

JAR - 6 / 1

E-ISSN: 2687-3338

FEBRUARY 2024



JOURNAL OF
AVIATION
RESEARCH

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERĐİSİ





JOURNAL OF
AVIATION
RESEARCH

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERĐİSİ

6 / 1



JOURNAL OF
**AVIATION
RESEARCH**

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERĐİSİ

Yılda iki sayı olarak yayımlanan uluslararası hakemli,
açık erişimli ve bilimsel bir dergidir.

Cilt: 6
Sayı: 1
Yıl: 2024

2019 yılından itibaren yayımlanmaktadır.

© Telif Hakları Kanunu çerçevesinde makale sahipleri ve
Yayın Kurulu'nun izni olmaksızın hiçbir şekilde
kopyalanamaz, çoğaltılamaz. Yazıların bilim,
dil ve hukuk açısından sorumluluğu
yazarlarına aittir.

Elektronik ortamda yayımlanmaktadır.
<https://dergipark.org.tr/jar>
Ulaşmak için tarayınız:

This is a scholarly, international, peer-reviewed, open-access
journal published international journal published twice a year.

Volume: 6
Issue: 1
Year: 2024

Published since 2019.

© The contents of the journal are copyrighted and may not
be copied or reproduced without the permission of the
publisher. The authors bear responsibility for the
statements or opinions of their
published articles.

This journal is published digitally.
<https://dergipark.org.tr/jar>
Scan for access:



Yazışma Adresi:
Süleyman Demirel Üniversitesi
Sivil Havacılık Yüksekokulu Müdürlüđu
Keçiborlu / Isparta - Türkiye

E-Posta:
journalofaviationresearch@gmail.com

Telefon:
+90 246 211 85 00

Dahili:
8505

Correspondence Address:
Süleyman Demirel University
Directorate of Civil Aviation School
Keçiborlu / Isparta - Türkiye

E-Mail:
journalofaviationresearch@gmail.com

Telephone:
+90 246 211 85 00

Ext:
8505



JOURNAL OF AVIATION RESEARCH

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERGİSİ

Yayın Sahibi

Doç. Dr. İnan Eryılmaz

Baş Editör

Doç. Dr. İnan Eryılmaz

Editör Kurulu

Doç. Dr. İnan Eryılmaz
Doç. Dr. Deniz Dirik
Doç. Dr. Yasin Şöhret
Dr. Öğr. Üyesi Şener Odabaşoğlu
Dr. Öğr. Üyesi Leyla Adiloğlu Yalçinkaya
Dr. Tamer Saraçyakupoğlu
Doç. Dr. Vahap Önen
Doç. Dr. Gökhan Tanrıverdi

Dil Editörleri

Doç. Dr. Deniz Dirik
Doç. Dr. Tuğba Erhan

Yayın ve Danışma Kurulu

Prof. Dr. Cem Harun Meydan
Prof. Dr. Dukagjin Leka
Prof. Dr. Ender Gerede
Prof. Dr. Ferişt Kolbakır
Prof. Dr. Osman Ergüven Vatandaş
Doç. Dr. Akansel Yalçinkaya
Doç. Dr. Asena Altın Gülova
Doç. Dr. Burcu Güneri Çangarlı
Doç. Dr. Engin Kanbur
Doç. Dr. Eyüp Bayram Şekerli
Doç. Dr. Ferhan Sayın
Doç. Dr. Florina Oana Virlanuta
Doç. Dr. Güler Tozkoparan
Doç. Dr. Hakkı Aktaş
Doç. Dr. Mehmet Kaya
Doç. Dr. Önder Altuntaş
Doç. Dr. Özgür Demirtaş
Doç. Dr. Rüstem Barış Yeşilay
Doç. Dr. Semih Soran
Dr. Öğr. Üyesi Birsan Açıkcel
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin Uzunbacak
Dr. Öğr. Üyesi Muhittin Hasan Uncular
Dr. Öğr. Üyesi Rukiye Sönmez
Dr. Öğr. Üyesi Tahsin Akçakanat
Dr. Öğr. Üyesi Uğur Turhan
Dr. Öğr. Üyesi Rıza Gürler Akgün

Grafik Tasarım

Dr. Öğr. Üyesi Rıza Gürler Akgün

Owner

Assoc. Prof. Dr. İnan Eryılmaz, Ph.D.

Editor in Chef

Assoc. Prof. Dr. İnan Eryılmaz, Ph.D.

Editorial Board

Assoc. Prof. İnan Eryılmaz, Ph.D.
Assoc. Prof. Deniz Dirik, Ph.D.
Assoc. Prof. Yasin Şöhret, Ph.D.
Asst. Prof. Şener Odabaşoğlu, Ph.D.
Asst. Prof. Leyla Adiloğlu Yalçinkaya, Ph.D.
Tamer Saraçyakupoğlu, Ph.D.
Assoc. Prof. Vahap Önen, Ph.D.
Assoc. Prof. Gökhan Tanrıverdi, Ph.D.

Language Editors

Assoc. Prof. Deniz Dirik, Ph.D.
Assoc. Prof. Tuğba Erhan, Ph.D.

Editorial and Advisory Board

Prof. Cem Harun Meydan, Ph.D.
Prof. Dukagjin Leka, Ph.D.
Prof. Ender Gerede, Ph.D.
Prof. Ferişt Kolbakır, Ph.D.
Prof. Osman Ergüven Vatandaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Akansel Yalçinkaya, Ph.D.
Assoc. Prof. Asena Altın Gülova, Ph.D.
Assoc. Prof. Burcu Güneri Çangarlı, Ph.D.
Assoc. Prof. Engin Kanbur, Ph.D.
Assoc. Prof. Eyüp Bayram Şekerli
Assoc. Prof. Ferhan Sayın, Ph.D.
Assoc. Prof. Florina Oana Virlanuta, Ph.D.
Assoc. Prof. Güler Tozkoparan, Ph.D.
Assoc. Prof. Hakkı Aktaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Mehmet Kaya, Ph.D.
Assoc. Prof. Önder Altuntaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Özgür Demirtaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Rüstem Barış Yeşilay, Ph.D.
Assoc. Prof. Semih Soran, Ph.D.
Asst. Prof. Birsan Açıkcel, Ph.D.
Asst. Prof. Hasan Hüseyin Uzunbacak, Ph.D.
Asst. Prof. Muhittin Hasan Uncular, Ph.D.
Asst. Prof. Rukiye Sönmez, Ph.D.
Asst. Prof. Tahsin Akçakanat, Ph.D.
Asst. Prof. Uğur Turhan, Ph.D.
Asst. Prof. Rıza Gürler Akgün, Ph.D.

Graphic Design

Asst. Prof. Rıza Gürler Akgün, Ph.D.



JOURNAL OF
**AVIATION
RESEARCH**
HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERGİSİ

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

MEVLÜT COŞKUN TEZCAN

Pisagor Bulanık Kümelere Entegre AHP ve TOPSIS Yöntemleri ile Uçak Tipi Seçiminin Optimizasyonu: Havayolu İşlemleri İçin Model Önerisi

Optimization of Aircraft Type Selection by Integrated AHP and TOPSIS Methods on Pythagorean Fuzzy Sets: Model Suggestion for Airline Processing 1 - 24

BURAK ÇINAR

Air Warfare Over Europe: An Exploration of The Luftwaffe Experience

Avrupa Üzerinde Hava Savaşı: Luftwaffe Deneyiminin Keşfi 25 - 52

Derleme Makaleler / Review Articles

ENGİN GÖDE - ATANUR TEOMAN - MELİH CEMAL KUŞHAN - KÜRŞAT TONBUL - GÖKHAN İBRAHİM ÖĞÜNÇ - BATUHAN DAZ

İnsansız Hava Araçları (İHA) İçin Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) Bağımsız Navigasyon

Global Navigation Satellite System (GNSS) Independent Navigation for Unmanned Aerial Vehicles (UAV) 53 - 88

ARİF TUNCAL - UFUK EROL

Integrating Unmanned Aerial Vehicles in Airspace: A Systematic Review

İnsansız Hava Araçlarının Hava Sahasına Entegrasyonu: Sistemik Bir İnceleme 89- 115



İnsansız Hava Araçları (İHA) İçin Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) Bağımsız Navigasyon

Engin GÖDE¹

Atanur TEOMAN²

Melih Cemal KUŞHAN³

Kürşat TONBUL⁴

Gökhan İbrahim ÖĞÜNÇ⁵

Batuhan DAZ⁶

| | | |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Derleme Makale | DOI: 10.51785/jar.1370785 | |
| Gönderi Tarihi: 03.10.2023 | Kabul Tarihi: 28.01.2024 | Online Yayın Tarihi: 28.02.2024 |

Öz

İnsansız Hava Araçlarının (İHA) otonom navigasyon yapabilmesi, Global Navigation Satellite System (GNSS-Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) ile sunulan konumlarının doğru olarak belirlenmesine bağlıdır. Uçuş esnasında konum belirlemek ve çevresel oryantasyon için İHA'lar genellikle GNSS, Inertial Measurement Unit (IMU, Ataletsel Ölçüm Birimi-AÖB), jiroskop ve ivmeölçer gibi elektronik ekipmanlarla donatılmıştır. Ancak, kötü hava koşulları, engellerin veya arazilerin varlığı, uyduların elverişsiz konumu, aldatma (spoofing) ve karıştırma (jamming) nedeniyle GNSS sinyali kaybolabilir veya bozulabilir. Bu gibi GNSS sinyali kaybolma veya bozulma durumlarında, AÖB tek başına güvenilir İHA konum bilgisi sağlayamaz hale gelmektedir. Özellikle yeterli görüşün olmadığı ve manuel kullanım ile İHA'nın kalkış noktasına getirilemediği durumlarda GNSS sinyalinin kaybolması büyük kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışmada, yapılan GNSS bağımsız uçuş ve navigasyon çalışmalarına yer verilmiştir. Hibrit navigasyon çözümlerinin kullanılmasının GNSS bağımsız İHA uçuşlarında büyük öneme sahip olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: İHA, GNSS-bağımsız, navigasyon.

JEL Sınıflandırma: M10, M19.

Global Navigation Satellite System (GNSS) Independent Navigation for Unmanned Aerial Vehicles (UAV)

Abstract

The ability of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) to perform autonomous navigation depends on the accurate determination of their positions provided by the Global Navigation Satellite System (GNSS). For position determination and environmental orientation during flight, UAVs are usually equipped with electronic equipment such as GNSS, Inertial Measurement Unit (IMU), gyroscope and accelerometer. However, the GNSS signal may be lost or distorted due to poor weather, obstacles or terrain, the unfavorable position of satellites, spoofing and jamming. In such cases of GNSS signal loss or deterioration, the IMU alone becomes unable to provide reliable UAV location information. Especially in cases where there is not enough visibility and the UAV cannot be brought to the take-off point by manual operation, the loss of the GNSS signal causes great losses. In this paper, GNSS independent flight and navigation studies are included. It is seen that the use of hybrid navigation solutions has great importance in GNSS independent UAV flights.

Key Words: UAV, GNSS-independent, navigation.

JEL Classification: M10, M19.

¹Doktor, STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş. engin.gode@stm.com.tr (Sorumlu yazar)

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, ataatymnn@gmail.com

³Profesör Doktor, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, erzesk@gmail.com

⁴Savunma Sanayi Başkanlığı, kursattonbul@gmail.com

⁵Profesör Doktor, Jandarma ve Sahil Güvenlik Akademisi, gokhan.ogunc@gmail.com

⁶Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, batuhandazeee@gmail.com

GİRİŞ

İHA'lar hem sivil hem de askeri uygulamalarda geniş kullanım alanlarına sahiptir (Benini, Mancini ve Longhi, 2013). Birçok savunma, keşif ve gözetleme operasyonu için İHA'lar merkezi bir rol oynamaktadır (Russell vd., 2020). Bu araçlar insanlar için düşman ortamlarında yer alan ulaşılması imkânsız veya tehlikeli görevleri gerçekleştirebilmektedirler (Benini, Mancini ve Longhi, 2013). İlk dronlar, radyo ünitesi tarafından yer istasyonu ile insan operatörü tarafından kontrol edilmekteydi. Ancak günümüzde İHA'lar daha karmaşık sistemlere sahip olup, önceden programlanmış uçuş planları ile otonom olarak uçabilmektedir (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).

Navigasyon, zamana göre önceden tanımlanmış bir referansa göre olan bağıl konum, hız ve oryantasyon olarak tanımlanabilir (Veth, 2006). İHA'ların otonom navigasyonu, yaygın olarak GNSS ile sağlanan konum belirleme olayına bağlıdır (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011). İHA'lar GNSS'e dayalı açık ortam engel tanımlı uçuşta iyi performans göstermektedir (Perez-Grau vd., 2018). Ancak çoğu durumda, bir dronu bir verici ile manuel olarak kontrol etmek için bir insanlı pilota ihtiyaç vardır ve yeterli açık GNSS koşulları altında otonom görev icrası kısmen mümkün olmaktadır (Bi vd., 2017).

Ticari İHA'ların çoğu uygun durum (konum, hız ve duruş) tahmini elde etmek için Inertial Navigation System (INS, Ataletsel Navigasyon Sistemi-ANS) ve GNSS bilgi füzyonunu kullanırlar. Bazı küçük ve mikro İHA'lar, kısıtlı alan, boyut, ağırlık, güç ve maliyet nedeniyle sensör kullanımında sınırlamalarla karşılaşmaktadır ve bu İHA'lar mağaralar, tüneller, kentsel ve doğal alanlar, kanyonlar ve şehir merkezi alanları gibi zorlu ortamlarda görev yapmaktadır (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018). Otonom bir İHA uçuşu sırasında konum ve yön belirlemek için genellikle GNSS ile birlikte üç jiroskop ve üç ivmeölçerden oluşan AÖB'yi kullanmaktadır (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011). İHA boyutundan bağımsız olarak, GNSS, AÖB tarafından sergilenen sapmayı sınırlandırmada hayati bir rol oynamakta ve araca mutlak konum bilgisi sağlamaktadır (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018). Ancak, gerçek çalışma ortamları dinamik olan bu ortamlar kısmen bilinmektedir ve genellikle GNSS erişimsizdir (Mohta vd., 2018). GNSS sinyali; kapalı ortamlarda, yer altında, kentsel ve doğal kanyonlarda, kötü hava koşulları, engellerin veya arazilerin varlığı, uyduların elverişsiz konumu, aldatma ve karıştırma nedenleriyle kaybolabilmekte veya bozulabilmektedir (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011; DeFranco vd., 2014). Genel olarak, GNSS sinyalinin zayıf olduğu ya da bu sinyale erişim olmayan ortamlarda, navigasyon sorunları nedeniyle otonom uçuşlar engellenmektedir. Bu durum görev icrasında önemli zorluklara yol açmakta veya en azından İHA'nın kabiliyetlerini sınırlayan manuel kullanımı gerektirmektedir (Causa vd., 2018).

Konumlandırma için yalnızca GNSS'ye güvenmek, sinyal karıştırma veya platformun ele geçirilmesi açısından güvenlik sorunlarına neden olduğundan, potansiyel olarak savunmasız bir sistemle neticelenebilmektedir (Perez-Grau vd., 2018). Bu şartlardaki İHA kullanımlarında GNSS'in olmaması navigasyon ve karar mekanizmaları için İHA'ya monte edilmiş dışa duyarlı sensörlerin kullanımını gerektirmektedir (Sampedro vd., 2019). İHA'ların otonom navigasyonunda genellikle yerleşik AÖB kullanılır. AÖB, üç ivmeölçere ve başlangıç noktasından doğrusal hareketi ve açısal hareketi bulmak için jiroskopa sahiptir.

Ancak AÖB ölçümleri zaman içinde birikmiş hatalardan zarar görmektedir. Bu sapma hataları çok küçük bile olsa zamanla birikerek büyük bir değere ulaşmaktadır (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016). İHA durum tahmin çözümündeki (konum, hız ve duruş) bu sapmalar yüzünden AÖB tek başına güvenilir İHA konum bilgisi sağlayamaz hale gelmektedir. Bu durum ise İHA konumunun doğru olarak belirlenmesinde hatalara yol açmaktadır. İHA özellikle, pilotun görüş alanından çıktığında ve manuel olarak kalkış noktasına İHA'nın geri getirilemediği durumlarda bu konum belirleme hataları yüzünden hayati derecedeki kötü sonuçlarla karşılaşılabilir (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011).

Geleneksel olarak, birikmiş hatayı telafi etmek için GNSS konum ölçümleri, AÖB ölçümleri ile birleştirilir. Ancak GNSS sinyalleri her yerde mevcut değildir ve düşman bölgelerinde, bina yapılarında ve su kütlelerinde kesintiye uğramakta veya erişimsiz hale gelmektedir. GNSS, erişimsiz ortamlarda navigasyon için görsel odometri ve Simultaneous Localization and Mapping (SLAM-Eş Zamanlı Lokalizasyon ve Haritalama) gibi alternatif yöntemler yaygın olarak kullanılan tekniklerdir (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016). GNSS erişimsiz ortamlarda navigasyon çalışmaları üzerinde çok çalışılan bir teknolojik alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

1. YÖNTEM

Bu çalışmada İHA'ların GNSS-erişimsiz ortamlardaki navigasyon seçenekleri araştırılmıştır. Literatürde yer alan GNSS-bağımsız navigasyon tekniklerine ve çalışmalarına yer verilmiştir. Literatür taramasında uluslararası dergiler, uluslararası sempozyum/konferans sunum ve bildiri kitapçıkları, North Atlantic Treaty Organization (NATO-Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü) Teknik Raporları, ulusal dergiler ve internet kaynakları kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında GNSS-bağımsız navigasyon konusundaki ilgili araştırma sonuçlarından önce GNSS ve GNSS erişimine engelleyici durumlar, olaylar ve cihazlar hakkında yapılan literatür araştırması sonuçlarına çalışmanın ön kısmında yer verilmiştir. GNSS-bağımsız navigasyon ana konusu ile ilgili literatür araştırmasında ise öncelikli olarak GNSS-bağımsız navigasyon konu başlığı altında yapılan geniş kapsamlı derleme çalışmaları analiz edilmiştir. Bu analiz çalışmaları sonucunda konu üzerinde yüksek uygulanabilirliğe sahip spesifik başlıklar üzerinde literatür taramaları gerçekleştirilmiştir ve bu çalışmalarda ortak ve yenilikçi uygun çalışmalar kapsama dahil edilmiştir.

2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ (GNSS)

Uydu navigasyonu, otonom coğrafi mekansal konumlandırma sağlamak için uyduları kullanan bir sistemdir. Bu sistem uydu navigasyon cihazlarının, uydulardan radyo ile bir görüş hattı boyunca iletilen zaman sinyallerini kullanarak yüksek hassasiyetle (birkaç santimetreye kadar) konumlarını (boylam, enlem ve irtifa/rakım) belirlemesine olanak tanır. Sistem, konum sağlamak, navigasyon yapmak veya alıcı takılmış bir cihazın konumunu izlemek (uydu takibi) için kullanılabilir. Sinyaller aynı zamanda elektronik alıcının mevcut yerel zamanı yüksek bir hassasiyetle hesaplamasına izin verir, bu da zaman senkronizasyonuna olanak tanır (Satellite Navigation, 2024).

Küresel kapsamaya sahip bir uydu navigasyon sistemi, GNSS olarak adlandırılabilir (Satellite Navigation, 2024). Günümüzde hassas konum bilgisi üretilmesi amacıyla tüm dünyayı kapsayacak şekilde tasarlanmış 4 (dört) küresel ve yerel ihtiyaçları karşılamaya yönelik planlanmış 2 (iki) bölgesel konumlandırma sistemi bulunmaktadır (Pırtı, Gündoğan ve Şimşek, 2022). Amerika Birleşik Devletleri'nin (ABD), küresel konumlandırma sistemi Global Positioning System (GPS-Küresel Konumlandırma Sistemi), Rusya'nın küresel konumlandırma sistemi Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS - Küresel Uydu Konumlandırma Sistemi), Çin'in küresel konumlandırma sistemi BeiDou ve Avrupa Birliği'ne ait küresel konumlandırma sistemi Galileo tamamen çalışır durumdaki sistemlerdir. Japonya'nın bölgesel konumlandırma sistemi Quasi-Zenith Satellite System (QZSS-Quasi Zenith Uydu Sistemi), GPS'ten bağımsız uydu navigasyonu ile GPS'in doğruluğunu artırmak için GPS uydu tabanlı bir büyütme sistemidir. Hindistan bölgesel konumlandırma uydu sisteminin (Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS- Hint Bölgesel Navigasyon Uydu Sistemi)), uzun vadede küresel bir sürüme geçmesi planlanmaktadır (Satellite Navigation, 2024). GNSS'a ait ilişkin temel bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Küresel Navigasyon Uydu Sistemlerinin Karşılaştırılması

| | Kurucu | Kapsam | Rakım (m) | Uydu Sayısı |
|--------------------|---------------------|---------------|------------------|------------------------|
| GPS | ABD Uzay Kuvvetleri | Küresel | 20.180 | 32 |
| GLONASS | Roskosmos | Küresel | 19.130 | 24 |
| Galileo | GSA ve ESA | Küresel | 23.222 | 30 |
| BeiDou | CNSA | Küresel | 21.528 35.786 | 35 |
| QZSS | JAXA | Bölgesel | 32.000 40.000 | 4 |
| IRNSS/NavIC | ISRO | Bölgesel | 36.000 | 8 (7 tanesi yörüngede) |

Kaynak: Pırtı, Gündoğan ve Şimşek, 2022

GPS'i en gelişmiş ve yaygın olarak kullanılan GNSS'dir (Schmidt, 2019). GPS, (aslen Navstar GPS), ABD hükümetine ait olan ve Birleşik Devletler Uzay Kuvvetleri tarafından işletilen uydu tabanlı bir radyo navigasyon sistemidir. Dört veya daha fazla GPS uydusuna engelsiz bir görüş hattının olduğu, Dünya üzerinde veya yakınında herhangi bir yerdeki bir GPS alıcısına coğrafi konum ve zaman bilgisi sağlayan GNSS'lerden biridir. Dünyanın her yerindeki askeri, sivil ve ticari kullanıcılara kritik konumlandırma yetenekleri sağlar. GPS sistemini oluşturan ABD hükümeti, kontrol edip ve idamesini sağlasa da, GPS alıcısı olan herkes sisteme ücretsiz olarak erişebilir. GPS projesi, 1960'ların sınıflandırılmış mühendislik tasarım çalışmaları da dahil olmak üzere geçmişteki birkaç fikri birleştirerek önceki navigasyon sistemlerinin sınırlamalarının üstesinden gelmek için 1973'te ABD Savunma Bakanlığı tarafından başlatılmıştır. İlk prototip uzay aracı 1978 yılında fırlatılmış ve 24 uydudan oluşan kümelenme 1993 yılında faaliyete geçmiştir (Global Positioning System, 2024). Gerçek zamanlı kinematik yaklaşımıyla GPS kullanımında 1 cm'ye kadar yüksek konumlandırma doğruluğu elde edilebilir (Pavlenko vd., 2019).

GLONASS, Rusya Federasyonu'nun sahip olduğu ve işlettiği küresel bir GNSS'dir. Tamamen işlevsel durumda olan sistem 24+ uydudan oluşur (Other Global Navigation

Satellite Systems, 2021). GLONASS, askeri ve sivil kullanıcılar için radyonavigasyon-uydu hizmetinin bir parçası olarak çalışan bir Rus uydu navigasyon sistemidir. GPS'e bir alternatif sunar ve küresel kapsam ve karşılaştırılabilir hassasiyetle çalışan ikinci navigasyon sistemidir. Hem GPS hem de GLONASS'ı destekleyen uydu navigasyon cihazları daha fazla uyduya sahiptir. Bu durum özellikle binaların bazı uyduların görüşünü engelleyebileceği yerleşim alanlarda cihaz konumlarının daha hızlı ve doğru bir şekilde sabitlenebileceği anlamına gelmektedir. GPS sistemlerine GLONASS takviyesi, yüksek enlemlerde (kuzey veya güney) konumlandırmayı da iyileştirmektedir. 12 Ekim 1982'den başlayarak, 1995'te uydu sisteminin tamamlanmasına kadar, çok sayıda roket fırlatma ile sisteme uydular eklenmiştir. GPS sinyali almanın sorunlu olabileceği enlemlerde (kuzey veya güney), GLONASS'ın yörüngesi, onu özellikle yüksekte kullanım için uygun hale getirmektedir. Küresel kapsama alanına sahip tamamen işlevsel bir uydu sistemi 24 uydudan oluşurken, Rusya topraklarını kapsamak için 18 uydu gereklidir. Konum sabitlemesi için alıcının en az dört uydunun menziline olması gerekmektedir (Glonass, 2023).

Galileo, Avrupa Birliği tarafından European Space Agency (ESA-Avrupa Uzay Ajansı) aracılığıyla oluşturulan, European Union Agency for the Space Programme (EUSPA-Avrupa Birliği Uzay Programı Ajansı) tarafından işletilen, 2016 yılında yürürlüğe giren ve merkezi Prag'da (Fucino (İtalya) ve Oberpfaffenhofen (Almanya) iki yer operasyon merkezi ile birlikte) bulunan küresel bir navigasyon uydu sistemidir. 10 milyar avroluk proje İtalyan astronom Galileo Galilei'nin adını almıştır. Galileo'nun amaçlarından biri, Avrupalı siyasi ve askeri yetkililerin operatörlerinin herhangi bir zamanda devre dışı bırakılabilecek veya bozulabilecek ABD GPS veya Rus GLONASS sistemlerine güvenmek zorunda kalmamaları için bağımsız bir yüksek hassasiyetli konumlandırma sistemi sağlamaktır. Temel (düşük hassasiyetli) Galileo hizmetlerinin kullanımı ücretsizdir ve herkese açıktır. Tamamen şifrelenmiş, yüksek hassasiyetli bir hizmet ise devlet tarafından yetkilendirilmiş kullanıcılara ücretsiz olarak sunulmaktadır. Galileo, 1 m hassasiyet içinde yatay ve dikey konum ölçümleri sağlamak üzere tasarlanmıştır. Harekat sistemine dahil olan ilk uydu 21 Ekim 2011 tarihinde fırlatılmıştır (Galileo (satellite navigation), 2023). Galileo sistemi, 3 adet yörünge üzerinde yer alan 30 adet uydudan oluşmaktadır. Bu uydular 23.222 km yüksekte konumlandırılmıştır. Her bir yörüngede 8 işlevsel ve 2 adet yedek uydu bulunmaktadır (Pırtı, Gündoğan ve Şimşek, 2022). Galileo sistemi, yayın efemerisi kullanıldığında 1 m'den daha düşük bir doğruluğa (GPS: 3 m) ve uydu yörüngeleri ve saatler için gerçek zamanlı düzeltmeler kullanıldığında uzayda 1.6 cm'lik sinyal aralığı hatasına (GPS: 2.3 cm, GLONASS ve BeiDou: 4-6 cm) sahip olarak GPS'ten daha yüksek bir doğruluğa sahiptir. Sistem, ABD (GPS), Rusya (GLONASS) ve Çin'in (BeiDou) daha askeri odaklı sistemlerinin aksine, öncelikle sivil kullanıma yöneliktir. Avrupa sistemi yalnızca olağan dışı durumlarda (silahlı bir çatışma gibi) askeri amaçlarla kapatılabilir (Galileo (satellite navigation), 2023).

BeiDou veya BeiDou Navigation Satellite System (BDS-BeiDou Navigasyon Uydu Sistemi), Çin Halk Cumhuriyeti'nin sahip olduğu ve işlettiği küresel bir GNSS'dir. BDS resmi olarak 2020 yılında devreye alınmıştır. İşletim sistemi 35 uydudan oluşmaktadır. BDS, daha önce pusula olarak adlandırılmaktadır (Other Global Navigation Satellite Systems, 2021). BDS, askeri ve ticari amaçlı bir uydu navigasyon sistemidir. İki ayrı uydu sisteminden

oluşur. Resmi adı BeiDou Uydu Navigasyon Deney Sistemi olan ve aynı zamanda BeiDou-1 olarak da bilinen ilk BeiDou sistemi, 2000 yılından başlayarak, özellikle Çin ve komşu bölgelerdeki kullanıcılar için sınırlı kapsama ve navigasyon hizmetleri sunan üç uydudan oluşmaktadır. BeiDou-1, 2012'nin sonunda hizmet dışı bırakılmıştır. Resmi olarak BeiDou Navigasyon Uydu Sistemi olarak adlandırılan ve aynı zamanda COMPASS veya BeiDou-2 olarak da bilinen sistemin ikinci nesli, Aralık 2011'de 10 uyduluk kısmi bir sistemle yörüngede Çin'de faaliyete geçmiştir. Aralık 2012 tarihinden itibaren Asya-Pasifik bölgesindeki müşterilerine hizmet vermektedir. 2015 yılında Çin, küresel kapsama için üçüncü nesil BeiDou sistemini (BeiDou-3) piyasaya sürmüştür. İlk BDS-3 uydusu 30 Mart 2015'te fırlatılmış olup, 27 Aralık 2018'de BeiDou Navigasyon Uydu Sistemi küresel hizmet vermeye başlamıştır. Sistem, Rusya'nın GLONASS'ı, Avrupa Galileo konumlandırma sistemi ve ABD'nin GPS'ine bir alternatif sunarak, zamanlama ve navigasyon için tam küresel kapsama alanı sağlamaktadır (BeiDou, 2024).

IRNSS, Hindistan hükümeti tarafından sahip olunan ve işletilen bölgesel bir GNSS'dir. IRNSS, Hindistan bölgesini ve Hindistan anakarasının 1500 km çevresini kapsayacak şekilde tasarlanmış otonom bir sistemdir. Sistem 7 uydudan oluşmaktadır. 2016'da Hindistan, IRNSS'yi Navigation Indian Constellation (NavIC, "denizci" veya "navigatör" anlamına gelir) olarak yeniden adlandırmıştır (Other Global Navigation Satellite Systems, 2021).

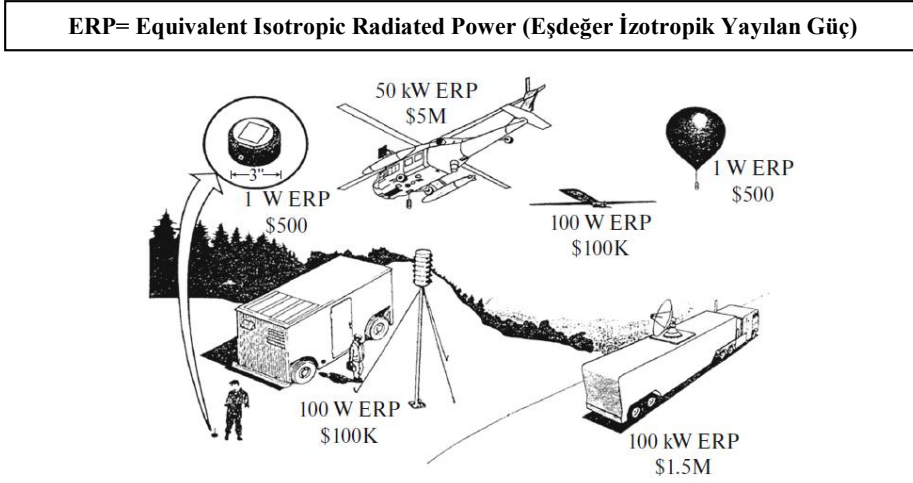
QZSS, Japonya Hükümeti'nin sahibi olduğu ve QZS System Service Inc. (QSS) tarafından işletilen bölgesel bir GNSS'dir. QZSS, Doğu Asya ve Okyanusya'da kapsama alanını iyileştirmek için GPS'i tamamlamaktadır. Japonya, QZSS hizmetlerinin resmi olarak 2018'de 4 operasyonel uydula başladığını ilan etti ve otonom yetenek için uydu sistemini yakın zamana kadar 7 uyduya genişletmeyi planlamaktadır (Other Global Navigation Satellite Systems, 2021).

3. GNSS KARIŞTIRICILAR (JAMMER)

GNSS küresel kapsama alanı, hafif alıcılar, yüksek doğruluk ve düşük maliyet gibi çekici özelliklerinden dolayı İHA'lar için önde gelen konumlandırma çözümüdür. Fakat, GNSS potansiyel sorunlara sahiptir. GNSS'nin düşük sinyal-gürültü oranı nedeniyle bu tür konum sistemleri hem karıştırmaya (jammimg) hem de aldatmaya (spoofing) yatkındır (Gryte vd., 2019). GNSS uydularından çok uzak mesafelerden sağlanan işaretlerin platformlara çok düşük seviyelerde, hatta sistemlerin gürültü tabanlarının bile altında ulaşmaları, GNSS işaretlerinin bilerek veya yanlışlıkla karıştırılmasını veya aldatılmasını mümkün kılmaktadır (Mutluer ve Ünal, 2021). Bu sorunların üstesinden gelmenin bir alternatifi, yedekli konumlandırma sistemlerini kullanmaktır. Böyle bir yedekli kullanım aynı zamanda GNSS kullanıcı ekipmanlarındaki donanım veya yazılım tek nokta hatalarının ya da GNSS sinyalleri ile ilgili sorunların (sinyal engelleme, güneş rüzgârları gibi) azaltılmasına da yardımcı olmaktadır. İHA'ların daha sık kullanılmasıyla birlikte, GNSS'e alternatif çözümler, güvenli ve sürekli operasyonlar için daha ön plana çıkmaktadır (Gryte vd., 2019).

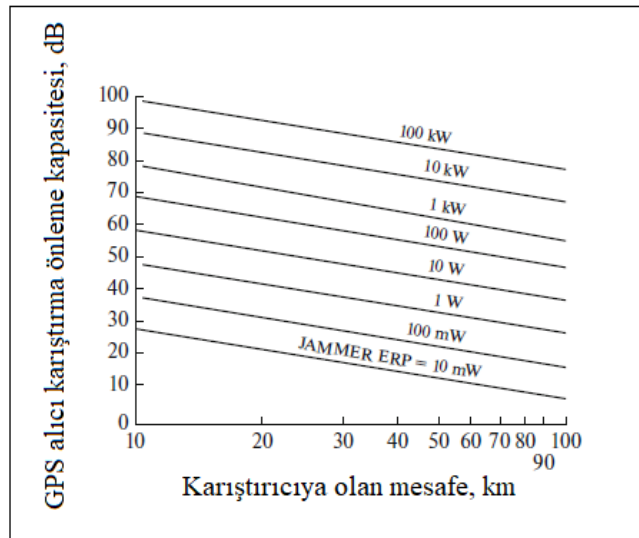
Karıştırıcılara ait temsili görseller Şekil 1'de sunulmuştur. Yüksek güçlü karıştırıcılar, yaydıkları yüksek güç nedeniyle bulunması ve saldırı düzenlenmesi kolay hedeflerdir. Düşük güce sahip karıştırıcıları bulmak ise zordur. Bu karıştırıcılara karşı alıcı içindeki

gelişmiş karıştırma önleme teknolojisi, antenin iyileştirilmesi veya bir ANS/karıştırma yapılamayan cihaz entegrasyonu ile önlem alınması önemlidir (Schmidt, 2019).



Şekil 1. Karıştırıcı Örnekleri (Schmidt, 2019) (Yeniden düzenlenmiştir).

Gerekli karıştırma önleme sınırı ve karıştırıcı gücü arasındaki dengeyi belirlemek için Şekil 2'deki hesap tekniği oldukça yararlıdır (Schmidt, 2019).



Şekil 2. GPS Karıştırma Hesapları (Schmidt, 2019) (Yeniden düzenlenmiştir).

Karıştırmaya karşı alınabilecek önlemlerde kullanılan teknikler aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Schmidt, 2019):

- Düşük maliyetli, yüksek doğruluklu AÖB'ler,
- Uzayda sinyallerin iyileştirilmesi,
- Artırılmış doğruluk,
- Mcode ve Mspot,

- Geliştirilmiş alıcılar,
- AÖB ile derin entegrasyon
- Aldatmaya karşı koruma teknikleri,
- Daha yüksek karıştırma önleme elektronığı,
- Daha yüksek performanslı, daha düşük maliyetli uyarlanabilir antenler,
- Dijital hüzme-oluşturma,
- Modern algoritmalar.

GPS'in askeri kullanımları arasında navigasyon ve zamanlama uygulamaları yer almaktadır ve GPS frekans bantlarındaki karıştırma büyük bir büyük endişe kaynağıdır. GPS sinyali Dünya üzerinde 12500 mil uzaklıkta parlayan 25 watt'lık bir ampule benzetilebilir ve dış kaynaktan Dünya'ya gelinceye kadar çok zayıflar (yaklaşık 1.6×10^{-16} watt). Bir alıcının arka plan gürültüsünde bir GPS uydusundan gelen sinyali alma ve bu sinyale kilitlenme yeteneğinin bir ölçüsü, arka plan gürültüsü veya karıştırma sinyali (J) gücünün, alıcının GPS sinyalinin işlemeye devam edebildiği uydu sinyal (S) gücüne maksimum oranıdır. Genellikle karıştırma-sinyal oranı (J/S) olarak adlandırılan bu oran birden oldukça büyüktür. Örneğin Defense Advanced GPS Receiver (DAGR-Savunma Gelişmiş GPS Alıcısını) kullanarak, sivil L1 C/A GPS sinyalini yakalamak için gerekli maksimum J/S 250'dir. P(Y) sinyalini yakalarken ise, maksimum J/S çok daha büyüktür (2500'e kadar ulaşmaktadır) (Schmidt, 2019).

Alıcı, P(Y) sinyalini yakaladığında GPS sinyalinden 12600 kata kadar daha güçlü sinyal karıştırma durumunda bu P(Y) sinyale kilitli kalabilir. Ancak karıştırıcı yaklaşık olarak sadece 2×10^{-12} watt'tan daha büyük bir güce gerek duyduğu için alıcının yanında yer alan bir karıştırıcı, alıcının GPS sinyaline kilitli olarak kalmasında önemli bir tehlike oluşturmaktadır. Kişisel koruma cihazları ve karıştırıcılar (tipik olarak 300 watt) bu güç seviyesini kolayca aşabilir. Bu nedenle, karıştırma yapılan bir ortamda GPS kullanılamayabilir (Schmidt, 2019).

GPS sinyalinin zayıflamasına ağaçlar, binalar veya anten yönü neden olabilmekte ve dolayısıyla parazit olmadan bile sinyal/gürültü oranı azalmaktadır. Bu sinyal kaybı, kasıtlı karıştırma ve parazit olmadan bile etkin karıştırma/sinyal (J/S) oranında bir artışa neden olabilir (Schmidt, 2019).

Amerika Savunma Bakanlığı yeni uydular satın alarak ve onları kontrol eden sistemleri iyileştirerek GPS'i her zaman modernleştirmektedir. Bir GPS alıcısının doğruluğu, uydulara gönderilen verilerdeki hatalardan, uydular tarafından yayınlanan verilerden, atmosferik etkilerden ve diğer hata kaynaklardan etkilenebilir. Askeri alıcılar mevcut uyduları kullanarak rutin olarak 3 m doğruluktan daha iyi bir doğruluk sağlamaktadırlar ve gelecekte de bu alıcıların Blok III GPS uyduları kullanarak 1 metreden daha iyi (0.15 m) doğruluk sağlaması beklenmektedir (Schmidt, 2019).

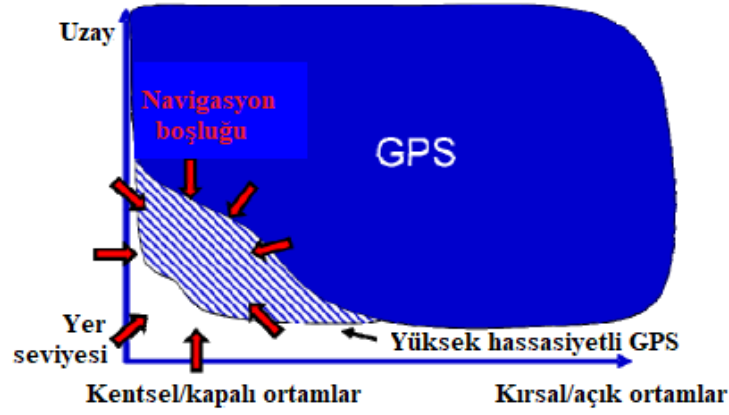
Askeri sistemler için GPS'teki bir başka önemli gelişme daha güvenli olarak tasarlanmış ve mevcut Y-kodundan daha iyi karıştırma direncine sahip M-kodunun kullanımı olacaktır. Daha yüksek güçlü bir sinyale sahip olan bu sistem (mevcut sinyal seviyelerinin +20 dBW

üzerinde) sinyal karıştırma direncini artırmak amacıyla bir operasyon alanı üzerinde yerel kapsama alanı için mevcut olacaktır (Schmidt, 2019).

4. GNSS ERİŞİMSİZ ORTAMLARDA İHA NAVİGASYONU

Küçük otonom İHA'ların birçok alanda kullanılması, İHA'ların 3B (Boyut) kartezyen uzayda tanımlı bir yolu takip etmesini veya tanımlanan bir konuma gitmesini gerektirmektedir. Tipik olarak, bu nedenle, bir GNSS alıcısı kullanılarak elde edilen İHA konum bilgisi normal durumlarda yeterli olmaktadır ve GNSS'in güçlü olması özellikle kolluk kuvvetleri ve savunma uygulamaları için büyük önem arz etmektedir (Unicomb vd., 2017). İHA navigasyonunda konum, hız ve duruş tahmini için en yaygın yaklaşımlar AÖB ve GNSS verilerinin füzyonunu esas almaktadır (Vetrella vd., 2015). Ancak, açık gökyüzüne erişim olmayan ortamlarda, GNSS uydusuna erişim olmayabilir veya sınırlı sayıda uyduya ulaşılabilir. Bazı durumlarda ise görüş hattı olsa bile, GNSS karıştırması veya haberleşme enterferansı nedeniyle GNSS uydu sinyallerine erişimde güçlükler olmaktadır. GNSS erişimsiz ortamlarda konum tahmin modunda ANS tarafından sergilenen hızlı sapma nedeniyle ANS/GNSS entegre çözümü güvenilir hale gelmektedir (Zahran vd., 2018). GNSS performansı uydunun geometrisine oldukça bağlı olduğu için ve daha önemlisi radyo sinyali yolu üzerindeki engellerden kaynaklı parazit girdiler ve emilim nedeniyle İHA'ların GNSS erişimsiz şartlar altında görev yapabilme yeteneğine sahip olması gerekmektedir (Vetrella vd., 2015).

Otonom araçların en zorlu yeteneklerden biri karmaşık ortamlarda, özellikle de GNSS erişimsiz ortamlarda navigasyon ve görev icrasıdır (Qin vd., 2019). İHA otonom operasyonu, bir görevi lokalize etmek ve planlamak için temel olarak GNSS kullanımına dayanır, ancak GNSS'in sınırlandırıldığı veya olmadığı ortamlar sık karşılaşılan bir durumdur (Vanegas vd., 2019). Kapalı ve oldukça kentsel ortamlarda navigasyon, GNSS'in performans gösteremediği bir “navigasyon boşluğu”dur ve alternatif navigasyon tekniklerinin kullanılması, bu boşluğu doldurmanın potansiyel yollarından biridir. Herhangi bir sistem gibi navigasyon sensörlerinin de güçlü ve zayıf yönleri vardır. Örneğin, GPS çok iyi derecede doğruluğa sahiptir, ancak uydu sinyallerinin kaybı nedeniyle kesintilere uğramaktadır. Atalet sensörleri yalnızca karıştırma yapılamayan yerçekimi ve platform dinamiklerine dayanır, ancak zamanla büyüyen ve sonunda kabul edilemez hatalar sergilerler. GPS'teki yetersizlikler (navigasyon boşluğu) Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekildeki yatay eksen kentsel/kapalı ve kırsal/açık ortamlar arasındaki sürekliliği temsil etmektedir. Dikey eksen yer seviyesinden uzaya kadar yaklaşık yüksekliği temsil etmektedir (Miller vd., 2011).



Şekil 3. Navigasyon Boşluğu (Miller vd., 2011) (Yeniden düzenlenmiştir).

GNSS erişimsiz ortamlarda geliştirilmesi gerekli navigasyon sistem gereksinimlerini şu şekilde özetlenebilir; (a) belirsiz bir görev süresini destekleyen, (b) gerçek zamanlı 3B bölge performans desteği olan, (c) kentsel ortamlarda ve yerleşim ve çoğu ticari binaların içinde lokalizasyonu destekleyen, (ç) bilinmeyen (haritalanmamış) veya kısmi olarak bilinen (kısmi olarak haritalanmamış) ortamlardaki operasyonları destekleyen, (d) güç kesilmesi durumlarında lokalizasyonu destekleyen ve ayrı bir başlangıç bölgesi gerektirmeyen, (e) bireysel tekil kullanıcı istasyonlarını destekleyen, (f) geçici bir kayıptan sonra yeniden navigasyon yeteneği elde eden, (g) düşük maliyetli ve düşük ağırlıklı, (ğ) kullanıcının hareket etmesini gerektirmeyen, (h) belirli bir düzeyde bütünlük, doğruluk, kullanıma hazır olma ve taktik görev gereklilikleri ile tutarlı hizmet sürekliliğe sahip sistemlerdir (Miller vd., 2011).

Engellere yakın olarak güvenli bir şekilde İHA kullanımı için hızlı reaksiyon sürelerinin gerekli olduğu durumlarda insan operatörler için bazı GNSS'siz senaryolar çeşitli sorunlar teşkil etmektedir. Harici hareket izleme sistemlerinin yardımıyla İHA kullanımı kolaylaşsa da İHA uzaklaştığında veya harici lokalizasyon sürdürülemediğinde yine kullanım zorlukları ortaya çıkmaktadır (Lu, 2022). Ayrıca GNSS, aldatma, karıştırma ve çevresel etkilere karşı savunmasız kalabilmekte, kapalı iç mekanlarda kesintiye uğramakta ve kanyon, ormanlık alan gibi bölgelerde güvenilirliği azalmakta ve hava koşullarından da kolaylıkla etkilenebilmektedir (Gyagenda vd., 2022; Wang vd., 2012; Wang vd., 2013). Sistemin bu eksiklikleri GNSS'den bağımsız navigasyon çözümlerinin gelişmesine neden olmuştur. İnsansız kara taşıtları ile başlayan GNSS bağımsız navigasyon çözümleri bu araçlar için belirli bir olgunluk seviyesine ulaşmıştır. Ancak hava araçlarındaki uygulama iki boyut yerine üç boyutlu ortamın devreye girmesi nedeniyle daha sınırlı bir seviyededir (Gyagenda vd., 2022). İHA'nın açık bir gökyüzü görüşe sahip olması koşuluyla (güvenilir bir GNSS konumlandırması elde etmek için) İHA'lar GNSS yol noktalarını (way-point) içeren önceden tanımlanmış rotalara programlanabilmektedir (Vanegas vd., 2019). Ancak İHA'lar için hareket planlama problemi, bu araçların hızlı, karmaşık ve belirsiz dinamiklere ve yük sınırlamalarına sahip oldukları 3 boyutlu uzayda gerçek zamanlı navigasyon yapmaları ve sürekli çevre ile etkileşim içinde olmaları nedeniyle oldukça zordur (Liao vd., 2016).

Hız, baş istikameti, irtifa ve konum İHA navigasyonunu etkileyen en önemli parametrelerdir (Gyagenda vd., 2022). Bu bilgiler uçuş kontrol birimi için gerekli girdilerdir (Gryte vd., 2019). Navigasyon ve kontrol çözümünde yüksek düzeyde doğruluk ve güvenilirliğe ihtiyaç duyulduğu için otonom iniş, en karmaşık ve kritik aşamadır. Bir mobil platforma otonom iniş için bir navigasyon sistemi uygularken aracın konum, hız ve duruşunu ölçmek ve belirlemek için çoklu sensörlerin geri bildirimine sahip olmak gereklidir (Alarcon, Santamaria ve Viguria, 2015).

4.1. GNSS-Erişimsiz Ortamlardaki Navigasyon Teknikleri

Navigasyon, derinlemesine analiz edilmesi gereken kritik öneme sahip bir konudur. Dış ortamlarda, İHA'lar GPS gibi uzay tabanlı uydulardan yararlanarak lokalizasyon yapabilir. Ancak uydu navigasyon sisteminin hassasiyeti özellikle sivil uygulamalar başta olmak üzere sınırlıdır. GPS ile elde edilebilen konum doğruluğu askeri uygulamalarda ≤ 1 m ve sivil uygulamalarda ise yaklaşık 10 m'dir (Benini, Mancini ve Longhi, 2013). GNSS-erişimsiz ortamlarda navigasyon, üzerine çalışılan en popüler konulardan biridir ve çeşitli teknikler bu alan için geliştirilmiştir.

4.1.1. Atalet Navigasyon Sistemleri ve Sensörleri

İHA'lar küresel olarak birçok araştırmacının, kuruluşun ve hatta sıradan kullanıcıların dikkatini çekmiştir. Platform üzerinde insan bulunmaması nedeniyle, İHA'ların çevre ile etkileşimini sağlamak için insan duyularına benzeyen ve çeşitli durumlarda ortaya çıkan insan reflekslerini taklit eden sensörlerle donatılması gerekmektedir. İHA'lar artık günlük yaşamda çok çeşitli faaliyetlerde, askeri ve sivil uygulamalarda farklı alanlarda önemli bir rol oynamaktadır ve insan hayatını tehlikeye atmadan tehlikeli görevleri yerine getirerek, zaman ve iş gücü tasarrufu sağlamaktadır. Askeri veya sivil alanlarda icra edilen tüm görev durumlarında, İHA'ların otonom olarak çalışması gereklidir. İHA'ların insan müdahalesi olmadan görevlerini otonom olarak yerine getirmesi için gözlem ve karar vermede platformda bulunan yerleşik sensörler kullanılır (Zahran vd., 2018).

Küçük İHA'lardaki yerleşim sınırlaması nedeniyle, otopilot ve sensörlerin boyut ve ağırlık açısından küçük olması ve İHA'nın düşük güç tüketimi gerçekleştirmesi gereklidir. Tüm İHA'lar, boyutu, görevi veya maliyeti ne olursa olsun, konum, hız ve duruş tespiti için esas olarak GNSS ile ANS'ye ihtiyaç duyar (Zahran vd., 2018). Küresel koordinatlara erişim olmayan durumlarda, bir İHA kendi ANS bilgisine güvenmelidir (Russell vd., 2020). GNSS, mutlak hızı ve aracın konumu tahmin ederek, atalet sensörlerinin birikmiş hatalarını sınırlandırabilmektedir. Ancak küçük İHA'ların GNSS erişimi olmayan ortamlardaki otonomisinde uçuş ortamına ilişkin herhangi bir ön bilgi olmaksızın araç durumunun belirlenmesi için diğer sensörlerin AÖB ile füzyonu gerekir. Bu otonomi çevrimiçi bir harita oluşturan ve o harita üzerindeki 6 serbestlik dereceli konumu tahmin edebilen SLAM gibi teknikler ile sağlanabilmektedir (Wang vd., 2013).

İHA'lar tipik olarak Genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) kullanılarak, üç eksenli bir ivmeölçer, üç eksenli bir jiroskop, bir yerleşik AÖB, üç eksenli bir manyetometre, bir yükseklik sensörü, bir barometre ve optik akış sensörleri içeren çok sayıda sensörden elde edilen bilgilerin füzyonunu sağlayan navigasyon birimlerinden oluşur. Böyle bir sistem İHA

duruşunu yeterince doğru tahmin ederek, İHA'yı kontrol etmeyi ve İHA stabilizasyonunun sağlanmasını mümkün kılmaktadır. İHA'nın kartezyen konumu ancak bir GNSS alıcısı navigasyon ünitesine bağlı olduğunda gözlemlenebilir hale gelmektedir (Unicomb vd., 2017; Shang vd., 2017).

ANS'ler karıştırılmaz birimlerdir. ANS'deki ana hata kaynakları jiroskop ve ivmeölçer atalet sensörlerindeki hatalar, yanlış navigasyon sistemi başlatma durumları ve hesaplamalarda kullanılan yerçekimi modelindeki kusurlardır. Ancak, neredeyse tüm ANS'lerde, en büyük hatalar atalet sensörlerinden kaynaklanmaktadır. Büyük hatalar jiroskoplar için açılabilir oranların, ivmeölçerler içinse belirli kuvvetlerin ölçümünde ortaya çıkmaktadır. Her iki sistem için de en büyük iki hata genellikle jiroskop sapması için derece/saat oranında ölçülen kararsızlık yanılması (veya ivmeölçer yanılması için mikro g) ve algılanan atalet miktarının parts per million (ppm-milyonda bir birim) cinsinden ölçülen ölçek faktörü kararlılığıdır (Schmidt, 2019).

GNSS erişimi olmayan ortamlar için gerekli olan İHA navigasyon sensörleri; duruş sensörleri, lokalizasyon sensörleri, irtifa sensörleri, haritalama sensörleri ve engel tanıma sensörleri şeklinde sınıflandırılabilir. Bu sensörler için başka bir sınıflandırma da atalet sensörleri, görü sensörleri, Light Detection and Ranging (LiDAR- Işık Tespiti ve Uzaklık Tayini) sensörleri, radyo sensörleri, radar sensörleri ve akustik sensörler şeklinde yapılabilir. Sensör seçim kriterlerinde dinamik aralık, hata özellikleri, bant genişliği, araç faydalı yükü kısıtlamaları, çözünürlük, tepki süresi, çalışma ortamı, uçuş ayarları, hesaplama kaynakları ve güç kullanılabilirliği dikkate alınmaktadır. Görü sensörleri lokalizasyon, lokalizasyon ve haritalama, geçiş hızı tahmini, iniş alanı algılama, engel tanıma, durum tahmini ve iniş alanı tespiti ve iniş uygulamalarında kullanılmaktadır (Gyagenda vd., 2022). Laser Range Finder (LRF-Lazer Mesafe Ölçer) tabanlı yaklaşımlarla karşılaştırıldığında, kamera sistemleri hafifliği ve düşük maliyeti nedeniyle rekabetçi alternatiflerdir. Daha da önemlisi kamera sistemleri doğal olarak 2B LRF sistemine göre daha fazla bilgi içermektedir (Qin vd., 2016). Radarlar, pitot tüpleri, manyetometreler, LiDAR ve kameralar bağımsız atalet sistemlerinin yanlışlığını ve ANS'nin sapmalarını azaltmak için kullanılmaktadır. GNSS erişimsiz ortamda doğru bir navigasyon çözümüne ulaşmak için bu sensör verilerinin ANS ile füzyonu gereklidir. Her ne kadar bu füzyon yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları olmasına rağmen, bu yöntemler hala bağımsız konum belirleme çözümünden daha iyi performans göstermektedir. Ayrıca tüm bu yardımcı yöntemlerinin ekstra bir sensörün eklenmesi gibi ortak dezavantajları vardır. Bu da, ekstra ağırlık, ekstra güç tüketimi, ekstra maliyet ve bu sensörlerin çalışma sınırlamaları nedeniyle ek kısıtlama anlamına gelmektedir (Zahran vd., 2018). Lokalizasyon kapsamında ise yer seviyesinden yükseklik ölçüm teknikleri altimetre ile ölçüm (sonar, barometre, lazer telemetri, radar) ve bilgisayar görüşü (stereo kamera ve hareket yakalama sistemi) ile ölçüm sınıflarına ayrılır (Gyagenda vd., 2022).

Bir AÖB genellikle iki ortogonal sensör üçlüsünden oluşmaktadır. Sensör üçlüsünden biri, üç adet tek eksenli ivmeölçerden, diğer sensör üçlüsü ise üç adet tek eksenli jiroskoptan oluşur. İki sensör üçlüsü nominal olarak paraleldir ve jiroskopun orijini ivmeölçer üçlüsünün orijini olarak tanımlanır (Benini, Mancini ve Longhi, 2013).

Bir eksen boyunca meydana gelen ivme aşağıdaki eşitlik (1) ile ifade edilebilir, burada termal kayma dikkate alınmaz:

$$\ddot{Z}_a = \ddot{Z} + g + \epsilon_a + S_a g \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de \ddot{Z}_a : Sensör çıkışında ölçülen ivme; \ddot{Z} : İvmenin (dikkate alınan noktadaki) gerçek değeri; g : Yerçekimi ivmesi; ϵ_a : Sapma; S_a : Ölçek faktörüdür (Benini, Mancini ve Longhi, 2013).

Nesne tanıma sorunu ile ilgili olarak, klasik bilgisayarlı görü algoritmaları genellikle çalışılan ortamın koşullarına (Örn; aydınlatma koşulları, arka plan çeşitliliği, dağınıklık vb.) çok bağlıdır. Bu nedenle kesin bir nesne tespiti yapmak ve görüntü düzleminde olası hataları ortadan kaldırmak için algoritma parametreleri her yeni ortam ele alındığında tekrar düzenlenmelidir. Ayrıca, bu düzenleme prosedürü genellikle deneme-yanılma testleri ile gerçekleştirildiği için oldukça zor bir görev haline gelebilmektedir. Anlamlı veri kümeleri üzerinde öğretildiklerinde makine öğreniminin kullanımı çeşitli ortamlarda yürütülebilen çok yönlü çözümler sağlayarak bu sınırlamaların ve zorlukların üstesinden gelebilmektedir. Ancak, bazı makine öğrenimi modelleri nesne tanıma için İHA'lara uygun olmayan (hesaplama kısıtları yüzünden) çok sayıda parametrelili derin modeller içermektedir (Sampedro vd., 2019). İHA'ların engellerin doğasına bağlı olarak farklı çarpışmalardan kaçınma stratejilerini de benimsemesi gerekebilir. Reaktif çarpışmayı önlemek için uçuş yürünge planlayıcısından elde edilen sensör verileri gerekmektedir (Perez-Grau vd., 2018).

Radar üretimindeki gelişmeler ile küçük ve mikro İHA'ların navigasyonuna uygun mikro radarların geliştirilmesi uygulanabilir hale gelmiştir. Radarlar GNSS kesintisi sırasında AÖB sapmasını sınırlamak için kullanılabilir. Radarlar, LiDAR ile aynı dezavantajlara sahip olsa da, çevresel değişikliklere karşı daha az duyarlı olduğu için bazı açılardan kameralardan veya LiDAR'dan daha pratik uygulamalara sahiptir (Zahran vd., 2018). Küçük İHA'lar için, çok ağır olan lazer gibi geleneksel sensörler havada kısıt teşkil etmektedir (Zhang vd., 2016). Lazer sensörlerin kullanımında, kısıtlı İHA çalışma yüksekliği (irtifa) ve veri iletimi için düşük bant genişliği söz konusudur (Mebarki ve Lippiello, 2014).

Küçük İHA'ların gerçek ağırlığı, boyut yapısı, kinetik enerjisi ve GPS-karıştırmalı ortam, geleneksel navigasyon sensörlerinin kullanımını sınırlandırmaktadır. Bahsedilen bu durum, zengin hareket kapasitesi ve çevre bilgileri içeren görsel sensörlerin kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Optik akış teknikleri, navigasyon sorununa karşı böcek ve kuş uçuşları gibi doğal çözümlerdir. Çeşitli navigasyon alt görevleri tek başına optik akışla veya mesafe tahmini, hız tahmini, dikey iniş vb. dahil olmak üzere atalet ölçümleriyle gerçekleştirilmektedir (Zhang vd., 2016).

4.1.2. Kalman Filtresi

Navigasyon algoritmalarıyla ilgili olarak en yaygın kullanılan tekniklerde Kalman Filtresi (KF) ve özellikle de Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF) kullanılır (Benini, Mancini ve Longhi, 2013). Görü ve atalet verilerinin füzyonu, GKF'nin uygulanması yoluyla gerçekleştirilir. GKF, hesaplanan sistem parametrelerindeki hataları tahmin eder. Doğrusallaştırma hatalarının etkilerini en aza indirmek için sistem parametreleri mevcut hata tahminleri ortadan kaldırılarak periyodik olarak düzeltilir (Miller vd., 2011). Ancak, GKF

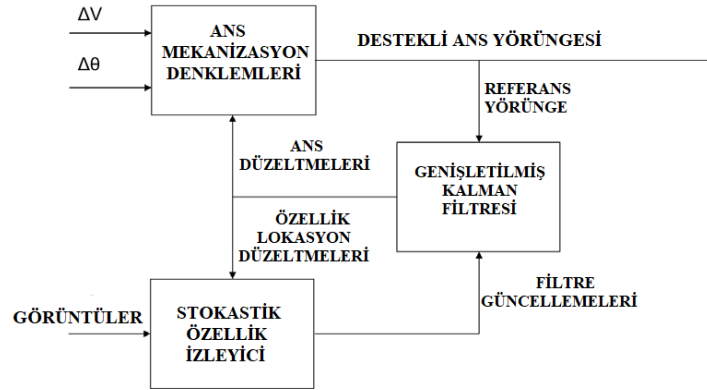
gerçek zamanlı araç konumu güncellemeleri sağlamasına rağmen doğrusal olmayan modellerle çözümleme yaparken, doğrusallaştırmadan zarar görebilecek doğrusal sistem modellerini esas alır. Kalman Filtresi, cihaz ve bilinen en az üç nokta arasında yapılan aralıklı ölçümler temelinde bir mobil cihazın x ve y koordinatlarının tahmini için uygundur. Kalman filtresi gibi GKF de kestirim ve tahmin olmak üzere iki adımda uygulanmaktadır. GKF doğrusallaştırma ile Bayes kuralının optimalliğine yaklaşan bir plansız durum tahminidir (Benini, Mancini ve Longhi, 2013).

Uçuş sırasında, navigasyon durumu AÖB mekanizasyon süreci aracılığıyla ivmeölçer ve jiroskop ham ölçümlerinden elde edilir. GNSS sinyali mevcut olduğunda, her iki sistemin çözümleri arasındaki fark GKF'ye beslenir. GKF'den elde edilen çıktılar, ivmeölçer hataları, jiroskop hataları, ölçek faktörleri ve navigasyon durumunda tahmin edilen hatalardır. Filtre durumu eşitlik (2)'de yer alan 21 adet durumdan oluşur:

$$\delta x = [\delta r^n \delta v^n \delta \varepsilon^n b_a d_g s_a s_g]^T \quad (2)$$

δr^n : Konum; δv^n : Hız; $\delta \varepsilon^n$: Duruş hata vektörü; b_a : İvme hatası s_a : Ölçek faktörü; d_g : Jiroskop sapması; s_g : Ölçek faktörüdür (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018).

Görü destekli navigasyonun bir blok diyagramı Şekil 4'te gösterilmektedir. GKF'nin türetilmesini sağlamak için temel ölçüm (görüntü düzlemindeki özelliğin piksel konumu) ile durum (kullanıcının konumu ve hızı) arasında bir ilişki kurulmalıdır. Bu ilişki doğrusal değildir (Miller vd., 2011) ve genel ifadesi eşitlik (3)'te verilmiştir:



Şekil 4. GKF ile Görü-Destekli Ataletsel Navigasyon Filtresi Blok Diyagramı (Miller vd., 2011) (Yeniden düzenlenmiştir).

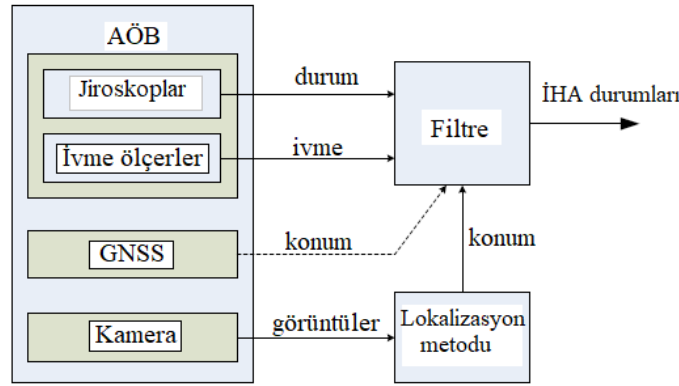
$$\tilde{z}(t_i) = \mathbf{h}\{\mathbf{p}_N(t_i), \mathbf{C}_b^N(t_i), \mathbf{y}_N(t_i), \mathbf{T}_c^{\text{pix}}\} + \mathbf{v}(t_i) \quad (3)$$

Eşitlik (3)'te \mathbf{p}_N : Navigasyon çerçevesindeki kullanıcı konumu; \mathbf{C}_b^N : gövde; \mathbf{y}_N : Navigasyon çerçevesindeki özellik konumu; $\mathbf{T}_c^{\text{pix}}$: Homojen kamera projeksiyon matrisi; \mathbf{v} : Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü ve \mathbf{h} : Doğrusal olmayan bir fonksiyondur.

4.1.3. GNSS-Erişimsiz Ortamlarda Görü-Destekli Ataletsel Navigasyon Sistemi

GNSS araç konum bilgisini sağlamak için harici kaynaklara (uydulara) ihtiyaç duyar, bu nedenle GNSS kentsel alanlarda düzgün çalışmaz, alçak irtifalarda güvenilir değildir ve uydu sinyal kesilmelerine maruz kalır. Ancak görü, piksel yapısındaki çözümü ile zengin bilgi sağlar, pasiftir, hafif ve düşük maliyetli donanım gerektirir. Ayrıca işlemci teknolojisinde ilerlemeler yerleşik algoritmalarda büyük öneme sahip olan görüntü akış hızının gelişmesini sağlamıştır (Mebarki ve Lippiello, 2014).

GNSS sinyalinin olmadığı veya zayıf olduğu ortamlardaki uçuş için olası bir çözüm, hâlihazırda mevcut olan navigasyon sistemini desteklemek için bir görü sisteminin entegrasyonudur (Şekil 5). Bir lokalizasyon yöntemi görüntülerde önceden çıkarılmış bazı özellikleri algılamak için ve dolayısıyla GNSS sinyali kaybolduğunda İHA'nın konumunu hesaplamak için kullanılabilir. Bir Kalman filtresi de konum sensörlü atalet sensörlerinden gelen sinyallerin füzyonu için değerlendirilebilir (GNSS veya GNSS'in mevcut olmadığı durumdaki görü sistemi). Görü tabanlı çözümler ve video kameralar İHA'lar için standart donanım haline geldiği için caziptirler. Ayrıca, kameralar renk ve doku gibi zengin bilgiler sağlar (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011). AÖB ve kameranın temel özellikleri, doğru tahmin sağlamak için birbirleriyle çalışmaya çok uygundur. AÖB'ler ideal olarak navigasyon amacıyla seçilir, çünkü ölçüm verilerini daha yüksek bir örnekleme hızında sağlayabilir. Ancak zamanla AÖB ölçümleri sapma gösterir ve hatalar birikir. Görü sensörü diğer şekilde davranır, ölçümler, yakalanan görüntünün işlenmesi için uzun süre gerekmesi nedeniyle düşük örnekleme hızındadır ve ölçüm zamanla sapmaz. Görü ve atalet sensörlerinin füzyonu ile İHA'nın daha iyi bir duruş tahmini sağlanır (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).

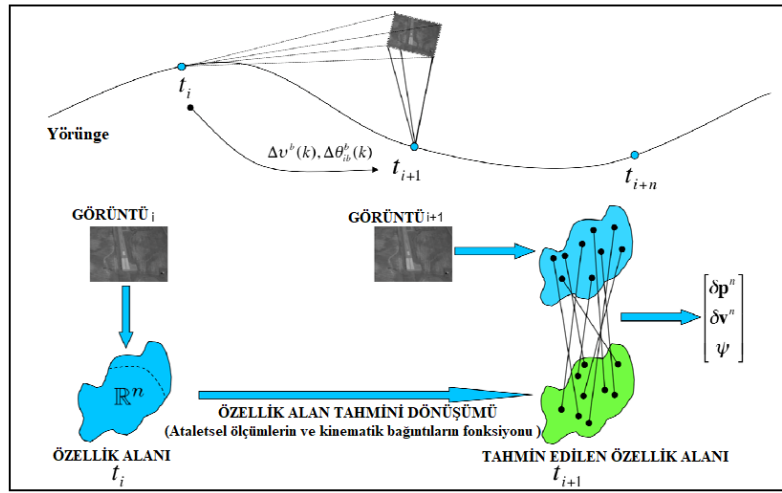


Şekil 5. GNSS-Bağımsız Navigasyon Mimarisi (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011)
(Yeniden düzenlenmiştir).

Görü-destekli navigasyon, pasif sinyal navigasyonu için mükemmel bir çözümdür. Bunun nedenlerine bakılacak olursa, ilk olarak birçok hayvan, navigasyon için görsel bilgileri kullanmaktadır. Aslında, oküler-vestibüler sistem insanlar için birincil navigasyon paketini sağlamaktadır. İkincisi, optik sensörler doğası gereği yüksek bant genişliğine sahiptir. Bu durum çok hassas açısız çözünürlük potansiyeline neden olmaktadır. Son olarak, dijital görüntüleme sensörleri rahatça bulunabilir ve ara yüzlerle kolaylıkla kullanılabilir, bu avantajlar da onları navigasyon potansiyelinin araştırılması için çok pratik bir çözüm haline getirmektedir (Miller vd., 2011).

Görü-destekli yöntemler, özellik-tabanlı veya optik-akış tabanlı olarak sınıflandırılır. Özellik-tabanlı yöntemler, çoklu çerçeveler üzerindeki sahnede yer alan özelliklerin (veya “yer işaretlerinin”) karşılıklarını belirlerken, optik-akışa dayalı yöntemler tipik olarak çerçeveler arasındaki görüntünün bütün bir kısmı için karşılıkları belirler. Optik akış yöntemleri genellikle göreceli hız belirlenmesi, açılal oranlar veya engellerden kaçınmaya odaklanarak temel hareket algılama için önerilmiştir. Özellik izleme-tabanlı navigasyon yöntemleri ise hem sabit montajlı görüntüleme sensörleri hem de gimbal-montajlı detektörler için önerilmiştir (Miller vd., 2011).

Birçok özellik-izleme tabanlı navigasyon yöntemi hedef konumun bilgisinden (ya ön bilgi olarak, binoküler stereopsis yoluyla ya da arazi homografisinden yararlanarak) yararlanır ve ters yörünge izdüşüm problemini çözer. Eğer bölge hakkında bir ön bilgi yoksa, navigasyon durumunun kestirimi tamamen olay yerinin tahmini ile ilişkilidir. Özellik-tabanlı görü/ataletsel entegre navigasyonun temel konsepti, Şekil 6'da gösterilmiştir (Miller vd., 2011).



Şekil 6. Görüntü-Destekli Atalet Algoritmasına Genel Bakış (Miller vd., 2011) (Yeniden düzenlenmiştir).

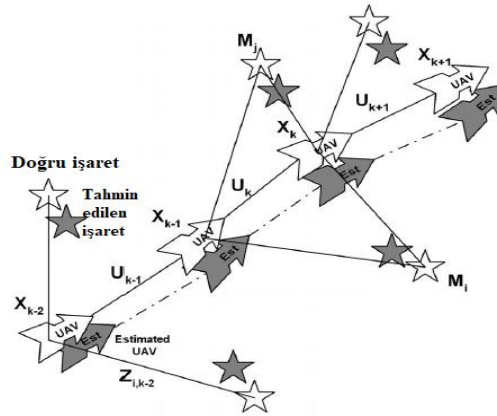
Algoritma şu temel adımlardan oluşur: t_i zamanında sistem, dijital görüntüleme cihazını kullanarak bir ortam görüntüsü alır ve bu görüntüyü özellik alanı olarak adlandırılan bir alanda bir dizi ayrık özelliğe dönüştürür. Ardından hem navigasyon durumu hem de özellik alanı durumu bir sonraki görüntüleme olayı olan t_{i+1} 'e ilerletilir. t_{i+1} 'de başka bir görüntü yakalanır ve özellik alanına dönüştürülür. Hem t_{i+1} zamanında yakalanan görüntü çerçevesinin özellik alanı, hem de ilerletilmiş özellik alanı, t_i ile t_{i+1} anı arasındaki özellikleri birleştiren istatistiksel özellik uyum algoritmasına girdi oluştururlar. Son olarak, yörünge hatası, bir Kalman tahmin edicisindeki bu ilişkili özellikler kullanılarak tahmin edilir (Miller vd., 2011).

4.1.4. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM-Eşzamanlı Lokalizasyon ve Haritalama)

Genel olarak, uçuş için geliştirilen sistemler ve algoritmalar tamamen bilinmeyen ortamlarda 3B ortamın haritasını çıkararak navigasyon çözümleri sağlamak zorundadır. Bu çözümler

SLAM teknikleri olarak adlandırılır ve bu tekniklerde atalet verisi ile lazer ve/veya görü verilerinin füzyonu kullanılmaktadır. Özellikle görsel SLAM'de uçuş boyunca alınan görüntülerdeki eş noktalar takip edilir (Vetrella vd., 2015). Esas olarak eş zamanlı araç duruş tahminine ve harita oluşumuna bağlı olan SLAM, GNSS sinyali yokluğunda kullanılabilcek alternatif bir yöntemdir. SLAM, kameralar, sonar veya LiDAR gibi çeşitli sensörlerin kullanılmasıyla uygulanabilir (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018).

SLAM tekniğinde, çevreleyen ortam için aşamalı olarak tutarlı bir canlı harita oluşturulur ve bu canlı haritada eşleştirme yapılarak aracın durumu tahmin edilir. SLAM teknolojisindeki ilerleme, çevredeki ortamın canlı bir haritasını oluşturmaya ve aynı zamanda çevresinin yerleşik haritasını kullanarak aracın lokalizasyonuna olanak tanımıştır. Bu lokalizasyon teknolojisi ile aracın uzak ortamlara navigasyonu gerçekleştirebilmektedir. Görev ortamında hareket eden ve bilinmeyen görüntü özelliklerini yakalayan kamera monte edilmiş bir araca uygulanan bu yöntem Şekil 7'de sunulmaktadır (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu; 2016; Whyte ve Bailey, 2006).



Şekil 7. SLAM (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016) (Yeniden düzenlenmiştir).

Şekil 7'de:

X_k = k anındaki araç durum vektörü,

U_k = k-1'den k'ya gitmek için araç kontrol vektörü,

M_i = i. görüntü özellik yer vektörü'dür (Burada i. görüntü özelliğinin statik olduğu kabul edilmektedir),

Z_{ik} = k anında, i. görüntü özelliği araç kamerasından elde edilir.

SLAM adımları aşağıdaki şekildedir:

1. Aracın ilk konumu X_{k-1} 'in, araç konumunun yüksek belirsizliği ile birlikte haritada önceden var olan görüntü özelliklerine sahip bir başlangıç olduğu varsayılır.
2. Araç X_{k-1} 'den X_k 'ye hareket etmeye başladığında, hareket modeli, yeni konumuna ilişkin yeni tahminler sağlar ve ayrıca yer belirsizliği bu sırada artar.
3. Araç hareketi sırasında haritaya yeni özellikler M_i eklenir ve mevcut özellik ölçümü güncellenir.

4. Öngörülen gözlem ve gerçek gözlem arasındaki fark hesaplanır.
5. Aracın mevcut durum tahmini güncellenir (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).

SLAM, kapalı mekan İHA navigasyon uygulamaları için standart bir teknik haline gelmiştir (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011). Görü yöntemi, ağırlık, maliyet ve bilgi açısından küçük İHA'ların otonom navigasyonu için GNSS'e iyi bir alternatif olarak görünmektedir. Görü sensörleri İHA'ların gözetleme görevleri için yıllardır kullanılmaktadır. Ayrıca bu sensörler küçük İHA'ların otonom navigasyon ve kontrolünde de önemli bir rol oynamaktadır. Görü ölçümü ile SLAM'in kullanılması çok fazla ilgi gören uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır. Görsel 3B SLAM kısmen yapılandırılmış ortamlarda görev yapan İHA'lar için geliştirilmiştir. Bu algoritmada araç, üniform hareketli rijit bir gövde olarak modellenmiştir ve ivme sistem gürültüsü olarak kabul edilir. Önerilen başka bir görsel SLAM sistemi, yalnızca doğal gözlem olarak yer işaretlerini alır. Bu sistemde İHA'nın hareketini tahmin etmek için homografi tabanlı yaklaşım kullanılmıştır ve yeni bir dönüm noktası olan yer işaretleri başlatma yöntemi geliştirilmiştir (Wang vd., 2013). LiDAR tabanlı SLAM, küçük ve mikro İHA'lar ile kullanılması halinde ağırlık, maliyet, boyut ve güç tüketimi açısından bazı dezavantajlara sahiptir (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018).

SLAM ve odometri yaklaşımları kısa vadeli lokalizasyonda ve hatta döngü kayıpsız uzun yörüngelerde iyi sonuçlar vermiştir (Perez-Grau vd., 2018). Ancak SLAM, geniş alanlara uygulandığında hala sorunlarla karşılaşmaktadır (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011). Görsel SLAM'e dayalı robot lokalizasyonunu tahmin etmek için monoküler görüşlü, atalet sensörleri ile yükseklik sensörlerinin (barometreler, ultrasonik sensörler veya lazerler gibi) füzyonunu içeren yaklaşımlar bulmak çok yaygındır. Bu yaklaşımlar aynı bölge tekrar tekrar ziyaret edildiğinde çok iyi çalışmakta, ancak bilinmeyen senaryolarda yüksek hızlı İHA hareketlerinde genellikle başarısız olmaktadır. Optik akış yaklaşımları da aynı sensörleri kullanmaktadır, ancak sadece doğrusal hızları tahmin etmeyi amaçlar. Bu yaklaşımların görüntülenen ortamın yaklaşık olarak düzlemsel olması durumunda İHA'larda yukarı ve aşağı bakan kameralar için iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ancak lokalizasyon (odometri) için hız entegrasyonu hızla sapma göstermekte ve bu yöntemler uzun vadeli lokalizasyon için kullanılamamaktadır (Perez-Grau vd., 2018).

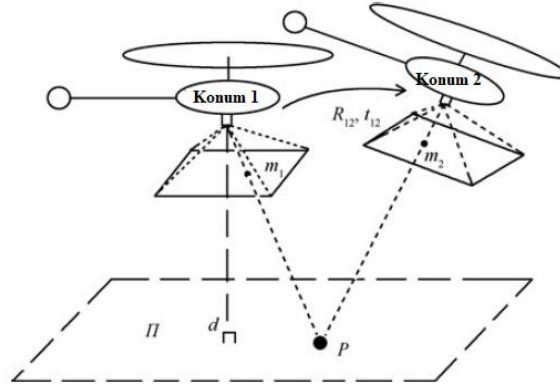
SLAM içerisinde homografi tabanlı bir yöntemde (Wang vd., 2013) araç hareketi 6 serbestlik dereceli olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Daha sonra, görü ölçümünün dolaylı bir GKF tarafından atalet sensörlerinin çıktısı ile füzyonu sağlanmıştır. Homografi, ölçek, döndürme ve öteleme dahil iki görüntü arasındaki dönüşümü belirtmek için kullanılır ve eşitlik (4)'teki şekilde tanımlanır:

$$\lambda \tilde{m}_2 = H \tilde{m}_1 \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te \tilde{m}_1 ve \tilde{m}_2 : Piksel koordinatlardaki iki ardışık çerçevenin karşılık gelen özellikleri için homojen konumlar; H : Homografi matrisi; ve λ : ölçek faktörüdür.

Küçük bir İHA'nın üzerinde aşağı doğru bakan bir kamera ile uçtuğu varsayıldığında m_1 ve m_2 Şekil 8'de gösterildiği gibi düzlem Π 'deki sabit bir P noktasının kamera

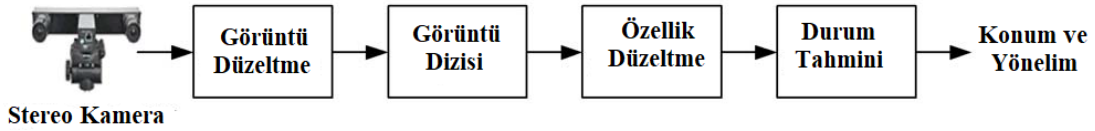
koordinatlarındaki iki izdüşümüdür. R_{12} ve t_{12} sırasıyla dönüşüm matrisi ve yer değiştirme vektörüdür ve her ikisi de aracın hareketini ifade etmek için konum 1'in kamera koordinatlarında tanımlanmıştır (Wang vd., 2013).



Şekil 8. Bir Düzlemdeki Aynı Sabit Noktanın İki Görünümü (Wang vd., 2013) (Yeniden düzenlenmiştir).

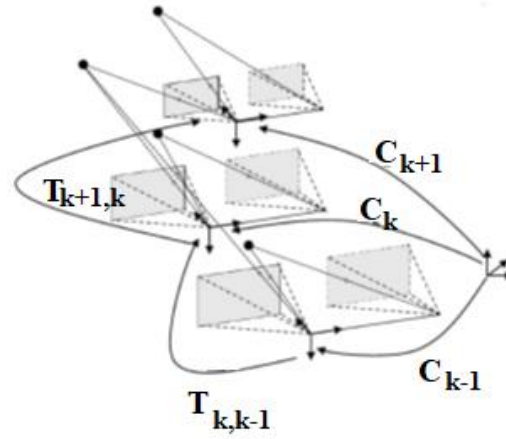
4.1.5. Görsel Odometri

Görsel Odometri, bir veya daha fazla platform üzeri kamera tarafından çekilen görüntü dizisi üzerinde hareketin neden olduğu sapmayı analiz ederek navigasyon halindeki aracının konumunu ve yönelimini kademeli olarak tahmin eden bir prosedürdür. Bu tekniğin blok diyagramı Şekil 9'da gösterilmiştir (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).



Şekil 9. Görsel Odometri Blok Diyagramı (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016) (Yeniden düzenlenmiştir).

Görsel odometri, görüntü düzleminde yakalanan nokta özelliklerinin izlenmesi ile aracın mevcut konumunu hesaplar. Yer değiştirme, görüntü çerçevelerinden kademeli olarak hesaplanır. İHA'ya monte edilen kamera çevrede uçmakta ve Şekil 10'da gösterilen görüntüler her anlık k zamanında sırayla alınmaktadır (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).



Şekil 10. Görsel Odometri Tekniği (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016) (Yeniden düzenlenmiştir).

İHA (Kamera) konum dönüşümünün ardışık görüntüleri eşitlik (5)'te gösterilmiştir,

$$T_k = [R_{k,k-1} t_{k,k-1}; 0 \ 1] \quad (5)$$

Eşitlik (5)'te R: Rotasyonel matrisi; ve t: Yer değiştirme vektörünü göstermektedir.

Kamera poz seti $C_{0:n} = [C_0, \dots, C_n]$ $k=0$ anında çekilen çerçeve ile ilgili olarak alınan araç kamera dönüşümlerini içermektedir. Mevcut poz C_n , tüm kamera dönüşümlerinin $T_k, k=1 \dots n$, integralini alarak tahmin edilebilir ve eşitlik (6) ile ifade edilir (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).

$$C_n = C_{n-1} T_n \quad (6)$$

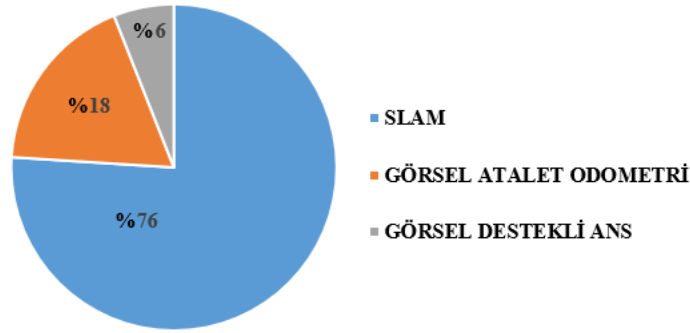
4.2. GNSS-Bağımsız Navigasyon Çözümlerinin Uygulama Alanları

Otonom navigasyon tüm navigasyon bileşenlerinin birbirleri ile etkileşimli olarak çalışmasını gerektirmektedir. Navigasyon sorunlarının karmaşıklığı, yapılan araştırmaları Tablo 2'de gösterilen GNSS-bağımsız özel çözüm yollarına yöneltmiştir. Bu araştırmalarda lokalizasyon en büyük paya sahiptir (Gyagenda vd., 2022).

Tablo 2. GNSS-Bağımsız İHA Navigasyon Araştırmalarının Dağılımı

| Araştırma Kapsamı | Yüzdelerik Dağılım |
|-----------------------|--------------------|
| Lokalizasyon | % 62 |
| Tam Navigasyon | % 16 |
| Yaklaşma ve/veya iniş | % 11 |
| Geçiş Hızı | % 4 |
| Engelden Kaçma | % 3 |
| Durum Tahmini | % 2 |
| Hareket Planlama | % 1 |
| Haritalama | % 1 |

Burada Lokalizasyon “ben neredeyim?” sorusuna araç konumunu tahmin ederek cevap vermek olarak tanımlanabilir. Bu yetenek sadece navigasyon için değil, aynı zamanda nesne işleme, çoklu robot koordinasyonu, keşif ve haritalama için de gereklidir. Lokalizasyon teknikleri şu şekilde özetlenebilir: LiDAR, SLAM, Görsel SLAM, Görsel Atalet Odometrisi, Havadan Havaya Destek (GPS), ANS, İşaret Vericiler, Bilgi Tabanlı Lokalizasyon, Radar Odometri ve Hareket Yakalama Sistemi. Lokalizasyon tekniklerinin tam navigasyon çözümleri içerisindeki dağılımı Şekil 11’de sunulmuştur (Benini, Mancini ve Longhi, 2013; Gyagenda vd., 2022). Lokalizasyon teknikleri arasında görsel lokalizasyonun popülerliği, düşük ağırlığı, görü sensörlerinin düşük güç tüketimi ve çevreyi iyi şekilde tanımlamasından kaynaklanmaktadır (Gyagenda vd., 2022).



Şekil 11. Tam Navigasyon Çözümleri Arasındaki Lokalizasyon Tekniklerinin Dağılımı

Yapılan GNSS-bağımsız navigasyon çalışmalarındaki tam navigasyon (full navigation) çözümleri Tablo 3’te sunulmuştur. Tablo 3’ten görüleceği üzere AÖB modern GNSS-bağımsız navigasyon çözümlerinin hepsinde kullanılmıştır. Ayrıca görü %94 üzerindeki oranla en popüler atalet destekli metottur. Gelecekteki GNSS-bağımsız navigasyon çözümleri için atalet-görsel entegrasyonun büyük bir öneme sahip olacağı değerlendirilmektedir (Gyagenda vd., 2022).

Tablo 3. GNSS Bağımsız Tam Navigasyon Çözümleri

| Metot | Ortam | Lokalizasyon | Referans |
|----------------------------|--|------------------------|--|
| Görü, lazer telemetri, AÖB | Kısmen bilinen kapalı mekan | LiDAR SLAM | (Mohta vd., 2018) |
| Görü, lazer telemetri, AÖB | Kapalı mekan | 2B SLAM | (Sampedro vd., 2019) |
| Görü, AÖB | Bilinmeyen, yapılandırılmamış | Görsel SLAM | (Vanegas, vd., 2019) |
| Görü, lazer telemetri, AÖB | Bilinen kapalı mekan | 2B SLAM | (Bi vd., (2017). |
| Görüntü, AÖB | Bilinen dış mekan | Görsel-destekli ANS | (Kuroswiski, de Oliveira, ve Shiguemori, 2018) |
| Görü, lazer telemetri, AÖB | Bilinmeyen karışık dış ve kapalı mekan | 2B SLAM | (Tang vd., 2019) |
| Görü, AÖB, sonar | Kapalı mekan ve dış mekan | Görsel SLAM | (Valenti vd., 2018) |
| Görü, AÖB | Kapalı mekanda bilinen yapı | Görsel Atalet Odometri | (Vanegas ve Gonzalez, 2016) |

| | | | |
|----------------------------|---|------------------------|--|
| Görü, sonar, AÖB | Kapalı yapı | Görsel SLAM | (Leishman, McLain ve Beard, 2014) |
| Görü, lazer telemetri, AÖB | Kapalı mekan | 2B SLAM | (Nieuwenhuisen, Droeschel, Beul ve Behnke, 2016) |
| Görü, sonar, AÖB | Yapılandırılmamış, kısmen bilinen kapalı mekan | Görsel SLAM | (Li vd., 2013) |
| Lazer telemetri, AÖB | Yapılandırılmamış, bilinmeyen kapalı ve dış mekan | LiDAR SLAM | (Bachrach, Prentice, He ve Roy, 2011) |
| Görü ve AÖB | Karmaşık kapalı ve dış mekan | Görsel SLAM | (Schmid vd., 2014) |
| Görü ve AÖB | Bilinen kapalı mekan | Görsel SLAM | (Perez-Grau vd., 2018). |
| Görü ve AÖB | Kısmen bilinen kapalı mekan | Görsel SLAM | (Oleynikova vd., 2020) |
| Görü ve AÖB | Karışık kapalı ve açık mekan | Görsel Atalet Odometri | (Lutz P., 2020) |
| Görü ve AÖB | Karışık bilinmeyen kapalı ve açık mekan | Görsel Atalet Odometri | (Lin vd., 2018) |

GNSS erişimsiz ortamlardaki araç/platform tipi özelinde görsel navigasyon çalışmalarının özeti Tablo 4'te sunulmuştur (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016):

Tablo 4. GNSS Erişimsiz Ortamlardaki Görsel Navigasyon Çalışmaları

| Sıra No | Araç Tipi | Strateji | Kullanılan Sensör | Yıl | Referans |
|---------|---------------------------------------|---|--|------|--|
| 1 | AscTec Pelican Quadrotor | Görsel odometri | Stereo kamera | 2015 | (Fu, Carrio ve Campoy, 2015) |
| 2 | Quadrotor (GTQ) | GKF ile görsel SLAM ve Lazer SLAM | AÖB, sonar, taramalı lazer ve kamera | 2014 | (Magree ve Johnson, 2014) |
| 3 | Hexacopter | GKF ile görsel SLAM | AÖB, monoküler kamera | 2014 | (Scaramuzza vd., 2014) |
| 4 | Mikrokopter | GKF | AÖB, monocular kamera, GPS, barometrik altimetre | 2014 | (Chambers vd., 2014) |
| 5 | Altı tekerlekli insansız yer aracı | Bayesian bilgi filtresi (GKF) | AÖB ve stereo kamera | 2013 | (Barrett, Gennert, ve Michalson, 2013). |
| 6 | AscTec Pelican mikro hava aracı (MHA) | Görsel odometri ve SLAM | Stereo kamera | 2013 | (Sanfourche, Vittori ve Besnerais, 2013) |
| 7 | Uçuş verileri ile simülör | Unscented Kalman Filter (UKF-Kokusuz Kalman Filtresi) | AÖB, GPS ve kamera | 2013 | (Angelino, Baraniello, ve Cicala, 2013) |
| 8 | Quadrotor | Sabit GKF | AÖB ve Red Green Blue-Depth (RGBD-Kırmızı Yeşil Mavi-Derinlik) odometri (kinect) | 2013 | (Li vd., 2013) |
| 9 | Asctec Pelican Quadrotor | UKF | AÖB, monoküler kamera | 2013 | (Mebarki, Cacace ve Lippiello, 2013) |

| | | | | | |
|----|---|---|---|------|---|
| 10 | AscTec Firefly MHA | GKF | AÖB, basınç sensörü ve monoküler kamera | 2013 | (Lynen, Achteplik, Weiss, Chli ve Siegwart, 2013) |
| 11 | Quadrotor | Kalman filtreli görsel SLAM | Monoküler kamera ile AÖB | 2013 | (Sa vd., 2013) |
| 12 | Hexacopter | Kalman filtreli görsel SLAM | AÖB ve Wide Video Graphics Array (WVGA- Geniş Video Grafik Dizisi) monoküler kamera | 2012 | (Weiss Achteplik, Lynen, Chli ve Siegwart, 2012) |
| 13 | Uçuş verileri ile simülör | GKF | AÖB, monoküler kamera | 2012 | Samadzadegan ve Abdi, 2012) |
| 14 | Çoklu stereo koruyucu başlık takibi sistem | GKF | AÖB ve monoküler kamera | 2012 | Oskiper Samarasekera ve Kumar, 2012) |
| 15 | Gazla çalışan radyo kontrollü model helikopter test tezgahı | GKF ile görsel SLAM | AÖB, monoküler kamera | 2012 | (Wang vd., 2012) |
| 16 | Quadrocopter | GKF ile görsel SLAM | AÖB, basınç sensörü, USB Firefly monoküler kamera | 2011 | (Achteplik, Weiss ve Siegwart, 2011) |
| 17 | Gazla çalışan radyo kontrollü model helikopter | GKF ile görsel odometri | AÖB, monoküler kamera | 2011 | (Wang, Wang, Liang, Chen, ve Wu, 2012) |
| 18 | Scout B1-100 Helikopter | Önceden var olan haritaları kullanma | AÖB ve monoküler kamera | 2011 | (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011) |
| 19 | Altı ayaklı paletli araç | Görsel odometri | Stereo kamera ile AÖB | 2011 | (Chilian, Hirschmüller ve Görner, 2011) |
| 20 | Araç verileri ile simülör | Geographic Information Systems (GIS- Coğrafi Bilgi Sistemi) verilerini kullanarak görüntü kaydı | AÖB, GPS, kamera ve GIS verisi | 2010 | (Gu, Zhu, Guo, Li ve Chang, 2010) |
| 21 | Araç verileri ile simülör | Görsel SLAM | Kamera | 2010 | (Kaiser, Gans ve Dixon, 2010) |
| 22 | Quadrotor | GKF ile görsel SLAM | AÖB, Stereo kamera, lazer mesafe ölçer ile monocular renkli kamera | 2010 | (Bachrach vd., 2010). |
| 23 | HMAV | GKF | AÖB ve Wi-Fi kamera | 2009 | (Ahrens, Levine, Andrews ve How, 2009). |
| 24 | Quadcopter | KF | AÖB ve Wi-Fi kamera | 2009 | (Achteplik, Zhang, Kuhnlenz ve Buss, 2009). |
| 25 | Yamaha RMAX helikopter | Görüntü kayıtlı KF | AÖB, GPS, Kamera ve uydu görüntüleri | 2008 | (Conte ve Doherty, 2008) |

| | | | | | |
|----|--|---|--------------------------|------|--|
| 26 | Araç verileri ile simülâtör | Kalman filtresi | Lazer tarayıcı ile AÖB | 2008 | (Soloviev, (2008) |
| 27 | Sentetik MHA uçuş verileri ile simülâtör | Epipolar kısıtlamayı UKF kullanan çerçevesi | AÖB ve stereo kamera | 2008 | (Taylor, 2008) |
| 28 | MHA uçuş verileri ile simülâtör | İteratif kayıt yöntemi, UKF | Monoküler kamera ile AÖB | 2007 | (Andersen ve Taylor, 2007) |
| 29 | MHA uçuş verileri ile simülâtör | GKF ile görsel odometri | Monoküler kamera ile AÖB | 2007 | (Ready ve Taylor, 2007) |
| 30 | Acrobatik helikopter 23cc | Doğrusal olmayan gözlemci | AÖB ve Webcam | 2007 | (Cheviron, Hamel, Mahony ve Baldwin, 2007) |
| 31 | Araç verileri ile simülâtör | GKF | Kamera ile AÖB | 2007 | (Mourikis ve Roumeliotis, 2007). |

4.3. GNSS-Erişimsiz Ortamlardaki Navigasyon ile İlgili Yapılan Çalışmalar

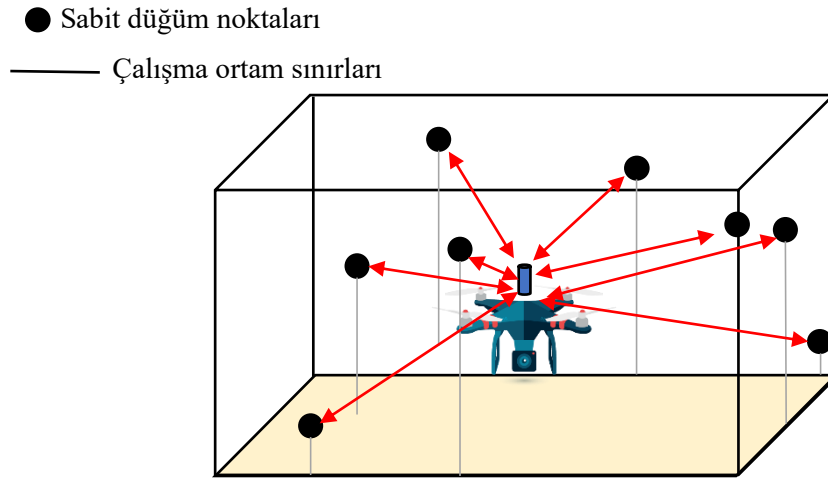
GNSS erişimsiz ortamlardaki lokalizasyon ve navigasyon sorunlarına yönelik ilk yaklaşımlarda optik akış tabanlı kontrol yöntemlerinden yararlanılmıştır. Bu biyomimetik yöntemde çok sayıda hesaplama veya ortama yerleştirilen yapay arazi işaretlerine ihtiyaç duyulmaz. Daha sonraları hızla gelişen gömülü hesaplama yetenekleri yerleşik optik akış hesaplamasını pratik uçuş kontrolü için mümkün kılmıştır (Zhang vd., 2015)

GNSS sinyali mevcut olmadığında konumu doğru şekilde belirlemek için biyo-ilham alan teknikler de araştırılmıştır. Mağara kırlangıcı da dahil olmak üzere bazı kuş türleri, yuvalarının olduğu karanlık mağaralarda zooloji literatüründe akustik yönelim olarak adlandırılan yönelime dayalı hareket sergilemektedir. Yarasalar tarafından kullanılan akustik radarın aksine, amaç avın yerini tespit etmek veya engellerden kaçmak değildir. Bu benzersiz kuşlar görsel ipuçları olmadan yuvanın olduğu konuma tam olarak geri dönmek için akustik sondaj (acoustics sounding) kullanır. Mağara swiftlet'leri (bir kuş türü) yankıları işleyerek 1 ve 16 kHz arasında cıvıltı sesi yayar ve geri yansıyan akustik sinyal özelliklerine dayalı olarak 1 cm'den küçük engellerden kaçarak ve bilinen yerleri tanıyarak hem tanıdık hem de bilinmeyen ortamlarda sürekli olarak gezinirler. Yapılan çalışmalar akustik navigasyon davranışının ortamda yer alan güçlü yansıtıcı nesnelere karşı olan yayılma gecikmesi hakkındaki geçici bilgilere dayandığını ileri sürmektedir. Akustik yönelimde elektromanyetik kanal cevaplarına dayalı navigasyon için optimal problema bant genişliği seçildiğinde kuşlar tarafından kısa sinyal kullanımının, önemli sonuçları olduğu görülmektedir (DeFranco vd., 2014).

Kanal durum karşılaştırması ile ilgili yapılan bir çalışmada (DeFranco vd., 2014) bir yayılma kanalının konum ilişkisinin kapalı ve açık-kapalı ortamlardaki haberleşme bağlantısında yer alan bir hedef veya alıcı-verici hareketini algılamak ve ölçmek için kullanılabilirdiği belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmadaki konseptte İHA ilk olarak belirli bir operasyon alanı üzerinde önceden tanımlı uçuş paternini takip eder ve GNSS veya diğer harici konumlandırma yardımcılarında (haritalama aşaması) elde edilen konumlar boyunca referans kanal durumu bilgilerini toplar. Daha sonra, İHA, GNSS kullanılabilirliği olmadan

aynı genel bölgeden uçar ve konum belirlemek için yayılma ortamının (navigasyon aşaması) ölçülen kanal durumu bilgilerini kaydedilmiş bir veri tabanı ile karşılaştırır. Kanal durum karşılaştırması, kayıtlı kanal matrisi ve ölçülen kanal matrisi arasındaki farka dayalı uzay matrisinde yer alan uygun bir norm kullanılarak yapılabilmektedir (DeFranco vd., 2014).

GNSS erişimsiz ortamlarda otonom İHA navigasyonu için Ultra-Wideband (UWB-Ultra Geniş Bant) konumlandırma sisteminin kullanılması da araştırılmıştır. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmada (Tiemann, Schweikowski ve Wietfeld, 2015) kapalı mekân konumlandırma sistemi dokuz adet UWB düğüm noktasından oluşmaktadır. Şekil 12’de gösterildiği üzere bu noktalardan sekiz tanesi değişen talepleri değerlendirmek üzere sabitleme noktaları olarak görev yapmaktadır. Bir düğüm noktası ise, döngüsel bir programda sabit bir düğüm noktası seti ile değişen bir nokta olarak yapılandırılmıştır. Gömülü bir sistem üzerinde yerleşik bir gerçek zamanlı GNSS benzetimi, çoklu koordinat sistemlerinde konum bilgisi sağlayarak başarılı şekilde uygulanmıştır.



Şekil 12. İHA İç Mekan Konumlandırma Senaryosunun Gösterimi (Koifman ve Bar-Itzhack, 1999) (Yeniden düzenlenmiştir).

GNSS sinyal kaybını telafi etmek ve bağımsız ANS çözümü sapmasını azaltmak için farklı sensörler/yöntemler kullanılmıştır. Signal of Opportunity (SoOP-Fırsat Sinyali) GNSS sinyalinin engellendiği durumlar için alternatif çözümlerden birisidir. SoOP esas olarak GNSS uyduları olarak işlev gören sabit işaretlerden gelen sinyallere bağlıdır. Bu sinyaller Radio Frequency (RF-Radyo Frekansı) sinyalleri gibi navigasyon amaçlı değildir. Hafif, düşük güç tüketimi ve uygun maliyet nedeniyle kameralar görü-tabanlı veya görü destekli yaklaşımlardaki GNSS sinyal kesintisi periyotlarında en çok kullanılan sensörlerden biri olarak kabul edilir. Ancak durum tahmin performansını düşürebilen eksik özellikler, stereo kameralar kullanıldığında oluşan küçük referans mesafeleri ve çevresel değişiklikler kamera kullanımı ile ilgili dezavantajlar olarak karşımıza çıkmaktadır (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018).

İHA’ya ilave yük getirmeyen, AÖB hatalarını azaltan ve navigasyon çözümünü güçlendiren bir yaklaşımda araç dinamik modelinden elde edilen ek bilgiler kullanılmıştır. Bu

yaklaşımında GKF ile iki sistemin füzyonu sağlanmaktadır. Birinci sistem araç durumunu tahmin etmek için kullanılan düşük maliyetli AÖB'ye (ivmeölçer ve jiroskop) dayalı sabit ANS'dir. İkinci sistem (yardımcı) dinamik model durum denklemlerinden hesaplanan, İHA gövdesine etki eden kuvvet ve tork varyasyonlarından oluşan navigasyon durumlarını tahmin eden araç dinamik modelidir. Araç dinamik modelinin yardımcı sistem olarak kullanılması için İHA dinamik parametrelerinin tüm İHA bileşenleri içerecek detaylı şekilde modellenmesi gerekmektedir. (Koifman ve Bar-Itzhack, 1999).

GNSS erişimsiz bölgelerde uçuş için yapılan çalışmada (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018) sensör gereksinimi olmaksızın tekrarlı dinamik paternler kullanılarak İHA navigasyon duruş tahmini yapılmıştır. Verilen bir eksen ve belirlenen modlara göre görev boyunca (sıfır-hız modu, sabit hız modu ve hızlanma/yavaşlama modu gibi) dört pervaneli İHA için tekrarlı dinamik paternlerin belirlenmesinde makine öğrenimi sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Daha sonra GKF vasıtasıyla daha iyi bir İHA duruş tahmini yapmak için belirlenen paterne göre uygun sınırlar/güncellemeler navigasyon çözümünü güçlendirmek için kullanılmıştır.

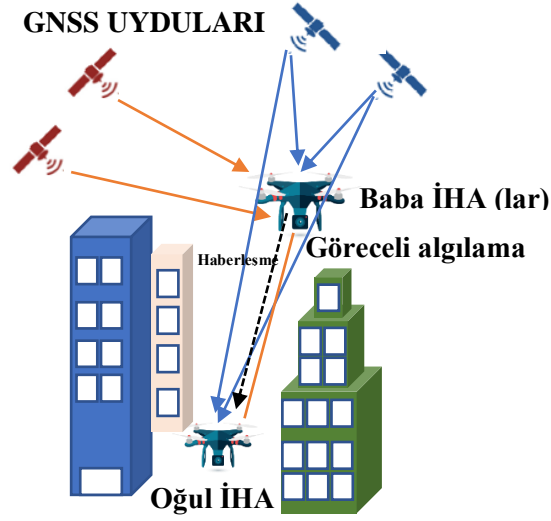
Son yıllarda, Phased-Array Radio Systems (PARS-Fazlı-Dizi Radyo Sistemleri), küçük İHA'larda yedekli bir konumlandırma sistemi olarak düşünülmüştür. PARS'ın yüksek bant genişliğine sahip bir radyo iletişim aracı olarak kullanımı birincil kullanım alanlarından. İHA bağlamında bu sistemde canlı video akışı da dahil olmak üzere kullanıcıya telemetri verisi sağlanabilmektedir. Bu sistem, yüksek sinyal-gürültü oranı, şifreli haberleşme kullanımı ve GNSS'den bağımsız olduğu için GNSS çözümlerinin güvenlik açığı yönünü tamamlamaktadır (Gryte vd., 2019).

Visual Teach and Repeat (VT&R- Görsel Öğretme ve Tekrarlama) gibi otonom rota izleme yöntemleri, harici altyapıya veya doğru bir küresel konum tahmini gerektirmeksizin yer robotları için uzun menzil navigasyonu sağlamıştır. VT&R'nin uçakta uygulanabilirliği iki farklı durumda görülmektedir: (1) "görsel izleri kullanan" bir yöntem olarak acil durum dönüşünün gerekli olduğu durumda kullanım ve (2) GNSS sinyalinin yetersiz olduğu durumlarda bir tamamlayıcı veya birincil navigasyon sistemi olarak kullanım (Warren, 2018).

Google haritasındaki konumu kullanan navigasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada (Shan, vd., 2015) Google haritasındaki mutlak bir konumu sağlamak için görüntü kaydından yararlanılmıştır. Ancak ölçek, oryantasyon ve aydınlatmadaki değişimler, yerleşik kamera tarafından haritaya görüntüyü kaydetmek için büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Ayrıca Google haritası sürekli güncellenmediği için yerleşik çerçeve ve harita arasındaki sahne değişimleri mevcuttur. Bu sorunları gidermek amacıyla görüntü kaydı için gradyan model ve Histogram of Oriented Gradients (HOG-Yönlendirilmiş Gradyan Histogramları) kullanımı temel alınmıştır. Eşleştirme sürecini hızlandırmak için kayar pencere aramasını önleyen parçacık filtresi kullanılmıştır.

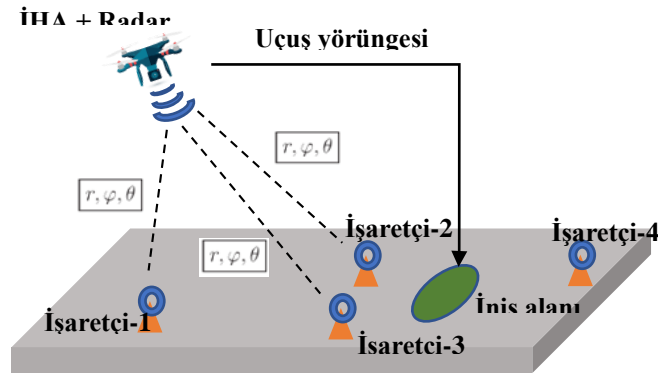
GNSS verisini kullanmayı esas alan çalışmada (Causa vd., 2018) en az iki İHA'nın (bir "oğul İHA" ve bir veya daha fazla "baba İHA") işbirliği içinde olduğu bir birlikte çalışma modeli dikkate alınmıştır. Söz konusu navigasyon konsepti Şekil 13'te gösterilmiştir. Baba İHA(lar) nominal GNSS kapsamı koşulları altında zorlu alanda uçuş yapmaktadır, dolayısıyla standart GNSS/ANS verisini kullanmaktadırlar. Bu İHA'ların rolü doğru bir veri bağlantısı

aracılığıyla bağlı algılama ve bilgi ile oğul İHA navigasyonunu desteklemektir. Diğer benzer yaklaşımlarda olduğu gibi, oğul ve baba(lar) İHA'lar arasında Line of Sight (LOS-Görüş Hattı) olması gerekmektedir.



Şekil 13. İşbirliğine Dayalı Navigasyon Senaryosu ve Konseptinin Görünümü (Causa vd., 2018) (Yeniden düzenlenmiştir).

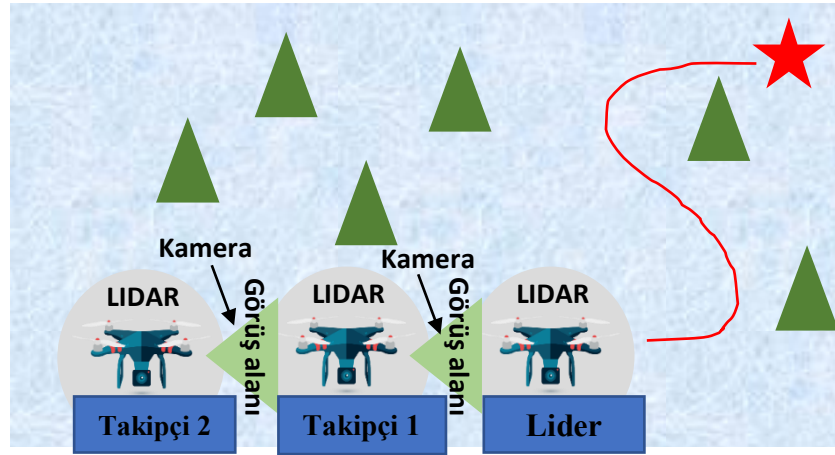
GNSS-erişimsiz ortamlarda, emniyetli bir İHA kullanımı için kablosuz konumlandırma sistemi bir alternatif olarak düşünülmüştür. Farklı sensör türleri karşılaştırıldığında, lazer tarayıcı veya kamera gibi optik sensörlerin kullanımı, performansları hava durumuna ve aydınlatma koşullarına bağlı olduğu için yeterince güvenilir değildir. Atalet sensörleri zamanla bir sapma sergilediği için konumlandırmayı etkilemektedir. Radar teknolojisi, zorlu çevre koşullarında bile yüksek konumlandırma doğruluğu sağladığı için başka umut verici bir çözüm haline gelmektedir. Şekil 14'te radar-tabanlı kablosuz lokal konumlandırma sistemi üzerinden kontrollü İHA lokalizasyonu ve inişi içeren konsept çalışması gösterilmiştir. Bu konseptte çalışmada İHA, radar transponderlerin yer aldığı işaretçilerde yapılan ölçümlere göre konumunu belirlemektedir (Pavlenko vd., 2019).



Şekil 14. Radar Tabanlı Kablosuz-Lokal Konumlandırma Sistemi ile İHA Lokalizasyon ve İniş Konsepti (Pavlenko vd., 2019) (Yeniden düzenlenmiştir).

Sürü hareketi bir grup olarak bir arada kalabilmek için bireylerin düzenli bir hareket içinde düzenlenen sınırlı çevresel bilgileri kullandıkları toplu bir davranış sergilemesini sağlar. Bu

hareketi doğada balıklar, böcekler ve kuşlar gibi canlılar tarafından yaygın olarak görmek mümkündür. Sürü davranışı ilk olarak 1987 yılında bir bilgisayarda Reynolds tarafından simüle edilmiştir. İHA sistemlerinde de sürü şeklinde uçuş yapabilmektedir. Mevcut sürü stratejileri genel olarak merkezi ve merkezi olmayan şeklinde ikiye ayrılabilir. Merkezi strateji sürü sistemlerinin davranışlarını düzenlemek için merkezi bir birim kullanır. Ancak büyük ölçekli sistemler için bu strateji teknik olarak mümkün olmayabilir. Merkezi olmayan strateji ise biyolojik sistemleri veya doğal olayları ilham kaynağı olarak alan İHA'lar arasındaki etkileşimi esas almaktadır. Tipik bir merkezi olmayan stratejide lider-takipçi esaslı yöntemde bazı takım üyeleri lider bazıları da takipçi olarak görev yapmaktadır. Bazı takım üyeleri de hem lider hem takipçi olarak sistemde yer alabilmektedir. Sürü İHA'ların GNSS erişimsiz ortamlarda kullanımı için de çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Şekil 15'te GNSS erişimsiz ortamlarda kullanılacak görü-destekli lider-takipçi sürü sistemi (çalışmada önerilen) gösterilmektedir (Tang, vd., 2019)



Şekil 15. Bilinmeyen Ortamda Görev Yapan Görü-Destekli Sürü Sistemi (Tang, vd., 2019) (Yeniden düzenlenmiştir).

5. SONUÇ

Yapılan kapsamlı araştırmada (Gyagenda vd., 2022) uygulanan navigasyon tekniklerinin genel olarak atalet, görsel, LiDAR ve radyo navigasyonunu içerdiği görülmektedir. Tam navigasyon çözümleri incelendiğinde, %76 ile SLAM tabanlı navigasyonun önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir. Görsel atalet odometrisi ve görüş destekli atalet navigasyonunun payı sırasıyla %18 ve %6'dır. Güvenilirliği, atalet sistemlerinin yüksek güncelleme oranları ve görüş tekniklerinin kalitesi ile atalet ve optik sistemlerin hibrit kullanımının GNSS bağımsız İHA navigasyonunda önemli bir role sahip olduğu görülmektedir.

GNSS sinyali kesintisinde büyük faydaları olması ve AÖB sapmalarını azaltmalarına rağmen tüm yardımcı sensörlerin İHA'ya daha fazla ağırlık, güç, boyut, maliyet ve fiziksel sınırlandırma etkisi bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında küçük/mikro İHA'lara getirilen sınırlamaları dikkate alan alternatif yöntemlerin kullanılmasının ve geliştirilmesinin gerektiği görülmektedir.

Kullanıma hazır otopilot sistemlerinin yaygınlığı sayesinde, İHA uçuş kontrol ve bunlarla ilgili yapısal tasarımlar tam teknoloji olgunluk seviyeleri ulaşmış gözükmektedir. Odak noktası artık algılama, lokalizasyon, hareket planlama ve haberleşme üzerine yoğunlaşmıştır. Makine öğrenimi, aktif görüş ve diğer uyarlanabilir yapay zeka tekniklerinin sensör hata modellemesinde ve anlamsal faaliyet alanını kavramak için popüler çözümler olabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca 5G haberleşme teknolojisinin yüksek hacimli gerçek zamanlı veri akışı özelliğine sahip yerleşik veri odaklı navigasyon sistemleri için önemli bir kolaylaştırıcı olması beklenmektedir.

6. YAZAR KATKILARI

Bu çalışmanın oluşturulmasında, Engin Göde konu başlığının ve kapsamının belirlenmesinde, teknik analiz ve değerlendirmelerde ve genel koordinasyonda, Melih Cemal Kuşhan ve Gökhan İbrahim Ögünç süreç yönetiminde ve spesifik başlıkların belirlenmesinde, Atanur Teoman ve Kürşat Tonbul araştırma kapsamının yönlendirilmesinde ve Batuhan Daz literatür taramasında çeşitli katkılarda bulunmuştur.

7. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmada isimleri belirtilen yazarlar, çalışmada ele alınan konular veya materyaller hakkında herhangi bir mali veya mali olmayan çıkara sahip herhangi bir kurum veya kuruluşla herhangi bir bağlantısı veya ilgisi bulunmadığını beyan ederler.

KAYNAKÇA

- Achtelik, M., Weiss, S., & Siegwart, R. (2011). Onboard IMU and monocular vision-based control for Mavs in unknown in-and outdoor environments. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, 3056-3063. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5980343>.
- Achtelik, M., Zhang, T., Kuhnlenz, K., & Buss, M. (2009). Visual tracking and control of a quadcopter using a stereo camera system and inertial sensors. *2009 International Conference on Mechatronics and Automation*, Changchun, China, 2863-2869. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5246421>.
- Ahrens, S., Levine, D., Andrews, G., & How, J.P. (2009). Vision-based guidance and control of a hovering vehicle in unknown, GPS-denied environments. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, 2643-2648. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5152680>.
- Alarcon, F., Santamaria, D., & Viguria, A. (2015). UAV helicopter relative state estimation for autonomous landing on moving platforms in a GPS-denied scenario. *IFAC-Papers Online*, 48(9), 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.056>.
- Andersen, E.D., & Taylor, C.N. (2007). Improving MAV pose estimation using visual information. *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, 3745-3750. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4399563>.
- Angelino, C.V., Baraniello, V.R., & Cicala, L. (2013). High altitude UAV navigation using IMU, GPS and camera. *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*, Istanbul, Turkey, 647-654. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6641342>.
- Bachrach, A., de Winter, A., Ruijie He, Hemann, G., Prentice, S., & Roy, N. (2010). RANGE - Robust autonomous navigation in GPS-denied environments. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, AK, USA, 1096-1097. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5509990>.
- Bachrach, A., Prentice, S., He, R., & Roy, N. (2011). RANGE-Robust autonomous navigation in GPS-denied environments. *J. Field Robotics*, 28(5), 644-666. <https://doi.org/10.1002/rob.20400>.
- Balamurugan, G., Valarmathi, J., & Naidu, V. P. S. (2016). Survey on UAV navigation in GPS denied environments. *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)*, Paralakhemundi, India, 198-204. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7955787>.
- Barrett, J.M., Gennert, M.A., & Michalson, W.R. (2013). Development of a low-cost, self-contained, combined vision and inertial navigation system. *2013 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*, Woburn, MA, USA, 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6556351>.
- BeiDou. (2024). <https://en.wikipedia.org/wiki/BeiDou>. Erişim Tarihi: 05 Ocak 2024.
- Benini, A., Mancini, A., & Longhi, S. (2013). An IMU/UWB/Vision-based extended Kalman filter for mini-UAV localization in indoor environment using 802.15.4a wireless sensor network. *J Intell Robot Syst*, 70, 461-476. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-012-9742-1>.
- Bi, Y., Lan, M., Li, J., Zhang, K., Qin, H., Lai, S., & Chen, B. M. (2017). Robust autonomous

- flight and mission management for MAVs in GPS-denied environments. *2017 11th Asian Control Conference (ASCC), Gold Coast, QLD, Australia*, 67-72. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8287144>.
- Causa, F., Vetrella, A.R., Fasano, G., & Accardo, D. (2018). Multi-UAV formation geometries for cooperative navigation in GNSS-challenging environments. *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, USA*, 775-785. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8373453>.
- Chambers, A., Scherer, S., Yoder, L., Jain, S., Nuske, S., & Singh, S. (2014). Robust multi-sensor fusion for micro aerial vehicle navigation in GPS-degraded/denied environments. *2014 American Control Conference Portland, OR, USA*, 1892-1899. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6859341>.
- Chevion, T., Hamel, T., Mahony, R., & Baldwin, G. (2007). Robust nonlinear fusion of inertial and visual data for position, velocity and attitude estimation of UAV. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, 2010-2016*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4209381>.
- Chilian, A., Hirschmüller, H., & Görner, M. (2011). Multi-sensor data fusion for robust pose estimation of a six-legged walking robot. *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, USA*, 2497-2504. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6094484>.
- Conte, G., & Doherty, P. (2008). An Integrated UAV navigation system based on aerial image matching. *2008 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA*, 1-10. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4526556>.
- DeFranco, P., Mackie, J.D., Morin, M., & Warnick, K.F. (2014). Bio-inspired electromagnetic orientation for UAVs in a GPS-denied environment using MIMO channel sounding. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(10), 5250-5259. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6861435>.
- Fu, C., Carrio, A., & Campoy, P. (2015). Efficient visual odometry and mapping for unmanned aerial vehicle using ARM-based stereo vision pre-processing system. *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Denver, CO, USA*, 957-962. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7152384>.
- Galileo (satellite navigation). (2023). [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(satellite_navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation)) Erişim Tarihi: 31 Aralık 2023.
- Global Positioning System. (2024). https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System Erişim Tarihi: 10 Ocak 2024.
- Glonass. (2023). <https://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS> Erişim Tarihi: 24 Aralık 2023.
- Gryte, K., Bryne, T.H., Albrektsen, S.M., & Johansen, T.A. (2019). Field test results of GNSS-denied inertial navigation aided by phased-array radio systems for UAVs. *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Atlanta, GA, USA*, 1398-1406. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8798057>.
- Gu, D.-Y., Zhu, C.-F., Guo, J., Li, S.-X., & Chang, H.-X. (2010). Vision-aided UAV navigation using GIS data. *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, QingDao, China*, 78-82. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5550944>.
- Gyagenda, N., Hatilima, J.V., Roth, H., & Zhmud, V. (2022). A review of GNSS-independent UAV navigation techniques. *Robotics and Autonomous Systems*, 152,

104069. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104069>.
- Kaiser, M.K., Gans, N.R., & Dixon, W.E. (2010). Vision-based estimation for guidance, navigation, and control of an aerial vehicle. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 46(3), 1064-1077. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5545174>.
- Koifman, M., & Bar-Itzhack, I.Y. (1999). Inertial navigation system aided by aircraft dynamics. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 7(4), 487-493. <https://ieeexplore.ieee.org/document/772164>.
- Kuroswiski, A.R., de Oliveira, N.M.F., & Shiguemori, E.H. (2018). Autonomous long-range navigation in GNSS-denied environment with low-cost UAV platform. *2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Canada, 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8369592>.
- Leishman, R.C., McLain, T.W., & Beard, R.W. (2014). Relative navigation approach for vision-based aerial GPS-denied navigation. *J. Intell. Robot. Syst.* 74, 97-111. <https://doi.org/10.1007/s10846-013-9914-7>.
- Li, D., Li, Q., Cheng, N., Wu, Q., Song, J., & Tang, L. (2013). Combined RGBD-inertial based state estimation for MAV in GPS-denied indoor environments. *2013 9th Asian Control Conference (ASCC) Istanbul, Turkey*, 1-8. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6606361>.
- Li, Q., Li, D.-C., Wu, Q., Tang, L., Huo, Y., Zhang, Y., & Cheng, N. (2013). Autonomous navigation and environment modeling for MAVs in 3-D enclosed industrial environments. *Computers in Industry*, 64(9), 1161–1177. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.06.010>.
- Liao, F., Lai, S., Hu, Y., Cui, J., Wang, J.L., Teo, R., & Lin, F. (2016). 3D motion planning for UAVs in GPS-denied unknown forest environment. *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Gothenburg, Sweden, 246-251. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7535393>.
- Lin, Y., Gao, F., Qin, T., Gao, W., Liu, T., Wu, W., ... Shen, S. (2018). Autonomous aerial navigation using monocular visual-inertial fusion. *J. Field Robotics* 35(1), 23-51. <https://doi.org/10.1002/rob.21732>.
- Lu, H. (2022). Flight in GPS-denied environment: Autonomous navigation system for micro-aerial vehicle. *Aerospace Science and Technology*, 124, 107521. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107521>.
- Lutz, P., Müller, M. G., Maier, M., Stoneman, S., Tomić, T., Bargen, I., ... Triebel, R. (2020). ARDEA-An MAV with skills for future planetary missions. *J. Field Robotics*, 37(4), 515-551. <https://doi.org/10.1002/rob.21949>.
- Lynen S., Achtelek, M.W., Weiss, S., Chli, M., & Siegwart, R. (2013). A robust and modular multi-sensor fusion approach applied to MAV navigation. *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Tokyo, Japan*, 3923-3929. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6696917>.
- Magree, D., & Johnson, E.N. (2014). Combined laser and vision-aided inertial navigation for an indoor unmanned aerial vehicle. *2014 American Control Conference Portland, OR, USA, 1900-1905*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6858995>.
- Mebarki, R., & Lippiello, V. (2014). Image moments-based velocity estimation of UAVs in GPS denied environments. *2014 IEEE International Symposium on Safety, Security,*

- and Rescue Robotics Hokkaido*, Japan, 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7017659>.
- Mebarki, R., Cacace, J., & Lippiello, V. (2013). Velocity estimation of an UAV using visual and IMU data in a GPS-denied environment. *2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR) Linköping*, Sweden, 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6719334>.
- Miller, M.M., Soloviev, A., de Haag, M.U., & Veth, M. (2011). *Navigation in GPS Denied Environments: Feature-Aided Inertial Systems*. NATO, RTO-EN-SET-116. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA581023.pdf>.
- Mohta, K., Watterson, M., Mulgaonkar, Y., Liu, S., Qu, C., Makineni, A., ... Kumar, V. (2018). Fast, autonomous flight in GPS-denied and cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 35(1), 101-120. <https://doi.org/10.1002/rob.21774>.
- Mourikis, A.I., & Roumeliotis, S.I. (2007). A Multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation Rome, Italy*, 3565-3572. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4209642>.
- Mutluer, E., & Ünal, A. (2021). GNSS uygulamaları için karıştırmaya dayanıklı anten dizisi tasarımı. *URSI-Türkiye X. Bilimsel Kongresi*, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli. http://ursitr2021.gtu.edu.tr/MCMSR/papers/URSI-TR_2020_paper_58.pdf.
- Nieuwenhuisen, M., Droschel, D., Beul, M., & Behnke, S. (2016). Autonomous navigation for micro aerial vehicles in complex GNSS-denied environments. *J. Intell. Robot. Syst.*, 84, 199-216. <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0274-3>.
- Oleynikova, H., Lanegger, C., Taylor, Z., Pantic, M., Millane, A., Siegwart, R., & Nieto, J. (2020). An open-source system for vision-based micro-aerial vehicle mapping, planning, and flight in cluttered environments. *J. Field Robotics*, 37(4), 642-666. <https://doi.org/10.1002/rob.21950>.
- Oskiper, T., Samarasekera, S., & Kumar, R. (2012). Multi-sensor navigation algorithm using monocular camera, IMU and GPS for large scale augmented reality. *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Atlanta, GA, USA, 71-80. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6402541>.
- Other Global Navigation Satellite Systems (GNSS). (2021). <https://www.gps.gov/systems/gnss/>. Erişim Tarihi: 19 Ekim 2021.
- Pavlenko, T., Schütz, M., Vossiek, M., Walter, T., & Montenegro, S. (2019). Wireless local positioning system for controlled UAV landing in GNSS-denied environment. *2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)* Turin, Italy, 171-175. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8869587>.
- Perez-Grau, F.J., Ragel, R., Caballero, F., Viguria, A., & Ollero, A. (2018). An architecture for robust UAV navigation in GPS-denied areas. *Journal of Field Robotics*, 35(1), 121-145. <https://doi.org/10.1002/rob.21757>.
- Pırtı, A., Gündoğan, Z.Ö., & Şimşek, M. (2022). QZSS uyduları ve sinyal yapıları. *Geomatik Dergisi*, 7(3), 243-252. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1912939>.
- Qin, H., Bi, Y., Ang, K. Z. Y., Wang, K., Li, J., Lan, M., ... Lin, F. (2016). A stereo and rotating laser framework for UAV navigation in GPS denied environment. *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society Florence*, Italy, 6061-6066. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7793246>.

- Qin, H., Meng, Z., Meng, W., Chen, X., Sun, H., Lin, F., & Ang, M. (2019). Autonomous exploration and mapping system using heterogeneous UAVs and UGVs in GPS-denied environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(2), 1339-1350. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8598942>.
- Rady, S., Kandil, A.A., & Badreddin, E. (2011). A hybrid localization approach for UAV in GPS denied areas. *2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, Kyoto, Japan, 1269-1274. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6147631>.
- Ready, B.B., & Taylor, C.N. (2007). Improving accuracy of MAV pose estimation using visual odometry. *2007 American Control Conference* New York, NY, USA. 3721-3726. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4283137>.
- Russell, J.S., Ye, M., Anderson, B.D.O., Hmam, H., & Sarunic, P. (2020). Cooperative localization of a GPS-denied UAV using direction-of-arrival measurements. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56(3), 1966-1978. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8878024>.
- Sa, I., He, H., Huynh, V., & Corke, P. (2013). Monocular vision based autonomous navigation for a cost-effective MAV in GPS-denied environments. *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Wollongong, NSW, Australia*, 1355-1360. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6584283>.
- Samadzadegan, F., & Abdi, G. (2012). Autonomous navigation of unmanned aerial vehicles based on multi-sensor data fusion. *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)* Tehran, Iran, 868-873. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6292475>.
- Sampedro, C., Rodriguez-Ramos, A., Bavle, H., Carrio, A., de la Puente, P., & Campoy, P. (2019). A fully-autonomous aerial robot for search and rescue applications in indoor environments using learning-based techniques. *J Intell Robot Syst*, 95, 601-627. <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0898-1>.
- Sanfourche, M., Vittori, V., & Le Besnerais, G. (2013). Evo: A realtime embedded stereo odometry for MAV applications. *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* Tokyo, Japan, 2107-2114. <https://ieeexplore.ieee.org/document/669665>.
- Satellite Navigation. (2024). https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation. Erişim Tarihi: 02 Ocak 2024.
- Scaramuzza, D., Achtelik, M. C., Doitsidis, L., Friedrich, F., Kosmatopoulos, E., Martinelli, A., ... Meier, L. (2014). Vision-controlled micro flying robots: From system design to autonomous navigation and mapping in GPS-denied environments. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 21(3), 26-40. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6880770>.
- Schmid, K., Lutz, P, Tomić, T., Mair, E., & Hirschmüller. (2014). Autonomous vision-based micro air vehicle for indoor and outdoor navigation. *J. Field Robotics*, 31(4), 537-570. <https://doi.org/10.1002/rob.21506>.
- Schmidt, G.T. (2019). GPS based navigation systems in difficult environments. *Gyroscopy Navig*, 10, 41-53. <https://doi.org/10.1134/S207510871902007X>.
- Shan, M., Wang, F., Lin, F., Gao, Z., Tang, Y. Z., & Chen, B. M. (2015). Google map aided visual navigation for UAVs in GPS-denied environment. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* Zhuhai, China, 114-119.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7418753>.

- Shang, C., Cheng, L., Yu, Q., Wang, X., Peng, R., Chen, Y., ... Zhu, Q. (2017). Micro aerial vehicle autonomous flight control in tunnel environment. *2017 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)* Kunming, China, 93-98. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8321597>.
- Soloviev, A. (2008). Tight coupling of GPS, laser scanner, and inertial measurements for navigation in urban environments. *2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium* Monterey, CA, USA, 511-525. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4570059>.
- Tang, Y., Hu, Y., Cui, J., Liao, F., Lao, M., Lin, F., & Teo, R. (2019). Vision-Aided multi-UAV autonomous flocking in GPS-denied environment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 616-626. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8333748>.
- Taylor, C.N. (2008). Fusion of inertial, vision, and air pressure sensors for MAV navigation. *2008 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Seoul, Korea (South), 475-480. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4648040>.
- Tiemann, J., Schweikowski, F., & Wietfeld, C. (2015). Design of an UWB indoor-positioning system for UAV navigation in GNSS-denied environments. *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* Banff, AB, Canada, 1-7. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7346960>.
- Unicomb, J., Dantanarayana, L., Arukgoda, J., Ranasinghe, R., Dissanayake, G., & Furukawa, T. (2017). Distance function based 6DOF localization for unmanned aerial vehicles in GPS denied environments. *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC, Canada, 5292-5297. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8206421>.
- Valenti, F., Giaquinto, D., Musto, L., Zinelli, A., Bertozzi, M., & Broggi, A. (2018). Enabling computer vision-based autonomous navigation for unmanned aerial vehicles in cluttered GPS-denied environments. *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE Hawaii, USA, 3886-3891. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8569695>.
- Vanegas, F., & Gonzalez, F. (2016). Uncertainty based online planning for UAV target finding in cluttered and GPS-denied environments. *2016 IEEE Aerospace Conference*, IEEE, Montana, USA, 706-714. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7500566>.
- Vanegas, F., Gaston, K.J., Roberts, J., & Gonzalez, F. (2019). A framework for UAV navigation and exploration in GPS-denied environments. *2019 IEEE Aerospace Conference Big Sky*, MT, USA, 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8741612>.
- Veth, M. J. (2006). *Fusion of Imaging and Inertial Sensors for Navigation* [Doctoral dissertation, Air University]. <https://scholar.afit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4339&context=etd>.
- Vetrella, A.R., Savvaris, A., Fasano, G., & Accardo D. (2015). RGB-D camera-based quadrotor navigation in GPS-denied and low light environments using known 3D markers. *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* Denver, CO, USA, 185-192. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7152290>.

- Wang C., Wang, T., Liang, J., Chen, Y., & Wu, Y. (2012). Monocular vision and IMU based navigation for a small unmanned helicopter. *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* Singapore, 1694-1699. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6360998>.
- Wang, C., Wang, T., Liang, J., Chen, Y., Zhang, Y., & Wang, C. (2012). Monocular visual SLAM for small UAVs in GPS-denied environments. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* Guangzhou, China, 896-901. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6491082>.
- Wang, C.-L., Wang, T.-M., Liang, J.-H., Zhang, Y.-C., & Zhou, Y. (2013). Bearing-only visual SLAM for small unmanned aerial vehicles in GPS-denied environments. *Int. J. Autom. Comput.*, 10, 387-396. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11633-013-0735-8>.
- Warren, M. (2018). Towards visual teach and repeat for GPS-denied flight of a fixed-wing UAV. M Hutter & R. Siegwart, R (Eds.) *Field and Service Robotics* (s. 481-498). Springer Proceedings in Advanced Robotics 5. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67361-5_31.
- Weiss S, Achtelik, M.W., Lynen S., Chli, M., & Siegwart, R. (2012). Real-time onboard visual-inertial state estimation and self-calibration of MAVs in unknown environments. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation* Saint Paul, MN, USA, 957-964. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6225147>.
- Whyte, H.D., & Bailey, T. (2006). Simultaneous localisation and mapping: Part I the essential algorithm. *Australian Centre for Field Robotics (ACFR) J04*, The University of Sydney, Sydney NSW, Australia. https://people.eecs.berkeley.edu/~pabbeel/cs287-fa09/readings/Durrant-Whyte_Bailey_SLAM-tutorial-I.pdf.
- Zahran, S., Moussa, A., & El-Sheimy, N. (2018). Enhanced UAV navigation in GNSS denied environment using repeated dynamics pattern recognition. *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)* Monterey, CA, USA, 1135-1142. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8373497>.
- Zahran, S., Moussa, A., El-Sheimy, N., & Sesay, A.B. (2018). Hybrid machine learning VDM for UAVs in GNSS-denied environment. *Navigation - Journal of The Institute of Navigation*, 65(3), 477-492. <https://doi.org/10.1002/navi.249>.
- Zhang, X., Xian, B., Zhao, B., & Zhang, Y. (2015). Autonomous flight control of a nano quadrotor helicopter in a GPS-denied environment using on-board vision. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(10), 6392-6403. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7080923>.
- Zhang, Y., Wang, T., Cai, Z., Wang, Y., & You, Z. (2016). The use of optical flow for UAV motion estimation in indoor environment. *Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference* Nanjing, China, 785-790. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7828885>.

