

**İKİ EKSENLİ HASSAS GİMBAL STABİLİZASYONU İÇİN BOZUCU-ETKİ  
GÖZLEYİCİSİ İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ LQG/LTR KONTROL SİSTEMİ  
TASARIMI**

**BURAK KÜRKÇÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MART 2015**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Osman EROĞUL

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Prof. Dr. Murat ALANYALI

Anabilim Dalı Başkanı

Burak KÜRKCÜ tarafından hazırlanan İKİ EKSENLİ HASSAS GİMBAL STABİLİZASYONU İÇİN BOZUCU-ETKİ GÖZLEYİCİSİ İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ LQG/LTR KONTROL SİSTEMİ TASARIMI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Yiğit TAŞCIOĞLU

Üye : Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

Üye : Akın GÜNÖNÜ

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Burak KÜRKÇÜ

<b>Üniversitesi</b>	<b>: TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi</b>
<b>Enstitüsü</b>	<b>: Fen Bilimleri</b>
<b>Anabilim Dalı</b>	<b>: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği</b>
<b>Tez Danışmanı</b>	<b>: Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU</b>
<b>Tez Türü ve Tarihi</b>	<b>: Yüksek Lisans – Mart 2015</b>

**Burak KÜRKCÜ**

**İKİ EKSENLİ HASSAS GİMBAL STABİLİZASYONU İÇİN BOZUCU-ETKİ  
GÖZLEYİCİSİ İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ LQG/LTR KONTROL SİSTEMİ  
TASARIMI**

**ÖZET**

Gimbal yapıları ile veri aktarımı ve lazer atımı gibi çeşitli kavramlar son yıllarda büyük bir önem arz etmektedir. Bu kapsamda aktarılan/gönderilen verinin daha sağlıklı ve anlamlı olabilmesi için geçmişten günümüze çeşitli metotlar önerilmiştir. Bu çalışma kapsamında, savaş uçaklarına takılan ve dört-eksenden oluşan hassas hedefleme ve gözleme sisteminin hassaslığını sağlayan iki iç eksen için, sistem tanımlama ile sistem dinamiği elde edilmiştir. Sistem dinamiğinin belirlenmesinin ardından sistemin kontrolü için bozucu-etki gözleyici yapısı ile güçlendirilmiş bir optimal kontrolcü önerilmektedir. Bu optimal kontrolcünün yapısı ise LQG/LTR yapısındadır. LQG/LTR yapısı klasik LQG yapısının gürbüzlük eksikliğini kapatmaktadır. Yapının temel önerilme amacı, görüş hattı hız kontrolü için gürbüz, sistem isterlerini karşılayan ve iyi bir bozucu etki giderim özelliği olan bir stabilizasyon döngüsünün tasarlanmasıdır. Tasarlanan bu kontrolcü ile sistemin, aerodinamik etkileri ve mekanik aksam kaynaklı ortaya çıkan bozucu etkileri bastırması, sistemde mevcut doğrusal olmayan etkileri minimize etmesi ve sistemin çalıştığı ve/veya çalışmasının amaçlandığı frekans bölgesinde gürbüz davranması hedeflenmektedir. Yukarıda belirtilen bu koşullar altında tasarlanan bozucu-etki gözlemleyicisi ile güçlendirilmiş LQG/LTR kontrol sistemi gerçek platforma uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda sistem performansına dair çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen tezin literatüre olan en büyük katkısı ise var olan LQG/LTR yapısının, bozucu-etki gözleyicisi ile güçlendirilmesi ve gerçek sisteme uygulanmasıdır.

**Anahtar Kelimeler:** Gimbal, Stabilizasyon, Sistem tanımlama, Bozucu-etki gözleyici, Optimal kontrol, LQG/LTR kontrol,

**University** : TOBB Economics and Technology University  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Electrical and Electronics Engineering  
**Supervisor** : Associate Professor Dr. Coşku KASNAKOĞLU  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – March 2015

**Burak KÜRKCÜ**

**LQG/LTR CONTROLLER DESIGN IMPROVED WITH DISTURBANCE  
OBSERVER FOR TWO-AXIS PRECISE GIMBAL STABILIZATION**

**ABSTRACT**

Applications that include data transfer and laser operations using gimbal systems have become a popular research field in recent decades. In this context, numerous methods have been proposed that attempt to improve the health and meaning of the transferred data. In this study, first a system identification method is proposed to identify the dynamical behavior of the two inner axes of a four-axis gimbal system, where the identified axes achieve the precise tracking and targeting. Next an optimal controller augmented with a disturbance observer structure is designed. This controller is an LQG/LTR controller which overcomes the robustness problems of the classical LQG design. The main goal of the controller is to provide a robust line of sight (LOS) controller that achieves the design criteria while rejecting disturbances. The controller is expected to reject disturbances caused by aerodynamic and mechanical effects, as well as minimize unmodeled nonlinearities and provide robustness in the frequency range of operation. The improved LQG/LTR controller is also verified on an actual experimental setup and it is observed that the design goals are met successfully. The main contribution of this thesis is the improvement of the classical LQG/LTR structure with a disturbance observer and the verification of the results of an actual physical system.

**Keywords:** Gimbal, Stabilization, System Identification, Disturbance Observer, Optimal Control, LQG/LTR Control,

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasının her aşamasında engin tecrübesini, zamanını, desteğini ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen ve beni karşılaştığım her zorlukta yönlendiren değerli hocam Sn. Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU'na, bu tez çalışmasının fiziki olarak gerçekleşmesini sağlayan değerli ASELSAN A.Ş yöneticilerine, her daim teknik ve teknik olmayan konularda değerli yorumlarını ve yardımlarını aldığım Sn. Akın GÜNÖNÜ ve Sn. Sabri ÇETİN'e özel teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca, bu süreç boyunca teknik ve manevi açıdan desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen iş arkadaşlarım, Mustafa KARAKURT, M. Sami BÜYÜKSARIKULAK, Faruk YURTSEVER , Mehmet BASKIN ve Semih GÖREN'e teşekkür ederim.

Lisans hayatımda fikirlerimi şekillendirmemi sağlayan, konu ve zamandan bağımsız olarak her türlü problemimde bana çıkış yolu gösteren, otomatik kontrol kavramını erken yaşlarda algılamamı sağlayan Sn. Prof. Dr. Ahmet KUZUCU'ya şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim için bana Araştırma bursu desteğini sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesine teşekkür ederim.

Bana her zaman destek olan yanımdan hiçbir zaman ayrılmayan, beni bugüne kadar büyüten, hayattaki doğruları gösteren, değer anlamını öğreten değerli ailem Esra KÜRKCÜ, Saliha KÜRKCÜ, Macit KÜRKCÜ ve değerli hayat arkadaşım İrem'e gönülden teşekkür ederim ve en derin şükranlarımı sunarım. Onların o büyük sevgisi ve desteği olmasaydı bu çalışma ortaya çıkamazdı.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRAC.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR.....	xii
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tipik Bir Noktalama ve Takip Sistemi.....	3
1.2 Literatür Araştırması.....	5
1.3 Tez Kapsamında Önerilen Yapı.....	6
1.4 Tezin Taslağı.....	6
2. SİSTEM TANILAMA VE SİSTEMİN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	8
2.1 İki Eksen bir KO/EO Gimbal Sistemi.....	8
2.2 Sistem Tasarımında Etkisi Olan Mekanik Parametreler.....	10
2.3 Sistem Tanılama ve Sistemin Dinamiği.....	11
2.4 Sisteme Uygulanan Giriş Sinyali.....	13
2.5 Sistem Modelinin Bileşenleri.....	16
2.6 Parametrik Sistem Modeli.....	17
2.6.1 İç Yükseliş Ekseni Sistem Modeli.....	18
2.6.2 İç Azimut Ekseni Sistem Modeli.....	19
2.7 Sistem Dinamiğinin Analizi.....	19
2.7.1 İç Yükseliş Ekseni Sistem Dinamiği Analizi.....	19

2.7.2	İç Azimut Eksenine Sistem Dinamiği Analizi.....	21
3.	KONTROL SİSTEMİ TASARIM METODOLOJİSİ.....	23
3.1	Bozucu Etki Gözleyicisi.....	23
3.1.1	Eşdeğer Giriş Bozucu Etki Tanımı.....	23
3.1.2	Bozucu Etki Gözleyicisinin Matematiksel Modeli.....	24
3.2	LQG/LTR Metodunun Matematiksel Arkaplanı.....	27
3.2.1	LQR ve LQG Tasarım Teknikleri Hakkında Matematiksel Özet.....	27
3.2.2	LQR Kontrol Yapısının Frekans Uzayı ve Asimptotik Özellikleri.....	31
3.2.3	LQG Kontrol Yapısının Genel Özellikleri.....	35
3.2.4	Döngü Transfer İyileştirilmesi(LTR).....	37
3.3	Güçlendirilmiş LQG/LTR Kontrol Sistemi Tasarımının Özeti.....	42
4.	GİMBAL SİSTEMİ İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ LQG/LTR KONTROL SİSTEMİ TASARIMI ve DENEYSEL SONUÇLAR.....	44
4.1	Temel Performans Kriterleri.....	45
4.2	İç Yükseliş İçin Tasarlanan Bozucu-Etki Gözleyicisi.....	45
4.3	İç Yükseliş İçin Tasarlanan LQR Kontrolör Yapısı.....	47
4.4	Girişte Yapılan Döngü İyileştirilmesi ile ASELPOD Sistemi için LQG/LTR Kontrolör Tasarımı.....	52
4.5	İç Azimut Eksenine için Tasarlanan Kontrol Yapısının Farklılıkları.....	54
4.6	Deneysel Sonuçlar.....	55
5.	SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR.....	59



## ÇİZELGE LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. İç yükseliş eksenini kutup ve sıfırları.....	21
Çizelge 2.2. İç azimut eksenini kutup ve sıfırları.....	21

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1 Gimbal sistemlerinde kullanılan mekanik yapılar[2].....	1
Şekil 1.2 Gimbal sisteminin kullanıldığı örnek bir gözetleme sistemi[3].....	3
Şekil 1.3 Tipik bir noktalama ve takip sistemi (bir eksen için).....	3
Şekil 2.1. Tez çalışmasında kullanılan sistemin 3-B çizimi (ASELPOD).....	9
Şekil 2.2. Gimbal şematik gösterimi – yapıda mevcut olan eksenler işaretlenmiştir[15].....	9
Şekil 2.3. Ölçüm düzeneği ve sistem tanılama yapısının şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.4. Sistem tanılama işlemi için kullanılan sinyal jeneratörü.....	11
Şekil 2.5. Sistem tanılama işlemi için kullanılan sinyalin zaman uzayı cevabı.....	13
Şekil 2.6. Sistem tanılama işlemi için kullanılan sinyalin güç spektrumu.....	14
Şekil 2.7. Sistem modeli bileşenlerinin blok diyagramı.....	16
Şekil 2.8. Matlab sistem tanılama ürünü arayüzü.....	18
Şekil 2.9. İç yükseliş eksen bode diyagramı.....	20
Şekil 2.10. İç azimut eksen bode diyagramı.....	20
Şekil 3.1. Önerilen bozucu etki gözleyici mimarisi.....	25
Şekil 3.2. LQR kontrol şematiği.....	28
Şekil 3.3. LQR kontrol sisteminin Nyquist grafiği[29].....	29
Şekil 3.4. LQG kontrol sisteminin şematik gösterimi.....	32
Şekil 3.5. Örnek bir sistem için LQG ve LQR kontrol sistemlerinin Nyquist Eğrileri.....	37
Şekil 3.6. LQG kontrol konfigürasyonu.....	37
Şekil 4.1. ASELPOD ve üzerine takıldığı 6 eksen Stewart Platformu.....	44
Şekil 4.2. Bozucu-etki gözleyicisi için açık çevrim Bode Grafiği.....	46
Şekil 4.3. Bozucu-etki gözleyicisinin gelen bozucu etkiyi tahmini.....	47
Şekil 4.4. Sistem tanılamadan elde edilen sistem modeli ve güncellenmiş sistem modellerinin Bode Grafikleri.....	48
Şekil 4.5. LQR kontrol sistemi açık çevrim Nyquist Diyagramı.....	51

Şekil 4.6. LQR kontrol sistemi açık çevrim Bode Grafiği.....	51
Şekil 4.7. Girişte yapılan döngü transfer iyileştirmelerinin Bode Grafiği.....	52
Şekil 4.8. Girişte yapılan döngü transfer iyileştirmelerinin Nyquist Diyagramı.....	53
Şekil 4.9. İç yükseliş ekseni için önerilen tümleşik kontrol sistemi.....	54
Şekil 4.10. Farklı <i>qnotch</i> değerleri için filtrenin bode grafikleri.....	55
Şekil 4.11. İç azimut ekseni için önerilen tümleşik kontrol sistemi.....	56
Şekil 4.12. İç yükseliş ekseni stabilizasyon hassasiyeti.....	57
Şekil 4.13. İç azimut ekseni stabilizasyon hassasiyeti.....	57
Şekil 4.14. Gimballere etkileyen örnek bozucu-etki profili.....	58

## KISALTMALAR

Kısaltmalar	Açıklama
<b>FLIR</b>	İleri bakan kızılötesi
<b>DA</b>	Doğru akım
<b>LOS</b>	Görüş hattı
<b>FOV</b>	Görüş alanı
<b>LQR</b>	Doğrusal Karesel Kontrol
<b>LQG</b>	Doğrusal Karesel Gauss
<b>LTR</b>	Döngü Transfer İyileştirmesi
<b>KO</b>	Kızıl Ötesi
<b>EO</b>	Elektro-Optik
<b>IMU</b>	Ataletsel Ölçüm Birimi
<b>SNR</b>	Sinyal-Gürültü Oranı
<b>FRF</b>	Frekans Cevabı Fonksiyonu

## SEMBOL LİSTESİ

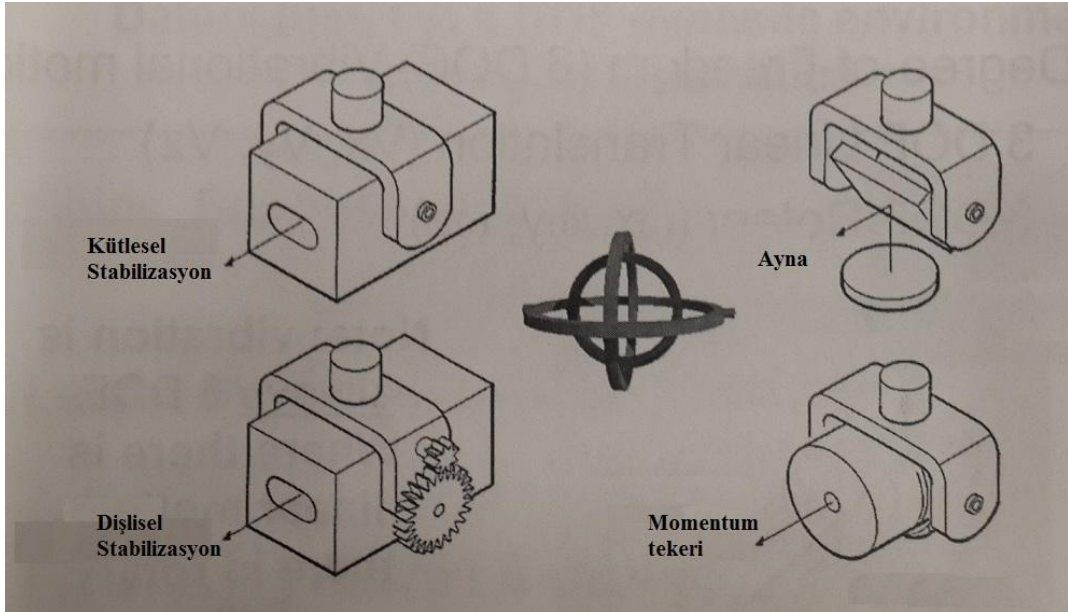
Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$m_u(t)$	Sistem tanılama etkiyen giriş gürültüsü
$m_y(t)$	Sistem tanılama etkiyen çıkış gürültüsü
$u_1(t)$	Sistem tanılama için kullanılan toplam giriş sinyali
$u_g(t)$	Hesaplama sonucu oluşturulan giriş
$y_1(t)$	Sistem tanılamada kullanılan çıkış sinyali, açısal hız bilgisi
$A$	Uygulanan sinyal genliği
$t$	zaman
$f_i$	Doğrusal süpürme sinyalinin frekansı
$\phi$	Süpürme sinyalinin fazı
$f_s$	Süpürme sinyalinin örnekleme frekansı
$T_s$	Süpürme sinyalinin örnekleme zamanı
$P_{int}$	Süpürme sinyalinin belirli bir frekans aralığındaki gücü
$P_{tot}$	Süpürme sinyalinin toplam gücü
$A, B, C, D$	Doğrusal-zamanla değişmez sistem matrisleri
$T_d$	Sisteme Dışardan Etkiyen Bozucular
$T_{ed}$	Sisteme girişinden etkileyen eşdeğer bozucular
$y_r$	Sistemin bozucu etkiler altındaki çıkışı
$y_d$	Sistemin bozucu etkilerden arındırılmış varsayan çıkış
$\varepsilon$	Hata fonksiyonu
$V$	Bozucu-etki gözleyicisi için ileri besleme terimi
$P$	Ricatti Denklemi sonucu
$Q, R$	Ağırlık Matrisi
$J$	Maliyet fonksiyonu
$K_{LQR}$	Optimal kontrolcü kazanç matrisi
$u_{LQR}/u_{LQG}$	Optimal kontrol yasaları
$L(s)$	Negatif geri-besleme transfer matrisi
$D(s)$	Dönüş farklılığı transfer matrisi
$x$	Sistem durumları
$\hat{x}$	Sistem durumlarının tahmini
$\dot{x}$	Doğrusal-zamanla değişmez sistemin durumlarının türevleri
$\hat{\dot{x}}$	Sistem Durum türevlerinin tahmini
$y$	Doğrusal-zamanla değişmez sistemin çıkışı
$\hat{y}$	Doğrusal-zamanla değişmez sistemin çıkışının tahmini
$L$	Gözleyici kazanç matrisi
$I$	Birim matris
$G_{OL}$	Açık çevrim sistem transfer fonksiyonu
$w$	Frekans bilgisi
$\hat{S}$	Hassaslık fonksiyonu
$\hat{T}$	Tamamlayıcı hassaslık fonksiyonu
$\rho, \beta$	LQR için tasarım parametreleri
$w_{cross}$	Çapraz geçiş frekansı

$T$	Dönüşüm Matrisi
$\sigma$	Tekil değerler
$E$	Çoklu modelleme hataları matrisi
$G_c$	Kontrol sistemi transfer fonksiyonu
$G_{LTR}$	İyileştirilmiş kontrol sistemi transfer fonksiyonu
$G_{aug}$	Sisteme yapılan eklemelerin transfer fonksiyonu
$\mu$	Kalman filtresi tasarım parametresi

## 1. GİRİŞ

Stabilize elektro-mekanik gimbal yapıları geçtiğimiz yıllarda popüler bir çalışma alanı olmaya başlamıştır. Popülaritede ki bu artış, gözlem-gözetleme alanındaki ihtiyacın artmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle askeri alandaki gözlem ve gözetleme faaliyetleri için stabilize gimbal yapıları çok büyük bir önem arz etmektedir. Gelişen sensör ve kamera teknolojileri, hedeflerin eski yapılara göre çok daha kolay tespit ve takip edilmesini olanaklı hale getirmektedir. Sensör ve kamera teknolojilerinde bu ilerleme ise stabilizasyon hassasiyetine olan ihtiyacı arttırmaktadır. Stabilize gimbal sistemlerinin temel görevi ise, sistemin bağlı bulunduğu araca (hava, kara, deniz araçları) ve/veya kendisine doğrudan etkiyen bozucu etkileri gidermektir [1,2]. Bu sistemler literatürde, stabilize olan platformun türüne bağlı olarak, optik, radar, lazer ışını ve görüş hattı uygulaması veya silah sistemleri stabilizasyonu için ateş hattı uygulaması olarak isimlendirilebilmektedir. Gimbal yapılarının kontrol sistemleri ise, dışarıdan gelen çeşitli bozucu etkiler altında, yapının yönelmesini, sabit bir yere bakmasını ve/veya takip problemlerinin çözülebilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu bozucu etkiler, elektro-mekanik gimbal sisteminin takıldığı platforma göre değişkenlik göstermektedir. Bu dış bozucu etkiler en çok, çalıştığı bölgenin doğası gereği, hava araçlarına takılan gimballerde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1.1 Gimbal sistemlerinde kullanılan mekanik yapılar[2]

Gimbal yapılarının mekanik kısmı stabilizasyon sisteminin tasarımına göre çok büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Bu mekanik yapılar Şekil 1.1 ile gösterilen, kütleli-stabilize, dişli-stabilize, ayna ve momentum tekeri ana grupları altında toplanmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında çalışılacak gimbal yapısı ise kütleli-stabilize gimballer grubuna dahildir. Kütleli-stabilize gimbal sistemleri, bütün faydalı yükün gimbal eksenleri tarafından direk olarak taşındığı ve gimbal rulmanlarının olabildiğince sürtünmesiz bir ortam sağladığı sistemlerdir. Bu yapı teorik olarak kütleli mekanik olarak dengede kalmasını amaçlamaktadır. Tasarlanan kontrolcü ise dışarıdan gelen bozucu etkilerin, mekanizma üzerindeki etkilerini yok etmek ve/veya azaltmak için kullanılmaktadır.

Gimbal yapıları çok sayıda alanda kullanılmaktadır. Bu alanlar genel olarak;

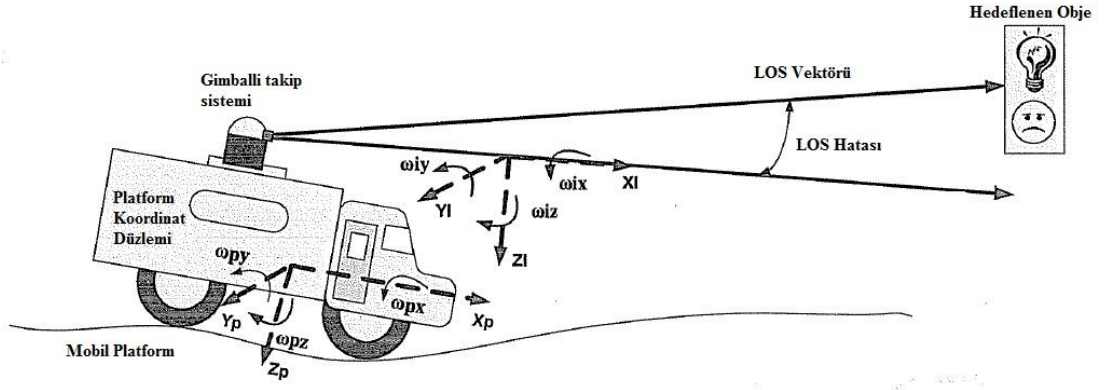
- Sensörler
  - Görüntüleme sistemleri(Kamera, FLIR)
  - Teleskoplar
  - Radarlar
- Silah Sistemleri
  - Toplar ve balistik silahlar
  - Arayıcı Başlıklar
- Lazerler
  - Mesafe bulucular

şeklinde özetlenebilmektedir.

Özellikle bu tez çalışmasında kullanılan gimbal yapısının amacını anlayabilmek için çeşitli terimlerin anlamlarını bilmek gerekmektedir. Bunlardan ilki Şekil 1.2 ile gösterilen görüş hattı (LOS) terimidir. Görüş hattı gözlemci ile gözleyici arasında kurulan bir vektör çizgisidir [3]. Örnek olarak, işaretlerin bol olduğu bir yolda, araba kullanan gözlemcinin gözü ile baktığı yol işaretleri arasına çizilen vektör görüş hattını tanımlamaktadır. Görüş hattı kontrolü ise çizilen bu vektörün sabit kalmasını sağlamaya çalışmaktır.

Görüş alanı (FOV) ise belirli bir anda görülebilen alandır [4].





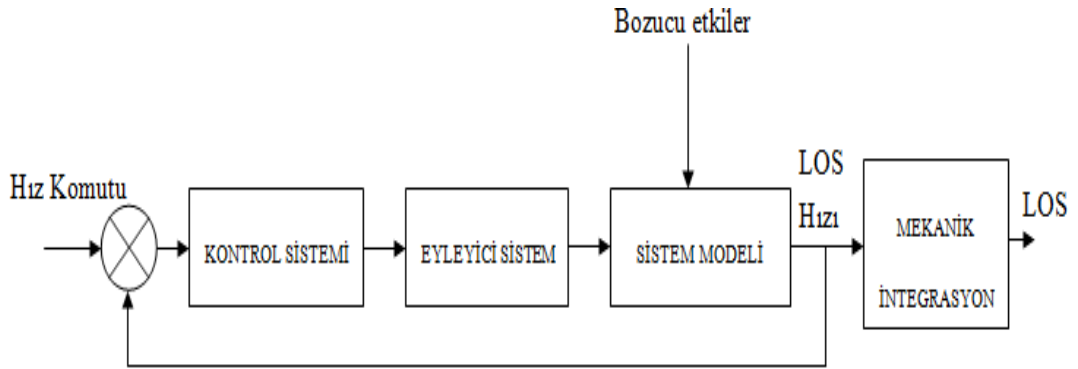
Şekil 1.2 Gimbal sisteminin kullanıldığı örnek bir gözetleme sistemi[3]

Tasarlanan stabilizasyon yapısı, görüş alanı sensörünün içindeki görüntü hareketini sınırlandırmalıdır. Bu hareket ve/veya titreşme ileriki bölümlerde detaylı olarak açıklanacaktır. Bu açısal hareketin birimi ise genelde  $\mu rad$  olarak belirtilmektedir.

Ayrıca, gimbal stabilizasyonun amacı, hava platformunda kullanılan çeşitli kamera sensörlerinin geri beslemelerinin, bu sensörleri izleyip değerlendirme yapan kişiler ve algoritmalar tarafından sorunsuz bir şekilde kullanılmasının sağlanmasıdır. Bunun sağlanması için ise gimbal stabilizasyonunda kullanılan geri besleme elemanı olan dönü-ölçerin integralinin, önceden belirlenen değerler arasında kalması gerekmektedir.

### 1.1 Tipik Bir Noktalama ve Takip Sistemi

Hava platformlarına takılı bir gimbal sisteminin blok diyagramı Şekil 1.3 ile gösterilmektedir.



Şekil 1.3 Tipik bir noktalama ve takip sistemi (bir eksen için)

Genellikle sistemler görüş hattı pozisyon kontrolü ile ilgilendiği halde, pratikte görüş hattı hız döngüsü tasarımı ile sonuca gidimi yaygındır. Bunun sebebi ise pratik sistemlerde hız komutunun doğrusal bir kumanda tarafından veriliyor olmasıdır. Sadece pozisyon döngüsü kontrollü bir kumandayı kullanan operatör, görüntüyü, verdiği kumandalarla, titreşimsiz ve/veya hareketsiz kılmakta zorlanacaktır. Ayrıca gereğinden fazla çaba sarf edilmesine neden olacak pozisyon döngüsü kullanımı, operatörün yapması gereken diğer işlemleri halletmesine de olanak vermeyecektir. Bunlara ek olarak, hız döngüsü sayesinde, operatör görüş hattını bir kez hedefin üzerine getirdiği takdirde, hedef takibinin sağlanabilmesi için “0” sıfır hız komutunun gönderilmesi yeterli olacaktır. Ayrıca tasarlanan hız döngüsünün yüksek bant genişliği, sisteme dışarıdan gelen bozucu etkiler altında, görüş hattının bozulmadan kalmasına yardımcı olmaktadır.

Tezde kullanılan stabilizasyon sisteminin temel prensibi sistem ataletinin değişmemesidir. Bu sayede uygulanan tork, gimbal hareketini oluşturmaktadır. Bu sebeple, Şekil 1.3 ile gösterilen kontrol sisteminin birincil amacı, stabilize kütleye gelen herhangi bir bozucu etkinin tersinin motorlardan uygulanmasıdır. Bu işlem gimbal sisteminin açısız hızının bir dönü-ölçer ile ölçülmesiyle mümkün olabilmektedir. Dönü-ölçerden gelen bilgiler sayesinde, gimbal stabilizasyonu için gereken torku üretecek bir kontrolcü tasarımı mümkün kılınmaktadır.

Elektro-mekanik bir sistemdeki dış bozucu etkiler;

- Sürtünmeler
  - Rulman kaynaklı
  - Motor kaynaklı
- Dengesiz montaj
- Kablaj Kaynaklı
  - Kablolar
  - Esnek-Yay kablo

şeklinde özetlenebilir.

Gimbal sistemlerinde sıkça karşılaşılan başka bir konu ise sistemin mekanik rezonans modlarıdır. Özellikle mekanik tasarım aşamasında, gimbal rezonans frekanslarının, sistemin gereken bant genişliği bölgesinden uzakta tutulması

gerekmektedir. Aksi takdirde, kontrol sistemi tasarım aşaması gereğinden daha fazla karmaşık bir hal alacaktır [5,6].

Son olarak gimbal yapısının zaman sabiti çok düşük olmalıdır. Bu sayede tasarlanan kontrolcülerin bant genişliği daha yüksek değerlerde tasarlanabilir.

## **1.2 Literatür Araştırması**

Gimbal yapılarının stabilizasyon/kontrol döngüleri için çeşitli klasik kontrol yapıları zaman içerisinde birçok defa tavsiye edilmiştir.

Stocktum'un önerdiği çalışma [5], sistem seviyesi performansı ve önemli elektro-mekanik tasarım parametreleri arasında ki ilişkiyi açıklamıştır. Ayrıca Stocktum, stabilize optik konfigürasyon ve stabilize ayna konfigürasyonu ile ilgili örnek bir tasarımı da sunmuştur.

William'un önerdiği kızılötesi arayıcı konulu çalışma [6], iki-eksenli stabilize platform için görüş hattı pozisyon kontrolünü tanıtmıştır.

Bigley ve Rizzo'un önerdiği çalışma [7], dönü-ölçer ile stabilize olan bir elektro-optik görüş sisteminin doğrusal karesel kontrol (LQR) teorisi ile kontrolünü önermiştir. Bu yapıda herhangi bir gözleyici bulunmamaktadır. Bunun sebebi ise bütün durum değişkenleri ölçülebilir olarak varsayılmıştır. Ancak, gerçek sistemlerde, bütün durum değişkenlerinin ölçülebilir olması oldukça ender rastlanan bir durumdur.

Borello'un önerdiği çalışma [8], bant genişliği 100 Hz olan, hassas stabilize bir iki-eksen gimbalin kontrol yapısını açıklamıştır.

Floyd'un önerdiği çalışma [9] ise uçan bir teleskop için stabilizasyon ve titreşme kontrolünü konu almaktadır. Bunun için önerilen kontrolcü ise durum-uzayı modelini kullanan Q-parametrizasyonu tekniğini içermektedir.

Son olarak, Kimbrell ve Ditto'nun çalışmaları [10] ise gözlemleyici tabanlı, çoklu-giriş ve çoklu-çıkış yapısında bir ayrık kontrol metodunu tanıtmışlardır. Ancak bu öneri herhangi bir özel tasarım metodu içermemektedir.

### **1.3 Tez Kapsamında Önerilen Yapı**

Bu tez çalışması kapsamında, savaş uçaklarına takılan ve dört-eksenden oluşan hassas hedefleme ve gözleme sisteminin hassaslığı sağlayan iki iç eksen için, bozucu-etki gözleyici yapısı ile güçlendirilmiş bir optimal kontrolcü önerilmektedir. Bu optimal kontrolcünün yapısı ise LQG/LTR yapısındadır. LQG/LTR yapısı klasik LQG yapısının gürbüzlük eksikliğini kapatmaktadır. Yapının temel önerilme amacı, görüş hattı hız kontrolü için gürbüz, sistem isterlerini karşılayan ve iyi bir bozucu etki giderim özelliği olan bir stabilizasyon döngüsünün tasarlanmasıdır.

Tasarlanan bu kontrolcü ile sistemin, aerodinamik etkileri ve mekanik aksam kaynaklı ortaya çıkan bozucu etkileri bastırması, sistemde mevcut doğrusal olmayan etkilerin minimize etmesi ve sistemin çalıştığı ve/veya çalışmasının amaçlandığı frekans bölgesinde gürbüz davranması hedeflenmektedir. Yukarıda belirtilen bu koşullar altında tasarlanan bozucu-etki gözlemleyicisi ile güçlendirilmiş LQG/LTR kontrol sistemi gerçek platforma uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda sistem performansına dair çeşitli sonuçlar elde edilmiştir.

Önerilen tezin literatüre olan en büyük katkısı ise var olan LQG/LTR yapısının, bozucu-etki gözleyicisi ile güçlendirilmesi ve gerçek sisteme uygulanmasıdır.

### **1.4 Tezin Taslağı**

Sunulan tez, giriş bölümü dahil beş bölümden oluşmaktadır.

Bölüm iki, iki-eksenli gimbal yapısının sistem tanılama ile durum-uzay modelinin elde edilmesini ve kullanılan sistem tanılama metodunun detaylarını açıklamaktadır. Aynı zamanda tezde kullanılan deneysel sistemin mekanik yapısı ve genel özellikleri hakkında kısa ve açıklayıcı bilgiler vermektedir. Ayrıca bu bölümde, elde edilen

sistem durum-uzay modelinin incelenmesi ve modelin dinamik özelliklerinin açıklanması yer almaktadır.

Bölüm üç, ilk olarak bölüm ikide elde edilen sistem modeli için tasarlanması düşünülen kontrolcünün matematiksel altyapısını içermektedir. Tasarlanması düşünülen kontrolcü ise iki ana başlığa ayrılmaktadır. Bunlardan ilki bozucu-etki gözleyicisidir. Diğeri ise LQG/LTR kontrolcü yapısıdır.

Bölüm dört, bölüm üç ile verilen matematiksel altyapı kullanılarak, bölüm ikide elde edilmiş modellere uygun kontrol sistemi tasarımı yapılmakta ve gerçek sistem üzerine uygulanışı açıklanmaktadır. Ayrıca, tasarlanan kontrolcünün uygulandığı gerçek sisteme ait çeşitli sonuçları içermektedir. Uçan sistemden elde edilen dönü-ölçer verileri ve bu dönü-ölçer verileri ışığında elde edilen stabilizasyon hassasiyeti sonuçları irdelenmekte ve açıklanmaktadır.

Bölüm beş ise sonuçlar ve gelecek çalışmalar bölümüdür. Elde edilen veriler ışığında, kontrol sisteminin performansı incelenmiş olup, yapılacak ve/veya yapılması muhtemel iyileştirmeler açıklanmaktadır.

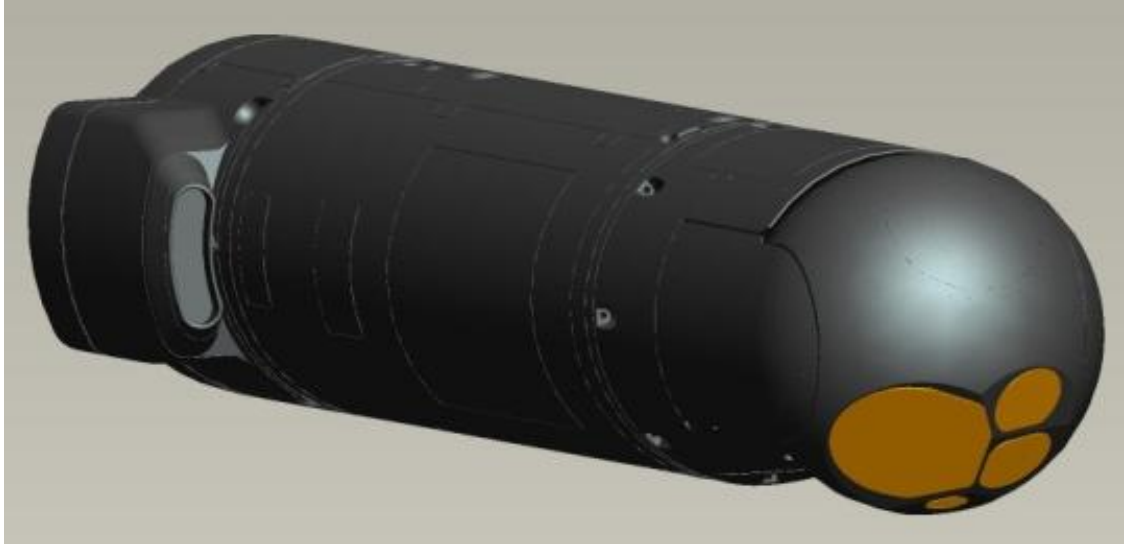
## 2. SİSTEM TANILAMA VE SİSTEMİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Karmaşık ve matematiksel olarak modellenmesi zor olan sistemlerin, sistem modelinin yüksek doğrulukla elde edilebilmesi için sistem tanılama yöntemi literatürde önemli bir yer tutmaktadır [11]. Ancak sistem modeli tanılama prosedürü ile yapılsa bile, sistemin genel karakteristiğinin bilinmesi, sistemin kontrolü için büyük bir katkı ve bakış açısının genişlemesini sağlamaktadır.

### 2.1 İki Eksen bir KO/EO Gimbal Sistemi

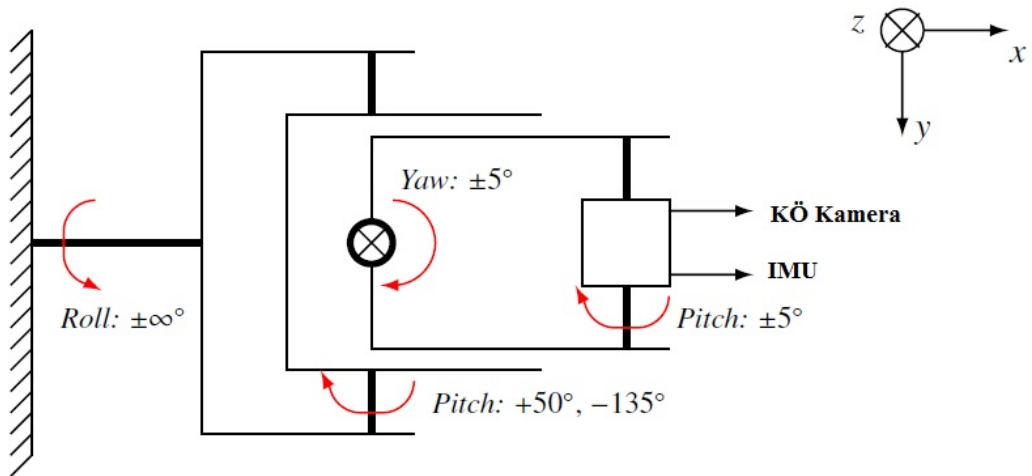
Bu çalışmada kullanılan ve Şekil 2.1 ile üç boyutlu çizimi gösterilen dönü-ölçer stabilize gimbal sistemi, iki-eksenli kızılötesi(KO) elektro-optik(EO) bir yapıdır. Bu yapının amacı ise bir savaş uçağı üzerine takılı KO/EO bir kameranın ataletsel stabilize bir şekilde çalışabilmesini ve anlamlı bir şekilde veri alabilmesini/aktarabilmesini sağlamaktır. Özellikle kameralardan elde edilen görüntünün bulanık olmaması ve titreşmesiz olabilmesi için mekanik stabilizasyon gereklidir. Normalde dört-eksenli bir yapı olan deneysel sistemin sadece iç iki-ekseni tez çalışması kapsamında irdelenmiş ve çalışılmıştır. Görüntünün bulanık olmamasını ve titreşmesiz olmasını ise yine bu çalışmada irdelenen eksenler sağlamaktadır. Var olan dış iki-eksen ise mekanik limitlerden kurtulma, hareket serbestliğinin sisteme kazandırılması ve rüzgar yükünün iç eksenlere aktarılmamasını sağlamaktadır. Dört-eksenli tüm yapının şematik gösterimi Şekil 2.2’de mevcuttur. Kullanılan dört-eksen gimbal platformunun her bir eksenini birbirlerine hiyerarşik olarak döner mafsallarla bağlıdır. Bu hiyerarşik yapı sayesinde  $1^{nci}$  eksenin açısal hareketi  $2^{nci}$ ,  $3^{ncü}$  ve  $4^{ncü}$  eksenlerde gözükmemektedir. Aynı şekilde  $2^{nci}$  eksenin açısal hareketi  $3^{ncü}$  ve  $4^{ncü}$  eksenlerde gözlemlenmemektedir. Çalışma kapsamında dış iki eksen sabit kabul edilmiş, iç eksenlerin sistem modellenmesi ve kontrolü üzerinde detaylı bir şekilde çalışılmıştır.

İç eksenler ise iç yükseliş ve azimut olarak isimlendirilmektedir. Her iki eksen için açısal olarak mekanik bir limit mevcuttur. Bu limit sistem gereksinimleri



Şekil 2.1. Tez çalışmasında kullanılan sistemin 3-B çizimi (ASELPOD)

doğrultusunda  $\pm 5^\circ$  olarak belirlenmiştir. Her iki eksen de doğrudan sürüm DA motorlar kullanılmıştır. Ayrıca, iç eksen rulmanlarının, dış eksen rulmanlarına kıyasla, sürtünmesi çok düşüktür. Kullanılan bu motorlar için akım döngüleri hazır olarak alınmıştır. Şekil 2.2’de gözüktüğü üzere, KÖ kameranın hemen yanında ise bir adet ataletsel ölçüm birimi (IMU) mevcuttur. Bu sensör sayesinde eksenlerin açısal hızları ile ilgili bilgiler elde edilebilmektedir. Ayrıca rijit olarak tasarlanan, IMU ile KÖ kameranın birlikte takıldığı mekanik arayüz sayesinde, bozucu etki altında KÖ kamerada meydana gelen bütün açısal hareket ve hızlanmalar mevcut IMU ile eksiksiz biçimde ölçülebilmektedir.



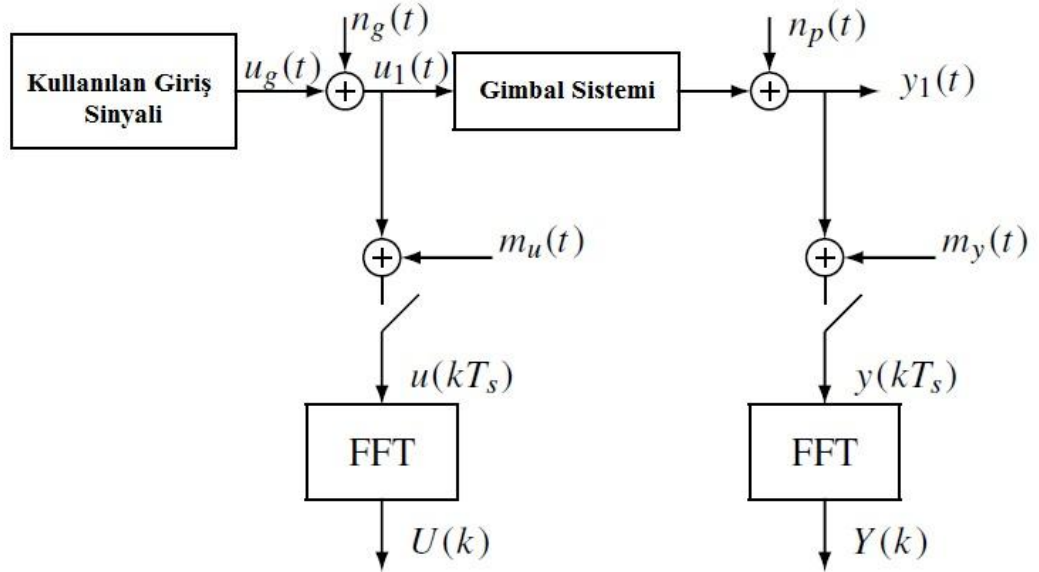
Şekil 2.2. Gimbal şematik gösterimi – yapıda mevcut olan eksenler işaretlenmiştir[15]

## 2.2 Sistem Tasarımında Etkisi Olan Mekanik Parametreler

Yüksek hassasiyete sahip stabilizasyon sistemleri için mekanik yapının özellikleri ve tasarımı çok önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle hassas kontrol için sistemin rijitliğinin yüksek olması gerekmektedir. Gimbal yapılarında performansa etkisi olan mekanik parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

**Sürtünme:** Stabilize edilmeye çalışılan birime gelen bozucu etkilerin başında sürtünme gelmektedir. Başka herhangi bir dış bozucu etki sisteme etkimese dahi, sahip olduğu dinamik etkiler nedeniyle sürtünme, sistemin istenilen davranışı göstermesinde büyük bir engel teşkil etmektedir. Sürtünmeler genel olarak üç kategoride sınıflandırılabilir. Bunlar, yapışkan sürtünme, coulomb sürtünmesi ve viskoz sürtünme olarak belirtilebilir [12]. Bütün sürtünme çeşitleri açık çevrim sisteme bir ölü-bölge eklemektedir. Ayrıca viskoz sürtünme, sistem modeline bir adet kutup eklemektedir. İdeal durum için bu sürtünmeler sifıra yakın olmalıdır ve mekanik tasarım aşaması belirtilen bilgiler ışığında yapılmalıdır.

**Rezonans:** Gimbal yapıları, mekanik yapı kaynaklı burulma modlarında, rezonatif bir davranış sergileyebilirler.



Şekil 2.3. Ölçüm düzeneği ve sistem tanılama yapısının şematik gösterimi



İstenmeyen yapısal rezonanslar, tümleşik sistemin performansında istenmeyen sonuçlar doğurabilmektedir. Rezonans, gimbal sisteminde birçok farklı sebepten dolayı ortaya çıkabilmektedir. Sistemin mekanik tasarımı sırasında bu davranışla ilgili dikkat edilmesi gereken önemli noktalar bulunmaktadır. Bu noktaların en önemlisi, eğer rezonans modlarının varlığı engellenemiyorsa, buldukları frekansların mümkün olduğunca yüksek bölgelere çekilmesidir. Bunun için tanımlanan alt limit ise kontrol sisteminin, gelen bozucu etkileri bastırmaya çalıştığı frekans bölgesidir. Bu bölge içerisinde rezonans modunun olmamasına ayrıca önem verilmelidir.

### 2.3 Sistem Tanılama ve Sistemin Dinamiği

Sistem tanılama işlemi tezde kullanılan dört-eksen gimbal yapısının iç iki eksenine uygulanmıştır. Çalışmada iç eksenlerin tercih sebebi ise, gimbalin hassas stabilizasyonunun iç eksenlerin kontrolü ile sağlanmasıdır. Dış eksenler ise iç eksenleri takip etmektedir ve iç eksenlerdeki mekanik limitlerin görüntünün elde edilmesini engellememesini sağlamaktadır. Sistem tanılamada kullanılan yapının şematik gösterimi Şekil 2.3 ile verilmiştir. Sistem tanılama işlemi her iki eksen için ayrı ayrı yapılmıştır.

Oluşturulan ve ileride detayı verilecek olan giriş sinyali bir eksene uygulanırken, diğer eksen etkilerinin sistem tanılama işlemi etkilememesi için kalan üç eksene sıfır "0" tork girişi uygulanmıştır.



Şekil 2.4. Sistem tanılama işlemi için kullanılan sinyal jeneratörü

Eksenler arası etkileşim ise minimum seviyede olduğu için sistemin tek-giriş tek-çıkış modellenmesinde herhangi bir dezavantaj görülmemiştir. Sistem tanılama işlemi iki farklı donanım ile gerçekleştirilmiştir. Bu iki metot arasındaki sonuçlar birbirleri ile çok benzerdir. Bu sebepten ötürü tez çalışması kapsamında bu metotlardan sadece birisinin detayları paylaşılmıştır. Bu donanımlardan ilki *Matlab*<sup>®</sup> ortamında çalışan “xPC Target” donanımdır. SpeedGoat firmasına ait bu ürün, Matlab/SIMULINK ortamında tasarlanan sistemin gerçek zamanlı olarak dış dünyaya aktarılmasını sağlamaktadır. Diğer ürün ise Şekil 2.4 ile gösterilen Agilent firmasına ait olan sinyal analizörüdür. Benzer bir mantıkla çalışan bu iki ürün ile gimbal eksenlerinin frekans uzayında ki davranış bilgileri elde edilmiştir. Bu bilgiler *Matlab*<sup>®</sup> Sistem Tanılama araç kutusunda kullanılarak, sistemin parametrik bir modeli elde edilmeye çalışılmıştır. Sonuçların benzerliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle tez çalışması kapsamında irdelenen ve üzerinde çalışılan modellerin frekans cevapları Agilent sinyal analizörü ile elde edilmiştir.

**Giriş Sinyali:** Şekil 2.3 de gözüktüğü üzere, sisteme uygulanan giriş sinyali  $u_1(t) = u_g(t) + n_g(t)$  yapısındadır. Bu sinyalin hesaplamalar sonucu oluşturulan ve uygulanan kısmı,  $u_g(t)$ , sisteme hazır bir motor sürücü kartı aracılığı ile uygulanmaktadır. Bununla birlikte sisteme istem dışı verilen bir giriş gürültüsü etkimektedir. Sisteme verilen  $u_g(t)$  giriş sinyali  $\pm 180$  büyüklüğüne sahip nümerik bir sinyaldir. Verilen bu sinyal motor sürücü kartı kısmında  $\pm 10$  V'luk bir voltaj girişine yelpaze edilmektedir. Gelen bu komuta istinaden motor sürücü kartı sistem için gereken torku oluşturacak bir akım oluşturmaktadır.

**Çıkış Sinyali:** İç eksenlere takılı LN-200 marka bir dönü-ölçer tarafından elde edilen ve gimbalin açılma hız bilgisini barındıran  $y_1(t)$  çıkış sinyali, 200 Hz bant genişliğine sahip ve 400 Hz örnekleme frekansına sahiptir. Bu kısıtlı bant-genişliği yüzünden sistem tanılama işlemi 200 Hz'e kadar olan bir frekans uzayını kapsamaktadır. Sistemin 200 Hz'den daha yüksek frekans bölgesindeki cevabı ise incelenmemiştir.

**Gürültü:** Sisteme verilen girişler ve alınan ölçümler yüksek doğruluk içinde yapılamamaktadır. Birçok farklı sebepten kaynaklanan ve ölçümlerin doğruluğunu

azaltan  $m_u(t)$  giriş gürültüsü ve  $m_y(t)$  çıkış gürültüsünün yapılan sistem tanılama işlemine doğrudan etkisi olmuştur.

**Sistem Kısıtlamaları:** Genellikle çalışılan uygulamalarda, fiziki sebepler nedeniyle çeşitli kısıtlamalar mevcut bulunmaktadır. Genellikle bu kısıtlamalar ise iki ana başlık altında toplanabilmektedir. Bu başlıklar

- i. Giriş sinyalinin izin verilen maksimum büyüklüğü
- ii. Gimbalin alacağı maksimum açısal pozisyon

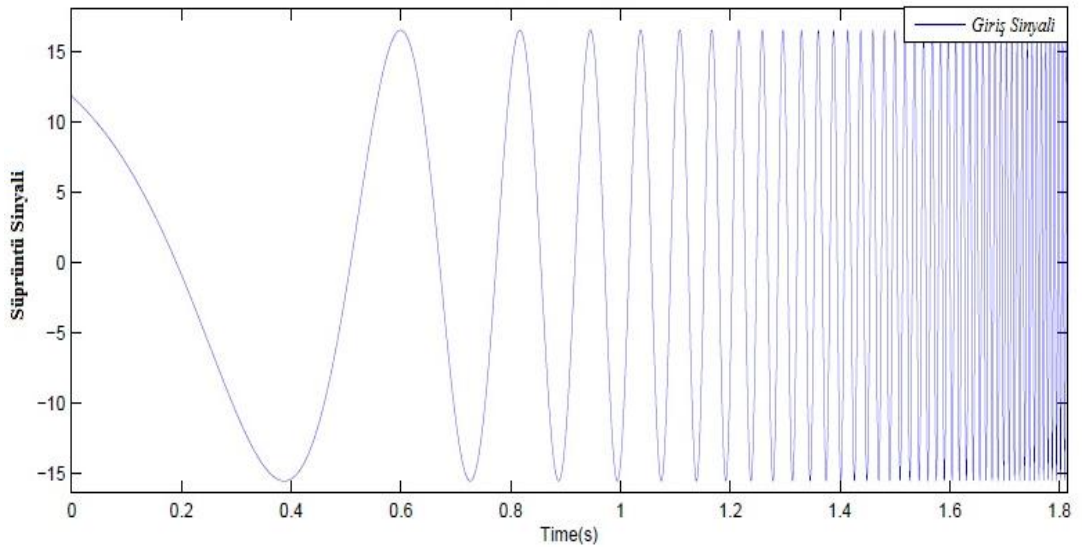
şeklinde sıralanabilir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada bu kısıtlamalar;

- i. Giriş sinyalinin büyüklüğü,  $\pm 10$  V'luk bir voltaj büyüklüğü geçmeyecektir.
- ii. Sistem tanılama işlemi sırasında, iç eksenin mekanik limitlere çarpmaması ve görece daha doğrusal olan bir bölgede çalışabilmesi için, izin verilen açısal pozisyon  $\pm 5^\circ$ 'yi geçmemelidir.

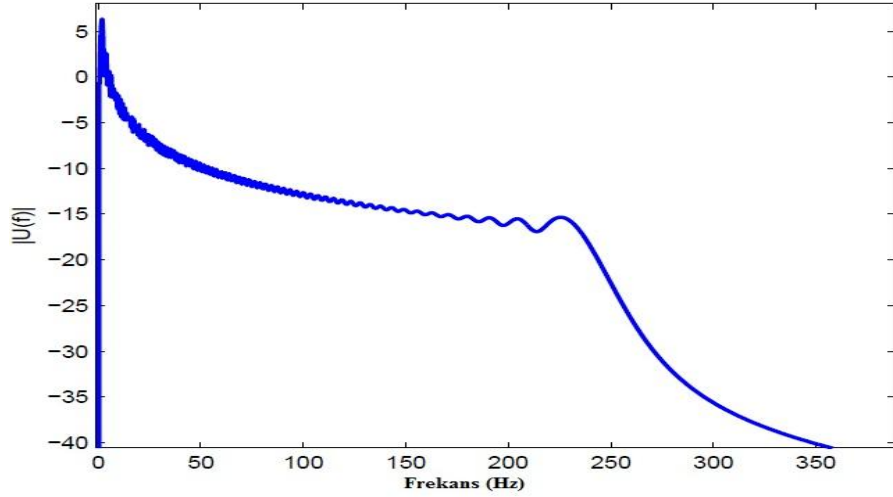
şeklindedir.

## 2.4 Sisteme Uygulanan Giriş Sinyali

Sistem tanılama işlemi için, sistemin istenilen bütün frekans bölgesindeki davranışının modellenmesi ve frekans cevabının elde edilmesi gerekmektedir. Bu işlem için sisteme bu frekans aralığını kapsayacak bir giriş sinyali verilmeli ve karşılığında sistem parametrik modelini oluşturmak için gerekli bir dönü-ölçer çıkış sinyalinin toplanması gerekmektedir.



Şekil 2.5. Sistem tanılama işlemi için kullanılan sinyalin zaman uzayı cevabı



Şekil 2.6. Sistem tanıma işlemi için kullanılan sinyalin güç spektrumu

Bu işlem için, kullanılan ürünün kendisine ait hazır birkaç sinyal çeşidi bulunmaktadır. Uygulanacak bu sinyal sistem tanıma için olan isterleri ve gerekleri karşılayan süprüntü sinüsü girişidir.

**Süprüntü Sinüsü Sinyal Tanımı:** Periyodik bir çirp olarak da tanımlanan süprüntü sinüs sinyali, sinyal frekansının bir ölçüm periyodu süresi içinde, yukarı ve aşağı kaydırılması ile elde edilmiş ve tekrarlanan bir periyodik sinyaldir [13]. Süprüntü sinüs uyarma sinyali Denklem 2.1 ile gösterilmiştir.

$$u(t) = A \sin(2\pi f_i(t)t + \emptyset) \quad 0 \leq t \leq T_0 \quad (2.1)$$

Sisteme uygulanan bu sinyalin periyodu  $T_0$  olarak belirtilmiştir. Başlangıç fazı ise  $\emptyset$  ile gösterilmiştir. Uygulanan sinyalin frekansı doğrusal veya logaritmik olarak süpürülebilir. Doğrusal süpürülme için sinyal frekansı  $f_i(t)$  Denklem 2.2 ile tanımlanmıştır.

$$f_i(t) = f_{start} + \beta t, \quad \beta = (f_{end} - f_{start})/T_0 \quad (2.2)$$

Logaritmik süpürülme için sinyal frekansı  $f_i(t)$  Denklem 2.3 ile tanımlanmıştır.

$$f_i(t) = f_{start} \beta^t, \quad \beta = (f_{end}/f_{start})^{1/T_0} \quad (2.3)$$

Burada belirtilen giriş sinyali başlangıç frekansı  $f_{start}$  ile bitiş frekansı ise  $f_{end}$  ile gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen sistem için logaritmik süpürme sinyalinin kullanılması öngörülmüştür. Kullanılan bu sinyal kısım 2.2' de belirtilen sistem kısıtlamalarını tatmin edecek şekilde belirlenmiştir. Şekil 2.5 ile birim bağımsız bir biçimde gösterilen ve sisteme uygulanan logaritmik süpürme sinyalinin özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Sistemin örnekleme frekansı  $f_s$ , 3 kHz olarak seçilmiştir ve bu sayede sistemin örnekleme periyodu,  $T_s = 1/f_s$ , ise 1/3000 saniyedir.
- Uygulanan süprüntü sinyali logaritmiktir.
- Uygulanan sinyalin genliği  $A$  ise 2,5 V olarak belirlenmiştir. Bu belirleme sayesinde iç gimballerin açılma pozisyon limitleri istenilen seviyelerde tutulmuştur.
- Başlangıç fazı  $\emptyset=45$  derece olarak belirlenmiştir.
- Sistem tanılamada kullanılan sinyalin, anlık değişken frekansının başlangıç değeri,  $t = 0$  anında,  $f_{start} = 0,5 \text{ Hz}$ , bitiş değeri ise,  $t = T_0$  anında,  $f_{end} = 250 \text{ Hz}$  seçilmiştir. Bu seçim sayesinde, sistemin çalışma frekans aralığında ki sistem tanılama işlemi ve sistem parametrik modelinin elde edilmesi sağlanmıştır.

Belirtilen kriterler altında tasarlanan ve sistem tanılamada kullanılan giriş sinyalinin güç spektrumu Şekil 2.6 ile gösterilmiştir. Tasarlanan bu sinyalin, ilgilenilen frekans bölgesindeki gücünün toplam güce oranı Denklem 2.4 ile gösterilmiştir.

$$\frac{P_{int}}{P_{tot}} = 0.99 \quad (2.4)$$

Bu oran istenilen bir orandır. İlgilenilen frekans bölgesinde, kabaca sabit bir sinyal-gürültü oranı (SNR) elde etmek için gürültünün yüksek olduğu frekanslara daha fazla güç vermek istenmektedir [14].

## 2.5 Sistem Modelinin Bileşenleri

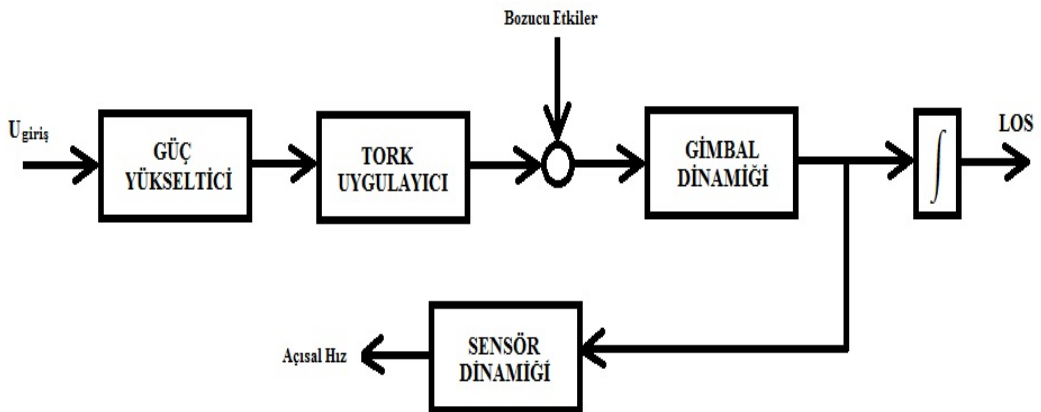
Sistem modelinin alt bileşenlerinin blok diyagram ile gösterimi Şekil 2.7 ile yapılmıştır. Bu bileşenlerin görevleri ise sırası ile;

**Güç Yükseltici:** Sisteme giren nümerik giriş komutunun anlamlı bir akım referansına dönüştürülme işlemini gerçekleştirmek üzere görevlendirilmiştir. Sabit bir kazanç olarak düşünülebilir.

**Tork Uygulayıcı:** Güç yükselticiden gelen anlamlı akım referansı, fiziksel sistem için bir anlam ifade etmemektedir. Sistemdeki hareketi sağlayan fiziki olgu ise torktur.

Tork uygulayıcı bloğu, gelen akım referansı ile anlamlı bir tork oluşturmak ve gimbal eksenini hareket ettirmek üzere görevlendirilmiştir. Bu blok bir adet doğrudan sürüm DA akım motoru ve bu motorun çalışmasını sağlayan bir adet motor sürücü kartından oluşmaktadır.

**Gimbal Dinamiği:** Bu tez çalışmasında her bir eksen için farklı olmak üzere iki adet farklı gimbal dinamiği mevcuttur. Eksenler arası etkileşimin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu varsayarsak, iç yükseliş eksenini için; rezonans modu olmayan ve çok düşük bir sönümlenme katsayısı olan bir dinamik mevcuttur. İç azimut için ise iki adet rezonans moduna sahip (177 Hz ve 223 Hz) ve çok düşük bir sönümlenme katsayısı olan bir dinamikten bahsedilebilir.



Şekil 2.7. Sistem modeli bileşenlerinin blok diyagramı

**Sensör Dinamiği:** İç eksenlerin kontrolü için geri besleme yapmakla görevlendirilen dönü-ölçer LN200 model ve yüksek performansa sahip bir dönü-ölçerdir. Bu dönü-ölçer çeşitli sebeplerden ötürü yaklaşık 3,5 milisaniyelik bir gecikmeye sahiptir. Bant genişliği 200 Hz olan ve örnekleme frekansı 400 Hz olan bu dönü-ölçerin gürültü seviyesi ise nispeten düşük seviyelerdedir.

Sistem tanılama işlemi için siyah kutu yapısı kullanılmıştır. Bu siyah kutu yapısını anlamak için Şekil 2.7 ile gösterilen blok diyagramın incelenmesi yeterlidir. Burada güç yükseltici bloğu ile sensör dinamiği bloğu arası siyah kutu olarak belirlenmiştir. Şekil 2.3 ile gösterilen sistem tanılama şematüğünde tanımlanan giriş sinyali, güç yükseltici bloğuna nümerik bir giriş komutu olarak uygulanmıştır. Sistem modeli için tanımlanan çıkış sinyali ise sensör dinamiği bloğunun çıkışı olan açısal hız bilgisi olarak alınmıştır. Sinyal analizörü ile elde edilen ve parametrik olmayan frekans cevabı fonksiyonu (FRF) ölçümleri yukarıda belirtilen siyah kutu için elde edilmiş olup tasarlanacak olan kontrolcü bu siyah kutu için tasarlanacaktır.

## 2.6 Parametrik Sistem Modeli

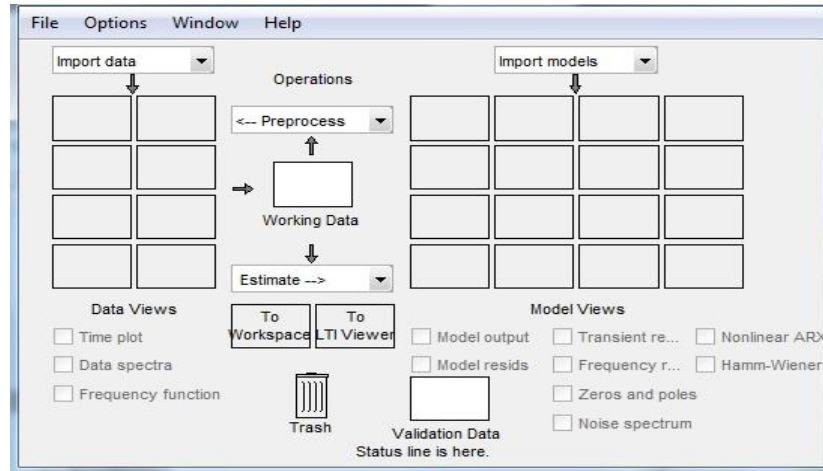
Bu kısmın temel hedefi, sistem tanılama için kullanılan sinyal analizörü vasıtası ile gürültü altında elde edilen ve parametrik olmayan FRF ölçümlerini kullanarak, doğrusal ve zamandan bağımsız bir parametrik sistem modelinin elde edilmesidir. Sistemin doğrusal ve zamandan bağımsız modelinin elde edilmesi frekans uzayında yapılacak analizler için çok daha elverişli bir hale gelmektedir. Ayrıca bu model sayesinde, tanımlanan performans isterlerini sağlayacak bir kontrolcü tasarımı ve zaman uzayında yapılacak simülasyonlar imkanı hale gelmektedir [15]. Parametrik bir sistem modeli için birçok farklı yapı mevcuttur. Bunlardan bazıları transfer fonksiyonu yapısı, durum-uzay yapısı, polinomsal yapılardır. Tez çalışması kapsamında kullanılan parametrik, doğrusal ve zamandan bağımsız sistem model yapısı durum-uzay yapısıdır. Durum-uzay yapısı Denklem 2.5 ve Denklem 2.6 ile gösterilmiştir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.5)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.6)$$

Burada  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ ,  $B_d \in \mathbb{R}^{n \times n_d}$ , ve  $C \in \mathbb{R}^{1 \times n}$  olarak belirtilmiştir. Sistem parametrik modeli elde edilirken  $A, B, C$  ve  $D$  matrislerinin değerleri belirlenecektir. Elde edilen bu model sinyal analizörü tarafından sağlanan ve parametrik olmayan FRF ölçümlerini doğrulayacak şekilde olmalıdır.

Belirtilen sistem matrislerinin elde edilmesi için *Matlab*<sup>®</sup> yazılımının sistem tanılama ürünü kullanılmıştır. Şekil 2.8 ile arayüzü gösterilen sistem tanılama ürünü elde edilen FRF ölçümlerini kullanarak, dinamik bir sistem modeli elde edilmesini olanaklı hale getirmiştir. Bu işlem belirli sınırlamalar ve varsayımlar altında yapılmıştır. Bu varsayımlardan ilki durum-uzay yapısının kendi içinde serbest bir yapıda olmasıdır. İkincisi ise sistem tanılama işlemi sırasında herhangi bir kararlı olmayan kökün kullanılmasına izin verilmemiştir. Böylece elde edilen bütün parametrik sistem modellerinin kararlılığı ve/veya sınırdaki kararlılığı garanti altına alınmıştır. Son olarak ise, işlem sırasında gradyan arama algoritması kullanılmıştır.



Şekil 2.8. Matlab sistem tanılama ürünü arayüzü

Yukarıda verilen bilgiler ışığında sistem tanılama işlemi gerçekleştirilmiş ve bu işlemler sonucunda her bir gimbal için parametrik, doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sistem modeli elde edilmiştir.

### 2.6.1 İç Yükseliş Ekseni Sistem Modeli

Sistem tanılama işlemi ile iç yükseliş ekseni için elde edilen model dört durumlu bir durum-uzay sistem modelidir. Şekil 2.9 verilen bode diyagramları, iç yükseliş ekseninin sistem tanılama ile elde edilen parametrik modelinin frekans cevabını



göstermektedir. Şekil 2.9 ile de gözüktüğü üzere, iç yükseliş eksenine ait herhangi bir rezonatif mod bulunmamaktadır. Elde edilen sistem modelinin kökleri ve sıfırları, Çizelge 2.1 ile gösterilmiştir.

### **2.6.2 İç Azimut Ekseni Sistem Modeli**

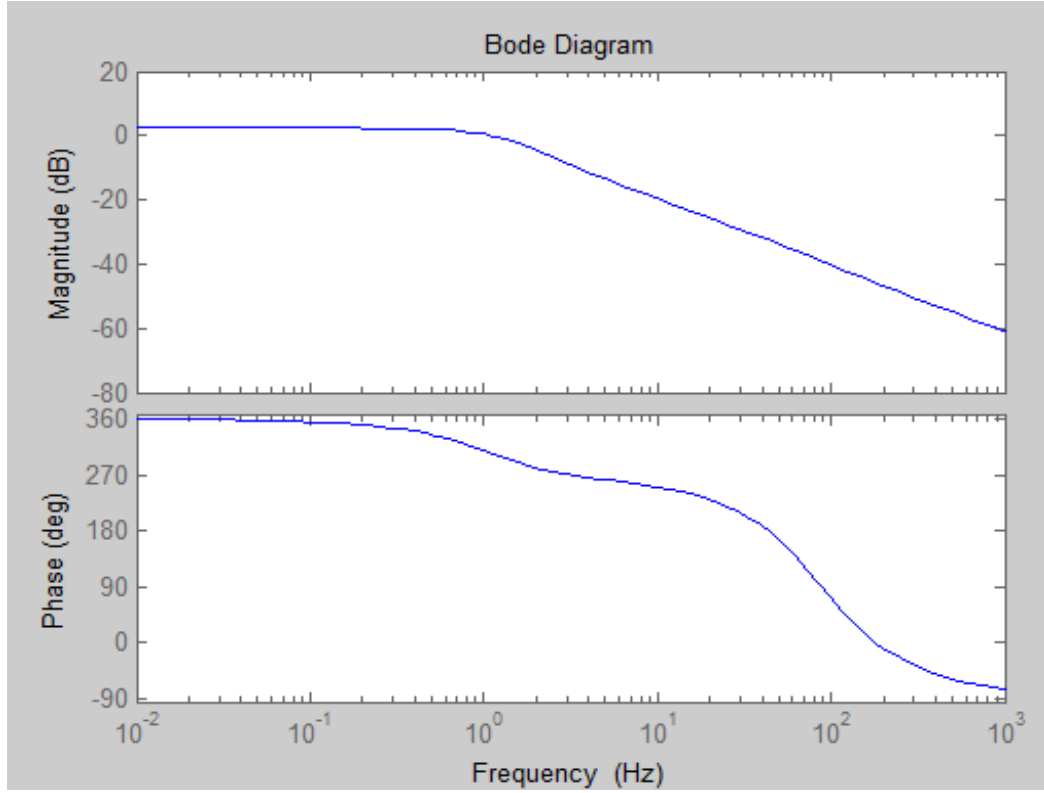
Sistem tanılama işlemi ile iç azimut ekseni için elde edilen model altı durumlu bir durum-uzay sistem modelidir. Şekil 2.10 verilen bode diyagramı, iç azimut ekseninin sistem tanılama ile elde edilen parametrik modelinin frekans cevabını göstermektedir. Şekil 2.10 ile de gözüktüğü üzere, iç azimut eksenine ait iki adet rezonatif mod bulunmaktadır. Elde edilen sistem modelinin kökleri ve sıfırları, Çizelge 2.2 ile gösterilmiştir.

## **2.7 Sistem Dinamiğinin Analizi**

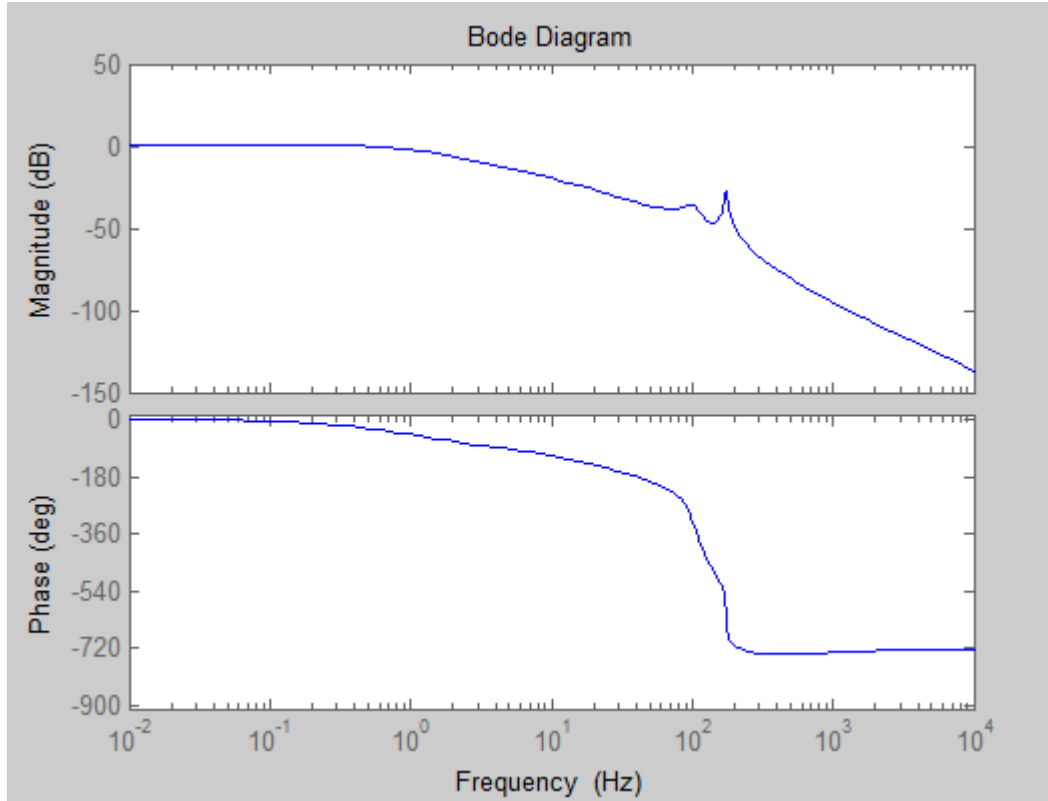
### **2.7.1 İç Yükseliş Ekseni Sistem Dinamiği Analizi**

Çizelge 2.1 ile gözüktüğü üzere, iç yükseliş ekseni dört adet kutup ve üç adet sıfırdan oluşmaktadır. Eksenin sahip olduğu bütün kutuplar yer-kök eğrisinde orijinin sol tarafında yer almaktadır. Bu sebepten ötürü, sistem dinamiği karardır. Ancak, sistemin sahip olduğu sıfırlardan iki tanesi, yer-kök eğrisinde, orijinin sağ tarafında yer almaktadır. Bu sebepten ötürü sistem minimum fazlı olmayan bir sistemdir. Sistemin sağ yarı düzlemde sıfırları olmasına rağmen, bu sıfırlar orijine bir hayli uzakta yer almaktadır ve buda kontrolör tasarımı açısından avantajdır.

Ayrıca, iç yükseliş eksenin, ilgilenilen frekans bölgesinde, herhangi bir rezonans moduna sahip olmaması, sistemin stabilizasyonu için herhangi bir ek önlem alınmasını gerektirmemektedir. İç yükseliş ekseninde bulunan sürtünme ise büyük ve tedbir alınması gereken bir doğrusal olmayan dinamiğe yol açmamaktadır. Bu sonuç, sistemden değişik zamanlarda ve değişik pozisyonlarda alınan ve sistem tanılama işlemi ile elde edilen sistem dinamiğinde farklılık gözükmemesinden elde edilmiştir.



Şekil 2.9. İç yükseliş eksenli bode diyagramı



Şekil 2.10. İç azimut eksenli bode diyagramı

Çizelge 2.1. İç yükseliş eksen kutup ve sıfırları

Sıra Numarası	Kutup	Kutup Damper Katsayısı	Sıfır	Sıfır Damper Katsayısı
1	-6.5+4.23i	0.838	-12.3	1
2	-6.5-4.23i	0.838	460+353i	-0.794
3	-414+349i	0.765	460-353i	-0.794
4	-414-349i	0.765	-	

Çizelge 2.2. İç azimut eksen kutup ve sıfırları

Sıra Numarası	Kutup	Kutup Damper Katsayısı	Sıfır	Sıfır Damper Katsayısı
1	-9.1	1	-2780	1
2	-167	0.838	538	-1
3	-14.7+1100i	0.0134	185+822i	-0.22
4	-14.7-1100i	0.0134	185-822i	-0.22
5	-80.1+646i	0.123	-	
6	-80.1-646i	0.123	-	

### 2.7.2 İç Azimut Eksen Sistem Dinamiği Analizi

Çizelge 2.2 ile gözüktüğü üzere, iç azimut eksen altı adet kutup ve dört adet sıfırdan oluşmaktadır. Eksenin sahip olduğu bütün kutuplar yer-kök eğrisinde orijinin sol tarafında yer almaktadır. Bu sebepten ötürü, sistem dinamiği karardır. Ancak, sistemin sahip olduğu sıfırlardan üç tanesi, yer-kök eğrisinde, orijinin sağ tarafında yer almaktadır. Bu sebepten ötürü sistem minimum fazlı olmayan bir sistemdir.

İç azimut ekseninde, iç yükseliş ekseninden farklı olarak iki adet rezonans modu mevcuttur. Bu rezonans modlarının, gimbalin çalışması sırasında istenmeyen herhangi bir davranışta bulunmaması için kontrolör tasarımı sırasında çeşitli

tedbirlerin alınması gerekmektedir. Bu tedbirler için detaylı açıklama ileriki bölümlerde yapılacaktır.

Son olarak, iç azimut ekseninde kullanılan rulmanların fiziksel özellikleri nedeniyle, sisteme etkiyen sürtünmeler düşük frekans bölgesinde doğrusal olmayan etkiler meydana getirmektedir. Önerilen kontrol yapısı, mevcut olan bu doğrusal olmayan etkilerin sistem performansı üzerine etkisini minimize etmeyi amaçlamaktadır.

### 3. KONTROL SİSTEMİ TASARIM METODOLOJİSİ

Bu tez çalışmasının amacı olan, dağılımı ve istatistiki verileri bilinmeyen bozucu etkiler altında, gimbaleksenlerinin stabilizasyonunu sağlayan kontrol sistemi tasarımı bu bölümde anlatılacaktır. Stabilizasyon için kullanılan kontrol yapısı LQG/LTR metodu bir bozucu etki gözleyicisi ile güçlendirilmiştir. Bu yapı mevcut olan LQG/LTR metodu için yeni bir yaklaşımdır. Bölüm üç, öncelikle önerilen kontrol sisteminin matematiksel altyapısını açıklamakta olup, ilerleyen kısımlarında ise gerçek sistem için kontrol sisteminin tasarlanmasını göstermektedir.

#### 3.1 Bozucu Etki Gözleyicisi

Gimbal sistemlerinde, sisteme etkiyen bozucu etkilerin tahmin edilmesi, geçtiğimiz birkaç on yılda bir hayli popüler olmaya başlamıştır. Özellikle yüksek performans isterlerine sahip sistemler için, sisteme etkiyen bozucu etkilerin giderilmesi ve sistem performansının çok düşük bir aralıkta kalma ihtiyacı, halledilmesi gereken en önemli konudur. Literatürde, bozucu etkilerin tahmini ve sisteme olan etkilerinin giderilmesi için birçok farklı metot mevcuttur [16-19]. Ancak, bu önerilen metotlardan büyük bir kısmı, özellikle literatürde çok yaygın olarak kullanılan ters dinamik[20,21] yöntemi, içerisinde kararsız sıfırlar barındıran sistemler için geçerliliğini kaybetmektedir. Bu tez çalışmasında incelenen sistem için kullanılacak bozucu etki gözleyicisi yapısı için KÜRKÇÜ ve KASNAKOĞLU'nun önerdiği yapı kullanılmıştır [22]. Bu metot, sistemin içerisinde kararsız sıfır olmasından etkilenmemekte ve sisteme etkiyen bozucu etkileri çok düşük bir gecikmeyle tahmin etmektedir.

##### 3.1.1 Eşdeğer Giriş Bozucu Etki Tanımı

Bu kısımda, Denklem 3.1 ile gösterilen doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sisteme etkiyen dış bozucu etkilerin tamamının, eşdeğer bir giriş bozucu etkisi olarak modellenebileceğinin matematiksel tanımını göstermektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_0(t) &= Ax_0(t) + Bu(t) + B_d T_d(t) \\ y_0(t) &= Cx_0(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Burada  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times n_u}$ ,  $B_d \in \mathbb{R}^{n \times n_d}$ , ve  $C \in \mathbb{R}^{n_y \times n}$  olarak şekilde seçilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmada sistem Tek-Giriş ve Tek-Çıkış olarak modellenmiştir. Bu sebepten ötürü,  $n_u = 1$  ve  $n_d = 1$  olarak belirlenmiştir. Ek olarak  $B$  ve  $B_d$  matrislerinin boyutları farklı olduğu için, sisteme etkileyen bozucu etkiler sistemin giriş kanalından farklı olan kanallardan da etkiyebilir. Eğer, sisteme etkileyen tüm bozucu etkilerin sadece ve sadece giriş kanalından etkideği varsayımı yapılacak olursa, sistem modeli Denklem 3.2 ile gösterilen yapıyı alır.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + BT_{ed}(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Bu durumda eşdeğer bozucu etki tanımı aşağıdaki şekilde yapılır:

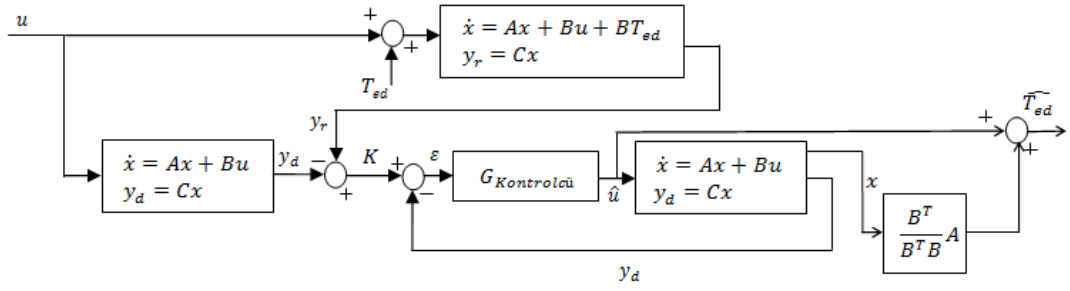
**Tanım:** Kontrol girişi  $u(t) = 0$  ve  $x(\pm\infty) = 0$  olarak seçilir. Bu durumda, Denklem 3.1 ile belirtilen ve  $T_d(t)$  bozucu etkisi altındaki sistem modelinin çıkışı  $y_0(t)$  olur. Aynı zamanda, Denklem 3.2 ile belirtilen ve  $T_{ed}(t)$  bozucu etkisi altındaki sistem modelinin çıkışı  $y(t)$  olur. Belirtilen koşullar altında, eğer  $y(t) = y_0(t)$  ise,  $T_{ed}(t)$  bozucu etkisi,  $T_d(t)$  bozucu etkisinin eşdeğer giriş bozucu etkisi olarak isimlendirilir.

**Varsayım:**  $(A, B)$  kontrol edilebilirdir ve  $(C, A)$  ise gözlemlenebilirdir. Eğer bozucu etki  $T_d(t)$ 'nin neden olduğu çıkış izdüşümü  $y_d(t) \in L_1 \cap L_\infty$  ise, kararlı ters almanın konseptine göre [23,24], kontrol giriş kanalında aynı izdüşümü oluşturan bir  $T_{ed}(t) \in L_1 \cap L_\infty$  'nin varlığı her zaman mevcuttur.

### 3.1.2 Bozucu Etki Gözleyicisinin Matematiksel Modeli

Bu tez çalışması kapsamında önerilen bozucu etki gözleyicisinin mimarisi Şekil 3.1 ile gösterilmiştir. Önerilen gözleyici iki çeşit sistem modeli kullanmaktadır. Denklem 3.3 ile gösterilen durum-uzay yapısındaki sistem modeli, eşdeğer giriş bozucu etkiler altında olan bir yapıdır. Denklem 3.4 ile gösterilen durum-uzay yapısındaki sistem modeli ise sıfır bozucu etki altında bir yapıdır.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + BT_{ed} \\ y_r &= Cx \end{aligned} \quad (3.3)$$



Şekil 3.1. Önerilen bozucu etki gözleyici mimarisi

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y_d &= Cx \end{aligned} \quad (3.4)$$

$T_{ed}$ 'nin tahmin edilmesi için,  $y_d$  ve  $y_r$  arasında ki fark Denklem 3.5 ile hesaplanmaktadır.

$$y_r - y_d = C \left[ \int_0^\infty (Bu + BT_{ed} + Ax) dt - \int_0^\infty (Bu + Ax) dt \right] \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'in basitleştirilmiş hali Denklem 3.6 ile verilmiştir.

$$K = C \int_0^\infty (BT_{ed}) dt \quad (3.6)$$

Burada  $K$ ,  $y_d$  ile  $y_r$  arasında ki farkı simgelemektedir. Şekil 3.1 de kullanılan, Bozucu etki gözlemleyici sistemin hatası  $\epsilon$  ile gösterilmiştir. Bozucu etkileri tahmin etmek için kullanılan  $G_{Kontrolcü}$  kontrolcüsünün çıktısı  $\hat{u}$  ise sisteme etkiyen bütün bozucu etkilerin eşdeğer bir bozucu etkisi olarak tahmin edilmiş halidir.

Burada,  $G_{Kontrolcü}$  kontrolcüsünün, Denklem 3.4 ile gösterilen sistem modelini asimptotik olarak kararlı yaptığı varsayılmıştır. Bu varsayımın gerçekleştiği koşullarda,  $\epsilon$  hatası sifıra yaklaşmaktadır. Bu yaklaşım ise Denklem 3.7 ile gösterilmiştir.

$$\epsilon = K - y_d = C \left[ \int_0^\infty (BT_{ed} - B\hat{u} - Ax) dt \right] \rightarrow 0 \quad (3.7)$$

Eğer  $C \neq 0$  ise yani yukarıda yapılan ilk varsayım doğru ise, Denklem 3.7 ile gösterilen integral sifıra yakınsamaktadır. Bu sayede ve  $B \neq 0$  varsayımı altında,

$$\begin{aligned} BT_{ed} - B\hat{u} - Ax &\rightarrow 0 \\ \hat{u} + \frac{B^T}{B^T B} Ax &\rightarrow T_{ed} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Özet olarak, eşdeğer giriş bozucu etki  $T_{ed}$ , Denklem 3.8 ile gösterildiği gibi tahmin edilebilmektedir. Ancak bu işlem ek bazı varsayımlar altında gerçekleşmiştir:

- i)  $B \neq 0, C \neq 0$ .
- ii)  $x$  durumları ölçülebilir ve/veya gözlemlenebilirdir.
- iii)  $G_{Kontrolcü}$ , Denklem 3.4 ile gösterilen sistem modelini asimptotik olarak kararlı yapmaktadır.

$G_{Kontrolcü}$  kontrolörü için önerilen ve gereken varsayımları sağlayacak kontrolcü yapısı integral aksiyonlu Doğrusal Karesel Regülatör (LQR) yapısındadır. Bu önerilen yapı doğrusal ve zamanla değişmez olan ve Denklem 3.4 ile gösterilen sistem modelini asimptotik bir şekilde kararlı yapmaktadır [25]. Bu işlem için öncelikle sistem modeline Denklem 3.9 ile gösterildiği gibi integral hata terimi eklenmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\varepsilon}_{int} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \varepsilon_{int} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} K \quad (3.9)$$

Sistemi kontrol için gereken kontrol girişi  $\hat{u}$  ise Denklem 3.10 ile gösterilen şekilde hesaplanmaktadır.

$$\hat{u} = -\hat{K}_{optimal,gains}x + VK \quad (3.10)$$

Denklem 3.9 ve Denklem 3.10'da, eklenen integral durum değişkeni  $\varepsilon = \int_0^t (K - y_d) dt$  ile durumların regülasyonu için kullanılan optimal kazanç vektörü  $\hat{K} = R^{-1}B^T P$  ile ve sistemin kalıcı-hal hatasını gidermek için kullanılan ileri besleme terimi ise  $V = -(C^T(A - B\hat{K})^{-1}B)^{-1}$  olarak kullanılmıştır. Ayrıca Denklem 3.11 ile gösterilen Ricatti Denkleminin sonucu ise  $P$ 'dir.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (3.11)$$



Yukarıda belirtilen  $G_{Kontrolcü}$  yapısı asimptotik kararlılığı garanti etmektedir. Açıklanan bozucu etki gözleyici yapısı ile gerçek sisteme etkiyen tüm bozucu etkiler, eşdeğer bir giriş bozucu etkisi olarak modellenmiştir. Buna ek olarak, gerçek sisteme ait ve doğrusal olmayan yaklaşımlar yine  $T_{ed}$  eşdeğer giriş bozucu etki içinde tahmin edilmektedir. Belirtilen sebeplerden ötürü önerilen bozucu etki gözleyicisi yeteri kadar esneklik klasik yapıları gözleyicilere göre oldukça fazla avantajı bulunmaktadır.

## 3.2 LQG/LTR Metodunun Matematiksel Arkaplanı

### 3.2.1 LQR ve LQG Tasarım Teknikleri Hakkında Matematiksel Özet

Bu kısımda sadece sonlu-boyutlu, doğrusal-zamandan bağımsız ve direk-geçiş ( $D$ ) olmayan sistemler göz önüne alınacaktır. Bölümde kullanılacak durum-uzay modeli Denklem 3.12 ile gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.12)$$

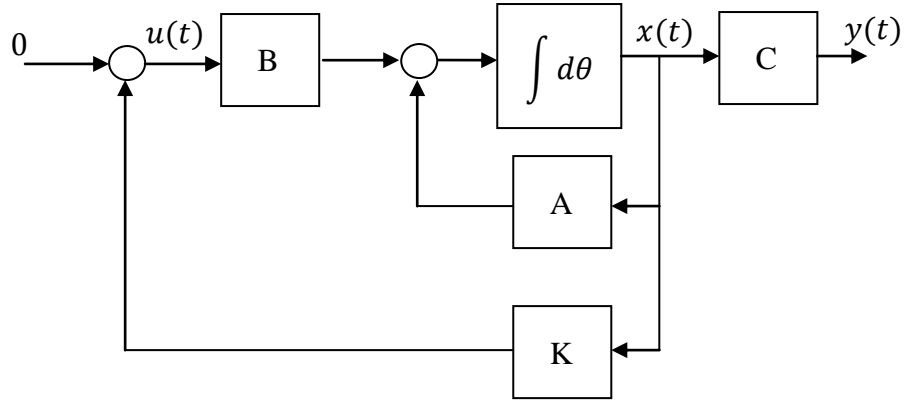
LQR problemi, Denklem 3.12 ile gösterilen sistemi asimptotik bir şekilde süren ve Denklem 3.13 ile verilen maliyet fonksiyonunu minimize eden bir  $u_{LQR}(t)$  kontrolünü bulmaya çalışmaktadır [25].

$$J(u, x_0) = \int_{t=0}^{\infty} \{x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)\} dt, \quad Q \geq 0, R \geq 0 \quad (3.13)$$

Burada  $Q$  ve  $R$  matrisleri simetrik ve pozitif (yarı) tanımlıdır. Bu optimal kriter, kontrollü çıkış için gerekli enerji ile kontrol için kullanılan giriş enerji arasında bir bağıntı kurmaktadır [26]. Tek Giriş-Tek Çıkış sistemler için  $Q = C^T C$  eşitliği genellikle yeterli olmaktadır.

Şekil 3.2 ile gösterilen LQR kontrolör yapısının çözümü Denklem 3.14 ile açıklanmıştır.

$$u_{LQR}(t) = -K_{LQR}x(t), \quad K_{LQR} \in R^{m \times n} \quad (3.14)$$



Şekil 3.2. LQR kontrol şematığı

Denklem 3.14’de kullanılan geri besleme kazanç matrisinin açık hali Denklem 3.15 ile verilmiştir.

$$K_{LQR} = R^{-1}B^T P \quad (3.15)$$

Burada simetrik matris  $P \in R^{n \times n}$ , Denklem 3.16 ile gösterilen Ricatti eşitliğinin tek pozitif-(yarı)tanımlı sonucudur.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (3.16)$$

Eğer Denklem 3.12 ile tanımlanan sistem için  $[A, B, Q^{1/2}]$  kararlılaştırılabilir ise ve sistemin sanal ekseninde tespit edilemez bir kutbu yoksa LQR probleminin çözümünün olduğu garanti edilir [27,28].

LQR kontrolörün en önemli özelliklerinden biriside çok iyi gürbüzlük özelliğinin bulunmasıdır. Tek Giriş-Tek Çıkış bir sistemde bu gürbüzlük çok net bir şekilde gözükabilmektedir.

$$D(s) = 1 + L(s) = 1 + K_{LQR}(sI - A)^{-1}B \quad (3.17)$$

Denklem 3.17 ile gösterilen dönüş-farklılığı Denklem 3.18 ile verilen şartı sağladığı Şekil 3.3’de açıkça gözükmektedir.

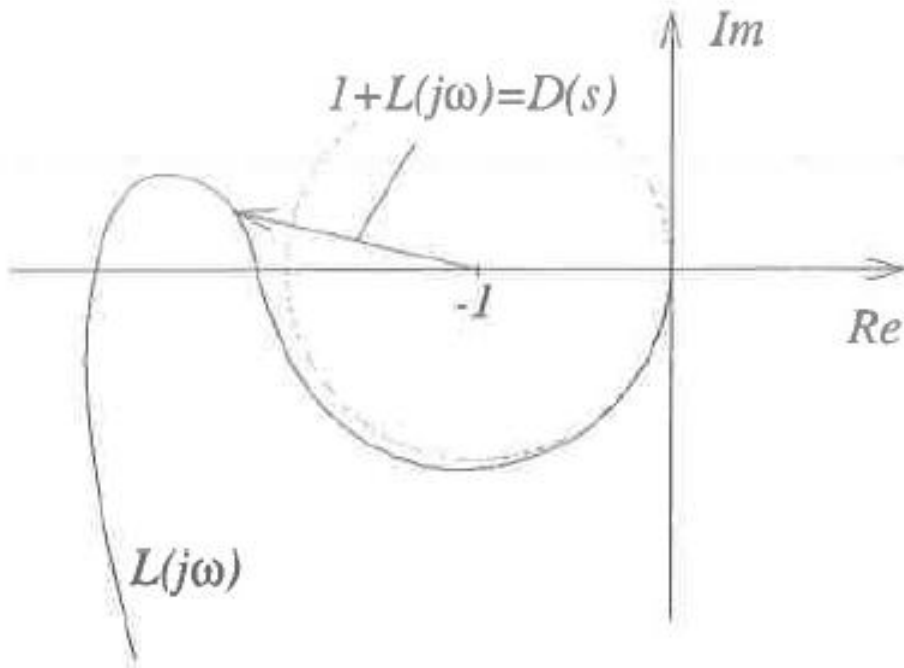
$$|D(jw)| \geq 1 \quad \text{bütün} \quad w \in [0, \infty) \quad (3.18)$$

Denklem 3.18'in sağlanması en az  $60^\circ$ 'lik bir faz payına veya  $[0.5, \infty)$ 'lik bir kazanç payına sebep olmaktadır.

Diğer taraftan, getirdiği bütün bu olumlu özelliklere rağmen, Denklem 3.14 ile tanımlan LQR kontrol yapısının çeşitli problem ve zorlukları bulunmaktadır. Bu problemlerin başında ise, kontrolcünün tasarlanacağı sistem modelinin bütün durum bilgileri her zaman, hatta pratik birçok uygulamada, sağlanamamaktadır. Genellikle sistemlerde, ölçümlenebilen bilgi  $y(t)$  çıkış bilgisi olmaktadır.

Sistem durum bilgileri, uygulamalarda ölçülemiyor olsa dahi, ölçülebilen  $y(t)$  çıkış bilgisi kullanılarak durum tahmini ve bunun için gerekli bir bütün durumları ölçülebilir kılabacak bir gözleyici bir yapı kurmak mümkündür. Kurulan bu yapı ile ölçülemeyen durum bilgileri kontrolcü için kullanılabilir bir hale gelmektedir. Durum tahmini için kullanılan bu gözleyici yapısı Denklem 3.19 ile verilmiştir.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)), \quad \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (3.19)$$



Şekil 3.3. LQR kontrol sisteminin Nyquist grafiği[29]

Ancak önerilen gözleyici yapısı ile tahmin edilen durumların başlangıç koşulu ile gerçek durumların başlangıç koşulları genellikle aynı olmamaktadır. Burada  $L$  gözleyici kazanç matrisi,  $\hat{x}$  ve  $\hat{y}$  ise sırasıyla sistem durumlarının tahmini ve sistem çıkışının tahminini simgelemektedir.

Denklem 3.12 ile Denklem 3.19 arası düzenli bir şekilde incelendiğinde, gözlemeleme hatasının,  $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ , Denklem 3.20 ile belirtilen diferansiyel denklemi sağladığı kolayca gözükmemektedir.

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) = (A - LC)e(t) \quad (3.20)$$

Denklem 3.20 ile tanımlanan hata dinamiği, gözleyici kazanç matrisi  $L$ 'nin uygun bir seçimi ile asimptotik kararlı bir hale getirilebilir. Bu sayede, başlangıç koşulları kaynaklı gözlemeleme hatası,  $e(0) = x_0 - \hat{x}_0$ , asimptotik bir şekilde ortadan kaybolur ve iki durum vektörü  $x(t)$  ve  $\hat{x}(t)$ , bütün muhtemel girişler için,  $u(t)$ , aynı hale gelir. Ancak, yukarıda bahsedilen durum, modelleme hatalarının minimum seviyede tutulduğu ve gürültü seviyelerinin sistem çıkışı ve girişine çok büyük bir etkisinin olmadığı durumlar için geçerlidir.

Sonuç olarak, ölçülemeyen gerçek durum değişkenleri,  $x(t)$ , yerine gözleyici tarafından sağlanan gerçek durum değişkenlerinin tahminleri,  $\hat{x}(t)$ , kullanılacak olursa; Denklem 3.14 ile belirtilen kontrol kanunu Denklem 3.21 ile belirtilen kontrol kanunu halini alacaktır.

$$u_{LQG}(t) = -K_{LQR}\hat{x}(t) \quad (3.21)$$

Denklem 3.21 ile belirtilen kontrol kanununun ve Denklem 3.19 ile belirtilen gözleyici modelinin birleşimi ise LQG kontrolör olarak isimlendirilmektedir [26].

Kapalı çevrim sistem için ortaya çıkan dinamik Denklem 3.22 ile gösterilen diferansiyel eşitlikle gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -BK_{LQR} \\ LC & A - BK_{LQR} - LC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \hat{x} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Belirtilen LQG kontrolcü kendi kendine  $n^{nci}$  mertebeden ve doğrusal-zamanla değişmeyen bir sistemdir. Bu sistemin transfer matrisi ise Denklem 3.23 ile belirtilmiştir.

$$G_{LQG}(s) = K_{LQR}[sI - (A - BK_{LQR} - LC)]^{-1}L \quad (3.23)$$

Denklem 3.21-3.23 ile belirtilen LQG kontrolün şematik gösterimi Şekil 3.4 ile gösterilmiştir.

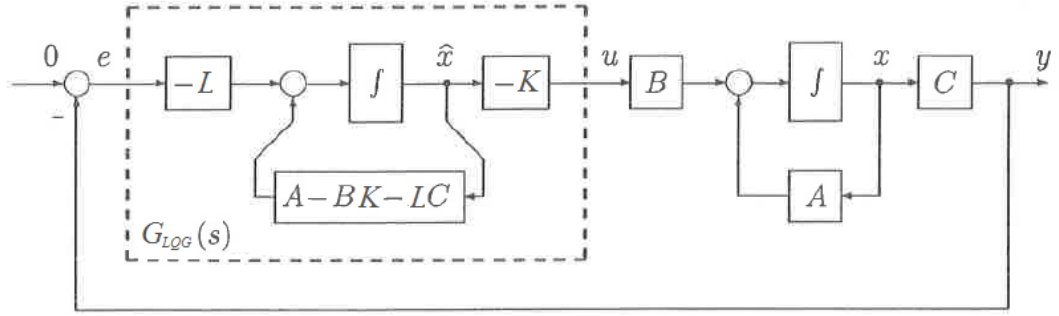
Buraya kadar anlatılan bilgiler ışığında, gözleyici kazanç matrisi  $L$ 'nin seçimi için, yapılan şey Denklem 3.20 ile belirtilen diferansiyel denklemin asimptotik kararlı olmasının sağlanmasıdır. Bunun dışında herhangi bir özel seçim veya kriterin varlığından söz edilmemiştir. Ancak, sistemin giriş ve çıkış gürültüsü ile ilgili bazı bilgiler mevcut ise, "Kalman-Bucy" adı verilen özel bir tasarım tekniği,  $L$  kazanç matrisinin seçimi için, kullanılabilir. Kalman-Bucy filtresi belirtilen gürültü sinyallerinin sistem üzerindeki negatif etkilerini minimum seviyeye indirir [30]. Kalman-Bucy filtresi teorisinin ana sonucu ise  $L$  gözleyici kazanç matrisinin, sistem parametreleri kullanılarak oluşturulan Ricatti denkleminin sonucundan elde edilebilir olmasıdır.

### 3.2.2 LQR Kontrol Yapısının Frekans Uzayı ve Asimptotik Özellikleri

#### 3.2.2.1 Kalman Eşitliği

Öncelikle, Denklem 3.12 ile ifade edilen doğrusal-zamanla değişmez sistemi ele alalım. Kısım 3.2.1' de ifade edilen LQR kontrol yapısı, uygun durumlar altında, asimptotik bir şekilde kararlı olduğu gösterilmiştir. Bu duruma ek olarak, LQR kontrol yapısı frekans uzayında da istenilen birçok özelliğe de sahiptir [31]. Bu durumun nasıl oluştuğunu anlayabilmek için Denklem 3.17 ile belirtilen açık çevrim negatif geri-besleme transfer matrisi  $L(s)$ 'i ve Denklem 3.24 ile gösterilen sistem açık çevrim transfer matrislerini düşünmeliyiz.

$$G_{OL} = C(sI - A)^{-1}B \quad (3.24)$$



Şekil 3.4. LQG kontrol sisteminin şematik gösterimi

Yukarıda belirtilen bu transfer fonksiyonları *Kalman Eşitliği* ile yakından alakalıdır.

***Kalman Eşitliği:*** Kalman eşitliği içerisinde birçok önemli özelliği barındırmaktadır. Denklem 3.13 ve 3.14 LQR kriterleri altında, *Kalman Eşitliği*, Denklem 3.25 elde edilmektedir.

$$(I + L(-s)^T)R(I + L(s)) = R + D^T D + G_{OL}(-s)^T G_{OL}(s) \quad (3.25)$$

Denklem 3.25 ile belirtilen *Kalman Eşitliği*'nin önemli özelliklerinden biri de *Kalman Eşitsizliği*'dir. *Kalman Eşitsizliği*,  $s = jw$  dönüşümü ve Denklem 3.26 ile belirtilen kriterler yapılarak elde edilebilir.

$$L(-jw)^T = L(jw), G_{OL}(-jw)^T = G_{OL}(s), D^T D + G_{OL}(jw)G_{OL}(jw) \geq 0 \quad (3.26)$$

***Kalman Eşitsizliği:*** Denklem 3.13 ve 3.14 ile belirtilen LQR kriteri için Denklem 3.27 ile belirtilen *Kalman Eşitsizliği* geçerli olmaktadır.

$$(I + L(jw))R(I + L(jw)) \geq R, \quad \forall w \in \mathbb{R} \text{ için} \quad (3.27)$$

### 3.2.2.2 LQR Kontrol Sisteminin Frekans Uzayı Özellikleri

Kısım 3.2.2.2'de incelenen sistem Tek-Giriş durumu için geçerlidir. Tez çalışması kapsamında incelenen sistemin de Tek-Giriş, Tek-Çıkış olduğu unutulmamalıdır. Bu

varsayım altında  $L(s)$  skaler bir transfer fonksiyonu haline gelmiştir. Bu durumda, Denklem 3.27 ile belirtilen Kalman Eşitsizliği'nin iki tarafı, skaler  $R$  ile bölünürse;

$$|1 + L(jw)| \geq 1, \quad \forall w \in \mathbb{R} \quad \text{için} \quad (3.28)$$

Elde edilir. Denklem 3.28,  $L(jw)$ 'nin Nyquist grafiğinin, -1 merkezi etrafına çizilen ve yarıçapı bir olan çemberin içine girmeyeceğini kanıtlamaktadır. Bu durum Şekil 3.3 ile gösterilmiştir. Ayrıca LQR kontrol sistemi aşağıda detayı belirtilmiş birçok önemli özelliğe sahiptir.

**Pozitif Kazanç Payı:** Eğer işlemin kazancı bir sabit,  $k > 1$ , ile çarpılırsa, Şekil 3.3 ile gösterilen Nyquist grafiği açısal olarak genişler ve bu sayede -1 etrafında ki çevreleme sayısı değişmez. Bu durum sistemin pozitif kazanç payının,  $[0,5, \infty)$  arasında olmasına yol açar.

**Negatif Kazanç Payı:** Eğer işlemin kazancı bir sabit,  $0,5 < k < 1$  ile çarpılırsa, Şekil 3.3 ile gösterilen Nyquist grafiği daralır. Ancak bu durumda dahi -1 etrafında ki çevreleme sayısı değişmez. Bu durum sistemin pozitif kazanç payının,  $-6dB$  olmasına yol açar.

**Faz Payı:** Eğer işlemin fazı  $\theta \in [-60^\circ, 60^\circ]$  aralığında arttırılırsa Şekil 3.3 ile gösterilen Nyquist grafiği  $\theta$  ile açısal olarak döner. Ancak bu durumda dahi -1 etrafında ki çevreleme sayısı değişmez. Bu durum sistemin faz payının,  $\pm 60^\circ$  olmasına yol açar.

**Hassaslık ve Tamamlayıcı Hassaslık Fonksiyonları:** Sistemin dinamiğini ve davranışını çok büyük ölçüde etkilen hassaslık fonksiyonu Denklem 3.29 ile tamamlayıcı hassaslık fonksiyonu ise Denklem 3.30 ile belirtilmiştir.

$$\hat{S}(s) = \frac{1}{1+L(s)} \quad (3.29)$$

$$\hat{T}(s) = \frac{L(s)}{1+L(s)} = 1 - \hat{S}(s) \quad (3.30)$$

Denklem 3.27 ile belirtilen Kalman Eşitsizliği ise Denklem 3.31 ile belirtilen kriterlerin doğruluğunu ve geçerliliğini garanti eder.

$$|\hat{S}(jw)| \leq 1, \quad |\hat{T}(jw)| \leq 1, \quad |\hat{T}(jw)| \leq 2 \quad \forall w \in \mathbb{R} \text{ için} \quad (3.31)$$

Bu durumda, aşağıda belirtilen maddeler, kontrol sisteminin tasarımı ve performansı için çok önemli ve geçerli hale gelmektedirler.

- i) Düşük seçilen hassaslık fonksiyonu  $\hat{S}(s)$ , iyi bir bozucu etki giderimi sağlamaktadır. Bu durum, özellikle düşük frekanslarda çok önemlidir.
- ii) Bir'e yakın seçilen tamamlayıcı hassaslık fonksiyonu  $\hat{T}(s)$ , iyi bir referans takibi sağlamaktadır. Bu durum, özellikle düşük frekanslarda çok önemlidir.
- iii) Düşük seçilen tamamlayıcı hassaslık fonksiyonu  $\hat{T}(s)$ , iyi bir gürültü giderimi sağlamaktadır. Bu durum, özellikle yüksek frekanslarda çok önemlidir.

Unutulmaması gerekir ki, yukarıda bahsedilen bütün özellikler için  $CD = 0$  varsayımı yapılmıştır. Bu varsayımın sağlanmadığı koşullar için *Kalman Eşitsizliği* geçerliliğini kaybetmektedir.  $CD \neq 0$  durumu için, LQR kontrolcüsü faz ve kazanç payları için kötü özellikler göstermektedir. Tez çalışması kapsamında incelenen sistem için  $CD = 0$  varsayımı geçerlidir.

### 3.2.2.3 LQR kullanılarak Döngü Şekillendirme

Kısım 3.2.2.3'de incelenen sistem Tek-Giriş durumu için geçerlidir. Kısım 3.2.2.2'de, *Kalman Eşitsizliği*'ni kullanarak, LQR kontrolcüsünün hassaslık ve tamamlayıcı hassaslık fonksiyonlarının büyüklükleri üzerinde otomatik olarak bazı üst limitler belirlediğini gördük. Ancak bu limitler frekanslardan bağımsızdır ve uygun döngü şekillerine yol açmayabilir. Bu kısımda LQR tekniğini kullanarak döngü şekillendirmenin yapılabilmesi için gereken birkaç kuralı inceleyeceğiz.

**Düşük Frekans Açık Çevrim Kazancı:** Denklem 3.27 ile belirtilen Kalman Eşitsizliği'nin her iki tarafı skaler bir  $R := D^T D + \frac{1}{\rho}$  ile bölünürse Denklem 3.32 elde edilmiş olur.

$$|L(jw)| \approx |1 + L(jw)| \approx \frac{\|G_{OL}(jw)\|}{\sqrt{D^T D + \frac{1}{\rho}}} \quad (3.32)$$



Denklem 3.32 gösteriyor ki, açık çevrim kazanç Bode eğrisinin “şeklini” sistem girişinden kontrol edilmiş çıktıya kadar takip eder. Kısaca, uygun bir kontrollü çıkış seçimi ile düşük frekans açık çevrim kazanç şekillendirilebilir. Bu işlem için ise,  $\frac{1}{\rho}$ , nun hareketi Bode büyüklük eğrisini yukarı ve aşağı hareket ettirmektedir.

**Yüksek Frekans Açık Çevrim Kazancı:**  $w \gg 1$  varsayımı altında ve bazı  $c$  sabitleri için yüksek frekans açık çevrim geri besleme fonksiyonu için Denklem 3.33 elde edilmektedir.

$$|L(jw)| \approx \frac{c}{w \sqrt{D^T D + \frac{1}{\rho}}} \quad (3.33)$$

Bu durumda çapraz-geçiş frekansı yaklaşık olarak Denklem 3.34 ile belirtilen hali almaktadır [31].

$$w_{cross} \approx \frac{c}{\sqrt{D^T D + \frac{1}{\rho}}} \quad (3.34)$$

### 3.2.3 LQG Kontrol Yapısının Genel Özellikleri

#### 3.2.3.1 Bölünme Teorisi

Denklem 3.22 ile belirtilen sistemin özdeğerleri, koordinat dönüşümü kullanılarak Denklem 3.35 ile gösterildiği gibi bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x \\ \hat{x} \end{bmatrix}; \quad T = \begin{bmatrix} I & 0 \\ I & -I \end{bmatrix} = T^{-1} \quad (3.35)$$

Bu yeni koordinat düzleminde, Denklem 3.22 ile belirtilen kapalı çevrim sistemin sistem matrisi Denklem 3.36 ile gösterilen yapıya dönüşür.

$$T \begin{bmatrix} A & -BK_{LQR} \\ LC & A - BK_{LQR} - LC \end{bmatrix} T^{-1} = \begin{bmatrix} A - BK_{LQR} & BK_{LQR} \\ 0 & A - LC \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Denklem 3.36 gösteriyor ki, Denklem 3.22 ile gösterilen kapalı çevrim sistem, LQR tasarımının ve gözleyici tasarımının köklerini ayrı ve blok halinde içermektedir. Bu sebeple LQG tasarım prosedürünü iki bağımsız aşama olarak düşünmek mümkündür.

- i) LQR Tasarımı: Durum vektörü  $x$ 'in, geri besleme kontrol yapısı için erişilebilir olduğu varsayımını altında yapılmalıdır.
- ii) Gözleyici Tasarımı: Tek amacın, sistemden ölçülen giriş ve çıkış kullanılarak, durumların tahmin edilmesi varsayımı altında yapılmalıdır.

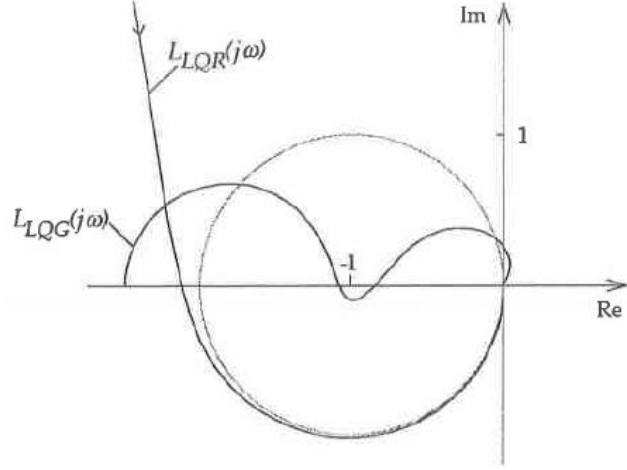
Elde edilen bu sonuca bölünme teorisi denilmektedir [32].

### 3.2.3.2 LQG Kontrol Sisteminin Gürbüzlük Payı

LQR kontrolcü doğal bir gürbüz kontrol sistemi olarak gözükmektedir. Bu gürbüzlük, LQR kontrolörün Denklem 3.18'i sağlamasından anlaşılabilir. LQG kontrol yapısının ise kararlılık özellikleri, Bölünme Teorisi tarafından garanti edilmektedir. Ancak kararlılık özelliklerinin garanti edilebilmesi için iyi bir gürbüzlük özelliğinin olması gerekmektedir. Ayrıca, LQG kontrol yapısının kararlılık paylarının aşırı düşük olduğu Şekil 3.5 ile kolayca gözükmektedir. Bu aşırı düşüklük LQG kontrolörün modelleme hatalarına karşı aşırı hassas olmasına sebep olmaktadır [33].

LQG kontrolörün sahip olduğu modelleme hatalarına karşı hassasiyeti, özellikle yüksek frekans modellemelerin kritik olduğu ve bant genişliklerinin yüksek olması gereken gimbal yapıları için oldukça kritik bir hal almaktadır.

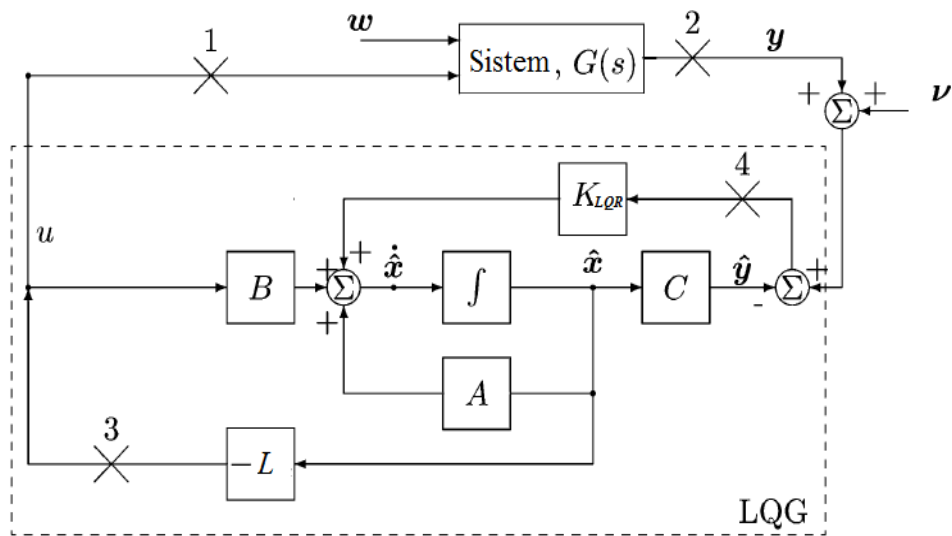
LQG kontrolörün sahip olduğu bu dezavantajların giderilmesi ve LQR ve Kalman-Bucy filtresinin sahip olduğu iyi gürbüzlük özelliklerinin LQG kontrol yapısında da gözükmesi için LQG/LTR kontrol yapısı ile bir iyileştirme çalışması yapılabilmektedir. İlerleyen kısımlarda detayı gösterilecek olan bu sistematik metot sayesinde döngü kazancı  $L(s)$  şekillendirilecek ve LQR kontrol yapısına ait birçok önemli özellik LQG kontrolöre kazandırılacaktır.



Şekil 3.5. Örnek bir sistem için LQG ve LQR kontrol sistemlerinin Nyquist Eğrileri

### 3.2.4 Döngü Transfer İyileştirmesi(LTR)

LQG kontrol yapısının sahip olduğu gürbüzlük özelliklerinin iyileştirilebilmesi için LTR tekniği önerilmiştir. LTR ise kendi içerisinde iki farklı yonteme ayrılmaktadır. Bunlardan ilki tasarlanacak olan uygun bir Kalman-Bucy fitleri yardımıyla, LQG kontrol yapısının gürbüzlük özelliklerinin LQR kontrol yapısına yakınsamasıdır. Diğeri ise tasarlanacak olan uygun bir LQR kontrol yapısı yardımıyla, LQG kontrolcüsünün gürbüzlük özelliklerinin Kalman-Bucy filtresine yakınsamasıdır. Şekil 3.6 ile şematiği gösterilen LQG kontrol yapısı ve bu şematiğin yardımı ile her iki yöntem için sistematik bir prosedür aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.6. LQG kontrol konfigurasyonu

### 3.2.4.1 Girişte Yapılan Döngü Transfer İyileştirmesi

Bu yöntem ile yapılacak iyileştirme için, Denklem 3.37 ile belirtilen döngü transfer fonksiyonun  $G_{LQG}(s)G_{OL}(s)$ , Şekil 3.6'da gösterilen nokta 1, Denklem 3.38 ile belirtilen açık çevrim transfer fonksiyonuna, Şekil 3.6'da gösterilen nokta 3, yakınsamaktadır [34]. Bu genelleştirilmiş (Tek-Giriş Tek-Çıkış ve Çok-Giriş Çok-Çıkış) metod için  $G_{OL}(s)$ 'in en az çıkış sayısı kadar girişi olmalıdır. Bu sebeple, Tek-Giriş ve Tek-Çıkış sistemlerde bu bölüm altında düşünülebilir.

$$G_{LQG}(s)G_{OL}(s) = K_{LQR}[sI - (A - BK_{LQR} - LC)]^{-1}LC(sI - A)^{-1}B \quad (3.37)$$

Denklem 3.38, girişte yapılacak döngü transfer iyileştirmesi kapsamında “Arzulanan Geri-besleme Döngüsü” (AGD) olarak da isimlendirilmektedir.

$$L_{giris}(s) = K_{LQR}(sI - A)^{-1}B \quad (3.38)$$

Takip eden kısımda detayı anlatılacak olan, girişte yapılan döngü transfer iyileştirilmesinin düzgün çalışabilmesi için sistemin minimum fazlı olması ve/veya minimum fazlı bir sisteme indirgenebilmesi gerekmektedir. Önerilen yöntem için, belirli bir hiyerarşi içinde, sistematik altı adım izlenecektir.

**Birinci Adım:** Öncelikle sistemin doğrusal ve zamanla değişmez bir modelinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu doğrusal ve zamanla değişmez model elde edildikten sonra, yapılacak incelemeler ışığında sistem modelinin çıkışına uygun PI elemanları, sistemin ihtiyacına göre ilave edilmelidir. Bu ilave işleminden sonra sistem matrisleri  $(A, B, C, D)$  güncellenmeli ve diğer adımlarda bu matrisler kullanılmalıdır.

**İkinci Adım:** Birinci adımdan sonra  $L(jw)$  ve  $D(jw)$ 'nin tekil değerleri için kriterler belirlenmelidir. Bunun için öncelikle genliği  $|L(jw)|$  olan bir çapraz-geçiş frekansı  $w_{cross}$  belirlenmelidir (Tek-Giriş, Tek-Çıkış için).

Frekansı  $0,1w_{cross}$ 'un altında olan geçirme bandı için,  $L(jw)$ 'nin tekil değerlerinin geçmeyeceği bir alt limit belirlenmelidir.

Frekansı  $10w_{cross}$ 'un üstünde olan söndürme bandı için,  $L(jw)$ 'nin tekil değerlerinin geçmeyeceği bir üst limit belirlenmelidir.

Frekansın  $0,1w_{cross} < w < 10w_{cross}$  olduğu bölge için,  $D(jw)$ 'nin tekil değerlerinin geçmeyeceği bir alt limit-genellikle -3dB- belirlenmelidir.

Ayrıca, çeşitli metotlarla elde edilen sistem modelinin sahip olduğu birçok çoklu modelleme hatası mevcuttur [35-37]. Bu çoklu modelleme hatalarının matrisinin,  $E(s)$ , sistem çıkışına yansıtılmış hali Denklem 3.39 ile gösterilmiştir.

$$G_{gercek}(s) = [I + E(s)]G_{OL}(s) \quad (3.39)$$

$E(s)$ 'in mutlak bir şekilde bulunması işlemi oldukça zor bir işlemdir. Bunun yerine, frekansın bir fonksiyonu olarak, mümkün olan en büyük modelleme hatasının büyüklüğünü, bu hataların olabileceği en kötü doğrultuda sınırlandırılmasını daha uygun ve kolay olacaktır. Bu sınırlandırma işlemi Denklem 3.40 varsayımı ile yapılmaktadır.

$$\sigma_{max}E(jw) < e_m(w) \quad (3.40)$$

Denklem 3.40 içerisinde tanımlanan sınırlandırma olan  $e_m(w)$ , modelleme işleminin bir parçası olarak tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, sistemin kararlılığı ve gürbüzlüğü için Denklem 3.41 ile belirtilen tamamlayıcı-hassaslık transfer fonksiyonunun en yüksek tekil değerinin, Denklem 3.42 ile tanımlanan bağıntıyı, bütün frekans değerleri için, doğrulaması gerekmektedir.

$$\hat{T}_{giris}(s) = \frac{L_{giris}(s)}{1+L_{giris}(s)} \quad (3.41)$$

$$\sigma_{max}\hat{T}_{giris}(jw) < 1/e_m(w) \quad (3.42)$$

**Üçüncü Adım:** LQR kontrolcü tasarımı bu aşamada yapılmalıdır. LQR kontrolcü tasarımı için Denklem 3.43 ile belirtilen Ricatti denkleminin çözülmesi gerekmektedir.

$$A^T P + PA - \frac{\rho}{\beta} PBB^T P + C^T C = 0, \quad R := D^T D + \frac{1}{\rho}, \quad Q := C^T C \quad (3.43)$$

LQR tasarımında kullanılan parametreler skaler  $\frac{1}{\rho} > 0$ , skaler  $\beta \geq 1$  ve  $C^T C$ 'dir.  $C$  matrisinin seçimi keyfi olarak yapılır. Ancak bu keyfi seçim sırasında  $[A, C]$  matrisinin sanal ekseninde herhangi gözlemlenemeyen bir kutbunun olmaması gerekmektedir.

Tasarım parametresi  $\beta$  ise gürbüzlük arttırma işlevini görmektedir. Birçok uygulamada  $\beta = 2$  olarak seçim işlemi yapılır. Bir diğer önemli tasarım parametresi ise  $\rho$ 'dur. Bant genişliği parametresi ismi de verilmektedir. Yüksek bant genişliğine ulaşmak için  $\rho$ 'nun yüksek seçilmesi gerekmektedir. Ancak bu seçim çok keyfi yapılmamalıdır.  $\rho$ 'nun yükselmesi iyi bir bant genişliği sağlarken, döngü transfer matrisinin,  $(K_{LQR}(sI - A)^{-1}B)$ , tekil değerlerinin de yüksek olmasına yol açar. Basitçe,  $\rho$ 'yu, ikinci adımda belirtilen geçirme bandı bölgesindeki alt limitleri ihmal etmeyecek kadar büyük seçmek yeterlidir.

**Dördüncü Adım:** Kalman-Bucy filtresi tasarımının yapıldığı adımdır. Bu adım ile döngü transfer fonksiyonun  $G_c(s)G_{OL}(s)$ ,  $K_{LQR}(sI - A)^{-1}B$  ile belirtilen açık çevrim transfer fonksiyonuna yakınsayacaktır ve döngü transfer iyileştirilmesi yapılmış olacaktır. Döngü transfer iyileştirmesinin yapılabilmesi için Denklem 3.44 ile belirtilen Ricatti denklemi çözülmelidir.

$$A^T \Sigma + P \Sigma - \Sigma C^T \mu^{-1} C \Sigma + BB^T = 0 \quad (3.44)$$

Denklem 3.38'in çözümü ile Denklem 3.45 ile gösterilen optimal gözleyici kazanç matrisi elde edilmiş olur.

$$L = \Sigma C^T \mu^{-1} \quad (3.45)$$

Denklem 3.38 ve 3.39 ile belirtilen LTR işleminin ana tasarım parametresi  $\mu$ 'dür. Düşük seçilen  $\mu$  değerleri ile daha düzgün bir iyileştirme işlemi yapılabilmektedir. Ayrıca düşük seçilen  $\mu$  değerleri ile döngü transfer matrisinin tekil değerleri genişler.

Basitçe,  $\mu$ 'nün seçimi ile girişte döngü transfer iyileştirmesi yapılırken, ikinci adımda belirlenen limitler de göz önünde bulundurulmalıdır.

**Beşinci Adım:** Yukarıda anlatılan üç ve dördüncü adımlar vasıtası ile elde edilen, sürekli zaman kontrolcüsü,  $G_{LTR}(s)$ , Denklem 3.46 ile gösterilmiştir.

$$G_{LTR}(s) = K_{LQR}[sI - (A - BK_{LQR} - LC)]^{-1}L \quad (3.46)$$

Ancak, kontrolcünün tasarlandığı sisteme, birinci adım ile anlatılan, ilave PI elemanlarının eklemesi yapıldı ise nihai kontrol sistemi,  $G_{LTR,final}(s)$ , Denklem 3.47 ile belirtilen yapıyı alır.

$$G_{LTR,final}(s) = G_{LTR}(s)G_{aug}(s) \quad (3.47)$$

Burada belirtilen  $G_{aug}(s)$ , sisteme eklenen bütün PI elementlerinin içinde olduğu tek bir transfer fonksiyonu ifade etmektedir.

**Altıncı Adım:** Eğer sisteme eklenen herhangi bir integral elemanı mevcut ise, bu elemanlar için tasarlanacak karşı-bitişler(anti-windup) mutlaka bulunmalıdır[38].

Yukarıda anlatılan altı sistematik işlemin sonucu olarak; eğer  $G_{OL}(s)$  sistem dinamiği minimum fazlı bir sistem ise, Denklem 3.48 ile belirtilen eşitlik doğrudur.

$$\lim_{\mu \rightarrow 0} K_{LQR}[sI - (A - BK_{LQR} - LC)]^{-1}LC(sI - A)^{-1}B \rightarrow K_{LQR}(sI - A)^{-1}B \quad (3.48)$$

Denklem 3.48'in basitleştirilmiş gösterimi ise Denklem 3.49 ile verilmiştir.

$$\lim_{\mu \rightarrow 0} G_{LQG}(s)G_{OL}(s) \rightarrow G_{LQR}(s) \quad (3.49)$$

### 3.2.4.2 Çıkışta Yapılan Döngü Transfer İyileştirmesi

Bu yöntem ile yapılacak iyileştirme için, Denklem 3.50 ile belirtilen döngü transfer fonksiyonun  $G_{OL}(s)G_{LQG}(s)$ , Şekil 3.6'da gösterilen nokta 2, Denklem 3.51

ile belirtilen açık çevrim transfer fonksiyonuna, Şekil 3.6’da gösterilen nokta 4, yakınsamaktadır [32]. Bu genelleştirilmiş (Tek-Giriş Tek-Çıkış ve Çok-Giriş Çok-Çıkış) metot için  $G_{OL}(s)$ ’in en fazla çıkış sayısı kadar girişi olmalıdır. Bu sebeple, Tek-Giriş ve Tek-Çıkış sistemlerde bu bölüm altında da düşünülebilir.

$$G_{OL}(s)G_{LQG}(s) = C(sI - A)^{-1}BK_{LQR}[sI - (A - BK_{LQR} - LC)]^{-1}L \quad (3.50)$$

Denklem 3.38, girişte yapılacak döngü transfer iyileştirmesi kapsamında “Arzulanan Geri-besleme Döngüsü” (AGD) olarak da isimlendirilmektedir.

$$L_{cikis}(s) = C(sI - A)^{-1}L \quad (3.51)$$

Çıkışta yapılan döngü transfer iyileştirilmesinin düzgün çalışabilmesi için sistemin minimum fazlı olması ve/veya minimum fazlı bir sisteme indirgenebilmesi gerekmektedir. Önerilen yöntem için girişte yapılan döngü transfer iyileştirmesi ile benzer bir şekilde, sistematik altı adım izlenecektir. Ancak bu tez çalışması kapsamında, girişte yapılan döngü transfer iyileştirmesi kullanıldığı ve metodolojinin çok benzer olması sebebiyle bu altı adımın detayları açıklanmayacaktır.

### 3.3 Güçlendirilmiş LQG/LTR Kontrol Sistemi Tasarımının Özeti

Bu bölümde, Bölüm 3’de anlatılan kontrol sistemi tasarımının izleyen kısımda sistematik bir özet yapılacaktır. Yapılan bu özet, Bölüm 4’te anlatılan ve tasarlanan kontrolcüsünün gerçek bir uygulamasını içeren uygulama için bir taslak niteliği taşımaktadır.

1. Kontrol edilmeye çalışılan sistem modeline etkiyen bozucu-etkilerin tamamı, sistemin girişinden etkidiği ve/veya sistemin girişinden etkiyen eşlenik bir bozucu etki olarak modellenenmektedir. Bu sayede, tasarlanacak olan bir bozucu-etki gözleyicisi tasarımı yapılmalıdır. Bu gözleyici tasarlanırken, sisteme etkiyen bozucu-etkilerin, eğer ilgilenilen frekans bölgesi içerisindeyse, tamamının belirli ve limitli bir gecikme ile tahmin edebilecek özelliklerde olmasına dikkat edilmelidir. Tasarlanan bu gözleyici, sisteme fazladan gürbüzlük etkisi katmaktadır. Özellikle modelleme hatalarından



kaynaklanan sistem modeli değişimi, sistemde var olan ve kontrolör tasarlanırken ihmal edilen, limitli doğrusal olmayan etkiler ve sistemin sahip olduğu bir takım belirsizliklerin giderimi için kullanılmaktadır. Ayrıca, sistemin performans karakteristiğini de, özellikle gaussian olmayan bozucu etkiler için, istenilen seviyelerde iyileştirmektedir.

2. Bir önceki maddenin geręekleřtirilmesinden sonra ise, sistemin performans özelliklerini istenilen seviyeye çekecek ve gürbüzlük özelliklerinin iyi olduğu bir LQR kontrol yapısı tasarlanmalıdır. Bu kontrol yapısının doğası sayesinde, sistem hem performans özellikleri bakımından tatminkar olmalı hem de gürbüzlük özellikleri bakımından sistemi isterlerini tatmin etmelidir. Ancak unutulmamalıdır ki LQR kontrol sistemi, geręek hayatta uygulamaları çok sınırlı olan bir yapıdır. Bunun sebebi kontrol sisteminin kullandığı durum bilgilerinin doğrudan bir şekilde çıkıştan elde edilemeyeşidir.
3. Tasarlanan LQR yapısının geręek sistemde kullanılabilmesi için, yapının ihtiyacı olan bilgilerin ölçülmesi gerekmektedir. Bu sebepten ötürü sisteme Kalman-Bucy filtresi ile durum bilgilerinin verilmesi istenmektedir. Ancak LQG kontrol sistemi olarak isimlendirilen bu yapı, LQR tasarımının kazandırdığı gürbüzlük, faz ve kazanç paylarının iyiliği gibi özellikleri kötüleştirmektedir. Bu sebepten ötürü, bu LQG yapısına girişte döngü transfer iyileştirmesi algoritması uygulanmalıdır. Bu sayede sistemin ihtiyacı olan durum bilgileri, kontrol sistemine sağlanırken diğer yandan LQG kontrol sisteminin getirdiği kötü özellikler düzeltilmiş olmaktadır.

#### 4. GİMBAL SİSTEMİ İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ LQG/LTR KONTROL SİSTEMİ TASARIMI ve DENEYSEL SONUÇLAR

Bölüm 3 ile anlatılan kontrol sisteminin tasarlandığı gerçek sistem Şekil 4.1 ile gösterilmiştir. ASELPOD sistemi için tasarlanan kontrolcülerin deneme ve doğrulama çalışmaları iki aşamada toplanmaktadır. Bunlardan ilki, tasarım aşaması sırasında sıklıkla kullanılan ve uçuştan önce sistem kararlılığı ve performansının test edildiği altı eksenli Stewart Platformudur. Bu platform hazır olarak MOOG firmasından temin edilmiştir. İkincisi ise gerçek uçuş testleridir. ASELPOD hassas hedefleme ve işaretleme sistemi savaş uçaklarına takılmakta ve aktif kullanılmaktadır.

Bu bölümde öncelikle iç eksenlerin tasarımını etkileyen performans kriteri ile ilgili kısa bir açıklama yapılmıştır. Bu açıklamanın ardından, ASELPOD sisteminin iç eksenleri için tasarlanan geliştirilmiş LQG/LTR yaklaşımı iç yükseliş eksenini için detaylandırılmıştır. İç azimut eksenini için benzer olan kontrol sistemi tasarımı ise detaylı olarak verilmemiştir. İç azimut eksenini için tasarlanan kontrol yapısının, iç yükseliş ekseninden farklı olduğu rezonatif modlar için ise ek bir Notch filtresi tasarımı ayrı bir kısım olarak ele alınmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan ve sunulan basitleştirilmiş veriler gerçek sistemde kullanılmış ve gerçek sistemden elde edilmiştir.



Şekil 4.1. ASELPOD ve üzerine takıldığı 6 eksen Stewart Platformu

#### 4.1 Temel Performans Kriterleri

Bölüm 1 ile anlatılan genel gimbal hedefleme-takip sistemlerinin en önemli çıktılarından birisi görüntü, diğer çıktısı ise atılan lazerdir. Bu tez çalışmasında kullanılan sistemin en önemli çıktıları, sistemden elde edilen kamera görüntüleri ve sistem tarafından çeşitli amaçlar için atılan lazerdir. Her iki çıktının sağlıklı bir şekilde sonuçlanması için, sistemin eksen başına sahip olduğu dönü-ölçer geri-beslemesinin integrali olan açısal pozisyonun belirli bir limit içerisinde kalması gerekmektedir. Tez çalışmasında kullanılan ASELPOD gelişmiş hedefleme-takip sistemi, sahip olduğu sensörlerin özellikleri nedeni ile çok düşük bir açısal pozisyon limitine sahiptir. Sistemin açısal pozisyonundaki  $28 \mu rad$ 'lık açısal değişimler, sistemden elde edilen görüntü üzerinde bir piksellik oynamalara neden olmaktadır. Görüntüdeki bu oynama, elde edilen görüntünün anlamlı bir yorumlama yapmak için kullanılmasını oldukça güçleştirmektedir.

ASELPOD hedefleme-takip sistemi için gimbal yapılarının maksimum izin verilen açısal oynamaları  $60 \mu rad$  ile sınırlandırılmaktadır. Sisteme gelen bozucu etkilerden bağımsız olarak belirlenen bu stabilizasyon hassasiyeti, bütün frekans aralığı için geçerlidir.

#### 4.2 İç Yükseliş İçin Tasarlanan Bozucu-Etki Gözleyicisi

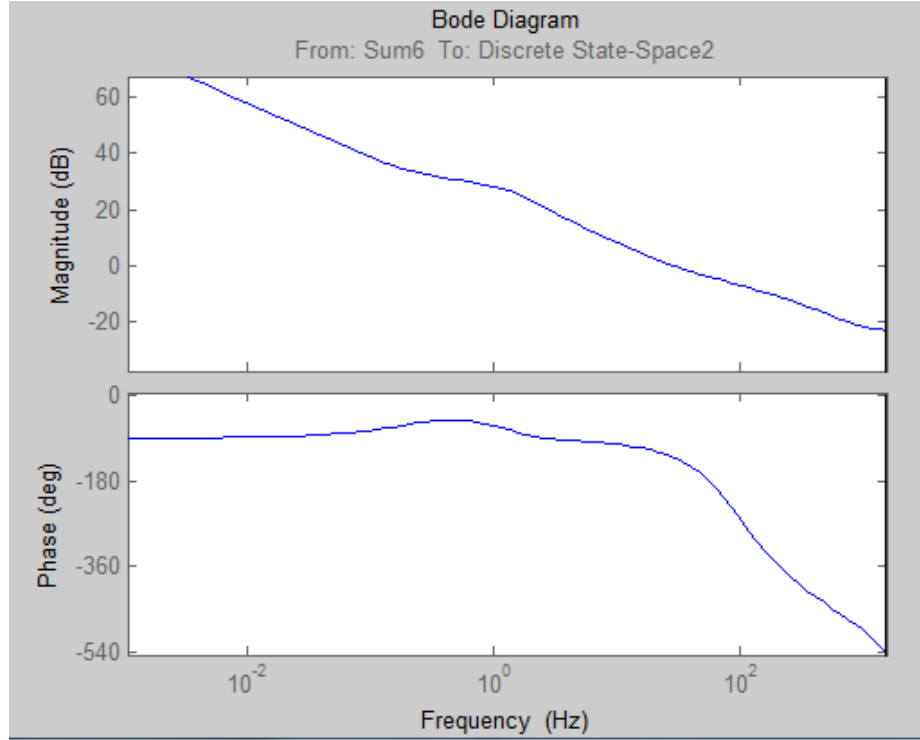
İç yükseliş eksenini için tasarlanan bozucu-etki gözleyicisinin tasarım prosedürü üç adımda tamamlanmıştır. Tasarlanan bozucu-etki gözleyicisinin en önemli tasarım kriteri, gelen bozucu etkileri tahmin etmesi ve bu tahminleri mümkün olduğunca hızlı gerçekleştirmesidir.

**Birinci Adım:** Sistem modelinin elde edilmesi ve bu modelin değerlendirilmesinden oluşmaktadır. İç yükseliş eksenini için elde edilen sistem modeli Çizelge 2.1 ile gösterilmiştir. Çizelge 2.1' den anlaşılacağı üzere sistem minimum olmayan fazlı bir sistemdir. Ancak Bölüm 3.1' de anlatıldığı üzere minimum olmayan fazlı sistem, kullanılan gözleyici yapısını etkilememektedir.

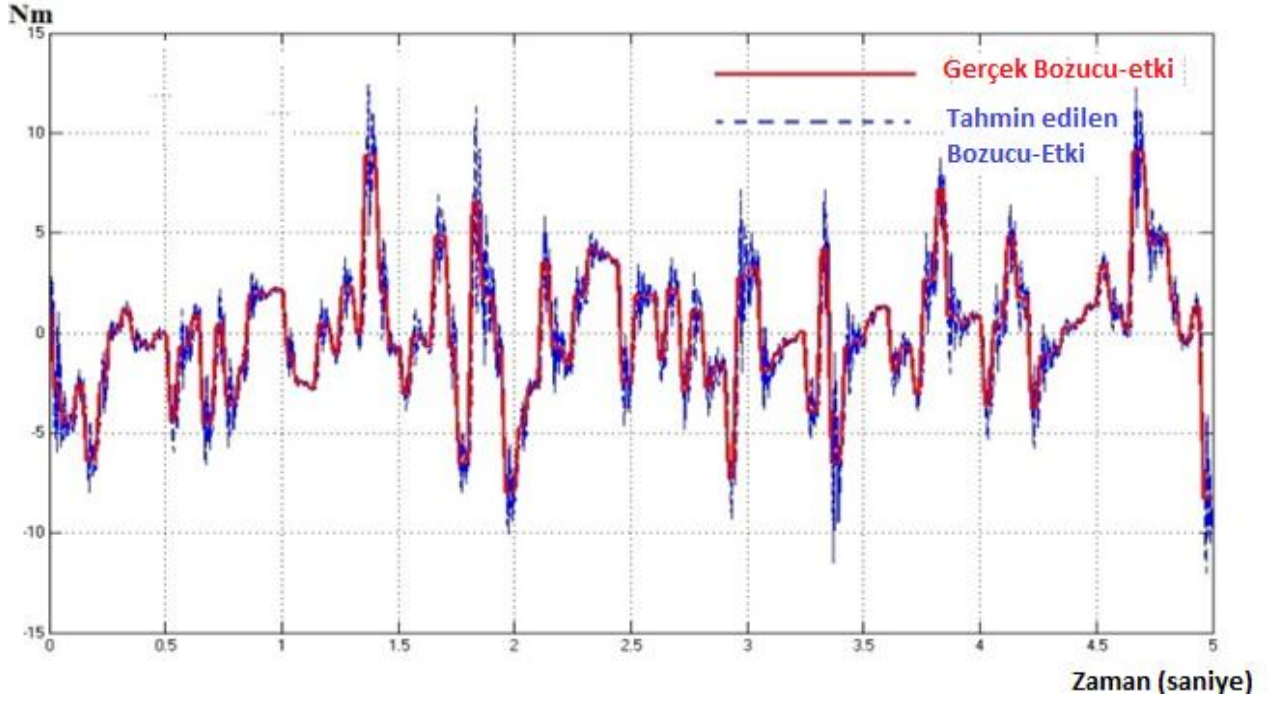
**İkinci Adım:** İç yükseliş eksenini global asimptotik kararlı yapacak bir  $G_{Kontrolcü}$ 'nün tasarlandığı aşamadır. Bu aşama için Kısım 3.1.2 ile anlatılan matematiksel arkaplan kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolcü için sistemin açık çevrim,  $G_{Kontrolcü}(s)G_{OL}(s)$ , Bode grafiği Şekil 4.22 ile gösterilmektedir.

**Üçüncü Adım:** Kısım 3.1.2 ve Şekil 3.1 ile gösterilen bozucu etki-gözleyici yapısının kurulması ve uygulanması adımıdır. Verilen örnek bir profil altında gözleyicinin cevabı ile gösterilmektedir.

Sonuç olarak, önerilen gözleyici yapısı sisteme dışarıdan etkiyen ve eşdeğer giriş bozucu etkisi olarak modellenen bütün bozucu etkileri tahmin etmektedir. Ayrıca bu tahmin işlemini yaklaşık 20 ms'lik bir gecikme ile gerçekleştirmektedir. Unutulmamalıdır ki, bozucu-etki gözleyicisi yalnız sisteme dışarıdan etkiyen fiziki bozucu etkileri gözlemlemekle kalmamakta, bunlara ek olarak sistemde mevcut olan doğrusal olmayan etkiler ve çok düşük seviyelerde olan eksenler arası etkileşimi de eşdeğer bir giriş bozucu-etkisi olarak gözlemlemektedir. Bu sebepten ötürü, tasarlanan bu gözleyici yapı aslında sistemin doğrusal modelinden farklılaşan etkilerin giderilmesinde büyük bir etki göstermektedir [22].



Şekil 4.2. Bozucu-etki gözleyicisi için açık çevrim Bode Grafiği



Şekil 4.3. Bozucu-etki gözleyicisinin gelen bozucu etkiyi tahmini

### 4.3 İç Yükseliş İçin Tasarlanan LQR Kontrolör Yapısı

Sistemde istenilen performans kriterlerinin sağlandığı bir LQR kontrol yapısının tasarımını yapabilmek için öncelikle sistemin ve sistem modelinin nasıl elde edildiğinin incelenmesi gerekmektedir.

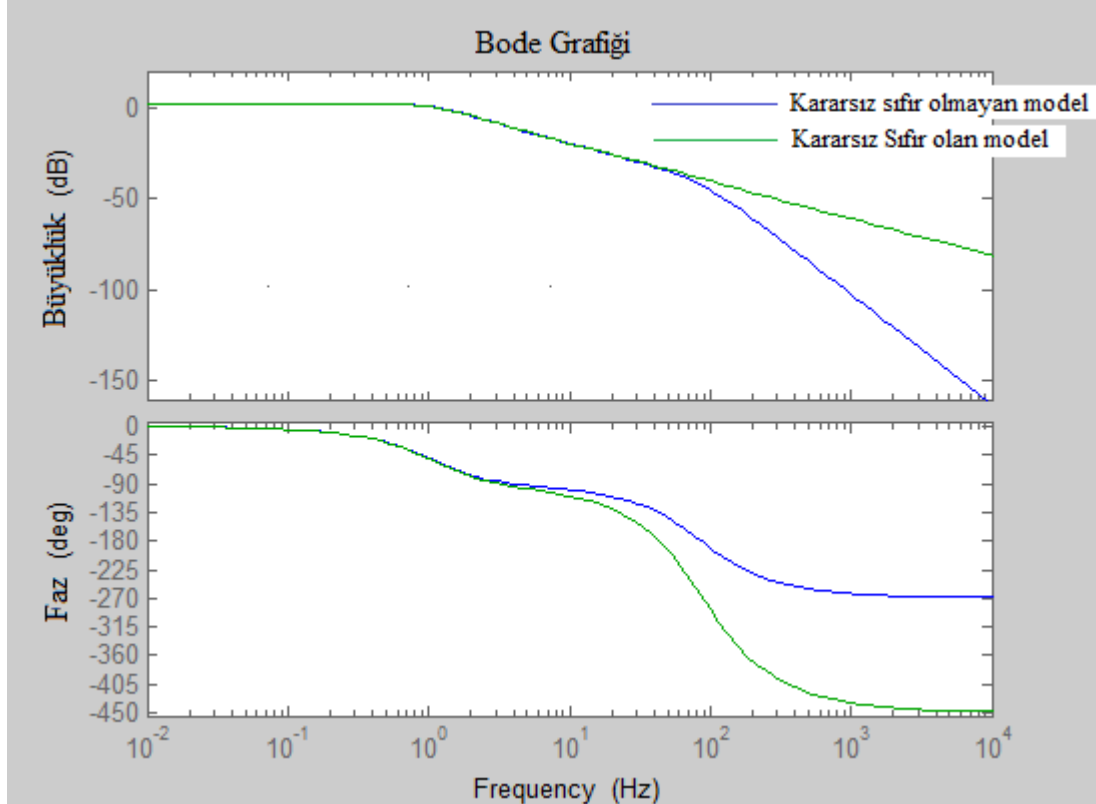
İlk olarak, sisteme etkileyen dış bozucu-etkiler gaussian değildir. Ayrıca sistemin hava platformuna takılı olması nedeniyle, uçağın yaptığı ve önceden kestirilemeyen manevralar, gimbal sistemi için modellenemeyen ve *G-kuvveti* etkileri ile oluşan bozucu etkilere maruz kalmaktadır. Bu sebeplerden ötürü, bozucu etkiler için ortaya bir model atmak ve bu model tabanlı bir bozucu etkileri tahmin etmek oldukça güç bir metottür. Yukarıda anlatılanlarda yola çıkılarak, Kısım 3.1 ve Kısım 4.2 ile detaylarının açıklandığı bir bozucu-etki gözleyicisi, sistemin Kısım 4.1 ile belirtilen zorlu tasarım kriterlerinin yerine getirilebilmesi için zorunlu olmuştur.

Kısım 3.1.1 ile yapılan varsayımlar dikkate alındığında, kontrol tasarımı için Denklem 3.2 ile belirtilen doğrusal-zamanla değişmez durum-uzay yapıları yeterli olmaktadır. Bu modelin katsayıları için ise Bölüm 2 ile elde edilen ve Çizelge 2.1 ile

gösterilen kutup ve sıfırlar kullanılmıştır. Elde edilen model Denklem 4.1 ile gösterilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1e7 & -3e6 & -3e5 & -8e2 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 5 \\ -9e3 \\ 8e6 \\ -4e9 \end{bmatrix}; C = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (4.1)$$

Ancak, Çizelge 2.1 ile gösterilen sistemin kutup ve sıfırları, dengeli olmayan sıfırlar içermektedir ve bu durum Kısım 3.2.4 ile belirtilen LQG/LTR yaklaşımı için uygun değildir. Bu sebepten ötürü, sistemin sahip olduğu bu kararsız sıfırlar, sistemin toplam kazancında bir değişikliğe neden olmadan, sistemden çıkartılmalıdır. Ek olarak belirtmek gerekir ki, bu çıkartma işleminin yapılması sistemin genel frekans uzayı bölgesinde ki özellikleri ihmal edilebilir bir ölçüde etkilemektedir. Bu durum Şekil 4.44 ile gösterilen Bode grafikleri üzerinden anlaşılabilir. Sistemden kararsız olan sıfırların atılması ile Denklem 4.1, Denklem 4.2 ile gösterilen doğrusal ve zamanla değişmeyen sistem modeli haline gelmektedir.



Şekil 4.4. Sistem tanılamadan elde edilen sistem modeli ve güncellenmiş sistem modellerinin Bode Grafikleri

$$A = \begin{bmatrix} -8e2 & -3e5 & -3e6 & -1e7 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; C = [0 \quad 0 \quad 1e6 \quad 2e7] \quad (4.2)$$

Denklem 4.2 ile katsayıları gösterilen sistem modeli, sisteme dışarıdan etkiyen bozucu-etkilerin,  $T_{ed}$ , tahmin edilmesi ile Denklem 4.3 ile gösterilen yapıyı almaktadır. Bu sayede kontrol sistemin ürettiği bilinen bir giriş ile sisteme etkiyen girişte etkiyen eşdeğer bozucu etkilerin toplamı,  $u^*(t)$ , bilinir bir yapıya gelmektedir. Çalışmanın devamında Denklem 4.3 ile belirtilen notasyon kullanılacaktır.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu^*; & u^* &= u + T_{ed} \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4.3)$$

Son olarak, Bölüm 2 ile yapılan sistem tanılama sonucu elde edilen model siyah kutu yöntemi ile elde edilmiştir. Bu siyah kutu için sistem modelinin çıkışı dönü-ölçer çıktısı olan açılal hız değeridir. Bu sebepten ötürü sistemin bir tane gerçek durumu, üç adet ise sahte durumu bulunmaktadır.

Yukarıda belirtilen bilgiler ışığında LQR kontrolcü tasarımı gerçekleştirilebilir olmuştur. Unutulmaması gerekir ki, sistem için tasarlanan geliştirilmiş LQG/LTR kontrol yapısı, ilk tasarlanan LQR kontrol yapısına indirgenmektedir. Özet olarak, nihai durumda elde edilecek kontrol sisteminin özellikleri, bu kısımda elde edilen LQR kontrol yapısının genel özelliklerini mümkün olduğu kadar sağlayacak şekilde getirilmektedir.

Yukarıda bahsedilen siyah kutu sistem tanılamasının yüzünden, minimize etmek üzere ilgilenilen ve Denklem 3.13 ile belirtilen maliyet fonksiyonunun kullanılması yerine Denklem 4.4 ile belirtilen maliyet fonksiyonunun kullanılması uygun olmaktadır.

$$J = \int_0^{\infty} (y^T Q^* y + u^T R^* u) dt \quad (4.4)$$

Ancak, tasarlanmak istenen LQR kontrol sisteminin kararlılık derecesinin artırılması için Denklem 4.4 ile belirtilen maliyet fonksiyonu Denklem 4.5 ile gösterilen maliyet fonksiyonu haline getirilmedi [39].

$$J = \int_0^{\infty} e^{2\alpha t} (y^T Q^* y + u^T R^* u) dt \quad (4.5)$$

Belirtilen kararlılık derecesi artırımı için  $[A+\alpha I, B]$  çiftinin tamamen stabilize edilebilir olması ve  $[A+\alpha I, C]$  çiftinin tamamen tespit edilebilir olması gerekmektedir [39]. Sisteme eklenen ve kararlılık derecesinin artırımını sağlayan,  $e^{2\alpha t}$ , parametresinin sistem modeline olan etkisi ve nihai durum sistem modeli Denklem 4.6 ile gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A^*x + Bu^*; & u^* &= u + T_{ed}; & A^* &= A + \alpha I \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4.6)$$

Burada,  $\alpha > 0$  ve skaler olarak seçilmelidir. Sistemin kararlılık derecesini istenilen oranda arttırmak için  $\alpha$ 'nın belirli bir oranda artırılması gerek ve yeterdir [26].

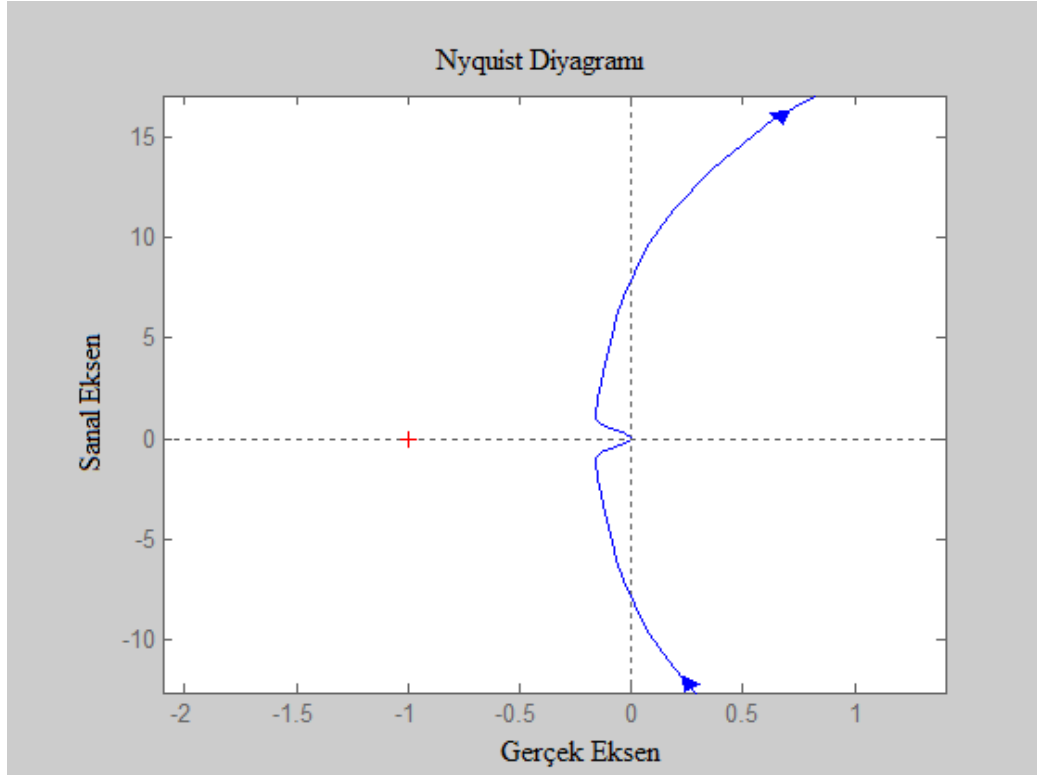
Bu tez çalışması kapsamında  $\alpha = 2$  olarak belirlenmiştir. Denklem 3.13 ile belirtilen klasik maliyet fonksiyonunun çözümü Denklem 3.16 ile belirtilmiştir. Denklem 4.5 ile belirtilen maliyet fonksiyonunun çözümünü Denklem 3.16 ile belirtilen Ricatti denklemi ile çözebilmek için Denklem 4.7 ile gösterilen ağırlık matrisleri dönüşümü yapılmalıdır.

$$\begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^T & 0 \\ D^T & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q^* & 0 \\ 0 & R^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & D \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

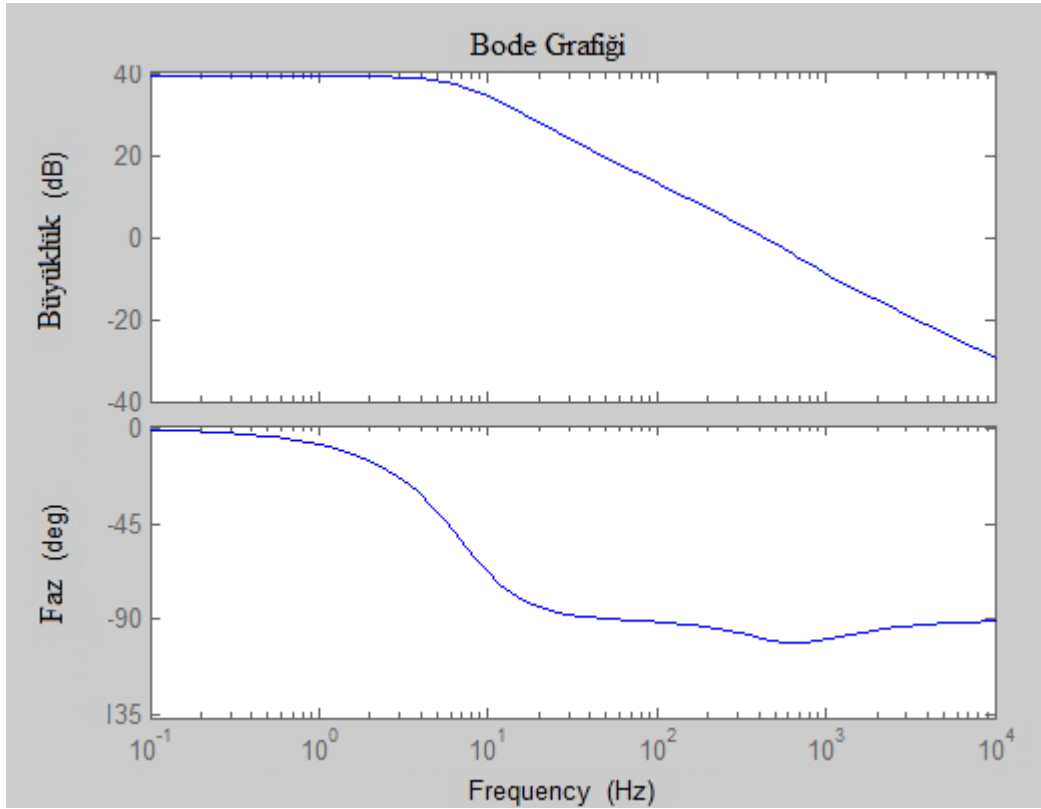
Denklem 4.7 ile dönüşümü verilen ağırlık matrislerinin seçimi için  $\frac{Q^*}{R^*} = 2e4$  oranı belirlenmiştir. Bunun sebebi Denklem 3.16 ile belirtilen Ricatti denkleminin çözümü için etkin olan parametre  $\frac{Q^*}{R^*}$  ile belirtilen parametredir [26].

Denklem 4.1 ile 4.7 arasında belirtilen formüllerin uygulanması sonucunda arzu edilen LQR kontrol kazançlarına ulaşılmıştır. Bu kontrol kazançları sistemin açık çevrim transfer fonksiyonunun,  $L_{giris}(s) = K_{LQR}(sI - A)^{-1}B$ , Nyquist diyagramı Şekil 4.5 ile Bode Grafiği ise Şekil 4.6 ile gösterilmektedir.





Şekil 4.5. LQR kontrol sistemi açık çevrim Nyquist Diyagramı

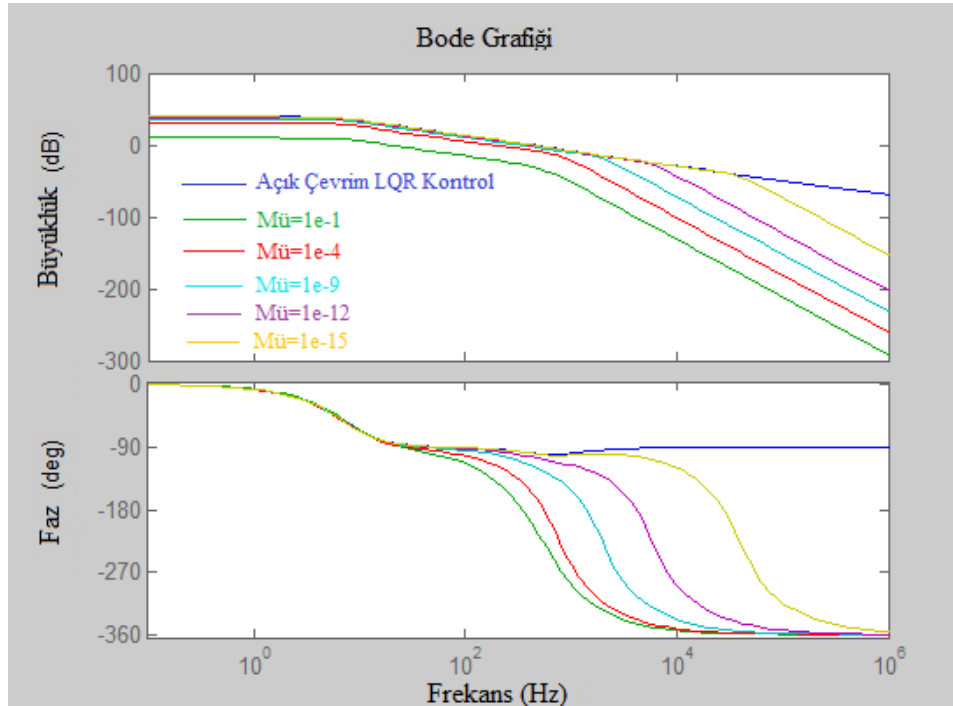


Şekil 4.6. LQR kontrol sistemi açık çevrim Bode Grafiği

Şekil 4.5 ve 4.6'den anlaşılacağı üzere, tasarlanan LQR kontrol sistemi, Kısım 3.2.1, Kısım 3.2.2 ve Kısım 3.2.4.1 içerisinde belirtilen tasarım kriterlerinin hepsini karşılamaktadır. Bu aşamadan sonra gereken en önemli şey, özellikleri tatminkar olan bu LQR kontrolörün özellikle gürbüzlük ve faz-kazanç payları özelliklerinin kaybolmadığı bir LQG/LTR kontrol sisteminin tasarlanmasıdır.

#### 4.4 Girişte Yapılan Döngü İyileştirilmesi ile ASELPOD Sistemi için LQG/LTR Kontrolör Tasarımı

Bu bölüm kapsamında yapılan çalışmanın amacı Denklem 3.48 ve 3.49 ile belirtilen, LQG kontrolcünün açık çevrim özelliklerinin, Kısım 4.3 içerisinde belirtilen,  $L_{giris}(s) = K_{LQR}(sI - A)^{-1}B$ , açık çevrim LQR kontrolcüsünün özelliklerine yakınsamasıdır. Bu işlem için, tasarım parametresi  $\mu$ 'nün sıfıra yakınsaması gerekmektedir. Yapılan kontrol sistemi tasarım çalışması Kısım 4.3 içerisinde anlatılan altı maddenin gerçekleşmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Tez çalışması kapsamında, girişte yapılan döngü transfer iyileştirmesi için, tasarım parametresi  $\mu = 1e - 15$  olarak belirlenmiştir.

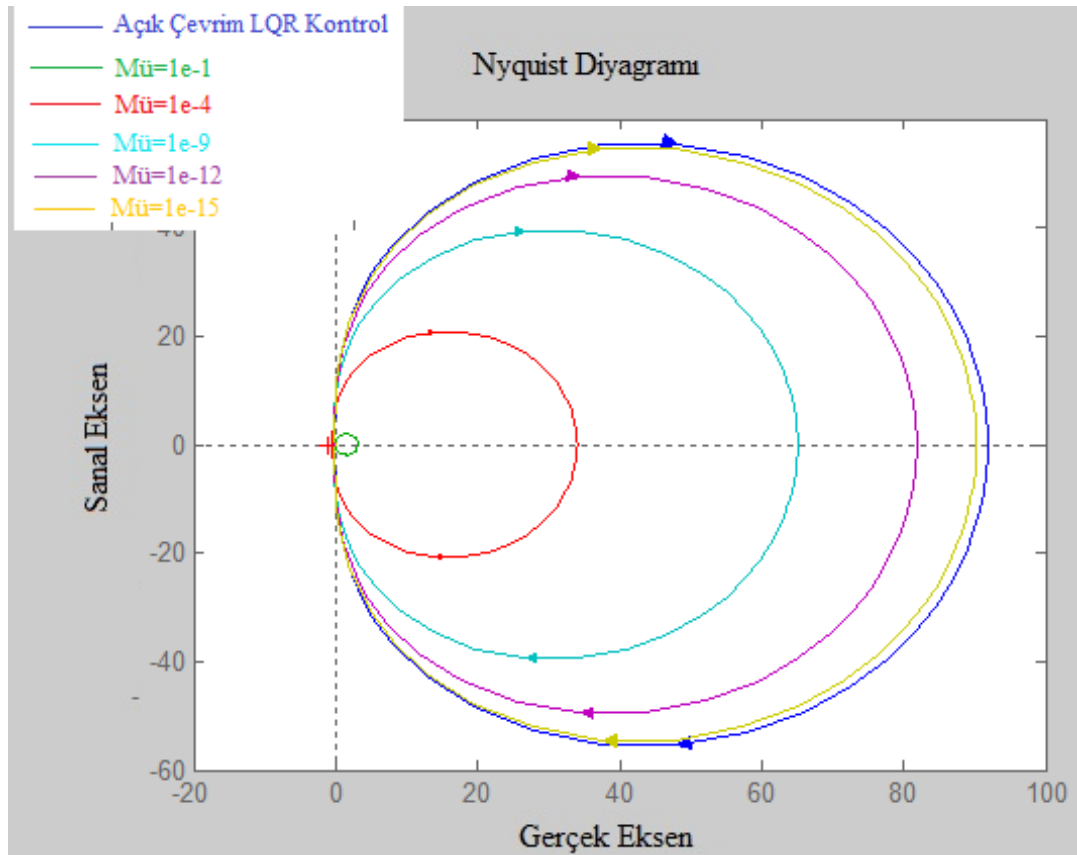


Şekil 4.7. Girişte yapılan döngü transfer iyileştirmelerinin Bode Grafiği

Ancak,  $\mu$ 'nün diğere parametreleri için dögü transfer iyileştirmesinin tamamı Şekil 4.7 ile gösterilmiştir. Ek olarak, yapılan iyileştirmenin ardından açık çevrim sistemin Nyquist diyagramı, çeşitli  $\mu$  değerleri için Şekil 4.8 ile verilmiştir.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.88'dan anlaşılacağı üzere, dögü transfer iyileştirmesinden sonra, klasik LQG yapısının getirdiği dezavantajlar ortadan kaldırılmış ve kontrol sistemine, LQR kontrolcünün doğal olarak sahip olduğu gürbüzlük ve diğer avantajlı özellikler kazandırılmıştır. Bu işlemlerin sonucunda sisteminin açık çevrim kazanç payı 38 dB olurken, faz payı 69 derece olmaktadır.

Yapılan dögü transfer iyileşmesinin ardından, ASELPOD hassas hedefleme ve işaretleme sisteminin i yükseliş ekseni için tasarlanan kontrol sisteminin nihai hali için Şematik gösterim Şekil 4.9 ile verilmiştir.

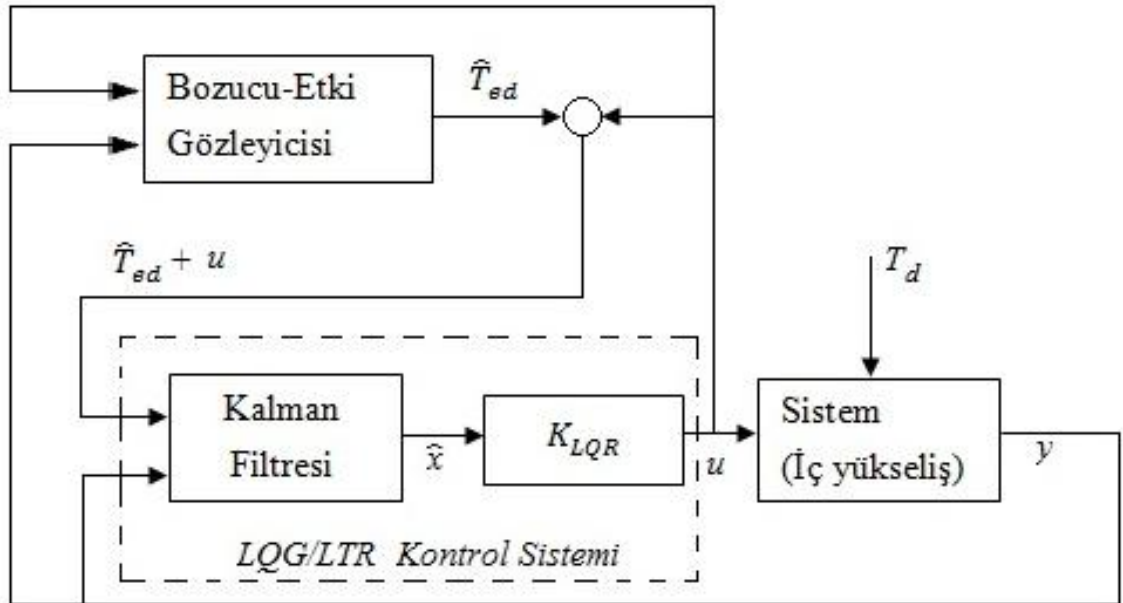


Şekil 4.8. Girişte yapılan dögü transfer iyileştirmelerinin Nyquist Diyagramı

#### 4.5 İç Azimut Eksenini için Tasarlanan Kontrol Yapısının Farklılıkları

İç azimut için önerilen kontrol sistemi, yapı olarak Kısım 4.2, Kısım 4.3 ve Kısım 4.4 ile anlatılan sistematığe benzer olarak tasarlanmıştır. Bu anlatılanlara ek olarak, Şekil 2.10 ile gözüktüğü üzere, iç Azimut eksenini yapısal olarak rezonans modlarına sahiptir. Bu sebepten ötürü, belirtilen eksenini için yapılan kontrol sistemi tasarımı temel bir farklılığa sahiptir. Sistemde var olan rezonans modlarının, sistem cevabı, performansı ve kararlılığına etkisinin olmaması için, kontrol girişinin sonuna fazlada Notch filtrelerin eklenmesi gerekmektedir. Bu eklenecek filtreler sistemin karakteristiğine uygun olarak tasarlanmalıdır. Ayrıca, sistemin sahip olduğu rezonans modu sayısı kadar, sisteme Notch filtresi eklenmesi tavsiye edilmektedir.

**Örnek bir Notch Filtresi Tasarımı:** Şekil 2.10 ile anlaşılacağı üzere iç azimut eksenini iki adet yapısal kaynaklı rezonans modu bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, sistemde baskın olan ve etkilerinin çok belirgin olduğu rezonans modu (177 Hz) için notch filtresi tasarımı açıklanmıştır. Üç ana grup altında toplanan notch filtreleri arasından, tez çalışması için kullanılan ve transfer fonksiyonu Denklem 4.8 ile verilen standart notch filtresidir [40].



Şekil 4.9. İç yükseliş eksenini için önerilen tümleşik kontrol sistemi

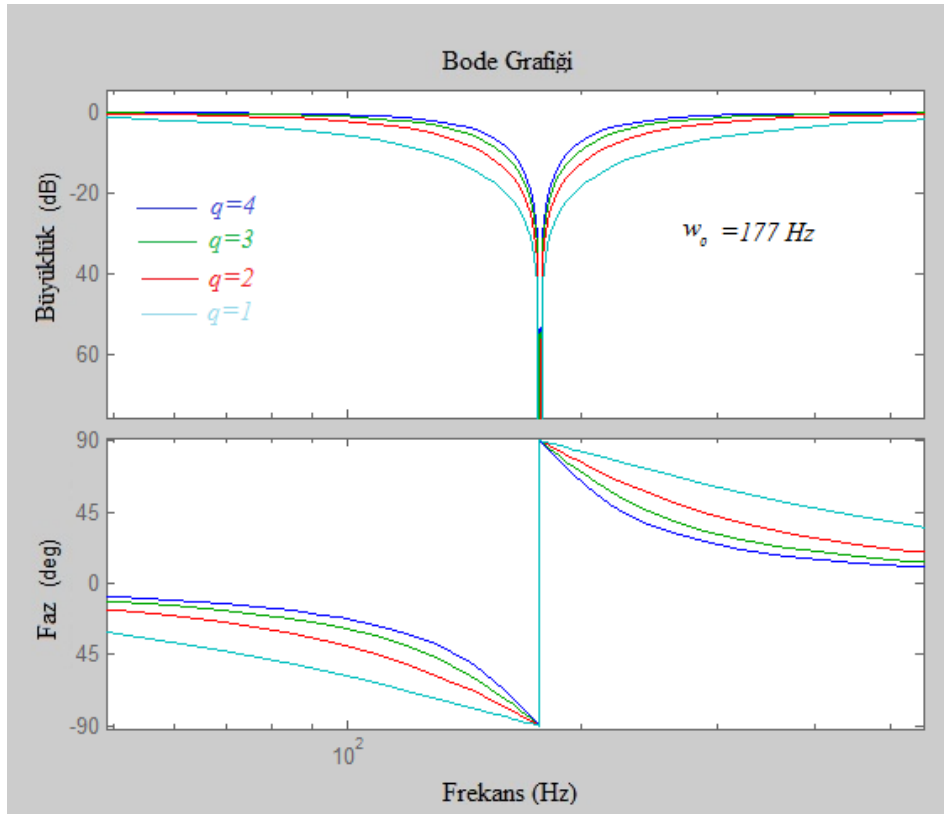
$$G_{notch} = \frac{s^2 + w_{notch}^2}{s^2 + \frac{w_{notch}}{q_{notch}}s + w_{notch}^2} ; \quad q_{notch} = \frac{w_{notch}}{\text{Filtrenin Bant Genişliği}} \quad (4.8)$$

Burada  $w_{notch}$  filtrenin sızdırılması istenilen rezonans modunun tepe noktasının frekansıdır. Bu tez çalışması kapsamında  $w_{notch} = 177$  olarak seçilmiştir.  $q_{notch}$  ise 4 olarak belirlenmiştir. Tasarlanan notch filtresinin farklı  $q_{notch}$  değerleri için bode grafiği Şekil 4.10 ile gösterilmektedir.

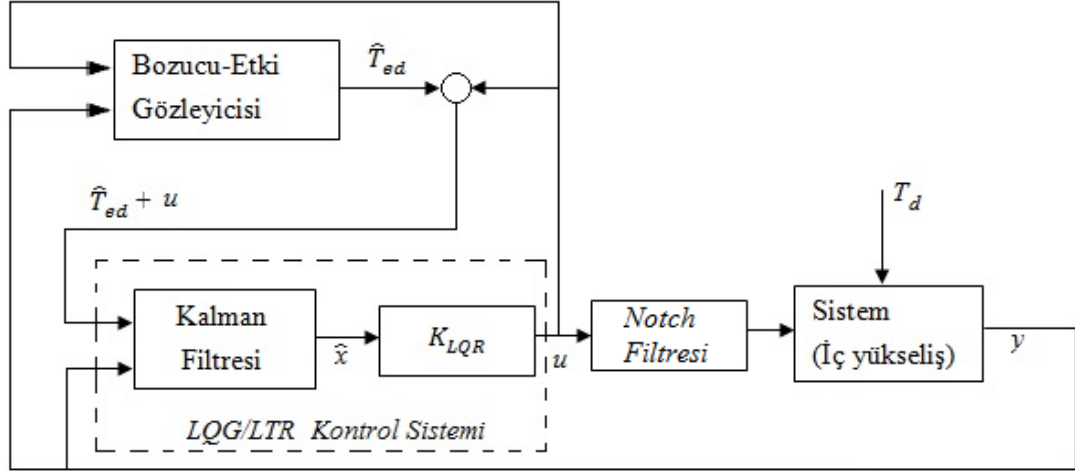
Yapılan bu son tasarım işleminin ardından azimut eksenini için tasarlanan kontrol sisteminin nihai halinin şematiği Şekil 4.11 ile gösterilmektedir.

#### 4.6 Deneysel Sonuçlar

Önceki bölümlerde detayı açıklanan kontrol sisteminin deneyleri, F-4 model bir savaş uçağı üzerinde yapılmıştır. Çok yüksek hızlarda ve doğası gereği net tanımlanamayan koşullar altında gerçekleştirilen deney sonucunda, iç yükseliş ve iç azimut eksenlerine ait dönü-ölçer integral çıktıları her bir eksen için elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Farklı  $q_{notch}$  değerleri için filtrenin bode grafikleri



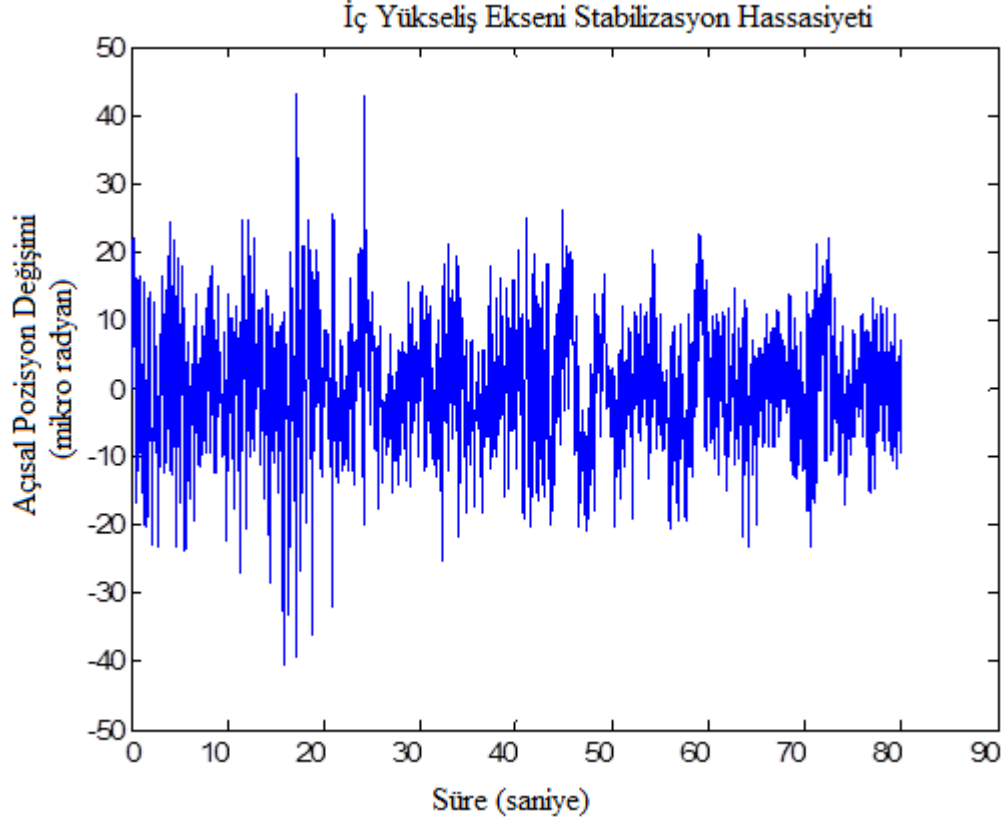
Şekil 4.11. İç azimut eksenini için önerilen tümleşik kontrol sistemi

İç yükseliş eksenini için elde edilen ve stabilizasyon hassasiyetini gösteren dönü-ölçer integral sonucu Şekil 4.122 ile gösterilmiştir.

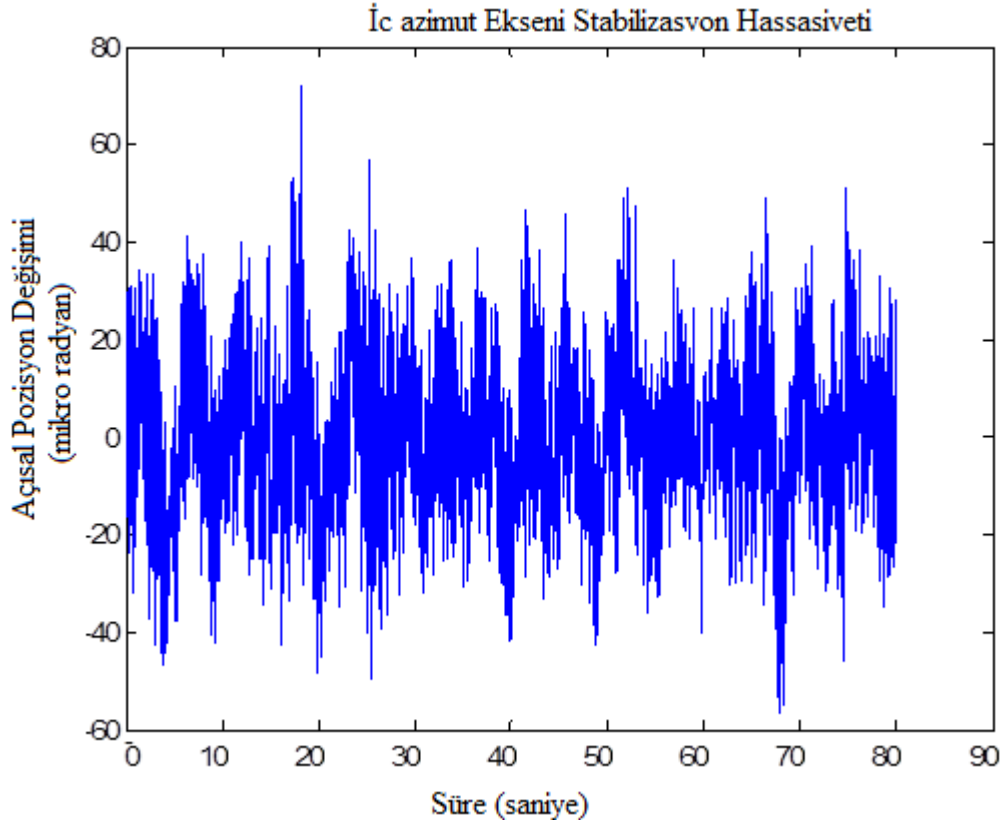
İç azimut eksenini için elde edilen ve stabilizasyon hassasiyetini gösteren dönü-ölçer integral sonucu Şekil 4.13 ile gösterilmiştir.

Yapılan deney için önceden alınmış olan örnek bir bozucu-etki profili ise Şekil 4.14 ile verilmektedir. Ancak unutulmamalıdır ki, verilen bu profil yaklaşık bir profildir ve gerçek durum hakkında detaylı ve net bir bilgi bulunmamaktadır.

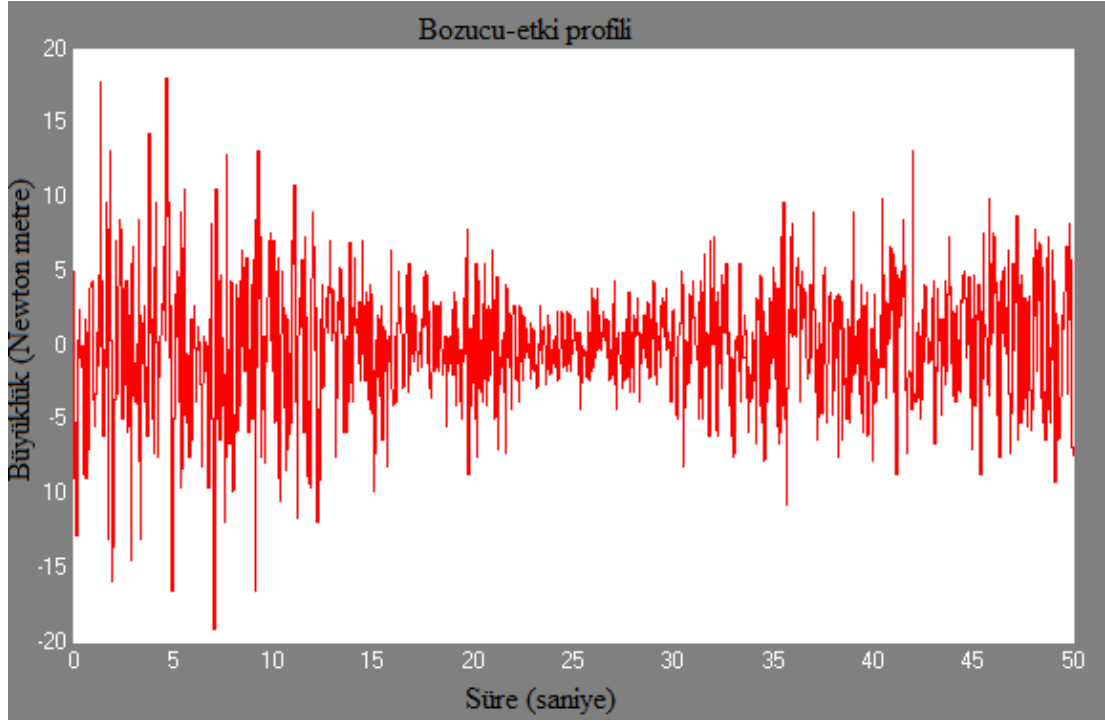
Sonuç olarak, sistem isterlerinde tanımlanan ve her bir gimbalin sahip olması gereken  $60 \mu rad$ 'lık stabilizasyon hassasiyeti değeri, her bir gimbal sistemi için başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Verilen bu sonuçlardan anlaşıldığı üzere, uçağa takılı sistem uçarken, bozucu-etkiler altında, görüntü elde edimi ve lazer atımı işlemlerini başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmektedir.



Şekil 4.12. İç yükseliş eksenini stabilizasyon hassasiyeti



Şekil 4.13. İç azimut eksenini stabilizasyon hassasiyeti



Şekil 4.14. Gimballere etkiyen örnek bozucu-etki profili



## 5. SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında, öncelikle karmaşık yapıya sahip olan ASELPD hedefleme ve işaretleme sisteminin iç iki eksen için sistem tanılama ile sistem modelinin elde edilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden sonra, sistemin her bir iç eksen için bozucu-etki gözleyicisi ile güçlendirilmiş bir optimal kontrol sistemi tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Bu optimal kontrol yapısının gürbüzlük özelliği ise girişte yapılan döngü transfer iyileştirmesi ile kazandırılmıştır. Tasarlanan kontrol sistemi hava platformuna takılı bir gimbal sistemi için önerilmiştir.

Sonuç olarak kontrol edilen sistemin performans ve gürbüzlük özellikleri deneysel bir çalışma ile teyit edilmiş ve sonuçları sıralı bir şekilde sunulmuştur. Bu sunulan sonuçlardan anlaşılacağı üzere tasarlanan kontrol sistemi, tatmin edici bir sistem performansını sağlamaktadır.

Sistem için yapılması öngörülen gelecek çalışmalar ise dönü-ölçerden gelen verilerin gürültü seviyesinin azaltılması için dönü-ölçer birleştirilmesidir. Ayrıca, gürbüz kararlılık kriterlerine ek olarak, çalışılacak yeni kontrol yapıları ile gürbüz performans kriterlerinin sağlanabilmesi hedeflenmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Bigley, W.J., Wideband Base Motion Isolation Control for a Mobile Platform, Proceedings of the American Control Conference, 1987.
- [2] Benett, W. H., Musser, K., Pointing and Stabilization of Weapon Platforms, Proceedings of the American Control Conference, San Francisco, CA, 1993.
- [3] Kennedy, P. J., Kennedy, R., Line of Sight Stabilization Primer, *lulu Publishing Company*, 2009.
- [4] “Wikipedia” erişim adresi: [http://tr.wikipedia.org/wiki/Görüş\\_alanı](http://tr.wikipedia.org/wiki/Görüş_alanı), erişim tarihi: 19 Mart 2015.
- [5] Stockum, L. A., Burge, J., Plunk, G., Electro-mechanical design for precision pointing and tracking systems, Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE), 779, 66-74, 1987.
- [6] Williams, E. F., Evens, R., H., Stockum, L., A., An Infrared Anti-ship Seeker simulator, Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE), 1111, 85-97, 1989.
- [7] Williams, J. B., Rizzo, V., J., Wideband Linear Quadratic Control of a Gyri-Stabilized Electro-Optical Sight System, IEEE Control Systems Magazine, 20-24, Aug. 1987.
- [8] Borello, M. A., Santina, M., S., Weight, T., H., Jitter stabilization experiment for a precision optical system, Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE), 641, 94-101, 1986.
- [9] Floyd, M. A., Lin, C., A., Lyons, M., G., Scan Stabilization and jitter Control for an Airborne telescope, Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE), 641, 102-120, 1986.
- [10] Kimbrell, J. E., Ditto, D., H., Design considerations for large beam directors, Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE), 779, 4-12, 1987.
- [11] Karaca, H., D., 2012, Çeşitli Akışkan Akışı Problemlerinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Dinamik Modellemesi ve Kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- [12] Kuzucu, A., Bayraktaroğlu, Z., Y., Kürkçü, B., Meriç, V., Dalgalanma Hareketi ile Tahrik, 16<sup>nci</sup> Ulusal Mekanik Kongresi (UMK 2009), 853-862, Kayseri, Türkiye, Haziran 2009.
- [13] Pintelon, R., Schoukens, J., System identification: A frequency domain approach, *Wiley*, 2012.

- [14] Guillaume, P., Pintelon, R., Schoukens, J., On the use of signals with a constant signal-to-noise ratio in the frequency domain, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 39(6), 835-842, 1990.
- [15] Özdoğan, G., 2014, System Identification and Modelling of Gyro-Stabilized IR/EO Gimbal System in Frequency Domain, *Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- [16] Corless, M., Tu, J., State and input Estimation for a Class of Uncertain Systems, *Automatica*, 34, 757-764, 1998.
- [17] Hou, M., Patton, R., J., Optimal Filtering for Systems with Unknown Input, *IEEE Trans. Automatic Control*, 43, 445-449, 1998
- [18] Xiong, Y., Saif, M., Sliding Mode Observer for Nonlinear Uncertain Systems *IEEE Trans. Automatic Control*, 46(12), 2012-2017, 2001.
- [19] Chen, X., Fukuda, T., Young, K. D., A new nonlinear robust disturbance observer, *Syst. Contr. Lett.*, 41(3), 189-199, 2000.
- [20] Liu, C. S., Peng, H., Inver-Dynamic Based State and Disturbance Observer for Linear Time-Invariant Systems, *Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control*, 124(3), 375-381, 2002.
- [21] Chen, C. H., Brussel, H. V., Servo Control of flexible beam with inverse-dynamic feedforward and disturbance observer, *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 702-707, 1993.
- [22] Kürkçü, B., Kasnakoğlu, C., Estimation of Unknown Disturbances in Gimbal Systems, *International Conference on Automatic Control (ICOAC 2015)*, 853-862, Ankara, Türkiye, Nisan 2015.
- [23] Hunt, J. H., Meyer, G., Su, R., Noncasual Inverses for Linear Systems, *IEEE Trans. Autom. Contr.* 41(4), 608-611, 1996.
- [24] Devasia, S., Chen, D., Paden, B., Nonlinear Inversion-Based Output Tracking, *IEEE Trans. Autom. Contr.* 41(7), 930-942, 1996.
- [25] Kürkçü, B., Kasnakoğlu, C., Çetin, S., Fırçasız DC Motorun Optimal Durum Uzayı Kontrolü, *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı (TOK'14)*, Kocaeli, Türkiye, Eylül 2014.
- [26] Anderson, B. D. O., Moore, J. B., *Optimal Control Linear Quadratic Methods*, *Prentice Hall*, 1989.
- [27] Kailath, T., *Linear Systems*, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, 1980.
- [28] Doyle, J., Francis, B., Tannenbaum, A., *Feedback Control Theory*, *Macmillan Publishing Company*, New York, 1992.

- [29] Guzzella, L., Geering, H. P., LQG/LTR – Theory for User, *Swiss Society for Automatic Control*, 2000.
- [30] Geering, H. P., Regelungstechnik, *Springer-Verlag*, Berlin, 1996.
- [31] Hespanha, J.P., Lecture notes on LQR/LQG controller design, 27 February 2015.
- [32] Maciejowski, J. M., Multivariable Feedback Design, *Addison-Wesley*, 1989.
- [33] Kulcsar, B., LQG/LTR Controller Design for an Aircraft Model, *Periodica Polytechnica Ser. Transp. Eng.* 28(1-2), 131-142, 2000.
- [34] Doyle, J. C., Stein. G., Robustness with Observers, *IEEE Trans. Autom. Contr.* 24(4), 607-611, 1979.
- [35] Doyle, J. C., Stein. G., Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical/Modern Synthesis, *IEEE Trans. Autom. Contr.* 26, 4-16, 1981.
- [36] Lehtomaki, N. A., Sandell. N. R., Athans, M., Robustness Results in Linear-Quadratic-Gaussian Based Multivariable Control Design, *IEEE Trans. Autom. Contr.* 26, 75-92, 1981.
- [37] Lehtomaki, N. A., 1981, Practical Robustness Measure in Multivariable Control System Analysis, *Doktora Tezi*, MIT Department of Electrical Engineering and Computer Science, Cambridge Mass.
- [38] Geering, H. P., Robuste Regelung, *IMRT Press*, Zurich, 1999.
- [39] Anderson, B. D. O., Moore. J. B., Linear System Optimization with Prescribed Degree of Stability, *Proc IEE*, 116(12), 2083-2087, 1969.
- [40] Nehorai, A., A Minimal Parameter Adaptive notch filter with constrained poles and zeros, *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, 33(4), 983-996, 1985.

## ÖZGEÇMİŞ

### 5.1 Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KÜRKCÜ, Burak  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 19.06.1987 Eskişehir  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (542) 612 33 47  
Faks : -  
e-mail : [bkurkcu@etu.edu.tr](mailto:bkurkcu@etu.edu.tr)

### Eğitim

5.2 Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	İstanbul Teknik Üniversitesi/Makina Müh.	2010
Yüksek Lisans	TOBB ETU/Elektrik ve Elektronik Müh.	2015

### 5.3 İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-2011	GE Aviation	Mühendis
2011-halen	ASELSAN A.Ş	Kontrol Sistemleri Tasarım Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

1. Kuzucu, A., Bayraktaroğlu, Z., Y., Kürkcü, B., Meriç, V., Dalgalanma Hareketi ile Tahrik, 16<sup>nci</sup> Ulusal Mekanik Kongresi (UMK 2009), 853-862, Kayseri, Türkiye, Haziran 2009.
2. Kürkcü, B., Kasnakoğlu, C., Estimation of Unknown Disturbances in Gimbal Systems, International Conference on Automatic Control (ICOAC 2015), 853-862, Ankara, Türkiye, Nisan 2015.

3. Kürkçü, B., Kasnakoğlu, C., Çetin, S., Fırçasız DC Motorun Optimal Durum Uzayı Kontrolü, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı (TOK'14), Kocaeli, Türkiye, Eylül 2014.
4. Kürkçü, B., Çelik, M., Çetin, S., Güdümlü bir Sistem için Fırçasız DC Motorun Modellemesi, Simülasyonu ve Uygulaması, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı (TOK'13), Malatya, Türkiye, Eylül 2013.