



Design of an automated stock-taking system based on unmanned aerial vehicles

İlkay Gümüşboğa*

Eskişehir Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Avionics, 26555, Eskişehir, Turkey

Highlights:

- Unmanned aerial vehicle-based stock-taking
- Vision-based barcode capturing
- Indoor 3-dimensional positioning

Keywords:

- Unmanned aerial vehicles
- Barcode capturing
- Automated stock-taking
- Indoor positioning
- Obstacle avoidance

Article Info:

Research Article
Received: 03.12.2020
Accepted: 06.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.835401

Acknowledgement:

This manuscript is based upon project supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) through grant 2180210.

Correspondence:

Author: İlkay Gümüşboğa
e-mail:
ilkaygumusboga@eskisehir.edu.tr
phone: +90 222 321 3550

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a UAV-based system that automates stock-taking process in a warehouse environment is proposed. This system moves autonomously in the warehouse and captures the barcodes of the products from the images collected by the camera. The captured barcodes are decoded online and the product information is recorded in the inventory file. Thus, a ground station computer can access this constantly updated inventory file on the UAV via Wi-Fi. The proposed system approach is represented in Figure A.

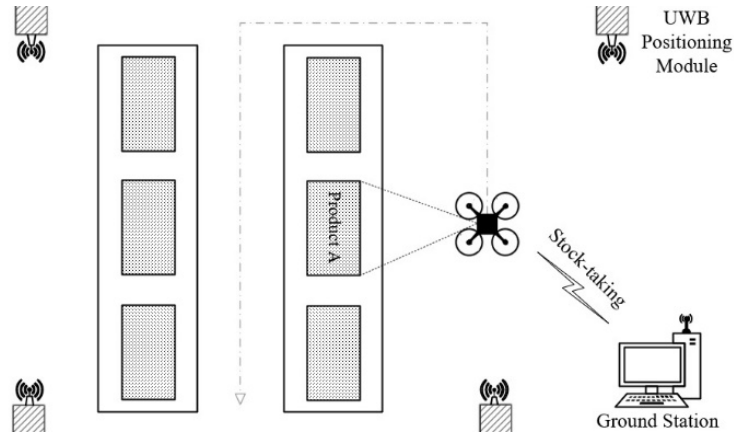


Figure A. The general picture of proposed stock-taking system

Purpose: The UAV-based stock-taking system proposed in this study basically aims to solve three main problems. (1) The indoor positioning problem is still a major challenge. In order for the UAV-based automatic stock-taking system to operate autonomously in an indoor environment, the problem of indoor 3D positioning problem is solved. (2) Images taken with the camera on the UAV, which moves autonomously and scans all shelves, are processed online, barcodes are captured and stock-taking is made. (3) In the warehouse environment where commercial activity continues, the obstacle avoidance function that will prevent collisions with people is operated.

Theory and Methods:

The solution methods of the three basic problems mentioned above were as follows: (1) Indoor positioning is provided by the installation of an UWB-based positioning system in a laboratory environment. Four UWB transmitter modules are placed in certain positions in the laboratory to produce the positioning of the UAV. (2) Once the positioning solution is provided, the UAV autonomously scans the shelves using the greedy search method and collects image data. These data are processed using the OpenCV framework and barcodes are detected. (3) When the UAV encounters a dynamic obstacle while performing its counting function, it detects the obstacle with the data it receives in the LiDAR and makes an avoidance maneuver.

Results:

(1) Indoor positioning problem is solved precisely with an error margin of 4 cm. (2) All of the barcodes produced in the Code-128 standard are successfully detected and the stock count is done correctly. (3) When there is an obstacle approaching more than 1m to the UAV, the UAV successfully made an avoidance maneuver and continued to operate safely.

Conclusion:

All subsystems of the proposed UAV-based automatic stock counting system approach is verified by laboratory tests. The final flight tests are shown that it successfully counts the stock with all its functions.



İnsansız hava aracı temelli bir otomatikleştirilmiş stok sayım sistemi tasarımı

İlkay Gümüşboğa*

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, 26555, Eskişehir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- İnsansız hava aracı temelli stok sayımı
- Görsel tabanlı barkod tespiti
- İç ortamda üç boyutlu konumlama

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 03.12.2020
Kabul: 06.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.835401

Anahtar Kelimeler:

İnsansız hava aracı,
barkod tespiti,
otomatik stok sayımı,
iç ortam konumlama,
engelden sakınma

ÖZ

Birçok işletme ihtiyaç duyduğu ürünlerin tedariki için düzenli stok sayımı yapar. Maalesef bu sayım, çoğu işletmede eski usul, elle sayım şeklinde yapılır. Bu süreç, zaman alıcı, maliyeti yüksek ve hatta tehlikelidir. Bu bağlamda, stok sayımı otomatikleştirilmeli, gerçek zamanlı, efektif ve güvenli olmalıdır. Bu çalışma kapsamında, iç ortamda çalışabilecek insansız hava aracı (İHA) tabanlı bir otomatik stok sayım sistemi önerilmiştir. Bu sistem, iç ortam konumlama problemini ultra geniş bant tabanlı bir konumlama sistemi ile çözer. Ayrıca, İHA üzerindeki lazer uzaklık ölçer (LiDAR) kullanılarak engelden sakınma fonksiyonu ile depo ortamlarında güvenli bir şekilde çalışır. İHA, otonom bir şekilde depo ortamında hareket ederken kamera vasıtası ile aldığı görüntü verisi, çevirim içi olarak işlenir ve stok sayımı süreci işletilir. Önerilen bu sistem için bir prototip tasarlanmış ve laboratuvar ortamında kurulan bir stok sayımı test alanında deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Yapılan bu deneysel çalışmalar önerilen İHA sisteminin iç ortamda dört santimetrenin altında bir maksimum hata düzeyi ile üç boyutlu konumlama yapabildiğini, engelden sakınma fonksiyonu ile güvenli bir şekilde çalışabildiğini ve nihai olarak test senaryosu gereğince sayılacak ürünlere ilişkin on iki farklı barkodun başarılı bir şekilde tespit edip stok sayımı fonksiyonunu yerine getirdiğini göstermiştir.

Design of an automated stock-taking system based on unmanned aerial vehicles

H I G H L I G H T S

- Unmanned aerial vehicle-based stock-taking
- Vision-based barcode capturing
- Indoor three-dimensional positioning

Article Info

Research Article
Received: 03.12.2020
Accepted: 06.11.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.835401

Keywords:

Unmanned aerial vehicle,
barcode capturing,
automated stock-taking,
indoor positioning,
obstacle avoidance

ABSTRACT

Many companies make regular stock-taking to supply the products they need. Unfortunately, in most companies, this stock-taking is done in the traditional way, i.e., manual counting. This process is time-consuming, costly, and even dangerous. In this regard, stock-taking should be automated, real-time, effective and secure. Within the scope of this study, an unmanned aerial vehicle (UAV) based automatic stock-taking system that can operate indoors is proposed. This system solves the indoor positioning problem with an ultra-wideband based positioning system. In addition, it works safely in warehouse environments with the obstacle avoidance function using the laser rangefinder (LiDAR) on the UAV. While the UAV moves autonomously in the warehouse environment, the video data received by the camera is processed online and the stock-taking process is run. A prototype is designed for this proposed system and experimental studies are conducted in a stock-taking test area set up in a laboratory environment. These experimental studies show that this proposed UAV system can perform three-dimensional positioning with a maximum error level of fewer than four centimeters in the indoor environment, can work safely with the obstacle avoidance function, and finally, according to the test scenario, it successfully detects twelve different barcodes of the products to be counted and fulfills the stock-taking function.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Birçok işletme, ticari faaliyetlerinin aksamaması için, direkt satılacak veya üretim girdisi olarak kullanılacak ürünlerin stoklarını sürekli takip edip, tedarik süreçlerini yönetmek zorundadır. Bu işletmeler, girdi/çıkıtı bilgilerini temel alan, stok yönetim sistemleri olmasına rağmen gerçek stok ile sistemde kayıtlı stok arasında zamanla oluşan farklılıklardan dolayı, düzenli olarak stok sayımı yapmak zorundadırlar. Maalesef bu sayım çoğu işletmede, belirli bir personelin görevlendirilip, elle sayım yapılarak stok bilgisinin elde edilmesi (geleneksel stok takibi) şeklinde yapılır. Bu durum, hata yapılması ihtimali yüksek, çok zaman alıcı, maliyetli ve hatta tehlikelidir. Zira bu sayım işlemi, yüksek raf sistemlerinin olduğu depolarda, personelin çatal kaldırma (fork-lift) kullanarak üst raflara ulaşım çalışmasını gerektirir. Bu şekilde yapılan sayımlar, zamandan feragat edilip gerekli güvenlik önlemleri alınsa dahi personelin can güvenliği açısından risklidir.

Endüstri 4.0 paradigması, gelişen güncel teknolojilerin kullanıldığı akıllı fabrikalar konseptinin gelişmesini sağlamıştır [1, 2]. Kullanılan bu teknolojilerden birisi de son yıllarda yoğun bir şekilde üzerinde çalışılan ve tüm alt sistemleriyle birlikte belirli bir teknolojik olgunluk düzeyine ulaşmakla birlikte ucuzlayan İHA teknolojisidir. Amazon'un ilk kez, İngiltere'de 7 Aralık 2016'da yaptığı, İHA ile ürün teslimatı uygulaması, büyük yankı uyandırmıştı [3]. Fakat, açık uçuş sahası mevzuatlarının kısıtlamaları sebebiyle bunun gibi dış ortam uygulamalarının gelişmesi nispeten yavaş olmaktadır. Buna mukabil, açık uçuş sahası kullanımı gerektirmeyen, iç ortam (kapalı mekân) endüstri uygulamalarında, İHA'ların kullanımı daha hızlı bir şekilde yaygınlaşmaktadır.

Endüstri 4.0 ile oluşan ve üretim sektöründe önemli bir endüstriyel devrime yol açan değişim, belirgin bir şekilde lojistik prosedürlerini de değiştirmektedir. Bu lojistik prosedürlerinin en önemlilerinden birisi de depolama faaliyetleridir. Depolama faaliyetleri, Amerika Birleşik Devletleri sanayisinde lojistik maliyetlerinin %30'unu teşkil etmektedir [3]. Dolayısı ile depolama süreçlerinde hızlı, efektif ve düşük maliyetli çözümler rekabetin yüksek olduğu üretim sektörü için çok önemlidir. Geniş fabrika ve depolara sahip işletmeler, İHA destekli envanter yönetim sistemleri için ilgi uyandırıcı uygulama alanlarıdır [4]. E-ticaretin yükselişi, perakende satış mağazalarında yükselen müşteri beklentileri, yoğun rekabet ortamında efektif depolama operasyonlarını yürütecek kalifiye işgücünün eksikliği gibi unsurlar, bu tarz teknolojileri ön plana çıkarır. Endüstri raporları, depo ortamında robotik teknolojilerinin kullanımının, 2023'e kadar, yıllık %11,6 oranında artacağını tahmin etmektedir [5]. Bahsi geçen bu robotik teknolojiler önemli ölçüde, otonom araçların depo ortamında lojistik faaliyetler için kullanılmasını kapsamaktadır. Son yıllarda, robotik teknolojilerin kullanıldığı bu tür depo ortamı endüstri uygulamalarının en popülerlerinden birisi de otonom stok sayımında İHA'ların kullanımınıdır [6, 7].

Depo ortamında, ürünlerin stok yönetimi genellikle barkodlar ve QR kodlar kullanılarak yürütülür. Geleneksel stok sayımında, ürünler el ile sayılır ve kontrol listesine stok bilgisi not edilir. Süreçleri otomatikleştirmenin ilk adımı, el tipi lazer tarayıcı barkod okuyucularıdır. Bu sistemler, süreci nispeten iyileştirse bile yanlış yerleştirilen ürünlerin sayılmaması, eksik sayım ve personelin riskli yüksekliklerde çalışması gibi sorunları çözmez. [8]'de, el tipi lazer tarayıcı ile sayım yapan personele nazaran, İHA üzerine yerleştirilen lazer barkod okuyucu ile, İHA operatörünün 119 kat daha hızlı sayım yapabildiği gösterilmiştir. Bu fark, operasyonun optimize edilmesinden bağımsızdır. Çünkü elle sayım, çatal kaldırma kullanarak yüksek yerde tarama yapmak gibi güvenlik önlemi gerektiren, dolayısı ile zaman alıcı, faaliyetler içerir. Buna rağmen, alınan güvenlik önlemleri riski sifira indirmez. Bu senaryoda operatör, İHA'yı stok sayılacak bölgede kumanda ile uçurur. Lazer barkod okuyucu ürünle hizalandığında, İHA durup tarama yapar ve sonra diğer ürünler için tekrar hareket eder, yani dur ve devam et şeklinde bir rota izlenir. İHA üzerine konumlandırılan lazer barkod okuyucu ile yapılan bu uygulama, elle sayım yöntemlerine göre büyük avantaj sağlamasına rağmen lazer tarayıcı barkod okuyucuları yakın mesafeden okuma yapabildikleri ve düşük görüş açısına sahip oldukları için envanter takibinde nispeten efektif değildir. Dolayısı ile İHA'ların stok sayımı uygulamalarında, genellikle görsel veriden (kamera verisi) barkod/QR kod yakalama veya radyo frekansı ile tanımlama (RFID) yolu ile stok sayımı yapılır [9-11]. Lazer okuyucunun kullanılmadığı bu alternatif yöntemlerde, [8]'de önerildiği şekilde dur ve devam et şeklinde bir uçuş rotası izlenilmesi gerekmediği için tarama süreci daha da hızlıdır. Stok sayımında İHA'ların kullanıldığı bazı uygulamalarda, hava aracı otonom hareket edemez ve bir operatöre ihtiyaç duyar [7, 12]. Operatör yerden hava aracını kontrol ederek veri toplar. Her ne kadar bir personele ihtiyaç duyulsa da bu tür çözümler, geleneksel stok sayım yöntemlerine göre süreci muazzam hızlandırır. Ayrıca personelin yüksek yerlerde çalışması gerekmediği için iş güvenliği açısından doğan riskler de en aza indirgenir. Fakat hâlâ, insan faktörü dolayısı ile hem personel maliyeti hem de ihtimali azalmış dahi olsa hata riski mevcuttur. Dolayısı ile insan faktörünün süreç içerisindeki etkisini en aza indirmek için otonom hareket eden İHA'lara ihtiyaç duyulur.

[9]'da İHA üzerindeki kamera vasıtası ile ürünlerin barkodları tespit edilerek stok sayımı yapılmıştır. Bu uygulamada, ürünlerin konumlarının önceden bilindiği varsayılmıştır. İHA, ürünleri açgözlü arama (greedy search) ile tarayıp tespit ettikçe ilgili ürünün konumunu bilindiği için kendi konumuna ilişkin de bilgi elde eder. Bu uygulamada nihai konumlama çözümü, ataletsel ölçüm biriminden (AÖB) elde edilen konumlama bilgisinin, ürünleri tespit ettikçe gelen konum bilgileri ile düzeltilmesi şeklinde elde edilir. Bu çalışmaya benzer şekilde [6, 12] çalışmalarında da konumlama çözümü için, tespit edilen RFID etiketlerinin konumlarından gelen bilgiye ihtiyaç duyulur. Bu çalışmalarda dayanılan, ürünlerin konumlarının bilindiği

varsayımı, depo ortamında ürünlerin sürekli doğru konumlarda olması gerekliliğini doğurur. Dolayısı ile İHA'nın konumlama performansı, bu çalışmalarda ürünlerin doğru konumlara yerleştirilmiş olmasına bağlıdır. [13]'de depo ortamından alınan çevirim dışı video kayıtları üzerinde çalışılmıştır. Video kayıtlarından efektif bir şekilde barkodların tespit edilmesi için görsel tabanlı bir algoritma önerilmiştir. Bu çalışmada, sadece barkodların tespiti üzerine çalışılmış, gerçek zamanlı bir İHA uçuşu yapılmamıştır. [14]'de ise yine çevirim dışı video kayıtları kullanılarak, barkodları derin öğrenme metodu kullanılarak tespit edebilen bir algoritma önerilmiştir. [15]'de bir yer aracı üzerine çatal kaldıraç sistemi ile yükseğe çıkabilen kamera sistemi yerleştirilmiştir. Depo ortamında çevirim dışı alınan video kayıtlarından stok sayımı yapılması şeklinde yarı-otomatik bir çözüm önerilmiştir.

Günümüz üretim sektöründe, ürünleri tanımlamak için kullanılan RFID etiketleri, barkodlara ve QR kodlarına nazaran çok daha nadir kullanılmasına rağmen, akademik çalışmalarda geniş yer bulmaktadır. [11, 12, 16]'de hava araçlarının üzerine RFID okuyucu modülü yerleştirilmiştir. Stok sayımı, üzerine RFID etiketleri yerleştirilmiş ürünlerin, İHA ile tespiti şeklinde gerçekleşir. Bu uygulamaların zayıf yanı; genellikle ürünlerde tanımlama sistemi olarak barkod veya QR kod kullanıldığı için, işletme envanterine giren her ürün yeniden etiketlenmelidir. Ayrıca, bu etiketler geri dönüşümlü olmayıp, tek kullanımlıktır. Dolayısı ile, RFID etiketleri envanter takibi işlemini kolayca sistematik bir hale getirir fakat bu çözüm stok maliyetlerini arttırır.

İç ortamda çalışan İHA'ların otonom görev icra edebilmesi için çözülmesi gereken en önemli zorlukların başında, hava araçlarının iç ortam konumlaması gelmektedir. Zira, dış ortamda yaygın şekilde kullanılan küresel konumlama sistemlerine (GPS, GLONASS, Galileo, ...) kapalı mekanlarda ulaşılamamaktadır. Hava araçlarının iç ortam konumlaması, literatürde son yıllarda yaygın bir şekilde çalışılmış olmakla birlikte halen aktif bir araştırma alanıdır [17, 18]. [19]'de model tabanlı görsel konumlama kestiriminden ve hızölçerden elde edilen veriler kullanılarak nihai bir konumlama çözümü elde edilmiştir. Burada İHA, konumlama için kullandığı görsel veriyi aynı zamanda stok sayımında barkodları tespit etmek için de kullanır. [10, 11]'da robotik alanında çok yaygın bilinen bir konumlama çözümü olan, eşzamanlı konumlama ve haritalama (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM) yöntemi kullanılmıştır. [11]'de konumlama için hem iki adet kamera hem de 3 boyutlu (3B) lazer uzaklık ölçer (Light Detection and Ranging - LiDAR) kullanılır. Bu çalışmada İHA üzerinde bulunan LiDAR, aynı zamanda basit engelden sakınma işlevi için de kullanılır. [10]'de ise, SLAM çözümü için sadece görsel veri kullanılmıştır. Konumlamada kullanılan bu görüntü verisinden aynı zamanda QR kodları tespit edilerek stok sayımı işlevi yerine getirilmiştir. Son olarak, [20]'de halihazırda otonom envanter takibi yapan İHA'lar için ultra geniş bant (UGB) tabanlı bir konumlama sistemi önerilmiştir. Bu çalışmada, bir İHA ile görev icra edilmemiş, sadece depo ortamında çalışabilecek bir UGB

konumlandırma sistemi kurulumunun deneysel olarak konumlama performansı üzerine çalışılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, depo ortamında stok sayımı süreçlerini otomatikleştirecek, otonom kabiliyetlere sahip bir İHA tasarlanmış, prototip olarak üretilmiş ve uçuş tecrübeleri ile tasarımı doğrulanmıştır. Tasarlanan bu İHA, depolarda fiziki erişimin zaman alacağı yerlere kolaylıkla ulaşır ve güvenli bir şekilde, sürekli olarak stok bilgilerini güncelleyerek etkin bir stok yönetimi sağlar. Çalışma alanı içerisinde kurulan UGB verici ağı kullanarak, iç ortam konumlama problemi çözülmüştür. İHA üzerinde bulunan kamera vasıtası ile çekilen görüntü, çevirim içi olarak işlenir, ürünlerin üzerindeki barkodlar tespit edilir ve stok sayım verisi gerçek zamanlı olarak güncellenir. İHA, çalışma ortamında, stok bilgilerini barındıran bir yer istasyonu ile kablosuz ağ (Wi-Fi) vasıtası ile haberleşir ve stok bilgisi eş zamanlı olarak güncellenir. Ayrıca, İHA üzerinde bir LiDAR vardır. Bu LiDAR, İHA'nın basit engelden kaçınma prosedürlerini işletip, fiziki engellerden sakınarak, karmaşık depo ortamlarında güvenle çalışmasına olanak tanır. Bu çalışma kapsamında önerilen ve tüm bu bileşenlerden oluşan otomatik stok sayım sisteminin tasarımı doğrulamak için bir İHA prototipi üretilmiştir. Ayrıca, laboratuvar ortamında bir test alanı oluşturularak envanter sayım süreci ile ilgili testler yürütülmüştür.

İHA tabanlı otomatik stok sayım sistemi yaklaşımı güncel referanslardan da anlaşılacağı üzere İHA teknolojisinin ulaştığı en ileri uygulamalardan biridir. Bu makale kapsamında önerilen otomatik stok sayım sistemi; İHA tasarımı, iç ortam konumlaması, basit engelden sakınma yaklaşımı ve stok sayım yöntemi gibi alt problemlerin çözümlerini içerir. Teorik olarak çözümü ortaya koyulmuş bu alt sistemler, tasarlanan prototip İHA'ya entegre edilmiştir. Tasarlanan sistemin tüm bu unsurlar ile birlikte ortaya koyduğu bütünlük yaklaşım orijinal bir çözümdür. Bu orijinal mühendislik çözümü ile literatürden farklı olarak düşük maliyetli donanımlar ile gerçek zamanlı otomatik stok sayım faaliyetlerini yürütebilecek bir sistemin tasarımı ortaya koyulmuştur. Detayları yukarıda verilen literatüre göre ortaya koyulan yenilik, çeşitli unsurlar bakımından aşağıdaki gibi ele alınmıştır. [13-15]'de, çevirim dışı video kaydı üzerinden stok sayım süreçleri yürütülür. Bu yaklaşımda hem verinin toplaması hem de analiz edilmesi ardışık ayrı süreçler şeklinde yürütüleceği için ek iş yükü ve zaman kaybı yaratır. Bu çalışma kapsamında önerilen sistemde; İHA otonom bir şekilde depo ortamındaki rafları tarar, barkod tespit ve ürün sayım süreci çevirim içi olarak İHA üzerindeki mini bilgisayarda yürütülür. [11, 12, 16] çalışmalarındaki diğer bir ortak yaklaşım; stok sayımında RFID etiketleri kullanmaktır. RFID etiketler, üretim sektöründe çok nadir olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, envantere giren tüm ürünlerin yeniden RFID ile etiketlenmesini gerektirir. Bu durum hem zaman kaybına hem de RFID etiketler tek kullanımlık olduğundan stok maliyetlerinin artmasına yol açar. RFID etiketlerinin bu ciddi dezavantajına rağmen literatürde yaygın olarak kullanılmasının sebebi; İHA üzerine yerleştirilen bir RFID

okuyucu ile herhangi bir teknik zorluk olmadan basitçe stok sayımı yapılabilmesidir. Bu çalışma kapsamında önerilen çözümde; sanayi standardı olan barkodlar kullanarak stok sayımı yapılır. Dolayısı ile ürünlerin üzerinde halihazırda bulunan tanımlama sistemi kullanıldığı için, ek bir süreç ve maliyet gerektirmez. [11, 14] çalışmalarındaki diğer bir yaklaşımda; yüksek hesaplama yükü gerektiren konumlandırma algoritmaları kullanıldığı için İHA üzerinde bulunan yüksek konfigürasyonlu bir bilgisayar ve algılayıcılar (3B LiDAR, RFID okuyucuları, ...) çok yüksek maliyetli, fiziki olarak büyük ve ağırdır. Artan bu faydalı yük sebebi ile İHA'lar çok büyük boyutlarda olmaktadır. Bu durum, İHA'ların nispeten dar yerlerde çalışmaması, çok sayıda ve büyük motorlardan dolayı çok fazla gürültülü çalışması sonucunu doğurur. Dolayısı ile bu çalışmalar teknoloji doğrulama konusunda başarılı olmakla birlikte gerçek hayat uygulamalarında hem maliyet/fayda açısından hem de fiziki kısıtlardan dolayı sorunludurlar. Bu çalışma kapsamında tasarlanan İHA; kolaylıkla erişilebilir, düşük maliyetli bileşenlerden oluşmakla birlikte, literatürdeki [11, 12] gibi örneklerinden çok daha küçük bir yapıya sahiptir. Ayrıca, önerilen bu İHA çözümü UGB tabanlı bir konumlama sistemi kullandığı için görsel tabanlı konumlama yapan diğer çalışmalardan çok daha gürbüz ve hassas konumlama yapabilmektedir. Yukarıda verilen literatürdeki çalışmaların çoğunda, İHA'nın hareketli engellerle çarpışmasını önleyecek bir çözüm varsayılmamıştır. Depo ortamında kullanılacak İHA'lar, stok sayımı yaparken diğer ticari faaliyetleri yürüten personel ile birlikte güvenle çalışabilmelidir. Bu çalışma ile önerilen İHA sistemi, üzerinde temel bir 2B LiDAR barındırır. Bu şekilde İHA'nın tüm çevresi sürekli olarak taranarak, basit engelden sakınma prosedürü işletilir.

Makalenin devamı aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. İkinci bölümde, tasarlanan stok takip sisteminin bileşenleri ve çözüm yöntemi anlatılmaktadır. Burada, İHA tasarımı ile birlikte UGB konumlama sistemi, kamera tabanlı barkod yakalama sistemi, basit engelden sakınma sistemi ve bütünlük sistemin görev yazılımı incelenmektedir. Üçüncü bölümde, laboratuvar ortamında yürütülen test faaliyetleri anlatılmaktadır. Bu testlerde; konumlama, engelden

sakınma, barkod yakalama ve otonom stok sayımı görev icrası başarımları gösterilmektedir. Son olarak, beşinci bölümde ise, elde edilen sonuçlar açıklanmıştır.

2. İHA TEMELLİ STOK SAYIM SİSTEMİ (UAV-BASED STOCK-TAKING SYSTEM)

Bu çalışma kapsamında önerilen, İHA temelli otomatikleştirilmiş stok yönetimi yaklaşımı, beş ana başlık çerçevesinde ele alınmıştır. Bunlar; İHA tasarımı, UGB konumlama sistemi, görsel tabanlı stok sayım sistemi, basit engelden sakınma sistemi ve bütünlük sisteminde tüm bu unsurları yöneten görev yazılımıdır.

2.1. İHA Tasarımı (UAV Design)

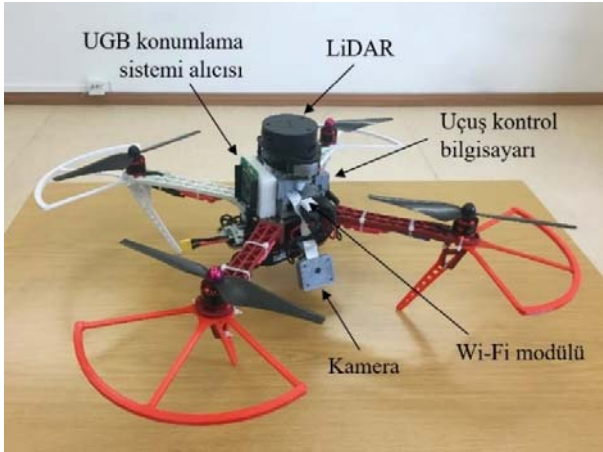
İç ortam uçuş uygulamalarında dikey kalkış/iniş yapabilen, çok rotorlu temel hava araçları kullanılır. İcra edilecek görev, faydalı yük, kalkış ağırlığı ve havada kalma süresi gibi temel tasarım parametreleri hava aracının konfigürasyonunu belirler. Hava aracının tüm bu unsurlar gözetilerek yürütülen tasarım süreçleri, üzerinde çokça çalışılmış, yaygınca bilinen detaylar barındırdığı ve bu çalışmanın asıl odağının dışında olduğu için bu bölümde, direkt olarak nihai tasarım incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında prototip olarak üretilen İHA'nın tasarımında temel amaç; uygun maliyetli, erişilebilir bileşenlerden oluşan, basit, modüler ve en önemlisi icra edilecek göreve uygun şekilde, programlanabilir bir yapı oluşturmaktır. Bu çalışma kapsamında üretilen dört rotorlu prototip hava aracı Şekil 1'de gösterilmektedir. Tablo 1 ise bu hava aracını oluşturan donanımsal bileşenleri listelemektedir.

Bu tasarımda, hava aracı dört rotorlu F450 İHA gövde takımı üzerine kurulmuştur. Bu gövde takımı, ana iskelet ile birlikte, hava aracının hareketini sağlayan itkiyi oluşturan dörder tane; fırçasız motor, elektronik hız kontrolcüsü ve karbon pervaneden oluşur. Tüm sisteme dört hücreli bir lityum polimer (LiPo) pil güç verir. Bu pil, motorları süren elektronik hız kontrolcülerine direkt güç verirken, düşük voltaj/akım gerektiren elektronik bileşenlere bir voltaj dönüşüm modülü vasıtası ile güç verir. Tasarlanan İHA'nın

Tablo 1. İHA bileşenleri (UAV components)

Donanım türü	Bileşenler	Kullanılan parça
Gövde bileşenleri	Dört kollu ana iskelet	DJI F450
	Fırçasız motor	DJI 2212 920Kv
	Elektronik hız kontrolcüsü	Simonk ESC 30A
	Karbon pervane	T9545
	Pil	Profuse 4C LiPo 5000mAh
	Voltaj dönüşüm modülü	Emlid 5,3V-2,25A
Uçuş kontrol bilgisayarı	Mini bilgisayar	Raspberry Pi 3 B+
	Uçuş kontrol kartı	Emlid Navio 2
Faydalı yük	UGB alıcısı	Pozyx alıcı modül
	Kamera	Raspberry Pi NoIR V2 modülü
	Wi-Fi modülü	Raspberry Pi Wi-Fi modülü
	LiDAR	SLAMTEC RPLIDAR A1M8

merkezinde bir mini bilgisayar vardır. Merkezi hesaplama birimi olarak kullanılan bu mini bilgisayar, *eşlikçi bilgisayar* olarak adlandırılır. Eşlikçi bilgisayar, üzerine takılan Navio 2 uçuş kontrol kartı ile birlikte uçuş kontrol bilgisayarını oluştururlar. Navio 2 uçuş kontrol kartı, yaygınca bilinen ve kullanılan açık kaynak kodlu ArduPilot yerleşik yazılımı temelli, programlanabilir bir uçuş kontrol kartıdır [21, 22]. İHA üzerindeki eşlikçi bilgisayar, bu uçuş kontrol kartı ile seri kanaldan MAVLink protokolünü kullanarak haberleşir [23]. Bu çift yönlü bir haberleşmedir; uçuş kontrol kartı üzerindeki durum bilgisi, algılayıcı verisi gibi bilgiler, eşlikçi bilgisayar tarafından alınır ve harekete ilişkin uçuş kontrol komutları hesaplanarak bu karta iletilir. Bu kart, eşlikçi bilgisayardan gelen komutlara uygun şekilde hava aracının uçuş hareketini gerçekleştirir. Hava aracının görevini tanımlamak, işlevini kontrol etmek ve en önemlisi stok sayımına ilişkin bilgilerin alınabilmesi için bir yer kontrol bilgisayarı kullanılmıştır. Bu bilgisayar ile hava aracı, aynı ağa bağlanarak, kablosuz ağ üzerinden haberleşirler. İHA üzerinde bulunan Wi-Fi modülü, bu amaca hizmet etmektedir. Hava aracı üzerindeki pervane korumaları, yükseltme ayakları, uçuş kontrol bilgisayarı ve kameraların koruyucu kasaları ve diğer bağlantı parçaları laboratuvar ortamında 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Hava aracının iç ortam konumlaması için kullanılan UGB alıcısı, barkod tespiti için kullanılan kamera ve basit engelden sakınma prosedürünün işletilebilmesi için kullanılan LiDAR da Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu bileşenlerin işlevlerinin detayları, müteakip bölümlerde anlatılacaktır.



Şekil 1. İHA Tasarımı (UAV design)

2.2. UGB Konumlama Sistemi (UWB Positioning System)

Ultra geniş bant, radyo sinyali enerjisinin çok düşük bir güç spektral yoğunluğu ile çok geniş bir frekans bandına yayılmasına neden olan teknikler kullanan bir veri iletimi teknolojisidir [24]. Düşük güç spektral yoğunluğu, geleneksel radyo sistemleri ile girişim olasılığını düşürür. Yüksek bant genişliği ise, iletişim cihazları için çok yüksek veri çıkışı veya konumlama için yüksek hassasiyet sağlar. Bu özellikleri sebebi ile UGB tabanlı konumlama sistemleri Wi-Fi, Bluetooth ve RFID tabanlı diğer konumlama sistemlerine

nazaran çok daha hassas/kesin konumlama çözümleri üretir. Bu çalışma kapsamında, İHA'nın iç ortam konumlaması için Pozyx firmasının geliştiriciler için sunduğu deneysel, açık kaynak kodlu UGB alıcı/verici seti kullanılmıştır [25]. UGB vericileri, konumlama çözümü üretilecek hacim içerisinde belirli, bilinen konumlara sabitlenir. Belirli konumlarda UGB sinyali üreten vericilerden veri alan ve ortam içerisinde hareketli olan alıcı modülü, vericilere ilişkin bilinen konumlardan kendi konumunu hesaplar. Bu konumlama sistemi, kurulumu yapılan ortam içerisinde santimetre düzeyinde hassas konumlama bilgisi üretir. Sistemin konumlama çözümü üretilebilmesi için en az dört verici modülü ortam içerisinde kurulmalıdır. Her bir verici modülünün teorik UGB sinyal menzili yaklaşık 100 m'dir, fakat pratikte koşullara göre 100-250 m² arasında bir alan içerisinde etkilidir [25]. Dolayısı ile dört vericili bir kurulum için ortam koşullarına göre değişen şekilde 400-1000 m² arasında bir alan, konumlama çözümü için kapsanmış olur.

Bu çalışmada önerilen otonom stok sayım sisteminin testleri için Eskişehir Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi bünyesindeki Kontrol ve Aviyonik Laboratuvarı (KAL) içerisinde bir test alanı oluşturulmuştur. Bu test alanı, içerisine kurulan UGB konumlama sistemi ile birlikte Şekil 2’de gösterilmektedir. Konumlama sistemi kurulurken ilk adım, bir referans koordinat sistemi belirlemektir. Bu uygulamada belirlenen referans koordinat sistemi de Şekil 2’de gösterilmiştir. Daha sonra, UGB vericileri alan içerisinde belirli konumlara sabitlenmiştir. Bu uygulamada 3B konumlama çözümü oluşturulacağı için UGB vericilerinin yatayda farklı ve dağınık konumlara yerleştirilmesinin yanı sıra, farklı yüksekliklerde olmasına da dikkat edilmiştir. Bu şekildeki dağınık yerleştirme, konumlama çözümünü iyileştirir. Vericiler belirli konumlarda sabitlendikten sonra bir lazer uzaklık ölçer kullanılarak bu vericilerin referans koordinat sistemi içerisindeki 3B konumları hassas bir şekilde ölçülmüştür. Burada kullanılan lazer uzaklık ölçerin ölçüm hassasiyeti ± 1 milimetredir. UGB vericilerinin ölçülen konumları, Tablo 2’de gösterilmiştir. Her bir vericinin onaltılık tanımlama bilgisi ile birlikte sabitlendiği konuma ilişkin ölçümler, alıcı modülünün konumunun belirlenmesi için kullanılır.

Tablo 2. UGB verici modülü konumları (UWB transmitter module positions)

Verici numarası	Verici tanımlaması	Vericilerin (x, y, z) konumları (mm)
1	0x6070	(0, 1363, 2381)
2	0x404d	(0, 4360, 1113)
3	0x604f	(4723, 3700, 2665)
4	0x6044	(4749, 0, 1915)

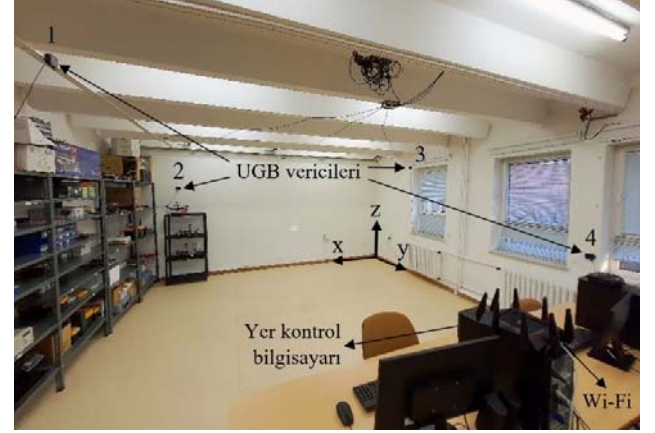
İHA üzerine Şekil 1’deki gibi yerleştirilmiş UGB alıcı modülü, eşlikçi bilgisayarın USB portuna bağlanmıştır. Alıcı modül enerjisini bu port üzerinden almakla birlikte saniyede 60 yenilemeye kadar konum bilgisini eşlikçi bilgisayara göndermektedir. Konum bilgisinin elde edilebilmesi için İHA üzerindeki eşlikçi bilgisayar ile UGB alıcı modül arasındaki haberleşme, Pozyx Python kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir [26].

2.3. Görsel Tabanlı Stok Sayım Sistemi (Vision-based Stock-taking System)

Bu çalışmada, otomatik stok sayımı, görsel tabanlı bir barkod yakalama sistemi temelinde tasarlanmıştır. Şekil 1’de gösterilen kamera vasıtası ile alınan görüntü işlenerek sayılacak ürünlerin barkodları tespit edilir. İHA üzerinde kullanılan kamera, Raspberry Pi V2 kızılötesi filtresiz (NoIR) kamera modülüdür. Bu kameranın tercih edilmesinin en önemli sebebi; kamera modülü üzerinde bir kızılötesi filtre barındırmamasıdır. Bu sayede, düşük ışık şartlarında diğer kameralara göre detayları daha belirgin görüntüler elde edilebilmektedir. Barkod tespiti için işletilen görüntü işleme süreçleri İHA üzerindeki eşlikçi bilgisayarda, gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilir. Bu durumu sağlayabilmek için düşük bütçeli, sınırlı işlem yükü kapasitesi olan eşlikçi bilgisayar üzerindeki hesaplama yükleri optimize edilmiştir. Barkod tespiti uygulamasında çok yüksek çözünürlüklü görüntülere ihtiyaç olmadığından işlem yükünü azaltmak için işlenecek görüntünün çözünürlüğü 640×480 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada tasarlanan görsel tabanlı stok sayım sisteminin blok diyagramı Şekil 3’te gösterilmiştir. Kameradan alınan görüntü verisi direkt olarak bir video akışı şeklinde yazılım ortamına çekilemez. Dolayısı ile öncelikli olarak eşlikçi bilgisayar üzerine UV4L sürücüsü kurulmuştur. Bu sürücü, kameradan görüntü verisini çekerek, üzerinden video akışı yapılabilecek sanal bir video akış cihazı gibi davranır. Daha sonra, UV4L sürücüsü ile sağlanan video akışı, SimpleCV görüntü işleme çerçevesi kullanılarak işlenir. SimpleCV, bilgisayarlı görü uygulamaları oluşturmak için açık kaynak kodlu bir çerçevedir. Bu yazılım çerçevesi ile OpenCV gibi birçok yüksek güçlü bilgisayarlı görü kütüphanesine erişilebilir [27]. Python dili kullanılarak yazılan görüntü işleme programı, SimpleCV çerçevesini kullanarak, UV4L sürücüsünden video akışını çeker. Daha sonra, video görüntüsü üzerindeki barkodlar, açık kaynak kodlu ZBar kütüphanesi kullanılarak yakalanır [28]. Bu kütüphane, tekli resim ve video akışı gibi kaynaklarda bulunan çeşitli standartlardaki barkodları yakalamak için kullanılan bir yazılım paketidir. ZBar kütüphanesi kullanılarak tespit edilen barkodların kod çözümleri de elde edilir. Bu kod çözümleri, hangi ürünün tespit edildiği bilgisini içerir. Elde edilen bu bilgi kullanılarak görüntü akışı üzerindeki barkod etiketlenir ve görüntüde bir çerçeveye alınarak hangi ürünün tespit edildiği bilgisi görüntü üzerine işlenir. Görsel tabanlı stok sayım sisteminin merkezini oluşturan ZBar kütüphanesi vasıtası ile Code 128, EAN-13/UPC-A, UPC-E, EAN-8 ve QR kod gibi birçok sanayi standardı tanılama yönteminin kodu çözülebilir ve stok sayımı için kullanılabilir. Bu makale

kapsamında sınırlı alanda sistemin tüm detaylarını anlatabilmek için deneysel çalışmalarda sadece yaygın kullanılan Code 128 standardı barkodlar ile çalışılmıştır.

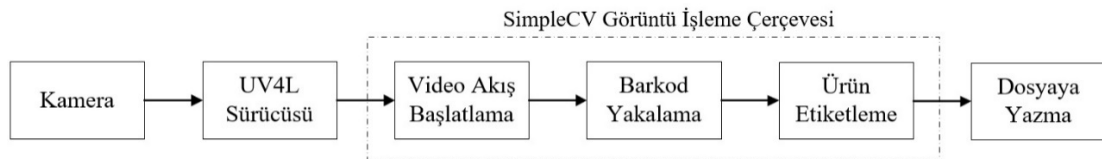


Şekil 2. UGB konumlama sistemi kurulumu
(UWB positioning system setup)

Tespit edilen barkod, görüntüden çıkana kadar takip edilir. Bir barkod bir kere tespit edildiğinde kod çözümleri yapıldığı için farklı zamanda aynı barkodun tekrar tespit edilmesinin önüne geçilir. Nihayetinde, tespit edilen her barkoda ilişkin ürün bilgisi CSV uzantılı bir dosyaya işlenir. Böylece İHA’nın tarama yaptığı bölgede tespit edilen ürünlerin bir listesi oluşturulur. Yer kontrol bilgisayarı, İHA üzerindeki eşlikçi bilgisayarda sürekli güncellenen bu stok sayım dosyasına, Wi-Fi haberleşmesi vasıtası ile erişir. Bunun yanı sıra, stok sayımı yapılırken oluşan anlık etiketlenmiş görüntü verisi de yer kontrol bilgisayarı tarafından Wi-Fi haberleşmesi ile çekilebilir.

2.4. Engelden Sakınma Sistemi (Obstacle Avoidance System)

Depolar ticari faaliyetin sürekli olduğu karmaşık ortamlardır. İHA tabanlı stok sayım sisteminin de bu ortamda hem durağan hem de hareketli engeller ile çarpışmadan görev icra etmesi beklenmektedir. Bu gereksinimin karşılanması için İHA üzerine Şekil 1’de görüldüğü gibi bir LiDAR yerleştirilmiştir. Bu LiDAR, 2B düzlemde 360° tarama yapabilen, İHA üzerinde kullanılmaya elverişli, hafif, düşük maliyetli bir çözümdür. Bu LiDAR’ın özellikleri Tablo 3’te gösterilmiştir. LiDAR ile eşlikçi bilgisayar arasındaki haberleşme, açık kaynak kodlu Skoltech robotik Python kütüphanesi kullanılarak sağlanmıştır [29]. Bu uygulamada İHA’nın konumlaması UGB sistemi ile sağlandığından dolayı sadece engelden sakınma fonksiyonunu yerine getirmesi için 2B LiDAR tercih edilmiştir. Böylece çevirim



Şekil 3. Görsel tabanlı stok sayım sistemi (Vision-based stock-taking system)

içi hesaplama yükü açısından da avantaj sağlanır. Fakat farklı bir yaklaşım olarak 3B LiDAR kullanarak engelden sakınma fonksiyonuna ek olarak konumlama problemi de tek bir LiDAR sistemi ile çözülebilir [11].

Tablo 3. LiDAR özellikleri (LiDAR specifications)

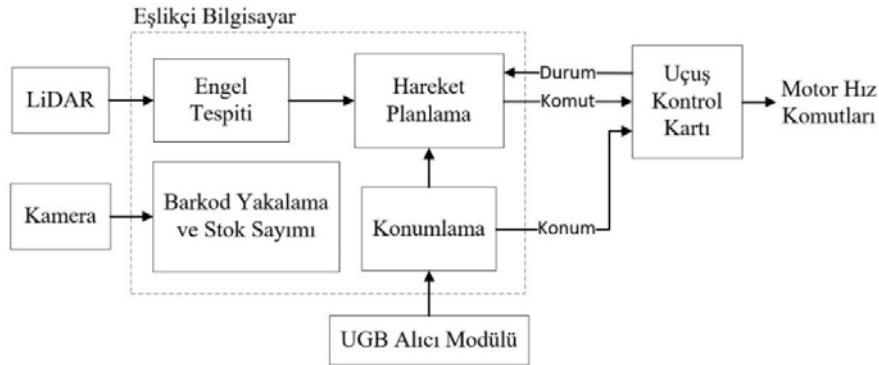
Menzil	Ölçüm çözünürlüğü	Açısal çözünürlük	Tarama hızı
0,15-12 m	<0,5 mm	$\leq 1^\circ$	1-10 Hz

LiDAR, USB üzerinden eşlikçi bilgisayara saniyede bir kere tam bir tur dönüşü için tarama verisi gönderir. İHA üzerinde mekanik olarak dönen LiDAR'ın bozucu moment etkisini minimize etmek için tarama hızı 1 Hz olarak seçilmiştir. Bu veri kullanılarak, merkezinde İHA'nın bulunduğu 12 m yarıçapında bir daire alan sürekli taranarak, ortamda hareketli fiziki engel olması durumu takip edilir. Bu çalışmada kullanılan İHA için risk uzaklığı 1 m olarak seçilmiştir. LiDAR tarafından gönderilen tarama verisinde tespit edilen engeller 1 m'den daha fazla İHA'ya yaklaştığında, İHA engelin tespit edildiği istikametinin tersine bir sakınma manevrası yapar. Daha sonra ise hareketli engelin uzaklaşması ile kaldığı konuma geri dönerek çalışmasına devam eder. Burada otonomi seviyesi nispeten düşük bir "basit engelden sakınma" sistemi varsayılmıştır. Hava araçlarında engelden sakınma, başlı başına ciddi bir çalışma alanı olup, yüksek otonomi seviyelerine ulaşabilmek için hala üzerinde yaygınca çalışılan bir konudur.

2.5. Görev Yazılımı (Mission Software)

Önerilen İHA tabanlı otomatik stok sayım sisteminde, tüm hesaplamalar hava aracı üzerindeki eşlikçi bilgisayarda gerçek zamanlı olarak yapılır. Bu fonksiyonlar, önceki bölümlerde de değinildiği üzere; hava aracının iç ortam konumlama çözümü, basit engelden kaçınma fonksiyonu, kamera verisinden barkod tespiti ve stok sayımı, en nihayetinde de hava aracının otonom hareket planlamasıdır. Bu alt bölümde, bahsi geçen tüm bu fonksiyonları bünyesinde barındıran görev yazılımı algoritması anlatılmaktadır. İHA'nın tüm fonksiyonları için en temel ve merkezi unsur eşlikçi bilgisayardır. Diğer tüm bileşenler eşlikçi bilgisayara bağlıdır ve burada koşan ana görev

yazılımı tüm bu bileşenleri yönetir. Şekil 4'te bu yapı blok diyagramı olarak gösterilmiştir. Hava aracı üzerinde koşan görev yazılımı, Python programlama dili kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yazılım, eşlikçi bilgisayarda kurulu Linux temelli "Raspbian" işletim sistemi üzerinde koşturulur. LiDAR ve UGB konumlama sistemi için halihazırda kullanılacak Python kütüphaneleri olduğu değinilmiştir. Ana görev yazılımı içerisinde, LiDAR ve UGB alıcı modülünden veri alınırken haberleşme için bu donanımlara ilişkin kütüphaneler kullanılmıştır. Şekil 4'te gösterilen "Engel Tespiti" ve "Konumlama" blokları görev planlama yazılımı içerisinde birer prosedür olarak yazılmışlardır. Engel tespiti prosedürü, LiDAR'dan 360° tarama verisi alarak, İHA çevresinde 1 m yarıçapındaki güvenlik bölgesi içerisine giren engelleri tespit eder. İHA'nın çevresi; ileri, sağ, sol ve arka olmak üzere 4 bölge olarak varsayılmıştır. Tespit edilen bu engellerin hangi bölge ya da bölgelerde olduğu bilgisi engel tespiti prosedürü içerisinde hesaplanarak hareket planında kullanılır. Konumlama prosedürü ise UGB alıcı modülünden, UGB vericilerin sabit konumlarına karşılık, İHA'nın konum bilgisini alır. Bu konum bilgisi hem hareket planında hem de uçuş kontrol kartında kullanılır. Uçuş kontrol kartı, hava aracının kararlı seviye uçuşu, takip kontrolü gibi düşük seviye kontrollerini icra eder. Eşlikçi bilgisayar, bu düşük seviye kontrolleri uçuş kontrol kartı içerisinde koşan otopilot (ArduPilot) sistemine bırakır. İHA'nın görevine ilişkin hareketini planlar ve uçuş kontrol kartına bu planlara ilişkin anlık olarak bir komut dizisi gönderir. Bu komut dizisi, stok tarama fonksiyonunu yerine getirecek şekilde belirli ara noktalara (waypoints) uçuş komutları ve kameranın tarama yapabilmesi için İHA'nın kamera bağlı yönünün rafa dönmesi ile ilgili baş açısı komutlarıdır. Bu komutlar MAVLink haberleşme protokolü ile uçuş kontrol kartına iletilir. Uçuş kontrol kartı üzerinde koşan açık kaynak kodlu ArduPilot otopilot sistemi bu komutları icra eder. Uçuş kontrol kartı üzerinde bulunan manyetometre ve AÖB, baş açısı kontrolü için gereken geri besleme sinyalini üretir. Dolayısı ile uçuş kontrol kartı baş açısı komutlarını takip edebilir. Fakat uçuş kontrol kartının üzerinde, iç ortamda konum kontrolü için geri besleme kullanacak bir algılayıcı yoktur. Dolayısı ile eşlikçi bilgisayar, UGB sisteminden ürettiği konum bilgisini yine MAVLink protokolünü kullanarak uçuş kontrol kartına iletir ve bu kart üzerinde



Şekil 4. Görev yazılımı blok diyagramı (Mission software block diagram)

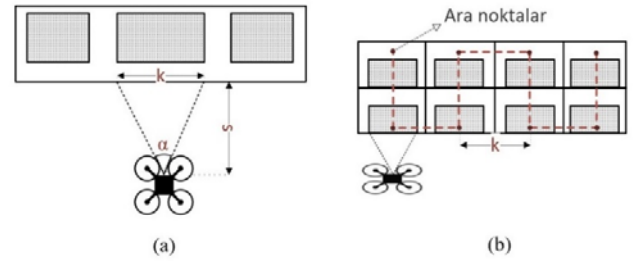
koşturan otopilot sistemi artık belirli ara noktalara uçuş komutlarını da icra edebilir.

Stok sayımı fonksiyonunu yerine getirecek şekilde tasarlanan hareket planlama algoritmasının akış diyagramı Şekil 5'te gösterilmektedir. Burada gösterilen şekilde yapılan hareket planı, belirli komutların uçuş kontrol kartına MAVLink protokolü kullanılarak iletilmesi şeklinde işletilir. Örneğin; kalkış, iniş, kalkış yapılan konuma geri dönüş gibi fonksiyonlar, ArduPilot sistemi içerisinde uçuş modları olarak tanımlanmıştır. Bu fonksiyonların icra edilmesi, ilgili uçuş modlarının değişimine ilişkin komutla sağlanır. Bunun dışında, Şekil 5'teki hareket planı işleyişi, belirli konumlara uçuş ve İHA'nın baş açısının değiştirilmesi fonksiyonlarını da içerir. Bu fonksiyonlar, stok sayımı için tarama yapılacak raftan alınan görüntü verisinin tüm rafı kapsaması ile ilgilidir. Şekil 6'da bu taramanın tüm rafı kapsayacak şekilde yapılmasına ilişkin İHA'nın izleyeceği rota planı gösterilmektedir.

Stok sayımı yapılacak depo ortamında rafların konumları sabit olduğundan dolayı o raftaki tüm ürünleri sayabilecek rota planına ilişkin ara noktalar da sabittir. Bu ara noktalar Şekil 6'da gösterilen bir yaklaşım ile belirlenmiş ve İHA'nın tek bir rafı bir seferde tarayacağı varsayılmıştır. İHA sistemi, stok sayımı sürecinde rafların bilinen konumlarına eşdeğer bir bilgi olan bu ara nokta setini kullanır. Bu ara noktalar, açgözlü arama metodu ile tüm rafı kapsayacak, sınırlı sayıda nokta olarak seçilmiştir. İHA, rafı tamamen taramak için bu ara noktalar dizisindeki her bir noktaya sırası ile uçar. Burada k uzaklığının belirlenmesi için sabit olan kamera görüş açısı ($\alpha = 45^\circ$) ile birlikte kameranın barkodları okuma uzaklığının (s uzaklığı) belirlenmesi gerekmektedir. Burada, s uzaklığı 70 cm olarak seçilmiştir. Seçilen bu uzaklık, kameranın sabit bir odak uzaklığı için en yüksek başarımda barkod okuma performansına göre belirlenmiştir. Bu analizler deneysel çalışmalar kapsamında Bölüm 3.2'de detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Şekil 6a'da gösterilen İHA

kameranın görüş bölgesi için α ve s değerleri bilindiğinde basit üçgen hesabı ile k değeri yaklaşık 58 cm olarak bulunur. Fakat, konum belirsizliği ve uçuş esnasında oluşabilecek bozucu etkiler de göz önüne alındığında k değerini ucu ucuna denk gelecek şekilde seçmek mantıksız olacaktır. Dolayısı ile rafın tamamının taranmasını garanti altına almak için k değeri 50 cm olacak şekilde ara noktaların konumları belirlenir. En nihayetinde kamera, İHA'nın tüm rafı tarayabilmek için oluşturduğu Şekil 6b'deki rota planı ile sayılacak tüm ürünlerin görüntüsünü alır.

Şekil 4'teki "Barkod Yakalama ve Stok Sayımı" prosedürü, Bölüm 2.3'te anlatıldığı gibi, alınan anlık görüntüleri işleyerek barkodları tespit eder, kod çözümlerini yapar ve tespit ettiği ürün bilgisini stok sayım dosyasına işler.

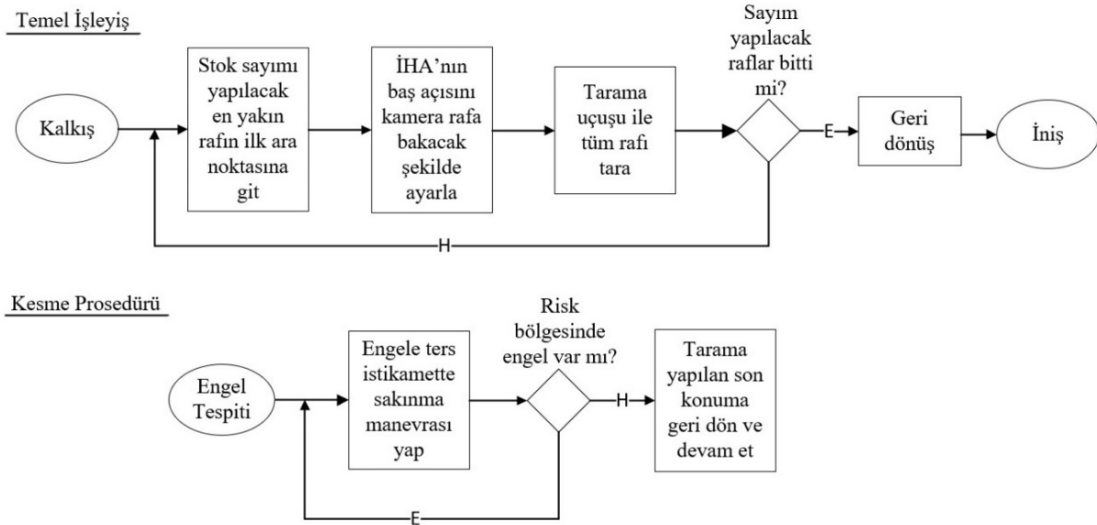


Şekil 6. İHA tarama uçuşu (a) üstten görünüm (b) önden görünüm

(UAV sweep flight (a) top view (b) front view)

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu bölümde, İHA kullanarak otomatikleştirilmiş stok sayımı konseptini doğrulamak için yapılan deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Bu deneysel çalışmalar, Bölüm 2'de incelenen alt sistemlerin derin analizleri ile birlikte, bütünlük sistem otomatik stok sayımı görevine ilişkin uçuş tecrübelerini de kapsamaktadır.



Şekil 5. Hareket planlama akış diyagramı (Motion planning flowchart)

3.1. UGB Konumlama Sistemi (UWB Positioning System)

UGB konumlama sistemi Bölüm 2.2’de anlatılmış ve laboratuvar ortamındaki kurulumu Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen İHA uçuş alanında, farklı konumlarda dört tane test noktası (TN) seçilmiştir. Bu test noktalarının Şekil 2’de gösterilen referans koordinat sistemine göre konumları, lazer uzaklık ölçer cihazı ile hassas bir şekilde ölçülmüştür. Lazer sistemi ile ± 1 mm hassasiyetinde yapılan bu ölçüm, UGB konumlama sisteminden alınacak santimetreler mertebesinde hassas olan konum verisi karşısında, gerçek konum olarak kabul edilmiştir. Bu ölçümler Tablo 4’te gösterilmektedir. Daha sonra, tasarlanan İHA, bir test noktası konumuna sabitlenerek UGB konumlama sisteminden 500 örnek (~ 10 saniye boyunca) konumlama verisi alınmıştır. Bu deney her bir test noktası için tekrarlanmıştır. UGB konumlama sisteminden alınan konum verileri, test noktalarının hassas bir şekilde lazer uzaklık ölçer ile ölçülmüş ve bu deneyde gerçek kabul edilen konumları ile birlikte Şekil 7’de gösterilmektedir.

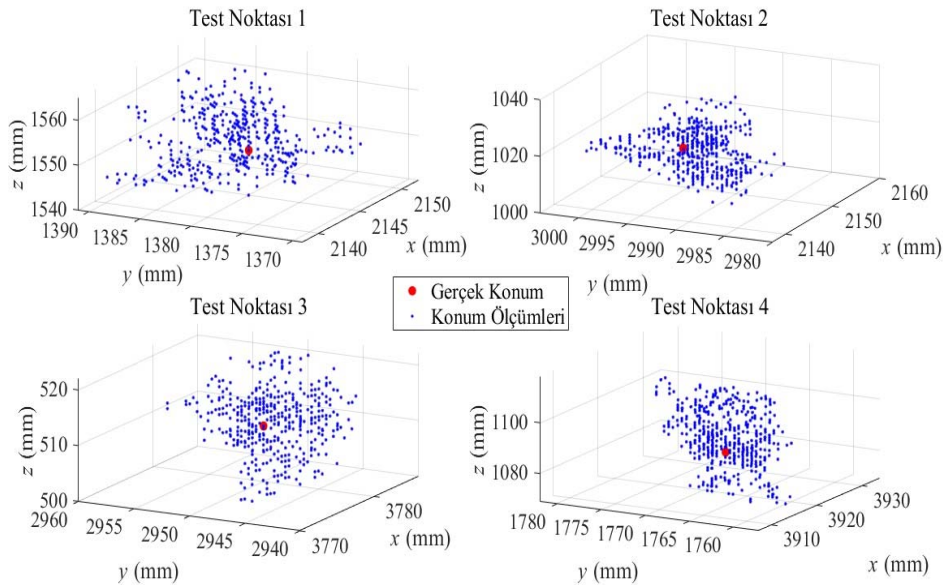
Tablo 4. Test noktalarının gerçek konumları
(True locations of test points)

Test noktaları	x (mm)	y (mm)	z (mm)
TN 1	2145	1380	1550
TN 2	2149	2995	1015
TN 3	3780	2950	510
TN 4	3925	1770	1085

Şekil 7’de gösterilen grafiklerde, UGB konumlama sisteminden alınan verilerin gerçek konumlara çok yakın oldukları açıkça görülmektedir. UGB sisteminden alınan ölçümlerin istatistiksel analizinin yapılabilmesi için Tablo 5’te konumlama hatalarına ilişkin ortalama ve standart

sapma değerleri gösterilmiştir. Öncelikle, bağımsız olarak x, y ve z eksenleri için, eksen bazında bir analiz yapılmıştır. Bu analizde, her ölçüm için konumlama hatası; ölçümler ile gerçek değer arasındaki farkının normu şeklinde hesaplanmıştır. Tablo 5’te eksen bazında en büyük hatanın TN 4 ölçümlerinde, z-ekseninde yapıldığı görülmektedir. Burada, ortalama hata 8,8040 mm olarak, standart sapma ise 8,8221 mm olarak hesaplanmıştır. Dolayısı ile en kötü durumda (ortalama hatadan 3 standart sapma uzakta) konumlama hatası 35,4506 mm olmuştur. Yapılan bu analiz göstermektedir ki laboratuvar ortamında kurulan UGB konumlama sisteminin konumlama hata marjı eksen bazında kabaca 3,5 cm düzeyindedir.

Yukarıda yapılan eksen bazındaki analiz, konumlama sistemi için referans bir istatistik ortaya koymaktadır. Fakat, hava aracı konumlamasında, 3B konumlama yapılmaktadır. Dolayısı ile bir de bütünleşik 3B konumlamasına ilişkin hata analizi yapılmıştır. Bu analizde, her ölçüm için konumlama hatası; ölçülen 3B koordinat ile gerçek 3B koordinat arasındaki mesafe şeklinde hesaplanmıştır. Tablo 5’te en büyük 3B konumlama hatasının TN 4 ölçümlerinde yapıldığı görülmektedir. Burada, ortalama hata 11,2945 mm olarak, standart sapma ise 9,0758 mm olarak hesaplanmıştır. Dolayısı ile en kötü durumda (ortalama hatadan 3 standart sapma uzakta) 3B konumlama hatası 38,5219 mm olmuştur. Dolayısı ile yapılan bu analiz göstermektedir ki laboratuvar ortamında kurulan UGB konumlama sisteminin 3B konumlama hata marjı kabaca 4 cm düzeyinin altındadır. Yapılan bu analizler, [25]’de ortaya koyulan, UGB konumlama sistemi için hata marjının 10 cm düzeyinin altında olduğu bilgisi ile tutarlılık arz etmekle birlikte, hata düzeyinin daha düşük bir seviyede olmasının sebebi ise daha büyük alanlarda çalışabilecek konumlama sisteminin, nispeten küçük bir laboratuvar içerisinde test edilmesidir.



Şekil 7. Test noktaları ve ölçümleri (Test points and measurements)

Tablo 5. UGB konumlama sistemi ölçüm istatistikleri (UGB positioning system measurement statistics)

İstatistik	Test noktası	x-ekseni konumlama hatası (mm)	y-ekseni konumlama hatası (mm)	z-ekseni konumlama hatası (mm)	3B konumlama hatası (mm)
Ortalama	TN 1	2,0600	3,8580	3,9500	6,6308
	TN 2	3,2680	3,1860	5,4920	8,0183
	TN 3	2,6780	3,0720	3,3260	6,0595
	TN 4	3,9780	3,7700	8,8040	11,2945
Standart Sapma	TN 1	1,6017	2,7621	2,6087	2,7829
	TN 2	2,7734	2,6626	4,6179	4,7727
	TN 3	1,9041	2,2001	2,6807	2,5665
	TN 4	4,0702	2,8343	8,8221	9,0758

3.2. Barkod Yakalama ve Stok Sayımı (Barcode Capturing and Stock-taking)

Bu çalışmada, kamera ile alınan görüntüler üzerinden barkod tespiti yapabilen, görsel tabanlı bir stok sayım sistemi önerilmiştir. Ürünlerin doğru ve eksiksiz bir şekilde sayılabilmesi kameradan alınan görüntünün özellikleri ile doğrudan ilintilidir. Dolayısı ile stok sayımının başarımı, çalışılan ortamın aydınlatması, görüntünün kaydedildiği uzaklık gibi faktörlerden etkilenmektedir. Daha önce, İHA'nın tasarım aşamasında düşük ışık koşullarından daha az etkilenmesi nedeniyle kızılötesi filtresiz kamera sisteminin kullanıldığı anlatılmıştı. Bu bölümde ise stok sayımı başarımını belirleyen unsurların etkisi test edilmiştir.

Laboratuvar ortamında yapılan otomatik stok sayım sistemi testleri için 4 farklı ürün grubuna ilişkin 40 farklı barkod kullanılmıştır. Barkodlar çevirim içi bir barkod üretici yazılım kullanılarak "Code 128" uluslararası standardında üretilmiştir [30]. Code 128, ISO/IEC 15417:2007 standardında tanımlanan yüksek yoğunluklu doğrusal bir barkod sistemidir [31]. Alfa-nümerik veya sayısal karakterlerden oluşan barkodlar için yaygın şekilde kullanılır. Bu çalışma özelinde, barkodların üretilmesi için basit bir ürün kimliği formatı varsayılmıştır. Bu format; XX-XXX şeklindedir. Burada ilk iki rakam ürün grubunu gösterirken son üç rakam ise o ürüne ait belirleyici kimliği göstermektedir. Üretilen barkodlardan iki tanesi örnek olarak Şekil 8'de gösterilmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan barkodlar, 10 cm eninde ve 3,5 cm boyunda olacak şekilde bastırılmışlardır. Problem senaryosunu oluşturan depo ortamlarında genellikle palet sistemi kullanılır ve bu paletlerin üzerinde etiketler seçilen boyuttan büyüktür. Fakat tekli ürünlerde ise bu barkodlar seçilen boyuttan daha küçüktür. Deneysel çalışmalarda konseptin ispatı için ortalama bir barkod büyüklüğü seçilmiştir. Fakat farklı barkod büyüklüklerinde kamera odak uzaklığı ve Şekil 6'da gösterilen parametreler ayarlanarak aynı güvenli tespit mesafesi ile süreç işletilebilir. Bu bölümde, üretilen bu 40 doğrusal barkod kullanılarak, farklı koşullar için barkod yakalama sisteminin testleri yapılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan kamera, sabit bir odak uzaklığı ayarında kullanılmaktadır. Test yapılacak ortamın nispeten küçük olması sebebi ile bu odak uzaklığı yakın cisimleri netleştirecek şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra, üç farklı uzaklık (kamera-barkod arası) ve üç farklı ortam aydınlatma

düzeyi için barkod yakalama testleri icra edilmiştir. Tablo 6 yapılan bu testlerdeki barkod yakalama başarımını göstermektedir. Her bir testte, üretilen 40 farklı barkod, farklı uzaklıklarda ve ortam aydınlatmalarında tespit edilmeye çalışılmıştır. Ortam aydınlatması, laboratuvarda farklı sayıda floresanın açılıp kapatılması ile ayarlanmış ve ortalama ışık şiddetleri lüksmetre ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki loş ışık koşullarında barkod yakalama başarımı nispeten düşüktür. Görsel tabanlı sistemlerin geneli için bozucu etki olan düşük ışık seviyesi etkisi bu testlerde de ortaya koyulmuştur. Bunun dışında, normal ve çok aydınlık ışık seviyeleri arasında belirgin bir barkod yakalama başarımı üstünlüğü görülmemiştir. Fakat bu iki ışık seviyesinde, 90 cm uzaktan alınan görüntülerde diğer uzaklıklara nazaran belirgin bir tespit başarımı düşüşü görülmektedir. Dolayısı ile yüksek performansta barkod tespiti için 90 cm'den daha yakından barkod okuma yapılması gerekliliği sonucuna ulaşılmıştır. Bu testlerden elde edilen sonuçlar uyarınca elde edilen bilgi neticesinde, yapılan uçuş testlerinde İHA'nın, kamera ile barkodlar arasındaki mesafe 70 cm olacak şekilde tarama yapmasına karar verilmiştir. Bu uzaklık Şekil 6a'da gösterilen s uzaklığına tekabül eder. Seçilen bu görüntü alma uzaklığı ile birlikte normal ve üstü aydınlatma koşullarında, barkodların tamamı tespit edilebilmiştir. Burada 50 cm uzaklığın tercih edilmemesinin sebebi; barkod tespit başarımını arttıracak kadar yakın fakat aksi bir durumda raflara çarpma riskini azaltacak kadar da uzak bir konumun seçilmiş olmasıdır.

**Şekil 8.** Code 128 barkod örneği (Code 128 barcode sample)**Tablo 6.** Barkod tespit sistemi ölçümlerinin analizi
(Analysis of barcode detection system measurements)

Uzaklık	Ortam Aydınlatması		
	Çok Aydınlık (108 lx)	Normal (86 lx)	Loş (53 lx)
50 cm	%100	%100	%92,5
70 cm	%100	%100	%92,5
90 cm	%90	%87,5	%82,5

3.3. Engelden Sakınma Sistemi (Obstacle Avoidance System)

Engelden sakınma sistemin bileşenleri ve basit engelden sakınma prosedürü Bölüm 2.4-2.5'te anlatılmıştır. Bu alt bölümde, tasarlanan basit engelden sakınma sistemi, laboratuvar ortamında gerçek uçuş tecrübesi ile test edilmiştir. Yapılan engelden sakınma testine ilişkin grafikler Şekil 9'da gösterilmektedir. Şekil 9b'de gösterildiği üzere, İHA'nın bir A ara noktasından bir B ara noktasına uçuşu söz konusudur. Bu uçuş gerçekleştirilirken belirli bir anda, sağ taraftan bir fiziki engel İHA'ya yaklaştırılmıştır. Şekil 9a, hava aracının LiDAR vasıtası ile aldığı anlık veriyi nokta haritası şeklinde kutupsal koordinatlarda göstermektedir. Bu grafikte noktalar, İHA'nın çevresindeki cisimlerin anlık olarak uzaklıklarını göstermektedir. Grafikteki eş uzaklık çizgileri milimetre olarak cisimlerin uzaklıklarını göstermektedir. Şekil 9a'da, İHA'nın sağ tarafından bir engelin 1 m yarıçapındaki risk bölgesini ihlal ettiği ana ilişkin grafik gösterilmektedir. Bu durumda, engel tespit sistemi, İHA'nın sağ tarafında bir engel olduğunu tespit eder ve Şekil 5'te gösterilen kesme prosedürü işletilir.

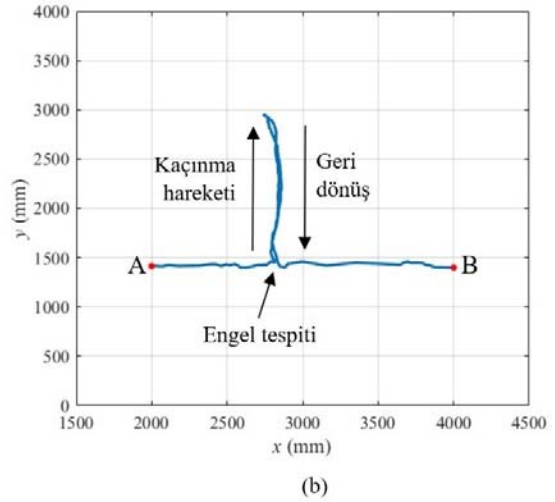
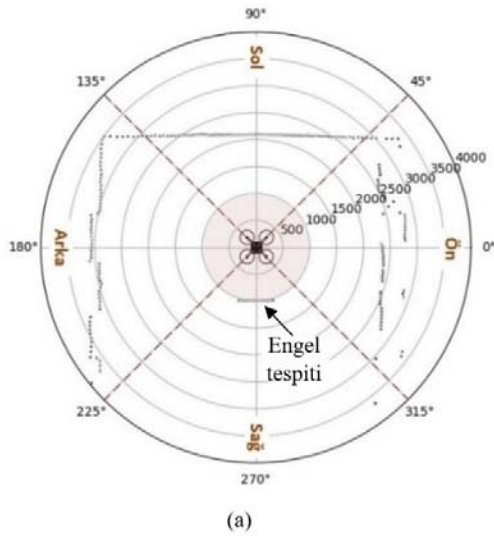
İHA'nın engelden sakınma manevrasına başlamadan önceki son konumu, tekrar o konuma dönmek üzere kaydedilir. İHA'nın çevresi 4 bölge (ön, arka, sağ, sol) olarak varsayılmıştır. Engele ters istikamette bir hız vektörü komutu MAVLink protokolü ile uçuş kontrol kartına iletilir. Fiziki engel, risk bölgesinden çıkana kadar bu sakınma manevrası sürdürülür. Engel risk bölgesinden çıktıktan sonra, uçuş rotası hattındaki son konuma geri dönülerek göreve kalınan yerden devam edilir. Burada birden fazla yönden engellerin gelme olasılığı da söz konusudur. İki ya da üç farklı bölgede engel tespit edildiğinde engel olmayan yöne doğru manevra yapılır. Fakat dört yönden birden dinamik engellerin İHA'ya yaklaşması durumunda irtifa artırma yaparak bir sakınma yapılması gerekir. Fakat bu çalışmada 2B tarama yapabilen bir LiDAR sistemi kullanıldığından, üçüncü boyutta bir sakınma manevrası

yapmak mümkün değildir. Dolayısı ile bu çalışmada böyle bir senaryo varsayılmamıştır.

3.4. Otomatik Stok Sayım Sistemi (Automated Stock-taking System)

İç ortamda İHA'nın konumlama probleminin çok düşük hata düzeyleri ile çözülmesi, İHA'nın etkin bir otonom görev kabiliyeti kazanmasını sağlar. Otonom görev yazılımı algoritması Bölüm 2.5'te detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu bölümde ise önerilen otomatik stok sayımı sistemi, tüm fonksiyonları ile birlikte, test edilmiştir. Burada yapılan testlerde Bölüm 3.2'de kullanılan barkodlardan 12 tanesi laboratuvarında bulunan rafların üzerine yerleştirilmiştir. Daha sonra İHA, laboratuvarın ortasında bir konuma yerleştirilerek çalıştırılmıştır. Yer kontrol istasyonundan gönderilen stok sayım görevi ile birlikte Bölüm 2.5'te detayları anlatılan şekilde İHA otonom olarak stok sayım görevini icra etmiştir. Bu çalışma kapsamında iki defa uçuş testi yapılarak sistemin çalışması doğrulanmıştır. Yürütülen uçuş testleri esnasında çekilmiş bir fotoğraf Şekil 10'da gösterilmektedir. Şekil 11'de ise yapılan bu uçuş testlerinden bir tanesine ilişkin, İHA'nın görev boyunca izlediği uçuş rotası gösterilmektedir. Burada stok sayımı yapılacak rafın uzunluğu yaklaşık 3 metredir. İHA, Bölüm 2.5'te anlatıldığı gibi düşey olarak yaklaşık 50 cm aralıklarla sağa kayarak, rafın sol üst köşesinden itibaren tarama uçuşu yapmıştır. Şekil 11'de İHA'nın tarama esnasında toplam 6 defa düşey alçalma-yükselme hareketi yaptığı görülmektedir. Bu da 3 metrelik rafın (50 cm × 6) taraması için öngörülen bir rota planı olduğunu göstermektedir.

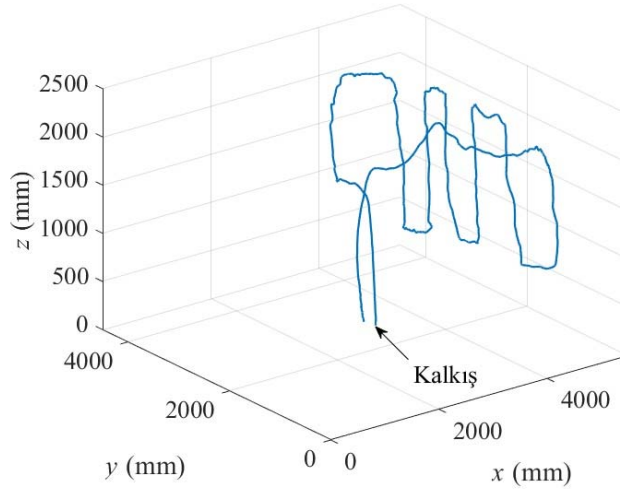
Yapılan otonom stok sayımı görevi uçuşları esnasında barkodların raflarda tespit edilme sürecine ilişkin fotoğraflar Şekil 12'de gösterilmektedir. Yapılan iki uçuş testinde de raflara yerleştirilen tüm barkodlar başarı ile tespit edilmişlerdir. Tespit edilen barkodlara ilişkin kod çözümleri yapılmış ve stok sayım dosyasına bu ürünlerin bilgileri işlenmiştir. Bu şekilde, ayrıca anlık görüntü içerisinde birden



Şekil 9. Engelden sakınma manevrası (a) LiDAR taraması (b) İHA'nın izlediği rota (Obstacle avoidance maneuver (a) LiDAR scanning (b) The route the UAV follows)



Şekil 10. Otonom stok sayımı görevi icrası (Autonomous stock-taking task execution)



Şekil 11. Stok sayımı yaparken İHA'nın izlediği rota (The route followed by the UAV while taking stock)

fazla barkodun olması durumu da gösterilmiştir. Bu durumda da barkod sayımı başarılı bir şekilde yapılmıştır. Yapılan ikinci uçuş testinde ise bazı barkodların yeri değiştirilerek, çoklu barkodların farklı yönlerde yerleştirilmeleri durumu da test senaryosuna eklenmiştir. Barkodları farklı yönlerde yerleştirerek yapılan testin amacı; ürünlerin yanlışlıkla farklı yönlerde raflara yerleştirilmesi durumunda da stok sayımı başarımlarını test etmektir. Şekil 12'in sağ alt köşedeki fotoğrafta, yakın konumlara yerleştirilen üç barkodun birisi düz yönlü konumlandırılmış iken (02-001), diğer iki barkodun birisi yan (04-002) diğeri ise ters duracak şekilde (01-002) konumlandırılmıştır. Böyle bir zorlukta da otomatik stok tespit sistemi bu barkodları yakalayarak ürünleri stok bilgisine eklemiştir. Bu test göstermektedir ki ürünlerin raflara farklı yönlerde yerleştirmeleri durumunda da stok sayım sistemi başarılı bir şekilde çalışmaktadır.

Laboratuvarında oluşturulan bu test ortamı, gerçek görev senaryosuna ilişkin başarımın konseptin ispatı yolu ile gösterilmesi amacıyla oluşturulmuştur. Bu test ortamının tek bir raf içermesi ve alçak tavanlı, nispeten küçük bir ortam olması konumlama hassasiyeti ve haberleşme kalitesi açısından avantaj sağladığı değerlendirilebilir. Fakat Bölüm 2.2'de sunulan konumlama sistemi hata düzeyinin hacim ile ilişkisi analizi göstermektedir ki kurulan UGB sisteminin en büyük hatası 10 cm düzeyinin altındadır. Bu konumlama hassasiyeti çok daha büyük hacimlerde yapılacak stok sayımı görevi için yeterlidir. Ayrıca İHA ve yer kontrol bilgisayarı arasındaki haberleşme Wi-Fi vasıtasıyla yapıldığı için bu haberleşme türü yansıma, girişim gibi bozuculara karşı yeterince gürbüz bir haberleşme yöntemidir. Dolayısı ile, önerilen İHA tabanlı stok sayım sistemi çok daha büyük ortamlarda da benzer başarımla çalışabilir.



Şekil 12. Stok sayımında tespit edilen barkodlar (Barcodes detected in stock-taking)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Endüstri 4.0 paradigması, geleneksel fabrikaların akıllı fabrikalara dönüşmesini, teknolojinin son gelişmelerini kullanarak teşvik eder. Bu çalışma kapsamında, depo ortamında zaman alıcı, maliyetli ve insan hayatı açısından tehlikeleri olan elle stok sayımı operasyonunu İHA kullanarak otomatikleştiren bir stok sayım sistemi önerilmiştir. Bu otomatik stok sayımı sistemi için bir prototip tasarlanarak laboratuvar ortamında test edilmiş ve sunulan konseptin başarı ile çalıştığı gösterilmiştir.

Tasarlanan İHA için laboratuvar ortamında UGB konumlama sistemi kurularak, iç ortam konumlama problemi çözülmüştür. Bu sistem, yaklaşık 25 m² genişliğinde bir uçuş alanı içerisinde test edilmiş ve hava aracının 3B konumlama hatasının 4 cm düzeyinin altında olduğu gösterilmiştir. Bu hassasiyette elde edilen konumlama çözümü, hava aracının laboratuvar ortamında etkin bir şekilde otonom görev icra edebilmesini sağlamıştır. Kamera kullanılarak alınan görüntü verisi anlık olarak İHA üzerinde işlenmiş ve stok sayım fonksiyonunun test ortamındaki tüm barkodları tespit ederek, başarılı bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Bu kapsamda iki uçuş testi yapılmıştır. Bu uçuş testlerinin ikisinde de tüm barkodlar tespit edilip kod çözümlenmeleri yapılmış ve stok bilgisi doğru bir şekilde elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında önerilen otomatik stok sayım sistemi; iç ortam konumlama yaklaşımı, görsel tabanlı barkod yakalama sistemi ve basit engelden sakınma fonksiyonu ile bir bütün olarak değerlendirildiğinde özgün bir yapıyı ortaya koymaktadır. Bu özgün konsept, yapılan deneysel çalışmalarla da test edilmiş ve başarılı bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Bir diğer önemli sonuç da uygun maliyetli, basit ve ulaşılabilir

donanımlarla kurulan bu yapının başarılı bir şekilde, beklenen tüm gereksinimleri karşılamaıdır.

Stok sayımının otomatikleştirilmesinin, sürecin hızlanması, personel maliyetinin düşürülmesi ve riskli yüksekliklerde çalışmaya gerek kalınmamasından dolayı iş güvenliğinin sağlanması gibi unsurlar açısından çok faydalı sonuçları olacaktır. Bu gibi faydalarının yanı sıra, sürekli ve etkin bir şekilde yapılan stok takibi ile elde edilecek veri, diğer ticari süreçlerin de verimliliğini arttıracaktır. Dolayısıyla bu çalışmada önerilen yaklaşımın başarılı sonuçları, akıllı fabrikalar konsepti açısından genişletilebilir bir fayda yaratma potansiyeline de sahiptir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, 2180210 numaralı proje kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Osterrieder P., Budde L., Friedli T., The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review, *Int. J. Prod. Econ.*, 221, 107476, 2020.
2. Kiraz A., Canpolat O., Özkurt C., Taşkın H., Sarp E., Examination of the criteria affecting Industry 4.0 with structural equation model and a pilot study, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (4), 2183-2196, 2020.
3. Companik E., Gravier M.J., Farris II M. T., Feasibility of warehouse drone adoption and implementation, *Journal of Transportation Management*, 28 (2), 1-5, 2018.

4. Wawrla L., Maghazei O., Netland T., Applications of drones in warehouse operations, Whitepaper, ETH Zurich, 2019.
5. Dasyam N., Warehouse robotics market, Allied Market Research Report, 2017.
6. Hardis Group. EyeSee resmi internet sayfası. <http://www.eyesee-drone.com>. Erişim tarihi Kasım 15, 2020.
7. DroneScan. Resmi internet sayfası. www.dronescan.co. Erişim tarihi Kasım 15, 2020.
8. Pons J., Drone Ready?. <http://www.scanman.co.za/downloads/whitepaperdronereadyscanman.pdf>. Erişim tarihi Kasım 15, 2019.
9. Cho H., Kim D., Park J., Roh K., Hwang W., 2D barcode detection using images for drone-assisted inventory management, 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), Honolulu, USA, 461-465, 2018.
10. Anand A., Agrawal S., Agrawal S., Chandra A., Deshmukh K., Grid-based localization stack for inspection drones towards automation of large scale warehouse systems, arXiv preprint arXiv:1906.01299, 2019.
11. Beul M., Droschel D., Nieuwenhuisen M., Quenzel J., Houben S., Behnke S., Fast autonomous flight in warehouses for inventory applications, IEEE Rob. Autom. Lett., 3 (4), 3121-3128, 2018.
12. Fernández-Caramés T. M., Blanco-Novoa O., Froiz-Míguez I., Fraga-Lamas, P., Towards an autonomous industry 4.0 warehouse: A UAV and blockchain-based system for inventory and traceability applications in big data-driven supply chain management. Sensors, 19 (10), 2394, 2019.
13. Lichao X., Vineet R. K., Carol C. M., Automatic extraction of 1D barcodes from video scans for drone-assisted inventory management in warehousing applications, International Journal of Logistics Research and Applications, 21 (3), 243-258, 2018.
14. De Falco A., Narducci F., Petrosino A., An UAV autonomous warehouse inventorying by deep learning. International Conference on Image Analysis and Processing, 443-453, Springer, Cham, 2019.
15. Cidal G. M., Cimbek Y. A., Karahan G., Böler Ö. E., Özkardesler Ö., Üvet H., A Study on the development of semi automated warehouse stock counting system, 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), İstanbul, Turkey, 323-326, 2019.
16. Bae S. M., Han K. H., Lee H. Y., Hong K. S. Automation of inventory checking system for outdoor warehouse, Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering, 41 (3), 138-144, 2018.
17. Kwon W., Park J. H., Lee M., Her J., Kim S. H., Seo J. W., Robust autonomous navigation of unmanned aerial vehicles (UAVs) for warehouses' inventory application, IEEE Rob. Autom. Lett., 5 (1), 243-249, 2019.
18. Walker O., Vanegas F., Gonzalez F., Koenig S., A deep reinforcement learning framework for UAV navigation in indoor environments, IEEE Aerospace Conference, 1-14, 2019.
19. Puerta J. P., Maurer M., Fraundorfer F., Bischof H., Towards an autonomous vision-based inventory drone, Logistikwerkstatt Graz 2019: Solution day—,update, 2019.
20. Macoir N., Bauwens J., Jooris B., Van Herbruggen B., Rossey J., Hoebeke J., De Poorter E., Uwb localization with battery-powered wireless backbone for drone-based inventory management, Sensors, 19 (3), 467, 2019.
21. Team, ArduPilot Dev., Community: ArduPilot documentation, <https://ardupilot.org/ardupilot/>, 2019.
22. Mackay R. N., Open source drones and AI, Journal of The Society of Instrument and Control Engineers, 59 (7), 455-459, 2020.
23. Koubâa A., Allouch A., Alajlan M., Javed Y., Belghith A., Khalgui M., Micro air vehicle link (MAVlink) in a nutshell: A survey, IEEE Access, 7, 87658-87680, 2019.
24. Kocakaya A., Cakir G., Cimen, S., Polarization and angle independent ultra wideband frequency selective surface design, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 287-295, 2020.
25. Pozyx. Resmi internet sitesi. <https://www.pozyx.io/>. Erişim tarihi Kasım 18, 2020.
26. GitHub. Pozyx Python kütüphanesi. <https://github.com/pozyxLabs>. Erişim tarihi Kasım 18, 2020.
27. Puri R., Jain V., Barcode detection using OpenCV-Python. Science, 4 (1), 97-99, 2019.
28. GitHub. Zbar Python kütüphanesi. <https://github.com/ZBar/ZBar>. Erişim tarihi Kasım 18, 2020.
29. GitHub. RPLiDAR Python kütüphanesi. <https://github.com/SkoltechRobotics/rplidar>. Erişim tarihi Kasım 18, 2020.
30. Favorskaya M., Zotin A., Robust textual watermarking for high resolution videos based on Code-128 barcoding and DWT, Procedia Comput. Sci., 176, 1261-1270, 2020.
31. Baby A., Rila B. S., Vishnu G. A., Pandya H. J., Assembly Management Software Integrated with Additive Manufacturing for Micro, Small, and Medium Enterprises. Industry 4.0 and Advanced Manufacturing, Springer, 159-165, 2020.

