

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UYARLAMALI OPTİK SİSTEMLER İÇİN H SONSUZ OPTİMAL KONTROLÇÜ
GELİŞTİRİLMESİ

ERKAN ADALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. AKIN DELİBAŞI

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UYARLAMALI OPTİK SİSTEMLER İÇİN H SONSUZ OPTİMAL KONTROLCÜ
GELİŞTİRİLMESİ**

Erkan ADALI tarafından hazırlanan tez çalışması 29.03.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Akın DELİBAŞI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Akın DELİBAŞI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Şeref Naci ENGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Leyla GÖREN
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında atmosferik türbülans sebebiyle oluşan yüzey bozulmalarını kompanze eden uyarlamalı optik sistemler için h sonsuz optimal kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Yüksek lisans tez çalışmamda ve eğitimi hayatım boyunca her alanda bana danışmanlık yapan sevgili hocam Doç. Dr. Akın DELİBAŞI'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Geçirdiğim zorlu süreçlerde benden desteklerini bir an için bile esirgemeyen değerli arkadaşlarıma, hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Mart, 2018

Erkan ADALI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	12
1.3 Hipotez.....	13
BÖLÜM 2	
BÜKÜLEBİLİR AYNA YÜZEYİNİN MODELLENMESİ	14
BÖLÜM 3	
ATMOSFERİK TÜRBÜLANS BOZULMASININ MODELLENMESİ	24
BÖLÜM 4	
UYARLAMALI OPTİK SİSTEMLER İÇİN OPTİMAL KONTROLÇÜ GELİŞTİRİLMESİ	28
4.4 Uyarlamalı Optik Sistemler için LQG Kontrolcü Tasarımı	31
4.5 H Sonsuz Optimal Kontrolcü Tasarımı	33

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	36
KAYNAKLAR.....	40
ÖZGEÇMİŞ.....	46



SİMGE LİSTESİ

Re	Raynolds sayısı
V_0	Akışkan karakteristik hızı
L_0	Akışkan karakteristik akış genişliği
ν_0	Akışkan kinematik viskozitesi
C_n^2	Kırılma indisi yapı sabiti
$\phi_{cor}, \phi_{tur}, \phi_{res}$	Yüzey fazları
h	Ayna yüzeyinin kalınlığı
M_x, M_y	Eğilme momentleri
σ_x, σ_y	Normal gerilmeler
M_{xy}, M_{yx}	Burulma momentleri
τ_{xy}, τ_{yx}	Kayma gerilmeleri
P_x, P_y	Kayma kuvvetleri
ρ	Ayna yüzeyinin noktasal yoğunluğu
E	Young katsayısı
ν	Poissons oranı
β_1	Ayna yüzeyinin yoğunluğu
β_2	Ayna yüzeyinin bükülme direnci
a	Ayna yüzeyinin kenar uzunluğu
Δ^2	Biharmonik türev operatörü
$\lambda^2, c, c_1, c_2, \gamma$	Pozitif sabitler
\mathcal{L}	Lineer bir türev operatörü
N_a	Ayna yüzeyi altındaki eyleyici sayısı
f_{c_j}	Alçak-geçiren filtrelerin kesme frekans değerleri
V	Atmosfer rüzgar hızı
D	Sistem giriş merceğın çapı
r_0	Fried parametresi
N_m	Mode sayısı

KISALTMA LİSTESİ

AO	Adaptive Optic
CCD	Charge-Coupled Device
DM	Deformable Mirror
FDM	Finite Difference Method
FEM	Finite Element Method
LQG	Linear Quadratic Gaussian
MEMS	Microelectromechanical Systems
MIMO	Multi-Input Multi-Output
ODE	Ordinary Differential Equation
PDE	Partial Differential Equation
SH	Shack-Hartmann
SLC-D	Submarine Laser Communication Day
WFS	Wavefront Sensor

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Işık dalga cephesindeki bozulma	2
Şekil 1.2 Dalga cephesinin DM ile düzeltilmesi	4
Şekil 1.3 Shack-Hartmann algılayıcısı temel yapısı	5
Şekil 1.4 AO sistemlerin temel yapısı	7
Şekil 1.5 Klasik AO Kontrol Sistemi.....	8
Şekil 1.6 MIMO yapıdaki merkezi kontrolcü kurgusu ve dağıtılmış kontrolcü kurgusu	10
Şekil 2.1 Sonsuz küçük boyutlu $hdx dy$ elemanını etkileyen kayma kuvveti, burulma momenti, eğilme momenti ve dış kuvvetler	15
Şekil 2.2 Esnek ayna yüzeyinin ilk 9 modu	19
Şekil 4.1 LQG Kontrolcü Blok Diagramı.....	31
Şekil 4.2 Tam Durum Geribeslemeli Kontrolcü Blok Diyagramı	33
Şekil 5.1 LQG Kontrolcü ile Kapalı Çevrim Sistemin 3 Adet Performans Çıkışı ...	37
Şekil 5.2 LQG Kontrolcü ile Açık Çevrim Sistem Yüzey Şekli	37
Şekil 5.3 H Sonsuz Kontrolcü ile Kapalı Çevrim Sistemin 3 Adet Performans Çıkışı	38
Şekil 5.4 H Sonsuz Kontrolcü ile Açık Çevrim Sistem Yüzey Şekli.....	39

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1	İlk 15 Zernike polinomu.....	25
Çizelge 5.1	Simulasyon parametreleri.....	36

UYARLAMALI OPTİK SİSTEMLER İÇİN H SONSUZ OPTİMAL KONTROLCÜ GELİŞTİRİLMESİ

Erkan ADALI

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Akın DELİBAŞI

Uyarlamalı (adaptive) optik bileşenler, ışınlardaki bozulmaları (aberrasyonlar) düzelterek optik sistemlerin etkinliğini ve yeteneklerini geliştirmek için kullanılır. Atmosferik türbülans, optik imalat hataları, ısı kaynaklı bozulmalar veya lazer cihaz hataları gibi sapmalar, hedefteki tepe ışın yoğunluk değerinin düşmesine, görüntüde lekelenmelere veya lazer demetinin hedeften sapmasına sebep olur. Gökyüzündeki yıldızların gözlem esnasında kırışımları veya yaz gününde atmosferik türbülansın sebep olduğu görüşteki bozulmaların tamamı uzun yıllardır uyarlamalı optik elemanlar ile çözülmektedir. Uyarlamalı optik sistemler temel olarak görüntü kalitesini arttırmak için büyük çaptaki gözlem teleskoplarında, hızlı hareket eden sistemlerin takibi için hedef takip sistemlerinde ve özellikle haberleşme sistemlerindeki lazer demetinin dağınımını gerçek zamanlı olarak kontrol etmekte kullanılmaktadır. Uyarlamalı optik sistem, dalga cephesi algılayıcıları, bükülebilir ayna (Deformable Mirror - DM) ve bir kontrol biriminden oluşmaktadır. Sistemin temel çalışma prensibi, algılama, hesaplama ve etkinleştirme biçimindedir. Öncelikle dalga cephesindeki bozulma algılayıcı ile tespit edilir. Daha sonra kontrol birimi bu cephenin tersi formundaki cepheyi oluşturacak şekilde DM'i sürer ve aynadan yansıyan dalganın cephesi düzeltilmiş olur.

Günümüzde özellikle savunma sanayiindeki bir çok problem için (uzak mesafe güvenli kablosuz haberleşme, lazer ile tahrip sistemleri, görüntüleme sistemleri gibi) ihtiyaç duyulan uyarlamalı optik sistemler, hali hazırda ülkemizde üretilmemektedir. Bunun başlıca

sebebi, sistemin konvansiyonel yöntemler ile kolaylıkla kontrol edilememesi veya istenilen başarı oranına bu yöntemlerle ulaşamamasıdır. Örneğin lazer tahrip veya körleme sistemlerinde bu bileşenin olmaması sebebiyle üretici firmalar daha yüksek güçlerde lazer üretimine gitmektedirler. Çünkü hedef noktada yeterli enerji toplanması atmosfer bozulmaları düzeltilemediği için oluşturulamamaktadır. Uygulanabilir mutlak başarının yakalanabilmesi için performans endeksi belirli bir optimizasyon probleminin, bir kontrolcü ile çözülmesi gerekmektedir.

Uyarlamalı optik sistemlerin temel amacı deformasyon kontrolünün sağlanmasıdır. Zira sistemin başlıca elemanını bükülebilir ayna oluşturmaktadır. Bu ayna piezoelektrik veya MEMS tipi eyleyicilerin esnek bir yansıtıcı yüzeye ilişkilendirilmesi ile oluşturulmuştur. Esnek bir katman altında hareket eden eyleyicilerden oluşan sistemin yüzeyine ait gerçekçi model, zamanla birlikte uzaysal değişimi de barındırmaktadır. DM'nin matematiksel modeli Euler Bernolli'nin esnek çubuk denkleminin, iki boyutlu yüzeylere genelleştirilmiş formu olan Kirchhoff-Love yüzey teorisi ile ifade edilebilir. Bu gösterim kısmı türevli diferansiyel denklem (PDE) barındırması sebebiyle sonsuz boyutlu (Infinite Dimensional) sistemler sınıfına girmektedir. Bu tip sistemlerin optimal kontrolünün sağlanması için model indirgemeler kullanılmaktadır. Bu sayede sonsuz boyutlu sistemler sonlu boyutlu yaklaşık karşılıklarına indirgenebilmektedir. Bu projenin amacı, uyarlamalı optik sistemlerin h sonsuz optimizasyonu ile kontrolünü sağlamaktır.

Anahtar Kelimeler: H Sonsuz Kontrolcü, MIMO Sistemler, Büyük Ölçekli Sistemler, Uyarlamalı Optik, Atmosferik Türbülans

**DEVELOPMENT OF H INFINITY CONTROLLER FOR ADAPTIVE OPTICAL
SYSTEMS**

Erkan ADALI

Department of Control and Automation Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Akın DELİBAŞI

Adaptive optics is used to enhance the capability of optical systems by actively compensating for aberrations. These aberrations, such as atmospheric turbulence, optical fabrication errors, thermally induced distortions, or laser device aberrations, reduce the peak intensity and smear an image or a laser beam propagating to a target. The twinkling of stars or distorted images across a paved road on a hot summer day is caused by turbulence in the atmosphere. Distortions like these were corrected by adaptive optics for a long time. The principal uses for adaptive optics are improving image quality in optical and infrared astronomical telescopes, imaging and tracking rapidly moving space objects, and compensating for laser beam distortion through the atmosphere. Adaptive optics system consists of a wave front sensor, deformable mirror and a control unit. The basic operating principle of adaptive optics system is detection, calculation and activation. First the distortion in the wavefront is determined by the sensors. Then, the control unit derive DM up to takes the shape in the reverse form of distorted wavefront and the wave reflected front face of the mirror would be corrected.

Many problems particularly (long distance secure wireless communication, laser weapons, imaging systems etc.) needed for adaptive optics systems in the defense industry, not yet produced in our country at the moment. The main reason is that the system can not easily be controlled with conventional methods or the inability to reach the desired

success rate with this method. For example, because of absence of the adaptive optic system in laser damage or blinding system, manufacturers are forced to enhance their laser power. Sufficient energy density to destroy the target cannot be formed without eliminated atmospheric distortions. In order to obtain an applicable control system, the problem needs to be solved as an optimization problem with a proper definition of the performance index.

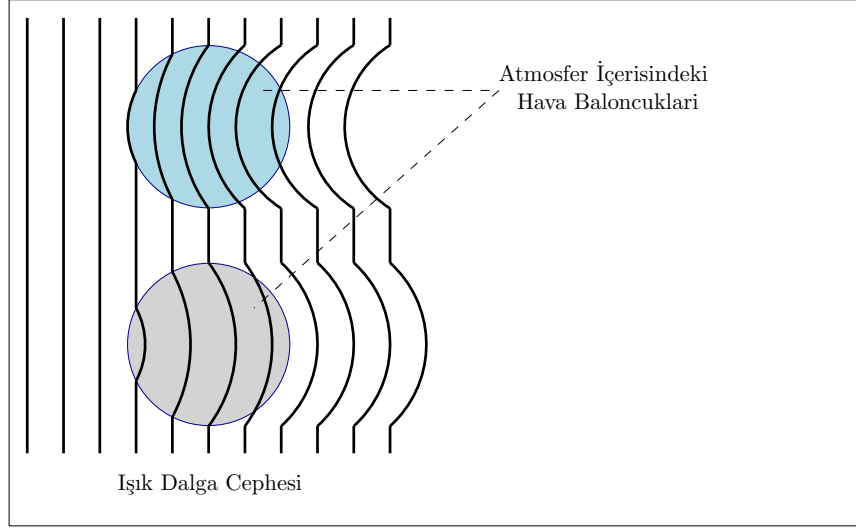
The main objective of the adaptive optics system is to handle the deformation control because the main component of the system is deformable mirror. Deformable mirror consist of a flexible reflective surface derived by the piezoelectric or MEMS type actuators. The realistic model of the system's surface derived by actuators under the flexible layer includes spatial changes with temporal changes. The mathematical model of DM can be expressed by Kirchhoff-Love Surface theory which is derived from Euler Bernoulli's flexible rods equation generalized in two dimension. This representation is hosted in the class of infinite-dimensional system due to partially differential equations (PDE). Model reduction must be used to control such a system optimally. By this way, infinite-dimensional systems can be reduced approximately to finite-dimensional systems. The aim of this project is to provide h infinity optimal controller for adaptive optical systems.

Keywords: Optimal H Infinity Control, MIMO Systems, Large Scale Systems, Adaptive Optic, Atmospheric Turbulence

1.1 Literatür Özeti

Uyarlamalı optik(Adaptive Optics-AO), ışınlardaki bozulmaları düzelterek optik sistemlerin etkinliğini ve yeteneklerini geliştirmek için kullanılır. Atmosferik türbülans, optik imalat hataları, ısı kaynaklı bozulmalar veya lazer cihaz hataları gibi sapmalar, hedefteki tepe ışın yoğunluk değerinin düşmesine, görüntüde lekelenmelere veya lazer demetinin hedeften sapmasına sebep olur. Atmosferik türbülans etkisi günlük hayatımızda da görülmektedir. Gece yıldızlara bakıldığında görüntünün kırışması, sıcak bölgelerde ufuk boyundaki görüntülerin dalgalanması atmosferik türbülans etkisi sonucu bozulmalara örnektir.

Astronomide kullanılan teleskoplarda uyarlamalı optik sistemlerin amacı, atmosferik türbülans sebebiyle oluşan dalga cephesindeki bozulmaları kompanze ederek görüntü kalitesini arttırmaktır. Atmosferik türbülans sebebiyle oluşan bozulmaların yapısının bilinmesi bu bozucuları kompanze edebilecek optimal kontrolcü yapılarının geliştirilmesinde büyük bir öneme sahiptir [1],[2],[3]. Atmosferik türbülans gibi kompleks ve rastlantısal sistemleri analiz edebilmek için bu sistemlerin basit fiziksel süreçlerini içeren modeller oluşturulmalıdır. 1941 yılında ünlü matematikçi Andrey Nikolaevich Kolmogorov yaptığı önerme ile günümüzde kullanılan atmosferik türbülans modellerinin temelini atmıştır. Kolmogorov'un oluşturmuş olduğu modele göre büyük ölçekli bir akışkan yapısına enerji eklendiğinde, büyük ölçekli yapı bu enerjiyi ısı enerjisi olarak yayar ve daha küçük



Şekil 1.1 Işık dalga cephesindeki bozulma

ölçekli yapılara böler [4]. Bu süreç Reynolds sayısı, akışının geometrik yapısına bağlı kritik bir değeri aştığı durumlarda türbülans akışının temel karakteristiğidir. Reynolds sayısı ise V_0 karakteristik hız, L_0 karakteristik akış genişliği, ν_0 akışkanın kinematik viskozitesi olmak üzere $Re = \frac{V_0 L_0}{\nu_0}$ şeklinde tanımlanmıştır [5]. Atmosfer için Reynolds sayısı bu kritik değerden çok büyük olduğu için atmosferdeki hava akışı sürekli bir türbülans halindedir [6].

Sürekli akış halindeki türbülans sebebiyle atmosfer içerisinde değişken sıcaklık değerlerine sahip boyutları birbirinden farklı hava baloncukları barındırır. Atmosfer içerisindeki hava akışı sebebiyle bu baloncuklar sürekli olarak hareket halindedir. Işık atmosfer içerisinde ilerlerken bu hava baloncukları içerisinde geçerek kırılmaya uğrar. Çeşitli nem ve sıcaklık değerlerine sahip hava kütlelerinin ışığı kırma indisleri de birbirinden farklıdır. Farklı kırılma indisleri sebebiyle atmosfer içerisinde ilerleyen ışığın dalga cephesinde bozulmalar oluşur [7]. Şekil 1.1'de atmosfer içerisinde yer alan farklı kırılma indislerine sahip hava baloncuklarının ışık dalga cephesinde yapmış olduğu bozulmalar gösterilmektedir.

Kırılma indisindeki dalgalanmaların bir ölçütü olan C_n^2 kırılma indisi yapı sabiti, yükseklik ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir [8]. C_n^2 indisinin belirlenmesinde kullanılan en basit model ise JC Kaimal vd. (1976) tarafından ortaya konulmuştur. JC Kaimal vd. (1976) tarafından oluşturulan bu modelde yüksekliğe bağlı $C_n^2(h)$ indisi, referans yükseklikteki

$C_n^2(h_0)$ indisi ile arasındaki benzerlik kullanılarak hesaplanır. VP Kukharets ve LR Tsvang (1980) bu modeli geliştirerek enverziyon katmanı üzerinde $C_0^2(h)$ değerini eksponansiyel olarak düşüren denklemler oluşturmuştur. Atmosferin katmanları için yapılan ölçümlerin artması ile birlikte deneysel veriler kullanılarak oluşturulan modellerde hız kazanmıştır. Deneysel verilere dayanan modeller içerisinde en popüler olanlardan birisi ise SLC-D (Submarine Laser Communications-Day) modelidir. SLC-D modelinde $C_n^2(h)$ indisini hesaplayan denklemler Hawaii de bulunan AMOS teleskop istasyonundan yapılan ölçümler kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca bu modelde $C_n^2(h)$ indisini gece hesaplamaları için farklı denklemler kullanılmaktadır [11]. Benzer şekilde Robert E Hufnagel (1978)'de kendisinin yapmış olduğu ölçümleri kullanarak $C_n^2(h)$ indisini hesaplayan denklemleri tek bir denkleme indirgeyen bir model oluşturmuştur. Ancak istatistiksel bilgiler içermeyen atmosferik türbülans modelleri kullanılarak optimal kontrolcü yapılarının oluşturulması mümkün değildir. Theodore De Karman ve Leslie Howarth'ın 1938 yılında yapmış olduğu çalışma da atmosferik türbülansı istatistiksel bakış açısıyla incelemiş ve von Kármán rüzgar türbülans modelini oluşturmuştur.

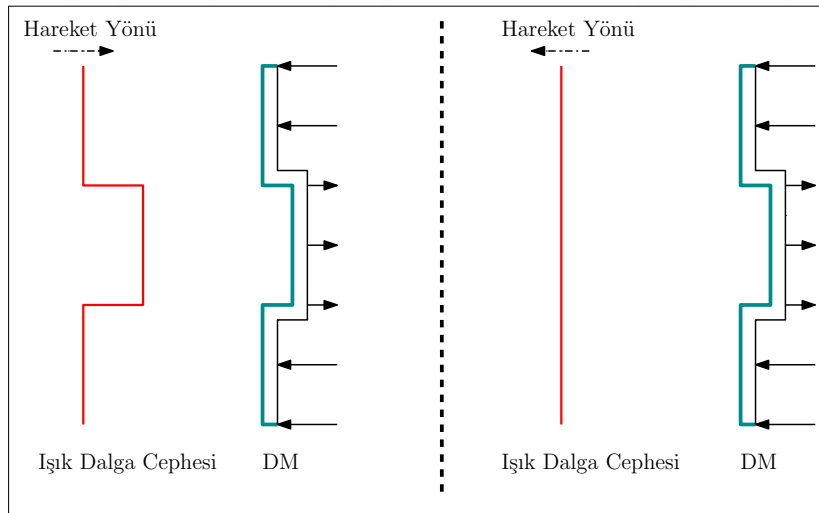
Kırılma indisindeki değişimler sebebiyle yüzeyler üzerinde oluşan bozulmaları tanımlamanın en çok tercih edilen yolu bu bozulmaları temel fonksiyonların toplamı şeklinde ifade etmektir. Birim daire üzerinde tanımlı ve birbirine ortogonal olan polinom serilerinden, Zernike polinomları, bu alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [14]. Türbülans sebebiyle oluşan yüzeyel bozulmalar sonsuz sayıda Zernike polinomunun toplamı şeklinde ifade edilebilir. Ayrıca bozulma tanımlanırken kullanılacak Zernike polinomlarının sayısı için bir sınır yoktur. Ancak ilk 15 Zernike polinom serisi atmosferik türbülansların %92'sini göstermek için yeterlidir [15].

Bu bozulmaların tamamı uzun yıllardır uyarlamalı optik elemanlar ile çözülmektedir. Uyarlamalı optik sistemler temel olarak görüntü kalitesini arttırmak için büyük çaptaki gözlem teleskoplarında, hızlı hareket eden sistemlerin takibi için hedef takip sistemlerinde ve özellikle haberleşme sistemlerindeki lazer demetinin dağınımını gerçek zamanlı olarak kontrol etmekte kullanılmaktadır. AO sistemlerinin uygulama alanlarını;

- Astronomi: Yüksek çözünürlükteki yer teleskoplarında [16],[17],[18],
- Ophtalmoloji: Göz bozukluklarının tanısı ve düzeltilmesinde [14],[19],
- Lithografi: Zaman değişimi ile oluşan hataları kompanze etmek için [20],
- Mikroskopi: Canlı hücrelerdeki diffraksiyon endeksinin değişimini kompanze etmek için [21],[22],
- Uzak mesafe kameraları: Havadaki türbülans etkisinin kompanze edilmesi için [23],
- Lazerler: Mesafe / güç ilişkisini iyileştirmek için [24],

olarak sınıflandırabiliriz.

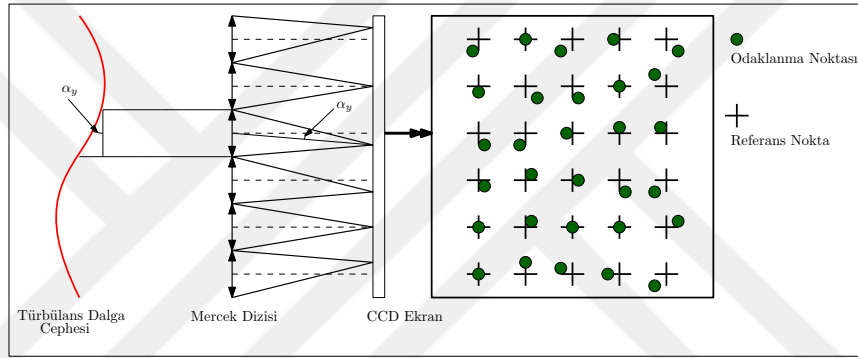
Uyarlamalı optik sistem, dalga cephesi algılayıcıları (Wavefront Sensor-WFS), bükülebilir ayna (Deformable Mirror - DM) ve bir kontrol biriminden oluşmaktadır. Sistemin temel çalışma prensibi, algılama, hesaplama ve etkinleştirme biçimindedir. Öncelikle, dalga cephesindeki bozulma, algılayıcı ile tespit edilir. Daha sonra kontrol birimi bu cephenin tersi formundaki cepheyi oluşturacak şekilde DM'i sürer ve aynadan yansıyan dalganın cephesi düzeltilmiş olur.



Şekil 1.2 Dalga cephesinin DM ile düzeltilmesi

Şekil 1.2'de dalga cephesinin, bükülebilir ayna ile nasıl düzeltilebildiği görülmektedir. Dalga cephesi herhangi bir sebep ile bozulmuş ışık dalgası, yüzeyi bu bozulmuş formu düzeltmek için bükülmüş aynaya çarpar ve düzgün bir şekilde yansıtılır.

AO sistemlerde ışığın dalga cephesindeki bozulmanın ölçülebilmesi için sistem içerisinde WFS'lere ihtiyaç vardır. Pek çok WFS olmakla birlikte Shack-Hartmann (SH) algılayıcıları AO sistemlerde en çok tercih edilenlerdir [25]. Algılayıcının ön yüzeyi küçük boyutlu ve sıralı monolitik merceklerden oluşmaktadır. Her bir mercek yerel olarak kendi üzerine düşen ışık demetini algılayıcının arka kısmında bulunan CCD (Charge-Coupled Device) algılayıcılardan oluşan yüzey üzerine odaklar. Her bir mercek, üzerine düşen ışık demetinin dalga yüzeyindeki bozulmasına bağlı olarak ışık demetini farklı bir noktada odaklar. Bu odaklanma noktalarının referans noktalara göre olan konumları kullanılarak ışığın dalga cephesindeki bozulma ölçülebilir [26]. SH algılayıcıların temel çalışma kurgusunu Şekil 1.3'de gösterilmektedir.



Şekil 1.3 Shack-Hartmann algılayıcısı temel yapısı

SH algılayıcılar dalga cephesinin doğrudan ölçmediği için yeniden-inşa (reconstruction) yöntemleri ile dalga cephesinin oluşturulması gerekmektedir. Ancak bu süreç için kullanılan algoritmaların hesaplama maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle yeniden-inşa süreci pek çok uyarlamalı optik sistemin gerçek zamanlı olarak çalışabilmesinde dar boğaz oluşturmaktadır [8]. Literatürdeki yeniden-inşa yöntemleri ise iki genel yöntem üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunlardan ilki SH algılayıcılardan elde edilen zonal yüzey gradyanlerini kullanarak bükülebilir ayna yüzeyi üzerinde önceden belirlenen zonal yüzeylerin gradyanlerinin hesaplanmasıdır [27],[28]. "Zonal matris yeniden-inşa (zonal matrix reconstruction)" adı verilen bu yöntemde zonal yüzeylerin bükülebilir ayna eyleycilerine uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Bu sebeple SH algılayıcı ile bükülebilir aynanın sistem içerisindeki pozisyonları kalibrasyon için büyük önem taşımaktadır. Literatürdeki diğer yöntemler ise "modal matris yeniden-inşa (modal matrix reconstruction)" adı altında incelenebilir. Bu yöntemde SH algılayıcıdan elde edilen ayırık yüzey zonal gradyanlerini sağlayan sonlu

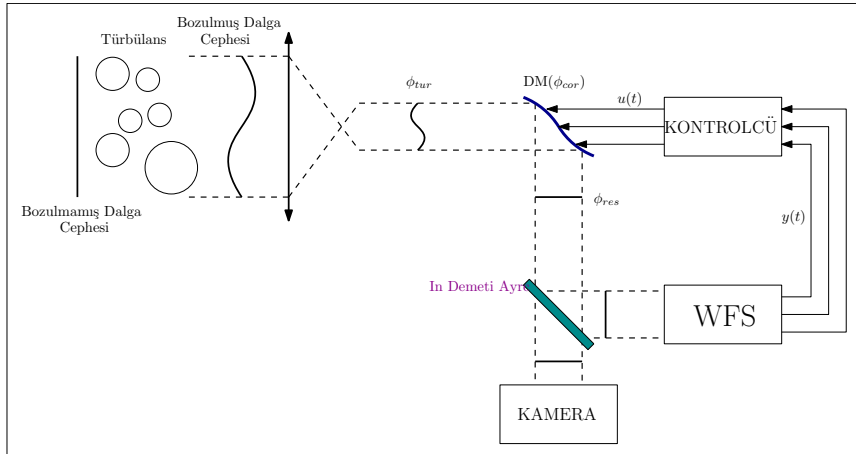
sayıda Fourier fonksiyonu veya Zernike polinomunun toplamı dalga cephesinin çözümü olarak kabul edilmektedir [29],[30].

Sürekli yüzeye sahip DM'lerin modellenmesi mekanik titreşim problemlerinin özel bir durumudur. DM yüzeyinin belirli bir kalınlığa sahip olması sebebiyle benzer yapıları 3 boyutlu olarak modelleyen çalışmalar olsa da [31], yüzey kalınlığının diğer boyutlara göre çok ince olması çalışmaları 2 boyutlu modeller oluşturmaya yönlendirmiştir [7],[32]–[34]. DM gibi sürekli yüzeylerin modellenmesi için en bilinen çalışma 1888 yılında Love tarafından yapılmıştır [35]. Love kısmi türevli diferansiyel denklemler (Partial Differential Equation) kullanarak oluşturduğu bu model, Gustav Robert Kirchoff'un yapmış olduğu kabulleri kullandığı için literatürde Kirchoff-Love yüzey teorisi olarak bilinmektedir [36],[37]. Ayrıca literatürde Kirchoff-Love teorisinde ihmal edilen ve yüzey kalınlığı arttıkça baskınlık gösteren kayma deformasyonlarını model içerisine dahil eden Mindlin–Reissner teorisine de yer verilmiştir [38],[39],[40]. Kirchoff-Love teorisi ile oluşturulan ve PDE denklemler içeren modellerin çözümünü inceleyen literatür çalışmaları ise 3 yöntem üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu yöntemlerden ilki ayna yüzeyini sonlu sayıda elemanlar ve bunlar arasındaki ilişkiler ile modelleyen sonlu elemanlar yöntemidir (Finite Element Method) [41],[42]. FEM ile benzerlik gösteren ve ayna yüzeyi için oluşturulan PDE denklemlerini, türev operatörünü ayrıştırarak çözüm sunan yöntemler ise sonlu türevler yöntemi (Finite Difference Method) olarak adlandırılmaktadır [43],[44]. Titreşim problemlerinde sıkça kullanılan diğer bir yöntem ise modal analiz yöntemidir. Bu yöntemde PDE denklemin çözümü Fourier dönüşümüne benzer şekilde sınır koşullarını sağlayan sonsuz sayıda yüzey fonksiyonunun toplamı şeklinde ifade edilir [45],[46].

DM'lerin yüzey modeli büyük ölçekli sistem matrisleri içermesi sebebiyle büyük ölçekli sistemler yaklaşımı ile incelenebilir. Büyük ölçekli sistem yaklaşımının geçmişi seyrek sistem matrisleri sebebiyle ortaya çıkan lineer programlama problemlerinin 1960 yılında ayrıştırılmasına kadar dayanmaktadır [47]. [48] bu çalışmadan esinlenerek büyük ölçekli sistemlerin kontrolünde çok seviyeli kontrol yaklaşımını ortaya koymuştur. Büyük ölçekli sistemler için çok seviyeli kontrol yaklaşımının başarısı araştırmacıları bozucu etkilere dayanaklı çok seviyeli kontrolcü yapılarının araştırılmasına yönlendirmiştir [49],[50]. Büyük ölçekli

sistemler için dağılık kontrolcü yapılarına duyulan ihtiyaç ise Masanao Aoki tarafından 1971 yılında belirtilmiştir. Masanao Aoki'in 1971 yılındaki çalışmasından sonra araştırmaların büyük çoğunluğu büyük ölçekli sistemler için dağılık kontrolcü yapıları tarafına kaymıştır [52],[53],[54],[55]. Literatürde büyük ölçekli sistem yapıları için ayrıştırma yapılarak dağılık kontrolcü yapılarının geliştirilmesi dışında sistem durumlarının alt kümeleri kullanılarak oluşturulan daha küçük ölçekli sistemler için kontrol yapılarını görmekte mümkündür [56],[57]. Büyük ölçekli sistemlerin kararlılığı ise literatürde iki farklı yaklaşım ile incelenmiştir. Bunlardan ilki Aleksandr Mikhailovich Lyapunov tarafından 1892 yılında ortaya konulan kararlılık yaklaşımıdır [59],[60]. Büyük ölçekli sistemler için diğer bir yaklaşım ise sisteme uygulanan sınırlı giriş sinyalleri için çıkış sinyallerinin de sınırlılığını inceleyen kararlılık testleridir [61],[62],[63].

Tarih boyunca uyarlamalı optik sistemlerin kullanımı teknolojik yetersizlikler sebebiyle kısıtlı kalmıştır. Bu alanda çalışan en başarılı bilim insanları bile bu sistemlerin önemini fark edememiştir. Isaac Newton, 1730 yılında yazmış olduğu Opticks adlı eserinde, astronomi alanında atmosferik türbülansın getirdiği kısıtlamalara çözüm bulamadığını belirtmiştir. Tarihte ilk AO uygulaması, 1953 yılında Horace Babcock tarafından, dalga cephesi algılayıcısı ile sürülen bükülebilir ayna elemanı kullanarak, atmosferik türbülansın teleskop görüntüleri üzerindeki bozucu etkileri kompanse edilmiştir. Bu sistem günümüzde bilinen en eski AO sistemdir [64].

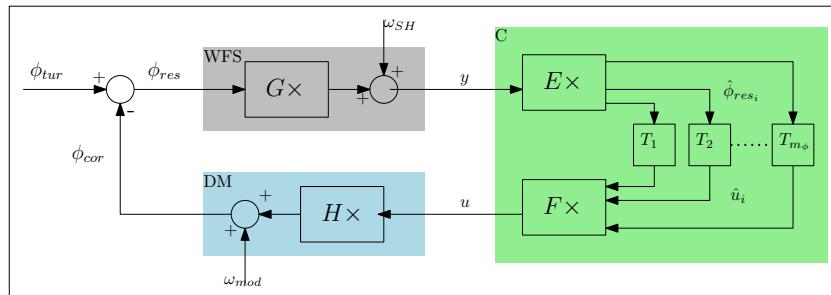


Şekil 1.4 AO sistemlerin temel yapısı

AO sistemlerin temel yapısı Şekil 1.4'de verilmiştir. Sistem içerisinde yer alan DM ile oluşturulan ϕ_{cor} fazı, atmosferik türbülans sebebiyle oluşan ϕ_{tur} fazından çıkartılır. DM'nin

kontrolü için gerekli olan u sinyali WFS'den alınan ölçümler (y sinyali) ile kontrolcü yapısı içerisinde gerçek zamanlı olarak işlenerek oluşturulur. WFS ise dalga formunun ayna yüzeyinden yansımından sonra geriye kalan $\phi_{res} \triangleq \phi_{tur} - \phi_{cor}$ bozulma fazını ölçer ve çıkış sinyalini oluşturur [25].

Uyarlamalı optik sistemlerin kontrolünde izlenen bir çok yol bulunmaktadır. Düzeltme ihtiyacına uygun teknik veya paralel teknikler seçilerek kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Nispeten düşük modal ve zonal bozulmalar için sadece tip/tilt ayna yeterli gelmiş ve buna uygun bir kontrol algoritması kurgulanmıştır. Bizim de çalışmada amaç edindiğimiz yüksek moddaki bozulmaların bertaraf edilmesi için ise bükülebilir aynalar ile farklı yollar bazen tek başına bazen paralel olarak kurgulanmıştır. Literatürde dalga cephesindeki bozulmanın zonal ve modal fazının belirlenmesi için algılayıcılardan alınan verilerin bir dizi işleme tabi tutulması gerekmektedir. Örneğin SH tipi algılayıcı sadece alt-merceklerin bulunduğu noktalarda spotun kaçıklığını ölçebilmekte ve bu bilgiyi dışarı vermektedir. Kullanıcının modal ve zonal fazı bulabilmesi için yeniden inşa (re-construction) işlemi ile bir dizi optimizasyon çalışması yapması gerekmektedir. İşte bu noktada kontrol literatürünün ilk ayrımı gerçekleşmektedir. Literatürde bu hesaplama külfetinden kaçınarak işlem yapılıp daha az enerji ve zaman harcayan dolaylı metotlar [65] algılayıcılardan almış olduğu veriyi işleyerek modal ve zonal faz bilgisini inşa edip bunu kullanan direk metotlar bulunmaktadır. Klasik uyarlamalı optik sistem kontrol yaklaşımlarında kontrolcü, statik eşlemenin ve paralel tek giriş tek çıkışlı geri-besleme döngülerinin seri bağlantısı biçimindedir. Klasik uyarlamalı optik kontrol sistemi Şekil 1.5'de gösterilmektedir.

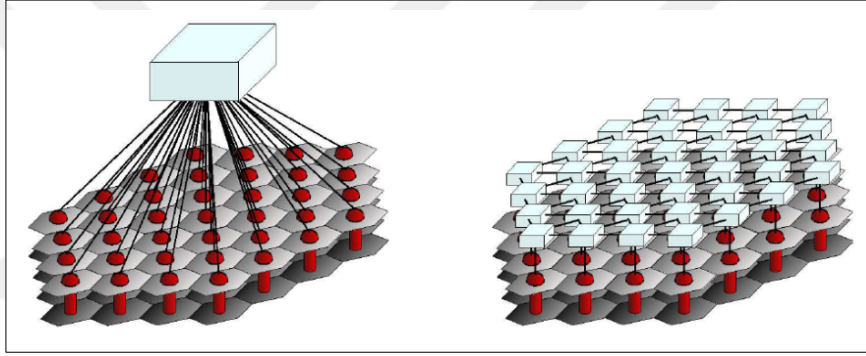


Şekil 1.5 Klasik AO Kontrol Sistemi

Şekil 1.5'de C ile gösterilen yeşil kısım sistemin kontrolcüsünü sembolize etmektedir. Burada SH algılayıcısının her bir merceğinden elde edilen sapma miktarları uygun statik

eşleme matrisi E ile çarpılarak paralel tek giriş tek çıkışlı kontrolcülere tabi tutulmuş ve çıkışları da F gibi statik bir eşleme ile çarpılarak bükülebilir aynanın kontrol sinyalini oluşturmuştur. Ortaya konan bu yapı hali hazırdaki bir çok teleskop sisteminde kullanılmaktadır. Örneğin, Hawaii'deki Keck teleskobunun SH algılayıcısının 304 alt-merceği ile DM'sinin 349 eyleyicisi bu tipte bir yapı ile kontrol edilmektedir [66]. Literatürde bu şemadaki kompanzatörlerin öncelikle kararlı hal hatasını yok etmek için basit integratörlerle tasarlandığı görülmektedir. Sonraki çalışmalarda bozucu etkisinin karakterizasyonu, özellikle bant genişliği üzerine yoğunlaşmış ve integratörlerin modal kazançları optimize edilmiştir [67]. Birinci dereceden bu kompanzatörlere alternatif olarak yüksek dereceli öngörülü kontrolcüler de geliştirilmiştir [68]. Literatürde uyarlamalı kontrolcülerin de kullanıldığı çalışmalara rastlamak mümkündür [69],[70]. Ancak bu tekniklerde tüm sistemin köşegenleştirilmesi gerekmektedir. Şekil 1.6'da bu problemin ortadan kaldırılabilmesi için önerilen iki yöntem gösterilmektedir. Soldaki uygulamada çok giriş çok çıkışlı (MIMO) kontrolcü kurgusunun kullanıldığı merkezi kontrolcü yapısı gösterilmiştir. Sağda ise kendi bölgesindeki WFS bilgisi ile birlikte komşu bölgelerdeki kontrolcüler ile de haberleşen dağıtılmış kontrolcü kurgusu gösterilmektedir. Genel çözüm elbette solda verilen kurgu gibidir. Ancak hesaplama maliyetini düşürmek ve bakım maliyetlerini azaltmak için dağıtılmış kurgunun da tercih edilmesi mümkündür [7]. Yüzeyi sürekli olan DM'lerde iki eyleyicinin birbirinin etki alanına müdahalesi ayrıştırılmaz biçimdedir. Bu yüzden günümüz DM'leri için merkezi MIMO tipte kontrolcü kullanılması performansı ciddi oranda iyileştirmektedir. Bu zorluğun yanında uyarlamalı optik sistemlerin dinamik periyodik bozucu sinyallerine cevap vermesi gerekmektedir. Özellikle yüksek frekanstaki veya belirli bir bant genişliğindeki gürültü sinyallerine cevap verme gerekliliği tasarımcıları Doğrusal Karesel Gaussian kontrolcülere (LQG) yöneltmiştir. LQG tipi kontrolcü tasarımında sistemin alt bileşenlerinin de modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sayede amaç doğrultusunda iyileştirme yapılabilmektedir. Bu alandaki ilk çalışmalar Randall N Paschall ve David J Anderson (1993) ile Randall N Paschall (1991)'in yapmış olduğu çalışmalardır. DM modeli, birinci dereceden gecikme filtresi ile, türbülans modeli de yine derecesi bir olan sürekli zamanda tanımlı yapı ile dikkate alınarak LQG tasarımı yapılmıştır. Benzer bir çalışma daha sonra Fourier dönüşümünü kullanarak köşegenleştirme yapan David W Miller ve

Simon CO Grocott (1999) tarafından yapılmıştır. Douglas P Looze vd. 1999 ve 2003 yıllarında yapmış oldukları çalışmalarda ise dalga cephesindeki bozulmaların modal ayrışmaları üzerinden bir kontrolcü kümesi oluşturulmuştur. Bu alandaki ilk laboratuvar çalışması boyutundaki uygulamaları ise Cyril Petit vd. 2005[74] yılında yapmış oldukları çalışmada görmekteyiz. Bu noktadan sonra literatürdeki çalışmalar daha fazla DM'nin dinamiklerini dikkate almaya yönelmiştir. Caroline Kulcsár vd. 2008 yılındaki çalışmasında DM eyleyicilerin doyum sınırları gözetilmiştir. Benzer şekilde DM'nin dinamiğini daha fazla dikkate alan çalışmalar da HF Raynaud vd. (2008) ve Douglas P Looze (2007)'dir. Literatürde tüm alt sistemlerin dinamiklerinin de dikkate alınması gerekliliği belirmiş ve türbülansa dair dinamiklerin de daha detaylı olarak irdelendiği minimum varyans kontrolü tipinde performansı yüksek kontrolcüler geliştirebilmiştir [76],[77].



Şekil 1.6 MIMO yapıdaki merkezi kontrolcü kurgusu ve dağıtılmış kontrolcü kurgusu

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki LQG tipi yaklaşımın başarısı DM ve atmosferik türbülansın iyi modellenmesine bağlıdır. Bundan dolayı DM'lerin modellenmesi Euler Bernolli'nin esnek çubuk denkleminin, iki boyutlu yüzeylere genelleştirilmiş formu olan Kirchhoff-Love yüzey teorisi [35] ile ifade edilmiştir. Ancak bu yeni gösterim kısmi türevli diferansiyel denklemler (PDE) barındırması sebebiyle sonsuz boyutlu (Infinite Dimensional) sistemler sınıfına girerek yeni zorluklar ortaya çıkarmıştır [16]. Atmosferik türbülans modeli de frekans tanım kümesindeki karakteristiğinden yararlanılarak Zernike polinomları ile durum uzay gösteriminde, Jean-Marc Conan vd. (1995) çalışmasında modellenmiştir.

Gerçekçi modelleri baz alarak literatürde PDE kontrol de dahil olmak üzere pek çok teknik kullanılmıştır [15],[79],[17]. Sonsuz boyutlu modeller her ne kadar modal analiz ile sonlu karşılıklarına indirgense de bu tip sistemlerde başarılı yaklaşımlar için 8-10. doğal frekansa

kadar ilerlenmesi gerektiği görülmüştür [15]. Atmosferik türbülans modeli de devreye girince tüm sistemin boyutu 14-16. mertebelere yükselmektedir. Bilindiği gibi AO sistemlerinin başlıca amacı bozucu etkilerinin sistem performansına etkisini en aza indirmektir. Bu alandaki başlıca kontrol tekniği ise bozucu girişi ile performans çıkışı arasındaki kazancın tüm frekanslardaki en büyük değerini minimize eden \mathcal{H}_∞ optimal kontrolcü tasarımıdır [56].



1.2 Tezin Amacı

Kare şeklindeki bükülebilir bir aynanın dinamik yüzey modeli, Kirchoff-Love yüzey teorisi kullanılarak PDE denklem ile gösterilecektir. Ayna yüzeyi altında 144 adet piezoelektrik eyleyici olduğu ve bu eyleyicilerin ayna yüzeyinin çok küçük bir alanına temas edeceği kabul edilebilir. PDE denklem ile gösterilen dinamik model için standart \mathcal{H}_∞ optimal kontrolcü geliştirme methodlarının uygulanması olmadığından PDE denklem “değişken ayrıştırma” yöntemi [80] kullanılarak kartezyen koordinatlara ve zamana bağlı fonksiyonlara ayrıştırılacaktır. Kartezyen koordinatlara bağlı fonksiyonlar iki boyutlu Fourier komponentlerinin toplamı şeklinde edilecek, böylece ayrıştırılmış PDE içerisinde bulunan zaman bağlı fonksiyonlar durum-uzay modeli ile gösterilecektir.

Uyarlamalı optik sistemler için optimal kontrolcü geliştirilebilmesi için sisteme etkileyen gürültülerin de modellenmesi gerekmektedir. Atmosferik türbülans sebebiyle oluşan yüzey bozulmaları birbirine ortogonal Zernike polinomlarının toplamı şeklinde ifade edilebilir. Atmosferik türbülans için ortaya konulan istatistiksel altyapı kullanılarak Zernike polinomlarının zamana bağlı katsayıları girişleri gaussian gürültüler olan durum-uzay modeli ile gösterilecektir.

Oluşturulan çok-giriş çok-çıkış sistemin \mathcal{H}_∞ normunu minimizasyonunu sağlayan optimal kontrolcü tasarımı yapılacaktır. Durum-uzay modeli için Lineer Karesel Gaussian kontrolcü yapısı oluşturulacak ve \mathcal{H}_∞ optimal kontrolcünün performansı ile karşılaştırma yapılacaktır.

1.3 Hipotez

Sürekli yüzeye sahip bir bükülebilir ayna içeren uyarlamalı optik sistem ve bu sisteme etkiyen atmosferik türbülans sebebiyle oluşan bozulma, sonlu boyutlu matrislerle oluşturulan durum-uzay modeli ile gösterilebilir. Oluşturulan durum-uzay modeli için sistemin bütün frekanslardaki cevabının en büyük kazancının indirgenmesi \mathcal{H}_∞ optimal kontrolcü yapısı ile gerçekleştirilebilir.



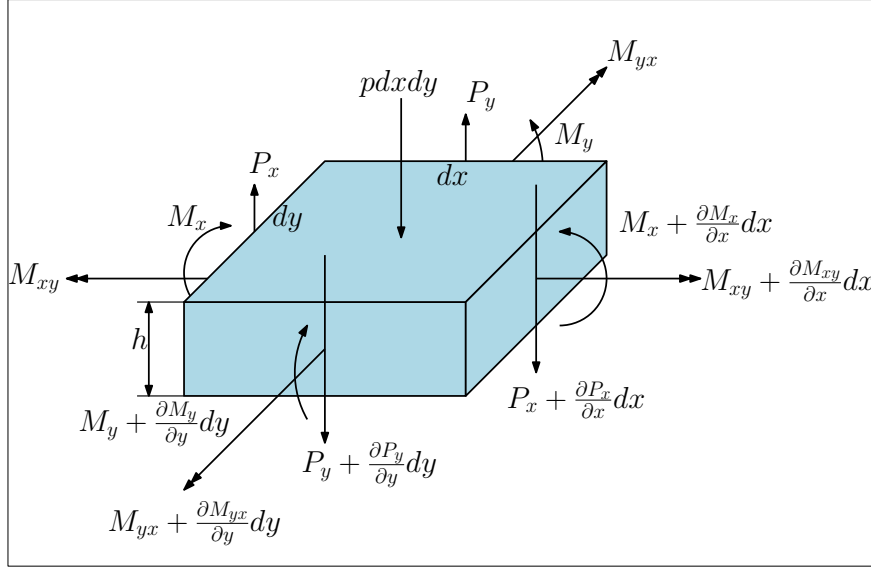
BÜKÜLEBİLİR AYNA YÜZEYİNİN MODELLENMESİ

Esnek yüzeylerin dinamik olarak modellenmesi, mekanik titreşim problemlerinin özel bir durumudur. Esnek yüzeylerin hareket dinamiğini temsil eden denklemler 3 boyutlu esnek nesnelere hareket dinamiğini temsil eden denklemlerden farklıdır. Çünkü esnek yüzeylerde, yüzeyin bir boyutu diğer boyutlarına göre ihmal edilebilecek ölçüde incedir [37].

Esnek yüzeylerin hareketlerini tanımlayan pek çok teori geliştirilmiştir. Bu esnek yüzey teorileri içerisinde en çok kullanılanı ise Kirchoff-Love esnek yüzey teorisidir [37],[36]. Bu teori Augustus Edward Hough Love tarafından Euler-Bernoulli kiriş teorisini 2 boyut için genelleştirilerek oluşturulmuştur. Ayrıca Love bu teoriyi geliştirirken Gustav Robert Kirchoff tarafından ortaya konulan kabulleri kullanmıştır. [35]

Esnek bir yüzeye ait sonsuz küçük bir $hdx dy$ elemanını etkileyen kayma kuvveti, burulma momenti, eğilme momenti ve dış kuvvetler Şekil 2.1 de verilmiştir. Birim uzunluk başına düşen M_x, M_y eğilme momentleri, σ_x, σ_y , normal gerilmelerin dağılımı sonucu oluşurken birim uzunluk başına düşen M_{xy}, M_{yx} burulma momentleri, τ_{xy}, τ_{yx} kayma gerilmeleri sonucu oluşur. Ayrıca birim uzunluğa uygulanan P_x, P_y kayma kuvvetleri, τ_{xy}, τ_{yx} kayma gerilmeleri sonucu oluşur.

$x, y, t \in R$ olmak üzere sonsuz küçük boyutlu $hdx dy$ elemanının kuvvet moment denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [46]:



Şekil 2.1 Sonsuz küçük boyutlu $h dx dy$ elemanını etkileyen kayma kuvveti, burulma momenti, eğilme momenti ve dış kuvvetler

$$-P_x dy + \left(P_x + \frac{\partial P_x}{\partial x} dx \right) dy - P_y dx + \left(P_y + \frac{\partial P_y}{\partial y} dy \right) dx + p dx dy = \rho h dx dy \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

$$\left(M_y + \frac{\partial M_y}{\partial y} dy \right) dx - M_y dx + M_{xy} dy - \left(M_{xy} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} dx \right) dy - P_y dx dy = 0 \quad (2.2)$$

$$\left(M_x + \frac{\partial M_x}{\partial x} dx \right) dy - M_x dy - M_{yx} dx + \left(M_{yx} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} dy \right) dx - P_x dx dy = 0 \quad (2.3)$$

Denklemler içerisinde gerekli sadeleştirmeler yapılarak:

$$\frac{\partial P_x}{\partial x} + \frac{\partial P_y}{\partial y} + p = \rho h \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial M_y}{\partial y} - \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - P_y = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial y} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial x} - P_x = 0 \quad (2.6)$$

elde edilir.

(2.5) ve (2.6) denklemleri P_x, P_y için çözümlenerek (2.4) de yerine yazılırsa:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial y \partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y^2} + p = \beta_1 \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

$\beta_1 \triangleq \rho h$ elde edilir [46].

Yüzeydeki noktasal yer değiştirme ve birim uzunluğun momenti arasındaki ilişki Karl F. Graff (1975) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir [81]:

$$M_x = -\beta_2 \left(\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 e}{\partial y^2} \right) \quad (2.8)$$

$$M_y = -\beta_2 \left(\frac{\partial^2 e}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} \right) \quad (2.9)$$

$$M_{xy} = -M_{yx} = \beta_2(1 - v) \frac{\partial^2 e}{\partial x \partial y} \quad (2.10)$$

$$\beta_2 \triangleq \frac{Eh^3}{12(1 - v^2)} \quad (2.11)$$

Denklemler içerisinde yer alan ve yüzeyin yapı malzemesine bağlı, E sabiti Young kat-sayısı, v sabiti Poissons oranı olarak adlandırılır. $M_{xy} = -M_{yx}$ eşitliği kullanılarak bükülebilir ayna aşağıdaki lineer kısmi türevli diferansiyel denklem (PDE) ile modellenenbilir [17],[33],[1]:

$$\beta_1 \frac{\partial^2}{\partial t^2} e(x, y, t) + \beta_2 \Delta^2 e(x, y, t) = p(x, y, t) \quad (2.12)$$

Denklem içerisinde yer alan semboller ise aşağıda verilmiştir:

β_1 : Ayna yüzeyinin yoğunluğunu sembolize etmektedir.

β_2 : Ayna yüzeyinin bükülme direncini sembolize etmektedir.

$p(x, y, t)$: Ayna yüzeyinin altında bulunan eyleyiciler tarafından oluşturulan kuvvetleri sembolize eder. x, y koordinat değişkenlerine ve t zaman değişkenine bağlıdır.

$e(x, y, t)$: ayna yüzeyindeki noktasal yerdeğiştirmeyi sembolize eder. x ve y Kartezyen koordinatların bağlı bir fonksiyondur. Ayrıca zamanla değiştiği için t zaman değişkenine de bağlıdır.

Δ^2 : Biharmonik operatörüdür. Kartezyen koordinatlar için aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [82]:

$$\Delta^2 \varphi \triangleq \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} \quad (2.13)$$

Ayrıca ayna yüzeyini modelleyen lineer kısmi türevli diferansiyel denklemin çözülebilmesi için sınır koşullarına gereksinim vardır. Kare yapıdaki ayna yüzeyinin kenarlarından desteklenmesi ile sınır koşulları aşağıdaki gibi olmaktadır [46].

$$e|_{x=0} = 0 \quad e|_{x=a} = 0 \quad (2.14)$$

$$e|_{y=0} = 0 \quad e|_{y=a} = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = 0 \quad \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} \Big|_{x=a} = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial^2 e}{\partial y^2} \Big|_{y=0} = 0 \quad \frac{\partial^2 e}{\partial y^2} \Big|_{y=a} = 0 \quad (2.17)$$

Esnek ayna yüzeyinin dinamik hareketlerini modelleyen lineer kısmi türevli diferansiyel denklem içerisinde bulunan ayna yüzeyinin noktasal yer değiştirmesi kartezyen koordinat ve zaman değişkenlerine ayrılarak aşağıdaki gibi yazılabilir. Kısmi türevli diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılan bu tekniğe "değişken ayırma" adı verilmektedir. [80]:

$$e(x, y, t) = E(x, t)T(t) \quad (2.18)$$

Benzer dönüşüm esnek ayna yüzeyine uygulanan kuvveti sembolize eden $p(x, y, t)$ fonksiyonuna da uygulanırsa:

$$p(x, y, t) = E(x, y)\tilde{T}(t) \quad (2.19)$$

elde edilir.

Teorem 2.1 [83] $\mathcal{L}(u) \triangleq \left[\frac{\partial}{\partial t^2} u + \Delta^2 u \right]$ operatörü ;

$$\mathcal{L}(u + v) = \mathcal{L}(u) + \mathcal{L}(v) \quad (2.20)$$

ve c sabit bir sayı olmak üzere;

$$\mathcal{L}(cu) = c\mathcal{L}(u) \quad (2.21)$$

eşitliklerini sağladığı için lineer bir türev operatörüdür.

Elde edilen (2.18) ve (2.19) eşitlikleri (2.12) denklemi içerisinde yerine yerleştirilirse ve Teorem 2.1 ile verilen özellikler kullanılırsa:

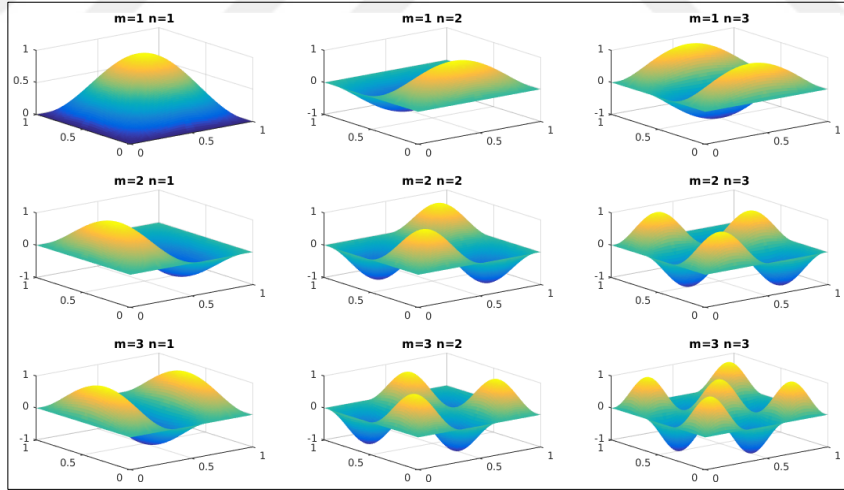
$$\frac{\partial}{\partial t^2} T(t) = -\frac{\beta_2 \Delta^2 E(x, y)}{\beta_1 E(x, y)} T(t) + \frac{1}{\beta_1} \tilde{T}(t) \quad (2.22)$$

elde edilir.

Elde edilen denklem içerisinde bulunan zaman ve Kartezyen koordinatlara bağlı bileşenler ayrı taraflara toplanırsa:

$$\frac{1}{T(t)} \frac{\partial}{\partial t^2} T(t) - \frac{1}{\beta_1} \frac{\tilde{T}(t)}{T(t)} = -\frac{\beta_2 \Delta^2 E(x, y)}{\beta_1 E(x, y)} = -\lambda^2 \quad (2.23)$$

Eşitliğin sol tarafı sadece t zaman değişkenine, eşitliğin sağ tarafı ise sadece x, y Kartezyen koordinat değişkenlerine bağlıdır. Bu eşitliğin sağlanabilmesi için iki tarafında $-\lambda^2$ gibi bir sabite eşit olması gerekmektedir.



Şekil 2.2 Esnek ayna yüzeyinin ilk 9 modu

Teorem 2.2 [83] \mathcal{L} lineer bir türev operatörü, $c_1, c_2 \in \mathbb{N}^+$,

$\mathcal{L}u = f_1$ lineer kısmi türevli diferansiyel denklemin çözümü u_1 ,

$\mathcal{L}u = f_2$ lineer kısmi türevli diferansiyel denklemin çözümü u_2 ,

olmak üzere;

$u_3 = c_1u_1 + c_2u_2$ fonksiyonu $\mathcal{L}u = c_1f_1 + c_2f_2$ lineer kısmi türevli diferansiyel denklemin çözümüdür.

Teorem 2.2 ile verilen özellik (2.12) lineer kısmi türevli diferansiyel denklemine uygulanırsa, $e(x, y, t)$ çözümü ve $p(x, y, t)$ yüzeye uygulanan kuvvet aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$e(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} E_{mn}(x, y)T_{mn}(t) \quad (2.24)$$

$$p(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} E_{mn}(x, y)\tilde{T}_{mn}(t) \quad (2.25)$$

Teorem 2.3 (Fourier Dönüşümü) [84] İki boyutlu $f(x, y)$ fonksiyonu birbirine ortogonal

$$\xi_{mn}(x, y) = \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \quad m, n, a \in \mathbb{N}^+ \quad (2.26)$$

Fourier bileşenlerinin toplamı ile ifade edilebilir:

$$f(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} c_{mn}\xi_{mn}(x, y) \quad (2.27)$$

$$c_{mn} = \int_0^a \int_0^a f(x, y)\xi_{mn}(x, y)dx dy \quad (2.28)$$

(2.24) ve (2.25) denklemleri içerisinde yer alan $E_{mn}(x, y)$ fonksiyonu aşağıda verilen Fourier komponentleri şeklinde kabul edilirse:

$$E_{mn}(x, y) = \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \quad m, n, a \in \mathbb{N}^+ \quad (2.29)$$

elde edilir. Bu çözüm ayrıca (2.23) eşitliğini ve (2.14), (2.15), (2.16), (2.17) ile verilen sınır koşullarını sağlar (Şekil 2.2).

Ayrıca Fourier dönüşümünün sağladığı (2.28) özelliği ile:

$$T_{mn}(t) = \frac{4}{a^2} \int_0^a \int_0^a e(x, y, t) E_{mn}(x, y) dx dy \quad (2.30)$$

şeklinde hesaplanabilir.

$e(x, y, t)$ çözümü için uygulanan Fourier komponentlerine ayrıştırma işlemi ayna yüzeyine uygulanan kuvveti sembolize eden $p(x, y, t)$ için de uygulanırsa: [80]:

$$\tilde{T}_{mn}(t) = \frac{4}{a^2} \int_0^a \int_0^a p(x, y, t) E_{mn}(x, y) dx dy \quad (2.31)$$

elde edilir.

Tanım 2.4 Dirac Delta Fonksiyonu: Aşağıdaki gibi tanımlanan Dirac Delta fonksiyonu [85]:

$$\delta(x) = \begin{cases} +\infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1,$$

Öteleme özelliğine sahiptir [84]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x - x_0) dx = f(x_0). \quad (2.33)$$

Ayna yüzeyi altında bulunan her bir eyleyici, esnek ayna yüzeyinin çok küçük bir alanına temas etmektedir. Temas yüzeyinin çok küçük olması sebebiyle , eyleyicilerin esnek ayna yüzeyine noktasal olarak temas ettiği kabul edilebilir. Böylece eyleyicilerin ayna yüzeyine uyguladığı kuvvetler dirac delta fonksiyonlarının toplamı şeklinde yazılabilir [86]:

$$p(x, y, t) = \sum_{i=1}^{N_a} \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) p_i(t) \quad (2.34)$$

Denklem içerisinde bulunan $p_i(t)$ i 'nci eyleyici tarafından uygulanan skaler kuvvet değerini sembolize etmektedir ve zamana bağlı olarak değişmektedir.

Dirac delta fonksiyonunun (2.33) ile verilen öteleme özelliği kullanılarak:

$$\tilde{T}_{mn}(t) = \frac{4}{a^2} \sum_{i=1}^{N_a} E_{mn}(x_i, y_i) p_i(t) dx dy \quad (2.35)$$

olarak hesaplanabilir.

Bükülebilir aynanın dinamik modeli için oluşturulan durum-uzay gösterimi ise aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\frac{\partial}{\partial t} x_{mn} = A_{mn} x_{mn} + B_{mn} u_{dm} \quad (2.36)$$

Dinamik sistemin durumları:

$$x_{mn} = \left[T_{mn}(t) \quad \frac{\partial}{\partial t} T_{mn}(t) \right]^T \quad (2.37)$$

Dinamik sistemin girişleri:

$$u_{dm} = \left[p_1(t) \quad \cdots \quad p_{N_a}(t) \right]^T \quad (2.38)$$

ve bunlar ile ilişkili sistem matrisleri aşağıda verildiği gibi tanımlanmıştır:

$$A_{mn} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\lambda_{mn}^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$$B_{mn} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \frac{1}{\beta_1} \frac{4}{a^2} E_{mn}(x_1, y_1) & \cdots & \frac{1}{\beta_1} \frac{4}{a^2} E_{mn}(x_{N_a}, y_{N_a}) \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Oluşturulan dinamik model çıkışlarından bükülebilir ayna yüzeyi elde edilmek istenildiğinde ise (2.24) eşitlik kullanılabilir.

ATMOSFERİK TÜRBÜLANS BOZULMASININ MODELLENMESİ

Uyarlamalı optik sistemler için optimal kontrolcü tasarımı yapılırken bozucu etki olan atmosferik türbülans bozulmasının da modellenmesi gerekmektedir. Atmosferik türbülans sebebiyle oluşan $\phi(r, \theta, t)$ yüzey bozulması (3.1) eşitliği kullanılarak, birbirine ortogonal 2 boyutlu $Z_j(r, \theta)$ Zernike yüzey polinomlarının toplamı (Zernike dönüşümü) ile gösterilebilir [87],[88]:

$$\phi(r, \theta, t) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j(t) Z_j(r, \theta) \quad (3.1)$$

Birim daire içerisinde seçilen ve zamanla değişen bir bozulma yüzeyini, Zernike polinomlarının toplamları şeklinde ifade etmek için polinom katsayıları denklem (3.2) kullanılarak hesaplanabilir [87],[88]:

$$a_j(t) = \int \int \phi(r, \theta, t) Z_j(r, \theta) r dr d\theta \quad (3.2)$$

Birim daire üzerinde tanımlı Zernike polinomları Robert J. Noll tarafından [87] aşağıdaki (tanım (3.3)) gibi tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned}
Z_{cift\ j}(r, \theta) &\triangleq \sqrt{n+1}R_n^m(r)\sqrt{2}\cos(m\theta), \quad m \neq 0 \\
Z_{tek\ j}(r, \theta) &\triangleq \sqrt{n+1}R_n^m(r)\sqrt{2}\sin(m\theta), \quad m \neq 0 \\
Z_j &\triangleq \sqrt{n+1}R_n^0(r), \quad m = 0
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Ayrıca tanım içerisinde bulunan $R_n^m(r, \theta)$ fonksiyonu tanım (3.4) ile verilmiştir[87]:

$$R_n^m(r) \triangleq \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! [\frac{n+m}{2} - k]! [\frac{n-m}{2} - k]!} r^{n-2k} \tag{3.4}$$

Ancak kontrolcü tasarımı yapılırken kontrolcünün numerik olarak gerçekleştirilebilmesi için sonsuz sayıda Zernike polinomunun kullanılması mümkün değildir. İlk 15 Zernike polinomu kullanılarak atmosferik türbülans sebebiyle oluşan bozulmaların ortalama olarak %92'si modellenenbilir [15]. Polar koordinatlarda tanımlı ilk 15 Zernike polinomu tablo 3.1'de verildiği gibidir [89],[64]:

Çizelge 3.1 İlk 15 Zernike polinomu

j	n	m	Z_j
1	0	0	1
2	1	1	$2r\cos(\theta)$
3	1	1	$2r\sin(\theta)$
4	2	0	$\sqrt{3}(2r^2 - 1)$
5	2	2	$\sqrt{6}r^2\sin(2\theta)$
6	2	2	$\sqrt{6}r^2\cos(2\theta)$
7	3	1	$\sqrt{8}(3r^3 - 2r)\sin(\theta)$
8	3	1	$\sqrt{8}(3r^3 - 2r)\cos(\theta)$
9	3	3	$\sqrt{8}r^3\sin(3\theta)$
10	3	3	$\sqrt{8}r^3\cos(3\theta)$
11	4	0	$\sqrt{5}(6r^4 - 6r^2 + 1)$
12	4	2	$\sqrt{10}(4r^4 - 3r^2)\cos(2\theta)$
13	4	2	$\sqrt{10}(4r^4 - 3r^2)\sin(2\theta)$
14	4	4	$\sqrt{10}r^4\cos(4\theta)$
15	4	4	$\sqrt{10}r^4\sin(4\theta)$

Atmosferik türbülans bozulmasının modellenmesi için durum değişkenleri Zernike polinomlarının zamanla değişen katsayıları $x_{tur} = [a_1\ a_2\ \dots\ a_{15}]^T$ ve sistem girişleri Gaussçu

beyaz gürültüler $w_{tur} = [w_1 w_2 \dots w_{15}]^T$ olan (3.5) dinamik sistemi oluşturulmuştur [15],[90]:

$$\dot{x}_{tur} = A_{tur}x_{tur} + B_{tur}w_{tur} \quad (3.5)$$

Atmosferik türbülans modeli için oluşturulan (3.5) durum-uzay gösteriminin A_{tur} dinamik matrisi, her bir Zernike polinomu için oluşturulan ve (3.6) eşitliği ile verilen alçak-geçiren filtre yapılarını içermektedir:

$$H_j(s) = \frac{2\pi f_{c_j}}{s + 2\pi f_{c_j}} \quad (3.6)$$

Alçak-geçiren filtre yapıları için f_{c_j} kesme frekans değerleri ise Jean-Marc Conan vd. (1995) tarafından verilen sezgisel eşitlik (3.7) kullanılarak bulunmuştur:

$$f_{c_j} \cong 0.3(n_j + 1) \frac{V}{D} \quad (3.7)$$

Yukarıdaki (3.7) denkleminde V atmosfer rüzgar hızı, D sistem giriş mercek çapıdır. r_0 Fried parametresi olmak üzere atmosferik türbülans için Zernike polinomları arasındaki kovaryans değerleri denklem (3.8) ile verilmiştir [87]:

$$\begin{aligned} P_\phi(\infty) &= E\{a_i a_j\} \\ &= 0.0072 \times (-1)^{(n_i+n_j-2 \times m_i)/2} \left(\frac{D}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \\ &\quad \times \sqrt{(n_i + 1)(n_j + 1)} \pi^{\frac{8}{3}} \\ &\quad \times \frac{\Gamma\left(\frac{14}{3}\right) \Gamma\left(\frac{n_i+n_j-\frac{5}{3}}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n_i-n_j+\frac{17}{3}}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n_j-n_i+\frac{17}{3}}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n_i+n_j+\frac{23}{3}}{2}\right)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

B_{tur} giriş matrisi ise kararlı-hal Lyapunov denklemi (denklem (3.9)) ve kovaryans matrisi ile bulunmuştur [15],[90]:

$$B_{tur}B'_{tur} = -(A_{tur}P_{\phi}(\infty) + P_{\phi}(\infty)A_{tur}') \quad (3.9)$$

Oluşturulan dinamik model çıkışlarından bozulma yüzeyi elde edilmek istenildiğinde ise (3.1) eşitlik kullanılabilir.



UYARLAMALI OPTİK SİSTEMLER İÇİN OPTİMAL KONTROLCÜ GELİŞTİRİLMESİ

Bükülebilir aynayı dinamik olarak modelleyen sonsuz boyutlu lineer kısmi türevli diferansiyel denklem (PDE), uygulanan modal analiz yöntemi ile sonsuz sayıda adi türevli diferansiyel denklem (ODE) kümesi ile gösterilmiştir [91],[80]

$$A_{dm} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & A_{12} & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & A_{21} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$B_{dm} = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ B_{21} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Bükülebilir ayna modelinin çözümleri olan mod şekilleri ile atmosferik türbülans bozulmasının mod şekilleri olan Zernike polinomları birbirinden farklıdır. Bu sebeple ayna modelinin çözümü olan mod şekilleri (3.1) denklemini kullanılarak Zernike polinomları cinsinden ifade edilmiştir [87],[88]:

$$\vartheta_{j,mn} = \int \int E_{mn}(r, \theta) Z_j(r, \theta) r dr d\theta \quad (4.3)$$

Bükülebilir ayna modelinin durumları için C_{tr} dönüşüm matrisi ise aşağıda gibi oluşturulmuştur [87],[88]:

$$C_{j,mn} = \begin{bmatrix} \vartheta_{j,mn} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$C_{tr} = \begin{bmatrix} C_{1,11} & C_{1,12} & C_{1,21} & \cdots \\ C_{2,11} & C_{2,12} & C_{2,21} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ C_{N_z,11} & C_{N_z,12} & C_{N_z,21} & \cdots \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Ancak sonsuz sayıda adi türevli diferansiyel denklem kümesi için tasarlanacak sonsuz boyutlu kontrolcü tasarımının nümerik olarak gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Sonsuz boyutlu matrisleri ile verilen dinamik sistem için modların frekans değerleri, $\lambda_{11}^2 < \lambda_{12}^2 = \lambda_{21}^2 < \dots$ şeklinde sıralanmıştır. Sıralama işleminden sonra yüksek frekanslı modlar A_{dm} , B_{dm} , C_{tr} sistem matrislerinden çıkartılmıştır (modal kesme) [56].

N_a ayna yüzeyi altında bulunan eyleyici sayısı, N_m sistemin modellenmesi için kullanılan mod sayısı, N_z atmosferik türbülansın modellenmesi için seçilen Zernike polinom sayısı olmak üzere elde edilen sınırlı boyutlu \bar{A}_{dm} , \bar{B}_{dm} , \bar{C}_{tr} sistem matrisleri, $\bar{x}_{dm} \in \mathbb{R}^{2N_m}$ sistem durumları, $u_{dm} \in \mathbb{R}^{N_a}$ sistem girişleri, $y_{ao} \in \mathbb{R}^{N_z}$ sistem çıkışları ile;

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{tur} \\ \dot{\bar{x}}_{dm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{tur} & 0 \\ 0 & \bar{A}_{dm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{tur} \\ \bar{x}_{dm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{tur} & 0 \\ 0 & \bar{B}_{dm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{tur} \\ u_{dm} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$y_{ao} = \begin{bmatrix} I_{tur} & \bar{C}_{tr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{tur} \\ \bar{x}_{dm} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

uyarlamalı optik dinamik sistemi oluşturulmuştur.



4.4 Uyarlamalı Optik Sistemler için LQG Kontrolcü Tasarımı

Linear Karesel Gaussian (LQG) kontrol problemi;

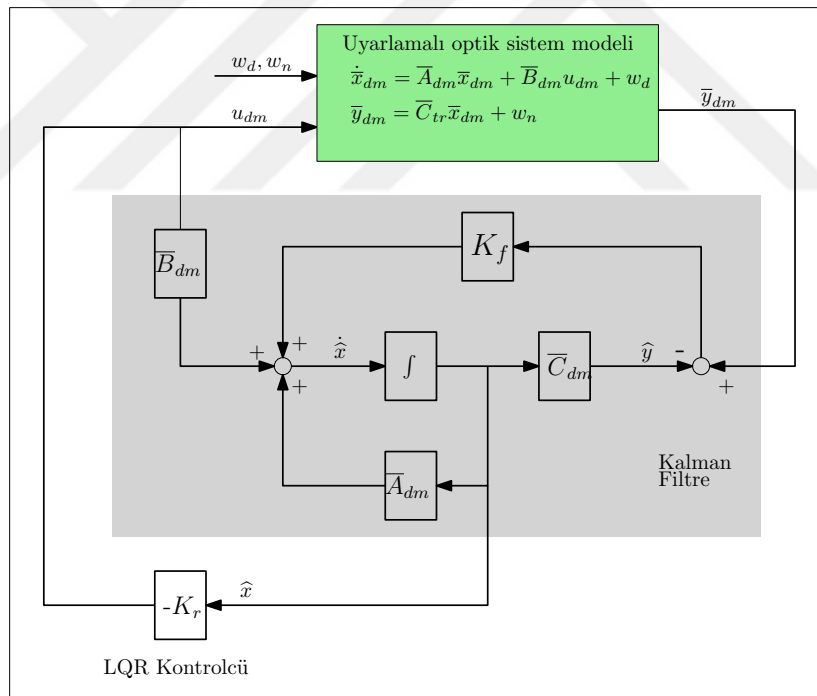
$$\dot{x} = Ax + Bu + w_d \quad (4.8)$$

$$y = Cx + w_n \quad (4.9)$$

şeklinde verilen genelleştirilmiş dinamik sistem için,

$$J_r = \int_0^{\infty} [y^T Q y + u^T R u] dt \quad (4.10)$$

maliyet fonksiyonunu minimize eden optimal kontrolcü ve gözleyici katsayılarının bulunmasıdır. Burada w_d ve w_n , varyans değerleri $W \geq 0, V \geq 0$ olan beyaz gaussian gürültülerdir [56].



Şekil 4.1 LQG Kontrolcü Blok Diagramı

LQG optimizasyonu ile K_f matrisi hesaplanan ve y sistem çıkışlarından x sistem durumlarını kestiren,

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + K_f(y - C\tilde{x}) \quad (4.11)$$

gözleyicisine literatürde Kalman Filtresi adı da verilmektedir [92]. 4.8, 4.9 dinamik sistemi için LQG probleminin çözümü olan K_f sabit matrisi,

$$K_f = YC^T V^{-1} \quad (4.12)$$

şekilde yazılırsa, $Y = Y^T \geq 0$ sabit matrisi,

$$YA^T + AY - YC^T V^{-1} CY + W = 0 \quad (4.13)$$

şeklinde verilen cebirsel riccati denkleminin çözümüdür [56].

4.11 gözleyicisi tarafından kestirilen \tilde{x} durum değişkenleri ile tam durum geribesleme kontrolcü yapısı aşağıdaki gibi verilebilir:

$$u = -K_r \tilde{x} \quad (4.14)$$

\tilde{x} durum değişkenleri elde edildikten sonra 4.10 maliyet fonksiyonunu minimize eden $-K_r$ sabit matrisinin hesaplanmasına literatürde Lineer Karesel Regülatör (LQR) optimizasyonu adı da verilmektedir [56]. 4.8, 4.9 dinamik sistemi için LQR probleminin çözümü olan K_r sabit matrisi,

$$K_r = R^{-1} B^T X \quad (4.15)$$

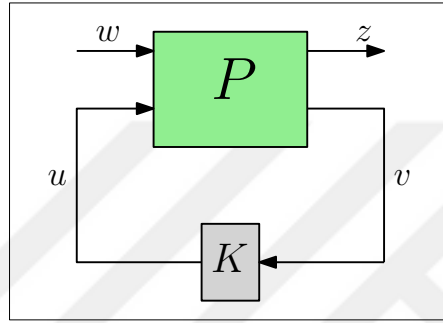
şekilde yazılırsa, $X = X^T \geq 0$ sabit matrisi,

$$A^T X + XA - XBR^{-1}B^T X + Q = 0 \quad (4.16)$$

şeklinde verilen cebirsel riccati denkleminin çözümüdür [56]. Elde edilen K_r ve K_f sabit matrisleri ile şekil 4.1'de verilen kontrol yapısı oluşturulabilir.

4.5 H Sonsuz Optimal Kontrolcü Tasarımı

Dinamik bir sistemi karşılayacak uygun modelin çıkarılmasını takiben, bu sistemin belli performans ölçütleri baz alınarak kontrol edilmesi, bozucu etkisinin en aza indirilmesi ve sistem eğer kararsız ise kararlılaştırma gereklilikleri boy göstermektedir. Sistemin bütün frekanslardaki cevabının en büyüğüne karşılık gelen \mathcal{H}_∞ normunun minimizasyonu ile bu ölçütler karşılanabilmektedir. \mathcal{H}_∞ norm optimizasyonu uygulanacak kapalı çevrim dinamik sistemler için Şekil 4.2 de verilen genel blok diyagram yapısı oluşturulabilir [93].



Şekil 4.2 Tam Durum Geribeslemeli Kontrolcü Blok Diyagramı

Şekil 4.2'de verilen bu yapının matematiksel gösterimi ise

$$\begin{bmatrix} z \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$u = K(s)v \quad (4.18)$$

denklemler ile verilebilir [93].

u kontrol sinyalleri, v ölçüm sinyalleri olmak üzere, w gürültü sinyalleri ile z minimize edilmek istenilen hata sinyalleri arasındaki ilişki,

$$z = F_l(P, K)w \quad (4.19)$$

$$F_l(P, K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \quad (4.20)$$

ile verilmiştir [93].

Standart \mathcal{H}_∞ kontrol problemi 4.20 denkleminde verilen $F_l(P, K)$ dinamik sisteminin \mathcal{H}_∞ normunu minimize eden ve 4.17, 4.18 denklemleri ile verilen kapalı çevrim dinamik sistemini kararlı kılan tüm K kontrolcülerini bulmayı hedefler. Denklem 4.20'de verilen dinamik sistemin bütün frekanslardaki cevabının en büyüğüne karşılık gelen \mathcal{H}_∞ normunun minimizasyonu

$$\|F_l(P, K)\|_\infty = \max_w \bar{\sigma}(F_l(P, K)(jw)) \quad (4.21)$$

ile verilebilir [56].

4.17, 4.18 sistemini kararlı hale getiren tüm K kontrolcüleri için $\|F_l(P, K)\|_\infty$ normunun minimum değeri γ_{min} olsun. Pratikte \mathcal{H}_∞ normunun optimal değerini bulmak yerine yerine $\gamma > \gamma_{min}$ ve $\|F_l(P, K)\|_\infty < \gamma$ şartlarını sağlayan bir alt-optimal K kontrolcüsü bulmak hesaplama maliyeti açısından daha ucuzdur.

Pascal Gahinet ve Pierre Apkarian (1994) yapmış oldukları çalışma \mathcal{H}_∞ alt-optimal kontrolcülerin bulunması problemini lineer matris eşitsizlikleri ile vermiştir. $X_\infty \geq 0$ matrisi 4.22 Cebirsel Riccati Eşitsizliğinin çözümü, $Y_\infty \geq 0$ matrisi 4.23 Cebirsel Riccati Eşitsizliğinin bir çözümü olsun. Ayrıca X_∞ ve Y_∞ matrisleri 4.24 eşitsizliğini de sağlasın.

$$A^T X_\infty + X_\infty A + C_1^T C_1 + X_\infty (\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T) X_\infty < 0 \quad (4.22)$$

$$A Y_\infty + Y_\infty A^T + B_1 B_1^T + Y_\infty (\gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2) Y_\infty < 0 \quad (4.23)$$

$$\rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2 \quad (4.24)$$

$Q(s)$ kararlı ve $\|Q\|_\infty < \gamma$ şartını sağlayan bir transfer fonksiyonu olmak üzere olmak üzere tüm $K = F_l(K_c, Q)$ kontrolcüleri

$$K_c(s) \stackrel{s}{=} \left[\begin{array}{c|cc} A_\infty & -Z_\infty L_\infty & Z_\infty B_2 \\ \hline F_\infty & 0 & I \\ -C_2 & I & 0 \end{array} \right] \quad (4.25)$$

$$F_\infty = B_2^T X_\infty, L_\infty = -Y_\infty C_2^T, Z_\infty = (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1} \quad (4.26)$$

$$A_\infty = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_\infty + B_2 F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2 \quad (4.27)$$

ile verilebilir. $Q(s) = 0$ için,

$$K(s) \stackrel{s}{=} \left[\begin{array}{c|c} A_\infty & -Z_\infty L_\infty \\ \hline F_\infty & 0 \end{array} \right] \quad (4.28)$$

kontrolcüsü genelleştirilmiş $P(s)$ dinamik sistemi ile eşit sayıda durum değişkeni içerir.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

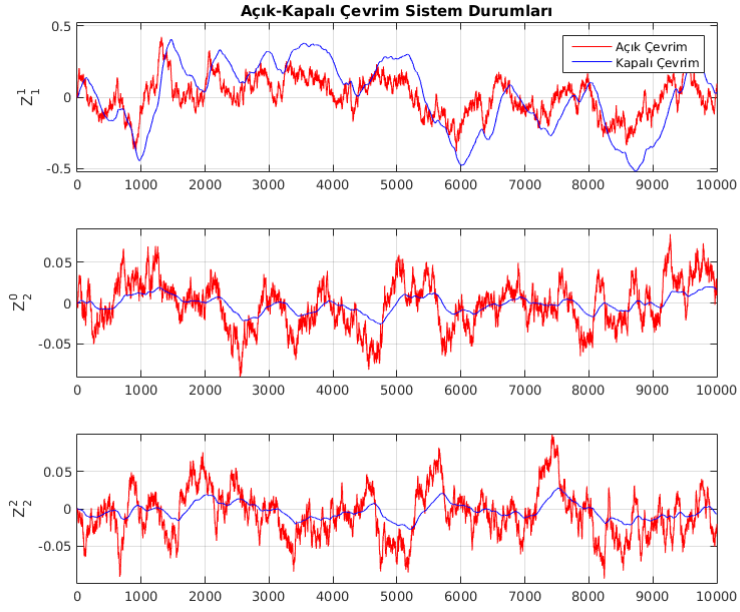
Bu çalışmada kare şeklindeki bükülebilir bir aynanın, modal analiz ve model indirgeme yöntemleri ile sonlu boyutlu ODE modeli oluşturulmuştur. Ayrıca optimal kontrolcü tasarımı için gerekli olan atmosferik türbülansın karakteristik modeli Zernike polinomlarının toplamı şeklinde ifade edilmiştir. Oluşturulan uyarlamalı optik sistemin temel amacı Zernike polinomları ile ifade edilen yüzey bozulmasındaki Zernike polinomlarının katsayılarını minimize etmektir.

Simulasyon çalışması için aynaya ve atmosfere ait parametreler aşağıda verildiği gibidir:

Çizelge 5.1 Simulasyon parametreleri

Parametre	Tanım	Değer
β_1	Bükülebilir ayna yüzeyinin yoğunluğu (kg.m^{-2})	16.3
β_2	Bükülebilir ayna yüzeyinin bükülme direnci (Nm)	84
a	Bükülebilir ayna yüzeyinin kenar uzunluğu (m)	1
N_a	Bükülebilir aynanın eyleyici sayısı	144
N_m	Bükülebilir ayna modelinin mod sayısı	6
N_z	Türbülans bozulma modelinin Zernike polinom sayısı	14

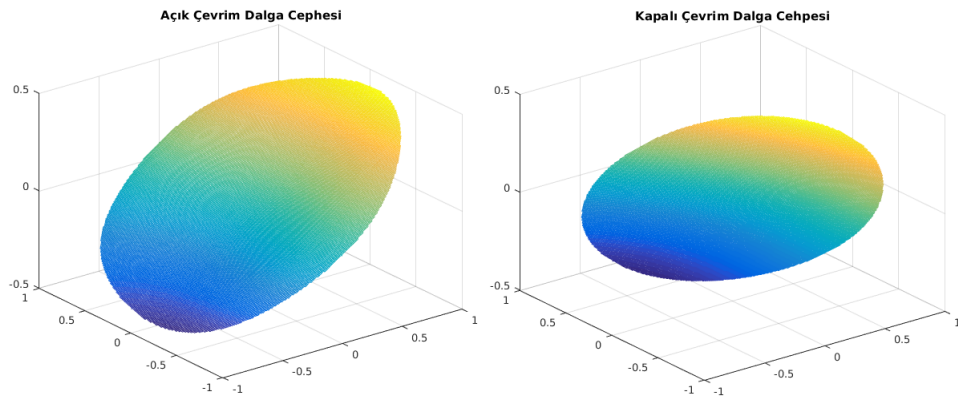
Karşılaştırma için atmosferik türbülansın dinamik yapısını ihmal eden Lineer Karesel Gaussian kontrolcü yapısı oluşturulmuştur. LQG optimizasyonu için oluşturulan 4.13 ve 4.16 cebirsel riccati denklemlerin çözümleri Matlab® yazılımı kullanılarak bulunmuştur [94]. Uyarlamalı optik sistem modeli için tasarlanacak kontrolcü yapılarının temel amacı Zernike



Şekil 5.1 LQG Kontrolcü ile Kapalı Çevrim Sistemin 3 Adet Performans Çıkışı

polinomlarının katsayılarını minimize etmektir. Böylece atmosfer sebebiyle oluşan bozulmaların etkisi ortadan kaldırılabilir. Kontrolcünün performansını göstermek için 3 adet Zernike polinomunun zamana bağlı katsayıları seçilmiştir. Bu kontrolcü yapısı için Z_1^1 , Z_0^2 ve Z_2^2 Zernike polinomlarının zamana bağlı katsayıları Şekil 5.1'de verilmiştir.

Atmosferik türbülans sebebiyle oluşan anlık bir yüzey bozulması ve LQG kontrolcü yapısı ile birlikte AO sistemin başarısı Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

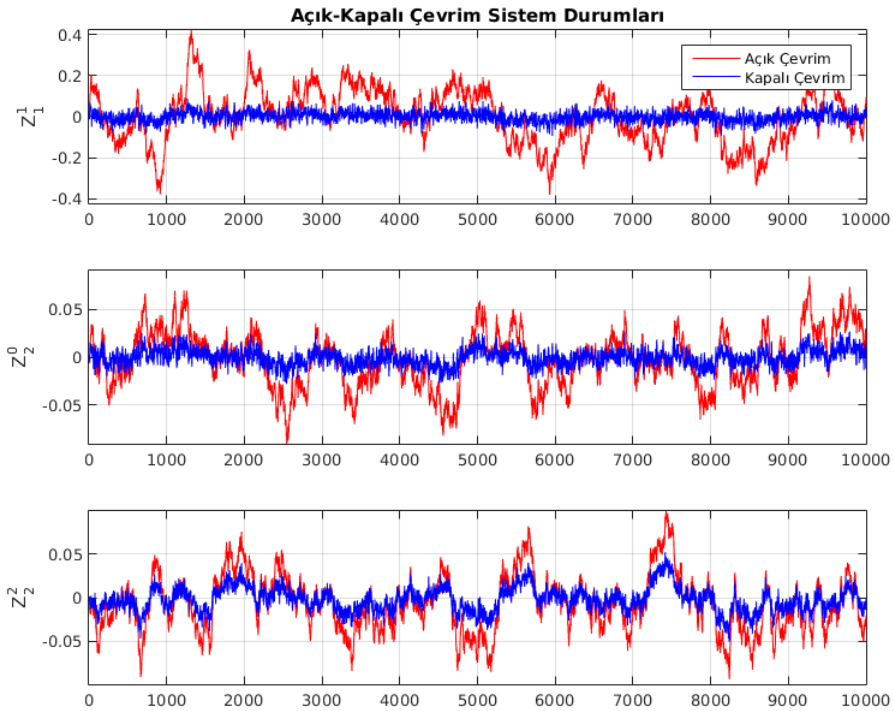


Şekil 5.2 LQG Kontrolcü ile Açık Çevrim Sistem Yüzey Şekli

Şekil 5.1'de görüldüğü üzere LQG kontrolcü yapısı yüksek dereceli Zernike polinomlarını bastırabilmektedir. Ancak düşük dereceli olan Zernike Polinomları üzerindeki etkisi düşük-

tür.

Çalışmanın asıl amacı olarak, Denklem 4.6 ve 4.7’te verilmiş olan sistem için, performans çıkışları ile bozucu girişleri arasındaki transfer fonksiyonunun sonsuz normunu en iyileştirmeye yönelik \mathcal{H}_∞ kontrolcü tasarlanmıştır. Burada performans çıkışı olarak Zernike polinomu katsayıları, bozucu girişi atmosferik türbülans bozulmalarıdır. Kapalı çevrim sistemi kararlılaştıracak, performans çıkışları ile bozucu girişleri arasındaki transfer fonksiyonunun sonsuz normunu önceden belirlenen pozitif bir γ değerinden küçük kılacak, $\|P_{CL}(s)\|_\infty < \gamma$, \mathcal{H}_∞ kontrolcüsü Pascal Gahinet ve Pierre Apkarian (1994) çalışmasından yararlanılan MATLAB® hinfsvn fonksiyonu kullanılarak tasarlanmıştır. Bu kontrolcü yapısı için Z_1^1 , Z_0^2 ve Z_2^2 Zernike polinomlarının zamana bağlı katsayıları Şekil 5.3’de verilmiştir.

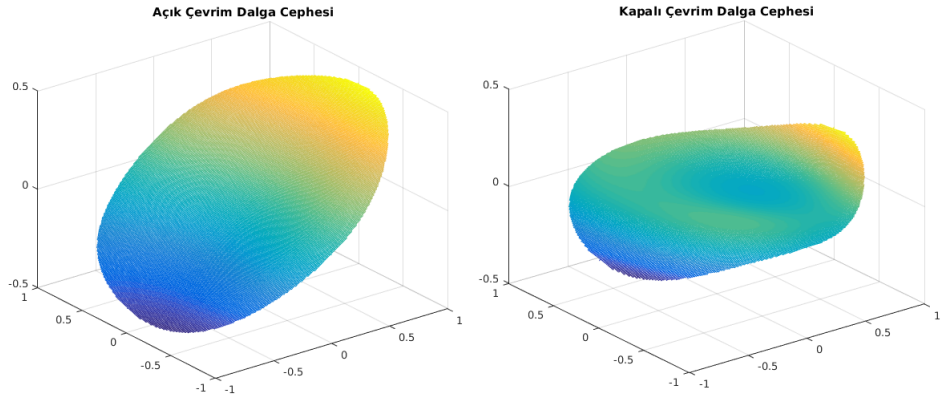


Şekil 5.3 H Sonsuz Kontrolcü ile Kapalı Çevrim Sistemin 3 Adet Performans Çıkışı

Atmosferik türbülans sebebiyle oluşan anlık bir yüzey bozulması ve \mathcal{H}_∞ kontrolcü yapısı ile birlikte AO sistemin başarısı Şekil 5.4’de gösterilmiştir.

Şekil 5.3’de görüldüğü üzere \mathcal{H}_∞ kontrolcü yapısı düşük dereceli Zernike polinomlarını bastırabilmektedir. Ancak yüksek dereceli olan Zernike Polinomları üzerindeki etkisi düşük-

tür.



Şekil 5.4 H Sonsuz Kontrolcü ile Açık Çevrim Sistem Yüzey Şekli

Gelecekteki çalışmalarda, bu tip kontrolcü tasarımı farklı performans kriterlerince genişletilerek uygulaması yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Vdovin, G., Soloviev, O., Loktev, M., Savenko, S. ve Dziechciarczyk, L., (2011). "Optimal correction and feedforward control of low-order aberrations with piezoelectric and membrane deformable mirrors", SPIE Optical Engineering+ Applications, 81650W–81650W.
- [2] Raynaud, H., Kulcsár, C., da Silva, C. C. ve Conan, J., (2008) "Multirate LQG AO control", SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation, 701538–701538.
- [3] Paschall, R. N., Von Bokern, M. A. ve Welsh, B. M., (1991). "Design of a linear quadratic Gaussian controller for an adaptive optics system", Decision and Control, 1991., Proceedings of the 30th IEEE Conference on, 1991.
- [4] Kolmogorov, A. N., (1941). "Dissipation of energy in locally isotropic turbulence", Dokl. Akad. Nauk SSSR, 32:16–18.
- [5] Sommerfeld, A., (1908) "Ein beitrag zur hydrodynamischen erklärung der turbulenten fluessigkeitsbewegungen", Atti del, 4:116–124.
- [6] Stokes, G. G., (1851). On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums, Pitt Press, United States.
- [7] Ellenbroek, R. M. L., (2011). Adaptive deformable mirror dynamics and modular control, Delft University of Technology, Delft.
- [8] Hardy, J. W., (1998). Adaptive optics for astronomical telescopes, Oxford University Press, Oxford.
- [9] Kaimal, J., (1976). "Turbulence structure in the convective boundary layer", Journal of the Atmospheric Sciences, 33(11):2152–2169.
- [10] Kukharets, V. ve Tsvang, L., (1980). "Structure parameter of the refractive index in the atmospheric boundary layer", Academy of Sciences, USSR, Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 16:73–77.
- [11] Good, R., Beland, R., Murphy, E., Brown, J. ve Dewan, E., (1988). "Atmospheric models of optical turbulence", SPIE, 928:165–186.
- [12] Hufnagel, R. E., (1978). "Propagation through atmospheric turbulence", The Infrared Handbook, 6:1–56.

- [13] De Karman, T. ve Howarth, L., (1938). "On the statistical theory of isotropic turbulence", içinde Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 164:192–215.
- [14] Azar, D. T., Gatinel, D. ve Hoang-Xuan, T., Refractive Surgery, Elsevier Mosby, 2007.
- [15] Baudouin, L., Prieur, C., Guignard, F. ve Arzelier, D., (2008). "Robust control of a bimorph mirror for adaptive optics systems", Applied optics, 47(20):3637–3645.
- [16] Miller, D. W. ve Grocott, S. C., (1999). "Robust control of the multiple mirror telescope adaptive secondary mirror", Optical Engineering, 38(8):1276–1287.
- [17] Ruppel, T., Osten, W. ve Sawodny, O., (2011). "Model-based feedforward control of large deformable mirrors", European Journal of Control, 17(3):261–272.
- [18] Andersen, T., Ardeberg, A. ve Owner-Petersen, M., (2003). "Euro50: design study of a 50 m adaptive optics telescope", Lund Observatory.
- [19] Le Gargasson, J.-F., Glanc, M. ve Léna, P., (2001). "Retinal imaging with adaptive optics", Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IV-Physics, 2(8):1131–1138.
- [20] Smith, B. W. ve Suzuki, K., (2007). Microlithography: science and technology, CRC press.
- [21] Booth, M. J., (2014). "Adaptive optical microscopy: the ongoing quest for a perfect image", Light: Science & Applications, 3(4):165.
- [22] Booth, M. J., (2007). "Adaptive optics in microscopy", Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 365(1861):2829–2843.
- [23] Wang, J.-L., Chen, T.-Y., Chien, Y.-H. ve Su, G.-D. J., (2009). "Miniature optical autofocus camera by micromachined fluoropolymer deformable mirror", Optics express, 17(8): 6268–6274.
- [24] Roggemann, M. C. ve Lee, D. J., (1998). "Two-deformable-mirror concept for correcting scintillation effects in laser beam projection through the turbulent atmosphere", Applied Optics, 37(21):4577–4585.
- [25] Kulcsár, C., Raynaud, H.-F., Petit, C. ve Conan, J.-M., (2012). "Minimum variance prediction and control for adaptive optics", automatica, 48(9):1939–1954.
- [26] Geary, J. M., (1995) Introduction to wavefront sensors, SPIE Optical Engineering Press, London.
- [27] Li, X. ve Jiang, W., (2002). "Comparing zonal reconstruction algorithms and modal reconstruction algorithms in adaptive optics system", SPIE, 4825:121–130.

- [28] Chanan, G., (2000). "Principles of Wavefront Sensing and Reconstruction", Center for Adaptive Optics (CfAO) Proceedings: Summer School on Adaptive Optics, Santa Cruz.
- [29] Luke, D. R., Burke, J. V. ve Lyon, R. G. (2002). "Optical wavefront reconstruction: Theory and numerical methods", *SIAM review*, 44(2):169–224.
- [30] Gerchberg, R. W. ve Saxton, W. O., (1972). "Practical Algorithm For Determination Of Phase From Image And Diffraction Plane Pictures", *OPTIK*, 35(2):237.
- [31] Asch, M. ve Bercovier, M, (1994). "A mixed 3D finite element for modelling thick plates", *Computational mechanics*, 13(5):332–342.
- [32] Wu, J. H., Liu, A. ve Chen, H., (2007). "Exact solutions for free-vibration analysis of rectangular plates using Bessel functions", *Journal of Applied Mechanics*, 74(6):1247–1251.
- [33] Vogel, C., Tyler, G., Lu, Y., Bifano, T., Conan, R. ve Blain, C., (2010). "Modeling and parameter estimation for point-actuated continuous-facesheet deformable mirrors", *JOSA A*, 27(11):A56–A63.
- [34] Vogel, C. R. ve Yang, Q., (2006). "Modeling and open-loop control of point-actuated, continuous facesheet deformable mirrors", *SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation*, 627223–627223.
- [35] Love, A. E. H., (1888). "The small free vibrations and deformation of a thin elastic shell", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A*, 179:491–546.
- [36] Reddy, J. N., (2006). *Theory and analysis of elastic plates and shells*. CRC press, Florida.
- [37] Timoshenko, S. P. ve Woinowsky-Krieger, S., (1959). *Theory of plates and shells*. McGraw-hill, New York.
- [38] Reissner, E., (1945). "The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates".
- [39] Mindlin, R. D., (1951). "Thickness-Shear and Flexural Vibrations of Crystal Plates", *Journal of Applied Physics*, 22(3):316–323.
- [40] Pagano, N., (1970). "Shear Deformation in Heterogeneous Anisotropic Plates1", *J. appl. Mech*, 37:1031–1036.
- [41] Ravensbergen, S., Hamelinck, R., Rosielle, P. ve Steinbuch, M., (2009). "Deformable mirrors: design fundamentals for force actuation of continuous facesheets", *SPIE Optical Engineering+ Applications*, 7466:74660G–74660G.
- [42] Bjöörn, F. ve Garpinger, O., (2005). "Modeling and control of a large deformable mirror", *Yüksek Lisans Tezi, Lund Institute of Technology, Fen Bilimleri Enstitüsü, İsveç*.

- [43] Bifano T. G., Mali, R. K., Dorton, J. K., Perreault, J. A., Vandelli, N., Horenstein, M. N., Castanon, D. A., (1997). "Continuous-membrane surface-micromachined silicon deformable mirror", *Optical Engineering*, 36(5):1354–1360.
- [44] Fraanje, R., Massioni, P. ve Verhaegen, M., (2010). "A decomposition approach to distributed control of dynamic deformable mirrors", *International Journal of Optomechatronics*, 4(3):269–284.
- [45] Gasmi, R., Dournaux, J., Cousty, R., Le Bihan, D., Crépy, B. ve Jagourel, P., (2010). "Numerical and experimental modal analysis of a 1-meter deformable mirror", *Proc. ISMA Noise and Vibration Engineering*.
- [46] Ruppel, T., (2012). *Modeling and control of deformable membrane mirrors*. INTECH Open Access Publisher.
- [47] Dantzig, G. B. ve Wolfe, P., (1960). "Decomposition principle for linear programs", *Operations research*, 8(1):101–111.
- [48] Mesarovic, M. D., (1970). "Multilevel systems and concepts in process control", *Proceedings of the IEEE*, 58(1):111–125.
- [49] Hassan, M., Salut, G., Singh, M. ve Titli, A., (1978). "A decentralized computational algorithm for the global Kalman filter", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 23(2):262–268.
- [50] Findeisen, W., Bailey, F. N., Brdys, M., Malinowski, K., Tatjewski, P. ve Wozniak, A., (1980). *Control and coordination in hierarchical systems*. John Wiley & Sons, 1980.
- [51] Aoki, M., (1971). "Some control problems associated with decentralized dynamic systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 16(5):515–516.
- [52] Javdan, M. R. ve Richards, R. J., (1977). "Decentralized control systems theory A critical evaluation", *International Journal of Control*, 26(1):129–144.
- [53] Tenney, R. R. ve Sandell, N. R., (1981). "Detection with distributed sensors", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, 4:501–510.
- [54] Tenney, R. R. ve Sandell, N. R. (1981). "Strategies for distributed decisionmaking", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 11(8):527–538.
- [55] Ikeda, M., Šiljak, D. ve Yasuda, K., (1983). "Optimality of decentralized control for large-scale systems", *Automatica*, 19(3):309–316.
- [56] Skogestad, S. ve Postlethwaite, I., (2007). *Multivariable feedback control: analysis and design*, Wiley, New York.
- [57] Zhou, K., Doyle, J. C., Glover, K., (1996). *Robust and optimal control*, Prentice hall, New Jersey.
- [58] Lyapunov, A. M. (Rusça-1992, İngilizce-1892). "The general problem of the stability of motion", *International Journal of Control*, 55(3):531–534.
- [59] Michel, A. N., (1974). "Stability analysis of interconnected systems", *SIAM Journal on Control*, 12(3):554–579.

- [60] Siljak, D., (1974). "On connective stability and instability of competitive equilibrium", Joint Automatic Control Conference, 223–228.
- [61] Desoer, C. A. ve Vidyasagar, M., "Feedback systems: input-output properties", SIAM.
- [62] Lasley, E. ve Michel, A., (1976). "Input-output stability of interconnected systems", IEEE Transactions on Automatic Control, 21(1):84–89.
- [63] Rosenbrock, H., (1971). "Progress in the design of multivariable control systems", Measurement and Control, 4(1):9–11.
- [64] Tyson, R. K., (2015). Principles of adaptive optics, CRC press, Florida.
- [65] Um, G. S., Smithgall, B. F. ve O'Bryan, C. L., (1983). "Minimum variance estimation of wavefront aberration", 26th Annual Technical Symposium, 96–103.
- [66] van Dam, M. A., Le Mignant, D. ve Macintosh, B. A., (2004). "Performance of the Keck Observatory adaptive-optics system", Applied Optics, 43(29):5458–5467.
- [67] Gendron, E. ve Léna, P., (1994). "Astronomical adaptive optics. 1: Modal control optimization", Astronomy and Astrophysics, 291:337–347.
- [68] Dessenne, C., Madec, P.-Y. ve Rousset, G., (1998). "Optimization of a predictive controller for closed-loop adaptive optics", Applied optics, 37(21):4623–4633.
- [69] Gibson, J. S., Chang, C.-C. ve Ellerbroek, B. L., (2000). "Adaptive optics: wavefront correction by use of adaptive filtering and control", Applied optics, 39(16):2525–2538.
- [70] Monirabbasi, S. ve Gibson, S., (2010). "Adaptive control in an adaptive optics experiment", JOSA A, 27(11):A84–A96.
- [71] Paschall, R. N. ve Anderson, D. J., (1993). "Linear quadratic Gaussian control of a deformable mirror adaptive optics system with time-delayed measurements", Applied optics, 32(31): 6347–6358.
- [72] Looze, D. P., Beker, O., Kasper, M. ve Hippler, S., (1999). "Optimal compensation and implementation for adaptive optics systems", Decision and Control, 2:1715–1720.
- [73] Looze, D. P., Kasper, M., Hippler, S., Beker, O. ve Weiss, R., (2003). "Optimal compensation and implementation for adaptive optics systems", Experimental Astronomy, 15(2):67–88.
- [74] Petit, C., Conan, J. M., Kulcsar, C., Raynaud, H. F., Fusco, T., Montri, J., Ddier Rabaud (2005). "Optimal control for multi-conjugate adaptive optics", Comptes Rendus Physique, 6(10):1059–1069.
- [75] Kulcsár, C., Raynaud, H.-F., Petit, C. ve Conan, J.-M., (2008). "Minimum variance control in presence of actuator saturation in adaptive optics", SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation, 70151G–70151G.

- [76] Looze, D. P., (2007). "Discrete-time model of an adaptive optics system", *JOSA A*, 24(9):2850–2863.
- [77] Looze, D. P., (2009). "Linear-quadratic-Gaussian control for adaptive optics systems using a hybrid model", *JOSA A*, 26(1):1–9.
- [78] Conan, J.-M., Rousset, G. ve Madec, P.-Y., (1995). "Wave-front temporal spectra in high-resolution imaging through turbulence", *JOSA A*, 12(7):1559–1570.
- [79] Le Gall, P., Prieur, C. ve Rosier, L., (2007). "On the control of a bimorph mirror", *International Journal of Tomography & Statistics*, (5):97–103.
- [80] Polyanin, A. D. ve Nazaikinskii, V. E., (2015). *Handbook of linear partial differential equations for engineers and scientists*. CRC press, Florida.
- [81] Graff, K. F., *Wave motion in elastic solids*. Courier Corporation, New York, 1975.
- [82] Kaplan, W., (1973). *Advanced calculus*, Addison Wesley Publishing Company, Boston.
- [83] Akhiezer, N. I., ve Glazman, I. M., (2013). *Theory of linear operators in Hilbert space*. Courier Corporation, New York.
- [84] Bracewell, R., (1965). "The fourier transform and its applications", New York, 5.
- [85] Gelfand, I., (1968). "Shilov, Generalized functions, vol. 2", *Spaces of fundamental and generalized functions*, Acad. Press, London.
- [86] Palmeri, A. ve Cicirello, A., (2011). "Physically-based Dirac's delta functions in the static analysis of multi-cracked Euler–Bernoulli and Timoshenko beams", *International Journal of Solids and Structures*, 48(14):2184–2195.
- [87] Noll, R. J., (1976). "Zernike polynomials and atmospheric turbulence", *JOSA*, 66(3):207–211.
- [88] Fricker, P., (2008). "Analyzing LASIK optical data using Zernike functions", *Matlab Digest*, (1–6).
- [89] Zhu, L., Sun, P.-C., Bartsch, D.-U., Freeman, W. R. ve Fainman, Y., (1999). "Wave-front generation of Zernike polynomial modes with a micromachined membrane deformable mirror", *Applied optics*, 38(28):6019–6026.
- [90] Anderson, D. J., (1991). "LQG control of a deformable mirror adaptive optics system with time-delayed measurements", DTIC Document.
- [91] Myint-U, T. ve Debnath, L., (2007). *Linear partial differential equations for scientists and engineers*, Springer Science & Business Media.
- [92] Kalman, R. E., (1960). "A new approach to linear filtering and prediction problems", *Journal of basic Engineering*, 82(1):35–45.
- [93] Gahinet, P. ve Apkarian, P., (1994). "A linear matrix inequality approach to H-inf control", *International journal of robust and nonlinear control*, 4(4):421–448.
- [94] MATLAB, version 7.10.0 (R2010a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2010.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Erkan ADALI
Doğum Tarihi ve Yeri : 31.05.1991, Batman
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : erkanadali91@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Kontrol ve Otomasyon Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2018
Lisans	Kontrol ve Otomasyon Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Maltepe Askeri Lisesi	2009

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016	AVL Araştırma ve Müh. San. ve Tic. Ltd. Şti.	Sistem Mühendisi
2015	Arçelik A.Ş.	Otomasyon Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Haspalamutgil, K. ve Adali, E., (2017), "Adaptive switching method for Adaptive Cruise Control", ICSTCC, 19-21 Oct 2017, 140-145.
2. Adali, E., Erol, B., Delibaşı, A. ve Altınler, B., (2017), "Uyarlamalı Optik Sistemler için \mathcal{H}_∞ Alt-Optimal Kontrolcü Geliştirilmesi", TOK, 21-23 Sep 2017, 183-188.

Proje

1. İzolesiz İki Yönlü DC-DC Dönüştürücü Tasarımı ve Uygulaması (Lisans Tezi)
2. 6 Serbestlik Dereceli 6x6 Stewart Platformunun Modellenmesi ve Simülasyonu (Lisans Tezi)
3. Ae2project Alternatif Enerjili Araç Projesi (Öğrenci kulübü)