zx}\Omega_{Oe_x}++I^O_{zy}\Omega_{Oe_y}+(I^O_{zz}+I_{m_{dış}})\Omega_{Oe_z}) \\
&-\Omega_{Ie_z}((I^I_{xx}\Omega_{Ie_x}+I^I_{xy}\Omega_{Ie_y}+I^I_{xz}\Omega_{Ie_z})\cos\varepsilon+(I^I_{zx}\Omega_{Ie_x}+I^I_{zy}\Omega_{Ie_y}+I^I_{zz}\Omega_{Ie_z})\sin\varepsilon) \\
&-\Omega_{Ie_x}((I^I_{xx}\Omega_{Ie_x}+I^I_{xy}\Omega_{Ie_y}+I^I_{xz}\Omega_{Ie_z})\sin\varepsilon-(I^I_{zx}\Omega_{Ie_x}+I^I_{zy}\Omega_{Ie_y}+I^I_{zz}\Omega_{Ie_z})\cos\varepsilon)=0
\end{aligned}
\tag{2.62}
$$

$$
\begin{aligned}
&I_{zx}^{O}\alpha_{Oe_x}+(I_{zz}^{O}+I_{m_{dış}})\alpha_{Oe_y}+I_{zz}^{O}\alpha_{Oe_z}-\Omega_{Ie_x}(I_{xx}^{I}\cos\varepsilon-I_{zx}^{I}\sin\varepsilon)\\
&-\Omega_{Ie_y}(I_{xy}^{I}\cos\varepsilon-I_{zy}^{I}\sin\varepsilon)-\Omega_{Ie_z}(I_{xz}^{I}\cos\varepsilon-I_{zz}^{I}\sin\varepsilon)\\
&-\alpha_{Ie_x}(I_{xx}^{I}\sin\varepsilon-I_{zx}^{I}\cos\varepsilon)-\alpha_{Ie_y}(I_{xy}^{I}\sin\varepsilon-I_{zy}^{I}\cos\varepsilon)-\alpha_{Ie_z}(I_{xz}^{I}\sin\varepsilon-I_{zz}^{I}\cos\varepsilon)\\
&+\Omega_{Oey}(I_{xx}^{O}\Omega_{Oe_x}+I_{xy}^{O}\Omega_{Oe_y}+I_{xz}^{O}\Omega_{Oe_z})-\Omega_{Oe_x}(I_{yx}^{O}\Omega_{Oe_x}++I_{yy}^{O}\Omega_{Oe_y}+I_{yz}^{O}\Omega_{Oe_z})\\
&+\Omega_{Iey}((I_{xx}^{I}\Omega_{Ie_x}+I_{xy}^{I}\Omega_{Ie_y}+I_{xz}^{I}\Omega_{Ie_z})\cos\varepsilon+(I_{zx}^{I}\Omega_{Ie_x}+I_{zy}^{I}\Omega_{Ie_y}+I_{zz}^{I}\Omega_{Ie_z})\sin\varepsilon)\\
&-\Omega_{Ie_x}(I_{yx}^{I}\Omega_{Ie_x}+(I_{yy}^{I}+I_{m_{iç}})\Omega_{Ie_y}+I_{yz}^{I}\Omega_{Ie_z})=T_{m_O}+T_{sür_{BO}}+T_{sür_{IO}}
\end{aligned}
\tag{2.63}
$$

Sistem dinamik dengeli kabul edildiği için atalet matrisinin diagonal olması gerekmektedir. Bunun yanında çapraz kuplaj etkilerini de yok saymak için $\Omega_{Ie}=\alpha_{Ie}=0$ olarak kabul edildiğinde üzerinde tork etkisi bulunan z ekseninde gerçekleşen dinamik denklem (2.63) aşağıdaki şekle indirgenebilir.

$$
I_{zz}^{O}\alpha_{Oe_z}=T_{m_O}+T_{sür_{BO}}+T_{sür_{IO}} \tag{2.64}
$$

3. SİMÜLASYON ORTAMINDA KONTROLCÜ TASARIMI

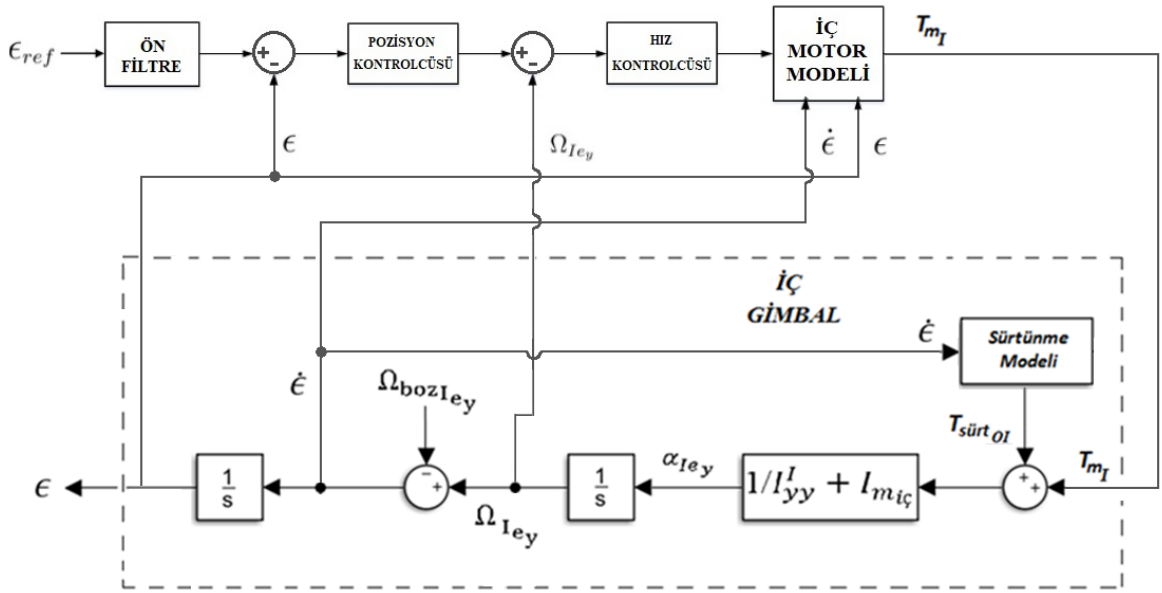
Bu bölümde, çalışmada ele alınan iki eksenli hareket platformunun hassas bir şekilde verilen komutları uygulayabilmesi ve hedef takibi yapabilmesi için ihtiyaç duyulan kontrolcüler tasarlanmıştır. Bu kapsamda gimballerin hız ve pozisyon döngüleri için ardışık kontrolcü tasarımı yapılarak sistem kontrol altına alınmaya çalışılmıştır. Bütün bu çalışmalar için sistemin blok diyagramı Matlab/Simulink ortamında hazırlanmış ve parametre seçim işlemi bu platformda yapılmıştır.

Ardışık kontrolcü tasarım aşamasında, sistemde bulunan ve sistemin doğrusal yapısını bozan sürtünme modellenirken, LuGre modeli temel alınmıştır. Sürtünme modelinde ihtiyaç duyulan tek parametre, sistemin bağıl hızı olmuştur. Bu düzensizlik, sisteme dışarıdan etki eden bir bozucu kuvvet olarak eklenmiştir.

Kontrolcü tasarımında ulaşılmak istenen şartlar; 2 saniye veya daha kısa sürede oturma zamanı, %2 veya daha alt seviyede oturma aralığı ve %10 veya altı aşım olarak belirlenmiştir.

3.1. Sistemin Blok Diyagramının Çıkarılması

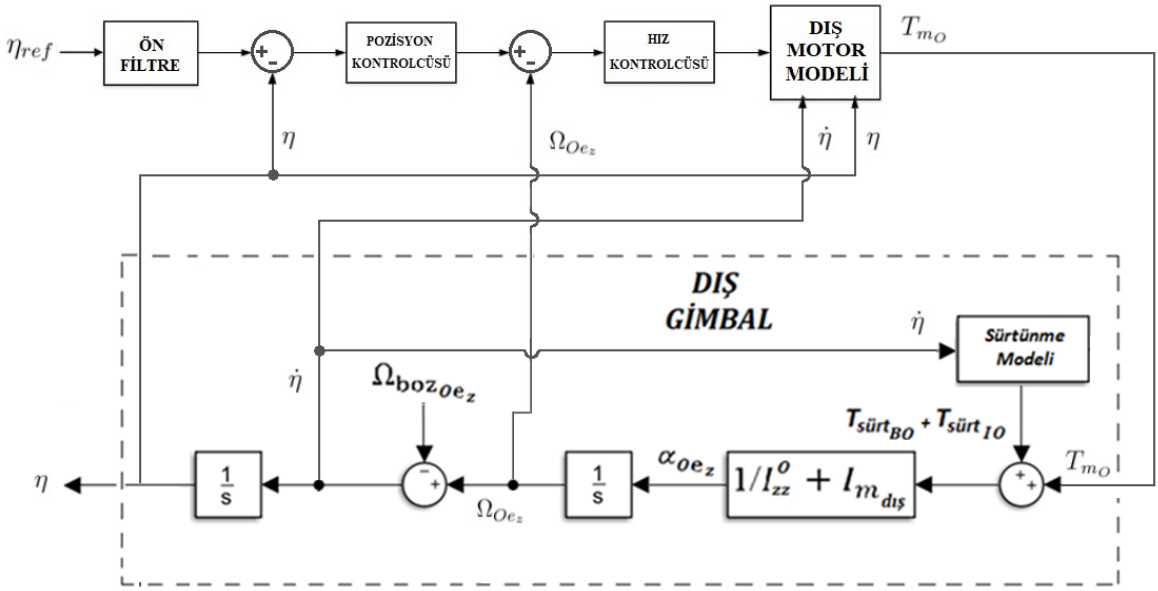
Benzetim tabanlı çalışmalar yapılabilmesi için Bölüm 2'de elde edilen dinamik denklemler kullanılarak sistemin blok diyagramı oluşturulmuştur. İç gimbal için Denklem 2.53'da bulunan eşitlik Şekil 3.1'de gösterilen biçimde blok diyagrama çevrilmiştir.



Şekil 3.1. İç gimbal ardışık kontrolcü blok diyagramı

Modelde ihtiyaç duyulan açısal hız $\Omega_{\mathrm{Ie_y}}$ ve açısal konum ϵ değerleri, sistem bloğunun çıkışında elde edilen ivmenin integral bloğu ile çarpılmasıyla bulunmuştur. Bunun yanında açısal hız terimi $\Omega_{\mathrm{bozI_{e_y}}}$ platformdan iç gimbale gelen bozucu etkileri temsil etmektedir. Bağıl hız terimi $\dot{\epsilon}$ ise açısal yer değiştirmenin değişim oranını göstermektedir [36]. İç gimbalin ataleti, motor ataleti ile iç gimbalin y ekseni üzerine denk gelen ataletinin toplamından oluşmaktadır. Sürtünme modelinin ihtiyaç duyduğu tek girdi, iç gimbalin bağıl hızı olmuştur. Son olarak motor modelinde ise iç gimbalin açısal konum ve açısal hız verilerine ihtiyaç duyulmuştur.

Dış gimbal için Denklem 2.64'da bulunan eşitlik, Şekil 3.2'de gösterilen biçimde blok diyagrama çevrilmiştir.



Şekil 3.2. Dış gimbal ardışık kontrolcü blok diyagramı

Modelde ihtiyaç duyulan açısal hız Ω_{Oe_z} ve açısal konum η değerleri sistem bloğunun çıkışında elde edilen ivmenin integral bloğu ile çarpılmasıyla bulunmuştur. Bunun yanında açısal hız terimi $\Omega_{boz_{Oe_z}}$ platformdan dış gimbale gelen bozucu etkileri, ή ise dış gimbalin bağıl hız terimini temsil etmektedir. Dış gimbalin ataleti, motor ataleti ile dış gimbalin z ekseni üzerine denk gelen ataletinin toplamından oluşmaktadır. Sürtünme modelinin ihtiyaç duyduğu tek girdi, dış gimbalin bağıl hızı olmuştur. Son olarak motor modelinde ise dış gimbalin açısal konum ve açısal hız verilerine ihtiyaç duyulmuştur.

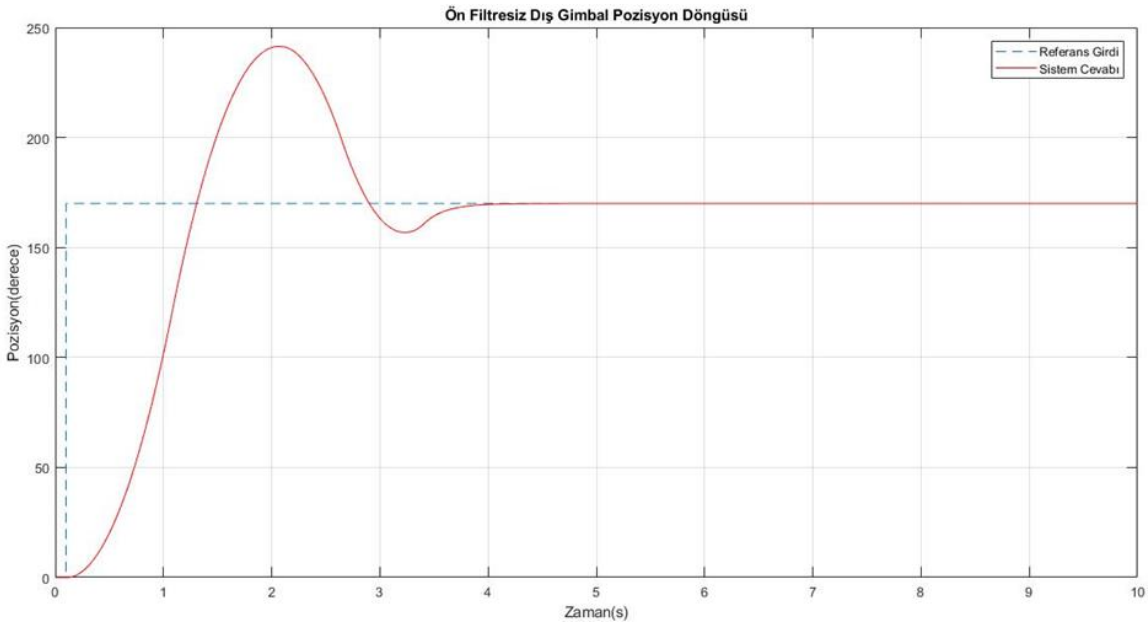
3.2. Ardışık Kontrolcü Tasarımı

Endüstriyel uygulamaların genelinde uygulanan kontrol stratejisinin, oransal, integral, türev (PID) kontrolcüsü olduğu söylenebilir. Çoğu PID kontrolcü uygulamasında türev terimi, frekans arttıkça sensör gürültüsünü artırdığı için katsayısı sıfır seçilerek etkisi sıfıra indirgenmektedir. Bu çalışmada sadece oransal ve integral terimleri kullanılarak kontrolcü tasarımı yapılmıştır. İntegral terimi, birim basamak girdisinde sistemin durağan durum hatasının üstesinden gelmek için, oransal terimi ise girdiye karşı sistemin tepki zamanının iyileştirmek için kullanılmaktadır [38].

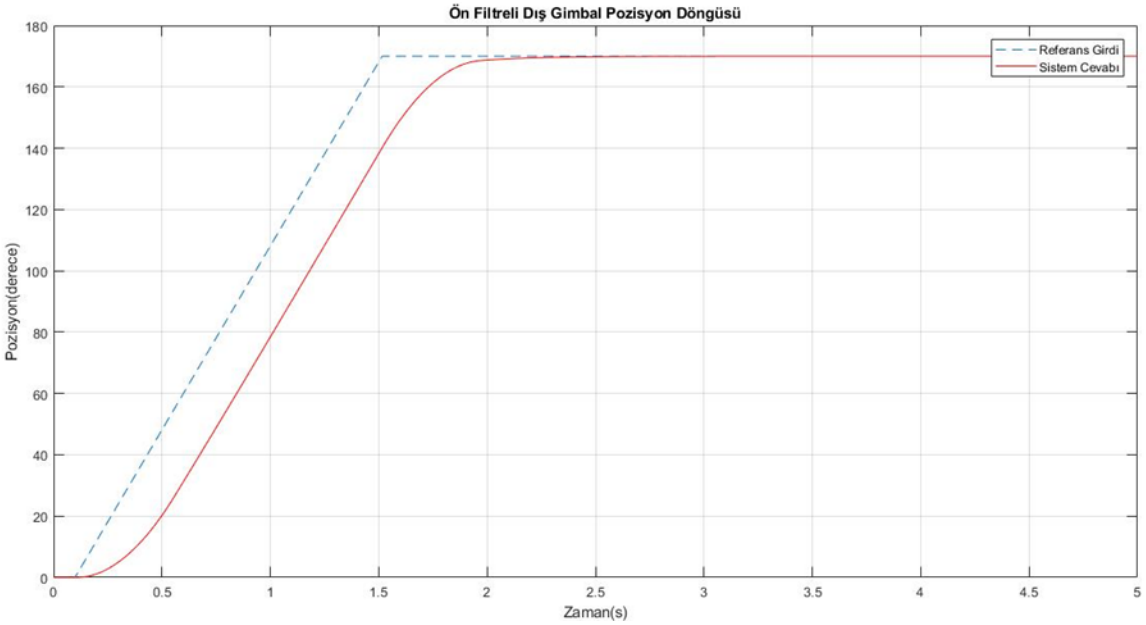
Ele alınan sistemde pozisyon ve hız döngüleri için tasarlanacak olan kontrolcülerin parametreleri dış gimbal ve iç gimbal için ayrı ayrı tasarlanmıştır. Tasarıma öncelikle

dışarıdan gelen etkileri yok etmek için kullanılacak olan hız döngüsündeki PI kontrolcüler ile başlanmıştır. Burada tasarlanacak olan kontrolcüler ne kadar iyi olursa pozisyon döngüsünde tasarlanacak olan kontrolcünün yükü o kadar azalacaktır. Dış ve iç gimbal hız döngüleri için tasarlanacak olan kontrolcüler seçildikten sonra kaliteli bir hedef takibi yapabilmek adına iki gimbal için de pozisyon döngülerindeki kontrolcü parametreleri seçilmiştir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de iki eksenli hareket platformunun ardışık kontrolcüsünün blok şeması verilmiştir. Görüldüğü gibi sisteme bir pozisyon girdisi verilmiştir. Bu girdi ilk olarak, anlık motor tepkisinin önüne geçilmesi için, bir ön filtreden geçerek pozisyon kontrolcüsüne ulaşmıştır. Buradan çıkan kontrol edilmiş hız referans bilgisi, yine bir ön filtreden geçerek hız kontrolcüsüne ulaşmıştır. Son olarak kontrol edilmiş hız bilgisi sisteme verilmiştir.

Pozisyon döngüsünde, referans konumun uygulanma anında ortaya çıkartacağı anlık değişimin, sistemi aşıma götürmesinin önüne geçmek gerekmektedir. Bunun için sistemin hızının kontrol altına alınması amacı ile bir ön filtre kullanılmıştır. Uygun bir ön filtre seçimi ile sistem takip edeceği hedefe daha hızlı ulaşabilecektir.



Şekil 3.3. Simülasyon ortamında, ön filtre uygulanmamış sistemin dış gimbalinin referans girdiye vermiş olduğu cevap



Şekil 3.4. Simülasyon ortamında, ön filtre uygulanmış sistemin dış gimbalinin referans girdiye vermiş olduğu cevap

Simülasyon ortamında yapılan çalışmalar sonucunda, Şekil 3.3'de ön filtresiz dış gimbal, istenilen konuma 3.3 saniyede otururken, Şekil 3.4'de maksimum hızı 100derece/s ile sınırlandırılmış dış gimbal, istenilen konuma 2.3 saniyede ulaşmıştır. Burada olduğu gibi dış ve iç gimbal pozisyon ve hız döngüsünde de ön filtre kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Seçilen ön filtre değerleri

	Birim	Ön Filtre Değeri
Dış Gimbal Pozisyon Döngüsü	derece	100
İç Gimbal Pozisyon Döngüsü	derece	60

Sürekli zamanlı bir PI kontrolcünün transfer fonksiyonu,

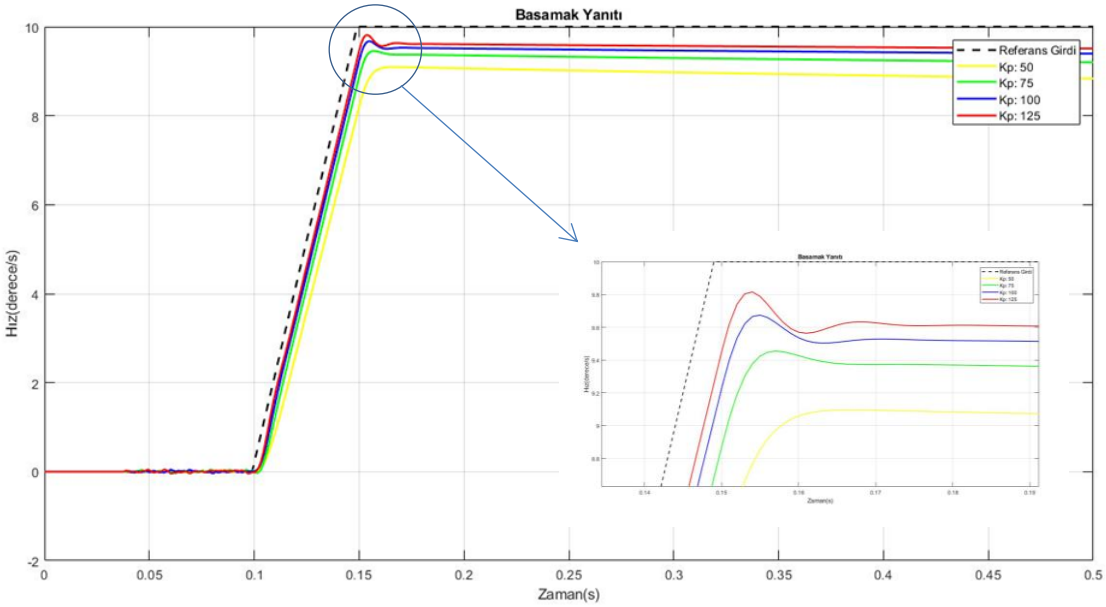
$$C_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{3.1}$$

şeklindedir. Burada K_p kontrolcünün oransal kazanç katsayısı iken K_i ise kontrolcünün integral kazanç katsayısını göstermektedir.

3.2.1. İç gimbal ardışık kontrolcüleri

<u>İç gimbal hız kontrolcüsü</u>

İki eksenli hareket platformu iç gimbalinin hız döngüsünde kullanılacak olan PI kontrolcüsünün K_p ve K_i değerleri bulunmuştur. Bunun için ilk önce integral kazancı K_i'nin sıfır olduğu durum için oransal kazanç K_p'ye farklı değerler verilmiş ve sistemin giriş değerine göstermiş olduğu tepki incelenerek en iyi K_p değeri elde edilmiştir.



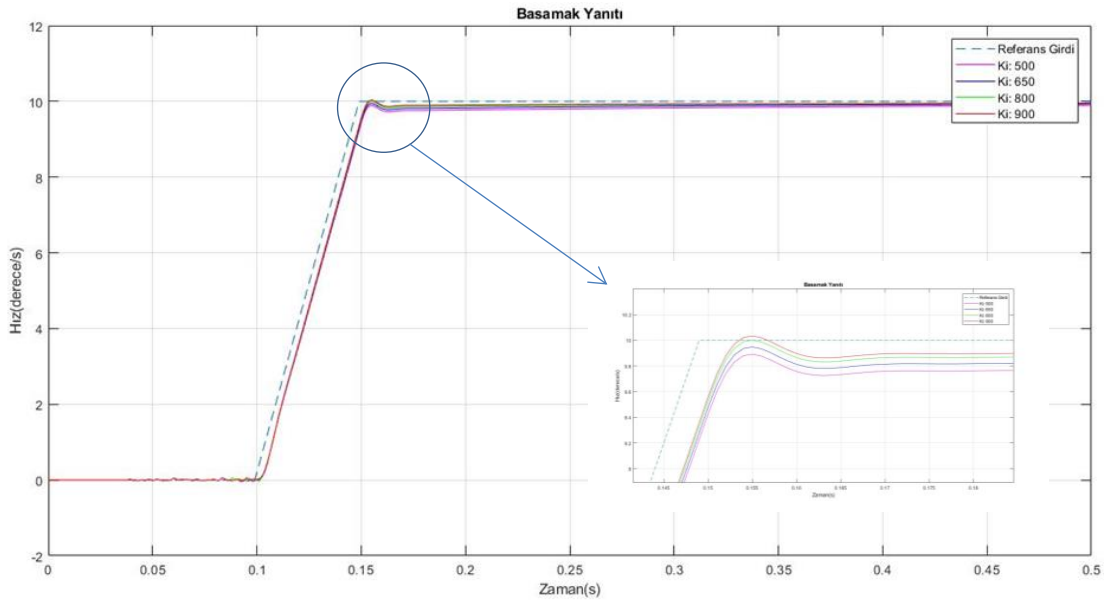
Şekil 3.5. Simülasyon ortamında, iç gimbal hız döngüsünün farklı K_p değerleri için tepkisi

Çizelge 3.2. Simülasyon ortamında, iç gimbal hız döngüsünün farklı K_p değerlerine göre kontrolcü performansı

K_p Değerleri	Aşım (%)	Oturma Süresi (s)	Durağan Durum Hatası (%)
50	0	3	<16
75	0	2.8	<11
100	0	2.4	<8
125	0	2.3	<7

Simülasyon ortamında, çizelge 3.2'de görüldüğü üzere $K_p = 100$ değeri için en iyi performans verilerine ulaşılmıştır. Bu sebepten ötürü $K_p = 100$ olarak seçilmiştir.

Şekil 3.5'de görüldüğü gibi simülasyon ortamında, hız döngüsünde yalnızca oransal kazanç kullanıldığında sistemde devamlı durum hatası meydana gelmiştir. Bu hatayı sıfıra yaklaştırmak ve arzu edilen çıkış sinyalini elde edebilmek amacıyla, uygun bulunan K_p değerinin yanında farklı integral kazanç K_i değerleri için sistemin göstermiş olduğu tepkiler incelenmiştir.



Şekil 3.6. Simülasyon ortamında, iç gimbal hız döngüsünün farklı K_i değerleri için tepkisi

Çizelge 3.3. Simülasyon ortamında, iç gimbal hız döngüsünün farklı K_i değerlerine göre kontrolcü performansı

K_i Değerleri	Aşım (%)	Oturma Süresi (s)	Durağan Durum Hatası (%)
500	0.5	0.168	<2
650	0	0.167	<2
800	0	0.152	<2
900	0	0.152	<2

Simülasyon ortamında, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi $K_i = 800$ değerinden sonra sistemde bir miktar aşım gözlemlenmiştir. Bu aşım hareketli platformun hedef takibi esnasında

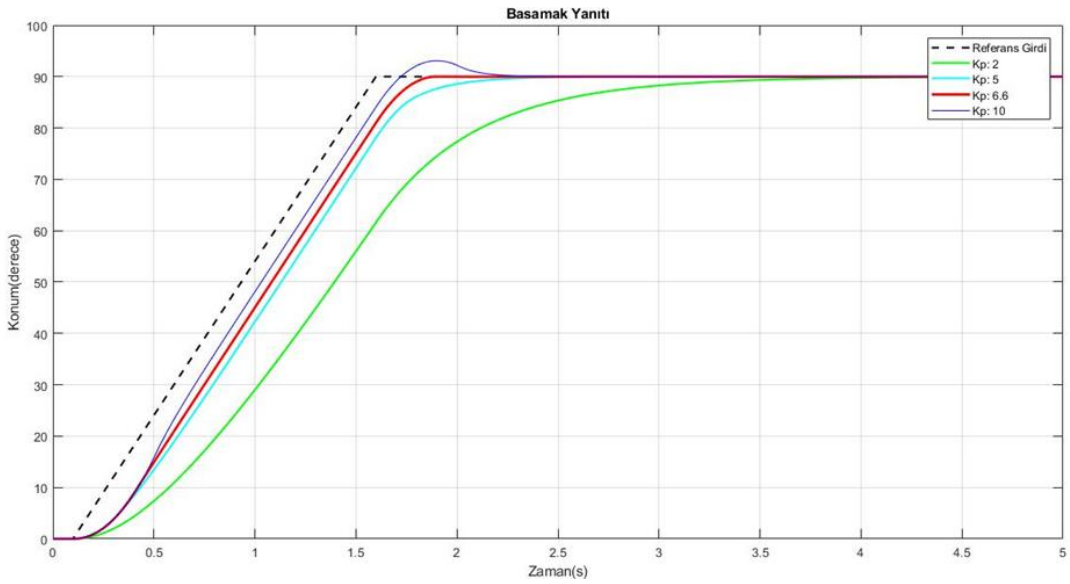
olumsuzluk yaratabilecek bir etki olduğundan $K_i = 800$ olarak seçilmiştir. Bu durumda iç gimbal hız kontrolcüsü;

$$C_{P_{OI}}(s) = 100 + \frac{800}{s} \tag{3.2}$$

olarak belirlenmiştir.

<u>İç gimbal pozisyon kontrolcüsü</u>

İç gimbalin pozisyon döngüsünde kullanılacak olan P kontrolcünün oransal kazanç katsayısı bulunmuştur. Bunun için simülasyon ortamında, farklı K_p değerleri verilerek sistemin tepkisi ölçülmüştür.

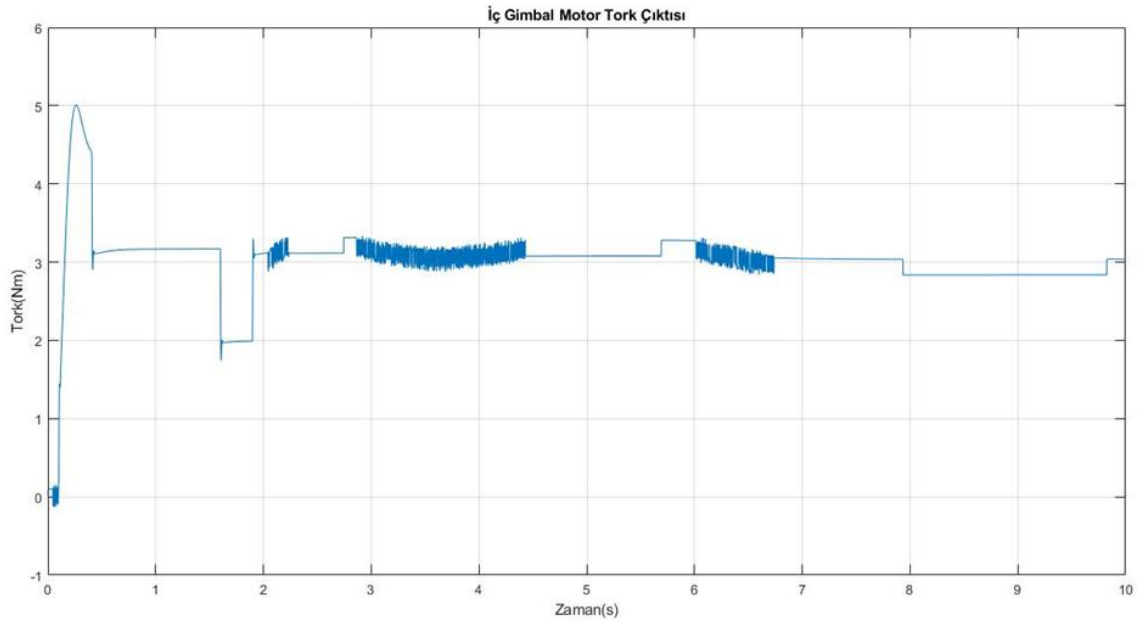


Şekil 3.7. Simülasyon ortamında, iç gimbal pozisyon döngüsünün farklı K_p değerleri için tepkisi

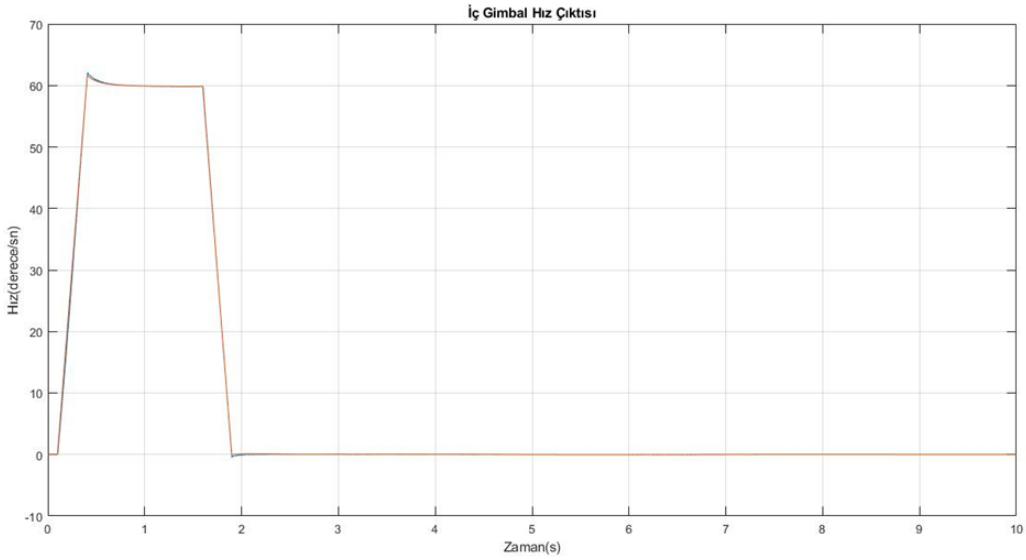
Çizelge 3.4. Simülasyon ortamında, iç gimbal pozisyon döngüsünün farklı K_p değerlerine göre kontrolcü performansı

K_p Değerleri	Aşım (%)	Oturma Süresi (s)	Durağan Durum Hatası (%)
2	3.2	2.5	<1
5	0	2	<1
6.6	0	1.8	<1
10	0	2	<1

Simülasyon ortamında, çizelge 3.4 incelendiği zaman K_p = 6.6 değeri için iç gimbal referans pozisyonunun ön filtreden geçtikten sonra t=1.8 saniyede beklenen değere oturduğu gözlenmiştir. Pozisyon çıktısında bu değer için bir aşım veya durağan durum hatası oluşmadığından sadece oransal kontrolcü yardımı ile pozisyon döngüsü kontrol altına alınmıştır. K_p = 6.6 değeri için iki eksenli hareket platformunun iç gimbalinin benzetim tabanında elde edilen motor tork eğrisi ve hız çıkış eğrisi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.8. Simülasyon ortamında, iç gimbal motor tork çıktısı

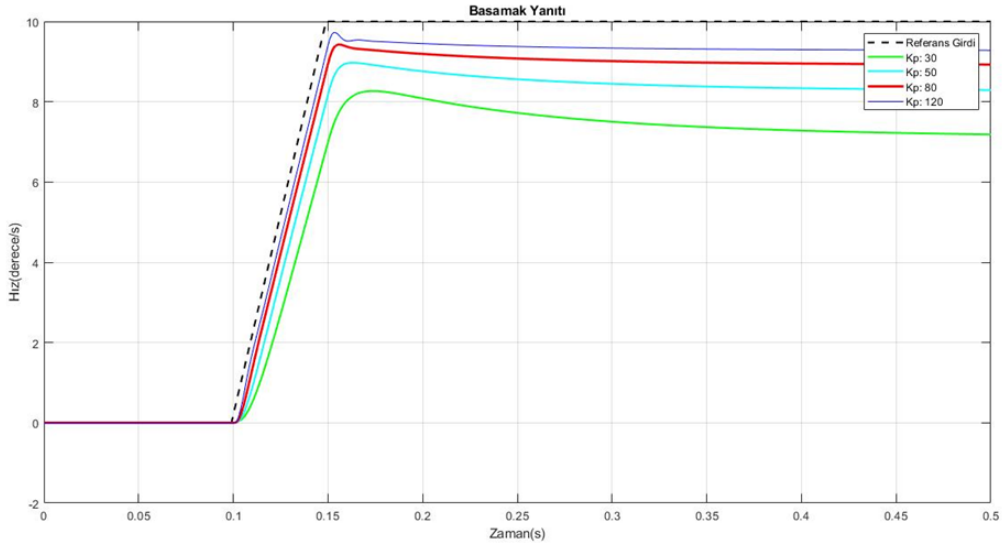


Şekil 3.9. Simülasyon ortamında, iç gimbal hız çıktısı

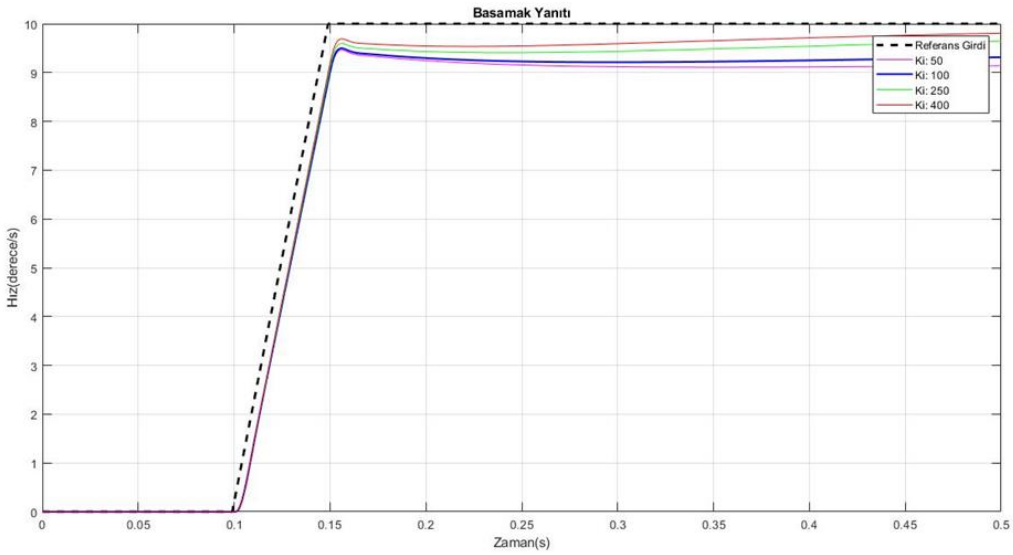
3.2.2. Dış gimbal ardışık kontrolcüleri

<u>Dış gimbal hız kontrolcüsü</u>

Dış gimbal için hız kontrolü yaparken, aynı iç gimbal hız döngüsünde olduğu gibi simülasyon ortamında, önce kullanılacak kontrolcünün K_p değeri bulunmuştur. Bunun için kontrolcü integral kazancı $K_i = 0$ seçilerek farklı K_p değerleri için hız döngüsünün tepkisine bakılmış ve en uygun oransal kazanç değeri seçilmiştir.

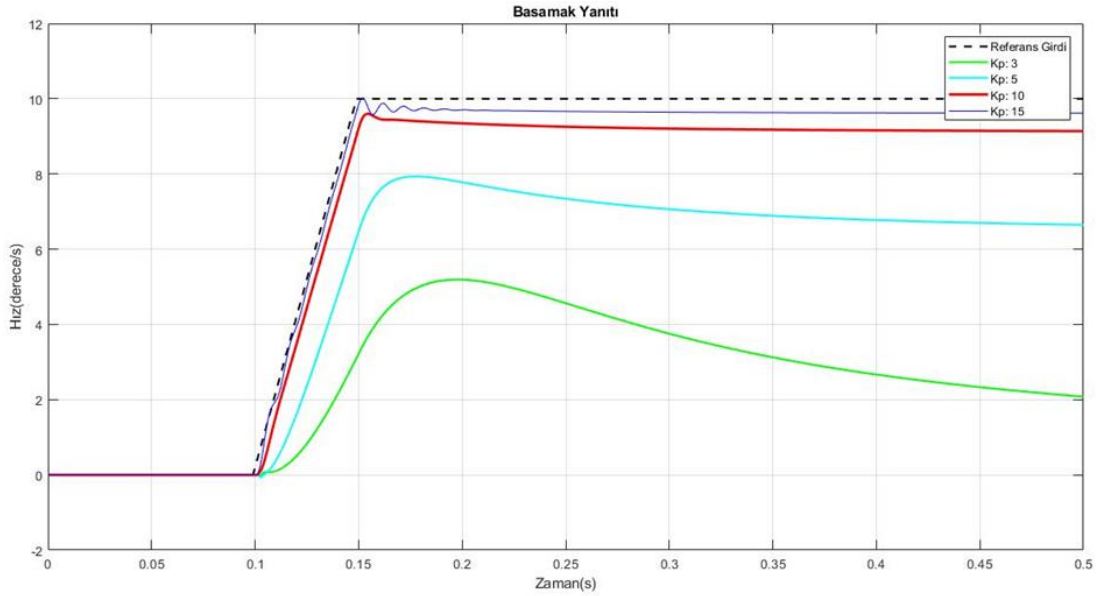


Şekil 3.10. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün K_i=0 iken farklı K_p değerlerine tepkisi



Şekil 3.11. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün K_p= 80 iken farklı K_i değerlerine tepkisi

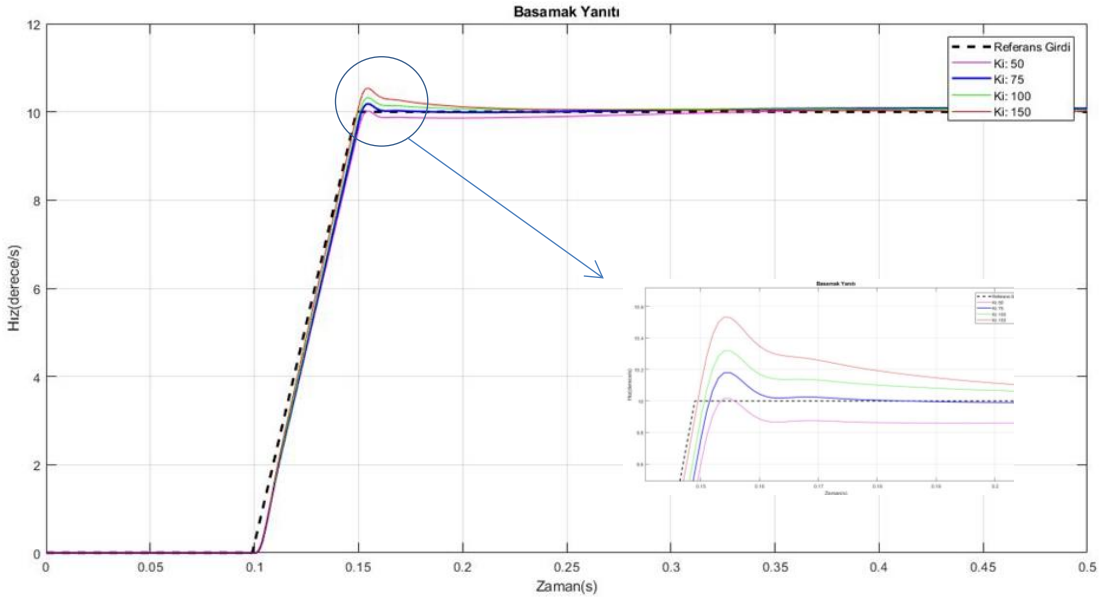
Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'da görüldüğü üzere tek PI kontrolcü kullanarak sistemi hızlı bir şekilde kararlı hale getirmek mümkün gözükmemiştir. Bu yüzden dış gimbal hız döngüsüne ardışık eş iki PI kontrolcü yerleştirilmiştir. Kontrolcü parametreleri aynı adımlar izlenerek yapılmıştır.



Şekil 3.12. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün çift kontrolcüyle K_i=0 iken farklı K_p değerlerine tepkisi

Çizelge 3.5. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün farklı K_p değerlerine göre kontrolcü performansı

K_p Değerleri	Aşım (%)	Oturma Süresi (s)	Durağan Durum Hatası (%)
50	0.05	-	100
75	0	-	100
100	0	-	100
150	0	-	100



Şekil 3.13. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün çift kontrolcüyle K_p= 10 iken farklı K_i değerlerine tepkisi

Çizelge 3.6. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız döngüsünün çift kontrolcüyle K_p= 10 iken farklı K_i değerlerine göre kontrolcü performansı

K_i Değerleri	Aşım (%)	Oturma Süresi (s)	Durağan Durum Hatası (%)
50	0.05	0.151	<1
75	0.18	0.150	<1
100	0.32	0.158	<1
150	0.55	0.178	<1

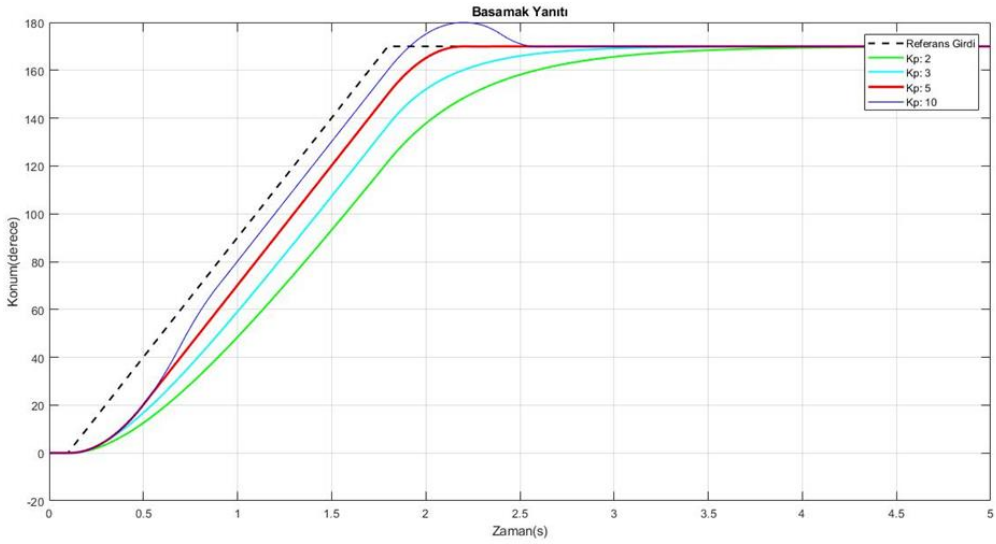
Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de görüldüğü gibi $K_i = 75$ değerinden sonra sistemde %2'lik oturma çizgisinin üzerinde bir miktar aşım gözlemlenmiştir. Bu aşım, hareketli platformun hedef takibi esnasında olumsuzluk yaratabilecek bir etki olduğundan $K_i = 75$ olarak seçilmiştir. Bu durumda dış gimbal hız kontrolcüsü;

$$C_{P_{Oe}}(s) = 10 + \frac{75}{s} \tag{3.3}$$

olarak belirlenmiştir.

<u>Dış gimbal pozisyon kontrolcüsü</u>

Dış gimbalin pozisyon döngüsünde kullanılacak olan P kontrolcünün oransal kazanç katsayısı simülasyon ortamında bulunmuştur. Bunun için farklı K_p değerleri verilerek sistemin tepkisi ölçülmüştür.

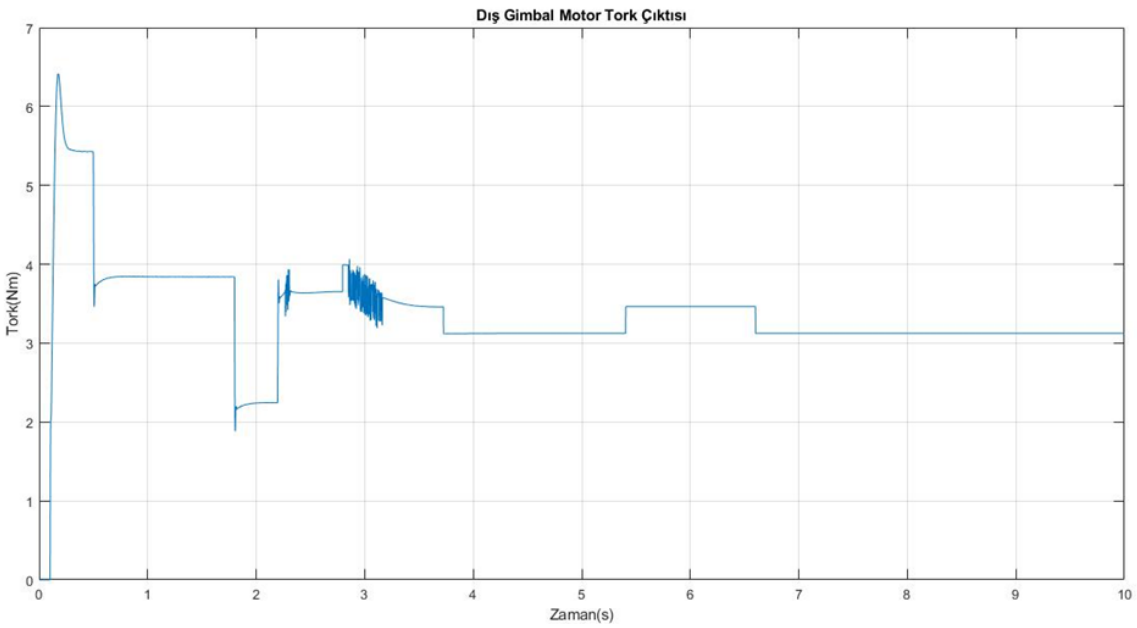


Şekil 3.14. Simülasyon ortamında, dış gimbal pozisyon döngüsünün farklı K_p değerleri için tepkisi

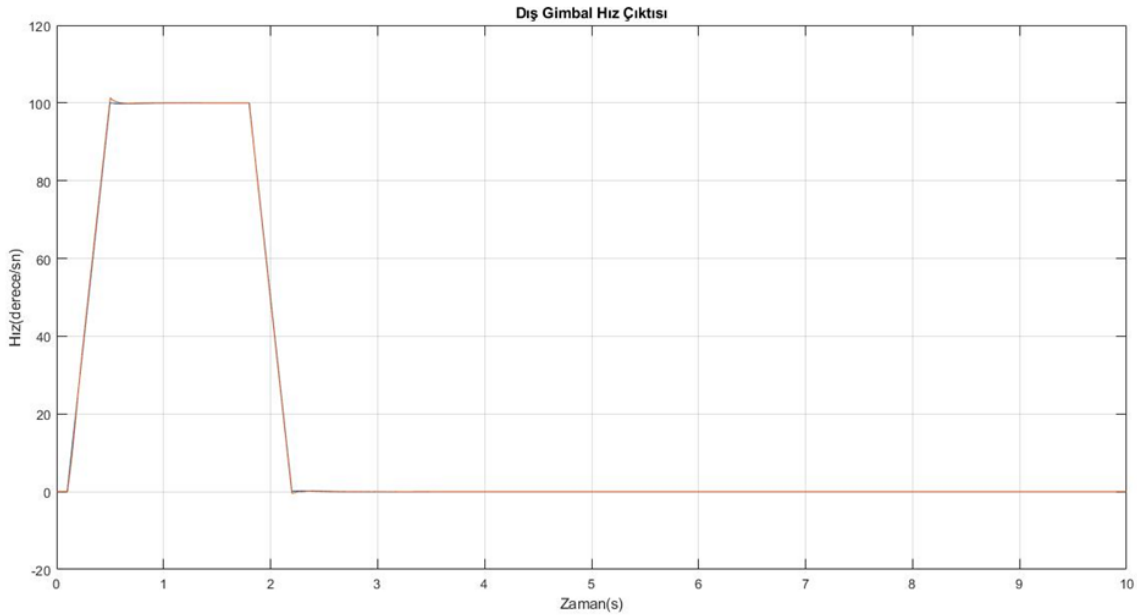
Çizelge 3.7. Simülasyon ortamında, dış gimbal pozisyon döngüsünün farklı K_p değerlerine göre kontrolcü performansı

K_p Değerleri	Aşım (%)	Oturma Süresi (s)	Durağan Durum Hatası (%)
2	5.88	3.2	<1
3	0	2.65	<1
5	0	2.2	<1
10	0	2.45	<1

Çizelge 3.7 incelendiği zaman K_p = 5 değeri için dış gimbal referans pozisyonunun ön filtreden geçtikten sonra t=2.2 saniyede beklenen değere oturduğu gözlenmiştir. Pozisyon çıktısında bu değer için bir aşım veya durağan durum hatası oluşmadığından sadece oransal kontrolcü yardımı ile pozisyon döngüsü kontrol altına alınmıştır. K_p = 5 değeri için iki eksenli hareket platformunun dış gimbalinin benzetim tabanında elde edilen motor tork eğrisi ve hız çıkış eğrisi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.15. Simülasyon ortamında, dış gimbal motor tork çıktısı



Şekil 3.16. Simülasyon ortamında, dış gimbal hız çıktısı

3.3. Bölüm Değerlendirmesi

Simülasyon ortamında yapılan çalışmalarda belirlenen isterler çerçevesinde iç ve dış gimbalin hız ve pozisyon döngüleri için ardışık kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. İç gimbalin hız döngüsünde çift PI kontrolcü, pozisyon döngüsünde oransal kontrolcü kullanılırken, dış gimbalin hız döngüsünde tek PI kontrolcü, pozisyon döngüsünde iç gimbaldeki gibi oransal kontrolcü kullanılmıştır. Hız döngüsünde kullanılan kontrolcünün performansı ne kadar iyi olursa, pozisyon döngüsünde kullanılacak olan kontrolcünün yükünün o kadar hafiflediği gözlemlenmiştir. Her ne kadar deney ortamında yapılacak olan çalışmada sistem karakteri hakkında daha detaylı bilgi edilebilmesinden dolayı daha kapsamlı bir kontrolcü tasarımı yapabilme imkanı olsa da simülasyon ortamında elde edilen veriler deney ortamında yapılacak olan çalışmaya temel oluşturmuş ve kullanılacak kontrolcü yapısı hakkında fikir vermiştir.

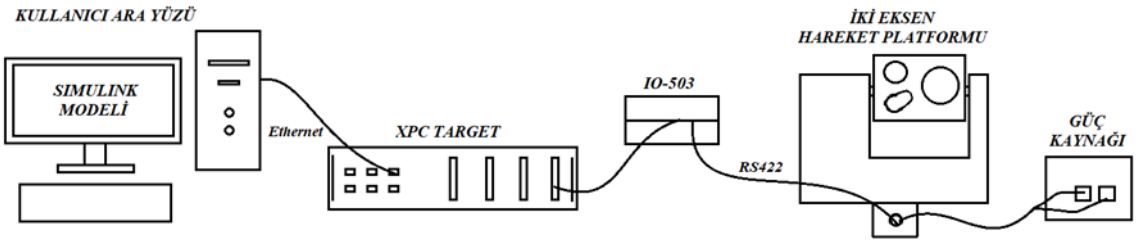
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kararlı hale getirilecek sistemlerde kontrolcü tasarımı yapılırken, gerçek sistem üzerinde çalışmalara başlamadan önce sistem, dinamik denklemler aracılığı ile simülasyon ortamında tasarlanır. Bu ortamda sistem için uygun olacak kontrolcü tasarımı yapıldıktan sonra gerçek sistem üzerinde çalışma yapılabilir. Doğrudan gerçek sistem üzerinde çalışmanın getirdiği bir takım zorluklar bulunmaktadır. Gerçek sistem üzerinde kontrolcü tasarımı yapılırken her iterasyon için sistemin baştan kurulması gerekmektedir. Bu sebeple harcanan vakit çok fazladır. Aynı zamanda tasarıma başlamadan önce yaklaşık bir tahmin yürütülememesinden dolayı deneme sonuçlarında, sistemde bir takım arızalar ile karşılaşılma olasılığı yüksektir. Bunun yanında simülasyon ortamında çalışılırken, ne kadar gerçeğe yakın bir matematik model ortaya konulsa da, gerçek sistem ile birebir uyuşan bir modelin ortaya konması mümkün olmamaktadır. Sistemdeki sürtünme değerlerinin ve katı model üzerinden alınan sistem atalet değerlerinin tam olarak doğru olmaması, sistemin dengeli tasarlanmasına rağmen az da olsa dengesizlik içermesi, tahmin edilemeyen dış etkilerin varlığı ve aynı zamanda sistemde veri aktarımı sırasındaki gecikmelerin tahmin edilip sisteme etkisinin incelenememesi gibi sebeplerden dolayı, simülasyon ortamında elde edilen kontrolcüler, gerçek sistemde tam olarak karşılık bulamamıştır. Ancak bu gibi ortamlardaki çalışmalar, gerçek sistem üzerindeki çalışmalara bir başlangıç noktası oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede sistem için en uygun kontrolcü tasarımında işlem adımları kısaltılarak zamandan kazanç sağlanmakta ve riskler azalmaktadır.

Bölüm 3'de simülasyon ortamında kontrolcü tasarımı gerçekleştirilen iki eksenli hareket platformunun, gerçek sistemdeki uygulaması bu bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. Bu bağlamda ilk önce gerçek zamanlı veri akışının sağlandığı test platformu ele alınmış, modal analiz ile doğal frekansları çıkarılmış, sistem tanımlaması yapılmış, sonrasında ise tanımlanan sistem için çift PI kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çift PI kontrolcü parametreleri belirlendikten sonra üstünlüğünü görebilmek amacıyla, çift PI kontrolcü tasarımında seçilen performans kriterlerine uygun olacak biçimde klasik PID kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Son olarak iki kontrolcünün birbiri ile kıyaslaması yapılmış ve çift PI kontrolcünün sistemin kullanım alanında maruz kalacağı bozucu frekansları ortadan kaldırmada PID kontrolcüye göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

4.1. Test Platformu

Kararlı hale getirilecek olan iki eksenli hareket platformu ile gerçek zamanlı iletişim kurulabilmesi için bir altyapı hazırlanmıştır. Bu amaçla hazırlanan test altyapısı resim 4.1'de verilmiştir.



Resim 4.1. Test altyapısı

4.1.1. İki eksenli hareket platformu

İki eksenli hareket platformu, üzerine yerleştirilen elektro optik cihazların, bakış hattının stabil kalmasını sağlayan, iki eksende hareket kabiliyeti bulunan yönlendirme birimidir. Sistemin dış ve iç gimbal pozisyonlarının kontrolü için iki girişi bulunmaktadır. Geri besleme için iç gimbal üzerinde bulunan ataletsel ölçüm birimi ve sistemin her bir ekseninde bulunan enkoder çıkışları kullanılmaktadır. Platformda, 28V ve 0-10A aralığında beslenen, sisteme gelen gürültüleri filtreleyen güç kartı, motorları sürmek için motor sürücü kartı ve kontrol algoritmalarını gerçekleştirme amaçlı motor kontrol kartı bulunmaktadır. Veriler, dış dünya konektöründen giriş yaptıktan sonra dış gimbal dönü ekseninde bulunan kayar bilezik üzerinden geçerek kartlara aktarılır. Kayar bilezik üzerinde sisteme güç sağlayacak olan hatlar ve haberleşme için kullanılan RS 422 hatları bulunmaktadır. Yönlendirme biriminin dış dünya konektöründen çıkan kablaj, IO503 birimine girmektedir.

4.1.2. IO503 birimi

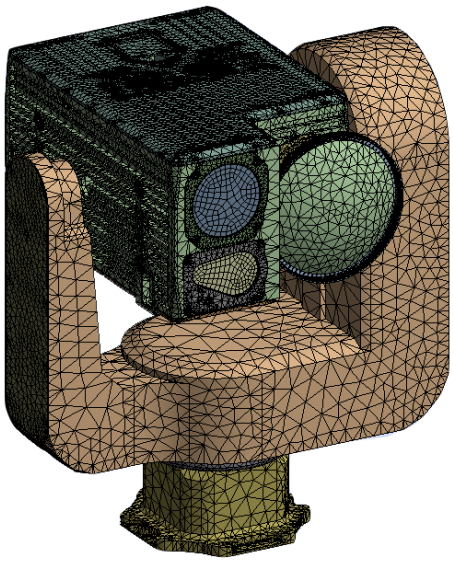
IO503 birimi, yönlendirme birimi ile XPC Target biriminin iletişim kurabilmesine ve diğer kanallara bağlanabilecek aygıtlar arasında ayrım yapılabilmesine olanak sağlayan modüldür. Hareket platformundan RS422 ile veri çıkışı bulunduğundan, modülün bu işlem için ayrılmış portları kullanılarak bağlantı sağlanır.

4.1.3. XPC Target birimi

XPC Target birimi, Matlab – Simulink programı ile modellenen bir simülasyonun gerçek zamanlı olarak sistem üzerinde kullanılmasına olanak sağlayan bilgisayardır. Kullanıcı arayüz birimindeki Simulink üzerinde değiştirilen her parametre, önce ethernet kanalı ile XPC Target birimine daha sonra da sisteme RS 422 kanalı ile aktarılır. Yönlendirme biriminin iç ve dış gimbal hareket verileri de eş zamanlı olarak kullanıcı ara yüz birimi üzerinden izlenebilmektedir. Bu sayede kontrolcü tasarımı aşamasındaki her bir iterasyon için yeniden kod yazarak karta yükleme iş yükünden kurtulmuş olunmaktadır. İşlemlerin gerçek zamanlı olarak yüksek hızlarda yapabilmesinin sebebi ise target bilgisayarının kaynaklarının yalnızca hesaplama yapmak amacı ile kullanılmasıdır. Aynı zamanda test platformunda sisteme güç sağlayacak olan güç kaynağı ve Matlab-Simulink programının çalıştırılacağı bir kullanıcı ara yüz birimi bulunmaktadır.

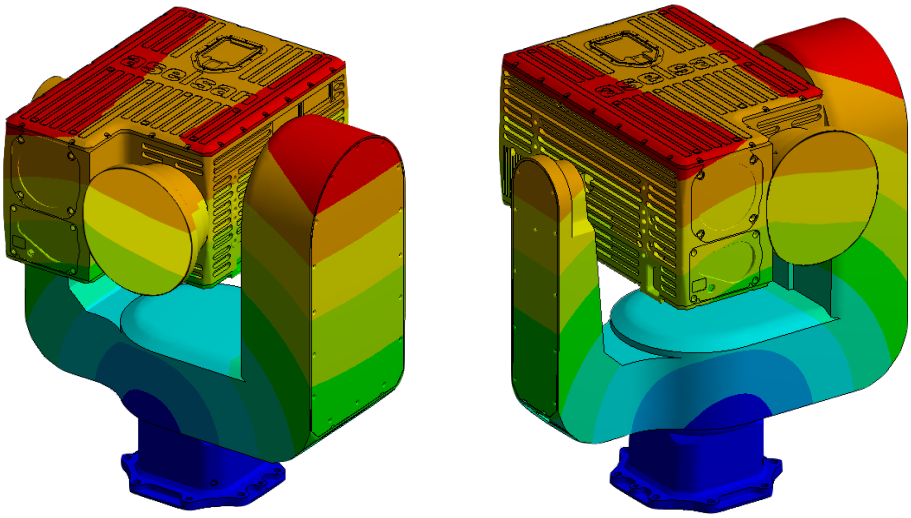
4.2. İki Eksenli Hareket Platformunun Modal Analizi

Tasarımı yapılan iki eksenli hareket platformunun transfer fonksiyonunu çıkarmak için yapılacak olan analizden önce, sistemin doğal frekansının bulunduğu bölgeler hakkında fikir vermesi açısından, modal analiz yapılmıştır. Bu amaçla Ansys programı kullanılmıştır. 3 boyutlu çizim programı Creo'da tasarlanan iki eksenli hareket platformu, analizde bağlantıların daha hızlı ve kolay yapılabilmesi için, iç gimbal tahrik takımı, dış gimbal tahrik takımı ve dış kabuklar olacak şekilde sadeleştirilmiştir. Sadeleştirilen 3D model Ansys'e aktarılmıştır. Burada parçaların birbiri ile olan bağlantıları tanımlanmış ve ağırlıkları noktasal olarak uygun bölümlere yerleştirilmiştir. Sistem en alt noktasında yere sabit olarak tanımlanmıştır. Sonrasında Resim 4.2'de verildiği şekilde sistem üzerine mesh atılmıştır.



Resim 4.2. İki eksenli hareket platformu mesh yapısı

Sistem üzerine mesh ataması yapıldıktan sonra sistemin doğal frekanslarının belirlenmesi amacı ile modal analiz işlemine geçilmiştir. Analiz sonucunda Resim 4.3 ve 4.4'de görüldüğü gibi bir deplasman dağılım elde edilmiştir. Çizelge 4.1'de ise sistemin modları Hz olarak verilmiştir.



(a) (b)

Resim 4.3.(a-b) Modal analiz sonucunda iki eksenli hareket platformunun deplasman dağılımı

Çizelge 4.1. İki eksenli hareket platformunun modları

Mod	Frekans (Hz)
1	47.133
2	116.12
3	192.16
4	273.99
5	452.17
6	563.43

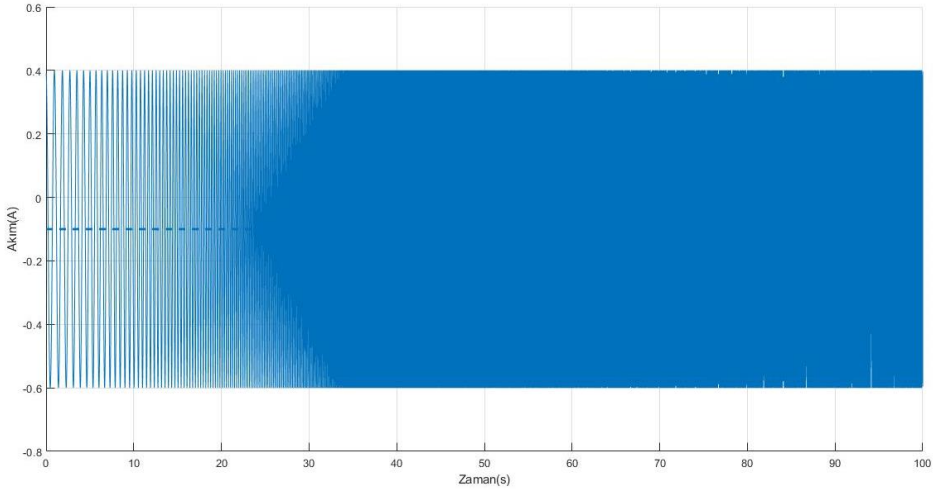
4.3. İki Eksenli Hareket Platformunun Sistem Frekans Tepki Fonksiyonunun Çıkarılması

Dinamik denklemleri kullanılarak matematik modeli çıkarılan sistemin, her ne kadar gerçek sisteme yakın uyarlanmış olsa da tahmin edilemeyen veya göz ardı edilen bir takım etkiler nedeni ile aralarında farklılıklar oluşabilmektedir. Gerçek sistem üzerinde çalışırken bu etkileri sisteme dahil etmeden tasarım yapmak, sistem üzerine tasarlanacak olan denetleyicinin verimini oldukça düşürecektir. Bu sebeple test aşamasına ilk olarak sistemin iç ve dış gimballerinin, hız döngülerinin ayrı ayrı transfer fonksiyonları çıkarılarak başlanmıştır.

Resim 4.1'de verilen test platformu kurulduktan sonra ilk olarak Simulink üzerinde iç ve dış gimballerin verilen bir sinyale gösterdiği tepkiyi gözlemleyebilmek için blok diyagram tasarımı yapılmıştır. Burada amaç, verilen bir sinyale karşılık iç gimbal üzerinde bulunan ve dönme eksenleri ile çakışık hale getirilen ataletsel ölçüm biriminin tepkilerini kayıt altına almak, giriş - çıkış arasında bir frekans tepki fonksiyonu çizdirmek ve bode diyagramına bakarak kontrolcü tasarımı gerçekleştirmek olmuştur. Frekans tepki fonksiyonu sayesinde giriş sinyalinin her bir uygulama frekansına bağımlı olarak sistem tepkileri ifade edilmiştir. Bu sayede sistemin hangi frekans aralığında rezonansa girdiği veya sönümlendiği gibi bir takım karakteristik özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

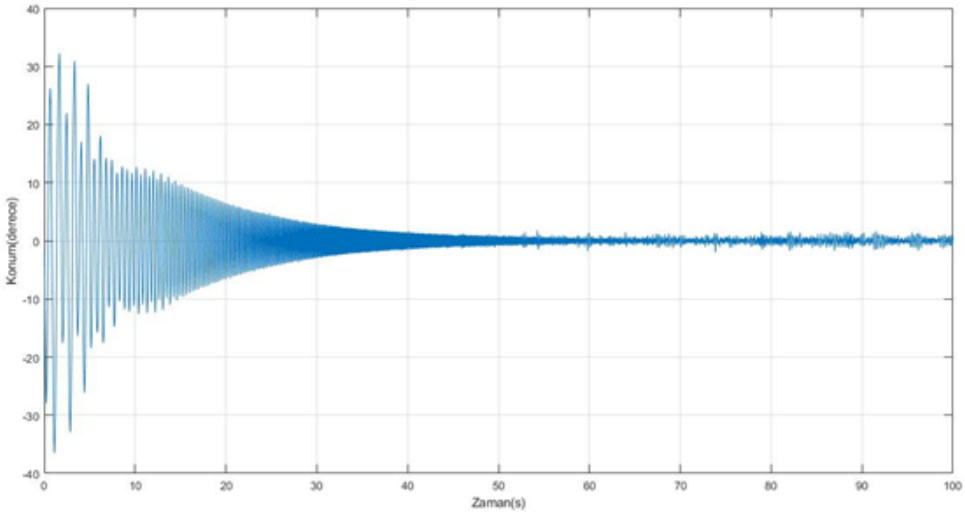
Frekans tepki fonksiyonunu elde edebilmek için eksenlere ayrı ayrı frekansı düşükten

başlayarak zamanla yükselen bir sinüs akım girişi verilmiş ve ataletsel ölçüm birimi çıkışlarından ulaşılan konumlar, XPC Target yardımı ile gerçek zamanlı olarak kayıt altına alınmıştır. Şekil 4.1, 4.2'de iç gimbale ve 4.3 ve 4.4'de dış gimbale verilen giriş akım sinyalleri ve ataletsel ölçüm birimlerinden ölçülen konum değerleri verilmiştir. İç ve dış gimbale 1Hz'den başlayarak 1000 Hz'e çıkan bir sinüs fonksiyonu uygulanmıştır.

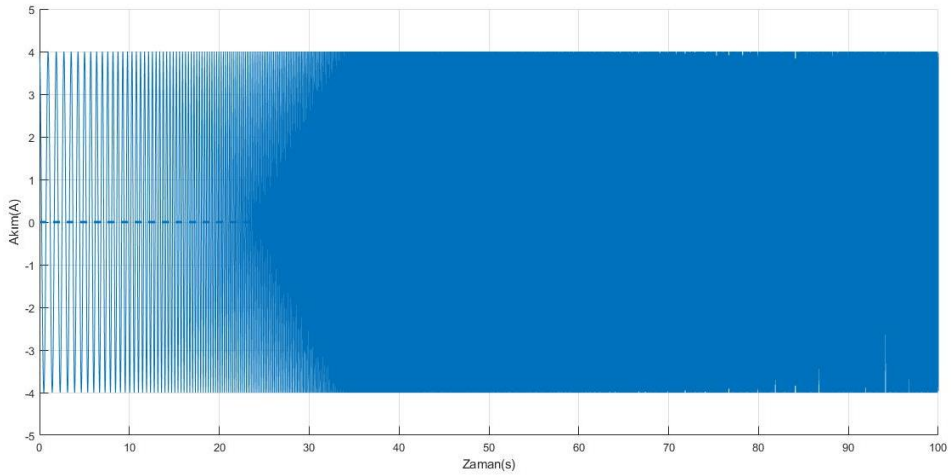


Şekil 4.1. İç gimbal bozucu sinyali

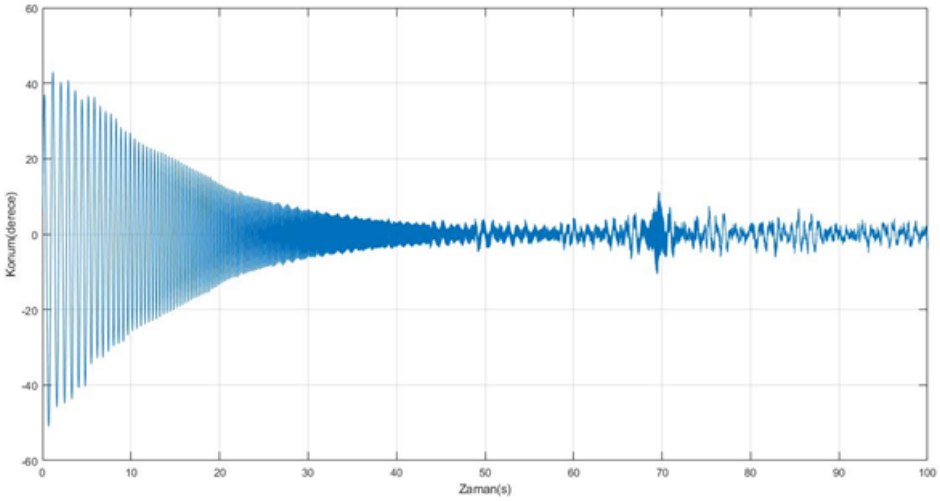
İç gimbal giriş sinyalinde dış gimbalden farklı olarak yaklaşık 5 derecelik bir eksen kaçıklığı verilmiştir. Bunun sebebi, sisteme ataletsel ölçüm birimi yerleştirildiğinde sistem dengesinde bir miktar bozulma meydana geldiğinden, sinyal verildiğinde alınan verilerde kayma oluşmasıdır.



Şekil 4.2. İç gimbalin bozucu sinyale karşı ataletsel ölçüm biriminin karşılık gelen dönü ekseninden toplanan tepki çıktısı



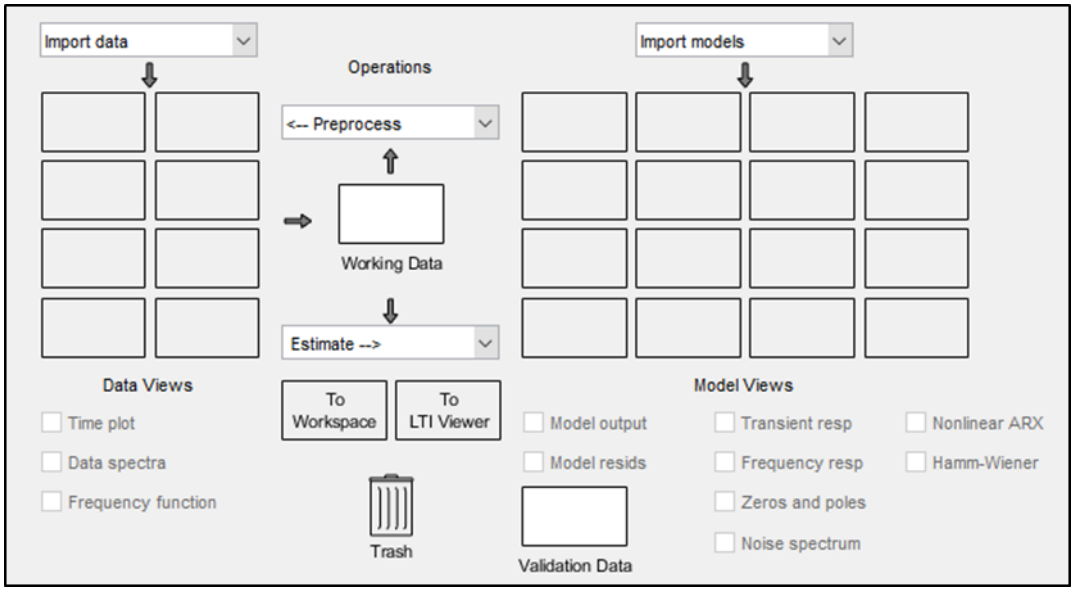
Şekil 4.3. Dış gimbal bozucu sinyali



Şekil 4.4. Dış gimbalin bozucu sinyale karşı ataletsel ölçüm biriminin karşılık gelen dönü ekseninden toplanan tepki çıktısı

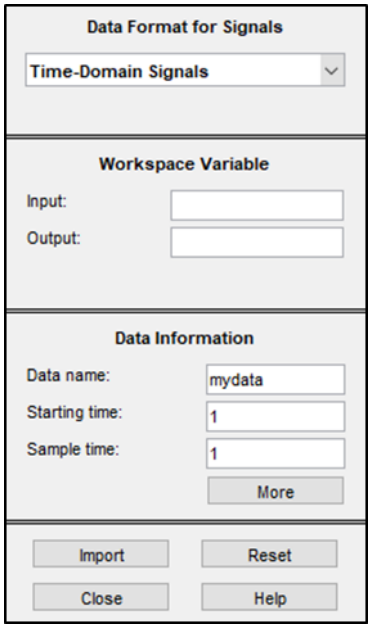
Şekil 4.4'de bozucu sinyalin frekansının modal analizde bulunan sistemin doğal frekansı ile çakıştığı noktalarda rezonansa girdiği görülmüştür. Bu yüzden kontrolcü tasarımı yapılırken bu frekans değerleri için notch filtre ile önlem alınmıştır. Bunun yanında doğal frekans noktaları dışında kalan bölümlerde şekillerden görüldüğü üzere frekans değeri yükseldikçe giriş sinyali, kopma sürtünmesini yenmekte zorlanmıştır. Sinyalin sürtünmeyi geçtiği noktalarda çıkış sinyalinde genlik artışı meydana gelmiş ve sinyalde bozulmalar oluşmuştur.

Elde edilen bu veriler Matlab'ın çalışma ortamına kayıt edilmiştir. Daha sonra Resim 4.2'de arayüzü verilen Matlab/Sistem Tanımlama eklentisinden iç ve dış gimballerin hız döngüleri için frekans tepki fonksiyonu oluşturma aşamasına geçilmiştir.



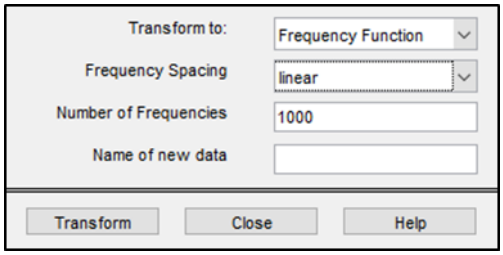
Resim 4.4. Sistem tanımlama ara yüzü

Sistem tanımlamasında ilk olarak import data bölümünden zaman alanı sinyalleri seçilmiş ve Resim 4.3'de verilen ekran açılmıştır. Burada input değişkeni olarak, çalışma ortamına kayıt edilen giriş sinüs sinyali seçilmiş iken output değişkeni olarak ise ataletsel ölçüm biriminden okunan veriler girilmiştir. Bu işlemlerde dikkat edilmesi gereken nokta, iki girdinin de veri sayısının eşit sayıda olmasıdır. Daha sonra, çıkarılacak veri grafiği için bir isim girilmiştir. Örnekleme zamanı için ise Simulink'de kullanılan değer olan 2 kHz girilmiş ve import'a basarak giriş ve çıkışa bağımlı bir veri grafiği elde edilmiştir.



Resim 4.5. Veri atama ekranı

Elde edilen veri grafiği Resim 4.2'de görülen working data bölümüne sürüklenerek bırakılmış ve operasyonlar sekmesinden veri transformu seçilmiştir. Açılan Resim 4.4'de verilen ekranda çevrilmek istenen tür olarak Frekans Fonksiyonu seçilmiş ve yeni veri grafiğine isim verilerek transform'a basılmıştır.

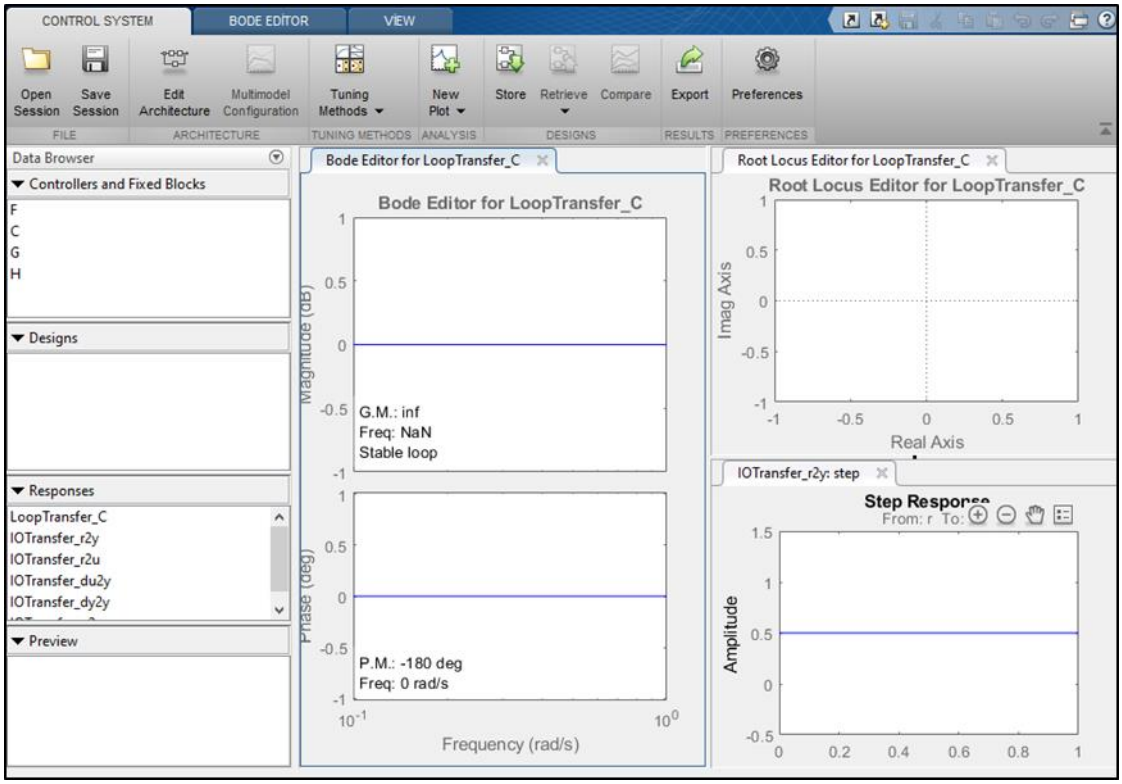


Resim 4.6. Veri türü değiştirme ekranı

Her iki gimbal içinde tekrarlanan işlemler sonucunda hız döngülerinin frekans tepki fonksiyonları elde edilmiştir. Matlab-Kontrol Sistemi Tasarlayıcı eklentisinde kontrolcüsü tasarlanacak olan hız döngülerinin bode diyagramı üzerinde çalışılmak üzere, fonksiyonlar çalışma ortamına kayıt edilmiştir.

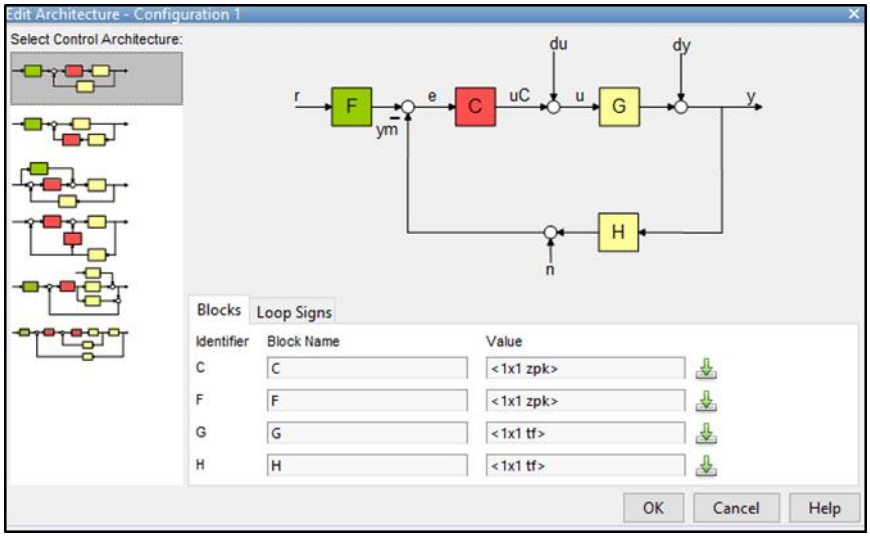
4.4. İki Eksenli Hareket Platformu İçin Kontrolcü Seçimi

Frekans tepki fonksiyonları bulunan iç ve dış gimballerin hız döngüleri için denetleyici parametrelerinin seçimi, bode diyagramları üzerinden yapılmıştır. Bu noktada Matlab-Kontrol Sistemi Tasarlayıcı eklentisinden faydalanılmıştır. Eklenti açıldığı zaman Resim 4.5'deki ekran gelmektedir.



Resim 4.7. Kontrol sistem tasarlayıcı arayüzü

Burada ilk olarak, mimari yapı sekmesinden nasıl bir kontrol tasarımı yapıldığı seçilmiş ve G ile belirtilen sistem bölümüne daha önce bulunan frekans tepki fonksiyonu atanmıştır.



Resim 4.8. Mimari yapı ara yüzü

Açılan ekranda bode diyagramı yer almaktadır. Bode diyagramının alt tarafında kazanç marjini ve faz marjini görülmektedir. Denetimi sağlanacak olan iki eksen hareket

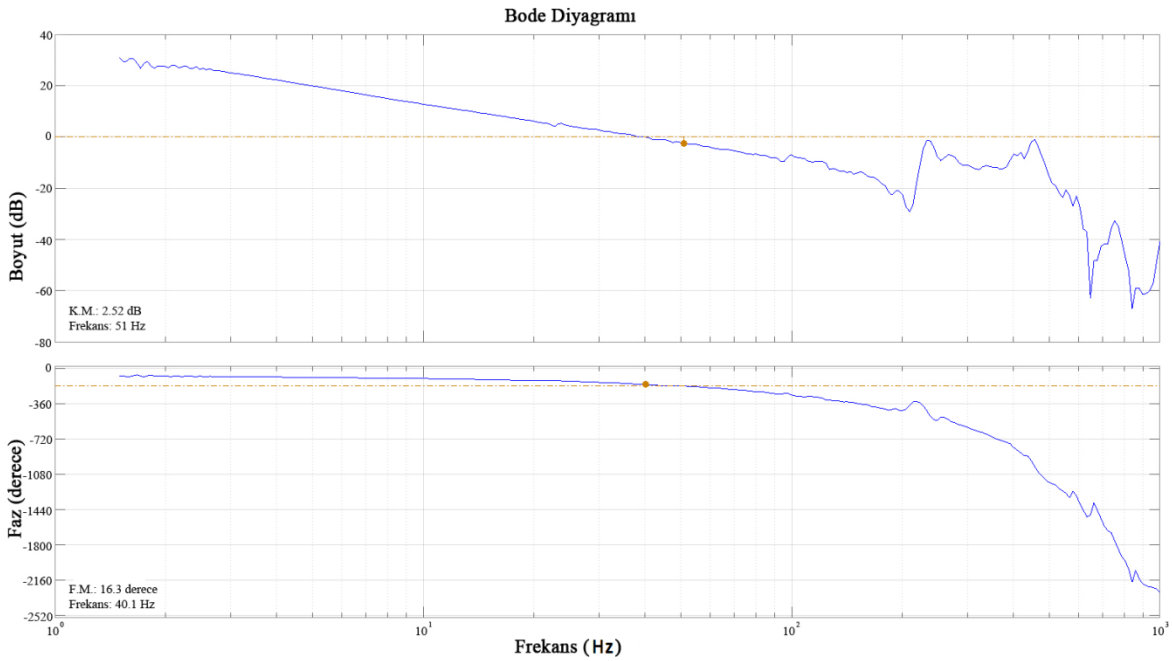
platformu, eğer ki az adetlerde üretilecek olsaydı bu marjin değerlerini düşük tutarak her sistem için ayrı ayrı denetleyici sağlamak mümkün olabilirdi. Ancak bu sistem ileride yüksek adetlerde üretilecek, seri üretim ürünü olacağı için ve her sistemin dinamiği birebir aynı olamayacağından, bu marjin miktarlarını bir miktar geniş tutmak, her sistem için tekrar tekrar uğraşmadan sonuca ulaşılmasına olanak sağlayacaktır. Bu sebeple sistemde kazanç marjininin 6dB değerine yakın olması, faz marjininin ise 30º ile 60º arasında olmasına karar verilmiştir.

4.4.1. Ardışık kontrolcü tasarımı

<u>İç gimbal kontrolcü tasarımı</u>

İç gimbal hız döngüsü

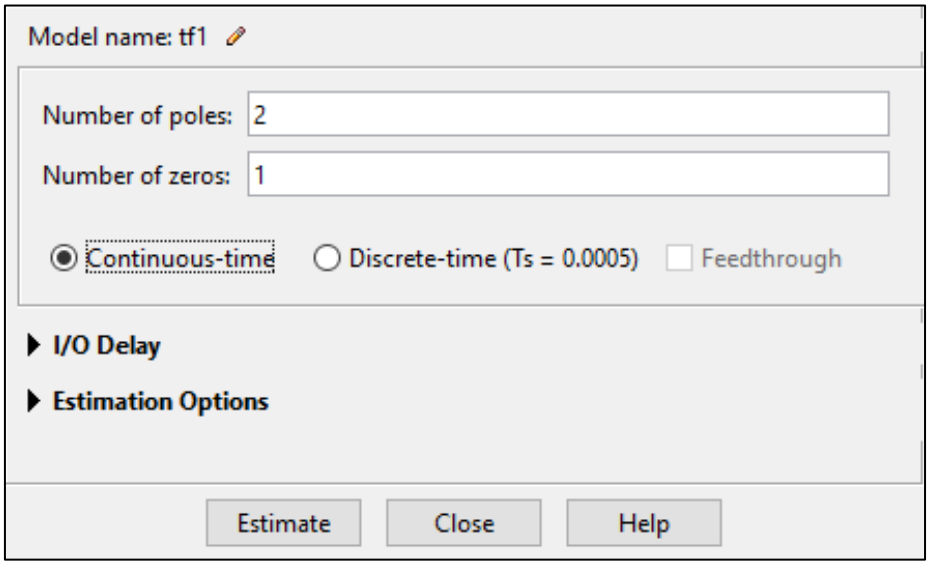
Kontrol Sistem Tasarlayıcısına girdi olarak iç gimbalin hız döngüsü için elde edilen frekans fonksiyonu girildiği vakit Şekil 4.5'de verilen bode diyagramı elde edilmiştir.



Şekil 4.5. İç gimbal hız döngüsü frekans tepki fonksiyonunun bode diyagramı

Şekil 4.5'de verilen iç gimbalin hız döngüsünün bode diyagramına, Matlab-Sistem Tanımlama eklentisinden transfer fonksiyonu ataması yapılmıştır. Bunun için frekans tepki

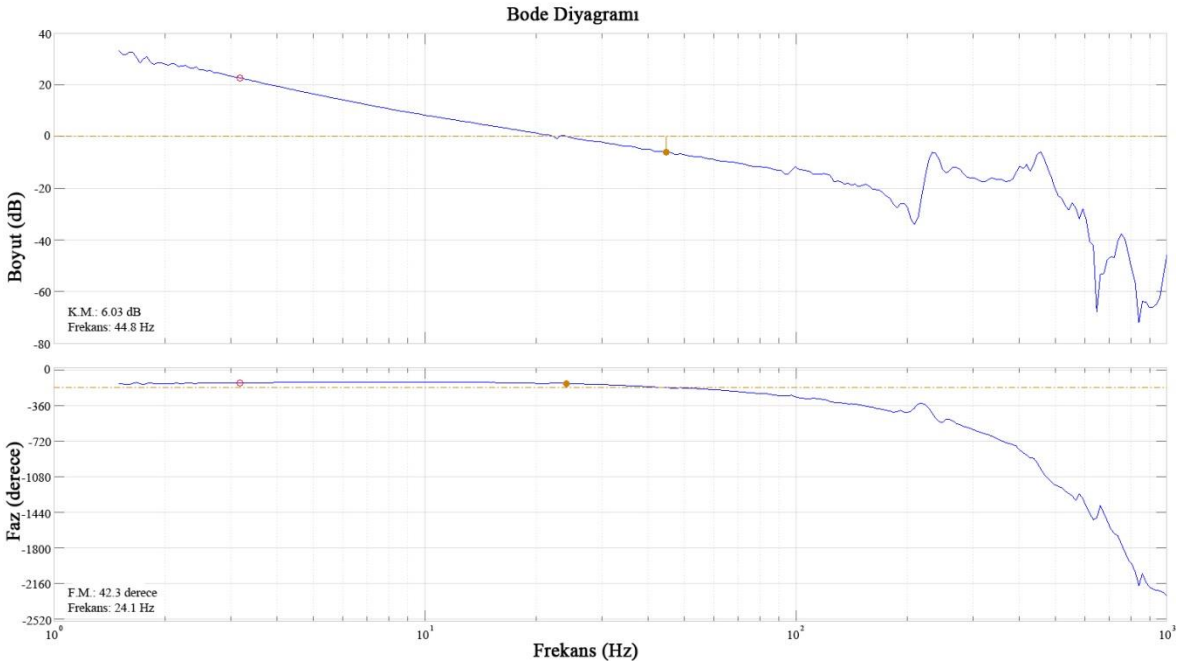
fonksiyonu çıkarılmasında anlatıldığı gibi Resim 4.2'deki ekranda working data bölümüne, bulunmuş olan frekans tepki fonksiyonu yerleştirilmiş ve tahmin bölümünden Transfer Fonksiyon Modeli seçilmiştir. Resim 4.7'de gösterilen açılan ekranın sıfır bölümüne 1 ve kök bölümüne 2 değeri girilmiş, tahmine basılmış ve transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Açılan ekranda, 88.48 % verilen frekans fonksiyonuna oturan bir transfer fonksiyonu tahmini bulunmuştur. 4.1'de verilen transfer fonksiyonu, modellemede iç gimbalin hız döngüsünün çevre bloğu olarak gösterilen fonksiyona denktir.



Resim 4.9. Transfer fonksiyon modeli tahmin ekranı

$$H_{iç} = \frac{-43.59s + 71140}{s^2 + 226.1s + 690.3} \tag{4.1}$$

Sistem üzerine etkiyecek düşük frekanslı bozucu etkiler, sistemi yüksek frekanslı bozuculara göre daha fazla etkileyeceği için düşük frekans aralığındaki kazanç marjinindeki eğim yüksek tutularak bu bölgenin hızlı bir biçimde geçilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Resim 4.5'de sol tarafta bulunan C kontrolcü içeriğine bir sıfır ve bir integratör eklemesi yapılmıştır.

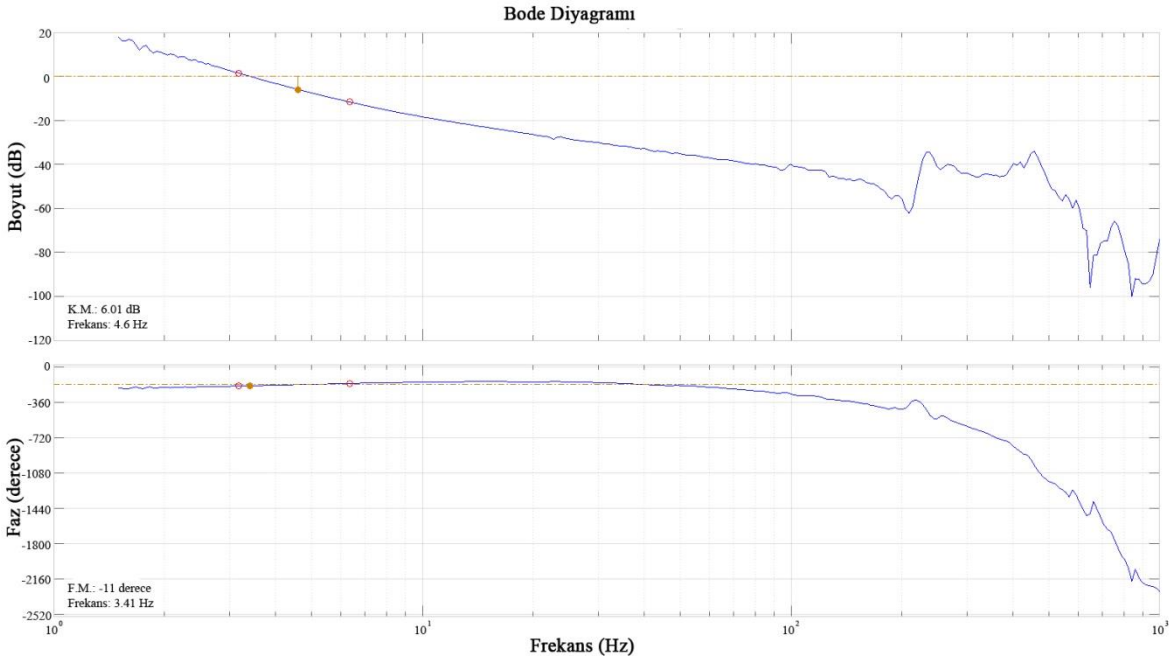


Şekil 4.6. Hız döngüsünde tek PI kontrolcü kullanılan iç gimbal

Çizelge 4.2. Tek PI kullanıldığındaki kontrolcü katsayıları ve kazanç - faz marjinleri

Kazanç Marjini	6.03 dB
Faz Marjini	42.3 derece
Kontrolcü Kazancı	11.4
Sıfır	-20
Kutup	0

Sisteme tek PI tanıtıldığı zaman sistemin düşük frekans aralığındaki cevabı 20 dB/decade'den yaklaşık 30 dB/decade'e çıkmıştır. Yani sistemin cevabı bir miktar hızlandırılmıştır. Böyle bir hız standart uygulamalar için geçerli olabilmekteyken, denetimi sağlanan hareket platformunun üzerine bağlanan kameranın menzilinin çok yüksek olması, sistemin olabildiğince iyi bir biçimde kontrol edilmesini gerektirmektedir. Bu sebeple kontrolcüye bir PI kontrolcü daha tanımlanarak sistemin en çok maruz kalacağı bozucu etki frekans aralığı olan düşük frekanslara tepkisinin, 40 dB/decade'e yaklaştırılmasına çalışılmıştır. Bunun için C kontrolcü içeriğine birer sıfır ve integratör daha eklenmiştir.

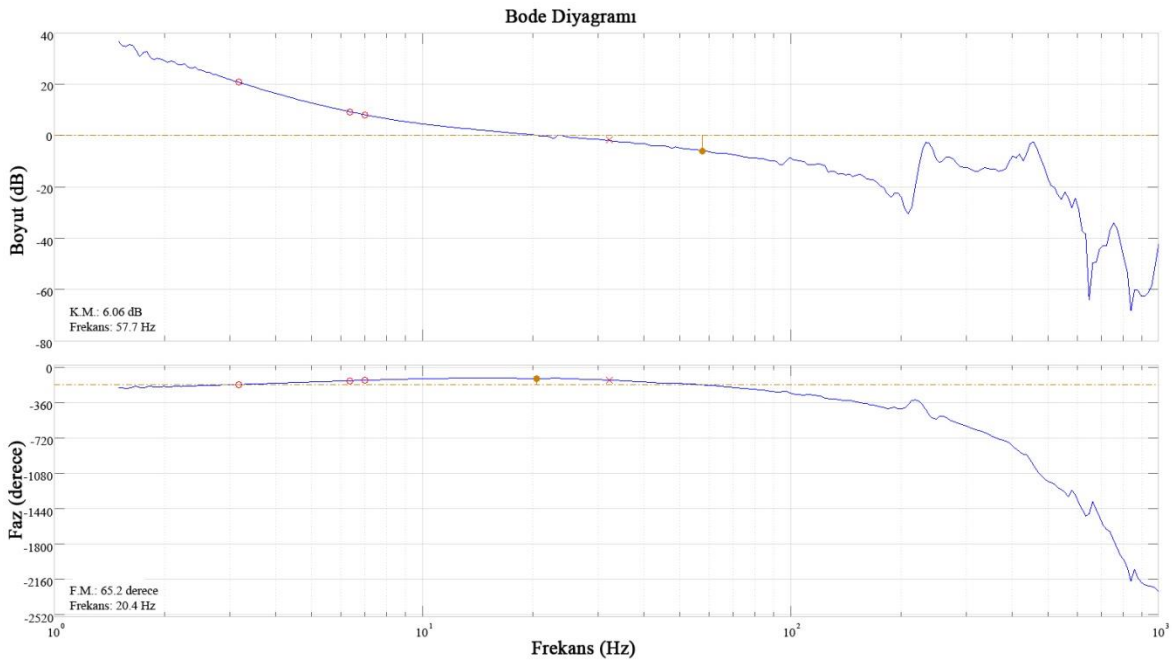


Şekil 4.7. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü kullanılan iç gimbal

Çizelge 4.3. Ardışık iki PI kullanıldığındaki kontrolcü katsayıları ve kazanç - faz marjinleri

Kazanç Marjini	6.01 dB
Faz Marjini	-11 derece
Kontrolcü Kazancı	17.85
Sıfırlar	-20,-40
Kutuplar	0, 0

İç gimbal hız döngüsünün kazanç marjini, PI kontrolcüler ve kazanç katsayısı yardımı ile 6.01 dB değerine çekildiği vakit sistemin faz marjininin -11º olduğu görülmüştür. Şekil 4.7'de görüldüğü üzere iki adet PI kullanıldığı vakit sistemin düşük frekans aralığına olan cevabı yaklaşık 40 dB/decade'lere yükseltilebilmiştir. İç gimbalin 180º değerini geçişini çok hızlı tamamlamaması ve dengesini kaybetmemesi için bir miktar faz kazandırmak gerektiğinden 15 Hz frekansına bir lead filtre yerleştirilmiştir. 15 Hz değerini bulurken kazanç marjininden fedakarlık edilmemesine ve en son bulunan faz marjin değerinde ulaşılan frekans ile filtrenin frekans değerinin birbirine yakın seçilmesine dikkat edilmiştir.

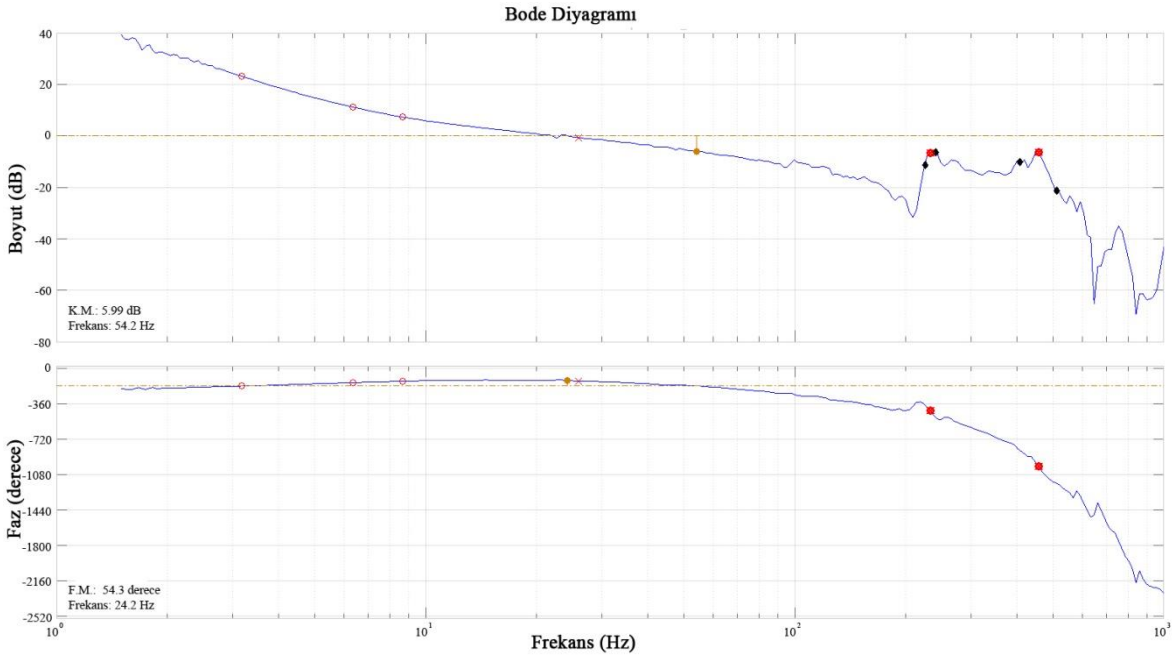


Şekil 4.8. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü ve Lead filtre kullanılan iç gimbal

Çizelge 4.4. Ardışık iki PI ve Lead filtre kullanıldığındaki kontrolcü, Lead filtre katsayıları ve kazanç - faz marjinleri

Kazanç Marjini	6.06 dB
Faz Marjini	65.2 derece
Kontrolcü Kazancı	150
Sıfırlar	-20,-40
Kutuplar	0, 0
Lead filtre sıfırı	-54.414
Lead filtre kutbu	-163.24

Kazanç ve faz marjinleri istenilen seviyeye gelirken sistem, yüksek frekanslarda iki noktada rezonansa girmektedir. Bu sebeple 233 Hz ve 457 Hz frekanslarına Notch filtre uygulanarak bu değerlerde sistemin kazancının sıfıra yaklaşmasının önüne geçilmiştir.



Şekil 4.9. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanılan iç gimbal

Çizelge 4.5. Ardışık iki PI kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanıldığındaki kontrolcü, Lead ve Notch filtre katsayıları ve kazanç - faz marjinleri

Kazanç Marjini	5.99 dB	1.Notch filtre frekansı	233 Hz
Faz Marjini	54.3 derece	1.Notch filtre sıfırı	0.016699
Kontrolcü Kazancı	205	1.Notch filtre kutbu	0.023587
Sıfırlar	-20,-40	2.Notch filtre frekansı	457 Hz
Kutuplar	0, 0	2.Notch filtre sıfırı	0.055774
Lead filtre sıfırı	-54.414	2.Notch filtre kutbu	0.078783
Lead filtre kutbu	-163.24		

Sonuç olarak iç gimbalin hız döngüsü için elde edilen kontrolcünün ifadesi aşağıdaki şekli almıştır.

$$C^{hız}_{iç\ (PI)^2} = 205x\frac{(1+0.05s)(1+0.025s)(1+0.018s)(1+0.00023s+(0.00068s)^2)(1+0.00039s+(0.00035s)^2)}{s^2(1+0.00061s)(1+0.00032s+(0.00068s)^2)(1+0.00055s+(0.00035s)^2)} \quad (4.2)$$

İç gimbal pozisyon döngüsü

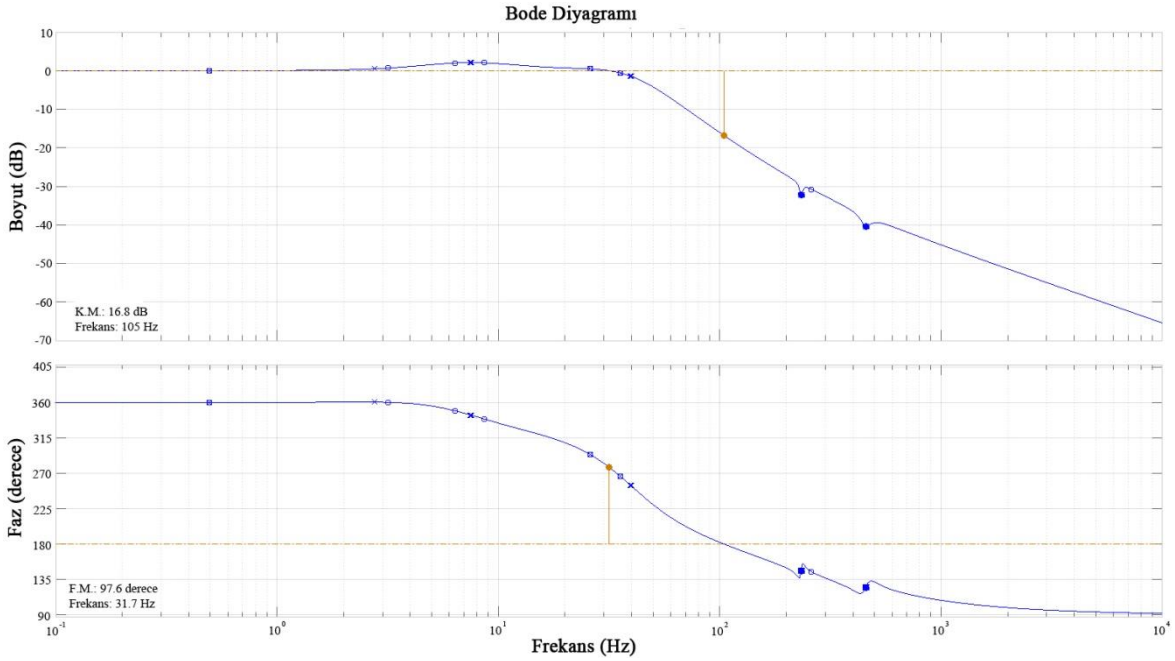
Pozisyon döngüsünde, aynı hız döngüsünde olduğu gibi sisteme bir giriş verilerek enkoder üzerinden çıkış değerleri okunabilmektedir. Ancak burada hız döngüsünün frekans tepki fonksiyonundan yararlanılarak, sistemin pozisyon döngüsünün transfer fonksiyonu bulunmuştur. 4.1'de verilen iç gimbalin hız döngüsü transfer fonksiyonu $H_{iç}$, ile 4.2'de verilen hız döngüsü kontrolcüsü kullanılarak iç gimbal pozisyon döngüsü transfer fonksiyonu Denklem 4.3 yardımı ile elde edilmiştir.

$$TF_{iç}^{poz} = \frac{C_{iç\ (PI)^2}^{hız} x H_{iç}}{1 + C_{iç\ (PI)^2}^{hız} x H_{iç}} \tag{4.3}$$

4.3 yardımı ile elde edilen iç gimbal pozisyon döngüsü transfer fonksiyonu 4.4'de verilmiştir.

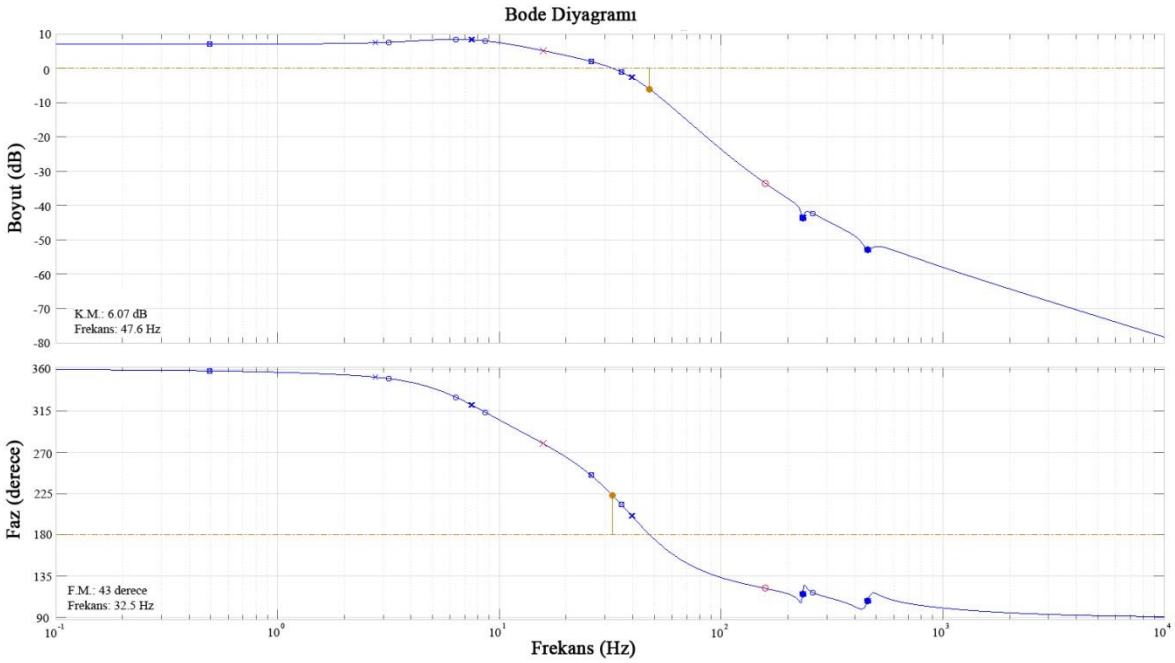
$$TF_{iç}^{poz} = \frac{-33.51(s+20)(s+40)(s+54.41)(s-1632)(s^2+48.89s+2.143x10^6)(s^2+320.3s+8.245x10^6)}{(s+17.28)(s+3.095)(s^2+67.84s+2224)(s^2+269.1s+6.192x10^4)(s^2+69.64s+2.144x10^6)(s^2+453.5s+8.25x10^6)} \tag{4.4}$$

Elde edilen transfer fonksiyonu, bode şekillendirme yöntemi ile kontrolcü tasarlamak için Kontrol Sistemi Tasarlayıcı eklentisinde, hız döngüsünde olduğu gibi mimari bölümünde G ile belirtilen çevre bloğuna atanmıştır. Bunun sonucunda Şekil 4.10'da verilen, içerisinde hız döngüsünün kontrolcüsünün de dinamiklerini içeren pozisyon döngüsünün bode diyagramı elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Kontrol edilmemiş iç gimbal pozisyon döngüsü bode diyagramı

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere sistemin kazanç marjini 16.8 dB bulunmuştur. Bu değeri 6 dB seviyelerine indirmek için sistemin kazanç kat sayısı değiştirilince faz marjininde kaybın fazla olduğu görülmüş ve bu sebeple 50 Hz'e Lag filtre eklenerek sisteme faz kazandırılmıştır (Şekil 4.11). Bulunan değerler Çizelge 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Pozisyon döngüsünde P kontrolcü ve Lag filtre kullanılan iç gimbal

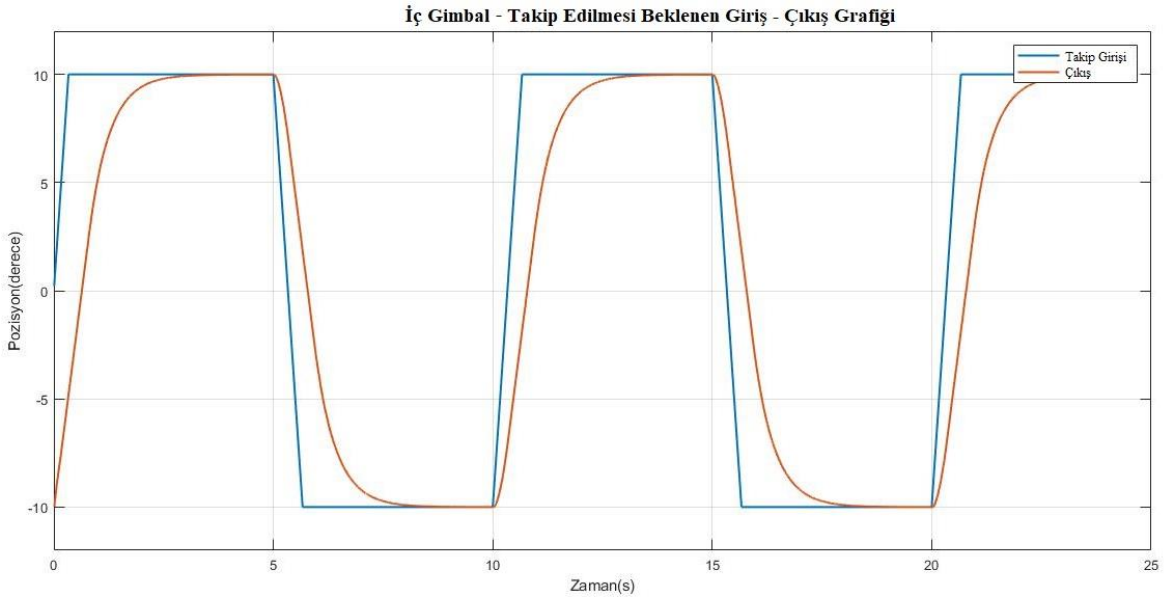
Çizelge 4.6. P kontrolcü ve Lag filtre kullanıldığındaki kontrolcü katsayıları ve kazanç – faz marjinleri

Kazanç Marjini	6.07 dB
Faz Marjini	43 derece
Kontrolcü Kazancı	2.26
Lag Filtre Sıfırı	-993.45
Lag Filtre Kutbu	-99.346

Bu durumda iç gimbalin pozisyon döngüsünün kontrolcüsü aşağıdaki gibi olmuştur.

$$C_{iç\ (PI)^2}^{poz} = 2.26\frac{1+0.001s}{1+0.01s} \tag{4.5}$$

Son olarak bulunan kontrolcüler, kullanıcı ara yüzünde Simulink ortamında EK-2'deki gibi tasarlanan modelde yerine yerleştirilmiştir. Daha sonra sisteme güç verilmiş ve giriş çıkış verileri kayıt altına alınarak çizdirilmiştir.

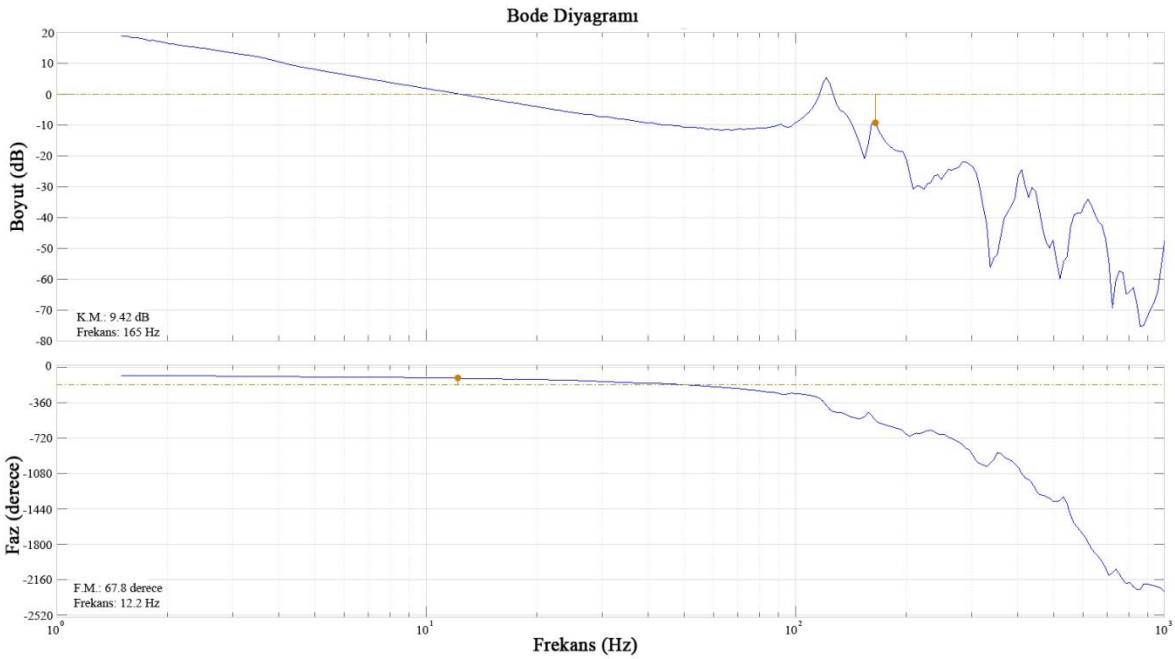


Şekil 4.12. Denetim altına alınmış iç gimbalin pozisyon takip grafiği

Dış gimbal kontrolcü tasarımı

Dış gimbal hız döngüsü

Kontrol Sistem Tasarlayıcısına girdi olarak dış gimbal hız döngüsü için elde edilen frekans fonksiyonu girildiği vakit Şekil 4.13'de verilen bode diyagramı elde edilmiştir.



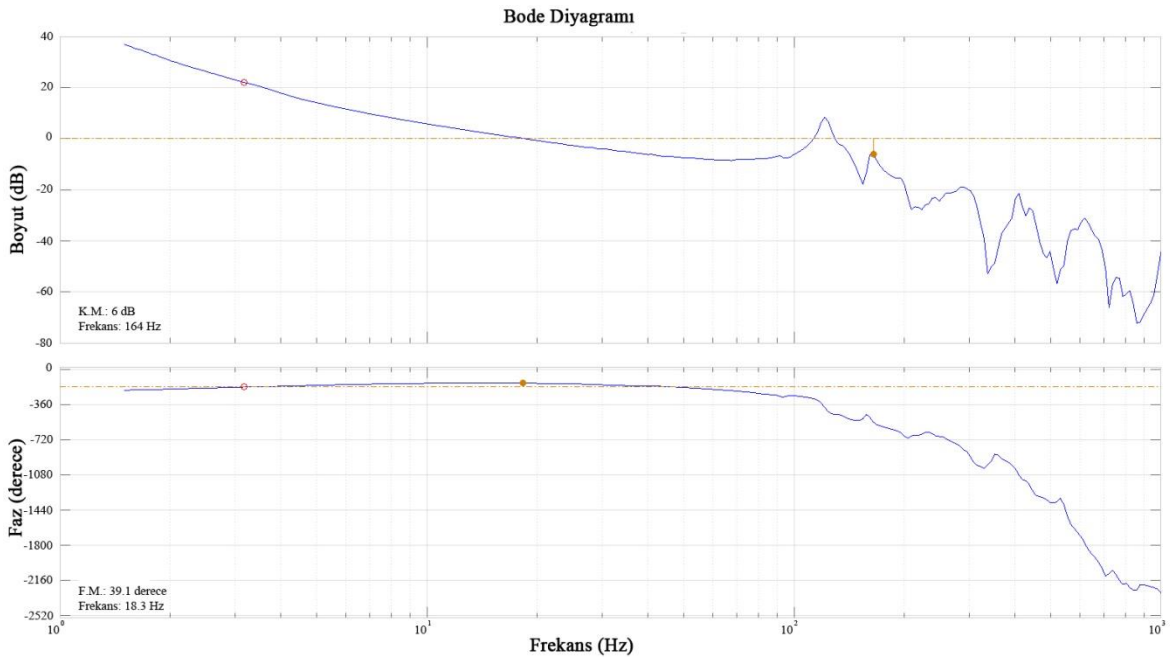
Şekil 4.13. Dış gimbal frekans tepki fonksiyonunun bode diyagramı

Şekil 4.13'de verilen dış gimbalin hız döngüsünün bode diyagramına, iç gimbal hız döngüsünde yapılan işlem adımları izlenerek, Matlab-Sistem Tanımlama eklentisinden transfer fonksiyonu ataması yapılmıştır. Frekans fonksiyonuna 90.41 % ile oturan bir transfer fonksiyonu tahmini bulunmuştur. 4.6'da verilen transfer fonksiyonu, modellemede dış gimbalin hız döngüsünün çevre bloğu olarak gösterilen fonksiyona denktir.

$$H_{dış} = \frac{-43.43s + 2.222x10^4}{s^2 + 265.8s + 434} \tag{4.6}$$

İç gimbalde anlatıldığı gibi burada da sistemin, düşük frekanslı bozucu etkilere hızlı tepki verebilmesi için bu bölgede kazanç marjininin eğimi artırılmaya çalışılmıştır. Yaklaşık 20 dB/decade olan eğim 40 dB/decade yapılmaya çalışılmıştır. Bunun için iç gimbalde

uygulanan adımların aynısı uygulanmıştır. İlk olarak çift PI, kontrolcü olarak denenmiştir.

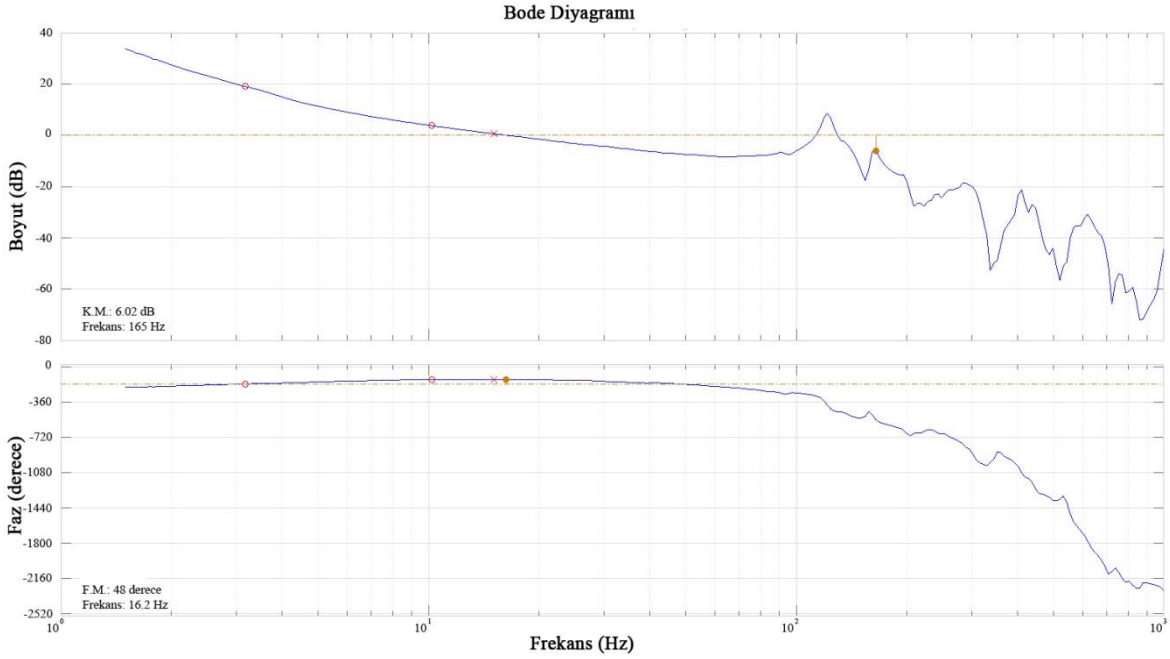


Şekil 4.14. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü kullanılan dış gimbal

Çizelge 4.7. Ardışık iki PI kullanıldığındaki kontrolcü katsayıları ve kazanç - faz marjinleri

Kazanç Marjini	6 dB
Faz Marjini	39.1 derece
Kontrolcü Kazancı	578
Sıfırlar	-20,-20
Kutuplar	0, 0

Dış gimbal hız döngüsü kazanç marjini, PI kontrolcüler ve kazanç katsayısı yardımı ile 6 dB değerine çekildiği vakit sistemin faz marjininin 39.1º olduğu görülmüştür. Aynı iç gimbaldeki gibi dış gimbalin 180º değerini geçişini çok hızlı tamamlamaması ve dengesini kaybetmemesi için bir miktar faz kazandırmak gerektiğinden 12.4 Hz frekansınan bir lead filtre yerleştirilmiştir. 12.4 Hz değerini bulurken kazanç marjininden fedakarlık edilmemesine ve en son bulunan faz marjin değerinde ulaşılan frekans ile filtrenin frekans değerinin birbirine yakın seçilmesine dikkat edilmiştir.

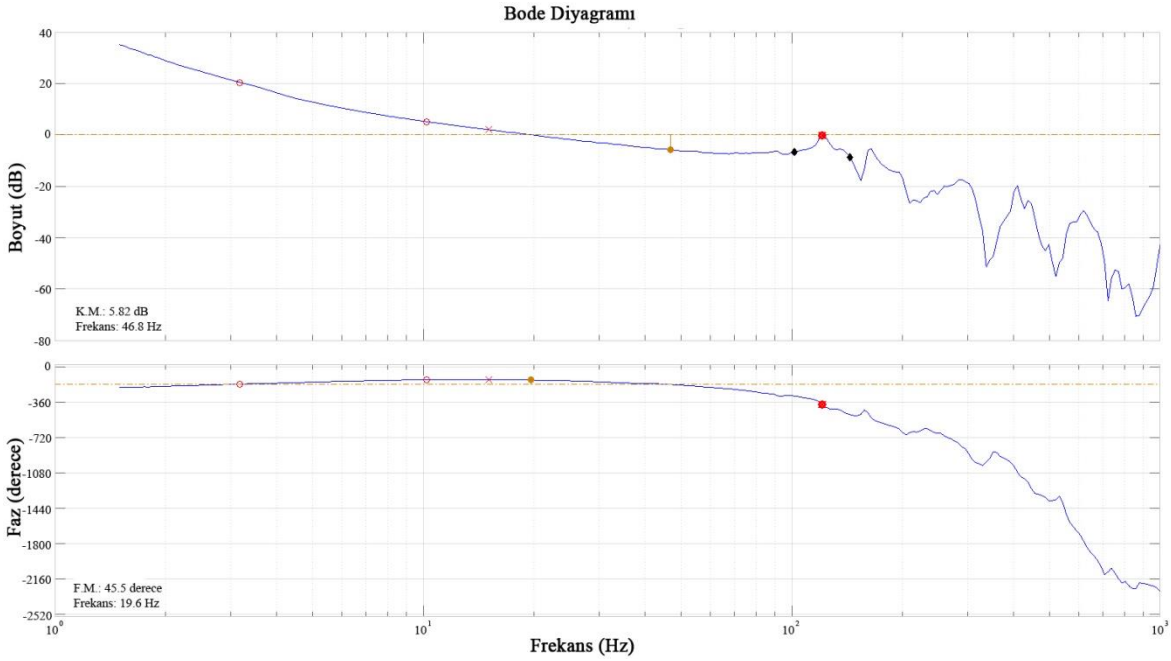


Şekil 4.15. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü ve Lead filtre kullanılan dış gimbal

Çizelge 4.8. Ardışık iki PI kontrolcü ve Lead filtre kullanıldığındaki kontrolcü ve Lead filtre katsayıları ve kazanç - faz marjinleri

Kazanç Marjini	6.02 dB
Faz Marjini	48 derece
Kontrolcü Kazancı	400
Sıfırlar	-20,-20
Kutuplar	0, 0
Lead filtre sıfırı	-64.225
Lead filtre kutbu	-94.514

Kazanç ve faz marjinleri istenilen seviyeye gelirken sistem, yüksek frekanslarda tek noktada rezonansa girmektedir. Bu sebeple 121 Hz frekansına Notch filtre uygulanarak bu değerde sistemin kazancının sıfıra yaklaşmasının önüne geçilmiştir.



Şekil 4.16. Hız döngüsünde ardışık iki PI kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanılan dış gimbal

Çizelge 4.9. Ardışık iki PI kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanıldığındaki kontrolcü, Lead ve Notch filtre katsayıları ve kazanç - faz marjinleri

Kazanç Marjini	5.82 dB	Lead filtre sıfırı	-64.225
Faz Marjini	45.5 derece	Lead filtre kutbu	-94.514
Kontrolcü Kazancı	470	Notch filtre frekansı	121 Hz
Sıfırlar	-20,-20	Notch filtre sıfırı	0.053397
Kutuplar	0, 0	Notch filtre kutbu	0.16886

Sonuç olarak dış gimbal hız döngüsü için elde edilen kontrolcünün ifadesi aşağıdaki şekli almıştır;

$$C^{hız}_{dış_{(PI)^2}} = 470x\frac{(1+0.05)(1+0.05)(1+0.016s)(1+0.00014s+(0.0013s)^2)}{s^2(1+0.011s)(1+0.00014s+(0.0013s)^2)} \tag{4.7}$$

Dış gimbal pozisyon döngüsü

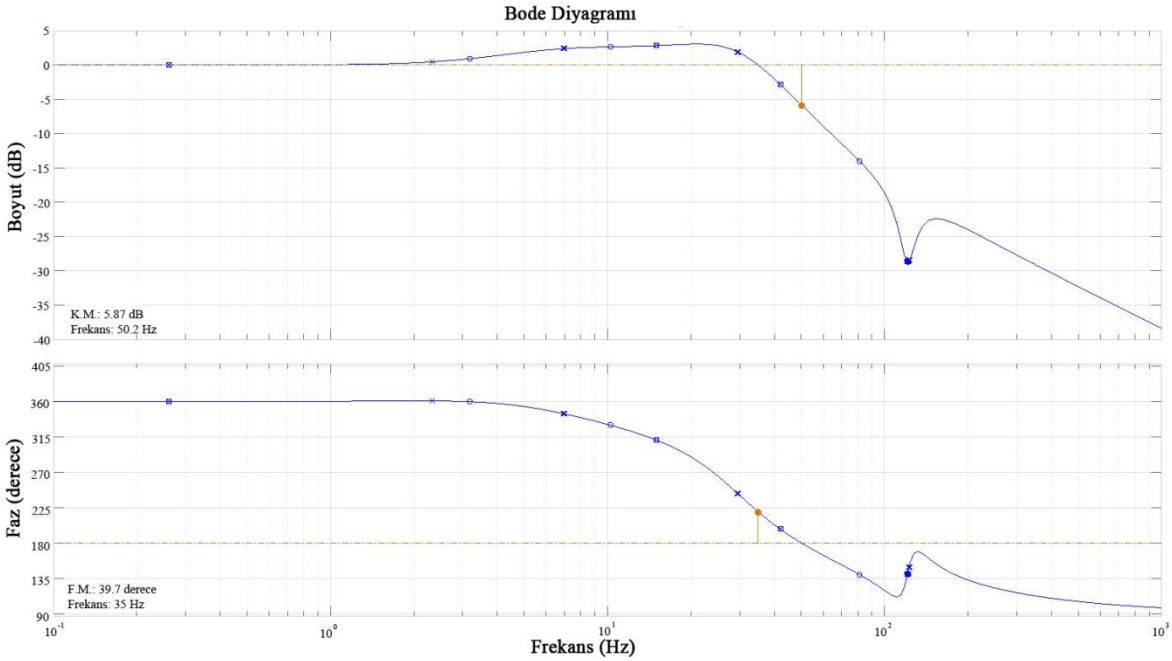
Aynı iç gimbaldeki gibi dış gimbal pozisyon döngüsünde de aynı işlem adımları takip edilerek dış gimbalin pozisyon döngüsünün transfer fonksiyonu bulunmuştur. 4.6'da verilen dış gimbalin hız döngüsü transfer fonksiyonu $H_{dış}$, ile 4.7'de verilen hız döngüsü kontrolcüsü kullanılarak sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu Denklem 4.8 yardımı ile elde edilmiştir.

$$TF_{dış}^{poz} = \frac{C_{dış_{(PI)^2}}^{hız} x H_{dış}}{1 + C_{dış_{(PI)^2}}^{hız} x H_{dış}} \tag{4.8}$$

4.8 yardımı ile elde edilen dış gimbal pozisyon döngüsü transfer fonksiyonu 4.9'da verilmiştir.

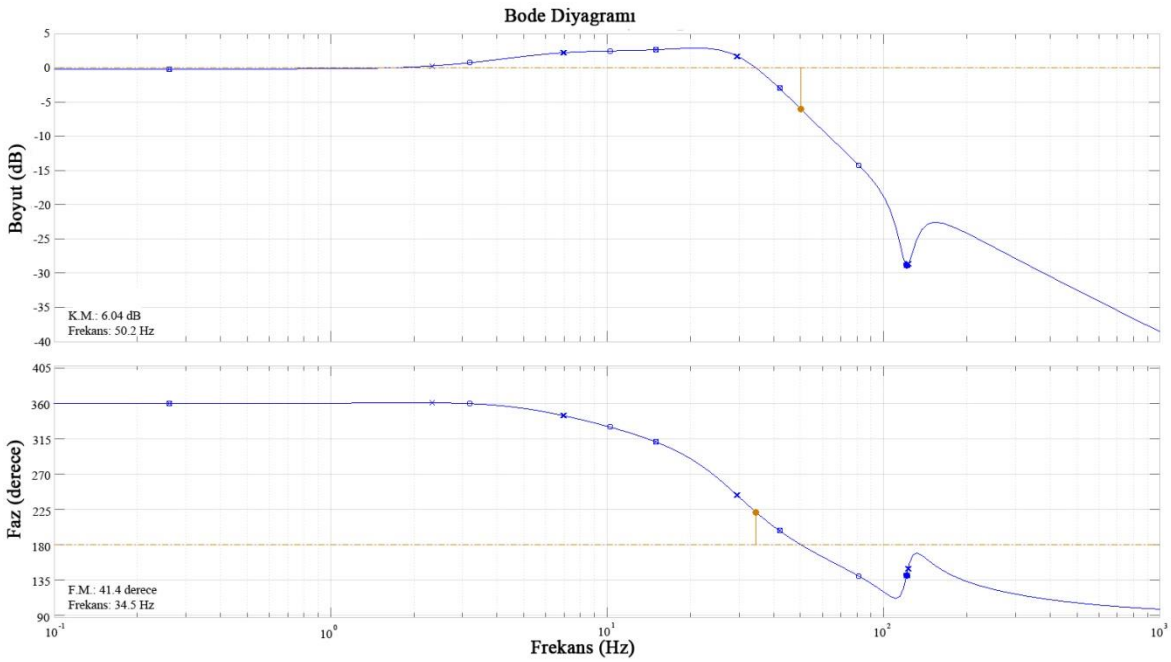
$$TF_{dış}^{poz} = -75.095 \frac{(s+20)^2 (s+64.23)(s-511.7)(s+1.643)(s^2+81.19s+5.78x10^5)}{(s+14.67)(s+1.643)(s^2+76.23s+1907)(s^2+177.6s+3.435x10^4)(s^2+273.4s+5.936x10^5)} \tag{4.9}$$

Elde edilen transfer fonksiyonu, bode şekillendirme yöntemi ile kontrolcü tasarlamak için Kontrol Sistemi Tasarlayıcı eklentisinde, hız döngüsünde olduğu gibi mimari bölümünde G ile belirtilen çevre bloğuna atanmıştır. Bunun sonucunda Şekil 4.17'de verilen, içerisinde hız döngüsünün kontrolcüsünün de dinamiklerini içeren pozisyon döngüsünün bode diyagramı elde edilmiştir.



Şekil 4.17. Kontrol edilmemiş dış gimbal pozisyon döngüsü bode diyagramı

Şekil 4.17'de görüldüğü üzere sistemin kazanç marjini 5.87 dB bulunmuştur. Bu değeri 6 dB seviyelerine yaklaştırmak için kazanç katsayısını değiştirmek yeterli olmuştur (Şekil 4.18). Bulunan değerler Çizelge 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.18. Pozisyon döngüsünde P kontrolcü kullanılan dış gimbal

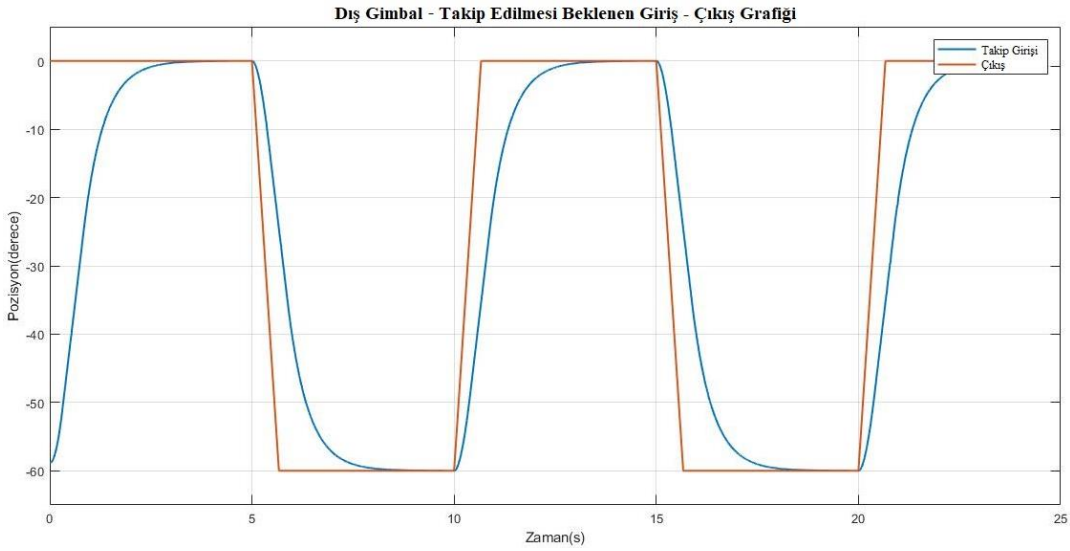
Çizelge 4.10. Tek P kullanıldığındaki kontrolcü katsayıları ve kazanç - faz marjinleri

Kazanç Marjini	6.04 dB
Faz Marjini	41.4 derece
Kontrolcü Kazancı	0.98

Bu durumda dış gimbalin pozisyon döngüsünün kontrolcüsü aşağıdaki gibi olmuştur.

$$C^{poz}_{dış\ (PI)^2} = 0.98 \tag{4.10}$$

Son olarak bulunan kontrolcüler, kullanıcı ara yüzünde Simulink ortamında EK-3'deki gibi tasarlanan modelde yerine yerleştirilmiştir. Daha sonra sisteme güç verilmiş ve giriş çıkış verileri kayıt altına alınarak çizdirilmiştir.



Şekil 4.19. Denetim altına alınmış dış gimbalin pozisyon takip grafiği

4.4.2. PID kontrolcü tasarımı

Bu bölümde sistem dinamiği çıkarılan iki eksenli hareket platformunun iç ve dış eksenlerin hız döngüleri için PID kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Kontrolcü parametreleri çift PI kontrolcü tasarımında olduğu gibi bode diyagramı üzerinden yapılmıştır. 3.4.1 bölümünde

tasarlanan kontrolcüler ile kıyaslama yapılabilmesi açısından kontrolcü performans kriterleri aynı seçilmiştir.

Kazanç marjini: 6dB

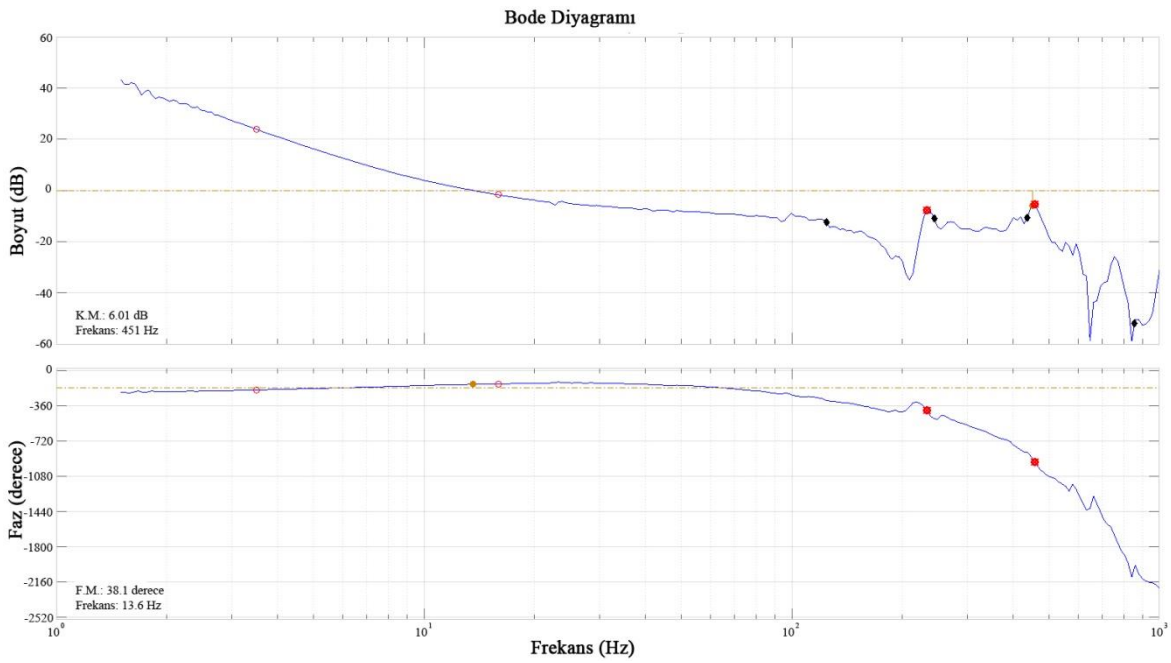
Faz marjini: 30-60 derece

Kullanılan kontrolcü denklem ..'da verilen şekilde seçilmiş, ayrıca bode diyagramını istenilen yapıya sokmak için çift PI kontrolcü tasarımında olduğu gibi filtreler kullanılmıştır.

PID kontrolcü formülü: $$P\left[1+I\frac{1}{s}+D\frac{N}{1+N\frac{1}{s}}\right] \tag{4.11}$$

<u>İç Gimbal PID Kontrolcü Tasarımı</u>

Sistem tanımlaması sırasında elde edilen iç gimbal bode diyagramı kullanılarak tasarım kriterlerine uygun PID kontrolcü tasarımı yapılmıştır. PID kontrolcü için sisteme 2 adet sıfır, 1 adet kutup ve bir adet integrator tanımlanmıştır. Bunun yanında bode diyagramını istenilen şekle sokmak için bir adet lead filtre ve iki adet notch filtre kullanılmıştır. Sonuçta elde edilen sistemin bode diyagramı grafik şekil 4.20.'deki halini almıştır.



Şekil 4.20. Hız döngüsünde ardışık PID kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanılan iç gimbal

Çizelge 4.11. İç gimbal hız döngüsünde kullanılan PID kontrolcünün kontrolcü, Lead ve Notch filtre katsayıları ve kazanç – faz marjinleri

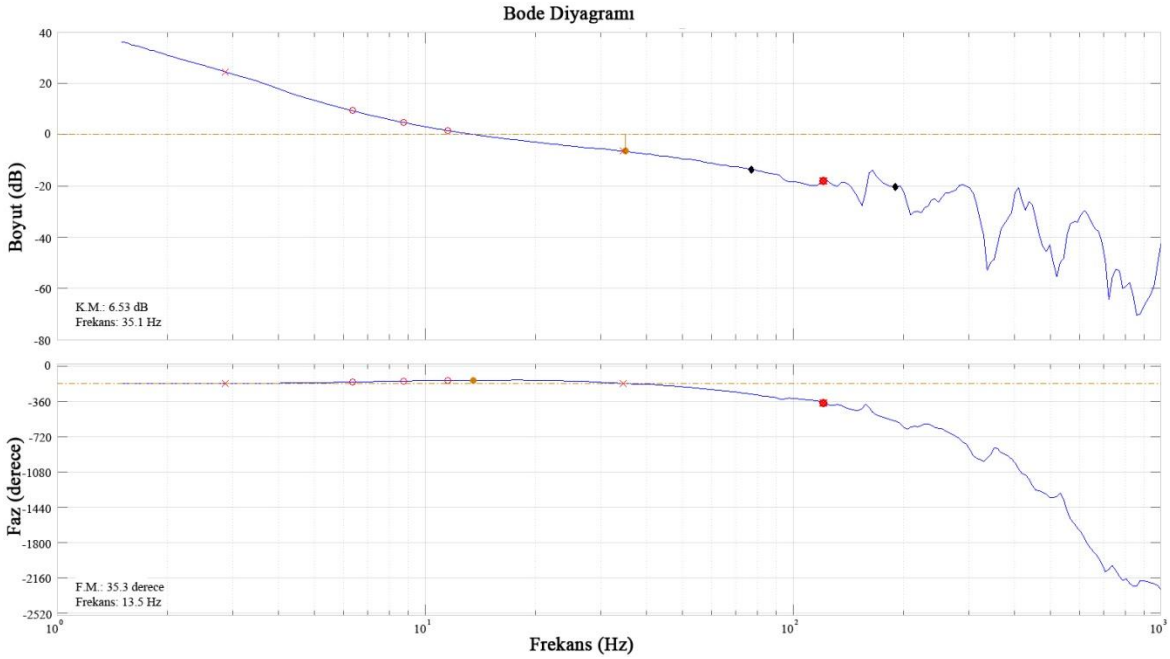
Kazanç Marjini	6.01 dB	Lead filtre kutbu	-2872.7
Faz Marjini	38.1 derece	1.Notch filtre frekansı	233 Hz
Kontrolcü Kazancı	6800	1.Notch filtre sıfırı	0.2059
Sıfırlar	-100,-100	1.Notch filtre kutbu	0.65111
Kutuplar	0.05	2.Notch filtre frekansı	457 Hz
Integrator	0	2.Notch filtre sıfırı	0.17937
Lead filtre sıfırı	-21.988	2.Notch filtre kutbu	0.71408

İç gimbal için elde edilen kontrolcünün transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$C_{\text{iç}\ (\text{PID})}^{\text{hız}} = \frac{(1+0.01s)(1+0.01s)(1+0.045s)(1+0.00028s+(0.00068s)^2)(1+0.00012s+(0.00035s)^2)}{s(1+20s)(1+0.00035s)(1+0.00089s+(0.00068s)^2)(1+0.0005s+(0.00035s)^2)} \quad (4.12)$$

<u>Dış Gimbal PID Kontrolcü Tasarımı</u>

Sistem tanımlaması sırasında elde edilen dış gimbal bode diyagramı kullanılarak tasarım kriterlerine uygun PID kontrolcü tasarımı yapılmıştır. PID kontrolcü için sisteme 2 adet sıfır, 1 adet kutup ve bir adet integrator tanımlanmıştır. Bunun yanında bode diyagramını istenilen şekle sokmak için lead filtre ve notch filtre kullanılmıştır. Sonuçta elde edilen sistemin bode diyagramı grafik şekil 4.21.'deki halini almıştır.



Şekil 4.21. Hız döngüsünde ardışık PID kontrolcü, Lead ve Notch filtre kullanılan dış gimbal

Çizelge 4.12. Dış gimbal hız döngüsünün PID kontrolcünün kontrolcü, Lead ve Notch filtre katsayıları ve kazanç - faz marjinleri

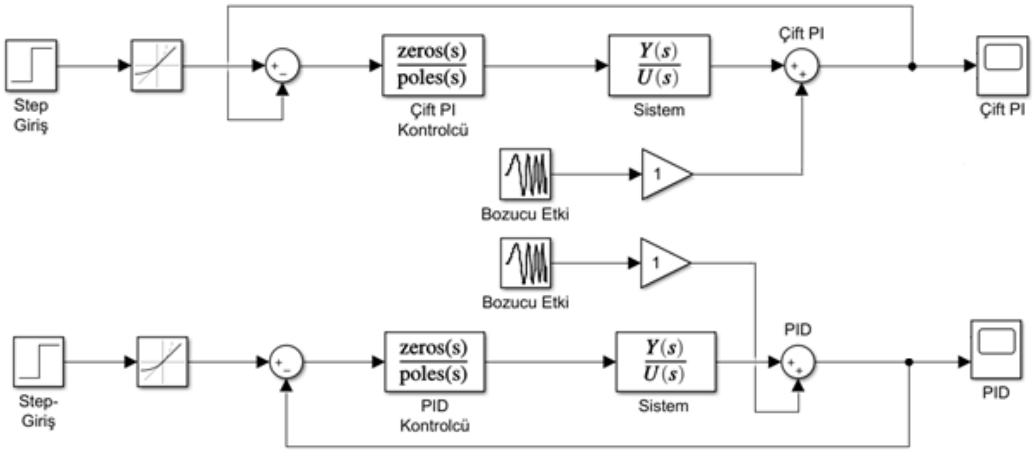
Kazanç Marjini	6.53 dB	Lead filtre sıfırı	-72.552
Faz Marjini	35.3 derece	Lead filtre kutbu	-217.66
Kontrolcü Kazancı	75	1.Notch filtre frekansı	121 Hz
Sıfırlar	-18,-40	1.Notch filtre sıfırı	0.037128
Kutuplar	55	1.Notch filtre kutbu	0.93261
Integrator	0		

Dış gimbal için elde edilen kontrolcünün transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$C_{\text{dış}\,(\text{PID})}^{\text{hız}} = 75\text{x}\frac{(1+0.025\text{s})(1+0.018\text{s})(1+0.014\text{s})(1+9.8\text{x}10^{-5}\text{s}+(0.0013\text{s})^2)}{\text{s}(1+056\text{s})(1+0.0046\text{s})(1+0.0025\text{s}+(0.0013\text{s})^2)} \tag{4.13}$$

4.4.3. Çift PI ve PID kontrolcülerinin kıyaslanması

Bu bölümde iki eksenli hareket platformunun iç ve dış eksenlerinin hız döngüleri için tasarlanan kontrolcülerin dışarıdan gelen bir etkiyi ne oranda sisteme aktardıkları incelenerek birbirleri ile kıyaslaması yapılmıştır. Bu amaçla ilk önce Simulink ortamında Şekil 4.22'de verilen model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde önceden belirlenen kontrolcü parametreleri sıra ile Matlab çalışma ortamına alınarak Şekil 4.22'de verilen blok diyagramındaki kontrolcü bloklarına yerleştirilmiştir. Daha sonra verilen farklı frekanslardaki bozucu etkiler için iki kontrolcünün de ayrı ayrı bulunduğu sistemin tepkileri kayıt altına alınmış ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.22. Çift PI ve PID kontrolcü için sistem çıktılarını karşılaştırma blok diyagramı

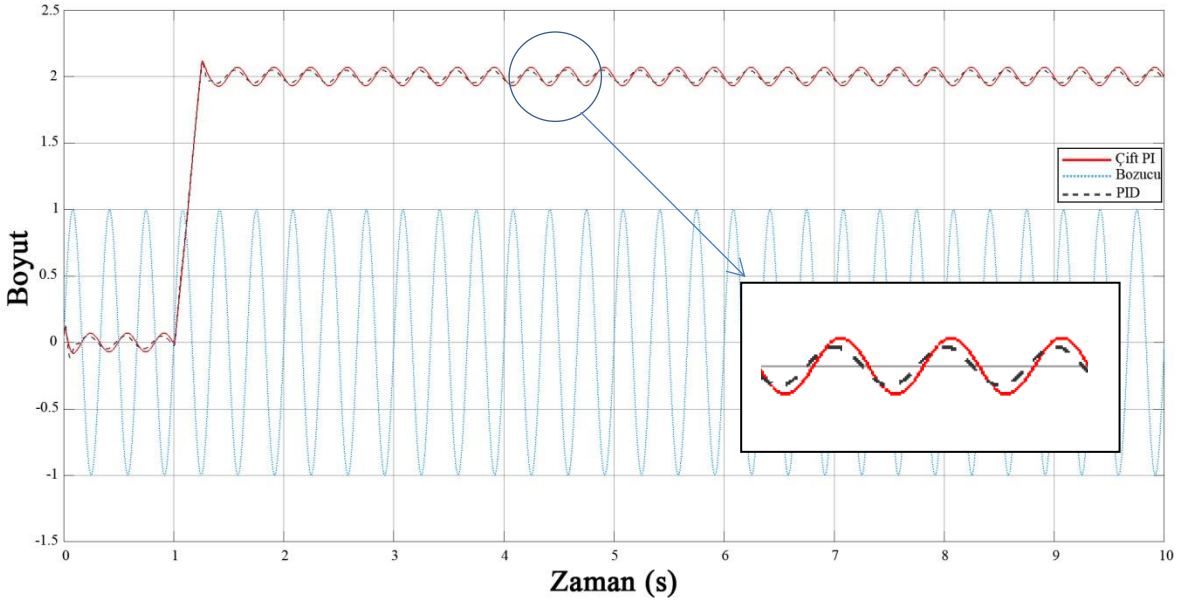
<u>İç Gimbal Hız Döngüsü için Tasarlanan Çift PI ve PID Kontrolcülerinin Karşılaştırılması</u>

Burada Şekil 4.22'de verilen blok diyagramında bozucu etki frekansı değiştirilerek sistemin iki kontrolcü için bozucu etki sönümleme kabiliyeti incelenmiştir. 3 Hz, 6 Hz, 7 Hz, 9,84 Hz, 10 Hz ve 22,7 Hz değerleri için grafik üzerinde karşılaştırma yapılmıştır. Diğer farklı frekanslar için yapılan çalışmalar ise çizelge ile verilmiştir.

3 Hz Frekansı

Frekansı 3 Hz, genliği 2 birim olan bir bozucu etki verildiği zaman sistem bunu çift PI kontrolcü varken 0,14 birim genlikte, PID kontrolcü varken 0,098 birim genlikte yansıtmıştır. 3Hz frekansına kadar iki kontrolcünün de yüksek performans sergilediği

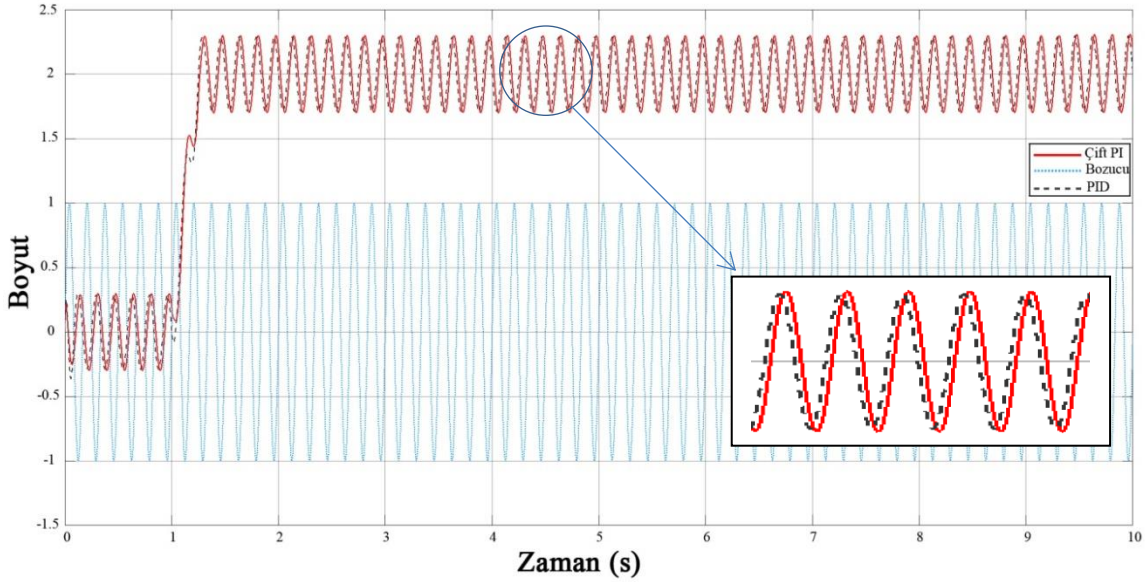
görülmüştür. Ancak bu frekansa kadar PID kontrolcünün çift PI kontrolcüye göre bir miktar daha iyi bir performans ortaya koyduğu görülmüştür.



Şekil 4.23. 3 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

6 Hz Frekansı

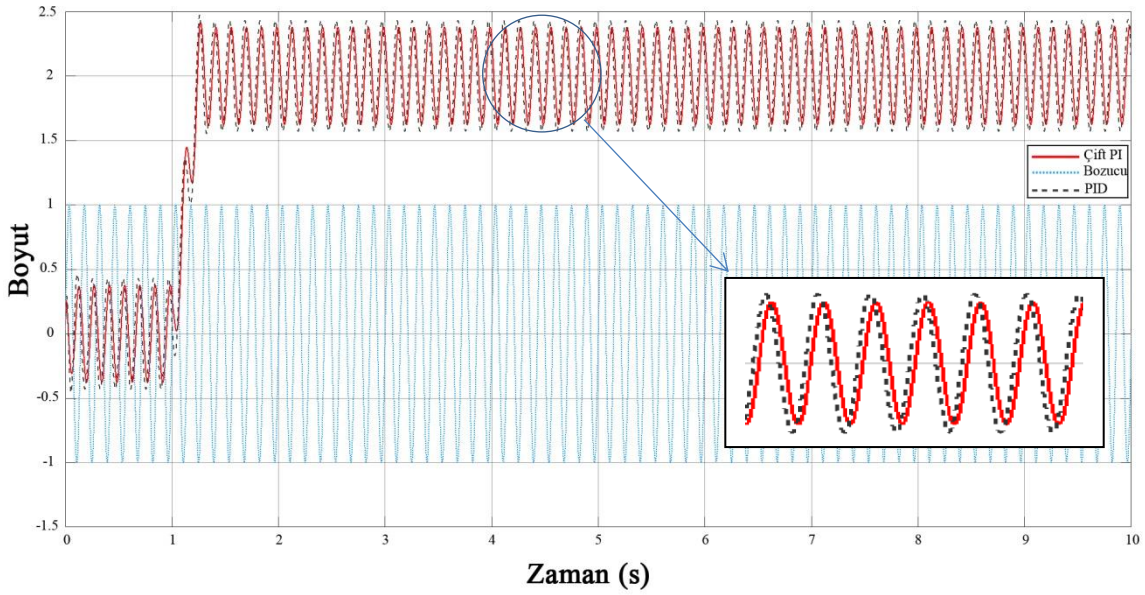
Frekansı 6 Hz, genliği 2 birim olan bir bozucu etki verildiği zaman sistem bunu çift PI kontrolcü varken 0,598 birim genlikte, PID kontrolcü varken 0,576 birim genlikte yansıtmıştır. 6 Hz frekansında görüldüğü üzere kontrolcü performanslarında ayrışma başlamıştır. Burada çift PI kontrolcü gürültüyü 3,35 kat azaltırken, PID kontrolcü 3,47 kat azaltmıştır.



Şekil 4.24. 6 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

7 Hz Frekansı

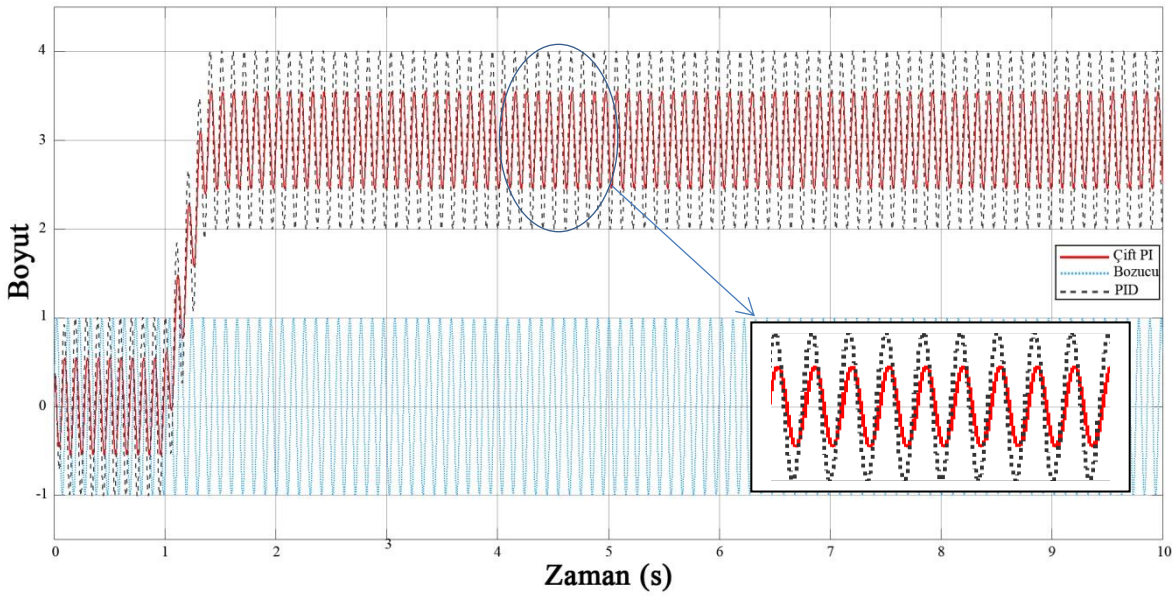
Frekansı 7 Hz, genliği 2 birim olan bir bozucu etki verildiği zaman sistem bunu çift PI kontrolcü varken 0,756 birim genlikte, PID kontrolcü varken 0,864 birim genlikte yansıtmıştır. 7Hz frekansında görüldüğü üzere çift PI kontrolcü performansı PID kontrolcüye göre 1,14 kat daha iyi bir performans sergilemiştir.



Şekil 4.25. 7 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

9,84 Hz Frekansı

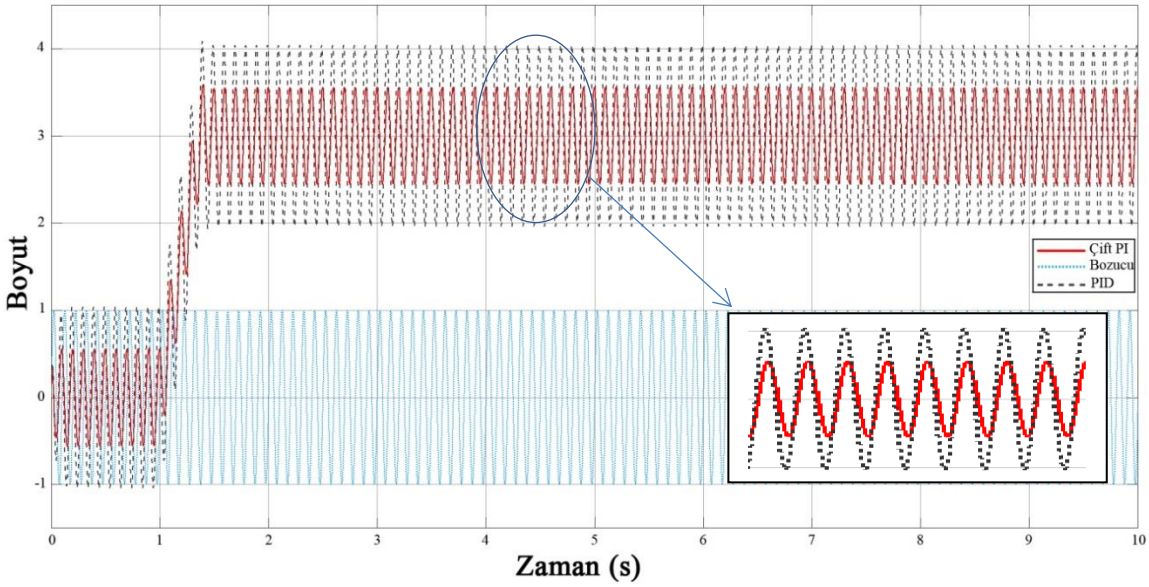
Frekansı 9,84 Hz, genliği 2 birim olan bir bozucu etki verildiği zaman sistem bunu çift PI kontrolcü varken 1,096 birim genlikte, PID kontrolcü ise 2 birim genlikte yansıtmıştır. 9,84Hz frekansında PID kontrolcü, dışarıdan gelen bir bozucu etkiyi sönümleyememiş, olduğu gibi sisteme aktarmıştır. Bunun yanında çift PI kontrolcü ise bu frekanstaki bir etkiyi 0,548 kat sönümleyebilmiştir.



Şekil 4.26. 9.84 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

10 Hz Frekansı

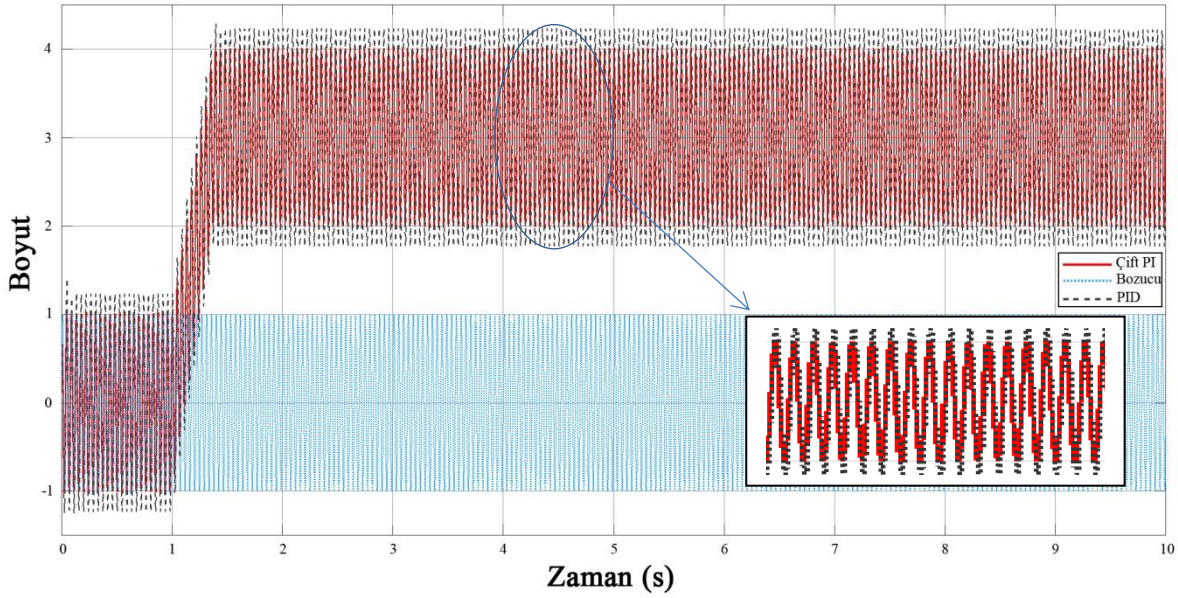
Frekansı 10 Hz, genliği 2 birim olan bir bozucu etki verildiği zaman sistem bunu çift PI kontrolcü varken 1,11 birim genlikte, PID kontrolcü varken 2,08 birim genlikte yansıtmıştır. 10Hz frekansında görüldüğü üzere çift PI kontrolcü performansı PID kontrolcüye göre 1,87 kat daha iyi bir performans sergilemiştir.



Şekil 4.27. 10 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

22.7 Hz Frekansı

Frekansı 22.7 Hz, genliği 2 birim olan bir bozucu etki verildiği zaman sistem bunu çift PI kontrolcü varken 2 birim genlikte, PID kontrolcü varken 2,48 genlikte yansıtmıştır. 22.7Hz frekansında ve ilerleyen frekanslarda çift PI kontrolcü de aynı PID kontrolcüde olduğu gibi etkinliğini kaybetmiştir.



Şekil 4.28. 22.7 Hz frekansında iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.12.‘de incelenen frekanslar için kayıt altına alınan kontrolcülerin tepkileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.13. Farklı frekans aralıkları için iç gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün 2 birimlik bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

Frekans (Hz)	Çift PI Kontrolcü (birim)	PID Kontrolcü (birim)	Oran
1	0,00804	0,005	0,621891
2	0,00512	0,0034	0,664063
3	0,14	0,098	0,7
4	0,272	0,2	0,735294
5	0,432	0,354	0,819444
6	0,598	0,576	0,963211
7	0,756	0,864	1,142857
8	0,894	1,216	1,360179
9	1	1,648	1,648
9,84	1,096	2	1,824818
10	1,11	2,08	1,873874
11	1,192	2,44	2,04698
12	1,268	2,7	2,129338
13	1,342	2,8	2,086438
14	1,404	2,82	2,008547
15	1,472	2,8	1,902174
16	1,532	2,76	1,801567
17	1,602	2,7	1,685393
18	1,67	2,64	1,580838
19	1,728	2,6	1,50463

20	1,808	2,56	1,415929
21	1,874	2,52	1,344717
22	1,942	2,5	1,287333
22,7	2	2,48	1,24
30	2,52	2,38	0,944444
40	2,94	2,36	0,802721
50	2,94	2,36	0,802721
80	2,48	2,36	0,951613
100	2,32	2,3	0,991379

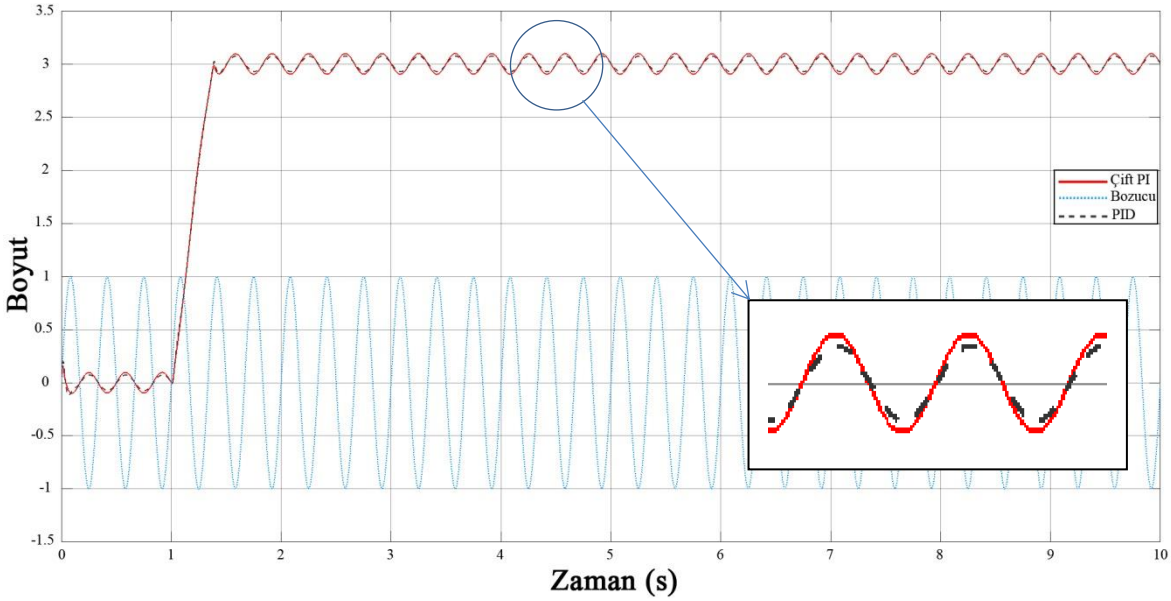
Verilen grafiklerde ve çizelgede görüldüğü üzere çift PI kontrolcü 3Hz frekansına kadar PID kontrolcüden geri kalmakta ancak iyi bir performans sergilemektedir. 3 Hz frekansından sonra performansı PID kontrolcüyü yakalamış, 6 Hz frekansından sonra ise 22,7 Hz'e kadar daha üstün bir performans sergilemiştir. PID kontrolcünün 9,84 Hz'e kadar sönümleme yapabildiği, sonraki frekanslarda ise bu etkiyi artırarak sisteme yansıttığı görülmüştür. Yüksek frekans aralığı detaylı olarak incelendiği zaman kontrolcülerin yaklaşık olarak aynı oranda sistemi etkilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda sistemin çalışma ortamının düşük frekans aralığı olduğu göz önünde bulundurulduğunda çift PI kontrolcünün daha iyi bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Dış Gimbal için Tasarlanan Çift PI ve PID Kontrolcülerinin Karşılaştırılması

Burada Şekil 4.22'de verilen blok diyagramında bozucu etki frekansı değiştirilerek sistemin iki kontrolcü için bozucu etki sönümleme kabiliyeti incelenmiştir. 3 Hz, 5 Hz, 7 Hz, 9 Hz ve 14,3 Hz değerleri için grafik üzerinde karşılaştırma yapılmıştır. Diğer farklı frekanslar için yapılan çalışmalar ise çizelge ile verilmiştir.

3 Hz Frekansı

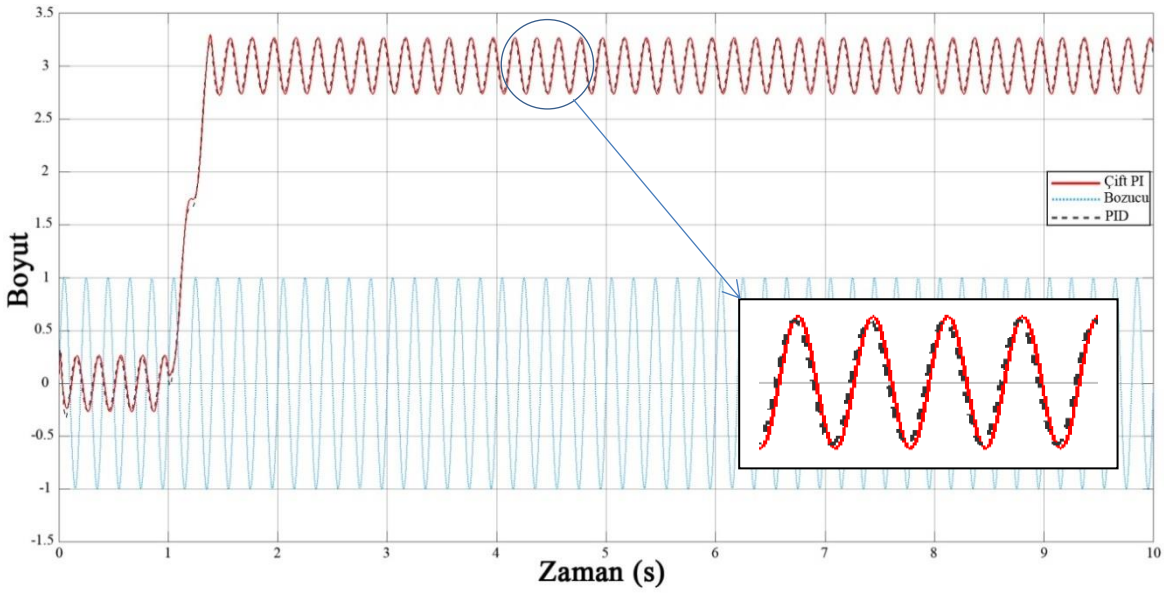
Frekansı 3Hz, genliği 2 birim olan bir bozucu etki verildiği zaman sistem bunu çift PI kontrolcü varken 0,196 birim genlikte, PID kontrolcü varken 0,15 birim genlikte yansıtmıştır. 3Hz frekansına kadar iki kontrolcünün de yüksek performans sergilediği görülmüştür. Ayrıca kontrolcülerin performansı birbirine oldukça yakın bulunmuştur.



Şekil 4.29. 3 Hz frekansında dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

5Hz Frekansı

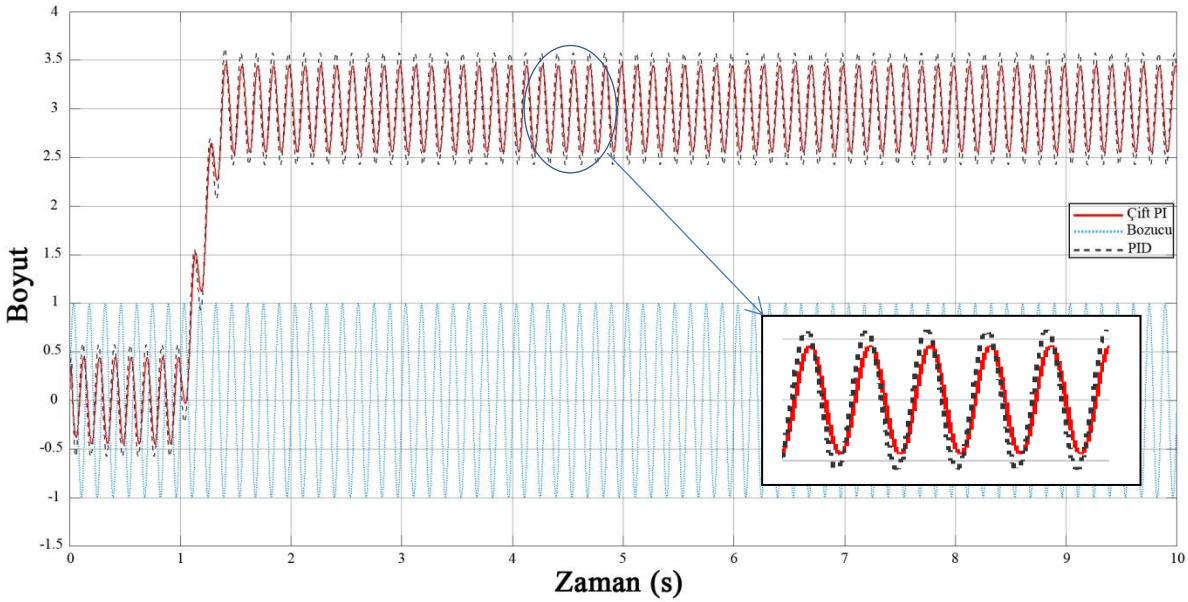
Frekansı 5Hz, genliği 2 birim olan bir bozucu etki verildiği zaman sistem bunu çift PI kontrolcü varken 0,534 birim genlikte, PID kontrolcü varken 0,51 birim genlikte yansıtmıştır. Burada çift PI kontrolcü gürültüyü 3,75 kat azaltırken, PID kontrolcü 3,92 kat azaltmıştır. 5Hz frekansından sonra kontrolcü performanslarında ayrışma başlamıştır.



Şekil 4.30. 5 Hz frekansında dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

7Hz Frekansı

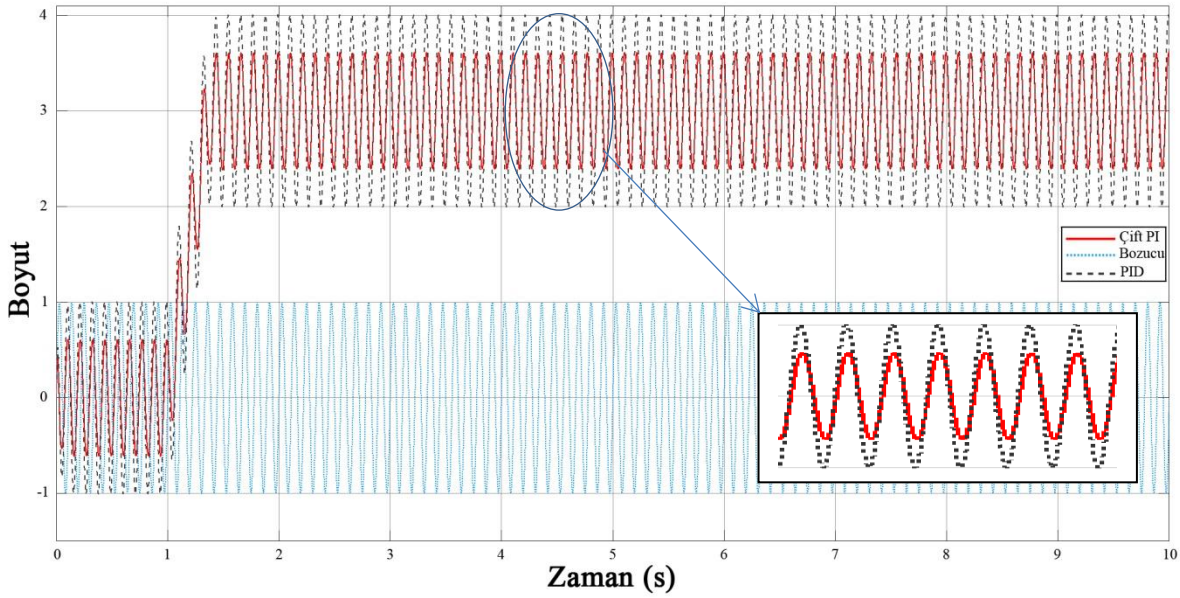
Frekansı 7Hz, genliği 2 birim olan bir bozucu etki verildiği zaman sistem bunu çift PI kontrolcü varken 0,894 birim genlikte, PID kontrolcü varken 1,152 birim genlikte yansıtmıştır. 7Hz frekansında görüldüğü üzere çift PI kontrolcü performansı PID kontrolcüye göre 1,29 kat daha iyi bir performans sergilemiştir.



Şekil 4.31. 7 Hz frekansında dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

9Hz Frekansı

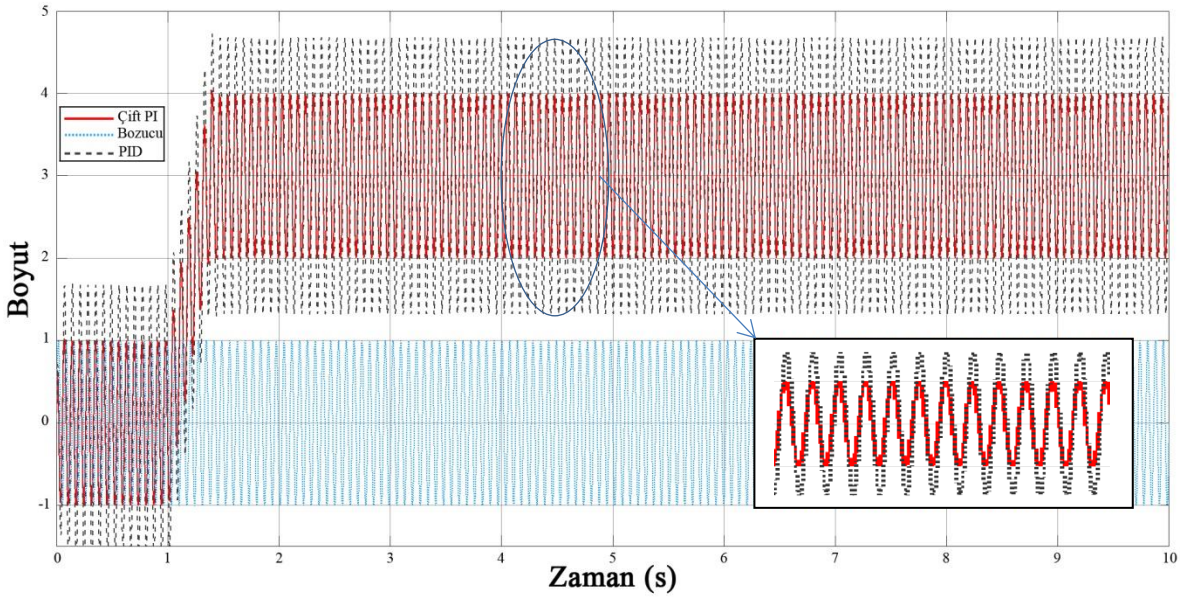
Frekansı 9 Hz, genliği 2 birim olan bir bozucu etki verildiği zaman sistem bunu çift PI kontrolcü varken 1,22 birim genlikte, PID kontrolcü ise 2 birim genlikte yansıtmıştır. 9 Hz frekansında PID kontrolcü, dışarıdan gelen bir bozucu etkiyi sönümleyememiş, olduğu gibi sisteme aktarmıştır. Bunun yanında çift PI kontrolcü ise bu frekanstaki bir etkiyi 0,61 kat sönümleyebilmiştir.



Şekil 4.32. 9 Hz frekansında dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

14.3 Hz Frekansı

Frekansı 14,3 Hz, genliği 2 birim olan bir bozucu etki verildiği zaman sistem bunu çift PI kontrolcü varken 2 birim genlikte, PID kontrolcü varken 3,36 genlikte yansıtmıştır. 14,3 Hz frekansında ve ilerleyen frekanslarda çift PI kontrolcü de aynı PID kontrolcüde olduğu gibi etkinliğini kaybetmiştir.



Şekil 4.33. 14.3 Hz frekansında dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.13.‘de incelenen frekanslar için kayıt altına alınan kontrolcülerin tepkileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.14. Farklı frekans aralıkları için dış gimbal hız döngüsünde kullanılan çift PI kontrolcü ve PID kontrolcünün 2 birimlik bozucu girdiyi yansıtma oranlarının karşılaştırılması

Frekans (Hz)	Çift PI Kontrolcü (birim)	PID Kontrolcü (birim)	Oran
1	0,012	0,0136	1,133333
2	0,0754	0,06	0,795756
3	0,196	0,15	0,765306
4	0,356	0,3	0,842697
5	0,534	0,51	0,955056
6	0,716	0,786	1,097765
7	0,894	1,152	1,288591
8	1,062	1,57	1,478343
9	1,22	2	1,639344
10	1,372	2,42	1,763848
11	1,52	2,74	1,802632
12	1,664	3	1,802885
13	1,802	3,18	1,764706
14	1,948	3,32	1,704312
14,3	2	3,36	1,68
15	2,08	3,42	1,644231
16	2,22	3,5	1,576577
20	2,86	3,7	1,293706
30	3,82	3,62	0,947644
50	3,02	2,54	0,84106
80	2,32	2,06	0,887931
100	2,12	2	0,943396

Verilen grafiklerde ve çizelgede görüldüğü üzere iki kontrolcü de 5 Hz frekansına kadar dışarıdan gelen etkileri sönümlemede birbirine yakın ve başarılı performanslar sergilemişlerdir. 5 Hz frekansından sonra ise 14,3 Hz'e kadar çift PI kontrolcü daha üstün bir performans sergilemiştir. PID kontrolcünün 9 Hz'e kadar sönümleme yapabildiği, sonraki frekanslarda ise bu etkiyi artırarak sisteme yansıttığı görülmüştür. Yüksek frekans aralığı detaylı olarak incelendiği zaman kontrolcülerin yaklaşık olarak aynı oranda sistemi etkilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda sistemin çalışma ortamının düşük frekans aralığı olduğu göz önünde bulundurulduğunda çift PI kontrolcünün daha iyi bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇ

Tez çalışmasında, üzerine elektro-optik bir görüntüleme sistemi bağlı bulunan iki eksenli hareketli platformu için ardışık kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Amaç, platform üzerine bağlanan görüntüleme biriminin, verilen bir komuta istenilen ölçüler dahilinde gitmesini ve dışarıdan gelen bozucu etkilere karşı konumunu koruyabilmesini sağlamak olmuştur. Bu kapsamda hareketli platformun iç ve dış gimballeri hız ve konum döngüleri için kontrolcü parametreleri belirlenmiştir. Literatürde incelenen çalışmalarda, iki eksenli hareket platformlarının kontrolü için klasik kontrol metotlarının yanında, doğrusal olmayan kontrol metotlarının da kullanıldığı görülmüştür. Bunun yanında, etkili bir klasik kontrolcü kullanımı ile de başarılı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, iki eksen içinde hız döngüsünde çift PI kontrolcü kullanılarak kalıcı durum hatası ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Bu çalışmalar, hem simülasyon ortamında gerçekleştirilmiş hem de gerçek sistem üzerinde denemeler yapılmıştır.

Tez çalışmasının ilk aşamasında, hareket platformunun eksen takımları belirlenmiş ve eksen takımlarının birbiri ile olan ilişkileri kurulmuştur. Daha sonra, kinematik denklemler türetilmiştir. Sürtünmenin sistem üzerindeki etkisi ve en uygun modeli üzerine araştırma yapılmıştır. Sistemde kullanılan DC motor, ataletsel ölçüm birimi ve enkoderlerin parametreleri netleştirilmiştir. Son olarak dinamik denklemler, Euler denklemleri kullanılarak bulunmuştur.

Simülasyon çalışmaları bölümünde, ikinci bölümde elde edilen Denklem 2.53 ve Denklem 2.64'e uygun olarak, sistemin blok diyagramı Matlab Simulink ortamında çıkarılmıştır. Platform kontrol çalışmasında, önce hız döngüsü için bir kontrolcü daha sonra konum döngüsü için bir kontrolcü olacak şekilde ardışık kontrolcü yapısı tasarlanmıştır. İç gimbal hız döngüsünün birim basamak girdiye olan cevabı incelendiğinde, eksenin tek PI ile kontrol altına alınabildiği gözlemlenmiştir. Konum döngüsünde ise yalnızca bir kazanç katsayısı P ile istenilen şartların sağlandığı gözlemlenmiştir. Dış gimbal hız döngüsünde ise tek PI kullanıldığı zaman, birim basamak cevap tepkisi incelendiğinde, sistemde durağan durum hatası oluşması sebebiyle çift PI kullanılmıştır. Bunun yanında pozisyon döngüsü için iç gimbalde olduğu gibi kazanç katsayısı kullanımı ile isterler sağlanmıştır.

Son bölüm olan deneysel çalışmalar bölümünde, hareket platformu ile gerçek zamanlı olarak çalışmaya olanak sağlayacak olan test alt yapısı kurulmuştur. Test alt yapısı sayesinde, tasarlanan kontrolcü parametreleri ile ilgili değişiklikler anlık olarak yapılabilmiştir. Deneysel çalışmalara, her bir eksen için hız döngülerinin karakteristiğini yansıtan frekans tepki fonksiyonları çıkarılarak başlanmıştır. Sisteme verilen farklı frekanslardaki sinüs sinyaline sistemin verdiği tepki ataletsel ölçüm biriminden alınmıştır. Bu veriler kullanılarak hız döngülerinin bode diyagramı çıkarılmış ve istenilen biçime sokmak için bode diyagramı şekillendirilmiştir. İlk olarak hareket platformunun eksenleri için ardışık kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Burada, iç ve dış gimbal için hız döngülerinde çift PI kontrolcü ve filtreler kullanıldığı zaman sistemin durağan durum hatasının önüne geçildiği görülmüştür. Bunun yanında, gimballerin pozisyon döngülerine kontrolcü tasarlamak için transfer fonksiyonu tahmininde bulunulmuş ve bu fonksiyonun bode diyagramı üzerinden tasarım yapılmıştır. Gimballerin pozisyon döngüsünde ise P kazanç katsayısı kullanılınca, bode diyagramı istenilen şekle girmiştir. Daha sonra, gimballerin hız döngülerinde seçilen çift PI kontrolcülerin performanslarını kıyaslama amacıyla tasarım aşamasında kullanılan performans kriterlerine uygun olacak biçimde PID kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Son olarak, elde edilen kontrolcülerin performansları birbiri ile kıyaslanmıştır.

Simülasyon ortamında elde edilen kontrolcü yapısı ile deney ortamında elde edilen kontrolcü yapısı arasında bir miktar farklılık olsa da birbirine benzedikleri görülmüştür. Yani benzetim tabanlı çalışmada ortaya konulduğu gibi hız döngülerinde PI kontrolcü ile pozisyon döngülerinde ise kazanç katsayısı P ile denetim yapmanın, sistemi kontrol altına almayı mümkün kıldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu da bize, doğrudan gerçek zamanlı sistem üzerinde çalışmalara başlamadan önce benzetim tabanlı çalışmalar ile kontrolcü yapısının elde edilmesinin, zamandan kazanım sağladığını göstermiştir. Simülasyon ortamında elde edilen sonuçların, gerçek sistemde nasıl bir kontrolcü kullanılabileceği hakkında fikir verdiği deneyimlenmiştir.

Deney ortamında ve simülasyon ortamında elde edilen kontrolcü yapısının birbirine benzediği sonucuna ulaşılmıştır. Ancak bu yöntemlerde bulunan kontrolcülerin katsayılarının birbiri ile aynı olmadığı görülmüştür. Simülasyon ortamında elde edilen oransal ve integral kazançları arasındaki oranın, deney ortamında elde edilen kazanç katsayıları arasındaki orana yakın olduğu hem iç hem de dış gimbal için görülmüştür.

Ancak kazanç katsayıları arasındaki oran her ne kadar birbirine benzese de değerler birbirine yakın bulunmamıştır. Gerçek sistemde elde edilen değerler, deney ortamında elde edilen değerlerden oldukça küçük bulunmuştur. Bunun sebebinin, test ortamında sistem ile gerçek zamanlı olarak çalışmaya olanak sağlayan XPC Target cihazının iç dinamiğinden gelen bir çarpan olduğu düşünülmektedir. Kontrolcü değerleri belirlendikten sonra bu çarpanın katsayısının belirlenip, doğru değerlerin kontrolcü kartına yüklenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Benzetim tabanlı çalışmada iç gimbalin hız döngüsünde tek PI kontrolcü kullanımının yeterli olacağı sonucuna varılmıştı. Ancak gerçek zamanlı çalışma sonucunda, sistemin istenilen doğrulukta komutları yerine getirmesi için bir PI kontrolcüye daha ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak, benzetim tabanlı çalışmada, blok diyagramının oluşturulmasında kullanılan denklemlerin, sistemin ataletinin dengeli olduğu varsayımı yapılarak oluşturulmuş olmasından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Eğer ikinci bölümde elde edilen denklemlerde sistemin atalet dengesizliği de ele alınarak blok diyagramlar oluşturulsaydı, gerçek zamanlı sonuçlar ile benzer sonuçlara ulaşılacağı ön görülmüştür.

Gerçek zamanlı çalışmalarda, benzetim tabanlı çalışmalardan farklı olarak sistemin farklı frekans girişlerine olan çıkışları üzerinden bode diyagramları incelenmiştir. Bu sayede sistemin iç ve dış gimballerinin hangi frekans aralığında nasıl tepki verdiği detaylı olarak ortaya konulabilmiştir. İç gimbal hız döngüsü için çizdirilen bode diyagramında 180º geçişinin hızlı olmaması için bir adet lead filtre eklenmiştir. Bunun yanında sistemin rezonansa girme ihtimalinin yüksek olduğu iki noktada notch filtre tasarlanarak bu frekans aralıklarında sistem baskılanmıştır. Dış gimbal hız döngüsü için oluşturulan bode diyagramı incelendiğinde ise eksen kontrolcüsünün bir adet lead filtre ve bir adet notch filtreye ihtiyaç duyduğu görülmüş ve eklenmiştir. Gerçek zamanlı uygulamada elde edilen bu filtreler sayesinde hareket platformunun performansı artırılmıştır.

Benzetim tabanlı çalışmada, birim basamak girişe sistemin vermiş olduğu cevaba bakarak kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda ise frekans tepki fonksiyonu kullanılmış ve bu fonksiyonlarla çizdirilen bode diyagramlarından yararlanılarak kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Sistemin eksenlerinin bode diyagramını, istenilen şekle sokmak

yukarıda da belirtildiği gibi sistemin karakteri hakkında detaylı bilgi verdiğinden, daha efektif bir kontrolcü tasarımı yapılmasına olanak sağlamıştır.

Deneysel çalışmada iç ve dış gimballerin hız döngüleri için tasarlanan çift PI kontrolcü ile PID kontrolcülerin dışarıdan gelen bozucu etkileri sönümleme kabiliyetleri üzerine kıyaslama yapılmıştır. Burada gimballere farklı frekanslarda bozucu girişler verilmiş ve kontrolcülerin bu girişleri ne ölçüde sisteme aktardıkları birbirleri ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda iç gimbalin hız döngüsü için tasarlanan kontrolcülerin 6 Hz'e kadar birbirine yakın performans sergilediği, 6-22.7 Hz aralığında çift PI kontrolcünün daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. 22.7 Hz değerinden sonra ise iki kontrolcünün performansının tekrar birbirine benzediği görülmüştür. Dış gimbal için tasarlanan kontrolcülerin ise 5 Hz'e kadar birbirine yakın performans sergilediği, 5-14.3 Hz aralığında çift PI kontrolcünün daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. 14.3 Hz değerinden sonra ise iki kontrolcünün performansının tekrar birbirine benzediği görülmüştür. Bunun yanında iç ve dış gimballer için tasarlanan PID kontrolcülerin sönümleme frekans aralıklarının çift PI kontrolcülere göre daha kısıtlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu tez çalışmasında elde edilen ardışık kontrolcü yapısı ile iki eksenli hareket platformunun taşıdığı elektro-optik birimin bakış hattı stabilizasyonu sağlanabilmiştir. Bu tez ile iki eksenli hareket platformlarının hız döngüsünde çift PI kullanılarak stabilizasyon gerçekleştirme çalışması teorik çalışma yanında gerçek zamanlı olarak da denenmiştir. Gelecek çalışmalarda, deneysel çalışmalarda eksenlerin hız ve pozisyon döngüleri için elde edilen kontrolcü parametrelerinin XPC Target'ın kazancından bağımsız hale getirilmesi çalışması gerçekleştirilebilir. Bunun yanında, iki eksenli hareket platformunun doğrusal olmayan bir yapıya sahip olması sebebiyle, literatür araştırması yapılırken karşılaşılan doğrusal olmayan kontrolcü tasarım çalışmaları da hem benzetim tabanlı hem de gerçek zamanlı olarak incelenebilir. Bulunan sonuçlar ile burada elde edilen kontrolcülerin performansları kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

1. Yun-xia, X., Qi-lianga, B., Zhi-jun, L., Qiong-yan, W. (2012). 2-Port Internal Model Control for Gyro Stabilized Platform of Electro-Optical Tracking System. *Proceeding of SPIE,* 1-5.

2. Altın, N. ve Sarp, M. (2017). Deniz Araçları İçin İki Eksenli Bir Görüş Hattı Stabilizasyon Sistemi Tasarımı. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(1), 119-137.

3. Şahin, M. (2015). *Kendinden Ayarlamalı Pıd Kontrolör ile İki Eksenli Gimbal Uygulaması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 1-4.

4. Decarlo, R. A., Zak, S. H. and Matthews, G. P. (1998). Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial. *Proceedings of the IEEE*, 3(76), 212-232.

5. Said, L., Sheng, L., Farouk, N. and Latifa, B. (2012). Modeling, Design and Control of a Ship Carried 3 DOF Stabilized Platform. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(19), 3843-3851.

6. Khıdır, T. C. (2009). *Belirsizlik İçeren Nonlineer Sistemler İçin Kayan Kipli Denetim Tasarlanması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-13.

7. Hastürk, Ö., Erkmen, A.M. ve Erkmen İ. (2011). Proxy-Based Sliding Mode Stabilization of a Two-Axis Gimbaled Platform. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 1(1), 370-376.

8. Roshdy, A. A., Su, C., Mokbel, H. F., lin, Y.Z. and Wang, T.(2012). Design a Robust PI Controller for Line of Sight Stabilization System. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2(2), 144-148.

9. Tan, K., Lee, T., Mamun, A., Lee, M. and Khoh, C. (2001). Composite Control of a Gyro Mirror Line of Sight Stabilization Platform Design and Auto-Tuning. *ISA transactions*, 40 (1), 155-171.

10. Han, Y., Lu, Y. and Qiu, H. (2007). An Improved Control Scheme of Gyro Stabilization Electro-Optical Platform in Control and Automation. *IEEE International Conference*, 346-351.

11. Zhiyong, T., Zhongcai, P. and Baolin, W. (2008). Research on Image-Stabilizing System Based on Gyro-Stabilized Platform with Reflector. *Proceeding of SPIE*, 1-4.

12. Buyuksarikulak, M. S., Kurkcu, B. ve Karakurt, M. (2016). İki Eksen Gimbal Sistemleri için Farklı Bozucu Kaynakların Stabilizasyon Performansına Etkileri. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK2016*, 224-229.

13. Boiffier, L. (1998). The Dynamics of Flight: The Equations. *John Wiley & Sons*, 1(1), 24-142.

14. Sıncar, E. (2013). *Friction Identification and Compensation in Stabilized Platforms, Yüksek Lisans Tezi*, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, 5-38.

15. Al-Bender, F., Lampaert, V. and Swevers, J. (2004). A Novel Generic Model at Asperity Level for Dry Friction Force Dynamics. *Tribology Letters*, 16(1-2), 81-93.

16. Mehmood, A. (2010). Sensitivity Analysis of LuGre Friction Model for Pneumatic Actuator Control. *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), IEEE*, 1-8.

17. İnternet: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fpeople.mech.kuleuven.be%2F%7Efarid%2Ftribology%2Ffriction%2Fexp%2Ftime%2Fpresliding%2Fpresliding.htmL&date=2018-06-21. Son Erişim Tarihi: 21.06.2018.

18. Johannes, V. I., Green, M. A. and Brockley, C. A. (1973). The Role of the Rate of Application of the Tangential Force In Determining the Static Friction Coefficient. *Wear*, 24(3), 381–385.

19. Armstrong Helouvry, B., Dupont, P. and Canudas de Wit, C. (1994). A Survay of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction. *Automatica*, 30(7), 1083-1138.

20. Iurian, C., Ikhouane, F., Rodellar, J. and Griñó, R. (2005). *Identification of a System with Dry Friction*. Universitat Politècnica de Catalunya, Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials, IOC-DT-P, 3-16.

21. Hensen, R. H. A. (2002). *Controlled Mechanical Systems with Friction*. Doktora Tezi, Dortmund University, Germany, 15-22.

22. Kamopp, D. (1985). Computer simulation of slip-stick friction in mechanical dynamic systems. *Trans. ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 107(1), 100-103.

23. Dahl, P. (1968). A Solid Friction Model; Aerospace Corporation Technical Report TOR-0158(3107-18)-1,*El Segundo, CA*, 1-23.

24. Olsson, H., Åström, K. J., Canudas de Wit, C., Gäfvert, M. and Lischinsky, P. (1998). Friction Models and Friction Compensation. *Friction Models and Friction Compensation*, 4(3), 176-195.

25. Canudas de Wit, C. (1995). A New Model For Control of Systems With Friction. *Automatic Control, IEEE Transactions*, 40(3), 419-425.

26. Canudas de Wit, C. and Lischinsky, P. (1997). Adaptive Friction Compensation with Partially Known Dynamic Friction Model. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 11(1), 65-80.

27. Olsson, H. (1996). *Control Systems with Friction*, Doctoral Thesis, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 44-73.

28. Ganzaroli, C. A., Carvalho, D. F., Dias, R. N., Reis, M.R., Alves, A.J., Domingos, J. L. and Calixto, W. P. (2015). Heuristic and Deterministic Strategies Applied on Cascade PI Controller Tuning for Speed Control of a DC Motor. *CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies*, 101–106.

29. Abdo, M., Toloei, A., Vali, A. R. and Arvan, M. R. (2013). Cascade Control System for Two Axes Gimbal System with Mass Unbalance. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(2), 903–912.

30. Xia, K., Lu, J., Bi, C., Tan, Y. and Dong, B. (2016). Dynamic Commutation Torque Ripple Reduction for Brushless DC Motor Based on Quasi-z-source Net. *IET Electric Power Applications*, 10(9), 819-826.

31. Motor, K. I. (2005). *Direct Drive DC Motors Catalogue*. Radford, VA, USA: Kollmorgen Corporation, 1-12.

32. İnternet: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.sensonor.com%2Fmedia%2F1137%2Fts1524r17-datasheet-stim300.pdf&date=2018-06-21. Son Erişim Tarihi: 21.06.2018.

33. İnternet: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ni.com%2Ftutorial%2F7109%2Fen%2F&date=2018-06-21. Son Erişim Tarihi: 21.06.2018.

34. İnternet: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fencoder.com%2Fblog%2Fcompany-news%2Fwhat-is-an-encoder%2F&date=2018-06-21. Son Erişim Tarihi: 21.06.2018.

35. İnternet: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.aksaotomasyon.com%2Fmakale-1442-encoder-nedir-kullanim-alanlari-ve-cesitleri-nelerdir.html&date=2018-06-21. Son Erişim Tarihi: 21.06.2018.

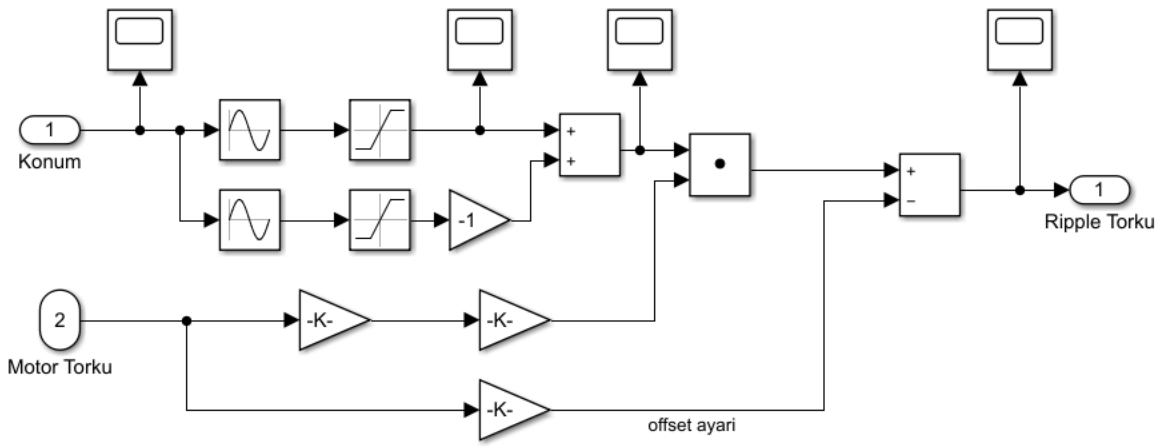
36. Öztürk, T. (2010). *Angular Acceleration Assisted Stabilization of a 2-DOF Gimbal Platform*, Yüksek Lisans Tezi, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, 11-27.

37. Sener, I. E. (2015). *Stabilization of an Image Based Tracking System*, Yüksek Lisans Tezi, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, 5-27.

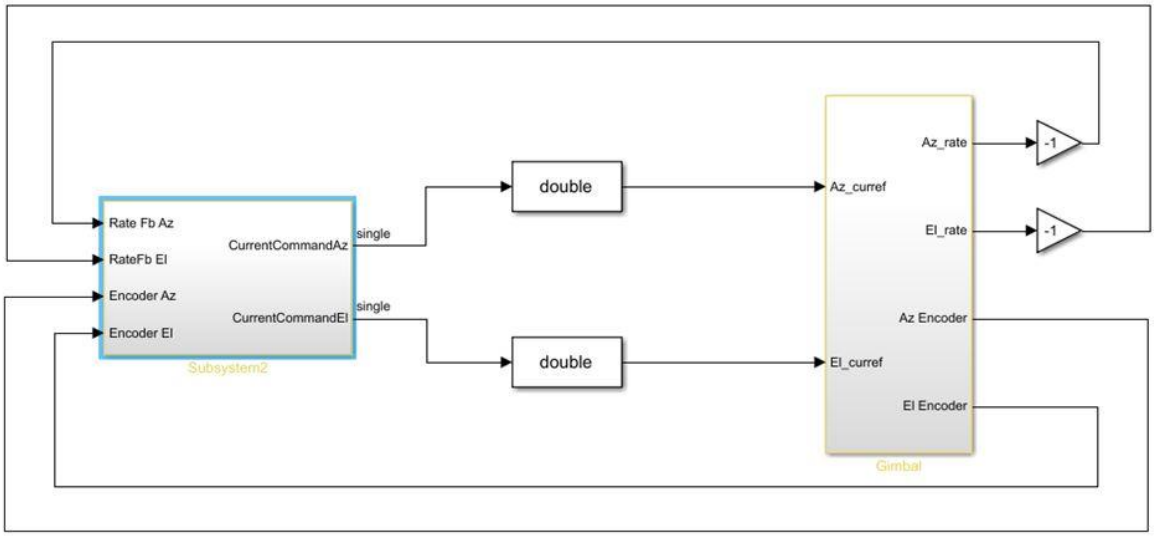
38. Knospe, C. (2006). PID Control. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(1), 30–31.

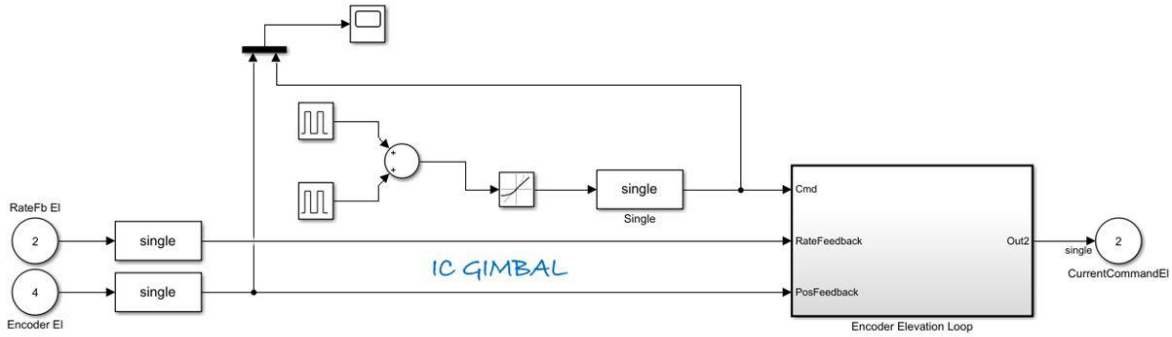
EKLER

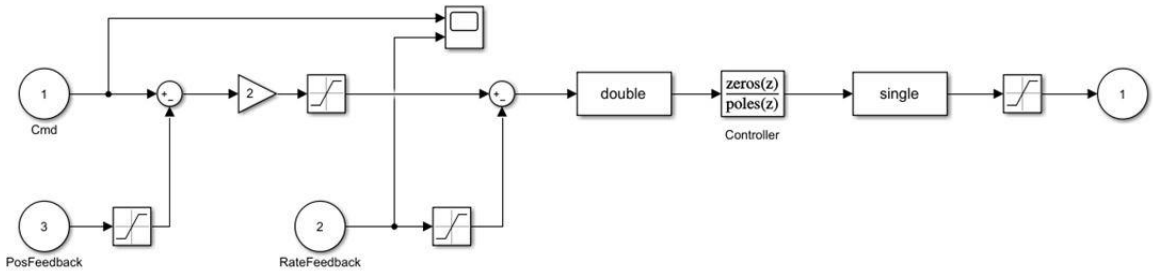
EK-1. Ripple torku matematik modeli



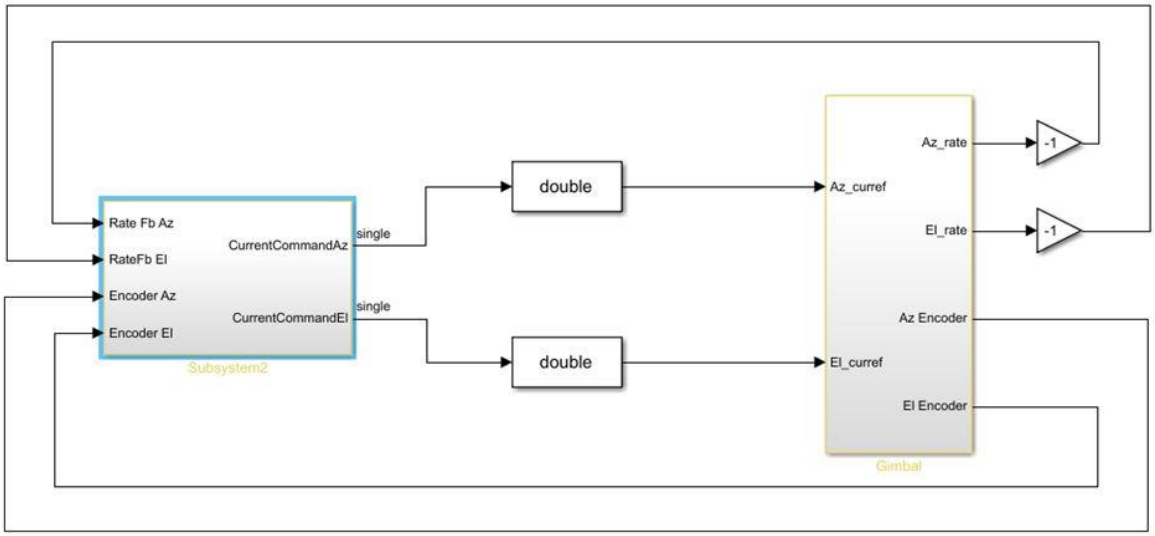
EK-2. İç gimbal kontrolcüsü blok diyagramı

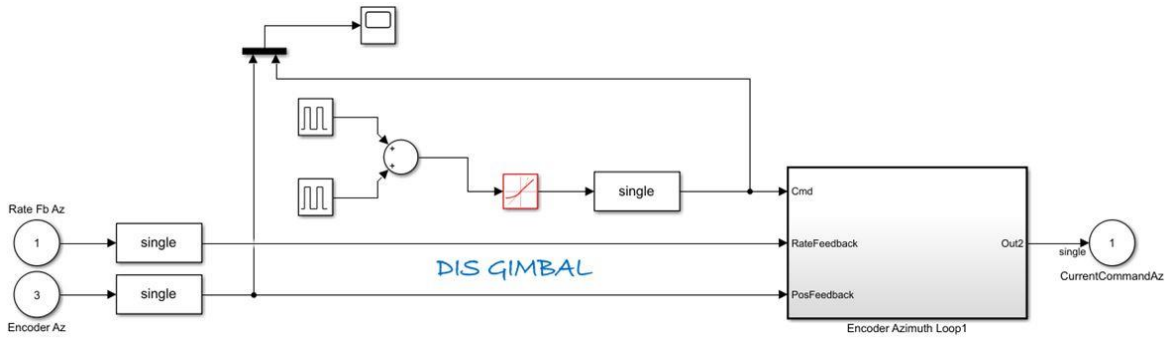


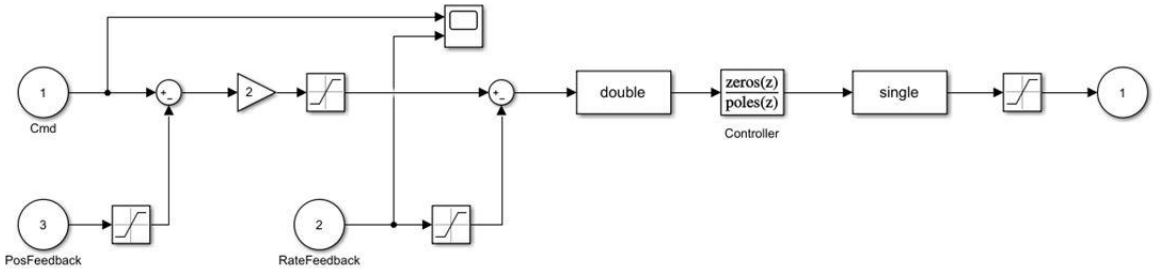




EK-2. İç gimbal kontrolcüsü blok diyagramı







ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TUNCEL, Özgür

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 29.11.1990, Ankara

Medeni hali : Evli

Telefon : 0 (507) 770 30 42

e-mail : tozgur90@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2014-2018
Çift Anadal	Gazi Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2008-2013
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2008-2013
Lise	Cumhuriyet Süper Lisesi	2004-2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-2016	Aselsan – MGEO	Tasarım Mühendisi
2016-Halen	Aselsan – MGEO	Sistem Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Tuncel, Ö., Uslan, İ. ve Salamcı, M. (2018). *İki Eksen Hareket Platformu için Kontrolcü Tasarımı ve Deneysel Uygulaması*, 3. Uluslararası Mühendislik Mimarlık Ve Tasarım Kongresi, Kocaeli.

Hobiler

Doğa yürüyüşü, yeni yerler keşfetmek

GAZİ GELECEKTİR...