

İnsansız Sistemlerde Görsel Eş Zamanlı Haritalama ve Konumlandırma Tekniğinin Simulink Ortamında Uygulanabilirlik Analizi

Celal Çağrı ALTINDAŞ^{1*}, Hasan Şakir BİLGE^{1*}

¹ Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

² Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

*¹ cagri.altindas@tubitak.gov.tr, ² bilge@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 29/08/2022;

Kabul/Accepted: 30/11/2022)

Öz: Günümüzde insansız sistemler birçok alanda görevler almakta ve bu görevlerini başarıyla yerine getirmektedirler. Ancak bu insansız sistemler otonom bir şekilde uçarak görevlerini yerine getirdiklerinden ötürü hem çevresini hemde bulunduğu konumunu bilmesi gerekmektedir. Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama (SLAM) yöntemi sayesinde çevre bilgisini anlık olarak elde ederek bu çevrede bulunduğu konumu kestiriminde avantaj sağlayan bir yöntemdir. Ancak bu yöntem genellikle düşük hızlarda uçan insansız sistemler için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Windows'ta çalışmakta olan MATLAB 2021b Simulink UAVToolbox ve Unreal Engine v4.25 oyun motor platformu kullanılarak yüksek hızlarda uçan sistemler için Görsel Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama (vSLAM) tekniğinin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu gerçekleştirilmede fotorealistik benzetim senaryosu Unreal Engine v4.25 aracılığıyla üretilerek MATLAB Simulink aracılığı ile benzetim yapılmıştır. Bu benzetimde kameralardan sağlanan görüntüler yardımı ile kamera tabanlı vSLAM yaklaşımı olan ORB-SLAM2.0 algoritması farklı hız, irtifa ve rotalarda senaryolar başarıyla koşturulmuştur. Benzetim testlerinin amacı olan yüksek hızlı sistemler için vSLAM algoritmasının çalıştırılabildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Eş zamanlı konum belirleme ve haritalama, vSLAM, UAVToolbox, MATLAB Simulink, Unreal Engine

Analysis of the Applicability of Visual Simultaneous Localization and Mapping Technique for Unmanned Systems Using Simulink Environment

Abstract : Today, unmanned systems take on tasks in many areas and successfully fulfill these tasks. However, since these unmanned systems fly autonomously, they need to know both their surroundings and their location. Thanks to the Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) method, it is a method that provides an advantage in estimating its location in this environment by instantly obtaining environmental information. However, this method is commonly used for unmanned systems flying at low speeds. In this study, Visual Simultaneous Localization and Mapping(vSLAM) technique is simulated for high-speed flying systems with the help of MATLAB 2021b Simulink UAVToolbox and Unreal Engine v4.25 running on Windows. In this implementation, the photorealistic simulation scenario was produced using Unreal Engine v4.25 and the simulation was carried out via MATLAB Simulink. In this simulation, the ORB-SLAM2.0 algorithm which is camera based vSLAM approach was run with the help of the images obtained from the cameras, and the simulation was successfully carried out at different speed, altitude and paths. It has been observed that vSLAM algorithm can be executed for high speed unmanned systems which is the purpose of simulations.

Keywords : Simultaneous Localisation and Mapping, vSLAM, UAVToolbox, MATLAB Simulink,, Unreal Engine

1. Giriş

İnsansız hava araçları, üzerlerine yerleştirilmiş çeşitli bilgisayarlar ve elektronik sistemler ile çalışan ve bir çok alanda sıklıkla kullanılmakta olan insansız sistemlerdir [1,2]. İnsansız sistemler, gözlem, çevre yönetim, uzaktan algılama gibi yetenekler sayesinde istenilen görevleri icra edebilmesi için üzerlerine yerleştirilen sensörler aracılığı ile otonom hareket kabiliyeti kazanmaktadır. Bu yetenek ile birlikte buldukları çevreyi bilme yeteneğinin kazandırılması, bu sistemlerin görevlerini gerçekleştirmeleri için önemli bir kriterdir[3].

İnsansız hava araçlarının çevreyi bilmesi için konum ve yönelimlerini belirleyebilmesi gerekmektedir. Bunun içinde KKS, AÖB gibi sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır.[4,5]. Ancak bu sensörlerin maruz kalabileceği çeşitli çevresel etkilerden dolayı hatalı veri üretme olasılıkları bulunmaktadır. Bu sebeple 1980'li yıllarda Eş Zamanlı

* Sorumlu yazar: cagri.altindas@tubitak.gov.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-0809-5211, ² 0000-0002-4945-0884

Konumlandırma ve Haritalama (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM) ile ilgili çalışmalara başlanmıştır [7].

SLAM kavramı ortaya atıldıktan sonra gerçekleştirilen çalışmalar sonucu ilk olarak filtre tabanlı olan Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Rao-Blackwellized Parçacık Filtreleri ortaya çıkarılmıştır [8][9]. Filtre tabanlı yöntemler ile birlikte lidar sistemlerin kullanılmaya başlanmasıyla 2D ve 3D ortamlarda haritalama alanlarında da çalışmalar gerçekleştirilmiştir [10][11]. Haritalama alanında gerçekleştirilen çalışmaların sonucu göstermiştir ki, SLAM daha sağlam ve güvenilir sonuçlar vermektedir [6]. Bütün bu önemli gelişmeler 2D ve 3D haritalama alanında çalışmaların daha da geliştirilmesi gereksinimini gündeme getirmiştir ve Lidar sistemler ile hem 2D SLAM hemde 3D SLAM alanında çalışmalara devam edilmiştir. Ancak teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesi ile lidarlı çözüm araçlarına alternatif olarak hem daha uygun hem daha kullanışlı olan kameralar çıkmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalarda, lidar sistemlerin yerine kamera ile oluşturulan Görsel SLAM (vSLAM *.ing*) tekniğinin mevcut tekniklere göre kabiliyetinin arttığı ve daha güvenilir sonuçlar ürettiği görülmektedir [12]. Ayrıca bu çalışmalarda vSLAM tekniğinin mevcut SLAM kabiliyetlerine göre daha modüler ve tasarruflu olduğu ve ekstra bir maliyet oluşturmadığı da gözlemlenmiştir [12]. Sonuç olarak vSLAM ile daha avantajlı bir şekilde 3D SLAM'in gerçekleştirilebileceği ispatlanmıştır [12][13].

Bütün bu önemli gelişmeler olmasına rağmen, literatürde vSLAM yönteminin yüksek hızda uçabilen insansız sistemler üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Nobis, Papanikolaou, Betz ve Lienkamp'ın 2020 yılında gerçekleştirdiği çalışmada[14], iç ve dış mekanlarda model araç üzerine yerleştirilen stereo kamera aracılığı ile hem kendi elde ettikleri veriler hemde KITTI veri seti[15] ile 8 mt/s ile 40mt/s aralığında ORB-SLAM2.0 tekniğini koşturmuşlardır. Çalışmaları sonucunda 36 mt/s hıza kadar hem iç mekan hem dış mekanda ORB-SLAM2.0 tekniğinin koşturulabileceğini ortaya koymuşlardır.[14]

Bu çalışmanın amacı, yüksek hızda uçabilen sistemlere SLAM'in uygulanabilirliğinin MATLAB Simulink benzetim ortamında gösterilerek vSLAM algoritmasının performans analizinin gerçekleştirilmesi ve bu bilgiler ışığında ilgili literatür çalışmalarına katkıda bulunmaktır. Bu makalenin Materyal ve Yöntem bölümünde bu çalışmaya özel olarak üretilmiş veri seti, ORB-SLAM2.0 tekniği ve deneysel ortamda kullanılmış olan platformlar açıklanmıştır. Deneysel Test Çıktıları bölümünde ORB-SLAM2.0 tekniği sonucu elde edilmiş olan harita ve konumlandırma bilgilerini içeren test sonuçlarına ait şekillere yer verilmiştir. Sonuç ve Öneriler bölümünde ise bu tekniğin başarı durumu ve yapılabilecek gelecek çalışmalara yer verilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Benzetim Veri Setleri

Benzetim ortamında gerçekleştirilmiş olan deneysel testlerde Şekil 4'de yer almakta olan 1. ve 2. rotalara uygun konum ve yönelim verilerini içeren 2 ayrı rota için veri setleri oluşturulmuştur. Bu rotalar için konum verileri zaman, x, y ve z eksen bilgilerini, yönelim verileri ise zaman, yuvarlanma, yunuslama ve dönme açı değerlerini içermektedir. Konum ve yönelim veri setlerinde yer almakta olan zaman bilgileri kısmında Simulink için gerekli örnekleme zaman değeri olan 0.05 saniyelik periyotları şeklinde aritmetik artacak şekilde tanımlanmıştır.

Konum bilgileri koordinat ekseninde yer almakta olan x, y ve z eksen bilgilerini içermektedir. Konum için gerekli olan x,y ve z eksen bilgileri rota, irtifa ve hız faktörleri ve 1 saniyelik veri setinde aşağıdaki Denklem 1'de yer alan formül dikkate alınarak oluşturulmuştur.

$$x^2 + y^2 + z^2 = \sqrt{hız} \quad (1)$$

Yönelim bilgileri yuvarlanma, yunuslama ve dönme açı değerleri benzetim uçuş test rotaları korunarak oluşturulmuştur. Bu kapsamda bilgisayar performans kısıtlamaları da göz önüne alınarak yaklaşık 10 mt/s (0.03 Mach) ile 40 mt/s (0.12 Mach) hız aralığı ile 100 metre ile 150 metre aralığında her iki rotada koşulabilmesi için toplamda 18 adet örneklem veri setleri oluşturulmuştur. Şekil 4'de yer alan 1. rota 1'den 9'a kadar olan veri setleri, 2. Rota için 10'dan 18'e kadar olan veri setleri oluşturulmuştur. Bu veri setlerine ilişkin detaylı bilgi Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel Testler İçin Oluşturulmuş Veri Setleri

Rota Numarası	Hız (m/s)	İrtifa (m)	Yol Nokta Sayısı	Süre (Sn)
1. Veri Seti	10	100	2005	100.2
2. Veri Seti	10	125	2005	100.2
3. Veri Seti	10	150	2005	100.2
4. Veri Seti	20	100	1017	50.8
5. Veri Seti	20	125	1017	50.8
6. Veri Seti	20	150	1017	50.8
7. Veri Seti	40	100	536	26.75
8. Veri Seti	40	125	536	26.75
9. Veri Seti	40	150	536	26.75
10. Veri Seti	10	100	1287	64.3
11. Veri Seti	10	125	1287	64.3
12. Veri Seti	10	150	1287	64.3
13. Veri Seti	20	100	673	33.6
14. Veri Seti	20	125	673	33.6
15. Veri Seti	20	150	673	33.6
16. Veri Seti	40	100	389	19.4
17. Veri Seti	40	125	389	19.4
18. Veri Seti	40	150	389	19.4

2.2 Görsel Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama Tekniği (vSLAM)

vSLAM, temel olarak görsel tabanlı haritalama ve konumlandırma algoritmalarıdır ve temel olarak ilkleme, takip ve haritalama olmak üzere 3 ana başlık altında incelenmektedir. Bu temellere ek olarak hesaplama karmaşıklığının indirgenmesi ve elde edilen harita çözünürlüğünün artırılması için döngü tamamlama yöntemleri de kullanılmaktadır. Barros, Michel, Moline, Corre, ve Carrel 2022 yılında gerçekleştirmiş oldukları, vSLAM yaklaşımını ve literatürdeki vSLAM tekniklerini geniş çapta ele aldıkları ve bir inceleme niteliğinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında, [16] literatürde kamera tabanlı gerçekleştirilmekte olan toplamda 8 adet vSLAM tekniği olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışma, ORB-SLAM2 tekniğinin, ilkleme, haritalama, takip, optimizasyon ve döngü tamamlama tekniklerini kullanan bunların yanı sıra mono ve stereo kamera kameralar gibi farklı kamera yaklaşımlarını içeren, literatürde gömülü sistem impementasyonları [17,18] gerçekleştirilebildiğini ortaya koymaktadır [16]. Bu faydalar göz önüne alınarak bu çalışmada kamera tabanlı vSLAM tekniği olan ORB-SLAM2.0 ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Literatürde ORB-SLAM2.0 tekniğini içeren ve son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar üzerinde incelemeler gerçekleştirildiğinde yüksek hız ve irtifalarda görev yapmakta olan sistemler ile ilgili az sayıda çalışma olduğu ve bunların da genellikle savunma alanında gerçekleştirilen çalışmalar olması nedeniyle sınırlı sayıda bilgiye ulaşılabilmektedir. Literatürde çalışmalar incelendiğinde ise farklı benzetim platformlarında, iç mekan ve robot platformlarında [19], daha küçük sistemli insansız hava araçlarında [20] ORB-SLAM2.0 tekniği ile gerçekleştirilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilen çalışmalar görülmüştür [14,19,20,21]. Bu çalışmaların yanı sıra literatür incelemesi sırasında MATLAB Simulink UAV Toolbox eklentisi ile gerçekleştirilmiş olan vSLAM çalışmasına rastlanamamıştır.

Daha yüksek hız ve irtifalarda vSLAM tekniğinin uygulanabilirliğinin gözlemlenebilmesi için gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada kullanılmakta olan ORB-SLAM2.0 [21] tekniğinin akış şeması aşağıdaki Şekil 1'de verilmiştir.

Akışı dört ana metod altında ele alınmıştır. Bunlar;

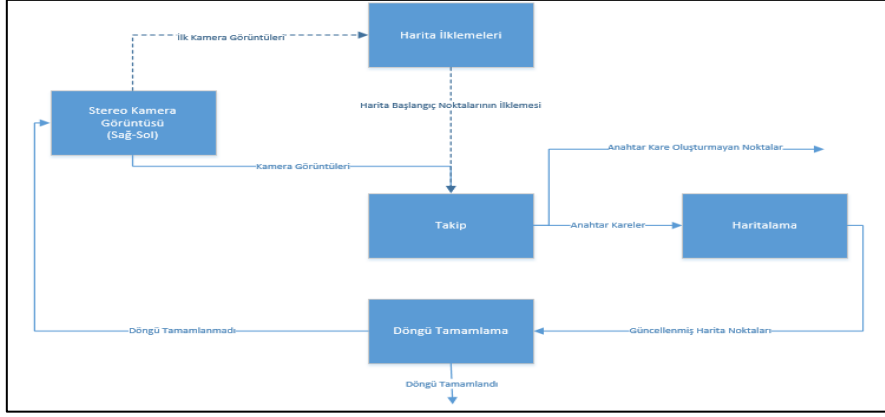
Harita İlkleme : Stereo kameradan gelmekte olan ilk görüntüden başlangıçtaki konumdan elde edilmiş olan görüntünün üç boyutlu noktalarını oluşturarak haritanın ilk anahtar karesi (keyframe *.img*) oluşturularak harita ilkleme gerçekleştirilmektedir.

Takip : Harita ilkleme tamamlandıktan sonra uçuş süresi boyunca stereo kameradan gelecek olan periyodik görüntüler takip aşamasında işlenerek bir önceki anahtar karedeki özellikler ile eşleştirilerek tahmin gerçekleştirilir ve yeni anahtar kareler elde edilmektedir.

Haritalama : Takip aşamasında elde edilen benzerlik bulunan her anahtar kareden üç boyutlu yol noktaları elde edilerek harita oluşturulmaktadır. Benzerlik bulunmayan anahtar kareler algoritma dışında tutulmaktadır.

Döngü Tamamlama : Elde edilmiş olan anahtar kareler birbirleri ile Kelime Çantası Yaklaşımı (Bag Of Features *.ing*) ile karşılaştırılarak anahtar karelerden bir tam tur döngüsünün algılanma aşamasıdır. Döngünün tamamlanmış olması haritalamanın tamamlandığı uçuş rotasının ilk noktasına tekrar dönüldüğünün bilgisini vermektedir.

Benzetim testleri sonrası algoritmanın başarımlı kriteri döngü tamamlamanın tamamlanarak haritanın oluşturulmuş olması, elde edilen haritanın rota irtifası ile uyumlu olması ve rota takibinin yapılmış olmasıdır.



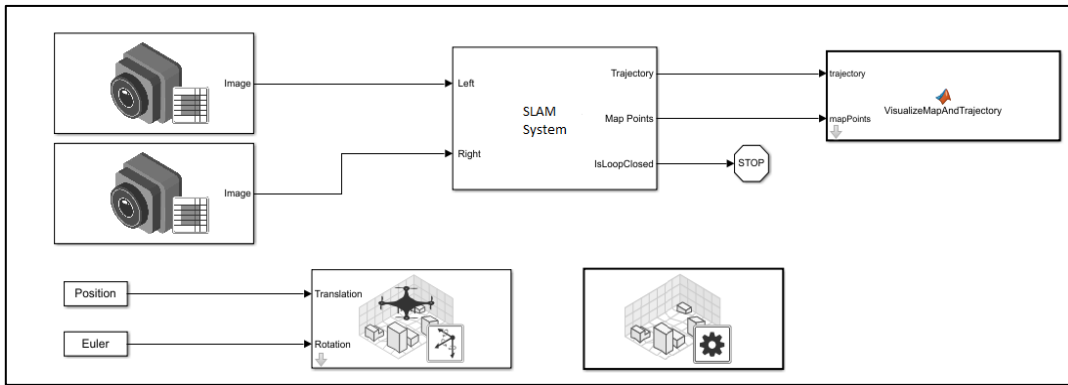
Şekil 1. vSLAM Tekniği MATLAB Kullanım Akış Şeması

2.2 Benzetim Ortam Ekipmanları

Deneyisel testlerde benzetim ortamı olarak Windows platformlarında sorunsuz çalışmakta olan Unreal Engine v4.25 ve MATLAB Simulink UAVToolbox eklentisi kullanılmıştır.

2.2.1 MATLAB Simulink UAVToolbox Eklentisi

UAVToolbox, MATLAB 2020b versiyonundan itibaren farklı işletim sistemlerinde Simulink üzerinden kullanıma açılmış olan bir eklentidir. Bu eklenti ile insansız hava araçları için algoritmalar, görev kontrolcülerini tasarlamak, simüle etmek ve test etmek imkanları sağlamaktadır. Bunlara ek olarak Windows işletim sisteminde çalışabilme imkanı, MATLAB üzerinde yer almakta olan MATLAB Coder aracılığıyla farklı programlama dillerinde gerçek zamanlı sistemler üzerinde çalışabilecek kod üretme olanakları, UAV Toolbox'ta yer alan eklentiler aracılığıyla benzetim senaryolarını koşturabilmek için Mavlink gibi haberleşme protokollerine zaman harcama ihtiyacı gerektirmemesi, Unreal Engine platformu ile senkron ve sorunsuz bir şekilde çalışarak farklı senaryo oluşturma imkanı gibi avantajlar göz önüne alınarak bu çalışmada MATLAB 2021b sürümü kullanılmıştır. Şekil 2'de deney ortamı için kullanılmış olan benzetim senaryosunun Simulink ortamında diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2. Simulink Benzetim Ortam Diyagramı

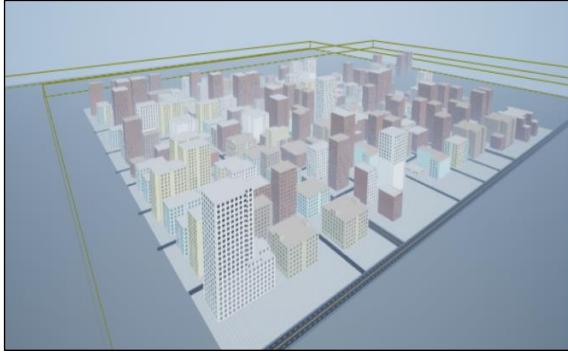
Şekil 2'de gösterilmekte olan Simulink benzetim ortamındaki ekipmanlar ve işlevleri aşağıdaki Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Benzetim Ortam Ekipmanları

Ekipmanlar	Benzetim Senaryosu İçin Kullanım Alanları
Kamera (2 Adet)	Senaryo içerisinde istenilen yörüngede uçuşu için konum ve yönelim bilgileri sağlanarak algoritmanın ihtiyaç duyduğu stereo görüntüyü algoritmaya istenilen periyotta iletmek için kullanılmaktadır.
İHA	Senaryoda benzetim uçuşu gerçekleştirerek algoritma test ekipmanıdır.
Senaryo	Unreal Engine v4.25 ile oluşturulan fotorealistik senaryonun MATLAB Simulink ile uyumlu koşması için kullanılmaktadır.
MATLAB Sistem Bloğu	vSLAM algoritmasının eş zamanlı olarak koşması için kullanılmaktadır.
Görselleştirme Ekipmanı	Test esnasında uçuş senaryosunu ve algoritma koştuktan sonra elde edilen haritanın görselleştirilmesi için kullanılmaktadır.
Konum ve Yönelim Verileri	Benzetim senaryosunda insansız hava aracının önceden planlanmış rotada yaklaşık 0.1 Mach hız, 150 metre irtifada uçuşu için hazırlanmış olan yol noktaları veri setidir.

2.2.2 Unreal Engine Oyun Motoru

Unreal Engine sanal bir oyun geliştirme motor platformudur. UAVToolbox ile birlikte gelen uyumluluk özelliği ile MATLAB Simulink'te eş zamanlı bir şekilde benzetim senaryosu koşulabilmektedir. Unreal Engine'nin çalışmalarda avantaj olarak bir özelliği ise fotorealistik yani gerçekçi bir benzetim ortamı oluşturulabilmesidir. Bu özellik sayesinde deneysel ortamlardaki benzetim senaryolarının hata payı azaltılabilmektedir. Unreal Engine v4.25 oyun motoru yardımı ile yaklaşık 0.5 km² boyutunda bir benzetim ortamı benzetim testleri için özel olarak oluşturulmuştur. Oluşturulmuş olan bu senaryoya ait bir örnek kesit Şekil 3 ile gösterilmektedir. Ayrıca benzetim testlerinde elde edilen kamera görüntülerine ait bir örnek görüntü de Şekil 3 ile gösterilmektedir.



a) Benzetim Senaryosu



b) Fotorealistik Örnek Kamera Görüntüsü

Şekil 3. Unreal Engine ile Oluşturulmuş Benzetim Senaryosu*

3. Deneysel Test Sonuçları

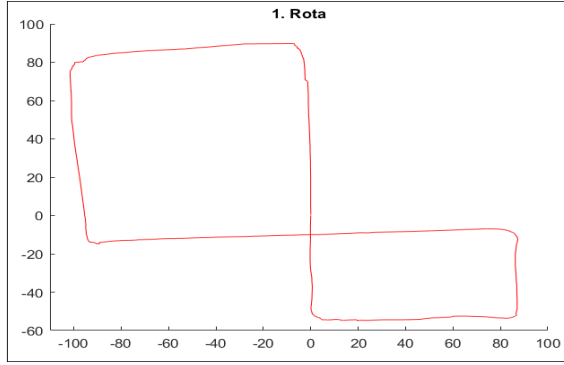
Benzetim ortam testleri için oluşturulmuş olan 18 adet veri setleri Tablo 1.'de yer almakta olan hız ve irtifaya göre hesaplanarak oluşturulmuştur. Ancak oluşturulmuş olan rota düz bir doğrultuda olmadığından sadece dönme noktalarında algoritmanın doğru bir şekilde koşabilmesi için 20mt/s'lik olan veri setlerinde %20, 40mt/s'lik olan veri setlerinde ise %25 yavaşlama payları mevcuttur. Oluşturulmuş olan veri setlerinden elde edilen rotalar Şekil 4'de gösterilmektedir. MATLAB ortamında sırasıyla gerçekleştirilmiş olan 18 adet benzetim testlerinin sonucu elde edilen veriler Tablo 3.'de verilmektedir. Burada yer alan döngü tamamlama, harita oluşumu, rota takibi ve irtifa takibi MATLAB Simulink ile elde edilmiş olan 3 boyutlu harita üzerinden gözlemlenmiştir. Ayrıca en düşük hız, en düşük irtifa profili ile en yüksek hız, en yüksek irtifa profilinde gerçekleştirilmiş olan deneysel testlere ait 3 boyutlu harita ve konumlandırma grafikleri ve 3 boyuta göre yükselti bilgi tablosu ise Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

*Şekil 3'te yer ekran görüntüsü Unreal Engine platformu kullanılarak benzetim senaryosuna özel olarak tasarlanmıştır.

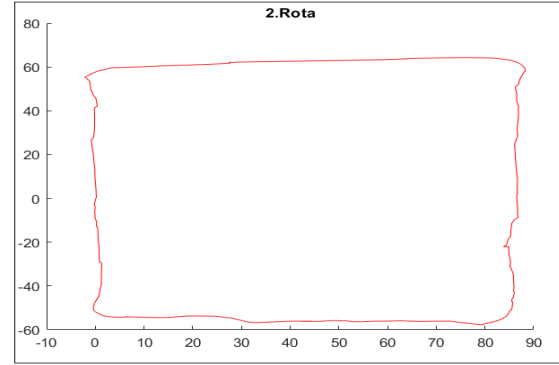
Tablo 3. 18 Adet Veri Seti ile Gerçekleştirilen Benzetim Test Sonuçları

Rota Numarası	Döngü Tamamlama	Harita Oluşumu	Rota Takibi	İrtifa Takibi
1. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
2. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
3. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre
4. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
5. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
6. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre
7. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
8. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
9. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre
10. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
11. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
12. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre
13. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
14. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
15. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre
16. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
17. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
18. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre

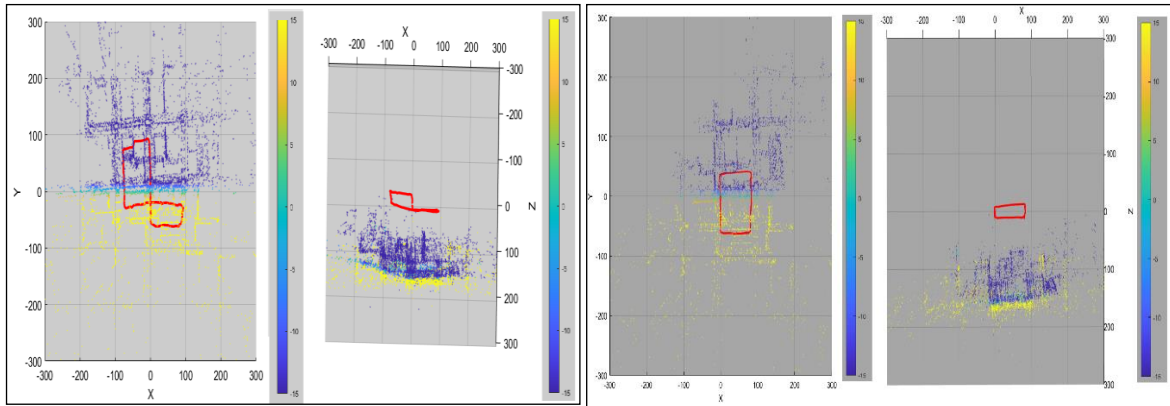
Elde edilen 18 adet test sonuçları incelendiğinde, benzetim senaryolarının istenilen kriterleri başarıyla tamamlamış olduğu gözlemlenmiştir. Harita sonuçları kıyaslandığında ise elde edilen 3 boyutlu haritalamanın hız ve irtifaya bağlı olarak hız ve irtifa arttıkça daha seyrelmekte olduğu gözlemlenmiştir.



a) 6 dönemeçten oluşan rota

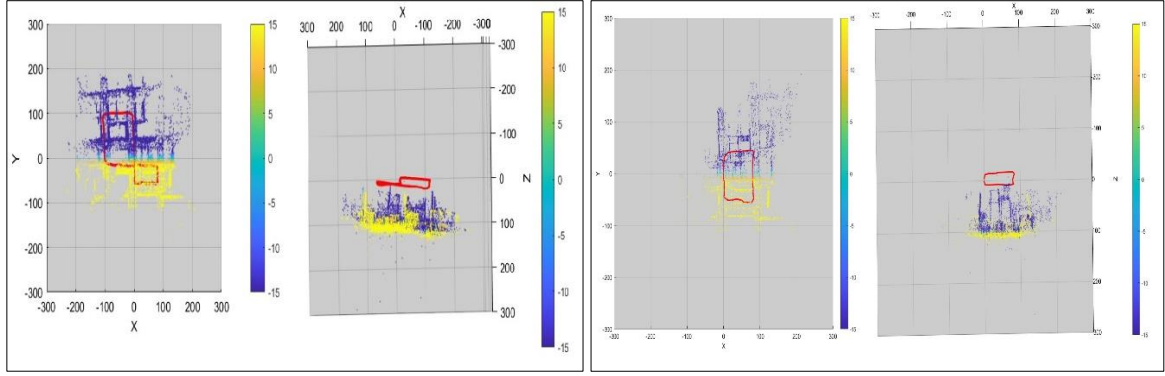


b) 4 dönemeçten oluşan rota

Şekil 4. Deneysel Test için Oluşturulmuş Rotalar

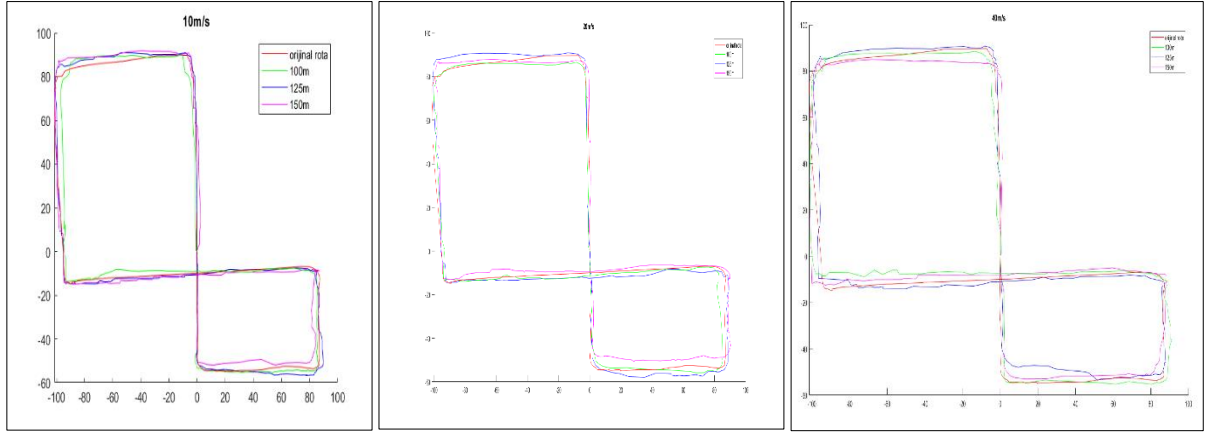
a) 9. Veri Seti Test Sonucu Elde Edilen Harita(X-Y,X-Z) b) 18. Veri Seti Test Sonucu Elde Edilen Harita (X-Y,X-Z)

Şekil 5. En Yüksek Hız ve İrtifadan Oluşan Veri Setlerinin Her İki Rota İçin Elde Edilen Test Sonuç Haritaları



a) 1. Veri Seti Test Sonucu Elde Edilen Harita(X-Y,X-Z) b) 10. Veri Seti Test Sonucu Elde Edilen Harita(X-Y,X-Z)

Şekil 6. En Düşük Hız ve İrtifadan Oluşan Veri Setlerinin Her İki Rota İçin Elde Edilen Test Sonuç Haritaları

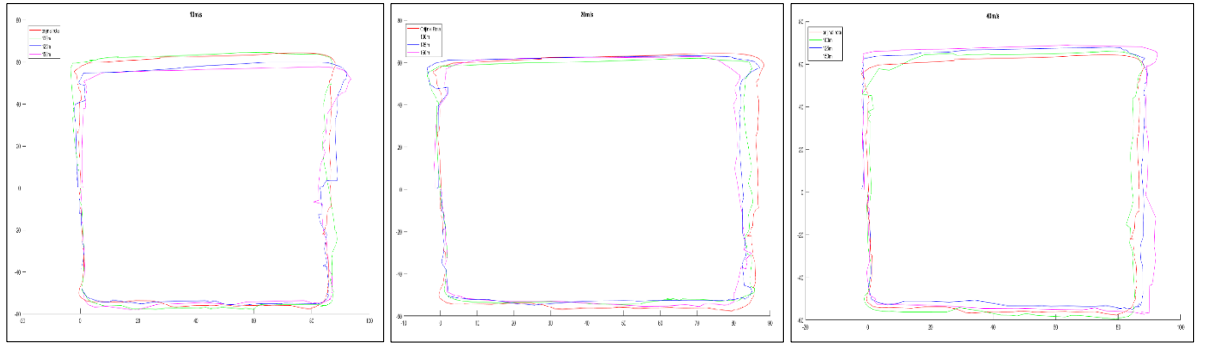


a) 10 mt/s

b) 20mt/s

c) 40mt/s

Şekil 7. 1.Rota İçin Farklı Hızlarda 100m, 125m, 150m İrtifada Rota Takibi İzdüşüm Haritaları

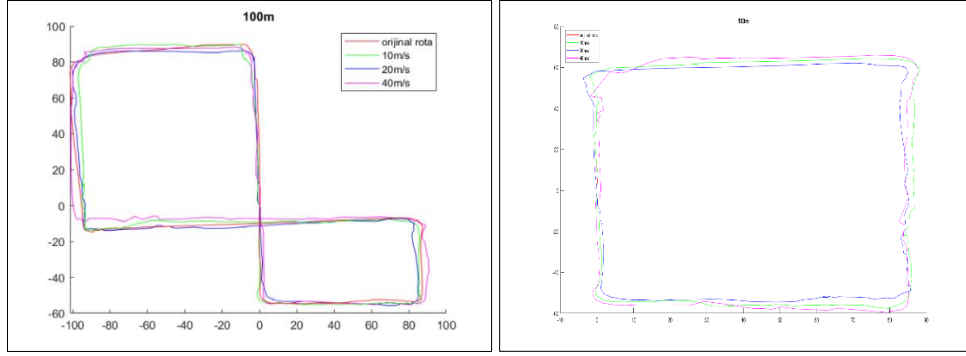


a) 10 mt/s

b) 20mt/s

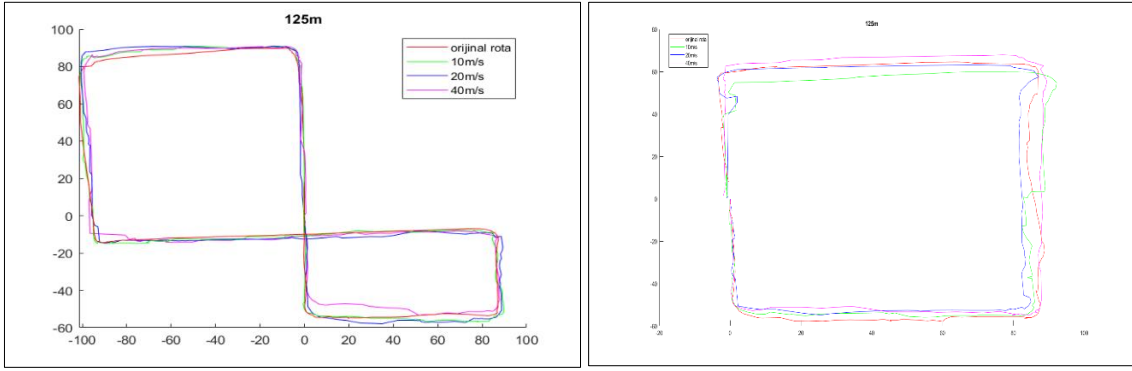
c) 40mt/s

Şekil 8. 2 Rota İçin Farklı Hızlarda 100m, 125m, 150m İrtifada Rota Takibi İzdüşüm Haritaları



a) 1.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler b) 2.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler

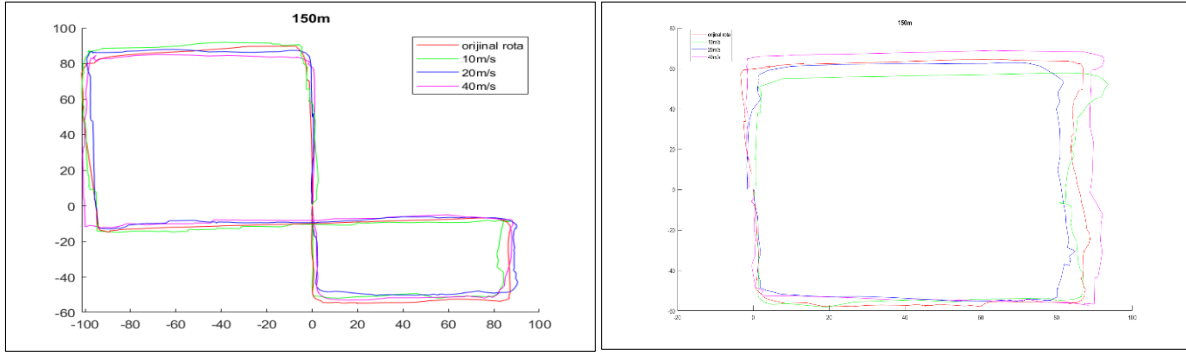
Şekil 9. Her İki Rota için 100m İrtifada Farklı Hızlarda Rota Takibi İzdüşüm Haritaları



a) 1.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler

b) 2.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler

Şekil 10. Her İki Rota için 125m İrtifada Farklı Hızlarda Rota Takibi İzdüşüm Haritaları



a) 1.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler

b) 2.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler

Şekil 11. Her İki Rota için 150m İrtifada Farklı Hızlarda Rota Takibi İzdüşüm Haritaları

Şekil 7a, Şekil 7b, Şekil 7c, Şekil 8a, Şekil 8b ve Şekil 8c'de yer almakta olan 100 m ile 150 m arası irtifa ile 10 mt/s ile 40 mt/s hız profillerindeki benzetim uçuş izdüşüm verileri incelendiğinde %90 üzerinde benzerlikle orijinal rotaların takip edildiği gözlemlenmektedir. Şekil 9a, Şekil 9b, Şekil 10a, Şekil 10b, Şekil 11a ve Şekil 11b'de yer almakta olan benzetim uçuş izdüşüm verileri MATLAB üzerinde incelendiğinde ise 100m irtifada yaklaşık %98.3, 125m irtifada %96.3 oranında, 150m irtifada ise %94.4 oranında benzerlikle orijinal rotaların takip edilmekte olduğu gözlemlenmektedir. Veriler sabit irtifa değişken hız profillerinde incelendiğinde ise 10mt/s'de yaklaşık %98, 20mt/s'de %95.1, 40mt/s'de ise %90.8 oranında orijinal rotaların takip edilmekte olduğu gözlemlenmektedir. Bu veriler üzerinden hız her iki katına çıkarıldığında rota takip benzerliğinin yaklaşık %3 oranında düştüğü, hız artırıldıkça rota takip benzerliğinin yaklaşık %2 oranında düştüğü gözlemlenmiştir.

Elde edilen izdüşümleri incelendiğinde, orijinal rotadan sapmaların genellikle oluşturulmuş rotaların dönemeçli bölümlerinde olduğu gözlemlenmektedir. Bu sapmaların sebebinin ise hız arttıkça algoritmaya girdi yapılan görüntülerin sayısının düşüş göstermesi olduğu düşünülmektedir. Algoritmaya beslenmekte olan veri sayısının düşüşü aynı zamanda haritalama için gerekli çevre görüntülerinin seyrelmesine ve görüntüler arası elde edilen anahtar karelerin daha az elde edilerek haritalama çözünürlüğünün düşüş göstermesine neden olduğu düşünülmektedir. Dönemeç noktalarında haritalama çözünürlüğünün düşüş göstermesi nedeniyle rota takibinde sapma payının yükseldiği ve hızın arttıkça bu sapma paylarının daha da artacağı hatta döngü tamamlama açısından bir kısıt oluşturabileceği öngörülmektedir. Oluşturulmuş rotaların düz bölümlerinde ise sapmaların çok düşük miktarda veya dönemeçten ötürü oluşan sapmanın düzeltilmesi için geçen süreçte olduğu görülmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen bu çalışmada benzetim senaryo ortamı anahtar kare oluşturabilmek için pek çok bina, yerleşke gibi nesnelere bulunması sebebiyle 25 metre irtifa artışlarının rota takip benzerlik oranlarına dönemeçlerdeki gibi ciddi bir etkisi gözlemlenmemiştir. Ancak kameradan gelmekte olan görüntülerde anahtar kare elde etmek için kullanılmakta olan nesnelere daha az olması durumunda irtifa artışının anahtar kare elde etmek için bir kısıt olabileceği düşünülmektedir.

Nobis, Papanikolaou, Betz ve Lienkamp'ın gerçekleştirdiği çalışmada[20], hem iç mekan hem dış mekanda farklı hızlarda ORB-SLAM2.0 performanslarını elde etmişlerdir. Bu çalışma her ne kadar benzer irtifada ve benzer platformlarda gerçekleştirilmemiş olsa da benzer hızlar için dış mekan rota takip benzerlik verileri ile kıyaslanmıştır. Çalışmada dış mekan deneysel testleri için 6 mt/s ile 42 mt/s aralığındaki testlerde 10mt/s'de yaklaşık %99,93, 20 mt/s'de %99,87 ve 40 mt/s'de yaklaşık %93,88 olmak üzere %93,88'in üzerinde rota takibi elde edildiği verilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise yukarıda verildiği üzere 10mt/s'de yaklaşık %98, 20mt/s'de %95.1, 40mt/s'de ise %90.8 oranında olmak üzere rota takip benzerlik oranı %90'ın üzerindedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Gerçekleştirilen bu çalışmada, daha yüksek irtifa ve hızda uçmakta olan ve konumlandırma ihtiyacı bulunan insansız sistemlere vSLAM algoritmalarından ORB-SLAM2.0 tekniğinin ön analiz çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda, Unreal Engine platformunda önceden hazırlanmış olan 0.5 km²'lik benzetim senaryo ve bu senaryo üzerinde planlanmış 2 farklı rota ve 18 adet veri seti bulunmaktadır. Bu rotaların ilki 6 adet dönemeçten oluşmakta, ikincisi ise 4 adet dönemeçten oluşmaktadır. Her iki rota içinde oluşturulan veri setleri, MATLAB Simulink benzetim ortamında otonom test uçuşlarını başarıyla tamamlamışlardır. Veri setleri sırasıyla otonom test uçuşlarında stereo kameralardan gelmekte olan fotorealistik benzetim görüntüleri ORB-SLAM2.0 algoritmasına beslenmiş olup algoritma tarafından döngü tamamlaması algılanmış ve 3 boyutlu harita ve harita üzerinde konumlandırma planlanan rotaya uygun şekilde başarıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca benzetim testlerinin %90'ın üzerinde rota takibinin gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışma, literatür taraması sonucunda yüksek hız ile gerçekleştirilen vSLAM uygulamalarına rastlanmış olsa da yüksek hız ve irtifada uçmakta olan insansız sistemler için vSLAM uygulamalarına rastlanamaması sebebiyle vSLAM tekniklerinin yüksek hız ve irtifada görev yapmakta olan platformlarda da kullanılabilir olduğunu göstermeyi hedeflemektedir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler vSLAM tekniklerinden olan ORB-SLAM2.0 algoritmasının yüksek irtifa ve hızda görevini icra etmekte olan gerçek zamanlı sistemler açısından uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bunlara ek olarak, daha önce MATLAB platformunda benzer bir konumlandırma ve haritalama gerçekleştirilmemiş olması sebebiyle bu tür benzetim çalışmalarının farklı bir işletim sistemi ve protokoller ile çalışma gereksinimi olmadan MATLAB platformunda gerçekleştirilebileceği ve MATLAB'in sunmakta olduğu kullanım kolaylığı, benzetim ortam kolaylığı ve gerçek zamanlı çalışmakta olan sistemler için sunduğu imkanlardan faydalanılabileceğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Gerçekleştirilmiş olan bu benzetim çalışması, maliyet ve kullanım kolaylığı açısından i7 işlemci performanslı bir dizüstü bilgisayarda Windows platformunda gerçekleştirilmiştir. İşlemci kapasitesinin sınırlı olmasından dolayı benzetim senaryolarında kısıtlamalar yapılmak durumunda kalmıştır. Bu nedenle, hız ve irtifa arttıkça SLAM algoritma sonuçlarının daha yüksek çözünürlükte elde edilebilmesi için hesaplama kapasitesi daha güçlü olan sistemlere ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

Gerçekleştirilmiş olan çalışmanın ışığında, gelecek çalışmalar açısından yapılabilecekler değerlendirildiğinde, deneysel çalışmalar için farklı benzetim senaryo ortamları üretilerek benzetim haritalarının farklı rota, irtifa ve hızlar ile çeşitlendirilmesi, farklı görüntü tabanlı vSLAM teknikleri ile performans kıyaslama testlerinin yapılmasının algoritma iyileştirmelerine ve daha yüksek çözünürlüklü sonuçların elde edilmesine katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1), 1-15.
- [2] Cracknell, A. P. (2017). UAVs: regulations and law enforcement. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 30543067.
- [3] Rieke, M., Foerster, T., Geipel, J., & Prinz, T. (2011). High-precision positioning and real-time data processing of UAV systems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1/C22).
- [4] Huang, B., Liu, J., Sun, W., & Yang, F. (2019). A robust indoor positioning method based on Bluetooth Low Energy with separate channel information. *Sensors*, 19(16), 3487.
- [5] Liu, J., Chen, R., Chen, Y., Pei, L., & Chen, L. (2012). iParking: An intelligent indoor location-based smartphone parking service. *Sensors*, 12(11), 14612-14629.
- [6] Aulinas, J., Petillot, Y., Salvi, J., & Lladó, X. (2008). The SLAM problem: a survey. *Artificial Intelligence Research and Development*, 363-371.
- [7] Castellanos, J. A., & Neira, J. ve Tardos, JD, 2006. *Lecture Notes on SLAM and Consensus in Data Association*, Department of Informatics and System Engineering, University. Zaragoza.
- [8] Bailey, T., & Durrant-Whyte, H. (2006). Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. *IEEE robotics & automation magazine*, 13(3), 108-117.
- [9] H. F. Durrant-Whyte and T. Bailey, "IEEE Robot. Autom. Mag.", vol. 13, no. 2, pp. 99–110, Jun. 2006.
- [10] Särkkä, S., Vehtari, A., & Lampinen, J. (2007). Rao-Blackwellized particle filter for multiple target tracking. *Information Fusion*, 8(1), 2-15.
- [11] Globally Consistent Range Scan Alignment for Environment Mapping(Lu, Millos 1997)
- [12] Davison, A. J., Cid, Y. G., & Kita, N. (2004). Real-time 3D SLAM with wide-angle vision. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(8), 868-873. [13] Thrun, S., & Montemerlo, M. (2006). The graph SLAM algorithm with applications to large-scale mapping of urban structures. *The International Journal of Robotics Research*, 25(5-6), 403-429.
- [13] Lemaire, T., Berger, C., Jung, I. K., & Lacroix, S. (2007). Vision-based slam: Stereo and monocular approaches. *International Journal of Computer Vision*, 74(3), 343-364.
- [14] Nobis, F., Papanikolaou, O., Betz, J., & Lienkamp, M. (2020, September). Persistent map saving for visual localization for autonomous vehicles: An orb-slam 2 extension. In *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)* (pp. 1-9). IEEE.
- [15] A. Geiger, P. Lenz, C. Stiller, and R. Urtasun, "Vision meets robotics: The kitti dataset," *International Journal of Robotics Research (IJRR)*, 2013.
- [16] Macario Barros, A., Michel, M., Moline, Y., Corre, G., & Carrel, F. (2022). A comprehensive survey of visual slam algorithms. *Robotics*, 11(1), 24.
- [17] Abouzahir, M.; Elouardi, A.; Latif, R.; Bouaziz, S.; Tajer, A. Embedding SLAM algorithms: Has it come of age? *Robot. Auton. Syst.* 2018, 100, 14–26.
- [18] Yu, J.; Gao, F.; Cao, J.; Yu, C.; Zhang, Z.; Huang, Z.; Wang, Y.; Yang, H. CNN-based Monocular Decentralized SLAM on embedded FPGA. In *Proceedings of the 2020 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)*, New Orleans, LA, USA, 18–22 May 2020; pp. 66–73.
- [19] Yang, G., Chen, Z., Li, Y., & Su, Z. (2019). Rapid relocation method for mobile robot based on improved ORB-SLAM2 algorithm. *Remote Sensing*, 11(2), 149.
- [20] Tang, E., Niknam, S., & Stefanov, T. (2019, August). Enabling cognitive autonomy on small drones by efficient on-board embedded computing: An ORB-SLAM2 case study. In *2019 22nd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)* (pp. 108-115). IEEE.
- [21] Mur-Artal, Raul, and Juan D. Tardós. "ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras." *IEEE Transactions on Robotics* 33, no. 5 (2017): 1255-1262.