



**DÖNER KANATLI İNSANSIZ HAVA
ARAÇLARININ HAREKETLİ PLATFORMA
OTONOM İNİŞ SİSTEMİ TASARIMI**

Doktora Tezi

Cemal IŞILAK

Eskişehir 2024

**DÖNER KANATLI İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ HAREKETLİ
PLATFORMA OTONOM İNİŞ SİSTEMİ TASARIMI**

Cemal IŞILAK

Doktora Tezi

Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hakan OKTAL

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Temmuz 2024

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 22DRP222 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Cemal IŞILAK'ın DÖNER KANATLI İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ HAREKETLİ PLATFORMA OTONOM İNİŞ SİSTEMİ TASARIMI başlıklı çalışması 24/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. Hakan OKTAL

Üye

: Prof. Dr. Osman PARLAKTUNA

Üye

: Doç. Dr. Hasan Serhan YAVUZ

Üye

: Doç Dr. Işıl YAZAR

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Yasemin IŞIK

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ğrencisi Cemal IşILAK, DÖNER KANATLI İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ HAREKETLİ PLATFORMA OTONOM İNİş SİSTEMİ TASARIMI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. Hakan OKTAL

ÖZET

DÖNER KANATLI İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ HAREKETLİ PLATFORMA OTONOM İNİŞ SİSTEMİ TASARIMI

Cemal IŞILAK

Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temmuz 2024

Danışman: Prof. Dr. Hakan OKTAL

İnsansız Hava Araçları (İHA), teknoloji ve mühendislik alanlarında büyük bir dönüşüm gerçekleştirmiş ve çeşitli sivil, askeri ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Özellikle keşif, gözlem, kargo taşımacılığı ve arama-kurtarma operasyonlarında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, İHA'ların etkin kullanımını artırmak ve daha zorlu görevleri yerine getirebilmeleri için, otonom iniş ve kalkış kabiliyetlerinin geliştirilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada, İHA'ların hareketli bir platforma otonom olarak iniş yapabilmesi için geliştirilen sistem, konum bilgileri, Kalman filtresi ve görüntüye dayalı nesne tespiti yöntemleri ile desteklenmiştir.

Bu tez çalışmasında, İHA'nın hareketli bir platforma otonom iniş yapabilmesi için benzetim ortamında geliştirilen sistem, İHA'nın kendi konum bilgilerinin yanı sıra hareketli platformun konum, hız ve yönelim verilerinden de faydalanmaktadır. İniş pistinin tespiti için özel olarak eğitilmiş YOLO V8 nesne tespit modeli ile pistin konum bilgileri elde edilmiş ve bu sayede yüksek hassasiyetli iniş gerçekleştirilmiştir. Sistemin performansını ölçmek ve geliştirmek amacıyla dört yenilikçi senaryo oluşturularak, İHA'nın değişken irtifa ve bölgelerde yapılan çeşitli ölçümler sonucunda hareketli platforma başarılı bir şekilde otonom iniş yapabildiğini göstermektedir. Benzetimlerde, değişken hız ve yöne sahip yan rüzgâr ve sis nedeni ile kısıtlı görüş etkileri de incelenerek sistemin performansı test edilmiştir. Ayrıca, birden fazla iniş pistinin bulunduğu senaryoda, İHA başlangıç anında kendine en yakın olan kara aracını başarıyla iniş hedefi olarak seçmiştir. Hareketli platform tarafından sağlanan GPS konumu, iniş sisteminin etkinlik alanını genişletmektedir. Platformun GPS konumu ve İHA üzerindeki Atalet Ölçüm Ünitesinden alınan yönelme açısıyla entegre edilen Kalman filtresi kullanılarak platformun hareket yönünde bir buluşma noktası belirlenmekte ve bu sayede daha verimli bir yörünge elde edilmektedir. Literatürdeki benzer çalışmalara kıyasla hedefe daha kısa bir rota üzerinden ulaşılabilmesi ve irtifa değişikliklerini içeren yeni bir yaklaşma ve iniş yörüngesi geliştirilmesi çalışmanın özgünlüğü olarak ortaya çıkmaktadır. Geliştirilen sistem, çeşitli İHA ve kara aracı platformlarıyla entegrasyon imkânı sunarak farklı görev gereksinimlerine uygun çözümler sunabilmektedir.

Anahtar Sözcükler: İHA, Otonom iniş, Hassas iniş, Otonom araçlar, Yörünge planlama

ABSTRACT

AUTONOMOUS LANDING SYSTEM DESIGN OF ROTARY WING UNMANNED AERIAL VEHICLES ON A MOVING PLATFORM

Cemal IŞILAK

Department of Avionics

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, July 2024

Supervisor: Prof. Dr. Hakan OKTAL

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have created a significant transformation in technology and engineering, finding extensive use in various civil, military, and industrial applications. They are particularly effective in tasks such as reconnaissance, observation, cargo transportation, and search and rescue operations. However, to enhance the effective use of UAVs and enable them to perform more challenging tasks, the development of autonomous landing and takeoff capabilities is crucial. This study presents a system developed for UAVs to autonomously land on a moving platform, supported by position information, Kalman filtering, and image-based object detection methods.

In this study, the system developed for UAVs to autonomously land on a moving platform in a simulation environment utilizes not only the UAV's own position data but also the position, speed, and orientation data of the moving platform. The position information of the landing pad was obtained using a specially trained YOLO V8, enabling high-precision landing. Four innovative scenarios were created to measure and improve the system's performance. These scenarios demonstrate that the UAV can autonomously land on a moving platform after various measurements in different altitudes and regions. The system's performance under side winds with variable speed and direction, as well as under limited visibility conditions due to fog, has been tested through simulations. Additionally, in a scenario with multiple landing pads, the UAV successfully selected the nearest ground vehicle as its landing target at the beginning of the operation. The effective area of the landing system is expanded by the GPS location provided by the moving platform. A Kalman filter, integrated with the GPS position of the platform and the orientation angle taken from the Inertial Measurement Unit on the UAV, has been used. A meeting point in the direction of movement of the platform is determined with Kalman filter, and thus a more efficient trajectory is obtained. Compared to similar studies in the literature, the novelty of this work lies in developing a new approach for approach and landing trajectories that involve altitude changes and achieve the target via a shorter route. The developed system offers integration possibilities with various UAV and ground vehicle platforms, providing solutions suitable for different mission requirements.

Keywords: UAV, Autonomous landing, Precision landing, Autonomous vehicles, Trajectory planning.

TEŞEKKÜR

Doktora sürecim boyunca bana rehberlik eden, yol gösteren ve destekleyen danışmanım Prof. Dr. Hakan OKTAL'a en derin teşekkürlerimi sunarım. Bu zorlu süreçteki bilgi birikimi, sabrı ve özverisiyle her zaman yanımda oldu. Tezim boyunca karşılaştığım zorlukları aşmamda sağladığı değerli katkılar ve cesaret verici tavsiyeleri, benim için ilham verici bir örnek teşkil etti. Bu süreçte bana kazandırdığı bilgiler ve gösterdiği anlayış için kendisine sonsuz minnettarım.

Tez izleme ve savunma jürimde bulunan değerli hocalarım Prof. Dr. Osman PARLAKTUNA ve Doç. Dr. Hasan Serhan YAVUZ'a, tezimin her aşamasında sağladıkları kıymetli geri dönüşler ve yapıcı eleştiriler için içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez savunma jürimde bulunan değerli hocalarım Doç. Dr. Işıl YAZAR ve Dr. Öğr. Üyesi Yasemin IŞIK'a, savunma sürecindeki yapıcı yorumları ve detaylı değerlendirmeleri için özel teşekkürlerimi iletmek isterim.

Beni her adımda destekleyen, sevgi ve sabırla yanımda olan aileme en derin teşekkürlerimi sunarım. Kıymetli annem ve babam, hayatım boyunca gösterdikleri anlayış ve fedakarlıkla her zaman yanımda oldular. Zorlu süreçlerde bana umut ve güç verdiler. Bu süreçteki büyük emekleri ve destekleri için her birine minnettarlığımı ifade ederim.

Bu süreçte bana sonsuz destek ve sabır gösteren sevgili eşim Nihal'e ve biricik kızım Asel'e özel teşekkürlerimi sunarım. Sevgili eşim, bu zorlu yolculuk boyunca hem manevi hem de günlük yaşamda yanımda olarak en büyük destekçim oldu. Kızım ise sürekli neşesi ve sevgisiyle bana sonsuz moral kaynağı oldu. Onların anlayışı ve destekleri, bu dönemde bana büyük güç verdi. İçten teşekkürlerimi sunarım; katkıları için çok minnettarım. Bu çalışmamı sevgili eşim Nihal'e ve biricik kızım Asel'e ithaf ediyorum.

Cemal IŞILAK

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Cemal IŞILAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI.....	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI.....	III
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
GÖRSELLER DİZİNİ	XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırma Problemi	2
1.2. Araştırmanın Amacı	2
1.3. Araştırmanın Önemi.....	2
1.4. Sınırlılıklar	3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. İHA'LARDA KÜRESEL VE YEREL KONUMLANDIRMA	10
3.1. Koordinat Sistemleri ve Gösterimi.....	10
3.1.1. Koordinat sistemleri	10
3.1.2. Yerel teğet düzlem koordinatları (LTP)	11
3.1.3. Koordinat çerçeveleri	12
3.1.4. Dik koordinat sistemleri.....	12
3.1.5. Pozlar ve koordinat çerçeveleri.....	14
3.1.6. Koordinat çerçevelerinde öteleme.....	15

3.2. İHA’larda Yönelim Belirleme Yöntemleri	16
3.2.1. Euler açıları	16
3.2.2. Kuaterniyonlar	17
3.2.3. İHA gövde çerçevesi	18
3.2.4. Euler açıları ve açısal hız ilişkisi	20
4. YÖNTEM.....	21
4.1. Operasyon Süreçleri.....	21
4.2. Sistem Tasarımı.....	21
4.3. Sistem Mimarisi	25
4.3.1. Ölçüm katmanı	26
4.3.2. Veri işleme katmanı	26
4.3.2.1. Alınan konum bilgilerinin coğrafi koordinat sisteminden yerel düzlem koordinatlarına dönüştürülmesi	26
4.3.2.2. Konum verilerinden araçlar arası mesafenin hesaplanması	28
4.3.2.3. İniş platformunun tespiti ve konum bilgilerinin elde edilmesi	29
4.3.3. Yol haritası katmanı	37
4.3.3.1. Kalman filtresi kullanarak yörünge planlama	38
4.3.3.2. Kara aracının konumunu takip etmek için hedef yönelimi ayarlama	42
4.3.4. Kontrol katmanı	42
5. BENZETİM ORTAMI VE BİLEŞENLERİ.....	46
5.1. İşletim Sistemi	46
5.2. Robotik İşletim Sistemi (ROS).....	46
5.3. Gazebo Benzetim Ortamı ve Kullanılan Araçlar	46
5.4. PX4 Uçuş Kontrol Kartı	48
5.5. QGroundControl Görev Planlayıcı Yer İstasyonu	49
5.6. Benzetim Ortamında Bileşenler Arası Haberleşme	49
6. BENZETİM SENARYOLARI.....	50
6.1. İHA'nın Otonom İnişi	52
6.2. Geleneksel Yöntem ile Geliştirilen Yöntemin Karşılaştırılması	54

6.3. Senaryo 1 – Platformun Yön Değiştirmesi Durumunda İHA'nın Otonom İnişi	56
6.4. Senaryo 2 – Değişken Yön ve Hızdaki Rüzgâr Etkileri Altında İHA'nın Otonom İnişi	58
6.5. Senaryo 3 –Sisli Benzetim Ortamında İşaretçi Tespiti ve Konumun Elde Edilmesi	60
6.6. Senaryo 4 - Birden Fazla İniş Pistinin Bulunması Durumunda İHA'nın Otonom İnişi	64
6.7. Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	65
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKÇA	70
EKLER	
ÖZGEÇMİş	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Mevcut çalışmalarda kullanılan yöntemler	9
Tablo 4.1. Karışıklık matrisi	32
Tablo 4.2. İHA irtifasına göre imge üzerindeki işaretçi koordinatları ve ölçekleme faktörleri	35
Tablo 6.1. Yöntemlerin Karşılaştırılması.....	65
Tablo 6.2. Senaryolarda elde edilen uçuş süreleri.....	66



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. NED koordinat sistemi (solda) ve ENU koordinat sistemi (sağda) gösterimi (Huang, Y.H.,2015)	11
Şekil 3.2. Orijin sol altta çakışık.....	13
Şekil 3.3. Orijin sol üstte çakışık	13
Şekil 3.4. Sol el koordinat sistemi	13
Şekil 3.5. Sağ el koordinat sistemi.....	13
Şekil 3.6. Sağ el kuralı kullanılarak bir eksen etrafındaki pozitif dönüşlerin yönü.....	14
Şekil 3.7. Çaydanlık senaryosunun üç koordinat çerçevesi ve ilişki ağacı (Molloy,2020)	15
Şekil 3.8. Ana koordinat çerçevesi p ve onun ötelenmiş alt koordinat çerçevesi c gösterimi (Molloy,2020).....	16
Şekil 3.9. Kuaterniyon gösterimi	18
Şekil 4.1. İHA'nın hareketli platforma inişi için otonom sistem tasarımı	22
Şekil 4.2. İHA'nın hareketli platforma iniş algoritması akış şeması	24
Şekil 6.1. Başlangıç anında üretilen yörünge noktalarının gösterimi	52
Şekil 6.2. İHA'nın oluşturulan yörüngeyi takip aşaması	53
Şekil 6.3. Otonom inişin gerçekleşmesi	53
Şekil 6.4. Araçların hızlarının gösterimi	54
Şekil 6.5. İHA'nın irtifası.....	54
Şekil 6.6. Geleneksel yöntem ve geliştirilen yöntem ile İHA'ların otonom inişi.....	55
Şekil 6.7. Araçların hızlarının gösterimi	55
Şekil 6.8. İHA'ların irtifası.....	55
Şekil 6.9. İHA'ların operasyon sırasındaki batarya yüzdeleri.....	56
Şekil 6.10. Senaryo 1: Kara aracının yön değişimi sonrası oluşturulan yörünge	57
Şekil 6.11. Senaryo 1: Otonom inişin tamamlanması	57
Şekil 6.12. Senaryo 1: Araçların hızlarının gösterimi.....	58
Şekil 6.13. Senaryo 1: İHA'nın irtifası	58
Şekil 6.14. Senaryo 2: Otonom inişin tamamlanması	59
Şekil 6.15. Senaryo 2: Araçların hızlarının gösterimi	60
Şekil 6.16. Senaryo 2: İHA'nın irtifası	60
Şekil 6.17. Sis ve rüzgar olumsuz hava koşulları altında İHA'nın otonom inişi.....	63

Şekil 6.18. Senaryo 3: Araçların hızlarının gösterimi.....	63
Şekil 6.19. Senaryo 3: İHA'nın irtifası	63
Şekil 6.20. Senaryo 4: Çoklu iniş pistleri gösterimi	64
Şekil 6.21. Senaryo 4 çoklu iniş pistleri arasından otonom inişin tamamlanması.....	65



GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1. Robot ve çaydanlığın konum gösterimi (Molloy,2020).....	12
Görsel 3.2. İHA üzerinde Euler açılarının gösterimi.....	18
Görsel 4.1. Veri seti içerisinde bir imge	30
Görsel 4.2. Nesne tespit aşamaları.....	31
Görsel 4.3. Tespit edilen işaretçi	33
Görsel 4.4. Ölçekleme faktörünün hesaplanması için oluşturulan ölçüm ortamı	34
Görsel 4.5. Tespit edilen işaretçinin imgedeki görüntüsü ve orta noktasının konumu	35
Görsel 5.1. IRIS İHA modeli	47
Görsel 5.2. Ackerman vehicle kara aracı modeli	48
Görsel 5.3. PX4 uçuş kontrol kartı (Pixhawk 4,2021).....	48
Görsel 6.1. Rüzgarın İHA'ya etkisinin gösterimi.....	58
Görsel 6.2. İHA 7 m irtifada iken sisli hava koşullarında kara aracının görüntüsü	61
Görsel 6.3. İHA 5 m irtifada iken sisli hava koşullarında tespit edilen kara aracının görüntüsü.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\hat{z}_k$	: k zamanındaki ölçümün tahmini
P_k	: k zamanındaki durum kovaryans matrisi
$X_{\text{ref}}, Y_{\text{ref}}, Z_{\text{ref}}$	: Referans noktasının ECEF koordinatları
k_p, k_d, k_i	: Orantılama, türev ve integral kat sayıları
u_k	: k zamanındaki kontrol girişi
w_k	: Sürekli Gauss dağılımına sahip sürekli bir rastgele değişken olan işlem hatası
$x_{\text{İHA}}, y_{\text{İHA}}$	: İHA'nın x ve y koordinatları
$x_{\text{KA}}, y_{\text{KA}}$	: Kara aracının x ve y koordinatları
x_k	: Durum vektörü
a	: Elipsoidin yarı büyük eksen
e^2	: Elipsoidin dış merkezliliğinin karesi
f	: Elipsoidin yassılığı
h	: Yükseklik (metre cinsinden)
N	: Elipsoidin belirli bir enlemdeki eğriliğinin yarıçapı
$R(\theta)$	: Rotasyon matrisi
λ	: Boylam (radyan cinsinden)
B	: Kontrol giriş matrisi
F	: Durum geçiş matrisi
H	: Gözlem matrisi
Q	: Sürekli işlem hatası kovaryans matrisi
R	: Ölçüm gürültüsü kovaryans matrisi
$u(t)$	: Kontrol sinyali
ϕ, θ, ψ	: Yatış, yunuslama ve sapma açısı
ω	: Açısal Hız Vektörü
AprilTAG	: İki boyutlu kod sistemi, nesne tanıma ve konumlandırma için işaretçi sistemi
ArUco	: Görüntüleme ve konumlandırma için işaretleme sistemi
DDPG	: Derin Deterministik Politika Gradyanı
ECEF	: Yer Merkezli Yer Sabit Koordinat Sistemi

ECI	: Yer Merkezli İnersiyal Koordinat Sistemi
EKF	: Genişletilmiş Kalman Filtresi
ENU	: Doğu, Kuzey, Yukarı Koordinat Sistemi
GPS	: Küresel Konumlama Sistemi
IMU	: Ataletsel Ölçüm Birimi
LTP	: Yerel Teğet Düzlem Koordinatları
LVLH	: Yerel Dikey, Yerel Yatay Koordinat Sistemi
MavLINK	: İnsansız Hava Araçları İçin İletişim Protokolü
MAVROS	: MAVLink ve ROS arasında köprü bağlantısı
MPC	: Model Öngörücü Kontrol
NED	: Kuzey, Doğu, Aşağı Koordinat Sistemi
PX4	: Açık kaynaklı uçuş kontrol kartı
QGC	: MAVLink tabanlı yer istasyonu yazılımı
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hata
ROS	: Robot İşletim Sistemi
RTK-GPS	: Gerçek Zamanlı Kinematik GPS
YOLO	: You Only Look Once, nesne tespiti derin öğrenme modeli

1. GİRİŞ

İnsansız hava araçlarının (İHA) arama ve kurtarma, nesne taşıma, inceleme, gözetim ve haritalama gibi farklı alanlarda kullanımı oldukça artmıştır. Bu araçlar, çeşitli görevlerde hız, erişim ve operasyonel verimlilik sağlamakla birlikte, geleneksel hava araçlarına kıyasla belirli sınırlamalara da sahiptir. Özellikle çok rotorlu İHA'lar, daha düşük verimliliğe sahip tahrik sistemleri nedeniyle, havada kalma süresi bakımından sabit kanatlı hava araçlarına göre dezavantajlıdır. Bu sebepten dolayı, çok rotorlu İHA'ların kullanım alanları ve görev süreleri sınırlanmaktadır. Mikro İHA'lar gibi daha küçük ölçekli İHA'lar için tekrarlanan uçuş operasyonlarının devamlılığının sağlanabilmesi için şarj gerektiren görevlerde bir şarj istasyonuna otonom olarak iniş yapabilmesi veya faydalı yük teslimatı gibi görevler için otonom iniş yeteneğinin olması büyük önem taşımaktadır.

Kaynakların en verimli şekilde kullanılması ve insan hatasından oluşabilecek risklerin azaltılması amacıyla otonom sistemler ön plana çıkmıştır. İHA'nın otonom sistemleri içerisinde en zorlu bileşenleri arasında otonom kalkış ve iniş sistemleri yer almaktadır. Özellikle hareketli bir platforma iniş sağlamak, daha karmaşık ve hassas yetenekler gerektirir. Hareketli bir iniş platformunun kullanılması, İHA sistemindeki belirsizliğin ve başarısız iniş ihtimalinin artırmasına karşın, İHA'ların ve özellikle çok rotorlu İHA'ların uygulama alanını genişletmektedir. Bu iniş sistemleri, yüksek dayanıklılık, manevra kabiliyeti ve gelişmiş algoritmaların entegrasyonunu gerektirmektedir.

Hareket eden bir araca dikey kalkış ve iniş yapabilen bir İHA, görev alanlarının hedef konumlarına yakın alanlardaki teknelerden, trenlerden veya arabalardan kalkış ve iniş yapabilmektedir. Bu türden otonom uçuşlar, İHA'ların yeteneklerini, verimliliklerini artırır ve operasyonel menzillerini genişletir (Baca, vd., 2019). Ayrıca, bu tür bir otonom sistem, İHA'ların zorlu hava koşullarında veya sınırlı alanlarda güvenli ve etkili inişler yapabilmesine olanak sağlar. Bu bağlamda, otonom iniş sistemlerinin geliştirilmesi, İHA teknolojisinin geleceği için önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında, hareketli platformdan sağlanan GPS konumu ve İHA üzerindeki Atalet Ölçme Ünitesi'nden elde edilen oryantasyon bilgileri kullanılarak, uzak mesafedeki hareketli platformun yönü ve hızı doğrultusunda, platformun gidebileceği güzergâh üzerinde sürekli güncellenen bir buluşma noktasına yönelen ve hareketli platforma daha kısa bir yaklaşma yörüngesi oluşturan yenilikçi bir otonom İHA yönelim

sistemi geliştirilmiştir. Bununla birlikte iniş aşamasında, İHA'ların hareketli platforma klasik iniş prosedüründen farklı olarak, İHA buluşma noktasına yaklaştıkça irtifasını kademeli olarak azaltarak daha kısa sürede platforma inişini gerçekleştirmesini sağlayan bir iniş yörüngesi önerilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların, İHA'ların otonom iniş yeteneklerini geliştirerek, çeşitli endüstriyel ve ticari uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanı bulmalarına katkı sağlaması amaçlanmıştır.

1.1. Araştırma Problemi

Dört rotorlu İHA'larda otonom iniş aşaması, periyodik gözetim, keşif, nesne taşıma ve izleme gibi kullanım alanlarının genişlemesiyle birlikte önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Tamamen otonom görevler için önemli bir unsur olan iniş görevleri sayesinde operasyonda tekrarlanabilirlik sağlanabilmektedir. Bu otonom iniş sistemleri, İHA'nın ekipmanlar yardımı ile hareket eden bir platformun konumunu saptaması, platforma ulaşabilecek bir yörünge oluşturması ve bu platforma otonom olarak iniş yapabilmesini içermektedir. İniş platformu, kara aracının ve İHA'nın büyüklüğü göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Platformdan alınacak GPS verileri ile ulaşma menzili arttırılırken, platform üzerinde yer alan işaretçinin görsel nesne tespit yöntemi kullanılarak takip edilmesi inişin hassasiyetini arttırmaktadır. Dört rotorlu İHA'ların en önemli kısıtı, operasyonel uçuş sürelerinin kısa olmasıdır. Bu nedenle şarj olmak üzere hareketli kara aracına yönelen İHA'nın kısa süre içerisinde hareketli platforma yaklaşma ve inişini gerçekleştirmesi önemli bir araştırma problemi olarak ortaya çıkmaktadır.

1.2. Araştırmanın Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, çok rotorlu İHA'ların hareketli platformlara daha kısa yoldan, kötü hava şartları da göz önüne alınarak hassas bir şekilde yaklaşma ve iniş yapabilmesini sağlayacak yeni ve özgün bir otonom sistem geliştirmektir. Araştırma kapsamında, İHA'ların yangınlar, depremler gibi doğal afetlerde, enerji, imalat, lojistik, inşaat gibi geniş bir endüstri yelpazesinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için kalkış, seyrüsefer, nesne algılama ve iniş görevlerindeki operasyonel verimlilikleri arttırılmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada İHA'ların farklı endüstriyel ve acil durum uygulamalarındaki etkinliğini artırarak daha geniş bir kullanım alanına ulaşması amaçlanmıştır.

1.3. Araştırmanın Önemi

Otonom sistemler, özellikle otonom iniş sistemleri, İHA'ların enerji sınırlamaları nedeniyle uzun süreli operasyonlarda ve tekrarlanan faydalı yük sevkiyatlarında kritik bir

rol oynamaktadır. Hareketli platformlara otonom iniş, İHA'ların esnekliğini ve etkinliğini artırdığı için yıllardır birçok araştırmanın odak noktası olmuştur. Bu nedenle İHA'nın hareketli bir platform üzerine kısa yoldan yaklaşma ve iniş yapabilmesini sağlayacak yeni bir otonom sistemin geliştirilmesi önemli bir araştırma problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Geliştirilen yeni otonom sistem ile İHA'ların operasyonel kapasitesinin ve uygulama alanlarının genişletmesi hedeflenmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda, platformun tespiti genellikle sadece kamera ve işaretçi kullanılarak yapılmıştır (Borowczyk vd., 2017; Falanga vd., 2017; Feng vd., 2018; Baca vd., 2019; Qi vd., 2019; Xing vd., 2019; Lee vd., 2020; Nogar, 2020). Ancak bu yöntemler İHA'nın operasyon menzilini sınırlamakta, daha uzun menzilli ve hassas operasyonlar için yetersiz kalmaktadır (Paris vd., 2019).

Bu çalışmada geliştirilen sistem hem İHA'dan hem de hareketli iniş platformundan elde edilen GPS verilerinden yararlanarak menzil sınırlamasını ortadan kaldırmaktadır. GPS verileri ile sistem, daha uzun menzilli operasyonlarda etkin bir şekilde kullanılabilmekte ve platformun yönü ile hızı doğrultusunda sürekli güncellenen bir yörünge oluşturularak güvenli yaklaşma ve iniş sağlanmaktadır. Yörünge planlama aşamasında, minimum enerji kullanım prensibi benimsenmiştir. Bu sayede, İHA'lar mevcut enerji kapasiteleri ile daha uzun süre havada kalabilmekte ve daha fazla görev gerçekleştirebilmektedir.

Bu araştırma, İHA'ların otonom iniş yeteneklerini geliştirerek, çeşitli endüstriyel ve ticari uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanı bulmalarına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, literatüre önemli bir katkı sağlayarak, hareketli platformlara otonom iniş konusundaki yöntemleri ileriye taşımakta ve İHA'ların operasyonel kabiliyetlerini artıracak yeni yaklaşımlar sunmaktadır.

1.4. Sınırlılıklar

Hareketli platforma otonom iniş sistemi kapsamında, İHA'nın konumu ile kara aracının konumu arasındaki mesafe, kara aracının hızı ve dış ortam koşullarının oluşturabileceği dezavantajlı durumlar başlıca sınırlılıklardır. Çalışma, İHA'nın yetenekleri doğrultusunda araçlar arasındaki mesafe, hareketli platform hızı, platform genişliği ve belirli dış ortam koşulları (yan rüzgâr ve sisli hava) gibi kısıtlamalar altında gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda literatürde, İHA'lar için statik ve hareketli platformlara otonom inişle ilgili çalışmalar artmaktadır. Bu çalışmalar çoğunlukla benzetim ve laboratuvar ortamında yapılırken birkaçı ise dış ortamda, gerçek dünya koşullarında yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda model öngörülü kontrol, PID kontrolcüsü, Kalman filtresi gibi geleneksel yöntemlerin yanı sıra makine öğrenmesi yöntemlerinden Pekiştirmeli Öğrenme yöntemleri de kullanılmaktadır.

Jin vd, 2016, çalışmasında, literatürde yer alan görüntü tabanlı otonom iniş çalışmalarını incelemiş ve genel değerlendirme yapmışlardır. Otonom iniş süreçlerini gruplandırarak iniş platformu görüntüleme, iniş platformu durum tahmini ve kontrol algoritması olmak üzere üç temel bölüme ayırmışlardır. İniş platformu görüntüleme aşamasında düşük çözünürlüklü kamera, mini bilgisayar ve görüntü işleme algoritmaları kullanılmıştır. Durum tahminleme aşamasında kullanılabilecek olan ölçüm cihazlarının, ağırlık ve güç tüketimleri gibi olumsuz durumlarından bahsetmişlerdir.

Araar vd.,2017, geliştirdikleri hareketli platforma iniş sisteminde, platform konum tahmini için kamera ve işaretçi kullanmışlardır. Platform konum tahmininde kullanmak üzere Genişletilmiş Kalman filtresi (EKF) ve Genişletilmiş H-sonsuz algoritması tasarlamışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda EKF ile konum tahmininde daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Borowczyk, vd.,2017, uzun menzilli uçuşlar için bir gezinme kontrolörü, yakın mesafe için ise PID kontrolörü kullanmıştır. Sistemin merkezi bileşeni, görsel bir referans işaretleyiciyi takip eden kameralardan, kara aracından ve mikro İHA üzerinde bulunan seyrüsefer sisteminden alınan ölçümleri birleştirerek İHA'nın iniş pistine göre konumunu tahmin eden bir Kalman filtresinden oluşmaktadır.

Chen, vd.,2017, hareketli bir platformu takip etmek ve otonom iniş gerçekleştirmek için görüntü ve lazer mesafe ölçüm sensörü (Lidar) tabanlı yerleştirme algoritması uygulayan bir İHA üzerinde çalışmışlardır. Hareketli platforma önceden tasarlanmış bir işaretleyici yerleştirilmiş ve konum tahmini için İHA'ya aşağıya bakan bir kamera monte edilmiştir. Hassas bir irtifa tahmini için, doğru yüksekliği belirlemek ve iniş sırasında alçalma hızını tahmin etmek için bir lidar kullanılmıştır. GPS tarafından desteklenmeyen bir ortamda 1 m/s hızla hareketli bir platforma başarılı iniş gerçekleştirilmiştir. Ancak, mevcut sistem birkaç zorluk ve sınırlamalar içermektedir. Çalışmalarında, İHA yerleşik kameranın işaretçiyi görüş alanında tutamadığı durumlarda konum bilgilerini elde

edememektedir. Tamamen otonom devriye gezmek, izlemek ve iniş gerçekleştirebilmek için uçuş kontrol stratejisinin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, ani hızlanma veya yavaşlama durumlarında bir aracı izlemek için uçuş kontrolörünün ayarlanması zorunludur.

Falanga, vd.,2017, GPS sistemi kullanmadan görüntü işleme algoritmaları kullanarak hareketli bir platforma otonom iniş yapabilen bir İHA geliştirmişlerdir. İHA'nın konumunu tahmin etmek için, Ataletsel Ölçüm Biriminden (IMU) gelen verilerle birlikte EKF kullanılmıştır. İniş platformunun konumunu tahmin etmek için ise, kamera, işaretçi ve görüntü tabanlı konum tahmin yöntemlerinden Perspective-n-Points tekniği ile EKF kullanılmıştır.

Feng, vd.,2018, İHA'nın kamera ile dinamik modellenmesi, mobil platformun optimum yer tespiti için bir Kalman filtresinin uygulanması ve İHA'lara rehberlik etmek için model öngörülü kontrol algoritması geliştirmiştir. Gürültülü ölçümler ve rüzgar etmenlerini de dahil ederek 12 m/s'ye kadar hızda hareket eden bir mobil platformun merkezinden 37 cm'den daha az bir hata ile otonom iniş gerçekleştirilmiştir.

Yang, vd., 2018, GPS desteği olmayan bir ortamda hareketli bir insansız yer robotuna (UGV) otonom iniş yapabilen İHA tasarlamışlardır. Oluşturdukları sistemde bir tane balıkgözü lensli kamera ve bir tane stereo kamera bulunmaktadır. Balıkgözü lensli kameradan alınan görüntülerden iniş platformu saptanmakta, stereo kameradan alınan görüntülerden ise İHA'nın yükseklik tahmini yapılmaktadır. Tasarlanan sistemin özelliklerine göre, UGV ve İHA'nın aynı hareket durumunu sürdürmesini ve otonom inişe izin vermesini sağlamak için UGV hareket durumuna dayalı doğrusal olmayan bir kontrolör üretilmiştir. Önerilen sistemin performansını değerlendirmek için AirSim programında benzetim yaparak, gerçek dünya deneyleri tasarlamışlardır.

Polvara, vd.,2018, çalışmalarında pekiştirmeli öğrenme yöntemini kullanarak İHA'nın sabit işaretçi üzerine otonom inişi için sistem tasarlamışlardır. Sistem iniş yapacağı işaretçi tespiti ve dikey iniş için tasarlanmış iki ana modülden oluşmaktadır. Bu modüller farklı ortamlar ve ilgili gürültüler için eğitilmiştir. Araştırmacılar işaretçi tespiti ve dikey iniş aşamalarında, bu sistem aracılığıyla elde edilen başarı oranının insanlarla ve son teknoloji işaretçi tespit ediciler ile karşılaştırılabilir düzeyde başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Vankadari, vd., 2018, çalışmalarında Gazebo benzetim ortamında pekiştirmeli öğrenme yöntemi kullanarak İHA'nın bir dikdörtgen yörüngeyi takip etmesini

sağlamışlardır. Benzetim programı üzerinden eğittikleri İHA'yı gerçek ortamda denemişlerdir. İHA gerçek ortam hakkında herhangi bir ek bilgiye ihtiyaç duymadan ilgili görevi yerine getirmiştir.

Bir diğer çalışmada araştırmacılar, pekiştirmeli öğrenme yöntemi kullanarak Gazebo benzetim ortamında İHA'yı eğiterek hareketli platforma otonom iniş yapabilmesini sağlamışlardır. Eğitilen İHA gerçek ortamda benzer koşullar altında bu görevi başarmıştır. Dolaylı bir sonuç olarak araştırmacılar, robotların benzetim ortamında öğrenebileceği ve gerçek çalışma ortamlarında düzgün şekilde çalışabileceğini doğrulamışlardır (Rodriguez-Ramos, A., vd., 2019).

Biçer vd., 2019, çalışmalarında derin öğrenme yöntemlerinden DAgger algoritmasının otonom sistemlerde uygulanabilirliğini incelemişlerdir. F-16 savaş uçağının otonom iniş sırasında baş istikamet açısını, iniş pistini takip eden kameradan gelen görüntüye bakarak tahmin etmek üzere bir sinir ağı eğitmişlerdir. DAgger algoritması kullanılarak eğitilen sinir ağı test aşamasında yeterli performans göstererek sorunsuz bir şekilde piste inişi gerçekleştirmiştir.

Baca, vd., 2019, 90 m boyunda 60 m genişliğindeki bir saha içerisinde sonsuz işareti yörüngesi üzerinde hareket eden, önceden yaklaşık hızı ve yörüngesi bilinen hareketli platform üzerine otonom iniş yapabilen bir İHA geliştirmişlerdir. Platformun konumunu tahmin etmek için işaretçi, kamera ve Kalman filtresi kullanmışlardır. Konumu tahmin edilen platforma iniş için Model Öngörülü Kontrol algoritması ile yörünge oluşturulmuş ve bu yörüngeyi takip edebilmek için doğrusal olmayan kontrol yöntemi kullanılmıştır.

Paris, vd., 2019, geliştirdikleri otonom hareketli platforma iniş sisteminde, hareketli platformun konumu için görüntü tabanlı konum tahmin yöntemini, İHA'nın konumu için ise hareket yakalama sistemini kullanmışlardır. Konum bilgilerini kullanarak EKF yardımıyla platformun durum tahminini elde etmişlerdir. Konumu belirlenen platforma model öngörülü kontrol yöntemi kullanarak minimum sarsıntı prensibiyle yörünge planlamışlardır. İHA'nın oluşturulan yörünge ile iniş platformuna iniş yapabilmesi için doğrusal olmayan kontrol yöntemi kullanmışlardır.

Qi, vd., 2019, düşük maliyetli bir dört rotorlu İHA'nın hareketli bir platforma otonom inişi için bir çözüm geliştirmişlerdir. İlk olarak, İHA'nın dinamik modeli iniş görevi için tanımlanmış ve basitleştirilmiştir. Daha sonra, algılama algoritmasıyla ilişkili yeni bir iniş pisti, düşük maliyetli bir kamera ile algılama tasarlanmıştır. Yansıma etkisi ve ara sıra yanlış tanımlama ile başa çıkmak amacı ile göreceli konum tahmini için bir üç

boyutlu nokta kümesi algoritması önerilmiştir. İHA'nın düşük maliyetli sistem mimarisi ve deney sonuçları ile önerilen yöntemin etkinliği gösterilmiştir.

Xing, vd, 2019, 0,5 m/s hıza sahip hareketli platforma iniş yapabilen bir İHA geliştirmişlerdir. Platformun konumu hem kamera ve işaretçi hem de platformun tekerleklerinde yer alan sensörlerden gelen verileri birleştirerek EKF çıkışından elde edilmektedir. Minimum sarsıntı ilkesi ile iniş yörüngesi oluşturulmuştur.

Lee, vd.,2020, çalışmalarında bir GPS desteği olmadan görüntü tabanlı kontrol yöntemi kullanarak hareketli platforma otonom dikey kalkış ve iniş yapabilen İHA tasarlamışlardır. Mevcut yöntemlerde iniş platformunun üzerinde yatay bir konumda bulunan işaretçiyi, iniş platformunu daha uzak mesafeden görebilmek için platforma dikey olarak yerleştirmişlerdir. İşaretçiyi algılamak ve ardından İHA'nın yönünü ve iniş pistine olan mesafelerini tahmin etmek için tek bir kamera kullanan bilgisayarlı görme sistemi geliştirilmiştir. Hareket algılama yöntemlerinden Vicon'u kullanarak gerçek zamanlı mesafe ölçümlerinde bir santimetreden daha düşük doğrulukta ölçüm yapma yeteneği elde etmişlerdir. PID kontrol sistemi, görüş sistemine entegre edilmiş ve ardından Gazebo benzetim programında dört rotorlu bir İHA dinamik modelinde uygulanmıştır. Kontrolörün rastgele yörüngelerde hareket eden platformlarda izleme ve iniş elde etme becerisini göstermek için kapsamlı benzetimler yapılmıştır. Hem sabit hem de hareketli platformlar kullanılarak tekrarlanan uçuş testleri, 5 santimetreden daha az iniş hatasıyla gerçekleştirilmiştir.

Mohammadi, vd.,2020, çalışmalarında İHA'nın hareketli platforma otonom iniş sistemini geliştirmişlerdir. Platformun konum tahmini için GPS sistemi, işaretçi ve EKF kullanmışlardır. Tahmin edilen konuma Model Öngörülü Kontrol algoritması ile yörünge planlamışlardır. 15 km/s hız ile ilerleyen platformun merkezine 39 cm hata ile iniş yapmışlardır.

Nogar, 2020, çalışmasında, İHA'yı GPS veya harici konumlandırma sistemleri kullanılmadan hareketli bir platforma otonom iniş sistemi tasarlamıştır. Platformun konumunu tahmin edebilmek için kamera ve işaretçi kullanmıştır. Konum tahminleme hassasiyetini arttırmak için farklı büyüklükteki işaretçileri iç içe yerleştirmiştir.

Ciabatti, vd.,2021, çalışmalarında İHA'lar için pekiştirmeli öğrenme yöntemi kullanarak dünya dışı bilinmeyen arazi türlerine otonom iniş sorununu ele almışlardır. Sistemi pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinden Derin Deterministik Politika Gradyanı (DDPG) algoritması kullanarak dünya üzerinde çeşitli arazi şekillerinde eğitmişlerdir.

Eğitilen İHA, benzetim ortamında NASA tarafından sağlanan ay yüzeyine başarılı bir şekilde iniş gerçekleştirmiştir.

Cui, vd., 2023, çalışmalarında hareketli bir platforma iniş yapabilen bir İHA geliştirmişlerdir. İniş sistemi, gelişmiş görsel konumlandırma yaklaşımı kullanılarak kabadan inceye bir stratejiyle çalışmaktadır. Özel tasarlanmış bir QR kod ile işaretlenmiş iniş platformu YOLOv5 ile İHA tarafından platformun uzak mesafeden tanınması sağlanmıştır. Kalman filtresi kullanılarak QR kodundan ve atalet ölçüm ünitesinden gelen veriler birleştirilmiştir. Çalışma farklı ortam ve ışık koşullarında yapılmış ve ortalama iniş hatası 11,5 cm olarak ölçülmüştür. Geliştirilen sistem, RTK-GPS sinyalleri olmadan da yüksek doğrulukla çalışabilmektedir.

Bouaiss, vd., 2023, çalışmalarında en az sarsıntı prensibi ile yörünge takibi, Model Öngörücü Kontrol (MPC) ile parametrik belirsizlikler ve dış etkenler göz önüne alınarak hareketli bir platforma otonom iniş yapabilen bir döner kanat İHA geliştirmişlerdir. İniş platformu tespiti için kamera kullanılmıştır. ArUco işaretleyicileri kullanılarak iniş platformunun konumu farklı irtifa ve açılarda tespit edilmiştir. Konum tahmini için EKF gözlemcisi kullanarak İHA'nın durum vektörü ve sensörlerden gelen veriler kullanılmıştır.

Aoki ve Ishigami 2023, çalışmalarında, bir İHA'nın engebeli arazide hareket eden bir kara aracına otonom olarak iniş yapabilmesi için görsel ve IMU verilerini, EKF ile birleştirilerek araçlar arasındaki göreceli konum tahmini yapmışlardır. Benzetimlerinde, önerilen yöntem ile bir İHA'nın engebeli arazide hareket eden bir kara aracını doğru bir şekilde takip etmesini ve 1.0 m/s hız ile %100 başarı oranı ile iniş yapabilmesini sağlamışlardır. Ayrıca, kara aracı 3.0 m/s hızla hareket ettiği durumda %50 başarı oranı ile iniş yapabilmektedir.

Tablo 2.1'de mevcut çalışmalarda platform hızı, platformu algılama yöntemleri, platform durum tahmini, yörünge planlama ve kontrol algoritmalarında kullanılan yöntemler verilmiştir.

Tablo 2.1. *Mevcut çalışmalarda kullanılan yöntemler*

Çalışma	Platform		Algılama Yöntemi	Platform Durum Tahmincisi	Yörünge Planlama	Kontrol Algoritması
	Hızı	(km/s)				
Araar vd.,2017	2		AprilTag, Kamera	EKF	Perspective-n-Point (PnP)	PID
Borowczyk vd.,2017	50		AprilTag, Balık gözü Kamera	EKF	Proportional Navigation (PN)	PD
Falanga, vd., 2017	7,2		Kamera İşaretçi	EKF	Perspective-n-Point (PnP), EKF	Nonlinear control
Feng vd.,2018	43 (Sim)		AprilTag, Gimbal Kamera	EKF	Model Öngörülü Kontrol	
Baca vd.,2019	15		İşaretleyici ve Kamera	EKF	Model Öngörülü Kontrol	Nonlinear Control
Paris vd., 2019	4,7		Hareket Yakalama Sistemi	EKF	Model Öngörülü Kontrol	Nonlinear Control
Qi vd.,2019 (Indoor)	1,8 (Sim)		Düşük Bütçeli Kamera	3D PCA		Backstepping Position Controller
Xing, vd., 2019	3,6		İşaretçi ve Kamera	EKF	Minimum Sarsıntı	
Lee vd., 2020	30		Gimbal Kamera, İşaretleyici	FCD	Perspective-n-Point Estimation Algorithm	PID
Mohammadi, vd., 2020	15		GPS + AprilTAG	EKF	Model Öngörülü Kontrol	
Nogar, 2020	9		Kamera	PX4 State Estimator		PID

3. İHA'LARDA KÜRESEL VE YEREL KONUMLANDIRMA

İHA'ların dünya üzerindeki hareketlerini ve yönelimlerini doğru bir şekilde belirlemek, kararlı bir şekilde uçuşlarını gerçekleştirebilmeleri ve hareketli bir platforma güvenli iniş yapabilmeleri açısından kritik öneme sahiptir. Bu süreçte koordinat sistemleri, İHA'ların konumunu ve hareketlerini tanımlamak ve analiz etmek için temel yapı taşlarıdır. İHA gövde koordinat çerçevesi, aracın kendi eksenlerine göre tanımlanan bir referans sistemi olarak, Euler açıları ve kuaterniyonlar gibi kavramlarla yönelim ve rotasyonel dinamiklerin modellenmesinde önemli bir rol oynar. Bu sistemler, İHA'ların uçuş performansını analiz etmek, kontrol algoritmalarını geliştirmek ve farklı görevleri etkin bir şekilde yerine getirmek için gereklidir.

3.1. Koordinat Sistemleri ve Gösterimi

Bu bölümde, İHA'ların ve diğer robotik sistemlerin uzaydaki konumlarını ve oryantasyonlarını anlamak ve takip etmek için kullanılan koordinat sistemleri ve gösterim yöntemleri verilecektir. Koordinat sistemleri, bir nesnenin veya aracın dünya üzerindeki pozisyonunu belirlemek için temel bir referans sağlar. Bu referans sistemlerinin doğru bir şekilde anlaşılması ve uygulanması, İHA'ların navigasyon, yönlendirme ve kontrol süreçlerinde kritik öneme sahiptir.

3.1.1. Koordinat sistemleri

Havacılık uygulamalarında yörüngelerinin modellenmesi, uçağın veya uzay aracının dönen Dünya'ya göre konumlandırılmasını ve yönlendirilmesini gerektirmektedir. Koordinat sistemleri, Dünya'nın merkezine ve yüzeyine göre tanımlanır. Temelde Uzay Sabit ve Yer Sabit koordinat sistemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Yer Merkezli İnertiyel (Earth-Centered Inertial ECI) koordinat sistemi yeryüzünün dönüşünden bağımsız olarak yıldızlara göre sabit inertiyel bir koordinat sistemidir. Uydu yörüngelerinin belirlenmesinde ve uydu koordinatlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır (Oktal ve Yaman,2019).

Yer Merkezli Yer Sabit (Earth-Centered, Earth-Fixed ECEF) koordinat sistemi ECI koordinat sisteminde olduğu gibi orijini yeryüzü merkezine sabit, fakat ECI'den farklı olarak yeryüzünün dönüşüne bağlıdır. Yeryüzünde bir noktanın koordinatlarını ölçmek için ECEF koordinat sistemi kullanılmaktadır (Grewal, MS. Vd, 2007).

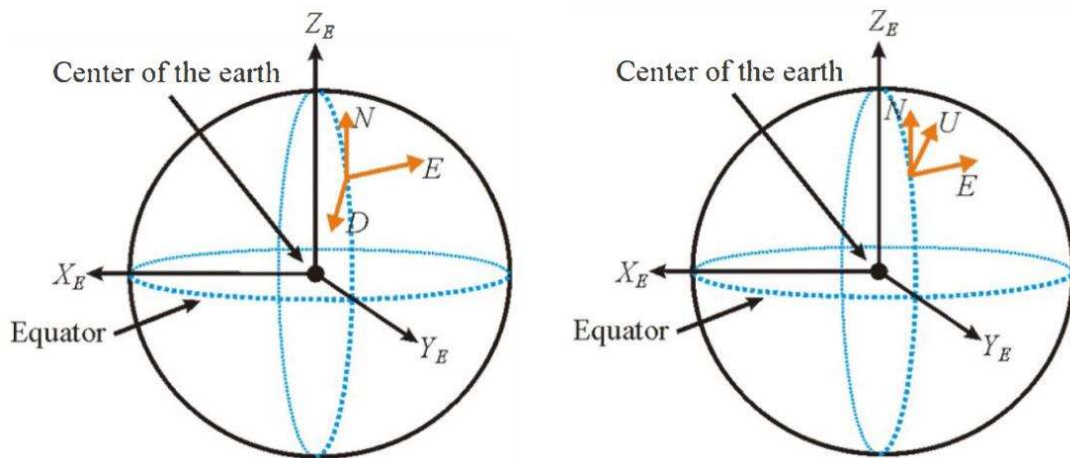
3.1.2. Yerel teğet düzlem koordinatları (LTP)

LTP (Local tangent plane coordinates) yerel elipsoid, yerel jeodezik koordinat sistemi veya yerel dikey, yerel yatay koordinatları (LVLH) olarak da bilinmektedir. Yerel dikey yön ve Dünya'nın dönme eksenini tarafından tanımlanan teğet düzleme dayalı bir uzaysal koordinat sistemidir. Kuzey(N), Doğu(E) ve dikey olmak üzere üç eksen oluşmaktadır. Sağ el koordinat sistemini kullanan Doğu, Kuzey, Yukarı (ENU) koordinatları ve Kuzey, Doğu, Aşağı (NED) koordinatları olmak üzere iki tipi bulunmaktadır (Grewal, MS. Vd, 2007).

Kuzey, Doğu, Aşağı koordinat sistemi, orijini uçak veya uzay aracı ağırlık merkezine sabitlenmiş inersiyel bir koordinat sistemidir. X eksenini kuzeyi (ileri), Y eksenini doğuyu (sol) ve Z eksenini aşağıyı göstermektedir. Sabit bir irtifada uçmak, Dünya yüzeyinin üzerinde sabit bir Z seviyesinde uçmak anlamına gelmektedir.

Doğu-Kuzey-Yukarı koordinat sistemi ise rotasyonları farklı olmak şartı ile NED sistemiyle aynı prensibe dayanmaktadır. X eksenini doğuyu (solu), Y eksenini kuzeyi (ileri), Z eksenini ise yukarıyı göstermektedir. NED ve ENU koordinat sistemlerinin gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.

Havacılık uygulamalarında NED koordinat sisteminin ENU koordinat sistemine göre daha çok tercih edildiği gözlenmiştir. Bunun nedeni ise bu koordinat sisteminin, hava araçlarının gövde eksenini ile ilişkisine dayandırılmaktadır. Ancak çoğu ROS uygulaması yer robotları ile yapıldığından ROS, ENU sistemini kullanmaktadır.



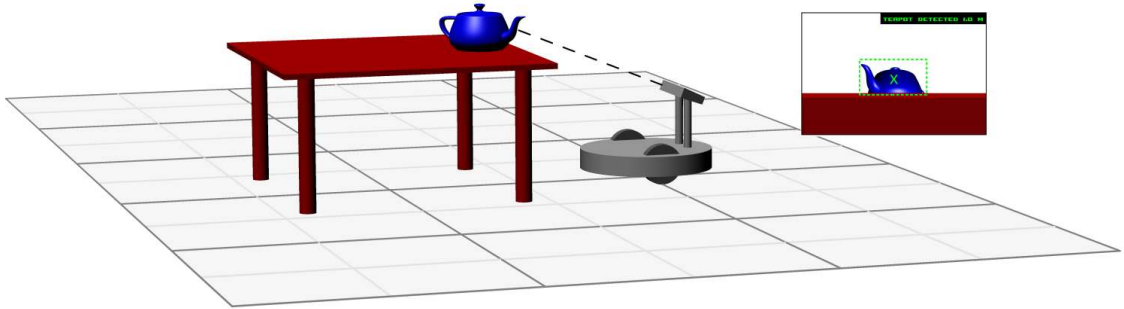
Şekil 3.1. NED koordinat sistemi (solda) ve ENU koordinat sistemi (sağda) gösterimi (Huang, Y.H.,2015)

3.1.3. Koordinat çerçeveleri

Robotik programlamada, uzaydaki nesnelerin konumlarını ve oryantasyonlarını takip etmek önemli bir konudur. Bu durumu açıklamak için üretilen senaryoda, robottan mavi çaydanlığı bulması ve konumunu kullanıcıya bildirmesi istenmektedir. Robotun görüş sistemi, bir metre mesafedeki kameranın hemen önünde bulunan çaydanlığı tespit edip "Çaydanlık Kameranın Bir Metre Önünde" mesajını kullanıcıya iletmesi yeterli olmamaktadır. Kullanıcı için, çaydanlığın odanın neresinde bulunduğu bilgisi daha önemlidir. Bu bilginin sağlanabilmesi için aşağıdaki unsurların her birinin bilinmesi gerekmektedir.

1. Çaydanlığın kameraya göre konumu.
2. Robotun konumuna göre kameranın konumu ve yönü.
3. Robotun odadaki konumu.

1. ve 3. maddelerdeki bilgiler elde edildikten sonra bir genel çerçeve oluşturulmalı ve nesnelerin birbirine göreceli konumları belirtilmelidir. Bu durumda, kameranın konumuna göre tanımlanan bir referans çerçevesinden "Çaydanlık Kameranın Bir Metre Önünde" mesajından ziyade, odaya göre tanımlanan sabit bir referans çerçevesine göre "Çaydanlık Odanın Güney-Batı Köşesine Yakındır" mesajı kullanıcı için daha anlamlı hale gelmektedir (Görsel 3.1).

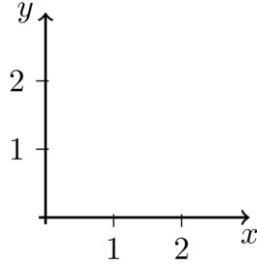


Görsel 3.1. Robot ve çaydanlığın konum gösterimi (Molloy,2020)

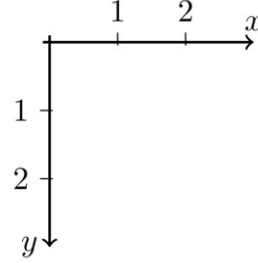
3.1.4. Dik koordinat sistemleri

Çalışmalarda çoğunlukla Şekil 3.2'de gösterilen iki boyutlu koordinat sistemi kullanılmaktadır. Bu varyasyonda, pozitif x eksenini yatay olarak ve pozitif y eksenini dikey olarak çizilir; orijin ise sol alt köşede olacak şekilde 90° ile çakıştırılır. Bu koordinat sistemini farklı şekillerde çizmek de mümkündür. Örneğin, bilgisayar ekranlarında

kullanılan koordinat sisteminde olduğu gibi, başlangıç noktası Şekil 3.3'te görüldüğü üzere sol üst köşeye yerleştirilebilir.

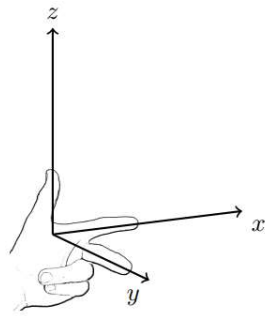


Şekil 3.2. Orijin sol altta çakışık

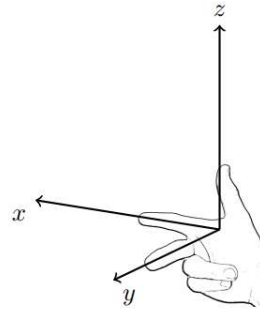


Şekil 3.3. Orijin sol üstte çakışık

Üç boyutlu koordinat sistemi ise birbirine dik üç eksenenden oluşmaktadır. Bu sistemdeki bir nokta, üç eleman ile tanımlanmaktadır. Üç boyutlu koordinat sisteminde, iki boyutlu koordinat sisteminden farklı olarak eksenlerin nasıl düzenlendiğine göre Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterildiği gibi temelde uyumsuz iki koordinat sisteminden herhangi birisi kullanılmaktadır. Bu durumu ifade etmek üzere eksen değerlerinin büyüme yönlerine göre sağ el sistemi ve sol el sistemi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.



Şekil 3.4. Sol el koordinat sistemi



Şekil 3.5. Sağ el koordinat sistemi

Sağ el koordinat sisteminde, sağ elin işaret parmağı pozitif x eksenini boyuncaya hedeflenir ve avuç içi pozitif y eksenine doğru kıvrılarak z ekseninin yönü belirlenir. Başparmağın yönü ise pozitif z yönünü göstermektedir. Sol el koordinat sistemi için sol el ile aynı prosedür izlenmektedir.

Bu iki koordinat sistemini birbiri ile hizalanacak şekilde döndürmenin bir yolu bulunmamaktadır. Bu sebeple üç boyutlu koordinatları temsil etmenin iki farklı yolu vardır. Kullanılması gereken evrensel bir kural olmamasına rağmen robotikte tercihen sağ el yöntemini kullanan sistemler daha yaygındır.

Ayrıca dönme yönünü tanımlamak için bir tercih yapılması gerekmektedir. Sağ el kuralı göz önüne alındığında, bir eksen etrafındaki pozitif dönüş yönünün belirlenebilmesi için ilk önce sağ elin başparmağı söz konusu eksenin büyüme yönüne doğru olmalıdır. Daha sonra ise diğer parmaklar eksen etrafında pozitif dönüş yönünde kıvrılacaktır. Bu ifade, Şekil 3.6’da gösterilmektedir.



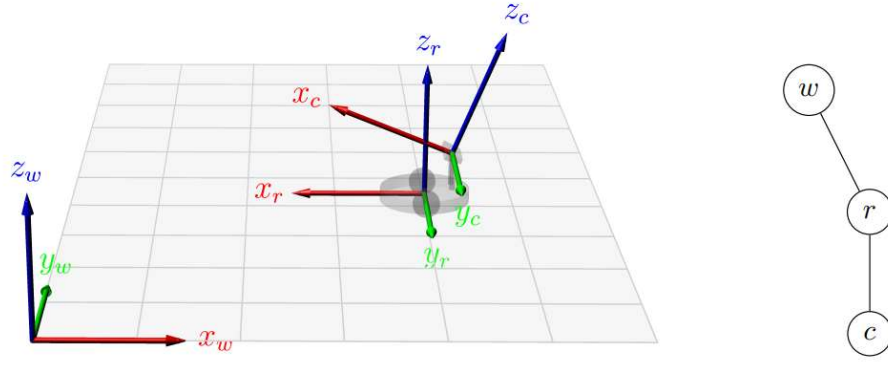
Şekil 3.6. Sağ el kuralı kullanılarak bir eksen etrafındaki pozitif dönüşlerin yönü

3.1.5. Pozlar ve koordinat çerçeveleri

Bir nesnenin uzaydaki konumu ve oryantasyonu, pozu olarak adlandırılmaktadır. Bir nesnenin pozu her zaman bağlı olduğu koordinat çerçevelerine göre yapılmalıdır. (0, 0, 0) noktasının nerede olduğu ve üç eksenin hangi yönü gösterdiği bilinmediği süreç, çaydanlığın (-2, 2.2, 1.6) konumunda olduğunu bilmek anlamlı bir ifade oluşturmamaktadır (Molloy,2020).

Robotikte, çoğunlukla çoklu koordinat çerçevelerini takip etmek gerekmektedir. Şekil 3.6’da yukarıda verilen çaydanlık senaryosu ile ilgili üç koordinat çerçevesi verilmiştir. “Dünya” koordinat çerçevesi w alt simgesiyle gösterilmiştir. Bu koordinat çerçevesi, uzayda bilinen bir konuma sabitlenir ve zaman içinde hareket etmeyeceği varsayılmaktadır. “Robot” koordinat çerçevesi, r alt simgesiyle gösterilmiştir. Bu koordinat çerçevesinin robotun tabanına bağlı olduğu bilinmelidir. Böylece robot hareket ettikçe çerçevenin de orijini hareket etmektedir. Başka bir deyişle, robot kendi koordinat çerçevesinde her zaman (0, 0, 0) konumunda bulunmaktadır. Benzer şekilde, “Kamera” koordinat çerçevesi c alt simgesiyle gösterilmekte ve kameraya eklenmektedir.

Çoğu uygulamalarda olduğu gibi Şekil 3.7’de x eksenini kırmızı, y eksenini yeşil ve z eksenini mavi olarak belirtilmiştir. Robotlar (ve diğer birçok nesne), “ileri”, “sol” ve “yukarı”ya karşılık gelen doğal bir yön notasyonuna sahiptir ve sırasıyla pozitif x , pozitif y ve pozitif z ’ye karşılık gelmektedir.



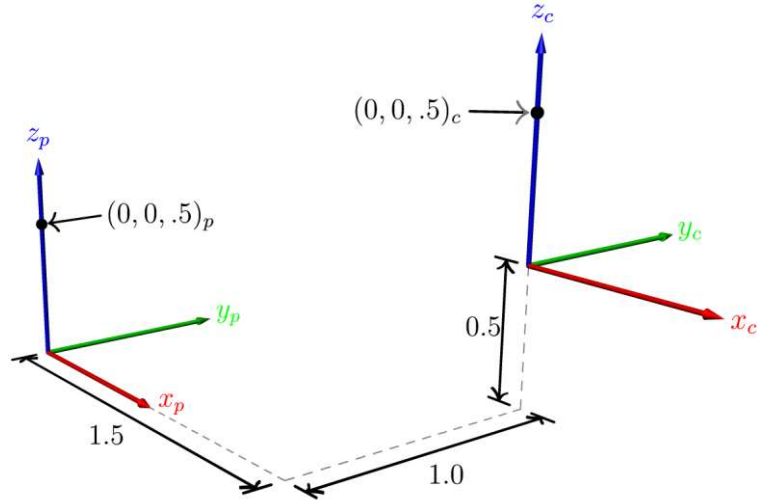
Şekil 3.7. Çaydanlık senaryosunun üç koordinat çerçevesi ve ilişki ağacı (Molloy, 2020)

Bu üç koordinat çerçevesi, “dünya” koordinat çerçevesi kök olmak üzere bir ilişki ağacı olarak tanımlanabilmektedir. Ağaçtaki her kenar, ana koordinat çerçevesine göre belirli bir koordinat çerçevesinin pozunu temsil etmektedir. İdeal olarak, bu ağaç yapısı fiziksel bağlantıları yansıtmalıdır. Bu durumda kameranın pozunu robotun koordinat çerçevesinde tanımlamak gerekmektedir. Çünkü ikisi fiziksel olarak birbirine bağlıdır ve kamera robotla birlikte hareket etmek üzere sınırlandırılmıştır. Robot hareket ettiğinde, yalnızca robot koordinat çerçevesinin pozunu güncellemek gerekirken, kamera robota göre sabit kalmaktadır.

Koordinat çerçevelerinin ilişkisinden yola çıkarak, herhangi iki koordinat çerçevesi arasındaki bir noktayı çevirmek mümkün olmaktadır. Örneğin, kamera koordinat çerçevesinde çaydanlığın koordinatları verildiğinde, çaydanlığın koordinatları robot koordinat çerçevesinde ve ardından oda koordinat çerçevesinde belirlenebilmektedir.

3.1.6. Koordinat çerçevelerinde öteleme

Bir nesnenin (veya bir koordinat çerçevesinin) pozunu, ana koordinat çerçevesine göre hem konumunu hem de oryantasyonunu içermektedir. Şekil 3.8’de bir öteleme ile ayrılmış iki koordinat çerçevesi gösterilmektedir. Bu örnekte, alt koordinat çerçevesi, ana koordinat çerçevesinde (1.5, 1.0, 0.5) konumunda bulunmaktadır. Bir nokta veya pozla ilişkili koordinat çerçevesini belirtmek için alt simgeleri kullanılmaktadır. Örneğin (0, 0, 0.5)_c, alt koordinat çerçevesindeki (0, 0, 0.5) noktasına atıfta bulunmaktadır. Koordinat çerçeveleri bir öteleme ile ayrıldığında, çerçeveler arasındaki dönüşüm için üç koordinat ofsetinin toplanması veya çıkartılması gerekmektedir. Örneğin, (0, 0, 0.5)_c noktası ana koordinat çerçevesinde $(0+1.5, 0+1.0, 0.5+0.5) = (1.5, 1.0, 1.0)$ konumunda bulunmaktadır.



Şekil 3.8. Ana koordinat çerçevesi p ve onun ötelenmiş alt koordinat çerçevesi c gösterimi (Molloy, 2020)

Ana koordinat çerçevesinden alt koordinat çerçevesine geçmek için toplamak yerine çıkartılması gerekmektedir. $(0, 0, 0.5)_p$ noktası, çerçeveler arasındaki öteleme miktarları göz önüne alındığında alt çerçevede $(-1.5, -1.0, 0)$ konumunda bulunmaktadır.

3.2. İHA’larda Yönelim Belirleme Yöntemleri

İHA’nın doğru yönlendirilmesi ve konumlandırılması, hassas ve güvenilir yöntemler gerektirir. Bu bölümde, İHA’ların yönelimini belirlemek için kullanılan çeşitli yöntemler ele alınmaktadır. Her bir yöntem, İHA’nın konum ve oryantasyonunu farklı matematiksel ve fiziksel temellere dayanarak tanımlar ve hesaplar.

3.2.1. Euler açıları

Oryantasyon, bir nesnenin uzaydaki belirli bir referans noktasına göre hangi yöne baktığını veya yöneldiğini gösterir. Bu yönelimi tanımlamak için birçok yöntem geliştirilmiştir. Üç boyutlu uzayda oryantasyonu tanımlamak, bir nesnenin sadece konumunu belirtmekten daha zordur. Çünkü yönelimin üç farklı eksen etrafındaki rotasyonlarını dikkate almak gerekir. Bu yöntemlerin her biri, belirli senaryolarda daha kullanışlı veya avantajlı olabilirken, bazı durumlarda ise sınırlamalara sahiptir. Örneğin, bazı yöntemler hesaplama açısından daha basit olabilirken, diğerleri daha fazla doğruluk veya stabilite sağlayabilir. Bu nedenle, oryantasyonu doğru ve etkili bir şekilde tanımlamak için kullanılan yöntemin seçimi, uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak değişebilir. Bu yöntemler arasında Euler açıları, en sezgisel olanıdır ve yaygın olarak kullanılır. Euler açıları, üç koordinat eksenini etrafında gerçekleştirilen üç ardışık dönüş

rotasyonu dizisi ile oryantasyonu ifade eder. Bu dönüşler, geleneksel olarak roll (yatış ϕ), pitch (yunuslama θ) ve yaw (sapma ψ) olarak adlandırılmaktadır.

Euler açıları ile yönelim belirlerken, dönüşlerin uygulanacağı sıranın belirtilmesi zorunludur. Örneğin, X eksen etrafında yapılan 90° 'lik bir dönüşü takiben Y eksen etrafında yapılan 90° 'lik bir dönüş, Y eksen etrafında yapılan 90° 'lik bir dönüşü takiben X eksen etrafında yapılan 90° 'lik bir dönüş ile aynı yönelimi sağlamaz. Ayrıca, dönüşlerin ana koordinat çerçevesine göre mi yoksa her dönüşten sonra oluşan yeni koordinat çerçevesine göre mi gerçekleştirildiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bilgi, doğru yönelimin elde edilmesi için hayati öneme sahiptir. Dolayısıyla, Euler açıları, oryantasyon problemlerinin çözümünde güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır.

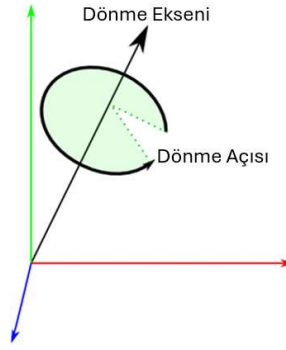
3.2.2. Kuaterniyonlar

Oryantasyon gösterimi için yaygın kullanılan yöntemlerden birisi de kuaterniyon gösterimidir. Kuaterniyonlar ve eksen-açı gösterimi arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Θ ve $[k_x, k_y, k_z]^T$ bir oryantasyonun eksen-açı temsilini tanımlar iken kuaterniyon gösterimi ise dört boyutlu (x, y, z, w) olarak gösterilmektedir. Bu açılar aşağıda verilen eşitlikler ile elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} x &= k_x \sin \frac{\Theta}{2} \\ y &= k_y \sin \frac{\Theta}{2} \\ z &= k_z \sin \frac{\Theta}{2} \\ w &= \cos \frac{\Theta}{2} \end{aligned} \tag{3.1}$$

x, y ve z bileşenleri orijinal dönme eksenleriyle aynı yönü, w ise eksen etrafında dönme açısını göstermektedir (Şekil 3.9). Yukarıda verilen eşitlikler ile oluşturulan bir kuaterniyon, aynı zamanda bir birim kuaterniyon olarak da adlandırılmaktadır ve aşağıda verilen eşitliği sağlamaktadır.

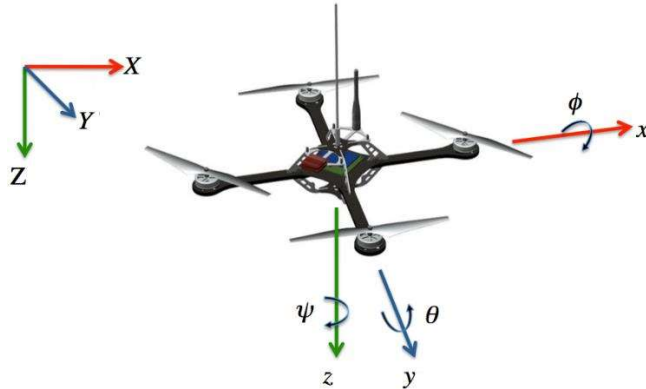
$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + w^2} = 1 \tag{3.2}$$



Şekil 3.9. Kuaterniyon gösterimi

3.2.3. İHA gövde çerçevesi

Dünya Koordinat Sistemi, sabit ve hareketsiz bir koordinat sistemi olarak kabul edilir ve İHA'nın genel pozisyonu ile yönelimini değerlendirmek için kullanılabilir. Gövde Çerçevesi, İHA'nın merkeziyle birlikte hareket eden ve İHA'nın kendisine sabit olan bir koordinat sistemidir. İHA'nın anlık hız ve ivme değerleri bu koordinat sisteminde ölçülür. Gövde çerçevesinin orijini, İHA'nın kütle merkezinde bulunmaktadır. Bu çerçeve, NED (North-East-Down) koordinat sistemi yapısına sahiptir. X eksenini İHA'nın burnunu, Y eksenini sağ kanadını ve Z eksenini ise XY düzlemine dik olarak aşağıyı göstermektedir. Gövde çerçevesindeki hareketlerin dünya koordinat sistemi ile ilişkilendirilmesi için Euler açıları (η) kullanılır (Görsel 3.2). Bu açılar, İHA'nın oryantasyonunu belirlemede ve İHA'nın gövde çerçevesi vektörlerini dünya koordinat sistemine çevirmek için gereken dönüşüm matrisi (R)'nin oluşturulmasında temel alınır. İHA'nın dünya koordinat sistemindeki konum vektörü (p), İHA'nın anlık pozisyonunu tanımlar ve hareketlerini doğru bir şekilde analiz etmek ve konumunu değerlendirmek için kritik bir öneme sahiptir.



Görsel 3.2. İHA üzerinde Euler açılarının gösterimi

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

x : İHA'nın dünya koordinat sistemindeki yatay (doğu-batı) eksenindeki konumu.

y : İHA'nın dünya koordinat sistemindeki dikey (kuzey-güney) eksenindeki konumu.

z : İHA'nın dünya koordinat sistemindeki irtifa (alt-üst) eksenindeki konumu.

$$\eta = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ϕ (Roll): İHA'nın x eksenini etrafında yaptığı dönüş açısı.

θ (Pitch): İHA'nın y eksenini etrafında yaptığı dönüş açısı.

ψ (Yaw): İHA'nın z eksenini etrafında yaptığı dönüş açısı.

Dönüşüm matrisleri sırayla roll (ϕ), pitch (θ) ve yaw (ψ) açıları için oluşturulur.

Roll (ϕ) Dönüşüm Matrisi: Roll açısı, x eksenini etrafındaki dönüşü ifade eder:

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Pitch (θ) Dönüşüm Matrisi: Pitch açısı, y eksenini etrafındaki dönüşü ifade eder:

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Yaw (ψ) Dönüşüm Matrisi: Yaw açısı ψ , z eksenini etrafındaki dönüşü ifade eder:

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Dönüşüm matrisi R , yukarıdaki üç dönüşüm matrisinin çarpımı ile elde edilir. Dönüşümler sırayla yaw (ψ), pitch (θ) ve roll (ϕ) açıları için uygulanır. Bu dönüşüm matrisi R , gövde çerçevesinden dünya koordinat sistemine dönüşümü sağlar.

$$R = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi) \quad (3.8)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.2.4. Euler açıları ve açısal hız ilişkisi

İHA gibi dinamik sistemlerin anlaşılması ve kontrol edilmesi, bu sistemlerin gövde çerçevesinde gerçekleşen hareketlerin ve açısal hızların hassas bir şekilde modellenmesini zorunlu kılar. Gövde çerçevesindeki açısal hızlar, İHA'nın uzaydaki konumunu ve yön değişimlerini doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılır, dolayısıyla İHA'nın performansını ve kararlılığını doğrudan etkiler.

Bu çerçevede açısal hızlar, İHA'nın hareketine yönelik kritik parametreler olarak kabul edilir. Açısal hızların doğru bir şekilde ölçülmesi ve modellenmesi, İHA'nın navigasyon sistemlerinin hassasiyetini ve yanıt verme kabiliyetini artırır. Bu sayede, İHA'nın dinamik tepkileri optimize edilir ve görevleri sırasında karşılaşılabileceği anormal durumlara karşı daha etkili bir kontrol mekanizması sağlanır. Gövde çerçevesi sisteminde Açısal Hız Vektörü (ω), İHA'nın gövde çerçevesindeki açısal hızlarını ifade eder.

$$\omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Burada p, q, r ırasıyla İHA'nın gövde çerçevesinde bulunan x, y, z eksenleri etrafındaki açısal hızları belirtmektedir. Euler açıları (ϕ, θ, ψ) ve gövde çerçevesindeki açısal hızlar (p, q, r) arasındaki bu ilişkiyi temsil eden matris, genellikle dönüşüm matrisleri veya Jacobi matrisleri olarak adlandırılır.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Burada $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$: Sırasıyla Roll, Pitch ve yaw açısının zamanla değişimini gösterir. Bu matris, gövde çerçevesindeki açısal hızları Euler açıları cinsinden ifade eder.

4. YÖNTEM

Bu bölümde dört rotorlu İHA'nın hareketli platforma inişi için otonom sistemin tasarım aşamaları ve bu aşamalarda kullanılan yöntemler verilmiştir.

4.1. Operasyon Süreçleri

Dört rotorlu İHA'nın hareketli bir platforma otonom iniş sürecinde hareketli platform ile haberleşme sağlanması, konum bilgilerinin alınması, hızının ve doğrultusunun tahmin edilmesi, takip edilmesi ve inişine yönelik bir sistem planlanmıştır. Otonom iniş sistemi aşağıdaki dört aşamadan oluşmaktadır.

I- Konum Saptama: Dört rotorlu İHA'nın yeryüzü üzerinde küresel konum belirleme sistemi GPS ile konumunun algılanması,

II- İniş Platformu Konum Saptama: İniş yapılacak platformun önceki aşamada belirtilen yöntemler aracılığıyla konumunun saptanması,

III- Buluşma Konumu Yörünge Oluşturma: Hareketli platformun ve dört rotorlu İHA'nın hızı, doğrultusu ve aralarındaki mesafe baz alınarak bir buluşma noktası belirlenip bu yörünge doğrultusunda rota oluşturulması ve bu süreçte platformun doğrultusu ve hızının takip edilmesi,

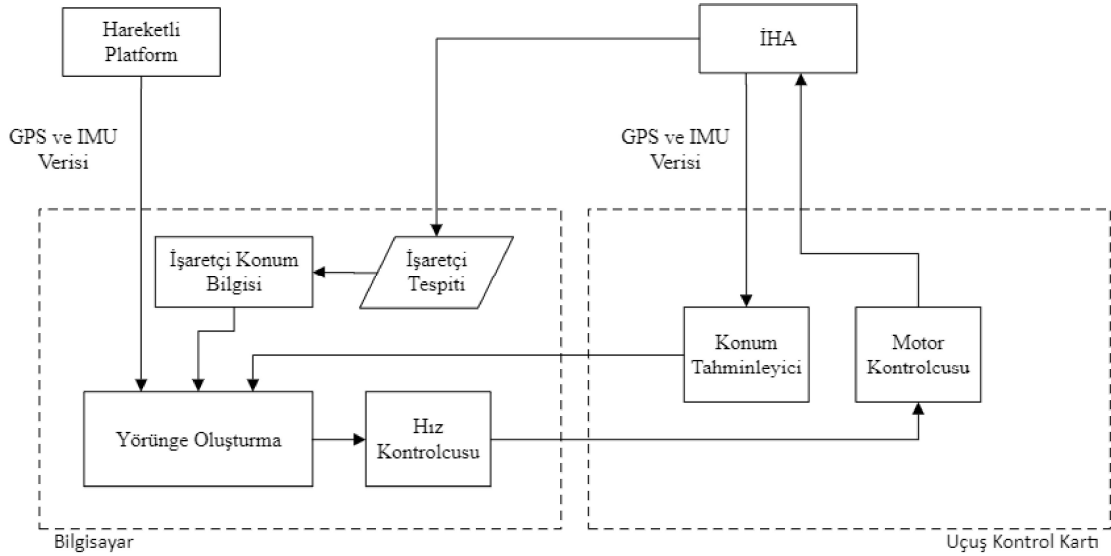
IV- Hassas İniş: Görüntü tabanlı ve işaretçi kullanarak İHA'nın hareketli platform üzerine inişini tamamlaması.

4.2. Sistem Tasarımı

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde GPS kullanılmayan durumlarda İHA'nın iniş hedefinin yerinin belirlenmesi için platform üzerinde işaretçi ve kamera kullanıldığı görülmektedir. GPS kullanılan çalışmalarda ise IMU, GPS, işaretçi ve kamera bir arada kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında, uçuş menzilinin genişletilmesi amacıyla hem hareketli platformun hem de İHA'nın IMU ve GPS verileri kullanılmış, hassas iniş aşaması için ise hareketli platform üzerindeki H işaretçisi ve bu işaretçiyi tespit etmek için İHA'nın alt yüzeyinde bulunan yere bakan kamera tercih edilmiştir. Geliştirilen hareketli platforma iniş sistemi, İHA üzerine yerleştirilmiş uçuş kontrol kartı ve bilgisayar olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Bu bileşenler, sensörler ve kontrol mekanizmaları ile entegre edilerek İHA'nın güvenli bir şekilde hareketli platforma iniş yapmasını sağlamaktadır.

Uçuş kontrol kartı üzerindeki konum tahminleyici, İHA'nın GPS ve IMU (Inertial Measurement Unit) sensörlerinden gelen verileri işleyerek İHA'nın konumunu belirler. Elde edilen konum bilgileri, yörünge oluşturulması amacıyla ve kamera görüntüleri ise H işaretçisinin tespiti için İHA'nın üzerinde bulunan bilgisayar bileşenine kablo bağlantısı aracılığı ile aktarılır. Uçuş kontrol kartındaki motor kontrolcüsü, İHA'nın motorlarını yöneterek istenilen konumda kalmasını veya belirlenen rotada hareket etmesini sağlar. Ayrıca, iniş algoritması tarafından verilen komutlar doğrultusunda İHA'nın iniş işlemleri de koordine edilir.

Bilgisayar bileşeni, hareketli platformun ve İHA'nın konum ve oryantasyon bilgilerini toplayarak iniş aşaması için yörünge oluşturur. Eğer H işaretçisi tespit edilirse, işaretçinin konum bilgisi de hesaplanır ve bu konum bilgisi, mevcut verilere eklenerek daha hassas bir iniş yörüngesi oluşturulur. Hız kontrolcüsü oluşturulan buluşma noktası ve İHA'nın mevcut konumu arasındaki mesafeye göre hız bilgisi üretir ve bu bilgiyi uçuş kontrol kartı üzerinde bulunan motor kontrolcüsüne ileterek iniş prosedürünü başlatır ve yönetir. Tasarlanan sistemin yapısı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

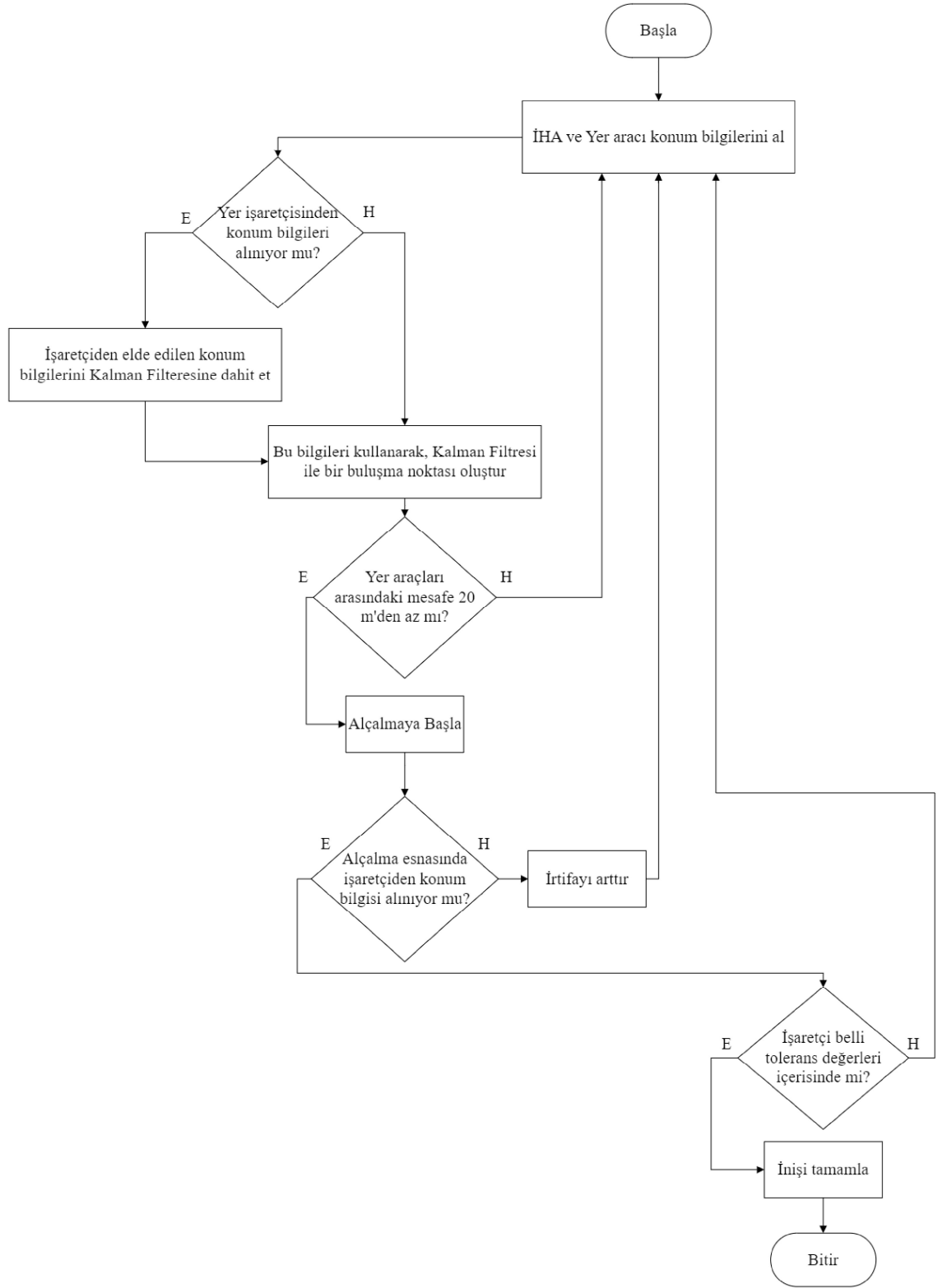


Şekil 4.1. İHA'nın hareketli platforma inişi için otonom sistem tasarımı

İHA ve kara aracı arasındaki buluşma noktasının belirlenmesi amacıyla geliştirilen algoritmanın başlatılmasıyla birlikte İHA ve kara aracının konum bilgileri elde edilir. Yer işaretçisinden yayınlanan konum bilgisinin alınıp alınmadığı kontrol edilir ve mevcutsa, bu veriler Kalman filtresine dahil edilerek hassas bir buluşma konumu belirlenir. Bu adımda elde edilen konum bilgileri, Kalman filtresi kullanılarak buluşma konumunu oluşturur. İHA ve kara aracı arasındaki mesafe kameranın görüş menzili olan 20 metreden

az ise, İHA alçalma işlemine başlar ve iniş sürecine geçer. Eğer mesafe 20 metreden fazla ise, algoritma yeniden konum bilgilerini alarak süreci tekrar başlatır. Herhangi bir anda yer işaretçi algılanmazsa, işaretçi algılanıncaya kadar İHA irtifasını kademeli olarak artırır. Elde edilen işaretçi konumu belirli tolerans değerleri içinde olması durumunda İHA alçalarak inişi gerçekleştirir, aksi takdirde algoritma yeniden konum bilgilerini alarak süreci tekrar başlatır. Geliştirilen algoritma, İHA'nın kara aracına güvenli bir şekilde iniş yapmasını sağlamaktadır (Şekil 4.2).





Şekil 4.2. İHA'nın hareketli platforma iniş algoritması akış şeması

4.3. Sistem Mimarisi

Sistem mimarisi literatürde yer alan çalışmalarda sistem ölçüm katmanı, veri işleme katmanı, yol haritası oluşturma katmanı ve kontrol katmanı olmak üzere dört katmandan oluşmaktadır. Mevcut çalışmalarda ölçüm katmanında platformun tespiti için sadece kamera ve işaretçi kullanılmış, İHA'nın konum tespiti için ise hareket yakalama sistemleri kullanılmıştır. GPS desteği olmadan kullanılan kamera ve işaretçi yöntemleri İHA'nın operasyon menzilini azaltmaktadır. İHA'nın konum tespitinde kullanılan hareket yakalama sistemlerinin yapısı gereği, hareketli platforma iniş sisteminin kullanımını iç ortam ile sınırlamaktadır.

Tasarlanan sistemde, ölçüm katmanı hem İHA'nın hem de hareketli iniş platformunun GPS verilerini kullanmaktadır. Bu sayede, İHA uzun menzilli operasyonlar için uygun hale getirilmiştir.

Veri işleme katmanında, sensörlerden elde edilen ölçüm verileri bir takım dönüştürme işlemlerine tabi tutularak hem araçlar arası mesafenin hesaplanmasında hem de yörünge planlama aşamasında kullanılmıştır. Aynı zamanda iniş pistinin tespiti de bu katman içerisinde gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler sayesinde, İHA'nın ve hareketli platformun gerçek zamanlı konum tahminleri yapılarak, platformun ve işaretçinin konumu yörünge planlama aşamasına iletilmektedir.

Yol haritası oluşturma katmanında, veri işleme katmanından elde edilen konum, hız ve yön bilgileri kullanılarak bir buluşma noktası hesaplanmış ve bu noktaya yönelik bir yörünge oluşturulmuştur. Mevcut literatürdeki uygulamalardan farklı olarak, bu yörünge, platform üzerindeki işaretçiye minimum enerji kullanımı prensibi benimsenerek oluşturulmuştur. Kara aracının ilerleyebileceği doğrultuda ve önünde belirlenen buluşma noktaları sayesinde, İHA'nın operasyonel süresi artırılmıştır. Bu yaklaşım, enerji verimliliğini optimize ederken aynı zamanda İHA'nın çalışma verimliliğini de maksimize etmeyi sağlamıştır.

Kontrol katmanında ise oluşturulan yörünge doğrultusunda gerekli yönlendirmeler İHA'ya gönderilmekte ve devamlı olarak İHA'nın ve kara aracının konumu kontrol edilmektedir. Sistem mimarisi katmanları Şekil 4.3'te verilmiştir.

Tasarlanan sistem mimarisi ile İHA'nın ve platformun GPS verilerini kullanarak konumlarının tespit edilmesi, platformun doğrultusunu ve hızını tahmin ederek bir buluşma noktası oluşturma, daha sonrasında ise bu noktaya yörünge oluşturarak

yaklaşması, hassas iniş aşamasında ise dahili kamera ile bir otonom iniş yapılması planlanmıştır.

4.3.1. Ölçüm katmanı

Ölçüm katmanı, İHA ve kara aracının hem konumlandırma hem de navigasyonunda kullanılan sistemleri içerir. Bu katmanda, kamera ve GPS kullanılarak İHA'nın ve hareketli platformun konum bilgisi alınmaktadır. Ölçüm katmanı tasarımında hem İHA'nın hem de iniş platformunun konum tespiti için GPS verileri kullanılmaktadır. Bu entegrasyon, uzun menzilli ve açık alan operasyonları için idealdir ve araçların konumlarının geniş coğrafi bölgelerde yüksek doğrulukla tespit edilmesini sağlar. Bu sayede, daha geniş bir hareket ve operasyon alanında kesintisiz ve hassas konumlandırma imkânı sunulur. Ölçüm katmanı, elde edilen konum verilerini diğer sistem katmanlarına aktararak, yörünge planlama ve kontrol mekanizmalarının etkin bir şekilde işlemesine olanak tanır. Ayrıca, bu katman içerisinde gerçekleştirilen iniş pisti tespiti için kamera verileri kullanılır.

4.3.2. Veri işleme katmanı

Bu bölümde, ölçüm katmanında elde edilen konum verileri, çeşitli işlemlerden geçirilerek İHA'nın ve kara aracının konumları tespit edilmekte ve bir sonraki süreç olan yörünge planlama aşaması için hazırlanmaktadır. Araçlar arasındaki mesafenin hesaplanması işlemleri aşağıda detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu süreçler hem yer hem de hava araçları için konum verilerinin doğru ve etkili bir şekilde işlenmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda, bu katmanda kameradan elde edilen görüntüler üzerinden iniş pistinin tespit edilmesi ve konum bilgilerinin çıkarılması işlemleri de yürütülmektedir.

4.3.2.1. Alınan konum bilgilerinin coğrafi koordinat sisteminden yerel düzlem koordinatlarına dönüştürülmesi

Yer ve hava araçlarının sensörlerinden elde edilen konum verilerinin etkili bir şekilde işlenebilmesi amacıyla, her iki aracın da konum verileri toplanmakta ve bu veriler işlenmektedir. Oryantasyon verileri dört boyutlu vektörler olarak tanımlanan kuaterniyonlar biçimindedir. Bu kuaterniyonlar, önceki bölümlerde ayrıntılarıyla açıklanan dönüşüm eşitlikleri kullanılarak üç boyutlu Euler açılarına çevrilmiştir. Bu dönüşüm süreci, kuaterniyonların karmaşıklığını azaltarak, verileri daha anlaşılır ve kullanılabilir bir formata getirmeyi sağlamaktadır.

Sensörlerden alınan konum bilgisi, araçların enlem, boylam ve deniz seviyesinden yüksekliği ile ilgili verileri içermektedir. Bu veriler, Dünya üzerinde konum belirlemede yaygın olarak kullanılan WGS-84 elipsoidi üzerinden tanımlanan coğrafi koordinatlardan oluşmaktadır. WGS-84 (World Geodetic System 1984), küresel bir yer referans sistemi olup, GPS (Global Positioning System) gibi küresel navigasyon sistemleri tarafından standart koordinat sistemi olarak kabul edilmiştir (Oktal ve Yaman, 2019).

Coğrafi koordinatlar, başlangıçta enlem, boylam ve deniz seviyesinden yükseklik olarak ifade edilir. Ancak, bu verilerin daha ileri düzeyde işlenebilmesi ve farklı koordinat sistemlerine entegre edilebilmesi için, öncelikle ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed) koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir. ECEF koordinat sistemi, Dünya'nın merkezini orijin olarak kabul eder ve sabit Dünya'ya bağlı bir referans çerçevesi oluşturur. Coğrafi koordinatların ECEF koordinat sistemine dönüştürülmesi, aşağıdaki eşitlikler yardımıyla gerçekleştirilir.

Burada;

N: Elipsoidin belirli bir enlemdeki eğriliğinin yarıçapı

a: Elipsoidin yarı büyük eksen (6378137.0 metre)

f: Elipsoidin yassılığı (1 / 298.257223563)

e^2 : Elipsoidin dış merkezliliğinin karesi ($f * (2 - f)$)

ϕ : Enlem (radyan cinsinden)

λ : Boylam (radyan cinsinden)

h: Yükseklik (metre cinsinden)

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\phi)}} \quad (4.1)$$

$$X = (N + h) \cos(\phi) \cos(\lambda) \quad (4.2)$$

$$Y = (N + h) \cos(\phi) \sin(\lambda) \quad (4.3)$$

$$Z = [(1 - e^2)N + h] \sin(\phi) \quad (4.4)$$

ECEF koordinat sistemine dönüştürülen veriler, daha sonra yerel analiz ve uygulamalar için ENU (East-North-Up) koordinat sistemine dönüştürülmektedir. ENU koordinat sistemi, belirli bir referans noktasına göre yerel düzlemdeki doğu, kuzey ve yukarı yönlerini tanımlar. Bu dönüşüm, ECEF koordinatlarının belirli bir referans noktası etrafında yerel düzlemdeki ENU koordinatlarına dönüştürülmesiyle gerçekleştirilir. Bu süreçte, aşağıdaki dönüşüm matrisi kullanılmaktadır. $X_{ref}, Y_{ref}, Z_{ref}$ değerlerini hesaplamak için yukarıdaki coğrafi koordinatların ECEF koordinat sistemine dönüşümü

için verilen eşitliklerden faydalanılır. Referans koordinatları ile dönüştürülmek istenen koordinatlar arasındaki Eşitlik 4.5,4.6 ve 4.7 ile hesaplanır.

$$\Delta X = X - X_{\text{ref}} \quad (4.5)$$

$$\Delta Y = Y - Y_{\text{ref}} \quad (4.6)$$

$$\Delta Z = Z - Z_{\text{ref}} \quad (4.7)$$

ECEF Koordinatlarını ENU Koordinatlarına dönüştürmek için dönüşüm matrisi (T) Eşitlik 4.8’de verilmiştir.

$$T = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda_{\text{ref}}) & \cos(\lambda_{\text{ref}}) & 0 \\ -\sin(\phi_{\text{ref}})\cos(\lambda_{\text{ref}}) & -\sin(\phi_{\text{ref}})\sin(\lambda_{\text{ref}}) & \cos(\phi_{\text{ref}}) \\ \cos(\phi_{\text{ref}})\cos(\lambda_{\text{ref}}) & \cos(\phi_{\text{ref}})\sin(\lambda_{\text{ref}}) & \sin(\phi_{\text{ref}}) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

ENU Koordinatları ise dönüşüm matrisi ile fark matrislerinin çarpımı ile hesaplanmaktadır (Eşitlik 4.9).

$$p_{\text{enu}} = T \cdot \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Bu eşitliklerde p_{enu} yerel ENU koordinatlarını, ϕ_{ref} , λ_{ref} sırasıyla Referans noktasının enlemi ve boylamı (radyan cinsinden), $X_{\text{ref}}, Y_{\text{ref}}, Z_{\text{ref}}$ ise referans noktasının ECEF koordinatları göstermektedir.

Her bir araç için hesaplanan Euler açıları ve konum bilgilerinden sapma açıları belirlenmiştir. Bu sapma açıları, araçların yönelim ve hareket performanslarının etkin bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Ayrıca, elde edilen konum verileri, araçlar arasındaki mesafenin hassas bir şekilde hesaplanmasına imkan tanır. Bu sapma açıları, araçların belirli bir hedefe veya referans noktaya olan yönlerinden sapmalarını ölçerek, doğru yörünge ve yönelim kontrolü sağlar. Böylece araçların birbirleriyle koordineli bir şekilde hareket etmeleri ve görevlerini başarıyla yerine getirmeleri mümkün hale gelir.

4.3.2.2. Konum verilerinden araçlar arası mesafenin hesaplanması

Robotik uygulama, veri bilimi gibi birçok alanlarda iki nokta arasında mesafe ölçümleri için Öklid, Manhattan, Minkowski ve Hamming gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler kullanım alanlarına göre ön plana çıkmaktadır. Çok boyutlu verilerde işlem yoğunluğundan dolayı Öklid mesafesi haricindeki yöntemler kullanılırken, düşük boyutlu veri işlemleri ve vektörlerin büyüklüğünün ölçülmesi gibi durumlarda Öklid tercih edilmektedir. Yöntemin uygulaması pratik ve sezgisel bir

yapıdadır (Amato, N., vd., 1998). Araçlar arası mesafenin bulunabilmesi için bu uygulamada Öklid mesafe ölçümü kullanılmıştır.

Öklid mesafe ölçümü iki noktayı birleştiren doğru parçasının uzunluğu olarak ifade edilmektedir. Öklid mesafe ölçümünde, Kartezyen koordinatlarda iki nokta arası mesafe hesaplamak için Pisagor teoremi kullanılmaktadır (Eşitlik 4.10).

$$D(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4.10)$$

Araçlar arasındaki mesafe göz önünde bulundurulduğunda, İHA'nın irtifasının bu mesafe üzerindeki etkisi düşük olduğundan, İHA'nın Z bileşeni hesaplamalarda ihmal edilmiştir. Bu nedenle, araçlar arasındaki iki boyutlu mesafeyi elde etmek amacıyla Eşitlik 4.10 iki boyuta uygun şekilde uyarlanmıştır (Eşitlik 4.11).

$$d_{İHA-KA} = \sqrt{(X_{İHA} - X_{KA})^2 + (Y_{İHA} - Y_{KA})^2} \quad (4.11)$$

4.3.2.3. İniş platformunun tespiti ve konum bilgilerinin elde edilmesi

İniş platformunun tespit edilmesi sorununa bilgisayarlı görü uygulamalarında, görsel nesne sezimi adı verilir. Görsel nesne sezimi, bir görüntüdeki belirli nesneleri tanımlama ve konumlandırma sürecidir. Bu amaçla YOLO (You Only Look Once) algoritması kullanılmıştır. YOLO algoritması, tek bir ileri geçişle tüm görüntüyü işleyebilen entegre bir yapıya sahiptir. Bu entegre yapı, görüntü işleme ve nesne tespitinin aynı anda yapılmasına olanak tanır. Diğer bazı yöntemler, önce görüntüyü bölgelere ayırır, sonra her bir bölgeyi ayrı ayrı analiz eder ve ardından nesneleri tespit eder. Bu, daha fazla zaman ve işlem gücü gerektirir. Ancak YOLO, tüm bu adımları, tek bir ileri geçiş işleminde gerçekleştirir. Bu mimari, nesne tespiti için hem bölgesel öneri hem de sınıflandırma adımlarını tek bir adımda gerçekleştirdiği için diğer tekniklere göre daha hızlı ve verimlidir.

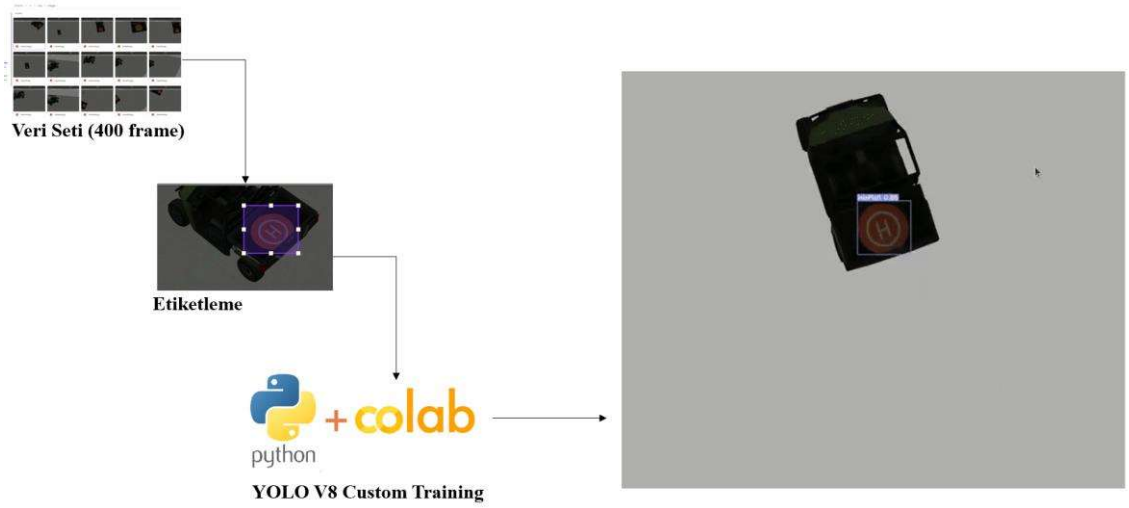
YOLO, bir görüntüyü hücrelere böler ve her hücre için birden fazla sınırlayıcı kutu ile bu kutular içindeki nesnelerin sınıf olasılıklarını aynı anda tahmin eden tek bir konvolüsyonel sinir ağı kullanır. "Sınıf olasılıkları" burada, her bir sınırlayıcı kutunun içindeki nesnenin belirli bir kategoriye (örneğin, kedi, köpek, araba) ait olma olasılığını ifade eder. Yani, YOLO algoritması, her bir hücrede tespit ettiği nesnelerin hangi sınıf olduklarını da tahmin eder ve bu tahminleri olasılık olarak ifade eder. Gerçek zamanlı uygulamalar için idealdir ve video izleme, otomatik sürüş ve güvenlik sistemleri gibi birçok alanda kullanılabilir.

Bu çalışmada iniş pistinin tespit edilmesi için güncel YOLO modeli olan YOLO V8 kullanılmıştır (YoloV8, 2023). YOLO modellerini eğitmek için kullanılan veri seti, benzetim ortamında elde edilen 400 adet imgeden oluşturulmuştur. Bu imgelerden 360'ı eğitim için, 40'ı ise değerlendirme için ayrılmıştır. Veri seti oluşturulurken, işaretçi tespitinin operasyonel uygunluğu açısından İHA'nın farklı irtifalarında, yer işaretçisinin farklı konumlarında ve işaretçinin tamamının görünmediği durumları da içeren örneklerin yer almasına özellikle dikkat edilmiştir (Görsel 4.1).



Görsel 4.1. Veri seti içerisinde bir imge

Nesne tespiti için, eğitim verilerinin doğru şekilde etiketlenmesi son derece önemlidir. Etiketleme, görüntülerdeki nesnelerin konumlarını ve sınıflarını belirleyen bir işlemdir. Bu veriler, algoritmanın nesneleri doğru bir şekilde tanımasına yardımcı olmakla birlikte yanlış sonuçları en aza indirmiştir. İşaretçi tespit aşamaları Görsel 4.2’de verilmiştir. Bu çalışmada tespit edilecek nesnelerin işaretlenmesi için MakeSense AI aracı kullanılmıştır. MakeSense, GPLv3 lisansı altında açık kaynaklı ve ücretsiz olarak kullanılabilen bir etiketleme aracıdır.



Görsel 4.2. Nesne tespit aşamaları

Veri seti ve etiketleme tamamlandıktan sonra YOLO modellerinin eğitim aşamasına geçilir. YOLO'nun farklı boyutlara sahip modelleri, hesaplama gücü gereksinimleri ve doğruluk seviyeleri açısından çeşitlilik gösterir. Tiny, Small, Medium, Large ve Xlarge gibi YOLO modelleri, boyutlarına bağlı olarak çeşitli avantajlar sunar. Tiny modelleri, daha hafif ve hızlı çalışan modellerdir. Bu nedenle mobil cihazlar ve gömülü sistemler gibi kaynakları sınırlı cihazlar için idealdir. Öte yandan, Xlarge modelleri, yüksek doğruluk ve geniş nesne sınıflandırma yetenekleri sağlar. Ancak eğitim ve kullanım için daha yüksek hesaplama gücü gerektirirler. Model tercihi, uygulama ihtiyaçlarına ve cihaz kaynaklarına bağlıdır. Hızlı bir nesne algılama sistemi gerektiren bir uygulamada Tiny veya Small modelleri tercih edilirken, yüksek doğruluk seviyeleri gerektiren bir uygulama için Medium veya Large modelleri daha uygundur.

Nesne tespiti için birçok performans metriği kullanılmaktadır. Performans metrikleri arasında Kesinlik (Precision), Duyarlılık (Recall), Ortalama Hassasiyet (Average Precision), Ortalama IoU (Intersection over Union), F1 skoru, mAP (mean Average Precision) ve Hız en yaygın olarak kullanılan metriklerdir. Kesinlik bir sınıflandırma modelinin gerçek pozitif sonuçlarının tüm tahmin edilen pozitif sonuçlara oranını ifade eder ve modelin yanlış pozitifleri ne kadar az döndürdüğünü ölçer. Duyarlılık bir sınıflandırma modelinin gerçek pozitif sonuçlarının toplam pozitif sonuçlara oranını ifade etmektedir ve modelin gerçek pozitifleri kaçırmadan ne kadarını doğru tahmin edebildiğini ölçmektedir. Ortalama Hassasiyet farklı nesne sınıfları için hesaplanan Kesinlik ve Duyarlılık ölçümlerinin ortalama değeridir ve bir modelin her bir sınıf için ne kadar iyi performans gösterdiğini ölçer. Bu metrik nesne konum bulma

yöntemlerinin başarımını ölçmek için kullanılan en yaygın metriktir. Tahmin edilen nesne ile gerçek nesne arasındaki en büyük çakışma oranı, Ortalama IoU olarak ifade edilmektedir. Nesne konum bulma algoritmalarında döndürülen pencerenin doğru sayılması için IoU oranlarına bakılır ve bu oran 0.5 değerinden büyük ya da eşitse döndürülen konum doğru, bu değer altında ise konum yanlış olarak değerlendirilmektedir. mAP, Kesinlik ve Duyarlılık değerlerine dayalı olarak modelin performansını özetlemektedir. Ortalama Hassasiyet, Kesinlik-Duyarlılık eğrisinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla bulunur. Bu, modelin farklı eşik değerlerinde nasıl performans gösterdiğini değerlendirmektedir. mAP, Kesinlik ve Duyarlılık arasındaki dengeyi ölçer ve modelin genel doğruluğunu, hassasiyetini ve tespit yeteneğini değerlendirmek için kullanılır. F1 skoru ise Kesinlik ve Duyarlılık değerlerinin harmonik ortalamasını ifade eder. Hem yanlış pozitiflerin hem de yanlış negatiflerin dikkate alındığı dengeli bir performans göstergesidir. Hız metriği ise çerçeve başına işlenen görüntü sayısı veya saniyedeki işlem süresi gibi gerçek zamanlı performansı hakkında bilgi vermektedir. Karışıklık matrisi, sınıflandırma performansını değerlendirmek için kullanılan bir tablodur ve aşağıdaki dört bileşeni içermektedir (Tablo 4.1).

Gerçek Pozitifler (GP): Doğru olarak pozitif sınıflandırılan tahminler.

Yanlış Pozitifler (YP): Yanlış olarak pozitif sınıflandırılan tahminler.

Gerçek Negatifler (GN): Doğru olarak negatif sınıflandırılan tahminler.

Yanlış Negatifler (YN): Yanlış olarak negatif sınıflandırılan tahminler.

Tablo 4.1. Karışıklık matrisi

		GERÇEK	
		Pozitif	Negatif
TAHMİN	Pozitif	GP	YN
	Negatif	YP	GN

$$Kesinlik = \frac{GP}{GP+Y} \quad (4.12)$$

$$Duyarlılık = \frac{GP}{GP+YN} \quad (4.13)$$

$$F1 Skoru = 2 * \frac{Kesinlik * Duyarlilik}{Kesinlik + Duyarlilik} \quad (4.14)$$

Veri seti ise YOLO algoritmalarının son versiyonlarından olan YOLO V8 nesne tespit algoritması içinde kullanılmıştır. Eğitilen algoritmanın performans kriterlerinden

mAP@0.5 0.995'tir. Eğitilen algoritmanın Kesinlik değeri 0.99811, Duyarlık değeri 1, F1 değeri ise 0,99 olarak elde edilmiştir.

Model entegrasyonu için ultralytics_ros paketi kullanılmıştır. Bu paket, ROS üzerinden alınan görüntü mesajlarındaki nesneleri gerçek zamanlı olarak tespit etmektedir. Tespit edilen nesnelerin görüntüleri /yolo_image konu başlığı altında yayımlanmaktadır (Görsel 4.3).



Görsel 4.3. Tespit edilen işaretçi

Tespit edilen nesnenin merkezi noktasının konumu, “/yolo_result” konu başlığı altında yayınlanmaktadır. Bu aşamada önemli bir detay, görüntünün 640x480 piksel çözünürlüğe sahip olması ve kameranın odak noktasının (320, 240) olmasıdır. İHA'nın temel hedefi, tespit edilen noktaya doğru bir iniş gerçekleştirmektir; dolayısıyla, işaretçinin merkezi noktasının odak noktasına olan uzaklığı, işaretçinin kameraya ve dolayısıyla İHA'ya olan mesafesini vermektedir. Bu amaçla, elde edilen x eksen konum bilgisinden 320, y eksen konum bilgisinden ise 240 çıkarılmıştır. Bu işlem, tespit edilen noktanın İHA'ya göre konumunu belirlemek için gereklidir.

$$x' = (x - 320) \quad (4.15)$$

$$y' = (y - 240) \quad (4.16)$$

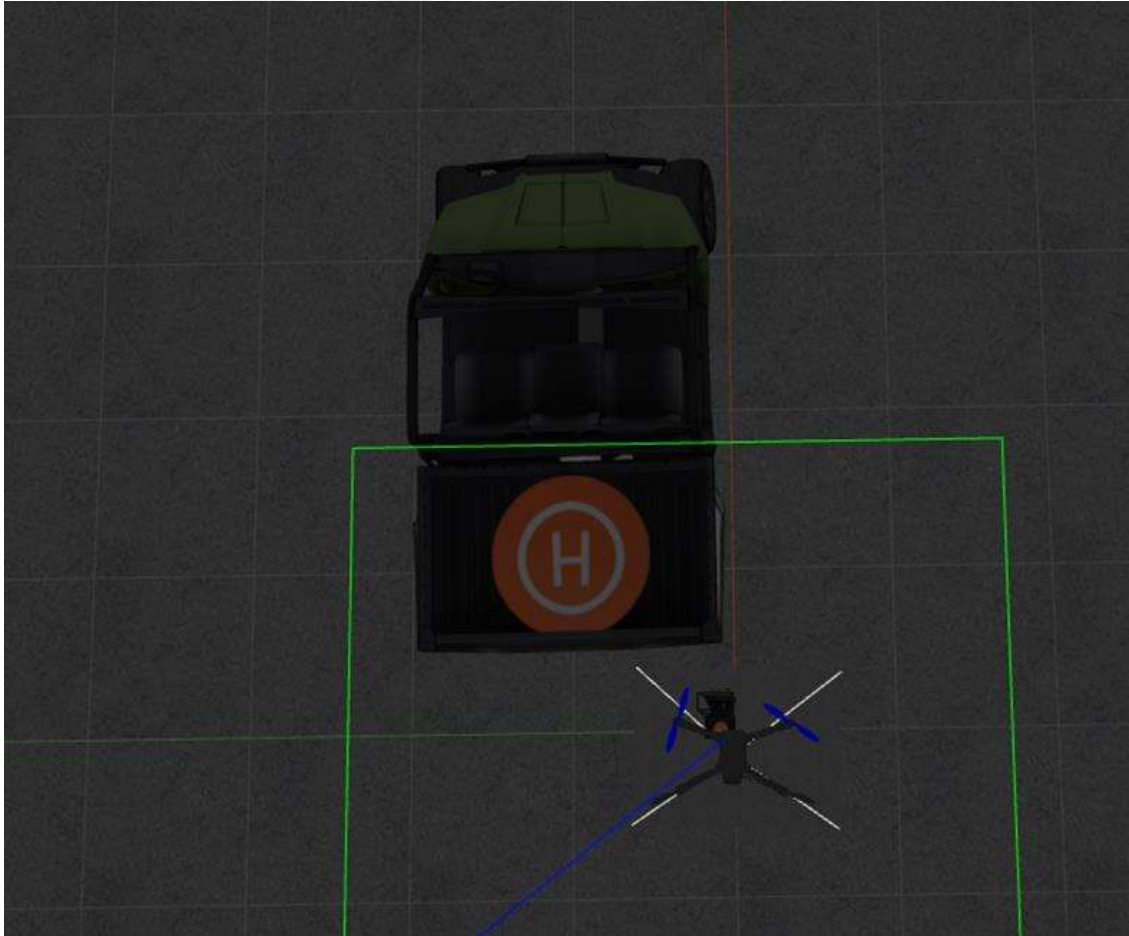
Nesne tespitinde kritik bir faktör olan İHA'nın irtifası, görüntü üzerindeki etkileri açısından büyük önem taşımaktadır. İrtifa arttıkça, kameranın kapsadığı alan genişler ve aynı piksel boyutu daha büyük bir fiziksel alanı temsil eder. Bu durum, İHA ve kara aracı aynı konumda bulunsa dahi, irtifaya bağlı olarak kameradan elde edilen görüntülerde farklılıkların ortaya çıkmasına neden olur. Dolayısıyla, farklı irtifalarda tespit edilen

işaretçinin konumunun odak noktasına uzaklığı, farklı piksel boyutlarında ifade edilir. Bu durumu yönetmek amacıyla kullanılan ölçekleme faktörü, İHA'nın irtifası ile ters orantılı olarak ayarlanır. Bu ölçekleme faktörü, YOLO algoritması tarafından elde edilen x ve y koordinatlarının İHA'nın gerçek dünya koordinatlarına dönüştürülmesi için kullanılır.

$$x' = (x - 320) \times \text{ölçekleme faktörü} \quad (4.17)$$

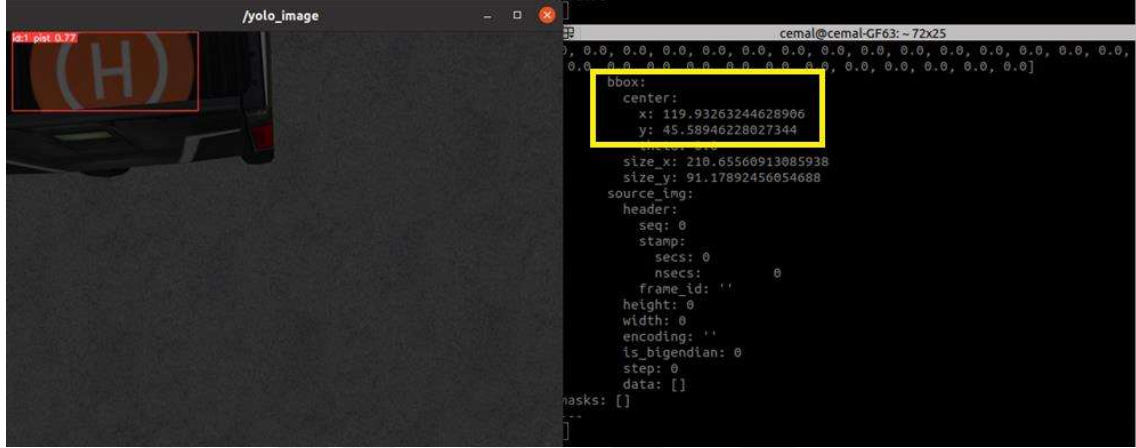
$$y' = (y - 240) \times \text{ölçekleme faktörü} \quad (4.18)$$

Ölçekleme faktörünün hesaplanması için, İHA'nın 2m, 3m, 4m ve 5m irtifalarında yapılan ölçümler kullanılmıştır. Bu ölçümlerde (1,1) koordinatlarına işaretçi yerleştirilmiştir. İHA ise (0,0) konumunda ve X ekseninin pozitif yönündedir. Benzetim zemininde bulunan kırmızı, yeşil ve mavi çizgiler sırasıyla benzetim ortamının X, Y, ve Z eksenlerini göstermekte ve her bir karenin çizgisi 1 m'ye denk gelmektedir (Görsel 4.4).



Görsel 4.4. Ölçekleme faktörünün hesaplanması için oluşturulan ölçüm ortamı

İHA, 2 metre irtifadayken, imge üzerinde tespit edilen işaretçinin orta noktası X ve Y eksenlerinde sırasıyla (119, 45.6) konumundadır. İşaretçinin gerçek konumunun (1, 1) olduğu bilinmektedir ve Eşitlik 4.17 veya 4.18 kullanılarak ölçekleme faktörü 0.005 olarak hesaplanmıştır.



Görsel 4.5. Tespit edilen işaretçinin imgedeki görüntüsü ve orta noktasının konumu

Hesaplamalar 3 metre, 4 metre ve 5 metre irtifalar için de tekrarlanmış olup, sonuçlar Tablo 4.2’de sunulmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer husus, benzetim ortamının doğası gereği, İHA’nın ve dolayısıyla kameranın yönünün yerel koordinat düzlemi ile her zaman aynı olmamasıdır. Bu nedenle, elde edilen değerlere koordinat dönüşüm matrisi uygulanmalıdır.

Tablo 4.2. İHA irtifasına göre imge üzerindeki işaretçi koordinatları ve ölçekleme faktörleri

X _{koordinat}	Y _{koordinat}	İrtifa	Ölçekleme Faktörü	X'	Y'
119	45,6	2	0,005	-1,005	-0,972
212	135	3	0,01	-1,08	-1,05
250	172	4	0,015	-1,05	-1,02
267	187,7	5	0,02	-1,06	-1,046

Bu karşılaştırmalar sonucunda, ölçekleme faktörü değerleri sırasıyla 0.005, 0.010, 0.015 ve 0.020 olarak belirlenmiştir. Bu dört noktadan yararlanarak bir lineer regresyon modeli oluşturulmuştur. Lineer regresyon, bir veya birden fazla bağımsız değişkenle bir bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu örnekte, İHA'nın yüksekliği (bağımsız değişken) ile ölçekleme faktörü (bağımlı değişken) arasındaki ilişkiyi belirlemek için lineer bir model kurulmuştur. Bu

model bir sabit (intercept) ve yükseklikle çarpılan bir eğim (slope) katsayısını içermektedir. Eşitlik 4.19 sayesinde 2m, 3m, 4m ve 5m irtifa için bilinen ölçekleme faktörü değerlerinin dışında ara değerler için de ölçekleme faktörü elde edilmektedir. Eşitlik 4.19’da k ve m değerleri irtifası ve ölçekleme faktörü bilinen iki eşitlik kullanılarak elde edilmiştir.

$$\text{ölçekleme faktörü} = k - m \times \text{irtifa} \quad (4.19)$$

$$k = \frac{\sum_{i=0}^n (\text{altitude}_i \text{ölçekleme faktörü}_i)}{n} \quad (4.20)$$

Burada;

k : Başlangıç ölçekleme faktörü

m : İHA'nın yüksekliği ile ölçekleme faktörü arasındaki orantılı azalışı ifade eden eğim katsayısı

$irtifa$: İHA'nın irtifasıdır.

İrtifaya göre elde edilen noktanın global harita üzerindeki konumu bilinmemektedir. Bu nedenle, tespit edilen noktanın İHA'ya göre konumunu bulmak için koordinat çerçevesi dönüşümü yapılması gerekmektedir. Kameranın İHA'ya göre olan konumu ve İHA'nın harita üzerindeki konumu göz önüne alınarak koordinat dönüşüm matrisi elde edilmektedir. Bu dönüşüm matrisi ile kameradan tespit edilen işaretçinin konumu İHA'nın koordinat sistemine dönüştürülmektedir.

Dönüşüm matrisi, kameranın yerel koordinat sistemindeki konumunu İHA'nın yerel koordinat sistemine çevirmektedir. Bu matris, genellikle bir rotasyon matrisidir, çünkü kameranın eksenleri İHA'nın eksenleriyle farklı yönlerde sahip olabilir. Böylece kamera koordinat sistemine göre belirlenen x_{kamera} , y_{kamera} konumları, İHA'nın koordinat sistemine doğru bir şekilde dönüştürülmektedir.

Eşitlik 4.21’de verilen matris, bir vektörü θ derece saat yönünün tersine döndürmek için kullanılır. Rotasyon matrisi $R(\theta)$, kameranın İHA'ya montaj açısına göre ayarlanır ve kamera görüntülerinin İHA'nın koordinat sistemine doğru bir şekilde entegre edilmesini sağlar.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Kamera tarafından algılanan bir nesnenin pozisyon vektörü Eşitlik 4.22’de verilmiştir.

$$p_{\text{kamera}} = \begin{bmatrix} x_{\text{kamera}} \\ y_{\text{kamera}} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Kamera, kendi koordinat sistemindeki konumu İHA’nın koordinat sistemine dönüştürmek için dönüşüm matrisini kullanır (Eşitlik 4.23).

$$p_{\text{İHA}} = R(\theta) \cdot p_{\text{kamera}} \quad (4.23)$$

Kameradan tespit edilen işaretçinin konum hatasını belirlemek için Kök Ortalama Kare Hata (RMSE, Root Mean Square Error) yöntemi kullanılmıştır. RMSE, hataların karelerinin ortalamasının karekökünü alarak hesaplanır ve hataların büyüklüğünü gösterir. Hem X hem de Y eksenindeki hata değerleri birleştirilerek tek bir RMSE değeri hesaplanabilir.

X ve Y eksenlerinde tahmin edilen noktaların hatalarını tek bir vektörde birleştirmek için Eşitlik 4.24’ten faydalanılır.

$$e_{xy,i} = \sqrt{(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2} \quad (4.24)$$

Burada x_i, y_i gerçek değerler ve x'_i, y'_i tahmin edilen değerlerdir. Ortalama Hata Karelerinin Hesaplanması için Eşitlik 4.25 ve RMSE için Eşitlik 4.26 kullanılmaktadır.

$$MSE_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{xy,i}^2 \quad (4.25)$$

$$RMSE_{xy} = \sqrt{MSE_{xy}} \quad (4.26)$$

4.3.3. Yol haritası katmanı

Yol haritası katmanında platforma yönelme ve yaklaşma aşamaları gerçekleşmektedir. Platforma yönelme, özellikle hareketli platformlarda, aracın hedefe doğru rotasını belirlemesi için kritik bir aşamadır. Bu süreçte, aracın konum ve yönelme verileri sürekli olarak güncellenir ve takip edilir. İniş yapacak olan aracın, hareketli platformun hız ve yön bilgilerini doğru bir şekilde algılayıp, buna uygun olarak rotasını ayarlaması gerekmektedir. Bu aşamada, IMU ve GPS gibi sensörlerden alınan veriler Kalman filtresi gibi algoritmalarla birleştirilir. Böylece, aracın platforma doğru kısa ve güvenli rotayı izlemesi sağlanır. Bu yaklaşım, aracın yönelimini sürekli olarak izleyip güncelleyerek platforma doğru güvenli bir iniş rotası oluşturur.

Platforma yaklaşma, aracın iniş öncesindeki son aşamalarını kapsar ve bu süreçte hassas manevralar büyük önem taşır. Aracın, platformun hareketine uyum sağlayarak yavaş ve kontrollü bir şekilde yaklaşması gerekmektedir. Bu aşamada, aracın irtifa ve hız bilgileri hassas bir şekilde kontrol edilir. Özellikle irtifa değişikliklerinin doğru bir şekilde yönetilmesi, aracın platforma güvenli bir şekilde iniş yapmasını sağlar. Platforma yaklaşma aşaması için nesne tespiti kullanılmakta ve işaretçinin konum bilgileri elde edilmektedir. Bu aşamada, İHA'nın üzerinde bulunan kameralar ve diğer sensörler yardımıyla işaretçi tespit edilmekte ve konum bilgileri anlık olarak güncellenmektedir. İşaretçinin konum bilgileri, diğer konum verilerine dahil edilerek sürekli bir düzeltme yapılmakta ve aracın platforma doğru hassas bir şekilde yönelmesi sağlanmaktadır. Bu sayede, aracın platforma yaklaşma süreci daha güvenli ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

İşaretçinin konum bilgilerinin entegrasyonu, aracın platforma yaklaşmasında kritik rol oynamaktadır. İniş sırasında aracın hareketleri izlenmekte ve işaretçi verileriyle karşılaştırılarak anlık düzeltmeler yapılmaktadır. Bu yöntem, aracın en uygun rotayı takip etmesini ve sapmaların minimize edilmesini sağlamaktadır. İşaretçi verileriyle yapılan sürekli düzeltmeler, güvenli ve doğru bir inişi mümkün kılmaktadır. Nesne tespiti ve işaretçi konum bilgilerinin etkin kullanımı, yaklaşma sürecinin başarısını artırmaktadır. Elde edilen konum ve yönelme verileri, son manevraları planlamak için kullanılmaktadır. Bu süreç, iniş hızını ayarlayarak ve gerektiğinde düzeltme manevraları yaparak başarılı bir inişi sağlamaktadır.

Hareketli platforma otonom inişi gerçekleştirmek için iniş stratejisi aşamasında İHA ile kara aracı arasındaki mesafe 20 metreden az ise, İHA alçalma işlemine geçer. 20 metreden fazla mesafe varsa, algoritma konum güncellemesi yaparak işlemi tekrar başlatır. İşaretçi algılanmadığı durumlarda İHA, işaretçi bulunana kadar irtifasını artırır. İşaretçi belirlenen tolerans değerleri içinde algılandığında İHA alçalarak inişi tamamlar. Eğer değerler dışında ise, algoritma yeniden başlatılır. Bu algoritma sayesinde, İHA'nın kara aracına güvenli inişi sağlanmaktadır.

4.3.3.1. Kalman filtresi kullanarak yörünge planlama

Yörünge planlama süreci, hedefin özelliklerini, çevresel faktörleri, mevcut sensör verilerini ve sistem gereksinimlerini dikkate alarak özelleştirilmiş algoritmalar, filtreleme teknikleri ve makine öğrenimi yöntemlerini içerir. Bu süreç, özellikle İHA'ların hareketli platformlara inişlerinde büyük bir önem taşır. Yörünge planlama, dinamik ve belirsiz

ortamlarda İHA'ların hedeflerini etkin bir şekilde tahmin etmelerine ve takip etmelerine olanak tanır, böylece İHA'nın doğru manevralar yapabilmesi için gereken bilgiler sağlanır.

Yörünge planlama için model tabanlı ve sensör tabanlı olmak üzere iki ana kestirim yaklaşımı kullanılır. İki ana kestirim yaklaşımı kullanılır: model tabanlı ve sensör tabanlı kestirim. Model tabanlı kestirim, hedefin hareket yörüngesini matematiksel veya fiziksel modeller kullanarak tahmin eder. Bu modeller, hedefin kinematik ve dinamik özelliklerine dayanarak gelecekteki konumları öngörür. Diğer yandan, sensör tabanlı kestirim, hedefin anlık konum bilgisini sensörler (örneğin, görüntü veya LIDAR) aracılığıyla elde eder ve bu verileri kullanarak gelecekteki konumları tahmin eder. Bu yöntem, hedefin hareket modelini veya dinamik özelliklerini sisteme dahil etmeden gerçek zamanlı takip için idealdir.

Bu tekniklerin entegrasyonu, İHA'ların hedef platforma hassas ve güvenli bir şekilde iniş yapabilmeleri için elzemdir. Yörünge kestirim tekniklerinin başarısı, kullanılan algoritmaların ve sensör sistemlerinin doğruluğuna bağlıdır. Kalman filtresi, bu süreçte kritik bir rol oynar; belirsizlikleri modelleyerek ve gürültülü ölçümleri filtreleyerek, hedefin konum ve hızını sürekli olarak günceller. Bu sürekli güncelleme, hedefin hareket dinamiklerine hızla uyum sağlamayı ve yörünge düzeltmelerini doğru bir şekilde yapmayı mümkün kılar, İHA'ların yörünge planlama ve hedef takip kabiliyetlerini artırır.

Kalman filtresi, doğrusal sistemler için etkili bir istatistiksel filtreleme yöntemi olarak, gerçek zamanlı uygulamalarda sıkça kullanılır. Bu yöntem, navigasyon, hedef takibi, robotik, kontrol sistemleri ve sinyal işleme gibi alanlarda etkili bir çözüm sunar. Sistemdeki belirsizliği azaltmak ve doğru tahminler yapmak amacıyla, mevcut verilere dayalı olarak sistemin durumunu sürekli tahmin eder ve günceller. Bu filtreleme süreci, tahmin ve güncelleme olmak üzere iki ana aşamadan oluşur, bu da sistemin hareket modeli ve gürültü özelliklerine dayanarak gelecekteki durumu etkin bir şekilde öngörür.

Güncelleme aşamasında, gerçek gözlem verileri kullanılarak tahmin edilen durum güncellenir ve doğruluk artırılır. Gözlem verileri, sistemin ölçülen durumu hakkında bilgi sağlar ve bu bilgiler ışığında tahmin edilen durumun doğruluğu artırılır. Böylece, sistemin mevcut durumu ve hata kovaryansı yeniden hesaplanarak, bir sonraki tahmin için daha güvenilir veriler elde edilir. Durum güncelleme eşitliği, mevcut durumun bir sonraki zamandaki tahmini için kullanılır (Bishop ve Welch,2019). Bu eşitlik, sistem modeli ve

mevcut kontrol girişleri temel alınarak bir sonraki durumun tahmin edilmesini sağlamaktadır (Eşitlik 4.27).

$$x_k = F \cdot x_{k-1} + B \cdot u_k + w_k \quad (4.27)$$

Burada:

x_k : Durum vektörü, k zamanındaki durum vektörü, tahmin edilen durumu temsil eder.

F : Durum geçiş matrisi, mevcut durumdan bir sonraki durumu tahmin etmek için kullanılır.

x_{k-1} : $k - 1$ zamanındaki gerçek durum.

B : Kontrol giriş matrisi, dış kontrol girişlerini modellemek için kullanılır.

u_k : k zamanındaki kontrol girişi.

w_k : Sürekli Gauss dağılımına sahip sürekli bir rastgele değişken olan sürekli işlem hatası.

Kovaryans matrisinin güncellenmesi, tahmin edilen durumun belirsizliğini hesaplar. Bu işlem, tahmin edilen durumun kovaryans matrisini, sistem modeli ve sürekli işlem hatası kovaryans matrisini kullanarak günceller (Eşitlik 4.28).

$$P_k = F \cdot P_{k-1} \cdot F^T + Q \quad (4.28)$$

P_k : k zamanındaki durum kovaryans matrisi, tahminin belirsizliğini temsil eder.

Q : Sürekli işlem hatası kovaryans matrisi.

Ölçüm tahmini, mevcut durumdan ölçümlerin tahmininin yapılmasını sağlar. Bu adım, gözlem matrisi aracılığıyla durum vektöründen ölçüm vektörüne dönüşümü tanımlar (Eşitlik 4.29).

$$\hat{z}_k = H \cdot x_k \quad (4.29)$$

Burada:

$\hat{z}_k$: k zamanındaki ölçümün tahmini.

H : Gözlem matrisi, durum vektöründen ölçüm vektörüne dönüşümü tanımlar.

Ölçüm tahmin hatası, gerçek ölçümlerle tahmin edilen ölçümler arasındaki farkı hesaplar. Bu adım, gerçek ölçümlerle tahmin edilen ölçümler arasındaki farkı ifade eder (Eşitlik 4.30).

$$y_k = z_k - \hat{z}_k \quad (4.30)$$

Ölçüm tahmin hatası kovaryansı, ölçüm tahmin hatasının belirsizliğini hesaplar. Bu adım, ölçüm tahmin hatası kovaryans matrisini hesaplamaktadır (Eşitlik 4.31).

$$S_k = H \cdot P_k \cdot H^T + R \quad (4.31)$$

Burada:

R : Ölçüm gürültüsü kovaryans matrisi.

Kalman kazancı, ölçüm tahmin hatasını düzeltmek için kullanılan ağırlık faktörünü hesaplar. Bu adım, ölçüm tahmin hatasının düzeltilmiş tahmin değerine ne kadar katkıda bulunacağını belirlemektedir (Eşitlik 4.32)

$$K_k = P_k \cdot H^T \cdot S_k^{-1} \quad (4.32)$$

Durum güncelleme, ölçümler kullanılarak durum tahmininin güncellenmesini sağlar. Bu adım, ölçümlerle düzeltilmiş durum tahminini hesaplamaktadır (Eşitlik 4.33)

$$x_k = x_k + K_k \cdot y_k \quad (4.33)$$

Kovaryans matrisinin güncellenmesi, durum güncelleme adımından sonra güncellenmiş durumun belirsizliğini hesaplar (Eşitlik 4.34).

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_k \quad (4.34)$$

I : Birim matris.

Bu çalışmada, durum vektörü 6 boyutlu ve gözlem vektörü 2 boyutludur. Durum vektörü, İHA'nın konumunu (x, y, z koordinatları), kara aracının konumunu (x, y koordinatları) ve kara aracının yönelim açısını (yaw) içermektedir. Gözlem vektörü ise kara aracının x ve y konumlarını içerir. Durum geçiş matrisi, bir durumun bir sonraki zamandaki durumunu tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu matris, hava aracının ve kara aracının konumlarının zamanla nasıl değiştiğini göstermektedir. Gözlem matrisi, gerçek ölçümlerin tahmin durumuna nasıl dönüştürüleceğini belirleyen matristir. Sistemdeki ölçümlerle durum arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Hesaplama hatasının kovaryans matrisi, tahminin ne kadar doğru olduğunu ve güvenilirliğini temsil eder. Başlangıçta, bu matris büyük bir değerle başlatılır. Çünkü başlangıçta durum tahmini oldukça belirsizdir. Gözlem hatasının kovaryans matrisi, gerçek ölçümlerin ne kadar

doğru olduğunu gösterir. Bu matris, gözlem hatalarının dağılımını belirlemek için kullanılır.

4.3.3.2. Kara aracının konumunu takip etmek için hedef yönelimi ayarlama

Kara aracının (KA) konumunu takip eden İHA'nın hedef yöneliminin belirlenmesi, iki aracın arasındaki açısal farkın hesaplanmasını gerektirir. Hedef yönelim açısı, kara aracının bulunduğu konuma doğru olan açıdır.

$$yaw_{desired} = \arctan \left(\frac{y_{KA} - y_{IHA}}{x_{KA} - x_{IHA}} \right) \quad (4.35)$$

x_{KA}, y_{KA} Kara aracının x ve y koordinatları

x_{IHA}, y_{IHA} İHA'nın x ve y koordinatları

$yaw_{desired}$ Hedef yönelim açısını göstermektedir.

Yönelim açısının, kuaterniyon formuna dönüştürülmesi için Eşitlik 4.36'ten faydalanılmaktadır.

$$\text{orientation}_{desired} = \arctan \left(\sin \left(\frac{yaw_{desired}}{2} \right), \cos \left(\frac{yaw_{desired}}{2} \right) \right) \quad (4.36)$$

Bu dönüşüm, İHA'nın hedef açığa doğru şekilde yönelmesini sağlar.

4.3.4. Kontrol katmanı

Kontrol katmanı, sistem mimarisinin yörünge planlama sürecini takiben İHA ve kara aracını belirlenen yörünge üzerinde doğru şekilde yönlendirmekten sorumludur. Bu katmanda, İHA ve kara aracının konumları sürekli olarak izlenir ve yörünge üzerindeki ilerlemeleri denetlenir. Bu kontrol mekanizması, araçların belirlenen buluşma noktasına hassas bir şekilde yönlendirilmesini sağlamak amacıyla kritik öneme sahiptir. Araçların konumları, hızları ve yönleri sürekli takip edilirken, kara aracı ve İHA'nın güvenli bir şekilde buluşmasını ve etkileşimini yönetir.

Kontrol süreçleri, kablosuz telemetri sistemleri aracılığıyla bilgisayar bileşenine aktarılan sensör verileri üzerinden yürütülür. Bu sürekli veri akışı, İHA ve kara aracının hareketlerinin koordineli ve senkronize bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Yörünge takibi, sistemlerin belirlenen bir yörüngeyi izleme veya belirlenen bir konumu ya da hareketi takip etme sürecidir. Bu süreç kontrol algoritmaları ve yöntemlerinin kullanımını gerektirir.

Yörünge takibinde kullanılan yaygın yöntemler arasında, geri beslemeli kontrol, model tabanlı kontrol, bulanık mantık kontrolü ve yapay sinir ağları bulunur. Bu çalışmada, enerji verimliliğini ve operasyonel verimliliği maksimize etmek amacıyla PID

(Proportional-Integral-Derivative) kontrolcüsü tercih edilmiştir. PID kontrolcüsü, sistem performansını hata sinyaliyle dayanarak ayarlar ve orantılama, türev, ve integral katsayılarını kullanarak hedeflenen performansa ulaşmayı sağlar. Bu katsayılar, sistemin tepkisini hızlandırır, aşırı salınımları önler ve sürekli hataları düzeltir. Böylece İHA'nın ve kara aracının belirlenen yörünge üzerinde doğru ve verimli bir şekilde hareket etmesine olanak tanır.

PID kontrolcüsü, endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir geri besleme kontrol mekanizmasıdır. Bu kontrolcü, hedeflenen sistem performansına ulaşmak için hata sinyalini (hedef değeri ile mevcut değeri arasındaki farkı) kullanarak kontrol sinyalini oluşturur. PID kontrolcüsünün başarısı, sistemin dinamik özelliklerine bağlı olarak ayarlanan orantılama(k_p), türev(k_d) ve integral (k_i) olmak üzere üç temel parametreye dayanmaktadır.

Orantılama Katsayısı (k_p): Bu katsayı ile hata sinyaliyle orantılı bir kontrol sinyali üretilir. Orantılama kontrolü, sistemin tepkisini hızlı bir şekilde artırarak hatayı azaltmaya çalışır. Ancak, yalnızca k_p kullanılması genellikle bir denge hatasına yol açar.

Türev Katsayısı (k_d): Hata değişim hızını dikkate alarak sistemin tepkisini düzeltir. Bu bileşen, sistemin aşırı salınım yapmasını önleyerek daha stabil bir yanıt sağlar. Türev bileşeni, mevcut hata ile bir önceki hata arasındaki farkı hesaplar.

Integral Katsayısı (k_i): Hata sinyalinin zamanla birikimini dikkate alarak sürekli hataları düzeltir. Bu bileşen, küçük fakat sürekli hataları telafi ederek sistemin hedef değere doğru daha hassas bir şekilde ayarlanmasını sağlar.

PID kontrolcüsü, hata sinyali $e(t)$ temel alınarak $u(t)$ kontrol sinyalini üretir. PID kontrolcüsü Eşitlik 4.37 ile ifade edilmektedir.

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4.37)$$

Bu eşitlikte:

$u(t)$: Kontrol sinyali

$e(t) = r(t) - y(t)$: Hata sinyali (hedef değeri $r(t)$ ile mevcut değeri $y(t)$ arasındaki fark)

k_p, k_i, k_d Sırasıyla Orantılama, İntegral ve Türev katsayısı

$\int_0^t e(\tau) d\tau$: Hata birikimi

$\frac{de(t)}{dt}$: Hata değişim hızı

PID kontrolcüsünün uygulanması aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilir:

1. Hata Hesaplama:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4.38)$$

2. Integral Hesaplama (hata birikiminin güncellenmesi):

$$I(t) = I(t - 1) + e(t) \cdot \Delta t \quad (4.39)$$

3. Türev Hesaplama (hata değişiminin hesaplanması):

$$D(t) = \frac{e(t) - e(t-1)}{\Delta t} \quad (4.40)$$

4. Kontrol Sinyali Hesaplama:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot I(t) + k_d \cdot D(t) \quad (4.41)$$

Burada (Δt), iki ölçüm arasındaki zaman dilimidir.

Bu adımlar, PID kontrolcüsünün algoritmik olarak nasıl çalıştığını göstermektedir. PID kontrolcüsü, bu süreçle sistemin dinamik tepkisini kontrol ederek istenen hedef değere ulaşmasını sağlar. Her iterasyonda hata, integral ve türev terimlerinin hesaplanması ve kontrol sinyalinin güncellenmesi, sistemin sürekli olarak hedef değer etrafında dengelenmesine yardımcı olur.

PID kontrolcüsü, mevcut pozisyon ile hedef pozisyon arasındaki hatayı hesaplar ve bu hatayı kullanarak uygun hız komutlarını(v_x, v_y) belirler. Bu komutlar, İHA'nın hedef pozisyona doğru hareket etmesini sağlar.

$$x_{iHA_Hedef} = x_{iHA_Mevcut} + (\cos(\dot{I}HA_{yaw}) \cdot v_x - \sin(\dot{I}HA_{yaw}) \cdot v_y) \quad (4.42)$$

Bu formül, İHA'nın yönelimi dikkate alınarak x eksenı boyunca hız komutunu (v_x) uygular.

$$y_{iHA_Hedef} = y_{iHA_Mevcut} + (\sin(\dot{I}HA_{yaw}) \cdot v_x + \cos(\dot{I}HA_{yaw}) \cdot v_y) \quad (4.43)$$

Bu formül, İHA'nın yönelimi dikkate alınarak y eksenı boyunca hız komutunu (v_y) uygular. Aynı zamanda İHA'nın mevcut yönelimine göre x ve y eksenlerindeki hız bileşenlerini hesaplar.

v_x : PID kontrolcü tarafın elde edilen x eksenı boyunca üretilen hız komutu.

v_y : PID kontrolcü tarafın elde edilen y eksenı boyunca üretilen hız komutu.

$\dot{IHA}_{yaw}$: İHA'nın anlık yönelimi.

İHA'nın anlık yönelimi dikkate alınarak hız komutları x ve y eksenlerine dönüştürülür. Bu sayede, İHA hedef pozisyonuna doğru ve kararlı bir şekilde hareket eder.



5. BENZETİM ORTAMI VE BİLEŞENLERİ

Bu bölümde otonom iniş sürecinde kullanılan programlar, uçuş kontrol kartı, benzetim programı ve ona bağlı çevresel birimleri tanıtılmıştır. Benzetim ortamı Ubuntu 20.04 işletim sisteminde oluşturulmuştur. Benzetim ortamı Robot işletim sistemi (ROS), Gazebo benzetim programı, PX4 uçuş kontrol kartı ve Qgroundcontrol görev planlayıcı yer istasyonu yazılımı olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır.

5.1. İşletim Sistemi

Benzetim ortamının oluşturulmasında, ROS ve Gazebo benzetim platformları kullanılmıştır. Bu platformlar, Linux ve macOS işletim sistemlerinde güvenilir bir performans sergilemektedir. Araştırmanın gereksinimleri doğrultusunda, açık kaynak kodlu ve geniş bir kullanıcı tabanına sahip olan Linux tabanlı Ubuntu 20.04 işletim sistemi tercih edilmiştir. Seçilen bu işletim sistemi, Gazebo'nun 11. versiyonu ile sorunsuz bir şekilde çalışmakta olup, aynı zamanda 2025 yılına kadar destekleneceği duyurulan ROS Neotic sürümü ile uyumludur. Bu uyumluluk, benzetim ortamının verimli bir şekilde kurulmasını ve yönetilmesini sağlar. Böylece sistemin geniş bir kullanım alanına kavuşması ve uzun vadeli sürdürülebilirliği sağlanmış olur (ROS Distributions, Gazebo, 2024).

5.2. Robotik İşletim Sistemi (ROS)

Robot İşletim Sistemi (ROS), açık kaynaklı bir robotik ara katman yazılımıdır. Kullanıcı, ROS sayesinde robot ile ilgili donanım sürücülerini, motor sürücülerini gibi robota özel durumlar ile uğraşmaktan ziyade kendi projesindeki problemlere odaklanabilmektedir.

Robotların farklı platformlarda kullanımını ve kullanıcıyla iletişimini kolaylaştırmak için, robot donanımlarını fiziksel modeller yerine özellik olarak ele almaktadır. Bu özellikler, ROS (Robot Operating System) içinde düğümler (nodes) ve başlıklar (topics) aracılığıyla kullanılır. Düğümler ve başlıklar arasındaki iletişim, abone olma (Subscriber) ve mesaj yayma (Publisher) prensiplerine dayanır. ROS'ta kullanılan başlık tabanlı iletişim ve mesaj yapıları Ek 1'de detaylandırılmıştır.

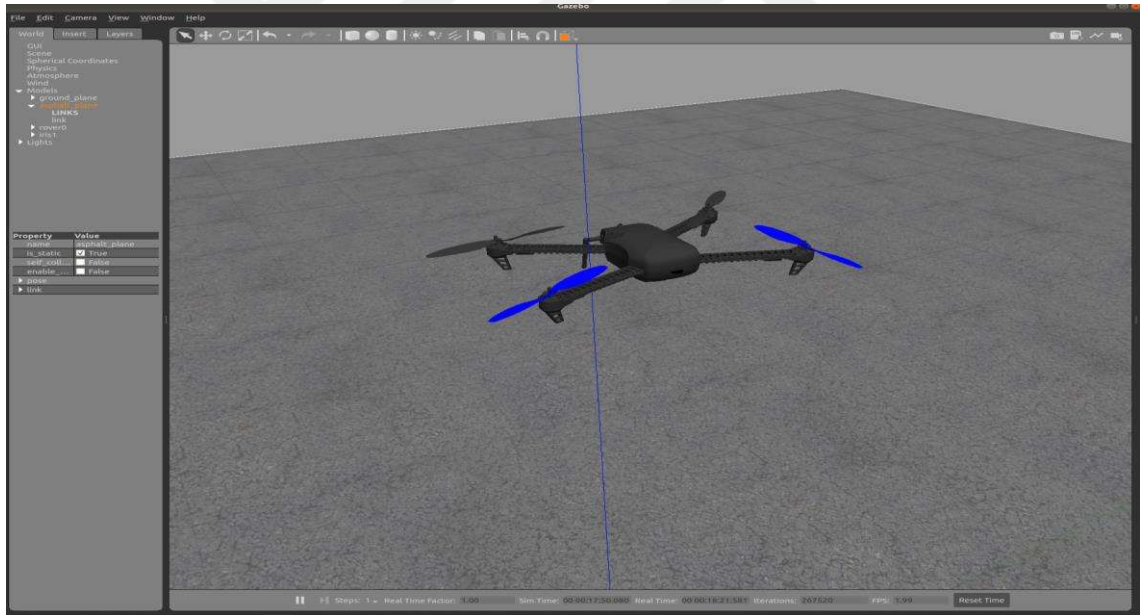
5.3. Gazebo Benzetim Ortamı ve Kullanılan Araçlar

Gazebo, robotların tasarlanıp test edilebileceği üç boyutlu yaygın olarak kullanılan açık kaynaklı robotik benzetim ortamıdır. Benzetimlerde kullanılan robotlar, gerçekçi kütle, hız, sürtünme ve diğer fiziksel özelliklere sahiptir. Özellikle nesneden kaçınmayı

ve bilgisayarla görmeyi test etmek için güçlü bir üç boyutlu benzetim ortamı sağlar (Rivera,2019).

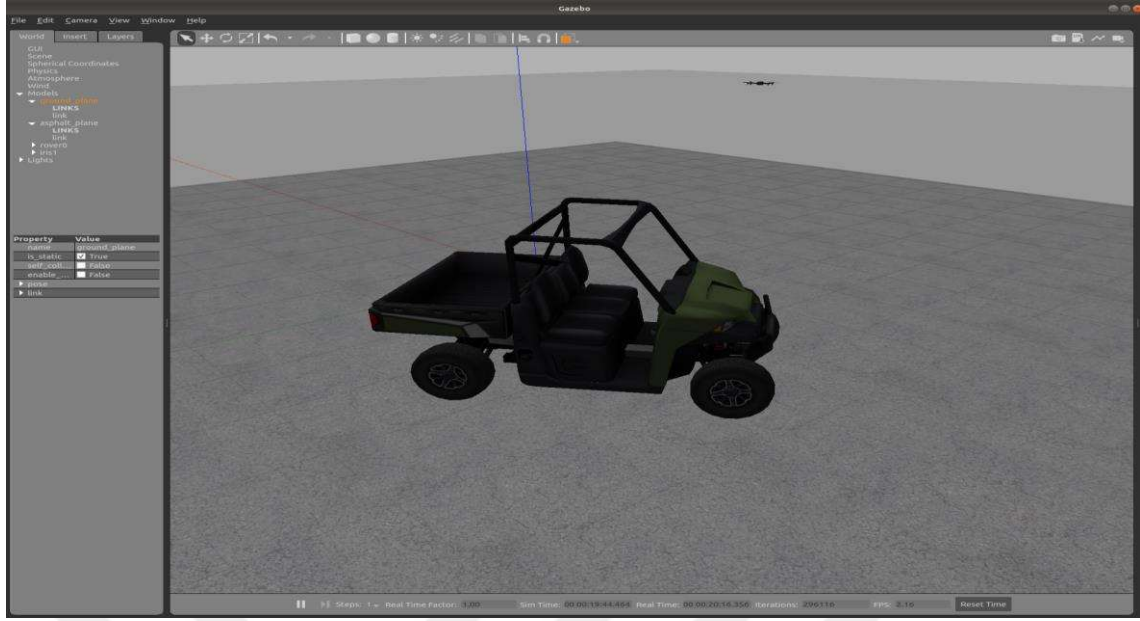
Programın çoklu araç desteği bulunmaktadır. Bu araç kontrolleri ve özellikleri için ROS paketlerinden faydalanılabilir. Bu paketler ile kod önce benzetim ortamında test edilebilmekte, daha sonra aynı kod fiziksel robotlar üzerinde kod bloğunda herhangi bir değişiklik yapılmadan çalıştırılabilmektedir. Gazebo benzetim programı macOS ve Linux işletim sistemlerinde çalışmaktadır.

Çalışmada Gazebo benzetim kütüphanesinde bulunan IRIS dört rotorlu İHA modeli ve Ackerman kara aracı modeli kullanılmıştır. Görsel 5.1’de IRIS İHA modeli verilmiştir. IRIS modeli kompakt ve dayanıklı bir tasarıma sahiptir. Kamera montajı ile havadan görüntü alınmaktadır. PX4 kontrolcü kartı ile otomatik kalkış ve iniş, GPS ile görev planlaması yapılabilmektedir. Ayrıca 550 mm gövde boyutuna ve 100 mm yüksekliğe sahiptir. Pil ile toplam ağırlığı 1582 gramdır. Ortalama 10-15 dakika uçuş süresine sahiptir. 425 gram taşıma kapasitesi bulunmaktadır (Iris, 2021).



Görsel 5.1. IRIS İHA modeli

Ackerman vehicle kara aracı ise arka tarafında platform bulunmasından dolayı tercih edilmiştir. Tasarlanan sistemde İHA'nın iniş yapabilmesi için gerekli iniş pisti olarak bu platformun kullanılması tercih edilmiştir (Görsel 5.2).



Görsel 5.2. Ackerman vehicle kara aracı modeli

5.4. PX4 Uçuş Kontrol Kartı

PX4, İHA'lar ve diğer insansız araçlar için açık kaynaklı bir uçuş kontrol kartıdır (Görsel 5.3). Çeşitli hava, kara ve deniz araçları için kullanılabilir. PX4 Uçuş Kontrol Kartı, araçlar için konum bilgisi, hız kontrolörleri, durum tahmin edicileri, çeşitli sensör desteği, uçuş kayıtları ve otonom uçuş kontrol sistemleri gibi temel ve gelişmiş kontrol yetenekleri sunar. ROS paketlerinden MavLINK'i temel alarak geliştirilen MAVROS protokolü sayesinde kullanıcı ile araç arasındaki iletişim ve kontrolü sağlamaktadır. Böylece sensör verileri ve durum tahminci değerleri elde edilmekte veya ilgili robotun kontrolü sağlanmaktadır.



Görsel 5.3. PX4 uçuş kontrol kartı (Pixhawk 4,2021)

5.5. QGroundControl Görev Planlayıcı Yer İstasyonu

QGroundControl (QGC) görev planlayıcı yer istasyonu, MAVLink protokolünü kullanan başta PX4 veya ArduPilot uçuş kontrol kartı ile çalışan araçlar için uçuş kontrolünü, araç kurulumunu ve haberleşmeyi sağlar. Belirli bir alanı tarama veya belli noktalardan geçerek istenilen hedefe ulaşma otonom görevlerini yerine getirmek için kullanılabilir. Aynı zamanda çoklu araç desteği de bulunmaktadır. QGC, Windows, macOS ve Linux işletim sistemlerinde çalışabilir ve IOS, Android cihazlarda kullanılabilir. Uygulama üzerinden araçların kamera görüntüleri de izlenebilir (QGroundControl, 2021).

5.6. Benzetim Ortamında Bileşenler Arası Haberleşme

Benzetim ortamında Gazebo, PX4 uçuş kontrol kartı, QGroundControl, İHA ve kara aracı bileşenleri arasındaki haberleşme, otonom iniş sisteminin doğru ve etkin bir şekilde çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir. Gazebo benzetim ortamında, ROS ile İHA ve kara aracı arasındaki haberleşme sisteminde kullanılan Telemetry sisteminin benzetimi yapılmakta ve MAVLink protokolü üzerinden ise PX4 uçuş kontrol kartı ile iletişim kurulmaktadır. ROS, sensör verileri ve kontrol komutları gibi bilgilerin düğümler arasında paylaşılmasını sağlar. Bu sayede, Gazebo'da çalışan İHA ve kara aracı, gerçek dünya senaryolarına yakın bir şekilde modellenenmektedir.

PX4 uçuş kontrol kartı, İHA'nın otonom uçuşunu yönetir ve çeşitli sensörlerden gelen verileri işleyerek uçuş komutlarını yerine getirir. PX4, QGroundControl ile MAVLink protokolü aracılığıyla iletişim kurar. Aynı zamanda İHA'nın uçuş verileri, kara aracının konum bilgileri QGroundControl'e iletilir, böylece gerçek zamanlı olarak İHA'nın ve kara aracının konumu gerçek dünya üzerinde görülebilmektedir.

Kara aracı, benzetim ortamında ROS tabanlı bir sistem kullanmaktadır ve Gazebo ile entegre çalışır. ROS, kara aracı ve diğer bileşenler arasında veri paylaşımını ve koordinasyonu sağlar.

6. BENZETİM SENARYOLARI

Bu bölümde, geliştirilen otonom iniş yönteminin etkinliğini ve üstünlüklerini değerlendirmek amacıyla iki aşamalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, geliştirilen yöntem geleneksel iniş yöntemi ile karşılaştırılarak performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. İkinci aşamada ise, yöntemin farklı çevresel ve operasyonel koşullar altında nasıl bir performans sergilediğini değerlendirmek amacıyla dört ayrı senaryo oluşturulmuştur. Her bir senaryo, İHA'nın iniş süreçlerinde karşılaşılabileceği çeşitli zorlukları ve bu zorlukların üstesinden gelme yeteneğini test etmeye yöneliktir. Benzetim ortamlarında oluşturulan bu senaryolar, sistemin gerçek dünya koşullarında nasıl davranacağını öngörmek ve geliştirilen yöntemlerin etkinliğini ölçmek açısından kritik öneme sahiptir. Senaryolarda, rüzgar ve diğer çevresel koşullar da dikkate alınarak, İHA'nın otonom iniş sürecinde karşılaşılabileceği zorluklar, sistemin dayanıklılığı, adaptasyon yeteneği ve genel performansı analiz edilmiştir.

Geliştirilen sistemin temel işleyişini ve genel hatlarını sunmak amacıyla, kara aracının seyir halinde olduğu ve yön değiştirmede olduğu durumda İHA'nın kara aracına otonom iniş süreci birinci alt bölümde incelenmiştir. Bu bölümde, İHA'nın iniş sürecinde kara aracını takip etme, iniş pistinin tespiti, yörünge oluşturma ve yörünge takibinde kullanılan yöntemlerin performansı analiz edilmiştir.

Geliştirilen sistem ile geleneksel iniş sisteminin karşılaştırılması ikinci alt bölümde verilmiştir. İki yöntemi de kullanarak iniş gerçekleştiren İHA'ların enerji kullanımı, yörünge süresi, iniş aşamasında geçirilen süre, toplam süre ve kat edilen mesafeler karşılaştırılmıştır.

Senaryo 1'de, geliştirilen yörünge planlama algoritmasının etkinliğini değerlendirmek amacıyla, İHA'nın yaklaşma aşamasında kara aracının 90° dönüş yapması durumunda İHA'nın bu değişime nasıl uyum sağladığı incelenmiştir. İHA'nın dönüş yapan kara aracını başarılı bir şekilde takip edebilmesi, sistemin adaptasyon yeteneğini ve kararlılığını göstermektedir.

Senaryo 2'de, tasarlanan hız ve yörünge kontrolcüsünün performansını ölçmek amacıyla Senaryo 1'e değişken yönde ve hızda rüzgar koşulları eklenmiştir. Bu senaryoda, İHA'nın değişen rüzgar koşullarına nasıl tepki verdiği ve bu koşullar altında hareketli platforma otonom inişini ne kadar başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği

incelenmiştir. Rüzgarın yön ve hızının sürekli olarak değiştiği bu senaryoda, kontrolcünün adaptasyon yeteneği ve kararlılığı değerlendirilmiştir.

Senaryo 3'te, iniş pisti tespiti için tasarlanan yöntemin performansını değerlendirmek amacıyla Senaryo 2'ye sis eklenmiştir. Bu senaryoda, yoğun sis koşullarının İHA'nın iniş pistini tespit etme sürecine olan etkisi incelenmiştir. Sisli hava koşullarında güvenli iniş yapabilme yeteneği, geliştirilen yöntemin etkinliğini ve güvenilirliğini ölçmek açısından önemlidir.

Senaryo 4'te, geliştirilen otonom iniş sisteminin kullanım alanlarını genişletmek ve esnekliğini değerlendirmek amacıyla benzetim ortamına üç farklı iniş pisti eklenmiştir. Bu pistlerin varlığı, İHA'nın en yakın iniş noktasını belirlemesi ve bu noktaya güvenli bir şekilde iniş yapması için kritik bir test ortamı sunmaktadır.

Otonom iniş aşamalarının performans değerlendirmesini yapılabilmesi adına oluşturulan senaryolarda İHA'nın maksimum hızı 12 m/sn (43,2 km/s) ve kara aracının maksimum hızı PIXHAWK uçuş kontrol kartı tarafından desteklenen maksimum 6,4 m/sn (23 km/s)'dir.

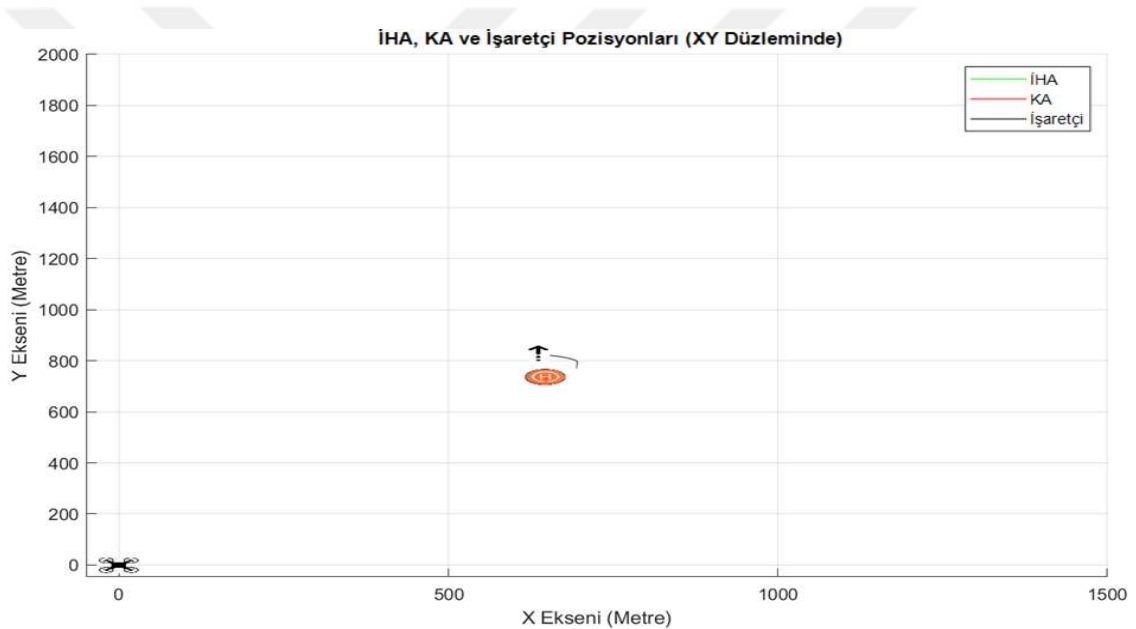
İHA (0,0) konumunda 20 metre irtifada iken işaretçinin kameradan görülebileceği alan X ve Y ekseninde yaklaşık ± 20 m'dir. Bu alan içerisinde IoU değeri yaklaşık 0,5'dir. İHA aynı konumda ve 10 metre irtifada iken işaretçinin kameradan görülebileceği alan X ve Y ekseninde yaklaşık ± 10 m'ye düşmüştür. 10 m irtifada IoU değeri artarak yaklaşık 0,75 olmuştur. Son olarak İHA aynı konumda ve 5 m irtifada iken işaretçinin görülebileceği alan X ve Y ekseninde yaklaşık ± 5 m'dir. Son olarak bu irtifada IoU değeri 0.8 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler, irtifanın azalmasıyla görüş mesafesinin daraldığını, ancak IoU değerinin arttığını göstermektedir. İHA'nın irtifasına bağlı olarak 0.5 m^2 'lik işaretçiyi 20 m irtifada 400 m^2 'lik bir alanda minimum IoU= 0.5 ile tespit edebilirken, 5 m irtifada 25 m^2 bir alanda işaretçiyi IoU değeri 0.9 değeri ile tespit edebilmektedir.

İHA'nın başlangıç noktasında (0,0) konumunu koruyarak ve 5m irtifada iken, kara aracı üzerindeki iniş pistini temsil eden işaretçi sırasıyla (3,3), (-3,3), (3,-3) ve (-3,-3)'e yerleştirilmiştir. Her bir konum için 1000 adet işaretçi konum tahmini yapılmış ve ortalama RMSE değeri 0.056 olarak hesaplanmıştır. Bu ölçümler sırasında İHA'nın

havada asılı kalma modunda olduğu ve benzetim ortamında rüzgar etkisinin bulunduğu dikkate alınmalıdır.

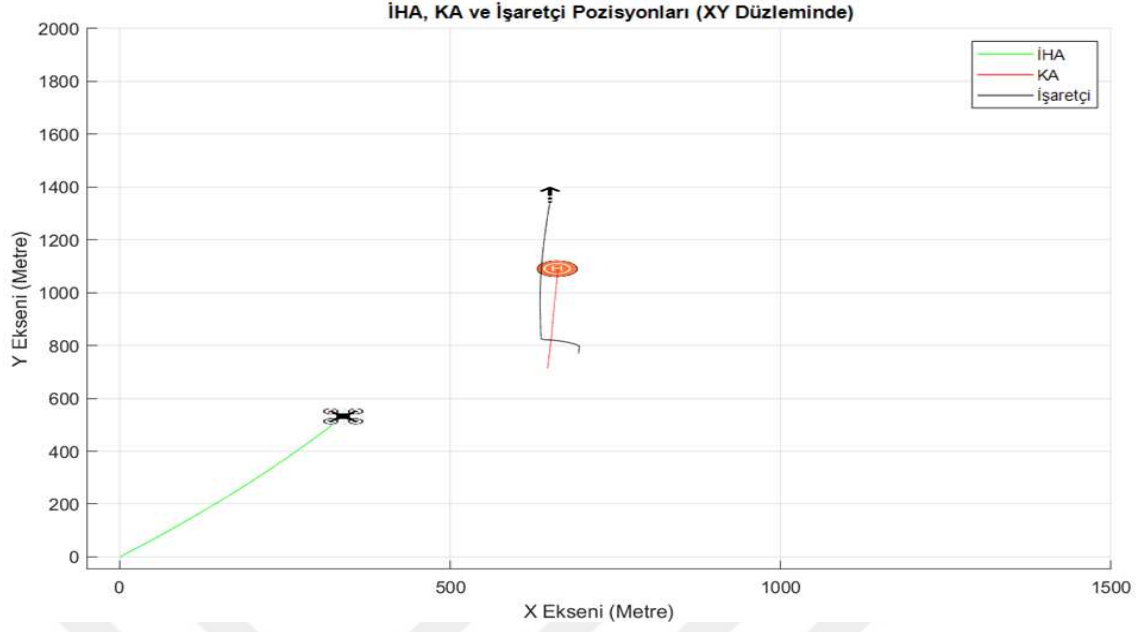
6.1. İHA'nın Otonom İnişi

Benzetim ortamında kara aracı (646,724) konumunda Y ekseninde pozitif yönde 6,4 m/sn (23 km/s) hızında seyir halindedir (grafik üzerinde H işareti ile gösterilmiştir). İHA ise (0,0) konumunda 10 m irtifada ve bekleme modundadır. İHA maksimum 12 m/sn (43,2 km/s) hıza sahiptir. Aralarındaki mesafe 970 m seçilmiştir. Süreç başlatıldığında siyah yukarı ok ile gösterilen ve Kalman filtresi ile oluşturulan yörünge noktaları üretilmeye başlanmıştır. Şekil 6.1'de anlık olarak ilk üretilen yörünge noktası (684,772)'dir ve her iki aracın da konum geçmişleri bilinmediği için hata oranı yüksektir.



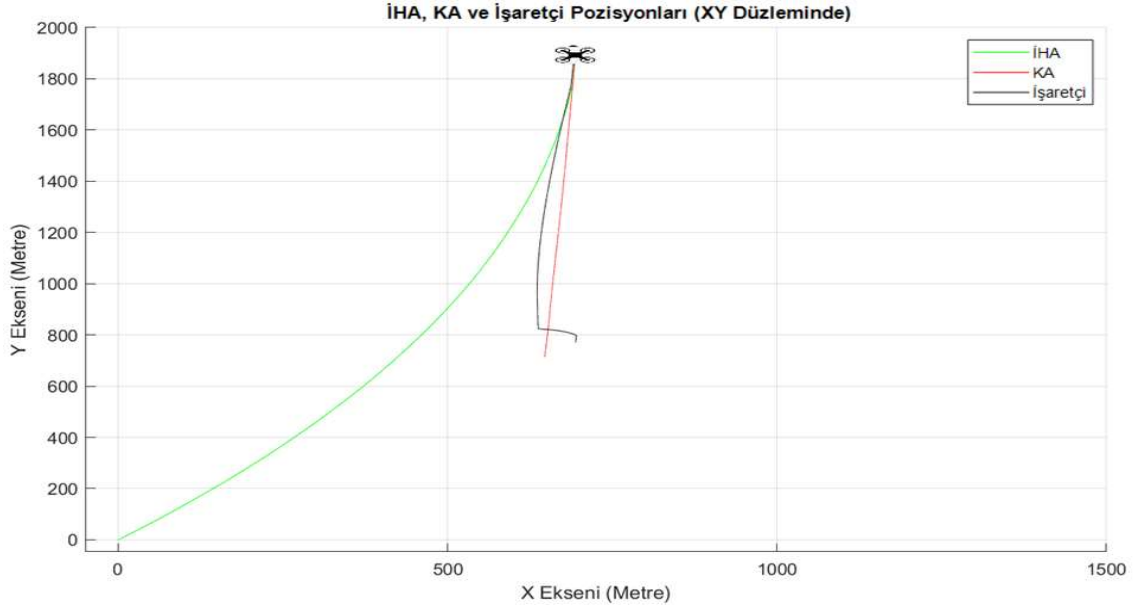
Şekil 6.1. Başlangıç anında üretilen yörünge noktalarının gösterimi

Kalman filtresi tarafından takip edilen kara aracının yönü, hızı, konumu ve İHA'nın konumu bilgileri referans alınarak kara aracının doğrultusunda ve gidebileceği ileri yönde devamlı güncellenerek yörünge noktaları oluşturulmaktadır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. İHA'nın oluşturulan yörüngeyi takip aşaması

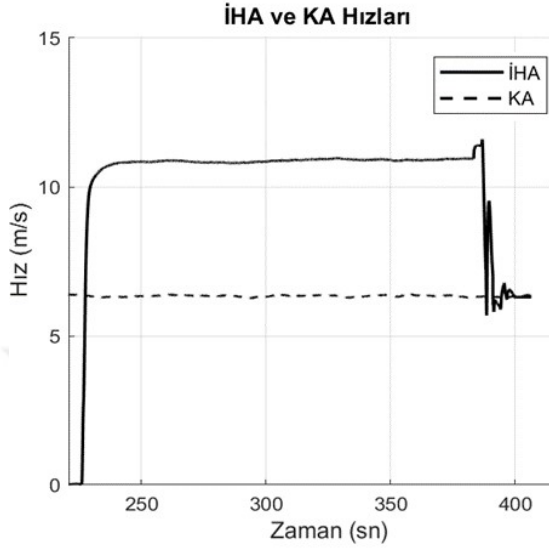
İHA, 178 sn'lik uçuş sonrası kara aracına başarılı bir iniş gerçekleştirmiştir (Şekil 6.3).



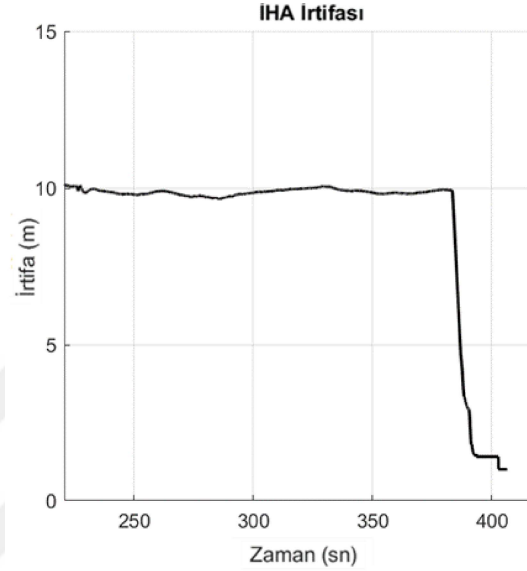
Şekil 6.3. Otonom inişin gerçekleşmesi

Şekil 6.4.'te görülebileceği üzere kara aracı (KA) sabit 6,4 m/s (23 km/s) hız ile ilerlemektedir. Benzetim ortamının 225. saniyesinde başlatılan görev ile İHA 11 m/s (40 km/s) hıza ulaşarak kara aracına yaklaşmaktadır. Aradaki mesafe azaldıkça PID kontrolcüsü İHA'nın hızını azaltmaktadır. İniş aşaması gerçekleşince İHA'nın hızı kara aracının hızına eşit olmaktadır.

Şekil 6.5.'te İHA benzetim ortamında seyir irtifası 10 m ile sınırlıdır. Seyir sırasında bu irtifaya ulaşarak ilerlemektedir. Kara aracına yaklaşıncı irtifasını kademeli bir şekilde azaltarak iniş aşamasını tamamlamaktadır. İHA'nın son irtifası ise işaretçinin irtifası olan 1 m'dir.



Şekil 6.4. Araçların hızlarının gösterimi



Şekil 6.5. İHA'nın irtifası

6.2. Geleneksel Yöntem ile Geliştirilen Yöntemin Karşılaştırılması

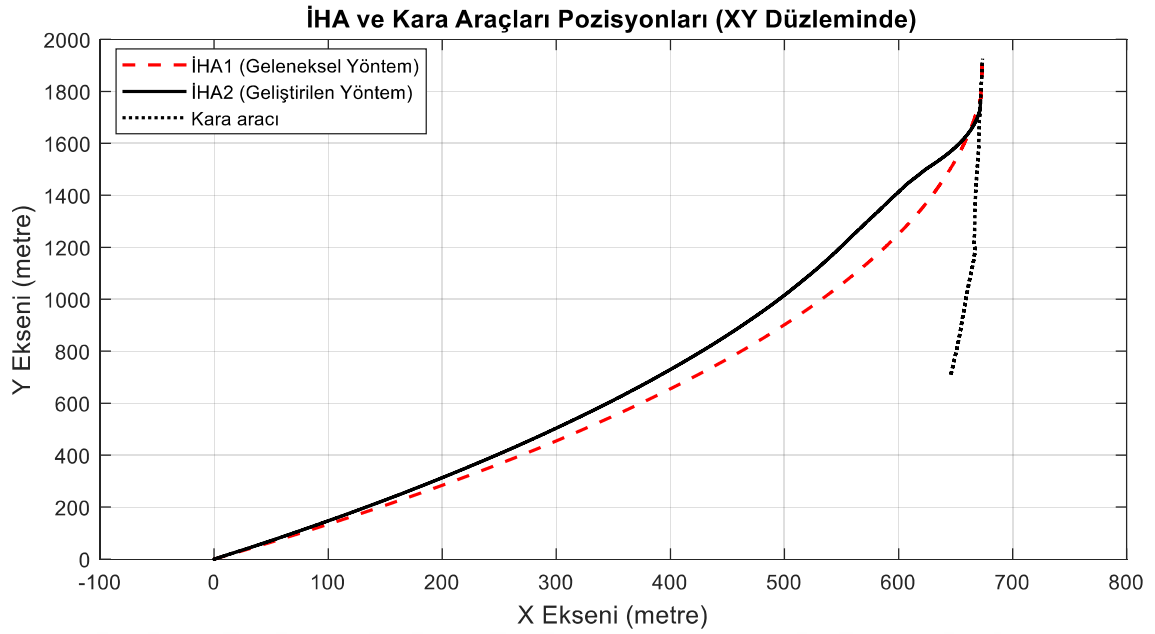
Geleneksel yöntemde İHA, kara aracının konumunu hedef olarak belirleyerek ona doğru yol almaktadır. İHA, kamera aracılığı ile işaretçi tespiti yaptığı ve işaretçinin tam üzerine geldiğinde irtifasını dikey olarak azaltarak iniş gerçekleştirmektedir. Geliştirilen yöntemde ise İHA, kara aracının ilerlediği doğrultuda bir buluşma noktası oluşturarak o noktaya ilerlemekte, araçlar arası mesafe 20 m'den az olduğunda ise kademeli olarak irtifasını azaltmakta ve hassas iniş gerçekleştirmektedir.

Kara araçları (646,724) konumunda iken İHA'lar (0,0) konumundadır. Aralarındaki mesafe 970 m'dir. Geleneksel yöntem ile kontrol edilen İHA1, 2037 m uçuş yaparak yer aracına (673,1924) konumunda iniş gerçekleştirmiştir. Geliştirilen yöntem ile kontrol edilen İHA2, 1883 m uçuş yaparak yer aracına (672,1770) konumunda iniş gerçekleştirmiştir. Böylelikle geliştirilen yöntem, geleneksel yöntemle kıyasla 154 m daha az uçuş gerçekleştirmiştir (Şekil 6.6).

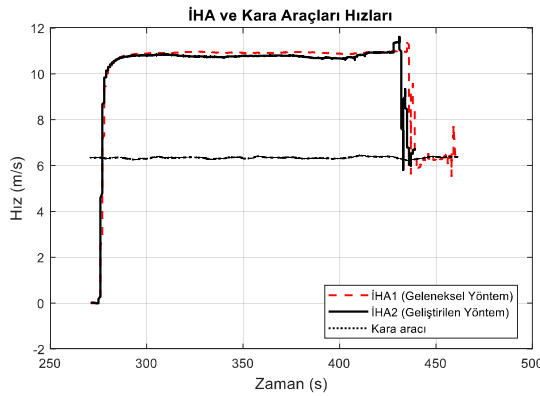
İHA1 168 sn ve İHA2 157 sn yörünge uçuşu gerçekleştirerek hedefe ulaşmış ve iniş aşamasına geçmiştir (Şekil 6.7). İHA1 23 sn'de otonom inişi tamamlar iken İHA2 11 sn'de otonom inişi gerçekleştirmiştir (Şekil 6.8). Böylelikle İHA1 toplam otonom iniş

operasyonu 191 sn'de tamamlanırken İHA2'nin toplam otonom iniş operasyonu 168 sn sürmüştür.

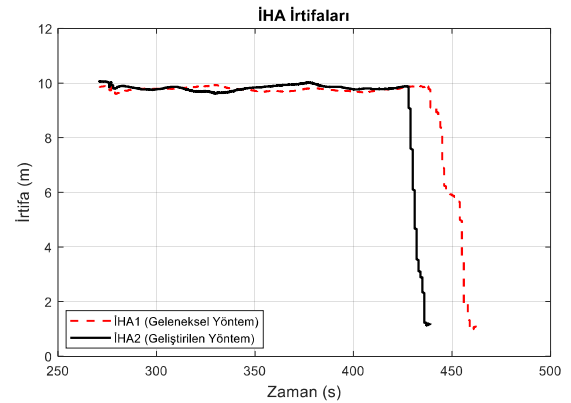
İki İHA'da 11.1V (3S LiPo) 3500mA'lık bataryaya sahiptir. İHA'lar otonom iniş aşamasına % 72'lik batarya ile başlamaktadır. İHA1 % 67 ile otonom inişi tamamlarken İHA2 % 68 ile otonom inişi tamamlamıştır (Şekil 6.9).



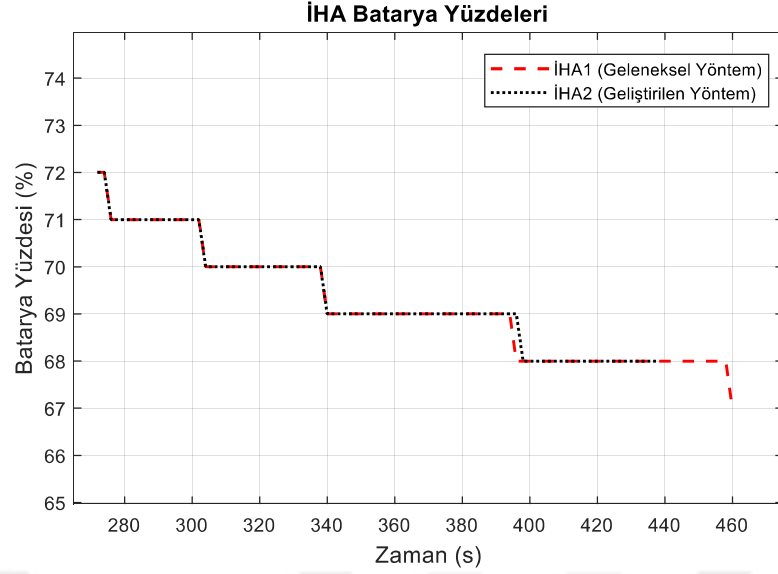
Şekil 6.6. Geleneksel yöntem ve geliştirilen yöntem ile İHA'ların otonom inişi



Şekil 6.7. Araçların hızlarının gösterimi



Şekil 6.8. İHA'ların irtifası

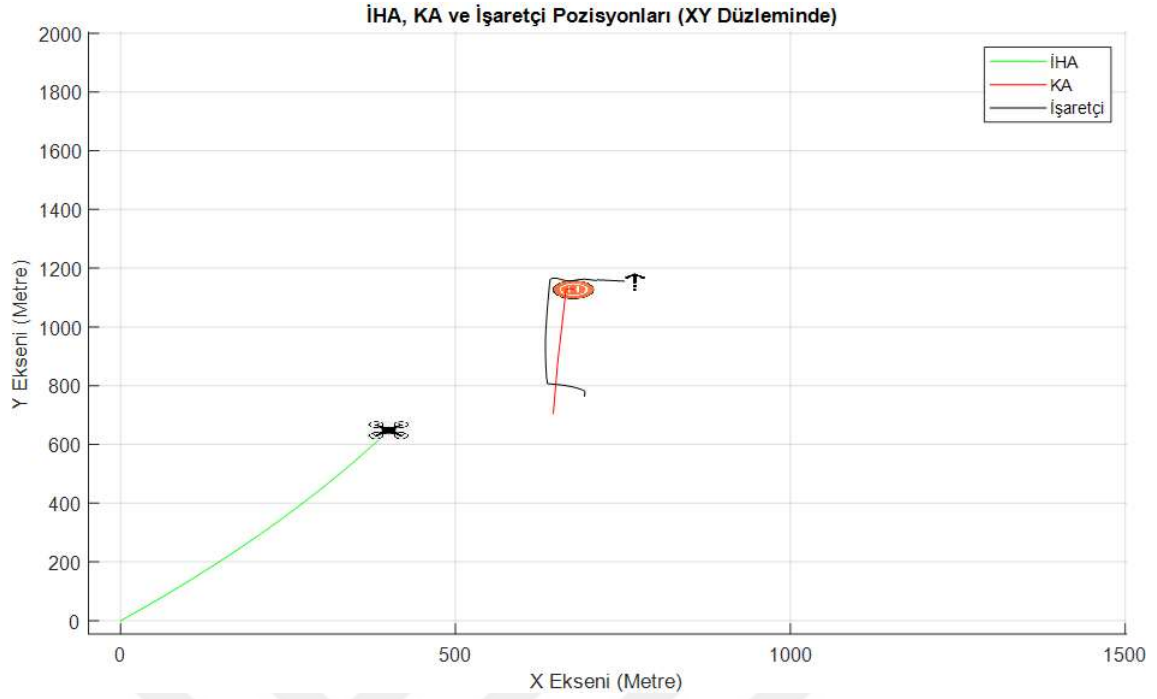


Şekil 6.9. İHA'ların operasyon sırasındaki batarya yüzdeleri

6.3. Senaryo 1 – Platformun Yön Değiştirmesi Durumunda İHA'nın Otonom İnişi

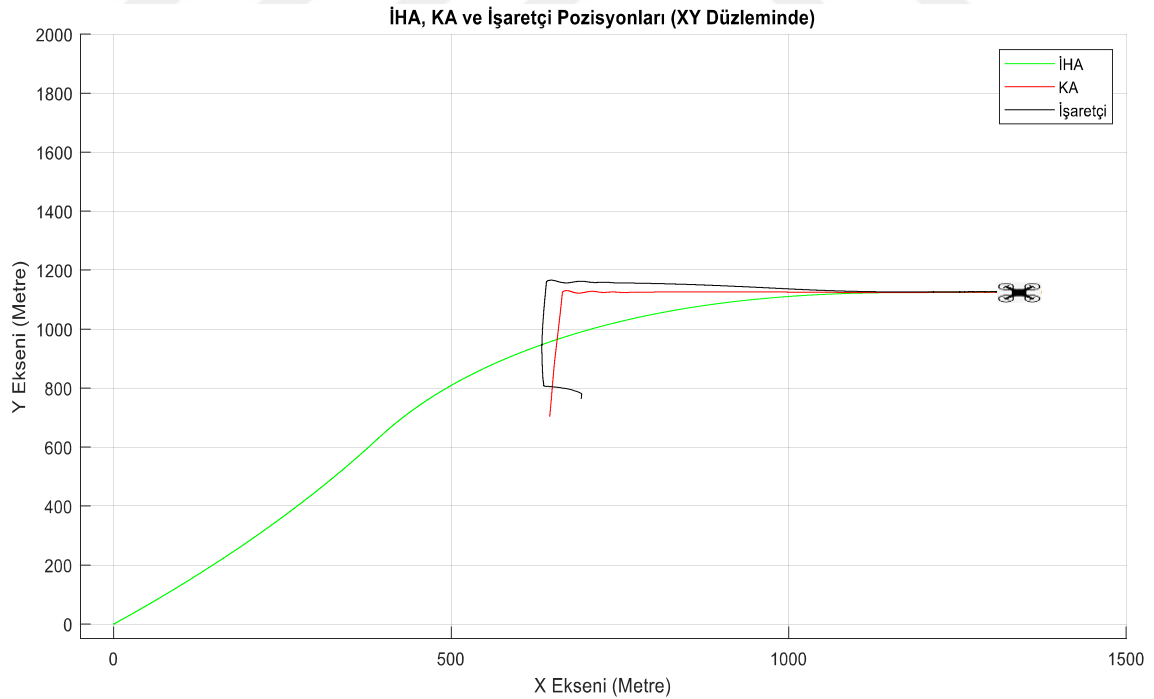
Senaryo 1'de İHA'nın otonom inişi gerçekleştirmek üzere yörüngesi üzerinde hareket ederken kara aracının 90° yön değiştirmesi durumu ele alınmıştır. Benzetim ortamında başlangıç anında kara aracı (646,724) iken Y ekseninde pozitif yönde 6,4 m/s (23 km/s) hızında seyir halindedir. İHA ise (0,0) konumunda, 10 m irtifada ve bekleme modundadır. İHA maksimum 12 m/s (43,2 km/s) hıza sahiptir. Aralarındaki mesafe 970 m'dir.

Kara aracı (676,1129) ve İHA ise (369,594) konumunda ve aralarındaki mesafe 616 m iken, kara aracı 90° yön değiştirerek X ekseninde pozitif yönde hareket etmeye başlamıştır. Şekil 6.10'da güncellenen araçların konumları sonrası Kalman filtresi ile oluşturulan yeni yörünge verilmiştir.



Şekil 6.10. Senaryo 1: Kara aracının yön değişimi sonrası oluşturulan yörünge

Senaryo 1 sonucunda İHA, 235. saniyede Şekil 6.11'deki yörüngeyi takip ederek 150 saniyelik uçuş sonrası kara aracına 385. saniyede otonom inişini gerçekleştirmiştir.

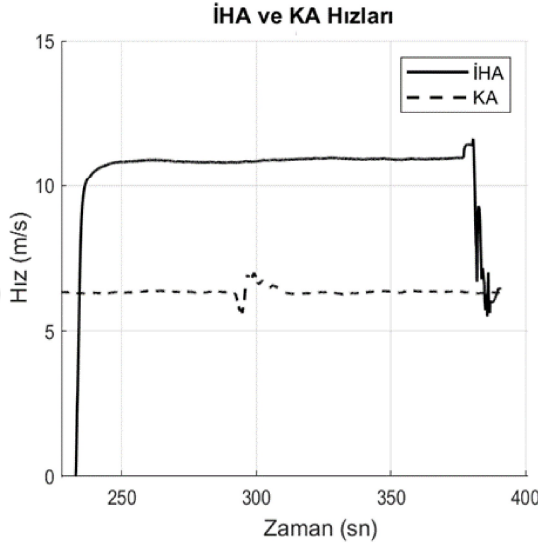


Şekil 6.11. Senaryo 1: Otonom inişin tamamlanması

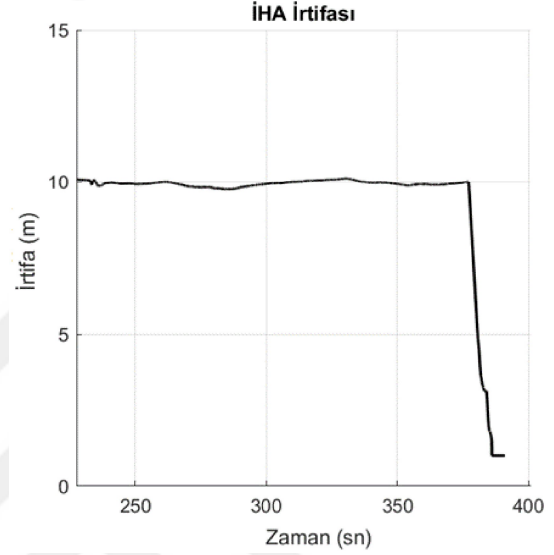
Şekil 6.12'den görülebileceği üzere kara aracı yön değişikliği sırasında hızında azalma olsa da senaryo boyunca hızı 6,4 m/s olarak kayda geçmiştir. İHA'nın hızı ise

maksimum 12 m/s olmak koşuluyla yaklaşma aşamasına kadar gelmiş, daha sonra ise yaptığı manevralar sebebiyle İHA'nın hızında dalgalanmalar gözlenmiştir.

Şekil 6.13'te İHA'nın irtifası yaklaşma aşamasına kadar ortalama 10 m iken yaklaşma aşamasında kademeli olarak azalarak iniş gerçekleştirilmiş ve kara aracı üzerinde bulunan işaretçinin irtifası olan 1 metre olarak kalmıştır.



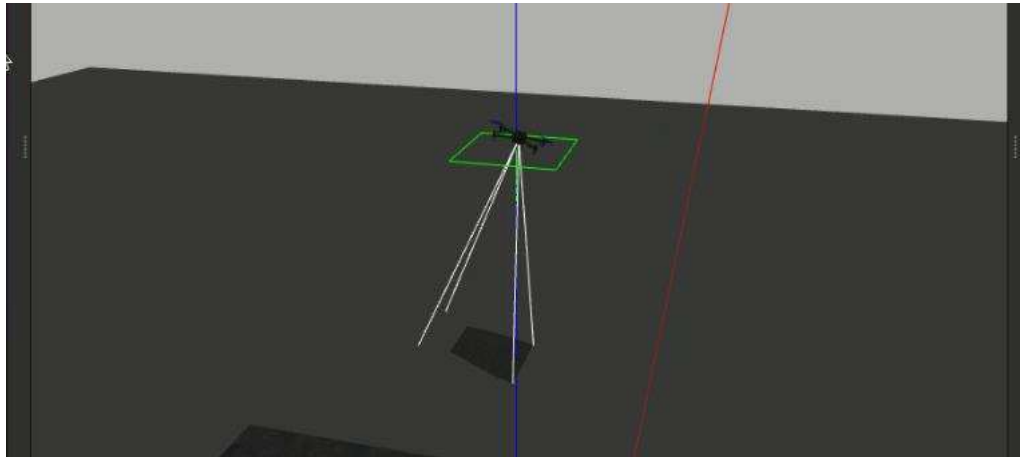
Şekil 6.12. Senaryo 1: Araçların hızlarının gösterimi



Şekil 6.13. Senaryo 1: İHA'nın irtifası

6.4. Senaryo 2 – Değişken Yön ve Hızdaki Rüzgâr Etkileri Altında İHA'nın Otonom İnişi

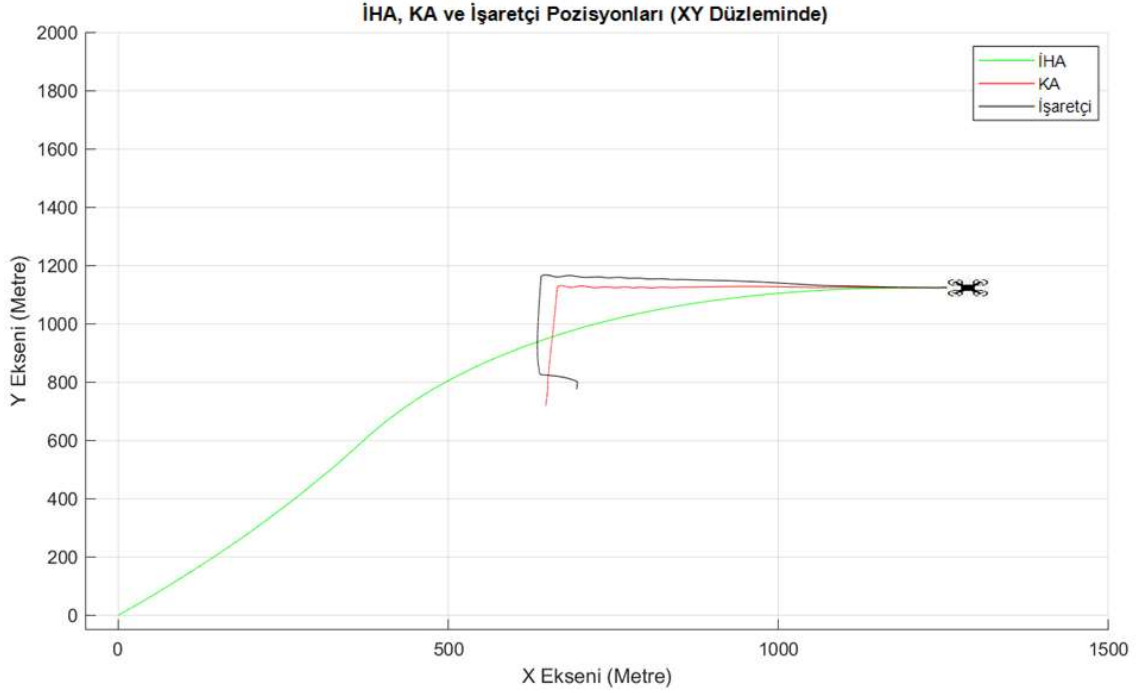
Senaryo 2 içerisinde Senaryo 1'de kurgulanan operasyona, bu senaryoda maksimum 6 m/sn (21,6 km/s) hızında olmak koşulu ile değişken yönde ve değişken hızda rüzgar uygulanmıştır. Rüzgarın İHA'ya olan etkisi ve İHA'nın uyguladığı rüzgar önlemesi Görsel 6.1'de gösterilmiştir.



Görsel 6.1. Rüzgarın İHA'ya etkisinin gösterimi

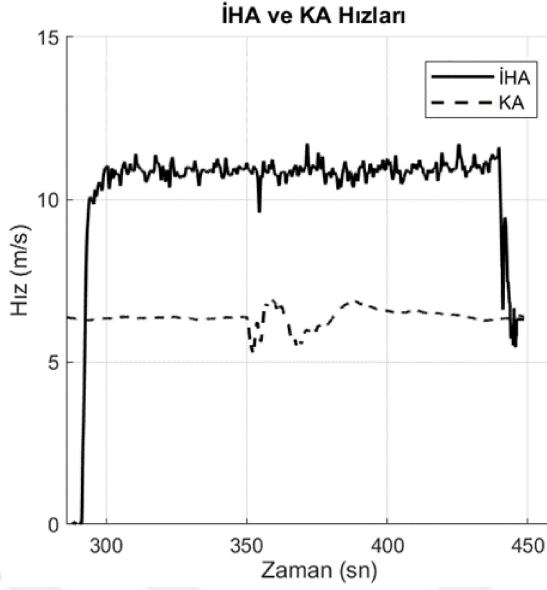
Benzetim ortamında başlangıç anında kara aracı (646,723) konumunda Y ekseninde pozitif yönde 6,4 m/s (23 km/s) hızında seyir halindedir. İHA ise (0,0) konumunda, 10m irtifada ve bekleme modundadır. İHA maksimum 12 m/s (43,2 km/s) hıza sahiptir. Aralarındaki mesafe diğer senaryolarda olduğu gibi 970 m'dir.

Şekil 6.14'te görüldüğü gibi değişken rüzgar şartlarında İHA 157 saniyede hareketli kara aracına başarı ile inişini tamamlamıştır.

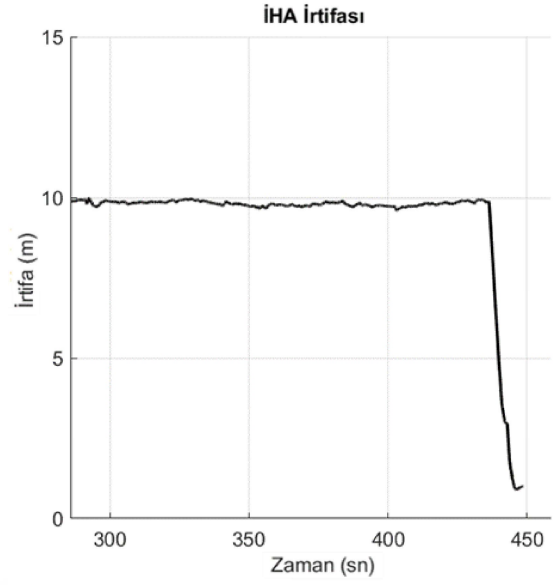


Şekil 6.14. Senaryo 2: Otonom inişin tamamlanması

Şekil 6.15'te görüleceği üzere İHA yörünge üzerindeki pozisyonunu korumak için, rüzgara karşı kendi hızında sürekli düzeltmeler yapmaktadır. Şekil 6.16'da ise Senaryo 2 için İHA'nın irtifası verilmiştir.



Şekil 6.15. Senaryo 2: Araçların hızlarının gösterimi

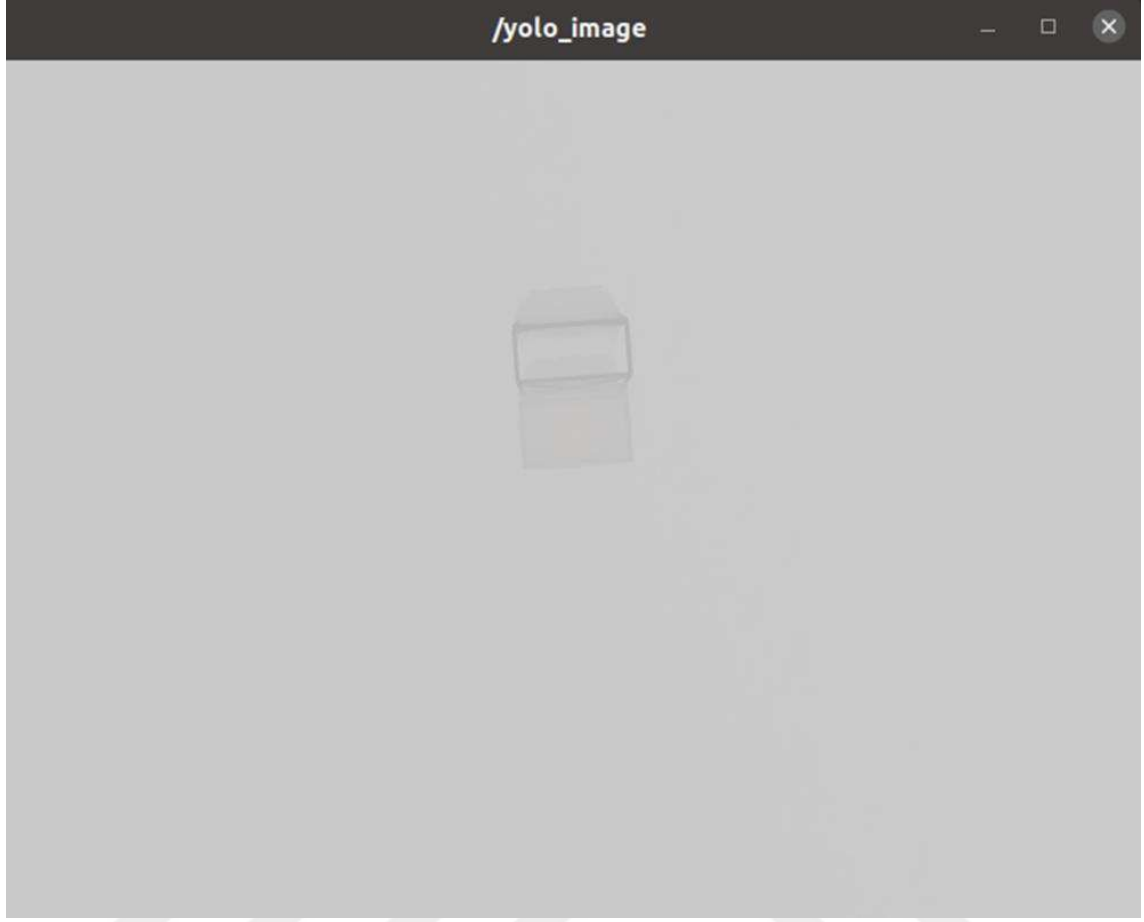


Şekil 6.16. Senaryo 2: İHA'nın irtifası

6.5. Senaryo 3 –Sisli Benzetim Ortamında İşaretçi Tespiti ve Konumun Elde Edilmesi

Bu senaryoda, Senaryo 2’de kurgulanan operasyona sis de eklenerek İHA’nın performansı değerlendirilmiştir. Sis, görüş mesafesini önemli ölçüde azaltır ve algılama ile tespit sistemlerine önemli zorluklar getirir. Bu bağlamda, düşük görüş koşulları altında tasarlanan yöntemin iniş pistini ne derece etkin bir şekilde tespit edebildiği bu senaryo ile değerlendirilmiştir.

Benzetim ortamında sis koşullarından dolayı görüş mesafesi, şartları zorlaştırmak adına maksimum 7 metre seçilmiştir. İHA 7 m irtifada iken kamera aracılığı ile iniş platformu belli belirsiz görülmektedir. Kameradan alınan görüntü Görsel 6.2’de verilmiştir.



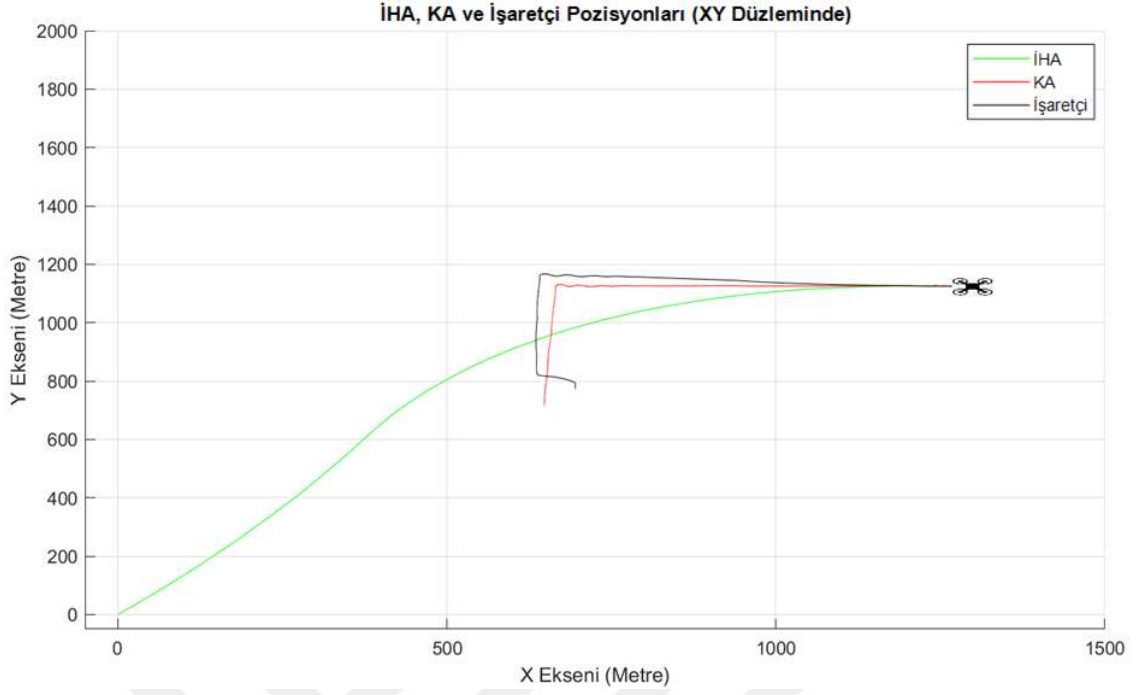
Görsel 6.2. İHA 7 m irtifada iken sisli hava koşullarında kara aracının görüntüsü

İHA ortalama 5 m irtifada iken işaretçiyi tespit etmeye başlamıştır. Fakat 0.5 IoU eşik değerini 5 m irtifada iken geçmiştir ve bu irtifada ortalama IoU değeri 0.58 iken RMSE değeri 0.150'dır (Görsel 6.3). Aynı irtifada sis bulunmayan benzetim koşullarında IoU değeri 0.72 iken RMSE değeri 0.066'dır.



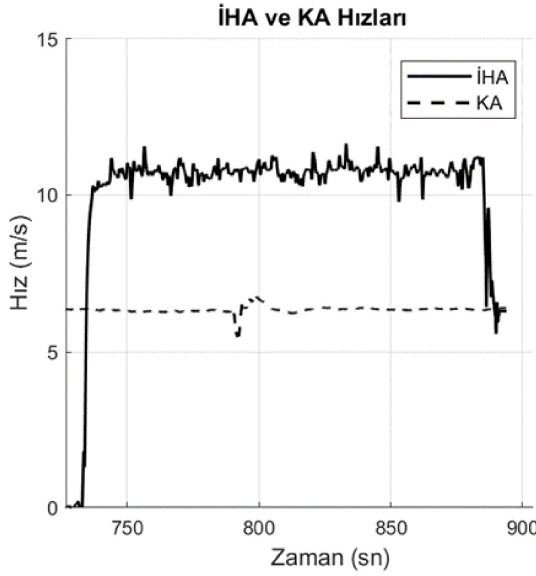
Görsel 6.3. İHA 5 m irtifada iken sisli hava koşullarında tespit edilen kara aracının görüntüsü

Şekil 6.17’de görüldüğü üzere bu zorlu koşullar altında İHA hareketli platforma başarılı bir şekilde iniş gerçekleştirmiştir.

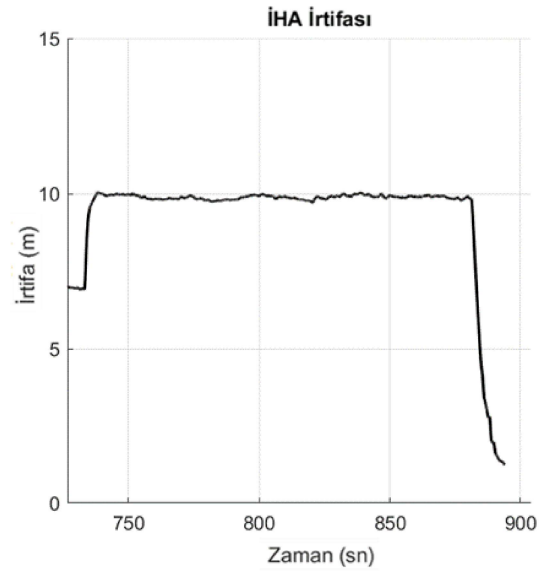


Şekil 6.17. Sis ve rüzgar olumsuz hava koşulları altında İHA'nın otonom inişi

İHA benzetim zamanının 733. saniyesinde uçuşa başlayarak 160 saniyelik bir uçuş sonrası kara aracının üzerine iniş yapmıştır. Beklenildiği üzere rüzgar hızını kontrol etmek üzere İHA kendi hızında sürekli düzeltmeler yapmaktadır (Şekil 6.18). İHA'nın irtifasındaki değişim Şekil 6.19'da verilmiştir.



Şekil 6.18. Senaryo 3: Araçların hızlarının gösterimi

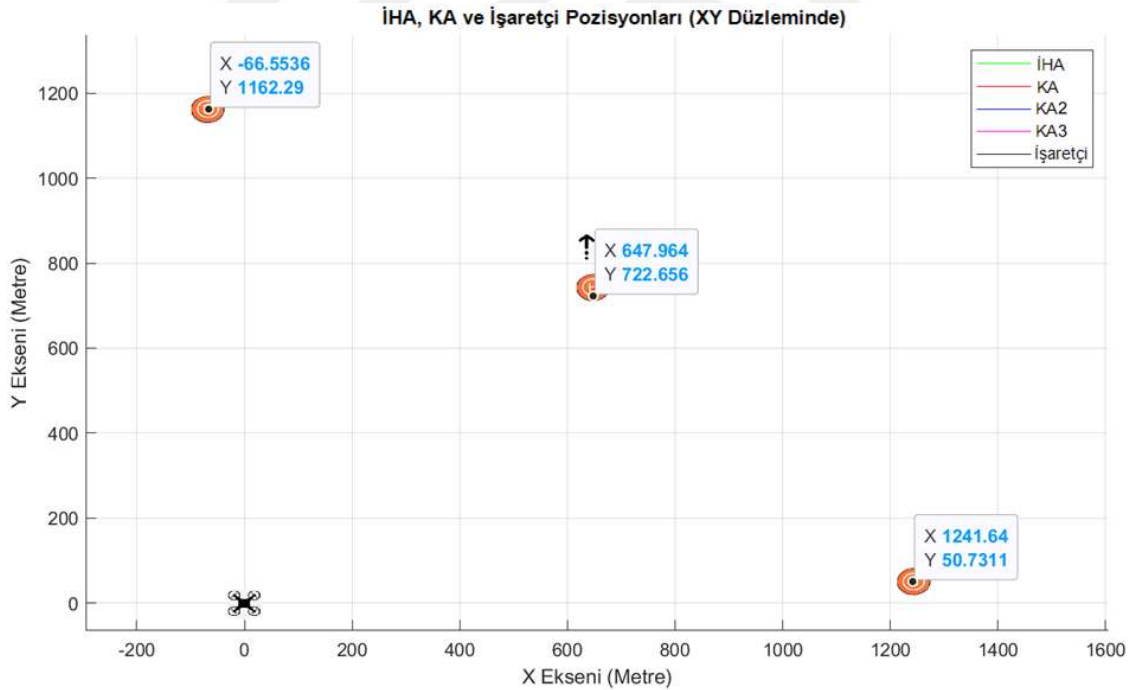


Şekil 6.19. Senaryo 3: İHA'nın irtifası

6.6. Senaryo 4 - Birden Fazla İniş Pistinin Bulunması Durumunda İHA'nın Otonom İniş

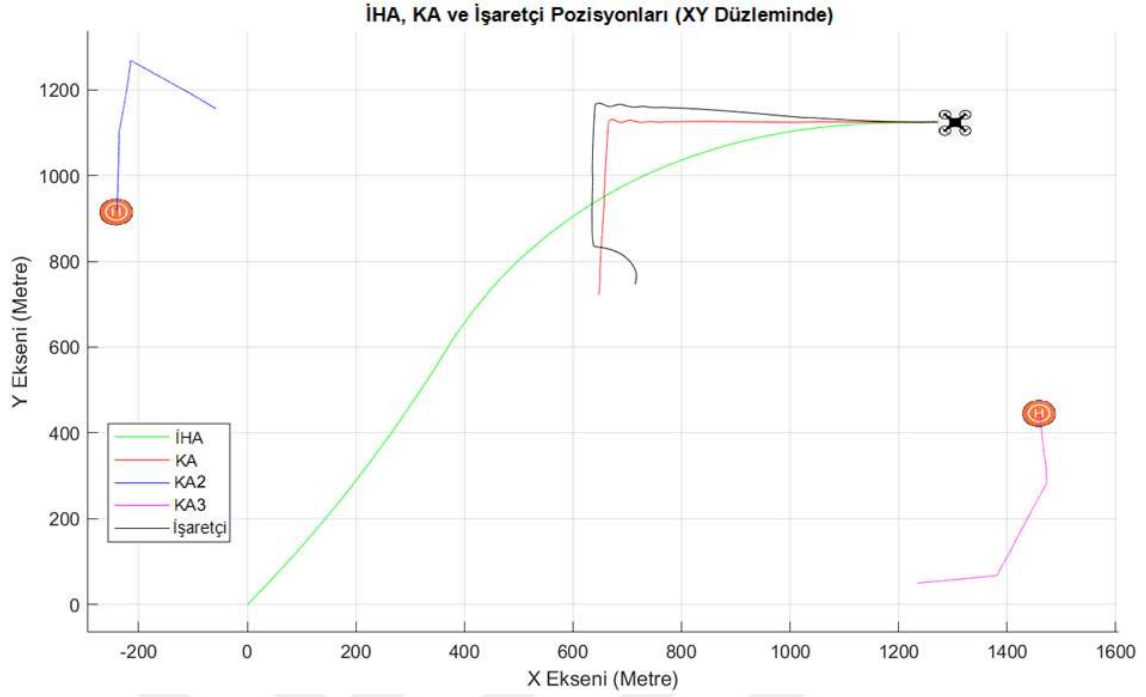
Tez çalışmasının kapsamını genişletmek amacıyla Senaryo 4 içerisinde benzetim ortamına üç adet iniş pisti yerleştirilmiştir ve istenirse bu sayı mevcut koşullarda dokuz adete kadar çıkarılabilmektedir. Bu sayede İHA'nın iniş pisti tercihi yaparak gerçek dünya üzerinde farklı uygulamalarda kullanılması hedeflenmektedir. Benzetim başlangıcında İHA tüm kara araçları ile aralarındaki mesafeyi hesaplar ve en yakın olan kara aracını kendine iniş pisti olarak tanımlar ve bundan sonraki süreç önceki senaryolarda verilen şekilde ilerlemektedir.

Başlangıç anında İHA (0,0), KA (648,722), KA2 (-66,1162) ve KA3 (1241,51) konumlarında bulunmaktadır (Şekil 6.20). İHA'nın KA, KA2 ve KA3 ile aralarındaki mesafe sırasıyla 970 m, 1163 m ve 1242 m'dir. Bu veriler ışığında İHA kendine en yakın mesafede olan KA'yı hedef olarak belirlemiştir. Bu aşamada yörünge oluşturma süreci başlamıştır ve İHA, KA'ya yaklaşmaktadır.



Şekil 6.20. Senaryo 4: Çoklu iniş pistleri gösterimi

İHA ve KA aralarındaki mesafe 265 m ve KA (673,1135) konumunda iken KA 90° yön değiştirerek X ekseninde pozitif yönde hareketine devam etmiştir. Bu durumda oluşturulan yörünge güncellenerek KA'nın yeni rotası üzerinde buluşma noktaları oluşturulmuş ve iniş aşaması tamamlanmıştır (Şekil 6.21).



Şekil 6.21. Senaryo 4 çoklu iniş pistleri arasında otonom inişin tamamlanması

6.7. Benzetim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Geliştirilen otonom iniş sisteminin performansını test etmek üzere hem geleneksel yöntem ile karşılaştırılmış hem de 4 adet senaryo oluşturulmuştur. Geleneksel yöntem ile karşılaştırılma yapılırken yön değişimi olmadan, rüzgarsız ve sis bulunmayan ortamda uçuşlar gerçekleştirilmiştir. Geleneksel otonom iniş sistemi ile karşılaştırma yapılırken yörünge takip süreleri (sn), iniş aşamasında geçen süre (sn), toplam uçuş süresi (sn), İHA'ların toplam otonom iniş mesafesi (m) ve kullanılan enerji (%) parametreleri göz önüne alınmıştır (Tablo 6.1).

Tablo 6.1. Yöntemlerin Karşılaştırılması

Yöntem	Yörünge Süresi (sn)	İniş Süresi (sn)	Toplam Uçuş Süresi (sn)	Toplam Mesafe (m)	Kullanılan Batarya (%)
Geleneksel	168	23	191	2038	5
Geliştirilen	157	11	168	1883	4

Geliştirilen yöntem ile İHA ve kara aracı arasındaki 970 m mesafe ve İHA'nın ortalama hızı 12 m/s, kara aracının hızı ise 6,4 m/s olduğu göz önüne alındığında iniş aşamasına gelene kadar olan yörünge süresinin 11 sn, iniş aşamasının 12 sn ve toplam otonom iniş sürecinin 23 sn azaltıldığı görülmüştür. Geleneksel yöntem ile 191 sn'de

gerçekleşen otonom iniş, geliştirilen yöntem ile 168 sn sürmüş ve %12 daha kısa uçuş süresi elde edilmiştir. Harcanan batarya gücünden ise %20 tasarruf sağlanmıştır.

Geliştirilen yöntemin değişken rüzgar ve sis bulunan ortamlardaki performansını değerlendirmek için oluşturulan senaryolarda İHA'nın görev sonrası hareketli kara aracına toplam iniş süreleri Tablo 6.2.'de verilmiştir. Değişken rüzgâr ve sis uçuş süresini uzatmakla birlikte, İHA hareketli kara aracına başarı ile inişini tamamlamaktadır.

Tablo 6.2. Senaryolarda elde edilen uçuş süreleri

Senaryo	Yörünge Değişimi	Değişken Rüzgar	Sis	İniş Pisti	Uçuş Süresi
1	✓	-	-	1	150 Sn
2	✓	✓	-	1	157 Sn
3	✓	✓	✓	1	160 Sn
4	✓	✓	✓	3	160 Sn

Senaryo 3 içerisinde sis koşulları eklendiğinde, uçuş süresi 160 saniyeye çıkmıştır. Sis, görüş mesafesini azaltarak İHA'nın iniş aşamasında işaretçi tespitini zorlaştırmıştır. İHA, normalde 10 m irtifada platformu algılamaya başladığı için maksimum görüş menzili önce 10 m, daha sonra 7 m seçilerek denemeler yapılmış, 7 m görüş için platform 5 m'den itibaren algılanmış ve değişken rüzgara rağmen iniş başarı ile gerçekleştirilmiştir. Aynı senaryo, 5 m maksimum görüş için de çalıştırılmış, İHA platformu ancak 3 m'de algılayabilmiş ve inişini bu yükseklikten başarı ile gerçekleştirememiştir.

Senaryo 4'te, Senaryo 3'te yer alan tüm faktörler (yörünge değişikliği, değişken rüzgar ve sis) mevcutken, ek olarak benzetim ortamında üç adet iniş pisti oluşturulmuştur. Başlangıç anında en yakın kara aracı iniş pisti olarak seçilmiştir. Seçilen kara aracı Senaryo 3'te yer alan konumda bulunduğu için İHA, aynı süre olan 160 saniyede inişini gerçekleştirmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İnsansız Hava Araçları, önceleri çoğunlukla muharebe, sınır denetimi, keşif, gözetleme, arama-kurtarma, haritalama gibi askeri uygulamalarda kullanılırken günümüzde sivil uygulamalarda da yaygın olarak yer almaya başlamıştır. Özellikle tarımsal ilaçlama, kamera çekimi, kargo taşımacılığı ve yangın söndürme operasyonları gibi çeşitli görevlerde de son derece etkili bir şekilde hizmet vermektedir. İHA'lar, sağladıkları esneklik ve yüksek verimlilik sayesinde, bu görevlerin daha hızlı, güvenli ve maliyet etkin bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Teknolojik ilerlemelerle birlikte, İHA'ların kullanım alanları ve görev yetenekleri de sürekli genişlemekte, böylece modern dünyada vazgeçilmez bir araç haline gelmektedir. Ancak, İHA'ların etkin kullanımını artırmak ve daha zorlu görevleri yerine getirebilmelerini sağlamak için, otonom iniş ve kalkış kabiliyetlerinin geliştirilmesi büyük bir önem taşımaktadır.

İHA'ların hareketli bir platforma otonom olarak iniş yapabilmesi, birçok açıdan kritik bir yenilik ve avantaj sunmaktadır. Bu kabiliyet, İHA'ların operasyonel esnekliğini ve görev başarısını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda lojistik ve güvenlik açısından da önemli faydalar sağlamaktadır. Hareketli platforma iniş, İHA'ların deniz, hava ve kara araçları gibi hareketli hedeflere güvenli ve hassas bir şekilde iniş yapabilmesini mümkün kılarak, operasyonel sürekliliği ve etkinliği artırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, İHA için hareketli bir platforma kısa yoldan, daha az enerji harcayarak yaklaşma ve iniş yapmasını sağlayacak yeni bir otonom sistem geliştirilmiştir. Bunun yanında İHA'ların hareketli platformlara inişi değişken rüzgar, sis, kara aracının hız ve yön değişimi gibi nedenlerle birçok teknik zorluk içerebilir. Geliştirilen otonom iniş sistemi içerisinde kullanılan bir dizi yöntem ve algoritma ile sözü geçen zorlukların üstesinden gelinmeye çalışılmıştır.

İHA'nın hareketli bir platforma başarılı bir iniş gerçekleştirebilmesi için, İHA'nın kendi konum bilgilerine ek olarak hareketli platformun konum, hız ve yönelim bilgilerinden yararlanılmıştır. Bu çerçevede, Kalman filtresi ile belirlenen yörünge noktaları için İHA'nın konum bilgileri ile hareketli platformun konum, hız ve yönelim bilgileri filtre girdisi olarak kullanılmıştır. Üretilen yörünge noktaları, hareketli platformun ilerlediği yöne ve hızına bağlı olarak sürekli güncellenen bir buluşma noktası oluşturmaktadır. Ayrıca, İHA'nın bu buluşma noktasına ulaşabilmesi için gerekli olan hız bilgileri de hesaplanmaktadır.

Tek başına konum bilgileri hem coğrafi koşullar hem de GPS sistemindeki metre düzeyindeki sapmalardan dolayı inişi gerçekleştirmek için yeterli değildir. Bu sebeple İHA'nın iniş aşamasının son fazında ise hassas bir şekilde iniş yapabilmesi için görsel nesne sezimi yönteminden faydalanılmıştır. Geliştirilen senaryolar ile İHA'nın kara aracının yön değiştirmesi, değişen hızda ve yönde rüzgar ve sisli hava şartlarındaki yaklaşma ve iniş performansı da test edilmiş, hareketli platforma başarı ile iniş yaptığı tespit edilmiştir.

Geliştirilen otonom iniş sistemini bu tez çalışmasında kullanılan kara aracı ve hava aracı modellerinden bağımsız olarak IMU ve GPS bilgileri elde edilebilen farklı modeller için de kullanmak mümkündür. Bu sayede, çeşitli İHA ve kara aracı platformlarının benzer sensör verileriyle entegrasyonunu mümkün kılarak, farklı ölçeklerde ve farklı görev gereksinimlerine uygun çözümler sunulabilmektedir. Ayrıca, bu sistem sayesinde İHA teknolojilerinin geniş bir yelpazede kullanım potansiyeli artırılarak, keşif, gözetleme, lojistik, kurtarma operasyonları gibi çeşitli alanlarda etkinliği ve operasyonel güvenilirliğinin artırılabilirliği düşünülmektedir.

Geliştirilen yeni sistemin önceki çalışmalara göre sağladığı en önemli katkı, görevini tamamlayan İHA'nın kısa süre içerisinde, kısa yoldan ve az enerji tüketimi ile hareketli platforma inişini gerçekleştirebilmesidir. Bu sayede yukarıda sözü edilen uygulamalarda yerine getirilecek görev için ayrılan operasyonel uçuş süresi arttırılabilecektir.

Benzetim ortamında gerçekleştirilen bu çalışmada GPS alıcısı, IMU, uçuş kontrol kartı, mikro bilgisayar ve kamera donanımları İHA üzerinde bulunmaktadır. Hareketli kara aracında ise işaretçi, GPS alıcısı ve kara aracının konum bilgilerini İHA'ya yayınlayan verici anteni yer almaktadır. İHA üzerindeki sözü edilen donanımlar her ne kadar toplamda büyük bir ağırlık oluşturmaya da özellikle küçük boyutlu hafif İHA'lar için enerji sarfiyatının artmasına neden olabilir. Bu yüzden geliştirilen otonom iniş sisteminin büyük boyutlu İHA'larda daha performanslı bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir.

Her ne kadar kara aracına yaklaşma ve iniş için gerekli donanımda bir değişiklik gerekmemekle birlikte, örneğin bir kargo taşıma görevinde gidilecek koordinatların İHA'ya iletilmesi, kara aracı veya araçları ile İHA veya İHA'lar arasında koordinasyonun sağlanması için sisteme bir veya birkaç yer istasyonunun dahil edilmesi kaçınılmazdır. Ayrıca kara aracı ile İHA arasında bir iletişim kopukluğu olması durumunda bunun tespit

edilmesi ve İHA'nın en yakın yer istasyonuna veya kalktığı piste yönlendirilmesi yine yer istasyonları ile gerçekleştirilebilecektir.

Bu çalışmanın bulguları, İHA'ların hareketli platformlara otonom iniş yapabilme potansiyelini ortaya koymaktadır. Ancak, gerçek dünya uygulamalarında bu sistemin etkinliğini artırmak için bazı iyileştirmeler önerilmektedir.

GPS arızaları ve hataları, rüzgar, yağmur gibi çevresel faktörlerin iniş üzerindeki etkilerini minimize etmek için daha dayanıklı sistemler geliştirilebilir. Özellikle rüzgarın yön ve hızına karşı sistemin dayanıklılığını artırmak için ek sensörler ve kontrol mekanizmaları entegre edilebilir. Ayrıca, gerçek dünya üzerinde bulunan engelleri de göz önüne alarak engelden sakınma yöntemleri dahil edilebilir.

Bu çalışmada, birden fazla iniş pistleri arasından en yakın pist tercih edilerek başarılı inişler gerçekleştirilmiştir. Ancak, bu tercih aşamasında iniş pistlerinin başka İHA'lar tarafından rezerve edilip edilmediği başta olmak üzere engelden sakınma algoritmalarıyla engelden daha az etkilenen pistlerin tercih edilmesi gibi başka kriterler de göz önünde bulundurulabilir. Ayrıca, birden fazla İHA'nın koordineli bir şekilde birden fazla hareketli platforma iniş yapabilmesi için otonom bir filo yönetim sistemi geliştirilebilir. Bu sayede, daha büyük ölçekte görev veya birden fazla noktaya iniş yapabilmek mümkün hale gelebilir.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ile önerilen yöntem ve algoritmaların gelecekteki araştırmalara ve uygulamalara ışık tutacağı, daha güvenli, verimli ve kullanışlı İHA teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte çalışmanın benzetim ortamında gerçekleştirildiği göz önüne alındığında, geliştirilen algoritmaların ve otonom iniş sisteminin gerçek dünya koşullarında test edilmesi, bu sistemlerin güvenilirliğini ve etkinliğini artıracaktır.

KAYNAKÇA

- Amato, N. M., Bayazit, O. B., Dale, L. K., Jones, C., & Vallejo, D. (1998, May). Choosing good distance metrics and local planners for probabilistic roadmap methods. In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Vol. 1, pp. 630-637). IEEE.
- Aoki, N., & Ishigami, G. (2023). Autonomous tracking and landing of an unmanned aerial vehicle on a ground vehicle in rough terrain. *Advanced Robotics*, 37(5), 344-355.
- Araar, O., Aouf, N., & Vitanov, I. (2017). Vision based autonomous landing of multirotor UAV on moving platform. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 85(2), 369-384.
- Azar, A. T., Koubaa, A., Ali Mohamed, N., Ibrahim, H. A., Ibrahim, Z. F., Kazim, M., ... & Casalino, G. (2021). Drone deep reinforcement learning: A review. *Electronics*, 10(9), 999.
- Baca, T., Stepan, P., Spurny, V., Hert, D., Penicka, R., Saska, M., ... & Kumar, V. (2019). Autonomous landing on a moving vehicle with an unmanned aerial vehicle. *Journal of Field Robotics*, 36(5), 874-891.
- Bicer, Y., Moghadam, M., Sahin, C., Eroglu, B., & Üre, N. K. (2019). Vision-based UAV guidance for autonomous landing with deep neural networks. In *AIAA Scitech 2019 Forum* (p. 0140).
- Bishop, G., & Welch, G. (2001). An introduction to the Kalman filter. In *Proceedings of SIGGRAPH, Course*, 8(27599-23175), 41.
- Borowczyk, A., Nguyen, D. T., Nguyen, A. P. V., Nguyen, D. Q., Saussié, D., & Le Ny, J. (2017). Autonomous landing of a quadcopter on a high-speed ground vehicle. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 40(9), 2378-2385.
- Bouaïss, O., Mechgoug, R., & Taleb-Ahmed, A. (2023). Visual soft landing of an autonomous quadrotor on a moving pad using a combined fuzzy velocity control with model predictive control. *Signal, Image and Video Processing*, 17(1), 21-30.
- Chen, X., Phang, S. K., & Chen, B. M. (2017, May). System integration of a vision-guided UAV for autonomous tracking on moving platform in low illumination condition. In *Proceedings of the ION 2017 Pacific PNT Meeting* (pp. 1082-1092).
- Ciabatti, G., Dafttry, S., & Capobianco, R. (2021). Autonomous planetary landing via deep reinforcement learning and transfer learning. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 2031-2038).
- Cui, Q., Liu, M., Huang, X., & Gao, M. (2023). Coarse-to-fine visual autonomous unmanned aerial vehicle landing on a moving platform. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 3(1), 100088.
- Falanga, D., Zanchettin, A., Simovic, A., Delmerico, J., & Scaramuzza, D. (2017, October). Vision-based autonomous quadrotor landing on a moving platform. In *2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)* (pp. 200-207). IEEE.

- Feng, Y., Zhang, C., Baek, S., Rawashdeh, S., & Mohammadi, A. (2018). Autonomous landing of a UAV on a moving platform using model predictive control. *Drones*, 2(4), 34.
- Gasparetto, A., Boscariol, P., Lanzutti, A., & Vidoni, R. (2015). Path planning and trajectory planning algorithms: A general overview. In *Motion and operation planning of robotic systems* (pp. 3-27). Springer.
- Gazebo. (2021, December 10). Which combination of ROS/Gazebo versions to use. Retrieved from http://gazebo.org/tutorials/?tut=ros_wrapper_versions
- Grewal, M. S., Weill, L. R., & Andrews, A. P. (2007). *Global positioning systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley & Sons.
- Huang, Y. H., Rizal, Y., & Ho, M. T. (2015, November). Development of attitude and heading reference systems. In *2015 International Automatic Control Conference (CACs)* (pp. 13-18). IEEE.
- Iris. (2021, December 5). The ready to fly UAV quadcopter. Retrieved from <http://www.ardupilot.org/iris-quadcopter-uav.html>
- Jin, S., Zhang, J., Shen, L., & Li, T. (2016, July). On-board vision autonomous landing techniques for quadrotor: A survey. In *2016 35th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 10284-10289). IEEE.
- Kimihiro Mori *Alpaca-robotics/ultralytics_ros* https://github.com/Alpaca-robotics/ultralytics_ros
Erişim Tarihi: Şubat 17, 2024
- Molloy, K. (2020). Coordinate frame tutorial. Retrieved March 18, 2022, from https://w3.cs.jmu.edu/molloykp/teaching/cs354/cs354_2020Fall/resources/frame_s.pdf
- Lee, B., Saj, V., Benedict, M., & Kalathil, D. (2020). A vision-based control method for autonomous landing of vertical flight aircraft on a moving platform without using GPS. *arXiv preprint arXiv:2008.05699*.
- Lee, H., Jung, S., & Shim, D. H. (2016, June). Vision-based UAV landing on the moving vehicle. In *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 1-7). IEEE.
- Mohammadi, A., Feng, Y., Zhang, C., Rawashdeh, S., & Baek, S. (2020, September). Vision-based autonomous landing using an MPC-controlled micro UAV on a moving platform. In *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 771-780). IEEE.
- Nogar, S. M. (2020, November). Autonomous landing of a UAV on a moving ground vehicle in a GPS denied environment. In *2020 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)* (pp. 77-83). IEEE.
- Oktal, H., & Yaman, K. (2019). *Uyduya dayalı konum belirleme: GPS-GLONASS-GALILEO-BEIDOU*. Eskişehir: Nisan Kitapevi.
- Paris, A., Lopez, B. T., & How, J. P. (2020, May). Dynamic landing of an autonomous quadrotor on a moving platform in turbulent wind conditions. In *2020 IEEE*

- International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 9577-9583). IEEE.
- Polvara, R., Patacchiola, M., Sharma, S., Wan, J., Manning, A., Sutton, R., & Cangelosi, A. (2018). Toward end-to-end control for UAV autonomous landing via deep reinforcement learning. In 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) (pp. 115-123). IEEE.
- PX4 Autopilot User Guide. (2021, December 17). ROS with Gazebo simulation. Retrieved from https://docs.px4.io/master/en/simulation/ros_interface.html
- PX4 Autopilot User Guide. (2021, December 17). Pixhawk 4. Retrieved from https://docs.px4.io/master/assets/img/pixhawk4_logo_view.20a45ddd.jpg
- Qi, Y., Jiang, J., Wu, J., Wang, J., Wang, C., & Shan, J. (2019). Autonomous landing solution of low-cost quadrotor on a moving platform. *Robotics and Autonomous Systems*, 119, 64-76.
- QGroundControl User Guide. (2021, December 24). Retrieved from <https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/index.html>
- Rivera, Z. B., De Simone, M. C., & Guida, D. (2019). Unmanned ground vehicle modelling in Gazebo/ROS-based environments. *Machines*, 7(2), 42.
- Rodriguez-Ramos, A., Sampedro, C., Bavle, H., De La Puente, P., & 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.
- ROS Distributions. (2021, December 20). Retrieved from <http://wiki.ros.org/Distributions>
- ROS Wiki RQT Documentation. <http://wiki.ros.org/rqt> Erişim Tarihi: Nisan 22,2022
- ROS Wiki TF Documentation. <http://wiki.ros.org/tf> Erişim Tarihi: Nisan 24,2022
- ROS Wiki Rostopic Documentation. <http://wiki.ros.org/rostopic> Erişim Tarihi: Nisan 24,2022
- Sokolova, M., Japkowicz, N., & Szpakowicz, S. (2006). Beyond accuracy, F-score and ROC: A family of discriminant measures for performance evaluation. In *AI 2006: Advances in Artificial Intelligence: 19th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence* (pp. 1015-1021). Springer Berlin Heidelberg.
- Sun, S., & Zhong, Y. (2020). UAV autonomous landing technology based on vision perception: A survey. *Electronics*, 9(5), 757.
- YoloV8 ultralytics/ultralytics <https://github.com/ultralytics/ultralytics> Erişim Tarihi: Ocak 07, 2023
- Wang, C., Li, Y., & Wang, S. (2022). Autonomous landing of UAV on moving platform using a modified reinforcement learning-based controller. *Aerospace Science and Technology*, 127, 107714.

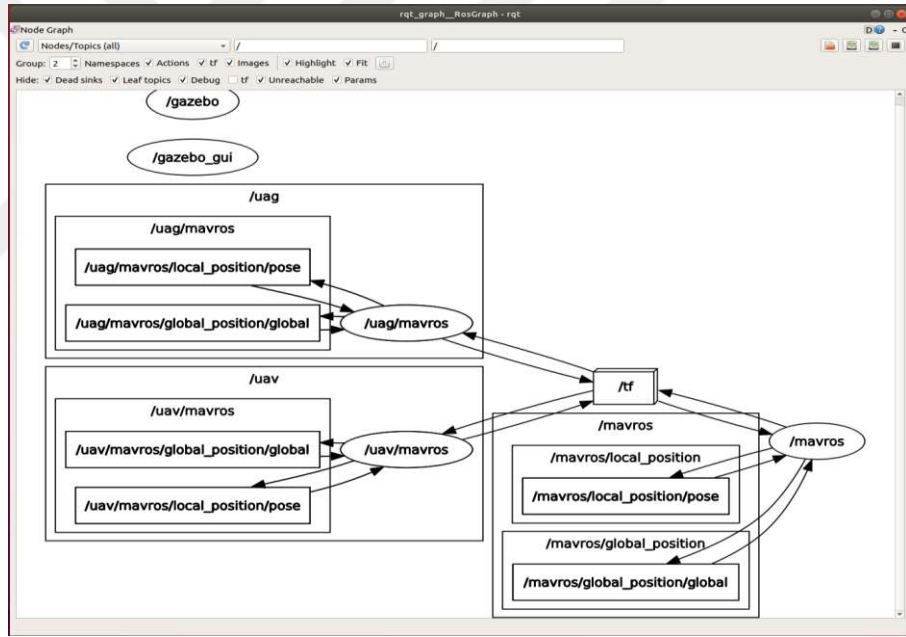
EKLER

EK 1. ROS'DA BAŞLIKLAR ARASI HABERLEŞME VE MESAJ YAPILARI

Başlıklar Arası Haberleşme

Robot İşletim Sistemi (ROS), robotların farklı platformlarda kullanımını ve kullanıcı ile iletişimini kolaylaştırmak için sensörler, motorlar ve kameralar gibi robot donanımlarını fiziksel modeller yerine özellikler olarak ele almaktadır. Bu özellikler düğüm (node) ve başlıklar (topic) aracılığı ile kullanılmaktadır. Sistemde gerçek zamanlı düğümler ve başlıklar arası ilişkiyi incelemek için 'rqt_graph' paketi kullanılmaktadır (ROS Wiki RQT, 2022).

Robotların bulunduğu harita üzerinde, İHA'nın ve kara aracının lokal ve küresel konum düğümleri haberleşme ilişkisi Görsel 1.1'de sunulmuştur.



Görsel 1.1. Benzetim ortamında bulunan düğümler, başlıklar ve paketler arası ilişki

Görselde yer alan 'Mavros' düğümü, benzetim ortamında ROS başlıkları ile MAVLink mesajları arasında dönüşüm yapabilmekte, ayrıca uçuş kontrolcü kartlarının ROS ile haberleşmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda QGroundControl gibi yer kontrol istasyonları için MAVLink iletişimini de üstlenmiştir.

ROS'un gelişimi sırasında, robotların koordinat çerçevelerini takip etmek, karmaşık işlemler gerektirmekteydi. Bu ve bunun gibi zorlukların üstesinden gelebilmek

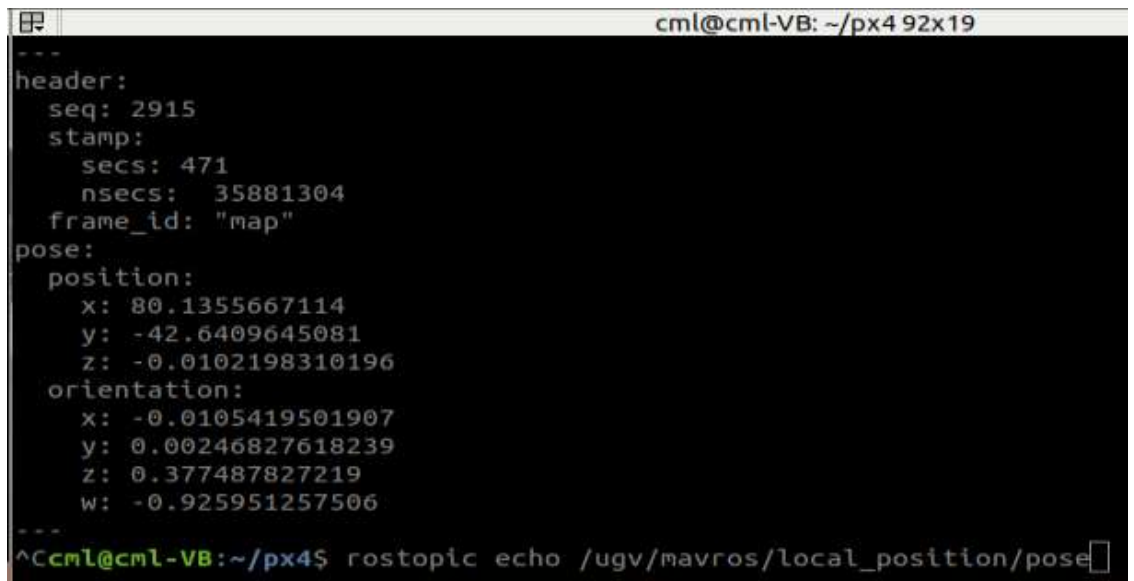
adına 'tf' paketi geliştirilmiştir. Tf paketi kullanıcının zaman içerisinde birden çok koordinat çerçevesini takip etmesini sağlayan bir pakettir. Referans koordinat sistemine göre her bir robotun konumunu ve oryantasyonunu takip edebilmek için ilgili robota bir eksen takımı atanmaktadır. Bu şekilde robot hareket ettiğinde ana koordinat sistemine göre hangi zamanda nerede olduğunun bilinmesine imkan sağlamıştır (ROS Wiki TF, 2022).

Mesaj Yapıları

Aktif başlıkların yapısı hakkında bilgi almak, ekranda listelemek ve bu başlıklara veri göndermek için 'rostopic' komutu ve onun alt komutları kullanılmaktadır (ROS Wiki Rostopic, 2022).

- rostopic bw: Konunun kullandığı band genişliğini (bandwidth) gösterir.
- rostopic echo: Ekrana mesajları yansıtır.
- rostopic hz: Konuların yayın yüzdesini (publishing rate) ekrana verir.
- rostopic list: Aktif konular hakkında bilgi verir.
- rostopic pub: Konuya veri yayınlar.
- rostopic type: Konu tipini verir.

Önceki çalışmalarda kara aracının konum verilerini almak için 'rostopic echo' komutu ve '/Mavros/local_position/pose' başlığı kullanılmıştır. Ekranda gerçek zamanlı kara aracının konum bilgileri listelenmektedir (Görsel 1.2).

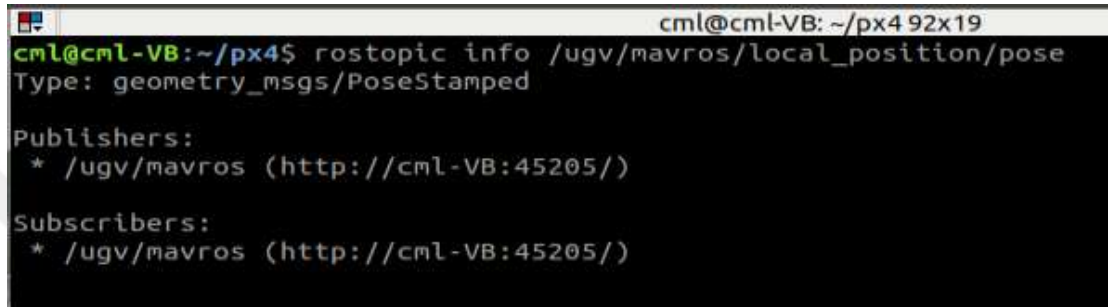


```
cml@cml-VB: ~/px4 92x19
---
header:
  seq: 2915
  stamp:
    secs: 471
    nsecs: 35881304
  frame_id: "map"
pose:
  position:
    x: 80.1355667114
    y: -42.6409645081
    z: -0.0102198310196
  orientation:
    x: -0.0105419501907
    y: 0.00246827618239
    z: 0.377487827219
    w: -0.925951257506
---
^Ccml@cml-VB:~/px4$ rostopic echo /ugv/mavros/local_position/pose
```

Görsel 1.2. Kara aracının lokal konum bilgileri

Bu konum bilgileri 3. parti yazılım ve kodlama yöntemleri ile kullanılmak istendiği zaman, bu başlığın mesaj bilgisi ve mesaj tipinin bilinmesi gerekmektedir. Mesaj bilgisini incelemek için ‘rostopic info’ komutu kullanılmaktadır.

Görsel 1.3’te ilgili başlığın mesaj tipinin “geometry_msgs/PoseStamped.msg” olduğu ve ‘/mavros’ başlığının hem abonesi hem de yayıncısı olduğu görülmektedir. “geometry_msgs/PoseStamped.msg” mesaj tipinin veri formatını incelemek için “rosmmsg Show” komutu kullanılmaktadır.



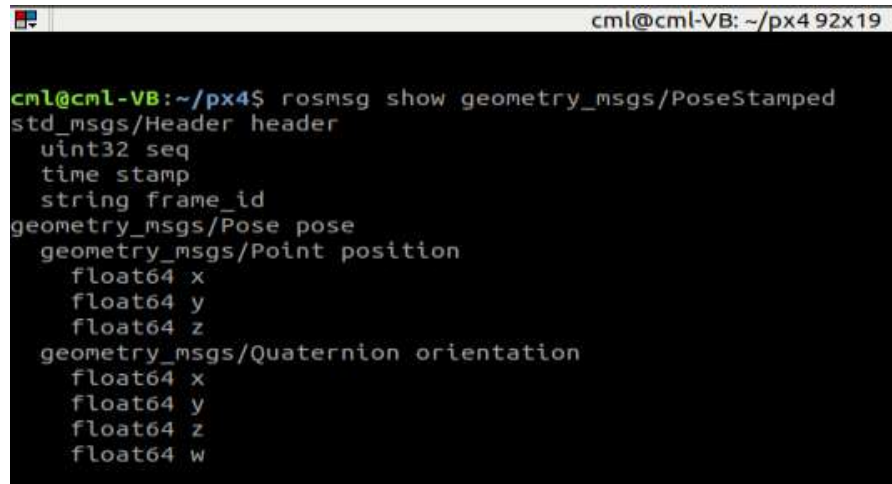
```
cml@cml-VB: ~/px4 92x19
cml@cml-VB:~/px4$ rostopic info /ugv/mavros/local_position/pose
Type: geometry_msgs/PoseStamped

Publishers:
 * /ugv/mavros (http://cml-VB:45205/)

Subscribers:
 * /ugv/mavros (http://cml-VB:45205/)
```

Görsel 1.3. ‘/Mavros/local_position/pose’ başlığının mesaj bilgisi

Görsel 1.4’te görüleceği üzere float64 tipinde x,y,z değerlerini konum için ve x,y,z,w Kuaterniyon değerlerini oryantasyon için sağladığı görülmektedir.



```
cml@cml-VB: ~/px4 92x19
cml@cml-VB:~/px4$ rosmmsg show geometry_msgs/PoseStamped
std_msgs/Header header
  uint32 seq
  time stamp
  string frame_id
geometry_msgs/Pose pose
  geometry_msgs/Point position
    float64 x
    float64 y
    float64 z
  geometry_msgs/Quaternion orientation
    float64 x
    float64 y
    float64 z
    float64 w
```

Görsel 1.4. ‘/Mavros/local_position/pose’ başlığının mesaj yapısı

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0002-2445-0220

Ad Soyad : Cemal IŞILAK

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Geçmişi:

- 2024, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı, Doktora.
- 2017, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans.
- 2013, Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Lisans.

Mesleki Geçmişi:

- 2018-2024, Araştırma Görevlisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü.
- 2015-2018, Araştırma Görevlisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği.
- 2015-2015, Araştırma Görevlisi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Ali Cavit Çelebioğlu Sivil Havacılık Yüksekokulu.

Yayınları ve Bilimsel Faaliyetleri:

- Işılak, C., Durmaz, O., Şalk, Y., Çevıkalp, H., Dutağacı, H., & Gırgın, T. (2023, July). Measuring Electromagnetic Field Strength in Base Stations Using Unmanned Aerial Vehicles. In 2023 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
- Aydın, E., Isilak, C., Suzer, A. E., & Atasoy, V. E. (2021). Serviceability analysis of training aircraft subject to maintenance operations in a flight training organisation: a case study. *International Journal of Sustainable Aviation*, 7(1), 93-112.

- ÜNCÜ, İ. S., IŞILAK, C., & SELVİ, K. (2017). Güneş Enerjili Kesintisiz Güç Kaynağı Tasarımı Ve Uygulaması. Presented at the International Congress of the New Approaches and Technologies for Sustainable Development .
- ÜNCÜ, İ. S., IŞILAK, C., & KESKİN, M. (2017). Havalimanlarındaki akülerin gsm modülü ile kontrolü. Presented at the International Congress of the New Approaches and Technologies for Sustainable Development .
- ÜNCÜ, İ. S., & IŞILAK, C. (2017). The Analysis of Wind Turbine Performance depending on the wind speed and its height by using Aerostat System. Presented at the 4th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering .
- ÜNCÜ, İ. S., ASLAN, M. F., & IŞILAK, C. (2017). Application Of Nfc Feature Phones To Lightning Systems. Presented at the International Conference on Engineering Technologies .
- IŞILAK, C., & ÜNCÜ, İ. S. (2017). Aerostat İle Ölçülen Rüzgar Hızlarının Veri Madenciliği Yöntemi Kullanarak Tahmini. Presented at the International Congress of the New Approaches and Technologies for Sustainable Development.
- IŞILAK, C., & ÜNCÜ, İ. S. (2017). Bölgesel Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Aerostat Yardımı İle Belirlenmesi. Presented at the International Congress of the New Approaches and Technologies for Sustainable Development .
- Üncü, İ. S., & Isilak, C. (2016, November). Güneş Enerji Santralleri için Eğitim ve Konuma Bağlı Güneşlenme Zamanı Belirleyici Uzaktan Kumandalı Arazi Aracı Tasarımı. In 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016) 3-5 Nov 2016 Alanya/Antalya-Turkey.
- Üncü, İ. S., & Isilak, C. (2016, November). Trafik Işıklarının Araç ile Haberleşmesi ile Yeşil Işık Geçiş Sistem. In 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016) 3-5 Nov 2016 Alanya/Antalya-Turkey.