

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DÖRT KANAT TİPİNDE İHA'LAR İÇİN YAPAY SİNİR AĞI İLE KONUM
TABANLI GÖRSEL SERVOLAMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYBÜKE ÜNLÜ

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. TOLGA YÜKSEL

BİLECİK, 2022
10462925

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DÖRT KANAT TİPİNDE İHA'LAR İÇİN YAPAY SİNİR AĞI İLE KONUM
TABANLI GÖRSEL SERVOLAMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYBÜKE ÜNLÜ

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. TOLGA YÜKSEL

BİLECİK, 2022
10462925

BEYAN

Dört Kanat Tipinde İha'lar İçin Derin Öğrenme İle Konum Tabanlı Görsel Servolama adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Bu çalışmamın, Bilimsel Araştırmalar Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte beyan edilmelidir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	
Destek alındı ise;			
Destekleyen Kurum:			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;			

Öğrenci Adı ve Soyadı

.....

Tarih

.....

İmza

.....

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yazılmasında, çalışmamı büyük bir titizlikle takip eden, başarılı olmam için elinden gelenden fazlasını yapan, çok büyük fedakarlık ve özveri ile çalışmalarına sonsuz katkısı olan, kendisini örnek aldığım kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tolga Yüksel'e sonsuz şükranlarımı ve saygımı sunarım.

Hayatımda desteklerini hiç üzerimden çekmeyen, başarılı olmam için dualar eden, her an yanımda olduğunu hissettiren, tüm zorluklarda nazımı ve kahrımı çeken, her zaman maddi manevi en büyük destekçim olan çok değerli aileme ve ailemin en minik üyesi kardeşim Yağız Berat Ünlü' ye bana en büyük manevi desteği verdiği için eşi ve benzeri olmayan sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Okula başladığım ilk andan bu zamana kadar başarının sırrını aramamda ki ve başarıyı kovalamamdaki en büyük katkıya sahip, bir an olsun kalem tutan elimi bırakmadığı için melek annem Aliye Ünlü' ye ayrıca teşekkür ve sevgilerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca yoluma ışık tutan ve başarının onların gösterdiği ışığı takip edebilmenin olduğunu kavramamı sağlayan, henüz 7 yaşında okulu sevdiren ve başarının bir tutku olduğunu gösteren başta kıymetli öğretmenim Sayın Filiz HUSİ olmak üzere tüm değerli ve kıymetli öğretilerime ve hocalarıma sonsuz sevgi ve şükranlarımı sunarım.

ÖZET

DÖRT KANAT TİPİNDE İHA'LAR İÇİN YAPAY SİNİR AĞI İLE KONUM TABANLI GÖRSEL SERVOLAMA

İnsansız Hava Araçları(İHA) belirli görevleri yerine getirirken uçuş esnasındaki konum ve yönelimleri ataletsel ölçüm birimine(IMU) ve küresel konumlandırma sistemine(GPS) bağlıdır. İHA'larda otomatik iniş, olumsuz atmosferik koşullarla ilişkili sorunları hafifletecek ve pilot girdisi olmadığı için olası hataları ortadan kaldıracak ve İHA'ların iniş yapacağı bölge için bir kontrol merkezinden izin almak zorunda kalmadan hali hazırda içerisinde bulunan GPS, IMU ya da GS kullanarak iniş yaparak tüm bu sorunları ortadan kaldıracak bir çözüm sunar. Otonom bir uçuş veya otonom iniş görevleri söz konusu olduğunda GPS sistemlerin kullanılamaz olduğu şartlarda görsel servolama sistemleri görevin tamamlanmasını sağlamaktadır. Görsel servolama yönteminde İHA üzerine monte edilmiş kamera hedeflenen göreve göre İHA'yı kontrol etmek için kullanılır. İHA'nın konum veya hız kontrolünün görsel servolama yöntemi kullanılarak sağlanmasıyla; düşük hassasiyet, düşük maliyet, yüksek dayanıklılık içeren sistem elde edilir.

Döner kanatlı insansız hava araçları için özniteliklere bağlı duruş kestirime ihtiyaç duyan, bunun yanı sıra etkileşim matrisi kaynaklı tekilliklerden uzak duran KTGS sistemine odaklanılmıştır. Bu çalışma da klasik KTGS' den farklı olarak görüş alanı koruyucu kullanılması hedeflenmiştir. Görüş alanı koruyucu ile planlanan yörüngenin döner kanatlı insansız hava aracının üzerine monte edilmiş kameranın öznitelikleri görececek şekilde bölgede kalıp kalmadığı kontrol edilerek herhangi bir önleme çalışması yapılmasa da kontrol işleminin bu çalışmaya katkı sağlaması amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında KTGS'nin duruş kestirimi için klasik yaklaşımların aksine yapay sinir ağı kullanılması hedeflenmiştir. İlk aşamada yapay sinir ağında kullanılmak üzere 150 farklı senaryo denemesi yapılarak veri seti oluşturulmuştur. Yapay sinir ağının eğitilmesinde Neural Network Toolbox kullanılmıştır. Yörünge planlama ile hedef özniteliklere ait merkez koordinat kestirimi yapılması hedeflenmiştir. Yapay sinir ağı duruş kestirimci girişlerine rastgele gürültü eklenerek hem gürültü hem de yörünge planlama da eğitilmiş ve eğitilmemiş verilerdeki yakınsama başarımlarının test edilmesi amaçlanmıştır. Simülasyon çalışmasında sanal platformu oluşturmak için kolay ve sezgisel bir ortam sağlayan CoppeliaSim kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Döner Kanat Tipinde İnsansız Hava Aracı, Konum Tabanlı Görsel Servolama, Yapay Sinir Ağı

ABSTRACT

POSITION BASED VISUAL SERVOING WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR QUADROTOR TYPE UAVs

While Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) perform certain tasks, their position and orientation during flight depend on the inertial measurement unit (IMU) and the global positioning system (GPS). Automatic landing in UAVs will alleviate the problems associated with adverse atmospheric conditions and eliminate possible errors as there is no pilot input, and without having to obtain permission from a control center for the area where the UAVs will land, they can land by using the GPS, IMU or VS already in place offers a solution to eliminate these problems. In the case of autonomous flight or autonomous landing missions, visual servoing systems ensure the completion of the mission in conditions where GPS systems are not available. In the visual servoing method, the camera mounted on the UAV is used to control the UAV according to the targeted mission. By providing the position or speed control of the UAV using the visual servoing method; low sensitivity, low cost, high durability system is obtained.

The focus is on the PBVS system, which needs feature-dependent pose estimation for quadrotor-type unmanned aerial vehicles, as well as avoiding singularities originating from the interaction matrix. In this study, it is aimed to use field of view protection, unlike the classical PBVS. Although no prevention work is carried out, it is aimed to contribute to this study by checking whether the camera mounted on the rotary wing unmanned aerial vehicle, which is planned with a field of view protector, remains in the region so that it can see the features. In this thesis, it is aimed to use an artificial neural network for the stance prediction of KTGS, unlike classical approaches. In the first stage, a data set was created by trying 150 different scenarios to be used in the artificial neural network. Neural Network Toolbox was used to train the artificial neural network. With the trajectory planning, it is aimed to make the estimation of the center coordinates of the target features. It is aimed to test the convergence performances of both noise and trajectory planning on trained and untrained data by adding random noise to the artificial neural network posture predictor inputs. CoppeliaSim, which provides an easy and intuitive environment to create the virtual platform, was used in the simulation study.

Keywords: Quadrotor-type Unmanned Aerial Vehicle, Position Based Visual Servo, Artificial Neural Network

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR LİSTESİ.....	ix
SİMGELER LİSTESİ.....	x
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Literatür Özeti.....	12
2.MATERYAL.....	17
2.1.İnsansız Hava Araçlarının Çalışma Prensibi.....	17
2.2.Görsel Servolama Temelleri.....	26
2.2.1.Görüntü Tabanlı Görsel Servolama.....	27
2.2.2.Konum Tabanlı Görsel Servolama.....	30
2.2.3.Hibrit Görsel Servolama.....	32
2.3.Yapay Sinir Ağları.....	32
2.4.Duruş Kestirimi.....	34
3.METOT.....	35
3.1.Önerilen Konum Tabanlı Görsel Servolama Sistemi.....	35
3.2.CoppeliaSim Simülasyon Ortamı.....	36
3.2.1.CoppeliaSim ve Matlab Haberleşmesi.....	38
3.3.Öznitelik Çıkarımı.....	39
3.4.Veri Setinin Oluşturulması.....	40
3.5.Neural Network Toolbox.....	42
3.6.YSA ile Öznitelik Kestirimi ve Görüş Alanı Koruması.....	49

3.7.YSA'nın Duruş Kestirimci Girişlerine Rastgele Gürültü Eklenmesi.....	60
4.SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....	67
KAYNAKÇA.....	69
EKLER.....	74



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.Geçmişteki İnsansız Hava Aracı.....	2
Şekil 1.2.AscTec Hummingbird Dört Kanatlı İHA.....	3
Şekil 1.3.Eldeki-göz ve Ele-göz.....	4
Şekil 1.4.Görsel Servolama İçin Eldeki-göz Kurulumu.....	4
Şekil 1.5.Görüntü Tabanlı Görsel Servolama.....	5
Şekil 1.6.Konum Tabanlı Görsel Servolama.....	6
Şekil 1.7.Robotik Montaj Sistemi Kurulumu Ve Montajı Yapılacak Bileşenler.....	8
Şekil 1.8.Montaj Sırası.....	8
Şekil 1.9.Dübbün Stereoskoplu Meyve Toplama Robotu.....	9
Şekil 1.10.Hasat Robotu İçin Bir Ortak Görme Sisteminin Şematik Diyagramı.....	9
Şekil 1.11.Laparoskop Tutucu AESOP Robotu İçin Model-free Görsel Servolama.....	10
Şekil 1.12.Yörüngede Kullanılan Uzay Robotik Sistemi.....	11
Şekil 1.13.Görsel Servolama Deneylerinde Öznitelik İzleme.....	16
Şekil 2.1.Dört Rotoru, İtme Vektörlerini ve Dönme Yönlerini Gösteren Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracı Gösterimi.....	17
Şekil 2.2.PID Kontrolör.....	22
Şekil 2.3.İğne Deliği Kamera Modeli.....	28
Şekil 2.4.Yapay Sinir Hücresi.....	33
Şekil 3.1.Önerilen Konum Tabanlı Görsel Servolama Sistemi.....	36
Şekil 3.2.CoppeliaSim GS Senaryo Animasyon Ortamı.....	38
Şekil 3.3.Önerilen Sistemin Orijinal Öznitelik Görüntüleri.....	39
Şekil 3.4.Önerilen Sistemin Özniteliklerine Ait Ön İşleme Sonrası Görüntüleri.....	39
Şekil 3.5. Öznitelikleri İçeren Görüntü Düzleminin 4 Bölgeye Ayrımı.....	40
Şekil 3.6.Neural Network Grafiksel Arayüzü.....	42
Şekil 3.7.Create Network or Data.....	43

Şekil 3.8. Yapay Sinir Ağı Yapısı.....	43
Şekil 3.9. Neural Network’de Eğitim Verilerinin Test Edilmesi.....	44
Şekil 3.10. Neural Network Performans Eğrisi.....	44
Şekil 3.11. Yapay Sinir Ağının x Konumlarına Yakınsaması.....	45
Şekil 3.12. Yapay Sinir Ağının y Konumlarına Yakınsaması.....	46
Şekil 3.13. Yapay Sinir Ağının z Konumlarına Yakınsaması.....	47
Şekil 3.14. Yapay Sinir Ağının α Yönelimine Yakınsaması.....	48
Şekil 3.15. Yapay Sinir Ağının β Yönelimine Yakınsaması.....	48
Şekil 3.16. Yapay Sinir Ağının γ Yönelimine Yakınsaması.....	49
Şekil 3.17. Örnek Yörünge Planlama.....	50
Şekil 3.18. Yörünge Planlama Blok Diyagramı.....	52
Şekil 3.19. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Kırmızı Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	52
Şekil 3.20. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Kırmızı Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	53
Şekil 3.21. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Mavi Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	53
Şekil 3.22. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Mavi Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	54
Şekil 3.23. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Yeşil Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	54
Şekil 3.24. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Yeşil Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	55
Şekil 3.25. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Kırmızı Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	56
Şekil 3.26. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Kırmızı Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	57

Şekil 3.27. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Mavi Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	57
Şekil 3.28. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Mavi Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	58
Şekil 3.29. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Yeşil Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	58
Şekil 3.30. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Yeşil Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama.....	59
Şekil 3.31. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının x Konumuna Ait Yakınsama.....	60
Şekil 3.32. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının y Konumuna Ait Yakınsama.....	60
Şekil 3.33. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının z Konumuna Ait Yakınsama.....	61
Şekil 3.34. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının α Yönelimine Ait Yakınsama.....	61
Şekil 3.35. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının β Yönelimine Ait Yakınsama.....	62
Şekil 3.36. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının γ Yönelimine Ait Yakınsama.....	62
Şekil 3.37. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının x Konumuna Ait Yakınsama.....	63
Şekil 3.38. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının y Konumuna Ait Yakınsama.....	64
Şekil 3.39. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının z Konumuna Ait Yakınsama.....	64
Şekil 3.40. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının α Yönelimine Ait Yakınsama.....	65
Şekil 3.41. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının β Yönelimine Ait Yakınsama.....	65
Şekil 3.42. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının γ Yönelimine Ait Yakınsama.....	66

KISALTMALAR LİSTESİ

2B: İki boyutlu (Two Dimensional)

3B: Üç Boyutlu (Three Dimensional)

API: Uygulama Programlama Arayüzü (Application Programming Interface)

CAD: Bilgisayar Destekli Tasarım(Computer Aided Design)

DNN: Derin Sinir Ağı(Deep Neural Network)

GCS: Yer Kontrol İstasyonu (Ground Control Station)

GKF: Genişletilmiş Kalman Filtresi (Extended Kalman Filter)

GPS: Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System)

GS: Görsel Servolama (Visual Servoing)

GTGS: Görüntü Tabanlı Görsel Servolama (Image-based Visual Servoing)

HDB: Hızlı Devriye Botu (Fast Patrol Boats)

HVS: Hibrit Görsel Servolama (Hybrid Visual Servoing)

İHA: İnsansız Hava Aracı (Unmanned Aerial Vehicle)

IMU: Ataletsel Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit)

KTGS: Konum Tabanlı Görsel Servolama (Position-based Visual Servoing)

MSE: Ortalama Kare Hatası (Mean Squared Error)

PF: Parçacık Filtresi (Particle Filter)

PID: Oransal İntegral Türev (Proportional Integral Derivative)

RANSAC: Rastgele Örnek Konsensüsü (Random SAmple Consensus)

RGB: Kırmızı-Yeşil-Mavi (Red-Green-Blue)

VTOL: Dikey Kalkış Ve İniş (Vertical Take Off and Landing)

YGKF: Yinelenen Genişletilmiş Kalman Filtresi (Iterated Extended Kalman Filter)

YSA: Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network)

SİMGELER LİSTESİ

$\mathbb{R}^2$: Tüm 2 Boyutlu Noktaların Kümesi

SE(n): Özel Öklid Grubu, Bir $\mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$ Ortogonal Matrisi İle Temsil Edilen n Boyutlu Tüm Pozlar Kümesi

C: Kamera Matrisi, $C \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$

f: Görüntü Özelliklerinin Vektörü

f*: Hedef Görüntü Özniteliklerinin Vektörü

G: Manipülatör Yerçekimi Yükleme Terimi

s: Görsel Öznitelik Vektörü

s*: Hedef Öznitelik Vektörü

ξ : Kartezyen Pozun Soyut Temsili

{B}: Gövde Çerçevesi

{E}: Dünya Sabit Çerçevesi

B_x: x Eksenindeki Gövde Koordinat Referansı

B_y: y Eksenindeki Gövde Koordinat Referansı

B_z: z Eksenindeki Gövde Koordinat Referansı

E_x: x Eksenindeki Yer Koordinat Referansı

E_y: y Eksenindeki Yer Koordinat Referansı

E_z: z Eksenindeki Yer Koordinat Referansı

r: Yer Koordinat Eksenini ile Gövde Koordinat Eksenini Arasındaki Mesafe

R: Dünya Sabit Çerçeve Ve Gövde Sabit Çerçeve Arasındaki Dönme Matrisi

ϕ : Yuvarlanma Açısı

θ : Yunuslama Açısı

ψ : Yönelme Açısı

T: Açısal Dönüşümler İçin Bir Dönüşüm Matrisi

M_B: B_x, B_y, B_z Etkileyen Moment

J: Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Diyagonal Atalet Matrisi

ω : Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Açısal Hız Vektörü

$\dot{\omega}$: Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Açısal İvme Vektörü

J_r: Rotor Ataleti

Ω_r : Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Z Eksenindeki Dönüsel Dengesizliği

F_i: i'nci Rotorun İtici Kuvveti

M_i: i'nci Rotorun Momenti

b : Aerodinamik Kuvvet Sabiti

Ω_i : i 'inci Rotorun Açısal Hızı

l : Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Merkezi İle Rotor Arasındaki Uzaklık

M_x : x Eksenindeki Moment

M_y : y Eksenindeki Moment

M_z : z Eksenindeki Moment

d : Dönüsel Dengesizlik Moment Sabiti

F_B : Yerçekiminden Bağımsız Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracı Rotorlarının Toplam İtki Kuvveti

m : Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Kütlesi

$\vec{r}$: Newton'un İkinci Yasasındaki İvme

T_z : Denetim Girişi

T_ϕ : x Eksenini İçin Denetim Girişi

T_θ : y Eksenini İçin Denetim Girişi

T_ψ : z Eksenini İçin Denetim Girişi

$\ddot{\Phi}$: Yuvarlanma Açısı İvmesi

$\ddot{\Theta}$: Yunuslama Açısı İvmesi

$\ddot{\Psi}$: Yönelme Açısı İvmesi

$\dot{\Phi}$: Yuvarlanma Açısı Açısal Hızı

$\dot{\Theta}$: Yunuslama Açısı Açısal Hızı

$\dot{\Psi}$: Yönelme Açısı Açısal Hızı

I_{xx} : x Eksenindeki Atalet Momenti

I_{yy} : y Eksenindeki Atalet Momenti

I_{zz} : z Eksenindeki Atalet Momenti

$\ddot{x}$: x Eksenindeki İvme

$\ddot{y}$: y Eksenindeki İvme

$\ddot{z}$: z Eksenindeki İvme

K_p : Orantı Katsayısı

K_i : İntegral Katsayısı

K_d : Türev Katsayısı

K_{ph} , K_{ih} , K_{dh} : Sırasıyla Havada Asılı Kalma İçin PID Katsayıları

$K_{p\theta}$, $K_{i\theta}$, $K_{d\theta}$: Boyuna Uçuş PID Katsayıları

$K_{p\phi}$, $K_{i\phi}$, $K_{d\phi}$: Yanal Uçuş İçin PID Katsayıları

τ_y^* : İstenen Yunuslama Torku

$\theta_p^\#$: Gerçek Araç Eğim Açısı

b : Kaldırma Sabiti

d : Rotorların Merkeze Uzaklığı

τ_x : x Eksenine Yuvarlanma Torku

τ_y : y Eksenine İçin Yunuslama Torku

τ_z : z Eksenine Etrafındaki Toplam Reaksiyon Torku

$\bar{\omega}_i$: Rotorun Açısal Hızı

T : Toplam Tork

A : Bir Matris

$^B v_x$: Gerçek Araç Hızı

$m(t)$: Bir Dizi Görüntü Ölçüm Vektörü

a : Sistem İle İlgili Potansiyel Ek Bilgileri Temsil Eden Bir Dizi Parametre (Kamera İçsel Parametresi)

v_c : Kamera Çerçevesinin Başlangıç Noktasının Anlık Doğrusal Hızı

ω_c : Kamera Çerçevesinin Anlık Açısal Hızı

L_s : s' e Bağlı Görüntü Etkileşim Matrisi

e : Hata Vektörü

L_e^+ : L_e Görüntü Etkileşim Matrisinin Moore-Penrose Yalancı Ters

$\widehat{L_e^+}$: L_e' nin Tahmininin Yalancı Ters

X, Y, Z : Kartezyen Koordinatları

$m=(u,v)$: Piksel Birimlerinde İfade Edilen Görüntü Noktasının Koordinatları

c_u, c_v : Kamera Bakış Noktaları

F : Odak Uzaklığı

α : Piksel Boyutlarının Oranı

Z : Görüntülenen Noktanın Kamera Çerçevesine Göre Derinliği

I_3 : 3×3 Birim Matrisi

t : Bir Öteleme Vektörü

θ_u : Dönüş İçin Açı/Eksen Parametreleştirilmesi

X_n : Veri Girişi

W_{ij} : Ağırlıklar

o_j : Aktivasyon

net_j : Net Giriş

F_c : Mevcut Kamera Çerçevesi

F_{c^*} : İstenen Kamera Çerçevesi

F_0 : Nesneye Eklenmiş Bir Referans Çerçevesi

${}^c t_0$: Geçerli Kamera Çerçevesine Göre İfade Edilen Nesne Çerçevesinin Başlangıç Koordinatları

${}^{c^*} t_0$: İstenen Kamera Çerçevesine Göre İfade Edilen Nesne Çerçevesinin Başlangıç Koordinatları

α : Roll Açısı

β : Pitch Açısı

γ : Yaw Açısı

Δ : Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Hedefe Ulaşması İçin Gereken 106 Adım

$x_{başlangıç}$: Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının X-Y-Z Konumlarının Başlangıç Noktası

x_{hedef} : Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının X-Y-Z Konumlarının Bitiş Noktaları

t_0 : Başlangıç Süresi

t_f : Bitiş Süresi

θ_0 : Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Başlangıç Konum Ve Yönelimleri

θ_f : Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Hedef Konum Ve Yönelimleri

$\dot{\theta}(t)$: Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının Hızı

$\ddot{\theta}(t)$: Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının İvmesi

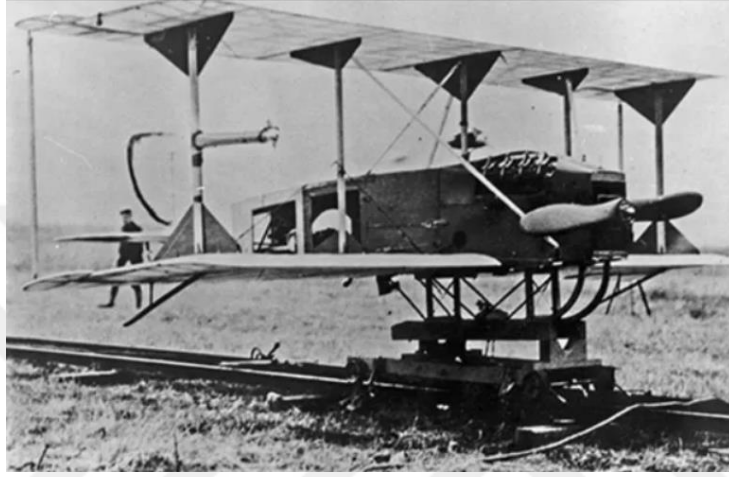
1.GİRİŞ

Günümüzde gelişmekte olan teknoloji ile birçok sektörde insan gücüne dayanan iş ve görevler yerini insansız sistemlere bırakmıştır. Buna en basit örnek insan gücü gerektirmeyen robot süpürgeler verilebilir. Buna ilaveten gelişmiş sektörleri daha da ileri taşıyan bu insansız sistemler tıp, sanayi, endüstri, havacılık, otomasyon, askeri kullanım, araştırma merkezleri gibi sektörlerin yanı sıra hobi ve sosyal yaşamda da hızla yerini almaktadır.

İnsansız hava araçları ise havacılık sektöründe atılmış en büyük adımlardan biridir. İnsansız hava araçları ayrıca haberleşme, fotoğrafçılık, araştırma, enerji, tarım, savunma sanayi, haritacılık, ilaçlama, sağlık, reklamcılık, sivil havacılık, meteorolojik araştırmalar, acil durumlar gibi birçok sektörün vazgeçilmezi olmuştur. İnsansız hava araçlarının vazgeçilmez olmasındaki en önemli neden uzaktan kontrol edilebilmeleri ve/veya otomatik olarak görevlerini yapmalarıdır. Böylece araçların vurulması veya düşürülmesi herhangi bir can kaybına yol açmayacak ve bunun yanı sıra maddi zararının nispeten az olmasını sağlayacaktır. Ayrıca boyutlarının insanlı hava araçlarına göre küçük olması birçok dar ve tehlikeli alanda kullanım imkanı sağlaması ile önemini daha da perçinlemektedir.

İnsansız hava araçlarının modern havacılık tarihinde 1903 yılında Orville Wright'ın 12 saniyelik uçuşuyla başladığı (Beard, 2015:20)'de belirtilse de aslında tarihi çok eskilere dayanmaktadır. İnsansız hava araçları ilk başlarda askeri amaçlarla kullanılmaya başlanmış ve daha sonra ticari amaçlar edinmiştir. Uzaktan kontrol edilen insansız hava araçlarının ilk kez Avusturya tarafından 1849 yılında zaman fitilli bombaları içeren insansız balonların Venedik şehrine gönderilmesi ile kullanılmaya başlandığı (Kahveci ve Can, 2017:512)'de belirtilmiştir. Bu insansız balonlar 1793 yılında Amerikan İç Savaşı'nda sadece askeri alanda keşif amacı ile kullanılmıştır(Can, 2011:64). Daha sonra içerisinde Alman havacıları taşıyan on Alman balonunun 1908 yılının Nisan ve Kasım aylarında Fransa'ya iniş yapması birçok diplomatik soruna yol açmıştır(Can, 2011:64). Bu sorunlar ilk kez hava hukukunun uluslararası bir platformda görüşülmesi adına önemli bir adım atılmasını sağlamıştır. Bu yaklaşımdan balonların insansız hava araçlarının atası sayıldığını söylemek doğru olacaktır. İlerleyen süreçte insansız hava araçlarının ABD'de askeri alanda gelişimi, 1900'lü yıllarda başlamıştır. İnsansız uçuş yapan ilk uçağın 1916 yılında yani Birinci Dünya Savaşı sonlarında tasarlanmıştır. Tasarlanan bu insansız hava aracının kullanımında da "Hewitt-Sperry" jiroskop kontrollü otomatik uçak ile gerçekleştirilmiştir(Kahveci ve Can, 2017:512). Bazı kaynaklarda bu uçuşun 1917 yılında gerçekleştiği ve telsizle kontrol edilen bu insansız hava aracının "Sperry Aerial Torpedo" olarak bilindiği (Beard, 2015:20)'de belirtilmiştir.

Bu gelişmelerin devamında 1918 yılında ise “otomatik uçan uçak”, ABD Silahlı Kuvvetleri’nin resmi uçağı olarak ilk uçuşunu gerçekleştirmiştir. İnsansız hava araçlarının Birinci Dünya Savaşı’ndan sonra da askeri amaçla kullanımı devam etmiştir. İkinci Dünya Savaşı, Afganistan, Vietnam, Irak ve Yemen Savaşlarında da kullanıldığı (Kaçan, 2000:587)’de belirtilmiştir. Tüm bu tarihsel gelişmelerden anlaşılmaktadır ki yaşanan savaşlar ve savaş koşulları bu araçların kullanım amaçlarını geliştirmiş ve yaygınlaştırılmasına vesile olmuştur. Geçmişteki bir insansız hava aracına örnek görüntü Şekil 1.1’de görülmektedir.



Şekil 1.1 Geçmişteki İnsansız Hava Aracı

İnsansız hava araçları için iki temel sınıflandırma yapılabilir; sabit kanatlılar ve döner kanatlılar. Döner kanatlı insansız hava araçları; dikey kalkış ve iniş yapabilen insansız hava araçlarıdır (Vertical Take Off and Landing-VTOL). Manevra kabiliyeti yüksek, kontrol sistemleri karmaşık olmasına rağmen, yapısal olarak basittir. Bu araçların dört rotoru vardır ve rotorlar, döner kanatlı insansız hava araçlarının kütle merkezinden eşit uzaklıkta konumlandırılmıştır. Rotorlar tarafından üretilen kuvvetleri yönlendirme için ve pervaneler vasıtasıyla üretilen kuvveti itme için kullanılmaktadırlar. Döner kanatlı insansız hava aracına dair örnek bir görüntü Şekil 1.2’de görülmektedir.

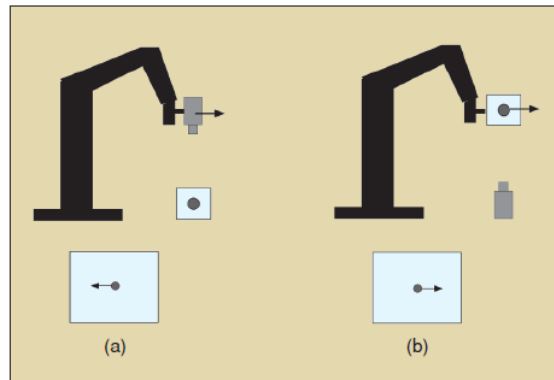


Şekil 1.2. AscTec Hummingbird Dört Kanatlı İHA

Kaynak: (Khalilov, 2016:18)

Döner kanatlı insansız hava araçları mücadele, askeri güvenlik, arazi arama, gözetleme, mayın taraması, uzun mesafe ve yüksek irtifa keşifleri, casus iletişimi, radar sistemlerinin belirlenmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Döner kanatlı insansız hava araçları bu görevleri yerine getirirken uçuş esnasındaki konum ve yönelimlerini ataletsel ölçüm birimine (IMU) ve küresel konumlandırma sistemine (GPS) bağlıdır(Ceren ve Altuğ, 2012). Bir IMU'nun arızalanma olasılığı düşük olmakla birlikte ancak çevresel koşullar GPS'in çevrimdışı olmasına neden olabilir. Otonom bir uçuş veya otonom iniş görevleri söz konusu olduğunda görevin tamamlanması için GPS'in görevini yerine getirecek alt sistemlerin bulunması gereklidir. IMU ve GPS sistemlerin kullanılamaz olduğu şartlarda görsel servolama sistemleri görevin tamamlanmasını sağlamaktadır(Yüksel, 2018:1-11).

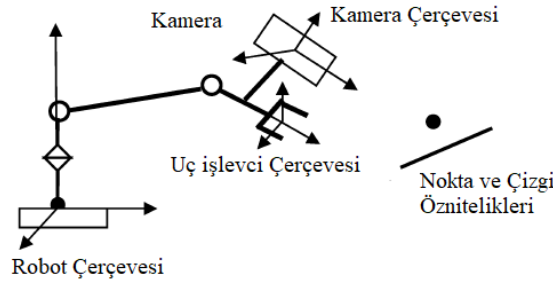
Görsel geribildirimlerden elde edilen anlamlı bilgileri kullanarak bir robotu kontrol etme tekniği görsel servolama olarak adlandırılır. Görsel servo kontrolünde, bir robotun hareketini kontrol etmek için bilgisayar görme verileri doğrudan bir robot manipülatörüne veya bir mobil robot üzerine monte edilmiş bir kameradan elde edilir. Bu durumda robotun hareketi kamera hareketini indükler. Görsel servolama da kamera yapılandırmasına göre iki farklı konfigürasyon vardır. Kamera, hedefi gözlemleyecek şekilde robota takılabilir (eye-in-hand) veya hem robotu hem de hedefi gözlemleyecek şekilde çalışma alanında bir noktaya sabitlenebilir(eye-to-hand). Tüm bu durumların matematiksel gelişimi benzerdir(Chaumette ve Hutchinson, 2006:82). Bu tez çalışmasında döner kanatlı insansız hava aracının üzerine monte edilmiş tek bir kameradan alınan görsel bilgiler kullanılmıştır. Görsel servolama da kamera görüntüsü, görüntü düzlemi form vektörlerinde k öznitelik noktalarını ve bu özniteliklerin koordinatlarını tanımlamak için kullanılır. Şekil 1.3'de eldeki göz(eye-in-hand) ve ele-göz(eye-to-hand) yapılandırmalarına ait görüntü görülmektedir.



Şekil 1.3. (a)Eldeki-göz(eye-in-hand) (b)Ele-göz(eye-to-hand)

Kaynak: (Chaumette ve Hutchinson, 2007)

Wang'ın yaptığı çalışmada kamera parametreleri kalibre edilmediğinde ve özniteliklerin 3 boyutlu koordinatları bilinmediğinde, bir robot manipülatörünün el-göz kamerası ile görüntü tabanlı görsel servo uygulaması için yeni bir yaklaşım sunulmaktadır. Hem nokta hem de çizgi öznitelikleri dikkate alınır. Aynı çalışmada, nokta öznitelikleri ve sabit kameralar kullanılarak görsel servo için daha önceki çalışmalarda geliştirilen derinlikten bağımsız etkileşim (ya da görüntü Jacobian) matrisi kavramını, el-göz kameraları ve nokta ve çizgi özniteliklerinin kullanıldığı probleme kadar genişletir. Derinlikten bağımsız etkileşim matrisini kullanarak, sistemin kapalı döngü dinamiklerini bilinmeyen kamera parametreleri ve özniteliklerin bilinmeyen koordinatları ile doğrusal olarak parametreleştirmenin mümkün olacağı belirtilmiştir. Şekil 1.4'te aynı çalışmada bir dizi görüntü özniteliğini izlemek için uç işlevci bir kameraların monte edildiği bir eldeki-göz(eye-in-hand) kurulumu görülmektedir. Görüntü özniteliklerinin sabit olduğu, ancak uzaydaki 3 boyutlu koordinatlarının bilinmediği varsayılmıştır(Wang vd., 2008).



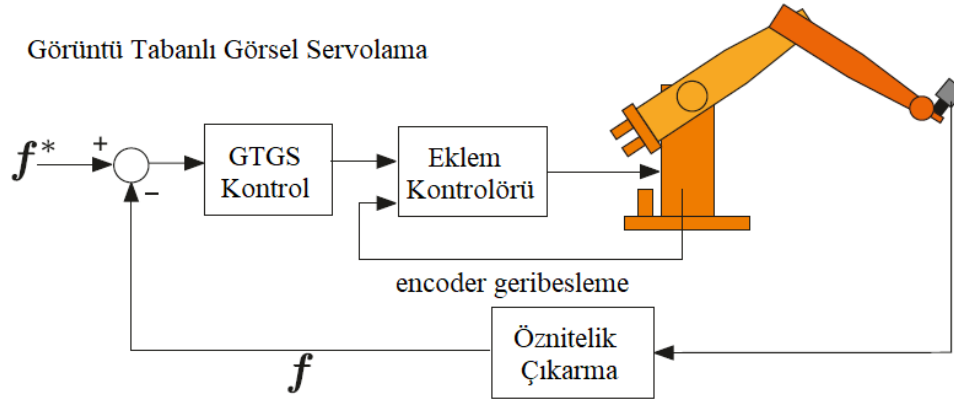
Şekil 1.4. Görsel Servolama İçin Eldeki-göz Kurulumu

Kaynak: (Wang vd., 2008)

Görsel Servolama kontrol teknikleri genel olarak aşağıdaki tiplerde sınıflandırılmaktadır: Görüntü tabanlı (GTGS), Konum / poz tabanlı (KTGS), Hibrit yaklaşım(Hutchinson vd., 1996:651-670; Chaumette vd., 2006:82-90). GTGS, Weiss ve Sanderson tarafından önerildi(Sanderson ve Weiss, 1983:107-116). Kontrol yasası, görüntü düzleminde mevcut ve istenen öznitelikler arasındaki hataya dayanır ve hedefin pozunun herhangi bir tahminini içermez. Öznitelikler, bölgelerin görsel özniteliklerinin, çizgilerinin veya momentlerinin koordinatları olabilir.

Görüntü Tabanlı Görsel Servolama; Şekil 1.5'de gösterildiği gibi poz tahmini adımı atlar ve görüntü özniteliklerini doğrudan kullanır. Kontrol, görüntü koordinat uzayı $\mathbb{R}^2$ de gerçekleştirilir. Hedefe göre istenen kamera pozu, hedef pozundaki görüntü özelliği değerleri ile örtük olarak tanımlanır. Görüntü öznitelikleri, kamera pozunun oldukça doğrusal olmayan

bir işlevi olduğundan, GTGS zorlu bir kontrol problemidir. Görüntü tabanlı görsel servolama çevrimi Şekil 1.5’de görülmektedir.

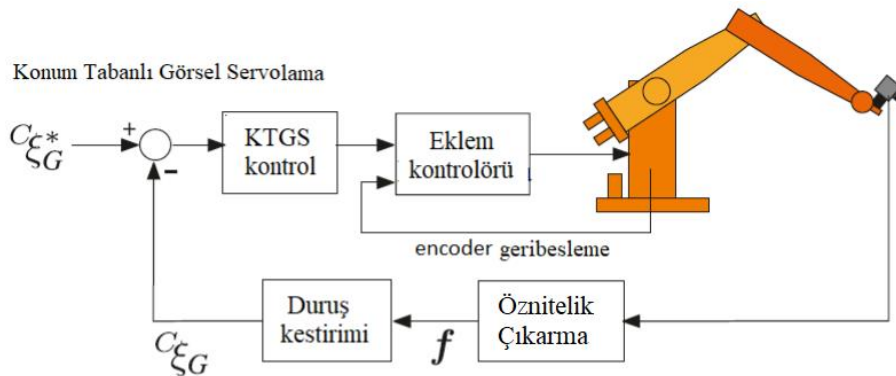


Şekil 1.5. Görüntü Tabanlı Görsel Servolama

Kaynak: (Corke, 2011:538)

Konum tabanlı görsel servolama, hedef nesnenin kameraya göre duruşunu belirlemek için hedef nesnenin gözlemlenen görsel özniteliklerini, bilinen bir geometrik modelini ve kalibre edilmiş bir kamerayı kullanır. Robot daha sonra bu duruşa doğru hareket eder ve kontrol genellikle SE(3) olan görev uzayında gerçekleştirilir. Duruş kestirimi için iyi algoritmalar mevcuttur, ancak hesaplama açısından pahalıdır ve kritik olarak kamera kalibrasyonunun doğruluğuna ve nesnenin geometrisinin modeline dayanır.

Konum tabanlı görsel servolama çevrimi Şekil 1.6’da görülmektedir. KTGS sisteminde, kamera ${}^{C}\xi_G$ ’ye göre hedefin pozu tahmin edilir. Hedef ${}^{C*}\xi_G$ ’ye göre istenen bağıl pozu belirlenir.



Şekil 1.6. Konum Tabanlı Görsel Servolama

Kaynak: (Corke, 2011:538)

Görüntü tabanlı görsel servolama (GTGS) görüntüden elde edilen s özniteliklerini doğrudan kinematik kontrolcü tasarımı için kullanırken konum tabanlı görsel servolama (KTGS) s özniteliklerini robotun duruş kestirimi için kullanmaktadır(Yüksel, 2020:766). GTGS, kamera geri çekilmesi olarak adlandırılan çok büyük rotasyon hareketlerinde zorluklar yaşar (Chaumette, 1998:66-78). KTGS, model tabanlı bir tekniktir (tek kamera ile). Bunun nedeni, ilgilenilen nesnenin pozunun kameraya göre tahmin edilmesidir ve daha sonra robot kontrolörüne bir komut gönderilir ve bu da robotu kontrol eder. Bu durumda görüntü öznitelikleri de çıkarılır, ancak ek olarak 3B bilgileri (Kartezyen uzayda nesnenin pozunu) tahmin etmek için kullanılır, bu nedenle 3B olarak yayınlanır. Hibrit yaklaşımlar, 2B ve 3B servo kombinasyonunu kullanır. Bahsedilen hata vektörü, görsel servolama kontrol yasası tarafından hızlar açısından uç işlevcinin kontrol sinyallerini elde etmek için kullanılır. Görüntü tabanlı görsel servo doğrudan görüntüden elde edilen öznitelikleri kullanır, ancak konum tabanlı görsel servo, görüntü ve robot pozunun 3B parametre tahminlerinden elde edilen öznitelikleri kullanır (Chaumette ve Hutchinson, 2006:82-90). Literatürde $2\frac{1}{2}$ ve bölünmüş kontrol gibi bazı hibrit yaklaşımlar bulunabilir(Corke ve Hutchinson, 2001:507-515; Malis vd., 2016:238-250).

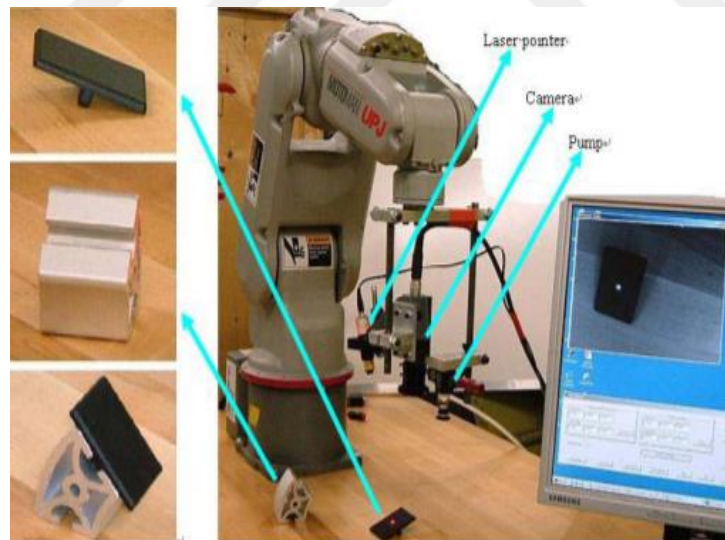
KTGS' nin aksine, GTGS herhangi bir poz tahminine ihtiyaç duymaz ve derinlik tahmin hatalarına karşı dayanıklıdır. Bu avantajlar GTGS' yi pratik uygulamalar için daha avantajlı hale getirir(Mohebbi, 2016:25-54). Ancak KTGS; GTGS' de görülen etkileşim matrisi kaynaklı tekilliklerden uzak olduğu için GTGS' ye üstünlük sağlamaktadır. Bu nedenle bu tez çalışmasında KTGS seçilmiştir.

Görsel servonun iki klasik yaklaşımı (görüntü tabanlı kontrol ve pozisyon tabanlı kontrol), kendi kontrol şemalarında kullanılan girdilerin doğası bakımından farklıdır (Chaumette, 1998:66-78). Sonuçta ortaya çıkan robot davranışları da farklı olsa bile, her iki yaklaşım da genellikle tatmin edici sonuçlar verir: istenen konuma yakınsamaya ulaşılır ve kontrol şemasında kullanılan kapalı döngü sayesinde, sistem kararlı ve sağlamdır. Kamera kalibrasyon hataları, robot kalibrasyon hataları ve görüntü ölçüm hataları gibi hata kaynakları olabilir.

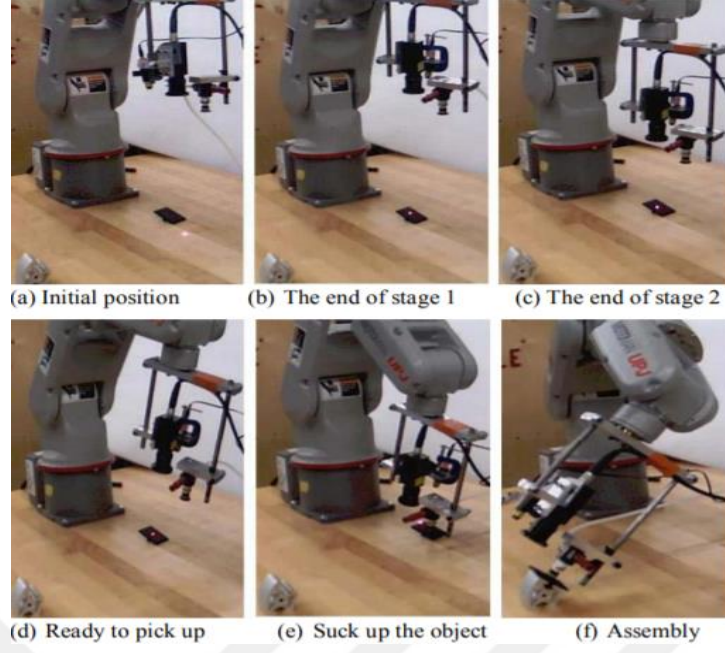
Görsel servolama tekniğinin daha çok endüstriyel robotlarda kullanıldığı düşünülse de görsel servolamanın birçok farklı kullanım amacı ve görevi vardır. Bu bölümün devamında görsel servolamanın birçok farklı sektördeki kullanımına örnek verilmiştir.

Baskılı devre kartları üzerindeki referans işaretlerine göre parça eklemek veya konveyör bantları üzerinde hareket eden organize olmayan parçaları kavramak gibi görevler için görsel servolama yöntemi kullanılır. Tipik olarak bu sistemler bir "bak" sonra "hareket ettir"

Bir robotik montaj sistemindeki sabit nesneye göre uç işlevci duruşunu(pose) kontrol etmek için lazer işaretçili Görüntü Tabanlı Görsel Servolama kullanarak kamera tarafından gözlemlenen görüntü özniteliklerini mümkün olan en hızlı şekilde alınması ve robotun görevini yapması (Li vd., 2007)'de amaçlanmıştır. Ayrıca bir lazer işaretçisi kullanarak önerilen anahtarlama algoritması ile görüntü tekillikleri ve görüntü yerel minimum problemi gibi geleneksel GTGS'nin dezavantajlarından kaçınmak için robot uç işlevcinin dönme ve öteleme hareket kontrolünü ayırır. Robotik montaj sistemine ait görüntüler Şekil 1.7 ve Şekil 1.8'de görülmektedir.



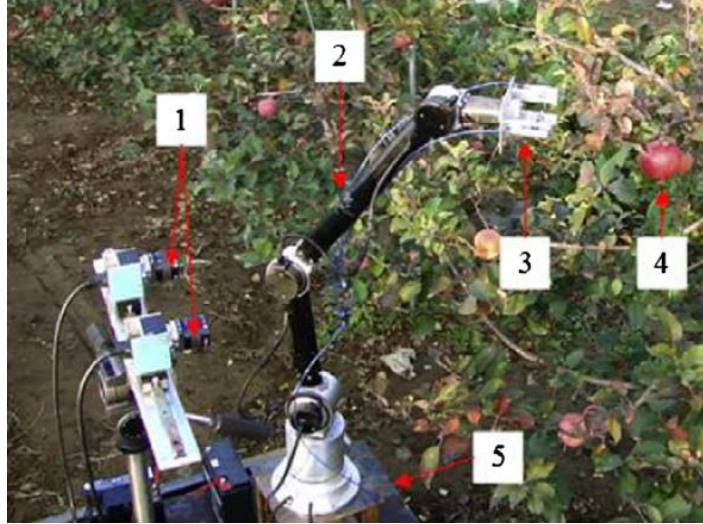
Kaynak: (Li vd., 2007)



Şekil 1.8. Montaj sırası

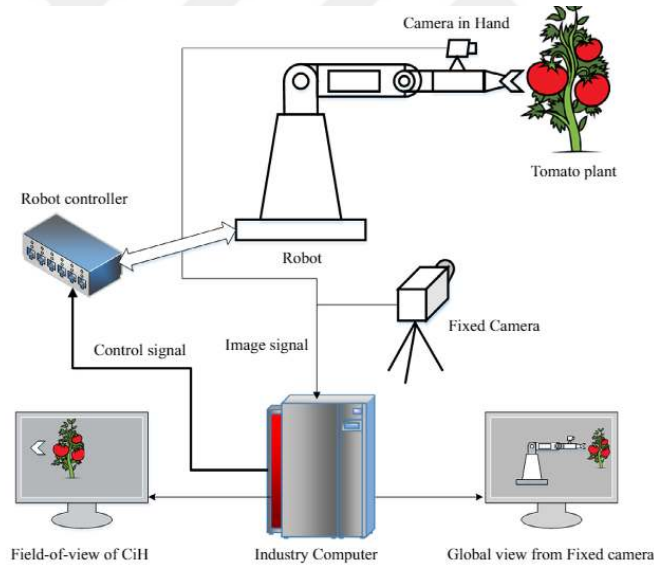
Kaynak: (Li vd., 2007)

Tarımsal robotik teknolojilerde hızlı bir gelişme olmasına rağmen, sağlam meyve tanıma ve hassas toplama yeteneklerine erişim eksikliği, hasat robotlarının ticari uygulamasını sınırlandırmış ve bu duruma çözüm aranmıştır. Görsel servolama tekniğindeki son gelişmeler bu durumu iyileştirmiştir. Görsel bilgi edinme stratejilerini içeren bu teknikler, meyve tanıma algoritmalarını ve el-göz koordinasyon yöntemlerini içerir. Bir meyve veya sebze hasat robotunda, ağaç üzerindeki nesneleri tespit etmede ve görsel bilgileri kullanarak nesneleri toplamadaki sorunları çözmek için görsel servolama kullanılır. Hasat robotları için görsel servolama, hasat robotlarının manipüle edilen nesneleri, çevresel ve genetik farklılıkların bir sonucu olarak meyve büyüklüğü, şekli, rengi, dokusu ve sertliği bakımından yüksek çeşitlilik gösteren doğal nesneleri ayırt etmek, çalışma alanı karmaşık sistemlerde kullanım ve hedef meyvelerin rastgele konumunu bulmaktır(Zhao vd., 2016:312). Bunlar gibi birçok nedenle, tarımda görsel servolama tercih edilir. Dürbün stereoskoplu meyve toplama robotu ve hasat robotu için bir ortak görme sisteminin şematik diyagramı Şekil 1.9 ve Şekil 1.10’da görülmektedir.



Şekil 1.9. Dürbün Stereoskoplu Meyve Toplama Robotu

Kaynak: (Yongsheng vd., 2015:69)



Şekil 1.10. Hasat Robotu İçin Bir Ortak Görme Sisteminin Şematik Diyagramı

Kaynak: (Zhao vd., 2016:312)

Görsel servolama tekniğinin bir diğer uygulama alanı tıp ve cerrahi uygulamalardır. (Krupa vd., 2002)'de yapılan çalışmada robotize laparoskopik cerrahinin devamında görsel servolama ile bilinmeyen bir organ yüzeyine kapatılmış bir cerrahi aletin hareketini kontrol etme sorunu ele alınmıştır. Bu sorunu gidermek için, görüntüdeki öznitelik hatalarını ve derinlik ölçümlerinde emrs'yi birleştiren görsel bir servolama algoritması geliştirilmiştir. Cerrahi aletin hız vidası, derinlik ve hareket alanı arasındaki ilişki tanımlanmış ve iki aşamalı bir servolama

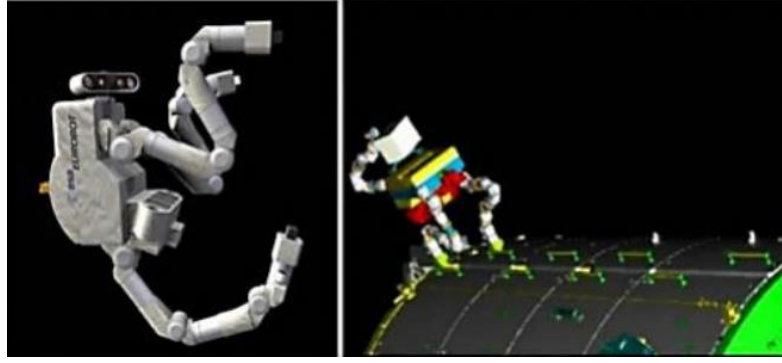
şeması önerilmiştir. Enstrümanın organa göre oryantasyonunu ve derinliğini ölçmek için, organ yüzeyine bir lazer nokta deseni yansıtılmış ve enstrümana optik işaretleyiciler yapıştırılmıştır. Cerrahi aleti yerleştirmek için, lazer noktalarının piksel koordinatlarını ve organ ile alet arasındaki tahmini mesafeyi birleştiren görsel bir servolama algoritması önerilmiştir(Krupa vd., 2002). Laparoskop tutucu AESOP robotu için model-free görsel servolamaya ait görüntü Şekil 1.11’de görülmektedir.



Şekil 1.11. Laparoskop Tutucu AESOP Robotu İçin Model-free Görsel Servolama

Kaynak: (Bourger vd., 2007)

Görsel servolama tekniğinin bir diğer uygulama alanı uzay teknolojisidir. Uzay teknolojisinde önemli bir uygulama, yakıt ikmali ve uydulara servis sağlanmasıdır. Bu tür uygulamalar için serbest yüzen bir nesne olan istemci uydusunu otonom olarak yakalayabilen bir sistem gerekir. Yörünge üzerinde bir hizmet sağlamanın ilk adımı, bir hedef uyduya yaklaşmak ve yanaşmaktır. Manipülâtör yakalama ve yanaşma, birçok uzay mekiği görevinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzay robotunun geleneksel kontrolü, teleoperasyon teknolojisi ile gerçekleştirilir. Teleoperasyon sistemlerindeki kaçınılmaz zaman gecikmesini önlemek için manipülâtör kontrolü görsel servolama ile sağlanır(Ye vd., 2012). Yörüngede kullanılan uzay robotik sistemine ait bir görüntü Şekil 1.12’de görülmektedir.



Şekil 1.12. Yörüngede Kullanılan Uzay Robotik Sistemi

Kaynak: (Habiymbere, 2018:19)

Bu tezde döner kanatlı insansız hava araçları için özniteliklere bağlı duruş kestirimine ihtiyaç duyan, bunun yanı sıra etkileşim matrisi kaynaklı tekilliklerden uzak duran KTGS sistemine odaklanılmıştır. Bu çalışma da klasik KTGS’ den farklı olarak görüş alanı koruyucu kullanılması hedeflenmiştir. Görüş alanı koruyucu ile planlanan yörüngenin döner kanatlı insansız hava aracının üzerine monte edilmiş kameranın öznitelikleri görecektir şekilde bölgede kalıp kalmadığı kontrol edilerek herhangi bir önleme çalışması yapılmasa da kontrol işleminin bu çalışmaya katkı sağlaması amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında KTGS’nin duruş kestirimi için klasik yaklaşımların aksine yapay sinir ağı kullanılması hedeflenmiştir.

Bu tezin içeriğine bakıldığında Bölüm 1’de insansız hava araçlarına, tarihçesine ve kullanım alanlarına ve görsel servolamanın genel bir tanımından başlayarak görsel servolama adımlarına, görsel servolama stratejisine ve kullanım alanlarına, kamera kalibrasyonuna genel bir giriş yapılmıştır. Daha sonra Bölüm 1.1’de literatürde insansız hava araçlarının kontrolü için kullanılan görsel servolama metotlarına, görsel servolama da kullanılan duruş kestirimci yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Bölüm 2’de tezin içeriğinde olan konuların teorik temelleri anlatılmıştır. Bunlar insansız hava araçlarının çalışma prensibi, görsel servolama temelleri, görüntü tabanlı ve konum tabanlı ve hibrit görsel servolama, yapay sinir ağları ve duruş kestirimidir.

Bölüm 3’de döner kanatlı insansız hava araçları için önerilen konum tabanlı görsel servolama sistemi, Coppelia simülasyon ortamı, Coppelia-Matlab haberleşmesi, öznitelik çıkarımı, veri setinin oluşturulması, yapay sinir ağı(YSA) ve Neural Network Toolbox, ve yörünge planlama ve görüş alanı koruyucu, YSA duruş kestirimci girişlerine rastgele gürültü eklenmesi anlatılmıştır.

Bölüm 4’de sonuçlar ve gelecek çalışmalar anlatılmıştır.

1.1.Literatür Özeti

Görsel servolama kullanarak döner kanatlı insansız hava aracı navigasyonu ile ilgili ilk çalışma (Hamel ve Mahony, 2002) 'de yapılmıştır. Hamel ve Mahony, çalışmalarında, bir helikopteri, çekilmemiş katı bir gövde olarak ele almışlar ve nokta özniteliklerine sahip küresel görüntü alanını kullanmışlardır. Görüntü dinamiğini katı bir cismin dinamik hareket denklemlerinin bir parçası olarak görmüşlerdir. (Mahony ve Hamel, 2005) 'de lineer öznitelikler kullanan döner kanatlı insansız hava araçları için çalışmayı genişletmişlerdir. Döner kanatlı insansız hava aracının tork sinyallerindeki gürültü dikkate alınmış, ancak öznitelik gürültüsünü ihmal etmişlerdir. Burada, görsel servolama için küresel kamera projeksiyonunun kullanılması çok yaygın olmasına rağmen, küresel görüntüleme ile döner kanatlı insansız hava araçıda görsel servolama kontrolü üzerindeki (Hamel ve Mahony, 2007) ve (Odile vd., 2007) 'nin çalışmalarının, kartezyen alan da küresel kamera ve görüntülerle ortaya çıkarmışlardır. (Altuğ vd., 2005) iki kamera duruş kestirimi ve geri adım atma kontrolü kullanan çıkış izleme kontrol yöntemine(output tracking control method) sahip KTGS tabanlı bir stabilizasyon sistemi önermiştir. (Ceren ve Altuğ, 2012) ayrıca klasik küresel görüntü projeksiyonundan ve özel küresel görüntü projeksiyonundan elde edilen hibrit öznitelik vektörlerini kullanan bir görsel servolama sistemi önermiştir.

(Metni vd., 2007), geri adım atma yöntemlerinden elde edilen homografi matrisini kullanan bir görsel izleme kontrol yasası, görsel veriler ve bir insansız hava aracı için izleme ve derinlik tahminine izin veren uyarlanabilir doğrusal olmayan izleme kontrol yasası önermiştir. Çalışmada helikopterin kontrol sinyalleri ve hızları verilmemiş, ancak görüntü gürültüsü dikkate alınmıştır. (Cunha vd., 2011) sert bir gövdeye monte edilmiş tek bir kameradan oluşan istenen bir denge noktasına stabilize etmeye odaklanmıştır. Mevcut ve istenen sabit görüntü koordinatlarını kullanarak rijit gövde dinamikleri olmayan homografi tabanlı görsel servolama geri besleme kontrolörü önermişlerdir. (De Plinval, 2014), hedefin kamera ölçümlerinden hesaplanan homografi matrisini kullanarak ön hedef görsel verilere ve jiros metre ölçümlerine dayanan türetilmiş stabilize edici geri bildirim yasalarını önermiştir. Başka bir araştırmada, (De Plinval ve Burlion, 2011), hedefi uçuş sırasında İHA'nın görüşünde kalmaya zorlamak için bir girdi doygunluğu tekniği kullanarak çalışmayı genişletmiştir. (Asl vd., 2014), belirsizliklerin varlığında güçlü performansı garanti eden bir döner kanatlı insansız hava aracının 3B translasyon ve yalpalama rotasyonel hareketlerini kontrol etmek için dinamik bir GTGS şeması önermiştir. Bu görsel servolama yaklaşımlarının tümü görsel olarak yönlendirilen insansız hava aracı stabilizasyonu, gezinme veya otomatik inişe odaklanmıştır.

Görsel servolama bakış açısından, bu yaklaşımların her biri farklı sonlandırma hedeflerine sahip bir görsel servolama uygulaması olarak düşünülebilir.

Literatür incelemesi İHA'lar için görsel servolama üzerinde yapılan çalışmaların çoğunun perspektif veya küresel görüntü projeksiyonu ile nokta özniteliklerini dikkate aldığını ve bu çalışmaların bazılarının kötü kamera kalibrasyonu, öznitelik gürültüsü veya hareketli hedefleri takip etmek gibi iç bozuklukları marjinal olarak değerlendirdiğini göstermektedir(Yüksel, 2018).

Literatürde genellikle konum tabanlı görsel servolama yöntemindeki duruş kestirimi için Kalman Filtresi kullanılmıştır. Kalman filtresi; durum uzayı modeli ile gösterilen bir dinamik sistemde, modelin önceki bilgileriyle birlikte giriş ve çıkış bilgilerinden sistemin durumlarını tahmin edilebilen filtredir. (Welch ve Bishop, 2004)'de standart bir Kalman Filtresinin (doğrusal denklemlerle) ayarlanması açıklanmaktadır. (Shademan ve Janabi-Sharif, 2005)'de sağlam bir yüksek hızlı konum tabanlı görsel servolama sistemi için Yinelene Genişletilmiş Kalman Filtresi (YGKF) uygulaması incelenmiştir. Elde ettikleri deneysel sonuçlar, YGKF 'nin bant genişliğinden ödün vermeden standart Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF)'den daha iyi performans gösterdiğini ve konum tabanlı görsel servolama sisteminin belirsizliklere karşı sağlamlığını geliştirmek için kullanıldığını göstermektedir. GKF, konum tabanlı görsel servolama yapısında kullanılmak üzere nispeten uygun bir performansa sahipken, performansın filtre parametreleri seçimi ve harici belirsizliklerle sınırlandığı göstermektedir. YGKF' i kullanılarak daha yüksek hızlar için daha iyi bir performansa ulaşılabileceği gösterilmiştir. Konum tabanlı görsel servolamada ki gerçek zamanlı poz tahminindeki tıkanıklık, öznitelik çıkarma modülü hızı olduğu için, YGKF'ye eklenen hesaplama maliyetini önemsiz kıldığını göstermiştir.

Santos yaptığı çalışma da sabit kanatlı bir insansız hava aracının kamera referans çerçevesiyle ilgili pozunu (3B konum ve yönlendirme) tahmin etmek için monoküler bir RGB görüntü sistemi sunmaktadır. Bu tahmini kullanarak, bir Yer Kontrol İstasyonu (GCS), bir Hızlı Devriye Botuna (FPB) iniş sırasında İHA yörüngesini kontrol edebilir. Yer tabanlı bir görüş sistemi, daha fazla işlem gücüne sahip olduğu için daha karmaşık algoritmaların kullanılmasını mümkün kılacağı belirtilmiştir. Önerilen yöntem, beş aşamaya bölünmüş bir Parçacık Filtresine (PF) dayalı 3B model tabanlı bir yaklaşım kullanır: çerçeve yakalama, hedef algılama, bozulma düzeltme, görünüm tabanlı poz örnekleyici ve duruş kestirimi. Çerçeve yakalama aşamasında yeni bir gözlem (yeni bir çerçeve) elde edilmiş, hedef tespit aşamasında, Derin Sinir Ağı (DNN) tabanlı bir dedektör kullanılarak yakalanan çerçeve üzerindeki İHA

bölgesi tespit edilmiş, bozulma düzeltme aşamasında, daha iyi bir tahmin elde etmek için çerçeve radyal ve teğetsel bozulmaları düzeltilmiş, görünüm tabanlı poz örnekleyici aşamasında, kaba bir poz başlatma için sentetik olarak oluşturulmuş önceden eğitilmiş bir veritabanı kullanılmış ve duruş kestirimi aşamasında, yakalanan çerçevede düşük hata ile İHA duruş kestirimi elde edebilmek için bir optimizasyon algoritması uygulanarak paralel işleme için Grafik İşlem Birimi (GPU) kullanılarak genel sistem performansı artırılmıştır. Sonuçlar, GPU hesaplama kaynaklarının gerçek zamanlı bir duruş kestirimi sistemi elde etmek için gerekli olduğunu göstermiştir(Santos vd., 2019).

Xu ve Huang çalışmalarında insansız hava araçlarının otonom uçuşunda, konum bilgilerinin gerçek zamanlı olarak alınmasının, navigasyon ve kontrol için temelini oluşturduğu belirtilmiştir. İnsansız hava araçlarının duruş kestirimi için önceki bilgilere dayalı bir RANSAC algoritması önerilmiş ve bu yöntem, görüntüler arasında öznitelik noktalarının çıkarılmasını ve eşleştirilmesini sağlamak için gerçek uçuşta aynı hedef alanın farklı açılarında insansız hava aracı tarafından elde edilen dizi görüntülerini işlemek için ilk olarak SURF algoritması kullanılmıştır. GPS ve IMU sistemleri tarafından sağlanan poz bilgisi yardımıyla, beş noktalı algoritma ile birleştirilen RANSAC algoritması, İHA'nın her an karşılık gelen poz bilgilerini elde etmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada yaptıkları deneylerin, bu yöntemin, insansız hava araçlarının duruş kestirimini gerçekleştirmek için görsel bilgi veya GPS ve IMU sistemini kullanmaktan daha doğru olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda gerçek projelerin ihtiyaçlarını izin verilen hata aralığında karşılayabileceği ve duruş kestirim teorisini zenginleştirebileceğini de belirtmişlerdir(Xu ve Huang, 2018).

Bu tez çalışmasında döner kanatlı İHA için konum tabanlı görsel servolama da duruş kestirimi için Yapay sinir ağı kullanılmıştır.

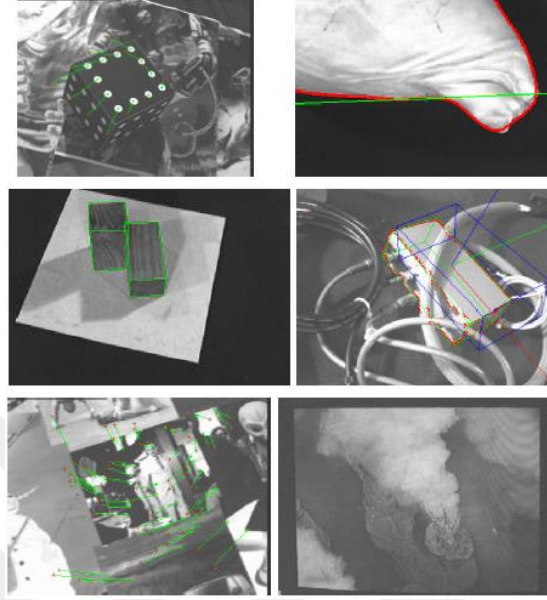
Konum tabanlı görsel servolama sisteminde girdi, üç boyutlu (3B) Kartezyen uzayında hesaplanır (bu nedenle bu yaklaşıma 3B görsel servolama denilebilir). Hedefin kameraya göre pozunu, görüntüdeki hedefin perspektif izdüşümüne karşılık gelen görüntü özniteliklerinden tahmin edilir. Bir nesnenin pozunu kurtarmak için çok sayıda yöntem mevcuttur(DeMenthon ve Davis, 1995). Hepsi nesnenin mükemmel bir geometrik modeli bilgisine dayanır ve tarafsız sonuçlar elde etmek için kalibre edilmiş bir kamera gerektirir. Kalibrasyon hatalarının varlığında sistemin yakınsamasını mümkün kılan bir kapalı çevrim kontrol kullanılsa bile, sistemin kararlılığını analiz etmek imkansız görünmektedir. Öte yandan, görüntü tabanlı bir kontrol sisteminde girdi 2 boyutlu görüntü uzayında hesaplanır (bu nedenle bu yaklaşıma 2 boyutlu görsel servolama denilebilir)(Espiau vd., 1992). Genel olarak, görüntü tabanlı görsel

servolamanın sadece kamera açısından değil, aynı zamanda robot kalibrasyon hataları açısından da sağlam olduğu bilinmektedir(Espiau, 1993). Ancak yakınsaması teorik olarak sadece istenilen konum civarında (analitik olarak belirlenmesi oldukça zor) bir bölgede sağlanır. Çok basit durumlar dışında, sistem bağlı(coupled) ve lineer olmadığı için kalibrasyon hatalarına göre stabilite analizi imkansız görünmektedir.

Malis çalışmasında 2B ve 3B görsel servolamanın avantajlarını birleştiren ve ilgili dezavantajlarını ortadan kaldıran yeni bir yaklaşım kullanarak analitik sonuçlar elde etmenin mümkün olduğunu söylemişlerdir. Kullanılan girdi kısmen 3B Kartezyen uzayda ve kısmen 2B görüntü uzayında ifade edildiğinden, bu yeni yaklaşıma 2-1/2-B görsel servolama adı verilir. Daha doğrusu, bir nesnenin mevcut ve istenen görünümüleri arasındaki kamera yer değiştirmesinin (kameranın dönüşü ve ölçeklendirilmiş çevirisi) tahminine dayanır(Malis vd., 1999). Hibrit görsel servolama konum tabanlı görsel servolamanın aksine, nesnenin herhangi bir geometrik üç boyutlu (3B) modeline ihtiyaç duymaz ve görüntü tabanlı görsel servolamanın aksine tüm görev alanında kontrol yasasının yakınsamasını sağlar(Malis vd., 1999). Böylece konum tabanlı görsel servolama ve görüntü tabanlı görsel servolama sistemlerine ait dezavantajları ortadan kaldıran bir sistem elde edilmiş olur.

Görsel servolama stratejisinde görüntü öznitelikleri nokta öznitelikleri, çizgi öznitelikleri ve görüntü moment öznitelikleri olarak temelde üç ana sınıfa ayrılır. Görsel özniteliklerin doğru bir çıkarımı ve gerçek zamanlı uzamsal-zamansal izleme süreci, gerçekten de görsel servolama görevinin başarısının veya başarısızlığının anahtarlarından biridir. Marchand ve Chaumette yaptıkları çalışmalarında görsel servolama denemeleri için geliştirilmiş birkaç izleme algoritmasına genel bir bakış sunulmuştur. Mevcut izleme tekniklerinin çoğu iki ana sınıfa ayrılabilir: özellik tabanlı ve model tabanlı izleme. İlk yaklaşım, geometrik ilkeler (noktalar, parçalar, daireler, . . .) veya nesne konturları, ilgi bölgeler gibi 2B özniteliklerin izlenmesine odaklanır. İkincisi, izlenen nesnelerin bir modelini açıkça kullanır. Bu ikinci sınıf yöntemler genellikle daha sağlam bir çözüm sağlar. Bir CAD modeli mevcutsa, izleme, poz hesaplama problemi ile yakından ilişkilidir ve bu durumda herhangi bir görsel servolama yaklaşımı için uygundur. Modele dayalı yöntemlerin temel avantajı, çalışma alanı hakkındaki bilginin, nesnenin gizli hareketini tahmin edebilmek suretiyle sağlamlık ve performansın iyileştirilmesine izin vermesi ve izleme sürecinde tanıtılan aykırı verilerin etkilerini azaltmak için hareket eder. Başka bir yaklaşım, çalışma alanı çok karmaşık olduğunda da düşünülebilir. Diğer iki durumda olduğu gibi öznitelik çıkarma ve izlemeye değil, görüntü dizisindeki hareketin analizine dayanır(Marchand ve Chaumette, 2009).

2B hareket hesaplaması, görsel bir servolama işleminde kullanılabilecek hem kamera hareketi hem de çalışma alanının yapısı ile ilgili ilginç bilgiler sağlar. Şekil 1.13 'de, öznel artan zorluklara göre sıralanan görsel servolama deneylerinde sonuçları takip eden bazı öznitelikler gösterilmektedir.



Şekil 1.13. Görsel Servolama Deneylerinde Öznitelik İzleme

Kaynak: (Marchand ve Chaumette, 2009)

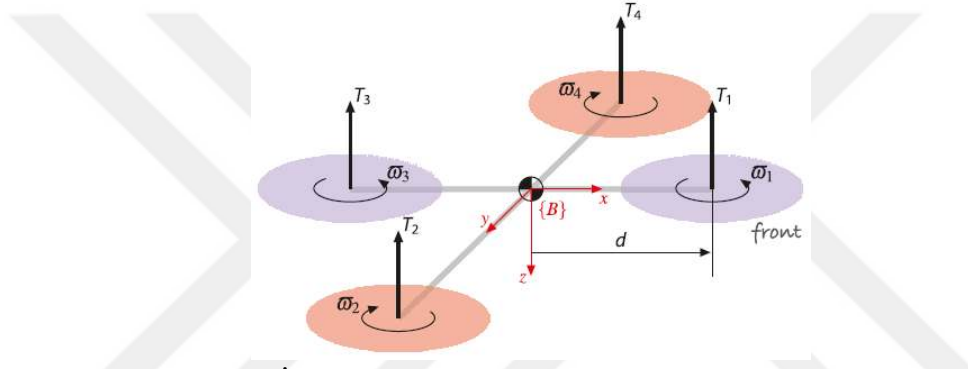
Bu yaklaşımda, izlenen nesneler noktalar, açılar, konturlar, düz çizgiler veya parçalar, elipsler vb. gibi basit geometrik öznitelikler kullanılarak tanımlanır. Bu yaklaşım, görsel servo oluşturma bağlamında en yaygın olanıdır, çünkü genellikle 2B ölçümler ile görsel servo oluşturma kontrol yasasında kullanılan görsel öznitelikler arasında doğrudan bir ilişki vardır. Hager ve Toyama'nın yaptığı çalışma böyle bir sisteme iyi bir örnektir(Hager ve Toyama, 1998). Basit öznitelikler (çizgiler, konturlar vb.) gerçek zamanlı olarak (yani video hızında) izlenir; bu amaca ulaşmak için, konturun normali boyunca basit bir arama kullanılarak bazı kenar noktaları çerçeveler üzerinde eşleştirilir. Daha karmaşık nesnelerin izlenmesi, birden fazla temel öznitelik bir araya getirildiğinde ve bir dizi kısıtlamayla birbirine bağlandığında da mümkündür. Marchand'ın yaptığı çalışmada benzer özelliklere sahiptir(Marchand, 1999). Temel geometrik özniteliklerin (segmentler, elipsler, eğriler,...) takibi düşünülür ve hareketli kenarlar algoritmasına dayanır (Bouthemy, 1989). Bu sınıf yaklaşımların ana avantajları, çok basit olmaları ve dolayısıyla çok hızlı olmalarıdır. Öte yandan, bir dizi basit 2B öznitelik ile modellenemeyen karmaşık özniteliklerin izlenmesine izin vermezler. Ayrıca, sonuçların kalitesi (hassasiyet ve sağlamlık) her zaman garanti edilemez ve çalışma alanına bağlıdır.

2.MATERYAL

Bu bölümde tezin içeriğinde olan konuların teorik temelleri anlatılmıştır. Bu konular şunlardır; insansız hava araçlarının çalışma prensibi, görsel servolama temelleri, yapay sinir ağı ve duruş kestirimidir.

2.1.İnsansız Hava Araçlarının Çalışma Prensibi

Büyük bir ana rotor ve kuyruk rotoru ile geleneksel helikopterler ile karşılaştırıldığında döner kanatlı insansız hava aracının uçuşu daha kolaydır. Karmaşık eğik plakaya (swash plate) sahip değildir böylelikle modellenmesi ve kontrolü daha kolaydır. Şekil 2.1’ de döner kanatlı insansız hava aracının dört rotoru, itme vektörleri ve dönme yönleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Dört Rotorlu, İtme Vektörlerini ve Dönme Yönlerini Gösteren Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracı Gösterimi

Kaynak: (Corke, 2011)

Döner kanatlı insansız hava aracının yaw(sapma/yalpalama) hareketi, pervanelerin her biri arasındaki karşı torktan elde edilir. Her rotor eşit bir açısal hızda dönerken, net sapma sıfırdır, ancak iki çift arasındaki hız farkı pozitif veya negatif bir sapma yaratır. Pitch(yunuslama) açısıyla ilişkili ileri veya geri hareket, arka rotor itme kuvveti artırılarak ve ön rotor itme kuvveti azaltılarak elde edilebilir. Son olarak, sol rotor itme kuvveti artırılarak ve sağ rotor itme kuvveti azaltılarak roll(yuvarlanma) açısı ile ilgili bir hareket elde edilebilir(Coban vd., 2019). Şekil 2.1’ de döner kanatlı insansız hava aracının **yunuslama hareketi** 1. ve 3. rotorlar saat yönünde dönerken, 2. ve 4. rotorların saat yönündeki dönüşlerinde oluşan hız farkından oluşur. Döner kanatlı insansız hava aracının **yalpalama hareketi** 2. ve 4. rotorlar saat yönünün tersine dönerken, 1. ve 3. rotorların saat yönünde dönüşlerindeki hız farkından oluşur. Döner kanatlı insansız hava aracının **sapma hareketi** 2. ve 4. rotorların saat yönünün tersine dönerken, 1. ve 3. rotorların saat yönünde dönüşlerindeki hızlarının artışı ya da azalışından oluşur.

Döner kanatlı insansız hava aracı, iki koordinat sistemine sahiptir; dünya sabit çerçevesi (E) ve Şekil 2.1 de görülen gövde çerçevesi {B} aynı zamanda aracın kütle merkezidir. Rotorlardan 1 ve 3 saat yönünün tersine dönerken (yukarıdan bakıldığında), 2 ile 4 ise saat yönünde döner. Ağırlık merkezinin koordinat çerçevesi {B} havacılık kuralını takiben z eksenini aşağı doğru taşır. Bazı döner kanatlı insansız hava araçlarının fiziksel özellikleri, E çerçevesinde (roll, pitch ve yaw açıları, açısal hızlar) ölçülürken, bazı özellikleri B çerçevesinde (doğrusal ivmeler) ölçülür. Döner kanatlı insansız hava aracının her bir çapraz kolun ucuna monte edilmiş 1 ile 4 etiketli dört adet rotoru vardır. Ekstra eklenecek rotorlar ekstra yük taşıma kapasitesi sağlar. Bu rotorlar elektronik hız kontrolleri tarafından desteklenen elektrik motorları tarafından tahrik edilir. Bazı düşük maliyetli döner kanatlı insansız hava araçları, yeterli tork elde etmek için küçük motorlar ve redüktörler kullanır(Corke, 2011).

Döner kanatlı insansız hava aracının matematiksel modelinin elde edilmesinde aracın üç boyutlu ortamda hareket halindeki katı bir cisim olduğu düşünülür ve aracın gövdesine uygulanan tork ve kuvvetler buna göre bulunur. Matematiksel modelin elde edilmesinde dinamik ve kinematik modeller kullanılır ve sistem davranışının zamanla değişimini açıklar. E ve B çerçeveleri arasındaki dönme matrisi R, sırasıyla x, y ve z eksenini etrafında yuvarlanma, eğim ve sapma (Euler açısı) açıları ile elde edilir(Oktay ve Köse, 2019).

Döner kanatlı insansız hava aracının kinematik modeli için, ilk olarak kullanılacak koordinat noktaları tanımlanır. Koordinatlar E_x , E_y , E_z eksenleri yer koordinat referansı, B_x , B_y , B_z eksenleri gövde koordinat referansı olarak belirlenmiştir. Bu iki eksen arasındaki mesafe $r = [x \ y \ z]^T$ ile tanımlanır. Euler dönüşümü ile elde edilen R dönüşüm matrisi ile döner kanatlı insansız hava aracının yer eksenine göre yönelimi verilir. Döner kanatlı insansız hava aracının yönelimi B_x (yuvarlanma), B_y (yunuslama), B_z (yönelme) eksenleri kullanılarak açıklanır(Bozkurt vd., 2020).

Dünya sabit çerçeve ve gövde sabit çerçeve arasındaki dönme matrisi R, sırasıyla x, y ve z eksenlerinde ki (yuvarlanma, eğim ve sapma (Euler açısı)) dönüşüm matrislerinden elde edilir.

$$R_i^b = R(\Phi, x) * R(\theta, y) * R(\Psi, z) \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’ deki ϕ : yuvarlanma açısı, θ : yunuslama açısı, ψ : yönelme açısını ifade etmektedir.

$$R_i^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Psi & -\sin\Psi & 0 \\ \sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R = (R_i^b)^T = R_b^i \quad (2.3)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\Psi\cos\theta & \cos\Psi\sin\theta\sin\Phi - \sin\Psi\cos\Phi & \cos\Psi\sin\theta\cos\Phi - \sin\Psi\sin\Phi \\ \sin\Psi\cos\theta & \sin\Psi\sin\theta\sin\Phi - \cos\Psi\cos\Phi & \sin\Psi\sin\theta\cos\Phi - \sin\Phi\cos\Psi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\Phi & \cos\theta\cos\Phi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

T , açısal dönüşümler için bir dönüşüm matrisidir;

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\Phi)\tan(\theta) & \cos(\Phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\Phi) & -\sin(\Phi) \\ 0 & \frac{\sin(\Phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\Phi)}{\cos(\theta)} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Döner kanatlı insansız hava aracının dinamik modeli Newton -Euler yaklaşımından elde edilmiştir. B_x, B_y, B_z eksenlerinden dönme hareket denklemleri türetilir ve bu eksen takımına Denklem 2.6' da verilen moment ifadesi etki eder.

$$M_B = J\dot{\omega} + \omega \times J\omega + \omega \times [0 \ 0 \ J_r\Omega_r]^T \quad (2.6)$$

$M_B ; B_x, B_y, B_z$ etkileyen moment, J ; döner kanatlı insansız hava aracının diyagonal atalet matrisi, ω ; döner kanatlı insansız hava aracının açısal hız vektörü, $\dot{\omega}$; döner kanatlı insansız hava aracının açısal ivme vektörü, J_r ; rotor ataleti, Ω_r ; döner kanatlı insansız hava aracının z eksenindeki dönüsel dengesizliğidir. Denklem 2.17'de verilen döner kanatlı insansız hava aracının momenti, rotorların ürettiği moment ve aerodinamik kuvvetler olarak iki fiziksel etkiyle belirlenir. Rotorların ürettiği kuvvet ve moment denklemleri Denklem 2.7'de verilmiştir.

$$F_i = b\Omega_i^2 ; M_i = bl\Omega_i^2 \quad (2.7)$$

F_i ; i'nci rotorun itki kuvveti, M_i ; i'nci rotorun momenti, b ; aerodinamik kuvvet sabiti, Ω_i ; i'nci rotorun açısal hızı, l ; döner kanatlı insansız hava aracının merkezi ile rotor arasındaki uzaklıktır.

Rotorların ürettiği moment ve kuvvetlerin etkisi döner kanatlı insansız hava aracının üzerinde incelendiğinde x , y , z eksenleri üzerindeki momentler Denklem 2.8’de verilmiştir.

$$M_B = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lb(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\ lb(\Omega_1^2 - \Omega_2^2) \\ d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

M_x ; x eksenindeki moment, M_y ; y eksenindeki moment, M_z ; z eksenine eksenindeki moment, d ; dönüsel dengesizlik moment sabitidir. Newton’un ikinci yasasına göre sabit eksen takımına dayanarak dönüşüm hareket denklemi Denklem 2.9’da elde edilir.

$$m\ddot{r} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} + RF_B \quad (2.9)$$

F_B ; yerçekiminden bağımsız döner kanatlı insansız hava aracı rotorlarının toplam itki kuvveti, m ; döner kanatlı insansız hava aracının kütlesi, r ; Newton’un ikinci yasasındaki ivme, R ; dönüşüm matrisidir. Toplam itki kuvveti Denklem 2.10’de verilmiştir.

$$F_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Döner kanatlı insansız hava aracının x , y , z eksenlerinde oluşan itki kuvvetindeki değişimleri denetim giriş vektörü (T) ile ifade edilir. Döner kanatlı insansız hava aracının askıda kalma, yükselme, alçalma için gereken itki kuvvetini T_z denetim girişi, T_ϕ ; x eksenini için, T_θ ; y eksenini için, T_ψ ; z eksenini için denetim girişleri olmak üzere aşağıdaki denklemlerde verilmektedir.

$$T = [T_z \ T_\phi \ T_\theta \ T_\psi] \quad (2.11)$$

$$T_z = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (2.12)$$

$$T_\phi = b(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \quad (2.13)$$

$$T_\theta = b(\Omega_1^2 - \Omega_3^2) \quad (2.14)$$

$$T_\psi = d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (2.15)$$

Döner kanatlı insansız hava aracının dönme hareketine ait denklemleri; döner kanatlı insansız hava aracının açı değişimlerinden sorumlu Denklem 2.13, Denklem 2.14 ve Denklem 2.15'deki momentler matris formunda Denklem 2.16'da verilmiştir.

$$M_B = \begin{bmatrix} lT_\phi \\ lT_\theta \\ T_\psi \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Denklem 2.16, Denklem 2.6' da yerine konur ve genişletilerek tekrar yazılırsa döner kanatlı insansız hava aracının açısal ivmeleri Denklem 2.17' de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \ddot{\Phi} &= \dot{\psi} \dot{\theta} \left(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \right) - \frac{J_r}{I_{xx}} \dot{\theta} \Omega_r + \frac{l}{I_{xx}} T_\phi \\ \ddot{\theta} &= \dot{\psi} \dot{\Phi} \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \right) + \frac{J_r}{I_{yy}} \dot{\Phi} \Omega_r + \frac{l}{I_{yy}} T_\theta \\ \ddot{\psi} &= \dot{\theta} \dot{\Phi} \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \right) + \frac{l}{I_{zz}} T_\psi \end{aligned} \quad (2.17)$$

İvmeler; yuvarlanma açısı için $\ddot{\Phi}$, yunuslama açısı için $\ddot{\theta}$, yönelme açısı için $\ddot{\psi}$ olarak verilmiştir. Açısal hızlar; yuvarlanma açısı için $\dot{\Phi}$, yunuslama açısı için $\dot{\theta}$, yönelme açısı için $\dot{\psi}$ olarak verilmiştir. Atalet momentleri, x eksenindeki I_{xx} , y eksenindeki I_{yy} , z eksenindeki I_{zz} olarak verilmiştir. Denklem 2.12'deki T_z (itki kuvveti denetim girişi), Denklem 2.10'a yazılarak oluşturulan yeni denklem, Denklem 2.9' da yerine konulur ve gereken işlemler yapılsa döner kanatlı insansız hava aracının x, y, z eksenlerindeki ivmeler Denklem 2.18'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{-T_z}{m} (\cos\psi \sin\theta \cos\phi + \sin\psi \sin\phi) \\ \ddot{y} &= \frac{-T_z}{m} (\sin\psi \sin\theta \cos\phi + \sin\phi \cos\psi) \\ \ddot{z} &= g - \frac{T_z}{m} (\cos\theta \cos\phi) \end{aligned} \quad (2.18)$$

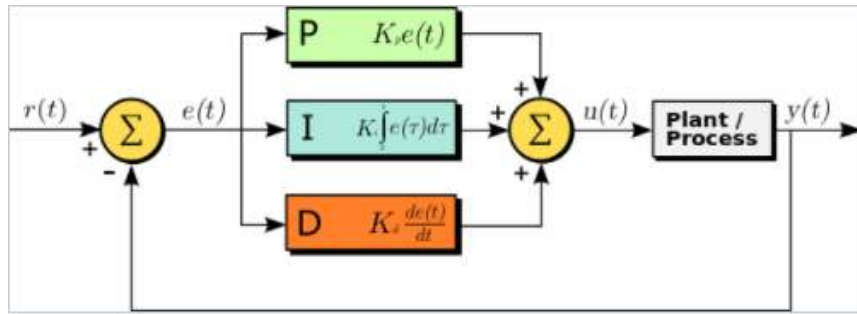
İvmeler; x eksenini için $\ddot{x}$, y eksenini için $\ddot{y}$, z eksenini için $\ddot{z}$ olarak verilmiştir. Açılar; yuvarlanma açısı ϕ , yunuslama açısı θ , yönelme açısı ψ olarak verilmiştir. Döner kanatlı insansız hava aracının matematiksel modelinin elde edilmesinde dönme ve dönüşüm denklemleri kullanılır. Dönme denklemleri döner kanatlı insansız hava aracının açısal hızlarının eldesinde, dönüşüm denklemleri ise döner kanatlı insansız hava aracının x, y, z eksenlerindeki ivme denklemlerinin eldesinde kullanılır. Bu şekilde döner kanatlı insansız hava aracının hız, ivme ve yön verilerine erişilebilmektedir(Bozkurt vd., 2020).

Döner kanatlı insansız hava aracı kontrolünde yaygın olarak PID kontrolörü kullanılır. PID (Proportional Integral Derivative) denetleyici kontrol döngüsü yöntemi, endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir geri besleme denetleyicisi yöntemidir. Bir PID denetleyici sürekli olarak bir hata değerini, yani amaçlanan sistem durumu ile mevcut sistem durumu arasındaki farkı hesaplar. Denetleyici süreç kontrol girdisini ayarlayarak hatayı en aza indirmeye çalışır. Kontrol çıktısı üç ayrı matematiksel işlemden geçirilir ve toplanarak elde edilir. Sistem etkileri P, D ve I olmak üzere üçe ayrılır. Orantılı Etki (P): Çıktının hatanın belirli bir "kazanç" değeri ile çarpımı kadar etkilidir. Mevcut hatayı hesaplar. İntegral Etki (I): Kontrolün etkisi, etkinin hesaplandığı ana kadar o andaki tüm hataların toplamı ile orantılıdır. Başka bir deyişle, integral etkisi, sistemin geçmişte yaptığı hataların toplamı anlamına gelir. Türev Etkisi (D): Hatanın değişimine göre sistemin çıktısı üzerinde orantılı bir etkiye sahiptir. Böylece gelecekteki hatanın tahminini hesaplar. Döner kanatlı insansız hava aracı kontrol uygulamalarının %75'ine PID uygulanmıştır. Geniş bir uygulama alanına sahip olan bu algoritmayı Karl Arstom şu şekilde tanımlamaktadır (Oktay ve Köse, 2019):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(v) d(v) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.19)$$

Burada K_p orantı katsayısı, K_i integral katsayısı ve K_d türev katsayısıdır.

Geleneksel bir PID yapısı bloklarla Şekil 2.2’de temsil edilmektedir:



Şekil 2.2. PID Kontrolör

Kaynak: (Oktay ve Köse, 2019)

Buna göre dört rotorlu havada asılı kalma, boylamsal ve yanal uçuş PID' si sırasıyla aşağıdaki gibi olacaktır:

$$u(t) = K_{ph} e(t) + K_{ih} \int_0^t e(v) d(v) + K_{dh} \frac{de(t)}{d(t)} \quad (2.20)$$

$$u(t) = K_{p\theta} e(t) + K_{i\theta} \int_0^t e(v) d(v) + K_{d\theta} \frac{de(t)}{d(t)} \quad (2.21)$$

$$u(t) = K_{p\phi} e(t) + K_{i\phi} \int_0^t e(v) d(v) + K_{d\phi} \frac{de(t)}{d(t)} \quad (2.22)$$

K_{ph} , K_{ih} , K_{dh} sırasıyla havada asılı kalma için PID katsayılarıdır. $K_{p\theta}$, $K_{i\theta}$, $K_{d\theta}$ boyuna uçuş PID katsayılarıdır. $K_{p\phi}$, $K_{i\phi}$, $K_{d\phi}$ yanal uçuş için PID katsayılarıdır (Oktay ve Köse, 2019).

(Solc, 2010)' da döner kanatlı insansız aracının dört rotoru tam kontrol ve modelleme üzerinde çalışıldı. Matematiksel modeli doğrusal değildi ve Newton'un hareket yasalarından yararlanıldı. Kontrol sisteminde durum değişkenleri yaklaşımı kullanılarak ve modeli oluşturarak simülasyonlarını yapmıştır. (Prabha vd., 2016), X dört rotorlu modelleme ve simülasyon üzerinde çalışmışlardır. Dinamik performansı doğrusal olmayan dört rotorlu kontrol olan PID algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (Wang vd., 2017)'de, gürültü uygulandığında döner kanatlı insansız aracının duruşlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada Bulanık Mantık Denetleyici ile PID Denetleyici arasındaki fark gösterilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, Bulanık Mantık denetleyicisi, PID denetleyicisinden daha hızlı olduğu grafiklerle gösterilmiştir. (Ononiwu vd., 2016)' da, döner kanatlı insansız aracının, yer kontrol merkezinden kablosuz olarak kontrol edilmiştir. Kontrol olarak PID kontrolör kullanılmıştır. Sonuçlar, döner kanatlı insansız hava aracının PID kontrolü ile kararlı tutum gösterdiğini ve kararlı durumdan saptığında (disturbance) kompanse ettiğini göstermiştir. (Quebe, 2013) küçük bir kapalı insansız hava aracının navigasyonu ve kontrolü ile ilgili konuları araştırmıştır. Gözlemci veya tahmin edici, bir Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanılarak ve bir SIR parçacık filtresi kullanarak döner kanatlı insansız hava aracının model parametrelerinin tahmini yapılmıştır. (Naidoo, 2011) döner kanatlı insansız hava aracının dinamik modeli üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Döner kanatlı insansız hava aracının kontrolü ve simüle edilmiş matlab / simulink için PD kullanılmıştır. (Bolandı vd., 2013)' de, PID denetleyicisini kullanan bir döner kanatlı insansız hava aracının, duruş kontrolü üzerinde çalışılmıştır. PID tuning, analitik yöntemi kullanılmıştır. Matlab/Simulink' de simülasyonlar yapılmış ve önerilen kontrolörün yeterli performans sağladığı sonucuna varmışlardır.

(Corke, 20.11) döner kanatlı insansız hava aracının kontrol modeli baz alındığında bu yöntemler burada açıklanmıştır. Aracı kontrol etmek için, eğim ve x öteleme hareketi için tanımlanan iç içe bir kontrol yapısı kullanılır. En içteki döngü, istenen ve gerçek yunuslama açısı arasındaki hataya dayalı olarak döner kanatlı insansız hava aracının gövdesinde gerekli yunuslama torkunu hesaplamak için orantısal ve türevsel bir kontrolör kullanır.

$$\tau_y^* = K_{\tau,p}(\theta_p^* - \theta_p^\#) + K_{\tau,d}(\dot{\theta}_p^* - \dot{\theta}_p^\#) \quad (2.23)$$

Kazançlar $K_{\tau,p}$ ve $K_{\tau,d}$ yaklaşık bir dinamik modele dayalı klasik kontrol tasarımı yaklaşımlarıyla belirlenir ve daha sonra iyi performans elde etmek için ayarlanır. Gerçek araç eğim açısı $\theta_p^\#$, bir eylemsiz navigasyon sistemi tarafından tahmin edilmiştir ve $\dot{\theta}_p^\#$, jiroskopik sensörlerden türetilmiştir. Gerekli rotor hızları daha sonra Denklem 2.10 kullanılarak belirlenir.

Araca bağlı ve $\{B\}$ ile aynı orijine sahip ancak x ve y eksenleri yatay düzlemde ve yere paralel olan bir $\{B'\}$ koordinat çerçevesi olsun. İtme vektörü $\{B\}$ çerçevesinin z eksenine paraleldir ve burnu aşağı doğru eğimlidir, y eksenini etrafında θ_p döndürerek, aracı $B'x$ yönünde hızlandıran bir bileşene sahip bir kuvvet üretir ve θ_p' nin küçük olduğu varsayılmıştır. B ; $b > 0$ olduğunda, hava yoğunluğuna, rotor kanadı yarıçapının küpüne, pervane kanat sayısına ve kanat genişliği ile kanat uzunluğuna bağlı olan kaldırma sabitidir ve d rotorların merkeze uzaklığıdır. τ_x, τ_y, τ_z sırasıyla x eksenini yuvarlanma torku, y eksenini için yunuslama torku, z eksenini etrafındaki toplam reaksiyon torkunu ifade eder. $\bar{w}_i$; rotorun açısal hızı ve T ise toplam torkdur. b ile d sabitlerinin olduğu A matrisi sabittir ve eğer $b, k, d > 0$ ise tam sıralamadır ve özel bir itme kuvveti T ve τ momentini uygulamak için gereken rotor hızlarını çözmek için ters çevrilebilir (Denklem 2.25).

$$A = \begin{pmatrix} -b & -b & -b & -b \\ 0 & -db & 0 & db \\ db & 0 & -db & 0 \\ k & -k & k & -k \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{w}_1^2 \\ \bar{w}_2^2 \\ \bar{w}_3^2 \\ \bar{w}_4^2 \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} T \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

$${}^{B'}f = \mathcal{R}_y(\theta_p) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T \sin\theta_p \\ 0 \\ T \cos\theta_p \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

$${}^{B'}f_x = T \sin\theta_p \approx T\theta_p \quad (2.27)$$

$K_f > 0$ 'ın bir kazanç olduğu bir orantısal kontrol yasası ile hız bu yönde kontrol edilebilir.

$${}^{B'}f_x^* = m K_f ({}^{B'}v_x^* - {}^{B'}v_x^\#) \quad (2.28)$$

Denklem 2.27 ve 2.28 birleştirilerek, istenen ileri hızı elde etmek için gereken istenen eğim açısını elde edilir.

$$\theta_p^* \approx \frac{m}{T} K_f ({}^{B'}v_x^* - {}^{B'}v_x^\#) \quad (2.29)$$

Denklem 2.23' ü kullanarak gerekli yunuslama torku hesaplanır ve ardından Denklem 2.25'i kullanarak gerekli rotor hızları hesaplanır. Dikey dengedeki bir araç için toplam itme ağırlık kuvvetine eşittir, yani $m/T \approx 1/g$. Gerçek araç hızı ${}^B v_x$, bir eylemsiz navigasyon sistemi veya bir GPS alıcısı tarafından tahmin edilmiştir. Aracın dünya çerçevesinin xy düzlemindeki konumu $p \in \mathbb{R}^2$ ise, istenen hız, istenen ve gerçek konum arasındaki hataya dayalı orantısal kontrol yasası tarafından verilir.

$${}^0 v^* = K_p ({}^0 p^* - {}^0 p^\#) \quad (2.30)$$

$\{B'\}$ çerçevesinin xy düzleminde istenen hız, sapma açısının θ_y bir fonksiyonudur.

$${}^{B'}v = \Theta \quad {}^0 \mathcal{R}_{B'}(\theta_y) \quad {}^0 v, \mathcal{R} \in SO(2) \quad (2.31)$$

$$\begin{pmatrix} {}^{B'}v_x \\ {}^{B'}v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_y & -\sin\theta_y \\ \sin\theta_y & \cos\theta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

2.2.Görsel Servolama Temelleri

Tüm görme tabanlı kontrol şemalarının amacı, tipik olarak Denklem 2.33 ile tanımlanan bir $e(t)$ hatasını en aza indirmektir.

$$e(t) = s(m(t), a) - s^* \quad (2.33)$$

Bu formülasyon oldukça geneldir ve çok çeşitli yaklaşımları kapsar. Denklem 2.33' deki parametreler aşağıdaki gibi tanımlanır. $m(t)$ vektörü, bir dizi görüntü ölçümüdür (örneğin, ilgilenilen noktaların görüntü koordinatları, nesnenin ağırlık merkezinin görüntü koordinatları). Görsel ölçümler, k tane görsel özniteliği sahip $s(m(t), a)$ vektörünü hesaplamak için kullanılır. a , sistem ile ilgili potansiyel ek bilgileri temsil eden bir dizi parametredir (örneğin, kamera içsel parametreleri, nesnenin 3B modeli). s ; görsel öznitelik vektörü, s^* hedef öznitelik vektörüdür.

Chaumette ve Hutchinson yaptıkları çalışmada yapılan çalışmalarda sabit hedef pozu ve hareketsiz nesneye odaklanılmıştır (Chaumette ve Hutchinson, 2009). Görsel servolama şeması s görsel öznitelik vektörünün tasarımına göre farklılık gösterir. Görüntü tabanlı görsel servolama, tümüyle görüntü düzleminden oluşturulan bir dizi öznitelik bilgisini içeren öznitelik vektörü s' yi kullanır. Konum tabanlı görsel servolama, görüntü ölçümlerinden tahmin edilmesi gereken bir dizi 3 boyutlu parametreden oluşan s' yi kullanır. Hibrit görsel servolama da ise s , doğrudan görsel veriden alınan bilgiyi ve aynı zamanda görsel veri kullanılarak çıkarımı yapılan bilgiyi kullanır. Görsel öznitelik vektörü s seçildiğinde, kontrol şemasının tasarımı daha basittir. En basit yaklaşımın bir hız kontrolörü tasarlamak olduğu düşünülürse bunu yapmak için, s 'nin zamana göre değişimi ile kamera hızı arasındaki ilişkiye ihtiyacımız vardır. Kameranin uzaysal hızı $v_c = (v_c, \omega_c)$ olmak üzere v_c kamera çerçevesinin başlangıç noktasının anlık doğrusal hızı ve ω_c kamera çerçevesinin anlık açısal hızını ifade etmektedir. $\dot{s}$ ve v_c arasındaki ilişki Denklem 2.34'de verilmiştir.

$$\dot{s} = L_s v_c \quad (2.34)$$

Denklem 2.42' de $L_s \in \mathbb{R}^{k \times 6}$, s' e bağlı görüntü etkileşim matrisidir. Denklem 2.33 ve Denklem 2.34 ile kamera hızı ve görsel hatanın zamana göre değişimi arasındaki ilişki Denklem 2.35'de verilmiştir:

$$\dot{e} = L_e v_c \quad (2.35)$$

Denklem 2.35' de $L_e = L_s$ kabul edilir. Görsel hatada $\dot{e} = -\lambda e$ şeklinde üstel bir azalma oluşacak şekilde Denklem 2.35' den de yararlanılarak kamera hızını Denklem 2.36' da verilmiştir.

$$v_c = -\lambda L_e^+ e \quad (2.36)$$

Denklem 2.36' da $L_e^+ \in \mathbb{R}^{k \times 6}$, L_e görüntü etkileşim matrisinin Moore-Penrose yalancı tersidir (Moore-Penrose pseudo inverse). L_e ' nin rankı 6 olduğunda yalancı tersi; $L_e^+ = (L_e^T L_e)^{-1} L_e^T$. Böylece $\|v_c\|$ ile $\|\dot{e} - \lambda L_e L_e^+ e\|$ ifadelerinin asgari yapıda olmasını sağlar. $k=6$ ve $\det(L_e) \neq 0$ olduğunda L_e ' nin tersi alınabilir. Bu şekilde $v_c = -\lambda L_e^{-1} e$ bağıntısı sağlanır.

Görsel servo sistemleri gerçekleştirirken görüntü etkileşim matrisi (L_e) veya görüntü etkileşim matrisinin yalancı tersi (L_e^+) tümüyle bilmek olası değildir. Bu sebeple L_e ve L_e^+ ' nin tahmini veya kestirimi gereklidir. Sonuç olarak hem L_e ' nin tahmininin yalancı tersi hem de L_e^+ ' nin tahmini terimleri için $\widehat{L_e^+}$ sembolü tercih edilmiştir. Bu gösterim ile Denklem 2.36 tekrar yazılırsa;

$$v_c = -\lambda \widehat{L_e^+} e \quad (2.37)$$

Görsel servo kontrolcülerinin kullandığı temel tasarım yukarıdaki denklemler de verilmiştir. Öznitelik vektörünün(s) seçimi, görüntü etkileşim matrisinin(L_s) formu ve $\widehat{L_e^+}$ ' nin tahmininin nasıl olacağı gibi konular çalışmanın ileri bölümlerinde ele alınacaktır.

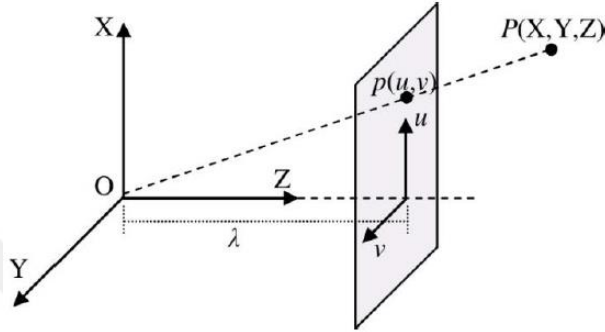
2.2.1. Görüntü Tabanlı Görsel Servolama

Görüntü tabanlı görsel servolama kontrol şemaları, öznitelik vektör(s) kümesini tanımlamak için bir dizi noktanın görüntü düzlemi koordinatlarını kullanır. Denklem 2.33' deki $s = s(m, a)$ tanımındaki a parametresi, kameranın içsel parametreleridir. m görsel ölçümleri çoğunlukla görüntülenen noktalar dizisinin piksel cinsinden koordinatlarıdır. Kamera içsel parametreleri piksel cinsinden ifade edilen görsel ölçümleri, gereken öznitelik bilgisine çevirmede kullanılmaktadır. Görüntü etkileşim matrisinin çıkarımı aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir;

Kamera düzleminde $\mathbf{X} = (X, Y, Z)$ koordinatlarına sahip üç boyutlu bir nokta ve bu noktanın görüntü düzlemine izdüşümü iki boyutlu $\mathbf{x} = (x, y)$ koordinatlarındaki bir nokta olsun. Noktanın kamera ve görüntü düzlemindeki durumu Denklem 2.38' de verilmiştir(Chaumette ve Hutchinson, 2009).

$$\begin{cases} x = \frac{X}{Z} = (u - c_u)/f\alpha \\ y = \frac{Y}{Z} = (v - c_v)/f \end{cases} \quad (2.38)$$

Şekil 2.3’ de etkileşim matrisinin analitik eldesi için nokta şeklindeki öznitelikler için iğne deliği modeli ile kamera çerçevesine göre 3B bir noktanın koordinatları belirtildiğinde ($P(X, Y, Z)$), bu noktanın görüntü çerçevesine göre durumu verilmiştir(Yüksel, 2020).



Şekil 2.3. İğne Deliği Kamera Modeli

Kaynak: (Yüksel, 2020)

Denklem 2.38’ de $m=(u,v)$ piksel birimlerinde ifade edilen görüntü noktasının koordinatlarını verir ve $a=(c_u, c_v, f, \alpha)$ kamera içsel parametreleridir. c_u, c_v kamera bakış noktaları, f odak uzaklığıdır ve α piksel boyutlarının oranıdır. Bu durumda, noktanın görüntü düzlemi koordinatları $s = x = (x, y)$ seçilir. Denklem 2.34’ deki izdüşüm denklemlerinin zamana göre türevini alınırsa Denklem 2.39 elde edilir:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\dot{X}}{Z} - \frac{X\dot{Z}}{Z^2} = \frac{\dot{X} - x\dot{Z}}{Z} \\ \dot{y} = \frac{\dot{Y}}{Z} - \frac{Y\dot{Z}}{Z^2} = \frac{\dot{Y} - y\dot{Z}}{Z} \end{cases} \quad (2.39)$$

3 boyutlu noktanın hızını, iyi bilinen denklemi kullanarak kamera uzaysal hızıyla ilişkilendirilirse;

$$\dot{\mathbf{X}} = -\mathbf{v}_c - \boldsymbol{\omega}_c \times \mathbf{X} \Leftrightarrow \begin{cases} \dot{X} = -v_x - \omega_y Z + \omega_z Y \\ \dot{Y} = -v_y - \omega_z X + \omega_x Z \\ \dot{Z} = -v_z - \omega_x Y + \omega_y X \end{cases} \quad (2.40)$$

Denklem 2.40, Denklem 2.39’da yerine konulursa Denklem 2.41 elde edilir:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{-v_x}{Z} + \frac{xv_z}{Z} + xy\omega_x - (1+x^2)\omega_y + y\omega_z \\ \dot{y} = \frac{-v_y}{Z} + \frac{yv_z}{Z} + (1+y^2)\omega_x - xy\omega_y + x\omega_z \end{cases} \quad (2.41)$$

Denklem 2.41 denklem 2.42’deki gibi yazılabilir;

$$\dot{x} = L_x v_c \quad (2.42)$$

x ile ilgili görüntü etkileşim matrisi L_x Denklem 2.43’ de verilmiştir.

$$L_x = \begin{bmatrix} \frac{-1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & xy & -(1+x^2) & y \\ \frac{-1}{Z} & \frac{-1}{Z} & \frac{y}{Z} & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

L_x matrisinde Z, görüntülenene noktanın kamera çerçevesine göre derinliğidir. Bu sebeple, etkileşim matrisinin bu biçimini kullanan herhangi bir kontrol şeması, Z’nin değerini tahmin etmeli veya kestirimini yapmalıdır. Kamera içsel parametreleri x ve y ’nin hesaplanmasında kullanılmaktadır. L_x matrisinin doğrudan kullanılamayacağı ve parametrenin kestirimi veya tahmini bir değerinin kullanılacağı tekrar belirtilmelidir.

$k \geq 6$ koşulu sağlandığında yani 6 serbestlik derecesinin kontrolü için en az 3 nokta gereklidir. Bu noktaların oluşturduğu öznitelik vektörü $x=(x_1, x_2, x_3)$ olarak gösterilir. x öznitelik vektörüne ait görüntü etkileşim matrisi ise her bir noktadan elde edilen görüntü etkileşim matrisleri Denklem 2.44’ deki gibidir.

$$L_x = \begin{bmatrix} L_{x_1} \\ L_{x_2} \\ L_{x_3} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

L_x ’in tekil olduğu bazı konfigürasyonlar olacaktır. Ayrıca, $e = 0$ olan dört farklı kamera duruşu vardır, yani dört global minimum vardır ve bunları ayırt etmek imkansızdır. Bu nedenlerle, genellikle üçten fazla nokta dikkate alınır.

Kontrol yasasında kullanılacak $\widehat{L}_e^+$ tahminini oluşturmak için çeşitli seçenekler mevcuttur. Bir popüler şema, elbette, $L_e = L_x$ biliniyorsa ve her noktanın mevcut derinliği Z mevcut iken $\widehat{L}_e^+ = L_e^+$ 'yi seçmektir. Pratikte, bu parametreler kontrol şemasının her tekrarında tahmin edilmelidir. Diğer bir yaklaşım, $\widehat{L}_e^+ = L_{e^*}^+$ 'yi seçmektir, burada L_e arzu edilen $e = e^* = 0$ pozisyonu için L_{e^*} 'nin değeridir. Bu durumda, $\widehat{L}_e^+$ sabittir ve her noktanın yalnızca istenen derinliği ayarlanmalıdır, bu da görsel servolama sırasında değişen hiçbir 3-B parametresinin tahmin edilmesi gerekmediği anlamına gelir. Son olarak, $\widehat{L}_e^+ = 1/2(L_e + L_{e^*})$ seçimi (Malis, 2004)' de önerilmiştir. L_e bu yöntemde dahil olduğundan, her noktanın mevcut derinliği de mevcut olmalıdır (Chaumette ve Hutchinson, 2009).

2.2.2. Konum Tabanlı Görsel Servolama

Konum tabanlı kontrol şemaları (KTGS) s'yi tanımlamak için bazı referans koordinat çerçevelerine göre kameranın duruşunu (poz) kullanır. Bir görüntüdeki bir dizi ölçümden duruş hesaplama, kameranın içsel parametrelerini ve gözlemlenen nesnenin 3 boyutlu modelinin bilinmesini gerektirir. Bu klasik bilgisayarlı görme problemine 3 boyutlu lokalizasyon problemi denir. Daha sonra, kamera duruşunu temsil etmek için kullanılan parametreleştirme açısından s'yi tanımlamak tipiktir. s'nin tanımında (Denklem 2.33) yer alan a parametreleri kameranın içsel parametreleri ve nesnenin 3 boyutlu modelidir. Üç koordinat çerçevesi dikkate alınırsa: mevcut kamera çerçevesi F_c , istenen kamera çerçevesi F_{c^*} ve nesneye eklenmiş bir referans çerçevesi F_o . Burada, bir dizi koordinatın tanımlandığı çerçeveyi belirtmek için önde gelen bir üst simge kullanmanın standart gösterimi benimseniyor. Böylece, koordinat vektörleri ${}^c t_0$ ve ${}^{c^*} t_0$ sırasıyla mevcut kamera çerçevesine göre ve istenen kamera çerçevesine göre ifade edilen nesne çerçevesinin orijin koordinatlarını verir. Ayrıca, $R = {}^{c^*} R_c$ mevcut kamera çerçevesinin istenen çerçevesine göre yönünü veren döndürme matrisidir.

s'yi (t, θ_u) olarak tanımlayabiliriz, burada t bir öteleme vektörüdür ve θ_u dönüş için açı/eksen parametreleştirmesini verir. t için iki seçenek tartışılır ve ilgili kontrol yasaları verilmiştir. t , F_o nesne çerçevesine göre tanımlanırsa, $s = ({}^c t_0, \theta_u)$, $s^* = ({}^{c^*} t_0, 0)$ ve $e = ({}^c t_0 - {}^{c^*} t_0, \theta_u)$ elde edilir. Bu durumda, e ile ilgili etkileşim matrisi şu şekilde verilir:

$$L_e = \begin{bmatrix} -I_3 & [{}^c t_0]_x \\ 0 & L_{\theta_u} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

burada I_3 , 3×3 birim matrisidir ve L_{θ_u} ile verilir:

$$L_{\theta u} = I_3 - \frac{\theta}{2} [u]_x + \left(1 - \frac{\text{sinc}\theta}{\text{sinc}^2 \frac{\theta}{2}}\right) [u]_x^2 \quad (2.46)$$

burada $\text{sinc } x$, $x \text{sinc } x = \sin x$ ve $\text{sinc } 0 = 1$ olacak şekilde tanımlanan sinüs kardinaldir. Kontrol şemasını elde edilirse;

$$v_c = -\lambda \widehat{L_e^{-1}} e \quad (2.47)$$

çünkü s 'nin k boyutu, kamera serbestlik derecesi sayısı olan 6'dır. Ayarlayarak:

$$\widehat{L_e^{-1}} = \begin{bmatrix} -I_3 & [{}^c t_0]_x L_{\theta u}^{-1} \\ 0 & L_{\theta u}^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

basit gelişmelerden sonra Denklem 2.49 elde edilir:

$$\begin{cases} v_c = -\lambda(({}^{c*}t_0 - {}^c t_0) + [{}^c t_0]_x \theta u) \\ \omega_c = -\lambda \theta u \end{cases} \quad (2.49)$$

$L_{\theta u}^{-1} \theta u = \theta u$ olarak elde edilir.

Bu KTGS şeması, dönme hareketinin üstel azalan bir hız ile bir jeodezik takip etmesine ve böylece s 'de yer alan öteleme parametrelerinin aynı hızla azalmasına neden olur.

Başka bir KTGS şeması $s = ({}^{c*}t_0, \theta u)$ kullanılarak tasarlanabilir. Bu durumda, $s^* = 0$, $e = s$ 'dir.

$$L_e = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & L_{\theta u} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Basit bir kontrol şeması elde edilmesini sağlayan öteleme ve dönme hareketleri arasındaki ayrışmaya dikkat edilirse:

$$\begin{cases} v_c = -\lambda R^T {}^{c*}t_0 \\ \omega_c = -\lambda \theta u \end{cases} \quad (2.51)$$

Chaumette ve Hutchinson Denklem 2.59'da yer alan poz parametreleri mükemmel bir şekilde tahmin edildiğinde, kamera yörüngesinin tamamen düz bir çizgi iken, görüntü yörüngeleri öncekinden daha az tatmin edici olduğunu ve hatta bazı özel konfigürasyonların, bazı noktaların kamera görüş alanından çıkması için bulunabileceğini belirtmişlerdir.

2.2.3. Hibrit Görsel Servolama

Konum tabanlı görsel servolamanın ana dezavantajı, görüntüde hedefin kamera görüş alanından çıkabileceği anlamına gelen hiçbir kontrolün olmamasıdır. Ayrıca, kameranın pozunu hesaplamak için hedefin bir modeline ihtiyaç duymasıdır. Görüntü tabanlı görsel servolama bu modele açıkça ihtiyaç duymaz. Ancak, kontrol yasasının tasarımında bir derinlik tahmini veya yaklaşıklık gereklidir. Ayrıca, bu yaklaşımın ana dezavantajı, yakınsamanın yalnızca istenen konumun (alanı analitik olarak belirlenmesi imkansız görünen) bir komşuluğunda sağlanmasıdır(Malis, 1999). KTGS ve GTGS için belirtilen dezavantajlar dikkate alındığında, önceki iki stratejiyi birleştiren Hibrit Görsel Servolama (HVS) yöntemi iyi bir alternatiftir.

Tüm görsel servo yaklaşımlarında olduğu gibi hibrit görsel servolama da 3 boyutlu uzaydaki bir noktanın 2 boyutlu kamera düzlemine izdüşümü için derinlik bilgisi elde edilemediği için bu değerin kestirimine ihtiyaç duyduğu belirtilmelidir(Yüksel, 2016).

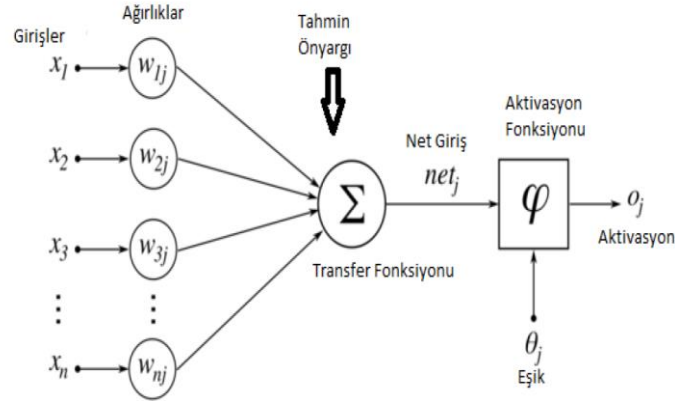
2.3.Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin karmaşık işlevselliğinden ilham alan bir tür hesaplama zekasıdır(Wang, 2003). YSA, insan beyninin öğrenme şeklini taklit ederek beynin kavrama, öğrenme, hatırlama, genelleme yapma yolu ile topladığı veriler ile yeni veri üretebilme gibi temel işlevlerin gerçekleştirildiği bilgisayar yazılımlarıdır. YSA; insan beyninden esinlenerek, öğrenme sürecinin matematiksel olarak modellenmesi uğraşı sonucu ortaya çıkmıştır. İnsan beyninin birbirine bağlı nöronları gibi, YSA belirli bir mimaride düzenlenmiş çok sayıda nöron katmanından oluşur. Nöronlar arasındaki bağlantılar, ağırlıklar adı verilen sayısal bir sayı ile ilişkilendirilir. Bağlı nöronların ağırlıklarını ve önyargılarını belirlemek için, eğitim veri setlerine tekrar tekrar maruz kaldıktan sonra sistemin titiz bir şekilde eğitilmesine dayanır. Bu yöntem denetimli öğrenme olarak bilinir ve eğitmenin bilgisine ve sisteme tanıtılan veri miktarına bağlıdır. Genel olarak, sisteme ne kadar fazla bilgi verilirse, YSA'nın bilinmeyen durumları çözme performansını ve kapasitesini artırır. Sinir ağının boyutu, sistemin kullanıcıya ve yaratıcısına bağlı olacaktır. Büyük bir YSA, genel etkileşimde ve ortaya çıkan davranışta bir artışa karşılık gelen milyarlarca nörona sahip insan beynine kıyasla yüzlerce veya binlerce işlemci birimine sahip olabilir. Bununla birlikte, araştırmacılar genellikle sinir ağının mimarisinin ve boyutunun tam olarak kopyalanmasıyla değil, doğru simülasyonun işlevselliği ve belirli sistemlerin işlevselliği ile ilgilenmektedir(Faelden, 2015).

İlk yapay sinir ağı modeli 1943 yılında bir sinir hekimi olan Warren McCulloch ve bir matematikçi olan Walter Pitts tarafından “Sinir Aktivitesinde Düşüncelere Ait Bir Mantıksal Hesap (A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity)” başlıklı makale ile ortaya çıkarılmıştır. Yapay sinir ağı biyolojik sinir ağlarını taklit eden sentetik yapılardır. Bir hücreye n adet veri girişi verilsin (X_n veri girişi), girilen veriler ağırlıklar(W_{ij}) ile çarpılarak tüm veriler toplandıktan sonra önyargı eklenerek elde edilen sonuç net yargıyı verir. Net girdi aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek bir veri çıktısı elde edilir. Bu işlemler Denklem 2.52 e 2.53’ te verilmiştir. Şekil 2.4’ de bir yapay sinir hücresi görülmektedir.(Öztürk ve Şahin, 2018).

$$net_j = \sum_{i=1}^n X_i W_{ij} - \theta_j \quad (2.52)$$

$$o_j = f(net_j) \quad (2.53)$$



Şekil 2.4. Yapay Sinir Hücresi

Kaynak: (Öztürk ve Şahin, 2018)

Yapay sinir ağı modelleri ileri beslemeli YSA, geri beslemeli YSA, tek katmanlı algılayıcılar ve çok katmanlı algılayıcılar olmak üzere temelde dört gruba ayrılır.

İleri beslemeli YSA’ da nöronlar girişten başlayarak çıkışa doğru düzenli katmanlar şeklindedir. Bir katmandan yalnızca kendinden sonra gelen katmanlara bağ vardır. YSA’ nın girişine gelen bilgiler herhangi bir değişime maruz bırakılmadan gizli katmandaki hücrelere (orta noktaya) iletilir ve son adım olarak sırasıyla çıkış katmanından işlenerek geçer ve dış ortama aktarılır.

Yapay sinir ağları; uyarlanabilirlik, eksik verilerle çalışma, öğrenme, çok sayıda değişken ve parametre kullanma, doğrusal olmama, hata toleransı ve esneklik, paralel çalışma, genelleme gibi temel özelliklere sahiptir. Yapay sinir ağlarının en sık kullanıldığı uygulamalar veri filtreleme, veri yorumlama, veri ilişkilendirme, tahmin, sınıflandırma gibi işlemlerdir.

Yapay sinir ağlarının kullanıldığı alanlar ise sağlık, askeri alanda, otomotiv, enerji, elektronik, optik karakter taşıma, bankacılık ve finans alanlarında, meteoroloji, veri madenciliği, parmak izi tanıma, insansız araçlar ve daha birçok farklı alanda kullanılmakta ve geliştirilmektedir.

Bu çalışmada döner kanatlı insansız hava aracı için konum tabanlı görsel servolama poz kestirimi için yapay sinir ağı mimarisi kullanılmıştır. Bölüm 3’de KTGS’ de duruş kestirimi için kullanılan yapay sinir ağı yapısı öznitelik çıkarımından sonra tanıtılacaktır.

2.4.Duruş Kestirimi

Görsel servolama da kamera görüntü düzleminde tanımlanan bir s öznitelik vektörü oluşturur. Daha sonra hedef öznitelik vektörü s^* ile bu vektör arasındaki fark hata vektörünü oluşturur. Görsel servolamada son olarak elde edilen hata vektöründen bir kinematik hız kontrol yasası oluşturulur. Öznitelik tabanlı görsel servolama yaklaşımlarından görüntü tabanlı görsel servolama görüntüden elde edilen s öznitelik vektörünü direkt olarak kinematik kontrolcü tasarımı için kullanır. Konum tabanlı görsel servolama ise s öznitelik vektörünü döner kanatlı insansız hava aracının duruş kestirimi için kullanır(Yüksel, 2020). Bu çalışmanın konusu olan konum tabanlı görsel servolama döngüsü görüntü tabanlı görsel servolama döngüsünden farklı olarak özniteliklere bağlı duruş kestirimine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada duruş kestirimi için literatürde sıklıkla tercih edilen kalman filtresi gibi yöntemler yerine yapay sinir ağı yapısı tercih edilmiştir.

3.METOT

Bu bölümde döner kanatlı insansız hava araçları için önerilen konum tabanlı görsel servolama sistemi, Coppelia simülasyon ortamı, öznitelik çıkarımı, veri setinin oluşturulması, yapay sinir ağı ve Neural Network Toolbox, Coppelia-Matlab haberleşmesi ve YSA ile duruş kestirimi anlatılmıştır.

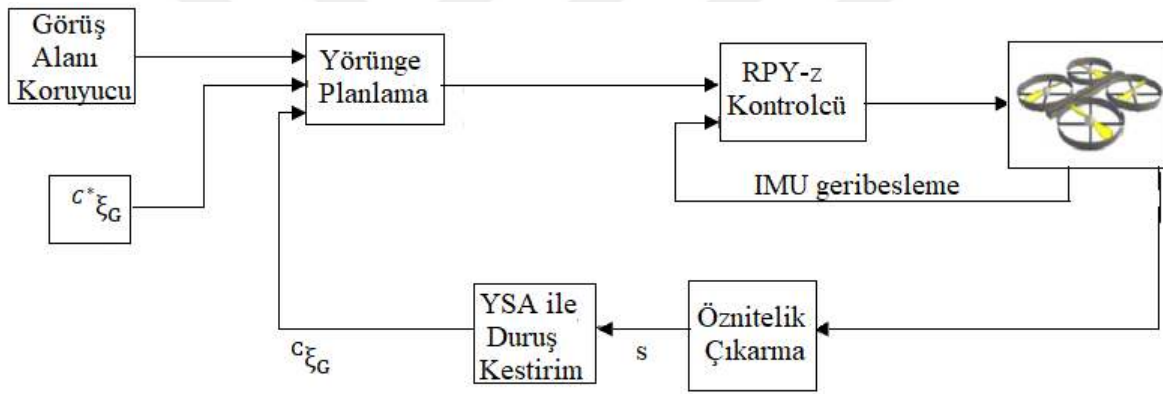
3.1.Önerilen Konum Tabanlı Görsel Servolama Sistemi

Görsel servolama döner kanatlı insansız hava aracının üzerine monte edilmiş kameradan alınan görüntüden elde edilen özniteliklere göre hızını kontrol eden bir kontrol yöntemidir. KTGS, model tabanlı bir tekniktir. Bunun nedeni, ilgilenilen öznitelik pozunun kameraya göre tahmin edilmesidir. Öznitelik kestiriminden dolayı hata işaretine bağlı olarak elde edilen hız kontrol komutu kontrolcü sinyali olarak sisteme uygulanır. Kameradan yeni görüntü elde edilmesi ve özniteliklerin çıkarılmasıyla KTGS döngüsü tamamlanır. Burada elde edilen görüntüler döner kanatlı insansız hava aracının üzerine monte edilmiş tek bir kameradan alınır. Sistem de üç koordinat çerçevesinin tanımlanması gerekir: mevcut kamera çerçevesi F_c , istenen kamera çerçevesi F_c^* ve nesneye eklenmiş bir referans çerçevesi F_o . Burada, bir koordinat kümesinin tanımlandığı çerçeveyi belirtmek için önde gelen bir üst simge kullanmanın standart gösterimi benimsenmektedir. Bu nedenle, koordinat vektörleri ${}^c t_0$ ve ${}^{c^*} t_0$, sırasıyla geçerli kamera çerçevesine göre ve istenen kamera çerçevesine göre ifade edilen nesne çerçevesinin başlangıç koordinatlarını verir. Ayrıca, mevcut kamera çerçevesinin istenen çerçeveye göre yönünü veren dönme matrisi $R = {}^{c^*} R_c$ şeklinde tanımlanır.

Görsel servolama teknikleri, kamera kalibrasyonu ve modelleme hatalarının varlığında daha iyi yerel kararlılığa ve yakınsamaya sahiptir. Bununla birlikte, küresel yakınsama sorunlarından muzdariptirler ve bu nedenle, özellikle ilk ve istenen kamera pozları uzak olduğunda bozulurlar. Örneğin, bazı görüntü özellikleri kameranın görüş alanından çıkabilir ve sonuç olarak servo görevinde başarısızlığa neden olabilir. Robotun veya insansız hava aracının eklem sınırları ve/veya çalışma alanı engelleriyle çarpışması nedeniyle uygun olmayan manevralar oluşabilir. Yol planlama(path planning) tekniklerinin reaktif görsel servolama stratejileriyle birleştirilmesi, bir hedefin ilk ve istenen görünümüleri arasında yüksek bir eşitsizliğin kaçınılmaz olduğu robotik uygulamalarda mevcut görsel servolama sistemlerini sağlamlaştırabilir (örneğin, hedefi durdurma, uzaya kenetleme, ulaşma ve kavrama vb.). Planlama aşaması, sistemdeki kritik kısıtlamaları ve belirsizlikleri hesaba katarak, daha sağlam bir görsel servolama süreci ile sonuçlanır. Görüntü alanı yol planlama teknikleri, herhangi bir

kamera kalibrasyonu veya hedef model bilgisi kullanmadan, ilk ve istenen görüntüler arasında görüntü uzayında bir yol enterpolasyonu yapmayı amaçlar (Kazemi vd., 2010).

Bu çalışma da klasik konum tabanlı görsel servolamadan farklı olarak görüş alanı koruyucu kullanılmıştır. Görüş alanı koruyucu ile planlanan yörüngeye döner kanatlı insansız hava aracının üzerine monte edilmiş kameranın öznitelikleri görece şekilde bölgede kalıp kalmadığı kontrol ediliyor. Özniteliklerin görüş alanından çıkıp çıkmadığı ile ilgili herhangi bir önleme çalışması yapılmısa da kontrol işlemi bu çalışmaya katkı sağlamaktadır. KTGS sisteminde, kamera $C_{\xi_G}^*$ ye göre hedefin pozunu tahmin edilir. Hedef $C_{\xi_G}^*$ ye, kamera C_{ξ_G} 'sine ve görüş alanı koruyucusuna göre istenen bağıl poz belirlenir. Yörünge planlamada YSA'da başlangıç ve bitiş verilerle ara 3. dereceden polinom ile doldurulmuştur. Şekil 3.1' de önerilen konum tabanlı görsel servolama sistemi görülmektedir.



Şekil 3.1. Önerilen Konum Tabanlı Görsel Servolama Sistemi

3.2.CoppeliaSim Simülasyon Ortamı

Bu çalışma da sanal platformu oluşturmak için kolay ve sezgisel bir ortam sağlayan ve bazı popüler robotları, nesneleri, yapıları, aktüatörleri ve sensörleri içeren fiziksel bir simülasyon ortamı olan CoppeliaSim kullanılmıştır.

CoppeliaSim, genel amaçlı robot simülasyonu için geliştirilmiş Coppelia Robotics ürünüdür. Özelleştirilmiş kullanıcı arayüzü ve modüler yapı entegre geliştirme ortamı, simülasyonun ana özellikleridir. Hem simülasyon nesneleri hem de kontrol yöntemleri için modülerlik üst düzeydedir. Simülasyon içerisinde geliştirme ortamının kolay kullanımı, robotların ve simülasyon durumlarının oluşturulmasını sağlar. Bu yetenek, hızlı prototipleme, algoritma tasarımı ve uygulamasına izin verir. Aktif simülasyon sırasında bu alan gerçek 3 boyutlu dünya gibi davranır ve modellerin davranışına göre gerçek zamanlı geri bildirim verir.

Sahneyi oluşturan nesneler, kontrol mekanizması ve hesaplama modülleri, simülatörün üç ana işlevidir. Aşağıdaki nesne türleri, CoppeliaSim simülasyon sahnesini veya modelini oluşturur: şekiller, mafsallar, yakınlık sensörleri, görüntü sensörleri, kuvvet sensörleri, grafikler, kameralar, ışıklar, yollar, maketler. Bu sahne nesnelerinin kombinasyonu, karmaşık sensörlerin (ivmeölçer, jiroskop, GPS, Kinect, vb.) ve manipülatörlerden tekerlekli robotlara kadar karmaşık modellerin oluşturulmasına izin verir. CoppeliaSim ortamında sahneye sürüklenerek kolayca eklenebilen geniş bir sensör ve robot model kütüphanesi bulunmaktadır. Ayrıca bu modellerin tamamen özelleştirilebilir. Her simülasyon nesnesinin davranışını yönetmek için çeşitli kontrol mekanizmaları vardır. Bu kontrolörler sadece simülasyon ortamının içinde değil, simülasyon ortamının dışında da uygulanabilmektedir. Ana iç kontrol mekanizması, sahnedeki herhangi bir öğeyle ilişkilendirilebilen alt komut dosyalarının kullanılmasıdır. Alt komut dosyaları, simülasyonun belirli bir bölümünü işler ve ilişkili nesnelerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Bu özellik nedeniyle, onlarla birlikte çoğaltılabilir ve seri hale getirilebilir. Bu nedenle, onları taşınabilir ve ölçeklenebilir kılan kontrolü ile birlikte model parametrelerini içeren tek bir pakettir. Ayrıca komut dosyaları, iletişim hatlarını açar ve yönetir, uzak API sunucularını başlatır, yürütülebilir dosyaları başlatır, eklentileri yükler ve kaldırır ve ROS yayıncılarını ve abonelerini kaydedebilir.

Simülatör in-the-loop konfigürasyon testleri için CoppeliaSim, simülasyonu simülatörün dışından harici ima edilen denetleyici algoritması ile kontrol etmek için bir yöntem de sunar. CoppeliaSim' de uzak API arayüzünde geliştirilen denetleyici, bir soket iletişimi kullanarak simülasyon sahnesi ile iletişim kurar. Uzak API sunucu hizmetleri ve uzak API istemcilerinden oluşur. İstemci tarafı C/C++, Python, Java, Matlab veya Urbi dillerinde geliştirilebilir, ayrıca uzaktan kontrol donanımı veya gerçek robotlar üzerinde çalışan herhangi bir yazılıma gömülür ve hızlı veri akışının yanı sıra uzaktan işlev aramasına da izin verir. İşlevler, herhangi bir yapılandırmaya uyum sağlamak için iki çağrı yöntemini destekler: engelleme, sunucu yanıt verene kadar bekleme veya engellememe, bir arabellekten akış komutlarını okuma. Eklentiler, standart LUA komutlarıyla bir simülasyon süreci sağlamak için API sunucusunu CoppeliaSim içinde uygular. Bu yüzden genellikle komut dosyalarıyla birlikte kullanılırlar. Öte yandan, hızlı hesaplama durumu (derlenmiş diller çoğu zaman komut dosyalarından daha hızlıdır) veya gerçek bir cihaza (örneğin gerçek robot) bir arayüze ihtiyaç duyulursa, eklentiler özel işlevler sağlar.

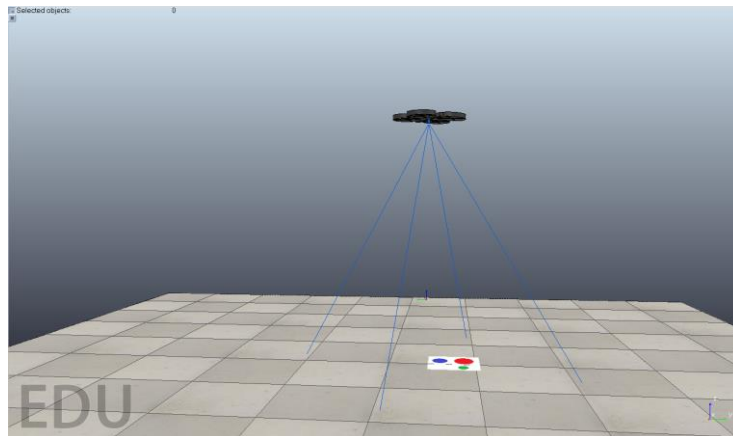
Simülasyon sahnesindeki nesneler arasındaki etkileşim, çeşitli hesaplama modları ile hesaplanır (Khalilov, 2016).

3.2.1.CoppeliaSim ve Matlab Haberleşmesi

CoppeliaSim, bir simülasyonun harici bir uygulamadan kontrol edilmesini sağlayan bir uzak API sunar. CoppeliaSim uzak API, Matlab programından çağrılabilen yaklaşık yüz fonksiyondan oluşur. Bu çalışma da komut ve kontrolör kısmı Matlab’da geliştirilmiş olup, çalıştırma ve fiziksel etkileşim kısmı CoppeliaSim’de oluşturulmuştur.

Simulink'te parça kontrolörü komutları ve durum verilerini alır, düzeltmeler yapar ve bu verileri kontrol karıştırma ve motor hız hesaplama bloğuna gönderir. Daha sonra tüm iletişim işlemlerinin yapıldığı Matlab S-Function'a hız verileri gönderilir. Matlab S-Function'da uzak API işlevleri ve Matlab işlevleri entegre edilmiştir. Uzak API işlevleri, gecikmeyi ve ağ yükünü büyük ölçüde azaltacak şekilde soket iletişimi aracılığıyla CoppeliaSim ile etkileşime giriyor. CoppeliaSim ile senkronizasyon da simülasyonun bu bölümünde yapılır. Matlab S-Function, motor hızlarını CoppeliaSim' e gönderir ve CoppeliaSim' den durum verilerini alır ve bu verileri Simulink'teki kontrolör ve düzeltme bloğuna gönderir. CoppeliaSim tarafında ana LUA komut dosyası, Matlab/Simulink'ten motor hızlarını alır ve bu değerleri uygun pervane modeli alt LUA komut dosyalarına gönderir. Bu arada, ana LUA komut dosyası, alt komut dosyalarından ivmeölçer ve jiroskop verilerini okur, bu verilere tamamlayıcı filtre uygular ve yuvarlanma ve eğim açılarını hesaplar. Öte yandan, döner kanatlı insansız hava aracının konumlarını, yönelimlerini, mutlak hızlarını ve açısal hızlarını Simulink/Matlab'a gönderir. İşlenen verilerin görselleştirilmesi hem Simulink/Matlab hem de CoppeliaSim uygulamasında yapılmaktadır(Khalilov, 2016).

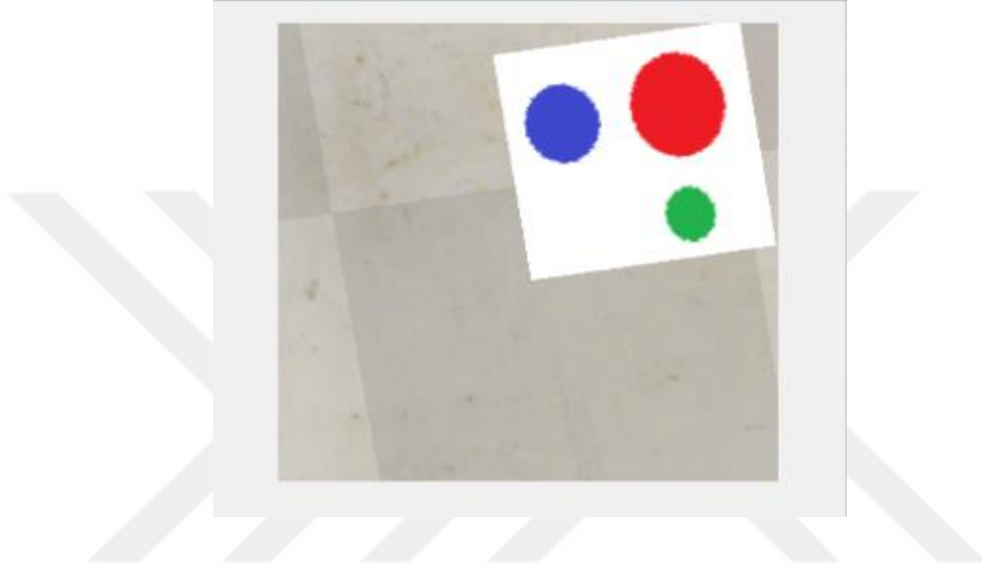
Tanımlanan senaryoya ait CoppeliaSim görüntüsü Şekil 3.2’de verilmiştir. Burada görüntü özneteliklerini içeren düzlemin eş düzlemlili (coplanar) olduğu belirtilmelidir. Tez çalışmasında döner kanatlı insansız hava aracı modeli olarak Robotics Toolbox içerisinde tanımlı olan araç modeli kullanılmıştır(Pounds vd., 2010).



Şekil 3.2. CoppeliaSim GS Senaryo Animasyon Ortamı

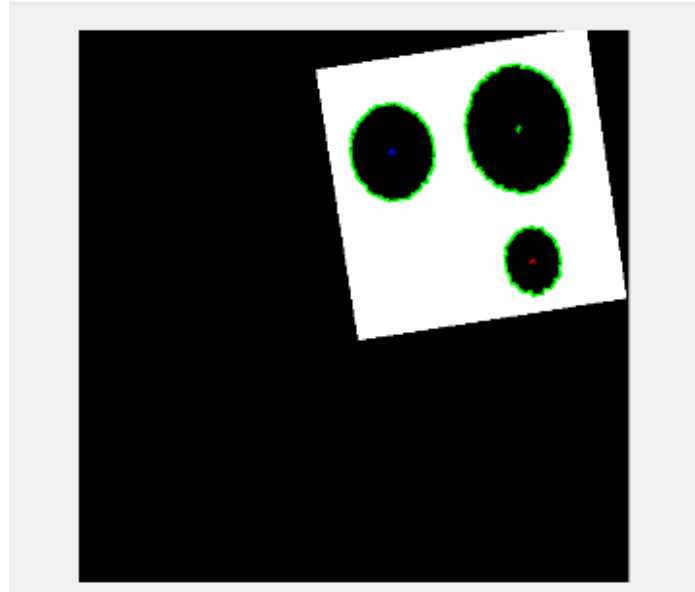
3.3.Öznitelik Çıkarımı

Önerilen sistemde öznitelikleri içeren görüntü İHA üzerine monte edilmiş ve merkezi İHA merkeziyle çakışık olan bir kamera yardımıyla alınarak bu görüntüye ait öznitelik çıkarımı yapılmıştır. Öznitelik çıkarımı için alınan görüntü Şekil 3.3’de verilmiştir. Bu görüntü renkli görüntüden gri görüntüye çevrilmiştir. Daha sonra bu görüntü eşikleme ile ikili görüntüye dönüştürülmüştür. Görüntüdeki üç dairenin çevresi çizdirilmiş ve merkezleri bulunarak farklı renklerde gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Önerilen Sistemin Orjinal Öznitelik Görüntüleri

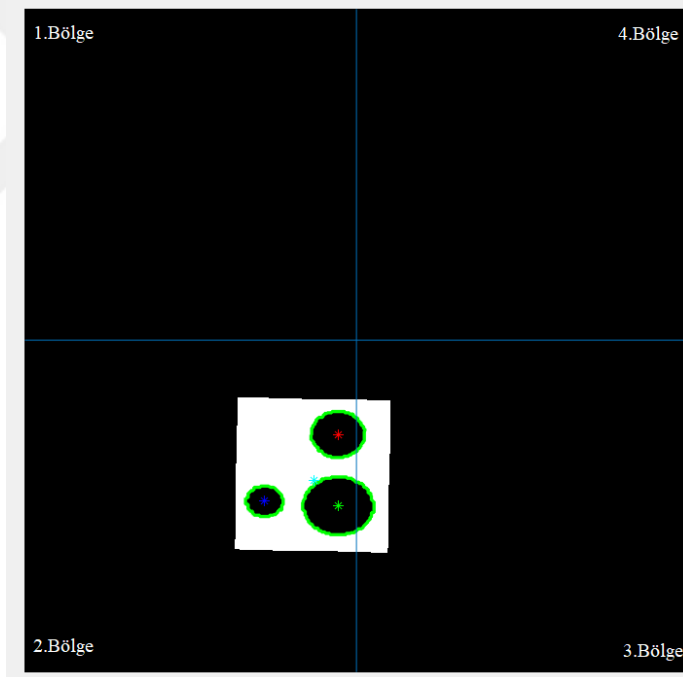
Şekil 3.4’ de önerilen sistemin özniteliklerine ait belirtilen ön işleme sonrası görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.4. Önerilen Sistemin Özniteliklerine Ait Ön İşleme Sonrası Görüntüleri

3.4. Veri Setinin Oluşturulması

Veri seti oluşturulurken bölüm 3.2’de bahsedilen öznitelik çıkarımı yapıldıktan sonra Şekil 3.5’ te görülen dairelere ait u-v görüntü merkezi, alan, oryantasyon, majör eksen uzunluğu, minor eksen uzunluğu ve yarıçap öznitelikleri bulunmuştur. Elde edilen bu öznitelikler sisteme ait YSA duruş kestirimci girişlerini oluşturmuştur. Her bir daireye ait 7 öznitelikten bir adımda toplam $1 \times (7 \times 3)$ ’lük bir giriş vektörü elde edilmiştir. Önerilen sistemde x , y ve z olmak üzere 1×3 ’lük bir konum vektörü seçilmiştir. α (roll), β (pitch) ve γ (yaw) olmak üzere 1×3 ’lük bir yönelim vektörü elde edilerek toplam 1×6 ’lık bir çıkış vektörü elde edilmiştir. Veri seti oluşturulurken döner kanatlı insansız hava aracının birçok farklı konum ve yönelimde hareketi sağlanması ve bu hareketleri yaparken kameranın görüntü alanı dışına çıkıp çıkmadığını da kontrol etmek için görüntü düzlemi 4 bölgeye ayrılmıştır. Böylece daha düzenli bir veri seti elde edilmiştir. Şekil 3.5’ te önerilen sistemin özniteliklerini içeren görüntü düzleminin 4 bölgeye ayrımı görülmektedir.



Şekil 3.5. Öznitelikleri İçeren Görüntü Düzleminin 4 Bölgeye Ayrımı

Önerilen sistemde yakınsamaya ilk adım olarak çıkış matrisi olarak x ve y sabit ve 0, z ise 0.77 m’den 1.8 m’ye karesel değişecek şekilde 1×3 ’lük bir konum vektörü seçilmiştir. α (roll), β (pitch) ve γ (yaw) sabit ve 0° olmak üzere 1×3 ’lük bir yönelim vektörü elde edilerek toplam 1×6 ’lık bir çıkış vektörü elde edilmiştir. Bu seçimlerle toplam 24 deneme yapılmıştır. Bu denemeler 6’şar olarak ayrılmıştır. Verilerin ilk 5’i eğitim verisi, kalan son bir tanesi ise test

verisi olarak seçilmiştir. Önerilen sistemde ilk aşama da her biri 106 adımda bitecek şekilde toplam 24 farklı deneme yapılmıştır.

Önerilen sistemde yakınsama için ikinci aşama olarak çıkış matrisi olarak x, y, z karesel ve değişken olmak üzere 1×3 'lük bir konum vektörü ve α, β ve γ sabit ve 0° olmak üzere 1×3 'lük bir yönelim vektörü elde edilerek toplam 1×6 'lık bir çıkış vektörü elde edilmiştir. Veri setinin oluşturulması için bu kısımda Şekil 3.5' te gösterilen bölgeler olmak üzere Bölge 1'den Bölge 2'ye, Bölge 1'den Bölge 3'e, Bölge 1'den Bölge 4'e, Bölge 2'den Bölge 3'e, Bölge 2'den Bölge 4'e ve Bölge 3'den Bölge 4'e ayrı ayrı 18'er denemeden her biri 106 adımda bitecek şekilde toplamda 108 adet deneme yapılmıştır. Yapılan denemeler 6'şar olarak ayrılmış ve ilk 5'i eğitim verisi olarak kalan biri ise test verisi olarak seçilmiştir.

Önerilen sistemde yakınsama için üçüncü aşama olarak çıkış matrisi olarak x, y, z karesel ve değişken olmak üzere 1×3 'lük bir konum vektörü ve α, β ve γ değişken olmak üzere 1×3 'lük bir yönelim vektörü elde edilerek toplam 1×6 'lık bir çıkış vektörü elde edilmiştir.

Önerilen sistemde her biri daha önce klasik KTGS ile elde edilmiş 106 adımda bitecek şekilde toplam 18 farklı deneme yapılmıştır. Verilerin ilk 5'i eğitim verisi, kalan son bir tanesi ise test verisi olarak seçilmiştir.

x, y , ve z konumlarına ait karesel ifadelerin tanımlanmasında Denklem 3.1, 3.2 ve 3.3'deki formüller kullanılmıştır.

$$u(i) = \frac{x_{hedef} - x_{başlangıç}}{\Delta^2} \quad (3.1)$$

$$v(i) = u \times (i^2) - x_{başlangıç} \quad (3.2)$$

$$u(i) = \frac{y_{hedef} - y_{başlangıç}}{\Delta^2} \quad (3.3)$$

$$v(i) = u \times (i^2) - y_{başlangıç} \quad (3.4)$$

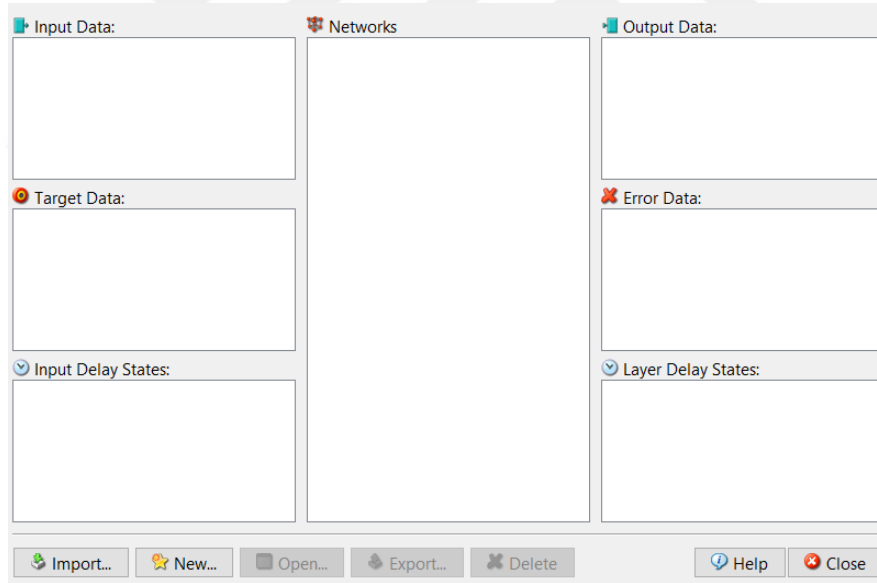
Denklem 3.1 ve Denklem 3.3' de verilen Δ ; döner kanatlı insansız hava aracının hedefe ulaşması için gereken 106 adımı ifade etmektedir. $x - y_{başlangıç}$; döner kanatlı insansız hava aracının $x-y-z$ konumlarının başlangıç noktası , $x - y_{hedef}$; döner kanatlı insansız hava aracının $x-y-z$ konumlarının bitiş noktaları olarak verilmiştir. Denklem 3.2 ve Denklem 3.4' de verilen i ; döner kanatlı insansız hava aracının konumlarının hesaplanması için toplam da 106 adım için 1. adımdan başlayarak 106 adıma kadar her bir adımı ifade etmektedir. v ise 106 adımın her bir adımında tekrar hesaplanan karesel konumları ifade etmektedir.

Önerilen sistemde toplam da 150 farklı deneme yapılmıştır. Giriş verisi olarak her deneme de 106×21 'lik bir giriş matrisi elde edilmiştir. 150 deneme 6'şar olarak 6'şar olarak ayrılmış ve ilk 5'i eğitim verisi olarak kalan biri ise test verisi olarak seçilmiştir. Böylece toplamda 25 farklı senaryo oluşturulmuştur. Toplamda 13125×21 'lik bir giriş matrisi oluşturulmuştur. Çıkış verisi olarak her deneme de 106×6 'lık bir çıkış matrisi elde edilmiştir. Böylece toplamda 25 farklı senaryodan 13125×6 'lık bir çıkış matrisi elde edilmiştir.

Önerilen sistemde YSA duruş kestirimci girişlerine ait oluşturulan veri setlerine ait ayrıntılı bilgi Ek-1 'de Tablo 3.1' de eğitim verileri ve Tablo 3.2'de test verileri olarak verilmiştir.

3.5. Neural Network Toolbox

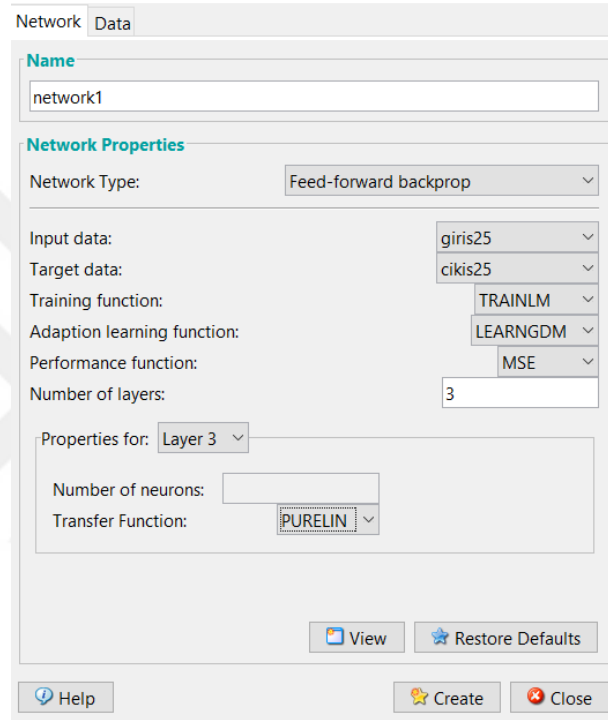
Bu çalışma da duruş kestirimi için kullanılan yapay sinir ağının Matlab ara yüzü Neural Network Toolbox kullanılmıştır. Neural Network Toolbox'ın çağırılması için komut ekranına nntool ifadesi yazılarak toolbox çağırılır. Şekil 3.6' da Neural Network grafiksel arayüzü verilmiştir.



Şekil 3.6. Neural Network Grafiksel Arayüzü

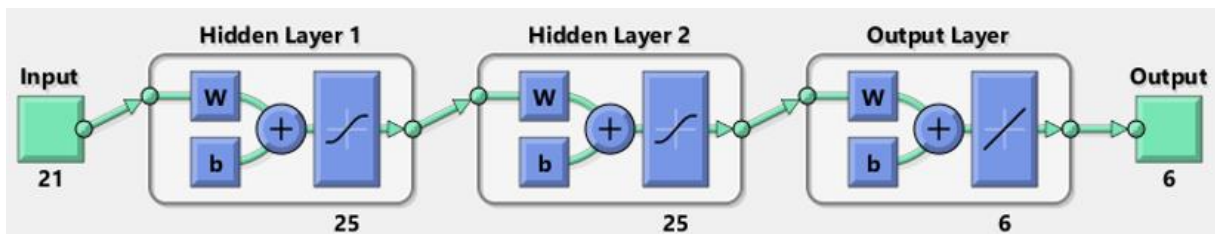
Yapay sinir ağının oluşturulmasına ilk adım olarak Import seçeneğinden giriş ve çıkış verilerinin ara yüze eklenmesi gereklidir. Import seçeneği seçildiğinde Import to Network/Data Manager arayüzü açılır. Giriş ve çıkış verileri "import from MATLAB workspace" seçeneği seçilerek workspace üzerinde bulunan vektör veya matrislerle ifade edilen giriş verileri input data, çıkış verileri target data seçilerek yüklenir. Daha sonra arayüzde sağ altta bulunan Import seçeneği seçilir. Ağı oluşturmak için New seçeneği seçilir.

Şekil 3.7’de Create Network or Data arayüzü görülmektedir. Burada input data kısmına girişi, target data kısmına çıkışı seçiyoruz. Trainig function için Levenberg-Marquart(TRAINLM), adaption learning function için LEARNNGDM seçilir. Bu çalışma da katman sayısı 3 seçilmiştir. İlk iki katman gizli katman olarak adlandırılır. İlk iki katman sayısı 25 ve transfer fonksiyonu TANSIG seçilmiştir. Çıkış katmanına ait katman sayısına müdahale izni verilmez ve transfer fonksiyonu PURELIN olarak seçilir. Daha sonra Create ile network oluşturulur.



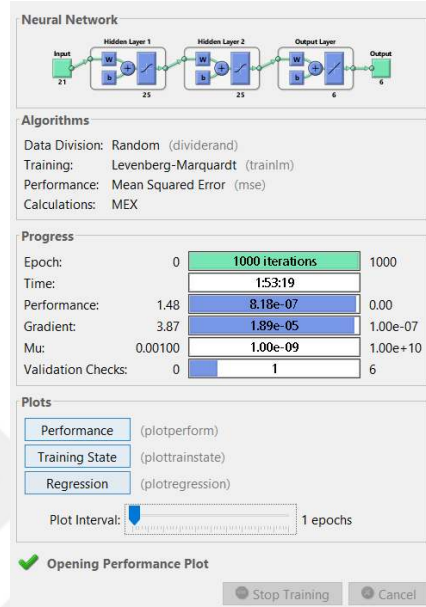
Şekil 3.7. Create Network or Data

YSA duruş kestirimci girişleri ve çıkışları 13125×21 'lik giriş matrisi olarak Neural Network Toolbox'a giriş verisi olarak, 13125×6 'lık çıkış matrisi olarak Neural Network Toolbox'a çıkış verisi olarak verilmiştir. Şekil 3.8' de önerilen KTGS sisteminde duruş kestirimi için Bölüm 3.4'de oluşturulan veri setleri ile elde edilen yapay sinir ağı yapısı gösterilmiştir.

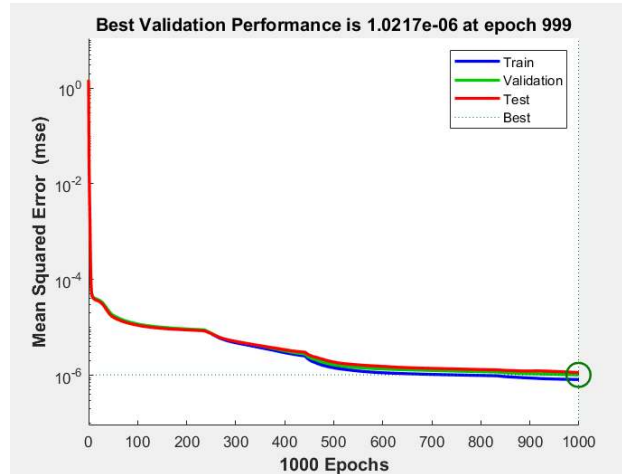


Şekil 3.8. Yapay Sinir Ağı Yapısı

Şekil 3.9’da Ek-1 de bulunan Tablo 3.1’deki eğitim verilerinin eğitilmesine ait arayüz görülmektedir. Bu ara yüzde yakınsamanın kaç saniye de bittiği görülebilir ve eğitim verilerine ait grafikler çizdirilebilir. Şekil 3.10’da ise bu eğitimin sonucu olarak yapay sinir ağının yakınsama performans grafiği görülmektedir.

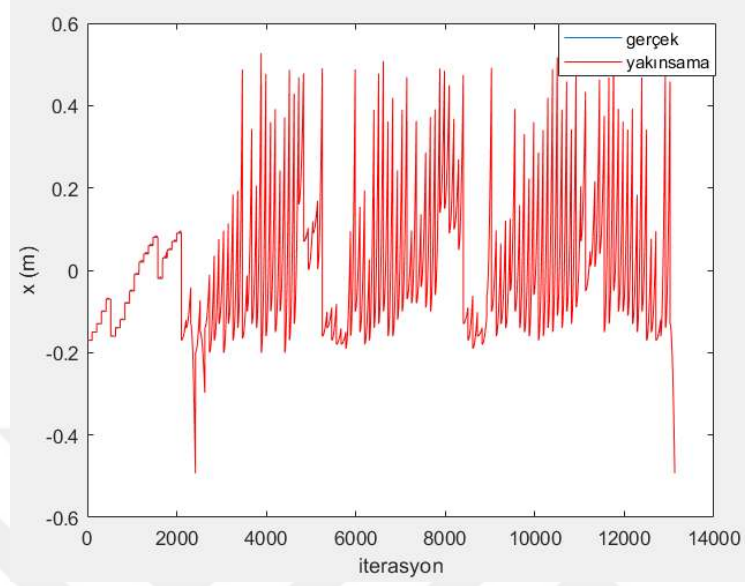


3.9. Neural Network’de Eğitim Verilerinin Test Edilmesi

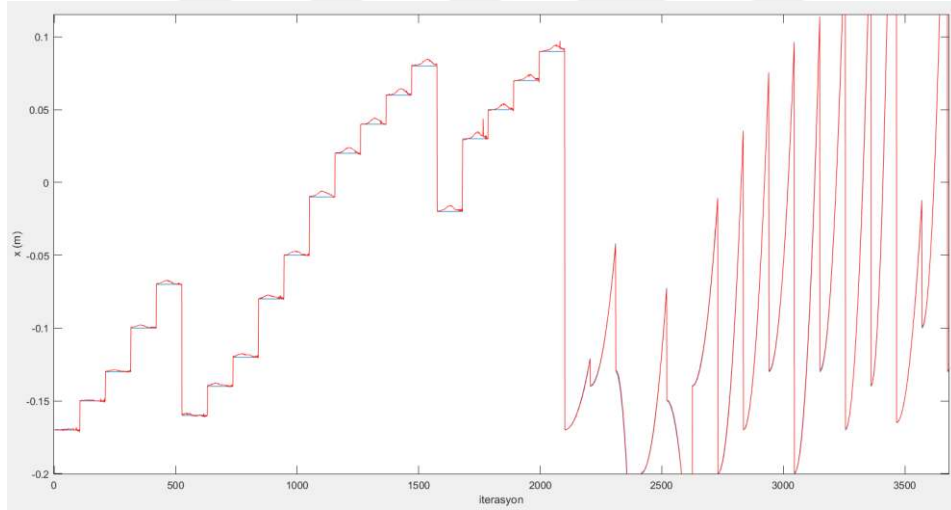


3.10. Neural Network Performans Eğrisi

Şekil 3.8’deki önerilen KTGS sisteminde duruş kestirimi için oluşturulan yapay sinir ağının x konumlarına yakınsama grafiği Şekil 3.11’de verilmiştir. Grafikte mavi eğri gerçek x konumlarını verirken kırmızı eğri yapay sinir ağının yakınsama eğrisini göstermektedir.



a)

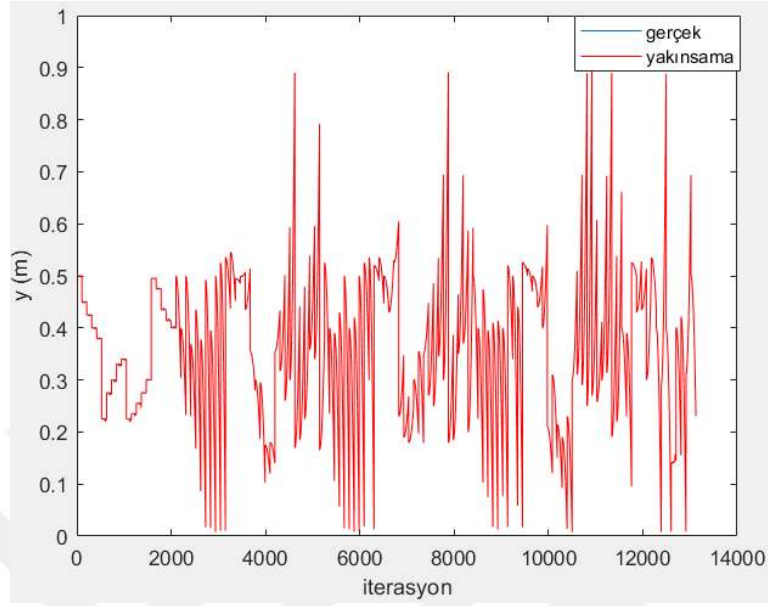


b)

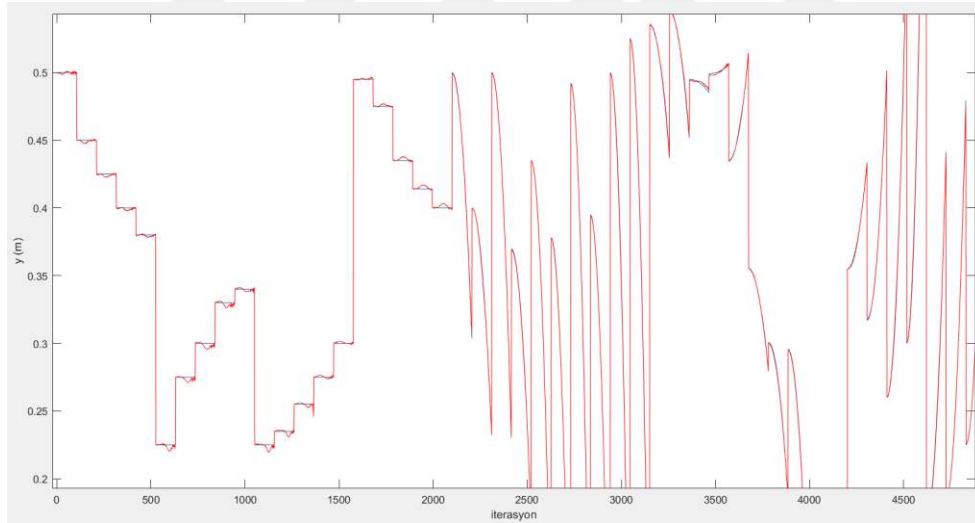
Şekil 3.11. Yapay Sinir Ağının x Konumlarına Yakınsaması

a) Tüm veriler için yakınsama **b)** 0-3700 veri için yakınsamanın yakınlaştırılması

Şekil 3.8'deki önerilen KTGS sisteminde duruş kestirimi için oluşturulan yapay sinir ağının y konumlarına yakınsama grafiği Şekil 3.12'de verilmiştir. Grafik de mavi eğri gerçek konumları verirken kırmızı eğri yapay sinir ağının yakınsama eğrisini göstermektedir.



a)

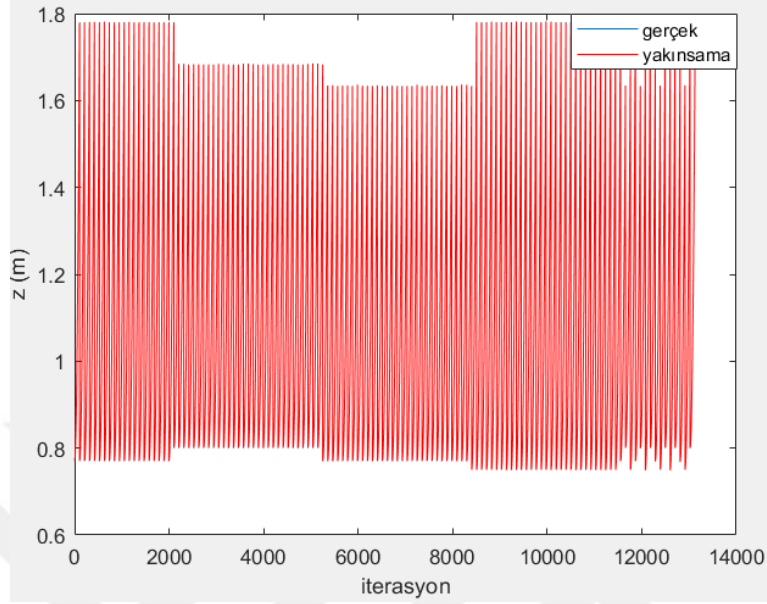


b)

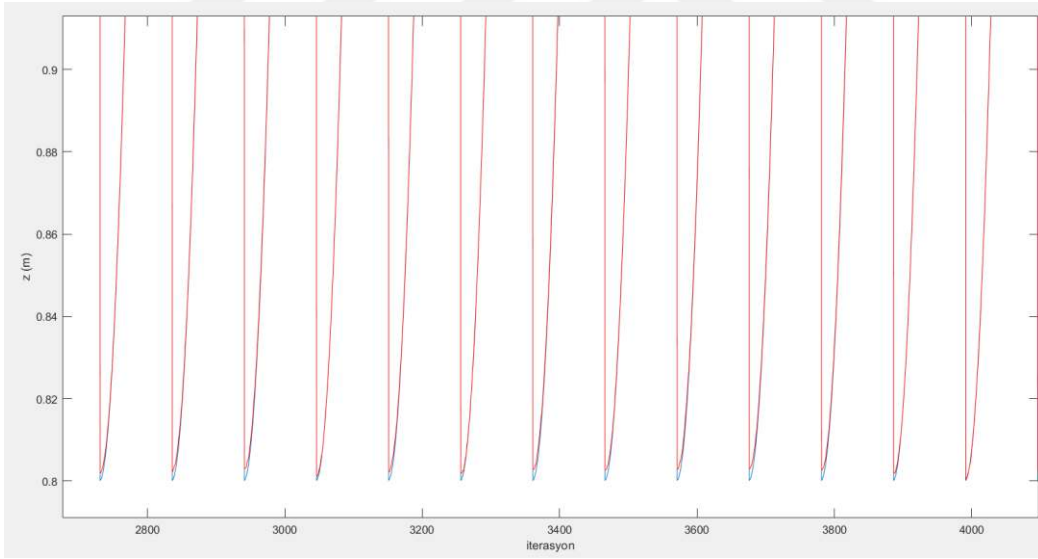
Şekil 3.12. Yapay Sinir Ağının y Konumlarına Yakınsaması

a) Tüm veriler için yakınsama b) 0-4700 veri için yakınsamanın yakınlaştırılması

Şekil 3.8’deki önerilen KTGS sisteminde duruş kestirimi için oluşturulan yapay sinir ağının z konumlarına yakınsama grafiği Şekil 3.13’de verilmiştir. Grafik de mavi eğri gerçek konumları verirken kırmızı eğri yapay sinir ağının yakınsama eğrisini göstermektedir.



a)

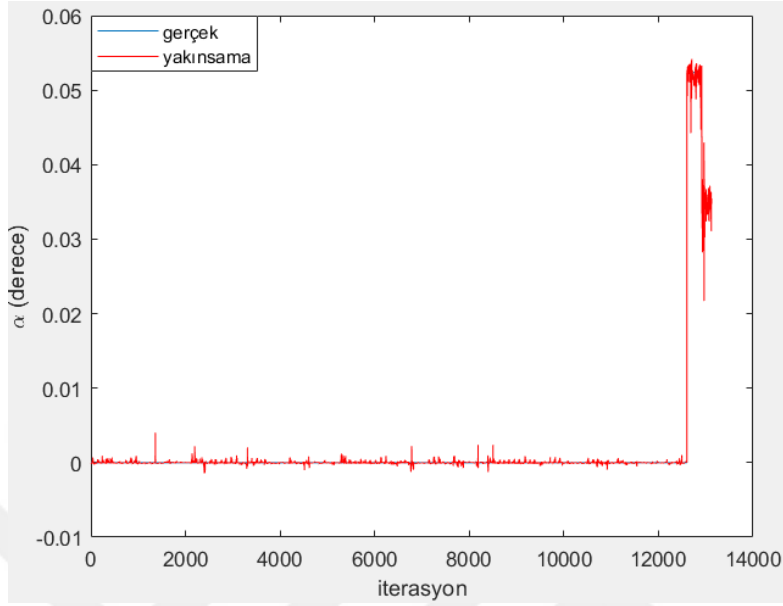


b)

Şekil 3.13. Yapay Sinir Ağının z Konumlarına Yakınsaması

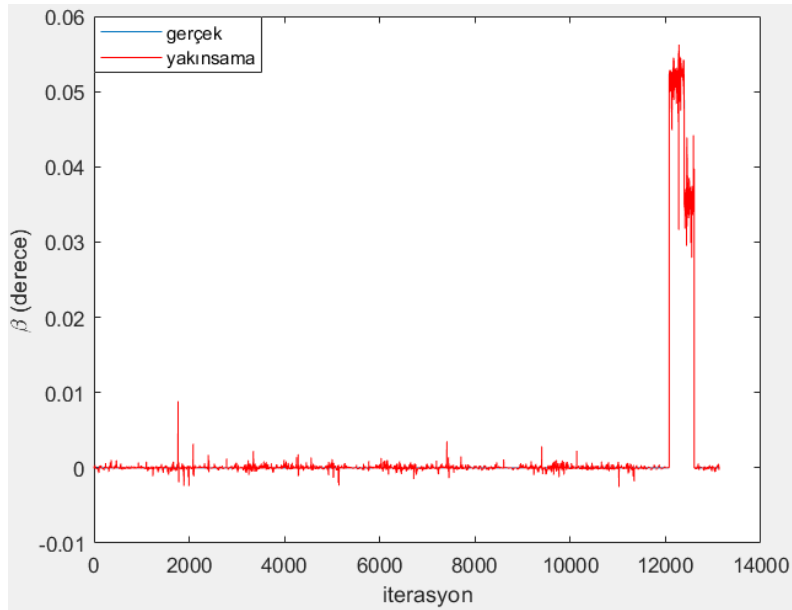
a) Tüm veriler için yakınsama **b)** 0-4200 veri için yakınsamanın yakınlaştırılması

Şekil 3.8’deki yapay sinir ağının α (roll açısı) yönelime yakınsama grafiği Şekil 3.14’de verilmiştir. Grafikde mavi eğri gerçek yönelimleri verirken kırmızı eğri yapay sinir ağının yakınsama eğrisini göstermektedir.



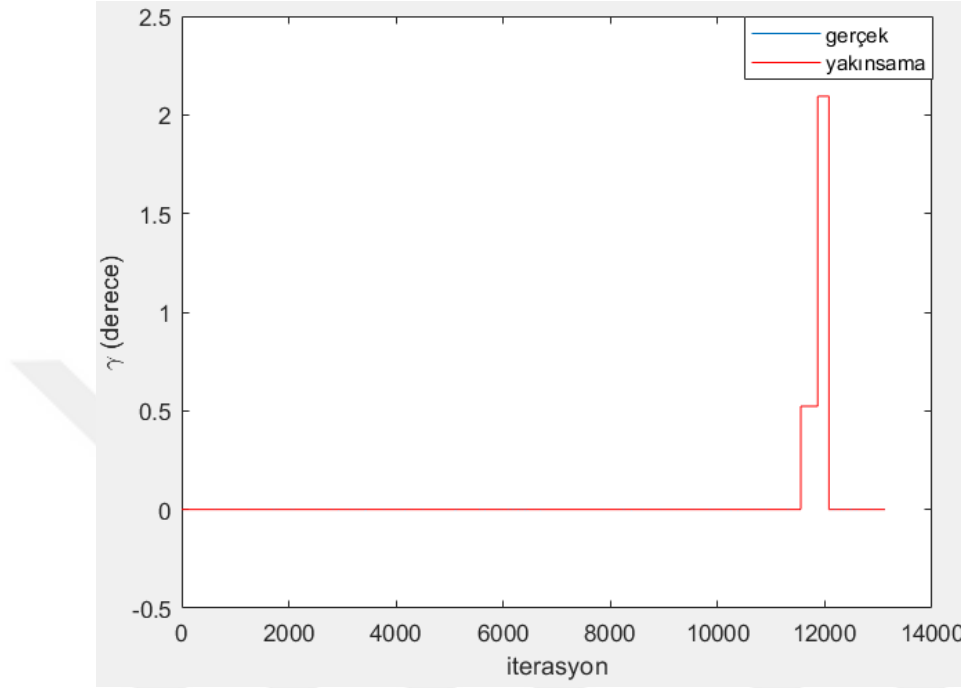
Şekil 3.14. Yapay Sinir Ağının α Yönelimine Yakınsaması

Şekil 3.8’deki yapay sinir ağının β (pitch açısı) yönelime yakınsama grafiği Şekil 3.15’de verilmiştir. Grafik de mavi eğri gerçek yönelimleri verirken kırmızı eğri yapay sinir ağının yakınsama eğrisini göstermektedir.



Şekil 3.15. Yapay Sinir Ağının β Yönelimine Yakınsaması

Şekil 3.8’deki yapay sinir ağının γ (yaw açısı) yönelimine yakınsama grafiği Şekil 3.16’da verilmiştir. Grafikde mavi eğri gerçek yönelimi verirken kırmızı eğri yapay sinir ağının yakınsama eğrisini göstermektedir.



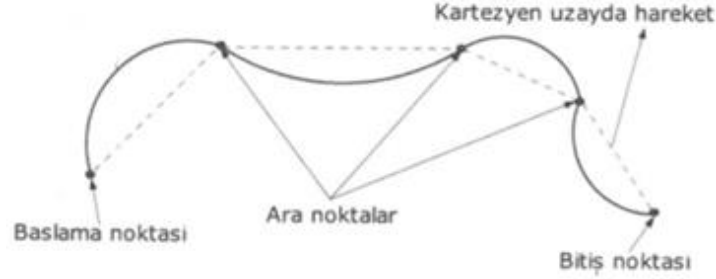
Şekil 3.16. Yapay Sinir Ağının γ Yönelimine Yakınsaması

3.6. YSA ile Öznitelik Kestirimi ve Görüş Alanı Koruması

Tez çalışmasında önerilen sistemde klasik KTGS’den farklı olarak başlangıç ve bitiş özniteliklerine bağlı olarak duruş kestirimleri yapıldıktan sonra yörünge planlaması yapılarak yörünge tanımlanmaktadır. Devamında tanımlanan bu yörünge için önerilen sistemdeki görüş alanı koruyucu ile planlanan yörünge için döner kanatlı insansız hava aracının üzerine monte edilmiş kameranın, öznitelikleri görecek şekilde görüntü düzleminde kalıp kalmadığı kontrol edilmektedir.

Yörünge; döner kanatlı insansız hava aracının 3B dünyada izlediği yol olarak tanımlanabilir. Yörünge Planlaması ise döner kanatlı insansız hava aracının verilen belirli noktalardan geçmesini sağlamaktır.

Şekil 3.17’de başlangıç ve bitiş noktaları belirli bir senaryo için yörünge planlaması görülmektedir.



Şekil 3.17. Örnek Yörünge Planlama

Kaynak: (Bingül ve Küçük, 2009)

Eklem uzayında yörünge planlaması yaparken başlangıç ve bitiş değerlerini verip araya 3. Dereceden bir polinom uydurulmaktadır. Başlangıç hızları sıfır kabul edilirse;

$$\theta(0) = \theta_0 \quad (3.5)$$

$$\theta(t_f) = \theta_f \quad (3.6)$$

$$\dot{\theta}(0) = 0 \quad (3.7)$$

$$\dot{\theta}(t_f) = 0 \quad (3.8)$$

t_0 ; başlangıç anı, t_f ; bitiş anı, θ_0 ; döner kanatlı insansız hava aracının başlangıç konum ve yönelimleri, θ_f ; döner kanatlı insansız hava aracının hedef konum ve yönelimlerini ifade etmektedir.

$$\theta(t) = s_0 + s_1 t + s_2 t^2 + s_3 t^3 \quad (3.9)$$

$$\dot{\theta}(t) = s_1 + 2 s_2 t + 3 s_3 t^2 \quad (3.10)$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2 s_2 + 6 s_3 t \quad (3.11)$$

Yukarıdaki denklemlerde kullanılan t ifadesi zamanı belirtmektedir. t ; 0'dan 0.048 adımlarla 5 saniyeye ulaşacak şekilde seçilmiştir. $\theta(t)$; döner kanatlı insansız hava aracının konumu, $\dot{\theta}(t)$; döner kanatlı insansız hava aracının hızını ve $\ddot{\theta}(t)$ döner kanatlı insansız hava aracının ivmesini verir. Denklem 3.7'deki katsayılar aşağıdaki gibi elde edilir(Bingöl ve Küçük, 2009);

$$s_0 = \theta_0 \quad (3.12)$$

$$s_1 = 0 \quad (3.13)$$

$$s_2 = -\frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0) \quad (3.14)$$

$$s_3 = -\frac{2}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0) \quad (3.15)$$

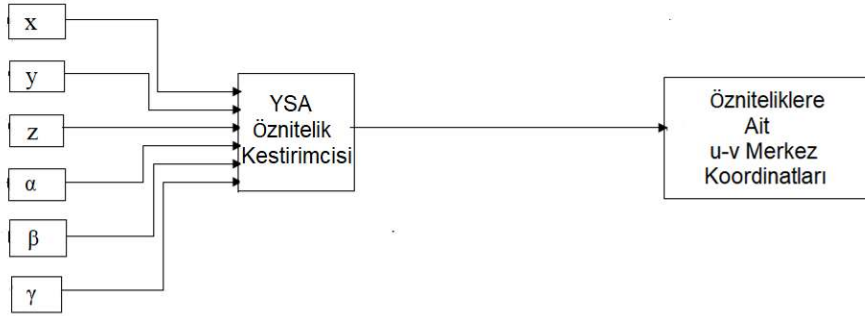
Çalışmanın bu kısmında Ek-1'deki Tablo 3.1'den eğitim verileri içerisinde θ_0 için veri seti 16'nın başlangıç konum ve yönelimleri, θ_f için veri seti 16'nın bitiş konum ve yönelimleri verilmiştir.

$$\theta_0 = \begin{bmatrix} 0.0600 \\ 0.2750 \\ 0.7701 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\theta_f = \begin{bmatrix} 0.0600 \\ 0.2750 \\ 1.7800 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

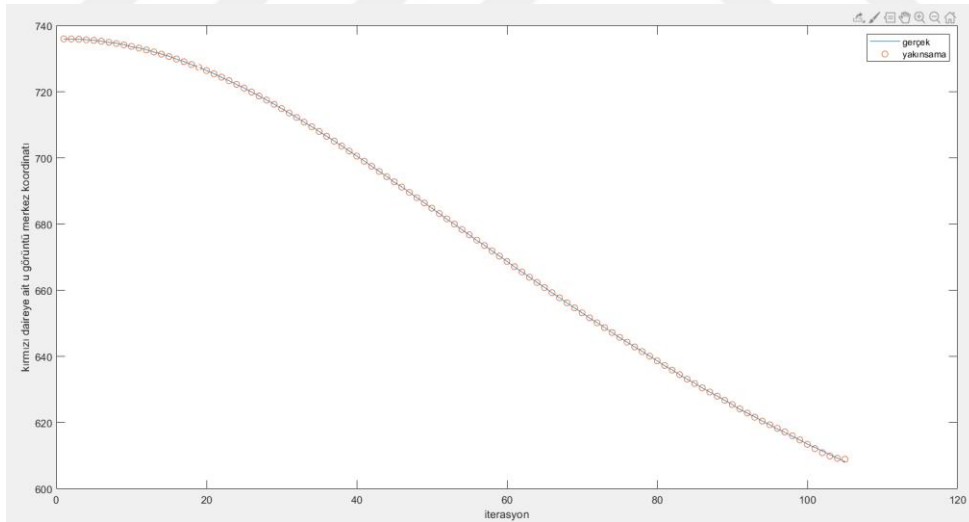
Yörünge planlama yapılırken YSA öznitelik kestirimci girişine Denklem 3.9' da hesaplanan $\theta(t)$ verilmiştir. YSA öznitelik kestirimci çıkışına ise Ek-1' deki Tablo 3.1'den örnek olarak seçilen eğitim veri seti 16'nın içerisindeki üç daireye ait $u-v$ görüntü merkezleri seçilmiştir. Böylece yörünge planlama ile özniteliklere ait merkez kestirimi yapılmaktadır. Yörünge planlamaya ait blok diyagramı Şekil 3.18'de verilmiştir. Yörünge planlama ile YSA'nın veri seti 16'daki $u-v$ görüntü merkez koordinatlarına yakınsamaları Şekil 3.19-Şekil 3.24'de görülmektedir. Şekil 3.3' de gösterilen kırmızı daireye ait $u-v$ görüntü merkezlerine yakınsama hataları Ortalama Kare Hatası (Mean Squared Error (MSE)) ile ifade edilirse sırasıyla 0.0131, 0.0174'dir. Şekil 3.3' de gösterilen mavi daireye ait $u-v$ görüntü merkezlerine yakınsama hataları (MSE) sırasıyla 0.0144, 0.0036'dir. Şekil 3.3' de gösterilen yeşil daireye ait

$u-v$ görüntü merkezlerine yakınsama hataları (MSE) sırasıyla 0.0069, 0.0190 olarak hesaplanmıştır. Böylece yörünge planlama ile YSA'nın veri seti 16'daki $u-v$ görüntü merkez koordinatlarına başarılı bir yakınsama sağladığı görülmektedir.



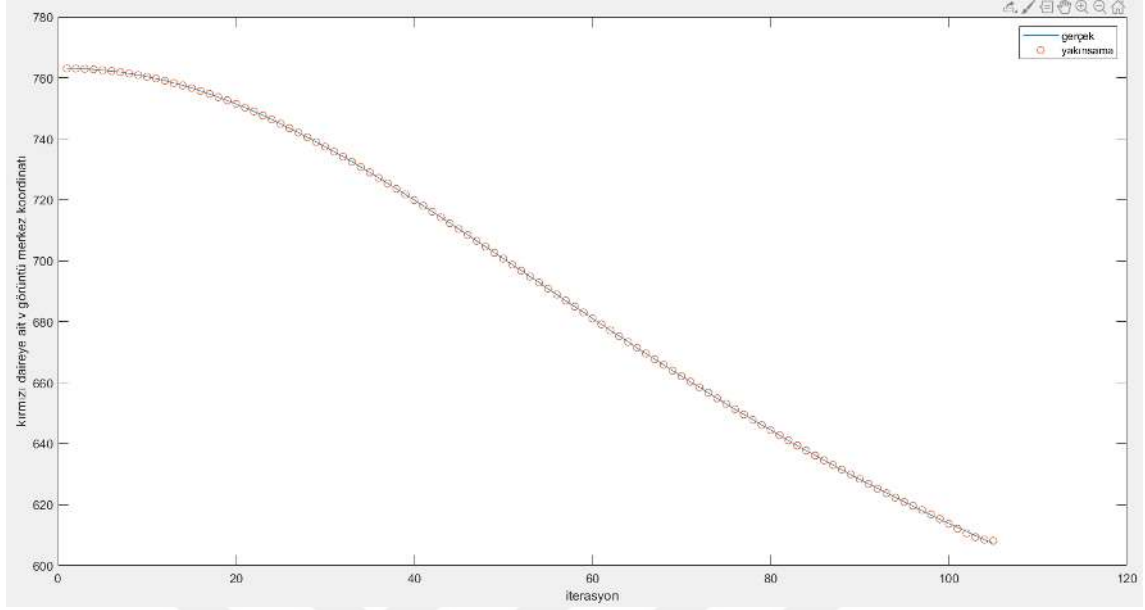
Şekil 3.18. Yörünge Planlama Blok Diyagramı

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3' deki kırmızı daireye ait u görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.19' da görülmektedir.



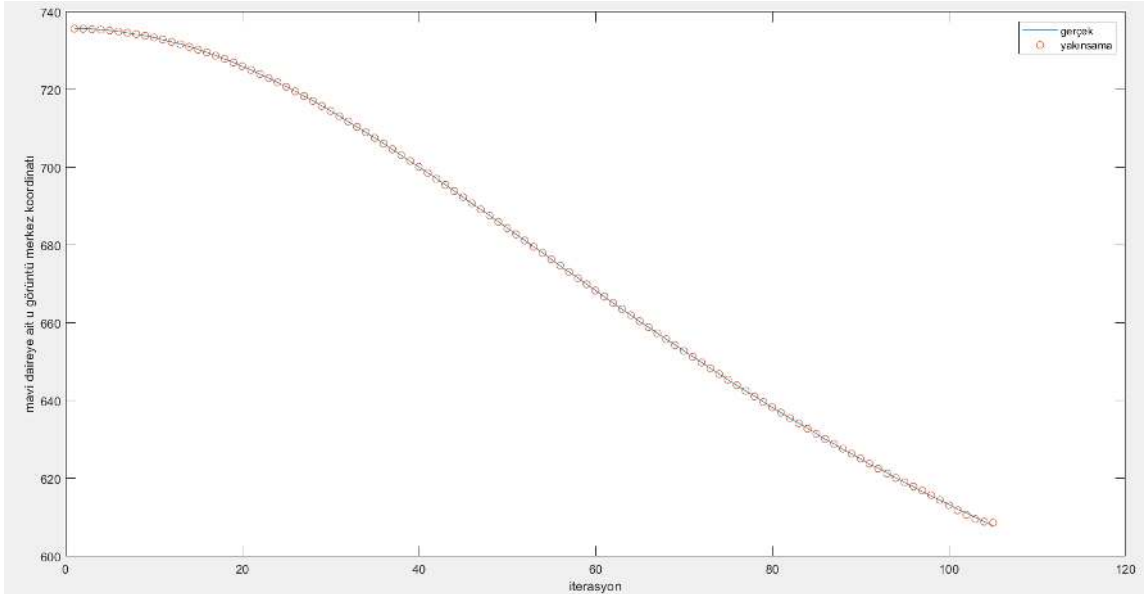
Şekil 3.19. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3' deki Kırmızı Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3’ deki kırmızı daireye ait v görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.20’ de görülmektedir.



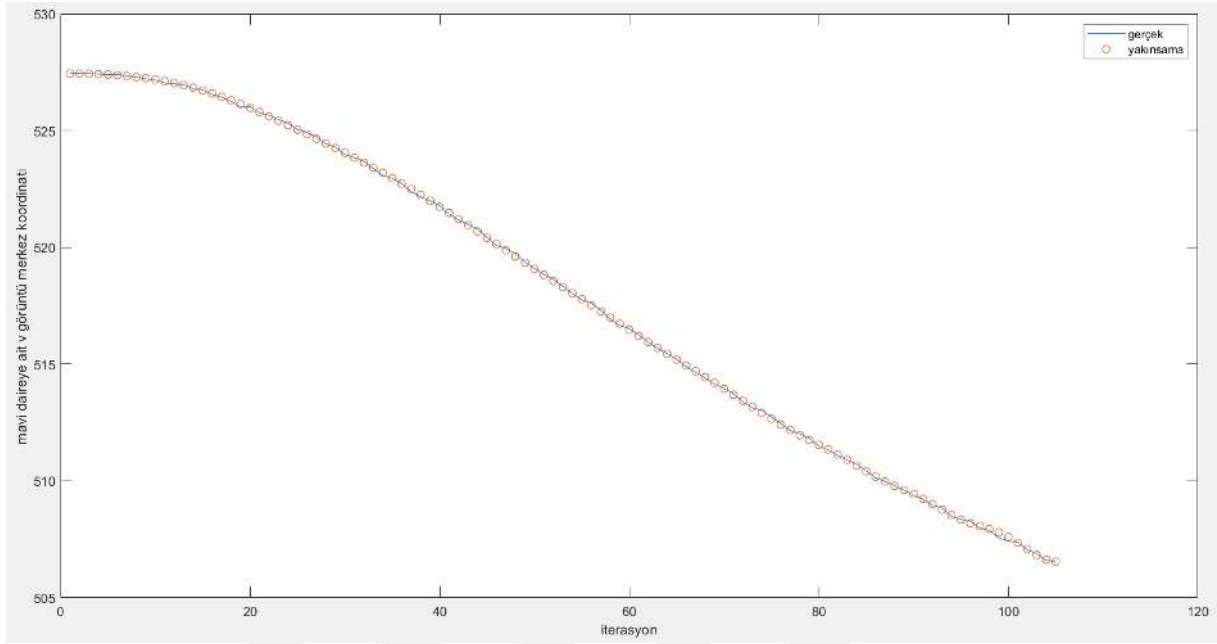
Şekil 3.20. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Kırmızı Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3’ deki mavi daireye ait u görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.21’ de görülmektedir.



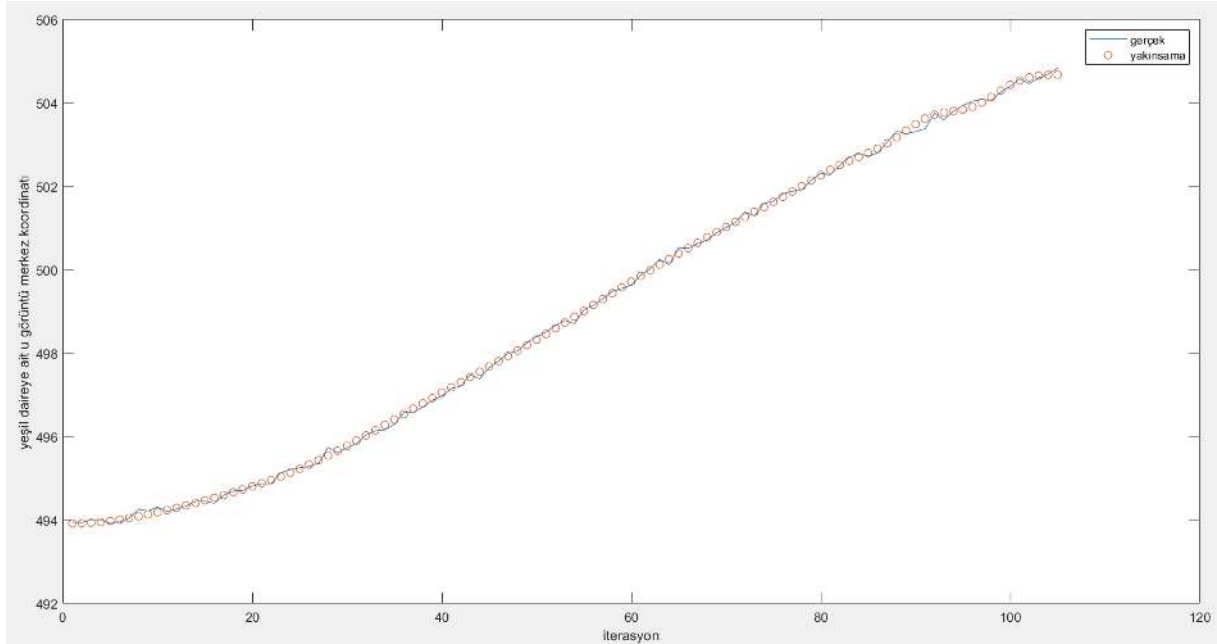
Şekil 3.21. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Mavi Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3’ deki mavi daireye ait v görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.22’ de görülmektedir.



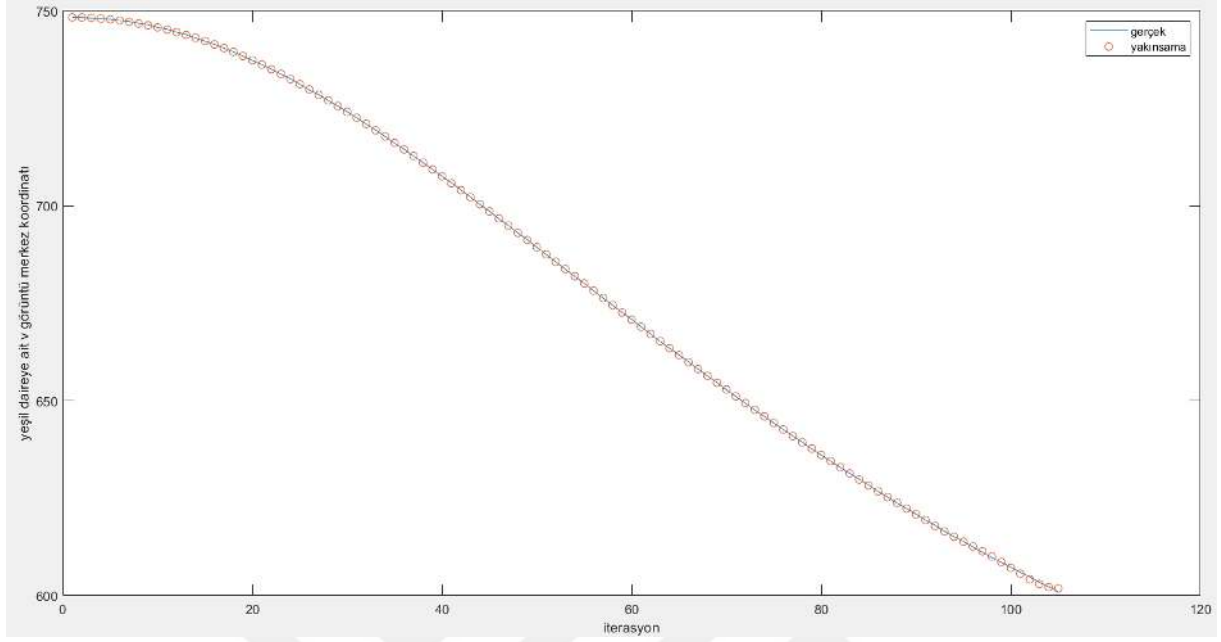
Şekil 3.22. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Mavi Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3’ deki yeşil daireye ait u görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.23’ de görülmektedir.



Şekil 3.23. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Yeşil Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3’ deki yeşil daireye ait v görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.24’ de görülmektedir.



Şekil 3.24. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Yeşil Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

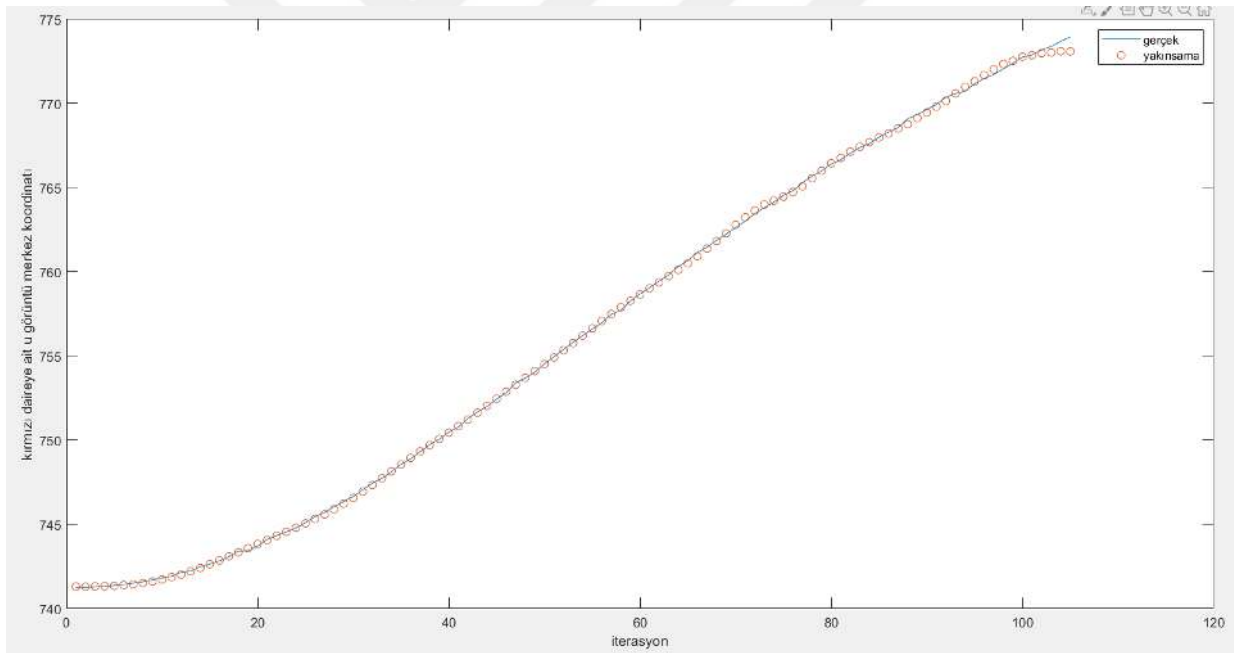
Çalışmanın bu kısmında Ek-1’deki Tablo 3.2’den test verileri içerisinde θ_0 için veri seti 132’nin başlangıç konum ve yönelimleri, θ_f için veri seti 132’nin bitiş konum ve yönelimleri verilmiştir.

$$\theta_0 = \begin{bmatrix} 0.0600 \\ 0.2500 \\ 0.7501 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\theta_f = \begin{bmatrix} 0.2857 \\ 0.7357 \\ 1.7803 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

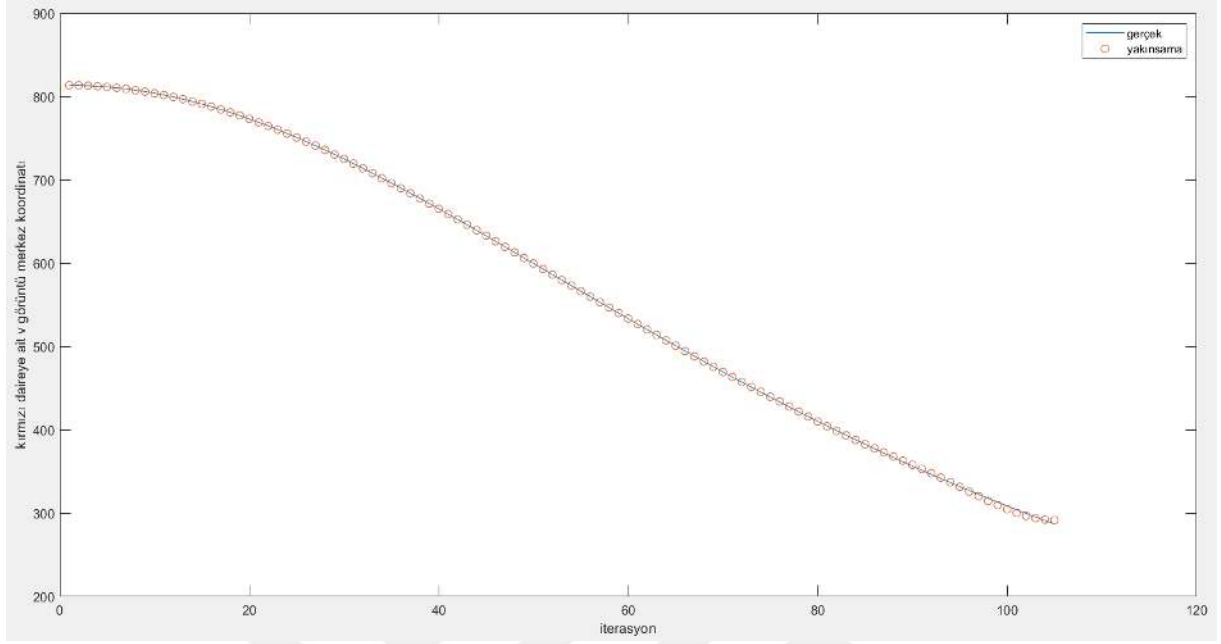
Yörünge planlama yapılırken YSA duruş kestirimci girişine Denklem 3.9' da hesaplanan $\theta(t)$ verilmiştir. YSA duruş kestirimci çıkışına ise Ek-1' deki Tablo 3.2'den örnek olarak seçilen test veri seti 132'nin içerisindeki üç daireye ait $u-v$ görüntü merkezleri seçilmiştir. Yörünge planlama ile YSA'nın veri seti 132'deki $u-v$ görüntü merkez koordinatlarına yakınsamaları Şekil 3.25-Şekil 3.30'da görülmektedir. Şekil 3.3' de gösterilen kırmızı daireye ait $u-v$ görüntü merkezlerine yakınsama hataları Ortalama Kare Hatası (Mean Squared Error (MSE) ile ifade edilirse sırasıyla 0.0240, 1.0197'dir. Şekil 3.3' de gösterilen mavi daireye ait $u-v$ görüntü merkezlerine yakınsama hataları (MSE) sırasıyla 0.0309, 0.5449'dir. Şekil 3.3' de gösterilen yeşil daireye ait $u-v$ görüntü merkezlerine yakınsama hataları (MSE) sırasıyla 0.1922, 1.0036 olarak hesaplanmıştır. Böylece yörünge planlama ile YSA'nın veri seti 132'deki $u-v$ görüntü merkez koordinatlarına başarılı bir yakınsama sağladığı görülmektedir.

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3' deki kırmızı daireye ait u görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.25' de görülmektedir.



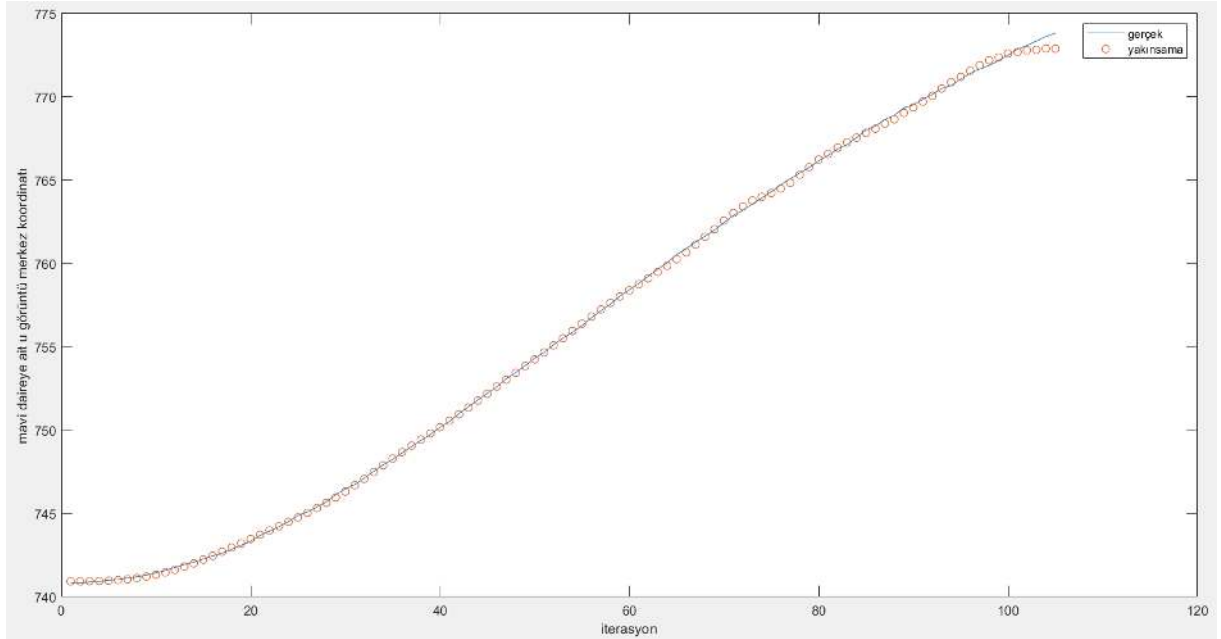
Şekil 3.25. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3' deki Kırmızı Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3’ deki kırmızı daireye ait v görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.26’ da görülmektedir.



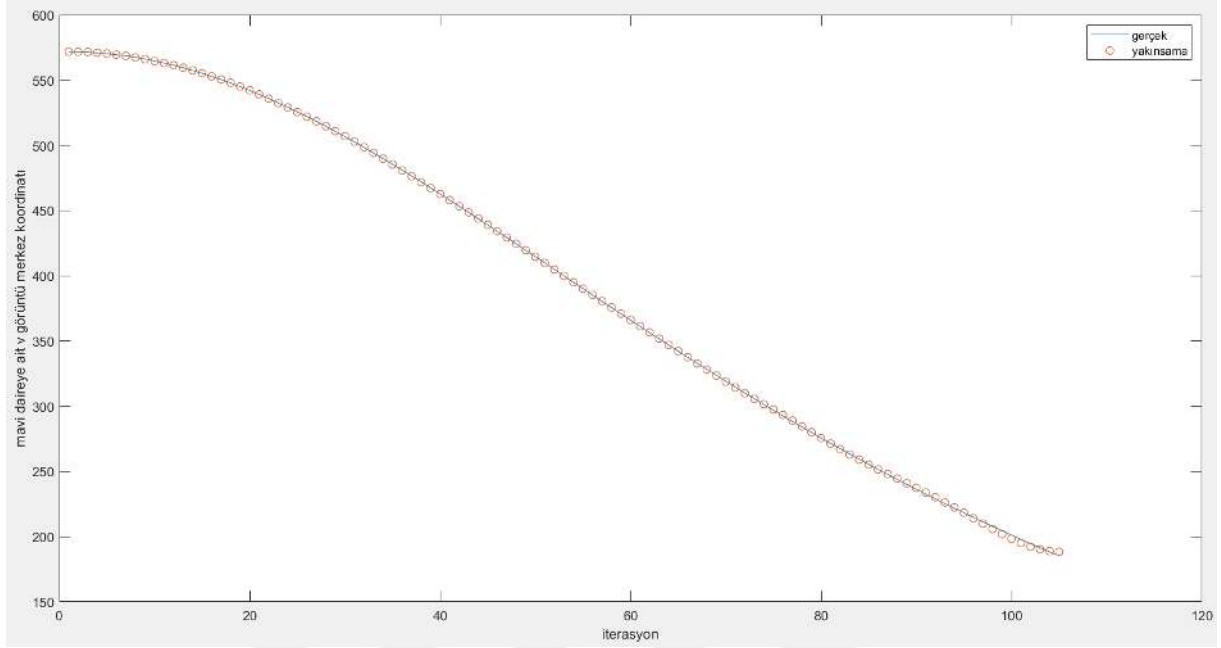
Şekil 3.26. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Kırmızı Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3’ deki mavi daireye ait u görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.27’ de görülmektedir.



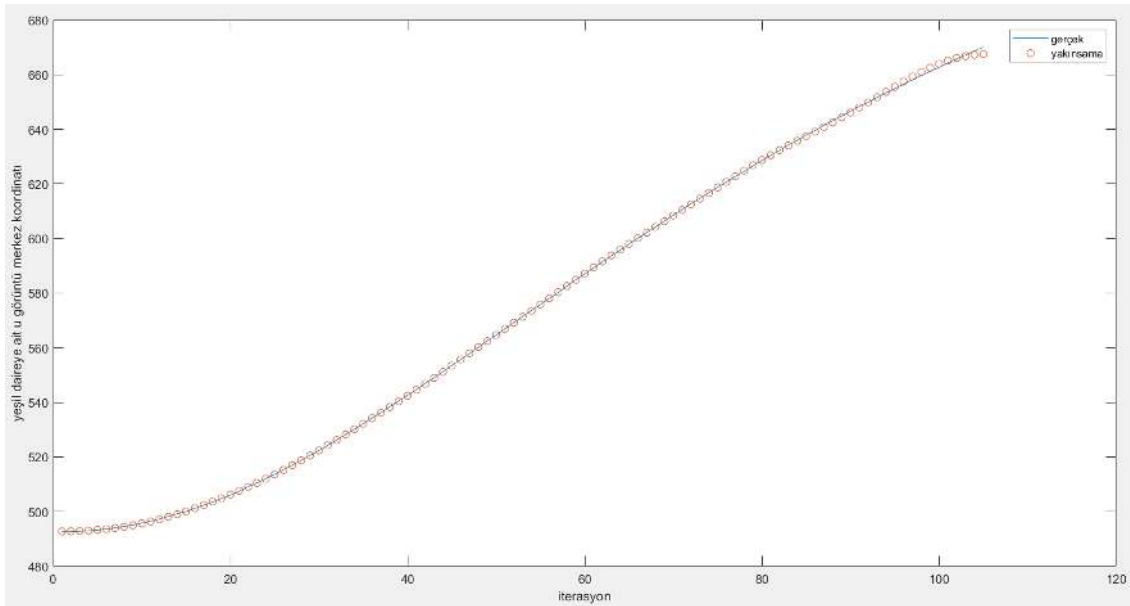
Şekil 3.27. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Mavi Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3’ deki mavi daireye ait v görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.28’ de görülmektedir.



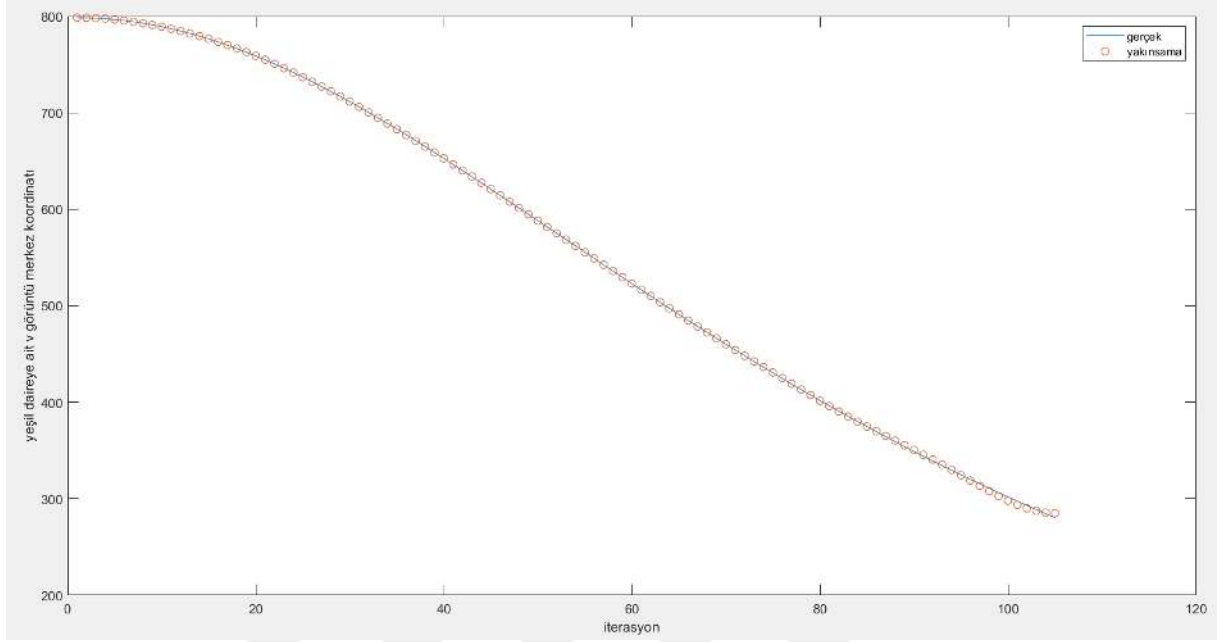
Şekil 3.28. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Mavi Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3’ deki yeşil daireye ait u görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.29’ da görülmektedir.



Şekil 3.29. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Yeşil Daireye Ait u Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

Yörünge Planlama ile Şekil 3.3’ deki yeşil daireye ait v görüntü merkez koordinatlarına ait yakınsama Şekil 3.30’ da görülmektedir.

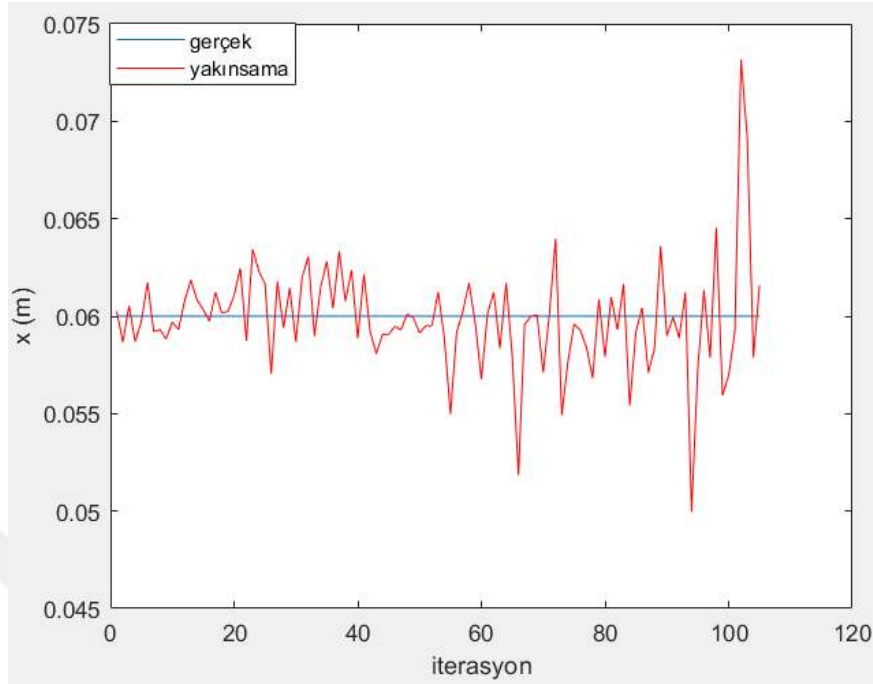


Şekil 3.30. Yörünge Planlama İle Şekil 3.3’ deki Yeşil Daireye Ait v Görüntü Merkez Koordinatlarına Ait Yakınsama

3.7.YSA’nın Duruş Kestirimci Girişlerine Rastgele Gürültü Eklenmesi

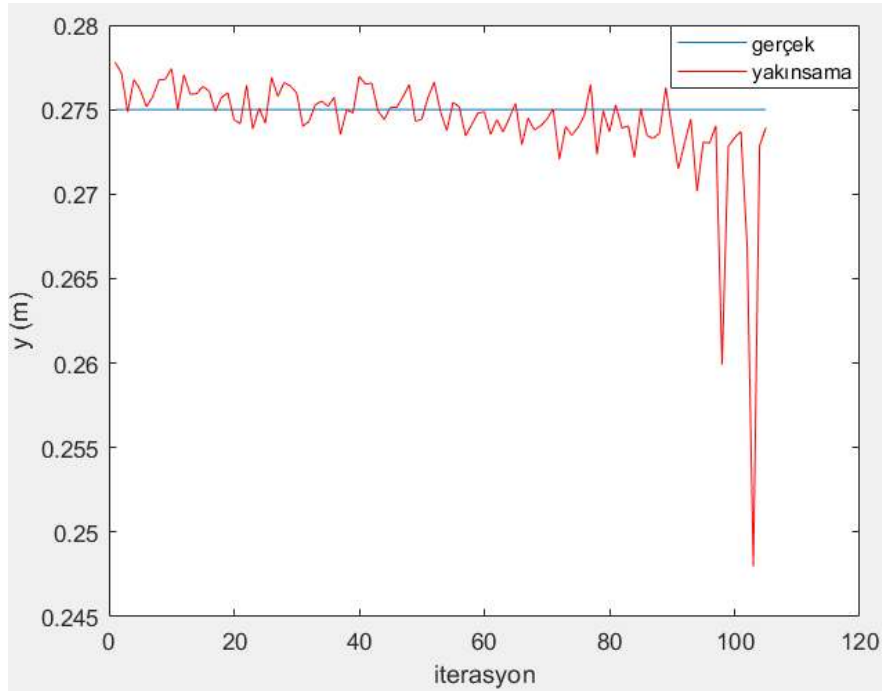
Çalışmanın bu bölümünde Ek-1’deki Tablo 3.1’ deki eğitim verileri içerisinde seçilen veri seti 16’nın YSA duruş kestirimci girişlerine rastgele %2’lik gürültü eklenmiş ve yapay sinir ağının döner kanatlı insansız hava aracının konum ve yönelimlerine yakınsama başarımı test edilmiştir. Yapılan çalışmada x konumuna ait yakınsama hatası (MSE) $7.5475e-06$, y konumuna ait yakınsama hatası $1.1640e-05$, z konumuna ait yakınsama hatası 0.1843 , α yönelimine ait yakınsama hatası $3.4961e-06$, β yönelimine ait yakınsama hatası $8.6044e-08$, γ yönelimine ait yakınsama hatası $1.6130e-11$ olarak bulunmuştur. Döner kanatlı insansız hava aracının konum ve yönelimlerine ait yakınsama grafikleri Şekil 3.31-Şekil 3.37’ de verilmiştir.

Döner kanatlı insansız hava aracının x konumuna ait yakınsama grafiği Şekil 3.31’de verilmiştir.



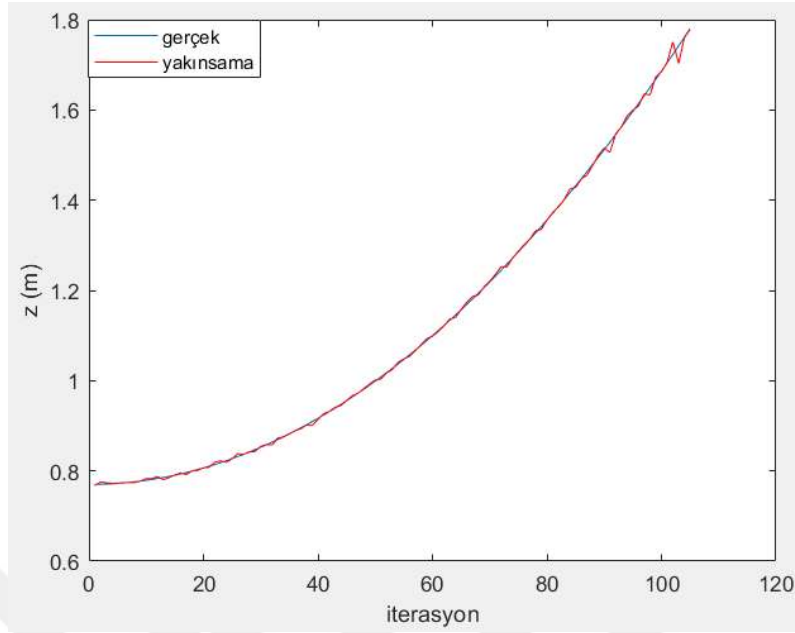
Şekil 3.31. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının x Konumuna Ait Yakınsama

Döner kanatlı insansız hava aracının y konumuna ait yakınsama grafiği Şekil 3.32’de verilmiştir.



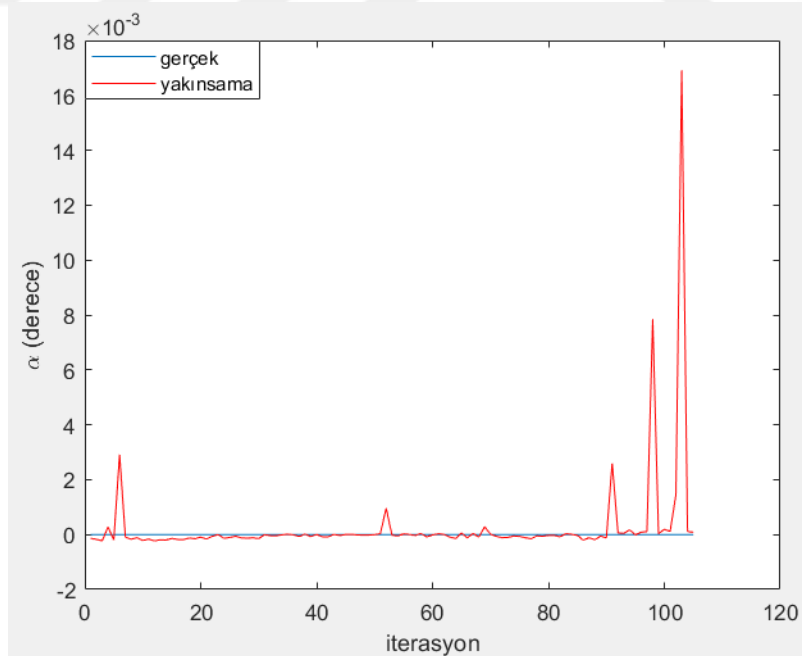
Şekil 3.32. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının y Konumuna Ait Yakınsama

Döner kanatlı insansız hava aracının z konumuna ait yakınsama grafiği Şekil 3.33’de verilmiştir.



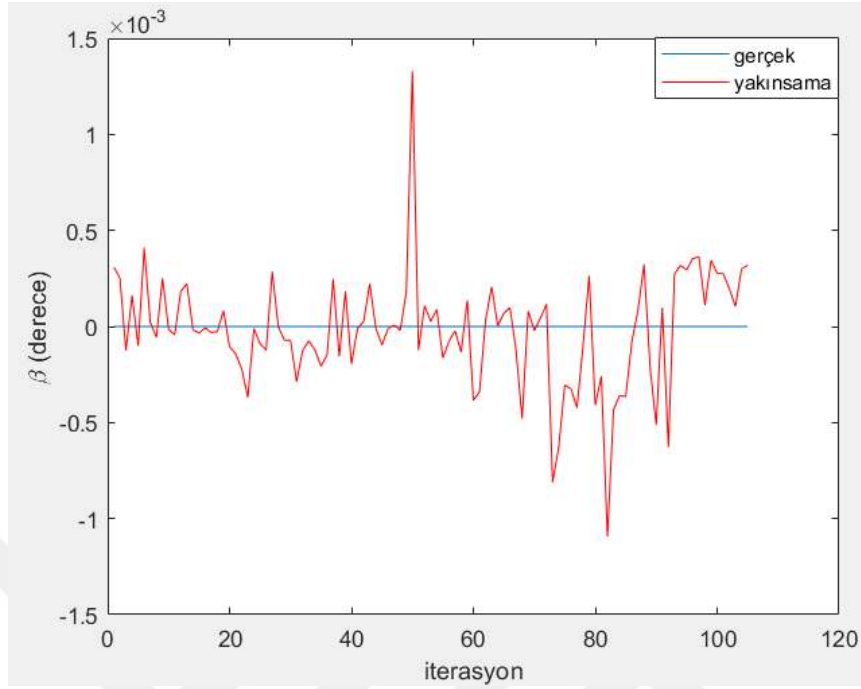
Şekil 3.33. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının z Konumuna Ait Yakınsama

Döner kanatlı insansız hava aracının α yönelimine ait yakınsama grafiği Şekil 3.34’de verilmiştir.



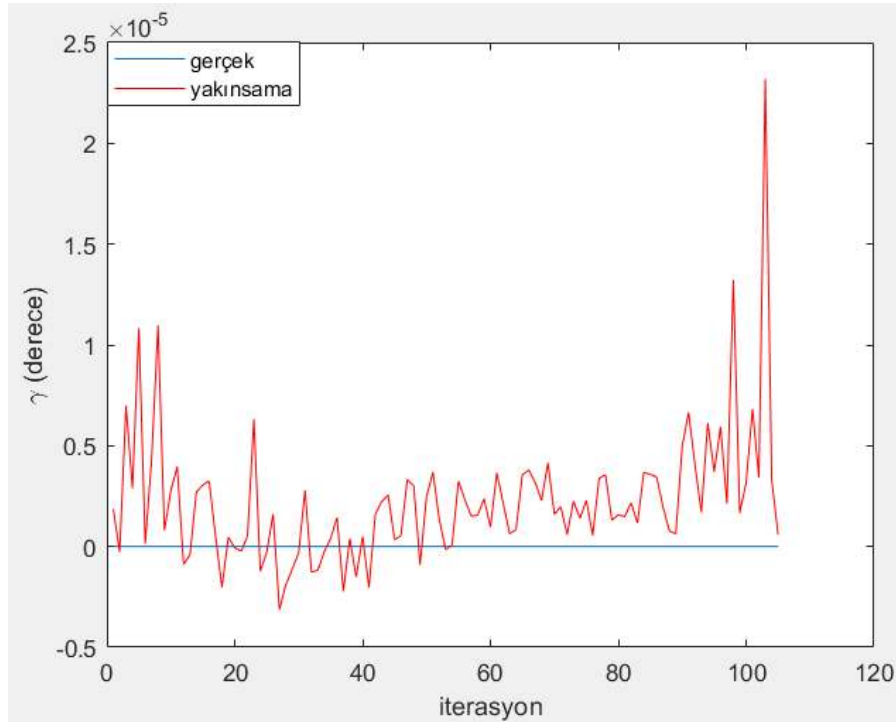
Şekil 3.34. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının α Yönelimine Ait Yakınsama

Döner kanatlı insansız hava aracının β yönelimine ait yakınsama grafiği Şekil 3.35’de verilmiştir.



Şekil 3.35. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının β Yönelimine Ait Yakınsama

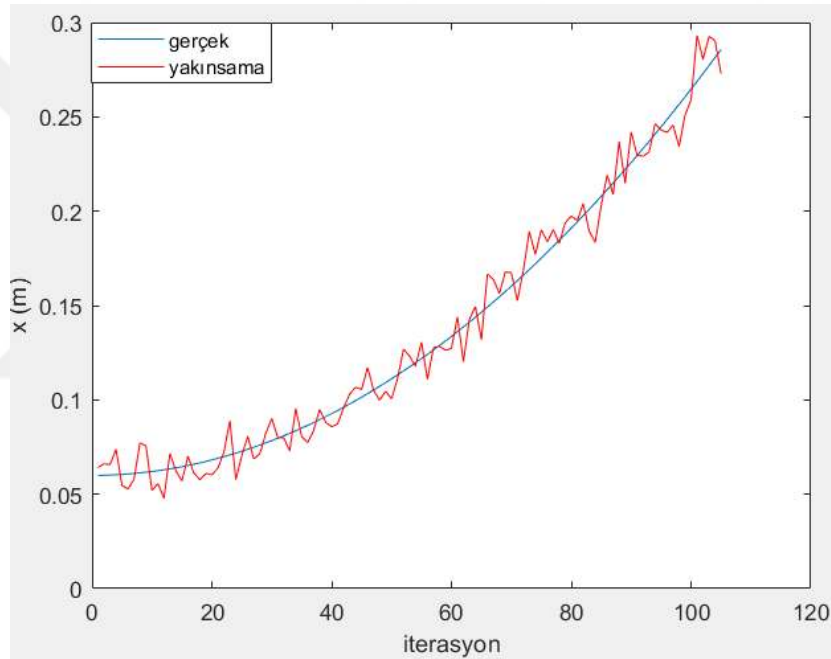
Döner kanatlı insansız hava aracının γ yönelimine ait yakınsama grafiği Şekil 3.36’da verilmiştir.



Şekil 3.36. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının γ Yönelimine Ait Yakınsama

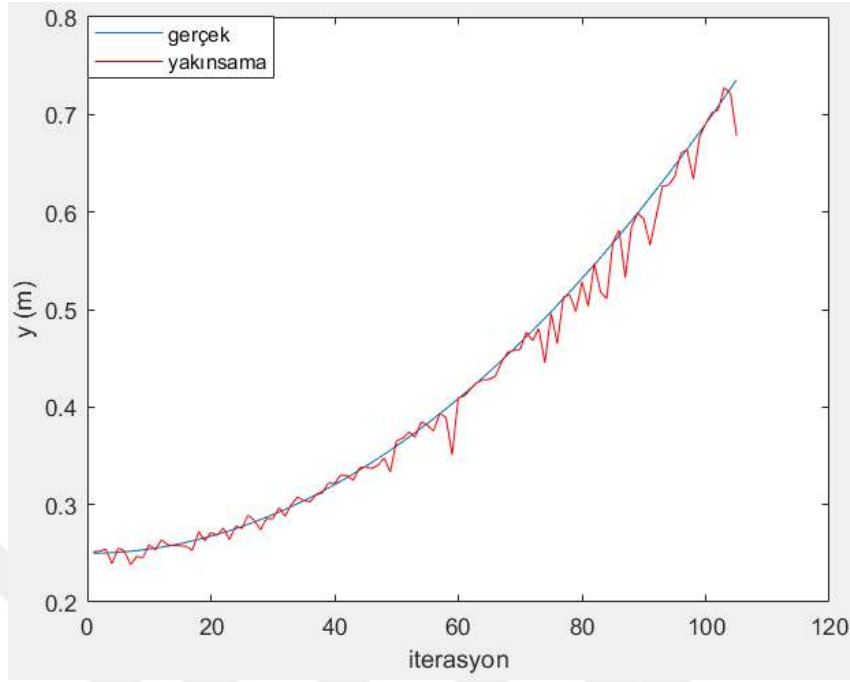
Çalışmanın bu bölümünde Ek-1’deki Tablo 3.2’deki test verileri içerisinde seçilen veri seti 132’nin YSA duruş kestirimci girişlerine rastgele %2’lik gürültü eklenmiş ve yapay sinir ağının döner kanatlı insansız hava aracının konum ve yönelimlerine yakınsama başarımı test edilmiştir. Yapılan çalışma da x konumuna ait yakınsama hatası (MSE) 0.0094, y konumuna ait yakınsama hatası 0.0414, z konumuna ait yakınsama hatası 0.1902, α yönelimine ait yakınsama hatası $1.2893e-04$, β yönelimine ait yakınsama hatası $5.3871e-06$, γ yönelimine ait yakınsama hatası $7.4905e-11$ olarak bulunmuştur. Döner kanatlı insansız hava aracının konum ve yönelimlerine ait yakınsama grafikleri Şekil 3.37-Şekil 3.42’de verilmiştir.

Döner kanatlı insansız hava aracının x konumuna ait yakınsama grafiği Şekil 3.37’de verilmiştir.



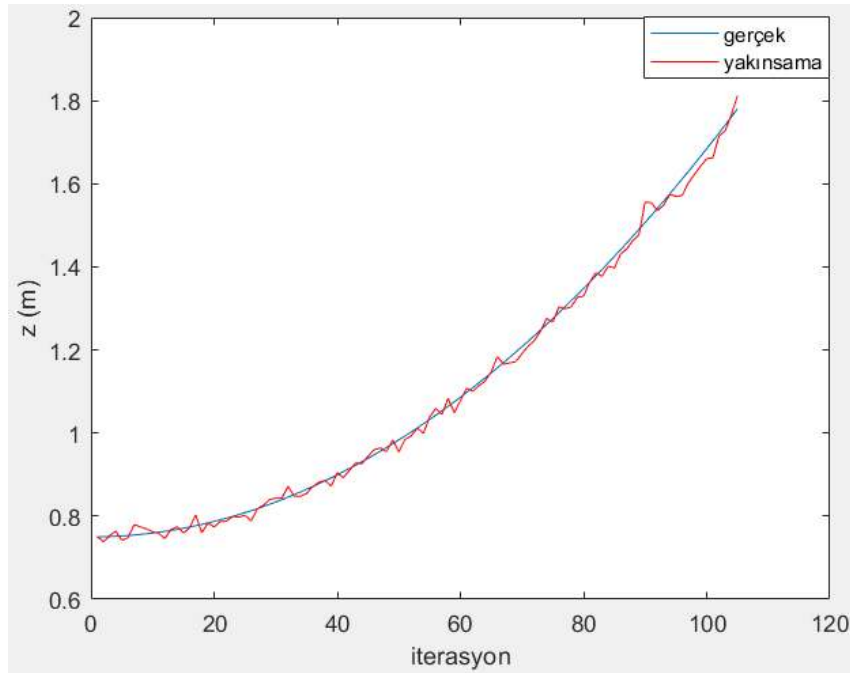
Şekil 3.37. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının x Konumuna Ait Yakınsama

Döner kanatlı insansız hava aracının y konumuna ait yakınsama grafiği Şekil 3.38’de verilmiştir.



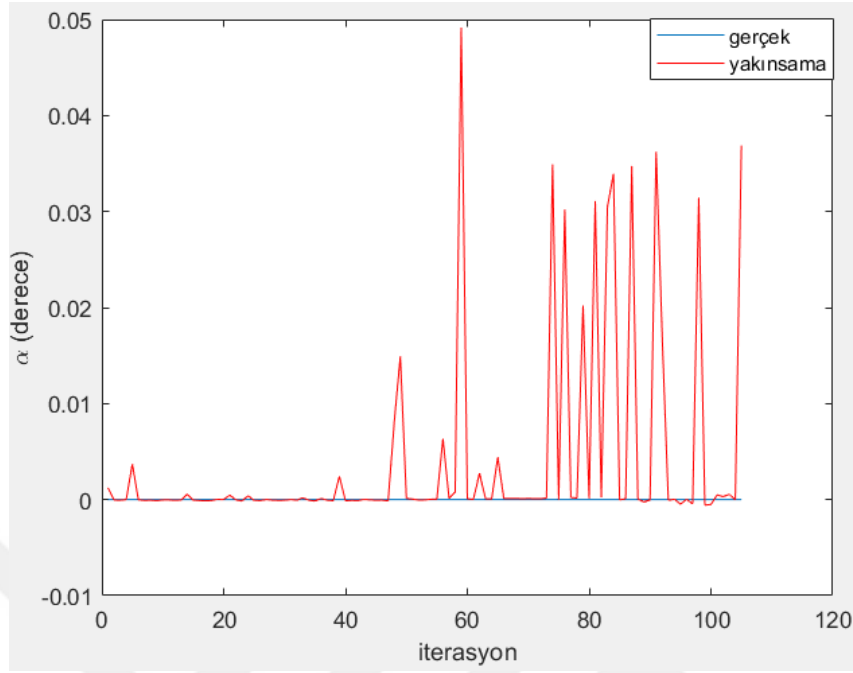
Şekil 3.38. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının y Konumuna Ait Yakınsama

Döner kanatlı insansız hava aracının z konumuna ait yakınsama grafiği Şekil 3.39’da verilmiştir.



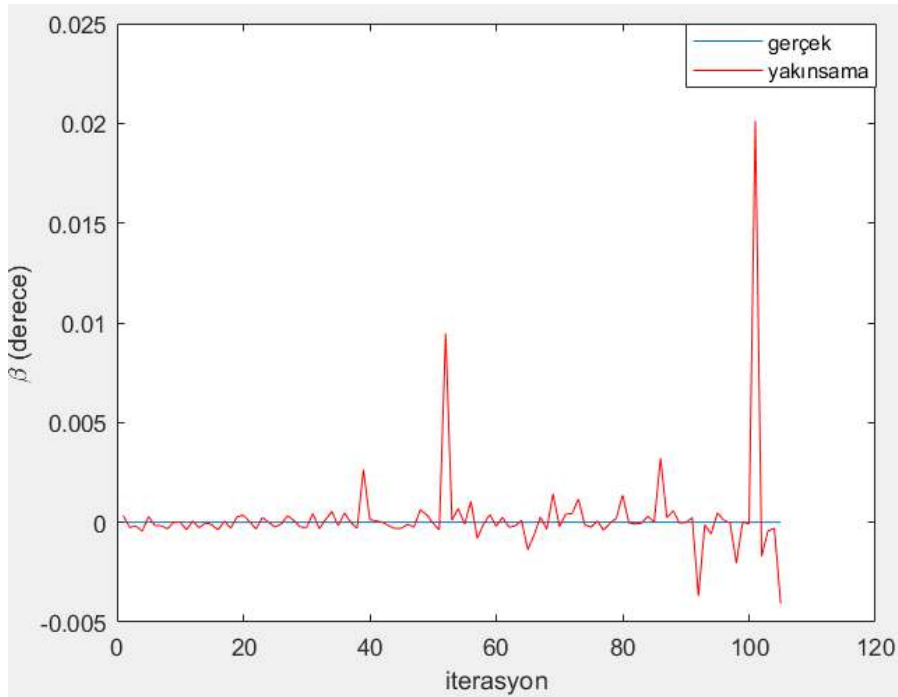
Şekil 3.39. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının z Konumuna Ait Yakınsama

Döner kanatlı insansız hava aracının α yönelimine ait yakınsama grafiği Şekil 3.40’da verilmiştir.



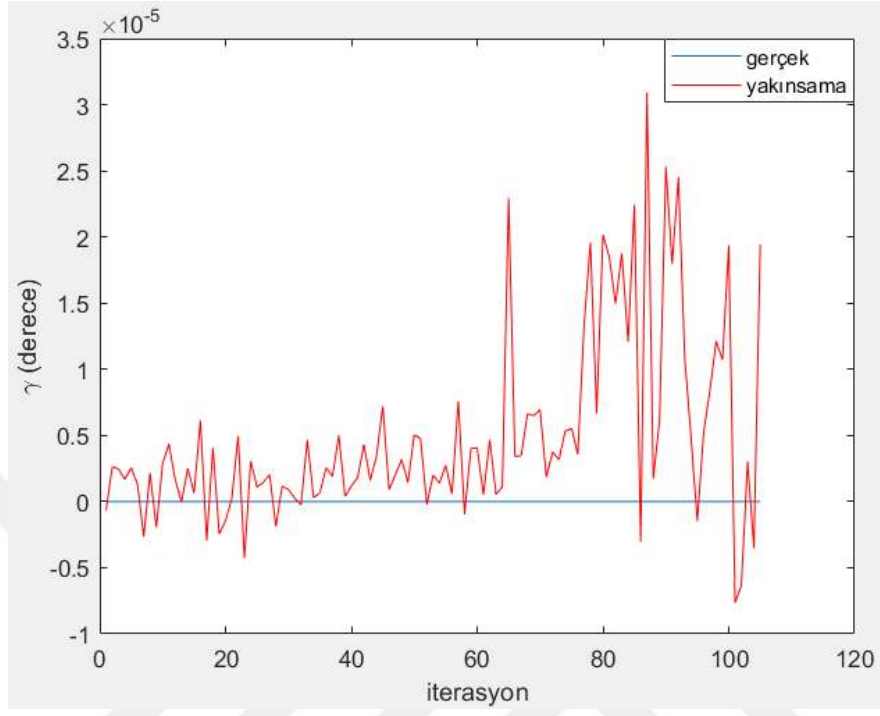
Şekil 3.40. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının α Yönelimine Ait Yakınsama

Döner kanatlı insansız hava aracının β yönelimine ait yakınsama grafiği Şekil 3.41’de verilmiştir.



Şekil 3.41. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının β Yönelimine Ait Yakınsama

Döner kanatlı insansız hava aracının γ yönelimine ait yakınsama grafiği Şekil 3.42’de verilmiştir.



Şekil 3.42. Döner Kanatlı İnsansız Hava Aracının γ Yönelimine Ait Yakınsama

4.SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada dönerkanat tipinde, dört rotorlu İHA için özniteliklere bağlı duruş kestirimine ihtiyaç duyan, bunun yanı sıra etkileşim matrisi kaynaklı tekilliklerden uzak duran KTGS sistemine odaklanılmıştır. Önerilen sistemde klasik KTGS sisteminden farklı olarak duruş kestirimi için YSA mimarisi kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada klasik KTGS' den farklı olarak görüş alanı koruyucu kullanılmıştır. Görüş alanı koruyucu ile planlanan yörüngenin döner kanatlı insansız hava aracının üzerine monte edilmiş kameranın öznitelikleri görecektir şekilde bölgede kalıp kalmadığı kontrol edilmiştir. Özniteliklerin görüş alanından çıkıp çıkmadığı ile ilgili herhangi bir önleme çalışması yapılmasa da kontrol işlemi bu çalışmaya katkı sağlamaktadır.

Önerilen sistemde yapay sinir ağı duruş kestirimci için öznitelikleri içeren görüntü özniteliklerini içeren düzlem 4 bölgeye ayrılmış ve her bölgede x , y , z konumları değişecek şekilde 6'şar senaryo denemesi yapılmıştır. Bu yapılan 24 farklı senaryo denemesine ilaveten döner kanatlı insansız hava aracının bir bölgeden diğer farklı bir bölgeye hareketini sağlayacak şekilde hepsi farklı x , y , z konum değerleriyle 18'er deneme yapılarak 108 adet farklı senaryo denemesi yapılmıştır. Son olarak x , y , z konumları farklı olmak üzere yönelimler olan α , β ve γ değerleri değiştirilerek 18 farklı senaryo denemesi yapılmıştır. Böylece 150 farklı senaryo ile tüm 4 bölgeyi kapsayacak şekilde veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılmıştır.

Önerilen sistemde yörünge planlama yapılırken YSA duruş kestirimci girişine döner kanatlı insansız hava aracının konum ve yönelimleri verilmiş ve YSA duruş kestirimci çıkışına ise ilk olarak eğitilmiş veriler içerisinde seçilen örnek bir veri setinin içerisindeki üç daireye ait $u-v$ görüntü merkezleri verilmiştir. Yörünge planlama ile başlangıç ve bitiş duruş kestirimleri yapıldıktan sonra zamana bağlı 3. dereceden bir polinom ile yörünge tanımlanmıştır. Devamında yörünge planlamaya yardımcı olarak tanımlı yörüngede özniteliklerin görüntü alınının dışına çıkmaması için her bir yörünge adımında özniteliklere ait merkez kestirimi yapılmıştır. Daha sonra aynı işlem eğitilmemiş veri seti ile denenmiştir. Metot kısmında örnek olarak eğitilmiş veride x konumu 0.06 m, y konumu 0.275 m, z konumu 0.77 m'den 1.8m'ye karesel bir yörünge izlemektedir. Eğitilmemiş veride ise x konumu 0.06 m'den 0.29 m'ye karesel, y konumu 0.250 m'den 0.745 m'ye karesel ve z konumu 0.75 m'den 1.8 m'ye karesel ve yönelimler olan α , β , γ , da 0° 'dir. Elde edilen sonuçlar hem grafiksel olarak karşılaştırılmış hem de yakınsama hataları MSE cinsinden hesaplanmıştır. Eğitilmiş veriler ile yapılan yörünge

planlama yakınsama hatalarının eğitilmemiş veriler ile yapılan yörünge planlama yakınsama hatalarından daha küçük olduğu görülmüştür.

Önerilen sistemde seçilmiş eğitilmiş veri YSA duruş kestirimci girişlerine rastgele %2'lik gürültü eklenmiş ve yapay sinir ağının döner kanatlı insansız hava aracının konum ve yönelimlerine yakınsama başarımı test edilmiştir. Yakınsama başarımlarının test edilmesi hem grafiklerle desteklenmiş hem de yakınsama hataları hesaplanmıştır. Eğitilmiş veri ile yapılan çalışmada x konumuna ait yakınsama hatası (MSE) $7.5475e-06$, y konumuna ait yakınsama hatası $1.1640e-05$, z konumuna ait yakınsama hatası 0.1843 , α yönelimine ait yakınsama hatası $3.4961e-06$, β yönelimine ait yakınsama hatası $8.6044e-08$, γ yönelimine ait yakınsama hatası $1.6130e-11$ olarak bulunmuştur. Daha sonra aynı deneme eğitilmemiş veri üzerinde yapılmıştır. Eğitilmemiş veri ile yapılan çalışma da x konumuna ait yakınsama hatası (MSE) 0.0094 , y konumuna ait yakınsama hatası 0.0414 , z konumuna ait yakınsama hatası 0.1902 , α yönelimine ait yakınsama hatası $1.2893e-04$, β yönelimine ait yakınsama hatası $5.3871e-06$, γ yönelimine ait yakınsama hatası $7.4905e-11$ olarak bulunmuştur. Hem grafiklere hem de yakınsama hatalarına bakıldığında küçük hatalarla başarılı bir yakınsamanın olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada hareketli hedef öznitelikleri kullanılmamıştır. Gelecek çalışmalarda hareketli hedef özniteliklerin kullanılması planlanmaktadır. Önerilen YSA tabanlı duruş kestirimci klasik KTGS sisteminde online çalıştırıldığında yakınsamadaki hatalardan dolayı öznitelikler görüntü alanının dışına çıkmaktadır. Bu sebeple online çalışmada önerilen kestirimci ile klasik KTGS sistemi kesintiye uğramaktadır. Bununla ilgili ilerleyen çalışmalarda SVM, ANFIS ve ELM gibi farklı yakınsayıcılar kullanılarak klasik KTGS sisteminin online çalıştırılması hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

- Altug, E., Ostrowski, JP., & Taylor, CJ.** (2005). Control of a quadrotor helicopter using dual camera visual feedback. *The International Journal of Robotics Research* 24(5), 329–341.
- Asl, HJ., Oriolo, G., & Bolandi, H.** (2014). An adaptive scheme for image-based visual servoing of an underactuated UAV. *International Journal of Robotics and Automation* 29(1): 1–30.
- Beard, J.**(2015, Aralık). Up in the Air Legal Status of Drones, *Michigan Bar Journal*, s.20-24.
- Bingöl, Z., & Küçük, S.** (2009). Robot Kinematığı. Birsen Yayınevi.
- Bolandi, H., Rezaei, M., Mohsenipour, R., Nemati, H., & Smailzadeh, S. M.** (2013). Attitude control of a quadrotor with optimized PID controller, *Intelligent Control and Automation*, vol. 4, p. 335.
- Bourger vd.,** 2007, A Model-free Vision-based Robot Control for Minimally Invasive Surgery using ESM Tracking and Pixels Color Selection, 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation
- Bouthemy, P.** (1989). A maximum likelihood framework for determining moving edges. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine intelligence*, 11(5):499–511.
- Bozkurt, E., & Dandıl, B., & Ata, F.** (2020). Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracının Kayan Kipli Denetleyici ve Geri Adımlamalı Denetleyici ile Yönelim ve Yükseklik Denetimi. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi* 32(1), 23-36.
- Can, N.** (2011, Haziran). Chicago Konvansiyonu’na Kadar Devletlerarası Hava Hukuku Alanındaki Bazı Düzenlemeler, *TALPA - Kokpitten Bakış Dergisi*.
- Ceren, Z. & Altug, E.** (2012). Image based and hybrid visual servo control of an unmanned aerial vehicle. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 65(1–4), 325–344.
- Chaumette F.,** (1998). Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. In D. Kriegman, G. Hager, and S. Morse, editors, *The confluence of vision and control*, volume 237 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 66–78.
- Chaumette F. & Hutchinson S.** (December 2006). Visual Servo Control, Part I: Basic Approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13(4), 82-90.
- Chaumette F. & Hutchinson S.** (2007). Visual servo control, Part II: Advanced approaches. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 14 (1),109-118.
- Coban, S., Bilgic, H. H., & Oktay, T.** (2019) .Designing, Dynamic Modeling and Simulation of Istecopter. *Journal of Aviation* 3 (1), 38-44 .

- Corke P. & Hager, 1998, Vision-based Robot Control** ,CSIRO Manufacturing Science and Technology, Australia
- Corke, P. I., & Hutchinson, S. A. (2001).** A new partitioned approach to image-based visual servo control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17 (4), 507–515.
- Corke, P.,** “Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in MATLAB®”, *Springer Tracts in Advanced Robotics*, Heidelberg (2011).
- Cunha, R. vd. (2011).** Vision-based control for rigid body stabilization. *Automatica* 47(5): 1020–1027.
- De Plinval, H. vd. (2014).** Visual servoing for underactuated VTOL UAVs: A linear, homography-based framework. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 24(16), 2285–2308.
- De Plinval H and Burlion L (2011).** Advances in aerospace guidance, navigation and control. In Florian Holzapfel, Stephan Theil (eds): *Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control*, 287–301.
- DeMenthon, D. ve Davis, L.S. (1995).** Model-based object pose in 25 lines of code, *Int. J. Comput. Vision*, vol. 15, nos. 1/2, 123–141.
- Espiau, B., Chaumette, F., & Rives, P. (1992).** A new approach to visual servoing in robotics, *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 8, 313–326.
- Espiau, B. (1993).** Effect of camera calibration errors on visual servoing in robotics,” in *Proc. 3rd Int. Symp. Experimental Robot.*, Kyoto, Japan.
- Faelden, G. E. U., vd. (2015).** A Neural Network Approach To A Cooperative Balancing Problem In Quadrotor-Unmanned Aerial Vehicles (QUAVs), 8th IEEE International Conference Humanoid, Nanotechnology, Information Technology Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE) – Philippine Section, Cebu, Philippines
- Gora, O. & Akkan T. (2014).** Dört Rotorlu Uçan Robot Denge Ve Yönelim Analizi İle Uygulaması, *Deü Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt: 16 No: 1 Sayı: 46 Sh. 25-4.
- Welch, G. & Bishop, G. “An Introduction to the Kalman Filter,”** Teknik Rapor TR 95-041, Computer Science, UNC Chapel Hill, 1995. Revised April 2004
- Habiyambere, D. (2018).** Görsel Servolama Yaklaşımı ile Endüstriyel Robot Kol Kontrolü, (Yüksek Lisans Tezi),Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir

- Hager, G. & Toyama, K.** (1998). The XVision system: A general-purpose substrate for portable real-time vision applications. *Computer Vision and Image Understanding*, 69(1):23–37, January 1998.
- Hamel, T. & Mahony, R.** (2002). Visual servoing of an under-actuated dynamic rigid-body system: An image-based approach. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 18(2), 187–198.
- Hamel, T. & Mahony, R.** (2007). Image based visual servo-control for a class of aerial robotic systems. *Automatica* 43(March), 1975–1983.
- Hutchinson, S., Hager, G. D. & Corke, P. I.** (1996). A tutorial on visual servo control. *IEEE Trans. Robot. Automat*, 12(5), 651-670.
- Kaçan, Y.** (2000). Hava Hukukunun Doğuşu ve Hava Sahalarının Statüsü, *TBB Dergisi*, 587-589
- Kahveci, M. & Can, N.** (2017). İnsansız Hava Araçları: Tarihçesi, Tanımı, Dünyada ve Türkiye'deki Yasal Durumu. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5 (4), s.511-535
- Kazemi, M., Gupta, K., & Mehrandezh, M.** (2010). Path-Planning for Visual Servoing: A Review and Issues, *Lecture Notes in Control and Information Sciences* 401:189-207, In book: *Visual Servoing via Advanced Numerical Methods* (pp.189-207).
- Khalilov, J.** (2016). Interfacing Simulink/Matlab With V-Rep For Analysis And Control Synthesis Of A Quadrotor, (Yüksek Lisans Tezi), Middle East Technical University, Doğal Ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü
- Krupa, A., vd.** (2002). Combined image based and depth visual servoing applied to robotized laparoscopic surgery, in *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference*, (1), 323-329.
- Lee, B., Lee, H. & Tahk, M.** (2013). Analysis of adaptive control using on-line neural networks for a quadrotor UAV, 2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013), 2013, pp. 1840-1844, doi: 10.1109/ICCAS.2013.6704240.
- Li, Z., W, Xie. & X, Tu.** (2007). Switching control of image based visual servoing with laser pointer in robotic assembly systems, in *Systems, Man and Cybernetics, ISIC. IEEE International Conference*, 2383–2389.
- Mahony, R. & Hamel, T.** (2005). Image-based visual servo control of aerial robotic systems using linear image features. *IEEE Transactions on Robotics* 21(2), 227–239.
- Malis, E., Chaumette, F., & Boudet, S.** (1999). 2 1/2 D visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15 (2), 238–250.

- Malis, E.** (2004). Improving vision-based control using efficient second-order minimization techniques, in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp. 1843–1848.
- Marchand, E.** (1999). Visp: A software environment for eye-in-hand visual servoing. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'99, volume 4, 3224–3229, Detroit, Michigan.
- Metni, N., Hamel, T., & Derkx, F.** (2007). Visual Tracking control of aerial robotic systems with adaptive depth estimation. *International Journal of Control, Automation, and Systems* 5(1), 51–60.
- Mohebbi, A. , Keshmiri, M. , & Xie, W. F.** (2016). A comparative study on eye-in-hand image-based visual servoing : Stereo vs . Mono. *Journal of Integrated Design and Process Science*, 19 (3), 25–54.
- Nakano, R. C. S. vd.,** (2015). Implementation of an artificial neural network in recognizing in-flight quadrotor images, TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/TENCON.2015.7372944.
- Naidoo, Y., Stopforth, R., and Bright, G.** (2011). Quad-Rotor unmanned aerial vehicle helicopter modelling & control, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, p. 45.
- Odile, B. vd.** (2007). Kinematic visual servo control of a quadrotor aerial vehicle. *IEEE Transactions on Robotics* 25(3), 833–838.
- Oktay, T. & Kose, O.** (2019). Dynamic Modeling and Simulation of Quadrotor for Different Flight Conditions. *European Journal of Science and Technology*, (15), 132-142.
- Ononiwu, G., Onojo, O., Ozioko, O., and Nosiri, O.** (2016). Quadcopter Design for Payload Delivery, *Journal of Computer and Communications*, vol. 4, pp. 1-12.
- Öztürk, K. Şahin, M. E.** (2018).Yapay Sinir Ağları ve Yapay Zekâ'ya Genel Bir Bakış, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Takvim-i Vekayi, ISSN: 2148-0087, Cilt: 6 No: 2 Sayfa: 25-36, Rize, Türkiye
- Prabha, M., Thottungal, R., and Kaliappan, S.** (2016). Modeling and Simulation of X Quadcopter Control, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. [online] Available at: <http://www.ijraset.com/files/serve.php>.
- Pounds, P., Mahony, R., & Corke, P.** (2010). Modelling and control of a large quadrotor robot. *Control Engineering Practice* 18 (2010), 691–699.
- Quebe, S. C.** (2013). Modeling, Parameter Estimation, and Navigation of Indoor Quadrotor Robots. Brigham Young University, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Provo, ABD. (Yüksek lisans tezi)

- Sanderson, A. C., & Weiss, L. E.** (1983). Adaptive visual servo control of robots. In A. Pugh, Robot Vision, 107–116.
- Santos, N. P., Lobo, V. & Bernardino, A.** (2019). 3D Model-Based UAV Pose Estimation using GPU, Oceans 2019 Mts/IEEE Seattle
- Shademan, A., & Janabi-Sharif, F.** (2005). Sensitivity Analysis of EKF and Iterated EKF Pose Estimation for Position-Based Visual Servoing, Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications.
- Solc, F.** (2010). Modelling and Control of a Quadcopter. Advances in Military Technology 5(2), 29–38.
- Wang, S. C.** (2003). Artificial Neural Network, in Interdisciplinary Computing in Java Programming, US, Springer, pp. 81-100.
- Wang, H., Liu, Y. H., & Zhou, D.** (2008). Adaptive Visual Servoing Using Point and Line Features With an Uncalibrated Eye-in-Hand Camera. IEEE Transactions On Robotics, Vol. 24, No. 4, 843.
- Wang, J., Xin, S., and Zhang, Y.** (2017). Modeling and Control of a Quadrotor Vehicle Subject to Disturbance Load, The 2017 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB 2017), Jan. 19-22, Seagaia Convention Center, Miyazaki, Japan
- Xu, X., & Huang, D.** (2018). UAV Pose Estimation Based on Prior Information and RANSAC Algorithm, 2018 3rd IEEE International Conference on Image, Vision and Computing, China
- Ye vd.** (2012). Study on Intelligent Visual Servoing of Space Robot for Cooperative Target Capturing, Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation Shenyang, China.
- Yongsheng, S.** (2015). Location of apples in trees using stereoscopic vision. Comput. Electr. Agric. 112(3), 68-74.
- Yüksel, T.** (2018). An intelligent visual servo control system for quadrotors'', Transactions of the Institute of Measurement and Control, 1–11.
- Yüksel, T.** (2020). GTGS Gerçekleme Problemleri İçin Akıllı Çözümlerin Endüstriyel Bir Robot Manipülatöre Uygulanması, 2458-7575. BSEU Journal of Science, 7(2), 764-789.
- Zhao, Y. vd.** (2016). A review of key techniques of vision-based control for harvesting robot. Comput. Electr. Agric. 127, 311-323.

Ek-1 Eğitim Ve Test Veri Seti

Tablo 3.1. Eğitim Veri Seti

Veri Setleri	x	y	z	α	β	γ	Bölge
Veri seti 1	-0.1700 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1
Veri seti 2	-0.1500 m	0.4500 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1
Veri seti 3	-0.1300 m	0.4250 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1
Veri seti 4	-0.1000 m	0.4000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1
Veri seti 5	-0.0700 m	0.3800 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1
Veri seti 7	-0.1600 m	0.2250 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2
Veri seti 8	-0.1400 m	0.3000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2
Veri seti 9	-0.1200 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2
Veri seti 10	-0.0800 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2
Veri seti 11	-0.0500 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2
Veri seti 13	0.0100 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3
Veri seti 14	0.0200 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3
Veri seti 15	0.0400 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3
Veri seti 16	0.0600 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3
Veri seti 17	0.0800 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3
Veri seti 19	-0.0200 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 4
Veri seti 20	0.0300 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 4
Veri seti 21	0.0500 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 4
Veri seti 22	0.0700 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 4
Veri seti 23	0.0900 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 4
Veri seti 25	-0.1700 m'den -0.1200 m'ye karesel	0.5000 m'den 0.3000 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti 26	-0.1400 m'den -0.0400 m'ye karesel	0.4000 m'den 0.2300 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti 27	-0.1300 m'den -0.5000 m'ye karesel	0.5000 m'den 0.2250 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti 28	-0.0200 m'den -0.0700 m'ye karesel	0.3700 m'den 0.1650 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye

Tablo 3.1'in devamı

Veri seti 29	-0.1500 m'den -0.3000 m'ye karesel	0.4350 m'den 0.0800 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti 31	-0.1400 m'den -0.0100 m'ye karesel	0.3780 m'den 0.0100 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti 32	-0.2000 m'den 0.0400 m'ye karesel	0.4920 m'den 0.0070 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti 33	-0.1700 m'den 0.0800 m'ye karesel	0.3950 m'den 0.0010 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti 34	-0.1300 m'den 0.1000 m'ye karesel	0.5000 m'den 0.0007 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti 35	-0.2000 m'den 0.1200 m'ye karesel	0.5250 m'den 0.0004 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti 37	-0.1300 m'den 0.1900 m'ye karesel	0.5350 m'den 0.4350 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti 38	-0.1700 m'den 0.0200 m'ye karesel	0.5450 m'den 0.4500 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti 39	-0.1400 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.4950 m'den 0.4850 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti 40	-0.1650 m'den 0.1900 m'ye karesel	0.4990 m'den 0.5140 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti 41	-0.1000 m'den 0.3500 m'ye karesel	0.4350 m'den 0.5150 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti 43	-0.1300 m'den 0.2100 m'ye karesel	0.3550 m'den 0.2300 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti 44	-0.1400 m'den 0.5400 m'ye karesel	0.3000 m'den 0.1850 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti 45	-0.2000 m'den 0.4900 m'ye karesel	0.2950 m'den 0.1000 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti 46	-0.1600 m'den 0.3700 m'ye karesel	0.1750 m'den 0.0500 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti 47	-0.1000 m'den 0.4000 m'ye karesel	0.1800 m'den 0.0900 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti 49	-0.1500 m'den 0.2500 m'ye karesel	0.3550 m'den 0.4350 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti 50	-0.1000 m'den 0.3800 m'ye karesel	0.3170 m'den 0.5050 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti 51	-0.2000 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.2600 m'den 0.6000 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e

Tablo 3.1'in devamı

Veri seti 52	-0.1700 m'den 0.4400 m'ye karesel	0.3000 m'den 0.9000 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti53	-0.1300 m'den 0.4800 m'ye karesel	0.1700 m'den 0.8000 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti55	0.1600 m'den 0.4800 m'ye karesel	0.1850 m'den 0.4850 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti56	0.0700 m'den 0.1000 m'ye karesel	0.2250 m'den 0.5450 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti57	0.0010 m'den 0.1200 m'ye karesel	0.3580 m'den 0.6000 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti58	0.0900 m'den 0.1700 m'ye karesel	0.3400 m'den 0.8000 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti59	0.0030 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.1650 m'den 0.3800 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti61	-0.1300 m'den 0.4800 m'ye karesel	0.5250 m'den 0.2300 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti62	-0.1400 m'den -0.0900 m'ye karesel	0.4000 m'den 0.1000 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti63	-0.1700 m'den -0.0800 m'ye karesel	0.3900 m'den 0.0500 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti64	-0.1800 m'den -0.1400 m'ye karesel	0.4300 m'den 0.0070 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti65	-0.1800 m'den -0.1100 m'ye karesel	0.5000 m'den 0.0040 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti67	-0.1900 m'den 0.4800 m'ye karesel	0.4000 m'den 0.0008 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti68	-0.1600 m'den 0.0500 m'ye karesel	0.4200 m'den 0.0050 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti69	-0.1000 m'den 0.4900 m'ye karesel	0.5000 m'den 0.0090 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti70	-0.1500 m'den 0.2000 m'ye karesel	0.5250 m'den 0.0010 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti71	-0.1800 m'den 0.0300 m'ye karesel	0.5350 m'den 0.0030 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti73	-0.1700 m'den 0.4000 m'ye karesel	0.5200 m'den 0.4500 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti74	-0.1400 m'den 0.4900 m'ye karesel	0.5350 m'den 0.4450 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e

Tablo 3.1'in devamı

Veri seti75	-0.1300 m'den 0.5200 m'ye karesel	0.5000 m'den 0.4350 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti76	-0.1000 m'den 0.3700 m'ye karesel	0.4300 m'den 0.5300 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti77	-0.1600 m'den 0.4300 m'ye karesel	0.5250 m'den 0.7000 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti79	-0.1600 m'den 0.2500 m'ye karesel	0.2300 m'den 0.3500 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti80	-0.1200 m'den 0.4000 m'ye karesel	0.1900 m'den 0.2700 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti81	-0.1000 m'den 0.4800 m'ye karesel	0.1800 m'den 0.2500 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti82	-0.0700 m'den 0.1000 m'ye karesel	0.3000 m'den 0.1950 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti83	-0.0800 m'den 0.3700 m'ye karesel	0.3550 m'den 0.1750 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti85	-0.0800 m'den 0.1400 m'ye karesel	0.3500 m'den 0.4500 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti86	-0.0400 m'den 0.2900 m'ye karesel	0.2700 m'den 0.4900 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti87	-0.0900 m'den 0.3800 m'ye karesel	0.2500 m'den 0.5400 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti88	-0.1000 m'den 0.4000 m'ye karesel	0.3450 m'den 0.7000 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti89	-0.0600 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.3000 m'den 0.9000 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti91	0.1400 m'den 0.4900 m'ye karesel	0.1790 m'den 0.3900 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti92	0.1400 m'den 0.4900 m'ye karesel	0.1790 m'den 0.3900 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti93	0.1400 m'den 0.4900 m'ye karesel	0.1790 m'den 0.3900 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti94	0.1400 m'den 0.4900 m'ye karesel	0.1790 m'den 0.3900 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti95	0.1400 m'den 0.4900 m'ye karesel	0.1790 m'den 0.3900 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti97	-0.1300 m'den -0.0900 m'ye karesel	0.5000 m'den 0.2200 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye

Tablo 3.1'in devamı

Veri seti98	-0.1700 m'den -0.0600 m'ye karesel	0.4000 m'den 0.1000 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti99	-0.1900 m'den -0.1000 m'ye karesel	0.4730 m'den 0.0700 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti100	-0.1600 m'den -0.1400 m'ye karesel	0.3950 m'den 0.0100 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti101	-0.1800 m'den -0.1100 m'ye karesel	0.4100 m'den 0.0050 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti103	-0.0600 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.4140 m'den 0.0700 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti104	-0.1000 m'den 0.1000 m'ye karesel	0.4000 m'den 0.0100 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti105	-0.1600 m'den 0.0700 m'ye karesel	0.5200 m'den 0.1000 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti106	-0.1300 m'den 0.4500 m'ye karesel	0.5000 m'den 0.0500 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti107	-0.1400 m'den 0.1300 m'ye karesel	0.4400 m'den 0.0090 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti109	-0.0500 m'den 0.4000 m'ye karesel	0.5250 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti110	-0.1000 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.5140 m'den 0.4700 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti111	-0.1400 m'den 0.3400 m'ye karesel	0.5000 m'den 0.4600 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti112	-0.1500 m'den 0.2300 m'ye karesel	0.4400 m'den 0.5190 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti113	-0.1600 m'den 0.3700 m'ye karesel	0.4000 m'den 0.6000 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti115	-0.0600 m'den 0.2900 m'ye karesel	0.3000 m'den 0.2100 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti116	-0.1300 m'den 0.3500 m'ye karesel	0.3100 m'den 0.1500 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti117	-0.1600 m'den 0.4300 m'ye karesel	0.2140 m'den 0.0900 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti118	-0.1400 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.1900 m'den 0.0100 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti119	-0.1500 m'den 0.5300 m'ye karesel	0.2300 m'den 0.0050 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e

Tablo 3.1'in devamı

Veri seti121	-0.1100 m'den 0.4000 m'ye karesel	0.3000 m'den 0.5140 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti122	-0.1400 m'den 0.4700 m'ye karesel	0.3100 m'den 0.7000 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti123	-0.1000 m'den 0.3500 m'ye karesel	0.2900 m'den 0.9000 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti124	-0.1300 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.2500 m'den 0.9300 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti125	-0.0900 m'den 0.2100 m'ye karesel	0.2700 m'den 0.6140 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti127	0.0700 m'den 0.3000 m'ye karesel	0.2600 m'den 0.4140 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti128	0.0500 m'den 0.2700 m'ye karesel	0.3000 m'den 0.7000 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti129	0.0100 m'den 0.2000 m'ye karesel	0.3140 m'den 0.9000 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti130	0.0090 m'den 0.4700 m'ye karesel	0.1900 m'den 0.5450 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti131	0.0400 m'den 0.3800 m'ye karesel	0.2200 m'den 0.6700 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti133	-0.1500 m'den 0.0950 m'ye karesel	0.1400 m'den 0.1600 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°'den 3°'ye	0°	0°	Bölge ayrımı yapılmadı
Veri seti134	-0.1500 m'den 0.0950 m'ye karesel	0.1400 m'den 0.1600 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°'den 3°'ye	0°	0°	Bölge ayrımı yapılmadı
Veri seti135	-0.1600 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.4200 m'den 0.0005 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°'den 3°'ye	0°	0°	Bölge ayrımı yapılmadı
Veri seti136	-0.1100 m'den 0.4000 m'ye karesel	0.3000 m'den 0.5140 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°'den 3°'ye	0°	Bölge ayrımı yapılmadı
Veri seti137	-0.1300 m'den 0.1900 m'ye karesel	0.5350 m'den 0.4350 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°'den 3°'ye	0°	Bölge ayrımı yapılmadı
Veri seti138	-0.1500 m'den 0.4800 m'ye karesel	0.4000 m'den 0.0080 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°'den 3°'ye	0°	Bölge ayrımı yapılmadı
Veri seti139	-0.1500 m'den 0.4800 m'ye karesel	0.4000 m'den 0.0050 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0	0°'den 3°'ye	Bölge ayrımı yapılmadı
Veri seti140	-0.1300 m'den 0.5400 m'ye karesel	0.3900 m'den 0.0900 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0	0°'den 3°'ye	Bölge ayrımı yapılmadı
Veri seti141	-0.0500 m'den 0.4000 m'ye karesel	0.5250 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0	0°'den 3°'ye	Bölge ayrımı yapılmadı

Tablo 3.1'in devamı

Veri seti142	-0.1400 m'den 0.4585 m'ye karesel	0.3100 m'den 0.6927 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°'den 2°'ye	0°	0°	Bölge ayırımı yapılmadı
Veri seti143	-0.1300 m'den - 0.4931 m'ye karesel	0.5000 m'den 0.2302 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°'den 2°'ye	0°	0°	Bölge ayırımı yapılmadı
Veri seti145	-0.1000 m'den 0.3416 m'ye karesel	0.2900 m'den 0.8885 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°'den 2°'ye	0°	Bölge ayırımı yapılmadı
Veri seti146	-0.1700 m'den - 0.0753 m'ye karesel	0.3950 m'den 0.0084 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°'den 2°'ye	0°	Bölge ayırımı yapılmadı
Veri seti148	-0.1000 m'den 0.3612 m'ye karesel	0.4300 m'den 0.5281 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°'den 120°'ye	Bölge ayırımı yapılmadı
Veri seti149	-0.1000 m'den 0.3416 m'ye karesel	0.4350 m'den 0.5135 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.6831 m'ye karesel	0°	0°	0°'den 120°'ye	Bölge ayırımı yapılmadı

Tablo 3.2. Test Veri Seti

Veri Setleri	x	y	z	α	β	γ	Bölge
Veri seti 6	-0.0400 m	0.3670 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1
Veri seti 12	-0.0300 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2
Veri seti 18	0.1300 m	0.5000 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3
Veri seti 24	0.1200 m	0.3870 m	0.77-1.8 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 4
Veri seti 30	-0.1600 m'den -0.1000 m'ye karesel	0.3500 m'den 0.0500 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti 36	-0.1500 m'den 0.1700 m'ye karesel	0.3850 m'den 0.0008 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti 42	-0.1600 m'den 0.4800 m'ye karesel	0.4500 m'den 0.5450 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti 48	-0.1400 m'den 0.4500 m'ye karesel	0.2730 m'den 0.0010 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti54	-0.1400 m'den 0.5200 m'ye karesel	0.2000 m'den 0.7000 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti60	0.0011 m'den 0.5200 m'ye karesel	0.2450 m'den 0.6500 m'ye karesel	0.8000 m'den 1.7000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti66	-0.1900 m'den -0.1500 m'ye karesel	0.4000 m'den 0.0010 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti72	-0.1700 m'den 0.3700 m'ye karesel	0.4500 m'den 0.0070 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti78	-0.1500 m'den 0.4500 m'ye karesel	0.5000 m'den 0.4200 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e
Veri seti84	-0.0300 m'den 0.3000 m'ye karesel	0.3000 m'den 0.1200 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti90	-0.0500 m'den 0.1700 m'ye karesel	0.2900 m'den 0.5000 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti96	0.1400 m'den 0.4900 m'ye karesel	0.1790 m'den 0.3900 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti102	-0.1500 m'den -0.0700 m'ye karesel	0.3800 m'den 0.0007 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 2'ye
Veri seti108	-0.1700 m'den 0.4300 m'ye karesel	0.3970 m'den 0.0070 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 3'e
Veri seti114	-0.0700 m'den 0.1400 m'ye karesel	0.4900 m'den 0.9000 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 1'den Bölge 4'e

Tablo 3.2'nin devamı

Veri seti120	-0.0700 m'den 0.5500 m'ye karesel	0.2900 m'den 0.0010 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 3'e
Veri seti126	-0.1200 m'den 0.4300 m'ye karesel	0.3400 m'den 0.7400 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 2'den Bölge 4'e
Veri seti132	0.0600 m'den 0.2900 m'ye karesel	0.2500 m'den 0.7450 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°	Bölge 3'den Bölge 4'e
Veri seti144	-0.0400 m'den 0.2838 m'ye karesel	0.2700 m'den 0.4859 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°'den 2°'ye	0°	0°	Bölge ayrımı yapılmadı
Veri seti147	-0.1000 m'den 0.3612 m'ye karesel	0.4300 m'den 0.5281 m'ye karesel	0.7700 m'den 1.6500 m'ye karesel	0°	0°'den 2°'ye	0°	Bölge ayrımı yapılmadı
Veri seti150	-0.1400 m'den 0.4585 m'ye karesel	0.3100 m'den 0.6927 m'ye karesel	0.7500 m'den 1.8000 m'ye karesel	0°	0°	0°'den 120°'ye	Bölge ayrımı yapılmadı