

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖREVE DAYALI GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI İNSANSIZ HAVA ARACI
HAREKETLİ PLATFORM İNİŞ-KALKIŞ SİSTEMİ TASARIMI

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATİH ARSLAN

AĞUSTOS 2023

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖREVE DAYALI GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI İNSANSIZ HAVA ARACI
HAREKETLİ PLATFORM İNİŞ-KALKIŞ SİSTEMİ TASARIMI

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih ARSLAN

DANIŞMAN

: Doç. Dr. Rıfat HACIOĞLU

ZONGULDAK

Ağustos 2023

KABUL:

Fatih ARSLAN tarafından hazırlanan “Göreve Dayalı Görüntü İşleme Tabanlı İnsansız Hava Aracı Hareketli Platform İnış-Kalkış Sistemi Tasarımı” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 25/08/2023

Danışman: Doç. Dr. Rıfat HACIOĞLU

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Ali NARİN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Batıkan Erdem DEMİR

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

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

Prof. Dr. Fikret GÖLGELEYEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Fatih ARSLAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÖREVE DAYALI GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI İNSANSIZ HAVA ARACI HAREKETLİ PLATFORM İNİŞ-KALKIŞ SİSTEMİ TASARIMI

Fatih ARSLAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU

Ağustos 2023, 65 sayfa

İnsansız hava araçları (İHA) dikey iniş-kalkış yapabilme ve belirtilen görevleri yerine getirebilme özellikleri ile faydalı yük taşıma, arama kurtarma çalışmaları, tarım uygulamaları, tehlikeli bölgelerde keşif çalışmaları gibi sivil ve askeri alanlarda kullanılmaktadır. İHA'lar insan hayatı için tehlikeli ortamlarda kullanılabilmeleri ve maliyetlerinin az olması gibi nedenlerden dolayı son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. İnsansız hava araçlarının rotasında sapma olmadan hızlı ve kararlı bir şekilde daha önceden belirlenmiş hareketli bir alan üzerine iniş yapması önemli bir problemdir.

Bu tez çalışmasında İHA'nın hareketli platform üzerine iniş yapılabilmesi için görüntü işleme tabanlı iniş algoritması geliştirilmektedir. Geliştirilen iniş algoritması üç adımdan oluşmaktadır. Bu adımlardan birincisi İHA'nın alt kısmında bulunan kamera ile belirlenen rotada hareket eden platformun tespit edilmesidir. İkincisi İHA'nın hareketli platformu takip etmesidir. Üçüncüsü ise İHA'nın altında bulunan kamera ile tespit edilen platformun üzerine iniş yapılmasıdır.

ÖZET (devam ediyor)

Tez çalışmasında işlem yükünün azaltılması için görüntü alma sıklığının hareketli platformun hızındaki değişime ve yüksekliğine bağlı olarak uyarlamalı olarak değiştirilmesi önerilmektedir. Geliştirilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritması, görüntü işleme yaklaşımlarından biri olan dairesel Hough dönüşümünü kullanarak hareketli platform üzerinde bulunan iç içe geçmiş yapıda iki daireden oluşan imgeyi algılamakta ve İHA'nın hareketli platform üzerine inişini gerçekleştirmektedir. İHA' nın hareketli platform üzerindeki dairesel imgenin algılanmasında farklı seviyelerdeki tuz – biber gürültüsünün inişe olan etkiside incelenmektedir. Görüntü işleme algoritmasının performansı, hem imge üzerindeki gürültü hem de hareketli platformun hız değişim etkisi incelenmektedir. Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ve sabit görüntü alma sıklığı performanslarının işlem yükü üzerindeki etkisinin kıyaslaması da yapılarak gerçek zamanlı çalışabilme performansından uyarlamalı yaklaşımın etkisi değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İnsansız hava araçları, görüntü işleme, Hough dönüşümü, hareketli platform, iniş algoritması.

Bilim Kodu: 608.05.00

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

MISSION WITH IMAGE PROCESSING BASED UNMANNED AERIAL VEHICLE MOVING PLATFORM LANDING-TAKING SYSTEM DESIGN

Fatih ARSLAN

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Rifat HACIOĞLU

August 2023, 65 pages

Unmanned aerial vehicles (UAVs), with their ability to take off and land vertically and perform specified tasks, are used in civil and military areas such as carrying payloads, search and rescue activities, agricultural practices, and exploration in dangerous areas. UAVs have become an important research topic in recent years due to their ability to be used in environments dangerous to human life and their low cost. It is a major problem for unmanned aerial vehicles to land quickly and stable on a predetermined moving area without detouring from their path.

In this thesis, an image processing-based landing algorithm is improved for the UAV to land on the moving platform. The enhanced landing algorithm consists of three steps. The first of these steps is to detect the platform moving on the path determined by the camera located at the bottom of the UAV. The second is that the UAV follows the moving platform. The third is landing on the platform detected by the camera under the UAV.

ABSTRACT (continued)

In order to reduce the processing load in the thesis study, it is recommended to change the image processing frequency adaptively depending on the change in speed and height of the moving platform. The developed image processing-based landing algorithm uses the circular Hough transform, one of the image processing approaches, to detect the image consisting of two circles in an interlocking structure on the moving platform and performs the landing of the UAV on the moving platform. The effect of salt and pepper noise at different levels on the detection of the circular image on the moving platform of the UAV is also examined. The performance of the image processing algorithm, both the noise on the image and the speed change effect of the moving platform are investigated. By comparing the effect of adaptive and fixed image processing frequency performances on the processing load, the effect of the adaptive approach on real-time operating performance is evaluated.

Keywords: Unmanned aerial vehicles, image processing, Hough transform, moving platform, landing algorithm.

Science Code: 608.05.00

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimime başladığım günden son gününe kadar her zaman yanımda olan ve desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen bana her zaman yol gösteren kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Rıfat HACIOĞLU'na saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezin değerlendirilme aşamasında zaman ayırarak katkıda bulunan değerli jüri üyeleri Doç. Dr. Ali NARİN ve Dr. Öğr. Üyesi Batıkan Erdem DEMİR hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca görüş ve önerileriyle bana destek veren Arş. Gör. Egemen BELGE hocama saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince her zaman yanımda olan destekleri ve sevgileri ile beni her zaman iyi hissettiren sevgili aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL:	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
 BÖLÜM 1 GİRİŞ	 1
1.1 MOTİVASYON	1
1.2 LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	1
1.3 ÇALIŞMANIN AMACI.....	4
1.4 ÇALIŞMANIN ORGANİZASYONU	5
 BÖLÜM 2 İHA SİSTEM MODELİ VE DENETİMİ	 7
2.1 İNSANSIZ HAVA ARACININ YAPISI	7
2.2 İHA SİSTEM MODELİ	8
2.2.1 Dönüş Kinematiği	10
2.2.2 Fırçasız Doğru Akım Motorunun Hareket Denklemleri	10
2.2.3 Öteleme Dinamikleri	11
2.2.4 Dönme Dinamikleri.....	12
2.3 İHA MATEMATİKSEL MODELİ	15
2.4 İHA UÇUŞ DENETİMİ	17
2.5 İHA İNİŞ – KALKIŞ PERFORMANS ANALİZİ.....	22

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 3 GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI HAREKETLİ PLATFORMA İNİŞ ALGORİTMASI	27
3.1 DAİRESEL HOUGH DÖNÜŞÜMÜ	27
3.2 GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI HAREKETLİ PLATFORMA İNİŞ ALGORİTMASI AKIŞ DİYAGRAMI.....	31
3.3 GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI HAREKETLİ PLATFORMA İNİŞ ALGORİTMASI İLE ALGILANAN İMGE	32
3.4 HAREKETLİ PLATFORM VE İHA’NIN BELİRLENEN HAREKET ROTALARI ..	35
3.5 ÖNERİLEN UYARLAMALI GÖRÜNTÜ ALMA SIKLIĞI TESPİTİ.....	38
BÖLÜM 4 BENZETİM SONUÇLARI	39
4.1 GÖRÜNTÜ ALMA SIKLIĞI ANALİZİ	40
4.2 GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI İNİŞ ALGORİTMASININ TUZ-BİBER GÜRÜLTÜ ETKİSİ ALTINDA İNCELENMESİ	44
4.3 HAREKETLİ PLATFORM ÜZERİNE İNİŞ KALKIŞ UYGULAMASI.....	53
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

No	Sayfa
Şekil 2.1 İHA sistem modeli.	9
Şekil 2.2 Motorların gövde merkezine göre konumları.	16
Şekil 2.3 İHA'nın uçuş denetimi döngüsü.	18
Şekil 2.4 İHA'nın hareketli platform üzerine iniş – kalkış uygulaması.	23
Şekil 2.5 İHA'nın iniş – kalkış uygulamasında yükseklik ve hız değişimleri.	24
Şekil 2.6 x, y koordinatlarında İHA'nın konumu ve hareketli platformun konumu arasındaki fark.	25
Şekil 3.1 Sabit yarıçaplı bir dairenin x, y uzayından (solda) parametre uzayına (sağda) dairesel Hough dönüşümü.	30
Şekil 3.2 Görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritma akış şeması.	33
Şekil 3.3 Hareketli platform üzerinde bulunan imge.	34
Şekil 3.4 İHA'nın alt kısmında bulunan kameranın görüş alanı.	34
Şekil 3.5 İHA'nın alt kısmında bulunan kameranın görüş alanına imge girdiği an.	36
Şekil 3.6 4 farklı iniş modunda imgenin algılanması.	36
Şekil 3.7 İHA'nın belirtilen rotada hareket eden platformun üzerine inişi.	37
Şekil 3.8 İHA'nın belirtilen rotada hareket eden platforma inişinin (a) 3 boyutlu gösterimi, (b) iki boyutlu gösterimi.	37
Şekil 4.1 Sabit görüntü alma sıklığı ile İHA'nın hareketli platform üzerine iniş süresi ve hareketli platformun hız değişimi eğrisi.	41
Şekil 4.2 0.3 s sabit görüntü alma sıklığında İHA'nın belirtilen rotada hareket eden platforma inişinin (a) 3 boyutlu gösterimi, (b) iki boyutlu gösterimi.	42
Şekil 4.3 Uyarlamalı görüntü alma sıklığında İHA'nın belirtilen rotada hareket eden platforma inişinin (a) 3 boyutlu gösterimi, (b) iki boyutlu gösterimi.	42
Şekil 4.4 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile İHA'nın hareketli platform üzerine iniş süresi ve hareketli platformun hız değişimi eğrisi.	43
Şekil 4.5 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültüsüz koşullar altında farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.	46
Şekil 4.6 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.001 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.	46
Şekil 4.7 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.005 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.	47
Şekil 4.8 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.01 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.	47

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.9 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.05 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.	48
Şekil 4.10 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.08 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.	48
Şekil 4.11 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültüsüz koşullar altında farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.....	49
Şekil 4.12 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.001 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.	49
Şekil 4.13 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.005 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.	50
Şekil 4.14 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.01 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.	50
Şekil 4.15 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.05 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.	51
Şekil 4.16 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.08 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.	51
Şekil 4.17 İHA'nın belirtilen rotada hareket eden platforma inişinin (a) 3 boyutlu gösterimi, (b) iki boyutlu gösterimi.....	54
Şekil 4.18 İHA'nın hareketli platform üzerine iniş – kalkış yapması durumunda oluşan yükseklik değişimleri.	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

No

Sayfa

Çizelge 2.1 X,Y,Z pozisyon kontrolünde kullanılan PID katsayı değerleri.....	19
Çizelge 2.2 p,q,r pozisyon kontrolünde kullanılan PID katsayı değerleri.....	21
Çizelge 2.3 Dört rotorlu İHA'nın fiziksel özellikleri.	23
Çizelge 4.1 İşlem süreleri 5 deneme ortalaması. 0.3 s sabit görüntü alma ve önerilen uyarlamalı görüntü alma.....	53





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

X^G	: Küresel koordinatlarda İHA'nın X eksen pozisyonu
Y^G	: Küresel koordinatlarda İHA'nın Y eksen pozisyonu
Z^G	: Küresel koordinatlarda İHA'nın Z eksen pozisyonu
x^b	: Gövde koordinatlarında İHA'nın X eksen pozisyonu
y^b	: Gövde koordinatlarında İHA'nın Y eksen pozisyonu
z^b	: Gövde koordinatlarında İHA'nın Z eksen pozisyonu
ψ	: Sapma açısı
θ	: Yunuslama açısı
ϕ	: Yuvarlanma açısı
$c(.)$	: Kosinüs fonksiyonu
$s(.)$	: Sinüs fonksiyonu
ϕ	: Yuvarlanma açısı
w	: Açısal hız
p	: Yuvarlanma açısal oranı
q	: Yunuslama açısal oranı
r	: Sapma açısal oranı
τ	: Motor torku
K_t	: Tork orantı sabiti
I	: Giriş akımı
I_0	: Yüksüz durumdaki akım
V	: Motor üzerindeki gerilim düşümü
R_m	: Motor direnci
K_θ	: Geri elektromanyetik kuvvet
P_m	: Motor gücü
P_h	: İHA'nın havada asılı kalması için gerekli güç
T	: İHA'nın havada asılı kalması için gerekli itki

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

ϑ_h	: İHA havada asılı durumdayken indüklenen hız
A	: Rotor pervanesinin tarama alanı
K_τ	: Tork orantı katsayısı
K_T	: İtke kuvveti
ρ	: Hava yoğunluğu
m	: İHA kütlesi
g	: Yerçekimi ivmesi
$\ddot{X}^G$	: Küresel koordinatlarda ivme
F_g	: Küresel koordinatlarda yerçekimi kuvveti
F_d	: Küresel koordinatlarda sürüklenme kuvveti
F_T^G	: Küresel koordinatlarda toplam itke kuvveti
F_T^b	: Gövde koordinatlarında toplam itke kuvveti
R_G^b	: Küresel koordinatlardan gövde koordinatlarına dönüşüm matrisi
R_b^G	: Gövde koordinatlarından küresel koordinatlara dönüşüm matrisi
F_i	: Her bir motorun itke kuvveti
K_{dx}, K_{dy}, K_{dz}	: Sürüklenme katsayıları
J_b	: İHA'nın atalet momenti
τ_m	: Motorların gövde çerçevesindeki torkları
τ_D	: Sürüklenme torku
J_x, J_y, J_z	: x, y, z eksenlerindeki atalet momenti
R	: Pervane yarıçapı
C_D	: Boyutsuz katsayı
l	: Kol uzunluğu
$\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi$	: Gövde çerçevelerindeki tork değerleri
d_i	: Sürüklenme kuvveti
$F1, F2, F3, F4$	: Motor itke kuvvetleri
u_1	: Tüm motorların toplam itke girişi
u_2	: Yuvarlanma kontrol girişi
u_3	: Yunuslama kontrol girişi
b, d	: Pervane karakteristiği
u_4	: Sapma kontrol girişi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

m_m	: İHA'nın her bir motorunun kütlesi
m_c	: İHA'nın merkez kütlesi
m_l	: Faydalı yükün kütlesi
e_x, e_y, e_z	: Pozisyon hataları
X_d^G, Y_d^G, Z_d^G	: İstenen pozisyonlar
X^G, Y^G, Z^G	: Ölçülen pozisyonlar
e_ϕ, e_θ, e_ψ	: Yönelim açılarının hataları
ϕ_d, θ_d, ψ_d	: İstenen yönelim açıları
e_p, e_q, e_r	: Açısal hız hataları
p_d, q_d, r_d	: İstenen açısal hızları
K_{PX}, K_{IX}, K_{DX}	: İHA'nın X eksenindeki hareketi kontrol eden PID katsayıları
K_{PY}, K_{IY}, K_{DY}	: İHA'nın Y eksenindeki hareketi kontrol eden PID katsayıları
K_{PZ}, K_{IZ}, K_{DZ}	: İHA'nın Z eksenindeki hareketi kontrol eden PID katsayıları
$K_{P\phi}, K_{I\phi}, K_{D\phi}$	: İHA'nın yuvarlanma açısını kontrol eden PID katsayıları
$K_{P\theta}, K_{I\theta}, K_{D\theta}$	: İHA'nın yunuslama açısını kontrol eden PID katsayıları
$K_{P\psi}, K_{I\psi}, K_{D\psi}$	: İHA'nın yunuslama açısını kontrol eden PID katsayıları
K_{PP}, K_{IP}, K_{DP}	: İHA'nın X eksenindeki açısal hızı kontrol eden PID katsayıları
K_{PQ}, K_{IQ}, K_{DQ}	: İHA'nın Y eksenindeki açısal hızı kontrol eden PID katsayıları
K_{PR}, K_{IR}, K_{DR}	: İHA'nın Z eksenindeki açısal hızı kontrol eden PID katsayıları
dx, dy, dz	: X, Y, Z eksenlerinde İHA'nın kat ettiği sonsuz küçük uzunluklar
y	: Kartezyen koordinatlarda bir doğrunun denklemi
s, f	: Kartezyen koordinatlarda bir doğru denkleminin katsayıları
δ	: Parametrik düzlemde bir doğrunun uzunluğu
ξ	: Parametrik düzlemde bir doğru denkleminin açısı
r	: Kartezyen koordinatlarda bir dairenin yarıçapı
k, n	: Kartezyen koordinatlarda bir dairenin merkez noktası

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

KISALTMALAR

DDPG	: Deep Deterministic Policy Gradients (Deterministik Politika Gradyanı)
ESC	: Electronic Speed Controller (Elektronik hız kontrolcüsü)
İHA	: İnsansız Hava Aracı
İKA	: İnsansız Kara Aracı
IBVS	: Image Based Visual Servoing (Görüntü tabanlı görsel servolama)
IMU	: Inertial Measurement Unit (Atalet Ölçü Birimi)
MPC	: Model Predictive Control
PI	: Proportional Integral
PID	: Proportional Integral Derivative
UWB	: Ultra-WideBand

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 MOTİVASYON

İnsansız hava araçları (İHA), sabit kanatlı ve döner kanatlı olmak üzere iki alt başlık altında incelenmektedir [1]. İnsansız hava araçları sivil ve askeri olmak üzere birden fazla alanda kullanılmaktadır. Faydalı yük taşıma, tarım sahalarının havadan denetimi, arama ve kurtarma çalışmaları, enerji nakil hatlarının havadan gözlemlenmesi gibi uygulamalar İHA'ların kullanım alanlarına örnek olarak verilmektedir. Son yıllarda İHA'lar küçük boyutları olması, yüksek manevra kabiliyeti ve taşınabilir olması gibi nedenler dolayısıyla araştırmacılar tarafından ilgi görmektedir [2], [3]. Belirli bir görevi yerine getirmek için kullanılan İHA'ların görev süresi boyunca tükettiği enerji miktarı batarya kapasitesine bağlılık göstermektedir. Bu durum İHA'ların uçuş süresini önemli derecede etkilemektedir. İHA'nın batarya kapasitesi sınırlı büyüklükte olduğu için belirlenen uçuş görevinin mümkün olabildiğince kısa zamanda tamamlanması ve başarılı bir iniş gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Beklenen bu durum araştırmacılar için İHA'ların otonom olarak belirlenen bir alana en az hatayla inişi önemli bir çalışma konusu haline getirmektedir [4]. İHA'nın özellikle hareketli platform üzerine gürbüz bir şekilde inişi geniş bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda görüntü işleme yaklaşımını kullanarak bir işaretin algılanması, sabit ve hareketli platformun takibi ve platforma hassas olarak iniş üzerine yöntemler geliştirilmektedir. Çalışmada kullanılan döner kanatlı İHA, çapraz şeklinde bir gövde ve bu gövdenin üzerinde bulunan dört adet motora sahip çok yönlü uçuş yapabilen bir uçan robottur. Kullanılan hareketli platform ise belirli bir rotayı hız sınırlaması ile takip edebilecek kabiliyette ve İHA'nın üzerine iniş yapabileceği yapıda seçilmiştir.

1.2 LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

İHA'ların serbest hareket kabiliyetine sahip olması sonucunda hareketli bir platform üzerine iniş yapabilmesi son yıllarda araştırmacılar için önemli bir çalışma alanı haline gelmektedir.

İHA'nın hareketli bir insansız kara aracını (İKA) takip etmesi ve üzerine iniş yapabilmesi için bir algoritma önerilmektedir [5]. Önerilen algoritma İHA havada hareket halindeyken ilk olarak İKA'nın tespit edilebilmesini, ikinci olarak İKA'nın takip edilebilmesini ve üçüncü olarak İKA üzerinde bulunan platform üzerine iniş yapılmasını hedeflemektedir. Önerilen algoritmanın gerçekleştirilebilmesi için iki adet yaklaşım önerilmektedir. Birinci yaklaşım, ilk adımda hareketli İKA'nın üzerinde bulunan platformun hareket değişimine göre İHA'nın hareketi uyarlamalı oransal-integral-türevsel (PID, proportional-integral-derivative) denetleyicisiyle ayarlanmaktadır. İkinci adımda ise uyarlamalı PID denetleyicisi Kalman filtresiyle birleştirilerek İHA'nın hareket etmesi gereken bir sonraki konum tahmini yapılmaktadır. Hareketli bir platform üzerine İHA'nın otonom olarak iniş yapabilmesini gerçekleştirmek için [6]'da atalet ölçü birimi birimi (IMU, inertial measurement unit) kullanılarak ve optik akış ölçümleri elde edilerek, optik akış temelli bir iniş kontrol algoritması sunulmaktadır. İHA'nın hareketli platformu takip edebilmesi ve platform üzerinde asılı olarak kalabilmesi için doğrusal olmayan orantılı-integral (PI, proportional-integral) denetleyici önerilmektedir. İHA'nın yüksek eğimle hareket eden bir platform üzerine iniş yapabilmesini sağlamak için doğrusal olmayan model öngörülü denetleyici (MPC, model predictive control) çalışmada sunulmaktadır. İHA'nın platformu takibi ve üzerine iniş yapabilmesi için oluşturulan hareket rotası ise geliştirilen iniş algoritması ile sağlanmaktadır. Çalışma [7]'de İHA'nın hareketli bir platform üzerine otonom inişini sağlamak için göreceli poz tahminine dayalı iniş algoritması önerilmektedir. İHA'nın alt kısmına yerleştirilen kameradan alınan görüntü örnekleriyle İHA üzerinde bulunan atalet ölçü biriminden (IMU, inertial measurement unit) alınan hareket verilerinin birleştirilmesi ile İHA'nın manevra kabiliyeti arttırılmaktadır. Genişletilmiş Kalman filtresi ve H_{∞} filtresi kullanılarak iniş algoritmasının başarısı değerlendirilmektedir. İHA'nın hareketli bir platform üzerine iniş yapabilmesi için görüntü işleme yöntemi kullanılarak üç aşamadan oluşan görüntü işleme tabanlı bir iniş algoritması [8]'de önerilmektedir. Birinci aşamada İHA tarafından hareketli iniş platformunun konumunu aranması, ikincisi ise platformun tespit edilmesi ve inişin başlaması ve sonuncusu ise hareketli platformun üzerine inişin gerçekleştirilmesidir. Tasarlanan görüntü işleme tabanlı algorithmada geri adım atma ve dinamik yüzey kontrolünün birlikte kullanıldığı özlü bir uyarlamalı kontrol şeması temelli denetim yöntemi kullanılmaktadır. Otonom olarak hareket eden bir İHA'nın hareketli bir platform üzerine iniş yapabilmesi önemli bir araştırma konusudur. [9]'da önerilen yöntem İHA'nın alt kısmında bulunan kameradan elde edilen görüntü örneklerinden yararlanılarak bir otonom iniş algoritması geliştirilmesidir. Kameradan alınan görüntü örnekleri kullanılarak hareketli platformun konumu tahmin edilmeye çalışılmaktadır. İHA'nın hareketli platforma

başarılı bir iniş gerçekleştirilebilmesi için yüksek bant genişliğine sahip geri besleme kontrol döngüsüne dayalı iniş algoritması sunulmaktadır. İHA üzerine yerleştirilen gimbal kameradan alınan görüntü verileri ile hareketli platformun modeli elde edilmektedir. MPC denetimi ve Kalman filtresi birlikte kullanılarak İHA, belirtilen rotada hareketini gerçekleştirmektedir.

İHA'nın hareket eden bir platform üzerine iniş yapabilmesini sağlamak için görüntü işleme yaklaşımı ve derin öğrenme tekniği birlikte kullanılarak Deterministik Politika Gradyanı (DDPG, Deep Deterministic Policy Gradients) algoritmasının takviyeli öğrenme tekniği ile birleştirilmesi yöntemine dayanan görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritması [10]'da önerilmektedir. Önerilen iniş algoritması farklı gürültü seviyeleri altında benzetim ortamında ve gerçek ortamda farklı değişim koşulları altında incelenmektedir. Göl üzerinde hareket halinde olan bir platforma [11]'de İHA'nın otonom olarak iniş yapabilmesini sağlamak için bir iniş algoritması sunulmaktadır. Geliştirilen algoritma, İHA'dan alınan konum verileri ile platform üzerinde bulunan iniş istasyonu verilerinin karşılaştırılmasına dayalı bir çözüm yöntemi önermektedir. Platform üzerinde oluşturulan iniş istasyonu, İHA'dan aldığı konum verileri ile platforma iniş yapabilmesi için gerekli olan rotayı oluşturmaktadır. Kalman filtresi iniş istasyonunun aktardığı veriler ile İHA'dan gelen konum verilerini birleştirerek İHA'nın hareket rotasını oluşturmaktadır. Ultra geniş bant (UWB, Ultra-Wideband) sistemi tarafından sağlanan yüksek frekanslı veriler Kalman filtresinin ayrıştırdığı konum verileri ile genişletilmektedir. Görüntü tabanlı görsel servolama (IBVS, image-based visual servoing) tekniği temel alınarak hareketli bir platform üzerine İHA'nın iniş yapabilmesi için görüntü işleme tabanlı iniş kontrol algoritması [12]'de önerilmektedir. Uyarlamalı kayan kipli denetleyici, İHA'nın referans hız değerlerini kullanarak platform üzerine otonom iniş yapılabilmesini gerçekleştirmektedir. Uyarlamalı kayan kipli denetleyici kullanılarak hız takibini sağlamak için, platform üzerine iniş sırasında yaşanan yer etkisini de göz önünde bulunduran uyarlanabilir bir yöntem önerilmektedir. Kontrol algoritması benzetim ortamında farklı gürültü seviyeleri altında incelenerek geliştirilen iniş yönteminin başarısı incelenmektedir. Çalışma [13]'te çok yönlü merceğe sahip bir kamera kullanılarak İHA'nın hareketli bir platform üzerine iniş yapabilmesi için görüntü işleme tekniği temelli bir iniş algoritması sunulmaktadır. İHA'nın alt kısmında bulunan çok yönlü merceğe sahip kamera aracılığıyla elde edilen görsel veriler ile İHA'nın dinamik modeli birleştirilerek hareketli platformun pozisyon ve hız tahmini elde edilmektedir. Önerilen kontrol algoritmasının başarısı farklı gürültü seviyeleri altında incelenmektedir. Görüntü işleme ve yerleşik algılama tekniği birlikte kullanılarak [14]'de serbest hareket edebilen İHA'nın hareketli bir platform üzerine iniş

yapabilmesini gerçekleştirmek için bir algoritma önerilmektedir. İHA'nın pozisyon tahminini elde etmek için monoküler görsel-ataletsel odometri kullanılmaktadır. Kameradan gelen veriler ve ataletsel ölçü birimi (IMU)'dan elde edilen veriler genişletilmiş Kalman filtresi ile birleştirilmektedir. Geliştirilen iniş algoritması İHA'nın pozisyon tahmini ve platform üzerine yönelimi hakkında başarılı bir durum tahmini gerçekleştirmektedir. Hareketli bir platform üzerine görüntü işleme tekniği kullanılarak [15]'te otonom hareket eden İHA'nın iniş yapabilmesi için pozisyon tahminine dayalı bir algoritma önerilmektedir. İHA üzerinde bulunan kameranın poz tahminini gerçekleştirmek için homografi modeli ile birlikte yinelemeli yöntem yaklaşımı benimsenmektedir. Kameranın yansıma hatasını en az seviyeye indirmek için Levenberg-Marquart algoritması kullanılarak doğrusal olmayan optimizasyon yapılmaktadır. İHA'nın hareketli platforma göre göreceli konumu genişletilmiş Kalman filtresi kullanılarak yerleşik görüş sistemi tarafından tahmin edilmektedir. Görüntü işleme tabanlı görsel servolama (IBVS) tekniği ve ötelemeli optik akış yöntemi birleştirilerek [16]'da hareketli bir platform üzerine İHA'nın otonom inişi için yinelemeli bir yöntem sunulmaktadır. Kamera verilerinden yararlanılarak ağırlık merkezini tespit etmeye odaklı bir denetleyici geliştirilmektedir. Önerilen denetleyici sınırlı bozulmalardan kaynaklı konum ve hız hatalarını en az seviyeye indirilmesini hedeflemektedir. Görüntü işleme tekniği kullanılarak topolojik örüntü ve dinamik bir görüntü eşliğinin aranması için önerilen yaklaşım ile İHA'nın hareketli bir platform üzerine inişi için bir iniş sistemi sunulmaktadır [17]. Burada doğrusal enterpolasyon yöntemi kullanılarak İHA'nın yüksekliği tahmin edilmektedir. Hareketli bir platform üzerine İHA inişi için ölü hesaplama yöntemi ile geliştirilen bir kontrol algoritması [18]'de sunulmaktadır. İHA'nın pozisyonu ölü hesaplama yaklaşımı ile tahmin edilmektedir. İHA'nın göreceli pozu elde edilerek platformun tespiti ve takibi gerçekleştirilmektedir.

Literatür gözden geçirildiğinde, İHA'ların hareketli bir platform üzerine iniş görevi için gerçek zamanlı çalışabilen algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Gerçek zamanlı çalışmakla birlikte, basit ve hızlı gerçekleştirilebilen bir algoritma İHA'ların görevi gerçekleştirme süresini azaltmakla birlikte işlem yükünün azalmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

1.3 ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmada İHA'nın hareketli bir platform üzerine otonom olarak inişini sağlamak için görüntü işleme tabanlı bir iniş algoritması önerilmektedir. Önerilen algoritma 3 adımdan oluşmaktadır. Bu adımlardan ilki hareketli platformun tespit edilmesi, ikincisi hareketli

platformun takip edilmesi ve son adımı ise hareketli platform üzerine inişin gerçekleştirilmesidir. İniş platformunun üzerinde iç içe geçmiş yapıda iki daire içeren bir imge bulunmaktadır. İHA, dairesel Hough dönüşümünü kullanarak platform üzerinde bulunan imge içerisindeki daireleri tespit etmektedir. İHA'nın imge içerisindeki büyük yarıçaplı daireyi algılamasıyla platform üzerine iniş başlamaktadır. İHA'nın belirli bir yüksekliğe kadar alçalmasıyla birlikte büyük yarıçaplı daire kameranin görüş açısının dışına çıkmaktadır. Hareketli platform üzerine inişin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için imge içerisinde bulunan küçük yarıçaplı daire algılanarak inişe devam edilmektedir. İHA'nın hareketli platform üzerine iniş performansı farklı gürültü yoğunlukları altında incelenmektedir. Önerilen iniş algoritmasının başarısı hem tuz-biber gürültü etkisi altında hem de hareketli platformun hız değişimine bağlı olarak incelenmektedir. Hareketli platformun hızına ve İHA'nın yüksekliğine bağlı olarak önerilen özgün uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımı ile gerçek zamanlı işlem yükünün azaltılması hedeflenmektedir. Önerilen özgün uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımı ile kameradan farklı örnekleme sıklıkları ile görüntü alınmaktadır. Önerilen bu yaklaşım ile İHA'nın hareketli platform üzerine iniş başarısı değerlendirilmektedir. İHA'nın hareketli platform üzerine inişi için oluşturulan sistem modeli benzetim ortamında gerçekleştirilmektedir [19].

1.4 ÇALIŞMANIN ORGANİZASYONU

İkinci bölümde İHA'nın sistem modeli ve kullanılan denetleyici yaklaşımı anlatılmaktadır. Ek olarak İHA'nın hareketli platform üzerine iniş – kalkış performansı değerlendirilmektedir. Üçüncü bölümde görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritmasının adımları ve akış diyagramı açıklanmaktadır. Ayrıca görüntü üzerinde dairelerin algılanması için kullanılan dairesel Hough dönüşümü, bu çalışmanın literatürden farklı yanlarından ilki olan iç içe geçmiş yapıda iki daireden oluşan imge ve çalışmanın ikinci literatürden farklı yanı olan önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımı sunulmaktadır. Dördüncü bölümde benzetim sonuçları verilmektedir. Sabit görüntü alma sıklığı ve önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı yönteminin İHA'nın veri işleme süresinde oluşan değişim etkisi kıyaslanmaktadır. Ayrıca geliştirilen iniş algoritmasının başarısı tuz-biber gürültüsü altında sabit ve uyarlamalı görüntü alma sıklıklarında incelenerek İHA'nın iniş performansı kıyaslanmaktadır. Beşinci bölümde ise çalışmada elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışmalar için sunulan öneriler yer almaktadır.



BÖLÜM 2

İHA SİSTEM MODELİ VE DENETİMİ

Bu bölümde dört rotorlu insansız hava araçlarının kinematiği ve dinamiği sunulmaktadır. İnsansız hava araçları sabit kanatlı ve döner kanatlı olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bu çalışmada bir gövde çerçevesi üzerinde dört adet motordan oluşan dikey – iniş kalkış yeteneğine sahip bir dört rotorlu döner kanatlı İHA kullanılmaktadır. Bu bölümde İHA'nın yapısı, sistem modeli, hareket denklemleri, matematiksel modeli, uçuş denetimi ve iniş – kalkış performans analizi sunulmaktadır. İHA'nın belirlenen rotada hareketi boyunca uçuş denetimi için kullanılan PID katsayı değerleri verilmektedir.

2.1 İNSANSIZ HAVA ARACININ YAPISI

Dört rotorlu insansız hava aracı bir çerçeve üzerinde dört adet motor bulunduran ve motorlara bağlı dört adet pervaneden oluşan altı serbestlik derecesine sahip (3 tane öteleme, 3 tane dönme) dikey iniş-kalkış yapabilen uçan bir hava robotudur. Bu serbestlik dereceleri, x, y, z doğrusal kuvvetler, ivmeler ve bu üç eksenin etrafında bulunan momentlerdir. İnsansız hava aracının öteleme ve dönme dinamikleri birlikte incelenmektedir. İHA'nın hareketi, itme vektörünü istenen hareket yönünde yönlendirebilmek için yuvarlanma ve yunuslama açılarının değiştirilmesiyle kontrol edilmektedir. İHA'nın hareketini sağlayabilmek için motorlardan iki tanesi saat yönünün tersine diğer ikisi ise saat yönünde dönecek şekilde ayarlanmaktadır. Motor uçlarında bulunan bütün pervanelerin dönme hızı aynı olduğunda İHA gövdesine etki eden tork sıfır olmaktadır. Sapma açısı ise pervanelerin maruz kaldığı aerodinamik sürüklenmeden ötürü İHA gövdesine net bir tork uyguladığından ve bu dönüş yönüne ters bir şekilde etki ettiğinden diferansiyel motor dönüş hızları ile denetim altına alınmaktadır [20]. Bu etkiden dolayı motor torkunun yönü bilinmektedir ve İHA'yı z eksenini etrafında döndürmek ile birlikte sapmayı değiştirmek mümkün hale gelmektedir [21]. İHA'nın sistem modellemesini oluşturan hareket yönleri Şekil 2.1'de verilmektedir. Burada x, y, z eksenleri sırasıyla ϕ, θ, ψ yuvarlanma, yunuslama ve sapma dönüş açıları olarak tanımlanmaktadır. $\{G\}$ küresel koordinat çerçevesini, $\{b\}$ gövde koordinat çerçevesini, X^G, Y^G, Z^G sırasıyla küresel koordinatla x, y, z eksenlerindeki

pozisyonu, x^b, y^b, z^b sırasıyla gövde koordinatlarında x, y, z eksenlerindeki pozisyonu ve l kol uzunluğunu belirtmektedir.

2.2 İHA SİSTEM MODELİ

Dört rotorlu İHA'nın matematiksel modeli için koordinat sistemi birincisi küresel çerçeve $[X^G \ Y^G \ Z^G]$, ikincisi ise gövde çerçevesi $[x^b \ y^b \ z^b]$ tanımlanmaktadır. Gövde çerçevesinde İHA'nın hız bileşenleri, küresel çerçevede ise İHA'nın konum bileşenleri tanımlanmaktadır. Bu bileşenler bir bütün olarak İHA sistemini ifade ettiğinden küresel ve gövde çerçeveleri arasında gerekli matematiksel dönüşümlerim yapılması gerekmektedir. ϕ, θ, ψ yuvarlanma, yunuslama ve sapma açıları sırasıyla dönüşüm matrisleri

$$R_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c(\phi) & s(\phi) \\ 0 & -s(\phi) & c(\phi) \end{bmatrix} R_\theta = \begin{bmatrix} c(\theta) & 0 & -s(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ s(\theta) & 0 & c(\theta) \end{bmatrix} R_\psi = \begin{bmatrix} c(\psi) & s(\psi) & 0 \\ -s(\psi) & c(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

olarak verilmektedir. Burada ifade edilen $c(\cdot)$ ve $s(\cdot)$ sırasıyla cosinüs ve sinüs fonksiyonlarını ifade etmektedir.

Küresel çerçeveden gövde çerçevesine dönüşüm matrisi

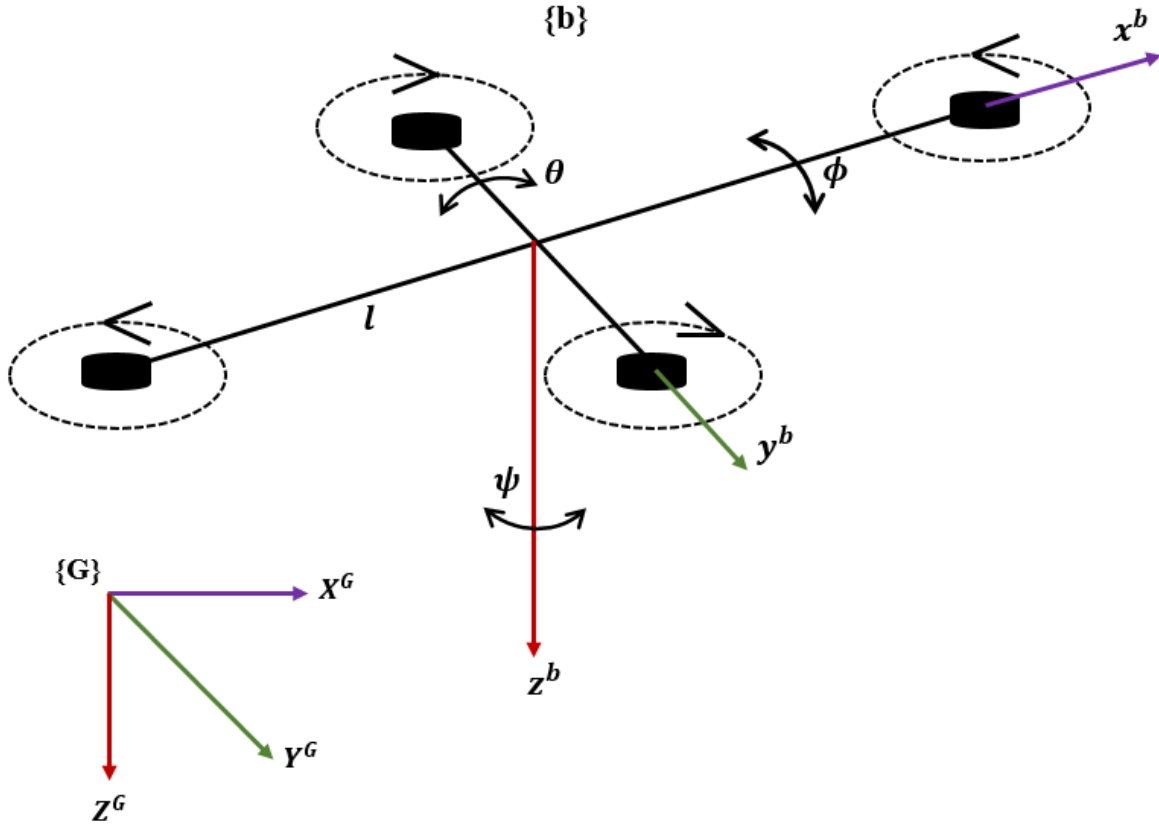
$$R_G^b = R_\phi R_\theta R_\psi,$$

$$R_G^b = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & s(\psi)c(\theta) & -s(\theta) \\ c(\psi)s(\phi)s(\theta) - c(\phi)s(\psi) & s(\phi)s(\psi)s(\theta) + c(\phi)c(\psi) & c(\theta)s(\phi) \\ c(\phi)c(\psi)s(\theta) + s(\phi)s(\psi) & c(\phi)s(\psi)s(\theta) - c(\psi)s(\phi) & c(\phi)c(\theta) \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

olarak ifade edilmektedir. Gövde çerçevesinden küresel çerçeveye dönüşüm

$$R_b^G = (R_G^b)^T = (R_\phi)^T (R_\theta)^T (R_\psi)^T,$$

$$R_b^G = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & c(\psi)c(\phi)s(\theta) - c(\phi)s(\psi) & c(\phi)c(\psi)s(\theta) + s(\phi)s(\psi) \\ s(\psi)c(\theta) & s(\phi)s(\psi)s(\theta) + c(\phi)c(\psi) & c(\phi)s(\psi)s(\theta) - c(\psi)s(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\phi)c(\theta) \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$



Şekil 2.1 İHA sistem modeli.

olarak tanımlanmaktadır. Küresel çerçevede İHA'nın pozisyonu tanımlanmaktadır. Gövde çerçevesinde ise İHA'nın hızı ve açısal hız bileşenleri ifade edilmektedir. İHA'nın uçuş anındaki pozisyon değişimleri küresel çerçevede tanımlanırken, ölçülen ivmeölçer değerleri gövde çerçevesinde tanımlanmaktadır. Bu nedenle küresel ve gövde çerçeveleri arasında matematiksel dönüşümlerin ifade edilmesi gerekmektedir. Bu dönüşümleri göz önünde bulundurarak gövde çerçevesinde tanımlanmış olan hız durum denklemleri

$$\begin{bmatrix} \dot{X}^G \\ \dot{Y}^G \\ \dot{Z}^G \end{bmatrix} = R_G^b \begin{bmatrix} \dot{x}^G \\ \dot{y}^G \\ \dot{z}^G \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

olarak tanımlanmaktadır. Bu denklemler ile hız küresel çerçevede hesaplanmaktadır. İHA'nın hareket denklemlerini dinamik ve kinematik olarak iki alt başlık altında tanımlanmaktadır. İHA'nın hareketini, Newton'nun ikinci kanununa göre dinamik unsurlar oluşturmaktadır. İHA'nın Euler dönüşümü denklemlerini ise kinematik unsurlar ifade etmektedir.

2.2.1 Dönüş Kinematiği

Gövde çerçevesinde açısal hız oranları tanımlanmaktadır. Euler açıları ise ara koordinat çerçevelerinde tanımlanmaktadır. Euler açıları ve açısal hız oranlarının zaman türevleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi için

$$w = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = R_\phi R_\theta \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + R_\phi \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\phi) \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi)\cos(\theta) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\tan(\theta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

dönüşüm matrisi kullanılmaktadır. Burada w açısal hızı, p, q, r sırasıyla yuvarlanma, yunuslama ve sapma açısal hızlarını ifade etmektedir. $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ sırasıyla yuvarlanma, yunuslama, sapma euler açılarının zamana göre türevini belirtmektedir.

2.2.2 Fırçasız Doğru Akım Motorunun Hareket Denklemleri

İHA'nın ihtiyaç duyduğu itme kuvvetini ve gerekli torku sağlamak için fırçasız doğru akım motorları kullanılmaktadır. Dört rotorlu İHA'nın hareketini sağlamak için her biri aynı tipte olan dört adet doğru akım motoru ihtiyaç duyduğu enerjiyi İHA'nın üzerinde bulunan bataryadan sağlamaktadır. Motorların hareketi elektronik hız kontrolcüsü tarafından denetlenmektedir. Fırçasız doğru akım motorlarının direnç ve yüksüz akımının değerlerinin sıfır olduğu kabul edilmektedir. İHA'nın üzerinde bulunan dört adet motor aynı tipte olduğundan oluşturulacak motor modeli her bir motor için aynı olmaktadır. Bir adet motorun ürettiği motor gücü

$$\tau = K_t(I - I_0), \quad (2.8)$$

$$V = IR_m + K_\theta w, \quad (2.9)$$

$$P_m = IV = \frac{(\tau + K_t I_0)(R_t I_0 R_m + \tau R_m + K_t K_\theta w)}{K_t^2}, \quad (2.10)$$

olarak hesaplanmaktadır. $R_m = 0$ ve $I_0 = 0$ olarak kabul edilirse $P_m = \frac{K_\theta \tau w}{K_t}$ olarak ifade edilmektedir. Bu denklemlerde; τ motor torkunu, K_t tork orantı sabitini, I giriş akımını, I_0 yüksüz durumda geçen akımı, V gerilim düşümünü, R_m motor direncini, K_θ geri elektromanyetik kuvvet katsayısını, P_m motor gücünü ifade etmektedir.

2.2.3 Öteleme Dinamikleri

İHA'nın uçuş yaptığı sırada İHA'ya etki eden bütün kuvvetlerin küresel koordinat sistemine göre doğrusal hareketi öteleme dinamiği olarak ifade edilmektedir. Newton'nun ikinci kanununa göre İHA'nın öteleme dinamiklerinden ortaya çıkan hareket denklemleri

$$m\ddot{X}^G = F_g - F_T^G - F_d, \quad (2.11)$$

$$\ddot{X}^G = \begin{bmatrix} \ddot{X}^G \\ \ddot{Y}^G \\ \ddot{Z}^G \end{bmatrix} \text{ ve } F_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

$$F_d = \begin{bmatrix} K_{dx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{dy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{dz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}^G \\ \dot{Y}^G \\ \dot{Z}^G \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

$$F_T^G = R_b^G F_T^b, \quad (2.14)$$

$$F_T^b = \sum_{i=1}^4 F_i, \quad (2.15)$$

$$F_T^G = R_b^G \sum_{i=1}^4 F_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_T \sum_{i=1}^4 w_i^2 \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

ile tanımlanmaktadır. Burada m İHA'nın kütesini, g yerçekimi ivmesini, $\ddot{X}^G$ küresel koordinatlarda tanımlanan ivmeyi, F_g küresel koordinatlarda tanımlanan yerçekimi kuvvetini, F_d küresel koordinatlarda tanımlanan sürüklenme kuvvetini, F_T^G küresel koordinatlarda tanımlanan toplam itki kuvvetini, F_T^b gövde koordinatlarda tanımlanan toplam itki kuvvetini, R_b^G gövde çerçevesinden küresel çerçeveye dönüşüm matrisini, F_i her bir motorun itki kuvvetini K_{dx} , K_{dy} ve K_{dz} ise sürüklenme katsayılarını ifade etmektedir.

İHA'ya küresel çerçevede etki eden ivme, etki eden bütün kuvvetlerin İHA'nın kütesine bölünmesi ile elde edilmektedir. Bu işlem

$$\begin{bmatrix} \ddot{X}^G \\ \ddot{Y}^G \\ \ddot{Z}^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} (-[\cos(\phi)\cos(\psi)\sin(\theta) + \sin(\phi)\sin(\psi)]F_T^b - K_{dx}\dot{X}^G) \\ \frac{1}{m} (-[\cos(\phi)\sin(\psi)\sin(\theta) - \cos(\psi)\sin(\phi)]F_T^b - K_{dy}\dot{Y}^G) \\ \frac{1}{m} (-[\cos(\phi)\cos(\theta)]F_T^b - K_{dz}\dot{Z}^G) + g \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

ile ifade edilmektedir.

2.2.4 Dönme Dinamikleri

Dönme dinamiğinde İHA'nın atalet momenti ve tork değişimlerine tabi olarak bütün eksenlerdeki Euler açılarının ikinci türevleri ile arasındaki bağlantı ifade edilmektedir. Coriolis teoremi kullanılarak bahsedilen eşitlik

$$J_b \dot{w} = \tau_m - \tau_g - (w \times J_b w), \quad (2.18)$$

olarak elde edilir. Burada J_b İHA'nın atalet momentini, $\dot{w}$ açısal ivmeyi, τ_m motorların gövde çerçevesindeki torklarını, τ_g jiroskopik etki torklarını, w açısal hız oranını ifade etmektedir. İHA'nın x ve y eksenleri çerçevesinde simetrik olarak tasarlanacak olursa atalet matrisi

$$J_b = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}, \quad (2.19)$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte tanımlanan J_x, J_y ve J_z sırasıyla x, y ve z eksenlerindeki atalet momentleridir. Atalet matrisi Coriolis teoremi denkleminde yerine yazılacak olursa

$$\dot{w} = \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = (w \times J_b w) = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \dot{\psi} (J_z - J_y) \\ \dot{\psi} \dot{\phi} (J_x - J_z) \\ \dot{\theta} \dot{\phi} (J_y - J_z) \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

olarak açısal ivme değerleri elde edilmektedir. Yuvarlanma, yunuslama ve sapma açılarındaki tork değerleri

$$J_b \dot{w} = \tau_m - \tau_\psi, \quad (2.21)$$

ile ifade edilmektedir. Burada τ_ψ gövde koordinatlarında sapma açısı torkunu, τ_m motorların gövde çerçevesindeki torklarını belirtmektedir. İHA havada asılı durumdayken, radyal hızın değişmediği için açısal ivmeyi sıfır olduğu ($\dot{w} = 0$) gövde koordinatlarında sapma açısının torkunun sürüklenme torkuna eşit olması ($\tau_\psi = \tau_D$), böylece

$$\tau_D = \frac{1}{2} R \rho C_D A (wR)^2 = K_d w^2, \quad (2.22)$$

$$\tau_\psi = \tau_D = (-1)^{i+1} K_d w_i^2 = K_d (w_1^2 - w_2^2 + w_3^2 - w_4^2), \quad (2.23)$$

$$\tau_{\phi,\theta} = \sum r \times T, \quad (2.24)$$

$$\tau_{\phi} = lK_T(w_4^2 - w_2^2), \quad (2.25)$$

$$\tau_{\theta} = lK_T(w_1^2 - w_3^2), \quad (2.26)$$

$$\tau_m = \begin{bmatrix} \tau_{\phi} \\ \tau_{\theta} \\ \tau_{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lK_T(w_4^2 - w_2^2) \\ lK_T(w_1^2 - w_3^2) \\ K_d(w_1^2 - w_2^2 + w_3^2 - w_4^2) \end{bmatrix}, \quad (2.27)$$

olarak elde edilir. Burada R pervane yarıçapını, A pervane tarama alanını, C_D boyutsuz katsayıyı, ρ hava yoğunluğunu, τ_D sürüklenme torkunu, K_d sürüklenme momenti orantı sabitini, K_T itki kuvvetini ve l kol uzunluğunu ifade etmektedir. τ_{ϕ} , τ_{θ} ve τ_{ψ} sırasıyla gövde çerçevesinde oluşan yuvarlanma, yunuslama ve sapma tork değerlerini, $w_{1,2,3,4}$ motor açısız hızlarını ifade etmektedir. İHA'nın jiroskop etkisi altında tork değerleri

$$\tau_g = w \times G_Z \sum_{i=1}^4 J_r w_i, \quad (2.28)$$

$$\tau_g = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ -\dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} J_r \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} w_i = \begin{bmatrix} J_r \dot{\theta}(w_1 - w_2 + w_3 - w_4) \\ -J_r \dot{\phi}(w_1 - w_2 + w_3 - w_4) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.29)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(J_y - J_z)qr - J_r q(w_1 - w_2 + w_3 - w_4) + lK_T(w_4^2 - w_2^2)}{J_x} \\ \frac{(J_z - J_x)pr - J_r p(w_1 - w_2 + w_3 - w_4) + lK_T(w_1^2 - w_3^2)}{J_y} \\ \frac{(J_x - J_y)pq + K_d(w_1^2 - w_2^2 + w_3^2 - w_4^2)}{J_z} \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

oluşan açısal ivme elde edilmektedir.

2.3 İHA MATEMATİKSEL MODELİ

İHA üzerinde bir gövde üzerinde dört adet aynı tipte fırçasız doğru akım motoru bulunan ve motorların her birinin uç kısmında pervane bulunan bir uçan robot türüdür. Her bir pervane çifti gövdeye dik olacak şekilde bir itme kuvveti oluşturmaktadır. İtme kuvveti ve sürüklenme katsayılarının motor hızlarıyla olan ilişkisi

$$F_i = bw_i^2, \quad d_i = dw_i^2, \quad (2.31)$$

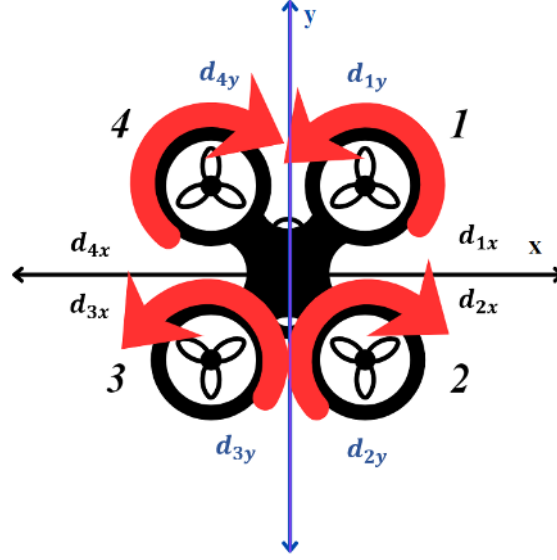
tanımlanmaktadır. Burada F_i İHA'nın her bir motorunun oluşturduğu itme kuvvetini, d_i sürüklenme katsayısını, b ve d pervane karakteristiğini oluşturan sabitleri ve w_i i . motorun açısal hızını ifade etmektedir. İHA'nın motor dönüşleri ve motorlarının gövde merkezine olan uzaklıkları Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Şekil 2.2'de $d_{1x,2x,3x,4x}$ x ekseninde sürüklenme katsayılarını, $d_{1y,2y,3y,4y}$ y ekseninde sürüklenme katsayılarını ve 1,2,3,4 motor dönüş yönlerini belirtmektedir.

İHA gövdesi üzerinde bulunan dört adet pervaneden her birinin pervaneye dik olacak şekilde bir itme kuvveti oluşturduğu ve gövdenin ağırlık merkezi çevresinde bir tork uyguladığı kabul edilmektedir. İHA'nın gövde çerçevesinde z vektörü aşağı yönde olduğundan dolayı pervanelerin oluşturduğu itki kuvveti negatif olarak kabul edilmektedir. Moment, kuvvet ile uzaklığının çarpımı ile elde edilmektedir. Bu nedenle İHA gövdesi üzerinde bulunan dört adet motorun gövdenin ağırlık merkezine ne kadar uzaklıkta olduklarının bilinmesi gerekmektedir.

Yuvarlanma (ϕ) ve yunuslama (θ) açılarının elde edilmesi için eksende bulundukları yere göre iki adet motor pozitif diğer iki motor ise negatif moment sağlamaktadır. Her bir pervanenin itki kuvvetinin yuvarlanma ve yunuslama tork değerlerine olan etkisi

$$\tau_\phi = F_1d_{1y} + F_2d_{2y} - F_3d_{3y} - F_4d_{4y}, \quad (2.32)$$

$$\tau_\theta = -F_1d_{1x} + F_2d_{2x} + F_3d_{3x} - F_4d_{4x}, \quad (2.33)$$



Şekil 2.2 Motorların gövde merkezine göre konumları.

ile hesaplanmaktadır. Burada τ_ϕ, τ_θ sırasıyla gövde çerçevesinde oluşan yuvarlanma, yunuslama tork değerlerini F_1, F_2, F_3 ve F_4 her bir pervanenin oluşturduğu itki kuvvetini, $d_{1y, 2y, 3y, 4y}$ y ekseninde pervanelerin sürüklenme kuvvetini, $d_{1x, 2x, 3x, 4x}$ x ekseninde pervanelerin sürüklenme kuvvetini belirtmektedir. Sapma açısını (ψ) oluşturmak için İHA'nın dört pervanesinden yararlanılmaktadır. İki pervane saat yönünde (3 ve 4), diğer iki pervane (1 ve 2) saat yönünün tersine dönmektedir. Yukarıya doğru bir itki kuvveti oluşturan pervane, itki kuvveti, pervane yarıçapı ve gövdenin ağırlık merkezine olan uzaklığı da göz önünde bulundurulduğunda dönme yönünde İHA'nın ağırlık merkezi çevresinde bir tork oluşmaktadır. Oluşan bu tork, $T(F, d_x, d_y)$ olarak tanımlanmaktadır. Sapma açısının (ψ) tork değeri

$$\tau_\psi = -T(F_1, d_{1x}, d_{1y}) + T(F_2, d_{2x}, d_{2y}) - T(F_3, d_{3x}, d_{3y}) + T(F_4, d_{4x}, d_{4y}), \quad (2.34)$$

ile ifade edilmektedir. İHA'nın gövde yapısında kol uzunlukları $l \frac{\sqrt{2}}{2}$ 'dir. Bu değişim İHA'nın yuvarlanma, yunuslama ve sapma açılarındaki tork değişimleri

$$\begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \frac{\sqrt{2}}{2} (-K_T w_1^2 - K_T w_2^2 + K_T w_3^2 + K_T w_4^2) \\ l \frac{\sqrt{2}}{2} (K_T w_1^2 - K_T w_2^2 - K_T w_3^2 + K_T w_4^2) \\ l \frac{\sqrt{2}}{2} (-K_d w_1^2 + K_d w_2^2 - K_d w_3^2 + K_d w_4^2) \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada τ_ϕ , τ_θ ve τ_ψ sırasıyla gövde çerçevesinde oluşan yuvarlanma, yunuslama ve sapma tork değerlerini, $w_{1,2,3,4}$ motor açısal hızlarını ve l kol uzunluğunu belirtmektedir. Motorların açısal hızı, itki kuvveti ve momentleri arasındaki ilişki

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_T^b \\ \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_T & K_T & K_T & K_T \\ -K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & -K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -K_d l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_d l \frac{\sqrt{2}}{2} & -K_d l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_d l \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1^2 \\ w_2^2 \\ w_3^2 \\ w_4^2 \end{bmatrix}, \quad (2.36)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada u_1 bütün motorların toplam itki girişini, u_2 yuvarlanma kontrol girişini, u_3 yunuslama kontrol girişini ve son olarak u_4 sapma kontrol girişini ifade etmektedir. İHA'nın açısal ivme vektörünün, her bir Euler açısı yönündeki tork değerleri ve atalet momentleri arasındaki bağlantı

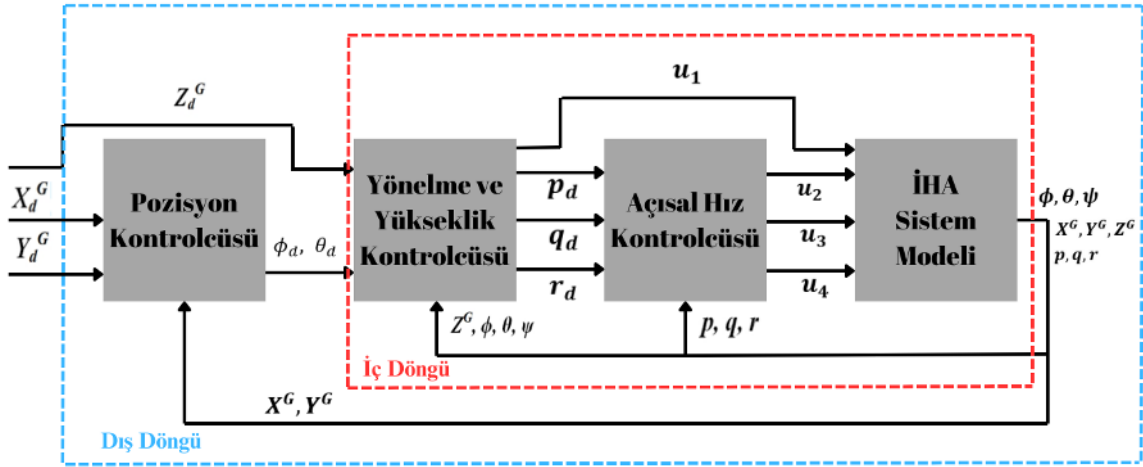
$$\begin{bmatrix} \ddot{p} \\ \ddot{q} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} qr \frac{(J_y - J_z)}{J_x} \\ pr \frac{(J_z - J_x)}{J_y} \\ pq \frac{(J_x - J_y)}{J_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\tau_\phi}{J_x} \\ \frac{\tau_\theta}{J_y} \\ \frac{\tau_\psi}{J_z} \end{bmatrix}, \quad (2.37)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada tanımlanan J_x, J_y ve J_z sırasıyla x, y ve z eksenlerindeki atalet momentlerini, p, q, r sırasıyla yuvarlanma, yunuslama ve sapma açısal hızlarını ve τ_ϕ, τ_θ ve τ_ψ sırasıyla gövde çerçevesinde oluşan yuvarlanma, yunuslama ve sapma tork değerlerini belirtmektedir.

2.4 İHA UÇUŞ DENETİMİ

İHA'nın uçuş denetimi için iç ve dış denetim döngüsü olarak birbiri ile bağlantılı bir denetim sistemi sunulmaktadır. Şekil 2.3'te önerilen denetim sistemi en içten en dışa doğru olacak şekilde üç adımda incelenebilmektedir. İlk adım yani en içteki denetim döngüsünde İHA'nın

açısal hız denetimi gerçekleştirilmektedir. İkinci adım yani bir üstteki denetim döngüsünde ise İHA'nın yönelme ve yükseklik bileşenleri kontrol edilmektedir.



Şekil 2.3 İHA'nın uçuş denetimi döngüsü.

Pozisyon kontrolcüsü tarafından istenilen yükseklik ve yönelme parametreleri, yükseklik ve yönelme kontrolcüsüne girdi olarak iletilmektedir. Üçüncü adım yani en dışta bulunan denetim döngüsünde ise x ve y eksenleri boyunca İHA'nın pozisyon denetimi sağlanmaktadır. Burada X_d^G, Y_d^G, Z_d^G istenilen pozisyon hatalarını, X^G, Y^G, Z^G sensör tarafından ölçülen pozisyonları, ϕ_d, θ_d, ψ_d istenilen yönelme açılarını, ϕ, θ, ψ sensörden ölçülen yuvarlanma, yunuslama ve sapma yönelme hatalarını, p, q, r sırasıyla sensörden ölçülen yuvarlanma, yunuslama ve sapma açısal hızlarını, p_d, q_d, r_d istenilen açısal hızlarını ve u_1, u_2, u_3, u_4 kontrol değişkenlerini ifade etmektedir.

İHA'nın x, y, z eksenlerindeki pozisyon hataları

$$e_x = (X_d^G - X^G), e_y = (Y_d^G - Y^G), e_z = (Z_d^G - Z^G), \quad (2.38)$$

ile ifade edilmektedir. Burada belirtilen parametreler sırasıyla (X, Y, Z) eksenlerindeki, e_x, e_y, e_z pozisyon hatalarını, X_d^G, Y_d^G, Z_d^G istenilen pozisyon hatalarını, X^G, Y^G, Z^G sensör tarafından ölçülen pozisyonları ifade etmektedir. Yönelme hata açılarının hataları

$$e_\phi = (\phi_d - \phi), e_\theta = (\theta_d - \theta), e_\psi = (\psi_d - \psi), \quad (2.39)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada sırasıyla X, Y, Z eksenlerindeki e_ϕ, e_θ, e_ψ yönelme açılarının hatalarını, ϕ_d, θ_d, ψ_d istenilen yönelme açılarını, ϕ, θ, ψ sırasıyla sensörden ölçülen yuvarlanma, yunuslama ve sapma yönelme açılarını ifade etmektedir. Açısal hız hataları

$$e_p = (p_d - p), e_q = (q_d - q), e_r = (r_d - r), \quad (2.40)$$

ile tanımlanmaktadır. Burada sırasıyla X, Y, Z eksenlerindeki e_p, e_q, e_r açısal hız hatalarını, p_d, q_d, r_d istenilen açısal hızları, p, q, r sırasıyla sensörden ölçülen yuvarlanma, yunuslama ve sapma açısal hızlarını ifade etmektedir. Pozisyon kontrolcüsü İHA'nın istenilen pozisyon değerlerini ve İHA'nın sistem modeli çıktısından elde edilen ölçüm farkını yani oluşan hatayı en aza indirmekten sorumludur. İstenilen pozisyon (X_d^G, Y_d^G) ve İHA'nın sistem modeli çıktısı (X^G, Y^G) pozisyon kontrolcüsünün girişlerini, istenilen yuvarlanma ϕ_d ve yunuslama açısı θ_d pozisyon kontrolcüsünün çıkışlarını belirtmektedir. Hatanın en aza indirilmesi

$$\theta_d(t) = K_{PX}(X_d^G - X^G) + K_{IX} \int_0^t (X_d^G - X^G)dt + K_{DX} (\dot{X}_d^G - \dot{X}^G), \quad (2.41)$$

$$\phi_d(t) = K_{PY}(Y_d^G - Y^G) + K_{IY} \int_0^t (Y_d^G - Y^G)dt + K_{DY} (\dot{Y}_d^G - \dot{Y}^G), \quad (2.42)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır. Bu hesaplama oransal-türevsel-integral (PID, proportional-integral-derivative) denetleyicisi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu eşitliklerde tanımlanan K_{PX}, K_{IX}, K_{DX} X-ekseninde, K_{PY}, K_{IY}, K_{DY} Y-eksenindeki İHA'nın hareketini kontrol eden PID katsayılarıdır. Pozisyon kontrolcüsü, yuvarlanma ve yunuslama açılarının değerlerini belirlemektedir. Bu çalışmada kullanılan X, Y, Z eksenlerinde İHA'nın pozisyon denetimi için kullanılan PID katsayıları Çizelge 2.1'de belirtilmektedir.

Çizelge 2.1 X, Y, Z pozisyon kontrolünde kullanılan PID katsayı değerleri.

X Eksen	K_{PX}	K_{IX}	K_{DX}
	0.35	0.25	-0.35
Y Eksen	K_{PY}	K_{IY}	K_{DY}
	0.35	0.25	-0.35
Z Eksen	K_{PZ}	K_{IZ}	K_{DZ}
	5.88	0	-5.88

Yönelme ve yükseklik kontrolcüsü, İHA'nın yuvarlanma, yunuslama, sapma açılarının kontrolünü ve İHA'nın yükseklik değişimi kontrol etmektedir. İstenilen ve ölçülen yükseklik miktarı ve yuvarlanma, yunuslama, sapma açıları yönelme ve yükseklik kontrolcüsünün girişlerini, istenilen açısal hız ve yükseklik kontrol değişkeni ise çıkışlarını oluşturmaktadır. Yükseklik kontrol değişkeni u_1 ve istenilen açısal hız (p_d, q_d, r_d) ,

$$u_1(t) = \frac{K_{PZ}e_z(t) + K_{IZ} \int_0^t e_z(t)dt + K_{DZ} \left(\frac{e_z(t) - e_z(t-1)}{dt} \right)}{\cos(\phi)\cos(\phi)}, \quad (2.43)$$

$$p_d(t) = K_{P\phi}e_\phi(t) + K_{I\phi} \int_0^t e_\phi(t)dt + K_{D\phi} \left(\frac{e_\phi(t) - e_\phi(t-1)}{dt} \right), \quad (2.44)$$

$$q_d(t) = K_{P\theta}e_\theta(t) + K_{I\theta} \int_0^t e_\theta(t)dt + K_{D\theta} \left(\frac{e_\theta(t) - e_\theta(t-1)}{dt} \right), \quad (2.45)$$

$$r_d(t) = K_{P\psi}e_\psi(t) + K_{I\psi} \int_0^t e_\psi(t)dt + K_{D\psi} \left(\frac{e_\psi(t) - e_\psi(t-1)}{dt} \right), \quad (2.46)$$

ile ifade edilmektedir. Burada (p_d, q_d, r_d) sırasıyla istenilen yuvarlanma, yunuslama ve sapma açısal hızlarını, K_{PZ}, K_{IZ}, K_{DZ} İHA'nın Z-eksenindeki kontrolünü, $K_{P\phi}, K_{I\phi}, K_{D\phi}$ yuvarlanma açısının kontrolünü, $K_{P\theta}, K_{I\theta}, K_{D\theta}$ yunuslama açısının kontrolünü, $K_{P\psi}, K_{I\psi}, K_{D\psi}$ sapma açısının kontrolünü sağlayan PID katsayılarıdır. Yükseklik kontrol değişkeni İHA'nın sistem modeline girdi olarak verilmektedir. Açısal hız kontrolcüsü, istenilen açısal hız değerleri ve ölçülen açısal hız değerleri arasında oluşan farkın yani hatanın en az miktara indirilmesini gerçekleştirmektedir. İHA'nın yönelme kontrol değişkenleri

$$u_2(t) = K_{PP}e_p(t) + K_{IP} \int_0^t e_p(t)dt + K_{DP} \left(\frac{e_p(t) - e_p(t-1)}{dt} \right), \quad (2.47)$$

$$u_3(t) = K_{PQ}e_q(t) + K_{IQ} \int_0^t e_q(t)dt + K_{DQ} \left(\frac{e_q(t) - e_q(t-1)}{dt} \right), \quad (2.48)$$

$$u_4(t) = K_{PR}e_r(t) + K_{IR} \int_0^t e_r(t)dt + K_{DR} \left(\frac{e_r(t) - e_r(t-1)}{dt} \right), \quad (2.49)$$

ile ifade edilmektedir. Burada İHA'nın K_{PP}, K_{IP}, K_{DP} X eksenindeki, K_{PQ}, K_{IQ}, K_{DQ} Y eksenindeki ve K_{PR}, K_{IR}, K_{DR} Z eksenindeki açısal hız kontrolünü sağlayan PID katsayılarını, e_p, e_q, e_r sırasıyla yunuslama, yuvarlanma ve sapma açısal hız hatalarını belirtmektedir. Bu çalışmada p, q, r açısal hızlarının denetimini sağlayan PID katsayıları Çizelge 2.2'de belirtilmektedir.

Çizelge 2.2 p, q, r pozisyon kontrolünde kullanılan PID katsayı değerleri.

p	K_{PP}	K_{IP}	K_{DP}
	2.7	1.0	-0.010
q	K_{PQ}	K_{IQ}	K_{DQ}
	2.7	1.0	-0.010
r	K_{PZ}	K_{IZ}	K_{DZ}
	2.7	1.0	-0.010

Elde edilen yükseklik ve yönelme kontrol değişkenlerini kullanarak ve eşitlik (2.36)'nın tersini alarak motor hareketini sağlamak için hızlar,

$$\begin{bmatrix} w_1^2 \\ w_2^2 \\ w_3^2 \\ w_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_T & K_T & K_T & K_T \\ -K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & -K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_T l \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -K_d l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_d l \frac{\sqrt{2}}{2} & -K_d l \frac{\sqrt{2}}{2} & K_d l \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}, \quad (2.50)$$

ile ifade edilmektedir. Burada $w_{1,2,3,4}$ motor açısal hızlarını, l kol uzunluğunu, u_1 bütün motorların toplam itki girişini, u_2 yuvarlanma kontrol girişini, u_3 yunuslama kontrol girişini ve son olarak u_4 sapma kontrol girişini belirtmektedir.

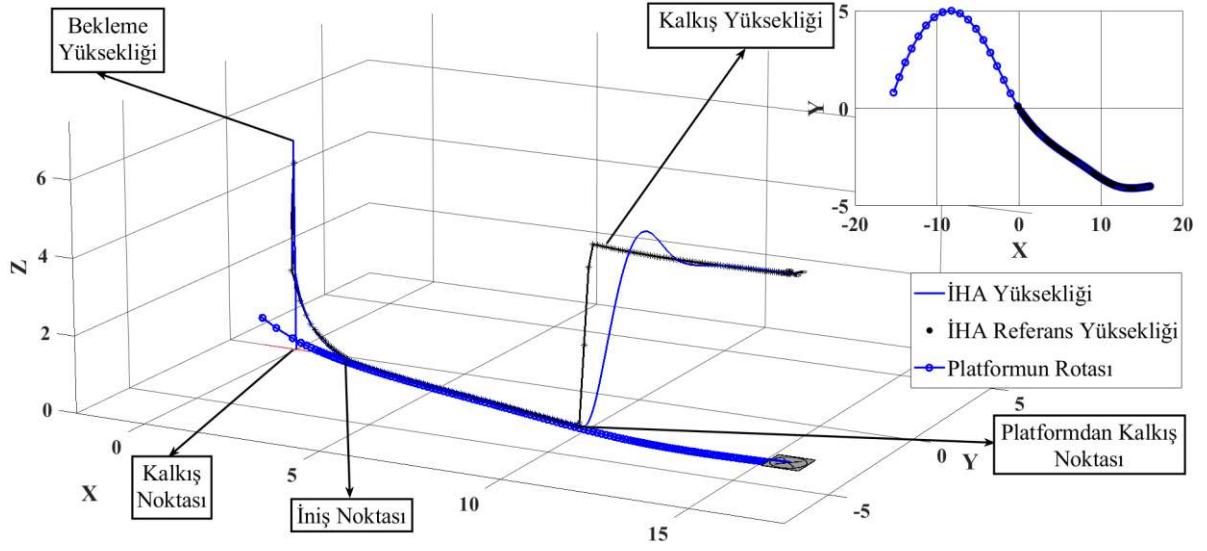
İHA'nın hareketli platformu takibi ve üzerine inişi için belirlenen rotada hareket etmesi için gerekli olan itki, yükselme ve alçalma hareketleri motorların hız değişimleri kontrol edilerek gerçekleştirilmektedir.

2.5 İHA İNİŞ – KALKIŞ PERFORMANS ANALİZİ

Belirlenen bir rotada hareket eden İHA'nın PID denetleyici kullanılarak iniş - kalkış analizi bu kısımda sunulmaktadır. Şekil 2.4'te İHA'nın belirlenen referans yüksekliğine göre yaptığı hareket rotası gösterilmektedir. İHA, belirlenen referans yüksekliği rotasına göre kalkış noktasından bekleme yüksekliğine çıkarak hareketli platformun kalkış yaptığı konuma gelmesini beklemektedir. Hareketli platform kalkış noktasına geldiğinde İHA, önerilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritmasını kullanarak hareketli platform üzerine inişe başlamaktadır. İniş yaptıktan sonra platformdan kalkış noktasından yükselerek kalkış yüksekliğine ulaşmaktadır. İHA, kalkış yüksekliğine ulaştıktan sonra belirlenen uçuş görevi tamamlana kadar görüntü işleme yaklaşımını kullanarak hareketli platformu takip etmektedir. İHA'nın hareketi sırasında belirlenen referans yüksekliği değerlerine bir sapma olmadan uyum sağladığı gözlemlenmektedir. İHA'nın hareketi hareketli platform üzerine inişi ve takibinin x, y eksenlerinde incelendiğinde belirlenen referans yükseklik değerlerine başarılı bir şekilde takip ettiği gözlemlenmektedir.

Çalışmada kullanılan dört rotorlu İHA'nın yapısı, sistem modeli, hareket denklemleri, matematiksel modeli ve İHA uçuş denetimi verilmektedir. İHA'nın uçuş denetimi için gerekli olan PID katsayıları önerilen iniş algoritmasının adımlarına uygun olacak şekilde belirlenmektedir. Çizelge 2.3'te kullanılan dört rotorlu İHA'nın fiziksel özellikleri belirtilmektedir.

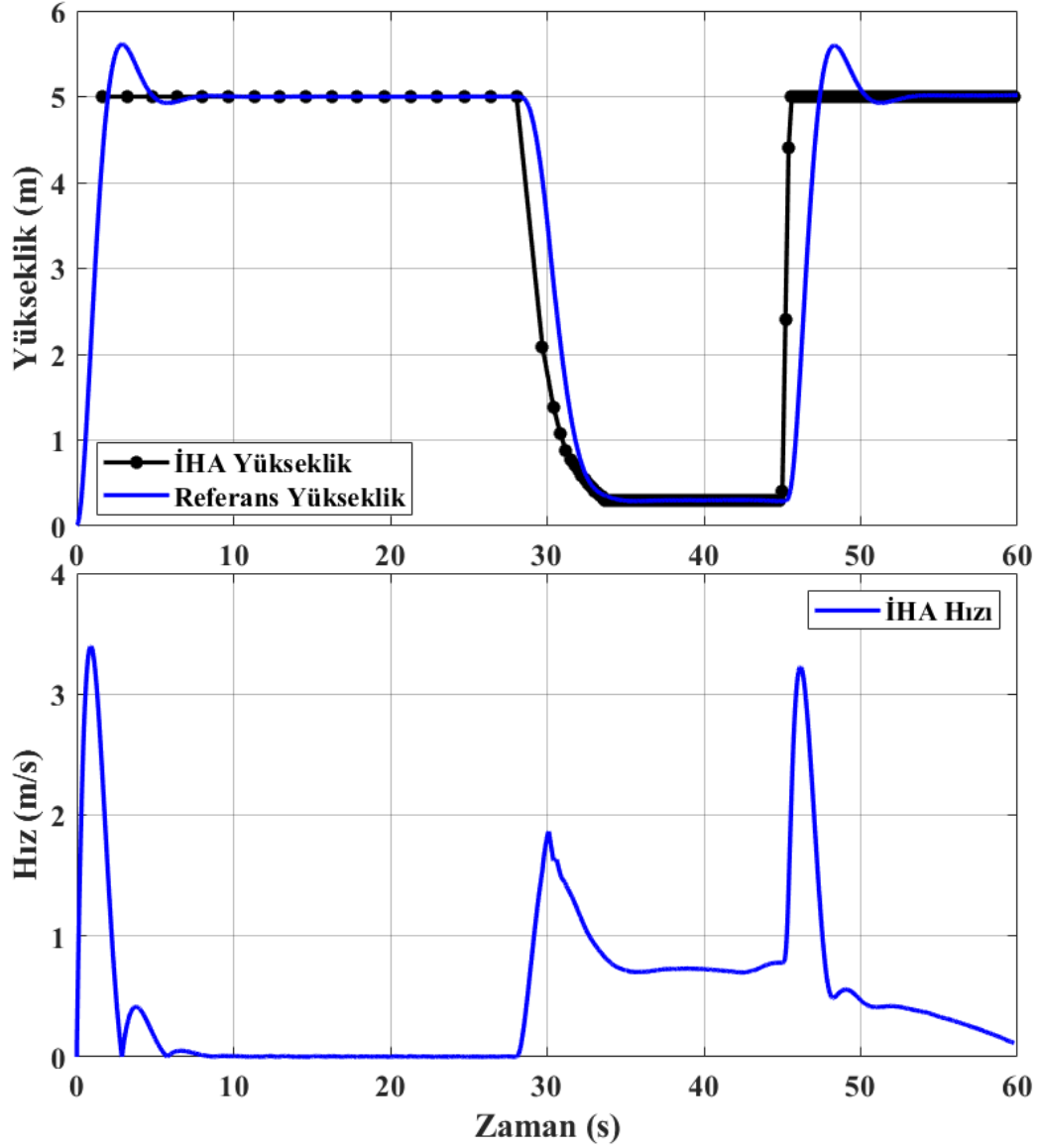
Şekil 2.5'te belirlenen referans yükseklik değerleri ve İHA'nın uçuş yükseklik değerleri verilmektedir. Şekil 2.5'te gösterilen hız/zaman grafiği ise İHA'nın hareketi boyunca oluşan hız değişimini belirtmektedir. İHA'nın görev süresi 60 s'dir. İHA, kalkış noktasından havalanarak bekleme yüksekliğine 7 s'de ulaşmaktadır. 28. saniyeye kadar hareketli platformun gelmesini beklemektedir. Geliştirilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritması kullanılarak önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile İHA, hareketli platformun üzerine 4 s'de iniş yapmaktadır. İHA, 45. saniyede platformdan kalkış noktasından hareketlenerek 7 s'de kalkış yüksekliği olan 5 m yüksekliğe çıkmaktadır ve görev süresi tamamlanana kadar görüntü işleme tekniği kullanılarak hareketli platformu takip etmektedir.



Şekil 2.4 İHA'nın hareketli platform üzerine iniş – kalkış uygulaması.

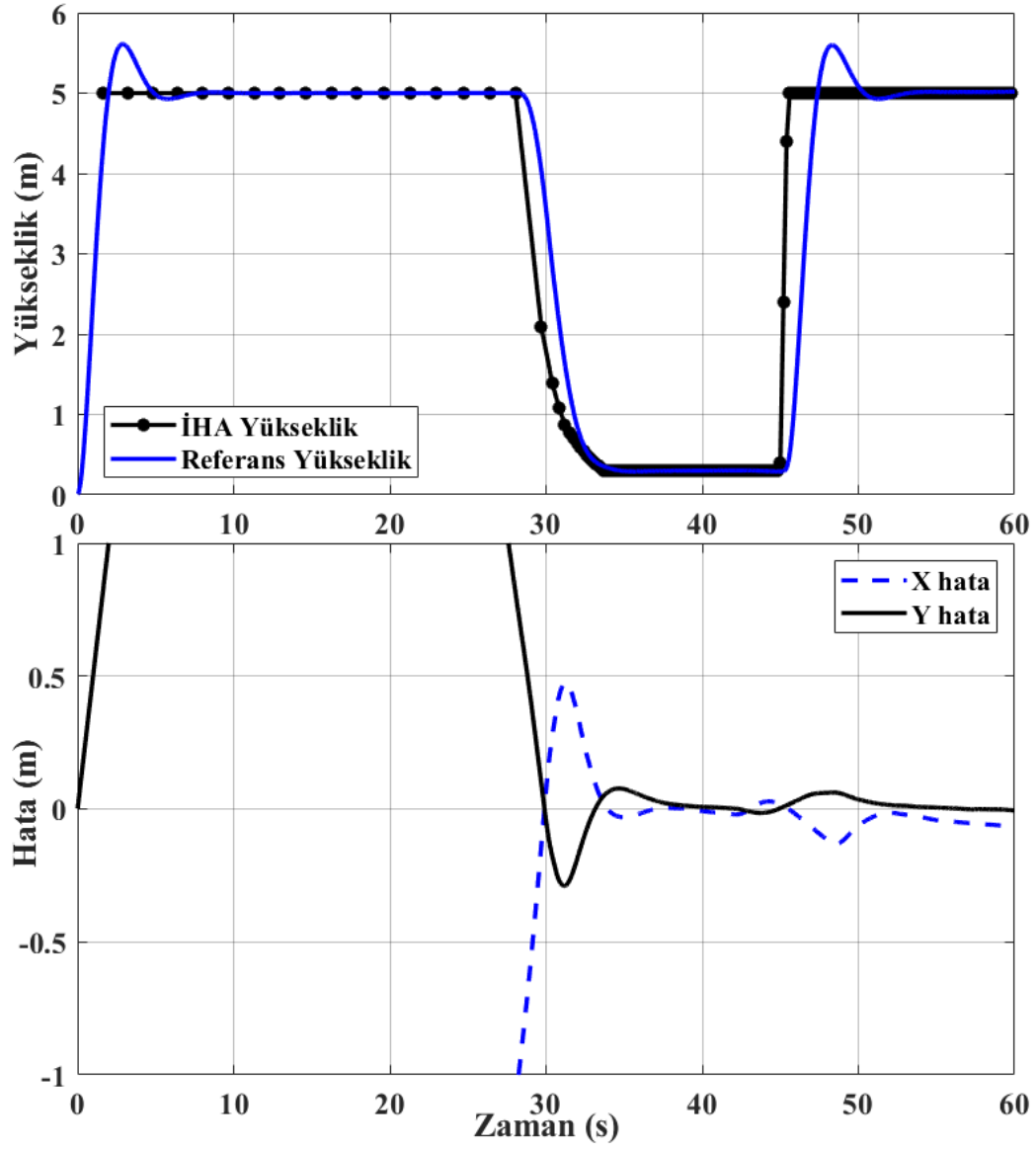
Çizelge 2.3 Dört rotorlu İHA'nın fiziksel özellikleri.

İHA fiziksel özellikleri	
Ağırlık (kg)	3.5
Kol uzunluğu (m)	0.27
Pervane yarıçapı (m)	0.12
Motor Kv değeri	700
Sabit sürüklenme tork katsayısı (kg.m^2)	2.54×10^{-6}
Sürüklenme momenti katsayısı (kg.m^2)	2.46×10^{-5}
Maksimum Yükselme Hızı (m/s)	4
Maksimum Yönelme Hızı (m/s)	8



Şekil 2.5 İHA'nın iniş – kalkış uygulamasında yükseklik ve hız değişimleri.

Şekil 2.6'da İHA'nın uçuş yaptığı süre boyunca belirlenen referans yükseklik değerleri ve İHA'nın yükseklik değişimi sunulmaktadır. İHA, hareketli platformun üzerine inişe başladıktan sonra İHA'nın konumu ve hareketli platformun konumu zamana göre x, y koordinatlarında belirtilmektedir. İHA'nın konumu ve hareketli platformun konumu arasındaki fark miktarı, İHA'nın iniş sırasında hareketli platform üzerinden ne kadar saptığını belirtmektedir. İHA'nın hareketli platform üzerine iniş sırasında bir sapma olmadan inişi gerçekleştirdiği gözlemlenmektedir. Şekil 2.6'da bulunan hata grafiğinde İHA'nın konumu ve hareketli platformun konumu arasındaki sapma yani hata x, y koordinatlarında belirtilmektedir. İHA'nın hareketli platform üzerine iniş – kalkış uygulaması MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak elde edilmektedir. Geliştirilen algorithmada görüntü işleme kısmında MATLAB Image Processing Toolbox kullanılmaktadır.



Şekil 2.6 x, y koordinatlarında İHA'nın konumu ve hareketli platformun konumu arasındaki fark.



BÖLÜM 3

GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI HAREKETLİ PLATFORMA İNİŞ ALGORİTMASI

Bu bölümde görüntü işleme yaklaşımında sıklıkla kullanılan dairesel Hough dönüşümü, geliştirilen hareketli platform üzerine iniş algoritması, İHA ve platformun hareket rotaları ve önerilen uyarlamalı görüntü örneği alma sıklığı yaklaşımı sunulmaktadır.

3.1 DAİRESEL HOUGH DÖNÜŞÜMÜ

Bu tez çalışmasında İHA'nın hareketli bir platform üzerine iniş yapabilmesi için görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritması geliştirilmektedir. Belirlenen bir rota üzerinde hareket eden platformun üzerinde iç içe geçmiş yapıda iki adet daireden oluşan bir imge bulunmaktadır. Geliştirilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritması dairesel Hough dönüşümünü kullanarak imge içerisindeki daireleri algılamakta ve İHA'nın hareketli platform üzerine iniş işlemi gerçekleştirilmektedir.

Görüntü işleme uygulamalarında kullanılan yöntemlerden birisi olan Hough dönüşümü bir doğru veya bir dairenin kullanılan görsel içerisinde tespit edilmesiyle aranan geometrik şeklin bulunmasını hedeflemektedir. Hough dönüşümü üç farklı şekilde kullanılmaktadır. Bunlar dairesel, doğrusal ve genel olarak sıralanmaktadır. Hough dönüşümünün tam anlamıyla doğru bir şekilde çalışabilmesi için elde görüntünün kusursuz bir şekilde en az bozulma ile elde edilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında İHA'nın hareketli platform üzerindeki dairesel imgenin İHA'nın alt kısmında bulunan kamera tarafından algılanması ve inişin başlaması için dairesel Hough dönüşümü kullanılmaktadır. Hough dönüşümü x ve y düzlemindeki bir noktanın parametre uzayına dönüşümü olarak tanımlanmaktadır [22]. Parametre uzayı algılanmak istenilen nesnenin şekline göre oluşturulmaktadır. Hough dönüşümünü daha iyi ifade edebilmek için ilk olarak Hough dönüşümü ile bir çizginin algılanması işlemine değinilmektedir. x ve y eksenlerinde (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) noktalarından geçen düz bir çizgi

$$y = sx + f , \quad (3.1)$$

ile tanımlanmaktadır [23]. Burada s ve f değişkenleri ile tanımlanan kartezyen koordinat sistemindeki doğrusal bir çizginin denklemidir. Hough dönüşümünü tanımlamak için x eksenine dik olan çizgilerin s değeri sonsuz olduğundan dolayı bu gösterimi kullanılmamaktadır. Çünkü bu durum s ve f parametre uzayını sonsuz bir büyüklük değerine ulaştırmaya çalışmaktadır ve bu durum gerçeklikten çok uzaktır. Bu durumun önüne geçmek ve Hough dönüşümünü tanımlamak için normal açısı (ξ) ve çizgi uzunluğu (δ) arasındaki bağlantı

$$\delta = x \cos(\xi) + y \sin(\xi) , \quad (3.2)$$

ile hesaplanmaktadır. Tanımlanan parametre alanı ξ ve δ değişkenleri tarafından oluşturulmaktadır. Burada ξ açısı kullanılan çözünürlüğe bağlı olarak sonlu bir boyuta sahip olmaktadır. δ uzunluk çizgisine olan uzaklık değeri, algılanan görüntünün köşegen uzunluğunun en fazla iki katı kadar bir büyüklüğe sahip olmaktadır. Algılanmak istenilen bir dairenin değerleri doğrudan parametre uzayına aktarılabildiğinden dolayı doğrusal bir çizginin değerleri parametre uzayına aktarılması ile kıyaslanacak olursa dairenin parametre uzayında tanımlanması daha basit ve işlem yükü olarak daha az olmaktadır [24]. Daire denklemi

$$r^2 = (x - k)^2 + (y - n)^2 , \quad (3.3)$$

olarak verilmektedir. Görüldüğü gibi r , k ve n olmak üzere bir dairenin üç adet değişkeni bulunmaktadır. Burada sırasıyla k ve n x - y ekseninde tanımlanan dairenin merkezini, r ise dairenin yarıçapını ifade etmektedir. Dairenin parametrik olarak gösterimi

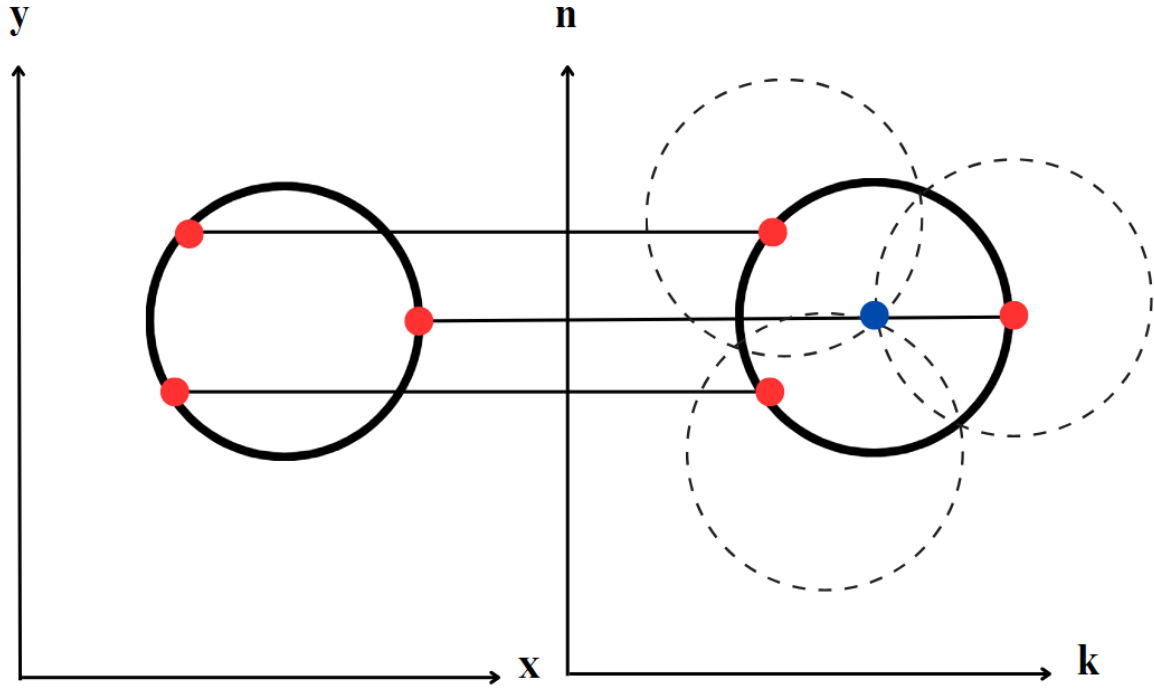
$$x = k + r \cos(\xi) , \quad (3.4)$$

$$y = n + r \sin(\xi) ,$$

olarak belirtilmektedir. Bu durum daire için 3 boyutlu parametre uzayı tanımlanırken çizgi için 2 boyutlu parametre uzayı tanımlanmaktadır. Görüntüden elde edilmek istenilen şekli tanımlamak için gerekli görülen parametre artışı sonucunda parametre uzayının boyutunda artış gözlemlenmektedir. Bu nedenle Hough dönüşümü elde edilen parametre artışı sonucunda daha karmaşık bir hale gelebilmektedir. Görüntü işleme yaklaşımında sıklıkla kullanılan Hough dönüşümü genel olarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu parametre uzayları içinde tanımlanabilen geometrik şekiller için kullanılmaktadır [25]. Tanımlanmak istenilen dairenin yarıçap değeri sabit tutularak dairenin parametrik gösterimi daha basit bir hale getirilebilmektedir. Dairesel Hough dönüşümünün bir görsel üzerinde daireleri algılama aşamaları şu şekilde sıralanabilir. İlk olarak elde edilen görüntü üzerindeki tüm kenarlar bulunmaktadır. Kenarlar algılanırken istenilen bir algılama tekniği kullanılabilir. Görüntü üzerinde algılanan her bir kenar noktasında merkezi istenen yarıçapta bir daire çizilmektedir. Kenar noktalarında çizilen bu daire parametre uzayında çizilmektedir. Şekil 3.1’de çizilen dairenin k değeri x eksenini, n değeri y eksenini ve yarıçap ise z eksenini ifade etmektedir. Çizilen dairenin parametreleri ile parametre uzayında dairelerin kesişme noktalarını tespit etmek için bir akümülatör matrisi oluşturulmaktadır. Çizilen dairenin çevresini oluşturulan koordinatlarda, parametre uzayı boyutu ile aynı boyut değerine sahip olan akümülatör matrisinin değeri arttırılmaktadır.

Algoritma 1’de dairesel Hough dönüşümünün çalışma adımları belirtilmektedir. Akümülatör matrisinin değerinin arttırılması işlemiyle algılanan giriş görüntüsündeki her bir kenar noktasını istenilen yarıçapa sahip daireler çizerek ve akümülatör değerini arttırarak algılanmak istenilen daire olup olmadığı değerlendirilmektedir. Her bir kenar noktası ve istenen her yarıçap değeri kullanıldığında akümülatör matrisi gittikçe istenilen koordinatlardan geçen dairelerin sayısına karşılık gelen daireler içermektedir. Akümülatör matrisi içerisinde oluşan en yüksek sayılara karşılık gelen daireler algılanan görüntüdeki dairelerin merkez noktalarına karşılık gelmektedir [26].

Hareketli platform üzerinde iç içe geçmiş yapıda iki daire ve bir çarpıdan oluşan bir imge bulunmaktadır. İHA’nın hareketli platform üzerine inişini gerçekleştirebilmek için imge içerisinde bulunan daireler görüntü işleme yaklaşımında sıklıkla kullanılan dairesel Hough dönüşümü ile algılanmaktadır. Dairesel Hough dönüşümü hızlı işlem yapması nedeniyle başarılı sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada kenar algılama yerine kontrast farkı kullanılarak görüntü üzerinde işlem yapılmaktadır. Alternatif olarak görüntü işleme tekniğinde kullanılan köşe kestirme yöntemi kullanılarak görüntü üzerinde işlem yapılarak iniş gerçekleştirilebilir.



Şekil 3.1 Sabit yarıçaplı bir dairenin x,y uzayından (solda) parametre uzayına (sağda) dairesel Hough dönüşümü.

Algoritma 1. Dairesel Hough dönüşümünün çalışma algoritması

```

1  Girdi: Kameradan alınan görüntü çerçevesi
2  Çıktı: Görüntü üzerinde algılanan dairelerin tespiti
3  Elde edilen görüntüdeki kenarları bul.
4  for(Her bir kenar pikseli için) do
5       $k$  ve  $n$  değerlerini parametre uzayına aktar
6      Dairesel Hough dönüşümüne başla.
7      for ( minimum yarıçap ile maksimum yarıçap arasındaki daireler için)
8          Her kenar noktası için  $r$  yarıçaplı merkezi kenar noktasında olan bir
            daire çiz.
9              if (görüntü içerisinde  $x$  ve  $y$  noktaları varsa )
10                 Akümülatörde dairenin çevresinin geçtiği noktalarda tüm
                    koordinat değerlerini arttır.
11                 Akümülatörde bir veya daha fazla maksimum değer bul.
12             end if
13         end for
14 end for

```

3.2 GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI HAREKETLİ PLATFORMA İNİŞ ALGORİTMASI AKIŞ DİYAGRAMI

Bu tez çalışmasında İHA'nın hareketli platform üzerine iniş yapabilmesi için görüntü işleme tabanlı bir iniş algoritması geliştirilmektedir. Belirlenen rotada hareket eden platformun üzerinde bulunan iç içe geçmiş yapıda iki daireden oluşan imge dairesel Hough dönüşümü ile algılanarak hareketli platform üzerine iniş yapılmaktadır. Şekil 3.2'de hareketli platform üzerine iniş algoritmasının akış diyagramı verilmektedir. İniş algoritması hareketli platformun durumuna göre uyarlamalı olarak değiştirilen görüntü örneği alma hızına bağlı dört farklı moddan oluşmaktadır. Şekil 3.3'te hareketli platform üzerinde bulunan imge yer almaktadır. İmge, iç içe geçmiş yapıda iki daireden oluşmaktadır. Küçük dairenin $r1$ yarıçap değeri 0.10 m ve büyük dairenin $r2$ yarıçap değeri ise 0.45 m'dir. Kameranin görüş alanı $8 \times 6 \text{ m}^2$ ve hareketli platformun boyutu $1 \times 1 \text{ m}^2$ 'dir. Bu nedenle hareketli platformun tespit ve takip edilebilmesi için İHA kalkış noktasından uygun yükseklik değeri olan 5 m bekleme yüksekliğine çıkmaktadır. Çalışmada kullanılan İHA'nın yere temas eden bacak uzunluğu 0.30 m olmasından dolayı temas modu olan dördüncü modda belirlenen temas yüksekliği 0.30 m olarak seçilmektedir.

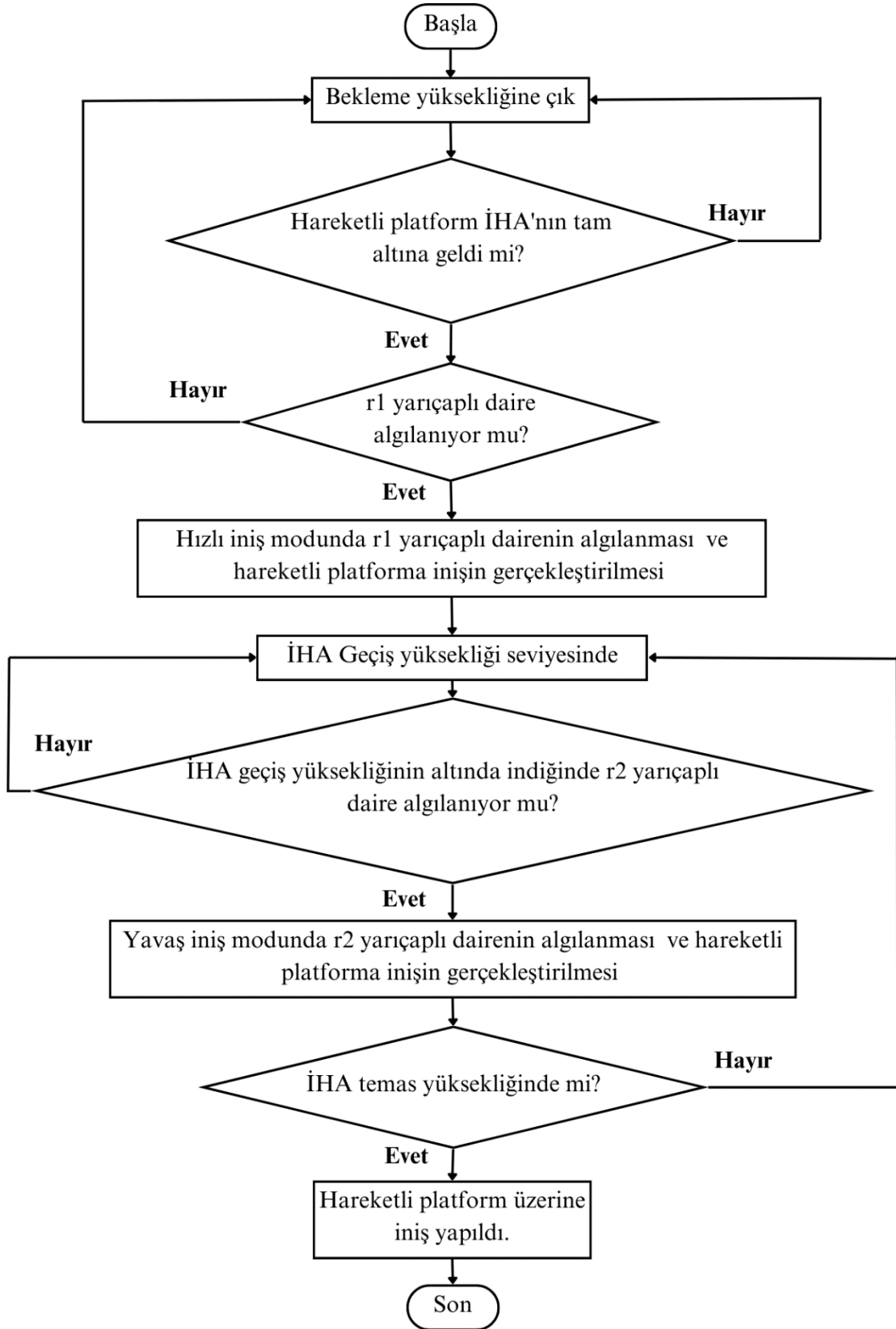
Bekleme modu olan birinci modda İHA yerden 5 m yüksekliğe çıkmakta ve hareketli platformun İHA'nın tam alt kısmında bulunan kameranın görüş açısına girmesini beklemektedir. Hareketli platform İHA'nın tam olarak alt kısmına geldiğinde birinci moddan ikinci moda geçilmektedir. Eğer ikinci moda geçildiğinde hareketli platform kameranın görüş açısı içerisinde değilse o zaman İHA birinci moda geri dönerek hareketli platform üzerindeki imgeyi algılamaya çalışmaktadır. Hızlı iniş modu olan ikinci modda 5 m ile 1 m yerden yükseklik aralığında İHA hareketli platform üzerinde bulunan imgenin içerisindeki 0.45 m ($r1$) yarıçaplı büyük daireyi dairesel Hough dönüşümünü kullanarak algılamakta ve hareketli platform üzerine doğru inişe geçmektedir. İHA'nın yerden yüksekliği 1 m geçiş yüksekliği değerine geldiğinde ikinci moddan üçüncü moda geçilmektedir. Yavaş iniş modu olan üçüncü moda geçildiğinde hareketli platform İHA'nın alt kısmında bulunan kameranın görüş açısının içerisinde değilse İHA tekrar ikinci moda dönerek hareketli platformu algılamaya çalışmakta ve iniş işleminin devam etmesini sağlamaktadır. Üçüncü modda İHA hareketli platform üzerinde bulunan imgenin içerisindeki 0.10 m ($r2$) yarıçaplı küçük daireyi dairesel Hough dönüşümünü kullanarak algılamakta ve hareketli platform üzerine doğru inişine devam etmektedir. Eğer hareketli platform İHA'nın alt kısmında bulunan kameranın görüş açısının

içerisinde değilse İHA tekrar ikinci moda geçerek hareketli platform üzerindeki imgeyi algılamaya çalışmaktadır. İHA'nın yerden yüksekliği temas yüksekliği değeri olan 0.30 m'ye indiğinde üçüncü moddan dördüncü moda geçilmektedir. Temas modu olan dördüncü modda hareketli platform üzerine iniş işlemi tamamlanmaktadır.

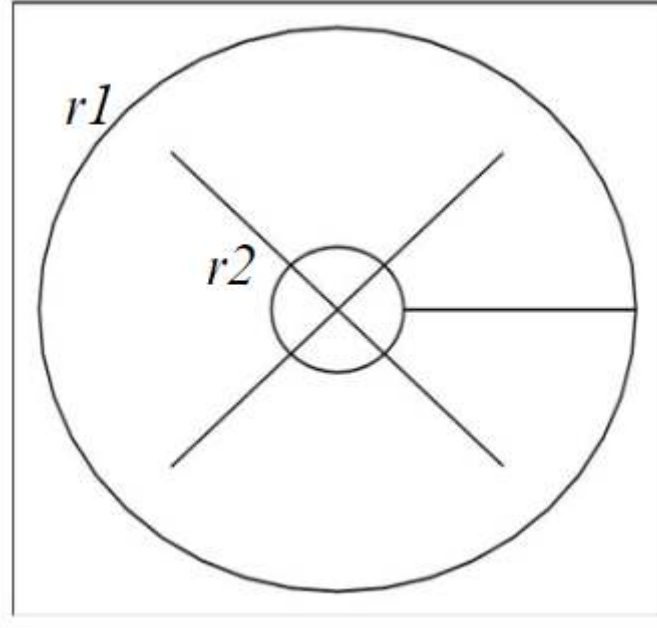
3.3 GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI HAREKETLİ PLATFORMA İNİŞ ALGORİTMASI İLE ALGILANAN İMGE

Görüntü işleme tabanlı iniş algoritmasının algıladığı hareketli platformun üzerinde bulunan imge, içerisinde 0.10 m (r_2) yarıçapında ve 0.45 m (r_1) yarıçapında iç içe geçmiş daireler bulunan ve tam ortasında bir çarpı olan bir işarettir. Şekil 3.3'te hareketli platform üzerinde bulunan imge gösterilmektedir. Şekil 3.4'te İHA bekleme yüksekliğindeyken kameranin görüş alanı sunulmaktadır. İHA'nın tam alt kısmında bulunan kameranin görüş alanı 8 x 6 m² ve görüş açısı ise 80°'dir. Şekil 3.5'te hareketli platform kameranin görüş alanına girdiği anda ki kameranin görüş alanı gösterilmektedir. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi hareketli platform İHA'nın tam alt kısmına geldiğinde görüntü işleme tabanlı iniş algoritması içi içe geçmiş yapıdaki dairesel imgeyi algılamakta ve hareketli platform üzerine inişe başlamaktadır. Şekil 3.6'da 4 farklı iniş modunda hareketli platform üzerinde bulunan imgenin görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritması tarafından algılanarak İHA'nın hareketli platform üzerine inişi ve imgenin dairesel Hough dönüşümü ile algılanması gösterilmektedir. Şekil 3.6'da gösterildiği gibi bekleme modu olan birinci modda imgenin içerisinde bulunan 0.45 m büyük yarıçaplı dairenin algılanması Bekleme Modu (1) başlığı altındaki görsel ile sunulmaktadır. İHA bu aşamada bekleme yüksekliği olan 5 m yükseklikte hareketli platformun gelmesini beklemektedir. Büyük yarıçaplı dairenin dairesel Hough dönüşümü kullanılarak algılanmasıyla birlikte İHA inişe başlamaktadır.

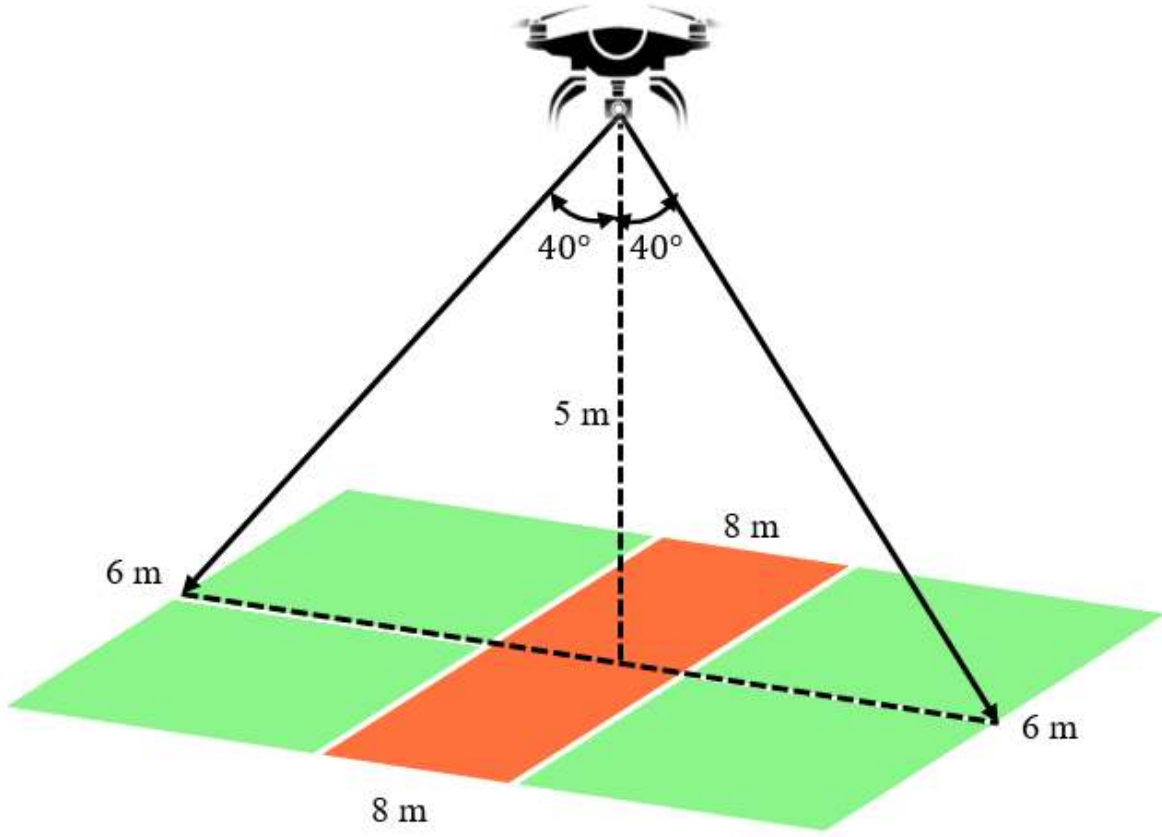
İHA'nın yerden yüksekliği 5 - 1 m aralığında hızlı iniş modu olan mod iki aşamasına geçilmektedir ve büyük yarıçaplı daire algılanarak iniş devam etmektedir. Şekil 3.6'da ikinci mod, Hızlı İniş Modu (2) başlığı altındaki görsel ile sunulmaktadır. İHA'nın yerden yüksekliği geçiş yüksekliği değeri olan 1 m'nin altına indiğinde ise 0.45 m yarıçaplı büyük daire İHA'nın alt kısmında bulunan kameranin görüş alanından çıkmaktadır ve yavaş iniş modu olan üçüncü moda geçilmektedir. Şekil 3.6'da üçüncü modda, Yavaş İniş Modu (3) başlığı altındaki görsel ile yarıçapı 0.10 m olan küçük yarıçaplı dairenin algılanması gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritma akış şeması.



Şekil 3.3 Hareketli platform üzerinde bulunan imge.



Şekil 3.4 İHA'nın alt kısmında bulunan kameranın görüş alanı.

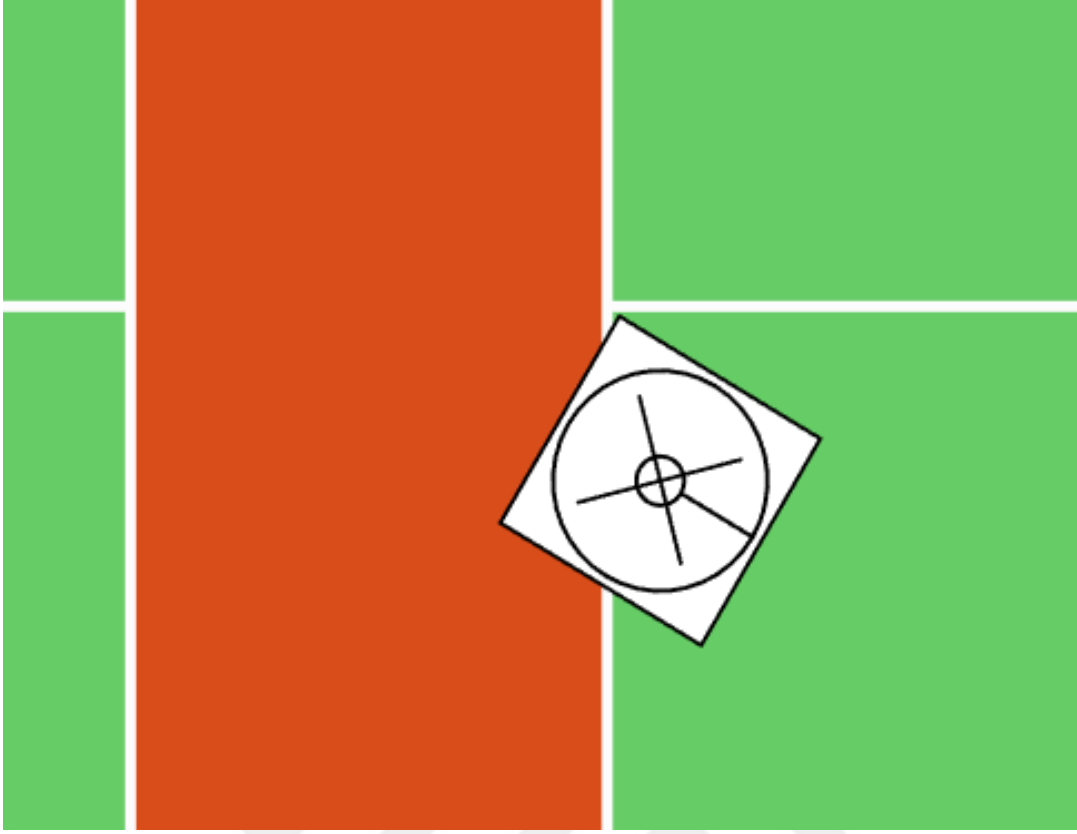
Dairesel Hough dönüşümü ile 0.10 m yarıçaplı küçük daire algılanarak İHA hareketli platform üzerine iniş devam etmektedir. İHA'nın yerden yüksekliği temas yüksekliği olan 0.30 m seviyesine geldiğinde dördüncü moda geçilmektedir. Temas modu olan dördüncü modda İHA hareketli platform üzerine inmiştir. Şekil 3.6'da dördüncü mod, Temas Modu (4) başlığı altındaki görsel ile sunulmaktadır.

3.4 HAREKETLİ PLATFORM VE İHA'NIN BELİRLENEN HAREKET ROTALARI

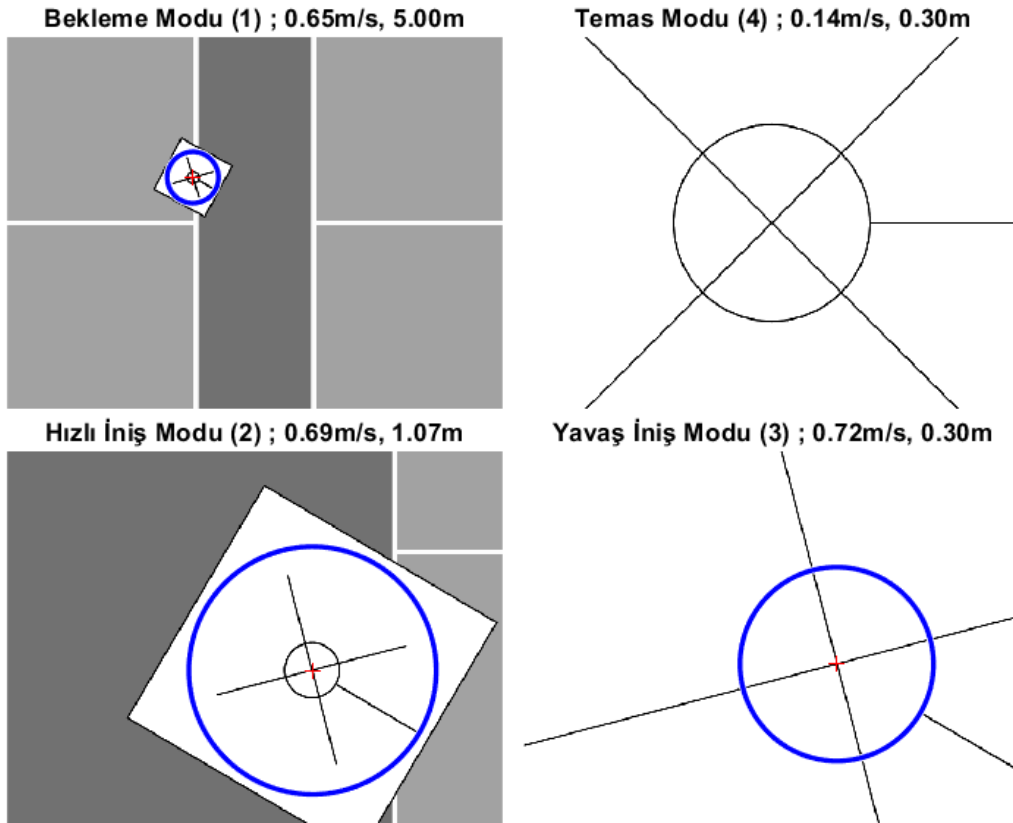
Geliştirilen görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritması belirli bir rotada hareket halinde olan bir platform üzerine İHA'nın otonom olarak iniş işlemini gerçekleştirmektedir. İHA'nın ve hareketli platformun bulunduğu iniş alanı dört basketbol sahası büyüklüğünde bir alandan oluşmaktadır. Şekil 3.7'de hareketli platformun oluşturulan rotası ve İHA'nın hareket rotası gösterilmektedir. Şekil 3.7'de hareketli platformun harekete başlama noktası, İHA'nın kalkış noktası ve İHA'nın platform üzerine iniş yaptığı nokta son olarak ise hareketin bittiği nokta belirtilmektedir. İHA belirtilen kalkış noktasından bekleme yüksekliğine çıkarak hareketli platformun tam alt konumuna gelmesini beklemektedir. Şekil 3.7'de belirtildiği gibi platform harekete başlama noktasından hızlanmaktadır. Hareketli platformun takip ettiği rota ve İHA'nın hareket ettiği rota iniş alanı üzerinde 2 boyutlu olarak sunulmaktadır. Hareketli platformun İHA'nın tam alt konumuna gelmesiyle birlikte iniş başladığından bu andan itibaren hareketli platformun ve İHA'nın hareket rotasının üst üste geldiği gözlemlenmektedir.

Hareketli platform belirlenen rotada hareket ederek İHA'nın kalkış yaptığı noktaya yani İHA'nın tam alt konumuna geldiğinde geliştirilen görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritması kullanılarak hareketli platform üzerine iniş başlamaktadır.

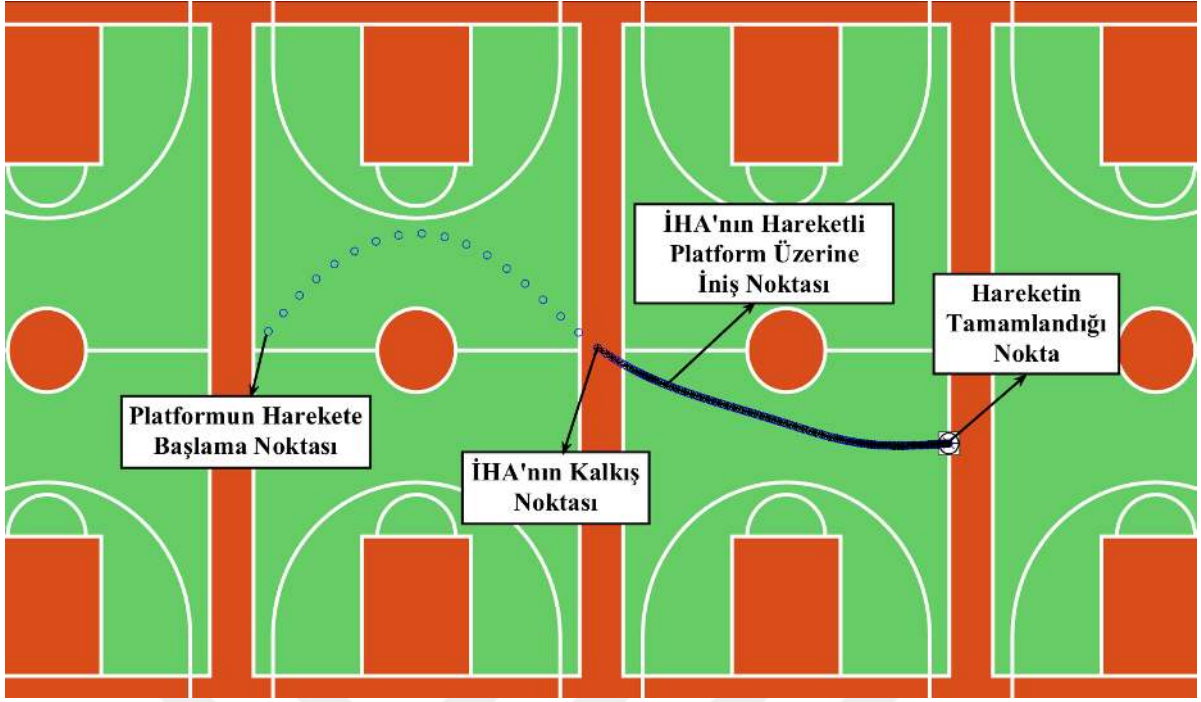
Şekil 3.8 (a)'da hareketli platformun belirlenen rotada hareketi, İHA'nın kalkış noktası, İHA'nın hareketli platformu takibi ve platform üzerine inişi 3 boyutlu olarak gösterilmektedir. x ve y ekseninde belirtilen eğri ile hareketli platformun belirlenen rotası gösterilmektedir. x, y, z eksenlerinde belirtilen eğri ile İHA'nın kalkış noktası ve hareketli platformu takip ettiği rota gösterilmektedir. Şekil 3.8 (b)'de bulunan küçük şekilde ise x ve y ekseninde hareketli platformun ve İHA'nın hareketinin iki boyutlu görüntüsü yer almaktadır.



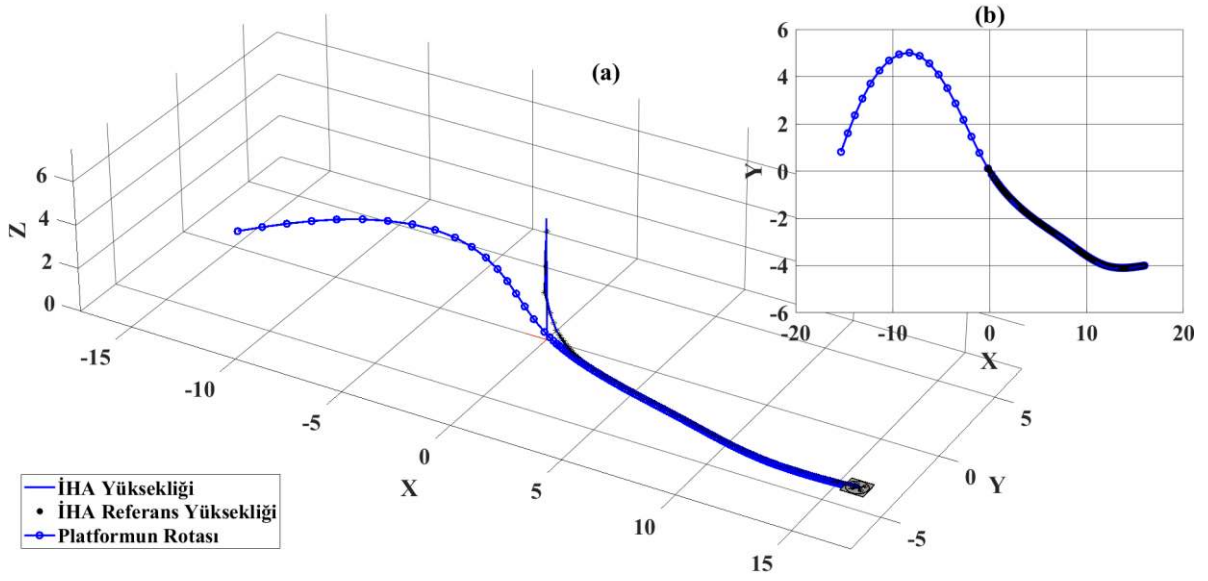
Şekil 3.5 İHA'nın alt kısmında bulunan kameranın görüş alanına imge girdiği an.



Şekil 3.6 4 farklı iniş modunda imgenin algılanması.



Şekil 3.7 İHA'nın belirtilen rotada hareket eden platformun üzerine inişi.



Şekil 3.8 İHA'nın belirtilen rotada hareket eden platforma inişinin (a) 3 boyutlu gösterimi, (b) iki boyutlu gösterimi.

3.5 ÖNERİLEN UYARLAMALI GÖRÜNTÜ ALMA SIKLIĞI TESPİTİ

İHA'nın alt kısmında bulunan kameradan 480x640 piksel boyutlarında görüntü alınmaktadır. Görüntü alma sıklığı iniş işlemi doğrudan etkilemektedir. Literatürdeki geliştirilen algoritmalarından farklı olarak İHA'nın hareketli platform üzerine inişi için önerilen görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritmasında oluşturulan dört farklı iniş modunda farklı sıklık değerlerinde kameradan görüntü alınmaktadır. İHA bekleme yüksekliğindeyken alt kısmında yer alan kameranın görüş alanı $8 \times 6 \text{ m}^2$ ve görüş açısı ise 80° 'dir.

Sabit aralıklarla görüntü alındığında hareketli platformun hızı görüntü alma hızından daha fazla ise hareketli platform İHA'nın altında bulunan kameranın görüş alanından çıkabilmektedir ve iniş gerçekleştirilememektedir. Bu sıkıntının çözümü için görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritmasında sunulan iniş modlarında görüntü alma sıklığı uyarlamalı olarak gerçekleştirilmektedir.

Görüntü alma sıklığı sabit tutulduğunda belirlenen iniş modlarında daha fazla gereksiz işlem yapıldığından dolayı İHA'nın veri işleme süresi uzamaktadır bu durum gereksiz daha fazla işlem yapılmasına neden olmaktadır. Görüntü alma sıklığı, uyarlamalı olarak farklı sıklıklar altında gerçekleştirildiğinde İHA'nın veri işleme süresinin kısaldığı yapılan benzetim çalışmasında gözlemlenmektedir. İHA'nın yüksekliğine, kamera açısına ve hareketli platformun hız tahminine bağlı görüntü alma sıklığı

$$T_I(t) = \frac{h \times \tan(\theta_I)}{\frac{[X_{ps}(t) - X_{ps}(t - \Delta_I)]}{T_I(t - \Delta_I)}} \quad (3.5)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada h İHA yüksekliğini, θ_I kamera açısını, $X_{ps}(t)$ hareketli platformun konumunu, Δ_I bir önceki görüntü örneği alma zamanını, t zamanı, $X_{ps}(t - \Delta_I)$ hareketli platformun bir önceki konumunu ve $T_I(t - \Delta_I)$ bir önceki görüntü alma sıklığını ifade etmektedir. Bu durumda geliştirilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritmasında belirlenen iniş modlarında önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımı ile hareketli platform üzerine doğru yaklaşıldığında daha hızlı görüntü alınarak uygun iniş koşullarının oluşturulabileceği anlaşılmaktadır.

BÖLÜM 4

BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde İHA'nın belirlenen bir rotada hareket eden bir platform üzerine otonom olarak iniş - kalkış yapmasını gerçekleştirebilmek için önerilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritması, görüntü alma sıklığının sabit olması durumu ve önerilen uyarlamalı görüntü örneği alma sıklığı yöntemi son olarak ise önerilen iniş algoritmasının gürültü yoğunluğu altında incelenmesi sunulmaktadır. Hareketli platform üzerinde bulunan iç içe geçmiş yapıdaki iki daireden oluşan imgenin görüntü işleme tekniği ile algılanarak platform üzerine iniş yapılması için görüntü işleme tabanlı bir algoritma geliştirilmektedir. Hareketli platforma iniş olarak adlandırılan algoritma dairesel Hough dönüşümü kullanarak platform üzerinde bulunan imgeyi algılamaktadır. Böylece İHA'nın hareketli bir platform üzerine inişi gerçekleştirilmektedir. Benzetim çalışması MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak elde edilmektedir. Geliştirilen algoritmada görüntü işleme kısmında MATLAB Image Processing Toolbox kullanılmaktadır.

Görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritması dört farklı iniş modundan oluşmaktadır. Bekleme modu olarak belirlenen ilk modda İHA hareketli platformun kameranin görüş alanına girmesi için uygun bekleme yüksekliği olan 5 m yüksekliğe çıkararak hareketli platformu beklemektedir. Hızlı iniş modu olan ikinci modda ise belirlenen bir rotada hareket eden platform İHA'nın kalkış yaptığı konuma geldiğinde hareketli platform üzerindeki imgenin içerisindeki büyük yarıçaplı daire algılanmaktadır. Böylece platform üzerine iniş süreci başlamaktadır. İHA, geçiş yüksekliği olan 1 m'nin altına indiğinde büyük yarıçaplı daire kameranin görüş alanından çıkmasıyla birlikte üçüncü moda geçilmektedir. Yavaş iniş modu olan üçüncü modda hareketli platform üzerinde bulunan imgenin içerisindeki küçük yarıçaplı daire, dairesel Hough dönüşümü ile algılanarak platform üzerine iniş devam etmektedir. İHA, temas yüksekliği olan 0.30 m seviyesine indiğinde dördüncü moda geçilmektedir. Dördüncü modda İHA yüksekliği 0.30 m seviyesindedir ve platform üzerine iniş başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Kullanılan İHA'nın bacak boyunun 0.30 m olmasından dolayı temas yüksekliği 0.30 m seçilmektedir. İstenilmesi durumunda hareketli platform üzerinden de İHA belirlenen yeni bir görev için kalkış yapabilmektedir.

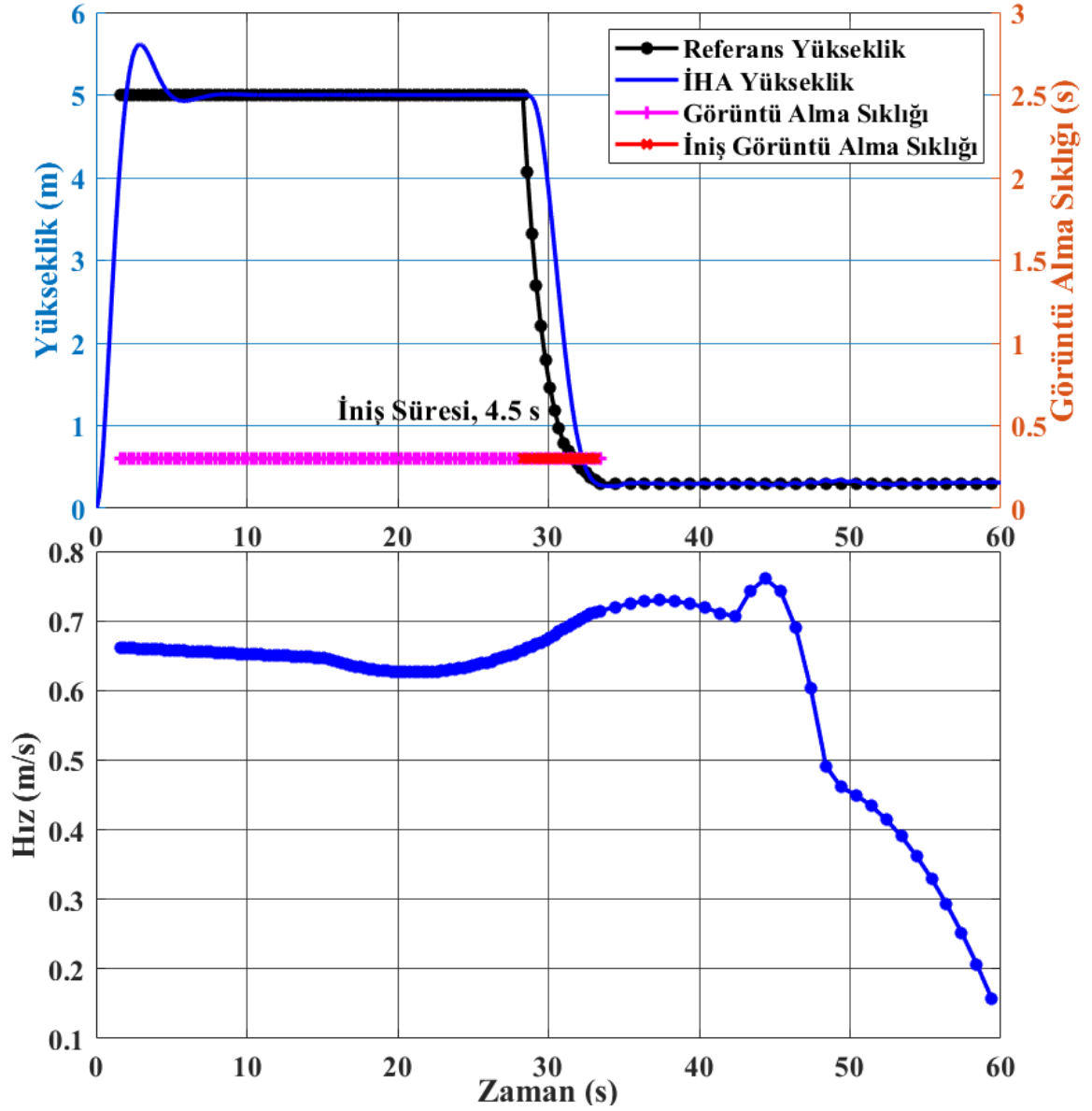
Görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritmasında belirtilen iniş modlarında geliştirilen görüntü alma sıklığı yöntemi ile her bir iniş modunda farklı sıklılarda görüntü alınmaktadır. Görüntü alma sıklığının sabit olması ve görüntü alma sıklığının uyarlamalı olması durumu incelenerek işlemci yükü üzerindeki etkileri kıyaslanmaktadır. Ek olarak geliştirilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritması tuz-biber gürültüsünün farklı yoğunluk değerleri altında incelenerek performans analizi gerçekleştirilmektedir.

4.1 GÖRÜNTÜ ALMA SIKLIĞI ANALİZİ

Görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritmasının iniş modlarında görüntü alma sıklığı önerilen yaklaşım ile uyarlamalı olarak değiştirilmektedir. Görüntü alma sıklığının farklı iniş modlarında sabit ve uyarlamalı olması durumu İHA'nın işlemci yükü üzerindeki etkisi yapılan çalışmada incelenmektedir. İHA'nın alt kısmında bulunan kameranin görüş açısı 80° 'dir. Kameradan 480×640 piksel boyutlarında görüntü alınmaktadır. İHA'nın kameradan görüntü alma sıklığı 0.30 s sabit ve uyarlamalı görüntü alma sıklığı altında incelenmektedir.

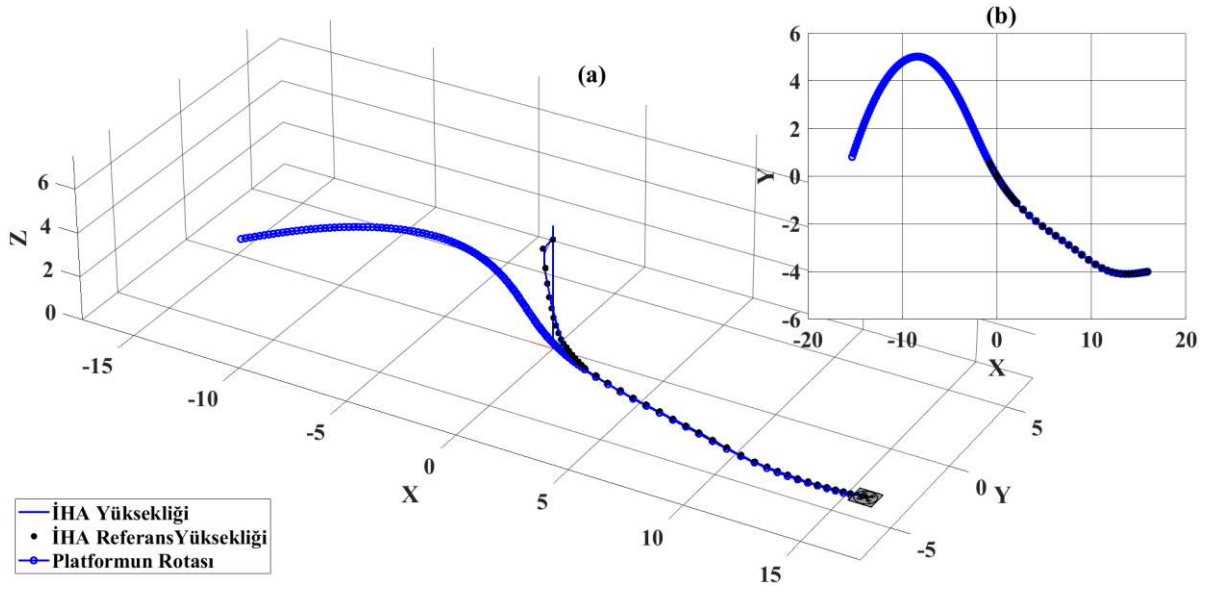
Şekil 4.1'de gürültüsüz koşullar altında İHA'nın hareketli platform üzerine inişi için geliştirilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritmasının zaman düzleminde performansı sunulmaktadır. Kameradan 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı altında İHA'nın toplam veri işleme süresi boyunca görüntü alma sıklığı, iniş sırasında görüntü alma sıklığı, İHA'nın veri işleme süresi boyunca ölçülen yüksekliği ve İHA'nın belirlenen referans yükseklik değerleri belirtilmektedir. 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı altında İHA'nın hareketli platformu algılayıp üzerine iniş aşamasında geçen süre 4.5 s'dir. Belirtilen iniş modlarında 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı altında İHA'nın veri işleme süresi 22.54 s'dir. Şekil 4.1'de verilen hız/zaman grafiği ise 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı altında hareketli platformun hız değişimini göstermektedir. İHA'nın hareketli platforma inmesinden itibaren görüntü alınmamaktadır.

Şekil 4.2 (a)'da 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı altında hareketli platformun ve İHA'nın rotasının 3 boyutlu gösterimi, (b)'de ise 2 boyutlu gösterimi verilmektedir. x ve y ekseninde belirtilen eğri ile hareketli platformun belirlenen rotası gösterilmektedir. x, y, z eksenlerinde belirtilen eğri ile İHA'nın kalkış noktası ve hareketli platformu takip ettiği rota gösterilmektedir. Şekil 4.2 (a)'da platform rotası üzerindeki noktaların yoğunluğu sabit sıklıkla görüntü alınmasından dolayı eğri boyunca aynı olduğu gözlemlenmektedir.

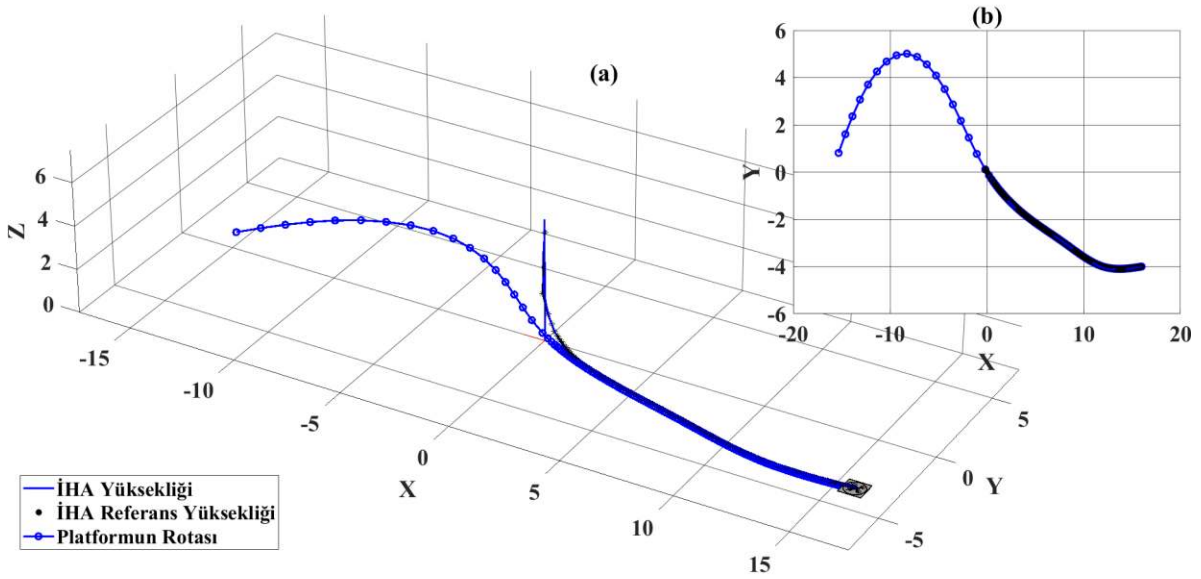


Şekil 4.1 Sabit görüntü alma sıklığı ile İHA'nın hareketli platform üzerine iniş süresi ve hareketli platformun hız değişimi eğrisi.

Şekil 4.3 (a)'da uyarlamalı görüntü alma sıklığı altında hareketli platformun ve İHA'nın rotasının 3 boyutlu gösterimi, (b)'de ise 2 boyutlu gösterimi verilmektedir. İHA iniş görevini tam olarak yerine getirmektedir. Şekil 4.3 (a)'da platform rotası üzerindeki noktaların yoğunluğu uyarlamalı sıklıkla görüntü alınmasından dolayı eğri sadece iniş kısmında yoğun olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.4'te gürültüsüz koşullar altında İHA'nın hareketli platform üzerine iniş işlemi boyunca kameradan uyarlamalı görüntü alma sıklığı altında hareketli platform üzerine iniş sırasında İHA'nın hareketi boyunca yükseklik değişimi, belirlenen referans yükseklik değeri, hareketli platform üzerine iniş kısmında geçen süre gösterilmektedir.



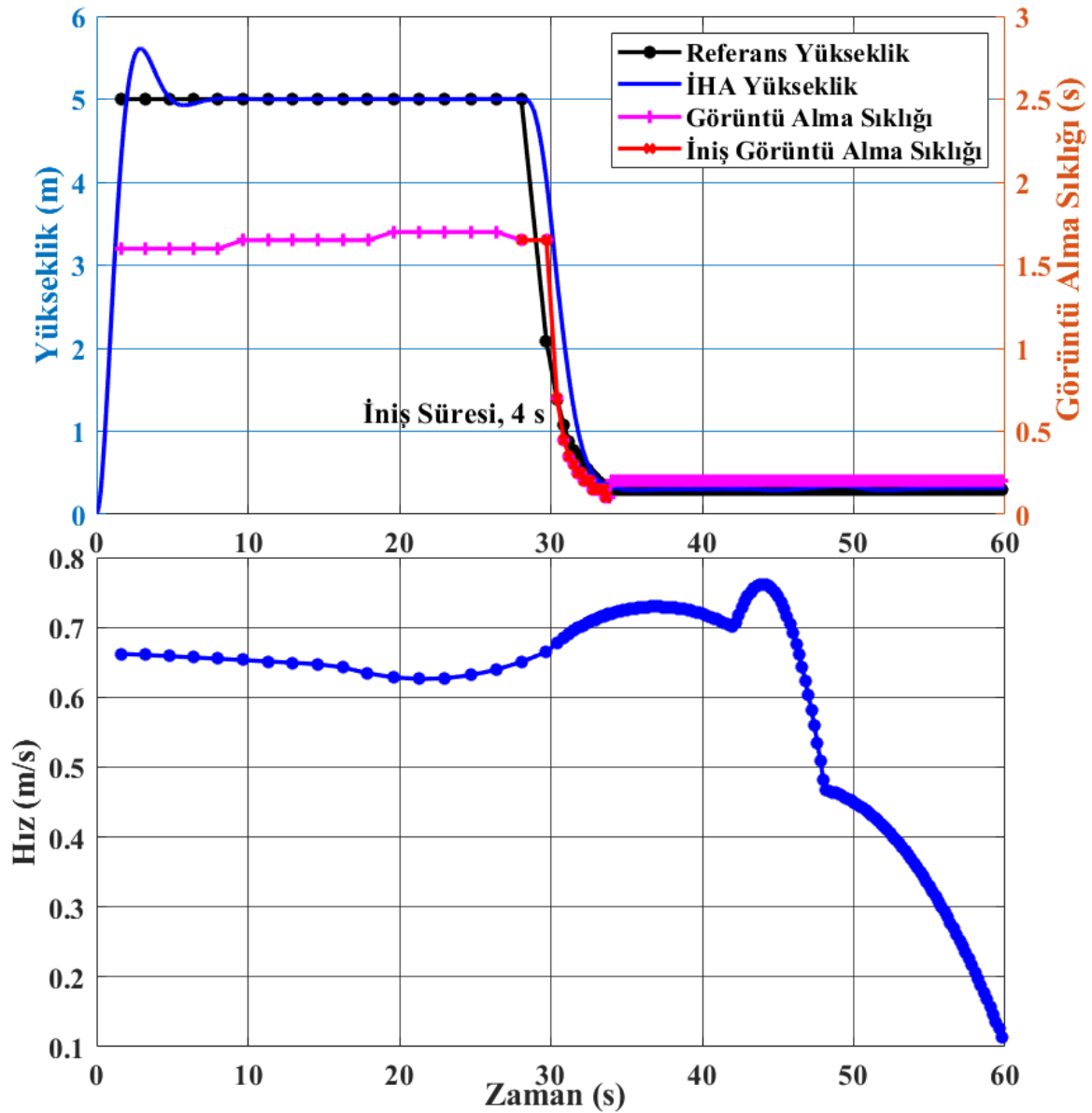
Şekil 4.2 0.3 s sabit görüntü alma sıklığında İHA'nın belirtilen rotada hareket eden platforma inişinin (a) 3 boyutlu gösterimi, (b) iki boyutlu gösterimi.



Şekil 4.3 Uyarlamalı görüntü alma sıklığında İHA'nın belirtilen rotada hareket eden platforma inişinin (a) 3 boyutlu gösterimi, (b) iki boyutlu gösterimi.

Uyarlamalı görüntü alma sıklığı altında İHA'nın hareketli platformu algılayıp üzerine iniş aşamasında geçen süre 4 s'dir. Belirtilen iniş modlarında geliştirilen görüntü örneği alma sıklığının uyarlamalı olarak değiştirilmesi yöntemi ile İHA'nın veri işleme süresi 12.50 s'dir. İHA'nın hareketli platforma inmesinden itibaren görüntü örneği alınmamaktadır. İHA iniş görevini tam olarak yerine getirmektedir.

Şekil 4.4'te verilen hız/zaman grafiği ise uyarlamalı görüntü alma sıklığı altında hareketli platformun hız değişimini göstermektedir. Gürültüsüz çalışma koşulları altında önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı yöntemi, 0.3 s sabit görüntü alma sıklığına göre İHA'nın veri işleme süresini 10.5 s kadar azaltmaktadır. Gürültüsüz koşullar altında sabit sıklık ve uyarlamalı görüntü alma sıklığında elde edilen veri işleme süresi değerleri 5 deneme sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak elde edilmektedir. Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gözlemlenen veri işleme süresindeki azalma İHA'nın hareketli platform üzerine inişi boyunca geçen sürede işlemcinin yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 4.4 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile İHA'nın hareketli platform üzerine iniş süresi ve hareketli platformun hız değişimi eğrisi.

4.2 GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI İNİŞ ALGORİTMASININ TUZ-BİBER GÜRÜLTÜ ETKİSİ ALTINDA İNCELENMESİ

Bu bölümde belirlenen rotada hareket eden platform üzerine İHA'nın otonom olarak iniş yapabilmesini sağlamak için geliştirilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritmasının başarısı tuz-biber gürültüsünün farklı yoğunluk değerleri altında incelenmektedir.

İHA'nın hareketli platform üzerine inişi dış bozucuların olmadığı koşullarda başarılı bir sonuç vermektedir. İHA'nın hareketli platform üzerine inişi için geliştirilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritmasında belirlenen iniş modlarında 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı ve uyarlamalı görüntü alma sıklığı farklı tuz-biber gürültüsü yoğunlukları altında incelenmektedir. Şekil 4.5'te bekleme modu olan birinci mod, hızlı iniş modu olan ikinci mod, yavaş iniş modu olan üçüncü mod ve dördüncü mod görseller ile belirtilmektedir.

Şekil 4.5, 4.6, 4.7'de geliştirilen görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritmasında iniş modlarında farklı yükseklik seviyelerinde sırasıyla gürültüsüz, 0.001 ve 0.005 tuz-biber gürültüsü yoğunluk değerleri altında 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı ile elde edilen görüntüler sunulmaktadır. Gürültüsüz, 0.001 ve 0.005 gürültü yoğunluk değerleri altında İHA'nın veri işleme süresi sırasıyla 22.54 s, 24.60 s ve 26.18 s olarak gözlemlenmektedir. Gürültüsüz, 0.001 ve 0.005 gürültü yoğunluğu altında 0.3 s sabit görüntü alma sıklığında İHA'nın hareketli platformu algılaması ile birlikte inişe başlaması ve hareketli platform üzerine inme işlemi boyunca geçen süre 4.5 s olarak belirtilmektedir. Dairesel Hough dönüşümü gürültüsüz, 0.001 ve 0.005 yoğunluk değerlerinde hareketli platform üzerinde bulunan imge içerisindeki daireleri başarılı bir şekilde algılamakta ve platform üzerine iniş gerçekleştirilmektedir.

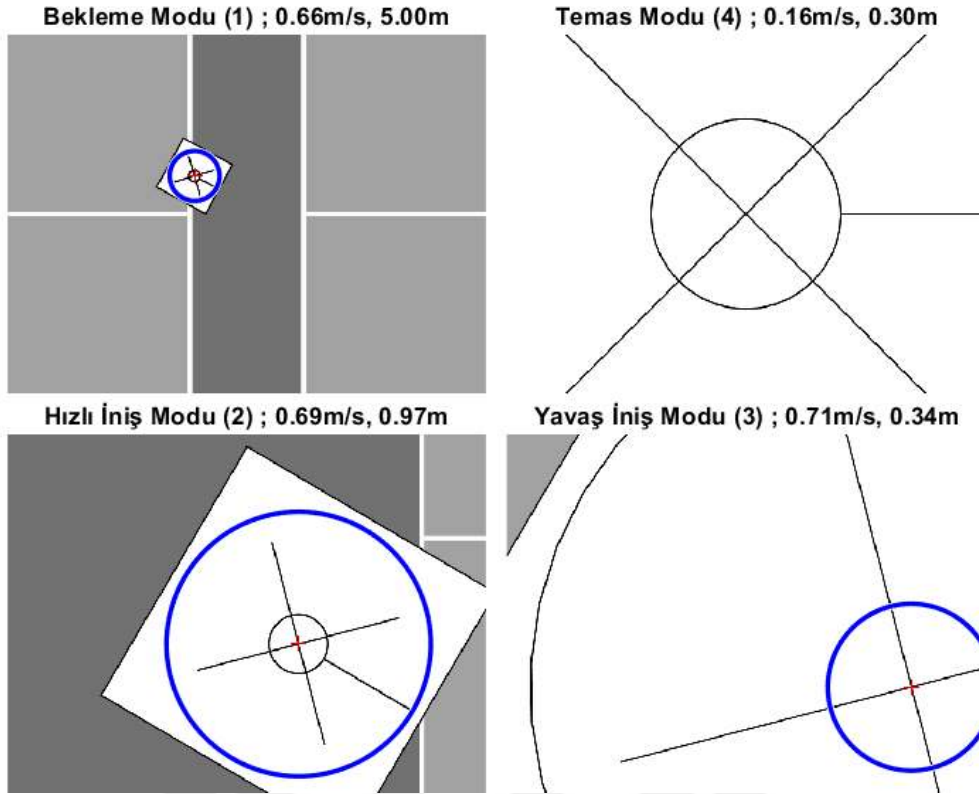
Şekil 4.8, 4.9, 4.10'da geliştirilen görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritmasında farklı modlarda 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı ile tuz-biber gürültüsünün sırasıyla 0.01, 0.05 ve 0.08 yoğunluk değerlerinde elde edilen görüntüler sunulmaktadır. İHA'nın 0.01 ve 0.05 tuz-biber gürültü yoğunluk değerleri altında sırasıyla veri işleme süreleri 28.34 s ve 39.18 s olarak gözlemlenmektedir. İHA'nın hareketli platformu algılaması ile birlikte inişe başlaması ve hareketli platform üzerine inme işlemi boyunca geçen süre 4.5 s olarak belirtilmektedir. Şekil 4.10'da dairesel Hough dönüşümü tuz-biber gürültüsünün 0.08 yoğunluk değerinde hareketli platform üzerinde bulunan imge içerisindeki daireleri başarılı bir şekilde algılayamamaktadır ve platform üzerine iniş gerçekleştirilememektedir. Gürültü etkisinden dolayı hızlı iniş

modundan yavaş iniş moduna geçilememektedir. 0.3 s sabit görüntü alma sıklığında 0.01, 0.05 ve 0.08 tuz-biber gürültü yoğunluğu değerlerinde elde edilen görüntülerde gürültü etkisi nedeniyle oluşan bozulmalar görülmektedir.

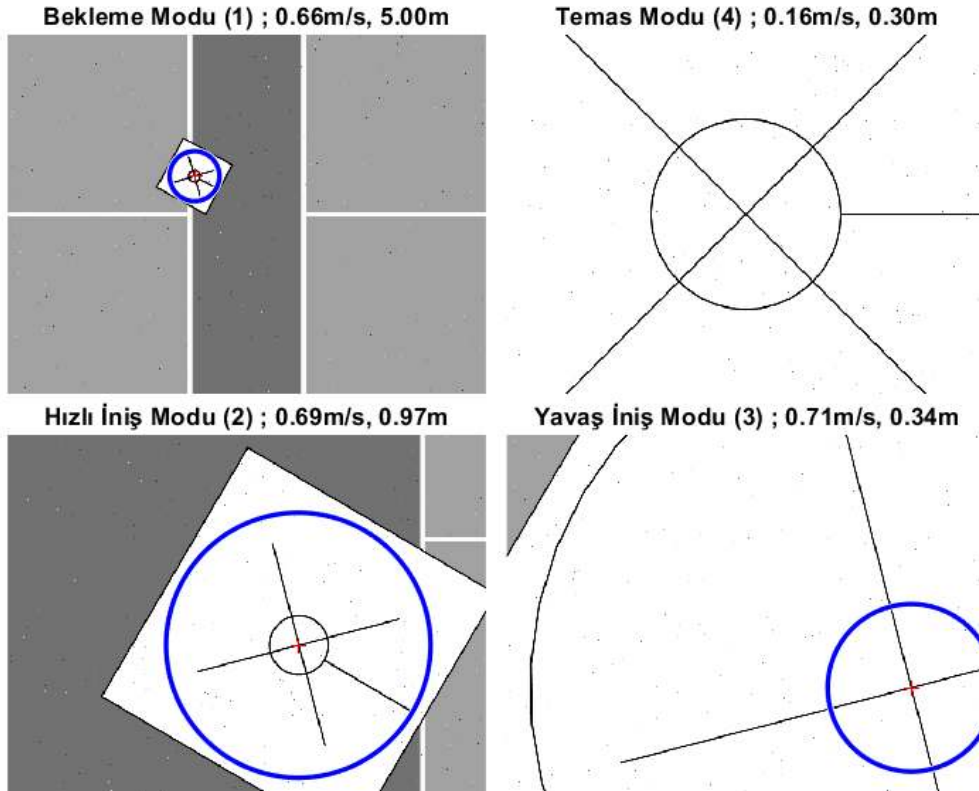
Şekil 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10’da yavaş iniş modunda elde edilen görüntü incelenecek olursa 0.3 s sabit görüntü alma sıklığında hareketli platform üzerinde bulunan dairesel imgenin içerisindeki küçük yarıçaplı (r_2) daire kameranın görüş alanından nerdeyse çıkmak üzeredir. 0.3 s sabit görüntü alma sıklığında yavaş iniş modunda imge içerisinde bulunan küçük yarıçaplı (r_2) daire algılanarak iniş gerçekleştirilmektedir. 0.3 s sabit görüntü alma sıklığından daha yüksek bir değerde sabit sıklık alınır sa hareketli platform kameranın görüş alanının dışına çıkabilir ve imge algılanamayabilir. Bu durumda İHA’nın hareketli platform üzerine inişi başarısızlıkla sonuçlanabilmektedir.

Şekil 4.11, 4.12, 4.13’te geliştirilen görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritmasında belirtilen iniş modlarında farklı yükseklik seviyelerinde tuz-biber gürültüsünün sırasıyla gürültüsüz, 0.001, 0.005 gürültü yoğunluk değerlerinde önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımı ile elde edilen görüntüler sunulmaktadır. Gürültüsüz, 0.001 ve 0.005 yoğunluk değerlerinde İHA’nın veri işleme süresi sırasıyla 12.05 s, 13.52 s ve 14.01 s olarak gözlemlenmektedir. Gürültüsüz, 0.001 ve 0.005 gürültü yoğunluk değerlerinde önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımında İHA’nın hareketli platformu algılaması ile birlikte inişe başlaması ve hareketli platform üzerine inme işlemi boyunca geçen süre 4 s olarak belirtilmektedir. Dairesel Hough dönüşümü uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımı altında gürültüsüz, 0.001 ve 0.005 yoğunluk değerlerinde hareketli platform üzerinde bulunan imge içerisindeki daireleri başarılı bir şekilde algılamakta ve platform üzerine iniş gerçekleştirilmektedir.

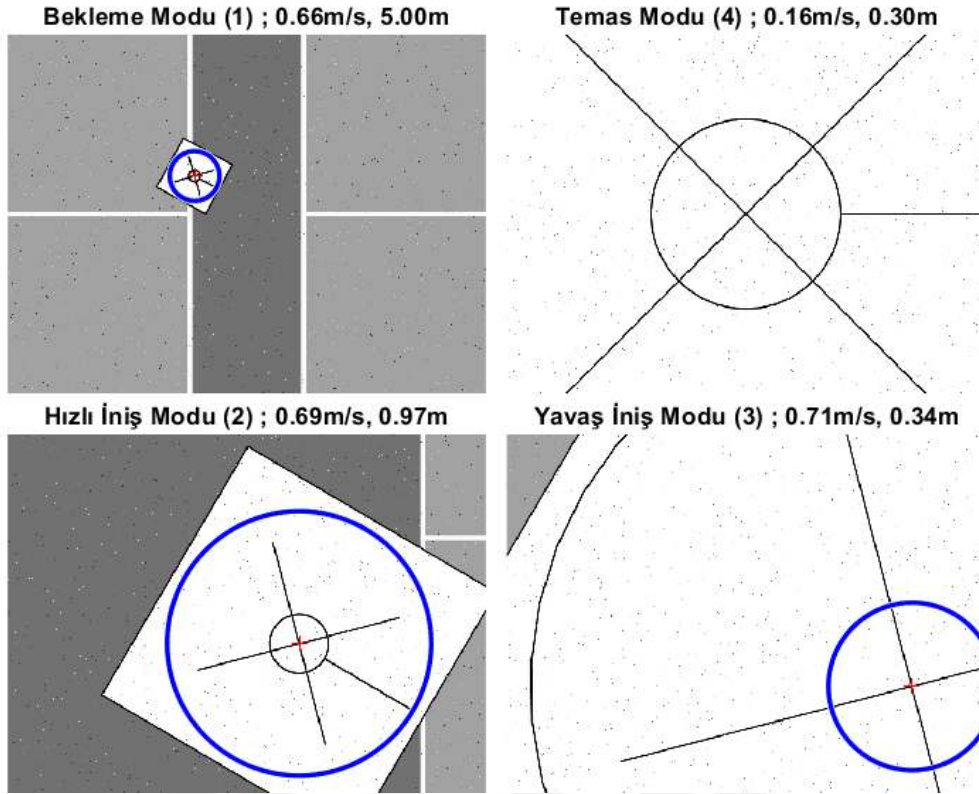
Şekil 4.14, 4.15, 4.16’da geliştirilen görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritmasında belirtilen iniş modlarında farklı yükseklik seviyelerinde tuz-biber gürültüsünün sırasıyla 0.01, 0.05 ve 0.08 gürültü yoğunluk değerlerinde önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımı ile elde edilen görüntüler sunulmaktadır. İHA’nın 0.01, 0.05 ve 0.08 tuz-biber gürültü yoğunlu değerlerinde veri işleme süreleri sırasıyla 14.42 s, 18.85 s ve 22.37 s olarak gözlemlenmektedir. İHA’nın hareketli platformu algılaması ile birlikte inişe başlaması ve hareketli platform üzerine inme işlemi boyunca geçen süre 4 s olarak belirtilmektedir.



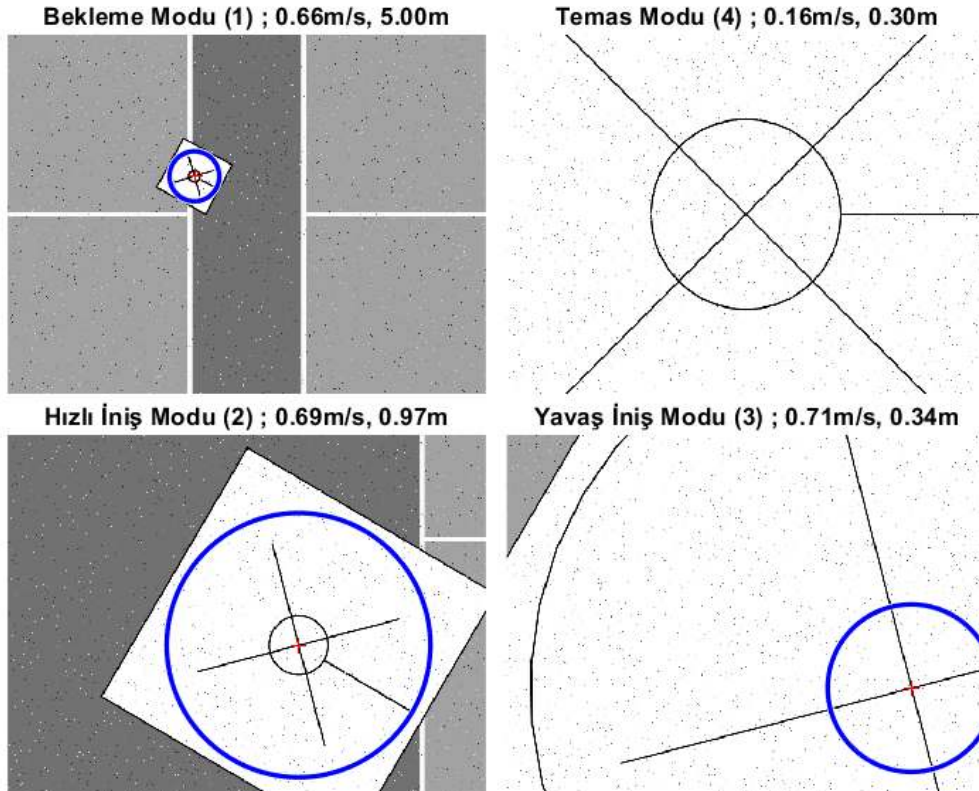
Şekil 4.5 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültüsüz koşullar altında farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.



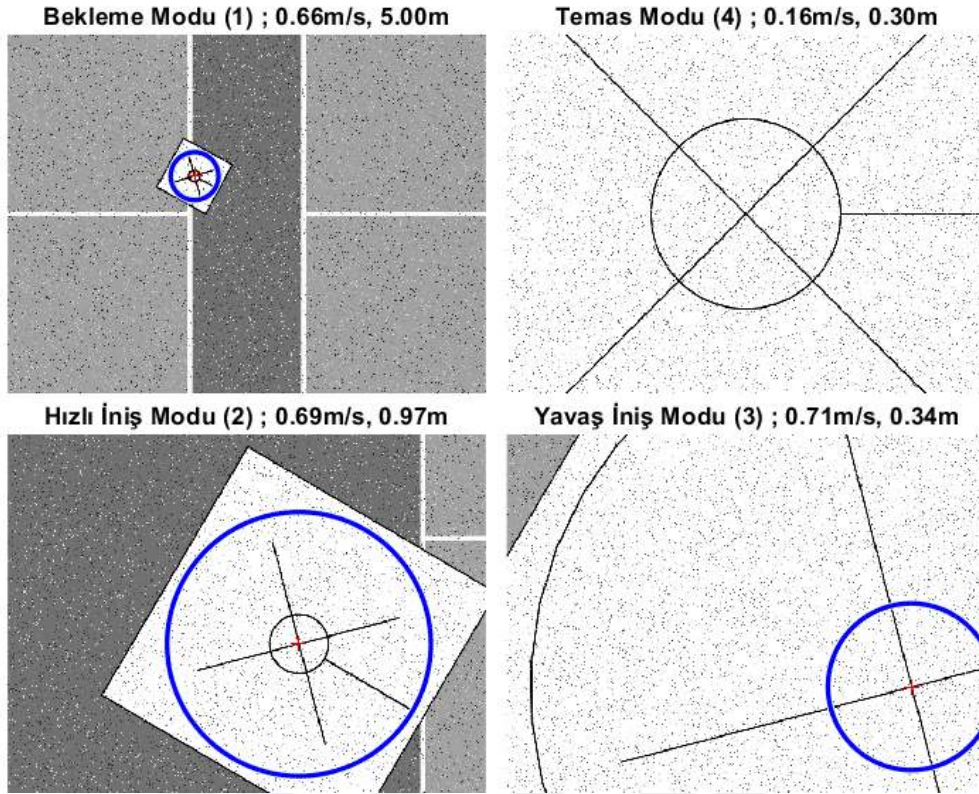
Şekil 4.6 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.001 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.



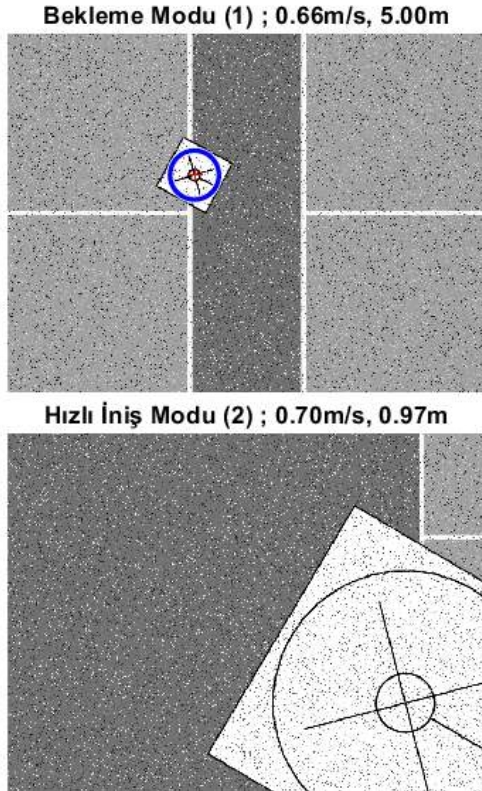
Şekil 4.7 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.005 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.



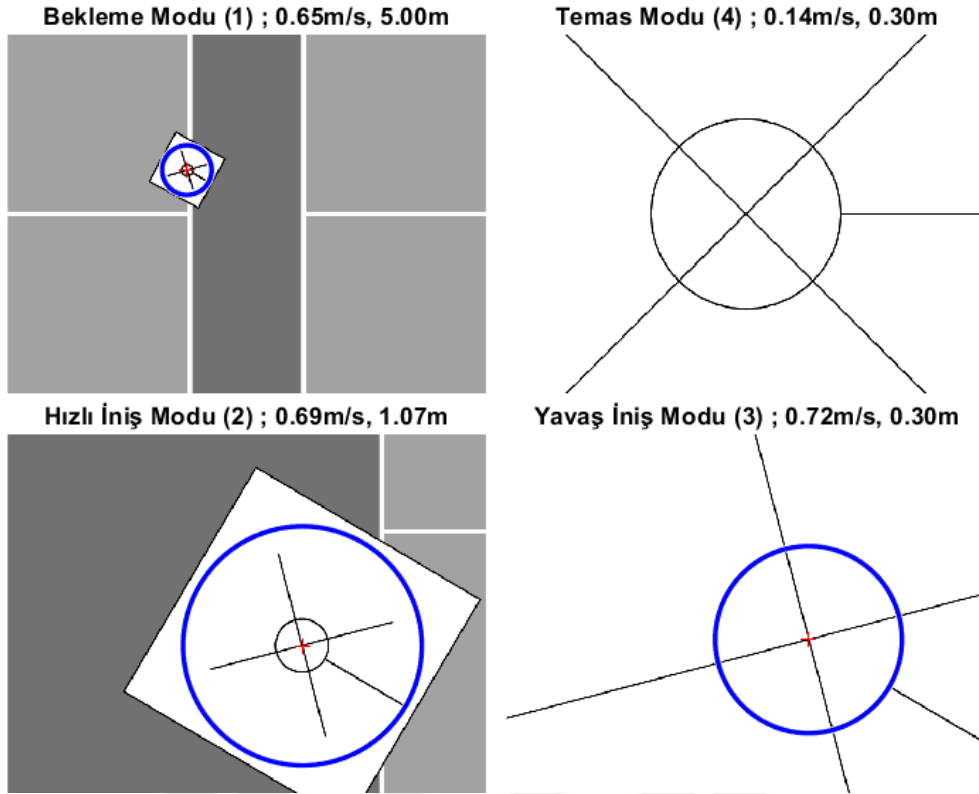
Şekil 4.8 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.01 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.



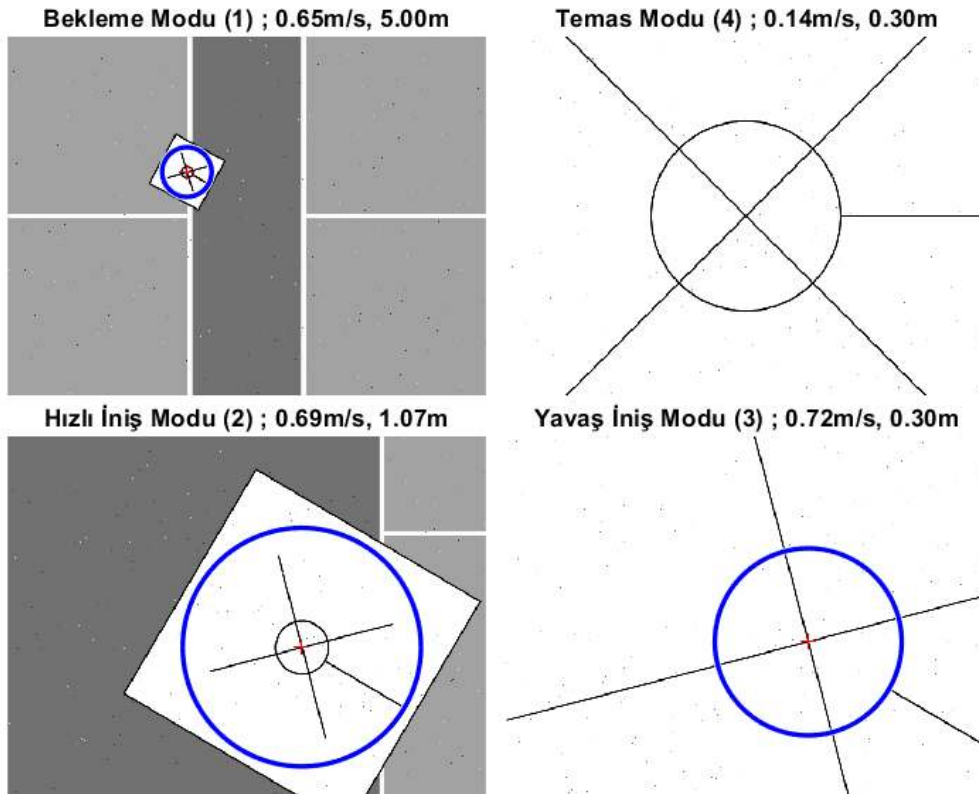
Şekil 4.9 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.05 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.



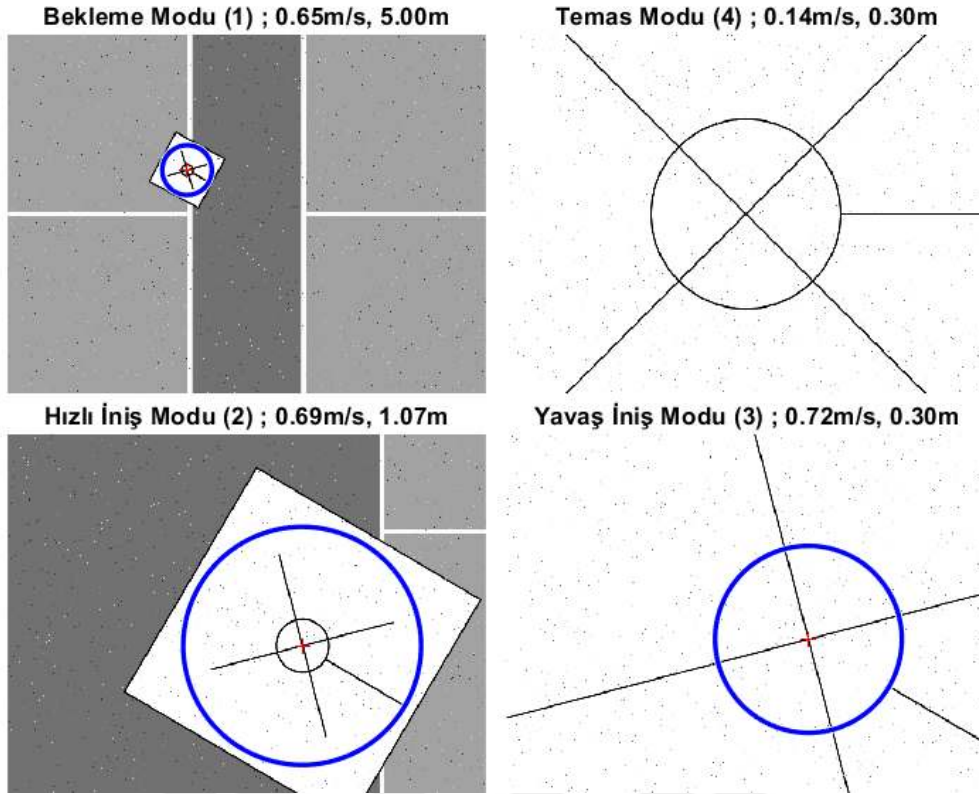
Şekil 4.10 Sabit görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.08 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.



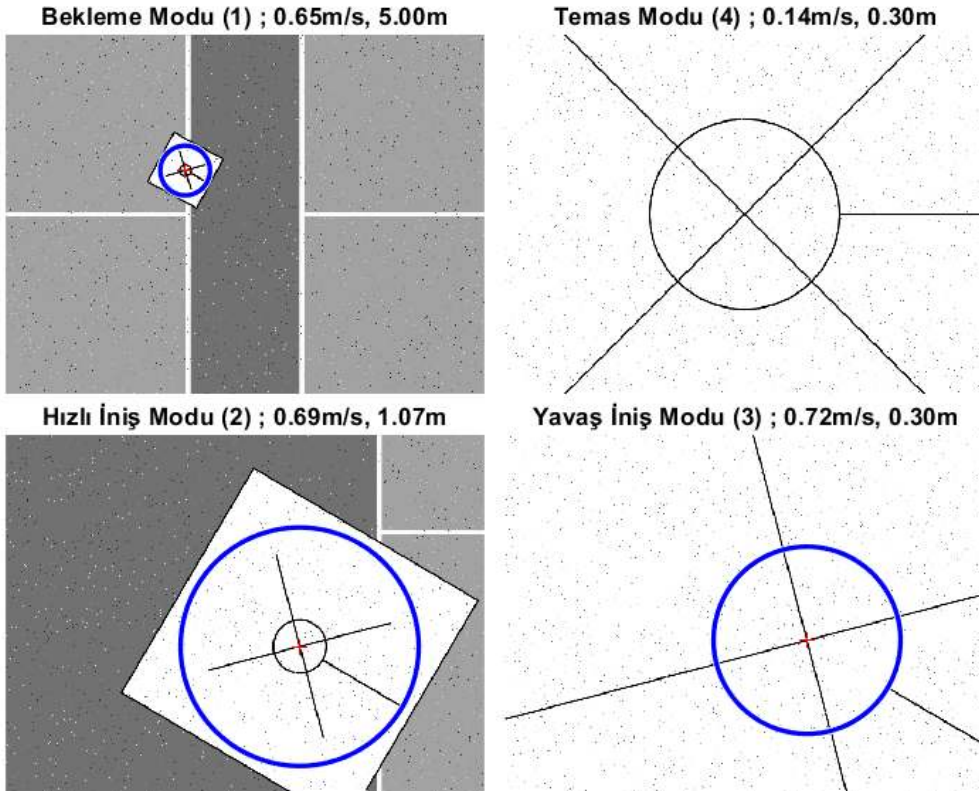
Şekil 4.11 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültüsüz koşullar altında farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.



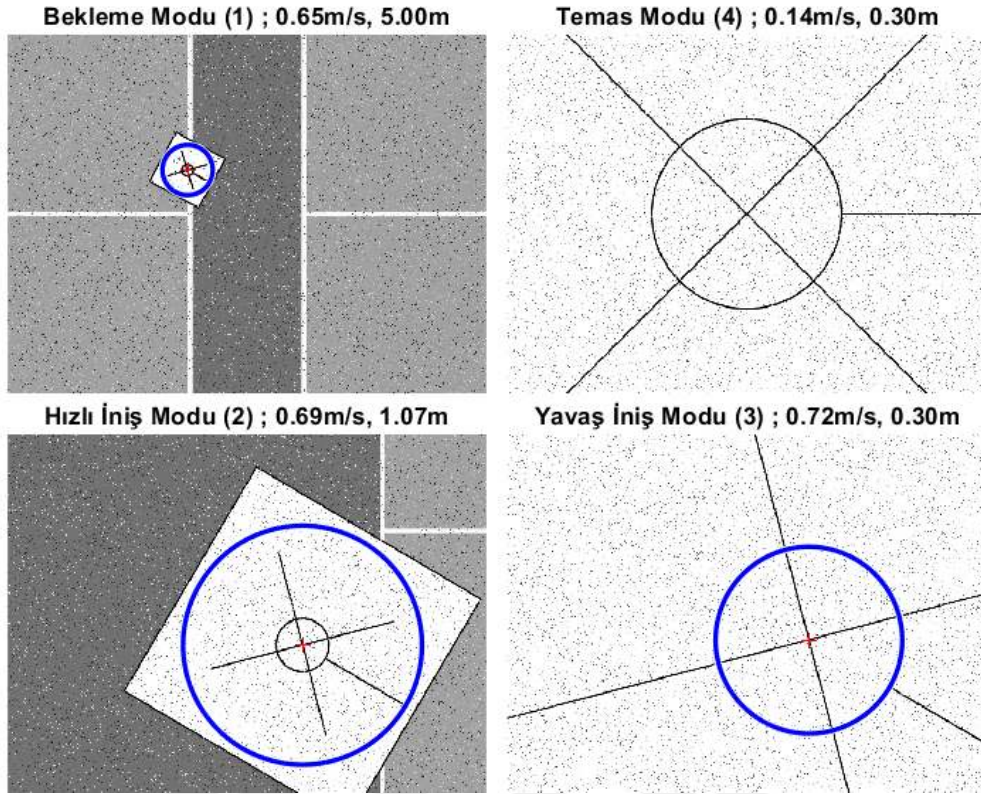
Şekil 4.12 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.001 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.



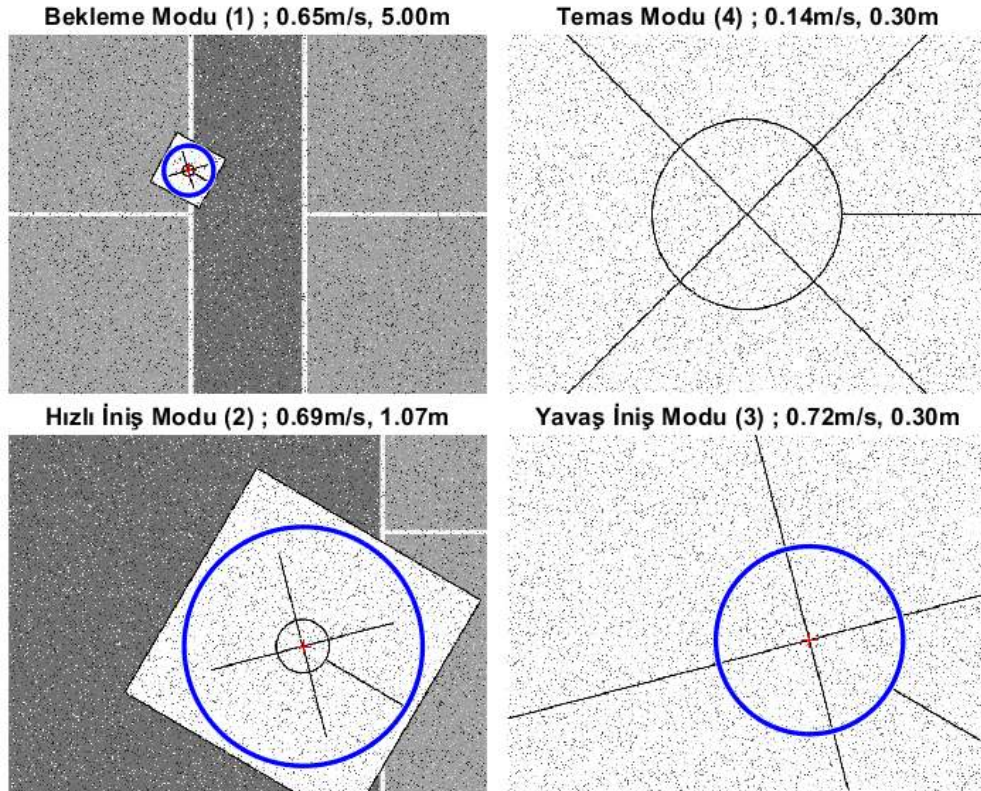
Şekil 4.13 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.005 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.



Şekil 4.14 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.01 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.



Şekil 4.15 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.05 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.



Şekil 4.16 Uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile gürültü seviyesinin 0.08 yoğunlukta olduğu durumda farklı iniş modlarında elde edilen görüntüler.

Geliştirilen görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritması uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımı ve 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı yaklaşımı ile farklı tuz-biber gürültü seviyeleri altında karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Tuz-biber gürültü seviyesi arttıkça İHA'nın veri işleme süresinde artış gözlemlenmektedir.

Tuz-biber gürültü seviyesi arttırıldığında hareketli platformun algılanması sırasında görüntü alma sıklığının eşit yükseklik aralıklarında olmasından dolayı İHA'nın hareketli platformu algılaması ve üzerine iniş kısmında geçen sürede bir değişim gözlemlenmemektedir. İHA'nın hareketli platformu algılaması ve üzerine inme boyunca geçen süre uyarlamalı görüntü alma sıklığı altında farklı gürültü seviyelerinde incelendiğinde 4 s sürede indiği, 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı altında incelendiğinde ise inme süresi 4.5 s olarak gözlemlenmektedir. Gürültü seviyesi arttırıldığında İHA'nın veri işleme süresi uzamaktadır fakat görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritması İHA'nın platform üzerine inişini başarılı bir şekilde gerçekleştirmektedir.

Hareketli platformun hızı nedeniyle yavaş iniş modunda 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı yaklaşımında hareketli platform kameranın görüş alanının dışına neredeyse çıkmak üzeredir. 0.3 s sabit görüntü alma sıklığında yavaş iniş modunda imge içerisinde bulunan küçük yarıçaplı (r_2) daire algılanarak iniş gerçekleştirilmektedir. 0.3 s sabit görüntü alma sıklığından daha yüksek bir değerde sabit sıklık alınırse hareketli platform kameranın görüş alanının dışına çıkabilir ve imge algılanamayabilir. Önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımı İHA'nın yüksekliğine, kamera açısına ve hareketli platformun hız tahminine bağlı olduğundan dolayı yavaş iniş modunda küçük yarıçaplı (r_2) dairenin algılanması sırasında daha iyi bir sonuç verdiği gözlemlenmektedir.

Çizelge 4.1'de 0.3 s sabit görüntü örneği alma sıklığı ve önerilen uyarlamalı görüntü örneği alma sıklığının tuz-biber gürültüsünün farklı yoğunluk değerleri altında incelendiğinde veri işleme süresi üzerindeki etkisi belirtilmektedir. 0.3 s sabit görüntü alma sıklığı ile görüntü örneği alınırken 0.08 gürültü yoğunluğunda hareketli platform üzerine iniş gerçekleştirilememektedir. Çizelge 4.1'de sunulan veri işleme süreleri her bir gürültü yoğunluğu değerinin 5 deneme sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmektedir. Çizelge 4.1'deki veriler karşılaştırıldığında önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı yönteminin veri işleme süresini kısalttığı ve işlem yükünü azalttığı anlaşılmaktadır.

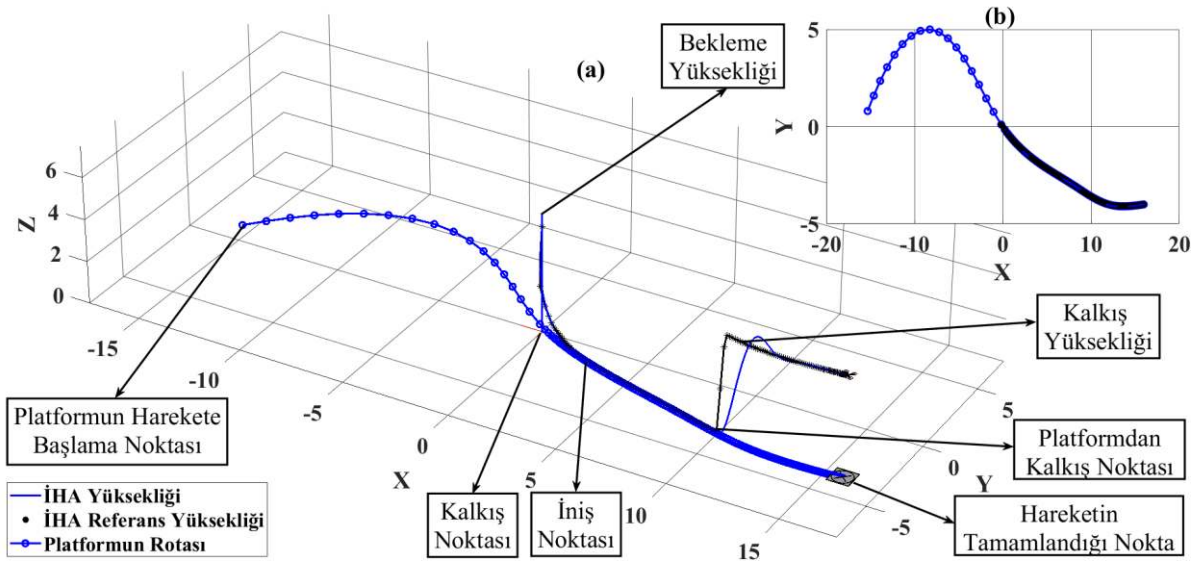
Çizelge 4.1 İşlem süreleri 5 deneme ortalaması. 0.3 s sabit görüntü alma ve önerilen uyarlamalı görüntü alma.

Gürültü Yoğunluk	İşlem Süresi	
	Sabit Görüntü Alma (s)	Uyarlamalı Görüntü Alma (s)
0	22.54	12.05
0.001	24.60	13.52
0.005	26.18	14.01
0.01	28.34	14.42
0.05	39.18	18.85
0.08	BAŞARISIZ	22.37

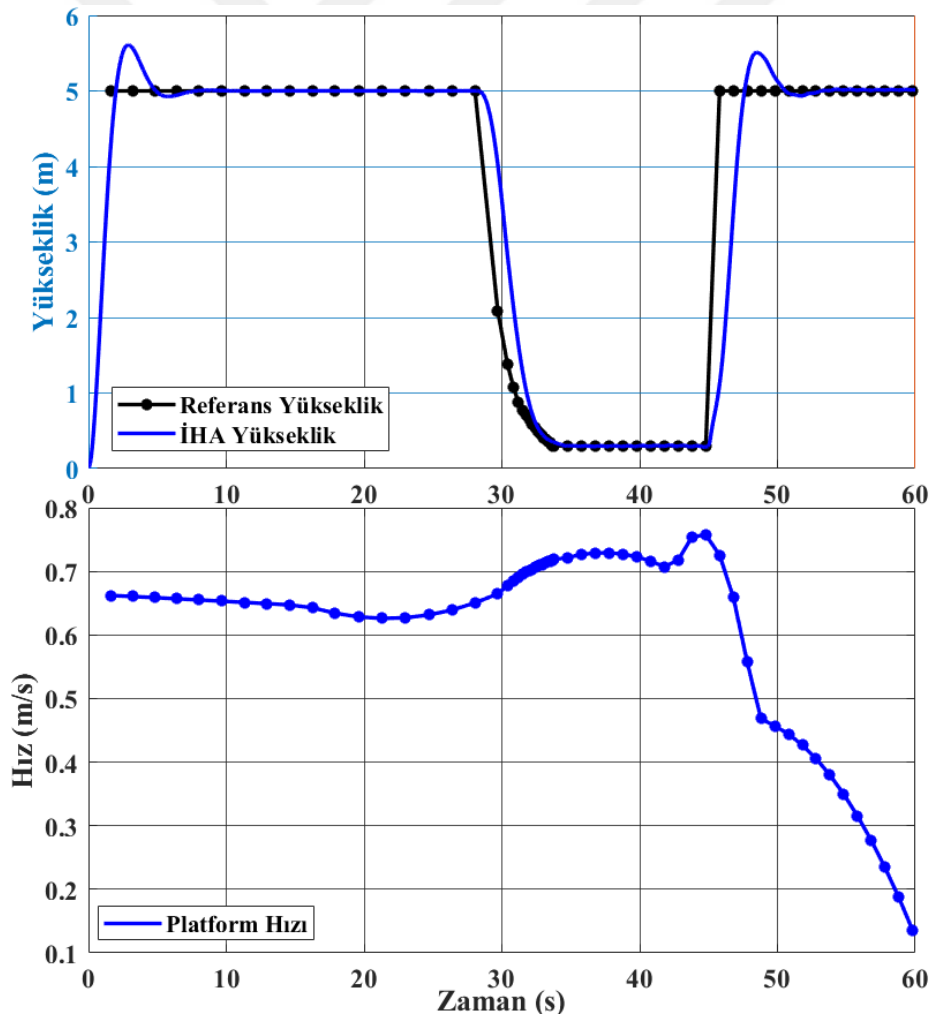
4.3 HAREKETLİ PLATFORM ÜZERİNE İNİŞ – KALKIŞ UYGULAMASI

Bu bölümde belirlenen rotada hareket eden platform üzerine İHA'nın otonom olarak iniş – kalkış yapabilmesini sağlamak için geliştirilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritmasının başarısı incelenmektedir.

Şekil 4.17'de platformun harekete başlama noktası ve İHA'nın belirlenen referans yüksekliğine göre yaptığı hareket rotası gösterilmektedir. Platform harekete başlama noktasından hızlanarak belirlenen rotada hareket etmektedir. İHA, belirlenen referans yüksekliği rotasına göre kalkış noktasından bekleme yüksekliğine çıkarak hareketli platformun kalkış yaptığı konuma gelmesini beklemektedir. Hareketli platform kalkış noktasına geldiğinde İHA, önerilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritmasını kullanarak hareketli platform üzerine inişe başlamaktadır. İniş yaptıktan sonra platformdan kalkış noktasından yükselerek kalkış yüksekliğine ulaşmaktadır. İstenilmesi durumunda İHA hareketli platform üzerinden yeni bir görev için kalkış yapabilmektedir. İHA'nın görev süresi 60 s'dir. İHA hareketli platform üzerine iniş yaptıktan sonra 45 s' hareketli platform üzerinden kalkışa geçmektedir. Belirlenen rotada hareket eden platform üzerine İHA'nın iniş – kalkış yapması 3 boyutlu olarak gösterilmektedir. İHA, kalkış yüksekliğine ulaştıktan sonra belirlenen uçuş görevi tamamlana kadar görüntü işleme yaklaşımını kullanarak hareketli platformu takip etmektedir. Şekil 4.18'de İHA'nın hareketli platform üzerine iniş – kalkış yapması durumunda oluşan yükseklik değişimi ve belirlenen referans yükseklik değeri belirtilmektedir. İHA'nın hareketi sırasında belirlenen referans yüksekliği değerlerine bir sapma olmadan uyum sağladığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.17 İHA'nın belirtilen rotada hareket eden platforma inişinin (a) üç boyutlu gösterimi, (b) iki boyutlu gösterimi.



Şekil 4.18 İHA'nın hareketli platform üzerine iniş – kalkış yapması durumunda oluşan yükseklik değişimleri.

İHA'nın hareketi hareketli platform üzerine iniş ve takibinin x, y eksenlerinde incelendiğinde belirlenen referans yükseklik değerlerine başarılı bir şekilde takip ettiği gözlemlenmektedir. İHA'nın görev süresi 60 s'dir. Belirlenen kalkış görevi için İHA, hareketli platform üzerine iniş yaptıktan sonra 45 s'de kalkışa geçmektedir. İHA hareketli platform üzerinden 5 m yüksekliğe çıkarak belirlenen rotada kalkış görevini tamamlamaktadır. Şekil 4.18'da ki hız/zaman grafiği ise hareketli platformun belirlenen rotada hareketi boyunca oluşan hız değişimlerini ifade etmektedir. İHA, kalkış noktasından havalanarak bekleme yüksekliğine 7 s'de ulaşmaktadır. 28. saniyeye kadar hareketli platformun gelmesini beklemektedir. Geliştirilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritması kullanılarak önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı ile İHA, hareketli platformun üzerine 4 s'de iniş yapmaktadır. İHA, 45. saniyede platform üzerinden kalkış yaparak 7 s'de 5 m yüksekliğe çıkmaktadır ve görev süresi tamamlanana kadar görüntü işleme tekniği kullanılarak hareketli platformu takip etmektedir.



BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada belirtilen bir rotada hareket eden bir platformun üzerine dört rotorlu İHA'nın otonom olarak iniş yapabilmesini gerçekleştirmek için görüntü işleme tabanlı bir iniş algoritması önerilmektedir. Hareketli platform belirlenen rotada hareket etmeye başlamaktadır. Hareketli platform üzerinde bulunan iç içe geçmiş iki daireden oluşan dairesel imge görüntü işleme yaklaşımlarında sıklıkla kullanılan dairesel Hough dönüşümü kullanılarak algılanmakta ve hareketli platform üzerine iniş gerçekleştirilmektedir.

Geliştirilen görüntü işleme tabanlı iniş algoritması dört farklı moddan oluşmaktadır. Bekleme modu olan ilk modda İHA yerden bekleme yüksekliğine çıkmakta ve hareketli platformun kalkış yaptığı konuma gelmesini beklemektedir. Hareketli platform İHA'nın kalkış yaptığı konuma geldiğinde hızlı iniş modu olan ikinci moda geçilmektedir. İHA'nın alt kısmında bulunan kamera ile hareketli platform üzerinde bulunan dairesel imge görüntü işleme tabanlı iniş algoritması tarafından algılanmakta ve iniş başlamaktadır. Eğer ikinci moda geçildiğinde hareketli platform kameranın görüş açısı içerisinde değilse o zaman İHA birinci moda geri dönerek hareketli platform üzerindeki imgeyi algılamaya çalışmaktadır. İkinci modda 5 m ile 1 m yerden yükseklik aralığında İHA hareketli platform üzerinde bulunan imgenin içerisindeki büyük yarıçaplı daireyi dairesel Hough dönüşümünü kullanarak algılamakta ve hareketli platform üzerine doğru inişe geçmektedir. İHA'nın yerden yüksekliği 1 m'nin altına indiğinde ikinci moddan üçüncü moda geçilmektedir. Yavaş iniş modu olan üçüncü moda geçildiğinde hareketli platform İHA'nın alt kısmında bulunan kameranın görüş açısının içerisinde değilse İHA tekrar ikinci moda dönerek hareketli platformu algılamaya çalışmakta ve iniş işleminin devam etmesini sağlamaktadır. Üçüncü modda İHA hareketli platform üzerinde bulunan imgenin içerisindeki küçük yarıçaplı daireyi dairesel Hough dönüşümünü kullanarak algılamakta ve hareketli platform üzerine doğru inişine devam etmektedir. Eğer hareketli platform İHA'nın alt kısmında bulunan kameranın görüş açısının içerisinde değilse İHA tekrar üçüncü moda geçerek hareketli platform üzerindeki imgeyi algılamaya çalışmaktadır.

İHA'nın yerden yüksekliği temas yüksekliğine indiğinde üçüncü moddan dördüncü moda geçilmektedir. Temas modu olan dördüncü modda hareketli platform üzerine iniş işlemi tamamlanmaktadır.

Görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritması İHA'nın hareketli platform üzerine inişi boyunca İHA denetimini kontrol yaklaşımlarında sıklıkla kullanılan oransal-integral-türevsel denetleyici (PID) ile gerçekleştirmektedir.

Görüntü işleme tabanlı iniş algoritması belirlenen iniş modlarında kameradan görüntü alma sıklığı İHA'nın hareketli platform üzerine inme süresini doğrudan etkilemektedir. Belirlenen iniş modlarında kameradan görüntü alma sıklığı sabit tutulduğunda hareketli platformun hızı görüntü alma hızından fazla ise hareketli platform İHA'nın alt kısmında bulunan kameranın görüş alanının dışına çıkabilmektedir. Bu durum inişi olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle belirlenen iniş modlarında hareketli platformun hız değişimine bağlı olarak geliştirilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımı yöntemi önerilmektedir. Çalışmada önerilen uyarlamalı görüntü alma sıklığı yaklaşımı, İHA'nın veri işleme süresini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum işlemcinin yükünü de azalttığı gözlemlenmektedir.

Geliştirilen görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritması tuz-biber gürültüsünün farklı yoğunluk değerleri altında incelendiğinde İHA'nın hareketli platform üzerine başarılı bir şekilde iniş işlemini gerçekleştirdiği gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, önerilen iniş algoritmasının insansız hava araçlarının hareketli bir platform üzerine iniş yapabilmesi problemine çözüm sunduğu görülmektedir. Geliştirilen görüntü alma sıklığının uyarlamalı olarak değiştirilmesi yaklaşımı ise İHA'nın veri işleme süresini önemli ölçüde kısaltması ile işlemci yükünün azaltılmasına katkı sağlamaktadır. İnsansız hava araçlarındaki temel problem olan veri işleme süresinin azaltılmasını sağlayan uyarlamalı yaklaşım, bu alandaki çalışmalara katkı sağladığı sonucuna varılmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritması ile İHA belirlenen bir rotada hareket eden platform üzerine başarılı bir şekilde iniş işlemini gerçekleştirmektedir. Hareketli platformun belirlenen rotası değiştirilerek farklı rotalar oluşturabilir ve performans analizi gerçekleştirilebilir.

Görüntü işleme tabanlı hareketli platforma iniş algoritmasında içe içe geçmiş yapıda iki daireden oluşan imgeyi algılamak için kullanılan dairesel Hough dönüşümü yerine makine öğrenmesi tabanlı yapay zeka algoritmaları kullanılabilir. Özellikle birden fazla hareketli platformun olması durumunda hangi iniş alanının seçileceği problemi sonuçlandırılabilir.

Gelecek çalışmalarda makine öğrenmesi kullanılarak görüntü işleme tabanlı bir iniş algoritması geliştirilmesi düşünülmektedir. Önerilen algoritmanın performansı gerçek zamanlı bir İHA sistemi üzerinde uygulanacaktır. Görüntü işleme tabanlı iniş algoritması gerçekleştirilerek, sistemin gürültülü ve muhtemel sensör hatalarının meydana geldiği çalışma koşullarında performansı analiz edilecektir.





KAYNAKLAR

- [1] **Liu H, Li D, Zuo Z, and Zhong Y** (2016) Robust three-loop trajectory tracking control for quadrotors with multiple uncertainties. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (4): 2263–2274.
- [2] **Mallavalli S and Fekih A** (2019) The role of Unmanned Aerial Vehicles in revolutionizing green energy. *IEEE Green Technologies Conference*, 3-6 April 2019, Lafayette, ABD, 1–8.
- [3] **Rahmani F, Rahmani R, Mobayen S, and Fekih A.** (2021) LMI-Based State Feedback Design for Quadcopter Optimal Path Control and Tracking. *American Control Conference*, 25-28 May 2021, New Orleans, ABD, 4655–4659.
- [4] **Xuan-Mung N, Hong S K, Nguyen N P, Ha L N N T and Le T L** (2020) Autonomous quadcopter precision landing onto a heaving platform: New method and experiment. *IEEE Access*, 8: 167192–167202.
- [5] **Palafox P R, Garzón M, Valente J, Roldán J J and Barrientos A** (2019) Robust visual-aided autonomous takeoff, tracking, and landing of a small UAV on a moving landing platform for life-long operation. *Applied Sciences*, 9 (13): 1–21.
- [6] **Herissé B, Hamel T, Mahony R and Russotto F X** (2012) Landing a VTOL unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow. *IEEE Transactions Robotics*, 28 (1): 77–89.
- [7] **Araar O, Aouf N and Vitanov I** (2017) Vision Based Autonomous Landing of Multirotor UAV on Moving Platform. *Journal of Intelligent Robotics Systems*, 85 (2): 369–384.
- [8] **Ghommam J and Saad M** (2017) Autonomous Landing of a Quadrotor on a Moving Platform. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 53 (3): 1504–1519.
- [9] **Mohammadi A, Feng Y, Zhang C, Baek S and Rawashdeh S** (2018) Autonomous landing of a UAV on a moving platform using model predictive control. *Drones*, 2 (4): 1–15.
- [10] **Rodriguez-Ramos A, Sampedro C, Bavle H, De la Puente P and Campoy P** (2019) A Deep Reinforcement Learning Strategy for UAV Autonomous Landing on a Moving Platform. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 93 (1–2): 351–366.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [11] **Kownacki C, Ambroziak L, Ciezkowski M, Wolniakowski A, Romaniuk S, Bozko A and Oldziej D** (2023) Precision Landing Tests of Tethered Multicopter and VTOL UAV on Moving Landing Pad on a Lake. *Sensors*, 23 (4): 2016-2040.
- [12] **Lee D, Ryan T and Kim H J** (2012) Autonomous landing of a VTOL UAV on a moving platform using image-based visual servoing. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 14-18 May 2012, Saint Paul, ABD, 971–976.
- [13] **Kim J, Jung Y, Lee D and Shim D H** (2014) Outdoor autonomous landing on a moving platform for quadrotors using an omnidirectional camera. *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 27-30 May 2014, Orlando, ABD, 1243–1252.
- [14] **Falanga D, Zanchettin A, Simovic A, Delmerico J and Scaramuzza D** (2017) Vision-based autonomous quadrotor landing on a moving platform. *2017 - 15th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics Conference (SSRR)*, 11-13 October 2017, Shanghai, Çin, 200–207.
- [15] **Liu X, Zhang S, Tian J and Liu L** (2019) An onboard vision-based system for autonomous landing of a low-cost quadrotor on a novel landing pad. *Sensors*, 19 (21): 4703-4722.
- [16] **Serra P, Cunha R, Hamel T, Cabecinhas D and Silvestre C** (2016) Landing of a quadrotor on a moving target using dynamic image-based visual servo control. *IEEE Transactions on Robotics*, 32 (6): 1524–1535.
- [17] **Wu Z, Han P, Yao R, Qiao L, Zhang W, Shen T, Sun M, Zhu Y, Lin M and Fun R** (2019) Autonomous UAV Landing System Based on Visual Navigation. *2019 - IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques*, 9-10 December 2019, Abu Dhabi, UAE, 4–9.
- [18] **Ajmera J, Siddharthan P R, Ramaravind K M, Vasan G, Balaji N and Sankaranarayanan V** (2016) Autonomous visual tracking and landing of a quadrotor on a moving platform. *2015 3rd International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, 21-24 December 2015, Wagnaghat, Hindistan, 342–347.
- [19] **Arslan F, Belge E ve Hacıoğlu R** (2023) İnsansız Hava Aracının Hareketli Platform Üzerine Uyarlamalı Görüntü Alma Hızına Bağlı Otonom İnişi. *7. Geleceğin Mühendisleri Uluslararası Öğrenci Sempozyumu (EFIS)*, 22-23 Haziran 2023, Zonguldak, Türkiye, 31–38.
- [20] **Gitleman L and Kleberger J** (2016) Dynamics, Modeling, Simulation and Control of Mid-Flight Coupling of Quadrotors. *Master Thesis*, Arizona State University, School for Engineering of Matter, Transport and Energy, Department of Systems and Control Theory, Arizona, ABD, 69 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [21] Selby W C (2009) Autonomous Navigation and Tracking of Dynamic Surface Targets On-board a Computationally Impoverished Aerial Vehicle. *Master Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Cambridge, ABD, 120 s.
- [22] Djekoune A O, Messaoudi K and Amara K (2017) Incremental circle hough transform: An improved method for circle detection, *Optik*, 133: 17–31.
- [23] Dobeš M, Martinek J, Skoupil D, Dobešová Z and Pospíšil J (2006) Human eye localization using the modified Hough transform. *Optik*, 117 (10): 468–473.
- [24] Li Q and Wu M (2020) An Improved Hough Transform for Circle Detection using Circular Inscribed Direct Triangle. *2020 13th International Congress on Image and Signal Processing, Biomedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, 17-19 October 2020, Chengdu, Çin, 203–207.
- [25] Kierkegaard P (1992) A method for detection of circular arcs based on the Hough transform. *Machine Vision and Applications*, 5 (4): 249–263.
- [26] Caya M V, Padilla D, Ombay G and Hernandez A J (2019) Detection and Counting of Red Blood Cells in Human Urine using Canny Edge Detection and Circle Hough Transform Algorithms. *2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, 29 November – 1 December 2019, Laoag, Filipinler, 2-6.



ÖZGEÇMİŞ

Fatih ARSLAN İlköğretim ve ortaöğrenimini Zonguldak'ta tamamladı. Zonguldak Erdemir Anadolu Lisesi'nden 2016 yılında mezun oldu. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde 2016 yılında eğitimine başladı ve 2020 yılında mezun oldu. 2020 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.

