



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



STEWART PLATFORMU TABANLI SİMÜLATÖRLER İÇİN HAREKET ALGI  
ALGORİTMASININ MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

BERK YAĞCIOĞLU

EYLÜL 2024



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

STEWART PLATFORMU TABANLI SİMÜLATÖRLER İÇİN HAREKET ALGI  
ALGORİTMASININ MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

BERK YAĞCIOĞLU

Yüksek Lisans

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ŞAHİN

EYLÜL 2024

**Berk YAĞCIOĞLU** tarafından **Yusuf ŞAHİN** danışmanlığında hazırlanan “**Stewart Platformu Tabanlı Simülatörler İçin Hareket Algı Algoritmasının Modellenmesi ve Kontrolü**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makina Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kürşat YALÇIN  
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ŞAHİN  
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erdi GÜLBAHÇE  
Konya Ticaret Odası Karatay Üniversitesi,

**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../20... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun .../.../20... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

**Prof. Dr. Mustafa KARATEPE**  
**MÜDÜR**

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İmza

Berk YAĞCIOĞLU

## ÖZET

### STEWART PLATFORMU TABANLI SİMÜLATÖRLER İÇİN HAREKET ALGI ALGORİTMASININ MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

YAĞCIOĞLU, Berk

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ŞAHİN

Eylül 2024, 66 sayfa

Simülatörler, gerçek araç hareketini birebir taklit etmek yerine, insan algı sisteminin sınırlarını kullanarak gerçekçi bir hissiyat yaratmaya odaklanmıştır. Bu süreç, insan algısının matematiksel olarak modellenmesi ve elde edilen bulguların mühendislik uygulamalarına aktarılmasıyla mümkün olmuştur. Simülatörler, kısıtlı hareket alanlarında en iyi ivme hissini oluşturmak için tasarlanırken, insan algısının belli ivme değerleri altında hassasiyetinin düşük olması ve eğim ile ivmelenme arasındaki farkın belirli bir dereceye kadar ayırt edilememesi gibi özelliklerinden yararlanır. Bu olgular, hareket algı algoritmalarının temelini oluşturur. 50 yılı aşkın süredir geliştirilen bu algoritmalar, farklı kontrol teorisi yaklaşımlarıyla en iyi sonucu elde etmeyi amaçlar. Bu tezde, Klasik Algı Algoritması ve Doğrusal Kuadratik Regülatör yaklaşımıyla oluşturulan Optimal Hareket Algı Algoritması karşılaştırılarak Matlab üzerinde simüle edilmiştir.

*Anahtar Sözcükler:* Filtreler, hareket algı algoritması, model optimizasyon, matematiksel model, LQR

## SUMMARY

### THE MODELING AND CONTROL OF MOTION PERCEPTION ALGORITHMS FOR STEWART PLATFORM-BASED SIMULATORS

YAGCIOGLU, Berk

Nigde Omer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assistant Professor Yusuf SAHIN

September 2024, 66 pages

In this thesis, the focus is on how simulators have evolved to prioritize simulating the sensation of acceleration, utilizing the limitations of human perception, rather than attempting to perfectly replicate real vehicle movement. This evolution involves the mathematical modeling of human perception and the application of these findings to engineering practices. Simulators are specifically designed to create the best possible sensation of acceleration within limited motion spaces. They take advantage of the fact that human perception is less sensitive to certain acceleration values and has difficulty differentiating between tilt and forward acceleration beyond a certain degree. These perceptual phenomena form the foundation of motion cueing algorithms, which have been refined over the past 50 years using various control theory approaches to achieve optimal results. This thesis compares the Classical Washout Algorithm with the Optimal Motion Cueing Algorithm, which is developed using a Linear Quadratic Regulator approach, through detailed simulations conducted in Matlab.

*Keywords:* Filters, motion cueing algorithm, model optimization, mathematical model, LQR

## ÖN SÖZ

Bu tez, Stewart Platformu tabanlı simülatörler için hareket algı algoritmalarının modellenmesi ve kontrolü üzerine yürütölen bir çalışmanın sonucudur. Tez kapsamında, simülatör teknolojilerinin gelişimi ve bu alandaki algoritmaların nasıl optimize edilebileceği üzerine yoğunlaşılmasıdır.

Bu çalışmayı yürütürken, bana yol gösteren ve değerli katkılarını sunan danışmanım Dr. Yusuf ŞAHİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onun rehberliği ve desteği olmadan bu tezi tamamlamak mümkün olmazdı. Ayrıca, bana her zaman destek olan aileme ve arkadaşlarıma da şükranlarımı sunarım.

Bu tezin, alanındaki çalışmalara katkı sağlamasını ve gelecekte yapılacak araştırmalar için bir temel oluşturmasını temenni ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	v
SUMMARY .....	vi
ÖN SÖZ .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
SİMGE VE KISALTMALAR .....	xiv
BÖLÜM I .....	1
GİRİŞ .....	1
1.1 Amaç ve Kapsam .....	1
1.2 Uçak Simülatorlerinin Tarih İçerisindeki Gelişimi .....	1
1.2.1 Erken Dönem Simülatorleri .....	2
1.2.2 Simülasyonlarda Hareket Sistemlerinin Evrimi .....	7
1.2.3 Stewart Platformun Tarih İçerisinde Gelişim Süreci .....	10
1.2.4 Simülatorlerde Güncel Gelişmeler .....	12
1.3 Algoritmaların Tarih İçerisindeki Gelişimi .....	13
1.3.1 Klasik Algoritma .....	14
1.3.2 Adaptif Algoritma .....	15
1.3.3 Lineer Optimizasyon .....	16
1.3.4 Nonlineer Optimizasyon .....	17
1.3.5 Model Öngörülü Kontrol .....	18
BÖLÜM II .....	20
İNSAN HAREKET ALGI SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ .....	20
2.1 Tanım .....	20
2.2 Vestibüler Organ .....	20
2.2.1 Yarım Daire Kanalları .....	22
2.2.2 Otolit .....	26
BÖLÜM III .....	31
HAREKET ALGI ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ .....	31
3.1 Klasik algoritma .....	31

3.2	Optimal Control Nedir? .....	34
3.3	Optimal Algoritmanın Geliştirilmesi.....	35
3.3.1	Vestibüler Organın Model Matrisleri .....	36
BÖLÜM IV .....		46
MODELLERİN SİMÜLASYONU .....		46
4.1	Matlab Stewart Platformu.....	46
4.2	Platform-1 Üzerindeki Simülasyon Sonuçları .....	49
4.2.1	Klasik Algoritma Sonuçları .....	49
4.2.2	Optimal Algoritma Sonuçları.....	50
4.3	Platform-2 Üzerindeki Simülasyon Sonuçları .....	51
4.3.1	Klasik Algoritma Sonuçları .....	51
4.3.2	Optimal Algoritma Sonuçları.....	54
BÖLÜM V .....		56
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....		56
KAYNAKLAR .....		59
ÖZ GEÇMİŞ.....		66

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Filtre Parametreleri .....	34
Çizelge 3.2. Maliyet Fonksiyonu ve Ölçeklendirme Parametreleri.....	44
Çizelge 3.3. Filtrelerin Katsayıları.....	45
Çizelge 4.1. Platform-1 ve 2 de Klasik Algoritma İçin Kullanılan Filtre Katsayıları ....	53
Çizelge 5.1. $\gamma_2=4\pi$ İçin Yeni Matris Değerleri .....	57



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Vestibüler Organ Yapısı (Kandel vd., 2000).....	21
Şekil 2.2. Yarım Daire Kanalının Çalışması (Tortora ve Derrickson, 2008) .....	22
Şekil 2.3. Yarım Daire Kanalı Kütle-Yay-Damper Modeli (Gastaldi vd., 2009).....	23
Şekil 2.4. Yarım Daire Kanal Modelinin Bode Diyagramı .....	26
Şekil 2.5. Otolitin Çalışması (Purves vd., 2001) .....	27
Şekil 2.6. Otolit $\theta$ Bode Diyagram .....	30
Şekil 2.7. Otolit $ax$ Bode Diyagram .....	30
Şekil 3.1. Klasik Algoritma $X$ ve $Ry$ Blok Diyagramı .....	31
Şekil 3.2. HP Filtre $Xivme$ Rampa Cevabı .....	32
Şekil 3.3. LP Filtre Rampa Cevabı .....	32
Şekil 3.4. 3.1 Blok Diyagramın Rampa Cevabı.....	32
Şekil 3.5. Rampa Girişinde Simülatöre $X$ Ekseninde Gönderilen Pozisyon Komutu ....	32
Şekil 3.6. Klasik Algoritmanın Washout Filtresi Eklenmiş Blok Diyagramı.....	33
Şekil 3.7. Washout Filtresinden ile $X$ Eksenindeki Nötrleme Hareketi .....	33
Şekil 3.8. Optimal Algoritmanın Blok Diyagramı.....	34
Şekil 3.9. Optimal Algoritma $W(s)$ Blok Diyagramı.....	43
Şekil 3.10. $W(s)$ Matrisinin Bulunma Diyagramı.....	44
Şekil 3.11. Optimal Algoritma Basamak Cevabı.....	45
Şekil 4.1. Matlab Stewart Platformu.....	46
Şekil 4.2. Stewart Platformunun Blok Diyagramı .....	46
Şekil 4.3. Platformun Filtreniz Basamak Cevabı.....	47
Şekil 4.4. Değiştirilmemiş Kontrol Blok Diyagramı .....	48
Şekil 4.5. Değiştirilmiş Kontrol Blok Diyagramı .....	48
Şekil 4.6. Platform-1 Basamak Cevabı .....	49
Şekil 4.7. Platform-2 Basamak Cevabı .....	49
Şekil 4.8. Platform-1 Klasik Algoritma Rampa Cevabı .....	50
Şekil 4.9. Platform-1 Optimal Algoritma Rampa Cevabı.....	51
Şekil 4.10. Platform-2’de Platform-1 Parametreleri ile Rampa Cevabı .....	51
Şekil 4.11. Platform-2 Klasik Algoritma Rampa Cevabı .....	52

Şekil 4.12. Çizelge 4.1'e Göre Oluşan Filtrelerin Rampa Cevabı.....	53
Şekil 4.13. Çizelge 4.1'e Göre Oluşan Filtrelerin X Eksenindeki Nötrleme Hareketi ...	54
Şekil 4.14. Platform-2 Optimal Algoritma Rampa Cevabı.....	54
Şekil 4.15. Optimal Algoritmanın Platform-2'deki Rampa Cevabı .....	55
Şekil 5.1. Klasik ve Optimal Algoritmaların Platform-1 ve 2 de Sonuçları.....	56
Şekil 5.2. $\gamma_2=4\pi$ ve Çizelge 5.1. de ki Değerlere Göre Platform-1 Rampa Cevabı.....	57



## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 1.1. Antoinette Trainer (Anonim, Kasım 2022).....	3
Fotoğraf 1.2. Billing Oscilatörü (Anonim, Ağustos 2024) .....	4
Fotoğraf 1.3. Bleriot Simülatörü (Anonim, Ekim 2003) .....	4
Fotoğraf 1.4. Ruggles Orientator (Anonim, Haziran 2017).....	5
Fotoğraf 1.5. Link Trainer (Anonim, Aralık 2013) .....	6
Fotoğraf 1.6. Comet IV Simülatörü (Anonim, Kasım 2013).....	7
Fotoğraf 1.7. GPN-2000 (Anonim, Eylül 1961).....	8
Fotoğraf 1.8. Stewart Platformu Japetus (Szczepański C., Ekim 2002).....	9
Fotoğraf 1.9. Gough'un Lastik Test Makinesi (Anonim, Şubat 2008) .....	10
Fotoğraf 1.10. Klaus Cappel Simülatörü (Anonim, Ekim 2005).....	11
Fotoğraf 1.11. Desdemona (Anonim, Nisan 2015).....	12

## SİMGE VE KISALTMALAR

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
$\tau_1$	Uzun zaman sabiti
$\tau_2$	Kısa zaman sabiti
$\tau_A$	Adaptasyon filtre sabiti
$\tau_L$	Lead filtre sabiti
$K_{Scc}$	Vestibüler sistemin adaptasyon operatörü
$G_{oto}$	Otolit sistemin adaptasyon operatörü
$G_{Scc}$	Vestibüler sistemin esik değerinin ölçeklendirme katsayısı
HP	Yüksek geçirgen filtre
LP	Düşük geçirgen filtre
Washout Filter	Platform nötrleme 1. dereceden yüksek geçirgen filtresi
$\omega_{HP}$	HP filtrenin yay sabiti
$\delta_{HP}$	HP filtresinin damper sabiti
$Washout_{HP}$	Washout filtresinin katsayısı
$\omega_{LP}$	LP filtresinin yay sabiti
$\delta_{LP}$	LP filtresinin damper sabiti
W(s)	Optimal algoritma washout filitresi

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

### 1.1 Amaç ve Kapsam

Bu tez, simülatörlerdeki hareket algı algoritmalarının gelişimini incelemeyi amaçlamaktadır. Öncelikle, simülatörlerin tarihsel gelişimini ele alarak, bu teknolojinin başlangıcından günümüze kadar nasıl evrildiğini ve bu süreçte hangi kritik dönüm noktalarının yaşandığını ortaya koymayı hedeflemektedir. Simülatörlerin ilk kullanım alanlarından başlayarak, modern simülatörlerin teknik ve teknolojik ilerlemeleri, eğitim ve mühendislik uygulamalarındaki önemini vurgulamak amaçlanmıştır.

Kapsam olarak, simülatörlerde kullanılan hareket algı algoritmalarının tarihsel gelişimi ve bu algoritmaların teknik detayları incelenmektedir. Tezde, hareket algı algoritmalarının temel prensipleri, insan algı sisteminin bu algoritmalara olan etkisi ve çeşitli kontrol teorileri ele alınmıştır. Ayrıca, klasik algı algoritmaları ile LQR (Doğrusal Kuadratik Regülatör) yaklaşımıyla oluşturulan Optimal Hareket Algı algoritmalarının karşılaştırılması ve Simulink üzerinden yapılan simülasyonlar aracılığıyla performans analizleri yapılmıştır.

### 1.2 Uçak Simülatörlerinin Tarih İçerisindeki Gelişimi

Uçuş simülatörlerinin ilk gelişimi, görsel gerçekçilikten ziyade uçuş dinamiklerinin hassas bir şekilde modellenmesine odaklanmıştır. Bu yaklaşım, uçuş koşullarının ve pilot eğitimlerinin daha gerçekçi bir şekilde simüle edilmesini sağlayarak havacılık güvenliği açısından kritik bir rol oynamıştır. Hareket sistemi, bu amaca yönelik olarak geliştirilen ve uçuş simülatörlerinin en önemli bileşenlerinden biri haline gelen bir teknolojidir.

Hareket sisteminin temel işlevi, pilotların uçuş sırasında maruz kaldığı çeşitli hareketleri simüle etmektir. Bu hareketler, uçağın dikey eksenindeki hareketi olan "pitch", yatay eksenindeki hareketi olan "roll" ve düşey eksenindeki hareketi olan "yaw" gibi temel uçuş manevralarını kapsar.

Havacılık endüstrisinde uçuş simülatörlerinde hareket sistemlerinin gerekliliği ve verimliliği uzun zamandır tartışma konusuydu. Simulator ilk gelişim zamanlarında

pilotlarının uçakları kullanırken daha çok uçuş göstergelerine bağlı olduğunu ve fiziksel hislere daha az ihtiyaç duyduğunu düşünüldüğünden dolayı hareket sistemlerine yeterince önem verilmemiştir. Her ne kadar uçuş simülatörlerin ilk örnekleri enstrüman odaklı olsa da hareket sistemleri uçuş simülasyonunun doğuşundan beri sürekli olarak ilerlemiş ve önemi giderek artmıştır. Bu gelişmiş hareket sistemleri, pilotların simülatörde gerçek uçuş deneyimine benzer bir his yaşamasını sağlayarak acil durumlar ve zorlu hava koşulları gibi senaryolara daha iyi hazırlanmalarına imkân tanır. Bu da havacılık emniyetinin artırılmasına büyük bir katkı sağlar.

### **1.2.1 Erken Dönem Simülatörleri**

I. Dünya Savaşı'nın başlamasıyla birlikte, havacılıkta yaşanan hızlı gelişmeler ve savaşın getirdiği acil gereksinimler, pilot eğitimi ve seçimi süreçlerinde ciddi zorluklara neden oldu. O dönemde, uçak sahibi olan herkesin pilot olabilmesi, deneyimsiz pilotların neden olduğu kazaların artmasına sebep oldu (Smith, 2018). Yapılan araştırmalar, havacılık kazalarının büyük bir kısmının pilot hatalarından kaynaklandığını ortaya koydu. Özellikle Sopwith Camel gibi uçakların uçuş özelliklerinin zorluğu, bu uçaklarda eğitim sırasında yüksek ölüm oranlarına neden oluyordu (Smith, 2018). Bu sorunlar, pilot adaylarının yeteneklerini değerlendirecek ve uçuş becerilerini geliştirecek yeni yöntemlerin geliştirilmesi ihtiyacını hızlandırdı.

Uçuş simülatörlerinin gelişiminde, hareket sistemi her zaman kilit bir rol oynamıştır. Bu alandaki ilk adımlardan biri, Wright Kardeşler'in Model B "Flyer"ını temel alan bir simülatörle atıldı. Bu simülatör, kuyruk ve motor gibi bazı parçaları hariç tutarak uçuş dinamiklerinin temel unsurlarını taklit etmeye odaklanmıştı. Elektrik motoru ve kam mekanizmasıyla çalışan bu simülatör, sürekli yuvarlanma hareketleri yapabiliyordu. Bu özellik, pilot adaylarının kanatları yatay tutmak için dümen kullanma becerilerini geliştirmelerini sağlıyor ve onları gerçek uçuşa hazırlıyordu (National Air and Space Museum, 2017).

1909 yılında, Antoinette şirketi tarafından geliştirilen Antoinette Trainer, dönemin en yenilikçi uçuş simülatörlerinden biri olarak kabul edilir. Bu simülatör, bir uçağın yuvarlanma ve eğim hareketlerini taklit etmek için üst üste yerleştirilmiş iki yarım varilden oluşuyordu.



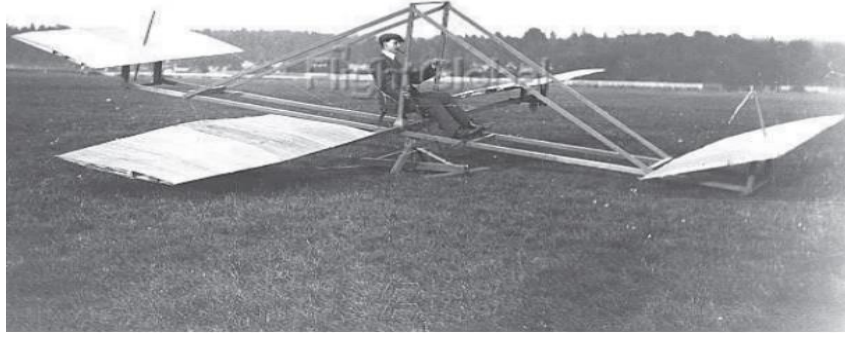
**Fotoğraf 1.1.** Antoinette Trainer (Anonim, Kasım 2022)

Fotoğraf 1.1’de görüldüğü gibi, pilot adayları, iki dümen tekerleğini kullanarak yapay bir ufuk çizgisini takip etmeye çalışıyor ve bu sayede uçuş sırasında karşılaşılabilecekleri farklı durumlara doğru tepki vermeyi öğreniyorlardı. Bu tasarım, simülâtörün fiziksel hareketlerle gerçek uçuş koşullarını taklit etmesini sağladı ve böylece pilotların uçuş becerilerini geliştirmelerine katkıda bulundu (ETHW, 2023).

Antoinette Trainer, kendi dönemi için ilerici bir buluş olarak kabul edilse de günümüz teknolojisi ve bilimsel bilgisi ışığında değerlendirildiğinde bazı eksiklikleri olduğu açıktır. Özellikle kabin pozisyonlarını ve uçuş sırasında karşılaşılan kompleks hareketleri simüle etme yetenekleri oldukça sınırlıydı. Bunun yanı sıra, o dönemde insanın denge ve hareket algısını sağlayan vestibüler sistem üzerine yapılan bilimsel çalışmalar henüz başlangıç aşamasındaydı (ETHW, 2023). Bu nedenle, Antoinette Trainer ve benzeri erken dönem simülâtörler, uçuş dinamiklerini tam olarak yansıtamıyor ve pilotlara gerçek uçuş deneyimlerini tam anlamıyla sunamıyordu.

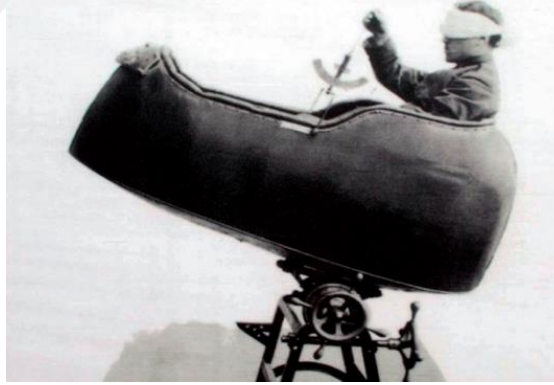
Bu eksikliklerin bir sonucu olarak, uçuş simülâtörleri geliştirilmeye başlandı. Bu simülâtörlerden biri, Fotoğraf 1.2’de görünen, Eardley Billing tarafından tasarlanan ve "Billing Oscilatörü" olarak adlandırılan bir cihazdı. Bu cihaz, bir kaideye monte edilmiş

bir uçak replikasıydı ve uçuş sırasında temel hareketlerin (yana yatma, yuvarlanma ve sapma açıları) simülasyonunu sağlıyordu (Havkar, 2024).



**Fotoğraf 1.2.** Billing Oscilatörü (Anonim, Ağustos 2024)

Billing Oscilatörü, pilot adaylarının uçuş becerilerini geliştirmelerine ve uçuş stresine karşı fizyolojik tepkilerini değerlendirmelerine olanak tanıyan önemli bir adımdı (Havkar, 2024).



**Fotoğraf 1.3.** Bleriot Simülatörü (Anonim, Ekim 2003)

Torino Üniversitesi'nde tasarlanan "Bleriot simülatörü" de havacılık eğitiminde önemli bir yere sahipti. Bu simülatör, Fotoğraf 1.3'te görüldüğü gibi, pilot adaylarının gözleri kapalıyken simüle edilen bir uçuş sırasında yana yatma ve yuvarlanma hareketlerini algılamalarına odaklanıyordu. Bu yöntem, pilot adaylarının uçuş becerilerini ve denge algılarını daha gerçekçi bir ortamda değerlendirmeyi amaçlıyordu (Havkar, 2024).

Fotoğraf 1.4'de gösterilen Ruggles Orientator, 1917'de Amerika Birleşik Devletleri'nde, pilotların zorlu uçuş durumlarıyla başa çıkma becerilerini geliştirmek amacıyla geliştirilen bir eğitim cihazıydı. Bu simülâtör, pilotları beklenmedik durumlara hazırlamayı ve uçuş güvenliğini artırmayı hedefliyordu (Flashbak, 2024).



**Fotoğraf 1.4.** Ruggles Orientator (Anonim, Haziran 2017)

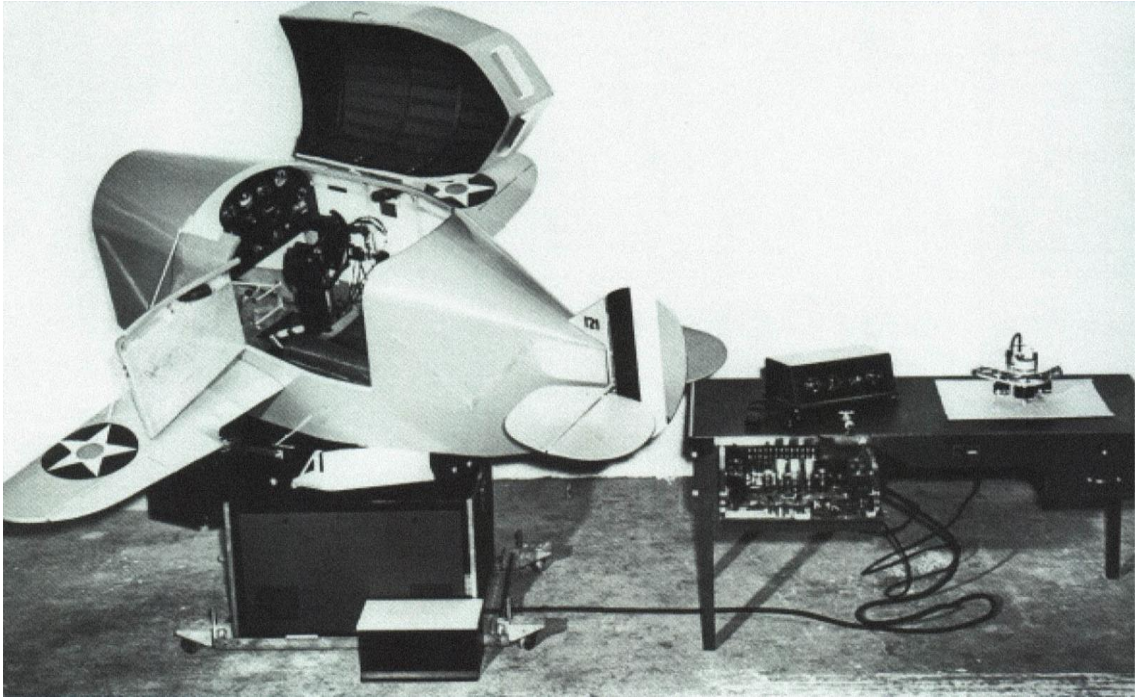
Ruggles Orientator, tekerlekli bir platform üzerinde, bir dizi halka aracılığıyla hareket edebilen bir pilot kabinine sahipti. Bu tasarım, kabinin üç eksenle dönmesine ve platformun yatay hareket etmesine izin vererek gerçekçi bir uçuş deneyimi sunuyordu. Simülâtörün hareketleri, eğitmen ve pilot tarafından kontrol edilen bir dümen ve kumanda kolu sistemi ile sağlanıyordu. Bu sistem, bir elektrik motoruyla entegre olarak çalışıyor ve kabinin istenen pozisyonlara getirilmesini sağlıyordu. Pilotlar, eğitim sırasında temel uçuş manevralarını yaparken aynı zamanda beklenmedik durumlarla başa çıkma becerilerini de geliştirebiliyorlardı (Flashbak, 2024).

Ruggles Orientator, havacılık eğitiminde önemli bir yenilik olarak kabul edilir. Bu simülâtör, pilotların uçuş becerilerini geliştirmelerine ve güvenliklerini artırmalarına yardımcı olarak havacılık tarihinde önemli bir rol oynamıştır. Ayrıca, modern uçuş simülâtörlerinin gelişimine de ilham kaynağı olmuştur (Flashbak, 2024).

Uçuş simülasyonunda bir sonraki büyük adım, Amerikalı mucit Edwin Link'in 1929'da geliştirdiği Link Trainer simülâtörü, diğer adıyla "Mavi Kutu" ile atıldı. Link, babasının org fabrikasındaki pnömomatik körüklerden ilham alarak, kabinin yana yatma, yuvarlanma ve sapma hareketlerini sağlayan yenilikçi bir mekanizma tasarladı. Bu sayede, simülâtör

gerçek uçuş koşullarını daha gerçekçi bir şekilde taklit edebiliyordu (Naval Air Station Fort Lauderdale Museum, 2024).

Fotoğraf 1.5’de görünen, Link Trainer’ın bir diğer önemli özelliği, kokpitin dümen sistemiyle entegre edilmiş uçuş aletlerine sahip olmasıydı. Bu sayede pilot, karartılmış bir kabinde sadece kabinin hareketlerine verdiği tepkileri hissetmekle kalmıyor, aynı zamanda uçuş aletlerinin göstergelerindeki değişimleri de takip ederek gerçek bir uçuş deneyimi yaşayabiliyordu (National Museum of the United States Air Force, 2005).



**Fotoğraf 1.5.** Link Trainer (Anonim, Aralık 2013)

Link Trainer’ın başarısı, sadece teknik özelliklerine değil, aynı zamanda Edwin Link’in girişimcilik becerilerine de dayanıyordu. Link, simülatorünü pazarlamak ve yaygınlaştırmak için büyük çaba sarf etti. Bu çabalarının sonucunda, Link Trainer, 1950’lerin sonuna kadar dünya genelinde kullanılan en başarılı ilk uçuş simülatorü haline geldi (National Museum of the United States Air Force, 2024). Bu simülator, binlerce pilotun eğitiminde kullanıldı ve havacılık tarihinde önemli bir yer edindi (Naval Air Station Fort Lauderdale Museum, 2024).

### 1.2.2 Simülasyonlarda Hareket Sistemlerinin Evrimi

1960'lara kadar uçuş simülasyon teknolojisindeki gelişmeler genellikle hareket sistemi dışındaki alt sistemlere odaklanmıştı. Bu dönemdeki simülatörlerin çoğunda hareket sistemi bulunmuyordu; bunun yerine, "modern pilotların hisleriyle değil, göstergelerle uçması gerektiği" düşüncesi hâkimdi. Bu yaklaşım, pilotların uçuş sırasında enstrümanlardan gelen verilere öncelik vermelerini savunuyordu. Hareket eksikliği, kısmen uçuş sırasında hissedilen kuvvetlere benzer bir his sağlayan kontrol yüklemesi sistemleriyle telafi edilmeye çalışılıyordu (de Havilland Aeronautical Technical School Association, 2016).

1958 yılında Redifon tarafından geliştirilen Comet IV simülatörü, tam hareket sistemine sahip ilk simülatörlerden biriydi ve bu özelliğiyle dönemin ötesinde bir tasarım olarak kabul edildi. Fotoğraf 1.6'da gösterilen bu simülatör, günümüzdeki uçuş simülatörlerine en yakın ilk örnek olarak değerlendirilmektedir. Ancak, uçuş testi verilerinin artan erişilebilirliği ve uçakların karmaşılaşması, analog bilgisayarların simülatör sistemlerinde önemli bir sınırlama oluşturmasına neden oldu (de Havilland Aeronautical Technical School Association, 2016).

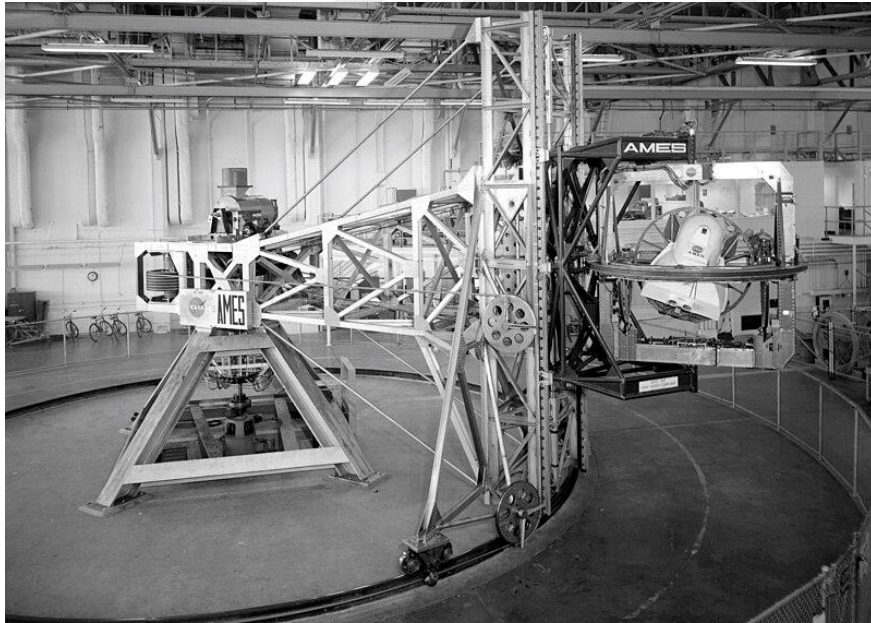


**Fotoğraf 1.6.** Comet IV Simülatörü (Anonim, Kasım 2013)

Simülatörlerin doğruluk ve güvenilirliğinin artırılması ihtiyacı, dijital bilgisayar teknolojilerinin benimsenmesini hızlandırdı. Ancak, dijital sinyal işleme yöntemleri, uçuş

testi verileri ile simülator hareket sistemi özellikleri arasındaki korelasyon eksikliğini gideremedi. Ayrıca, hareket sistemi sinyallerinin yokluğunda, geniş görüş açılı görsel sistemlerin yarattığı güçlü görsel uyarılar, pilotlarda istemsiz uzaysal oryantasyon bozukluklarına neden oldu. Bu dönemde, hareket üretici, uçuş simülatorlerinin en karmaşık ve maliyetli bileşeni olarak öne çıkıyordu (Marrison, 1993).

1961 yılında NASA Ames Araştırma Merkezi, Fotoğraf 1.7’de gösterilen, havacılık araştırmalarını desteklemek amacıyla bir uçuş simülatorü geliştirdi. Bu simülator, dikey hareketleri gerçekçi bir şekilde simüle etmek üzere tasarlanmıştı ve özellikle uçak, helikopter ve V/STOL (Dikey ve/veya Kısa Kalkış ve İniş) uçaklarının eğitiminde kullanıldı. Bu simülator, bir binanın dış duvarına monte edilmiş ve motorlu bir vinç yardımıyla 15 metreye kadar dikey hareket edebiliyordu. Bu sayede, pilot adayları farklı irtifalarda ve hızlarda deneyim kazanabiliyor, aynı zamanda saniyede 6.7 metreye varan hızlanma ve  $\pm 1.5g$  gibi yüksek ivme değerlerine maruz kalarak gerçek uçuş koşullarına yakın bir eğitim alabiliyorlardı (Riccobono, 2020).



**Fotoğraf 1.7.** GPN-2000 (Anonim, Eylül 1961)

Havacılık teknolojisinin hızla ilerlemesi, daha yüksek irtifalarda ve hızlarda uçuşları mümkün kılmış, ancak bu durum beraberinde yeni tehlikeleri de getirmiştir. Özellikle yüksek G kuvvetleri altında pilotların maruz kaldığı G-LOC (G kuvveti kaynaklı bilinç

kaybı) ciddi bir tehdit oluştuyordu. Bu tehlikelere karşı pilotların özel eğitimlerle hazırlanabileceği, santrifüj simülatörlerinin geliştirilmesiyle mümkün hale geldi.

Merkezkaç kuvveti simülatörleri, pilotları gerçek uçuş koşullarına benzer bir ortamda eğitmek için kullanılır. Bu simülatörlerde, gondolun sabitlenme mekanizması hatve (pitch) ve yalpalama (roll) hareketlerini değiştirmeye olanak tanıyarak, üç eksenle doğrusal ivmelerin hassas bir şekilde haritalanmasını sağlar. Ancak, bu simülatörlerin bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, merkezkaç kuvveti simülatörünün dönüşü sırasında pilot baş pozisyonunu değiştirdiğinde, çapraz bağlı açılal ivme uyarımı (Coriolis uyarıları) pilota rahatsızlık hissine neden olabilir. Bu durum, simülasyon deneyimini olumsuz etkileyebilir ve bu yüzden simülatör tasarımında dikkate alınmalıdır (Marrison, 1993).

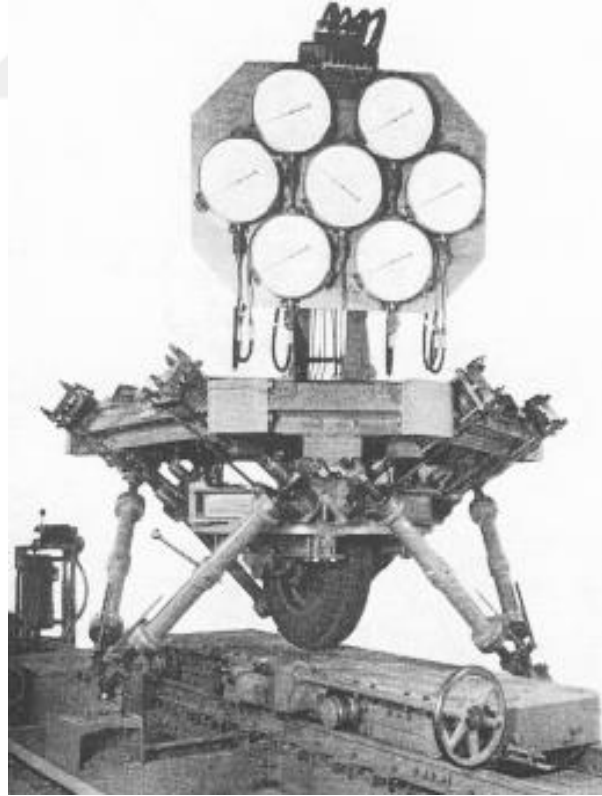
1969 yılında NASA Ames Araştırma Merkezi'nde faaliyete geçen İleri Uçaklar için Uçuş Simülatörü (FSAA), sabit kanatlı ve döner kanatlı uçakların performansını değerlendirmek için kullanıldı. Bu simülatör, gerçek uçuş koşullarını gerçekçi bir şekilde simüle ederek pilotların uçuş becerilerini geliştirmelerine ve güvenliği artırmalarına yardımcı olmuştur. Fotoğraf 1.8'de bir örneği gösterilen, altı serbestlik dereceli (DoF) Stewart Platformu, havacılık simülasyon teknolojisinde önemli bir dönüm noktasıdır. Bu platform, hareketin tüm yönlerini taklit ederek pilotların gerçek uçuş deneyimini simüle eder. Stewart Platformu, uçuş simülatörlerinde geniş kabul görmüştür ve pilot eğitimi için yaygın olarak kullanılır (Lewkowicz ve Kowaleczko, 2020).



**Fotoğraf 1.8.** Stewart Platformu Japetus (Szczepański C., Ekim 2002)

### 1.2.3 Stewart Platformun Tarih İçerisinde Gelişim Sureci

Stewart platformunun temelleri, aslında platforma adını veren Charles W. Stewart'ın 1965 yılındaki makalesinden önce atılmıştır (Stewart, 1965). Gough'un, Fotoğraf 1.9'da gösterilen, Lastik Test Makinesi olarak adlandırdığı icadı, havacılık iniş yükleri problemlerine yanıt vermek amacıyla tasarlanmıştır (Gough ve Whitehall, 1962). Karma yükler altında lastiklerin özelliklerini belirlemek için bir makineye ihtiyaç duyuluyordu. Gough'un geliştirdiği bu sistem, altı bağımsız olarak hareket ettirilen hexapod içermektedir ve bu hexapodların uzunlukları kontrol edilerek platformun istenen pozisyon ve oryantasyona getirilmesi sağlanıyordu (Stewart, 1965). Gough'un yeni fikri, altı hexapodun simetrik bir düzenlemeyle oktahedron oluşturacak şekilde yerleştirilmesiydi (Dasgupta ve Mruthyunjaya, 2000). 1950'lerin başında inşa edilmiş ve 1954'te tam olarak faaliyete geçmiş olan bu makine Stewart platformunun temel prensiplerini barındırıyordu ve bu alandaki ilk önemli çalışmalardan biri olarak kabul edilir.



**Fotoğraf 1.9.** Gough'un Lastik Test Makinesi (Anonim, şubat 2008)

Charles W. Stewart, 1965 yılında yayınladığı "A Platform with Six Degrees of Freedom" adlı makalesinde o zaman için yeni bir hareket sistemi tanıtmıştır (Stewart, 1965). Bu sistem, altı bağımsız lineer aktüatörle bir alt ve bir üst plakayı birbirine bağlayarak üç doğrusal ve üç açısız hareket sağlayabilmektedir (Stewart, 1965). Stewart ayrıca makalesinde, her biri iki aktüatöre sahip üç hexapod'dan oluşan hibrit bir tasarım önermiştir (Stewart, 1965). Bu altı serbestlik dereceli hareket platformunun uçuş simülatörü olarak kullanılabilceğini belirtmiştir (Stewart, 1965).

Stewart'ın önerdiği paralel mekanizma, Gough tarafından icat edilen ve sıklıkla Stewart platformu olarak adlandırılan oktahedral hexapod'dan farklıdır (Dasgupta ve Mruthyunjaya, 2000). Stewart'ın bu önemli makalesi, paralel kinematik alanındaki sonraki gelişmeler üzerinde büyük bir etkiye sahip olmuştur (Bone ve Lambert, 1999). Gough, popüler oktahedral hexapod'u icat eden ve inşa eden ilk kişi olmasına rağmen, Klaus Cappel daha sonradan simülatörler için üretilen bu platformun, Fotoğraf 1.10, 1964 yılında patentini almış ve ilk uçuş simülatörü şirketlerine lisanslamıştır (Cappel, 1967).

20. yüzyılın sonlarına doğru, Stewart platformu, altı serbestlik dereceli (DoF) hareket sistemleri arasında yaygınlaşmıştı (Bone ve Lambert, 1999). Ancak, farklı uçuş dinamiklerine sahip tüm uçakları test etme ihtiyacı, NASA Ames Araştırma Merkezi'ni daha gelişmiş bir çözüm olan Dikey Hareket Simülatörü'nü (VMS) geliştirmeye sevk etti (McKenna, 1990). VMS, 18,3 metrelik dikey hareket mesafesi ve  $\pm 10$  m/s<sup>2</sup>'ye varan ivmelenme kapasitesiyle, pilot-uçak etkileşimini incelemek ve V/STOL (Dikey/Kısa Kalkış ve İniş) uçaklarını değerlendirmek için ideal bir platform sunuyordu (McKenna, 1990). Ayrıca, uzay mekiği pilotlarının eğitiminde de gerçekçi bir uçuş ortamı sağlıyordu (McKenna, 1990).

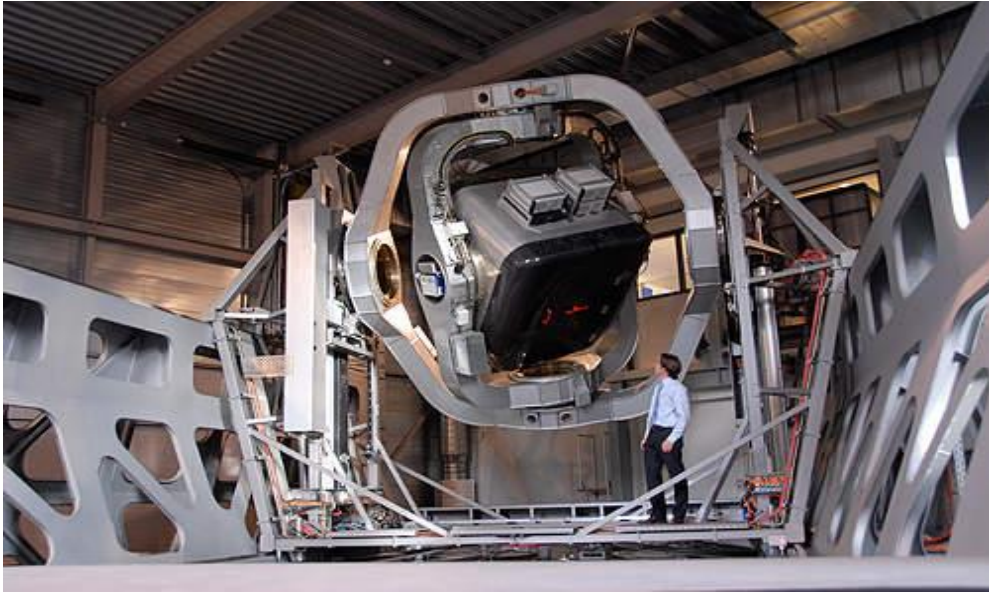


**Fotoğraf 1.10.** Klaus Cappel Simülatörü (Anonim, Ekim 2005)

#### 1.2.4 Simulatörlerde Güncel Gelişmeler

Modern havacılıkta yüksek manevra kabiliyetine sahip uçakların artmasıyla birlikte, mekansal oryantasyon kaybı önemli bir sorun olarak ortaya çıktı (Barnett-Cowan, Dyde, ve Clement, 2010). O dönemde pilotlar, bu kavramlar uçuş eğitimleri sırasında karşılaşmıyorlardı (Gillingham ve Krutz, 1985). Mekansal oryantasyon kaybını önlemenin en etkili yöntemlerinden biri, mekansal oryantasyon simulatörlerinde pratik eğitimden geçirilmektir (Barnett-Cowan, Dyde, ve Clement, 2010). WIML'deki Gyro-IPT ve benzeri simulatörler, uçuş sırasında yaşanan mekansal oryantasyon kaybına neden olan hareketleri taklit ederek pilotların bu duruma hazırlıklı olmalarını sağladı (Gillingham ve Krutz, 1985).

Simulatörlerde hareket gerçekçiliğini artırma çabası, daha karmaşık hareket sistemleri ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesine yol açtı. Bu geliştirmeler, çok aşamalı, kademeli hareket sistemi bağlantıları kullanılarak gerçekleştirildi ve hareket sisteminin çalışma alanı ile üretilebilen ivme aralığı genişletildi. Fotoğraf 1.11'de gösterilen AMST-Systemtechnik GmbH tarafından geliştirilen Desdemona uçuş simulatörü, bu tür bir çözüme örnek olarak verilebilir. Üç eksen etrafında tam kabin dönüşü sağlayan altı serbestlik dereceli bir hareket sistemiyle donatılan Desdemona, yüksek açısız hızlar ve ivmeler üretebilme kapasitesine sahipti. Başka bir örnek ise, başlıca araştırma amaçlı kullanılan DLR uçuş simulatörüdür.



**Fotoğraf 1.11.** Desdemona (Anonim, Nisan 2015)

Günümüzde uçuş simülatörleri, uçakların tüm yaşam döngüsü boyunca, araştırma ve geliştirme aşamalarından pilot değerlendirme ve eğitimine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Yeni uçak tasarımlarının geliştirilmesine ve mevcut uçakların iyileştirilmesine katkı sağlarken, aynı zamanda uçuş testleriyle ilişkili maliyetleri ve riskleri azaltmada da önemli bir rol oynarlar. En yaygın kullanılan uçuş simülatörleri ise, pilotların, uçuş ekibinin ve uçuş ekipmanı servisinin eğitimi için tasarlanmış uçuş simülasyon eğitim cihazlarıdır (FSTD).

### **1.3 Algoritmaların Tarih İçerisindeki Gelişimi**

Hareket algı algoritmaları, simülasyon teknolojilerinde kullanıcıya gerçekçi ve etkileyici bir deneyim sunma konusunda kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle uçuş, sürüş ve denizcilik simülatörleri ile sanal gerçeklik uygulamalarında, bu algoritmalar kullanıcıların gerçek dünya koşullarını simüle edilmiş ortamlarda deneyimlemelerini sağlar.

Hareket algı algoritmalarının temel işlevi, simüle edilen aracın veya nesnenin hareketlerini gerçek dünya fizik yasalarına uygun olarak taklit etmektir. Bu sayede kullanıcı, görsel ve işitsel uyaranlara ek olarak, vestibüler (denge) ve proprioseptif (vücut pozisyonu algısı) duyularını da içeren çok boyutlu bir deneyim yaşar.

Simülatör platformlarının fiziksel hareket kabiliyetlerinin sınırlı olması nedeniyle, hareket algı algoritmaları "washout filtreleri" kullanarak bu kısıtlamaları yönetir. Washout filtreleri, simülatörün fiziksel sınırlarına yaklaştığında hareketleri yumuşatarak veya yönlendirerek hem kullanıcı konforunu hem de simülatörün güvenli çalışmasını sağlar. Ayrıca, bu filtreler sayesinde simülatörün hareket alanı efektif olarak genişletilir ve kullanıcıya kesintisiz bir hareket deneyimi sunulur.

Hareket algı algoritmaları, sadece fiziksel hareketleri taklit etmekle kalmaz, aynı zamanda insan fizyolojisi ve algısını da dikkate alır. İnsan beyni, hareket ve ivme değişikliklerine karşı oldukça duyarlı olduğundan, algoritmalar kullanıcının bu değişikliklere vereceği tepkileri öngörerek hareketleri buna göre düzenler. Bu süreçte, psikolojik ve fizyolojik araştırmalardan elde edilen veriler, algoritmaların insan

faktörlerini daha iyi anlamasına ve daha gerçekçi hareket ipuçları üretmesine yardımcı olur.

Modern hareket algı algoritmaları, adaptif yazılımlar kullanarak farklı senaryolara ve kullanıcı profillerine uyum sağlayabilir. Bu sayede, simülasyon deneyimi kişiselleştirilerek kullanıcının deneyim seviyesi ve tercihlerine göre optimize edilebilir. Adaptif algoritmalar, farklı uçuş koşullarında, farklı araç tiplerinde veya farklı kullanıcı profillerinde en uygun hareket geri bildirimini sağlayarak, simülasyonun eğitim, araştırma veya eğlence amaçlı kullanımına göre özelleştirilmesine imkan tanır.

Hareket algı algoritmalarının gelişimi, bu teknolojilerin eğitim, araştırma ve eğlence alanlarında kullanımını artırmıştır. Bu algoritmalar, pilotların ve sürücülerin eğitiminde, askeri personelin görev hazırlığında ve sanal gerçeklik deneyimlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Hareket algı algoritmalarının daha sofistike hale gelmesiyle, kullanıcılar daha gerçekçi ve etkileyici simülasyon deneyimleri yaşayabilirler.

İleri alt başlıklarda, hareket algı algoritmaları alanında bugüne kadar en yaygın olarak çalışılan ve üzerinde en çok yayın yapılan başlıca yaklaşımlar, kronolojik bir sırayla incelenecektir.

### **1.3.1 Klasik Algoritma**

Hareket algılama algoritmaları, simülasyon sistemlerinde kullanıcılara gerçekçi bir hareket deneyimi sunmak amacıyla, sürekli öteleme ivme hareketinin etkisini yerçekimi vektörü aracılığıyla eğim koordinasyonunu kullanarak simüle etmeyi hedefler (Conrad ve Schmidt, 1970).

Bu kapsamda, farklı hareket algılama algoritmalarının uygulama diyagramları incelenmiştir. İlk olarak, Conrad ve Schmidt (1970) tarafından uçuş simülatörleri için geliştirilen ve daha sonra genel sürüş simülatörlerine uyarlanan klasik washout filtreleri ele alınmıştır. Bu filtreler, ticari simülatörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır ve genellikle kartezyen düzlemde gösterilirler (Reid ve Nahon, 1985). Klasik washout filtreleri, düşük frekanslı hareket bileşenlerini sönmüleyerek ve yüksek frekanslı bileşenleri koruyarak, simülatör platformunun kısıtlı hareket kapasitesini etkin bir şekilde

yönetmeyi amaçlar (Nahon ve Reid, 1990). Bu sayede, platformun fiziksel sınırlamalarına rağmen kullanıcıya gerçekçi bir hareket hissiyatı sunulabilir.

2005 yılında Wentink ve arkadaşları, 'Desdemona' simülatörü için küresel koordinatlara sahip bir algoritma geliştirmiştir (Wentink et al., 2005). Bu algoritma, klasik washout filtresinin kartezyen koordinat sistemindeki sınırlamalarını aşarak, daha geniş bir hareket yelpazesini simüle etme imkanı sunar. 2010 yılında ise Giordano, seri robotlar için silindirik koordinatlara sahip bir klasik algılama algoritması geliştirmiştir (Giordano, 2010). Bu algoritma, özellikle endüstriyel robotların hareketlerini daha hassas ve gerçekçi bir şekilde simüle etmek için tasarlanmıştır.

Klasik washout filtreleri, hareket belirleme algoritmasının hızlı bir şekilde prototiplemesi için etkili bir yöntem olarak kabul edilir (Reid ve Nahon, 1985). Yol bilgilerini çalışma alanı sınırı olarak kullanarak, aracın düz bir yoldaki yanal dinamiklerini sürüş simülatöründe gerçekçi bir şekilde yeniden üretebilirler. Bu amaçla, doğrusal ivme sinyali yüksek, orta ve düşük frekans bileşenlerine ayrıştırılır ve 8 serbestlik dereceli simülatörler için farklı birinci ve ikinci dereceden yüksek geçişli filtre parametreleri kullanılır. Bu sayede, lineer heksapod, lineer X ve Y eksenleri ile eğim açısı komut sinyalleri elde edilir. Ancak, klasik washout filtrelerinin doğrusal yapısı, bazı durumlarda istenmeyen hareket yapaylıklarına ve gerçekçilikten uzaklaşmaya neden olabilir (Grant ve Reid, 1997). Bu nedenle, daha sonra adaptif, optimal ve doğrusal olmayan algoritmalar gibi daha gelişmiş yöntemler geliştirilmiştir.

### **1.3.2 Adaptif Algoritma**

Adaptif washout filtreleri, simülasyon sırasında simülatörün mevcut durumuna göre parametrelerini ayarlayarak, hareket hatalarını ve platform kısıtlamalarını minimize etmeyi hedefleyen gelişmiş algoritmalar (Reid ve Nahon, 1985). Bu filtreler, simülasyon deneyimini optimize etmek ve kullanıcılara daha gerçekçi bir hareket hissiyatı sunmak için sürekli olarak adapte olma yeteneğine sahiptir.

Bu alandaki öncü çalışmalardan biri, Reid ve Nahon (1985) tarafından geliştirilen Adaptif Dinamik Reaksiyon Ağı (ADRN) algoritmasıdır. ADRN, hareket hatalarını ve platform kısıtlamalarını içeren bir maliyet fonksiyonunu en aza indirmek için gradient tabanlı

optimizasyon kullanarak adaptif parametreleri belirler (Reid ve Nahon, 1985). Bu sayede, simülasyon süresince değişen koşullara hızlı ve etkili bir şekilde tepki verebilir.

Naseri ve Grant (2005), ADRN algoritmasını temel alarak, hareket sistemi aktüatör durumlarını da maliyet fonksiyonunda dikkate alan Aktüatör Durumu Tabanlı Adaptif (ASBA) algoritmasını geliştirmiştir. ASBA, ADRN'nin adaptif yeteneklerini daha da geliştirerek, simülasyon performansını artırır ve daha gerçekçi hareket ipuçları sağlar.

LMR sürüş simülatörü üzerinde yapılan bir araştırmada, Schweig ve Kammers (2011), hibrit klasik-adaptif washout filtreleri olarak adlandırılan Adaptif Dinamik Silindirik Koordinat (ADSK) algoritmasını geliştirmiştir (Schweig ve Kammers, 2011). ADSK, silindirik koordinatlarda yüksek geçişli filtrelerin parametrelerini optimize ederek, simülatörün hareket tepkisini daha da iyileştirir ve kullanıcıya daha doğal bir deneyim sunar.

### **1.3.3 Lineer Optimizasyon**

Sivan ve çalışma arkadaşları (1982) önemli çalışmaları, doğrusal optimal washout filtrelerinin temelini atmış ve sonraki araştırmalara ilham kaynağı olmuştur (Sivan, vd., 1982). Bu alanda yapılan çalışmalar, başlangıçta Sivan'ın varsayımlarını doğrulamak ve genişletmek üzerine odaklanmıştır. Örneğin, Reid ve Nahon (1985), gerçek araç hareketlerinin spektral özelliklerini analiz ederek Sivan'ın varsayımlarını destekleyen bulgular elde etmişlerdir (Reid, Nahon, 1985).

Sivan ve arkadaşları, hareket algısında vestibüler sistemin baskın rol oynadığını vurgulayarak, gerçek ve simüle edilmiş hareket arasındaki farkın vestibüler hata ile ölçülebileceğini belirtmişlerdir (Sivan vd., 1982). Ayrıca, gerçek araç hareketinin rasyonel spektruma sahip rastgele bir süreç olarak modellenebileceği ve dinamik sistemlerin doğrusal denklemlerle temsil edilebileceği varsayımlarını da kabul etmişlerdir (Sivan vd., 1982). Bu yenilikçi algoritma, Adaptif Duyusal Yeniden Ağırlıklandırma Nötralizasyonu (ADRN)'ye benzer şekilde, yuvarlanma/yana kayma, eğilme/ileri kayma, düşey hareket ve dönüş gibi dört temel problemi ayrı ayrı ele alarak kapsamlı bir çözüm sunmaktadır (Sivan vd., 1982). Algoritmanın sofistike yapısal çerçevesi, gerçek araçta ve simülatörde hareket algısını oluşturan iki ayrı kanalı içermekte ve her iki kanalda da

vestibüler sistem, sürücünün algısını temsil etmektedir (Sivan vd., 1982). İdeal bir senaryoda, simülatörün çıktısı, giriş ile birebir örtüşerek kusursuz bir uyum sağlamalıdır.

Daha sonraki yıllarda, araştırmacılar optimal washout filtrelerinin performansını artırmak için farklı yöntemler geliştirmişlerdir. Telban ve arkadaşları (2005), çevrimdışı hesaplanan transfer fonksiyonlarının çevrimiçi uygulamasını optimize ederek simülasyon gerçekçiliğini artırmışlardır (Telban vd., 2005). Ayrıca, Fischer (2009), sürücü adaptasyonunu hesaba katan adaptif washout filtreleri önererek daha kişiselleştirilmiş bir simülasyon deneyimi sunmuştur.

Optimal algoritmanın temel amacı, gerçek araç ile simülatör arasındaki fark olan sürücü algı hatasını en aza indiren bir maliyet fonksiyonunu içeren transfer fonksiyonunu belirlemektir. Bu transfer fonksiyonları, araç girişini simülatör girişine dönüştürmek için kullanılan filtreler olarak işlev görerek, gerçekçi bir simülasyon deneyimi sunar. Bu fonksiyonlar, çevrimdışı bir program tarafından özenle üretildikten sonra çevrimiçi olarak uygulanarak verimliliği artırır (Telban vd., 2005).

#### **1.3.4 Nonlineer Optimizasyon**

Doğrusal optimal washout filtreleri, genellikle en kötü durum senaryolarına göre tasarlandığından, gerçek sürüş manevralarına adaptasyon kabiliyetleri sınırlıdır ve potansiyel olarak yanıltıcı hareket algıları üretebilirler. Bu durum, sürüş simülatörlerinde kullanıcı deneyimini olumsuz etkileyerek gerçeklik algısını azaltabilir ve algısal hataların artmasına neden olabilir (Cardullo ve Kosut, 1983; Ish-Shalom, 1982).

Bu sorunu çözmek amacıyla, Cardullo ve Kosut (1983) ve Ish-Shalom (1982) tarafından doğrusal olmayan bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşım, adaptif ve optimal washout filtrelerinin prensiplerini birleştirerek, sürüş simülatörlerinde hareket ipucu doğruluğunu en üst düzeye çıkarmayı hedefler. Bu sayede, simülatör kullanıcılarının gerçekçi ve doğru hareket deneyimleri yaşamaları amaçlanır.

Telban ve arkadaşları (2005), bu yaklaşımı temel alarak doğrusal olmayan optimal bir washout filtresi geliştirmişlerdir (Telban et al., 2005). Bu algoritma, algısal hataları minimize etmek için uygun bir simülatör girişi oluşturarak optimal washout filtrelerini

belirler. Algoritma, her zaman adımında simülâtör durumlarının geri bildirim bilgisini kullanarak hesaplanır ve bu, Riccati Denklem Çözücüsünün gerçek zamanlı olarak uygulanmasını gerektirir (Telban et al., 2005). Bu sayede, filtrelerin performansı anlık olarak optimize edilir ve algısal doğruluk artırılır.

Ayrıca, algoritma, Algısal Sistem bloğuna hem vestibüler hem de optokinetik bir model dahil ederek, yalnızca özgül kuvvetler ve açısal hız (vestibüler sistem tarafından algılanan) değil, aynı zamanda dönme hızı ve translasyonel algının hızını (görsel sistem tarafından algılanan) da dikkate alır (Telban et al., 2005). Bu kapsamlı yaklaşım, kullanıcının hem iç kulak denge organı (vestibüler sistem) hem de göz hareketleri ve görsel algı (optokinetik sistem) üzerinden daha doğru ve bütünsel bir hareket hissi yaşamasını hedefler.

### **1.3.5 Model Öngörülü Kontrol**

Doğrusal optimal washout filtreleri, genellikle en kötü durum senaryolarına göre tasarlandığından, gerçek sürüş manevralarına adaptasyon kabiliyetleri sınırlıdır ve potansiyel olarak yanıltıcı hareket ipuçları üretebilirler (Cardullo ve Kosut, 1983). Bu durum, sürüş simülâtörlerinde kullanıcı deneyimini olumsuz etkileyerek gerçeklik algısını azaltabilir ve algısal hataların artmasına neden olabilir (Cardullo ve Kosut, 1983; Ish-Shalom, 1982).

Bu sorunu çözmek amacıyla, Cardullo ve Kosut (1983) ve Ish-Shalom (1982) tarafından doğrusal olmayan bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşım, adaptif ve optimal washout filtrelerinin prensiplerini birleştirerek, sürüş simülâtörlerinde hareket ipucu doğruluğunu en üst düzeye çıkarmayı hedefler. Bu sayede, simülâtör kullanıcılarının gerçekçi ve doğru hareket deneyimleri yaşamaları amaçlanır.

Telban ve arkadaşları (2005), bu yaklaşımı temel alarak doğrusal olmayan optimal bir washout filtresi geliştirmişlerdir. Bu algoritma, algısal hataları minimize etmek için uygun bir simülâtör girişi oluşturarak optimal washout filtrelerini belirler. Algoritma, her zaman adımında simülâtör durumlarının geri bildirim bilgisini kullanarak hesaplanır ve bu, Riccati Denklem Çözücüsünün gerçek zamanlı olarak uygulanmasını gerektirir

(Telban et al., 2005). Bu sayede, filtrelerin performansı anlık olarak optimize edilir ve algısal doğruluk artırılır.

Ayrıca, algoritma, Algısal Sistem hesaplamasına hem vestibüler hem de optokinetik bir model dahil ederek, yalnızca özgül kuvvetler ve açısal hız (vestibüler sistem tarafından algılanan) değil, aynı zamanda dönme hızı ve translasyonel algının hızını (görsel sistem tarafından algılanan) da dikkate alır (Telban et al., 2005). Bu kapsamlı yaklaşım, kullanıcının hem iç kulak denge organı (vestibüler sistem) hem de göz hareketleri ve görsel algı (optokinetik sistem) üzerinden daha doğru ve bütünsel bir hareket hissi yaşamasını hedefler.



## BÖLÜM II

### İNSAN HAREKET ALGI SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

#### 2.1 Tanım

İnsan hareket algısına yönelik en uygun algoritmanın geliştirilmesi, öncelikle algı kavramının insan fizyolojisi ve psikolojisi bağlamında derinlemesine anlaşılmasını gerektirir (Goldstein, 2013; Sekuler ve Blake, 2014). Bu bağlamda, "algı"nın soyut yapısının matematiksel ifadelerle modellenmesi, algoritma geliştirme sürecinde kullanılacak yöntemlerin kapsamını genişletebilir (Grush, 2004; Faisal vd., 2008).

Literatür incelendiğinde, algı algoritmalarının ve simülatörlerin performansının, simüle edilen hareket parametrelerinin (hız, ivme vb.) insan algı sistemine ne kadar doğru ve gerçekçi bir şekilde aktarılabilirdiği ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir (Wertheim, 1994; Snowden ve Braddick, 1991). Dolayısıyla, insan algı sisteminin işleyiş mekanizmalarının daha iyi anlaşılması hem algoritma hem de simülatörlerin geliştirilmesinde kritik bir öneme sahiptir (Purves vd., 2001; Kandel vd., 2000). Bu noktada, vestibular sistemin insan hareket algısındaki merkezi rolü nedeniyle, simülatör odaklı araştırmalarda vestibular sistemin detaylı analizi öncelikli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır (Angelaki ve Cullen, 2008; Howard, 1982). Vestibular sistemin matematiksel modellemesi üzerine yapılan çalışmalar, farklı modelleme yaklaşımlarının denenmesi ve en uygun modelin belirlenmesi çabalarını içermektedir (Fernandez ve Goldberg, 1971; Mayne, 1973). Matematiksel modeller, hareket halindeki insan vücudunun beyne ilettiği sinyallerin yorumlanmasına ve optimizasyonuna olanak tanıyarak, algı süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

#### 2.2 Vestibüler Organ

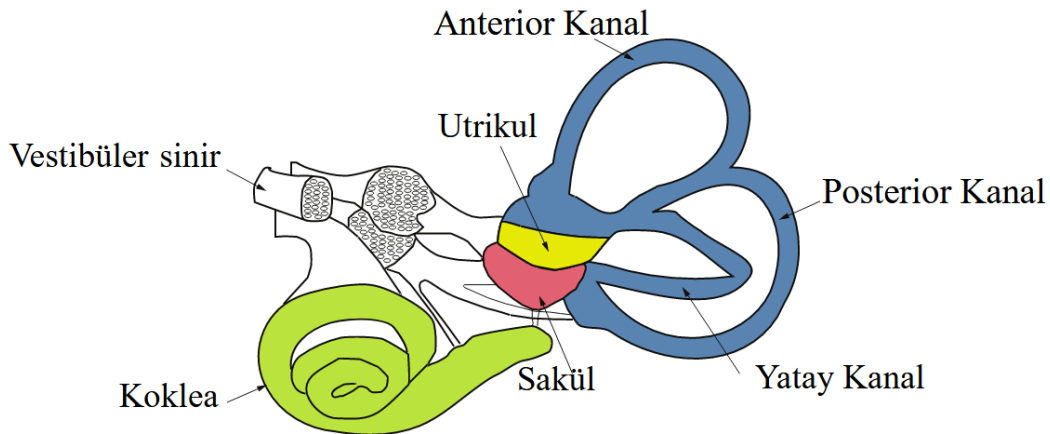
Vestibüler sistem, denge ve uzamsal oryantasyonun sağlanmasında kritik rol oynayan karmaşık bir yapıdır (Purves vd., 2001; Howard, 1982). İç kulakta yer alan ve kohlea ile anatomik yakınlık gösteren bu sistem, bilateral simetrik bir düzenleme sergiler (Angelaki

ve Cullen, 2008). Bu simetri, vücudun her iki tarafındaki hareketlerin eşit algılanmasına ve denge kontrolüne katkıda bulunur (Dieterich ve Brandt, 2008).

Vestibüler sistemin temel işlevi, açısal ve doğrusal hareketlerin algılanması ve bu bilgilerin merkezi sinir sistemine iletilmesidir (Goldstein, 2013). Bu sayede beyin, vücudun uzaydaki konumunu ve hareketlerini sürekli olarak izler ve dengeyi korumak için gerekli düzenlemeleri yapar (Purves vd., 2001). Bu karmaşık işlevler, özelleşmiş iki ana bileşen aracılığıyla gerçekleştirilir: yarım daire kanalları (açısal hareket) ve otolit organlar (doğrusal hareket) (Khan ve Chang, 2013).

Vestibüler sistem duyum modellerinin geliştirilmesi, deneysel ve teorik analizlerin birleşiminden elde edilen bulgulara dayanmaktadır (Zupan vd., 2002). Bu modeller, hareket ipucu algoritmalarına kolayca entegre edilebilecek ve fizyolojik gerçekliklerle uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır (Telban et al., 2005). Geliştirilen modeller, yarım daire kanalları ve otolit organlarının fizyolojisi üzerine yapılan araştırmalardan ve döner ve doğrusal hareket duyumunu inceleyen çalışmalardan elde edilen verilerle desteklenmektedir (Fernandez ve Goldberg, 1971; Young ve Oman, 1969). Yarım daire kanalları duyum modeli, daha önce sunulan bir modelin devamı niteliğindedir (Grant ve Best, 1987). Ayrıca, hareket eşikleri üzerine yapılan araştırmalar, hareket ipucu algoritması geliştirme sürecinde kullanılacak değerlerin belirlenmesinde önemli bir rol oynamıştır (Benson, 1978).

Vestibüler sistem, iç kulakta konumlanır ve açısal hareketi algılayan yarım daire kanalları ile doğrusal hareketi algılayan otolit organlarından oluşur (Clarke, 2005).



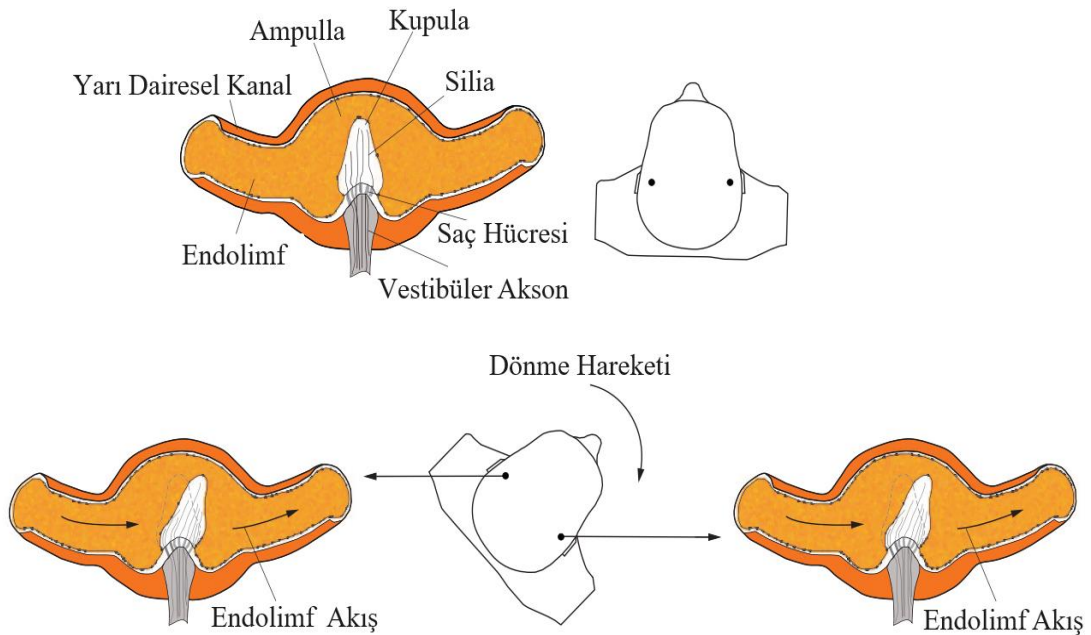
**Şekil 2.1.** Vestibüler Organ Yapısı (Kandel vd., 2000)

## 2.2.1 Yarım Daire Kanalları

Yarım daire kanalları, iç kulakta bulunan ve vestibüler sistemin temel bileşenlerinden biri olan özelleşmiş duyuşal organlardır (Purves vd., 2001). Bu yapılar, başın üç boyutlu uzaydaki açısal hareketlerinin (dönme hareketleri) algılanmasından sorumludur (Khan ve Chang, 2013). Bu sayede denge kontrolü, uzaysal oryantasyon ve hareket koordinasyonu gibi hayati fonksiyonlara katkıda bulunurlar (Goldstein, 2013).

Her bir yarım daire kanalı, içinde endolenf adı verilen viskoz bir sıvı bulunan kemikli bir tüpten oluşur (Clarke, 2005). Kanalin bir ucunda ampulla adı verilen genişlemiş bir bölge bulunur ve bu bölgede kupula adı verilen jelatinimsi bir yapı yer alır (Angelaki ve Cullen, 2008). Kupula, kanalın içini tamamen kapatarak endolenfin serbestçe akmasını engeller (Squires vd., 2013). Kupula içinde ise duyuşal saç hücreleri bulunur. Bu hücreler, stereosilya ve kinocilyum adı verilen özel yapılara sahiptir.

Başın dönme hareketi sırasında, endolenf sıvısı atalet nedeniyle hareket eder ve kupulayı iterek saptırır (Howard, 1982). Bu sapma, saç hücrelerindeki stereosilya ve kinocilyumların bükülmesine neden olur. Bu bükülme, mekanik bir uyarıyı elektriksel sinyale dönüştürerek sinirler aracılığıyla beyne iletilir (Kandel vd., 2000). Beyin, bu sinyalleri yorumlayarak başın uzaydaki konumunu ve hareketlerini algılar.



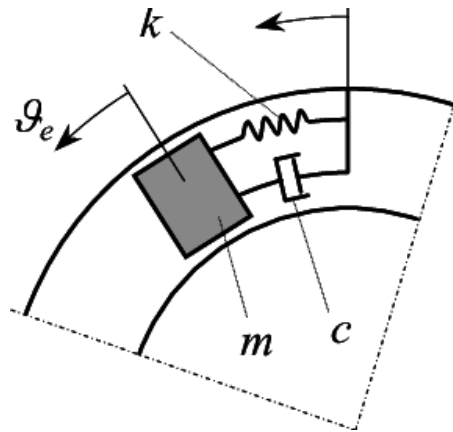
Şekil 2.2. Yarım Daire Kanalıının Çalışması (Tortora ve Derrickson, 2008)

Yarım daire kanalları, açısal ivmeye değil, açısal hıza duyarlıdır (Wilson ve Melvill Jones, 1979). Başın dönme hızı arttıkça, endolenf sıvısının kupula üzerindeki itme kuvveti de artar, bu da saç hücrelerinin daha fazla uyarılmasına ve daha güçlü sinyaller üretmesine yol açar. Ancak, sabit hızda dönme durumunda, endolenf sıvısı sonunda dengeye ulaşır ve kupula üzerindeki itme kuvveti azalır. Bu nedenle, yarım daire kanalları sürekli dönme hareketini algılayamazlar.

### 2.2.1.1 Yarım Daire Kanallarının Matematiksel Modelleri

Açısal hareket algılama fizyolojisinin temellerini oluşturan ilk matematiksel tanım, Steinhausen (1933) tarafından geliştirilen torsiyon-sarkaç modeli ile atılmıştır. Bu modelde, tek yarım daire kanalı, üzerine kütle ile orantılı bir atalet kuvveti etkileyen sönümlü bir kütle-yay sistemi olarak temsil edilir (Fernandez ve Goldberg, 1971). Bu sayede, dönme hareketi sırasında yarım daire kanalındaki sıvının hareketine bağlı olarak oluşan sinirsel uyarıların matematiksel bir modeli oluşturulmuş ve bir transfer fonksiyonu elde edilmiştir.

Ancak, vestibüler sistemin karmaşıklığı göz önüne alındığında, torsiyon-sarkaç modelinin gerçek dönme hareketleri sırasında algılanan duyumları tam olarak yansıtamadığı anlaşılmıştır (Wilson ve Melvill Jones, 1979). Vestibüler modeller üzerinde yapılan deneysel ölçümler, algılanan duyumların modelin öngördüğünden daha karmaşık bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir (Goldberg ve Fernandez, 1971). Bu nedenle, yıllar içinde modelin daha gerçekçi tahminler yapabilmesi için çeşitli düzenlemeler ve iyileştirmeler yapılmıştır (Ormsby, 1974).



Şekil 2.3. Yarım Daire Kanalı Kütle-Yay-Damper Modeli (Gastaldi vd., 2009)

$$\frac{\bar{\theta}_e - \bar{\theta}_c}{\bar{\omega}} = \frac{-s}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (2.1)$$

Burada  $\bar{\omega}$  kanalın açısal hızı,  $\bar{\theta}_c$  kafa ile tamamlayıcı olarak kabul edilen ve atalet sisteminden yararlanan yarı dairesel kanal kanalının açısal yer değiştirmesi,  $\bar{\theta}_e$  eylemsizlik sisteminden yararlanan endolenfinin açısal yer değiştirmesi, k elastik sabiti, c kinematik viskozite sabiti, m endolenfin kütlesidir (Gastaldi vd., 2009).

$$\frac{\bar{\theta}_e - \bar{\theta}_c}{\bar{\omega}} = \frac{-\tau_1 \tau_2 s}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (2.2)$$

$\tau_1 = \frac{c}{k}$  , uzun zaman sabiti

$\tau_2 = \frac{m}{c}$  , kısa zaman sabiti

Kısa zaman sabiti, yüksek frekanslı titreşimlerde baskın olan ve sistemin tepki hızını belirleyen önemli bir parametredir. Bu sabit, sistemin kütlesi ve viskoz sönümlenme oranı ile doğrudan ilişkilidir. Daha yüksek bir kütle, sistemin daha yavaş tepki vermesine neden olurken, daha yüksek bir viskoz sönümlenme oranı, titreşimlerin daha hızlı sönümlenmesini sağlar. Diğer yandan, uzun zaman sabiti, düşük frekanslı titreşimlerde daha belirgin hale gelir ve sistemin genel davranışını etkiler. Bu sabit, viskoz sönümlenme terimi ile sertlik teriminin oranı olarak ifade edilir ve sistemin ne kadar hızlı dengeye ulaşacağını gösterir.

$$\frac{\bar{\theta}_c(s)}{\bar{\alpha}(s)} = \left[ \frac{\tau_a s}{1 + \tau_a s} \right] \left[ \frac{K_{SCC}}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} \right] \quad (2.3)$$

Vestibüler sistemin matematiksel modelinin oluşturulmasında öncü olan Laurence Young (1968), Torsiyon sarkaç modelini, başlangıçta rotasyonel duyumu modellemek için kullanmış olsa da daha sonraki çalışmalarında bu modelin bazı eksikliklere sahip olduğunu ortaya koymuştur (Young ve Oman, 1969). Özellikle, modelin gerçek sistemlerin karmaşıklığını tam olarak yansıtamadığı ve bazı durumlarda hatalı sonuçlar üretebildiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için bir adaptasyon fonksiyonu geliştirmiştir (Young, 1984).

Yukarıdaki denklemde de görüldüğü gibi torsiyon-sarkaç modeli ile yüksek geçiren filtre olan adaptasyon fonksiyonu  $\left[ \frac{\tau_a s}{1 + \tau_a s} \right]$  çarpılmıştır. Bu fonksiyon, vestibüler sistemin adaptasyon davranışını modellemek için kullanılmıştır. Vestibüler sistemin bu davranışı, aynı hızda maruz kalınması durumunda nötr pozisyona geri dönmesini sağlar ve karmaşık bir süreçtir. Bu süreç, merkezi sinir sistemi ile iç kulaktaki yapılar arasındaki etkileşimi içerir.

Sürekli aynı hızda maruz kalma durumunda, vestibüler sistem bu hareketi "normal" olarak algılamaya başlar (Curthoys ve Oman, 1975). Bu adaptasyon sürecinde, vestibüler sinir hücrelerinin aktarım hızı azalır ve beyin bu harekete karşı daha az duyarlı hale gelir (Miles ve Lisberger, 1981). Bu habituasyon süreci, sinir hücreleri arasındaki bağlantıların gücünün zayıflamasıyla gerçekleşir (Squires vd., 2013). Adaptasyon ve habituasyon süreçleri sayesinde, vestibüler sistem hareketin hızına uyum sağlar ve bu hareketi artık bir uyarı olarak algılamaz. Bu da vestibüler sistemin nötr pozisyona dönmesine, yani başlangıçtaki denge durumunu yeniden kazanmasına yol açar. Böylece, baş dönmesi gibi rahatsızlıklar ortadan kalkar ve denge yeniden sağlanır.

Özetle, vestibüler sistemin aynı hızda maruz kalma durumunda nötr pozisyona dönmesi, iç kulaktaki yapılar, beyin sapı, beyincik ve diğer duyuşal sistemler arasındaki karmaşık etkileşimler sonucu gerçekleşen bir süreçtir (Angelaki ve Cullen, 2008). Adaptasyon ve habituasyon mekanizmaları sayesinde, vestibüler sistem hareketin hızına uyum sağlayarak dengeyi yeniden kazanır.

$K_{Scc}$  parametresi ise, modelin farklı frekans aralıklarına ne kadar duyarlı olduğunu belirleyerek, daha geniş bir frekans yelpazesine uyum sağlamasına ve daha doğru sonuçlar üretmesine olanak tanır. Böylece, adaptasyon operatörü, torsiyon sarkaç modelinin eksikliklerini gidererek daha gerçekçi ve güvenilir bir modelleme aracı sunar.

$$\frac{\bar{\phi}_c(s)}{\bar{a}(s)} = \left[ \frac{\tau_a s}{1 + \tau_a s} \right] \left[ \frac{K_{Scc}}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} \right] [1 + \tau_L s] \quad (2.4)$$

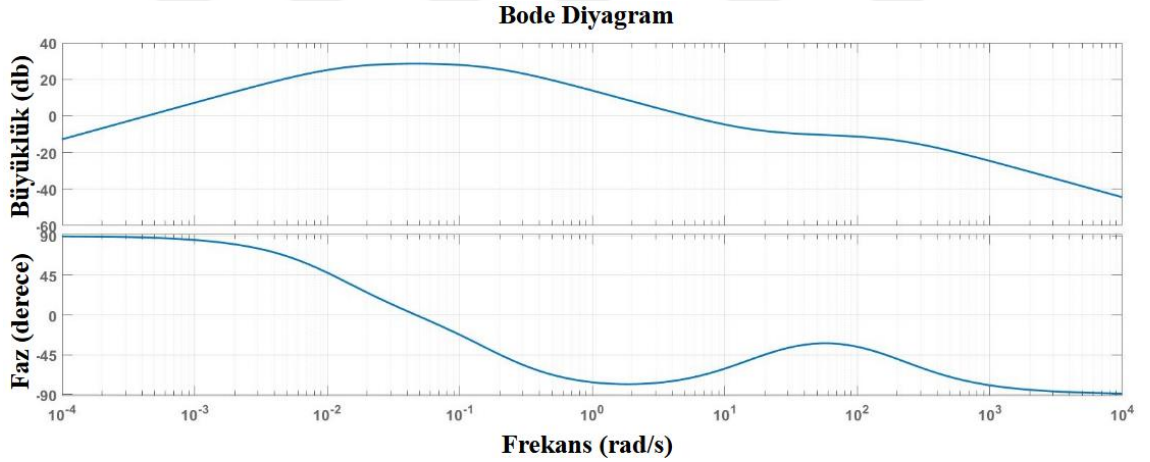
Her ne kadar model eklenen yeni parametreler ile iyileştirilmiş olsa da 1970 yılında sincap maymunları ile yapılan deneysel çalışmalarda bu modelin de yetersiz olduğu ortaya

çıkış ve yakalanamayan frekans cevapları lead(öncül) fonksiyonu  $[1 + \tau_L s]$  ile yakalanmaya çalışılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda yarım daire kanalına ait nihai (2.4) transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Bu çalışmaya göre yarım daire kanal nöronlarının açılmal hızlanmaya verdiği tepkinin dinamiklerini tanımlamak için dört zaman sabiti değerleri  $\tau_1 = 5.73$ ,  $\tau_2 = 0.003$ ,  $\tau_A = 80$ ,  $\tau_L = 0.049$  ve  $K_{SCC} = 3.44$  olarak belirlenmiştir.

$$\frac{\bar{\theta}_c(s)}{\bar{\alpha}(s)} = \left[ \frac{80s}{1+80s} \right] \left[ \frac{3.44}{(1+5.73s)(1+0.003s)} \right] [1 + 0.049s] \quad (2.5)$$

Parametrelerin bulunması ile ilgili deneysel araştırmalardan sonra parametreler  $\tau_1 = 5.73$ ,  $\tau_2 = 0.005$ ,  $\tau_A = 80$ ,  $\tau_L = 0.06$  ve  $K_{SCC} = 28.6479$  olarak güncellenmiş ve tezde de kullanılmak üzere, Goldberg ve Fernandez (1971) araştırmasında yer alan (2.6)'da ki transfer fonksiyonu elde edilmiştir.

$$\frac{\bar{\theta}_c(s)}{\bar{\alpha}(s)} = \left[ \frac{80s}{1+80s} \right] \left[ \frac{28.6479}{(1+5.73s)(1+0.005s)} \right] [1 + 0.06s] \quad (2.6)$$



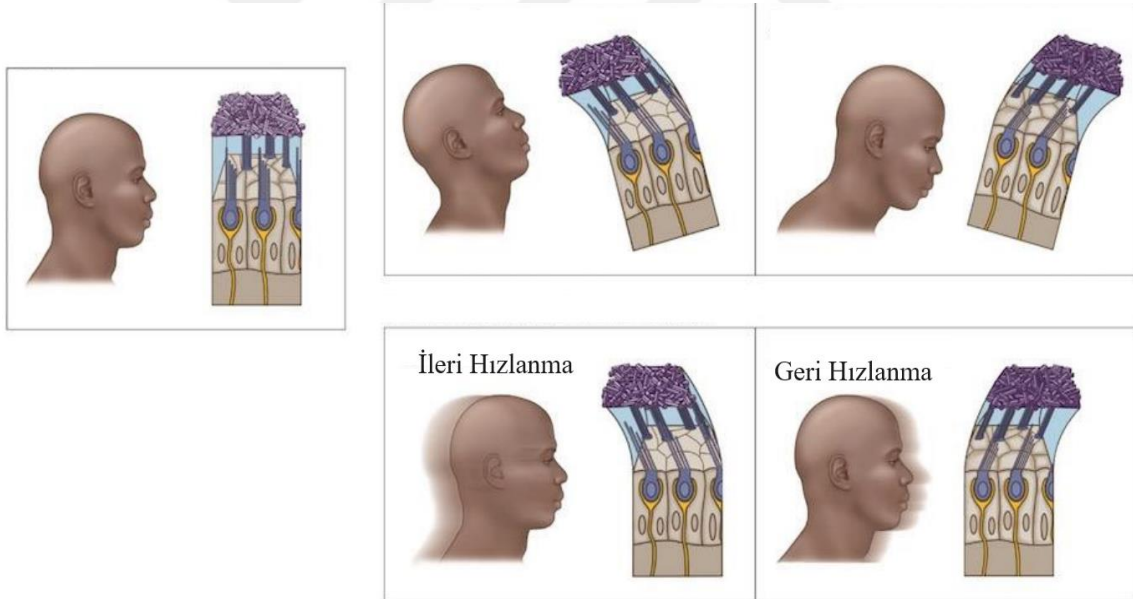
**Şekil 2.4.** Yarım Daire Kanal Modelinin Bode Diyagramı

### 2.2.2 Otolit

Otolitik organlar, iç kulakta yer alan ve denge ile doğrusal ivme algısından sorumlu önemli yapılardır (Purves vd., 2001; Khan ve Chang, 2013). Bu organların işlevi, otokonyal tabaka (kalsiyum karbonat kristalleri) ve jelatinöz tabakadan oluşan otolitik membran aracılığıyla gerçekleşir (Lundberg ve Zhao, 2016). Jelatinöz tabaka, otokonyal

tabakanın altında bulunur ve duyu hücresi tabanı olan makula ile bağlantılıdır (Goldstein, 2013). Makula, kafatasına sıkıca bağlı olduğundan baş hareketleriyle birlikte hareket eder (Clarke, 2005).

Otolitik organlardan utrikul yatay düzlemde, sakkul ise dikey düzlemde bulunur (Angelaki ve Cullen, 2008). Makula, otolitik tabakanın eylemsizliği sayesinde doğrusal ivmeleri algılar (Fernández ve Goldberg, 1971). Baş hareketi veya doğrusal hız değişiklikleri sırasında otolitik membran yer değiştirir, bu da kıl hücrelerinin uyarılmasına veya inhibe edilmesine neden olur (Wilson ve Melvill Jones, 1979). Örneğin, ileri ivmelenme veya başın eğilmesi durumunda, otolitik membran deformasyona uğrar ve kıl hücreleri tepki verir. Bu deformasyon, jelatinöz tabakayı geriye çeken atalet kuvveti veya tabakayı aşağıya çeken yerçekimi kuvveti tarafından meydana gelir (Howard, 1982). Sapmanın yönüne bağlı olarak, saç hücreleri uyarılır veya inhibe edilir (Kandel vd., 2000).



**Şekil 2.5.** Otolitin Çalışması (Purves vd., 2001)

Şekil 2.5'te ki gibi Otolitik organların eğim ve doğrusal ivmeye aynı yanıtı vermesi, algısal bir yanılsamaya yol açarak maruz kalınan eğimin hızlanma hareketi olarak algılanmasına sebebiyet verebilir (Zacharias, 1978). Bu kavram, hareket algısı algoritmalarının doğrusal ivmeyi simüle etmesindeki temel mekanizmayı oluşturur. Ancak, otolit organının eğim ve doğrusal ivme arasındaki ayrımı algılama kapasitesi

sınırlıdır. Bu sınır bireyler arasında farklılık göstermekle birlikte, yapılan deneysel çalışmalar yaklaşık olarak 20°'den sonraki eğimler için yarım daire kanallarından gelen proprioseptif sinyallerin beyinde hareketin ivme temelli olduğunun anlaşılmasını sağladığını ortaya koymuştur (Zacharias, 1978). Bu noktada, bahsi geçen deneysel çalışmaların deneklerin görsel bilgiden yoksun bırakıldığı, yani gözleri kapalı bir şekilde gerçekleştirildiğini belirtmek önemlidir. Bu durum, algısal yanılsamanın oluşumunda görsel bilginin rolünü dışlamak ve otolit organın işlevine odaklanmak için gereklidir.

### 2.2.2.1 Otolit matematiksel model

Zacharias (1978), Meiry'nin (1968) çalışmasına dayanarak, algılanan hız ile gerçek hız arasındaki ilişkiyi modelleyen bir transfer fonksiyonu geliştirdi. (2.7)'da gösterilen model, algılanan tepkinin bir ivme adımına yanıt olarak 10 saniyelik bir zaman sabiti ile azaldığını öngörüyor.

$$\frac{\tilde{V}(s)}{V(s)} = \left[ \frac{K_{oto}\tau_1 s}{(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)} \right] \quad (2.7)$$

Young ve Meiry (1968), Zacharias (1978)'in modelinin bazı yönlerden başarılı olduğunu, ancak otolitlerin sürekli eğim açısına tepkisini tam olarak tahmin edemediğini belirtti. Bu nedenle hem algılanan eğimi hem de ivmeyi modelleyebilen yenilenmiş (2.8)'de gösterilen modeli önerdiler.

$$\frac{\tilde{f}(s)}{f(s)} = \left[ \frac{K_{oto}}{(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)} \right] [1 + \tau_L s] \quad (2.8)$$

Modelde  $\tau_1$  uzun zaman sabiti 5.33,  $\tau_2$  kısa zaman sabiti 0.66, lead zaman sabiti  $\tau_L$  13.2, kompanzasyon için kullanılan  $K_{oto}$  0.4 olarak belirlenmiş ve ivme girdisine yanıt olarak hem algılanan eğimi hem de ivmeyi içermektedir. Bu model, doğrusal ivme hissini eğim hissi ile eşdeğer olduğunu varsayar.

İlerleyen zaman katsayıları ile ilgili yapılan araştırmalarında daha doğru sonuç veren katsayı formatı ve oluşan formül (2.9)'da ki gibidir.

$$\frac{\tilde{f}(s)}{f(s)} = K'_{oto} \left[ \frac{s+A_0}{(s+B_0)(s+B_1)} \right] \quad (2.9)$$

Buradaki  $A_0 = 1/\tau_L$ ,  $B_0 = 1/\tau_1$ ,  $B_1 = 1/\tau_2$ ,  $K'_{oto} = K_{oto}\tau_1\tau_2/\tau_L$ , katsayılar ise  $\tau_1 = 5$ ,  $\tau_2 = 0.016$ ,  $\tau_L = 10$  ve  $K_{oto} = 0.4$ , olarak tezde kullanılmıştır.

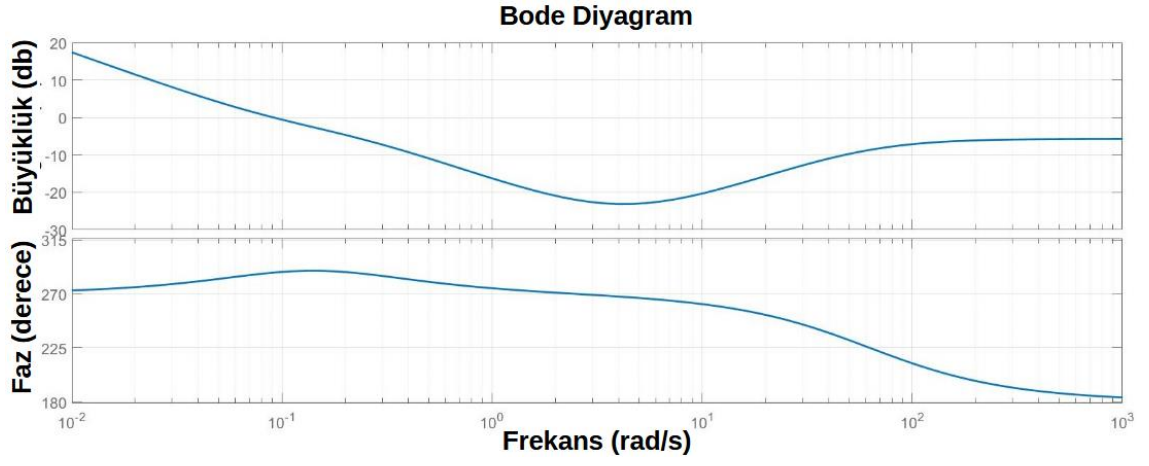
Bu araştırmalar, otolit sisteminin doğrusal hareket ve spesifik kuvveti nasıl algıladığını modellemeye yönelik önemli adımlar atmıştır. Zacharias (1978) ve Young ve Meiry (1968)'nin çalışmaları, bu alandaki anlayışımızı derinleştirerek daha gelişmiş modellerin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. Özellikle Young ve Meiry (1968), modelin sadece başın hız değil, aynı zamanda hem eğim hem de doğrusal hareket altında maruz kaldığı kuvvetlerin birleşimini temsil etmesi gerektiğini savunmuş ve (2.10)'da gösterilen modeli önermiştir ve bu model ise tezde kullanılan modeldir.

$$f_x = a_x + g\theta - R_{sz}\ddot{\theta} \quad (2.10)$$

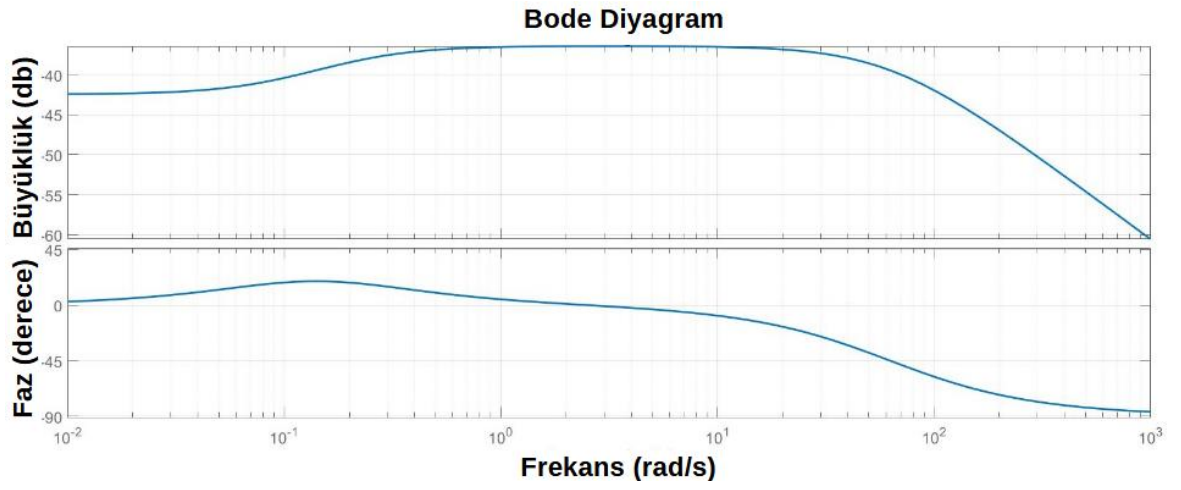
$$f(s) = u_2(s) + \left(g\frac{1}{s} - R_{sz}s\right)u_1(s) \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \hat{f}_x(s) &= G_{oto}K'_{oto} \frac{(s+A_0)}{(s+B_0)(s+B_1)} \left[ u_2 + \left(g\frac{1}{s} - R_{sz}s\right)u_1 \right] \\ &= G_{oto}K'_{oto} \frac{(s+A_0)}{(s+B_0)(s+B_1)} \left[ \left(g\frac{1}{s} - R_{sz}s\right) \begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} \right] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\ &= G_{oto}K'_{oto} \left[ \frac{-R_{sz}s^3 - R_{sz}A_0s^2 + gs + gA_0}{s(s+B_0)(s+B_1)} \quad \frac{(s+A_0)}{(s+B_0)(s+B_1)} \right] u \end{aligned} \quad (2.12)$$

Otolitin alışma prensibinde bahsedildiği ve (2.11) denkleminden grldğg üzere otolit organın 2 adet hissiyat girişi(input) bulunmaktadır:  $u_1 = \dot{\theta}$ ,  $u_2 = a_x$ . Denklem 2.12. de kullanılan  $R_{sz}$ , katsayısı 0.55 alınmıştır. Bulunan katsayılarla beraber belirlenen 2.12 denkleminin frekans cevabı Şekil 2.6 ve Şekil 2.7 de verilmiştir.



**Şekil 2.6.** Otolit  $\theta$  Bode Diyagram



**Şekil 2.7.** Otolit  $a_x$  Bode Diyagram

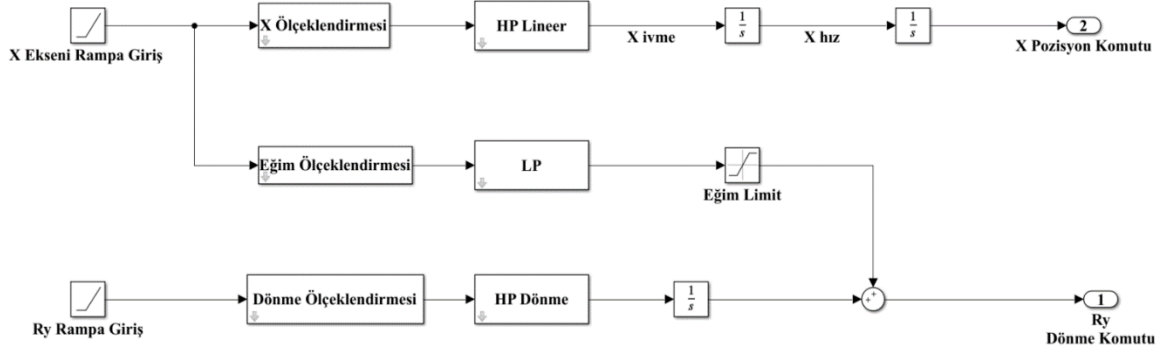
## BÖLÜM III

### HAREKET ALGI ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ

#### 3.1 Klasik algoritma

Schmidt ve Conrad (1970), uçuş simülörlerinde hareketin nasıl daha gerçekçi hale getirilebileceğini araştırmışlar. Gerçek uçuştaki tüm hareketleri birebir kopyalamak mümkün olmasa da pilotun uçuşu hissetmesi ve kontrol etmesi için en önemli hareketlerin neler olduğunu bulmaya çalıştılar. Schmidt ve Conrad'ın geliştirdiği ilk algoritma, "Klasik Algoritma" olarak adlandırılıyor. Bu algoritma, insan algısındaki, belli bir dereceye kadar eğimi ileri yönde ivmelenme sanması ve belli bir hız kadar hareketi hissedememesi durumlarını dikkate alarak, simülördeki hareketleri daha gerçekçi hale getirmeyi amaçlamıştır.

Schmidt ve Conrad'ın (1970) yayınladıkları klasik algoritma Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



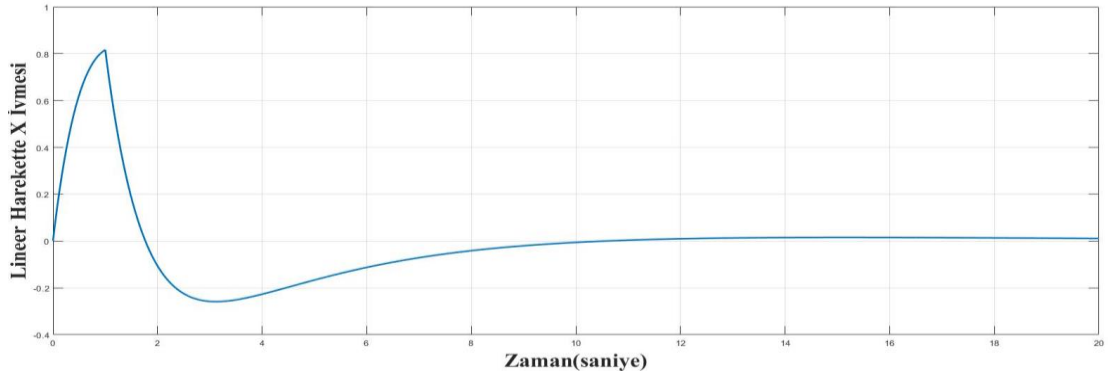
Şekil 3.1. Klasik Algoritma X ve  $R_y$  Blok Diyagramı

Şekil 3.1 de gösterilen filtreler aşağıdaki gibidir:

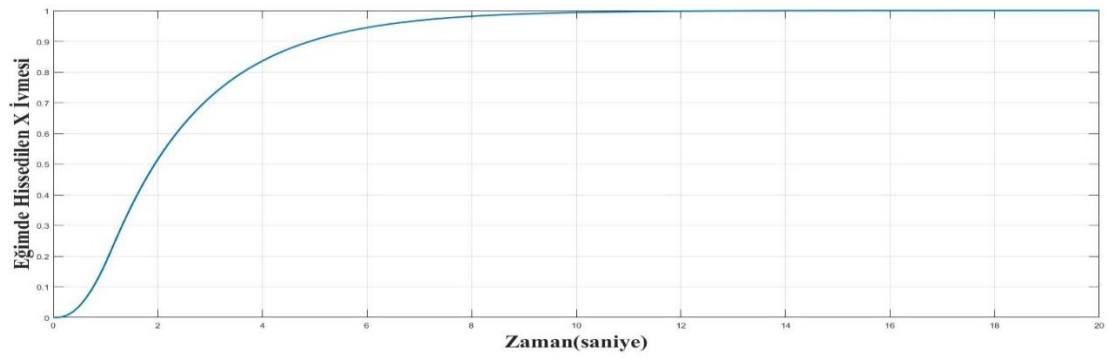
$$HP_{Lineer} = \frac{s^2}{s^2 + 2\delta_{HP}w_{HP} + w_{HP}^2} \quad (3.1)$$

$$LP_{Eğim} = \frac{1}{s^2 + 2\delta_{LP}w_{LP} + w_{LP}^2} \quad (3.2)$$

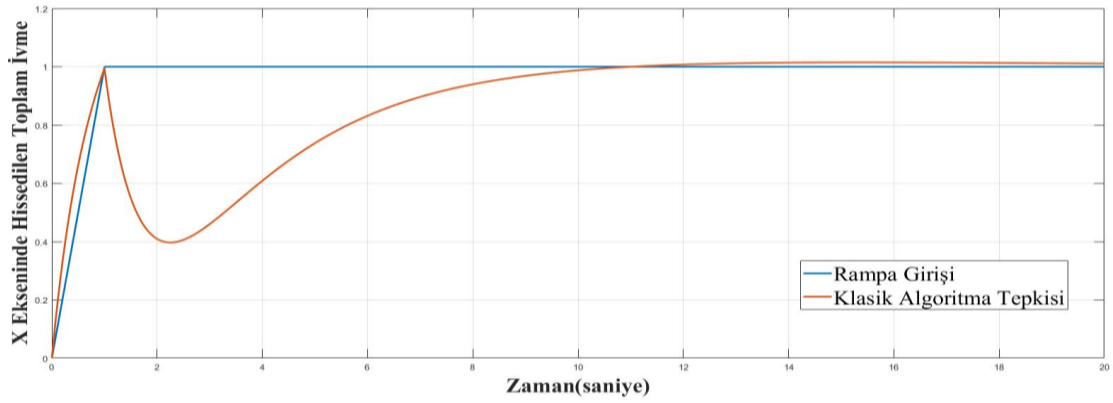
Çizelge 3.1'e göre elde edilmiş grafik sonuçları aşağıdaki gibidir:



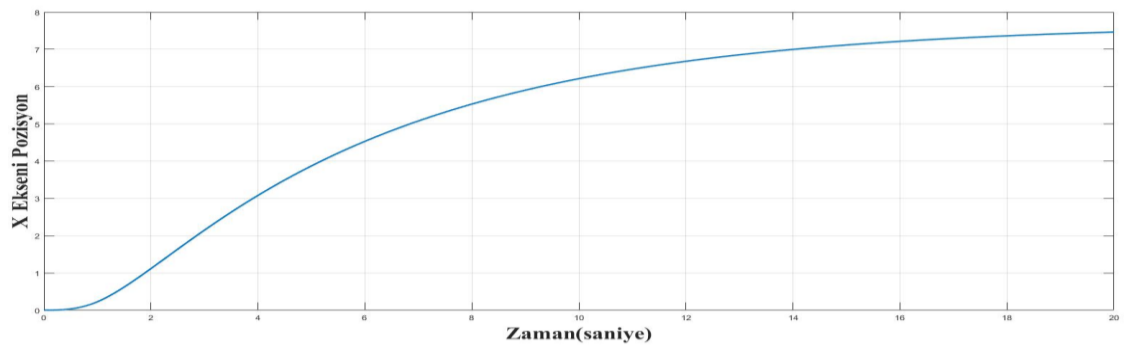
Şekil 3.2. HP Filtre  $X_{ivme}$  Rampa Cevabı



Şekil 3.3. LP Filtre Rampa Cevabı



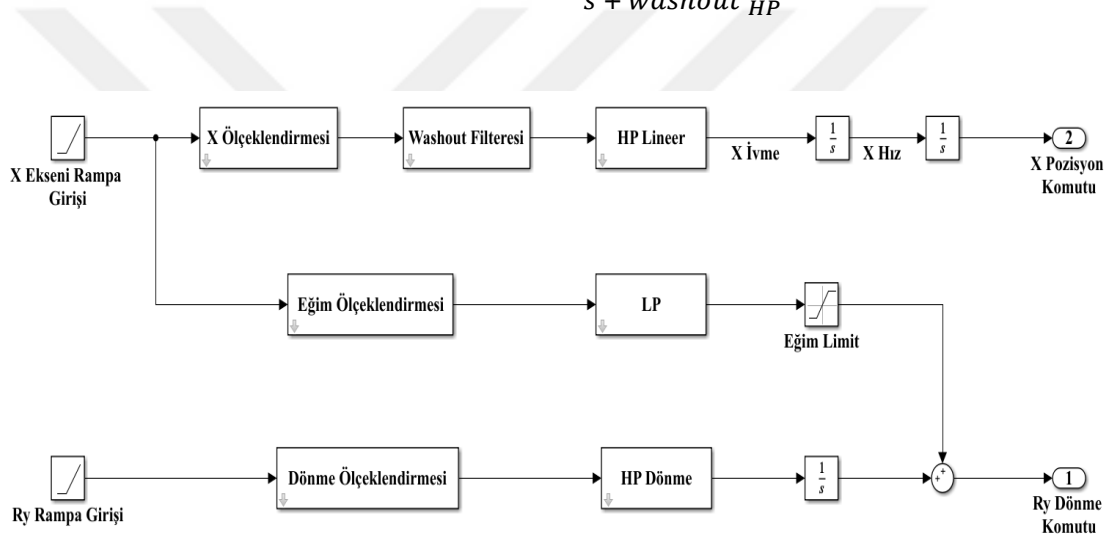
Şekil 3.4. 3.1 Blok Diyagramının Rampa Cevabı



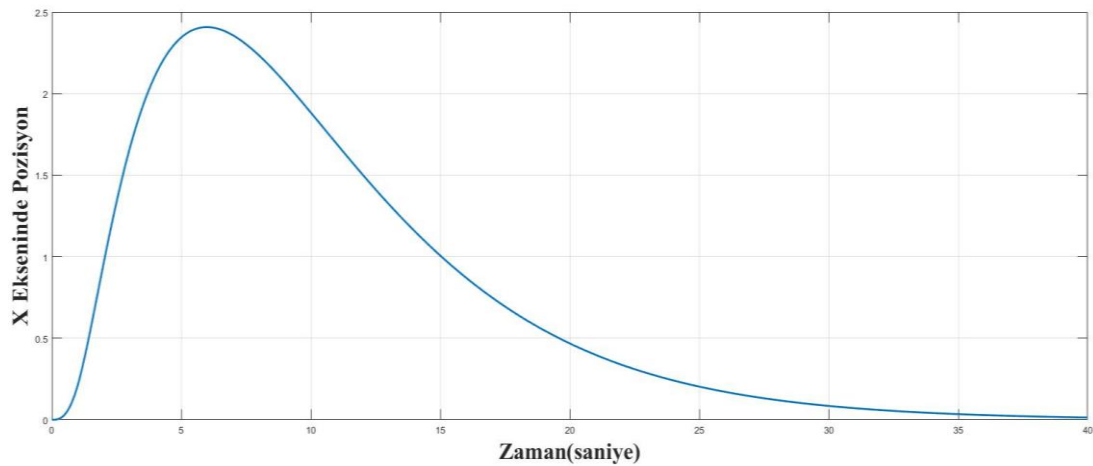
Şekil 3.5. Rampa Girişinde Simülatöre X Ekseninde Gönderilen Pozisyon Komutu

Sadece 2. derece bir yüksek geçirgen filtresi kullanmak teorik olarak iyi bir sonuç alınmasını sağlasa da algı algoritmalarının ikinci olgusu olan belirli bir hızın altında kalındığında hareketin hissedilmemesi durumu burada geçerli değildir. Şekil 3.5 de görüldüğü gibi, Platform X ekseninde herhangi bir nötr pozisyon hareketi sağlamıyor. Bu etkinin oluşması için, platformun nötrleme yani merkez noktasına geri dönme hareketini tanımlamak için kullanılan washout filtresi (3.3) modele eklenir ve model aşağıdaki Şekil 3.6'ya dönüşür. Bu filtre sayesinde Şekil 3.4 de görünen rampa cevabından herhangi bir ödün verilmeden platform bir sonraki manevraya daha çok yer elde etmek için insan algısının altında bir hızda yavaşça sıfır noktasına geri döner.

$$washout_{HP} = \frac{s}{s + washout_{HP}} \quad (3.3)$$



Şekil 3.6. Klasik Algoritmanın Washout Filtresi Eklenmiş Blok Diyagramı



Şekil 3.7. Washout Filtresinden ile X Eksenindeki Nötrleme Hareketi

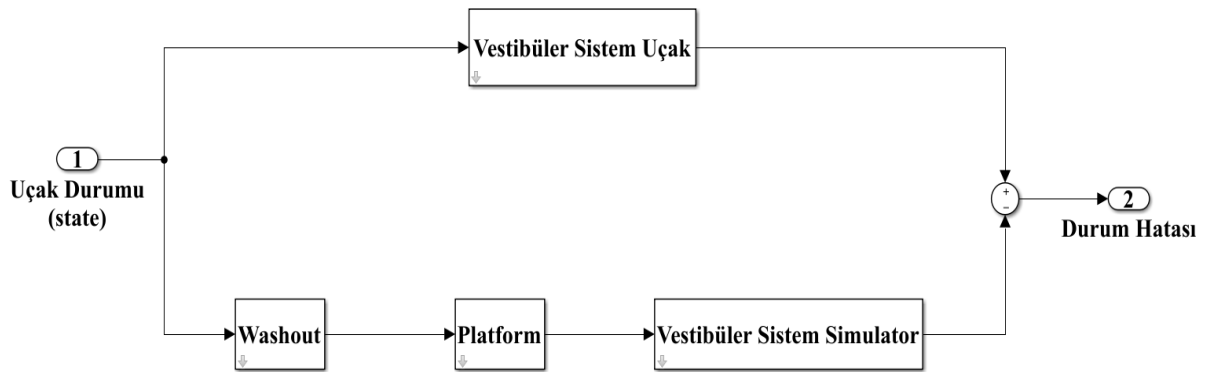
Şekilde 3.7’de görüldüğü gibi, washout filtresinin eklenmesi, platformun nötr pozisyona geri dönmesini ve bu sayede bir sonraki manevra için daha fazla alana sahip olmasını sağlar. Ek olarak, washout filtresi X eksenindeki ivme cevabını yavaşlatmış ve iyi bir sonuç elde edilmesini sağlamıştır. Daha iyi sonuç alınması için washout parametresi azaltılabilir; ancak bu durumda platformun nötrlenme hareketi de yavaşlatılmış olur. Bu sebeple, kullanıcı daha iyi bir ivme hissiyatı ve daha yavaş nötrleme hareketi arasında ayar yaparken bir uzlaşa sağlamalıdır.

Tez kapsamında sadece X eksenine ait yaratılmış ivme sonucu verilmiştir. Diğer Y ve Z eksenlerine ait modeller X eksenine benzer olduğu için ayrıca ele alınmamıştır.

**Çizelge 3.1.** Filtre Parametreleri

X Eksen Parametreleri	$\omega_{HP}$	$\delta_{HP}$	$Washout_{HP}$	X Ölçek	Eğim Ölçek	$\omega_{LP}$	$\delta_{LP}$
Şekil 3.1 Parametreleri	0.5	1.5	-	1.65	4.08	2.02	2
Şekil 3.6 Parametreleri	0.5	1.5	0.25	1.65	4.08	2.02	2

### 3.2 Optimal Control Nedir?



**Şekil 3.8.** Optimal Algoritmanın Blok Diyagramı

Lineer washout filtreleri, uçuş simülatorlerinin gerçekçiliğini artırmak için kullanılan önemli bir araçtır. Bu filtreler, simülator ve gerçek uçak hareketleri arasındaki farklılıkları en aza indirerek, pilotların daha gerçekçi bir eğitim deneyimi yaşamalarını sağlar. Özellikle yüksek hızlarda ve ivmelerde uçuş manevralarını simüle ederken kritik bir rol oynarlar ve insan vestibüler sisteminin matematiksel modellemesini kullanarak optimal transfer fonksiyonlarını hesaplarlar. Bu hesaplamalar, simülatorün pilotların gerçekte hissedeceği fiziksel tepkilere daha yakın bir deneyim sunmasını sağlar.

Şekil 3.8 de görüldüğü gibi, uçaktan alınan durum (aircraft state), gerçek bir pilotun vestibüler sisteminden geçerken oluşan referans sinyalinin simülator platformunda kullanıcının hissedeceği şekilde yaklaştırılması için washout filtresinin oluşturulmasını hedeflemektedir.

Durum hatasının sıfır olduğu durum, en optimal durumu yaratır. Bu durum, simülatorün gerçeğe en yakın tepkileri verebildiği ve pilotun algıladığı hareketlerle simülatorün ürettiği hareketler arasındaki farkın minimuma indirildiği durumu ifade eder. Hatayı en aza indirmek için oluşturulan washout filtresi, çevrim dışı hesaplandıktan sonra kontrol algoritması olarak sisteme eklenir. Bu filtre, simülatorün performansını iyileştirir ve pilotların eğitim sürecinde karşılaştıkları hislerin daha doğru ve güvenilir olmasını sağlar.

### **3.3 Optimal Algoritmanın Geliştirilmesi**

Tez kapsamında oluşturulan Optimal Algoritmanın matematiksel durum-uzay matrislerinin bulunmasında Telban (2005) yayını kullanılmış ve (3.1) denkleminde (3.25)'e kadar  $W(s)$  filtrelerinin bulunmasında aynı akış takip edilmiştir.

Bu akış yarım daire kanalları ve otolit matrisleri kullanılarak vestibüler mantislerin bulunması, platform matrisinin oluşturulması, beyaz gürültü filtresinin matrise eklenmesi, bulunan bu matrisler ile A, B, C ve D matrislerinin ortaya çıkarılması akabinde ise Maliyet Fonksiyonunda optimal cevabı verecek K matrisinin bulunması ve son olarak K matrisi üzerinden algorithmada kullanılacak olan  $W(s)$  filtresinin hesaplanması aşamalarını içermektedir.

### 3.3.1 Vestibüler Organın Model Matrisleri

Vestibüler organın model matrisinin girişi:

$$u = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ a_x \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Burada  $\dot{\theta}$  açısal hız ve  $a_x$  doğrusal ivmedir, her terim sırasıyla  $u_1$  ve  $u_2$  ile eşitlenmiştir. Algılanan dönme hareketi  $\dot{\theta}$ , Eşitlik (3.5)'deki yarım daire kanalları modeli tarafından  $u_1$  ile ilişkilendirilmiştir:

$$\dot{\theta} = \left[ \frac{\tau_a s}{1 + \tau_a s} \right] \left[ \frac{G_{SCC}}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} \right] [1 + \tau_L s] u_1 \quad (3.5)$$

Burada yarım daire kanalları zaman sabitleri  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_a$  ve  $\tau_L$  Eşitlik (2.6)'de verilmiştir ve  $G_{SCC}$  yanıtı eşik birimlerine ölçeklendiren açısal hız eşliğidir. Eşitlik (3.5), (3.6)'da gösterildiği gibi yeniden yazılabilir:

$$\dot{\theta} = \left[ \frac{T_4 s^3 + T_3 s^2}{s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + T_0} \right] u_1 \quad (3.6)$$

$$T_0 = \frac{1}{\tau_a \tau_1 \tau_2} \quad T_1 = \frac{\tau_a + \tau_1 + \tau_2}{\tau_a \tau_1 \tau_2} \quad T_2 = \frac{\tau_1 \tau_2 + \tau_a (\tau_1 + \tau_2)}{\tau_a \tau_1 \tau_2} \quad T_3 = \frac{G_{SCC}}{\tau_2} \quad T_4 = \frac{G_{SCC} \tau_L}{\tau_2}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{SCC} &= A_{SCC} X_{SCC} + B_{SCC} u \\ \dot{\theta} &= C_{SCC} X_{SCC} + D_{SCC} u \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} A_{SCC} &= \begin{bmatrix} -T_2 & 1 & 0 \\ -T_1 & 0 & 1 \\ -T_0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_{SCC} = \begin{bmatrix} T_3 - T_2 T_4 & 0 \\ -T_1 T_4 & 0 \\ -T_0 T_4 & 0 \end{bmatrix} \quad C_{SCC} = [1 \ 0 \ 0] \\ D_{SCC} &= [T_4 \ 0] \end{aligned}$$

Otolit organa ait X de ki transfer fonksiyonu:

$$\hat{f}_x(s) = G_{oto}K'_{oto} \left[ \frac{-R_{sz}s^3 - R_{sz}A_0s^2 + gs + gA_0}{s(s+B_0)(s+B_1)} \frac{(s+A_0)}{(s+B_0)(s+B_1)} \right] u \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\hat{f}} + (B_0 + B_1)\dot{\hat{f}} + (B_0B_1)\hat{f} = & \quad (3.9) \\ G_{oto}K'_{oto} \left[ R_{sz}(B_0 + B_1 - A_0)\dot{u}_1 + (g + R_{sz}B_0B_1)u_1 + gA_0 \int u_1 dt + \dot{u}_2 + A_0u_2 \right] \end{aligned}$$

Aşağıdaki gibi katsayı dönüşümü yapılır:

$$\ddot{\hat{f}} + a\dot{\hat{f}} + b\hat{f} = c\dot{u}_1 + du_1 + e \int u_1 dt + f\dot{u}_2 + gu_2 \quad (3.10)$$

Otolite ait bu formalizasyon aşağıdaki gibi uzay-zaman denkleminde matris çevrimi yapılır

$$\begin{aligned} \dot{x}_{oto} &= A_{oto}x_{oto} + B_{oto}u \\ \dot{\theta} &= C_{oto}x_{oto} + D_{oto}u \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$A_{oto} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -b & -a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -b & -a \end{bmatrix} \quad B_{oto} = \begin{bmatrix} c & 0 \\ d - ac & 0 \\ e & 0 \\ 0 & f \\ 0 & h - af \end{bmatrix}$$

$$C_{oto} = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \quad D_{oto} = [-G_{oto}K'_{oto}R_{sz} \ 0]$$

Elde edilen yarım daire kanalları ve otolit sistem matrisleri diyagonal olacak şekilde tek bir vestibüler matris altında birleştirilmesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_v &= A_v x_v + B_v u \\ \hat{y}_1 &= C_v x_v + D_v u \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$A_v = \begin{bmatrix} A_{scc} & 0 \\ 0 & A_{oto} \end{bmatrix} \quad B_v = \begin{bmatrix} B_{scc} \\ B_{oto} \end{bmatrix} \quad C_v = \begin{bmatrix} C_{scc} & 0 \\ 0 & C_{oto} \end{bmatrix} \quad D_{scc} = \begin{bmatrix} D_{scc} \\ D_{oto} \end{bmatrix}$$

Şekil 3.8 de görüldüğü gibi vestibüler durum hatası  $x_e = x_s - x_A$  şeklinde tanımlanır. Burada  $x_s$  simülördeki  $x_A$  ise uçakta oluşan vestibüler durum uzayını,  $u_A$  ve  $u_s$  sırası ile simülâtör ve uçaktan gelen girişleri ifade ediyor.

$$\begin{aligned}\dot{x}_e &= A_V X_e + B_V u_s - B_V u_A \\ e &= C_V X_e + D_V u_s - D_V u_A\end{aligned}\quad (3.13)$$

Vestibüler hareket algılarını sağlayan simülâtör platformunun kendisidir. Bu hareketlerin LQR maliyet fonksiyonunda girdi olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Durum denklemlerinde  $X_d$  Denklem (3.15)'te görüldüğü gibi, platformun durumu A matrisi ile platformun pozisyonu ve hızını temsil etmektedir. Ayrıca,  $u_s = [\dot{\theta} \quad a_x]^T$  ifadesi olduğu için, B matrisinden ivme ve açısal hız değerleri elde edilir. Bu ek terimler, simülâtörün hareketini daha doğru bir şekilde modellemeyi ve kontrol algoritmasının bu hareketi daha etkili bir şekilde düzenlemesini sağlar. Bu sayede, maliyet fonksiyonunun optimizasyonu daha hassas ve doğru bir biçimde gerçekleştirilir.

$$\dot{x}_d = A_d X_d + B_d u_s \quad (3.14)$$

$X_d$  in içerdiği simülâtöre ait bileşenler aşağıdaki gibidir:

$$X_d = [\iiint a_x dt^3 \quad \iint a_x dt^2 \quad \int a_x dt \quad \theta]^T \quad (3.15)$$

$u_s$  girişine maruz kalan matris yapısı aşağıdaki gibi:

$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Uçaktan meydana gelen titreşimin beyaz gürültünün simüle filtrelenmesi için  $X_n$  matrisi durum uzay matrisine eklenir.

Uçak girişi  $u_A$  filtrelenmiş beyaz gürültüden oluşur ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}\dot{x}_n &= A_n X_n + B_n w \\ u_A &= X_n\end{aligned}\quad (3.16)$$

$X_n$  filtrelenmiş beyaz gürültü durumlarını,  $w$  beyaz gürültüyü temsil eder ve  $A_n$  ve  $B_n$  şu şekilde verilir:

$$A_n = \begin{bmatrix} -\gamma_1 & 0 \\ 0 & -\gamma_2 \end{bmatrix} \quad B_n = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix}$$

Burada  $\gamma_1$  ve  $\gamma_2$ , her bir serbestlik derecesi için birinci mertebe filtre kesme frekanslarıdır. Tezde  $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = \pi$  olarak belirlenmiştir. Bu değerler ile 1Hz'lik filtreleme elde edilir.

(3.13), (3.14) ve (3.16) denklemlerinin birleştirilerek tek bir model matrisinin elde edilmesi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}\dot{x}_e &= Ax + Bu_s - Hw \\ y &= [e \quad x_d]^T C_V X_e = Cx - Du_s\end{aligned}\quad (3.17)$$

Burada  $y$  istenen çıktıyı ifade eder ve birleşik durumları temsil eder:

$$x = \begin{bmatrix} x_e \\ x_d \\ x_n \end{bmatrix}\quad (3.18)$$

Birleştirilmiş sistem matrisleri aşağıdaki şekilde bulunur:

$$A = \begin{bmatrix} A_V & 0 & -B_V \\ 0 & A_d & 0 \\ 0 & 0 & A_n \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_V \\ B_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_n \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} C_V & 0 & -D_V \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} D_V \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bulunan matrislerden  $A$  matrisi diyagonal yerleşim ile bulunmuş olsa da beyaz gürültünün etkisi vestibüler sisteme giriş olarak gelir bu sebepten dolayı  $A$  matrisinde yer alan  $A_V$ ,  $A_d$  ve  $A_n$  matrislerine durum mantisine çarpım olarak gelen  $B_V$  ilk yani vestibüle ait satirin sonuna eklenmiştir. Bununla beraber, ileri yönde besleme matrisi olan  $D$  matrisi sadece vestibüler sistemden gelmektedir. Bu durum, son değer hatasına

sebepe olabilmektedir. Bu sebeple, uygulamaya geçilmeden önce matrislerin simülasyonu yapılmalıdır. Bu matrise özel önem verilmeli ve eğer pozisyonda fazla sapmalara neden oluyorsa, elimine edilmeye çalışılmalıdır.

A =

$$\begin{bmatrix}
 -T_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_2T_4 - T_3 & 0 \\
 -T_1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_1T_4 & 0 \\
 -T_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_0T_4 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -b & -a & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & ac - d & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -f \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -b & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & af - h \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\text{gamma1} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\text{gamma2}
 \end{bmatrix}$$

B =

$$\begin{bmatrix}
 T_3 - T_2T_4 & -T_1T_4 & -T_0T_4 & c & d - ac & e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f & h - af & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}^T$$

C =

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -T_4 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{oto}K'_{oto}R_{sz} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0
 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix}
 T_4 & -G_{oto}K'_{oto}R_{sz} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}^T$$

$$H = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \text{gamma1} \ \text{gamma2}]^T$$

Sonuç olarak, ana mantisler yarım daire kanalları, otolit, platform ve beyaz gürültü olarak dört ana bileşenden oluşur. Yarım daire kanallarına ait matris elemanları yeşil, otolit

matris elemanları kırmızı, platform durumunu gösterene elemanlar pembe ve beyaz gürültü elemanları mavi ile renklendirilmiştir.

Oluşturulan matrisler ile Maliyet Fonksiyonun Hesaplanması denklem (3.16) ile sağlanır:

$$J = E \left\{ \int_0^{t_1} (e^T Q e + X_d^T R_d X_d + U_s^T R U_s) dt \right\} \quad (3.19)$$

Bu Lineer Kuadratik Regülatör fonksiyonunda  $Q$  ve  $R_d$  pozitif yarı tanımlı matrislerdir ve  $R$  pozitif tanımlı bir matristir. Denklemden, maliyet fonksiyonunda üç değişkenin sınırlandırılması gerektiğini ifade eder: duyum hatası  $e$ , ve ek terimler  $x_d$  ve  $u_s$ , ki bunlar birlikte platformun doğrusal ve açısal hareketini tanımlar. Maliyet fonksiyonu platform durumu  $X_d$  ve  $u_s$  girişi hesaba takılarak en iyi sonucu bulmak için kullanılır.

Sistem denklemi ve maliyet fonksiyonu, Kawkernaak ve Sivan (1972) ile Reid ve Nahon (1985) tarafından gösterildiği gibi aşağıdaki denklemlerle standart optimal kontrol formuna dönüştürülür:

$$\dot{X} = A'x + Bu' + Hw \quad (3.20)$$

Bu eşitliğe ait maliyet fonksiyonu:

$$J = E \left\{ \int_0^{t_1} (X^T R' X + U'^T R_2 U') dt \right\} \quad (3.21)$$

Burada:

$$A' = A - BR_2^{-1}R_{12}^R, u' = u_s + R_2^{-1}R_{12}^T x, R_1' = R_1 - R_{12}R_2^{-1}R_{12}^T, R_1 = C^T G C$$

$$R_{12} = C^T G D, R_2 = R + D^T G D, G = \text{diag}[Q \quad R_d]$$

Maliyet fonksiyonu (3.22) koşulunda minimumdur:

$$u' = -R_2^{-1}B^T x \quad (3.22)$$

(3.23)'deki P değerinin bulunması aşağıdaki Ricatti denkleminin çözümüdür:

$$R'_1 - PBR_2^{-1}B^TP + A'^TP + PA' = 0 \quad (3.23)$$

(3.23)'de ki P değerine göre  $u_s$ ,

$$\begin{aligned} u_s &= [R_2^{-1}(B^TP + R_{12}^T)]x \\ u_s &= Kx, \quad K = R_2^{-1}(B^TP + R_{12}^T) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Bulunan K matrisinin X durum matrisi ile çarpımı aşağıdaki gibidir.

$$u_s = [K_1 \quad K_2 \quad K_3] \begin{bmatrix} X_e \\ X_d \\ X_n \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

(3.16) beyaz gürültü denkleminde  $u_A = X_n$  eşitliği ile (3.26) denklemini (3.27) denklemine dönüştürülür:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_e \\ \dot{X}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_V & 0 & -B_V \\ 0 & A_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_e \\ X_d \\ u_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_V \\ B_d \end{bmatrix} u_s \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_e \\ \dot{X}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_V - B_V K_1 & -B_V K_2 \\ -B_d K_1 & A_d - B_d K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_e \\ X_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -B(I + K_3) \\ -B_d K_3 \end{bmatrix} u_A \quad (3.27)$$

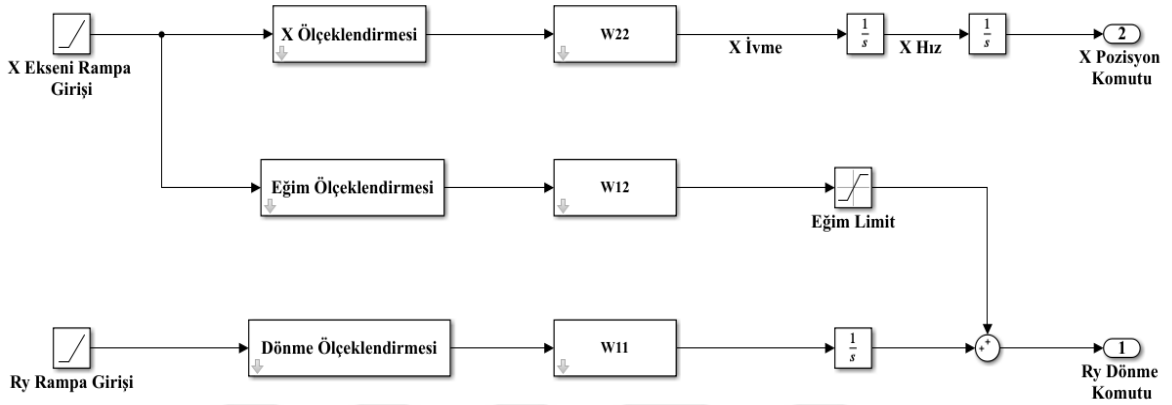
Durum uzay formundaki Eşitlikler (3.26) ve (3.27) gözlemlendikten sonra, aşağıdaki eşitlikler Laplace alanında elde edilmiştir:

$$u_s(s) = W(s) u_A(s) \quad (3.28)$$

$$W(s) = [K_1 \quad K_2] \begin{bmatrix} sI - A_V + B_V K_1 & B_V K_2 \\ B_d K_1 & sI - A_d + B_d K_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} B_V(I + K_3) \\ B_d K_3 \end{bmatrix} - K_3$$

W(s), simülatör girdileri  $u_s$  ile uçak girdileri  $u_A$  arasındaki optimize edilmiş açık çevrim transfer fonksiyonlarını bağlayan bir matristir. Bulunan matris formundaki bu filtre bulunurken birleştirilen vestibüler, platform durumu ve beyaz gürültü modelleri (3.23)

Ricatti denkleminin çözümünün akabinde çıkan K matrisi, modellemenin en başında referans olarak denklem (3.4) göre ayrıştırılmanın sağlanması gerekir. Çünkü bulunan  $W(s)$  matrisi hem doğrusal hem de açısız filtreler içerir. Bu ayrıştırma sonucunda 3 adet filtre ortaya çıkar bu matrislerden.  $W_{22}$ ,  $a_x$  bileşenine,  $W_{12}$  X eksenin oluşturulması istenen ivmemenin eğime dönüştürülmesine,  $W_{11}$  matrisi ise açısız hızı simüle etmek oluşturulmuş filtreler olarak bulunur. Bu filtrelerin kullanım şekli, Şekil 3.10, blok diyagramında verilmiştir.

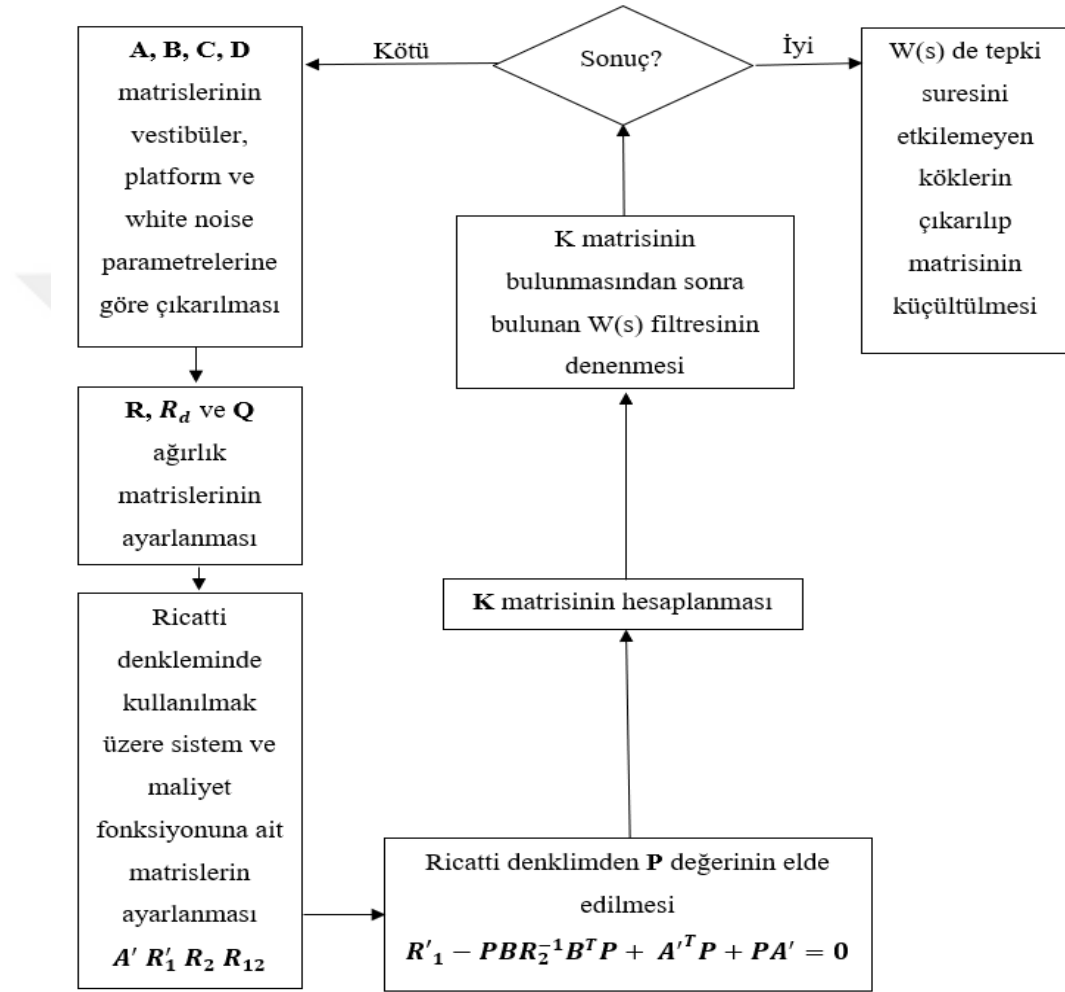


Şekil 3.9. Optimal Algoritma  $W(s)$  Blok Diyagramı

Klasik algoritmanın aksine, optimal algoritma kullanılarak ek bir washout filtrelemesine gerek kalmaz çünkü  $W(s)$  filtreleri nötrleme hareketini içermektedir. Bunun sebebi, vestibüler modellerin nötrlenecek şekilde yüksek geçiren filtreler olarak tasarlanmasıdır. Genel itibarıyla, bulunan filtreler sonrasında oluşan blok diyagramı klasik algoritma ile aynıdır; ancak klasik algoritmada oluşan filtre 3. dereceden bir transfer fonksiyonunu ifade ederken, optimal algoritmada bu 14. derecedendir. Elde edilen transfer fonksiyonlarının kullanacak platformlara göre istenilen sonuçların alınabilmesi için ölçekleme(scale) katsayıları ile çarpılması gerekir. Şekil 3.10 da görünen  $X_{ölçek}$  ve  $Eğim_{ölçek}$  parametreleri doğru bir  $X_{ekseni}$  ivme hissiyatı için ayarlanmalıdır. Simülasyonda kullanılan bu parametre setleri Çizelge 3.2 de gösterilmiştir.

Optimal algoritma kullanarak algı algoritmasının oluşturulması ile ilgili akış diyagramı Şekil 3.10 da verilmiştir. Bu diyagram Telban (2005) yayını ile benzeşmemekle beraber köklerin elimine edilmesi kısmi algoritmanın son kısmına ta bulunmaktadır. Şekil 3.10. da görüldüğü gibi, A, B, C, D matrislerinin bulunması akışın ilk adımını oluşturur.

Denklem (3.16)'da maliyet fonksiyonunda kullanılacak matrisleri  $R$ ,  $R_d$  ve  $Q$  belirlenir. Bu matrislerin belirlenmesinin ardından, Riccati denkleminin çözümü için kullanılacak matrisler olan  $A'$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{12}$  dönüşümleri yapılır. Bu dönüşüm sayesinde bulunan  $P$  değerlerinden sonra  $K$  matrisi bulunur ve bu matrisle beraber algoritmada kullanılacak  $W(s)$  filtresi elde edilir.



Şekil 3.10.  $W(s)$  Matrisinin Bulunma Diyagramı

Bu akışa göre optimal algoritma için bulunup tezde kullanılan parametre setleri aşağıdaki gibidir:

Çizelge 3.2. Maliyet Fonksiyonu ve Ölçeklendirme Parametreleri

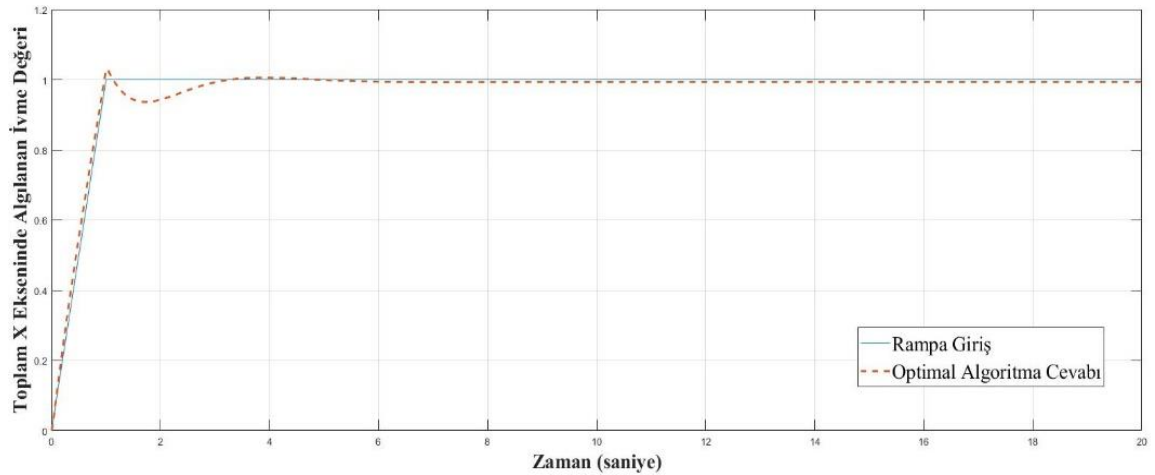
$Rd_{11}$	$Rd_{22}$	$Rd_{33}$	$Rd_{44}$	$Q_{11}$	$Q_{22}$	$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{21}$	$R_{22}$	$X_{ölçek}$	$Eğim_{ölçek}$
8	5	1	350	1	10	1	1	1	1	700	83

Bu parametre setleri ile bulunan K matrisinden 14. Dereceden filtreler meydana gelmektedir. Burada akışın son basamağı olan etkisiz köklerin(zeros/poles) elimine edilmesi durumunda 5. ve 4. Dereceden yüksek geçiren filtrelere davranışına sahip dönüşür.  $W_{22}$  ve  $W_{12}$  için elde edilen fonksiyonlar Çizelge 3.3 de ki gibidir.

**Çizelge 3.3.** Filtrelerin Katsayıları

	$s^5$	$s^4$	$s^3$	$s^2$	$s^1$	$s^0$
$W_{22}$ - Pay	0	-0.0672	0.0001	0	0	0
$W_{22}$ - Payda	1	65.8381	209.3334	305.8298	176.7496	-0.0001
$W_{12}$ - Pay	x	-0.0060	-0.4149	-2.5276	-3.6626	-2.1202
$W_{12}$ - Payda	x	1	65.8388	209.3754	305.9520	177.1365

Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2 ile oluşturulan optimal algoritmanın rampa cevapları Şekil 3.12 de, Nötrleme(washout) hareketi ile 0 pozisyonuna geri dönüş hareketi Şekil 3.13 gösterilmiştir. Grafiklerdeki her iki çıktı teorik olarak elde edilmiş sonuçlardır.

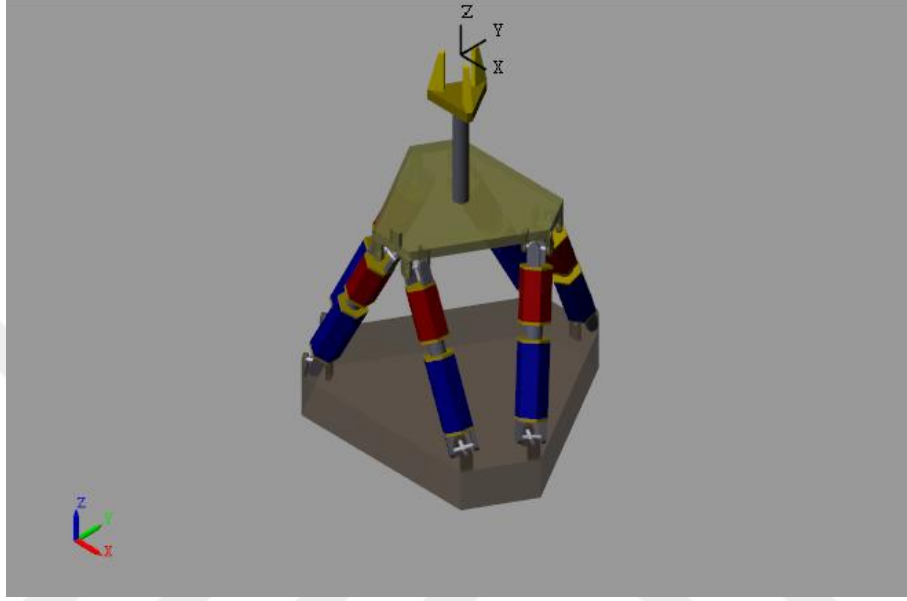


**Şekil 3.11.** Optimal Algoritma Basamak Cevabı

## BÖLÜM IV

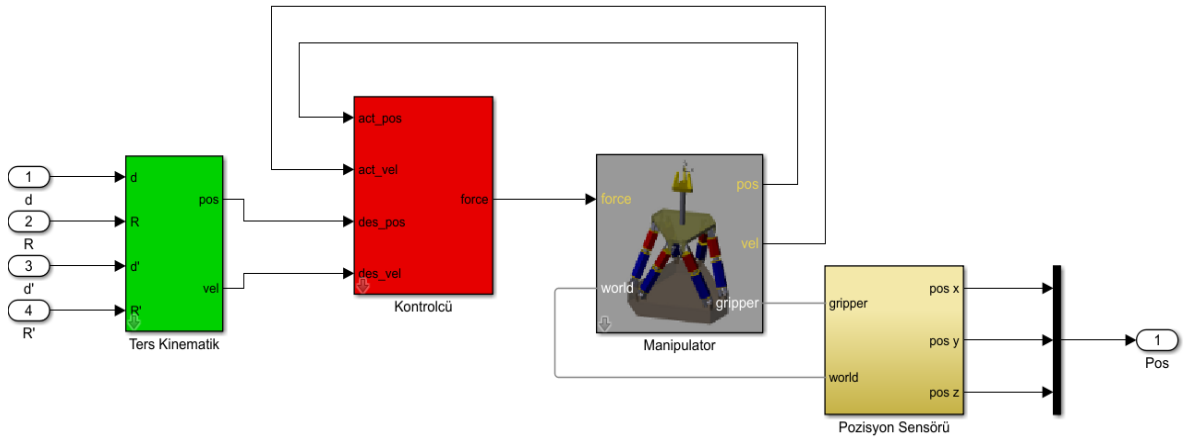
### MODELLERİN SİMÜLASYONU

#### 4.1 Matlab Stewart Platformu



Şekil 4.1. Matlab Stewart Platformu

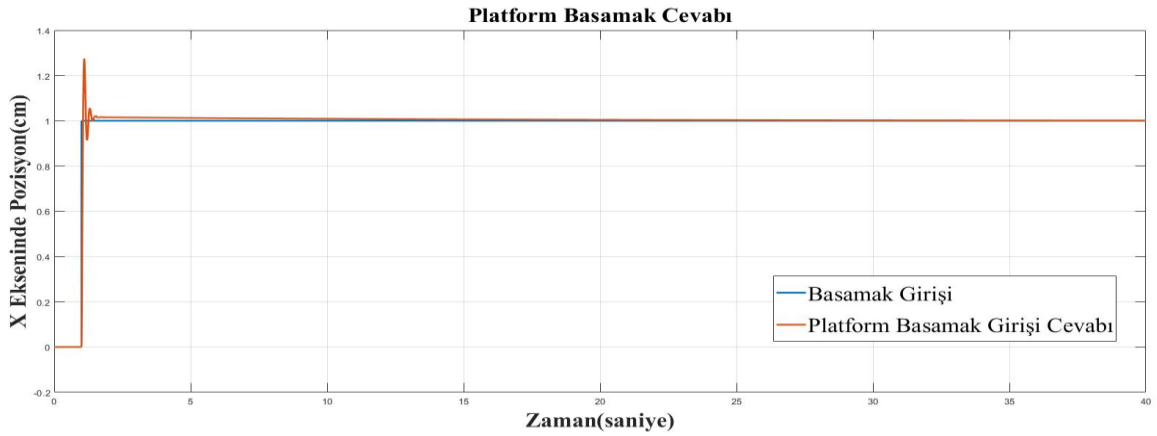
Matlab programı içerisinde Stewart Platformunu simüle etmek için Multi Body eklentisi ile yapılmış üç boyutlu model bulunmaktadır. Bu model, komut olarak verilen referans yörüngesini takip edebilen bir Stewart platformunu göstermektedir.



Şekil 4.2. Stewart Platformunun Blok Diyagramı

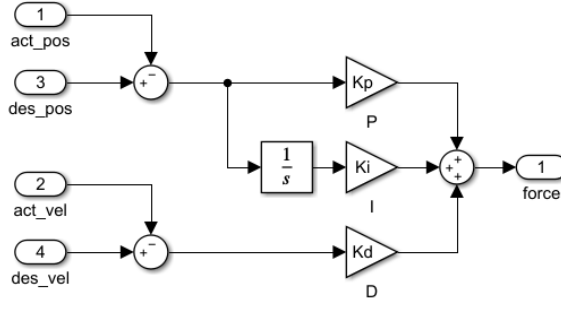
Model, Şekil 4.2'de görüldüğü gibi 4 ana bloktan oluşmaktadır. Bunlar Ters Kinematik, Kontrolcü, Manipülator ve Pozisyon Sensörüdür. Komut olarak platforma alınan doğrusal ve dairesel hareketler, 6 boyutlu pozisyon uzayında tanımlanır ve bir ters kinematik modülü bunu 6 boyutlu bacak pozisyonu uzayına dönüştürür. Genel bir PID kontrolcüsü, manipülatorü istenen yörünge boyunca kuvvet(force) üreterek yönlendirmeye çalışır. Simülasyon sonuçları, platform üzerinde bulunan tutucudan (gripper) alınmaktadır.

Ancak simülatorün kontrolcüsü, gerçek dünyadaki sistemler gibi çalışmamaktadır. Gerçek uygulamalarda, Stewart platformuna bağlı aktüatör motorları servo sürücüler tarafından kontrol edilir ve bu sürücüler, kademeli bir kontrolcü ile aktüatörlerin hedef noktaya ulaşmalarını sağlamak için sarsıntı (jerk), ivme ve hız değerlerine göre hareket eder.



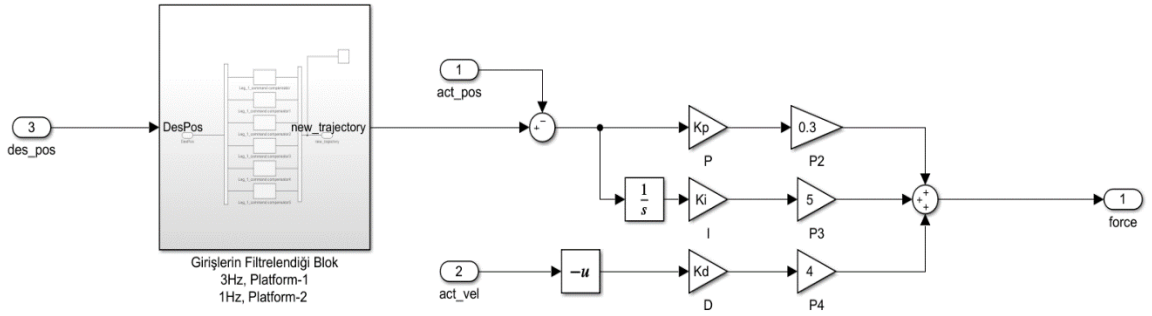
Şekil 4.3. Platformun Filtreniz Basamak Cevabı

Matlab modelinde ise sadece pozisyona dayalı bir PID kontrolcüsü uygulanmaktadır ve diğer jerk, ivme ve hız değerleri aktüatörlere komut olarak verilmemektedir. Şemada görünen hız girişi(inputu), yalnızca platformun tepki süresini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Yani, hız sıfır olarak ayarlansa bile, PID kontrolcüsü platformun pozisyon hatasına göre yer değiştirme yapar. Bu sebeplerden ötürü, Matlab üzerinde bulunan Stewart platformu, Şekil 4.3 de olduğu gibi rijit bir tepkiye(response'a) sahiptir. Bu tepkiyi sağlayan kontrol yapısı Şekil 4.4 de gösterilmiştir (Blok diyagramı Matlab üzerinden alındığından dolayı parametre isimlendirmelerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır).



**Şekil 4.4.** Değiştirilmemiş Kontrol Blok Diyagramı

Gerçek uygulamalardaki ve simülasyonda kullanılan kontrolcü yapılarındaki farklılık nedeniyle simülasyon sonuçları gerçek dünya uygulamalarıyla birebir örtüşmez. Gerçek dünyada, aktüatörler daha karmaşık bir kontrol sistemi ile yönetilirken, simülasyon ortamında bu tür detaylı kontrol stratejileri göz ardı edilmektedir. Ancak platform tepkisini biraz daha gerçek dünyaya benzetmek amacıyla, aktüatörlere giden pozisyon komutları filtrelenmiştir. Platformun yeniden düzenlenmiş kontrol yapısı ve basamak cevabı, Şekil 4.6 ve 4.7 da gösterildiği gibidir.

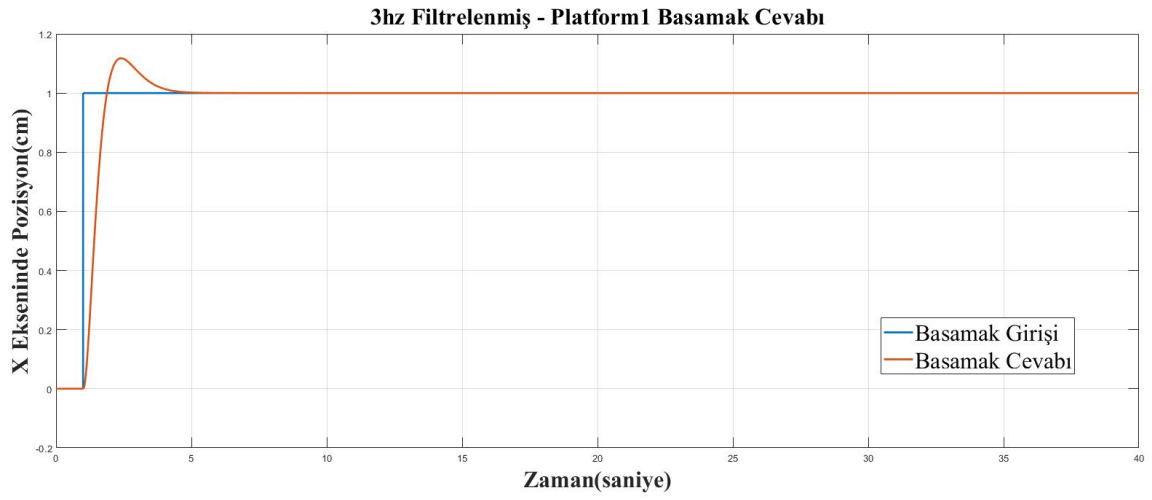


**Şekil 4.5.** Değiştirilmiş Kontrol Blok Diyagramı

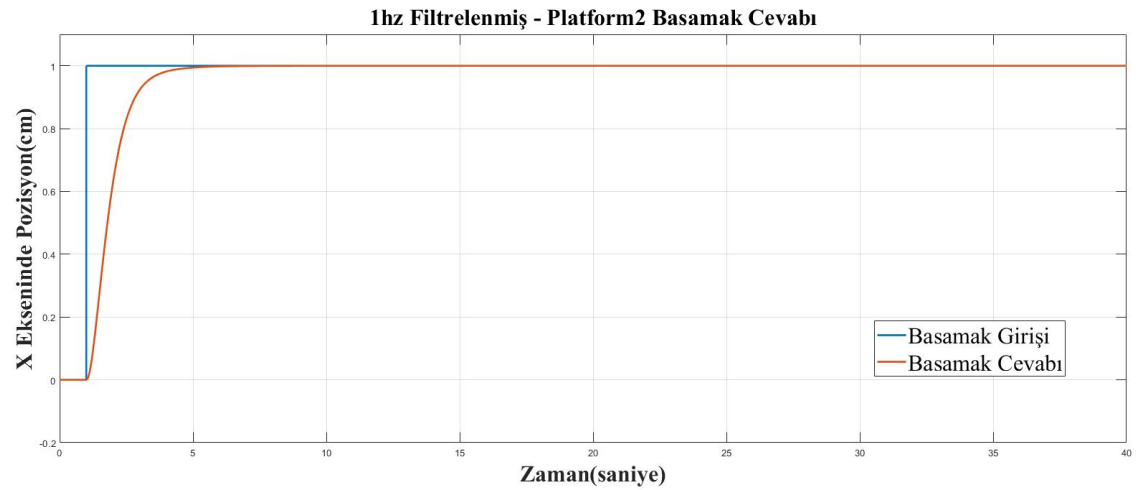
Şekil 4.5'te gösterilen yeniden düzenlenmiş kontrolcü yapısında, platformun rijit basamak cevabını yumuşatmak ve platform tepkilerini bilerek yavaşlatmak için istenilen pozisyon değeri ilk 3 ve 1 Hz'lik filtrelerle düşük geçiren olacak şekilde filtrelenmiştir.

Tez kapsamında, klasik ve optimal algoritmalar hem 3 Hz'lik hem de 1 Hz'lik filtrelerle kullanılmış ve bunlar sırasıyla Platform-1 ve Platform-2 olarak adlandırılmıştır. Farklı tepkiler üreten bu platformlar üzerinde denemeler yapılarak katsayı değerleri bulunmuş,

bu sayede her iki platform iki farklı platformda test edilerek aralarındaki farklar kıyaslanmış ve çapraz kontrol yapılarak sonuçlar çıkarılmıştır.



**Şekil 4.6. Platform-1 Basamak Cevabı**

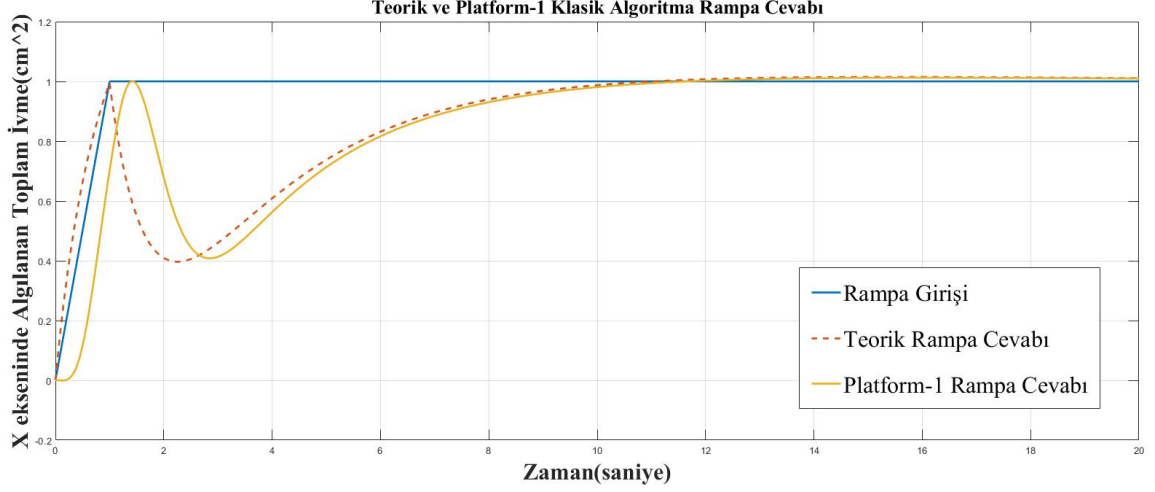


**Şekil 4.7. Platform-2 Basamak Cevabı**

## 4.2 Platform-1 Üzerindeki Simülasyon Sonuçları

### 4.2.1 Klasik Algoritma Sonuçları

Çizelge 3.1 de gösterilen filtre parametreleri ile Platform-1 üzerinden alınan rampa cevabının grafiği Şekilde 4.7 de gösterilmiştir.



**Şekil 4.8.** Platform-1 Klasik Algoritma Rampa Cevabı

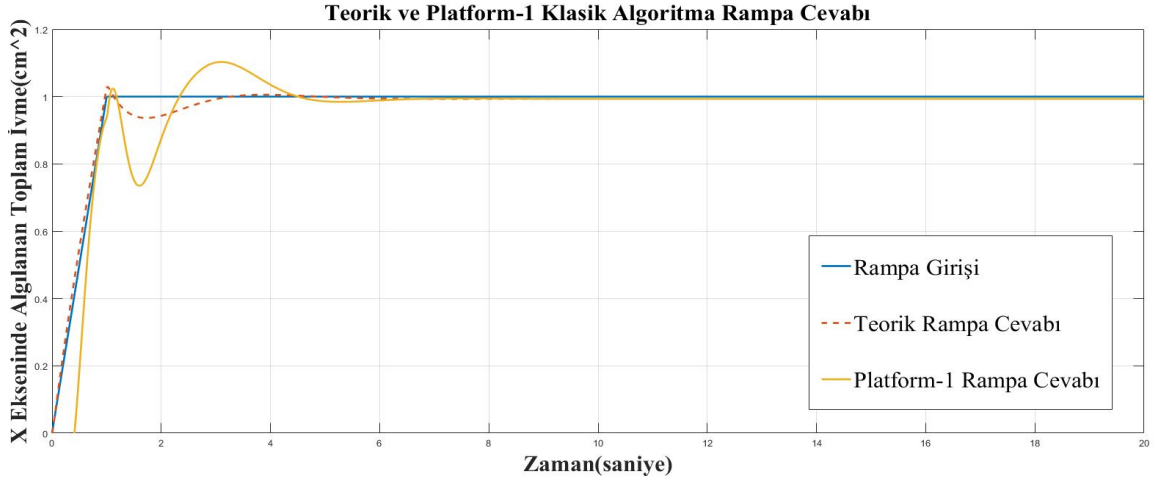
Şekil 4.8 de görüldüğü gibi, klasik algoritmanın rampa girişine karşı teorik olarak verilen cevabı, platformun kendi cevap tepkisinde oluşan yavaşlıktan dolayı daha hızlıdır. Bu sebepten, teorik ve Platform-1 üzerinden alınan sonuçlar arasında zaman ekseninde bir kayma görülmektedir.

#### 4.2.2 Optimal Algoritma Sonuçları

Çizelge 4.1 de katsayıları gösterilen teorik olarak edilmiş  $W(s)$  filtrelerinin Platform-1 üzerinde uygulandığında alınan sonuç Şekil 4.9 da ki gibidir.

Klasik algoritmanın rampa cevabının aksine, Platform-1 üzerinde yapılan simülasyonda sadece sistem yavaşlığından dolayı zaman ekseninde bir kayma değil, aynı zamanda salınım ve tepe değerlerinde bir sapma söz konusudur.

Şekil 4.9'da görüldü gibi yanıt grafiği, platformun yavaşlığından dolayı aynı sonucu vermeyebilir. Bu nedenle, her platforma özgü katsayıların yeniden belirlenmesi gerekir. Katsayıların bulunup  $W(s)$  filtrelerinin belirlenmesi sürecinde, Şekil 3.11 de ki akış diyagramı takip edilmiştir. Bu süreç, algoritmanın platforma özgü tepkilerini optimize etmek için gerekli adımları içerir, böylece her platformda beklenen performans elde edilebilir.

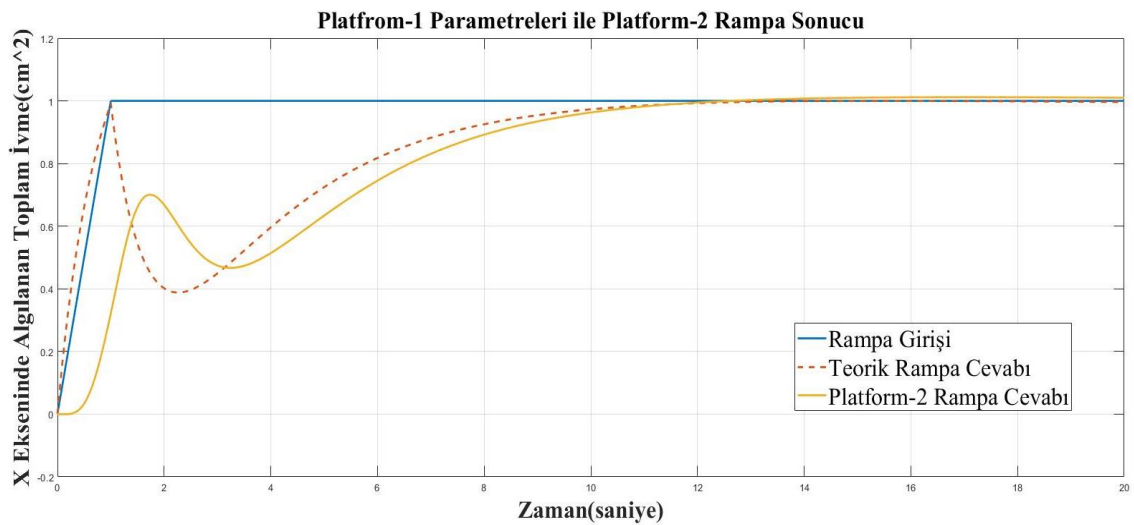


Şekil 4.9. Platform-1 Optimal Algoritma Rampa Cevabı

Şekil 3.11 de ki akış ile bulunan  $W(s)$  filtrelerine ek olarak filtrelere ait ölçeklendirme(scale) dengelerinin uygun bir şekilde bulunuyor olması gerekir. Çizelge 4.1 de gösterilen bu  $X_{ölçek}$  ve  $eğim_{ölçek}$  değerlerinin bulunması genel olarak deneysel olarak gerçekleşir. Eğer gerçek dünyada kullanılacak simülatör platformu iyi bir şekilde modellenmiş ise simülasyon ile bulunan değerler başlangıç değeri kabul edilip gerçek platform üzerinde küçük ayarlamalar ile en uygun değerlerin bulunması sağlanır.

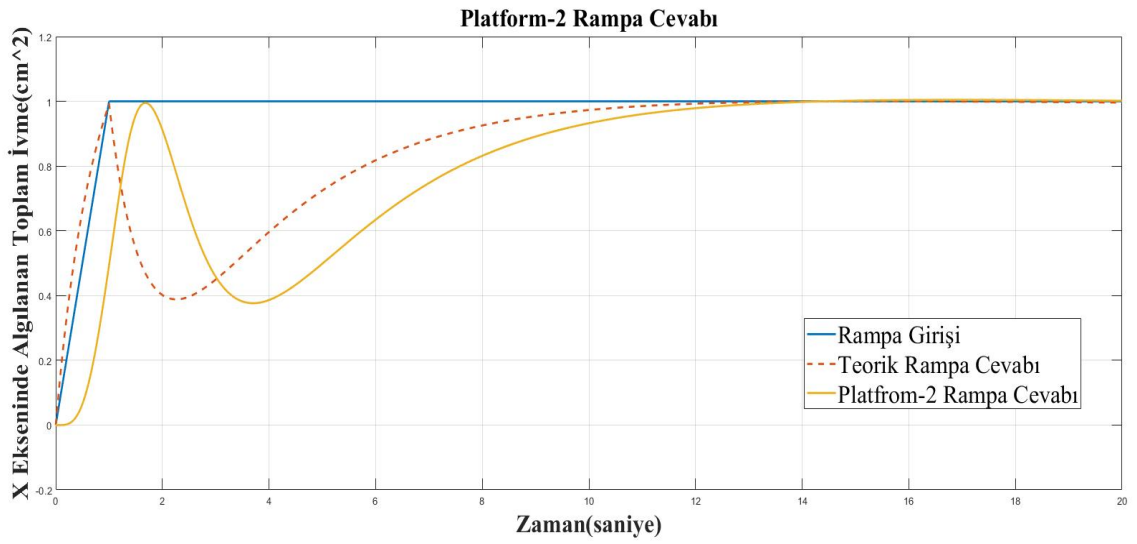
### 4.3 Platform-2 Üzerindeki Simülasyon Sonuçları

#### 4.3.1 Klasik Algoritma Sonuçları



Şekil 4.10. Platform-2'de Platform-1 Parametreleri ile Rampa Cevabı

Çizelge 3.1'de gösterilen, Platform-1'de kullanılan aynı parametre değerlerine sahip filtrelerden oluşan klasik algoritmanın Platform-2'deki cevabı Şekil 4.10 da ki gibidir. Burada, Platform-1'den farklı olarak, Platform-2'nin sistem cevabının daha düşük olmasından dolayı daha yavaş bir yükselme gerçekleşmekte ve X ekseninde gerçekleşen ivmenin rampa değerinin maksimumu olan 1'e ulaşamadığı görülmektedir. Bunun sebebi, Platform-2'nin Platform-1'e göre daha yavaş kalması ve X eksenine gönderilen pozisyon komutunu yeterince iyi yakalayamamasıdır. Çizelge 4.1'de görünen  $X_{ölçek}$  parametresinin değeri %61.94 oranında artırılarak Şekil 4.11 deki grafik elde edilmiştir.

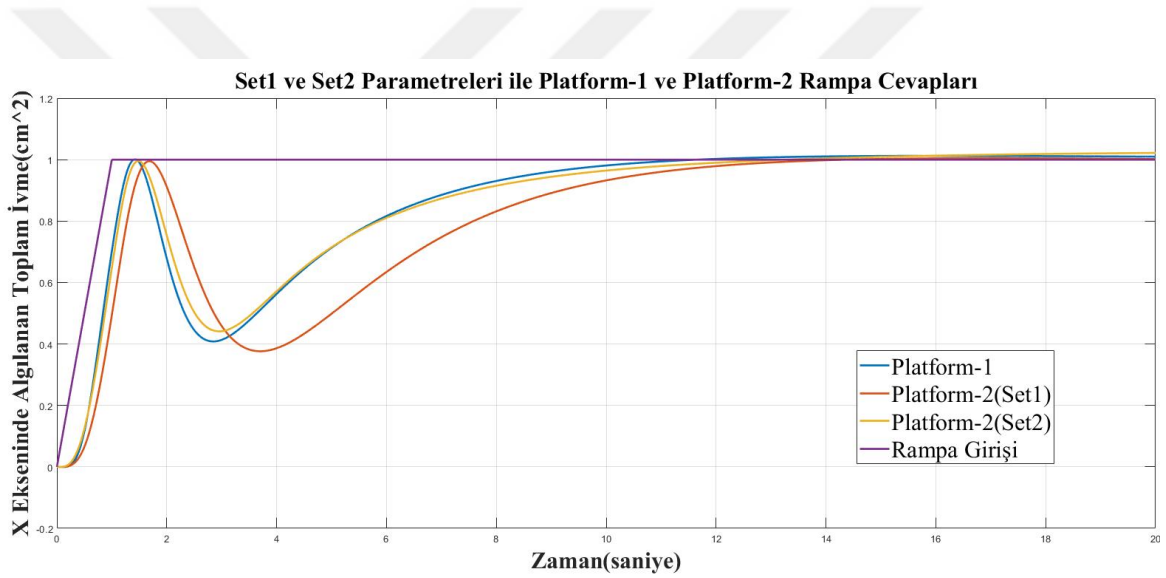


**Şekil 4.11.** Platform-2 Klasik Algoritma Rampa Cevabı

Ancak Şekil 4.11 de görüldüğü gibi her ne kadar maksimum değeri  $X_{ölçek}$  parametresi artırılarak yükseltilmiş olsa da Platform-2'nin tepki süresinin yavaşlığından dolayı Platform-1'e göre daha kötü sonuç alınmıştır. Bunu gidermek için klasik algortmada kullanılan filtre değerlerinde değişiklikler yapılması gerekir. Gecikmenin telafisi için kullanılan yeni filtre parametreleri Çizelge 4.1, Platform-2 sütununda gösterilmektedir.

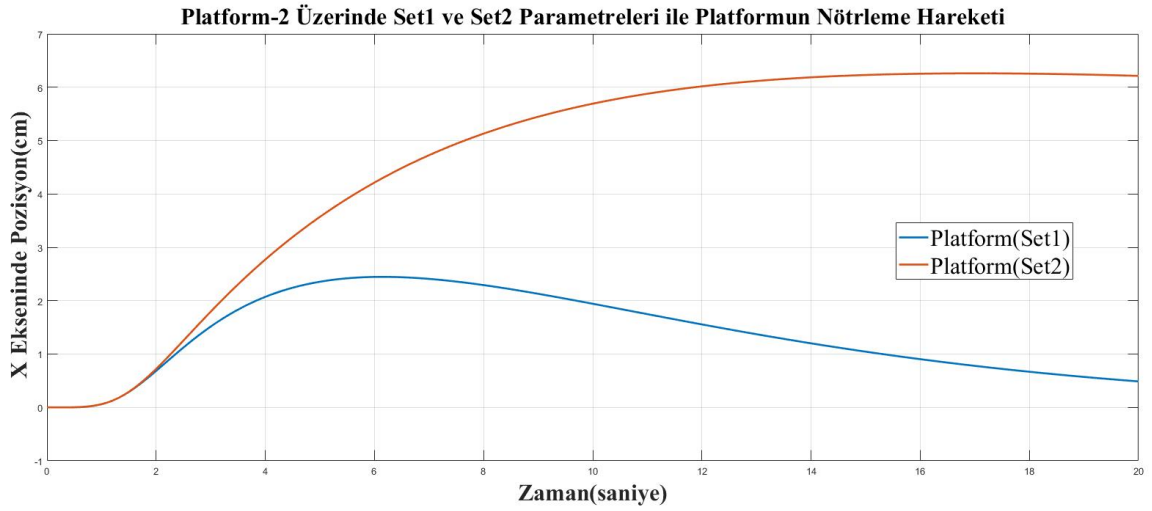
**Çizelge 4.1.** Platform-1 ve 2 de Klasik Algoritma İçin Kullanılan Filtre Katsayıları

<b>X Eksenli Parametreleri</b>	Platform-1 Model	Platform-2 Model(Set1)	Platform-2 Model(Set2)
$\omega_{HP}$	0.5	0.5	1
$\delta_{HP}$	1.5	1.5	2.5
$Washout_{HP}$	0.25	0.25	0.01
$X_{ölçek}$	1.92	3.1	7.3
$\omega_{LP}$	2.02	2.02	2.02
$\delta_{LP}$	2	2	2
$eğim_{ölçek}$	4.02	4.02	4.2



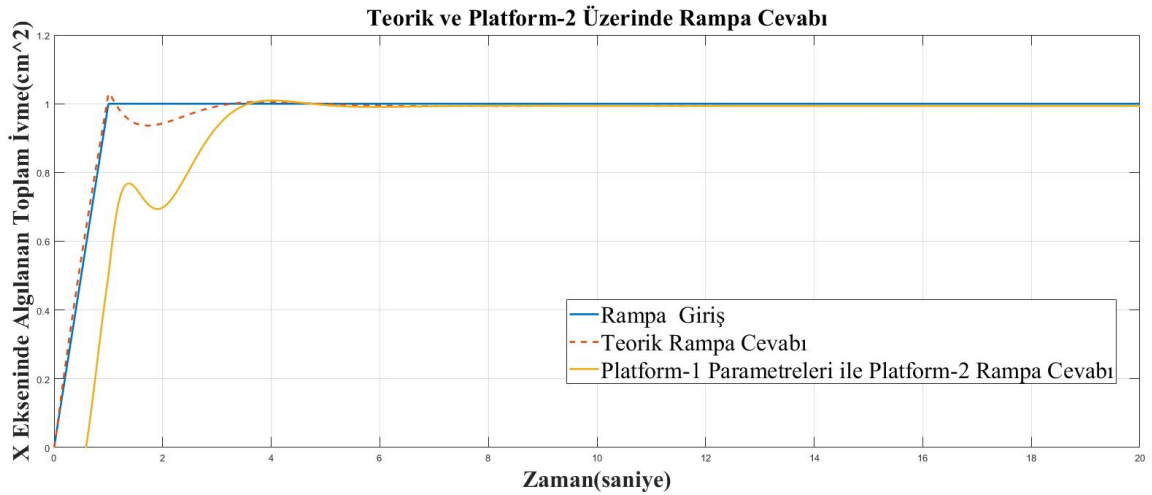
**Şekil 4.12.** Çizelge 4.1'e Göre Oluşan Filtrelerin Rampa Cevabı

Çizelge 4.1'e göre teorik, Platform-1 ve Platform-2 parametre bilgileri için karşılaştırmalı grafik sonuçları aşağıdaki gibidir. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi Platform-1 değerleri ile Platform-2 (set1) filtre değerleri aynıdır. Ancak, frekans yavaşlığını tolere etmek için katsayı değerleri (set2) olarak ayarlanmış ve Platform-1'e yakın bir rampa tepki grafiği oluşturulmuştur. Ancak, bu grafik performans gösterimi açısından yanıltıcıdır. Çünkü washout'a ait filtre değeri ciddi anlamda düşüp 0.01 olmuştur, bu da Şekil 4.13'te görüleceği üzere platformun nötr pozisyonuna geri dönmesini ciddi anlamda geciktirmiş ve yaklaşık olarak 300 saniyeye çıkarmıştır. Bu şekilde ayarlanan filtre değerleri bir simülatör için kullanışsız olmaktadır.



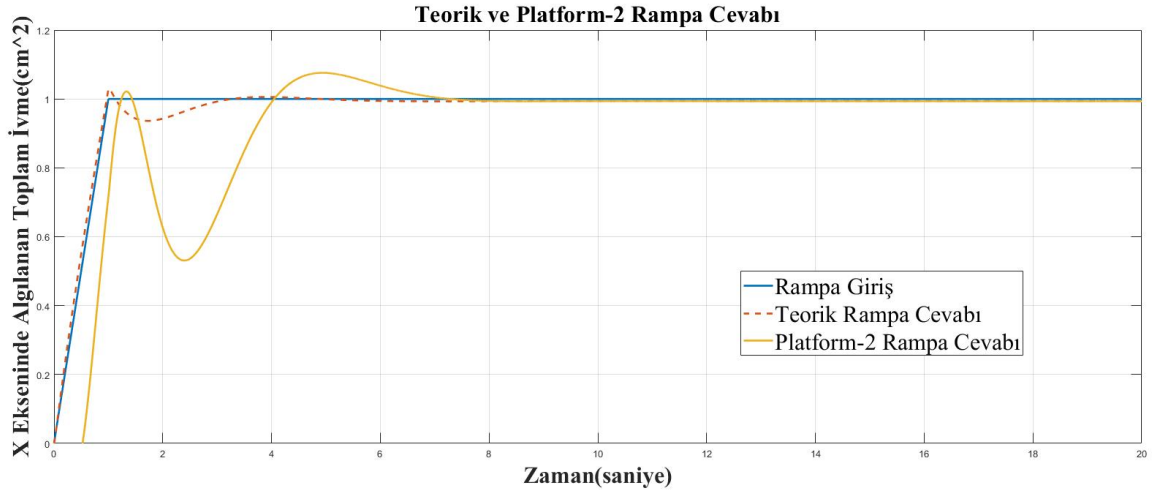
**Şekil 4.13.** Çizelge 4.1'e Göre Oluşan Filtrelerin X Eksenindeki Nötrleme Hareketi

### 4.3.2 Optimal Algoritma Sonuçları



**Şekil 4.14.** Platform-2 Optimal Algoritma Rampa Cevabı

Klasik algoritmada oluşan sistem yavaşlamasından kaynaklanan tepe değeri hatası ve yavaşlama Şekil 4.14'te de görülmektedir. Oluşan tepe değeri hatasını gidermek için Çizelge 4.1 de gösterilen  $X_{ölçek}$  parametre değeri %428.6 oranında artırılmış ve Şekil 4.15 de ki sonuç alınmıştır.

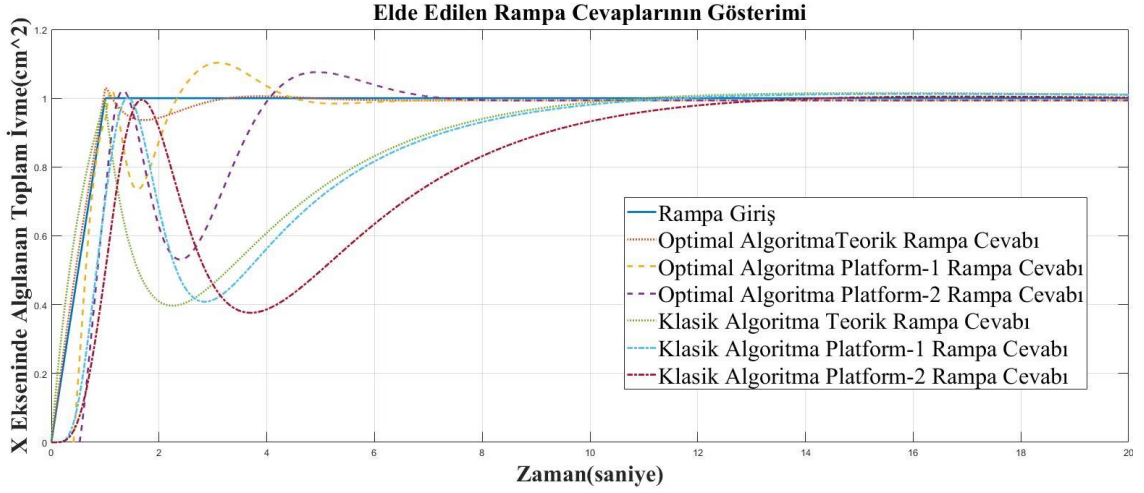


**Şekil 4.15.** Optimal Algoritmanın Platform-2'deki Rampa Cevabı



## BÖLÜM V

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER



Şekil 5.1. Klasik ve Optimal Algoritmaların Platform-1 ve 2 de Sonuçları

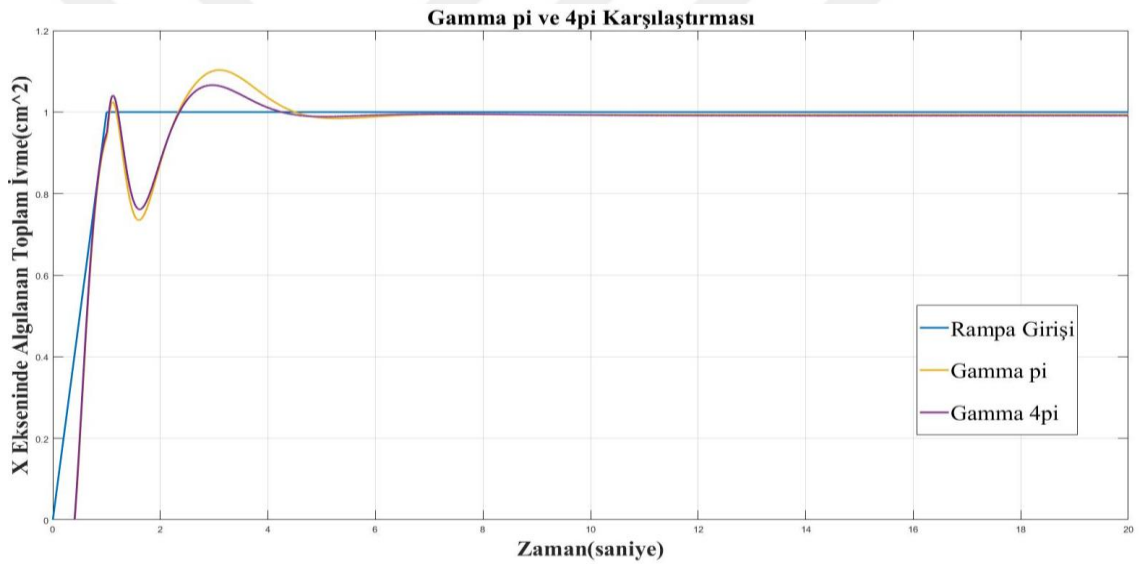
Yapı itibarıyla, klasik algoritmalar, bu tezde oluşturulan LQR yapısına sahip Lineer Optimal Kontrolcü gibi ileri kontrol yöntemleriyle oluşturulan algoritmalara kıyasla ilkel görünebilir. Ancak işlevsellik açısından bu algoritmalar, ileri yöntemlerden çok da geri kalmaz. Bu nedenle, nispeten daha yeni simülatör sınıfına giren Desdoma simülatörlerinde Klasik Algoritma tercih edilmiştir. Bununla birlikte, Şekil 5.1 de görüldüğü gibi, Lineer Optimal Kontrolcünün çıktıları Klasik Algoritmaya göre daha iyidir.

Lineer Optimal Algoritmanın daha iyi sonuçlar verdiği kabul edilse de algoritmanın içinde bulunan birçok parametre ayarlanabilir esnekliğe sahip değildir. 3.3 Optimal Algoritmanın Geliştirilmesi başlığı altında bulunan A, B, C ve D matrisleri, vestibüler sistemler üzerindeki deneysel araştırmalarla belirlendiğinden ve platform matrisi, platform durum matrisinden elde edildiğinden, üzerinde değişiklik yapılabilir matrisler değildir. Bu sebeple, Optimal Algoritmanın davranış tepkisini değiştirmek için yalnızca Beyaz Gürültü matrisi kullanılmaktadır. Her ne kadar bu matris, vestibüler sisteme gelen gürültüleri filtrelemek için eklenmiş olsa da aynı zamanda algoritmanın hareket tepkisini ayarlayabilmesi amacıyla da kullanılmıştır. A matrisinde bulunan  $-B_v$  parametresinden anlaşılacağı üzere, Beyaz Gürültü matrislerinin katsayıları vestibüler sistem girişiyile

çarpılarak durum matrisinde kullanılır. Şekil 4.8'de görünen Platform-1 tepkilerini elde etmek için  $\gamma_1=1$  ve  $\gamma_2=\pi$  olarak belirlenmişti. Yeni gamma değerleri  $\gamma_1=1$  ve  $\gamma_2=4\pi$  olarak ayarlandığında ise, Şekil 5.1 de Platform-1'deki rampa cevabı elde edilmiştir ve  $\gamma_2=\pi$  durumu ile kıyaslanmıştır. Ancak burada sadece  $\gamma_2$  değeri değil aynı zamanda yeni  $\gamma_2$  değeri ile Şekil 3.10 da ki akışa göre Maliyet Fonksiyonuna ait Q ve R matrislerinin bastan bulunması gerekir. Yeni bulunan matris dengeleri Çizelge 5.1 de ki gibidir.

**Çizelge 5.1.  $\gamma_2=4\pi$  İçin Yeni Matris Değerleri**

$Rd_{11}$	$Rd_{22}$	$Rd_{33}$	$Rd_{44}$	$Q_{11}$	$Q_{22}$	$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{21}$	$R_{22}$	$X_{ölçek}$	$Eğim_{ölçek}$
1	1	6	300	7	10	1	1	1	1	700	83



**Şekil 5.2.  $\gamma_2=4\pi$  ve Çizelge 5.1 de ki Değerlere Göre Platform-1 Rampa Cevabı**

Şekil 5.2 de ki grafiğe göre  $\gamma_2= 4$  ve Çizelge 5.1 de ki matris değerlerinde nispeten daha iyi sonuç alınmış bunun sebebi vestibüler sistemin 1Hz yerine 4Hz olarak filtrelenip frekans tepkisinin artırılmasıdır ancak bu durumda gürültülü sinyallerin daha az filtrelenmesine sebep olur. Telban (2005) göre NASA simülatörlerinde gerçek pilotlar ile yapılan testlerde  $\gamma_2$  değerinin yükseltilmesi art arda yapılan manevralarda daha iyi pilot hissi sunmuştur.

Lineer Optimal Algoritmada, Klasik Algoritmaya göre ayarlanabilir daha çok parametre olduğu görülse de aslında değişmeyen matris yapılarından dolayı Maliyet Fonksiyonunda

seçilecek Q ve R matrisleri oluşacak tekillikler (singularity)'den dolayı kısıtlı bir değer verme havuzuna sahiptir.

Hareket algı algoritmaları, bir son kullanıcı ürünüdür; bu sebeple algoritmanın ne kadar iyi olduğu son kullanıcı tarafından belirlenir. Tez kapsamında, zorlayıcı bir manevra olan rampa fonksiyonunda yaratılan ivmenin grafikleri çizdirilmiş olsa da algoritmanın ne kadar iyi olduğu son kullanıcı tarafından belirlenir. Gerçek simülasyonlarda yapılan karşılaştırmalı deneylerde, adaptif klasik algoritmanın klasik algoritmadan, optimal algoritmanın ise adaptif klasik algoritmadan daha iyi olduğu belirtilse de, Telban (2005), bu sonuç yine subjektiftir. Bu sebeple, optimal algoritmanın matematiksel olarak iyi olduğu grafiklerle doğrulansa bile, uygulamanın karmaşıklığının alınan sonuca değip değmediği yine sübjektifliğini korumaktadır. Günümüzde ise bu algoritmalar, farklı kontrol teorisi yaklaşımları ile tekrar ele alınmakta ve birbiri ile kıyaslanmaları devam etmektedir.

## KAYNAKLAR

Angelaki, D. E., ve Cullen, K. E. "Vestibular System: The Many Facets of a Multimodal Sense", *Annual Review of Neuroscience*, 31, 125-150, 2008.

Barnett-Cowan, M., Dyde, R. T., ve Clement, R. S. "The Potential of Spatial Disorientation Training to Reduce Spatial Disorientation Mishaps in Military Aviation", *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 81(10), 965-971, 2010.

Benson, A. J. "Spatial Disorientation: General Aspects", *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 49(1 Pt. 2), 47-54, 1978.

Bone, G. M., ve Lambert, S. C. "Parallel Mechanisms: Stewart Platform Configurations", *Robotica*, 17(2), 213-222, 1999.

Cappel, K. Apparatus for Simulating Various Conditions. US Patent 3,304,706, 1967.

Cardullo, F. M., ve Kosut, R. L. "Nonlinear Washout Filter Design for a Flight Simulator", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 6(2), 110-116, 1983.

Clarke, A. H. "The Human Vestibular System: Anatomy and Function", In A. H. Clarke ve A. P. Bradshaw (Eds.), *Balance: Its Nature and Function* (pp. 3-29). *Springer*, 2005.

Conrad, B., ve Schmidt, S. F. "Washout Circuits for Motion Simulators", *NASA Technical Note*, NASA TN D-5840, 1970.

Curthoys, L. S., ve Oman, C. M. "Vestibular Adaptation and Habituation", *In The Vestibular System*, *Academic Press*, 1975.

Dasgupta, B., ve Mruthyunjaya, T. S. "The Stewart Platform Manipulator: A Review", *Mechanism and Machine Theory*, 35(1), 15-40, 2000.

de Havilland Aeronautical Technical School Association. "The Redifon Comet 4 Flight Simulator for BOAC", <https://www.dhaetsa.org.uk/news/the-redifon-comet-4-flight-simulator-for-boac>, 2016.

Dieterich, M., ve Brandt, T. "Functional Brain Imaging of Peripheral and Central Vestibular Disorders", *Brain*, 131(10), 2538-2552, 2008.

Engineering and Technology History Wiki. "Antoinette and Early Flight Simulation", [https://ethw.org/Antoinette\\_and\\_early\\_flight\\_simulation](https://ethw.org/Antoinette_and_early_flight_simulation), 2023.

Faisal, A. A., Selen, L. P., ve Wolpert, D. M. "Noise in the Nervous System", *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 292-303, 2008.

Fernandez, C., ve Goldberg, J. M. "Physiology of Peripheral Neurons Innervating Semicircular Canals of the Squirrel Monkey. II. Response to Sinusoidal Stimulation and Dynamics of Peripheral Vestibular System", *Journal of Neurophysiology*, 34(4), 661-675, 1971.

Fischer, P. "Driving Simulator Motion Cueing Algorithm with Driver Adaptation", *In Driving Simulation Conference Europe*, 2009.

Fotoğraf, Antoinette Trainer. "The Antoinette Barrel – a Training Device Upon Request", <https://www.halldale.com/defence-or-military/20498-the-antoinette-barrel-atraining-device-upon-request>, Kasım 2022.

Fotoğraf, Billing Oscilatörü. <https://www.mediastorehouse.com/flightglobal/flight/historical/earldley-biling-oscillator-1570909.html>, Ağustos 2024.

Fotoğraf, Comet IV, <https://web.aeromech.usyd.edu.au/vsfs/images/Comet.jpg>, Kasım 2013.

Fotoğraf, Desdemonna. <https://www.tno.nl/en/safe/operationshumanfactors/desdemonna-ultimate-motion-simulator>, Nisan 2015.

Fotoğraf, Gough Platform. <https://fecad.com/hexapod/index.html>, Şubat 2008.

Fotoğraf, GPN-2000. <http://hq.nasa.gov/IMAGES/LARGE/GPN-2000-001812.jpg>, Eylül 1961.

Fotoğraf, Japetus. Szczepański C. "Simulator Technology in Optimising the Human-Automated System Interface", RTO-MP-088 Symposium The Role of Humans in Intelligent and Automated Systems, Warsaw, Poland, Ekim 2002.

Fotoğraf, Klaus Cappel Simülatorü. <http://www.bdigital.unal.edu.co/50951/1/74371282.2015>, Ekim 2005.

Fotoğraf, Ruggles Orientator. <https://tessa2.lapl.org/digital/collection/photos/id/110353>, Haziran 2017.

Fotoğraf, The Link Trainer. Historic Wings. <http://fly.historicwings.com/2013/04/the-link-trainer/>, Aralık 2013.

Flashbak, The Ruggles Orientator: The First. <https://flashbak.com/the-ruggles-orientator-the-first-flight-simulator-article-12345>, Ağustos 2024.

Gastaldi, L., Pastorelli, S., Sorli, M. "Vestibular Apparatus: Dynamic Model of the Semicircular Canals", *BIOMED*, 2009.

Gillingham, K. K., ve Krutz, R. W. "Spatial Disorientation in Flight: A Review of Current Problems, Countermeasures, and Future Research Directions", *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 56(11), 1109-1115, 1985.

Goldberg, J. M., ve Fernandez, C. "Physiology of Peripheral Neurons Innervating Semicircular Canals of the Squirrel Monkey. III. Variations Among Units in Their Discharge Properties", *Journal of Neurophysiology*, 34(4), 676-684, 1971.

Goldstein, E. B. "Cognitive Psychology: Connecting Mind, Research, and Everyday Experience", *Cengage Learning*, 2013.

Gough, V. E., ve Whitehall, S. G. "Universal Tire Test Machine", *Proceedings of the FISITA 9th International Technical Congress*, 1962.

Grant, J. W., ve Best, W. J. "Otolith-Organ Mechanics: Lumped Parameter Model and Dynamic Response", *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 58(11), 1079-1085, 1987.

Grant, P. R., ve Reid, L. D. "Motion Cueing Algorithms for Helicopter Flight Simulators", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 20(4), 763-770, 1997.

Grush, R. "The Emulation Theory of Representation: Motor Control, Imagery, and Perception", *Behavioral and Brain Sciences*, 27(3), 377-396, 2004.

Havkar. "İlk Uçak Simülatörü", <https://www.havkar.com/tr/blog/view/ilk-ucak-simulatoru/90>, 2024.

Howard, I. P. Human Visual Orientation. *John Wiley ve Sons*, 1982.

Ish-Shalom, J. "Design of Optimal Motion for Flight Simulators", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 5(5), 481-486, 1982.

Kandel, E. R., Schwartz, J. H., ve Jessell, T. M. Principles of Neural Science (4th ed.). *McGraw-Hill*, Health Professions Division, 2000.

Khan, S., ve Chang, R. "Anatomy of the Vestibular System: A Review", *NeuroRehabilitation*, 32(3), 437-443, 2013.

Lewkowicz, R., ve Kowaleczko, G. "Development of Motion Systems for Flight Simulators", *The Polish Journal of Aviation Medicine*, 2020.

Lundberg, Y. W., ve Zhao, X. "Otolith Organs", In *The Vestibular System* (pp. 145-170). *Springer*, 2016.

National Museum of the United States Air Force, Link Trainer. <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/FactSheets/Display/Article/196178/link-trainer>, 2023.

Marrison, R. "Lessons Learned From A Historical Review of Piloted Aircraft Simulations", *Flight Simulation and Technologies Conference*, Monterey, 1993.

Mayne, R. "A Systems Concept of the Vestibular Organs." In H. H. Kornhuber (Ed.), *Handbook of Sensory Physiology: Vestibular System Part 2: Psychophysics, Applied Aspects and General Interpretations* (pp. 493-580). *Springer-Verlag*, 1973.

McKenna, J. "The Vertical Motion Simulator: A Facility for Advanced Flight Research", *Paper presented at the Aerospace Technology Conference and Exposition*, Long Beach, CA, 1990.

Meiry, J. L. "The Vestibular System and Human Dynamic Space Orientation", *National Aeronautics and Space Administration*, Washington, D.C., (NASA CR-666), 1968.

National Air and Space Museum. "Wright Brothers and Early Flight Simulators", <https://airandspace.si.edu/visit/udvar-hazy-center/simulators>, 2017.

Nahon, M. A., ve Reid, L. D. "Simulator Motion-Drive Algorithms: A Designer's Perspective", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 13(2), 356-362, 1990.

Naseri, A., ve Grant, P. R. "Actuator State Based Adaptive Washout Algorithm for a Hexapod Flight Simulator Motion Base", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 219(1), 19-34, 2005.

Naval Air Station Fort Lauderdale Museum. "Link Trainer Flight Simulator", <https://www.nasflmuseum.com/link-trainer.html>, 2024.

National Museum of the United States Air Force. "Link Trainer", <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Fact-Sheets/Display/Article/196852/link-trainer/>, 2005.

Purves, D., Septemberine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A. S., McNamara, J. O., ve White, L. E. Neuroscience (2nd ed.). *Sinauer Associates*, 2001.

Riccobono, N. S. "U.S. Coast Guard Boat Recovery Simulation at NASA Ames Vertical Motion Simulator", *NASA Ames Research Center*, 2020.

Schmidt, S. F., ve Conrad, B. "Motion Cues for Piloted Flight Simulators", *AIAA Paper*, 70-351, 1970.

Schmidt, S. F., ve Conrad, B. "Washout Circuits for Motion Simulators", *NASA Technical Note*, NASA TN D-5840, 1970.

Sekuler, R., ve Blake, R. Perception (6th ed.), *McGraw-Hill Education*, 2014.

Sivan, R., Ish-Shalom, J., ve Huang, J. K. "An Optimal Control Approach to the Design of Moving Flight Simulators", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-12(6), 818-827, 1982.

Smith, B. L. "Almost as Many Pilots Died Flying This World War I Plane in Training as in Combat", <https://insider.si.edu/2018/09/two-aviation-treasures-bequeathed-to-the-smithsonian/>, Smithsonian Insider, 6 Eylül 2018.

Snowden, R. J., ve Braddick, O. J. "The Temporal Integration and Resolution of Velocity Signals", *Vision Research*, 31(5), 907-914, 1991.

Squires, T. M., Carter, A. A., Brichta, A. M., ve Gentine, M. S. "The Semicircular Canals: A Review of the Literature and Case Report", *Journal of the Canadian Chiropractic Association*, 57(4), 311, 2013.

Steinhausen, W. "Über die Beobachtung der Cupula in den Bogengangsampullen des Labyrinthes des lebenden Hechts", *Pflügers Archiv European Journal of Physiology*, 232(1), 500-512, 1933.

Stewart, D. "A Platform with Six Degrees of Freedom", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 180(1), 371-386, 1965.

Telban, R. J., ve Cardullo, F. M. "Motion Cueing Algorithm Development: Human-Centered Linear and Nonlinear Approaches", *Journal of Aircraft*, 42(2), 509-518, 2005.

Tortora, G. J. and Derrickson, B. H. "Principles of Anatomy and Physiology", *John Wiley ve Sons*, New Jersey, USA, 2008.

Wentink, M. H., Roskam, R., ve Valk, P. J. L. "A Spherical Washout Algorithm for a Moving Base Flight Simulator with Three Rotational Degrees-of-Freedom", *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 2005-6383, 2005.

Wertheim, A. H. "Motion Perception During Self-Motion: The Direct Versus Inferential Controversy Revisited", *Behavioral and Brain Sciences*, 17(2), 293-311, 1994.

Wilson, V. J., ve Melvill Jones, G. Mammalian Vestibular Physiology. *Plenum Press*, 1979.

Young, L. R. "The Current Status of Vestibular System Models", *Automatica*, 20(1), 5-13, 1984.

Young, L. R., ve Meiry, J. L. "A Revised Dynamic Otolith Model", *Aerospace Medicine*, 39(6), 606-608, 1968.

Young, L. R., ve Oman, C. M. "Model for Vestibular Adaptation to Horizontal Rotation", *Aerospace Medicine*, 40(10), 1076-1080, 1969.

Zacharias, G. L. "Transfer Characteristics of the Human Operator in the Control of Slow-Moving Vehicles", *Ergonomics*, 21(3), 205-222, 1978.

Zupan, L., Merfeld, D. M., ve Darlot, C. "Using Sensory Weighting to Model Gravitoinertial Cue Combination: I. Basic Theory", *Journal of Neurophysiology*, 88(4), 1227-1243, 2002.

## ÖZ GEÇMİŞ

.....'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Aydın'da tamamladı. 2011 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2016'da mezun oldu. 2022 yılından bu yana Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans çalışmalarını sürdürmektedir.



