



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**DÖNERKANATLI İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN GÖRSEL SERVOLAMA
ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA CİHAN SALMANER

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. TOLGA YÜKSEL

BİLECİK, 2026

10812217

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**DÖNERKANATLI İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN GÖRSEL SERVOLAMA
ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA CİHAN SALMANER

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. TOLGA YÜKSEL

BİLECİK, 2026
10812217

BEYAN

Dönerkanatlı insansız hava araçları için görsel servolama üzerine bir çalışma başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Mustafa Cihan SALMANER
.././20..

İmza:

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sürecinde bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, değerli katkıları ve yönlendirmeleriyle çalışmanın şekillenmesinde önemli rol oynayan danışman hocam sayın Prof. Dr. Tolga Yüksel'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez süreci boyunca desteğini, sabrını ve anlayışını her zaman yanımda hissettiğim sevgili eşime en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte göstermiş olduğu fedakârlık ve manevi destek, çalışmamı tamamlamamda büyük bir güç kaynağı olmuştur.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen aileme, hocalarıma ve katkı sağlayan herkese teşekkür ederim.

Mustafa Cihan SALMANER
2026

ÖZET

İnsansız hava araçlarının otonom görevlerde güvenilir biçimde kullanılabilmesi kritik öneme sahiptir. Bu gereksinim, özellikle dar geçitlerden geçiş, hedefe yaklaşma, hassas konumlanma ve çevresel etkileşim gerektiren uygulamalarda daha belirgin biçimde ortaya çıkmaktadır. Bu tür görevlerde aracın yalnızca hedefi algılaması değil, aynı zamanda hedefe uygun biçimde yönelmesi, hedef karşısında kararlı olarak hizalanması ve görev koşulu sağlandığında güvenli şekilde hareketini sürdürmesi gerekmektedir. Bu ihtiyaç, görsel bilgiye dayalı kontrol yöntemlerinin insansız hava araçları üzerindeki kullanımını önemli hale getirmektedir.

Bu tez çalışmasında, döner kanat bir insansız hava aracının görüntü tabanlı olarak belirli özelliklere sahip bir hedefe otonom biçimde yönelmesi, hedef karşısında hizalanması, belirli bir süre bu hizayı koruması ve ardından hedefin içindeki boşluktan geçmesi için bir kontrol yaklaşımı geliştirilmiştir. Çalışmada hedef, yer düzlemine dik konumlandırılmış içi boş bir dikdörtgen olarak ele alınmıştır. İnsansız hava aracı, yer düzlemine paralel hareket edecek şekilde değerlendirilmiş ve aracın ön kısmında bulunan kamera ile elde edilen görüntüler üzerinden hedefin konumu belirlenmiştir. Görüntü işleme ve kontrol katmanları birlikte ele alınarak, hedefin görüntü düzlemindeki konumuna bağlı hata bilgisi üretilmiş ve bu bilgi kullanılarak aracın uygun hareket komutları oluşturulmuştur.

Önerilen sistem kapsamında, hedefe yönelme, hedef karşısında konum düzeltme ve hizayı koruma süreçleri görsel geri besleme temelli olarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol yapısında PID tabanlı bir yaklaşım kullanılmış, ayrıca gövde hızlarının geri besleme olarak denkleme dahil edildiği ve edilmediği iki farklı uygulama yaklaşımı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Böylece görüntü hatasına dayalı kontrol ile hız geri beslemesi destekli kontrol yapılarının sistem davranışına etkileri değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Döner kanat İHA, otonom uçuş, görüntü işleme, görsel servolama, PID kontrol

ABSTRACT

The reliable use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in autonomous missions is of critical importance. This requirement is particularly evident in applications requiring passage through narrow passages, target approach, precise positioning, and environmental interaction. In such missions, the vehicle must not only detect the target but also orient itself appropriately towards the target, maintain stable alignment with the target, and safely continue its movement when the mission condition is met. This need makes the use of visual information-based control methods on unmanned aerial vehicles important.

In this thesis, a control approach has been developed for a rotary-wing UAV to autonomously orient itself towards a target with specific characteristics, align itself with the target, maintain this alignment for a certain period, and then pass through the gap inside the target, based on image-based information. In the study, the target is considered as a hollow rectangle positioned perpendicular to the ground plane. The UAV is evaluated to move parallel to the ground plane, and the target's position is determined from images obtained by a camera located at the front of the vehicle. By considering image processing and control layers together, error information based on the target's position in the image plane is generated, and appropriate movement commands for the vehicle are created using this information.

In the proposed system, the processes of aiming at the target, position correction against the target, and alignment maintenance are performed based on visual feedback. A PID-based approach is used in the control structure, and two different application approaches, one with and one without body velocities included as feedback in the equation, are examined comparatively. Thus, the effects of image error-based control and velocity feedback-supported control structures on the system behavior are evaluated.

Keywords: Rotary-wing UAV, autonomous flight, image processing, visual servoing, PID control.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Görüntüden öznitelik çıkarımı: nokta, çizgi ve sift öznitelikleri	1
1.1.1. Nokta özniteliklerinin çıkarılması	2
1.1.2. Çizgi özniteliklerinin çıkarılması.....	3
1.1.3. SIFT özniteliklerinin çıkarılması.....	4
1.2. Görsel servolama kamera yerleşim konfigürasyonları.....	5
2. KURAMSAL / KAVRAMSAL TEMELLER.....	15
2.1. Drone koordinat sistemleri	23
2.2. Drone kinematik modeli	24
2.3. Drone dinamik modeli	25
2.4. Drone dönel dinamik modeli	26
2.5. Drone küçük açı yaklaşımı ile sadeleştirilmiş modeli	27
3. MATERYAL / METOT.....	28
3.1. Görüntü hedefinin oluşturulması	28
3.2. Deney düzeneği tanıtımı.....	30
3.3. Balık gözü kamera düzeltme	33
3.4. Lab renk uzayında yeşil ve kırmızı çerçeve tespiti.....	34
3.5. Kontur ve köşe noktalarının çıkarılması	36
3.6. Hedef doğrulama ve merkez hesabı.....	40

3.7. Görsel servo kontrol yöntemi	40
3.8. Yaklaşım a: görüntü hatasına doğrudan pid	42
3.9. Yaklaşım b: $V_x - V_y$ geri beslemeli pid (hız döngüsü)	43
3.10. Geçiş fazı yaklaşımı	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
4.1. Görüntü işleme bulguları.....	48
4.2. V_x hızı için deney bulguları.....	49
4.3. V_y hızı için deney bulguları.....	50
4.4. Kontrol yaklaşımlarının karşılaştırılması.....	52
4.5. Tartışma	56
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
5.1. Çalışmadan elde edilen temel sonuçlar	57
5.2. Çalışmanın literatür katkıları	58
5.3. Sınırlılıklar	59
5.4. Öneriler ve gelecek çalışmalar	59
KAYNAKÇA	61
EKLER.....	65

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Nokta öznitelik çıkarımına bir örnek.....	2
Şekil 1.2. Çizgi öznitelik çıkarımı.....	3
Şekil 1.3. Difference of gaussian çıkarımı.....	4
Şekil 1.4. SIFT öznitelik çıkarımı adımları.....	5
Şekil 1.5. Elde göz ve ele göz gösterimi.....	6
Şekil 1.6. İğne deliği kamera modeli.....	6
Şekil 1.7. Özniteliklerden görüntü tabanlı görsel servo kontrole geçiş.....	7
Şekil 1.8. Görüntü tabanlı görsel servolama blok diyagram.....	8
Şekil 1.9. Kamera ve hedef pozisyonları.....	9
Şekil 1.10. Konum tabanlı görsel servolama blok diyagram.....	11
Şekil 1.11. Özniteliklerden konum tabanlı görsel servo kontrole geçiş.....	11
Şekil 2.1. Kutunun çizgiler ile gösterimi.....	15
Şekil 2.2. Robot ile yapılan montaj işlemi.....	15
Şekil 2.3. Bir kamera görüntü düzlemindeki pikseller.....	17
Şekil 2.4. 2-1/2 Görsel servolama.....	18
Şekil 2.5. Parrot Drone için kamera düzlemi, drone düzlemi ve sabit düzlem gösterimi.....	20
Şekil 2.6. Mikro robot kolu görseli.....	22
Şekil 2.7. Yapay sinir hücresi diyagramı.....	23
Şekil 2.8. Drone gövde koordinat sistemi.....	24
Şekil 3.1. Kapalı çevrim blok diyagram.....	28
Şekil 3.2. İlk denemelerde kırmızı hedefin arka plandaki kırmızı bölgelerle karışması.....	29
Şekil 3.3. Hedefe yeşil renk bileşeni eklenmesine yönelik ilk tasarım denemesi.....	29
Şekil 3.4. Uygulamada kullanılan nihai hedef yapısı ve hedef merkezinin belirlenmesi.....	30

Şekil 3.5. AR.Drone Roll, Pitch, Yaw açıları.....	31
Şekil 3.6. Parrot AR.Drone 2.0 platformu.....	32
Şekil 3.7. Deney hedefi.....	32
Şekil 3.8. Kalibrasyon ile görüntü düzeltme.....	34
Şekil 3.9. CIELAB renk uzayında L^* , a^* ve b^* eksenlerinin gösterimi.....	35
Şekil 3.10. Ayırma için kullanılan görüntü.....	35
Şekil 3.11. Yeşil dikdörtgen için uygulanmış kontur çıkarma işlemi görüntüsü.....	37
Şekil 3.12. Kırmızı ve yeşil dikdörtgenlerin köşe piksel değerleri.....	38
Şekil 3.13. İHA merkez ve hedef merkez gösterimi.....	41
Şekil 3.14. İç ve dış döngü bir arada.....	44
Şekil 4.1. V_x Grafikleri.....	49
Şekil 4.2. İleri – Geri Hata Grafikleri.....	50
Şekil 4.3. V_y Grafikleri.....	51
Şekil 4.4. Yatay Hata (e_y) Grafikleri.....	51
Şekil 4.5. Kenar Hata Grafikleri.....	52
Şekil 4.6. Hızlar varken deney görseli.....	54
Şekil 4.7. Hızlar yokken deney görseli.....	55

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. AR.Drone Özellikleri	33
Tablo 3.2. Renk ayrıştırma, düzeltme ve tespit işlemleri parametreleri	36
Tablo 6.1. Hızlar varken deney verileri	65
Tablo 6.2. Hızlar yokken deney verileri	66

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

A	: Kamera iç parametre matrisi
c_x	: Görüntü merkezinin x koordinatı
c_y	: Görüntü merkezinin y koordinatı
centerX	: Hedef merkezinin x piksel koordinatı
centerY	: Hedef merkezinin y piksel koordinatı
D	: Distorsiyon/bozulma katsayıları vektörü
dt	: İki örnekleme ya da iki görüntü arasındaki süre
e	: Hata vektörü
\dot{e}	: Hata vektörünün zamana göre türevi
e_x	: Yatay hata
e_y	: Düşey hata
f	: Odak uzaklığı
f_x	: x doğrultusundaki odak uzaklığı parametresi
f_y	: y doğrultusundaki odak uzaklığı parametresi
H	: Görüntü yüksekliği
$I_{RGB}(x, y)$: Renkli giriş görüntüsü
ileriHata	: Pitch eksenini için tanımlanan ileri-geri hata
i	: İndis gösterimi
K	: Kamera içsel parametre matrisi
k_1	: Birinci radyal distorsiyon katsayısı
k_2	: İkinci radyal distorsiyon katsayısı
k_3	: Üçüncü radyal distorsiyon katsayısı
kenarHata	: Sol ve sağ kenar farkına dayalı hata
K_dGas	: Gaz eksenini türev kazancı
K_dPitch	: Pitch eksenini türev kazancı
K_dRoll	: Roll eksenini türev kazancı
K_dYaw	: Yaw eksenini türev kazancı
K_iGas	: Gaz eksenini integral kazancı
K_iPitch	: Pitch eksenini integral kazancı
K_iRoll	: Roll eksenini integral kazancı
K_iYaw	: Yaw eksenini integral kazancı
K_pGas	: Gaz eksenini oransal kazancı

$K_p Pitch$: Pitch eksenini oransal kazancı
$K_p Roll$: Roll eksenini oransal kazancı
$K_p Yaw$: Yaw eksenini oransal kazancı
$L_{pbvs}(u, \theta)$: Konum tabanlı görsel servolamada kullanılan ilişki matrisi
L_s	: Etkileşim matrisi
L_s^+	: Etkileşim matrisinin psödo-tersi
outGas	: Gaz eksenini kontrol çıkışı
outPitch	: Pitch eksenini kontrol çıkışı
outRoll	: Roll eksenini kontrol çıkışı
outYaw	: Yaw eksenini kontrol çıkışı
p_1	: Birinci teğetsel distorsiyon katsayısı
p_2	: İkinci teğetsel distorsiyon katsayısı
p_i	: Görüntü düzlemindeki i. noktanın homojen koordinat gösterimi
Π	: Perspektif izdüşüm operatörü
π	: Pi sabiti; metinde özellikle π radyan dönmeyi ifade etmektedir
R	: Dönüş/rotasyon matrisi
rect.Height	: Dikdörtgenin yüksekliği
rect.Width	: Dikdörtgenin genişliği
rect.X	: Dikdörtgenin sol üst köşesinin x koordinatı
rect.Y	: Dikdörtgenin sol üst köşesinin y koordinatı
s	: Anlık görsel öznitelik vektörü
\dot{s}	: Öznitelik vektörünün zamana göre türevi
s^*	: İstenen görsel öznitelik vektörü
sagkenar	: Sağ kenar uzunluğu
solkenar	: Sol kenar uzunluğu
t	: Öteleme vektörü
t_e	: Öteleme hatası
u, v	: Görüntü düzlemindeki koordinatlar
u_i, v_i	: i. özneliğinin görüntü koordinatları
ustKenar	: Üst kenar uzunluğu
v	: Kamera uzaysal hız vektörü
v_c	: Kamera doğrusal hız bileşeni
Vxerror	: V_x hız hatası

V_{xmeas}	: Ölçülen V_x hızı
V_{xref}	: Referans V_x hızı
V_{yerror}	: V_y hız hatası
V_{ymeas}	: Ölçülen V_y hızı
V_{yref}	: Referans V_y hızı
V_x	: İleri-geri doğrultudaki hız
V_y	: Yanal doğrultudaki hız
W	: Görüntü genişliği
x, y	: Görüntü düzlemindeki koordinatlar
X, Y, Z	: Üç boyutlu uzay koordinatları
X_c, Y_c, Z_c	: Kamera koordinat takımındaki konum bileşenleri
X_w, Y_w, Z_w	: Dünya/nesne koordinat takımındaki konum bileşenleri
z	: Derinlik doğrultusu / z eksen
λ	: Pozitif kontrol kazancı
θ	: Açısal değişken
θ_u	: Eksen-açı gösterimindeki yönelim hatası
ξ	: Kamera uzaysal hız vektörü
ω_c	: Kamera açısal hız bileşeni
ϵ_x	: Yatay hizalama eşiği
ϵ_y	: Düşey hizalama eşiği
± 150	: İHA'nın yer düzlemine göre maksimum eğim açısı
cT_w	: Dünya/nesne koordinat takımından kamera koordinat takımına dönüşüm
matrisi	
cT_c	: İstenen kamera pozu ile mevcut kamera pozu arasındaki bağıl dönüşüm
cT_w	: İstenen kamera konumuna ait dönüşüm matrisi
wP_i	: Dünya/nesne koordinat takımındaki i. referans 3B nokta
$(\cdot)^T$: Transpoz
$(\cdot)^{-1}$: Ters matris
2B	: İki boyutlu
3B	: Üç boyutlu
3S	: Seri bağlı 3 hücreli pil yapısı
BGR	: Blue Green Red
C#	: C Sharp

CIELAB	: Commission Internationale de l'Éclairage L*a*b*
CV	: Computer Vision
dk	: Dakika
DoG	: Difference of Gaussian
Emgu CV	: .NET ortamı için OpenCV sarmalayıcısı
FISHEYE	: Balık gözü
GPS	: Global Positioning System
GTGS	: Görüntü Tabanlı Görsel Servolama
HGS	: Hibrit Görsel Servolama
ICP	: Iterative Closest Point
İHA	: İnsansız Hava Aracı
KTGS	: Konum Tabanlı Görsel Servolama
Lab	: L*a*b* renk uzayı
mAh	: miliamper-saat
ms	: milisaniye
OpenCV	: Open Source Computer Vision Library
PD	: Proportional Derivative
PID	: Proportional Integral Derivative
PnP	: Perspective-n-Point
RGB	: Red Green Blue
RGB-D	: Red Green Blue Depth
SDK	: Software Development Kit
SIFT	: Scale-Invariant Feature Transform
ToF	: Time of Flight
Wi-Fi	: Kablosuz ağ bağlantı standardı
YOLO11	: You Only Look Once 11
.NET	: Microsoft .NET yazılım geliştirme platformu

1. GİRİŞ

Robotik sistemler endüstride, savunmada, tarımda, sağlıkta ve otonom taşıt uygulamalarında giderek daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlerin yalnızca önceden tanımlanmış ve yapılandırılmış ortamlarda değil, belirsizlik içeren gerçek çalışma koşullarında da güvenilir biçimde görev yapabilmesi gereklidir. Klasik algılayıcılar belirli görevler için yeterli olsa da çevrenin geometrisi ve hedefin görelî konumu değiştiğinde, hareketli nesnelere ile çalışıldığında, görüş hattındaki değişimler ve aydınlatma koşullarının farklılaşması gibi durumlarda çoğu zaman sınırlı kalmaktadır. Buna karşılık görüntü sensörleri; konum, yönelim, şekil, renk, kenar, doku ve hareket gibi çok boyutlu bilgi sundukları için robotik sistemlere daha zengin bir çevresel farkındalık kazandırmaktadır. Bu nedenle görsel bilginin denetim döngüsüne dahil edilmesiyle ortaya çıkan görsel servolama, modern robotik ve otonom sistemler alanında temel araştırma başlıklarından biri hâline gelmiştir.

Genel anlamda görsel servolama, görüntüden çıkarılan özniteliklerle tanımlanan mevcut durum ile istenen durum arasındaki farkın hata sinyali olarak kullanılması ve bu hatayı azaltacak hareket komutlarının üretilmesi esasına dayanır. Ancak görüntü sensörleri doğrudan üç boyutlu fiziksel büyüklükler sağlamaz. Bunun yerine bu büyüklüklerin iki boyutlu izdüşümlerini sağlar. Derinlik bilgisinin kaybı, kamera kalibrasyon doğruluğu, görüntü gürültüsü, öznitelik izleme hataları ve gerçek zamanlı hesaplama gereksinimleri gibi problemler görsel servolamanın temel zorluklarını oluşturmaktadır. Bu nedenle görsel servolama yalnızca bir görüntü işleme konusu değildir. Kamera modeli, kinematik, dinamik, etkileşim matrisi, kararlılık analizi ve gerçek zamanlı denetim boyutlarını içeren çok disiplinli bir çalışma alanıdır.

İzleyen alt bölümlerde görüntüden nokta, çizgi ve SIFT (Scale – Invariant Feature Transform) öznitelikleri çıkarımı ve görsel servolama kamera yerleşim konfigürasyonlarından bahsedilecektir. Nokta, çizgi ve SIFT öznitelik çıkarımı ayrı başlıklarda açıklanacaktır. Görsel servolama kamera yerleşim konfigürasyonları ise elde göz ve ele göz olarak incelenecektir.

1.1. Görüntüden öznitelik çıkarımı: nokta, çizgi ve sift öznitelikleri

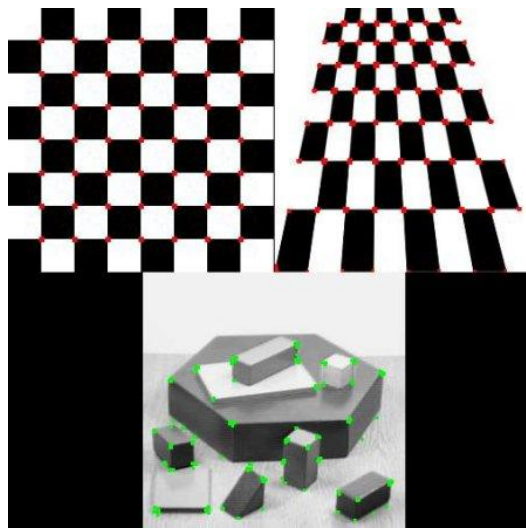
Görsel servolama ve görüntü tabanlı kontrol uygulamalarında kritik aşamalardan biri, görüntü üzerinde kontrol için kullanılacak güvenilir özniteliklerin çıkarılmasıdır. Bu öznitelikler; hedefin merkezini, yönelimini, kenar yapısını veya ayırt edici yerel desenlerini temsil edebilir. Literatürde en yaygın kullanılan öznitelik türleri arasında nokta öznitelikleri,

çizgi öznitelikleri ve ölçekten bağımsız yerel tanımlayıcılar yer almaktadır. Özellikle kamera ile hedef arasındaki göreceli konumun tahmini, hata sinyalinin oluşturulması ve kontrol girdisinin üretilmesi süreçlerinde bu öznitelikler doğrudan kullanılmaktadır.

1.1.1. Nokta özniteliklerinin çıkarılması

Bir renkli görüntü $I_{RGB}(x, y)$, öznitelik çıkarımında hesaplamayı kolaylaştırmak amacıyla gri seviyeye dönüştürülür. Nokta öznitelikleri, görüntü üzerinde çevresine göre belirgin yoğunluk değişimi gösteren ve bu nedenle ayırt edici kabul edilen yerel yapılarıdır. Bu öznitelikler çoğunlukla köşe, birleşim noktası veya yüksek eğrilikli bölgelerden elde edilir.

Nokta özniteliklerinin çıkarım süreci genellikle görüntünün gri seviyeye dönüştürülmesi, gürültünün azaltılması amacıyla Gauss filtresi ile yumuşatılması ve ardından yatay ile dikey doğrultudaki yoğunluk değişimlerinin, yani gradyanların hesaplanması ile başlar. Elde edilen gradyan bilgileri kullanılarak her pikselin bulunduğu bölgede iki farklı yönde ne kadar değişim gösterdiği analiz edilir. Eğer bir pikselin çevresinde hem yatay hem de dikey doğrultuda belirgin yoğunluk değişimi varsa, bu nokta köşe veya ayırt edici nokta olarak değerlendirilir. Daha sonra uygun eşikleme ve maksimum bastırma işlemleri uygulanarak yalnızca en güçlü ve anlamlı noktalar seçilir. Böylece görüntü üzerinde hedefin konumunu, geometrisini ve hareketini temsil etmede kullanılacak güvenilir nokta öznitelikleri elde edilmiş olur. Şekil 1.1'de nokta öznitelik çıkarımı görsel olarak anlatılmıştır.

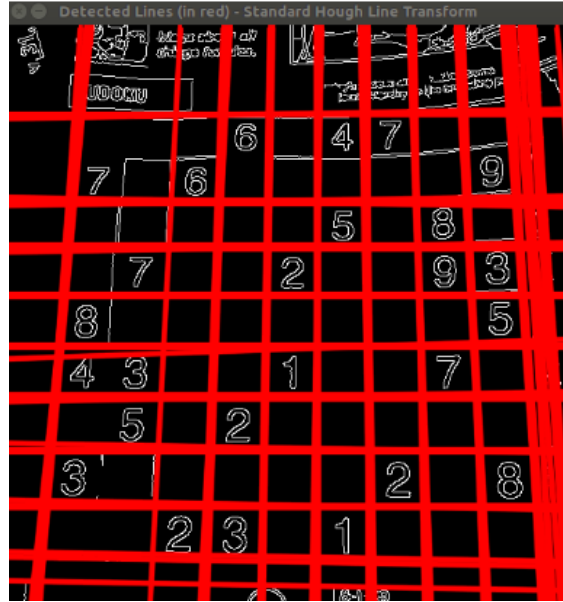


Şekil 1.1. Nokta öznitelik çıkarımına bir örnek (OpenCV HCD, 2025)

1.1.2. Çizgi özniteliklerinin çıkarılması

Çizgi öznitelikleri, özellikle dikdörtgen, yol, koridor, pencere, kapı ve hedef çerçevesi gibi geometrik yapıların belirlenmesinde önemli rol oynar. Görsel servolama uygulamalarında çizgi bilgisi, hedef yöneliminin ve görüntü düzlemindeki hizalamanın tahmini için oldukça kullanışlıdır. Şekil 1.2’de çizgi öznitelik çıkarımına bir örnek görülmektedir.

Çizgi öznitelikleri, görüntüdeki kenar yapılarının belirli bir doğrultuda süreklilik göstermesiyle elde edilen ve özellikle geometrik şekillerin tanımlanmasında önemli rol oynayan özniteliklerdir. Bu özniteliklerin çıkarımı süreci genellikle görüntünün gri seviyeye dönüştürülmesi ve görüntünün azaltılması için yumuşatma uygulanmasıyla başlar. Ardından görüntüdeki ani yoğunluk değişimleri belirlenerek kenarlar elde edilir. Kenar pikselleri belirlendikten sonra bu piksellerin aynı doğru üzerinde hizalanıp hizalanmadığı incelenir. Bu amaçla yoğunlukla Hough dönüşümü gibi yöntemler kullanılarak görüntü uzayındaki kenar noktaları parametre uzayında doğru adaylarına dönüştürülür. Parametre uzayında aynı doğruyu temsil eden kesişimlerin yoğunlaştığı bölgeler, görüntüde anlamlı bir çizginin varlığını gösterir. Son aşamada ise bu doğru adayları eşikleme ile seçilir ve başlangıç-bitiş noktaları belirlenerek çizgi parçaları elde edilir. Böylece hedefin kenarları, yönelimi ve geometrik sınırları hakkında bilgi sağlayan çizgi öznitelikleri çıkarılmış olur.

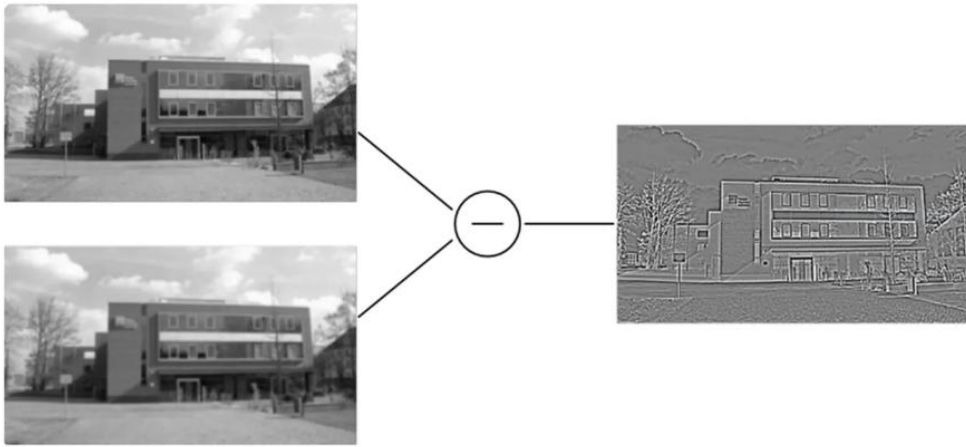


Şekil 1.2. Çizgi öznitelik çıkarımı (OpenCV HLT, 2025)

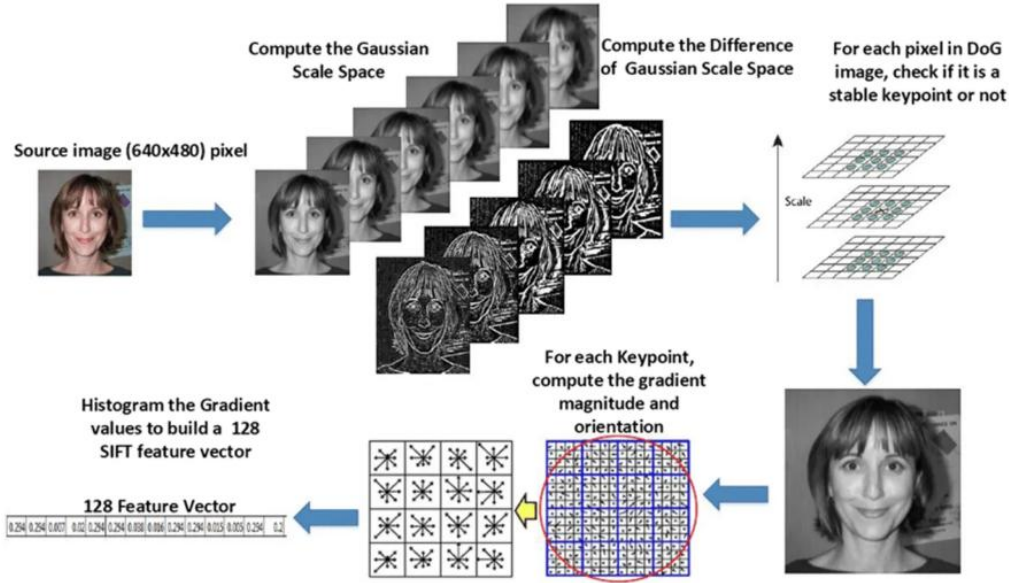
1.1.3. SIFT özniteliklerinin çıkarılması

SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), görüntüde yer alan ayırt edici yerel bölgeleri çok ölçekli olarak tespit eden ve bu bölgeler için dönmeye ve ölçek değişimine dayanıklı tanımlayıcılar oluşturan bir yöntemdir. Özellikle hedef tanıma, görüntü eşleme, poz kestirimi ve robotik görme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Lowe, 2004). SIFT yönteminin kuramsal temeli, Gauss ölçek uzayı ve otomatik ölçek seçimi yaklaşımıyla da ilişkilidir (Lindeberg, 1998).

SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) öznitelikleri, görüntüdeki ayırt edici yerel bölgelerin farklı ölçek ve yönelim koşulları altında kararlı biçimde tespit edilmesini sağlayan güçlü özniteliklerdir. SIFT özniteliklerinin çıkarımı, öncelikle görüntünün farklı ölçeklerde Gauss filtreleri ile bulanıklaştırılması ve bu ölçekler arasındaki farkların alınmasıyla elde edilen Difference of Gaussian (DoG) görüntülerinin oluşturulmasıyla başlar. Şekil 1.3'te görsel olarak açıklanmaktadır. Daha sonra her piksel, hem kendi ölçeğindeki hem de komşu ölçeklerdeki çevresi ile karşılaştırılarak yerel maksimum veya minimum noktalar belirlenir ve bu noktalar anahtar nokta adayları olarak seçilir. Seçilen adaylar, düşük kontrastlı veya kenar üzerinde kararsız olan noktaların elenmesiyle daha güvenilir hale getirilir. Ardından her anahtar nokta için çevresindeki gradyan yönleri incelenerek baskın yön atanır; böylece öznitelik dönmeye karşı dayanıklı hale gelir. Son aşamada ise anahtar noktanın çevresi alt bölgelere ayrılır, her alt bölgede gradyan yön histogramları oluşturulur ve bunlar birleştirilerek öznitelik tanımlayıcı vektörü elde edilir. Bu sayede SIFT, ölçek değişimi, dönme ve kısmi aydınlatma farklılıklarına karşı dayanıklı, ayırt edici ve eşleme işlemlerinde etkili bir öznitelik temsil yöntemi sunar. Şekil 1.4'de tüm bu aşamalar görsel olarak verilmiştir.



Şekil 1.3. Difference of gaussian çıkarımı (Palma vd, 2014)



Şekil 1.4. SIFT öznelik çıkarımı adımları (Murat M. Q., 2014)

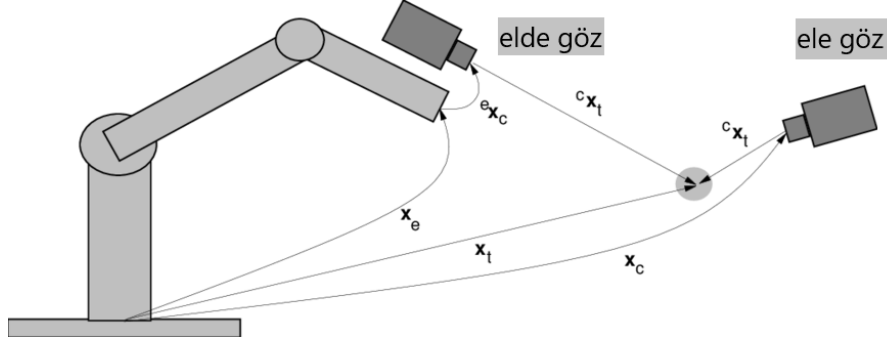
Nokta, çizgi ve SIFT öznelikleri farklı görsel görevlerde farklı avantajlar sunmaktadır. Nokta öznelikleri, özellikle köşe ve merkez tabanlı hata tanımlarında basit ve düşük maliyetli bir çözüm sunar. Çizgi öznelikleri, dikdörtgen ve çerçeve benzeri hedeflerde yönelim ve hizalama bilgisini daha güçlü biçimde temsil eder. SIFT öznelikleri ise ölçek, dönme ve kısmi aydınlatma değişimlerine karşı dayanıklı olmaları nedeniyle daha karmaşık sahnelerde ve hedef eşleme problemlerinde öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, SIFT yönteminin hesaplama yükü daha yüksektir. Bu nedenle gerçek zamanlı insansız hava aracı uygulamalarında kullanılacak öznelik tipi; işlem yükü, sahne karmaşıklığı, hedef geometrisi ve kontrol gereksinimleri dikkate alınarak seçilmelidir.

Bu tez çalışmasında hedef yapı dikdörtgen ve renk tabanlı olarak belirgin olduğundan, kontrol için daha çok geometrik ve bölgesel özneliklerin kullanılması uygun olmaktadır. Bununla birlikte, nokta ve çizgi özneliklerinin kuramsal temeli ile SIFT gibi gelişmiş yerel öznelik çıkarım yöntemlerinin anlaşılması, görsel servolama literatürünün bütüncül olarak değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır (Lindeberg, 1998).

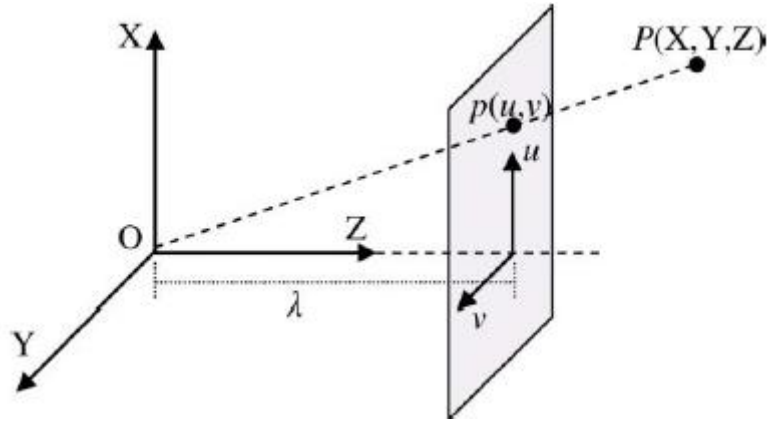
1.2. Görsel servolama kamera yerleşim konfigürasyonları

Görsel servolama sistemleri kamera yerleşimine göre elde göz (eye-in-hand) ve ele göz (eye-to-hand) olarak Şekil 1.5'te gösterildiği gibi ikiye ayrılmaktadır. Elde göz yaklaşımında kamera doğrudan robot ya da taşıt üzerine yerleştirilmektedir. Böylece kamera ve hareketli platform birlikte hareket etmektedir. Ele göz yaklaşımında ise kamera çalışma alanına sabitlenmekte ve sistem dışarıdan gözlemlenmektedir. Elde göz yapısı, özellikle mobil robotlar

ve insansız hava araçları için hedefe göre görelî hareketin doğrudan algılanabilmesi bakımından avantaj sağlar. Ele göz yapısı ise daha geniş bir görüş alanı sunabilmekle birlikte örtülme ve çevresel karmaşıklık problemlerine daha açık olabilir. Hava araçları için görsel servolama çalışmalarında çoğunlukla elde göz yapısının tercih edildiği görülmektedir.



Şekil 1.5. Elde göz ve ele göz gösterimi (Hutchinson vd, 1996)



Şekil 1.6. İğne deliği kamera modeli (Yuksel, 2015)

Görüntü tabanlı görsel servo kontrolde, Şekil 1.6'da gösterilen bir noktanın görüntü düzlemine izdüşümü

$$u = \lambda X/Z \text{ ve } v = \lambda Y/Z \quad (D.1)$$

bağıntılarıyla ifade edilir. Nesne üzerindeki köşe, nokta, çizgi ya da moment gibi ayırt edici görsel öznitelikler görüntüden çıkarılarak

$$s = [u_1, v_1, \dots, u_n, v_n]^T \quad (D.2)$$

biçiminde bir öznitelik vektöründe toplanır. İstenen görünüm için tanımlanan s^* ile anlık ölçülen öznitelikler s arasındaki fark

$$e = s - s^* \quad (D.3)$$

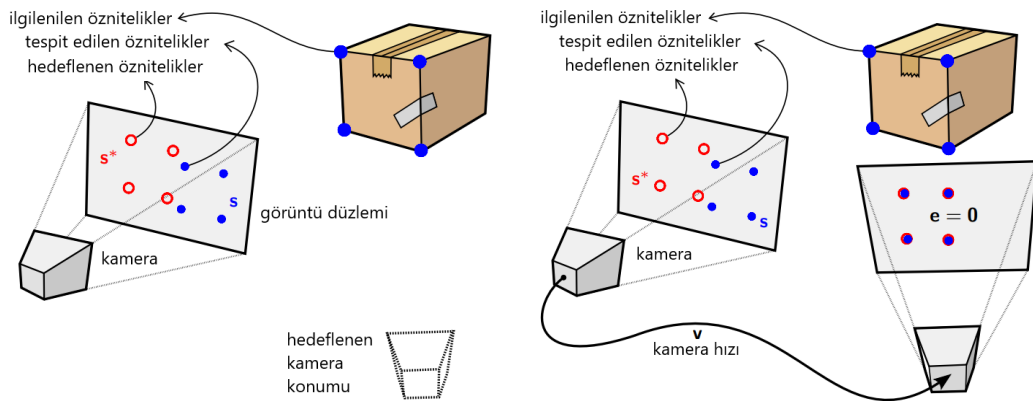
görsel hata vektörünü verir. Şekil 1.7’de gösterildiği gibi, amaç ölçülen öznelikleri kamera hareketi yardımıyla istenen özneliklere yaklaştırmaktır. Bu nedenle özneliklerin zamana göre değişimi kamera uzaysal hızı v ile $\dot{s} = L_s v$ bağıntısı üzerinden ilişkilendirilir. Burada L_s etkileşim matrisi olup görüntü düzlemindeki öznelik değişimini kamera hareketine bağlar. Hatanın üstel olarak sıfıra gitmesi için

$$\dot{e} = -\lambda e, \lambda > 0 \quad (D.4)$$

seçildiğinde, sabit hedef için $\dot{s}^* = 0$ kabulü altında görüntü tabanlı görsel servo kontrol kuralı

$$v = -\lambda L_s^+ e \quad (D.5)$$

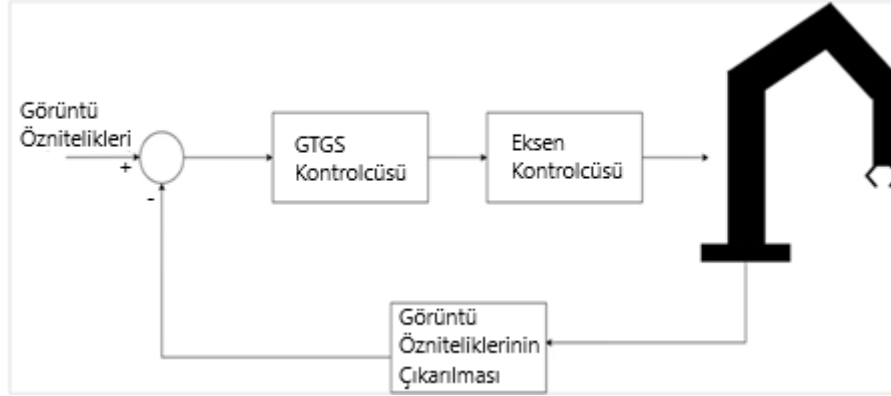
biçiminde elde edilir. Böylece görüntü izdüşümü ile başlayan ve öznelik çıkarımıyla sayısallaştırılan görsel bilgi, doğrudan kontrol girdisine dönüştürülerek İHA’nın ya da robotun hedef görüntüye hizalanması sağlanır.



Şekil 1.7. Özneliklerden görüntü tabanlı görsel servo kontrole geçiş (Antonio P., 2021)

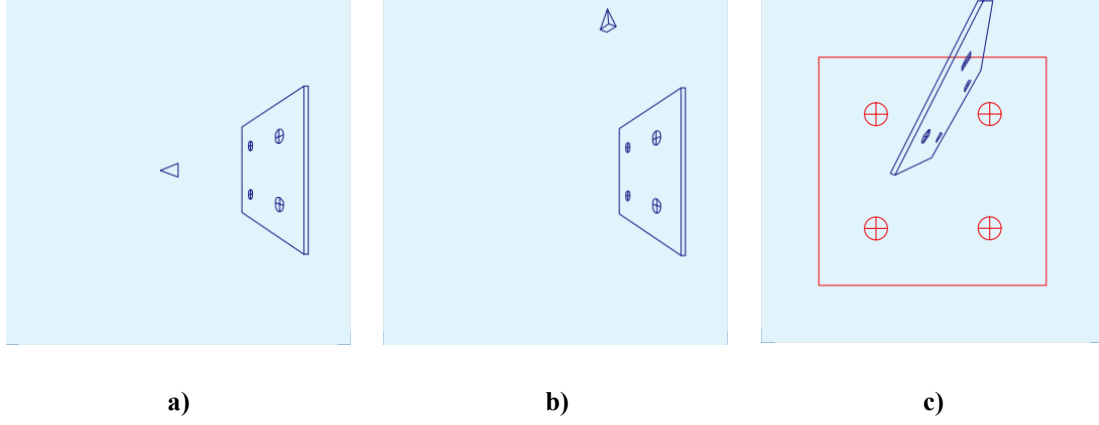
Görsel servolama stratejileri temel olarak üç ana başlıkta incelenmektedir. Bunlar, Görüntü Tabanlı Görsel Servolama (GTGS), Konum Tabanlı Görsel Servolama (KTGS) ve hibrit 2-1/2 görsel servolamadır (HGS). Görüntü tabanlı görsel servolamada hata, doğrudan görüntü düzlemindeki özneliklerin istenen görüntü konumlarına göre tanımlanır. Şekil 1.8’de GTGS’nin blok diyagramı bulunmaktadır. Hedef noktaların, kenarların, merkezlerin veya bölgesel özneliklerin mevcut ve istenen görüntü koordinatları arasındaki fark kontrolü için kullanılır. Bu yöntemin en önemli avantajı, kontrolün doğrudan görüntü uzayında tanımlanması nedeniyle üç boyutlu konum kestirimi gereksinimini azaltması ve bazı durumlarda kalibrasyon hatalarına karşı daha dayanıklı olabilmesidir. Ayrıca özneliklerin görüntü düzleminde nasıl

hareket ettiği doğrudan takip edilebildiğinden, görüş alanı içinde kalma problemi daha kolay yönetilebilir. Bununla birlikte, GTGS’de uzaydaki hareket her zaman sezgisel olmayabilir. Büyük dönmelerde veya elverişsiz başlangıç koşullarında tekillikler, yerel minimumlar ve beklenmeyen kamera hareketleri ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 1.8. Görüntü tabanlı görsel servolama blok diyagram

Görüntü tabanlı görsel servolama, görsel özniteliklerin doğrudan görüntü düzleminden elde edilmesi ve denetimin bu öznitelik hatasına göre kurulması nedeniyle uygulamada oldukça yaygın bir yaklaşımdır. Şekil 1.9’da kameranın ve hedefin pozisyonları gösterilmiştir. GTGS her durumda istenen uzaysal hareketi üretmez. Chaumette, 1998 tarihli çalışmasında hem GTGS hem de KTGS yapılarında bazı başlangıç konfigürasyonlarında yakınsama ve kararlılık problemlerinin ortaya çıkabileceğini göstermiştir (Chaumette, 1998). Daha sonra Corke ve Hutchinson, GTGS’nin bu sezgisel olmayan davranışının en uç örneklerinden birini “Chaumette Conundrum” olarak adlandırmıştır (Corke, 2001).



Şekil 1.9. Kamera ve hedef pozisyonları **Şekil 1.9.a.** Basit bir hedefe göre istenen kamera pozisyonu **Şekil 1.9.b.** Başlangıç kamera pozisyonu **Şekil 1.9.c.** Hedefin karşılık gelen başlangıç ve istenen pozisyonu (Chaumette ve Hutchinson, 2006)

Chaumette Conundrum'un klasik biçimi, kameranın optik eksenini etrafında π radyanlık bir dönmeye gitmesinin gerektiği durumda ortaya çıkar. Corke ve Hutchinson'un verdiği örnekte, başlangıçta (u, v) koordinatlarında bulunan bir görüntü noktası için istenen konum $(-u, -v)$ olur; ancak standart GTGS kontrolü bu noktaları dönmeye zorlamak yerine görüntü merkezine doğru sürer (Corke, 2001). Bu sırada sistem görüntü Jacobian'ının tekil bir bölgesine yaklaşır. Noktalar merkeze ulaştığında görünür hareket kaybolur ve teorik modelde kamera hedeften sonsuz uzaklığa doğru geri çekilir. Bu nedenle söz konusu durum literatürde “camera retreat to infinity” olarak da açıklanmaktadır.

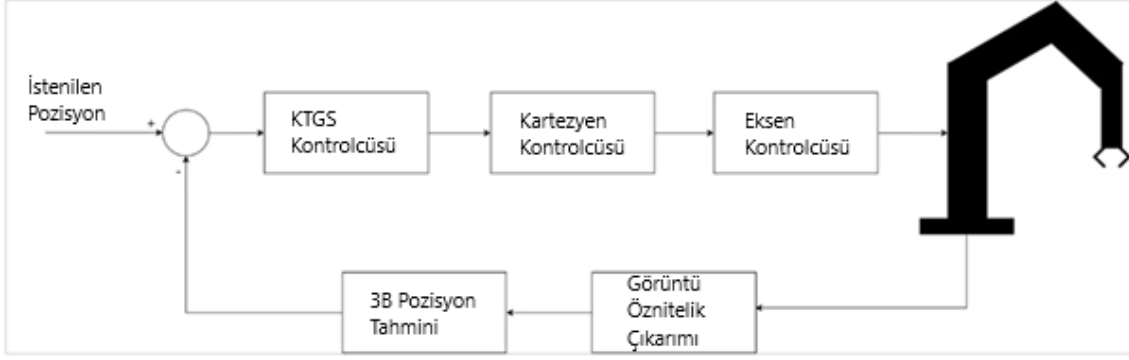
Bu problem, yalnızca görüntü hatasının azalmasının iyi bir denetim davranışı için yeterli olmadığını göstermesi açısından önemlidir. Chaumette ve Hutchinson, büyük dönmelerde öz nitelik seçimi ile etkileşim matrisi içindeki bağlaşımın bu beklenmeyen hareketleri artırdığını, dönme π radyana yaklaştığında ise denetim yasasının hiç dönme üretmeyebildiğini vurgulamıştır (Chaumette ve Hutchinson, 2006). Aynı çalışmada, birçok GTGS uygulamasında kullanılan öz nitelik sayısı serbestlik derecesinden büyük olduğunda yerel minimumların da ortaya çıkabileceği belirtilmiştir. Dolayısıyla Chaumette Conundrum, GTGS'in yalnızca tekillik problemi değil, aynı zamanda yerel minimum ve alt-optimal uzaysal yörünge problemi de olabileceğini gösteren temel bir örnektir (Chaumette ve Hutchinson, 2007).

Literatürde bu sorunu azaltmak için çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Corke ve Hutchinson, dönme ve öteleme bileşenlerini ayırıştırarak partitioned GTGS yaklaşımını önermiş ve özellikle z-ekseni etrafındaki dönme ile z doğrultusundaki ötelemeyi diğer serbestlik derecelerinden ayırarak bu problem sınıfını hafifletmeyi amaçlamıştır (Corke ve Hutchinson, 2001). Malis, Chaumette ve Boudet ise $2\frac{1}{2}$ görsel servolama yaklaşımında 2B ve 3B bilginin

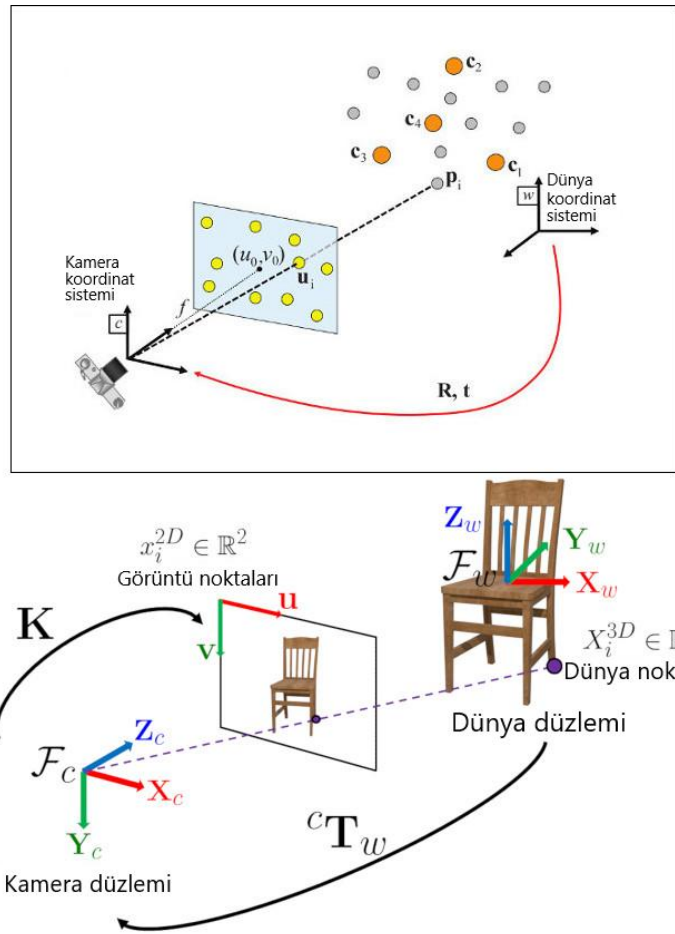
avantajlarını birleştiren, klasik KTGS ve GTGS'nin sakıncalarını azaltan ve tüm görev uzayında yakınsamayı hedefleyen bir yapı sunmuştur (Malis ve Chaumette, 1999). Chaumette ve Hutchinson'un ikinci makalesi de bu tür gelişmiş yöntemlerin temel amacının KTGS ve GTGS'nin görelî eksikliklerini telafi etmek olduğunu açıkça belirtmektedir (Chaumette ve Hutchinson, 2007).

Bu nedenle Chaumette Conundrum, tezlerde yalnızca tarihsel bir problem örneği olarak değil, aynı zamanda neden hibrit, ayrıştırılmış veya 2-½ tabanlı görsel servolama yapılarının geliştirildiğini açıklayan kuramsal bir dayanak olarak ele alınmalıdır. Özellikle büyük açışal sapmaların bulunduğu görevlerde, yalnızca görüntü hatasını küçültmeye odaklanan bir kontrol yapısının fiziksel uzayda verimsiz veya başarısız hareketler üretebileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Chaumette ve Hutchinson, 2007).

KTGS'de ise görüntüden çıkarılan öznitelikler, hedefin veya kameranın üç boyutlu konumunun kestirilmesinde kullanılır ve kontrol bu üç boyutlu konum hatasına göre yürütülür. Şekil 1.10'da KTGS'nin blok diyagramı gösterilmiştir. Bu yaklaşım, uzaysal hareket açısından daha düzenli, daha yorumlanabilir ve çoğu durumda daha kısa yollu yörüngeler üretme avantajına sahiptir. Bu nedenle geniş manevra alanı gerektiren görevlerde, hedef geometrisinin bilindiği senaryolarda ve tam görelî konumlama istenen uygulamalarda KTGS güçlü bir yöntemdir. Ancak doğru konum kestirimi için kamera kalibrasyonunun güvenilir olması, çoğu zaman hedefe ait üç boyutlu model bilgisinin bulunması ve görüntüden çıkarılan bilgilerin tutarlı olması gerekir. Ayrıca denetim üç boyutlu uzayda tanımlandığından, özniteliklerin görüş alanından çıkması durumunda sistem başarımı düşebilir veya görev başarısız olabilir. Bu nedenle KTGS, güçlü geometrik avantajlarına rağmen uygulamada daha yüksek hesaplama ve model doğruluğu gerektiren bir yapıya sahiptir.



Şekil 1.10. Konum tabanlı görsel servolama blok diyagramı



Şekil 1.11. Özniteliklerden konum tabanlı görsel servo kontrole geçiş (OpenCV PnP, 2025)

Konum tabanlı görsel servo kontrolde, Şekil 1.11’de gösterildiği üzere, denetim süreci öncelikle nesne üzerindeki 3B referans noktalarının görüntü düzlemindeki 2B özniteliklere izdüşürülmesiyle başlar ve bu ilişki

$$s \mathbf{p}_i = K[R \mid t]\mathbf{P}_{w,i} \quad (\text{D.6})$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada $\mathbf{P}_{w,i} = [X_{w,i} \ Y_{w,i} \ Z_{w,i} \ 1]^T$ nesne ya da dünya koordinat takımında tanımlanan i . 3B referans noktasını, $\mathbf{p}_i = [u_i \ v_i \ 1]^T$ ise bu noktanın görüntü düzlemindeki homojen koordinatlarını göstermektedir. Denklemden yer alan s perspektif izdüşümden kaynaklanan ölçek katsayısını, K kamera iç parametre matrisini, R dönme matrisini ve t öteleme vektörünü ifade etmektedir. Görüntüden çıkarılan köşe, nokta veya benzeri özneliklerin nesnenin bilinen 3B modeli ile eşleştirilmesi sonucunda kameranın nesneye göre konumu

$${}^cT_w = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (D.7)$$

şeklinde kestirilir. Bu aşamadan sonra KTGS yaklaşımında görsel bilgi artık yalnızca görüntü koordinatlarıyla değil, doğrudan 3B konum parametreleriyle temsil edilir ve özellik vektörü

$$s_p = ({}^c t_o, \theta \mathbf{u}) \quad (D.8)$$

olarak tanımlanır. Burada ${}^c t_o$ nesne orijininin mevcut kamera koordinat takımına göre konumunu, $\theta \mathbf{u}$ ise yönelim hatasının eksen-açı gösterimini ifade etmektedir. Bu gösterimde θ dönme açısını, \mathbf{u} ise birim dönme eksenini belirtir. İstenen konum için

$$s_p^* = ({}^c t_o^*, \mathbf{0}) \quad (D.9)$$

tanımı yapıldığında, mevcut ve istenen konum arasındaki hata

$$e = s_p - s_p^* = ({}^c t_o - {}^c t_o^*, \theta \mathbf{u}) \quad (D.10)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklemden e , öteleme ve yönelim bileşenlerini birlikte içeren konum hatası vektörüdür. Konum hatasının zamana göre değişimi kamera uzaysal hızı ile

$$\dot{e} = L_e \mathbf{v}_c \quad (D.11)$$

ilişkisi üzerinden tanımlanır. Burada L_e konum hatası ile kamera hareketi arasındaki diferansiyel bağıntıyı kuran etkileşim matrisini, $\mathbf{v}_c = [v_x \ v_y \ v_z \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ ise kameranın doğrusal ve açısal hız bileşenlerinden oluşan uzaysal hız vektörünü göstermektedir. Sistemin istenen konuma üstel olarak yakınsaması amacıyla $\dot{e} = -\lambda e$, $\lambda > 0$, seçildiğinde, konum tabanlı görsel servo kontrol kuralı

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \hat{L}_e^+ e \quad (D.12)$$

biçiminde elde edilir. Bu ifadede λ yakınsama hızını belirleyen pozitif kontrol kazancını, \hat{L}_e^+ ise etkileşim matrisinin genelleştirilmiş tersini göstermektedir. Sonuç olarak, Şekil 1.11'de de

görüldüğü gibi, görüntü düzleminden çıkarılan 2B öznitelikler önce 3B poz bilgisine dönüştürülmekte, ardından bu poz bilgisi kullanılarak uygun doğrusal ve açılal hız komutları üretilmekte ve sistemin istenen konum ile yönelime yakınsaması sağlanmaktadır.

Hibrit görsel servolama yöntemi ise, görüntü tabanlı ve konum tabanlı görsel servolama yaklaşımlarının güçlü yönlerini bir araya getirmeyi amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, bir yandan görüntü düzleminden elde edilen öznitelikler kullanılarak hedefin kamera görüntüsündeki konumu doğrudan izlenirken, diğer yandan hedefin veya kameranın uzaydaki görelil konumuna ilişkin bilgiler de kontrol sürecine dahil edilir. Böylece görüntü tabanlı yaklaşımın yüksek görsel hassasiyeti ile pozisyon tabanlı yaklaşımın daha sezgisel hareket planlama avantajı birlikte kullanılabilir. Hibrit yapı, özellikle yalnızca tek bir yöntemin yeterli olmadığı durumlarda daha kararlı, daha esnek ve uygulamaya daha uygun bir kontrol davranışı sağlayabilir. Bu nedenle karmaşık hedef hizalama, yaklaşma ve geçiş görevlerinde hibrit görsel servolama, hem görüntü bilgisinden yararlanması hem de uzaysal hareketi daha anlamlı biçimde yönlendirmesi açısından önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir

Bu tez çalışması, görsel servo kontrol yardımıyla bir insansız hava aracının otonom hizalanması ve hedefe yönelmesi problemini ele almaktadır. Çalışmada kullanılan platform Parrot AR.Drone 2.0 olup, hava aracının ön kamerasından alınan görüntüler üzerinden dışı yeşil, içi kırmızı ve içi boş dikdörtgen bir hedef tespit edilmektedir. Hedefin merkezinin gerçek zamanlı olarak bulunması ve bu merkez bilgisinin kontrol döngüsünde hata sinyali olarak kullanılmasıyla, hava aracının hedefin karşısına otonom biçimde hizalanması amaçlanmaktadır. Ardından uygun yönelim sağlandığında, hava aracının hedef açıklığına yönelmesi ve bu açıklığın içinden geçmesi hedeflenmektedir. Bu yönüyle çalışma, yalnızca hedef takibi veya görüntü merkezleme problemi olmayıp; hedef tespiti, merkez çıkarımı, hizalanma, yönelim ve geçiş aşamalarını bir arada içeren bütünleşik bir görev yapısı sunmaktadır.

Çalışmada, AR.Drone 2.0'ın 1280×720 çözünürlüklü ön kamerasından elde edilen görüntüler üzerinde önce mercek bozulumunun düzeltilmesi gerçekleştirilmektedir. Geniş açılı kamera nedeniyle oluşan balık gözü bozulumunun hedef geometrisini ve merkez hesabını olumsuz etkileyebileceği değerlendirildiğinden, Emgu CV kullanılarak bozulum azaltılmakta ve daha sonra OpenCV tabanlı görüntü işleme aşamasına geçilmektedir. Hedefin ayrıştırılmasında Lab renk uzayı tercih edilmekte; yeşil dış bölge ve kırmızı iç bölge uygun eşikleme yöntemleriyle belirlenmektedir. Daha sonra kontur bilgisi ve geometrik değerlendirmeler yardımıyla içi boş dikdörtgen yapının merkezi bulunmakta ve bu merkez, istenen görüntü merkezi ile karşılaştırılarak kontrol için kullanılmaktadır. Bu yapı, temel olarak

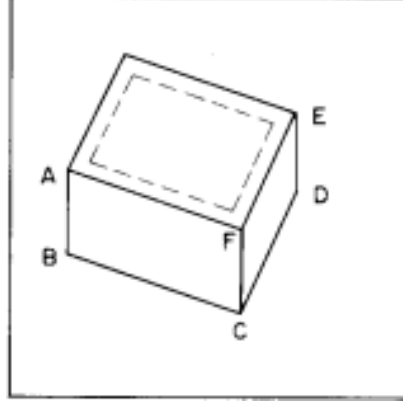
görüntü düzlemindeki hata bilgisine dayandığı için ağırlıklı olarak görüntü tabanlı görsel servolama karakteri taşımaktadır.

Bu çalışmanın yanlış pozitiflerden kaçınmak için görsel olarak ayırt ediciliği yüksek özel bir çerçeveye ihtiyacı bulunmaktadır. Dışı yeşil, içi kırmızı ve içi boş dikdörtgen yapı hem renk tabanlı ayrıştırma hem de geometrik merkez hesabı açısından yüksek kontrastlı ve deneysel olarak denetlenebilir bir hedef sunmaktadır. Böylece hedefin güvenilir biçimde tespit edilmesi, yanlış algılamaların azaltılması ve kontrol için kullanılan hata sinyalinin kararlılığının artırılması amaçlanmaktadır. Çalışmada pencere geçişi ve açıklık içinden uçuş problemlerine benzer bir görev tanımını ele alınmıştır. Bununla birlikte, hedefin özel olarak tasarlanmış olması deneysel tekrarlanabilirlik ve kontrol edilebilirlik açısından avantaj sağlamaktadır.

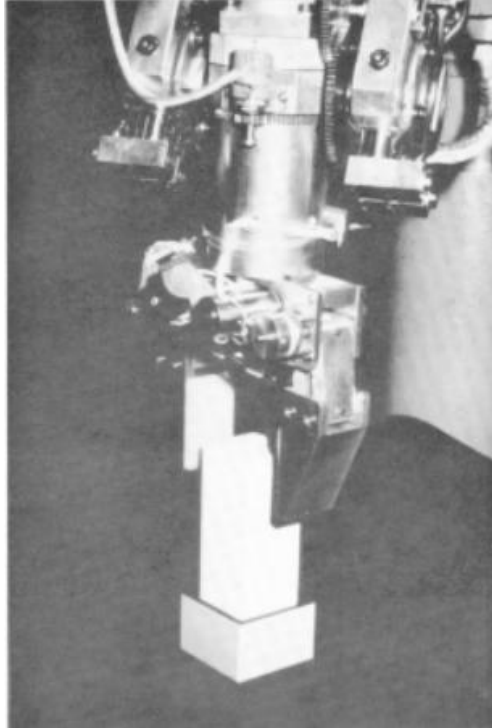
Bu tez çalışması görsel servolamanın tarihsel gelişimi ve yöntemsel çerçevesi içinde uygulama odaklı bir araştırma niteliği taşımaktadır. Çalışmada düşük maliyetli bir ticari hava aracı üzerinde gerçek zamanlı görüntü işleme, bozulmuş düzeltme, renk tabanlı hedef tespiti, hedef merkezine göre hizalanma ve açıklıktan geçiş davranışı bir arada ele alınmıştır. Çalışma, GPS'siz veya yarı yapılandırılmış ortamlarda, görsel geri besleme ile otonom yönelim ve görel konumlama problemlerine uygulanabilir bir çözüm önermekte; aynı zamanda Türkiye'de İHA tabanlı görsel servolama çalışmalarına hedef merkezleme ve açıklık geçişi boyutunu ekleyerek katkı sunmaktadır.

2. KURAMSAL / KAVRAMSAL TEMELLER

Görsel servolama alanındaki çalışmalar tarihsel olarak incelendiğinde, ilk örneklerin robotların görsel geri besleme yardımıyla yönlendirilmesine yönelik temel denemeler olduğu görülmektedir. Shirai ve Inoue montaj görevlerinde görsel bilginin robot yönlendirmesinde kullanılabileceğini göstermiştir (Shirai ve Inoue, 1973). Şekil 2.1’de hedefin çizgiler ile çıkarımı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kutunun çizgiler ile gösterimi (Shirai ve Inoue, 1973)



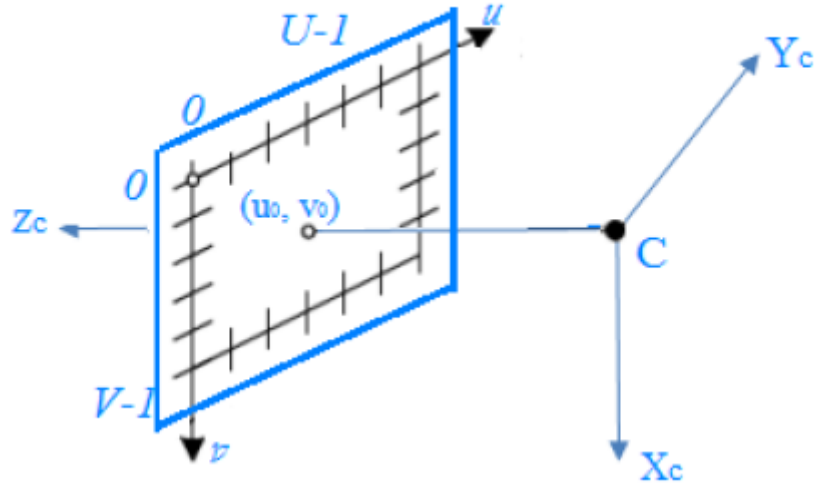
Şekil 2.2. Robot ile yapılan montaj işlemi (Shirai ve Inoue, 1973)

Hill ve Park ise gerçek zamanlı görsel geri beslemeli robot kontrolünü ele alarak alanın terminolojik ve kavramsal gelişimine katkı sağlamıştır (Hill ve Park, 1979). Şekil 2.2’de robot ile yapılan montaj işlemi görülmektedir. 1990’lı yıllarda Espiau, Chaumette ve Rives, görsel sensörün kapalı çevrim içinde göreve özgü bir sensör olarak ele alınması gerektiğini vurgulamış ve böylece görsel servolamanın kuramsal altyapısını güçlendirmiştir (Espiau vd., 1992). Hutchinson, Hager ve Corke ile Chaumette ve Hutchinson’ın iki bölümlük kapsamlı derlemeleri ise alanı sistematik bir yapıya kavuşturmuştur (Hutchinson vd, 1996).

Görsel servolamanın temel yöntemleri literatürde çoğunlukla görüntü tabanlı, konum tabanlı ve hibrit yapı olarak sınıflandırılmaktadır. Habiyambere tez çalışmasında bu sınıflandırmayı açık biçimde vermiştir. KTGS, GTGS ve hibrit görsel servolamayı ana stratejiler olarak sunmuştur (Habiyambere, 2018). Aynı tez çalışmasında görsel servolamanın yalnızca strateji bakımından değil, kamera yapılandırması, kamera sayısı, hedef durumu ve görüntü özelliği bakımından da sınıflandırılabileceğini belirtmiştir. Ele göz ve elde göz kurulumları, mono ve stereo görüş, statik ve hareketli hedefler ile nokta, çizgi ve moment tabanlı öznitelikler bu sınıflandırma içinde yer almaktadır.

GTGS yaklaşımı, görüntü düzleminde tanımlanan hata vektörüne dayandığı için özellikle merkezleme, görsel takip ve özniteliklerin görüş alanında tutulması gereken görevlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Habiyambere tez çalışmasında görüntü tabanlı görsel servolamada hata sinyali ve kontrol komutunu görüntü alanında hesaplamıştır. Kontrolün amacının, görüntü özellik parametre hatasını en aza indirmek olduğunu ifade etmiştir. Aynı tezde, yakın nesnelere çalışırken ToF (Time of Flight) ve RGB-D (Red-Green-Blue-Depth) gibi algılayıcıların sınırlamalarından söz etmiş, bu nedenle yakın çalışma alanlarında alternatif görsel yapıların önem kazandığını belirtmiştir (Habiyambere, 2018). Kurt tez çalışmasında GTGS’nin doğrudan görüntü düzleminde çalıştığı için genellikle hızlı olduğunu, ancak üç boyutlu işlem yapılmadığından karmaşık hareketlerde zorluk çıkarabildiğini belirtmiştir (Kurt, 2025).

KTGS yaklaşımı ise görüntüden çıkarılan bilgiler yardımıyla hedefin üç boyutlu konumunun kestirilmesine ve kontrolün bu konum bilgisi üzerinden kurulmasına dayanır. Şekil 2.3’te hedefin kamera düzleminde ifadesi gösterilmiştir. Habiyambere tez çalışmasında KTGS’nin kameranın iç parametrelerine ve gözlenen nesnenin üç boyutlu modeline ihtiyaç duyduğunu, dolayısıyla klasik üç boyut konumlandırma problemine dayandığını belirtmiştir.

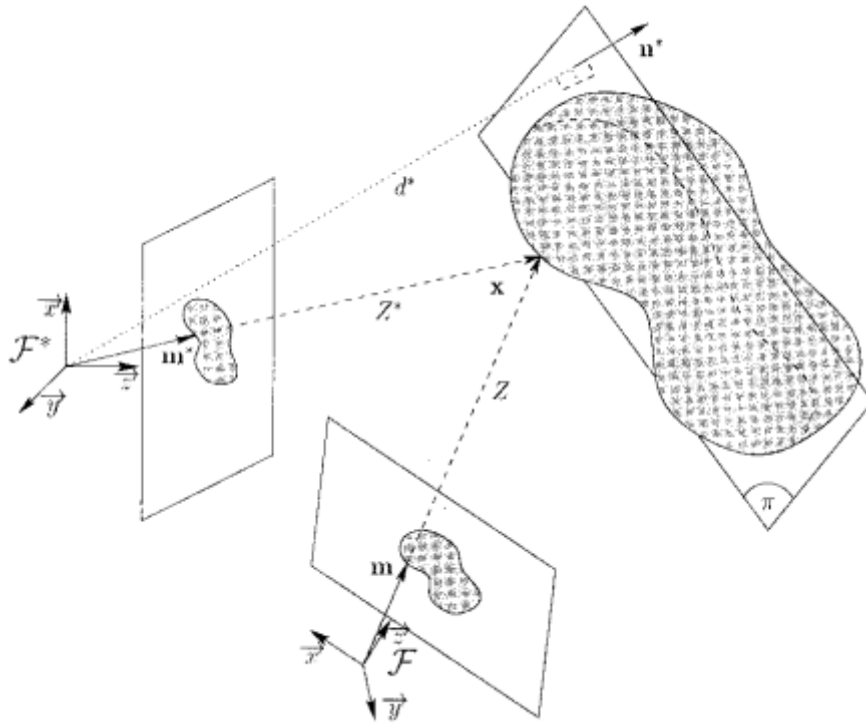


Şekil 2.3. Bir kamera görüntü düzlemindeki pikseller (Habiymbere, 2018)

Bunlara ek olarak kalibrasyon doğruluğu da önem arz ettiği için karmaşık olabildiğini ifade etmiştir. Ayrıca stereovizyon kullanımıyla iki kamera görüntüsünden üç boyutlu konumun yeniden oluşturulmasının mümkün olduğunu belirtmiştir. Kurt tez çalışmasında KTGS'nin hedef nesnenin üç boyutlu konum bilgisine göre robot yörüngesini dinamik olarak güncellediğini ve geniş çalışma alanları ile daha karmaşık hareketler için uygun olduğunu vurgulamıştır. Ünlü tez çalışmasında KTGS yaklaşımını, döner kanatlı İHA'lar (İnsansız Hava Araçları) için özniteliklere bağlı duruş kestirimi gerektiren bir yapı olarak ele almıştır (Ünlü, 2022).

Hibrit görsel servolama, iki yaklaşımın sınırlarını aşmak için geliştirilmiştir (Malis vd, 1999). Şekil 2.4'de görsel olarak belirtilmiştir. Ceren tez çalışmasında Türkiye'de hibrit görsel servo kontrolünü İHA üzerinde uygulamıştır (Ceren, 2010). Bu çalışmasında görsel servo kontrol tekniklerinin küçük ölçekli hava araçlarında uygulanabildiğini, iç ve dış döngüden oluşan bir kontrol mimarisinin kullanıldığını ve hibrit görsel servo yaklaşımıyla kamera açılal konumunun da denetim sürecine dahil edildiğini belirtmiştir. Çalışmanın eklerinde hem görüntü esaslı hem hibrit görsel servolama sistemine ait Simulink modellerine yer vermiş, iki yaklaşımı uygulama düzeyinde karşılaştırmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan küresel kamera, geniş görüş alanı sayesinde hedefin görüntü dışına çıkma olasılığını azaltarak görsel servolama için daha sürekli ve güvenilir öznitelik elde edilmesine imkân sağlamaktadır. Ceren tez çalışmasında küresel izdüşüm temelli hibrit yaklaşımın, bütün görev alanı boyunca tekil nokta problemini ortadan kaldırmaya yardımcı olduğunu, kalibrasyon ve modelleme hatalarına karşı daha dayanıklı bir yapı sunduğunu ve hedefin görüş alanında tutulmasını kolaylaştırdığını

belirtmiştir. Buna karşılık, küresel kameranın geometrik modelinin ve kalibrasyonunun klasik perspektif kameralara göre daha karmaşık olduğunu vurgulamış, görüntülerin işlenmesinin daha fazla hesaplama gerektiğini belirtmiştir. Yöntemin görüntü gürültüsü ile görüntü işleme hatalarına karşı daha hassas davranabildiğini belirtmiş, bu nedenle küresel kameranın, özellikle hedef takibi ve kararlılık açısından önemli avantajlar sunsa da, uygulamada daha dikkatli kalibrasyon, daha güçlü görüntü işleme ve daha karmaşık algoritmik tasarım gerektiren bir algılayıcı olduğunu açıklamıştır.



Şekil 2.4. 2-1/2 GörSEL servolama (Malis vd, 1999)

İnsansız hava araçları için görsel servolama literatürü, özellikle hedef takibi, iniş, görel konumlama ve otonom yönelim problemlerine odaklanmıştır. Altuğ, Ostrowski ve Mahony dört rotorlu bir hava aracının görsel geri besleme ile denetimini gerçekleştirmiştir (Altuğ vd, 2002). Saripalli, Montgomery ve Sukhatme görsel rehberli iniş problemi üzerinde çalışmış ve hedefe göre görel konum bilgisinin iniş kontrolüne aktarılmasını sağlamıştır (Saripalli vd, 2003). Yang, Scherer ve Zell tek kameralı bir yapı ile kalkış, havada asılı kalma ve iniş görevlerini gerçekleştirmiş, görsel servolamanın mikro hava araçlarında da uygulanabilir olduğunu göstermişlerdir (Yang vd, 2013). Pestana ve arkadaşları GPS'siz ortamda nesne takibi ve nesnenin görüntü merkezinde tutulması için öne bakan kamera tabanlı bir yaklaşım önermiştir (Pestana vd, 2013). Ho ve Chu ise döner kanatlı hava aracı için görsel servolama tabanlı otomatik iniş sistemi geliştirmiştir (Ho ve Chu, 2013).

Bu çalışmalar, insansız hava araçlarında görsel servolamanın uygulanabilirliğini göstermeleri bakımından önemli katkılar sunmakla birlikte, çoğunlukla belirli hedef işaretlerine, kontrollü deney koşullarına ve sınırlı görev senaryolarına dayanması nedeniyle bazı önemli kısıtlar taşımaktadır. Altuğ, Ostrowski ve Mahony'nin çalışmasında dört rotorlu hava aracının denetimi görsel geri besleme ile sağlanmış olsa da, sistemin harici kamera altyapısına dayanması yöntemin gerçek saha uygulamalarında taşınabilirliğini ve tam otonomluğunu sınırlandırmaktadır (Altuğ vd., 2002). Saripalli, Montgomery ve Sukhatme tarafından ele alınan görsel rehberli iniş yaklaşımı, hedefe göre görel konum bilgisinin iniş kontrolüne aktarılmasını sağlamasına rağmen, belirgin bir iniş işaretine ve yardımcı seyrüsefer bileşenlerine ihtiyaç duyması nedeniyle doğal ve karmaşık ortamlarda genellenebilirlik açısından zayıf kalmaktadır (Saripalli vd., 2003). Yang, Scherer ve Zell'in tek kameralı yapısı kalkış, havada asılı kalma ve iniş görevlerinde başarılı sonuçlar üretmiş olsa da, önceden tanımlı iniş pisti geometrisine dayanması ve tek kamera kullanımından kaynaklanan ölçek belirsizlikleri yöntemin işaretsiz veya düzensiz hedeflere uygulanmasını güçleştirmektedir (Yang vd., 2013). Pestana ve arkadaşlarının GPS'siz ortamda nesne takibi için geliştirdiği yaklaşım, hedefin görüntü merkezinde tutulmasını başarıyla gerçekleştirse de, yüksek doğruluklu görel konum kestirimi, hassas hizalanma ve daha karmaşık manevralar bakımından sınırlı bir çerçeve sunmaktadır (Pestana vd., 2013). Benzer biçimde Ho ve Chu'nun döner kanatlı hava aracı için geliştirdiği görsel servolama tabanlı otomatik iniş sistemi, belirli renk ve biçim özelliklerine sahip bir iniş hedefine bağımlı olması nedeniyle karmaşık arka planlar, değişken aydınlatma koşulları ve standart olmayan iniş bölgelerinde dayanıklılık açısından zayıflık göstermektedir (Ho ve Chu, 2013). Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışmalar görsel servolamanın İHA uygulamalarındaki potansiyelini ortaya koymakla birlikte, yöntemlerin çoğunun özel işaretlere bağımlı olması, çevresel değişkenlere karşı sınırlı dayanıklılık göstermesi ve daha serbest görev tanımlarında genellenebilirlik sorunu taşıması önemli birer zayıflık olarak öne çıkmaktadır.

Parrot AR.Drone 2.0 platformu üzerine yapılan çalışmalar, düşük maliyetli hava araçlarında görsel servo kontrolünün uygulanabilirliğini göstermesi bakımından önemlidir. Chakrabarty ve arkadaşları iç mekânda AR.Drone kullanarak otonom nesne takibi gerçekleştirmiştir (Chakrabarty vd, 2016). Pereira, AR.Drone 2.0 üzerinde hedef takibi için görsel servolama kullanımını incelemiş ve özellikle haberleşme ile görüntü işleme gecikmelerinin performans üzerindeki etkisini ortaya koymuştur (Pereira, 2021). Şekil 2.5'de Parrot Drone, kamera ve hedef düzlemi gösterilmiştir. Bu çalışmalar, ticari ve görece sınırlı

donanımlı hava araçlarında dahi görsel servo yöntemlerinin uygulanabildiğini göstermiştir. Ancak gecikme, çözünürlük ve işlem kapasitesi gibi etkenlerin denetim başarımı üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 2.5. Parrot Drone için kamera düzlemi, drone düzlemi ve sabit düzlem gösterimi (Pereira, 2021)

Açıklıklardan geçiş ve dar alanlarda otonom manevra problemleri de literatürde önemli yer tutmaktadır. Pachauri ve arkadaşları monoküler görüntü ile bir İHA'nın pencereyi tespit etmesi ve pencere açıklığından geçmesi için görüntü işleme temelli bir yaklaşım önermiştir (Pachauri vd, 2016). Tang ve arkadaşları ise döner kanatlı hava aracının bir pencere açıklığından geçmesi ve ardından düzlemsel hedefe iniş yapması problemini görüntü tabanlı görsel servolama ile ele almıştır (Tang vd, 2021). Bu tür çalışmalar, görsel servolamanın yalnızca hedef takip veya merkezleme için değil, aynı zamanda fiziksel engellerle çevrili geçitlerden güvenli geçiş için de kullanılabilirliğini göstermektedir. Keipour ve arkadaşları hareketli platforma iniş çalışması ile görsel bilginin zamanla değişen hedefler için de etkili biçimde kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır (Keipour, 2022).

Türkiye'de yapılan tez çalışmaları incelendiğinde, görsel servolamanın yalnızca İHA'larla sınırlı kalmadığı görülmektedir. Ceren tez çalışmasında, dört rotorlu bir mini insansız hava aracının üzerine yerleştirilen kamera ile yerdeki hedefin takibini ve hedef üzerindeki açısız konumunun kontrolünü gerçekleştirmiş; bu amaçla görüntü esaslı görsel servo kontrol ile hibrit görsel servo kontrol yaklaşımlarını karşılaştırmalı olarak ele almıştır (Ceren, 2010). Habiymbere tez çalışmasında endüstriyel robot kol için dolaylı görüntü tabanlı görsel servolama yapısını geliştirmiş ve görsel geri besleme ile kartezyen kontrolü bir araya getirmiştir (Habiymbere, 2018). Bilgin tez çalışmasında, hedefi görüntü merkezinde tutmaya yönelik doğrusal olmayan iki serbestlik dereceli bir sistem üzerinde görsel servo tabanlı hedef takibi

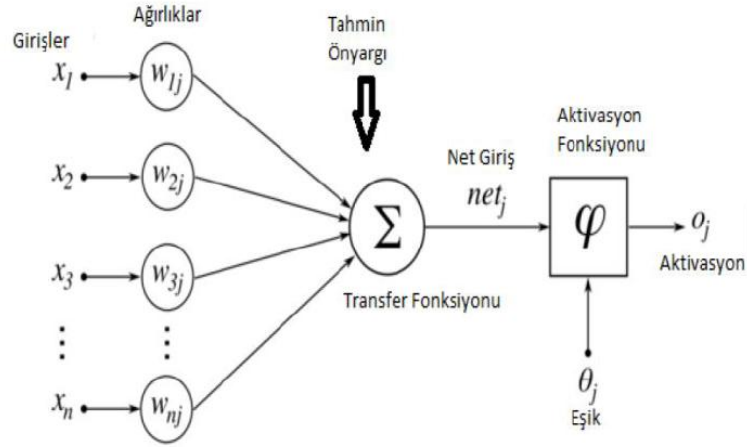
gerçekleştirmiştir (Bilgin, 2019). Şen tez çalışmasında mobil manipülatörü, görsel muayene görevi için RGB-D tabanlı algılama ve görsel servo ile yönlendirmiştir (Şen, 2023). Kurt tez çalışmasında hibrit delta robotu, RGB-D kamera, YOLO11 segmentasyon ve ICP (Iterative Closest Point) kullanılarak KTGS tabanlı biçimde yönlendirmiştir. Özellikle derinlik kamerasından elde ettiği nokta bulutlarında yüksek düzeyde gürültünün ve yüzey bozulmalarının bulunduğunu, bunun da ICP başarımını sınırladığını belirtmiştir (Kurt, 2025).

İlginöglu 2016 tarihli tez çalışmasında, görsel geri besleme ile temassız manipölasyonu mikro ölçekteki robotta yapmıştır. Bu çalışmasında mikro robot kolu için farklı deney düzenekleri kurmuş, görsel ve ölçümsel geri besleme ile yüksek hassasiyetli hareket kontrolünü araştırmıştır (İlginöglu, 2016). Şekil 2.6'da mikro robot kolu görseli bulunmaktadır. Tez çalışmasında, sistemde deadband etkisinin ortaya çıktığını, robotun hareketine hızlı yanıt verebilen bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulduğunu ve bu nedenle aktif kontrol yapılarının geliştirilmesinin gerekli olduğunu belirtmiştir. Lazer tarayıcıdan okuduğu yükseklik bilgisini geri besleme olarak kullandığı PID (Proportional – Integral – Derivative) modelini de bu amaçla oluşturmuştur. Her ne kadar bu çalışma doğrudan hava araçlarına yönelik olmasada görsel geri besleme ile hassas konumlama, sistem gecikmeleri ve aktif kontrol gereksinimi bakımından görsel servolama literatürüne yöntemsel katkı sunmaktadır.



Şekil 2.6. Mikro robot kolu görseli (İlginoğlu, 2016)

Ünlü 2022 tarihli tez çalışmasında döner kanat tipinde İHA'lar için konum tabanlı görsel servolamayı yapay sinir ağı ile birleştirmiştir (Ünlü, 2022). GPS'in kullanılmadığı koşullarda görsel servolama ile görevin tamamlanmasının mümkün olduğunu belirtmiştir. KTGS yapısında duruş kestirimi için klasik yaklaşımların aksine yapay sinir ağı kullanmıştır. Görüş alanı koruyucu yaklaşımında hedef özniteliklerin kamera tarafından görülmeye devam edip etmediğini denetlemiş ve 150 farklı senaryo ile veri seti oluşturmuştur. Şekil 2.7'de yapay sinir hücresi diyagramı gösterilmiştir. Şekilde, yapay sinir ağındaki bir nöronun temel işlem yapısı gösterilmektedir. x_1, x_2, \dots, x_n ile ifade edilen girişler, ilgili w_{ij} ağırlıkları ile çarpılarak toplama bloğunda bir araya getirilmekte ve bu toplam, önyargı ya da eşik terimi ile birlikte net giriş net_j değerini oluşturmaktadır. Elde edilen bu net giriş, φ ile gösterilen aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek nöronun çıkışı o_j üretilmektedir. Bu yapı, yapay sinir ağlarının giriş bilgilerini ağırlıklı olarak değerlendirmesi ve doğrusal olmayan dönüşümler aracılığıyla anlamlı çıktı üretmesi açısından temel çalışma prensibini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.7. Yapay sinir hücresi diyagramı (Ünlü, 2022)

Kurt 2025 tarihli tez çalışmasında KTGS tabanlı yapının gelişmesine katkı sağlamıştır. Çalışmada RGB görüntü üzerinde YOLO11 ile nesne segmentasyonu yapmış, segmentasyon bilgisini derinlik görüntüsüne aktarmış, nokta bulutunu ayrıştırmış ve ICP algoritması ile nesnenin güncel pozisyonunu tahmin etmiştir. Elde ettiği dönüşüm matrisi yardımıyla robotun yörüngesini dinamik biçimde güncellemiştir. Bu yaklaşımı ile, görsel servolamanın yalnızca klasik kamera tabanlı görüntü düzlemi kontrolü olmaktan çıktığını, derinlik bilgisi ve yapay zekâ destekli algı ile birleştiğini göstermiştir (Kurt, 2025).

2.1. Drone koordinat sistemleri

Drone hareketi iki koordinat sistemiyle tanımlanabilir:

Ataletsel koordinat sistemi:

$$\{I\} = (X, Y, Z) \quad (D.13)$$

Gövde koordinat sistemi:

$$\{B\} = (x_b, y_b, z_b) \quad (D.14)$$

Burada; x_b drone gövdesinin ileri yönü, y_b drone gövdesinin yan yönü, z_b düşey eksen, ϕ roll açısı, θ pitch açısı ve ψ yaw açısıdır. Bu değişkenlerin olduğu drone gövde koordinat sistemi Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Drone gövde koordinat sistemi (Pereira, 2021)

Drone'un konum ve yönelim vektörü şu şekilde tanımlanır:

$$\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (\text{D.15})$$

Gövde hızları ise:

$$v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (\text{D.16})$$

şeklindedir. Burada u, v, w gövde doğrultusundaki doğrusal hızları; p, q, r ise roll, pitch ve yaw eksenlerindeki açısal hızları ifade eder (T. Luukkonen, 2011).

2.2. Drone kinematik modeli

Drone'un ataletsel eksenindeki doğrusal hızları ile gövde eksenindeki hızları arasındaki ilişki dönüşüm matrisi ile verilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = R(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (\text{D.17})$$

Burada $R(\phi, \theta, \psi)$, gövde koordinat sisteminden ataletsel koordinat sistemine dönüşüm matrisidir:

$$R = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\phi - s_\psi c_\phi & c_\psi s_\theta c_\phi + s_\psi s_\phi \\ s_\psi c_\theta & s_\psi s_\theta s_\phi + c_\psi c_\phi & s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \quad (\text{D.18})$$

Burada;

$$c_\phi = \cos \phi, s_\phi = \sin \phi \quad (D.19)$$

şeklindedir.

Açısal hızlar ile Euler açı hızları arasındaki ilişki ise şu şekildedir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (D.20)$$

Dolayısıyla quadrotorun genel kinematik modeli:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (D.21)$$

şeklinde ifade edilir.

Drone'un gövde eksenindeki doğrusal ve açısal hızları ile ataletsel koordinat sistemindeki konum ve yönelim değişimleri doğrudan aynı büyüklükler değildir. Çünkü drone hareket sırasında roll, pitch ve yaw açılarına bağlı olarak sürekli yön değiştirmektedir. Bu nedenle gövde ekseninde tanımlanan hız vektörü $v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$, dönüşüm matrisi $J(\eta)$ yardımıyla ataletsel koordinat sistemindeki durum değişim vektörü $\dot{\eta}$ 'ye dönüştürülür. Bu ilişki genel olarak $\dot{\eta} = J(\eta)v$ şeklinde ifade edilir. Burada $J(\eta)$, doğrusal hızlar için dönüşüm matrisi $R(\phi, \theta, \psi)$ ve açısal hızlar için Euler dönüşüm matrisi $T(\phi, \theta)$ 'den oluşmaktadır. (L. Carlone ve M. Ryll, 2023)

2.3. Drone dinamik modeli

Quadrotorun translasyonel hareketi Newton'un ikinci yasasına göre modellenir:

$$m\ddot{\xi} = R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} - D_v \dot{\xi} \quad (D.22)$$

Burada; m drone kütlesi, g yerçekimi ivmesi, $\xi = [x \ y \ z]^T$ konum vektörü, U_1 toplam itki kuvveti, D_v doğrusal sönüm katsayısı matrisidir.

Toplam itki kuvveti dört rotorun ürettiği kuvvetlerin toplamıdır:

$$U_1 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (D.23)$$

Rotor kuvvetleri genellikle rotor açısal hızlarının karesiyle orantılı kabul edilir:

$$F_i = b\Omega_i^2 \quad (D.24)$$

Burada; b itki katsayısı, Ω_i i . rotorun açısal hızıdır. (S. Bouabdallah ve R. Siegwart, 2007)

2.4. Drone dönel dinamik modeli

Drone'un dönel hareketi Euler denklemleri ile ifade edilir:

$$I\dot{\omega} + \omega \times I\omega = \tau - D_\omega \omega \quad (D.25)$$

Burada;

$$\omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (D.26)$$

gövde açısal hız vektörüdür.

$$I = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (D.27)$$

atalet momenti matrisidir.

Moment vektörü:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (D.28)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Rotor hızlarına bağlı olarak kontrol girişleri şu şekilde yazılabilir:

$$U_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \quad (D.29)$$

$$U_2 = lb(\Omega_2^2 - \Omega_4^2) \quad (D.30)$$

$$U_3 = lb(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \quad (D.31)$$

$$U_4 = d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \quad (D.32)$$

Burada; l rotor ile gövde merkezi arasındaki mesafe, d sürüklenme moment katsayısı, U_2 roll momenti, U_3 pitch momenti, U_4 yaw momentidir.

Rotor numaralandırmasına göre moment denklemlerinin işaretleri değişebilir. Bu nedenle deneysel çalışmada kullanılan eksen yönleri ile model işaretlerinin uyumlu olması gerekir (S. Bouabdallah ve R. Siegwart, 2007).

2.5. Drone küçük açı yaklaşımı ile sadeleştirilmiş modeli

Drone hover noktasına yakın çalışıyorsa roll ve pitch açıları küçük kabul edilebilir:

$$\sin \phi \approx \phi, \sin \theta \approx \theta \quad (\text{D.33})$$

$$\cos \phi \approx 1, \cos \theta \approx 1 \quad (\text{D.34})$$

Bu durumda translasyonel hareket yaklaşık olarak şu şekilde yazılabilir:

$$\ddot{x} \approx g\theta \quad (\text{D.35})$$

$$\ddot{y} \approx -g\phi \quad (\text{D.36})$$

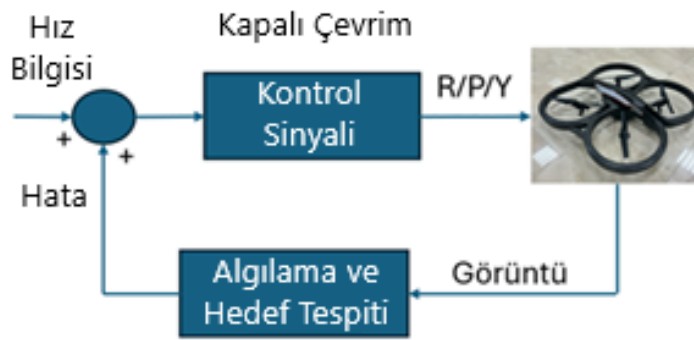
$$\ddot{z} \approx \frac{U_1 - mg}{m} \quad (\text{D.37})$$

Bu modelden görüldüğü gibi pitch açısı θ ileri–geri hareketi, roll açısı ϕ sağ–sol hareketi, toplam itki U_1 düşey hareketi etkiler. Yaw momenti U_4 ise drone’un yönelimini değiştirir.

Bu ifade, görsel servolama çalışmalarında oldukça kullanışlıdır. Çünkü görüntü düzlemindeki yatay hata çoğunlukla roll hareketiyle, hedef alanına bağlı ileri–geri hata ise pitch hareketiyle düzeltilir (S. Bouabdallah ve R. Siegwart, 2007).

3. MATERYAL / METOT

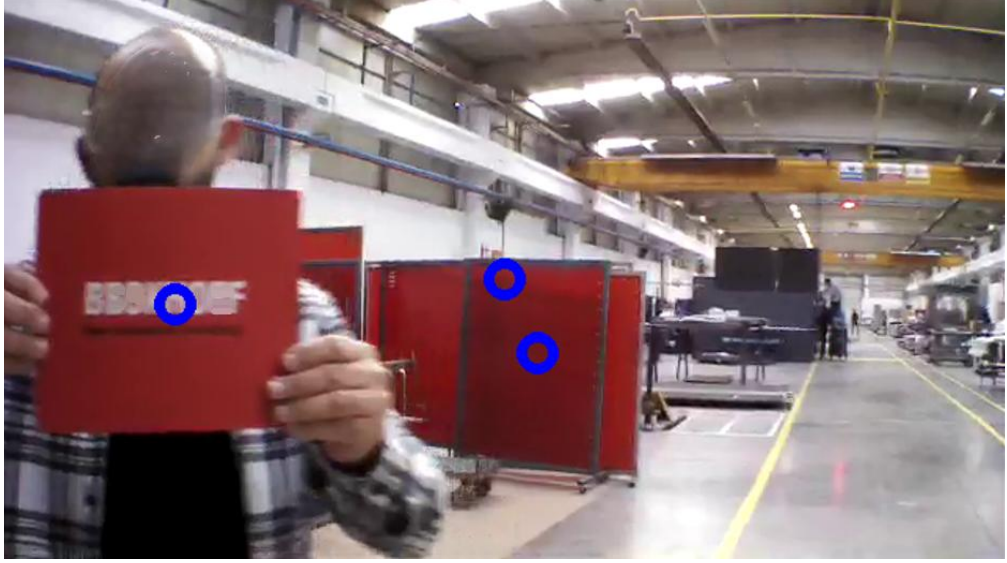
Önerilen sistem iki temel bileşenden oluşmaktadır. İlk bileşen algılama, ikincisi ise kontrol bileşenidir. Algılama için İHA'nın ön kamerasından alınan görüntü işlenerek hedefin görüntü düzlemindeki merkezi belirlenmektedir. Kontrol için ise hedef merkezi ile görüntü merkezi arasındaki hata kullanılarak İHA'ya gönderilecek roll, pitch, yaw ve gaz komutları üretilmektedir. Böylece sistem, görüntü işleme ve kontrol algoritmasının gerçek zamanlı olarak birlikte çalıştığı kapalı çevrim bir yapı hâline getirilmiştir. Şekil 3.1'de kapalı çevrim blok diyagram verilmiştir.



Şekil 3.1. Kapalı çevrim blok diyagram

3.1. Görüntü hedefinin oluşturulması

İlk deneme görüntüsü Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu görüntüde, İHA kamerasından alınan sahnede kırmızı hedef ile arka plandaki kırmızı yüzeylerin aynı görüntü alanı içerisinde yer aldığı görülmektedir. Görüntü işleme algoritması renk tabanlı ayrıştırma yaptığında, yalnızca elde taşınan gerçek hedefi değil, arka planda bulunan kırmızı bölgeleri de hedef adayı olarak değerlendirebilmektedir. Şekil üzerinde işaretlenen noktalar, hedef merkezi belirleme sürecinde oluşabilecek karışıklığı göstermektedir. Bu nedenle ilk denemelerde hedef merkezinin yanlış hesaplanması ve İHA'nın hatalı doğrultuya yönelmesi gibi riskler ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.2. İlk denemelerde kırmızı hedefin arka plandaki kırmızı bölgelerle karışması

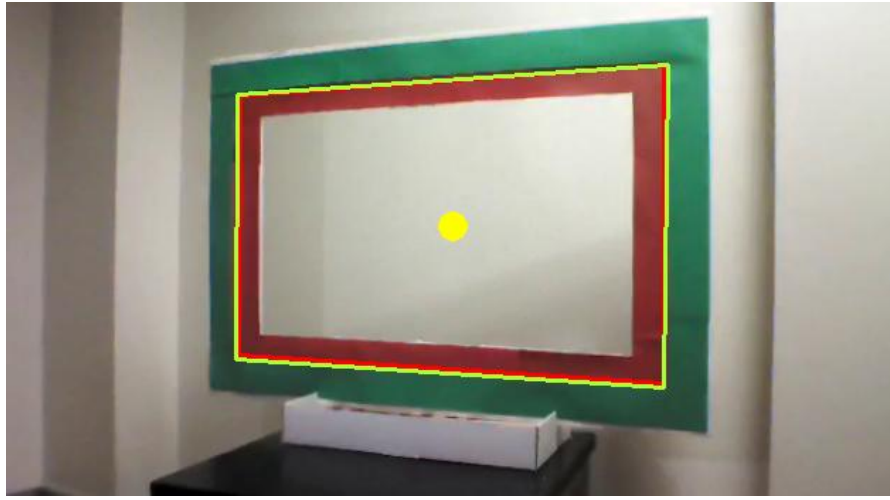
Bu problemin giderilebilmesi için hedef yapısına ikinci bir ayırt edici renk eklenmesi önerilmiştir. Şekil 3.3'te, hedefe yeşil renk bileşeni eklenmesine yönelik ilk tasarım denemesi gösterilmektedir. Bu aşamada amaç, yalnızca kırmızı bölgenin algılanmasına dayalı bir hedef tespiti yerine, kırmızı ve yeşil renklerin birlikte değerlendirildiği daha güvenilir bir hedef yapısı oluşturmaktır. Yeşil rengin hedefe eklenmesiyle birlikte, görüntü işleme algoritmasının arka plandaki kırmızı nesnelere gerçek hedeften ayırabilmesi için ek bir doğrulama ölçütü elde edilmiştir. Böylece hedef tespiti yalnızca renk benzerliğine değil, aynı zamanda hedefi oluşturan renk bölgelerinin birbiriyle olan geometrik ilişkisine dayandırılmıştır.



Şekil 3.3. Hedefe yeşil renk bileşeni eklenmesine yönelik ilk tasarım denemesi

DeneySEL gözlemler sonucunda hedefin son tasarımı, dış çerçevesi yeşil, iç çerçevesi kırmızı ve orta kısmı boş dikdörtgen bir yapı olarak belirlenmiştir. Şekil 3.4'te uygulamada

kullanılan nihai hedef yapısı gösterilmektedir. Bu yapıda yeşil dış çerçeve hedefin genel sınırlarını, kırmızı iç çerçeve ise İHA'nın geçmesi gereken açıklığın çevresini temsil etmektedir. Nihai tasarımda görüntü işleme algoritması yeşil ve kırmızı çerçeveleri ayrı ayrı algılamakta, ardından kırmızı çerçevenin yeşil çerçeve içinde yer alıp almadığını kontrol ederek hedef doğrulaması yapmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde ilk denemelerde karşılaşılan kırmızı hedeflerin karışması problemi azaltılmış ve hedef merkezinin daha güvenilir biçimde belirlenmesi sağlanmıştır. Şekil 3.4'te sarı nokta ile gösterilen merkez bilgisi, doğrulanan hedef geometrisi üzerinden hesaplanan hedef merkezini ifade etmektedir.



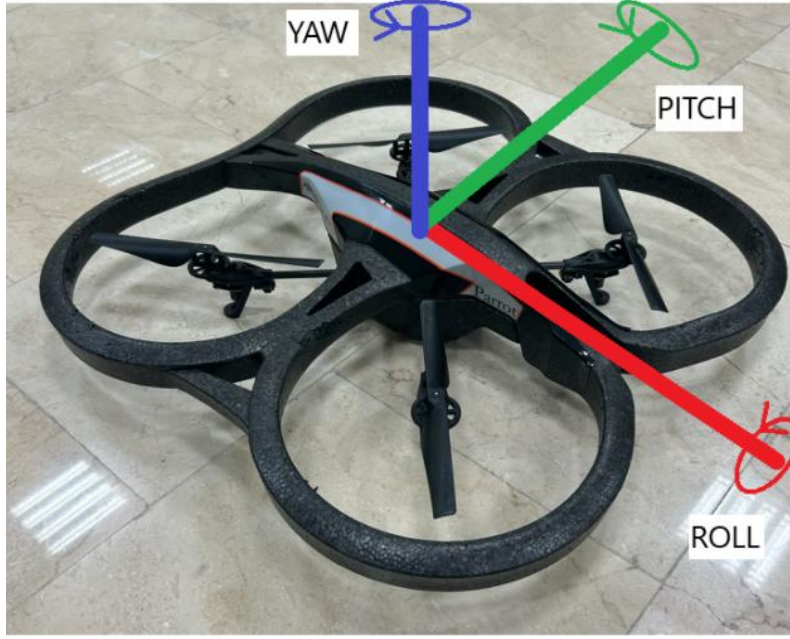
Şekil 3.4. Uygulamada kullanılan nihai hedef yapısı ve hedef merkezinin belirlenmesi

Bu geliştirme süreci sonucunda çalışmada kullanılacak hedef yapısı kesinleştirilmiş ve sonraki aşamalarda görüntü işleme ile kontrol algoritmaları bu nihai hedef geometrisi esas alınarak oluşturulmuştur. Böylece çalışma, başlangıçta tek renkli hedef tespitine dayalı denemelerle başlamış; arka plan nesneleriyle oluşan karışıklıkların giderilmesi amacıyla çift renkli ve geometrik doğrulamaya dayalı bir hedef algılama yaklaşımına dönüştürülmüştür. Bundan sonraki bölümde, bu nihai hedef yapısı kullanılarak gerçekleştirilen adımlar ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.2. Deney düzeneği tanıtımı

Önerilen sistem, döner kanatlı bir insansız hava aracının görüntü tabanlı geri besleme kullanarak dikdörtgen bir hedefe yönelmesi, hedef karşısında hizalanması ve hedef açıklığından geçebilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Çalışmada döner kanat İHA platformu olarak Parrot AR.Drone 2.0 kullanılmıştır. Parrot AR.Drone maksimum yer düzlemine göre $\pm 15^\circ$ açı yaparak hareket etmektedir. 500 mAh 3S Lipo Batarya ile havada 7 dk kalabilmektedir.

AR.Drone 2.0, Wi-Fi bağlantısı üzerinden bilgisayar ile haberleşebilmekte ve roll, pitch, yaw ve gaz komutları aracılığıyla kontrol edilebilmektedir. Roll hareketi İHA'nın yanal hareketiyle, pitch hareketi ileri-geri hareketiyle, yaw hareketi dönme hareketiyle ve gaz komutu düşey hareketle ilişkilidir. AR.Drone için bu eksenler Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bilgisayar tarafında geliştirilen yazılım C# tabanlı olarak .NET Framework 4.8 ortamında hazırlanmış (Arnaud, 2013), (Ruslan, 2024), İHA kontrolü ve görüntü işleme işlemleri aynı yazılım içerisinde gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme için EmguCV ve OpenCV fonksiyonları kullanılmıştır.

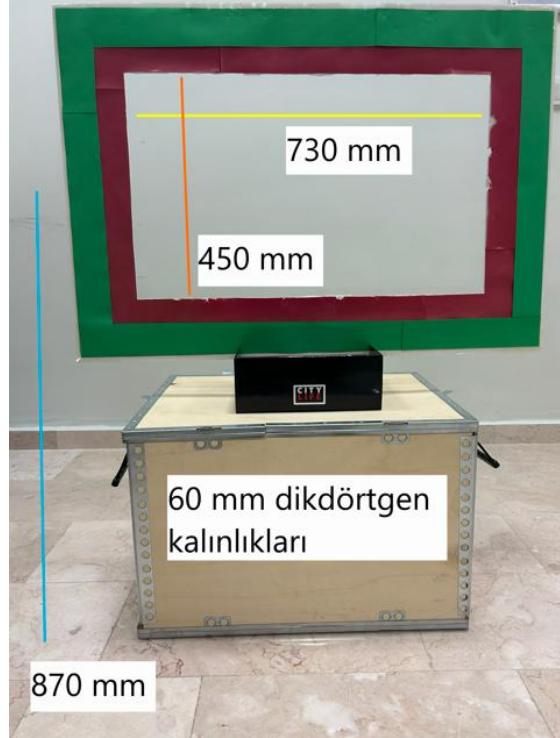


Şekil 3.5. AR.Drone Roll, Pitch, Yaw açıları

Parrot AR.Drone 2.0 platformu ve fiziksel yapısı Şekil 3.6'da, deneylerde kullanılan hedef çerçeve yapısı ise Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Tablo 3.1'de AR.Drone ayrıntıları verilmiştir. Kullanılan hedef; dış çerçevesi yeşil, iç çerçevesi kırmızı olan ve ortasında İHA'nın geçişine olanak sağlayan boşluk bulunan dikdörtgen bir yapıdan oluşmaktadır. İHA'nın görevi, ön kamerasından aldığı görüntü yardımıyla hedefi algılamak, hedef merkezi ile görüntü merkezi arasındaki farkı azaltmak, hedef karşısında uygun hizalanmayı sağlamak ve hizalama tamamlandıktan sonra ileri yönde hareket ederek açıklıktan geçmektir.



Şekil 3.6. Parrot AR.Drone 2.0 platformu



Şekil 3.7. Deney hedefi

Tablo 3.1. AR.Drone Özellikleri

AR.Drone Özellikleri	Ayrıntılar
Ön Kamera	1280 x 720 piksel
Bağlantı	Wi-Fi bağlantı
Uçuş Süresi	7 dk
Açısal Eğim Kontrolü	-1.0 - 1.0

Önerilen sisteme ait yazılım C#/NET ortamında gerçekleştirilmiştir. Görüntü akışı AR.Drone 2.0 SDK üzerinden alınmış ve Emgu CV ile Mat yapıları üzerinde işlenmiştir. Renk ayrıştırma, kontur analizi, köşe çıkarımı ve hedef doğrulama işlemlerinde OpenCV fonksiyonlarından yararlanılmıştır. Görüntü işleme adımları genel olarak balık gözü düzeltme, renk tabanlı ayrıştırma, kontur ve köşe çıkarımı, hedef doğrulama ve merkez hesabı aşamalarından oluşmaktadır.

3.3. Balık gözü kamera düzeltme

AR.Drone 2.0'in ön kamerasında geniş açılı lens kullanılması nedeniyle özellikle görüntü kenarlarına doğru radyal bozulmalar oluşmaktadır. Bu bozulmalar, dikdörtgen biçimindeki hedefin görüntü düzlemindeki geometrisini değiştirmekte ve hedef kenarlarının eğrisel veya açısal olarak hatalı algılanmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle renk tabanlı ayrıştırma ve kontur çıkarımı işlemlerinden önce görüntü üzerinde balık gözü düzeltme işlemi uygulanmıştır.

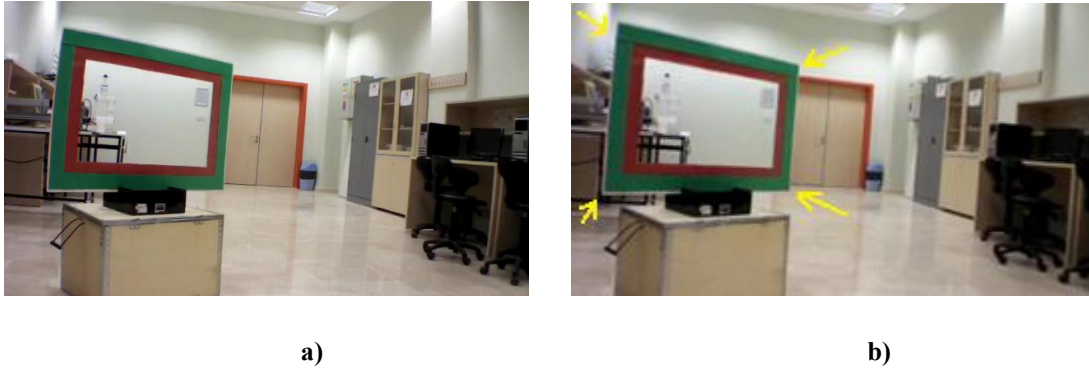
Kameranın içsel parametreleri K matrisi ile temsil edilmiştir. Bu matris odak uzaklıklarını (f_x, f_y) ve görüntü merkezini (c_x, c_y) içermektedir. Lens kaynaklı geometrik bozulmalar ise $D = [k_1, k_2, p_1, p_2, k_3]$ distorsiyon katsayıları ile modellenmiştir. Uygulamada Emgu CV ile "undistort/ remap" yaklaşımı tercih edilmiştir. Kullanılan kamera iç parametreleri ve bozulma katsayıları aşağıdaki şekilde verilmiştir: (Hinz ve Topal, 2013).

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D = [k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2 \ k_3] \quad (D.38)$$

$$K = \begin{bmatrix} 620 & 0 & 320 \\ 0 & 620 & 180 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D = [-0,24 \ 0,03 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (D.39)$$

Kalibrasyon parametrelerinin elde edilişi bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Bu nedenle çalışmada hazır/ön tanımlı bozulma parametreleri kullanılarak geçici düzeltme yapılmıştır (Hinz ve Topal, 2013). Bununla birlikte, hazır parametre kullanımının kamera

özelinde hassas düzeltme sağlamayabileceği belirtilmelidir. Daha yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda kameraya özel kalibrasyon yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada ise hedef tespiti ve kontrol algoritmasının çalıştırılması için hazır parametrelerle yapılan düzeltme yeterli kabul edilmiştir. Şekil 3.8.a'da düzeltme öncesi görüntü, Şekil 3.8.b'de ise düzeltme sonrası görüntü gösterilmiştir. Düzeltme sonrasında hedef çerçevesindeki geometrik bozulmanın azaldığı görülmektedir.



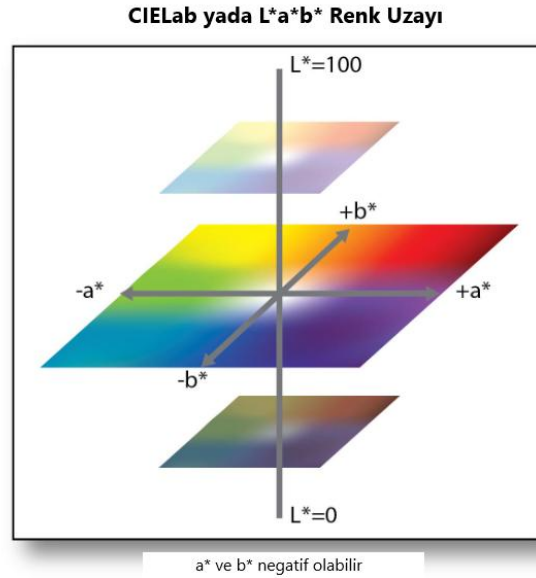
Şekil 3.8. Kalibrasyon ile görüntü düzeltme **Şekil 3.8.a.** Düzeltme öncesi görüntü **Şekil 3.8.b.** Düzeltme sonrası görüntü

3.4. Lab renk uzayında yeşil ve kırmızı çerçeve tespiti

Hedef tespitinde temel yaklaşım, hedefi oluşturan yeşil ve kırmızı çerçevelerin görüntü içerisinde ayrıştırılmasıdır. İlk denemelerde yalnızca kırmızı renkli hedef kullanıldığında arka plandaki kırmızı nesnelere de hedef adayları olarak algılanabildiğinden, nihai hedef tasarımında iki farklı renk bölgesi kullanılmıştır. Bu nedenle görüntü işleme algoritması, yeşil dış çerçeve ve kırmızı iç çerçeve olmak üzere iki ayrı renk bölgesini tespit edecek şekilde tasarlanmıştır.

Renk tabanlı hedef tespitinde aydınlatma değişimlerine karşı daha kararlı sonuç verebilmesi nedeniyle RGB renk uzayı yerine CIELAB, yani Lab renk uzayı tercih edilmiştir. CIELAB renk uzayı, renk bilgisini parlaklık bilgisinden ayırarak ifade eden üç boyutlu bir renk uzayıdır. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere L^* eksenini görüntüdeki açıklık/parlaklık bilgisini temsil ederken, a^* eksenini yeşil-kırmızı renk karşıtlığını, b^* eksenini ise mavi-sarı renk karşıtlığını göstermektedir. a^* ekseninde negatif değerler yeşil tonlara, pozitif değerler kırmızı tonlara karşılık gelmektedir. Bu özellik, dış çerçevesi yeşil ve iç çerçevesi kırmızı olan hedefin ayrıştırılmasında önemli avantaj sağlamaktadır. RGB renk uzayında parlaklık değişimleri renk bileşenlerini doğrudan etkileyebilirken, Lab renk uzayında parlaklık bilgisinin L^* kanalında ayrı temsil edilmesi, renk tabanlı eşikleme işleminin daha kararlı yapılmasına olanak

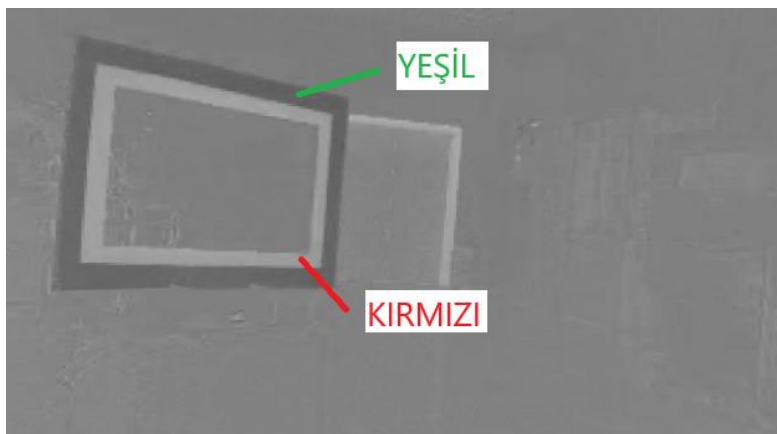
tanılmaktadır. Bu nedenle çalışmada hedef tespiti için RGB yerine CIELAB renk uzayı tercih edilmiştir (Graphic Communications Open Textbook Collective, 2015).



Şekil 3.9. CIELAB renk uzayında L^* , a^* ve b^* eksenlerinin gösterimi (Graphic Communications Open Textbook Collective, 2015).

Düzleştirilmiş görüntü önce BGR renk uzayından Lab renk uzayına dönüştürülmüş, ardından yeşil ve kırmızı renk bölgeleri için ayrı eşikleme uygulanmıştır. Kırmızı ve yeşil dikdörtgenlerin ayrıştırılması için elde edilen eşikleme görüntüsü Şekil 3.10'da verilmiştir.

Bu aşamada her iki renk için deneysel olarak belirlenen eşik değerleri kullanılmış ve gürültüyü azaltmak amacıyla Gauss bulanıklaştırma uygulanmıştır (OpenCV, 2026).



Şekil 3.10. Ayrı eşikleme için kullanılan görüntü

Tablo 3.2. Renk ayrıştırma, düzeltme ve tespit işlemleri parametreleri

Renk	Lab Alt Eşik	Lab Üst Eşik	Son İşlem
Yeşil	118	255	Gauss,Canny,Find Contours
Kırmızı	142	255	Gauss,Canny,Find Contours

Tablo 3.2’de verilen eşik değerleri deney ortamındaki ışık koşulları dikkate alınarak belirlenmiştir. Yeşil ve kırmızı bölgelerin ayrı ayrı tespit edilmesi, algoritmanın tek renkli yanlış pozitiflere karşı daha dayanıklı çalışmasını sağlamıştır. Bu yapı sayesinde yalnızca kırmızı bir nesnenin tespit edilmesi hedef kabul edilmemiş, kırmızı çerçevenin yeşil çerçeve ile birlikte bulunması ve geometrik olarak doğru konumda yer alması beklenmiştir.

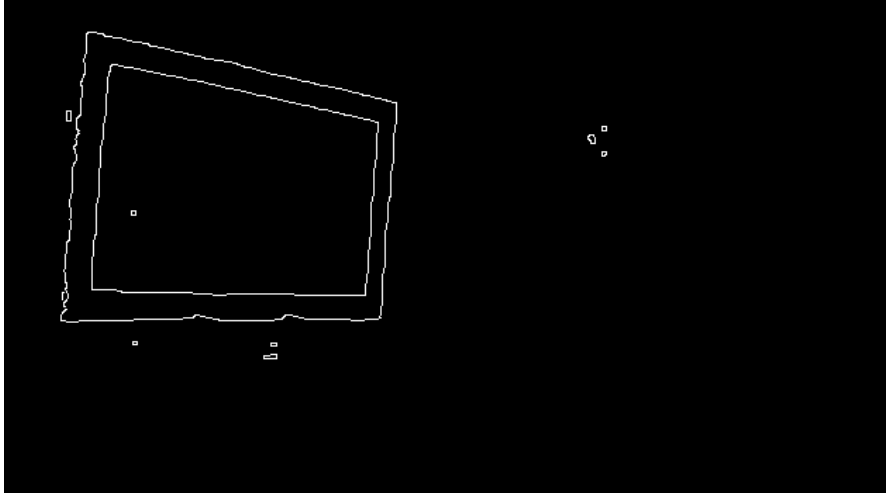
3.5. Kontur ve köşe noktalarının çıkarılması

Eşikleme işlemi sonrasında elde edilen ikili görüntüler üzerinde kontur çıkarımı yapılarak kırmızı ve yeşil çerçevelere ait sınır bölgeleri belirlenmiştir. Yeşil dikdörtgen için uygulanmış kontur çıkarma işlemi sonucu elde edilen görüntü Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Bu aşamada görüntü içerisinde hedef dışındaki küçük gürültü bölgeleri, renk benzerliği gösteren arka plan parçaları veya eksik algılanmış kenarlar da kontur olarak bulunabildiğinden, her kontur doğrudan hedef olarak kabul edilmemiştir. Bunun yerine, bulunan konturlar belirli geometrik ölçütlere göre değerlendirilmiştir. İlk olarak her konturun alanı hesaplanmış ve çok küçük alanlı konturlar gürültü olarak elenmiştir. Alan değeri, konturun görüntü düzleminde kapladığı piksel bölgesini ifade etmektedir. Bu işlem sayesinde eşikleme sonucunda oluşan küçük noktalar, kopuk parçalar ve hedefle ilgisi olmayan renk bölgeleri hedef adayları listesinden çıkarılmıştır.

Kontur alanı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$A_c = \text{ContourArea}(C) \quad (\text{D.40})$$

Burada A_c , C konturunun piksel cinsinden alanını göstermektedir. Uygulamada yalnızca belirlenen alt alan eşliğinden büyük konturlar değerlendirmeye alınmıştır. Böylece görüntüdeki küçük gürültü bileşenlerinin hedef olarak algılanması engellenmiştir.



Şekil 3.11. Yeşil dikdörtgen için uygulanmış kontur çıkarma işlemi görüntüsü

Alan ölçütünden sonra konturun dikdörtgensel yapıya uygunluğu incelenmiştir. Bunun için konturu çevreleyen sınırlayıcı dikdörtgenin alanı ile kontur alanı karşılaştırılmıştır. Bir kontur hedef çerçeveye ait ise, bu konturun genel geometrisinin dikdörtgen biçimine yakın olması beklenmektedir. Dikdörtgensellik oranı aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$R = \frac{A_c}{A_r} \quad (D.41)$$

Burada A_c kontur alanını, A_r ise konturu çevreleyen dikdörtgenin alanını ifade etmektedir. R değerinin belirlenen aralıkta olması, konturun dikdörtgensel yapıya yakın olduğunu göstermektedir. Çok düşük dikdörtgensellik oranına sahip konturlar ince, dağınık veya düzensiz bölgeleri temsil edebileceğinden hedef aday olarak değerlendirilmemiştir. Bu ölçüt, özellikle arka planda bulunan ve hedef rengine benzeyen fakat hedef geometrisine sahip olmayan nesnelerin elenmesinde kullanılmıştır.

Son aşamada çokgen yaklaşımı uygulanarak konturun köşe yapısı incelenmiştir. Gerçek hedef, dikdörtgen bir çerçeve yapısına sahip olduğundan, ideal durumda konturun dört temel köşe noktası ile temsil edilebilmesi beklenmektedir. Bu amaçla kontur üzerindeki çok sayıda nokta, konturun ana geometrisini koruyacak şekilde daha az sayıda köşe noktasına indirgenmiştir. Çokgen yaklaşımı sonucunda dört köşe noktası elde edilen ve belirlenen alan/dikdörtgensellik koşullarını sağlayan konturlar hedef aday olarak seçilmiştir.

Bu işlem aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

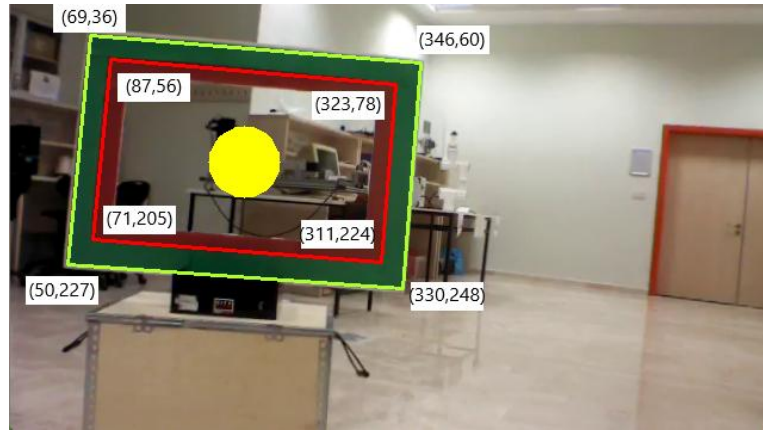
$$P = \text{ApproxPoly}(C, \varepsilon) \quad (D.42)$$

Burada P , yaklaşık çokgeni; C , giriş konturunu; ε ise konturun çevre uzunluğuna bağlı olarak belirlenen yaklaşım toleransını ifade etmektedir. ε değeri genellikle kontur çevresinin belirli bir oranı olarak seçilir:

$$\varepsilon = \alpha \cdot L_c \quad (D.43)$$

Burada L_c , konturun çevre uzunluğunu; α ise deneysel olarak belirlenen yaklaşım katsayısını göstermektedir. ε değeri küçük seçildiğinde konturun ayrıntıları daha fazla korunmakta, büyük seçildiğinde ise kontur daha sade bir çokgen ile temsil edilmektedir. Bu çalışmada hedef dikdörtgen yapıda olduğu için, yaklaşık çokgenin dört köşeli olması önemli bir seçim ölçütü olarak kullanılmıştır.

Görüntüde tespit edilen konturlar sırasıyla alan, dikdörtgensellik ve köşe sayısı bakımından değerlendirilmiştir. Alan ölçütü küçük gürültü bölgelerini elemek için, dikdörtgensellik ölçütü hedef geometrisine uymayan renkli bölgeleri ayırmak için, çokgen yaklaşımı ise hedefin dört köşeli yapısını doğrulamak için kullanılmıştır. Bu üç koşulu birlikte sağlayan konturlar yeşil dış çerçeve veya kırmızı iç çerçeve adayı olarak kabul edilmiştir. Daha sonra kırmızı çerçevenin yeşil çerçeve içerisinde yer alıp almadığı kontrol edilmektedir.



Şekil 3.12. Kırmızı ve yeşil dikdörtgenlerin köşe piksel değerleri

Şekil 3.12’de, hedef doğrulama aşamasında kullanılan yeşil dış dikdörtgen ve kırmızı iç dikdörtgene ait köşe noktaları gösterilmektedir. Görüntü işleme sonucunda önce yeşil ve kırmızı renk bölgeleri ayrı ayrı eşiklenmiş, ardından bu bölgelerden elde edilen konturlar çokgen yaklaşımı ile dört köşeli yapıya indirgenmiştir. Bu işlem sonucunda yeşil çerçeveye ait köşe noktaları dış hedef sınırı, kırmızı çerçeveye ait köşe noktaları ise iç hedef sınırı olarak değerlendirilmiştir. Hedefin doğru algılandığının kabul edilebilmesi için yalnızca kırmızı dikdörtgenin bulunması yeterli görülmemiş, kırmızı dikdörtgenin yeşil dikdörtgen sınırları

içinde kalıp kalmadığı ayrıca kontrol edilmiştir. Böylece arka planda bulunan kırmızı renkli nesnelerin yanlış hedef olarak algılanması engellenmiştir.

Şekil 3.12’de yeşil dış çerçeveye ait köşe noktaları saat yönünde

$$G_1 = (69,36), G_2 = (346,60), G_3 = (330,248), G_4 = (50,227) \quad (D.44)$$

şeklinde; kırmızı iç çerçeveye ait köşe noktaları ise

$$R_1 = (87,56), R_2 = (323,78), R_3 = (311,224), R_4 = (71,205) \quad (D.45)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada G_i yeşil dikdörtgenin köşe noktalarını, R_i ise kırmızı dikdörtgenin köşe noktalarını ifade etmektedir. Görüntü koordinat sisteminde x eksenini soldan sağa, y eksenini ise yukarıdan aşağıya doğru artmaktadır.

Kırmızı dikdörtgenin yeşil dikdörtgen içerisinde yer alıp almadığını belirlemek için kırmızı dikdörtgenin her bir köşe noktası yeşil dikdörtgen sınırları açısından test edilmiştir. Bu amaçla yeşil dikdörtgenin ardışık iki köşe noktası bir kenar olarak alınmış ve kırmızı köşe noktasının bu kenara göre konumu vektörel çarpım ile incelenmiştir. Yeşil dikdörtgenin herhangi bir kenarı $G_i G_{i+1}$, test edilen kırmızı köşe noktası ise R_j olmak üzere vektörel çarpımın z bileşeni aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$S_{ij} = (x_{G_{i+1}} - x_{G_i})(y_{R_j} - y_{G_i}) - (y_{G_{i+1}} - y_{G_i})(x_{R_j} - x_{G_i}) \quad (D.46)$$

Burada S_{ij} , R_j noktasının $G_i G_{i+1}$ kenarına göre konumunu belirleyen işaretli değerdir. Yeşil dikdörtgenin köşe noktaları sıralı biçimde alındığında, bir noktanın yeşil dikdörtgen içinde kabul edilebilmesi için tüm kenarlar için hesaplanan S_{ij} değerlerinin aynı işarete sahip olması gerekir. Bu koşul aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$S_{1j}, S_{2j}, S_{3j}, S_{4j} > 0 \quad (D.47)$$

veya köşe sıralama yönüne bağlı olarak

$$S_{1j}, S_{2j}, S_{3j}, S_{4j} < 0 \quad (D.48)$$

olmalıdır. Bu koşul kırmızı dikdörtgenin dört köşe noktası için ayrı ayrı kontrol edilmiştir:

$$R_1, R_2, R_3, R_4 \in G \quad (D.49)$$

koşulu sağlandığında, kırmızı dikdörtgenin yeşil dikdörtgen içerisinde bulunduğu kabul edilmiştir. Bu doğrulama işlemi sonucunda yeşil dış çerçeve ve kırmızı iç çerçeve birlikte

algılanmış, geometrik olarak iç içe oldukları teyit edilmiş ve ilgili yapı gerçek hedef olarak seçilmiştir.

3.6. Hedef doğrulama ve merkez hesabı

Hedefin yanlış pozitiflere karşı sağlamaştırılması için kırmızı dikdörtgenin yeşil dikdörtgen içinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu doğrulama, kırmızı çerçevenin köşe noktalarının yeşil çerçevenin sınırları içinde kalıp kalmadığının incelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Böylece görüntü içerisinde yalnızca kırmızı veya yalnızca yeşil renge sahip nesnelerin hedef olarak kabul edilmesi engellenmiştir.

Doğrulama sağlandığında hedef merkezinin piksel koordinatı, seçilen dikdörtgenin ağırlık merkezi üzerinden hesaplanmıştır. Merkez koordinatları aşağıdaki denklemlerle elde edilmiştir:

$$centerX = rect.X + rect.\frac{W}{2} \quad (D.50)$$

$$centerY = rect.Y + rect.\frac{H}{2} \quad (D.51)$$

Burada ($centerX$, $centerY$), hedef merkezinin görüntü düzlemindeki piksel koordinatlarını ifade etmektedir. İHA kamera görüntüsünün merkezi ise görüntü genişliği ve yüksekliği dikkate alınarak $(\frac{W}{2}, \frac{H}{2})$, (320,180) biçiminde değerlendirilmiştir.

İzleyen bölümde İHA'nın kontrol yöntemi gösterilmiştir.

3.7. Görsel servo kontrol yöntemi

Bu bölümde hedef merkez hatasından görsel servo ile kontrol sinyallerinin üretilmesi açıklanmıştır. AR.Drone 2.0, gövde koordinat sisteminde roll, pitch, yaw ve gaz komutlarını kabul etmektedir. Çalışmada temel amaç, hedef merkezini görüntü merkeziyle hizalamak ve hizalama tamamlandıktan sonra hedef açıklığından geçişi sağlamaktır.

Görüntü düzleminde yatay merkez hatası, düşey merkez hatası, hedefe göre açısal durumu temsil eden kenar farkı ve ileri-geri mesafe kontrolünde kullanılan üst kenar bilgisi aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$e_x = 320 - centerX \quad (D.52)$$

$$e_y = 180 - centerY \quad (D.53)$$

$$kenarHata = solkenar - sagkenar \quad (D.54)$$

$$ileriHata = 260 - ustKenar \quad (D.55)$$

Burada e_x , bilgisayar görüntü koordinat sisteminde soldan sağa doğru tanımlanan X eksenini üzerindeki yatay merkez hatasını; e_y ise yukarıdan aşağıya doğru tanımlanan Y eksenini üzerindeki düşey merkez hatasını temsil etmektedir. *kenarHata*, kırmızı dikdörtgenin sol ve sağ kenar uzunlukları arasındaki farktan elde edilmekte ve İHA'nın hedefe göre açısal hizalanma durumunu belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. *ileriHata* ise pitch eksenini için gerekli ileri-geri hareket bilgisini temsil etmektedir. Denklem D.55'te yer alan 260 değeri, hedefin görüntüde istenen büyüklükte tutulması ve uygun yaklaşma mesafesinin sağlanması için deneysel olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.13. İHA merkez ve hedef merkez gösterimi

Şekil 3.13'te görüldüğü üzere mavi çember ile İHA mevcut görüntü merkezi işaretlenmiştir. Sarı daire ile tespit edilen dikdörtgen merkezi işaretlenmiştir.

Mavi çember ile sarı daire arasındaki piksel cinsinden fark ile İHA Yaw eksenini düzeltilmesi sağlanmaktadır. Denklem D.52'de e_x , hedef merkezinin görüntü merkezine göre yatay eksenindeki piksel farkını göstermektedir. Dolayısıyla mavi çember ile sarı daire arasındaki yatay uzaklık, İHA'nın yaw ekseninde yapması gereken düzeltme hareketi için hata bilgisi olarak kullanılmıştır. Hedef merkezi görüntü merkezinin sağında veya solunda kaldığında e_x değerinin işareti değişmekte, bu işaret değişimi de yaw komutunun yönünü belirlemektedir. e_x değerinin sifıra yaklaşması, hedef merkezinin yatay ekseninde görüntü merkeziyle hizalandığını göstermektedir.

Şekil 3.13'te görüldüğü üzere kırmızı dikdörtgenin sol ve sağ kenarları kırmızı ile işaretlenmiştir. Bu kenarlar tespit edildikten sonra piksel cinsinden uzunluk hesabı yapılmıştır. Uzunluk farkı ile İHA Roll eksenini düzeltilmesi sağlanmaktadır. Kırmızı dikdörtgenin hedef düzlemine göre görüntüdeki eğikliği, sol ve sağ kenar uzunlukları karşılaştırılarak

değerlendirilmiştir. İHA hedefin tam karşısında ve hedef düzlemine yaklaşık dik konumda bulunduğunda, kırmızı dikdörtgenin görüntüdeki sol ve sağ kenar uzunluklarının birbirine yakın olması beklenir. Ancak İHA hedefe açılı konumlandığında perspektif etkisi nedeniyle dikdörtgenin bir kenarı görüntüde diğer kenara göre daha uzun veya daha kısa algılanır. Bu nedenle kırmızı dikdörtgenin sol ve sağ kenar uzunlukları piksel cinsinden hesaplanmış ve bu iki uzunluk arasındaki fark roll eksenini için hata bilgisi olarak kullanılmıştır.

Kırmızı dikdörtgenin sol kenar uzunluğu *solkenar*, sağ kenar uzunluğu ise *sagkenar* olarak tanımlandığında, roll ekseninde kullanılacak kenar hatası denklem D.54'te ifade edilmiştir. Burada *kenarHata*, İHA'nın hedefe göre yanal/açısal hizalanma durumunu temsil etmektedir. *kenarHata* değerinin sıfıra yaklaşması, kırmızı dikdörtgenin sol ve sağ kenarlarının görüntüde yaklaşık eşit uzunlukta algılandığını ve İHA'nın hedef karşısındaki hizalanmasının iyileştiğini göstermektedir. *kenarHata* değerinin pozitif veya negatif olması ise düzeltme hareketinin yönünü belirlemektedir.

İHA'nın dikdörtgenin içinden geçebilmesi için dikdörtgenin tam karşısında olması gerekmektedir. Bu nedenle Yaw ve Roll eksenleri düzeltmeleri sürekli olarak birlikte yapılmıştır. Şekil 3.13'teki düzeltmede Roll düzeltmesi İHA'yı maksimum 0,1 komuta denk gelen $\mp 1,5^\circ$ olacak şekilde hareket ettirilmiştir. Bu hareket sırasında Yaw eksenini bozulur ve Yaw düzeltmesi İHA'yı merkezlemeye çalışmaktadır. Son olarak Yaw düzeltmesi İHA'yı merkezler ve İHA hem Yaw hem Roll eksenlerinde dikdörtgenin karşısına gelmektedir. İleri – Geri hizalanması içinse hesaplanan üst kenar uzunluğu piksel cinsinden kullanılmıştır.

3.8. Yaklaşım a: görüntü hatasına doğrudan pid

İlk kontrol yaklaşımında kontrol girdileri doğrudan görüntü hatalarından üretilmiştir. Bu yöntemde hedef merkezi ile görüntü merkezi arasındaki farklar ve hedef kenarlarından elde edilen hata büyüklükleri PID denetleyiciye giriş olarak verilmiştir. Yaw eksenini için kontrol çıktısı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$out_{Yaw} = K_{p_{Yaw}} * e_x + K_{i_{Yaw}} * \int e_x dt + K_{d_{Yaw}} * \frac{d(e_x)}{dt} \quad (D.56)$$

Gas eksenini için kontrol çıktısı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$out_{Gas} = K_{p_{Gas}} * e_y + K_{i_{Gas}} * \int e_y dt + K_{d_{Gas}} * \frac{d(e_y)}{dt} \quad (D.57)$$

Roll eksenini için kontrol çıktısı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$out_{Roll} = K_{p_{Roll}} * kenarHata + K_{i_{Roll}} * \int kenarHata dt + K_{d_{Roll}} * \frac{d(kenarHata)}{dt} \quad (D.58)$$

Pitch eksen için kontrol çıktısı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

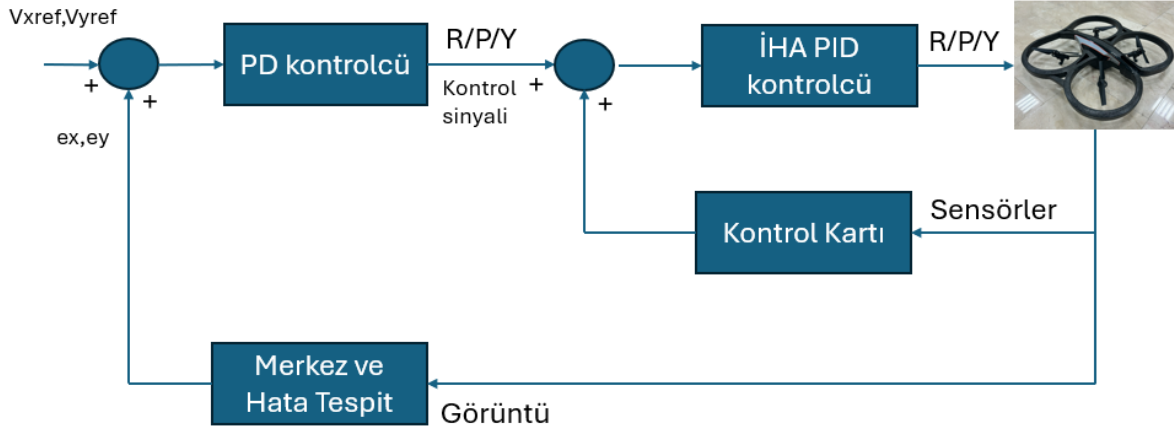
$$out_{Pitch} = K_{p_{Pitch}} * ileriHata + K_{i_{Pitch}} * \int ileriHata dt + K_{d_{Pitch}} * \frac{d(ileriHata)}{dt} \quad (D.59)$$

Burada dt , İHA'dan alınan iki ardışık görüntü arasında geçen süreyi ifade etmektedir. Çalışmada görüntü işleme ve kontrol döngüsü için bu süre 100 ms olarak kullanılmıştır. Bu durumda saniyede yaklaşık 10 görüntü işlenmiş ve İHA'ya 100 ms aralıklarla kontrol komutu gönderilmiştir. Yapılan denemelerde bu örnekleme aralığının görüntü akışı açısından yeterli olduğu ve İHA'nın verilen komutlara uygun tepki verdiği gözlemlenmiştir. Burada, $K_{p_{Yaw}} = 1.0$, $K_{i_{Yaw}} = 0.0$, $K_{d_{Yaw}} = 0.1$, $K_{p_{Gas}} = 0.8$, $K_{i_{Gas}} = 0.05$, $K_{d_{Gas}} = 0.15$, $K_{p_{Roll}} = 1.0$, $K_{i_{Roll}} = 0.0$, $K_{d_{Roll}} = 0.1$, $K_{p_{Pitch}} = 0.8$, $K_{i_{Pitch}} = 0.0$, $K_{d_{Pitch}} = 0.1$ olup deneysel şekilde belirlenmiştir.

3.9. Yaklaşım b: $V_x - V_y$ geri beslemeli pid (hız döngüsü)

İkinci kontrol yaklaşımında, görüntü düzleminde elde edilen hata değerleri doğrudan İHA komutlarına dönüştürülmemiştir. Bunun yerine, görsel servo kontrol yapısına uygun olarak görüntü hataları önce istenen gövde hızlarına çevrilmiş, ardından navigasyon verisinden alınan ölçülen hızlar kullanılarak geri beslemeli bir iç hız döngüsü oluşturulmuştur. Bu nedenle önerilen yapı, görüntü tabanlı görsel servo kontrolün hız geri beslemeli bir biçimi olarak değerlendirilebilir. Görsel servo yaklaşımında temel amaç, görüntü düzleminde tespit edilen hedef özniteliklerinin istenen konuma taşınmasıdır. Bu çalışmada hedef merkezinin görüntü merkeziyle olan piksel farkı, hedefin görüntüdeki konumu ve hedef geometrisinden elde edilen hata büyüklükleri görsel hata olarak kullanılmıştır. Bu hatalar, doğrudan roll veya pitch komutuna aktarılmak yerine, İHA'nın gövde eksenlerinde gerçekleştirmesi gereken referans hız değerlerini üretmek için kullanılmıştır.

Bu yapı iki aşamalı bir kontrol sistemi olarak ele alınmıştır. İlk aşama dış döngü olup, görüntü işleme sonucunda elde edilen görsel hata değerlerinden referans hızlar üretilmektedir. İkinci aşama ise iç döngüdür ve bu aşamada İHA'dan alınan navigasyon verileri ile gerçek hız değerleri geri besleme olarak kullanılmaktadır. Böylece kontrol sistemi yalnızca hedefin görüntüdeki konumunu değil, aynı zamanda İHA'nın bu hedefe yönelirken sahip olduğu mevcut hareket durumunu da dikkate almaktadır. Şekil 3.14.'de iç ve dış döngü bir arada gösterilmiştir.



Şekil 3.14. İç ve dış döngü bir arada

Pitch ekseninde hız hatası aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$V_{xerror} = V_{xref} - V_{xmeas} \quad (D.60)$$

$$out_{Pitch} = K_{p_{Pitch}} * V_{xerror} + K_{i_{Pitch}} * \int V_{xerror} dt + K_{d_{Pitch}} * \frac{d(V_{xerror})}{dt} \quad (D.61)$$

Burada V_{xref} , görüntü hatasından elde edilen değer deneysel olarak belirlenen katsayı ile çarpılması sonucu elde edilen referans hız değeridir. V_{xmeas} ise İHA navigasyon verisinden alınan V_x hızının deneysel olarak belirlenen 0,1 katsayısı ile çarpılarak hata hesabına dahil edilmiş hâlidir.

Benzer şekilde roll ekseninde hız hatası aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$V_{yerror} = V_{yref} - V_{ymeas} \quad (D.62)$$

$$out_{Roll} = K_{p_{Roll}} * V_{yerror} + K_{i_{Roll}} * \int V_{yerror} dt + K_{d_{Pitch}} * \frac{d(V_{yerror})}{dt} \quad (D.63)$$

Burada V_{yref} , piksel hatasından elde edilen değer katsayı ile çarpılmasıyla oluşturulan referans yanal hız değeridir. V_{ymeas} ise İHA navigasyon verisinden alınan V_y hızının deneysel olarak belirlenen 0,05 katsayısı ile çarpılarak hata hesabına dahil edilmiş hâlidir. Bu yaklaşımda kontrolcü, doğrudan piksel hatasını azaltmak yerine, hedeflenen ileri-geri ve yanal hız değerlerine ulaşmaya çalışmaktadır. Böylece İHA'nın hızı arttığında kontrol sistemi bu durumu geri besleme yoluyla algılayabilmekte ve komut büyüklüğünü azaltarak aşımı sınırlayabilmektedir. Bununla birlikte, hız ölçümlerinin gürültülü olması durumunda ek filtreleme gereksinimi ortaya çıkabilmektedir.

Bu yapıda kontrol, doğrudan piksel hatasına değil, hedeflenen ileri-geri ve yanal hız ulaşmaya çalışılmıştır. Avantajı, İHA hızlandığında ($V_x - V_y$ büyüdüğünde) kontrolün bunu algılayıp komutu azaltabilmesi ve aşımın azaltılmasıdır. Dezavantajı ise hız ölçümünün gürültülü olabilmesi ve ek filtreleme gerektirebilmesidir.

Her iki yöntem içinde aynı PID değerleri kullanılmış olup, I değeri 0 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak PD kontrolcü ile çalışma yapılmıştır. Burada, $K_{p_{Pitch}} = 0.8$, $K_{i_{Pitch}} = 0.0$, $K_{d_{Pitch}} = 0.1$, $K_{p_{Roll}} = 1.0$, $K_{i_{Roll}} = 0.0$, $K_{d_{Pitch}} = 0.1$ olup deneysel şekilde belirlenmiştir.

3.10. Geçiş fazı yaklaşımı

Hizalama fazı tamamlandığında İHA'nın hedef açıklığından geçebilmesi için ileri yönde hareket komutu uygulanmıştır. Hizalamanın tamamlandığı durum, hedef merkezinin görüntü merkezine yeterince yaklaşması ve bu koşulun belirli bir süre boyunca korunması ile değerlendirilmiştir. Örneğin $|e_x| < \varepsilon_x$ ve $|e_y| < \varepsilon_y$ koşullarının yaklaşık 2 sn boyunca sağlanması, geçiş fazına geçmek için uygun bir kriter olarak ele alınmıştır. Bu aşamada İHA'ya sabit bir pitch komutu verilerek hedef açıklığına doğru ilerlemesi sağlanmıştır. Geçişin gerçekleştiği durum; hedefin görüntüde hızla büyümesi, hedefin görüntü alanından çıkması veya hedef alanının belirlenen bir eşik değerin üzerine çıkması gibi gözlemsel ve sayısal kriterlerle değerlendirilebilmektedir.

Bu yapı ile çalışma, ilk denemelerde karşılaşılan tek renkli hedef algılama problemlerinden başlayarak, yeşil ve kırmızı çerçevelerin birlikte kullanıldığı daha güvenilir bir hedef doğrulama yaklaşımına dönüştürülmüştür. Nihai sistemde görüntü işleme katmanı hedefin merkezini ve geometrik yönelimini belirlemede, kontrol katmanı ise bu bilgilerden yararlanarak İHA'nın hedef karşısında hizalanmasını ve geçiş görevini gerçekleştirmesini sağlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, AR.Drone 2.0 platformu üzerinde gerçekleştirilen görüntü işleme ve kontrol deneylerinden elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, renk kodlu içi boş dikdörtgen hedefin görüntü düzleminde güvenilir biçimde tespit edilmesi, hedef merkezine göre hizalanma hatasının azaltılması ve bu hizalanma davranışının farklı kontrol yaklaşımları altında karşılaştırılmasıdır. Bu kapsamda iki kontrol yaklaşımı ele alınmıştır. Yaklaşım A, görüntü düzleminde elde edilen hata büyüklüğünü doğrudan PID denetleyici girişine uygulayan doğrudan görsel hata tabanlı kontroldür. Yaklaşım B ise görüntüden üretilen referans hareketin, İHA gövde eksenindeki ölçülen hızlarla karşılaştırıldığı hız geri beslemeli PID yapısıdır. Böylece yalnızca hedefin görüntüdeki konumu değil, aracın bu hedefe göre oluşturduğu hareket eğilimi de kontrol çevrimine dahil edilmiştir.

Deneylerde hedefe doğru ileri hareket başlatılmadan önceki hizalanma süreci esas alınmıştır. Bu tercih, hedefe yaklaşma sırasında oluşabilecek ölçek değişimi ve perspektif etkilerini sınırlayarak iki kontrol yaklaşımının yatay hizalama ve gövde hızı davranışı açısından daha doğrudan karşılaştırılmasını sağlamıştır. Her denemede 100 görüntü karesi değerlendirilmiş, görüntü alma periyodu 100 ms olduğundan her grafik yaklaşık 10 saniyelik bir zaman aralığını temsil etmiştir. Bu bölümde verilen grafikler, formülde gövde hızları kullanıldığında ve kullanılmadığında V_x ve V_y hız bileşenlerinin zamanla değişimini göstermektedir.

Karşılaştırmalı değerlendirmede aynı hedef geometrisi, aynı kamera konumu ve aynı görüntü işleme akışı kullanılmıştır. Bu nedenle kontrol yaklaşımları arasındaki farkın temel kaynağı, hata değişkeninin tanımlanma biçimi ve gövde hızlarının denetleyiciye dahil edilip edilmemesidir. Görüntü tabanlı hata, hedef merkezinin görüntü merkeziyle olan piksel cinsinden farkından elde edilmiştir. Görüntü merkezinin yatay koordinatı u_0 , hedef merkezinin yatay koordinatı $u_t(k)$ ve normalleştirme katsayısı $e_{x,max}$ olmak üzere yatay görsel hata aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$e_x(k) = \frac{u_t(k) - u_0}{e_{x,max}} \quad (D.64)$$

Burada $e_x(k)$, k anındaki normalize yatay hizalama hatasını göstermektedir. Hedef merkezi görüntü merkezinin sağında kaldığında hata işaretinin pozitif, solunda kaldığında negatif olması sağlanarak hata işareti İHA'nın yanal hareket yönüyle ilişkilendirilmiştir. Bu hata doğrudan roll komutuna aktarılabildiği gibi, hız geri beslemeli yapıda yanal hız

referansının oluşturulmasında da kullanılmıştır. Benzer biçimde, hedefe yaklaşma veya hedef karşısında konum koruma sürecinde V_x gövde hızı, hedefe göre ileri-geri hareket davranışının değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Doğrudan PID yaklaşımında kontrol girişi, görsel hatanın oransal, integral ve türev bileşenlerinden elde edilir. Yatay eksen hatası ayrıık halde genel ifade ile temsil edilebilir:

$$u_A(k) = K_p e_x(k) + K_i \sum_{i=0}^k e_x(i) \Delta t + K_d \frac{e_x(k) - e_x(k-1)}{\Delta t} \quad (D.65)$$

Bu ifadede $u_A(k)$ denetleyici çıkışını, K_p oransal kazancı, K_i integral kazancı, K_d türev kazancını ve Δt örnekleme süresini göstermektedir. Aynı şekilde dikey eksen hatası ayrıık halde genel ifade ile temsil edilir:

$$u_A(k) = K_p e_y(k) + K_i \sum_{i=0}^k e_y(i) \Delta t + K_d \frac{e_y(k) - e_y(k-1)}{\Delta t} \quad (D.66)$$

Doğrudan yaklaşımda hata azalınca kadar komut üretimi devam eder; ancak İHA'nın ataleti ve daha önce oluşmuş gövde hızı açık biçimde hesaba katılmadığında, hedef merkezi çevresinde salınım görülmesi beklenebilir.

Hız geri beslemeli yaklaşımda ise görsel hata önce bir hız referansına dönüştürülür. İleri - Geri eksen için bu ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$v_{x,ref}(k) = K_v e_x(k) \quad (D.67)$$

Burada $v_{x,ref}(k)$, k . görüntü karesinde ileri - geri eksen için üretilen referans hız değerini; K_v ise görüntü hatasını hız referansına dönüştüren kazanç katsayısını ifade eder. Bu aşamadan sonra denetleyiciye uygulanan hata, referans ileri - geri hız ile navdata üzerinden ölçülen ileri - geri gövde hızı arasındaki fark aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$e_{v_x}(k) = v_{x,ref}(k) - v_{x,meas}(k) \quad (D.68)$$

Yanal eksen için bu ilişki aynı şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$v_{y,ref}(k) = K_v e_y(k) \quad (D.69)$$

Burada $v_{y,ref}(k)$, k . görüntü karesinde yanal eksen için üretilen referans hız değerini; K_v ise görüntü hatasını hız referansına dönüştüren kazanç katsayısını ifade eder. Aynı şekilde denetleyiciye uygulanan hata, referans yanal hız ile navdata üzerinden ölçülen yanal gövde hızı arasındaki fark aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$e_{v_y}(k) = v_{y,ref}(k) - v_{y,meas}(k) \quad (D.70)$$

Denklem D.67’de açıklanan $v_{x,ref}(k)$ değeri denklem D.68’de kullanılır ve hedef görüntü merkezine yaklaşırken İHA’nın mevcut ileri – geri hareketi dikkate alınmış olunur. Aynı şekilde D.69’da açıklanan $v_{y,ref}(k)$ değeri D.70’te kullanılır ve hedef görüntü merkezine yaklaşırken İHA’nın mevcut yanal hareketi de dikkate alınmış olunur. Örneğin hedef merkezi görüntü merkezine yaklaşmış olsa bile araç ileri – geri yönde hareket etmeye devam ediyorsa, ölçülen V_x hızı hata değişkenini etkileyerek denetleyici çıkışının daha erken azalmasını sağlar. Aynı hareket benzer şekilde yanal ekseninde V_y hızı hata değişkenini etkileyerek denetleyici çıkışının daha erken azalmasını sağlar. Bu durum özellikle aşımın azaltılması ve hedef çevresindeki salınımın bastırılması açısından önemlidir.

4.1. Görüntü işleme bulguları

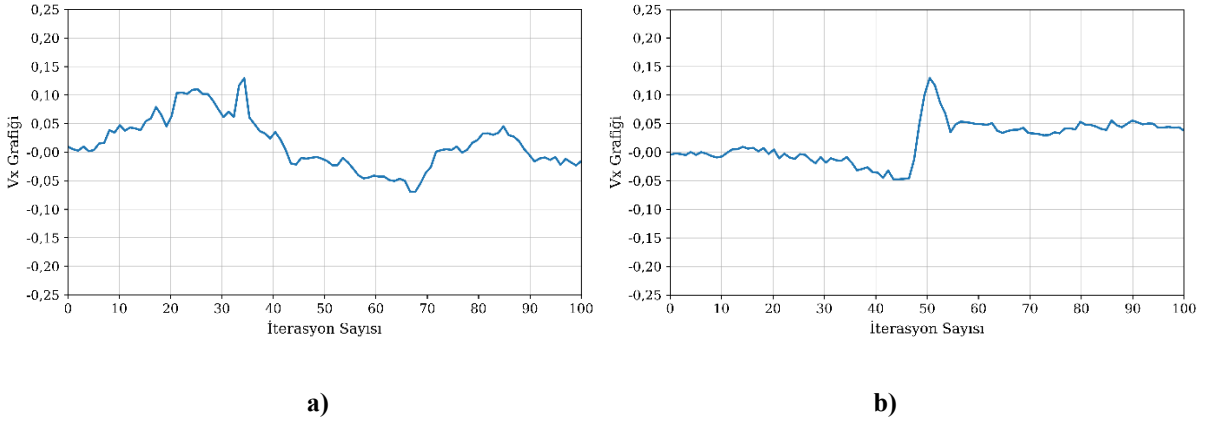
DeneySEL süreçte hedefin güvenilir tespiti, kontrol başarımının ön koşulu olarak değerlendirilmiştir. AR.Drone 2.0 ön kamerasından alınan görüntülerde balık gözü etkisi nedeniyle hedef kenarlarında doğrusal olmayan bozulmalar oluşabilmektedir. Bu nedenle görüntüler öncelikle kamera matrisi ve bozulma katsayıları kullanılarak düzeltilmiş, daha sonra Lab renk uzayına dönüştürülerek renk ve parlaklık etkileri ayrıştırılmıştır. Lab renk uzayının kullanılması, ortam aydınlatmasındaki değişimlere karşı RGB uzayına göre daha kararlı bir eşikleme davranışı sağlamıştır.

Görüntü işleme akışında Gauss bulanıklaştırma ile gürültü azaltılmış, kenar bilgisi Canny operatörü ile çıkarılmış ve FindContours yöntemi ile kapalı konturlar elde edilmiştir. Konturlar alan, dikdörtgensellik ve çokgen yaklaşımı açısından değerlendirilmiş; kırmızı iç dikdörtgenin yeşil dış dikdörtgen içinde bulunması koşulu sağlandığında hedef doğrulanmıştır. Bu geometrik doğrulama adımı, yalnızca renge bağlı eşiklemenin neden olabileceği yanlış pozitifleri azaltmış ve çevrede bulunan benzer renkteki nesnelerin hedef olarak seçilmesini engellemiştir.

Hedef merkezinin bulunmasında kırmızı iç dikdörtgen ve yeşil dış dikdörtgenin köşe noktalarından yararlanılmıştır. Kırmızı dikdörtgenin köşe noktaları yeşil dikdörtgen sınırları içinde kaldığında hedefin geçerli olduğu kabul edilmiş, daha sonra hedef merkezi piksel koordinatları üzerinden hesaplanmıştır. Böylece kontrol katmanına aktarılan hata bilgisi, yalnızca renk tespitine değil, hedefin tasarlanan geometrik yapısına da dayandırılmıştır. Bu durum, görsel servo kontrol çevriminde kullanılan geri beslemenin daha tutarlı olmasına katkı sağlamıştır.

4.2. V_x hızı için deney bulguları

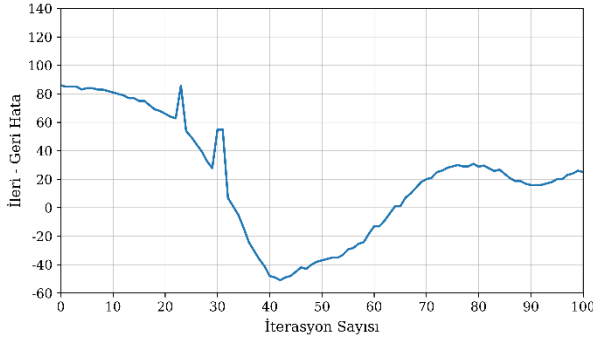
Şekil 4.1’de formülde gövde hızları kullanıldığında ve kullanılmadığında V_x hızının zamanla değişimi gösterilmektedir. V_x bileşeni, İHA’nın gövde ekseninde ileri-geri hareket eğilimini temsil etmektedir. Hedefe ilerleme hareketi başlatılmadan önceki bölümün incelenmesi, kontrol yapısının hedef karşısında konum koruma ve hizalanma sürecinde ileri-geri yönde istenmeyen hız birikimi oluşturup oluşturmadığını değerlendirmek açısından önemlidir.



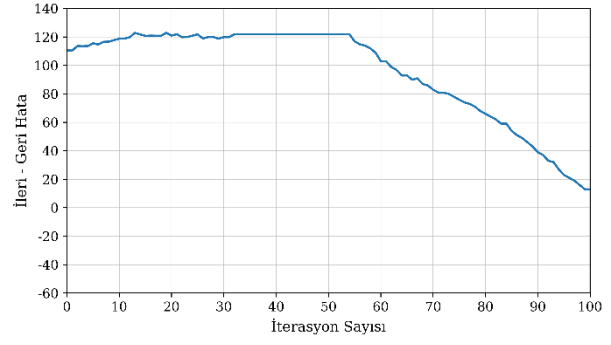
Şekil 4.1. V_x Grafikleri

Şekil 4.1.a. Denklem D.68 hızlar varken Şekil 4.1.b. Denklem D.65 hızlar yok

Şekil 4.1.a’da hız geri beslemesinin kullanıldığı durumda V_x hızının sıfır çevresinde daha kontrollü bir davranış gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.2.a’da hız geri beslemeli kontrolün İleri – Geri hatayı etkin şekilde düzeltmeye yönelik davranışları net görülmektedir. Bu sonuç, denetleyicinin yalnızca görsel hata büyüklüğüne değil, aracın mevcut gövde hareketine de tepki verdiğini göstermektedir. Hız bilgisinin kontrol denklemine dahil edilmesi, özellikle hedefe göre istenmeyen ileri veya geri hareket eğiliminin daha erken bastırılmasını sağlamaktadır.



a)



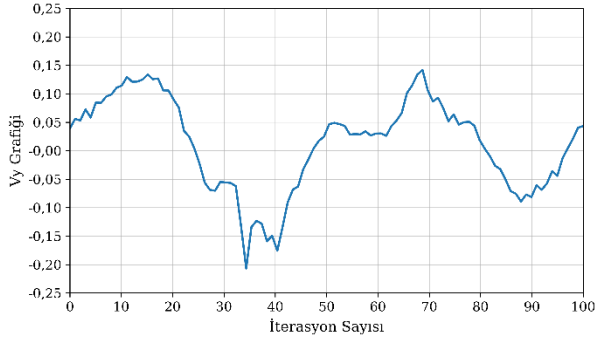
b)

Şekil 4.2. İleri – Geri Hata Grafikleri Şekil 4.2.a. Denklem D.68 hızlar varken Şekil 4.2.b. Denklem D.65 hızlar yok

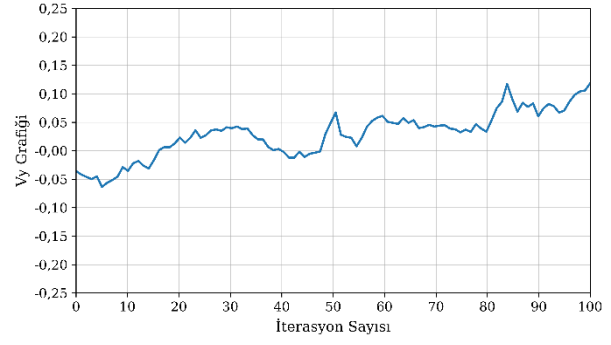
Şekil 4.1.b'de hız bilgisinin kullanılmadığı durumda ise V_x hızının sıfırdan uzak noktalarda dalgalanma eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.2.b'de hız bilgisi kullanılmadığı durumda kontrolde gecikme olduğu gözlemlenmektedir. Bu davranış, doğrudan görsel hata tabanlı PID yapısının hedef görüntüde merkezlenmiş olsa bile araç dinamiğinden kaynaklanan hız birikimini yeterince dikkate alamamasından kaynaklanabilir. İHA'nın ataleti, komut gecikmesi ve sensör örnekleme periyodu gibi etkenler, görsel hata azalsa dahi aracın hareketinin kısa süre devam etmesine neden olur. Bu nedenle hız geri beslemesi kullanılmayan durumda kalıcı salınım veya daha belirgin hız dalgalanması ortaya çıkabilmektedir.

4.3. V_y hızı için deney bulguları

Şekil 4.3'te formülde gövde hızları kullanıldığında ve kullanılmadığında V_y hızının zamanla değişimi verilmiştir. V_y bileşeni, İHA'nın yanal hareketini temsil ettiği için hedef merkezinin görüntü merkeziyle hizalanmasında doğrudan etkili olan hız bileşenidir. Bu nedenle V_y grafikleri, iki kontrol yaklaşımının yanal hizalama başarımını yorumlamak açısından temel göstergelerden biridir.



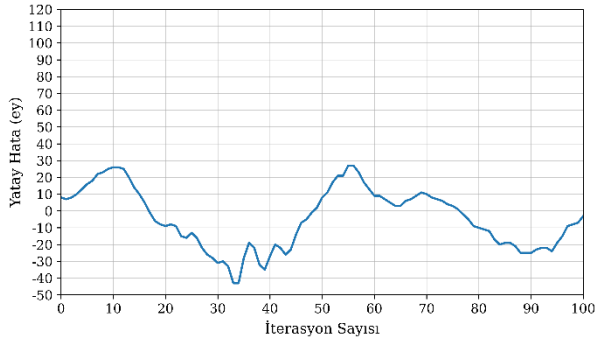
a)



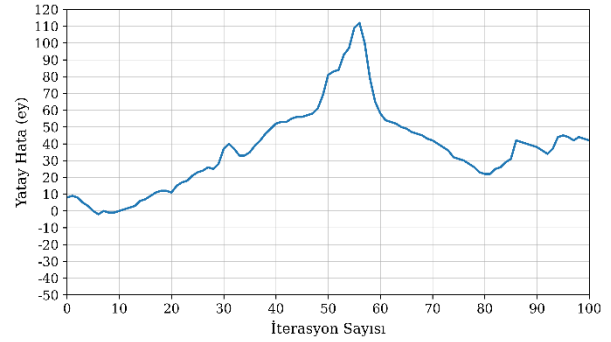
b)

Şekil 4.3. V_y Grafikleri Şekil 4.3.a. Denklem D.70 hızlar varken Şekil 4.3.b. Denklem D.66 hızlar yok

Şekil 4.3.a incelendiğinde, hız geri beslemeli PID yapısında V_y hızının sıfıra yaklaşma eğiliminin daha belirgin olduğu görülmektedir. Şekil 4.4.a'da hız geri beslemeli kontrolün yatay hatayı etkin şekilde düzeltme eğilimi görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 4.5.a incelendiğinde kenar hata grafiğinin hız geri beslemeli kontrolün yatay hatayı etkin şekilde düzeltme eğilimine destekleyici şekilde olduğu görülmektedir. Bu durum, hedef merkezi görüntü merkezine yaklaştıkça yanal hız referansının küçülmesi ve ölçülen yanal hızın denetleyici tarafından bastırılması ile açıklanabilir. Başka bir ifadeyle, sistem yalnızca hedefin anlık piksel hatasına göre değil, bu hatayı azaltmak için oluşan gerçek yanal harekete göre kendini düzeltmektedir.



a)

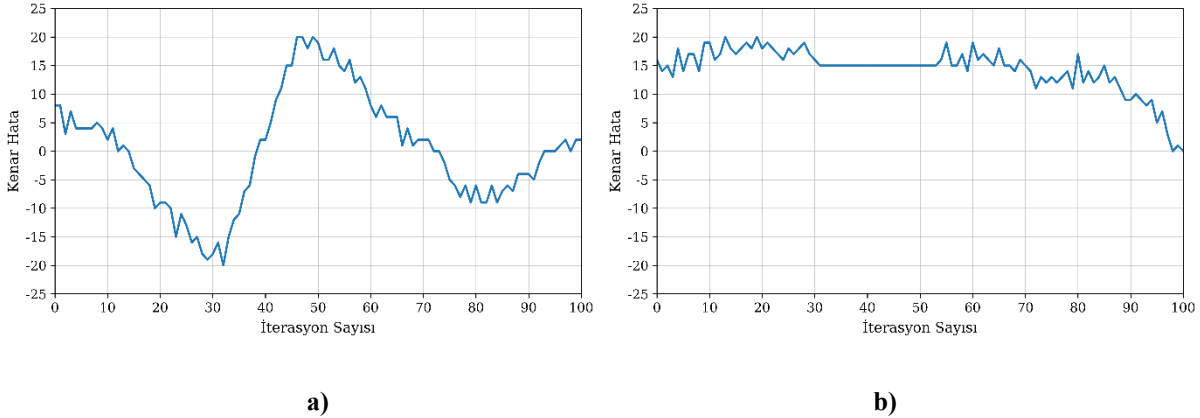


b)

Şekil 4.4. Yatay Hata (e_y) Grafikleri Şekil 4.4.a. Denklem D.70 hızlar varken Şekil 4.4.b. Denklem D.66 hızlar yok

Şekil 4.3.b'de ise hız geri beslemesi kullanılmadığında V_y hızının sıfır çevresinde daha geniş aralıkta salındığı görülmektedir. Şekil 4.4.b'de hız geri beslemesi kullanılmadığı durumda kontrol sisteminin hatayı kontrolde geciktiği görülmektedir. Aynı durum Şekil 4.5.b kenar hata grafiği incelendiğinde de geçerlidir. Kontrol sistemi hatayı kontrolde gecikmektedir. Bu durum,

doğrudan görsel hata tabanlı kontrolün düşük uygulama karmaşıklığına rağmen yanal ekseninde daha fazla aşım üretebildiğini göstermektedir.



Şekil 4.5. Kenar Hata Grafikleri Şekil 4.5.a. Denklem D.70 hızları varken Şekil 4.5.b. Denklem D.66 hızları yok

Görüntü tabanlı hata tek başına kullanıldığında, hedef merkezine yaklaşıldığı anda komutun azalması mümkündür; ancak İHA üzerinde oluşmuş olan yanal hızın etkisi devam ettiği için hedef görüntü merkezinin diğer tarafına geçebilir ve bu da ters yönde yeni bir düzeltme komutu üretilmesine neden olabilir. Bu çevrim tekrarladığında salınım davranışı oluşmaktadır.

4.4. Kontrol yaklaşımlarının karşılaştırılması

Elde edilen grafikler genel olarak değerlendirildiğinde, hız geri beslemesinin kullanıldığı yaklaşımın hedef çevresinde daha sönümlü bir davranış ürettiği görülmektedir. Şekil 4.6'da bu deneyin görseli mevcuttur. 100 ms'de 100 adet alınmış görsel hizalanmanın 10 sn'sini belirtmektedir. Görsel içerindeki parça görseller, soldan sağa ve yukarıdan aşağı olacak şekilde sıralanmıştır. Görseller incelendiğinde hedef karşısındaki hizalanma daha sönümlü olarak görülmektedir.

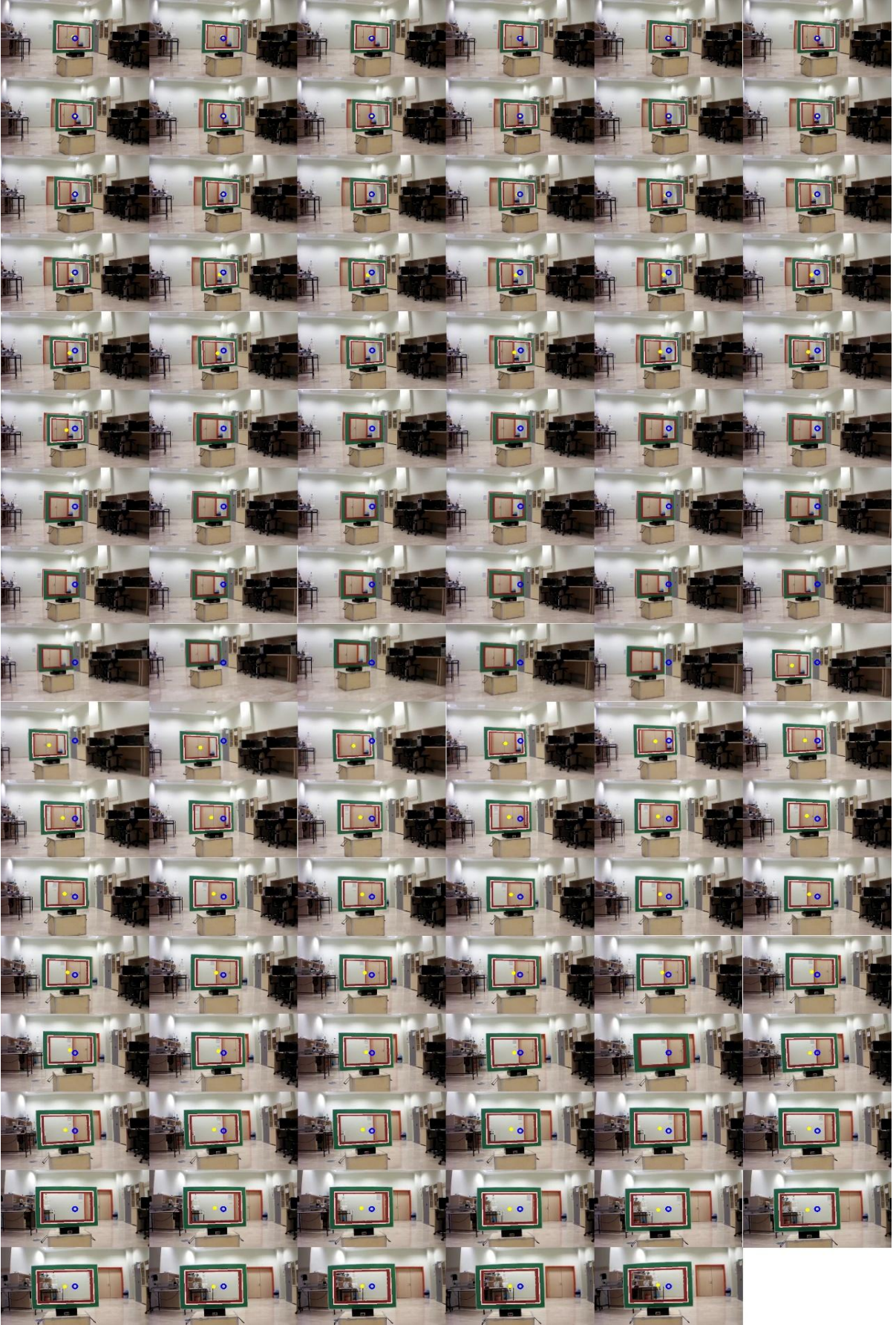
Hızların kontrol denklemine dahil edilmesi, özellikle İHA'nın mevcut hareket durumunun denetleyiciye aktarılmasını sağladığından, görsel hatanın sıfıra yaklaşması sırasında oluşabilecek aşımın azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle Yaklaşım B, hedefe yaklaşma öncesindeki hizalanma aşamasında daha kararlı bir davranış sergilemiştir.

Buna karşılık Yaklaşım A, daha basit bir kontrol yapısı sunmasına rağmen gövde hızlarını açık biçimde dikkate almadığı için dış bozucular, gecikmeler ve ataletsel etkiler karşısında daha fazla salınım gösterebilmektedir. Şekil 4.7'de bu deneyin görseli mevcuttur. 100 ms'de 100 adet alınmış görsel hizalanmanın 10 sn'sini belirtmektedir. Görsel içerindeki

parça görseller, soldan sağı ve yukarıdan aşağı olacak şekilde sıralanmıştır. Görseller incelendiğinde hedef karşısındaki hizalanma daha az sönümlü olarak görülmektedir. Özellikle hava akımı, pervane kaynaklı titreşimler, görüntü işleme gecikmesi ve navdata güncelleme periyodu gibi etkenler, doğrudan piksel hatasına dayalı kontrolde hedef çevresinde sürekli düzeltme komutlarının oluşmasına neden olabilir.



Şekil 4.6. Hızlar varken deney görseli



Şekil 4.7. Hızlar yokken deney görseli

4.5. Tartışma

Deneysel bulgular, görsel servo kontrol uygulamalarında yalnızca görüntü düzlemindeki hatanın kullanılmasının her zaman yeterli olmadığını göstermektedir. İHA gibi düşük kütleli ve dış bozuculara duyarlı platformlarda, aracın o anda sahip olduğu gövde hızının kontrol çevrimine dahil edilmesi sistem davranışını iyileştirebilmektedir. Hız geri beslemesi, denetleyicinin geçmiş komutların araç üzerinde oluşturduğu hareket etkisini dolaylı olarak görmesini sağlar. Bu nedenle hata küçülürken bile aracın hareket etmeye devam ettiği durumlarda denetleyici daha erken karşı tepki üretebilir.

Bununla birlikte hız geri beslemeli yaklaşımın başarımı, ölçülen hız bilgisinin güvenilirliğine bağlıdır. AR.Drone 2.0 navdata verileri, gövde hızları hakkında kullanışlı geri besleme sağlasa da bu ölçümlerde gürültü ve gecikme bulunabilir. Özellikle PID denetleyicide türev terimi kullanıldığında, hız ölçümündeki ani değişimler denetleyici çıkışında gereksiz dalgalanmaya yol açabilir. Bu nedenle hız geri beslemeli yapının uygulanmasında düşük geçiren filtre, üstel hareketli ortalama veya türev teriminin filtrelenmiş hata üzerinden alınması gibi düzenlemeler kararlılığı artırabilir.

Görüntü işleme tarafında ise hedefin kırmızı iç dikdörtgen ve yeşil dış dikdörtgen ile tanımlanması, yalnızca tek renkli hedef kullanımına göre daha güvenilir bir tespit sağlamıştır. Kırmızı dikdörtgenin yeşil dikdörtgen içinde bulunma koşulu, hedefin çevredeki benzer renkli nesnelere ayrılmasına katkı vermiştir. Bununla birlikte ortam ışığının ani değişmesi, hedefin kameraya çok yaklaşması, hedefin kısmen görüntü dışına çıkması veya hareket bulanıklığı oluşması durumunda kontur tespiti olumsuz etkilenebilir. Bu nedenle bulgular, hedef tasarımının kontrol başarımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, hız geri beslemeli PID yaklaşımı doğrudan görsel hata tabanlı yaklaşıma göre daha kararlı bir hizalanma davranışı üretmiştir. Bu iyileşme, hız ölçüm kalitesi, filtreleme yöntemi ve PID katsayılarının uygun seçimi ile yakından ilişkilidir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, AR.Drone 2.0 ön kamerası kullanılarak renk kodlu içi boş dikdörtgen hedefin tespit edilmesi, hedef karşısında otonom hizalanmanın sağlanması ve hedefe geçiş görevi için gerekli görsel servo kontrol altyapısının oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışmada görüntü işleme, hedef doğrulama ve PID tabanlı kontrol katmanları bir arada değerlendirilmiştir. Balık gözü bozulmasının düzeltilmesi, Lab renk uzayında eşikleme yapılması, kontur ve köşe noktaları üzerinden kırmızı iç dikdörtgenin yeşil dış dikdörtgen içinde olduğunun doğrulanması, hedef merkezinin güvenilir biçimde hesaplanmasını sağlamıştır.

Kontrol katmanında iki farklı yaklaşım karşılaştırılmıştır. Birinci yaklaşımda, görüntü düzleminden elde edilen hata doğrudan PID denetleyiciye uygulanmıştır. İkinci yaklaşımda ise görsel hatadan üretilen referans hareket, İHA'nın gövde eksenlerindeki ölçülen hızları ile karşılaştırılarak hız geri beslemeli PID yapısı oluşturulmuştur. Deneysel grafikler, hız geri beslemesinin kullanıldığı durumda V_x ve V_y hızlarının sıfıra daha düzenli biçimde yaklaştığını; hız bilgisinin kullanılmadığı durumda ise hatanın sıfırdan uzak bölgelerde salınım yapabildiğini göstermiştir. Bu sonuç, gövde hızlarının kontrol denklemine dahil edilmesinin hedef karşısındaki hizalanma kararlılığını artırdığını ortaya koymaktadır.

5.1. Çalışmadan elde edilen temel sonuçlar

Çalışma sonucunda elde edilen ilk önemli bulgu, hedef tasarımının görsel servo başarımı üzerindeki belirleyici etkisidir. Başlangıçta yalnızca renge dayalı tespit yaklaşımı, ortamda benzer renkte nesnelere bulunduğunda yanlış hedef seçimlerine neden olabilmektedir. Kırmızı iç dikdörtgenin yeşil dış dikdörtgen içinde bulunması şartının eklenmesiyle hedef tespiti yalnızca renk bilgisine değil, aynı zamanda geometrik tutarlılığa dayandırılmıştır. Bu durum, hedef merkezinin daha güvenilir belirlenmesini ve kontrol çevrimine daha doğru hata bilgisinin aktarılmasını sağlamıştır.

İkinci önemli sonuç, kamera görüntüsünde oluşan balık gözü bozulmasının kontrol doğruluğunu etkileyebilmesidir. Görüntüdeki bozulma düzeltilmediğinde hedef kenarları ve köşe noktaları gerçek geometriden sapmakta, bu durum hem hedef merkezinin hesaplanmasını hem de kenar uzunluklarına dayalı hizalama değerlendirmelerini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle kamera düzeltme adımı, hedef tespiti ve kontrol başarımı açısından gerekli bir ön işlem olarak değerlendirilmiştir.

Üçüncü sonuç, doğrudan görüntü hatasına dayalı PID yaklaşımının uygulanabilir ancak salınımına açık bir yapı sunduğudur. Bu yaklaşım düşük hesaplama maliyetine ve daha az parametreye sahiptir. Bununla birlikte İHA'nın mevcut gövde hızı denetleyiciye açık biçimde aktarılmadığı için, hedef merkezine ulaşıldıktan sonra dahi araç hareketinin devam etmesi aşım ve salınım davranışına neden olabilmektedir.

Dördüncü sonuç, hız geri beslemeli PID yaklaşımının hizalanma aşamasında daha kararlı bir davranış üretmesidir. V_x ve V_y hızlarının kontrol formülüne dahil edilmesi, denetleyicinin yalnızca görsel hataya değil, aracın o andaki hareket durumuna da tepki vermesini sağlamıştır. Bu yapı hedefe yaklaşma öncesindeki hizalanma sürecinde salınımı azaltmış, hızların sıfıra yakınsama eğilimini güçlendirmiş ve daha yumuşak bir kontrol davranışı ortaya çıkarmıştır.

Beşinci sonuç, hız geri beslemesinin uygulanmasında ölçüm kalitesinin kritik olduğudur. Navdata hız ölçümlerinde gürültü, gecikme veya ani değişimler bulunduğunda PID denetleyicinin türev bileşeni hassaslaşabilir. Bu nedenle hız geri beslemeli yaklaşımın başarılı biçimde uygulanabilmesi için hız ölçümlerinin filtrelenmesi, örnekleme süresinin düzenli tutulması ve PID katsayılarının deneysel olarak dikkatli ayarlanması gerekmektedir.

5.2. Çalışmanın literatür katkıları

Bu tez çalışmasının temel katkısı, AR.Drone 2.0 gibi düşük maliyetli bir döner kanat İHA üzerinde, yalnızca ön kamera görüntüsüne dayalı hedef tespiti ve hedef karşısında hizalanma sürecinin deneysel olarak gerçekleştirilmesidir. Çalışmada kullanılan kırmızı iç dikdörtgen–yeşil dış dikdörtgen hedef yapısı, renk ve geometri bilgisini birlikte kullanarak daha güvenilir bir hedef doğrulama yaklaşımı sunmuştur. Ayrıca doğrudan görsel hata tabanlı kontrol ile gövde hızları etkisini içeren kontrol yaklaşımının karşılaştırılması, görsel servo uygulamalarında hız geri beslemesinin pratik etkisini göstermesi bakımından önemlidir.

Çalışma, görüntü işleme ve kontrol adımlarının birbirinden bağımsız düşünülmemesi gerektiğini de ortaya koymuştur. Görüntüden elde edilen hedef merkezi, kenar uzunlukları ve doğrulama bilgisi doğrudan kontrol komutlarını etkilediğinden, görüntü işleme kararlılığı kontrol kararlılığının ön koşulu haline gelmiştir. Bu yönüyle tez, görsel servo tabanlı İHA uygulamalarında hedef tasarımı, görüntü düzeltme, öznitelik çıkarımı ve hız geri beslemeli kontrolün birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

5.3. Sınırlılıklar

Çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. İlk olarak, kullanılan kamera kalibrasyonu hedefe ve deney ortamına özel kapsamlı bir kalibrasyon süreciyle değil, önceden belirlenen parametrelerle gerçekleştirilmiştir. Bu durum balık gözü bozulmasının azaltılmasını sağlasa da, daha hassas konum ve yönelim tahmini gerektiren durumlarda yeterli olmayabilir. İkinci olarak, deneylerde hedefin belirli bir geometriye ve belirli renklere sahip olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle farklı hedef renkleri, farklı arka planlar veya daha karmaşık ortamlar için eşikleme ve kontur seçim parametrelerinin yeniden düzenlenmesi gerekebilir.

Üçüncü sınırlılık, kontrol performansının temel olarak belirli deney senaryoları ve 10 saniyelik grafikler üzerinden değerlendirilmiş olmasıdır. Bu grafikler iki kontrol yaklaşımı arasındaki farkı göstermektedir; ancak farklı aydınlatma seviyeleri, farklı hedef uzaklıkları, farklı başlangıç hataları ve dış bozucular altında daha fazla deneme yapılması sonuçların genellenebilirliğini artıracaktır. Dördüncü olarak, navdata hız ölçümlerinin gürültü ve gecikme içerebilmesi hız geri beslemeli PID yapısının performansını sınırlayabilir. Bu nedenle hız ölçümlerinin filtrelenmesi ve daha gelişmiş durum kestirim yöntemlerinin kullanılması gerekebilir.

5.4. Öneriler ve gelecek çalışmalar

Gelecek çalışmalarda öncelikle kamera kalibrasyonunun deney ortamına ve kullanılan kameraya özel olarak yapılması önerilmektedir. Satranç tahtası veya benzeri kalibrasyon desenleri kullanılarak kamera iç parametreleri ve bozulma katsayıları daha hassas biçimde elde edilebilir. Bu sayede hedef köşe noktalarının görüntü düzlemindeki konumu daha doğru hesaplanabilir ve hedef merkezine dayalı kontrol hatası daha güvenilir hale getirilebilir.

İkinci olarak, görüntü işleme algoritmasının farklı aydınlatma koşullarında daha kararlı çalışması için adaptif eşikleme, renk sabitleme, morfolojik filtreleme ve hedefe özel öğrenme tabanlı yöntemler değerlendirilebilir. Mevcut çalışmada Lab renk uzayı ve geometrik doğrulama birlikte kullanılmıştır; ancak güçlü ışık değişimleri, gölge ve hareket bulanıklığı gibi durumlarda bu yapının ek önlemlerle desteklenmesi yararlı olacaktır.

Üçüncü olarak, hız geri beslemeli kontrol yapısında ölçülen hızlar filtrelenerek kullanılmalıdır. Üstel hareketli ortalama, düşük geçiren filtre veya tamamlayıcı filtre gibi yöntemler navdata hız ölçümlerindeki ani değişimleri azaltabilir. Daha ileri aşamada Kalman filtresi veya gözleyici tabanlı durum kestirimi kullanılarak görsel hata, gövde hızı ve kontrol komutu aynı çerçevede değerlendirilebilir.

Dördüncü olarak, PID denetleyicinin yanı sıra bulanık mantık, kayan kipli kontrol, model öngörülü kontrol veya adaptif kontrol gibi daha gelişmiş kontrol stratejileri denenebilir. Bu yöntemler özellikle dış bozucuların fazla olduğu, görüntü işleme gecikmesinin değişken olduğu veya hedefin hareketli olduğu durumlarda PID yaklaşımına göre daha dayanıklı sonuçlar verebilir.

Beşinci olarak, hedef kaybı durumunda güvenli davranış senaryoları tanımlanmalıdır. Hedef görüntüden çıktığında İHA'nın son komutu sürdürmesi yerine durması, havada asılı kalması, yavaşça geri çekilmesi veya arama davranışına geçmesi güvenlik açısından önemlidir. Bu kapsamda hedef doğrulama başarısız olduğunda kontrol komutlarının sınırlandırılması ve güvenli moda geçiş koşullarının belirlenmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Altuğ E. & Ostrowski J. P. & Mahony R. (2002). Control of a quadrotor helicopter using visual feedback. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- Antonio P. (2021). *Visual Servoing*. USI-SUPSI Dalle Molle Institute for Artificial Intelligence (IDSIA)
- Arnaud F. (2013). ARDrone2 SDK [Erişim:16.04.2026, <https://github.com/ARDrone2/Windows/SDK>]
- Bilgin B. (2019). *Visual servoing for target tracking using a non-linear 2 degree of freedom system*. (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Canny J. (1986). A Computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 8(6), 679–698.
- Ceren Z. (2010). *Görsel servo kontrol yöntemi ile bir insansız hava aracının kontrol edilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Chakrabarty A. & Morris R. & Bouysounouse X. & Hunt R. (2016). Autonomous indoor object tracking with the parrot ar.drone. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*.
- Chaumette F. & Hutchinson S. (2006). Visual servo control. I. basic approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(4), 82–90.
- Chaumette F. & Hutchinson S. (2007). Visual servo control. II. advanced approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 14(1), 109–118.
- Chaumette F. (1998). Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. *The Confluence of Vision and Control, Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 237, 66–78, Springer.
- 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.
- Duda R. O. & Hart P. E. (1972). Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*, 15(1), 11–15.
- Espiou B. & Chaumette F. & Rives P. (1992). A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(3), 313–326.

- Graphic Communications Open Textbook Collective (2015). *Graphic Design and Print Production Fundamentals*, “Lab Colour Space and Delta E Measurements,” BCcampus Open Education.
- Gökçe F. & Üçoluk G. & Şahin E. & Kalkan S. (2015). Vision-based detection and distance estimation of micro unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 15(9), 23805–23846.
- Habiyambere D. (2018). *Görsel servolama yaklaşımı ile endüstriyel robot kol kontrolü*. (Yüksek Lisans Tezi) Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Harris C. & Stephens M. (1988). A combined corner and edge detector. *In Proceedings of The Alvey Vision Conference*, 147–151.
- Hill J. & Park W. T. (1979). Real time control of a robot with a mobile camera. *Proceedings of the 9th International Symposium on Industrial Robots*, 233–246.
- Hinz S., & Topal C. (2013). *Camera calibration for mobile platforms using Parrot AR.Drone*. In Workshop on Computer Vision on Small Unmanned Aerial Vehicles (CV-SUAV).
- Hutchinson S. & Hager G. D. & P. I. Corke (1996). *A tutorial on visual servo control*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12(5), 651–670.
- Ho H. W. & Chu Q. P. (2013). Automatic landing system of a quadrotor UAV using visual servoing. *CEAS EuroGNC*.
- İlginoğlu A (2016). *Mikro-robot kolu dizaynı, üretimi ve görsel geri besleme ile temassız manipülasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Keipour et al. A. (2022). Visual servoing approach to autonomous UAV landing on a moving platform. *Sensors*, 22(17).
- Kurt Ö. (2025). *5 Eksenli hibrit delta robotun RGB-D kamerayla görsel servo yaklaşımı ile yönlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bursa.
- L. Carlone ve M. Ryll, (2023). *Lecture 6: Quadrotor Dynamics*, MIT Visual Navigation for Autonomous Vehicles.
- Lindeberg T. (1998). Feature detection with automatic scale selection. *International Journal of Computer Vision*, 30(2), 77–116.
- Lowe D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91–110.

- Malis E. & Chaumette F. & Boudet S. (1999). 2-1/2-D visual servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(2), 238–250.
- Murad M. Q. (2014) *FPGA-based Parallel Hardware Architecture for Real-time Image Classification*. (Yüksek lisans tezi) American University of Sharjah, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sharjah.
- OpenCV (2026), “*Smoothing Images*,” OpenCV Documentation.
- OpenCV Open Source Computer Vision (2025). *Harris Corner Detection*. [Erişim: 16.04.2026, https://docs.opencv.org/3.4/dc/d0d/tutorial_py_features_harris.html]
- OpenCV Open Source Computer Vision (2025). *Hough Line Transform*. [Erişim: 16.04.2026, https://docs.opencv.org/3.4/d9/db0/tutorial_hough_lines.html]
- OpenCV Open Source Computer Vision (2025) *Perspective-n-Point (PnP) pose computation*. [Erişim: 16.04.2026, https://docs.opencv.org/4.x/d5/d1f/calib3d_solvePnP.html]
- Pachauri A. & More V. & Gaidhani P. & Gupta N. (2016). Autonomous ingress of a UAV through a window using monocular vision.
- Palma Olvera, R. D., Zerón Martínez, E., Aceves-Fernandez, M. A., and Pedraza Ortega, J. C. (2014), *Analysis and comparison of images using the SIFT algorithm with a preprocessing stage based on histogram with different lighting conditions*. 10^o Congreso Internacional de Ingeniería, Santiago de Querétaro.
- Pereira A. D. R. (2021). Target tracking using visual servoing: the parrot ar.drone 2.0 case study. *MSc Thesis, Instituto Superior Técnico*.
- Pestana J. & Sanchez-Lopez J. L. & Campoy P. & Saripalli S. (2013). Vision based GPS-denied object tracking and following for unmanned aerial vehicles. *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*.
- Saripalli S. & Montgomery J. F. & Sukhatme G. S. (2003). *Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle*. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(3), 371–380.
- Ruslan B. (2024). FFMpeg.AutoGen [Erişim:16.04.2026, <https://github.com/RuslanB/FFmpeg.AutoGen>]
- Shirai Y. & Inoue H. (1973). Guiding a robot by visual feedback in assembling tasks. *Pattern Recognition*, 5, 99–108.
- Şen M. (2023). *Design and visual servo control of a non-holonomic mobile manipulator for*

- visual inspection*. (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- S. Bouabdallah ve R. Siegwart, (2007). Full control of a quadrotor, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- Tang Z. & Cunha R. & Cabecinhas D. & Hamel T. & Silvestre C. (2021). Quadrotor going through a window and landing: An image-based visual servo control approach. *Control Engineering Practice*, 112.
- T. Luukkonen. (2011) *Modelling and control of quadcopter*, Aalto University, School of Science, Espoo, Finland.
- Ünlü A. (2022). *Dört kanat tipinde İHA'lar için yapay sinir ağı ile konum tabanlı görsel servolama*. (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Yang S. & Scherer S. A. & Zell A. (2013). An onboard monocular vision system for autonomous takeoff, hovering and landing of a micro aerial vehicle. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 69. 499–515.
- Yüksel T. (2015). *Robot Manipülörler İçin Akıllı GTGS Sistemi*. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK'2015, 10-12 Eylül 2015, Denizli

EKLER

Tablo 6.1. Hızlar varken deney verileri

Frame	Yatay Hata Düzeltme Cikis	Yatay Hata Duzeltme Cikis	Yatay Konum	Dikey Hata	Dikey Hata Duzeltme Cikis	Dikey Konum	İleri-Geri Hata	İleri-Geri Hata Duzeltme Cikis	İleri-Geri Konum	Hiz Vx	Hiz Vy	Kenar Hata
307	8	-0,024	0,5120621	1	-3,248250043	0,783	85,98850613	-0,010007175	-0,0055676	0,009548905	0,05298697	8
308	7	-0,018107974	0,5072625	1	-3,365228191	0,781	84,9885718	-0,010078671	-0,002059489	0,009531894	0,03924749	8
309	8	-0,026637502	0,500892	-1	1,005222989	0,785	84,9885718	-0,012934717	0,000523599	0,005088312	0,0559814	3
310	10	-0,035369228	0,4963542	-2	3,182261108	0,786	85	-0,012897713	-0,003089233	0,002554117	0,05309431	7
311	13	-0,047592189	0,4899139	0	-1,1023531	0,785	83	-0,009476282	-0,005340707	0,009983514	0,07264911	4
312	16	-0,056124848	0,4834562	-1	1,057326836	0,789	84	-0,012706861	-0,007539823	0,00174952	0,05840315	4
313	18	-0,059513824	0,4744154	1	-3,280711424	0,792	83,99715911	-0,011416534	-0,01012291	0,003580327	0,08465384	4
314	22	-0,076749269	0,4647114	3	-7,54997654	0,792	82,99717516	-0,009577845	-0,01174607	0,01508386	0,08395374	4
315	23	-0,071836788	0,4531922	5	-12,23740965	0,784	82,9745781	-0,010310167	-0,01586504	0,01633066	0,09519219	5
316	25	-0,080411304	0,4383918	13	-29,20424913	0,774	81,9747209	-0,005871191	-0,01949533	0,0384944	0,0988027	4
317	26	-0,080792313	0,4190885	16	-36,44196723	0,768	80,95531284	-0,008020088	-0,0214501	0,03429541	0,1106722	2
318	26	-0,078	0,3946713	20	-44,13278576	0,76	79,90002776	-0,006907091	-0,02605777	0,04709427	0,1444538	4
319	25	-0,07213623	0,3691546	23	-52,83336006	0,758	78,9309524	-0,008106847	-0,02375393	0,03764455	0,1294344	0
320	20	-0,046464549	0,3360631	25	-55,33862675	0,756	76,95628937	-0,00525898	-0,01785472	0,04320709	0,1212684	1
321	14	-0,025908428	0,325703	23	-50,74217923	0,76	76,97541149	-0,006763777	-0,01045452	0,04152617	0,1214113	0
322	10	-0,018767011	0,2714336	16	-36,76597808	0,767	74,93244477	-0,007577549	-0,005515241	0,0384509	0,1249923	-3
323	5	-0,002057563	0,2353926	13	-28,72516838	0,78	74,95678181	-0,002885495	-0,004258603	0,05410557	0,1337485	-4
324	-1	0,041017445	0,2035927	10	-24,09060229	0,793	71,97606535	-0,003102745	-0,007749262	0,05920194	0,1257109	-5
325	-6	0,06355942	0,1729272	10	-23,2797102	0,806	69	-0,001383212	-0,01253146	0,0790567	0,1268791	-6
326	-8	0,058840784	0,1486322	8	-18,74078411	0,82	67,93490687	-0,001866959	-0,01665044	0,06545308	0,1060386	-10
327	-9	0,059268593	0,125559	8	-18,43718573	0,833	65,93557771	-0,00862705	-0,01595231	0,04532702	0,1059075	-9
328	-8	0,042384756	0,1059938	3	-8,111432636	0,847	63,93623486	0,001786431	-0,009529497	0,06311293	0,08992004	-9
329	-9	0,059624371	0,08452629	-2	2,922853247	0,855	62,7945234	0,009345768	-0,005794493	0,1034621	0,07588408	-10
330	-15	0,122745878	0,06386159	-7	13,70002717	0,861	61,71288057	-0,004944819	-0,000418879	0,1044106	0,0394173	-15
331	-16	0,101274544	0,05384341	-12	24,04103162	0,864	53,75724238	0,013652143	0,01094321	0,1021189	0,02470413	-11
332	-13	0,060500639	0,04644321	-18	39,35901432	0,862	49,59800381	0,010711237	0,01975713	0,1091117	0,004091728	-13
333	-16	0,111963461	0,03307399	-25	52,10813128	0,854	44,40547317	0,008975025	0,03145083	0,1102634	-0,02282253	-16
334	-22	0,163919223	0,02501057	-29	60,78351905	0,843	39,48922929	0,007845706	0,03656465	0,101816	-0,0506068	-15
335	-26	0,178881026	0,02427753	-32	70,54433505	0,822	32,56869169	0,01163891	0,03026401	0,1017009	-0,06870949	-18
336	-28	0,178724771	0,03309144	-18	37,81371887	0,802	27,78488277	0,006402147	0,01373574	0,08998875	-0,00728348	-19
337	-31	0,202555956	0,0429351	-5	10,20847962	0,786	54,84396182	-0,004996102	-0,003473205	0,07516918	-0,05482414	-18
338	-30	0,174508024	0,05958554	3	-7,225204904	0,771	54,84396182	-0,004865986	-0,0122173	0,0616918	-0,0565504	-16
339	-33	0,213618885	0,06290167	13	-28,10159149	0,769	6,839971559	0,024564247	-0,02478367	0,07077995	-0,0567479	-20
340	-43	0,317266927	0,07773697	17	-39,65627789	0,77	0,930511252	0,01305958	-0,02431244	0,0618922	-0,0622698	-15
341	-43	0,258	0,1206721	13	-28,8552776	0,785	-5,092436708	0,03113273	-0,01446878	0,1166763	-0,1320167	-12
342	-28	0,08680455	0,1670455	1	-3,100406763	0,798	-14,14777037	0,043042895	0,003019419	0,1294987	-0,0267457	-11
343	-19	0,062891223	0,1920209	-15	32,42948529	0,811	-24,21294833	0,005603511	0,02042035	0,06066517	-0,1341588	-7
344	-22	0,147696287	0,216735	-26	54,09186407	0,824	-30,29123307	0,0147848	0,03623303	0,04896838	-0,1230616	-6
345	-32	0,248761313	0,2405064	-42	92,70460241	0,824	-36,20432137	0,014136753	0,04014257	0,03693189	-0,1282098	-1
346	-35	0,225824009	0,2796018	-43	90,85248736	0,823	-41,13452144	0,019833042	0,03752458	0,03281843	-0,1589083	2
347	-27	0,117031801	0,3207392	-38	83,7523352	0,818	-48,02597293	0,017646594	0,03221878	0,02412312	-0,1493824	2
348	-20	0,08079277	0,3544415	-35	77,14910152	0,805	-49,00647202	0,025481459	0,02399828	0,03504499	-0,175459	5
349	-22	0,143068406	0,3755599	-29	63,62023846	0,793	-51,0064348	0,019489563	0,01886701	0,02214506	-0,1344624	9
350	-26	0,177481893	0,3976558	-25	54,00237809	0,784	-49,00161812	0,010864354	0,01448623	0,003940331	-0,09070265	11
351	-23	0,121128754	0,427117	-18	40,23981155	0,773	-48,00162337	0,001861362	0,009442232	0,0197448	-0,06830163	15
352	-14	0,035063109	0,454763	-14	30,84119797	0,761	-45,01475374	0,007944325	0,001413717	0,02157046	-0,06307585	15
353	-7	0,003690612	0,4719196	-1	2,783858799	0,748	-42	0,009040477	-0,0082205	-0,01017794	-0,03247094	20
354	-5	0,018944321	0,4804892	3	-5,946494557	0,744	-43,01485112	0,011746061	-0,008395034	-0,01134524	-0,01513584	20
355	-1	-0,007847222	0,4905597	5	-10,20778566	0,741	-40,02666548	0,008442205	-0,005986479	-0,009745867	0,004125268	18
356	2	-0,014300493	0,4959528	8	-16,93896609	0,736	-38,02684443	0,008341443	-0,003543018	-0,008333958	0,01725027	20
357	8	-0,039701682	0,5017647	8	-16,3852856	0,735	-37,02408456	0,006300246	0,000139626	-0,01151032	0,02477504	19
358	11	-0,041465585	0,5009968	6	-12,81497602	0,734	-36,06080457	0,0052047	0,00731293	-0,01550532	0,04659117	16
359	17	-0,067256477	0,5017123	2	-3,869876721	0,734	-35,06101064	0,00562844	0,01090831	-0,02277824	0,04893707	16
360	21	-0,074340504	0,4989722	3	-6,229025377	0,732	-35,1372562	0,005316496	0,008726646	-0,02273214	0,04671007	18
361	21	-0,063	0,4906993	6	-12,44970368	0,735	-33,24563083	0,007353401	0,01078613	-0,01018615	0,04355805	15
362	27	-0,096314444	0,4821647	2	-3,774080163	0,739	-29,29223979	0,003547803	0,0132645	-0,0178702	0,02833993	14
363	27	-0,081	0,4716578	1	-1,929724412	0,745	-28,34007699	0,002095084	0,01249656	-0,02872343	0,02940691	16
364	23	-0,057981819	0,4597721	-2	4,738773644	0,754	-25,39446386	-0,002478805	0,007714355	-0,04026679	0,02860678	12
365	17	-0,035159001	0,4478864	-1	2,50993093	0,759	-24,21294833	-0,002134339	0,001151917	-0,04590252	0,03417616	13
366	13	-0,028159167	0,439823	0	0,389909875	0,764	-18,21754078	-0,001683906	0,001117011	-0,04443506	0,02612728	11
367	9	-0,015851345	0,4321261	-2	4,787837315	0,764	-13,11719096	-0,003356111	0,000942478	-0,0411448	0,03017117	8
368	9	-0,027	0,4245688	-3	7,125674829	0,765	-13,11719096	-7,77094E-06	0,003089233	-0,04285501	0,03039425	6
369	7	-0,015534075	0,4173431	-5	11,27618556	0,763	-9,046464389	-0,004610869	0,003665191	-0,04286666	0,02620232	8
370	5	-0,009572651	0,406906	-7	15,58033446	0,763	-4,030301291	-0,005583447	0,00312414	-0,04894332	0,04333287	6
371	3	-0,003537091	0,402822	-7	15,6810047	0,764	0,998069505	-0,005496591	0,002042035	-0,05053756	0,05302864	6
372	3	-0,009	0,3959977	-6	13,32028603	0,763	1	-0,004154889	-0,000855211	-0,04650193	0,06645852	6
373	6	-0,026590688	0,3893655	-4	9,502888479	0,759	7	-0,008855439	-0,003455752	-0,05043445	0,1013239	1
374	7	-0,023690595	0,380796	-1	2,726635583	0,757	9,992000128	-0,008985038	-0,00858702	-0,06913605	0,1146439	4
375	9	-0,032376045	0,3681597	3	-5,867436923	0,755	14	-0,010848056	-0,01623156	-0,06931139	0,1337607	1
376	11	-0,038773489	0,3562042	8	-17,42394961	0,752	17,99173568	-0,008224553	-0,02151991	-0,05449798	0,1419218	2
377	10	-0,027377515	0,337599	13	-26,99748399	0,752	19,99791668	-0,005032194	-0,02548181	-0,03627023	0,1064021	2
378	8	-0,018274886	0,3208962	17	-37,57214634	0,754	20,99790796	-0,004483035	-0,02858489	-0,02602581	0,08663017	2
379	7	-0,018474499	0,3014184	21	-43,08290114	0,754	24,98085184	-0,001764324	-0,03337069	0,000851436	0,09304442	0
380	6	-0,015025076	0,2831971	23	-52,49237353	0,759	25,99145315	-0,003037118	-0,03344051	0,003680223	0,07466076	

Tablo 6.2. Hızlar yokken deney verileri

Frame	Yatay Hata	Yatay Hata Duzeltme Cikis	Yatay Konum	Dikey Hata	Dikey Hata Duzeltme Cikis	Dikey Konum	ileri-Geri Hata	ileri-Geri Hata Duzeltme Cikis	ileri-Geri Konum	Hiz Vx	Hiz Vy	Kenar Hata
166	8	-0,032430076	1,276918	-2	4,187670921	0,737	110,5945115	-0,01590303	-0,007173304	-0,008365519	-0,02943655	16
167	9	-0,029612169	1,280915	2	-4,446007911	0,735	110,3437272	-0,015850191	-0,01343904	-0,004740932	-0,03568592	14
168	8	-0,021192528	1,283445	7	-15,69739138	0,733	113,5076794	-0,016878068	-0,01537635	-0,002148868	-0,04181278	15
169	5	-0,006799985	1,28458	8	-17,64849478	0,735	113,4223755	-0,016318832	-0,01534144	-0,003151852	-0,04597266	13
170	3	-0,00308567	1,287198	7	-15,56339074	0,737	113,5076794	-0,016359159	-0,01790708	-0,005120174	-0,04994983	18
171	0	0,016102872	1,292696	8	-17,53334387	0,74	115,5008651	-0,016953085	-0,01965241	0,000246625	-0,04489108	14
172	-2	0,023548678	1,297443	7	-16,13955644	0,743	114,6555815	-0,016363975	-0,01768018	-0,004703644	-0,06353328	17
173	0	-0,005272436	1,308491	6	-13,17725659	0,747	116,4973868	-0,017066948	-0,015132	1,75706E-05	-0,05624549	17
174	-1	0,011622057	1,314425	5	-11,52285542	0,748	116,5775471	-0,016800687	-0,01277581	-0,002644626	-0,05150306	14
175	-1	0,006	1,32186	3	-6,863738375	0,745	117,7150746	-0,017130763	-0,0121824	-0,006709755	-0,04520665	19
176	0	-0,002749743	1,329086	1	-2,692693209	0,751	118,6458349	-0,017238561	-0,01368338	-0,00926826	-0,02885445	19
177	1	-0,005813174	1,334269	4	-9,36549843	0,745	118,773232	-0,017124849	-0,01462586	-0,007544169	-0,02561225	16
178	2	-0,008811959	1,341722	4	-9,384404701	0,745	119,7716149	-0,017415557	-0,01583014	-0,00089068	-0,02205007	17
179	3	-0,011754148	1,348354	5	-11,47308947	0,745	122,7666221	-0,018173315	-0,01603958	0,000954841	-0,01800155	20
180	6	-0,025909758	1,354533	5	-11,2076302	0,748	121,7068331	-0,01735813	-0,01380555	0,00545667	-0,02636738	18
181	7	-0,023848484	1,359594	3	-7,299254445	0,753	120,7089378	-0,017211755	-0,01148427	0,00946491	-0,02123586	17
182	9	-0,032566446	1,362771	0	-0,6319829	0,754	120,8238526	-0,017417825	-0,01019272	0,006267034	-0,01647332	18
183	11	-0,038320946	1,365755	0	-0,6319829	0,756	120,7699745	-0,017382276	-0,009372418	0,007637491	0,001209174	19
184	12	-0,038779376	1,3675	-4	8,148356518	0,757	120,7699745	-0,017390876	-0,00546288	0,001514359	0,006432208	18
185	12	-0,036	1,367675	-4	8,177757811	0,761	122,8667631	-0,018043568	-0,002583087	0,007159242	0,005948392	20
186	11	-0,030289958	1,36661	-9	18,85616462	0,763	120,8705639	-0,017080463	-0,000244346	-0,00317119	0,01275604	18
187	15	-0,056134411	1,366122	-10	21,43287719	0,764	121,90945	-0,017728472	3,49066E-05	0,004606099	0,02308577	18
188	17	-0,056363445	1,363992	-12	25,27231932	0,763	119,7716149	-0,016903128	0,004939281	-0,01079876	0,01411042	18
189	18	-0,056770902	1,36113	-12	25,87235643	0,762	119,9107427	-0,017290278	0,003700098	-0,002559149	0,02260851	17
190	21	-0,070905826	1,358058	-11	23,00357144	0,765	120,8238526	-0,017543013	0,002007129	-0,009175647	0,03593804	16
191	23	-0,074409372	1,350506	-11	23,44633646	0,765	121,7683104	-0,017687904	0,001117011	-0,01186508	0,0226876	18
192	24	-0,074816153	1,349715	-11	24,11799519	0,764	118,8263481	-0,016613893	0,000663225	-0,003320712	-0,02708081	17
193	26	-0,083413252	1,344497	-12	25,73541327	0,763	119,8714876	-0,017431222	0,001064651	-0,004725644	0,03563239	18
194	25	-0,072190943	1,33947	-11	24,20420961	0,764	119,8714876	-0,017261494	0,001396263	-0,00959532	0,03741468	19
195	28	-0,092353389	1,343781	-9	19,73296241	0,767	118,773232	-0,016919862	-0,002600541	-0,0192595	0,03484607	17
196	37	-0,134746932	1,343205	-6	12,75263214	0,763	119,8251092	-0,017421341	-0,004328417	-0,008744687	0,04121734	16
197	40	-0,128517557	1,331843	-7	15,6111206	0,76	119,8251092	-0,017254816	-0,00148353	0,01811542	0,03947987	15
198	37	-0,102710127	1,317898	-7	15,38348727	0,76	121,7683104	-0,017856815	-0,002879793	-0,01075199	0,04254506	15
199	33	-0,08787197	1,305367	-5	11,09394648	0,757	121,7683104	-0,017534637	-0,006038839	-0,01421827	0,03786591	15
200	33	-0,099	1,301178	-3	6,492562926	0,754	121,7683104	-0,017534637	-0,005794493	-0,01499302	0,03906664	15
201	35	-0,110469821	1,300864	-3	6,674894895	0,752	121,7683104	-0,017534637	-0,003159046	-0,008439078	0,02753281	15
202	39	-0,128240291	1,301422	-5	11,22440071	0,749	121,7683104	-0,017534637	0,003211406	-0,01858343	0,01997127	15
203	42	-0,134072263	1,302173	-8	17,40683307	0,747	121,7683104	-0,017534637	0,003560472	-0,03177425	0,01977417	15
204	46	-0,149126039	1,302592	-6	13,42070131	0,747	121,7683104	-0,017534637	0,00132645	-0,02946734	0,006591814	15
205	49	-0,155278892	1,302941	-5	11,20242658	0,747	121,7683104	-0,017534637	0,001745329	-0,02644765	0,00979209	15
206	52	-0,164035485	1,300986	-7	15,31728323	0,746	121,7683104	-0,017534637	0,005515241	-0,03498909	0,003047342	15
207	53	-0,161863043	1,299363	-7	15,99897742	0,743	121,7683104	-0,017534637	0,004171337	-0,03597879	-0,00222569	15
208	53	-0,159	1,297809	-7	15,25548272	0,737	121,7683104	-0,017534637	0,002583087	-0,0451261	-0,0121469	15
209	55	-0,170362213	1,297094	-3	6,857457146	0,734	121,7683104	-0,017534637	0,001082104	-0,0320452	-0,01221675	15
210	56	-0,170947461	1,295785	-3	7,272257003	0,732	121,7683104	-0,017534637	0,005148721	-0,04732012	-0,001702765	15
211	56	-0,168	1,293272	-5	11,00906624	0,728	121,7683104	-0,017534637	0,005044002	-0,04742405	-0,01092159	15
212	57	-0,173863863	1,290985	-4	9,42845903	0,727	121,7683104	-0,017534637	-0,000890118	-0,04682856	-0,005264718	15
213	58	-0,176658387	1,291945	1	-1,634103609	0,723	121,7683104	-0,017534637	-0,000680678	-0,04602025	-0,003499437	15
214	61	-0,191123462	1,302347	-1	2,654539604	0,716	121,7683104	-0,017534637	0,007243116	-0,01284504	-0,001320328	15
215	69	-0,230339651	1,308822	-1	2,764498908	0,713	121,7683104	-0,017534637	0,01038471	0,04942118	0,02887995	15
216	81	-0,27413395	1,315315	19	-39,45178793	0,709	121,7683104	-0,017534637	-0,02712242	0,100763	0,04853	15
217	83	-0,284411436	1,302731	43	-92,41539814	0,707	121,7683104	-0,017534637	-0,04139921	0,1298989	0,06710073	15
218	84	-0,25478415	1,305175	40	-87,74097464	0,71	121,7683104	-0,017534637	-0,01314233	0,1170652	0,02809971	15
219	93	-0,303848013	1,308857	24	-52,51904357	0,718	121,7683104	-0,017534637	0,01076868	0,08676546	0,02429621	15
220	97	-0,302136695	1,313552	4	-8,978257257	0,73	121,7683104	-0,017534637	0,03782129	0,06755903	0,02268802	16
221	109	-0,360093254	1,317933	-14	30,37063667	0,733	116,8287738	-0,016006017	0,04766494	0,0349887	0,00780751	15
222	112	-0,344277719	1,292626	-21	45,75241799	0,736	114,779478	-0,016188975	0,05569346	0,04881378	0,02264418	15
223	100	-0,268110494	1,251436	-31	66,14599199	0,735	113,8322881	-0,016240822	0,05544911	0,05351844	0,04196784	15
224	79	-0,17803012	1,209269	-23	50,97126864	0,732	111,9155646	-0,015792901	0,02919936	0,05253	0,05224064	16
225	65	-0,157679704	1,180436	-12	25,94017508	0,729	108,8808417	-0,015193455	0,00710349	0,0511123	0,05805014	14
226	58	-0,15432551	1,159405	-3	6,977735235	0,721	102,9204023	-0,013815378	-0,002792527	0,04911243	0,0612178	19
227	54	-0,150970801	1,142737	1	-1,822316926	0,716	102,8440265	-0,014796904	-0,00546288	0,04898266	0,05077399	16
228	53	-0,156242221	1,124795	3	-6,196652707	0,711	98,84789793	-0,013572871	-0,009599311	-0,00770092	0,04895877	17
229	52	-0,153365544	1,108232	5	-10,27459355	0,711	96,80379906	-0,013616642	-0,01073377	0,05085548	0,04701406	16
230	50	-0,144473876	1,093344	6	-12,81021172	0,708	92,8533578	-0,012715965	-0,01249656	0,03763248	0,05179345	15
231	49	-0,144135675	1,079333	8	-17,62022264	0,708	92,89225033	-0,013383168	-0,01733112	0,03368961	0,04893236	18
232	47	-0,135439404	1,063394	11	-23,91390618	0,708	89,8941506	-0,012444621	-0,02165954	0,0370297	0,05379387	15
233	46	-0,135291984	1,046569	14	-30,05592824	0,707	90,85509171	-0,013239268	-0,02188643	0,03898642	0,03967995	15
234	45	-0,13224708	1,029099	14	-30,44653651	0,71	86,85843942	-0,011847467	-0,02139774	0,03939549	0,04153427	14
235	43	-0,123764252	1,012134	14	-29,58143378	0,713	85,85925233	-0,012206788	-0,02125811	0,04257923	0,04545788	16
236	42	-0,123099129	0,9969146	11	-24,86798703	0,717	82,861636	-0,011410334	-0,01867502	0,03356198	0,04239605	15
237	40	-0,114681752	0,9800547	10	-21,46522481	0,722	80,89946957	-0,011336465	-0,01792453	0,03723069	0,0412119	14
238	38	-0,108384341	0,966505	11	-24,47142945	0,725	80,86318078	-0,011638184	-0,01855285	0,03167618	0,0486599	11
239	36	-0,102671928	0,9495289	11	-23,74250093	0,727	79,90002776	-0,011				