

İHA'ların İç Mekan Navigasyonu için Lidar Tabanlı Bir Yöntemin Geliştirilmesi

Cankut Bora Tuncer*, Busenaz Kerimgil†, Onur Alp Çulha‡, Osmanalp Ömeroğlu§, Mert Ateş¶, Elif Yılmaz||
Bilkent Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Müh., Ankara

Haluk Gözde**, Taylan Sipahi††
TUSAŞ, Ankara

ÖZET

Bu proje, geleneksel GNSS sinyallerinin bulunmadığı iç mekanlarda insansız hava araçlarının (İHA) navigasyonu ile ilgili problemi ele almayı amaçlamaktadır. Türk Havacılık ve Uzay Sanayii (TUSAŞ) ile iş birliği içinde yürütülen bu projede, LiDAR teknolojisi kullanılarak yüksek hassasiyetli 2D haritalama ve lokalizasyon hedeflenmektedir. Ayrıca, üretilen haritalar kullanılarak İHA'ların otonom kontrolünün sağlanması da amaçlanmaktadır. Çalışmanın arkasındaki motivasyon, İHA'ların maden araştırması ve mağara keşfi gibi çeşitli görevler için iç mekanlarda işlev görmesi gereksiniminden kaynaklanmaktadır. Simülasyon üzerinde kapsamlı testler yapılarak geliştirilen algoritmaların performansı test edilmiştir. Elde edilen harita, geliştirilen kullanıcı arayüzüne gönderilerek kullanıcıya ortaya çıkan haritayı görüntüleme ve araca gitmesi gereken hedef noktayı belirleme fırsatı tanımaktadır. Bu proje, simüle edilen ortamda İHA'nın doğru iç mekan haritaları üretme kapasitesini ve güvenilir otonom kontrolünü göstermiştir.

GİRİŞ

Günümüzde, İnsansız Hava Araçları (İHA) birçok endüstriyel ve araştırma alanında önemli görevler üstlenmektedir; ancak, kapalı alanlarda güvenilir ve hassas navigasyon, mevcut teknolojilerle hâlâ bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle, maden incelemesi ve mağara keşfi gibi insanların erişiminin zor olduğu iç mekan görevlerinde İHA'ların navigasyonu büyük önem arz etmektedir. İHA navigasyonunda sıklıkla kullanılan GNSS sinyallerinin kapalı alanlarda kullanılamaz olması, güvenilir bir navigasyon yapılmasını zorlaştırmaktadır.

Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) (Eşzamanlı Konumlandırma ve Haritalama) algoritmaları, LIDAR veya kamera verilerini kullanarak ortamın haritalandırılıp aynı zamanda ortaya

*Lisans öğrencisi, E-posta: bora.tuncer@ug.bilkent.edu.tr

†Lisans öğrencisi, E-posta: busenaz.kerimgil@ug.bilkent.edu.tr

‡Lisans öğrencisi, E-posta: onuralp.culha@gmail.com

§Lisans öğrencisi, E-posta: osmanalp.omeroglu@gmail.com

¶Lisans öğrencisi, E-posta: mert.ates@ug.bilkent.edu.tr

||Lisans öğrencisi, E-posta: yilmaz.elif@ug.bilkent.edu.tr

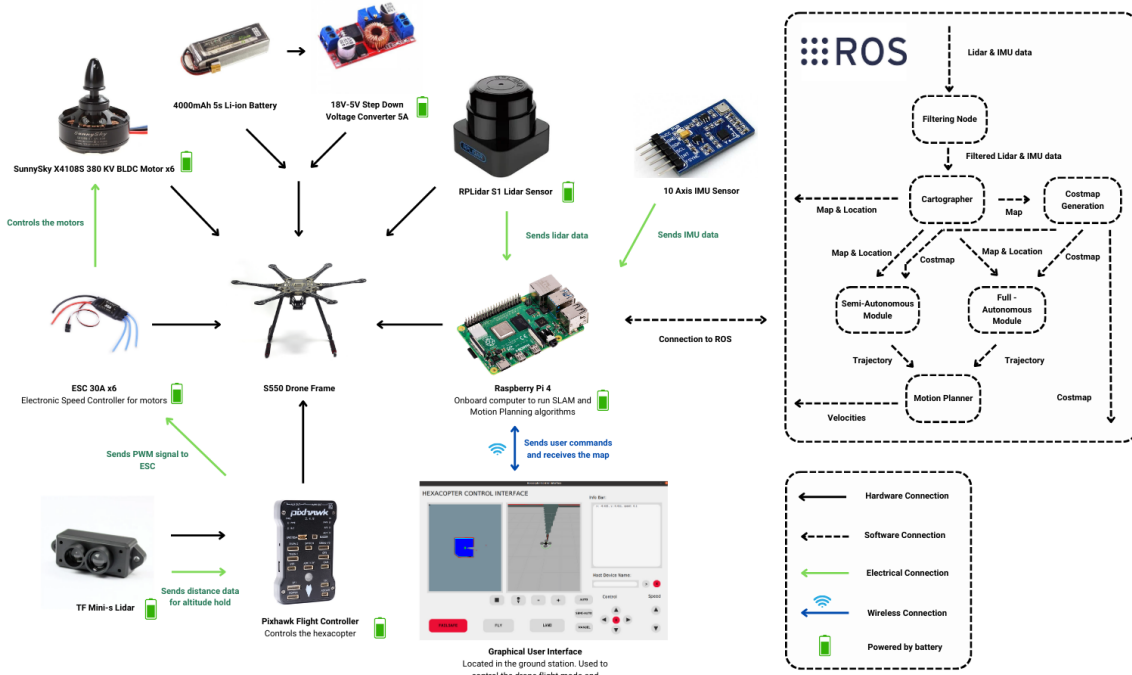
**Doç Dr., E-posta: haluk.gozde@tai.com.tr

††Dr., E-posta: taylan.sipahi@tai.com.tr

çıkın haritada konumlandırma yapmaya imkân tanımaktadır [Pritsker(1984)]. LIDAR sensörü, belirli aralıklarla lazer ışını yollayan ve geri dönüş süresinden mesafe ölçümü yapan bir sensördür. Döner bir platform üzerine yerleştirildiğinde 360 derece ölçüm yaparak ortamın kesit alanını çıkarmaktadır. Bu projenin amacı, yalnızca LiDAR verisi kullanılarak GNSS sinyallerinin erişilemediği iç mekan ortamlarında SLAM algoritması ile İHA'ların navigasyonunu sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda, LiDAR sensörleri kullanılarak 2 boyutlu haritaların dinamik olarak oluşturulması ve İHA'nın ortamda göreceli olarak konumlandırılması sağlanmıştır. Buna ek olarak, oluşturulan haritalar kullanılarak İHA'lara manuel, yarı-otonom ve tam otonom sürüş özelliği kazandırılmıştır. Proje, iç mekanlarda İHA'lar için yüksek doğrulukta haritalama ve engel algılama kabiliyeti sağlayarak afet yönetimi ve endüstriyel tesislerde güvenlik ve bakım kontrolleri gibi kritik uygulamalarda İHA kullanımının önünü açmaktadır. LIDAR verisi dışında herhangi başka bir veriye dayanmadan güvenilir bir navigasyon sağlaması ve İHA'lara otonom kontrol ve engellerden kaçınma yetenekleri kazandırması projeyi diğer projelerden ayırmaktadır. Ortaya konulan metodlar, fiziksel bir sistem üzerinde de denenmiştir.

YÖNTEM

Sistem 3 temel modülden oluşmaktadır: SLAM, Hareket Planlama ve Donanım.

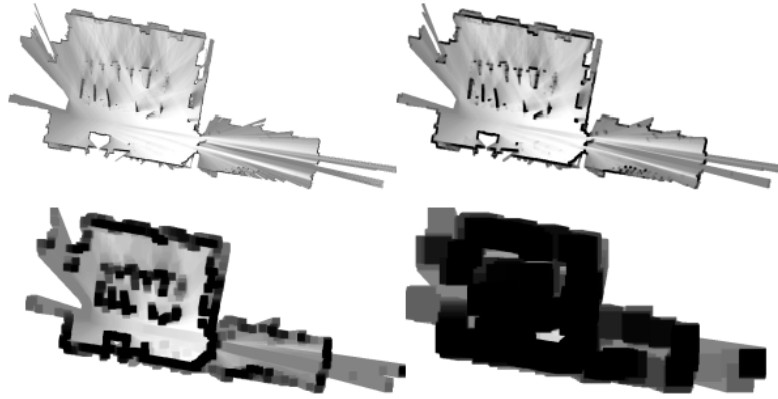


Şekil 1: Sistem Modülleri ve Parçaları

SLAM

Literatürde çeşitli 2D haritalandırma ve konumlandırma algoritmaları mevcuttur; ancak geliştirilen sisteme uygun olan adaylar GMapping [Stachniss(2005)], HectorSLAM [Kohlbrecher(2011)] ve Cartographer [Hess(2016)] olarak belirlenmiştir. GMapping algoritması, odometre gerektiren bir algoritmadır [Stachniss(2005)] fakat isabetli odometrenin sadece LIDAR sensörü ile elde edilebilmesi sağlıklı değildir. Bu sebepten dolayı, GMapping algoritması bu sistem için uygun bulunmamıştır. HectorSLAM ise sadece LIDAR verisi kullanarak haritalandırma yapan ve ortamdaki

detayları referans olarak konumlandırma yapabilen, hızlı ve düşük hesaplama gücü gerektiren bir algoritmadır [Kohlbrecher(2011)]. Simülasyon üzerinde yapılan testlerde her ne kadar başarılı sonuçlar alınsa da, gerçek ortamda konumlandırma yapmada başarısız olduğu ve ortaya çıkan haritada kaymalar gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin, LIDAR sensörünün geniş ve simetrik ortamlarda yeterince detay bulamaması olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeplerden dolayı, SLAM algoritması olarak Cartographer tercih edilmiştir. Cartographer, Google tarafından geliştirilen, tarama eşleştirme yöntemiyle çalışan ve hata birikimini poz optimizasyonu ile azaltan bir SLAM algoritmasıdır [Hess(2016)]. Ortaya çıkan olasılık haritasında, engelin olduğunun kesin olduğu yerler 1 ile, kesinliğinden emin olunmadığı noktalar ise 1'den azalarak temsil edilmektedir ve engelin olmadığı alanlar 0 olarak işaretlenmektedir [Hess(2016)]. Bu harita renklendirilerek kullanıcıya yorumlanabilir bir görsel olarak sunulmaktadır. Koyu renkli noktalar engelleri, açık renkli bölgeler ise serbest alanları belirtmektedir. Mevcut sistemde 0.7'den büyük alanlar engel, 0.7'den düşük alanlar ise serbest alan olarak belirlenmiştir. Bu eşik değeri, yapılan simülasyon deneyleri sonucunda bulunmuştur. Bu yöntem, diğer yöntemlerin aksine sağlıklı LIDAR değerlerinin her zaman gelmediği durumlarda engelin kesinliği hakkında bir analiz yapma fırsatı tanımaktadır. Cartographer algoritması, Google tarafından ROS için implemente edilmiştir. Sistem için çeşitli parametreler ayarlanmış ve çalışır hale getirilmiştir.



Şekil 2: Cartographer algoritmasından çıkan renklendirilmiş olasılık haritası [Hess(2016)].

Hareket Planlama

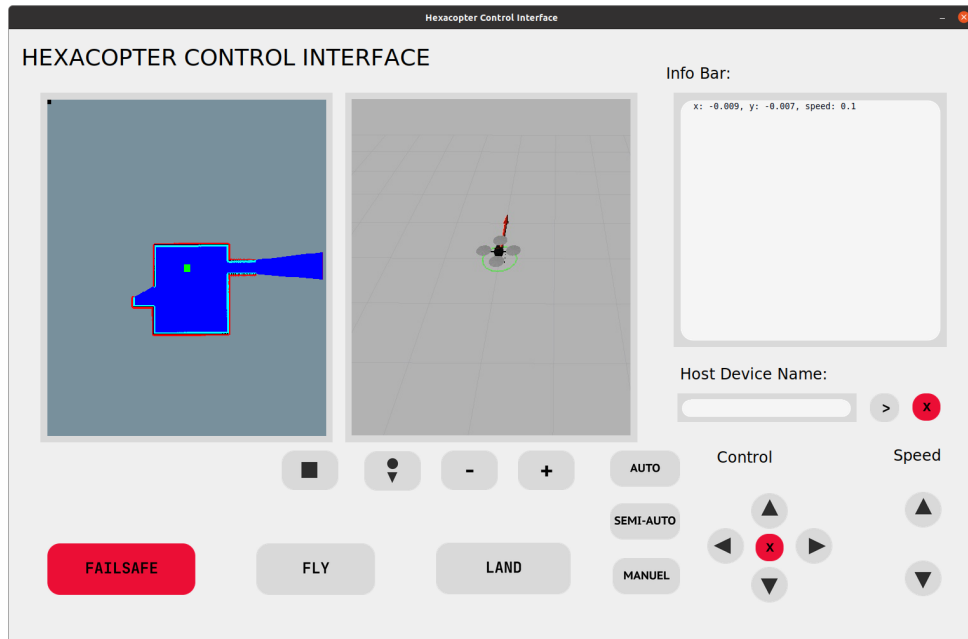
Yapılan literatür taraması sonucunda, Rapidly Exploring Random Tree (RRT) [LaValle(1998)] algoritmasının kullanılmasına karar verilmiştir. Rapidly-exploring Random Trees (RRT), robotik ve otonom hareket planlamada yaygın olarak kullanılan bir algoritmadır. RRT, başlangıç noktasından rastgele yönlere doğru dallanarak hızla keşfeden ve engelleri aşarak hedefe ulaşmayı amaçlayan bir yol oluşturmuştur [LaValle(1998)]. Algoritma, karmaşık ve yüksek boyutlu alanlarda bile etkili bir şekilde çalışabilen, basit ama güçlü bir yöntem sunmaktadır [LaValle(1998)].

Yarı-otonom planlama, harita üzerinde bir nokta belirlendikten sonra, o nokta ile bulunulan konum arasında RRT ile bir rota çizilmesiyle gerçekleşmektedir. Sonrasında, bu rotanın takibi için adım adım drona hareket komutları verilmektedir. "move_base" adlı ROS paketi optimize edildikten sonra yarı otonom sürüş sisteme entegre edilmiştir. Tam otonom planlamada ise noktanın manuel olarak verilmesi yerine otomatik olarak belirlenmesi sağlanmaktadır. "RRT Exploration" adlı ROS paketi, ortamda keşfedilmemiş, yani haritada -1 olarak işaretlenmiş alanları keşfetmek üzere, o noktaları hedef nokta olarak "move_base" paketine göndermekte ve böylece ortam tamamen keşfedilinceye kadar navigasyon devam etmektedir. Engel kaçınma algoritması olarak, haritada engel olarak tanımlanan alanların etrafına belli bir yarıçap kadar tampon alan belirlenmiştir. Bu tampon alana hareket planlama modülü rota çıkarmamaktadır. Böylece, engellerin etrafından çarpmadan geçme imkânı sağlamaktadır.

Donanım ve Yer İstasyonu

Altı-kanatlı S550 gövdesi üzerine kurulan dron, Şekil 1'de görülen parçalar ile birleştirilmiştir. LIDAR sensörü olarak, 20 metre tarama yarıçapına sahip RPLIDAR S1 tercih edilmiştir. Halihazırda sistem üzerinde bir IMU sensörü mevcut olup, bu projede IMU aktif olarak kullanılmamıştır. Bilgisayar olarak Raspberry Pi 4 8GB seçilmiş ve uçuş kontrolcüsü olarak PixHawk PX4 kullanılmıştır. Geliştirilen algoritmalar tamamen dron üzerine çalışmaktadır.

Yer istasyonu, kullanıcıya ortaya çıkarılan haritayı görüntüleme fırsatı tanımaktadır. Kullanıcı, 3 farklı uçuş modundan birini seçer, kalkış komutu verir ve sistem uçuşuna başlar. Yer istasyonu olarak Raspberry Pi 4 tabanlı bir tablet kullanılmıştır. İki bilgisayar arası iletişim Wi-Fi üzerinden sağlanmaktadır.



Şekil 3: Yer İstasyonu

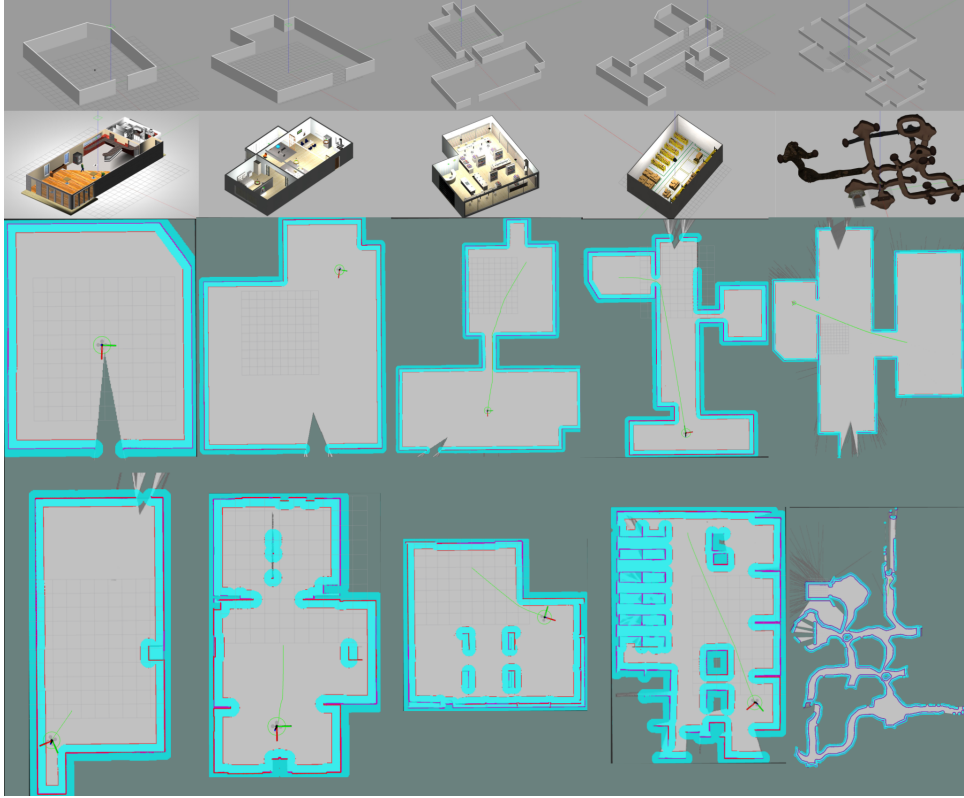
UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Sistem, donanım üzerinde test edilmeden önce simülasyon üzerinde denenmiştir. Simülasyon ortamı olarak ROS (noetic) ve Gazebo seçilmiştir. Simülasyonda simüle edilen LIDAR sensörü, gerçek hayatta kullanılan sensöre uygun olarak modellenmiştir. Algoritmaların testi için 10 farklı harita tasarlanmıştır. İlk 5 harita, haritalandırma ve navigasyon açısından kolaydan zora gitmektedir. Son 5 harita ise, gerçek ortam koşullarındaki performansını test etmek adına seçilmiştir. Seçilen gerçek ortam simülasyonları şöyledir: hareketli insan dolu bir kafe, ev ortamı, kütüphane, malzeme deposu ve mağara/maden.

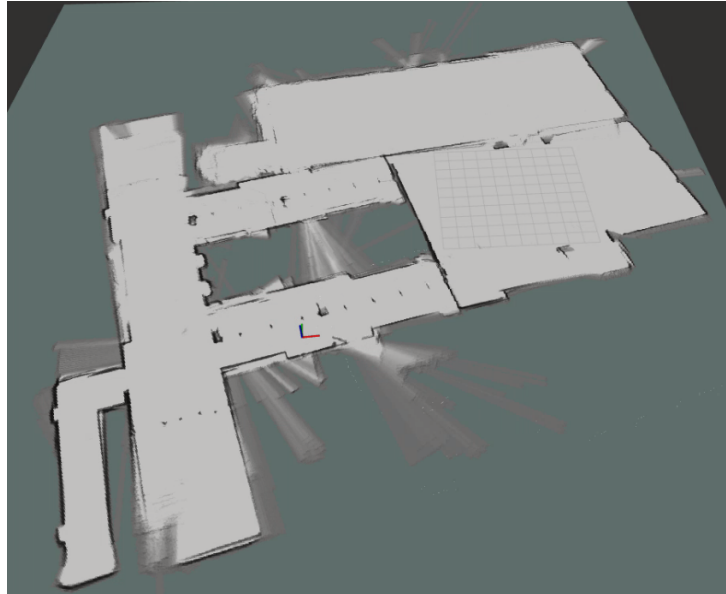
Şekil 4'te, dronun manuel olarak hareket ettirilerek içinde bulunduğu ortamdan çıkardığı haritalar verilmiştir. Görüldüğü üzere, Cartographer algoritması ortamdaki genel ve ince detayları isabetli bir şekilde yakalarken bulunduğu konumu oryantasyonu ile birlikte takip edebilmiştir.

Simülasyonda başarılı sonuçlar alındıktan sonra gerçek ortam testlerine geçilmiştir. SLAM algoritmasını test etmek için RPLidar S1 sensörü ve Raspberry Pi 4 kullanılmış ve sensör taşınabilir bir platformda Bilkent Üniversitesi EE binası 1. katında dolaştırılmıştır. Şekil 4'te görülen figürde ortaya çıkan harita ve anlık konum görülmektedir¹.

¹Video: <https://youtu.be/dvovVc2l2N0?si=xT2fZn45Oh8GcyJI>.



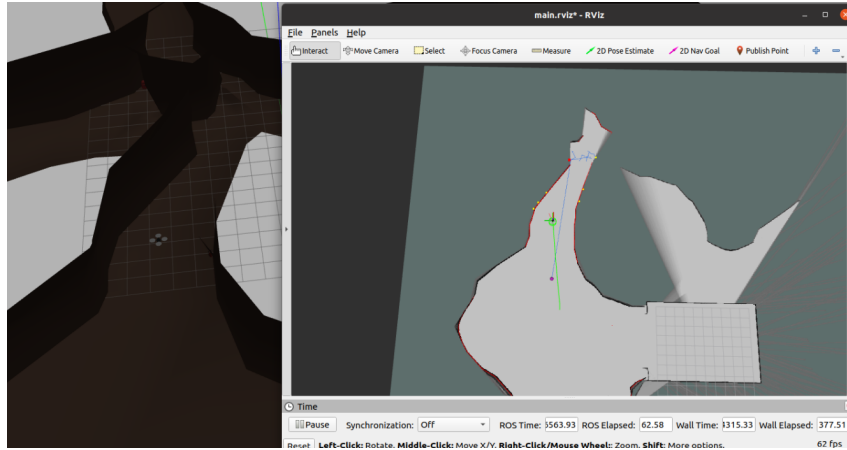
Şekil 4: Tasarlanan ortamlar ve haritalandırma sonuçları



Şekil 5: EE binası 1. kat haritalandırması.

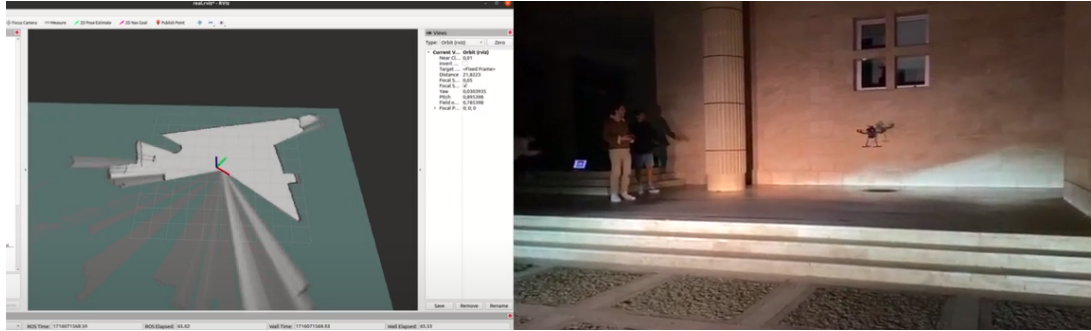
Seçilen SLAM algoritması Cartographer, hem simülasyonda hem de gerçek ortamda bulunduğu mekanı başarılı bir şekilde haritalandırmış ve ortaya çıkan haritayı hareket planlama için uygun bir hale getirmiştir.

Hareket planlama testleri simülasyon ortamında test edilmiştir. Harita üzerine bir nokta verildiği zaman dron, başarılı bir şekilde ortam içerisinde hareket ederek hedefe ulaşmıştır. Ortamın dinamik olduğu durumlarda, rotada bir engel çıkması durumunda rota tekrar hesaplanmış ve çarpışma engellenmiştir. Tam otonom uçuşta, dron daha önce keşfedilmemiş bir noktaya hedef belirleyip o noktaya uçuşunu sağlamıştır. Ortam tamamen keşfedilene kadar dron hareketini sürdürmüştür.



Şekil 6: Otonom sürüş gösterimi.

Uçuş denemelerine, simülasyon testleri bittikten sonra başlanmıştır. Dron, stabil bir şekilde uçmakta ve hareket planlama modülünden gelen komutları takip edebilmektedir. Tedbir amacıyla dron sadece dış ortamlarda test edilebilmiştir. Uçuş esnasında haritalandırma testi yapılabilmemiş ancak otonom sürüş testi güvenlik kaygıları sebebiyle gerçekleştirilememiştir.



Şekil 7: Dış ortam uçuş ve haritalandırma testi.

SONUÇ

Bu çalışmada, GNSS sinyallerinin erişilemediği iç mekanlarda insansız hava araçlarının (İHA) güvenilir navigasyonunu sağlamak amacıyla LiDAR tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Kullanılan Cartographer SLAM algoritması, hem simülasyon ortamında hem de gerçek ortamda başarılı sonuçlar vermiştir. Haritalandırma ve engel algılama kabiliyeti ile İHA'ların otonom kontrolünü sağlayan sistem, özellikle afet yönetimi ve endüstriyel tesislerde güvenlik ve bakım kontrolleri gibi kritik uygulamalarda kullanılabilir. Yarı ve tam otonom sürüş özellikleri ile sistem, iç mekanlarda İHA'ların işlevselliğini artırmaktadır. Gelecek çalışmalarda, sistemin gerçek ortam testleri genişletilerek daha karmaşık senaryolarda performansının değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, farklı sensör verilerinin entegrasyonu ile sistemin hassasiyeti ve güvenilirliği artırılabilir.

Bu çalışma, iç mekan navigasyonu ve haritalama konusundaki mevcut zorluklara yenilikçi bir yaklaşım sunmakta ve gelecekteki araştırmalar için bir temel oluşturmaktadır.

TEŞEKKÜR

Çalışma, İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi'nden tamamı son sınıf Elektrik ve Elektronik Mühendisliği öğrencisi ekip tarafından, Bilkent Üniversitesi'nden Sayın Prof. Dr. Hitay Özbay'ın akademik danışmanlığı, Sayın Dr. Mehmet Kutay Alper'in ve Sayın Furkan Burak Mutlu'nun proje danışmanlığı, TUSAŞ'tan Lift-UP projesi kapsamında Sayın Doç. Dr. Haluk Gözde ve Sayın Dr. Taylan Sipahi'nin akademik ve sanayi danışmanlığı ile gerçekleştirilmiştir. Bu proje, TÜBİTAK 2209-b kapsamında desteklenmektedir.

Kaynaklar

- Pritsker, A.A.B., 1984. *Introduction to Simulation and SLAM II.*, Halsted Press.
- Stachniss, C., Grisetti, G., Burgard, W., 2005. *Improved Techniques for Grid Mapping With Rao-Blackwellized Particle Filters.*, Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference on, Barcelona, Spain, April 18-22.
- Kohlbrecher, S., Meyer, J., von Stryk, O., Klingauf, U., 2011. *A Flexible and Scalable SLAM System with Full 3D Motion Estimation.*, IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, Kyoto, Japan, November 1-5.
- Hess, W., Kohler, D., Rapp, H., and Andor, D., 2016. *Real-Time Loop Closure in 2D LIDAR SLAM.*, Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on, 1271-1278.
- LaValle, S.M., 1998. *Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning.*, Technical Report TR 98-11, Department of Computer Science, Iowa State University.