

Taşınabilir Lazer Tarama Sistemleri ile Farklı Alanlarda Doğruluk Analizi

Zübeyir Bilal ÇAKMAK¹, Burak AKPINAR^{1*}, Mahmut Oğuz SELBESOĞLU²

^{1,2} Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

e-posta: zubeyircakmak21@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7109-3249>

Sorumlu yazar e-posta: bakpinar@yildiz.edu.tr*

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-1578>

e-posta: selbesoglu@itu.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1132-3978>

Geliş Tarihi: 02.07.2022

Kabul Tarihi: 18.10.2022

Öz

Anahtar kelimeler

Lidar; Mobil Lidar Sistemi; SLAM; Taşınabilir Lazer Tarama Sistemi; Üç boyutlu modelleme.

Teknolojideki gelişmelere paralel olarak mobil lidar sistemlerinin kullanım alanları günümüzde hızla artmaktadır. Özellikle GNSS ile konum belirlemenin mümkün olmadığı kapalı alanlarda SLAM algoritmalarının sağladığı avantajlar ile haritalama çalışmaları yüksek doğrulukta hızla yapılabilmektedir. Bu çalışmada, geliştirilen bir mobil lidar sistemi ile ağaçlık alan, kapalı alan ve dış mekanda yapılan ölçmeler sonucunda söz konusu alanların üç boyutlu modelleri üretilmiş ve üretilen modellerin doğruluk analizi yapılarak, GNSS ile konumlanmanın mümkün olmadığı durumlarda mobil lidar sistemlerinin doğrulukları araştırılmıştır. Yapılan testler sonucunda geliştirilen mobil lidar sistemi ile ağaçlık alanlar, kapalı alanlar ve dış mekânlarda yapılan çalışmalar için sırasıyla ± 2.1 cm, ± 2.4 cm ve ± 3.0 cm standart sapma değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre sistemin orman envanterinin belirlenmesi çalışmalarında, kapalı ve açık alanlarda yapılacak mimari röleve vb çalışmalarda kullanılabilmesi öngörülmektedir.

Accuracy Assessment of Mobile Lidar System in Different Environments

Abstract

Keywords

Lidar; Mobile Lidar System; SLAM; Simultaneous localization and mapping; 3-dimensional modelling;

Depending on the developments in technology, the usage areas of mobile lidar systems are increasing rapidly today. With the advantages of SLAM algorithms, mapping studies can be performed with high accuracy, especially in areas where positioning is not possible with GNSS. In this study, with a developed mobile lidar system, three-dimensional models of the different areas were produced as a result of measurements made in woodland, indoor and outdoor areas, and the accuracy of the produced models was investigated in cases where positioning with GNSS was not possible. As a result of the tests, ± 2.1 cm, ± 2.4 cm and ± 3.0 cm standard deviation values were obtained, respectively, for the studies carried out in woodland, indoor areas and outdoors with the mobile lidar system developed. According to these results, it is predicted that the system can be used in studies to determine the forest inventory, architectural surveys etc. to be made in indoor and outdoor areas.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

1. Giriş

3 boyutlu yoğun nokta bulutlarına olan ihtiyaç günümüzde gittikçe artmaktadır. Teknolojideki gelişmelere de paralel olarak 3 boyutlu nokta bulutu üreten ölçme sistemleri, harita mühendisliği uygulamalarında, ormanlık alanların ölçümü ve belgelenmesinde, dijital ikiz projelerinde, BIM (Building Information Modelling) standartlarında bina modeli oluşturulmasında, 3 boyutlu sanal tur

çalışmalarında vb. aktif olarak kullanılmaktadır. İhtiyaç duyulan 3 boyutlu yoğun nokta bulutları fotogrametrik yöntemlerle, yersel lazer tarayıcılar ile ve mobil lazer tarama sistemleri (MLS) ile elde edilebilmektedir.

Lazer ışınlarının kullanımı ile araştırma çalışmaları 1960 lı yıllarda atmosfer biliminde ve batimetrik çalışmalarda kullanılmaya başlanmıştır (Hickman

and Hogg 1969). Sonraki yıllarda lidar sistemlerinin ormanlık alanların ölçümünde ve arazi topografyasının belirlenmesinde kullanılmaya başlandığı görülmektedir (Arp and Tranarg 1982). 1990 ların başında yakın kızılötesi ışık kullanan lazer profilleri ile birlikte lazer tarayıcılar ormanlık alanlarda ağaç yüksekliklerinin belirlenmesinde, 1990 ların sonlarında ise hava lazer tarama sistemleri ağaç yüksekliği, meşcere hacmi, ağaç taban alanı gibi bilgilerin elde edilmesinde kullanılmıştır (Nelsoon *et al.* 1988, Harding *et al.* 1994).

2000 li yıllara gelindiğinde ise lidar teknolojilerinin uzay tabanlı sistemlerde de kullanılmaya başlandığı görülmektedir (Lefsk *et al.* 2005). 3 boyutlu nokta bulutlarının her türlü nesneyi farklı ölçeklerde ve detay seviyelerinde temsil etmekteki başarısı nedeniyle günümüzde 3 boyutlu görüntüleme tekniklerinin otonom araçlar, insansız hava araçları, robotlar da dahil olmak üzere endüstriyel, tıbbi, bilimsel vb. birçok alanda kullanılmaya başlandığı görülmektedir (Koide *et al.* 2019, Wang *et al.* 2021, Yang *et al.* 2021). Lidar sistemlerinin taşınabilir hale getirilmesi ile ilgili ilk çalışma ise Glennie (2009) tarafından helikoptere monte edilmiş lazer tarama sistemi ile karşımıza çıkmaktadır. Sonrasında SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algoritmalarındaki gelişmeler ile birlikte taşınabilir lazer tarama sistemleri mobil haritalama sistemlerine doğru dönüşmeye başlamış ve lidar sistemlerinin hareket halindeki bir araca, insansız hava aracına ya da sırt çantasına monte edilmesi ile, hareket halinde, kısa süre içinde ve yüksek çözünürlükte ortamının 3 boyutlu haritaları üretilmeye başlanmıştır (Mossmann and Stiller 2011, Nüchter *et al.* 2007, Sobczak *et al.* 2021).

Haritalama amaçları için kullanılan ticari taşınabilir lazer tarama sistemlerinde genellikle GNSS (Global Navigation and Satellite System) alıcıları ile IMU (Inertial Measurement Unit) sistemleri bulunmaktadır ve bu sistemlerin kullanımı ile geo-referanslanmış, üç boyutlu nokta bulutu verisi elde edilmektedir (Stefano *et al.* 2021). SLAM algoritmalarının sağladığı avantajlar ile de GNSS kullanımının mümkün olmadığı alanlarda, lup

kapatma olarak adlandırılan, ölçüme başlanılan nokta ölçümün bitirilmesi yöntemi ile hataların minimuma indirilerek yüksek çözünürlüklü nokta bulutu verisi elde edilebilmektedir (Cabo *et al.* 2018, Gollob *et al.* 2020).

Bu çalışmada haritalama amaçlı geliştirilen bir taşınabilir lazer tarama sistemi ile ilgili bilgiler verilmiş ve geliştirilen sistem ile ağaçlık alan, kapalı alan ve açık alan olmak üzere üç farklı bölgede test ölçümleri yapılarak sistemin doğruluğu araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında geliştirilen taşınabilir lazer tarama sisteminde kullanılan yazılım ve donanımlar aşağıda ayrı başlıklar altında incelenmiştir.

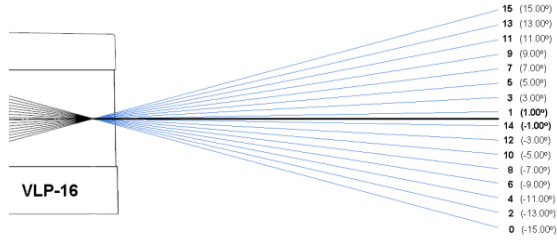
2.1 Taşınabilir Lazer Tarama Sisteminin Bileşenleri

Sistemde lidar sensörü olarak Velodyne VLP-16 kullanılmıştır (Şekil 1).



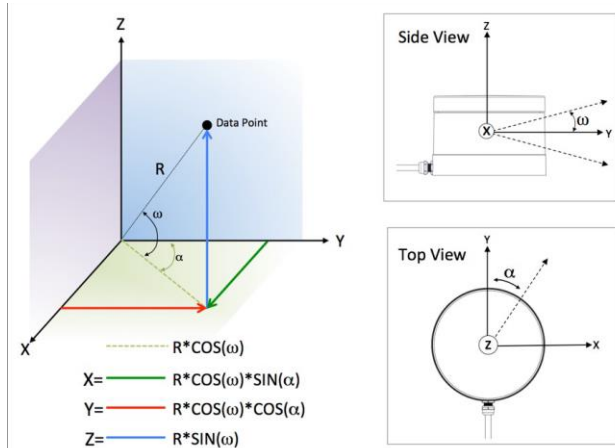
Şekil 1. Velodyne VLP-16 Lidar

Velodyne VLP-16 Lidar sistemi günümüzde sürücüsüz otomobiller, robotlar, insansız hava araçları vb birçok alanda aktif olarak kullanılan bir lidar sistemidir. Velodyne VLP-16 çalışma prensibi, aynı anda gönderilen 16 adet ışın demetinin ölçülen objenin yüzeyinden yansıyan sinyallerin alıcı üniteye geri dönmesi ve gönderilen ve geri dönen sinyalin gidiş-dönüş zamanının ölçülerek, konum belirleme algoritmaları ile objenin koordinatlarının hesaplanması şeklindedir (Şekil 2).



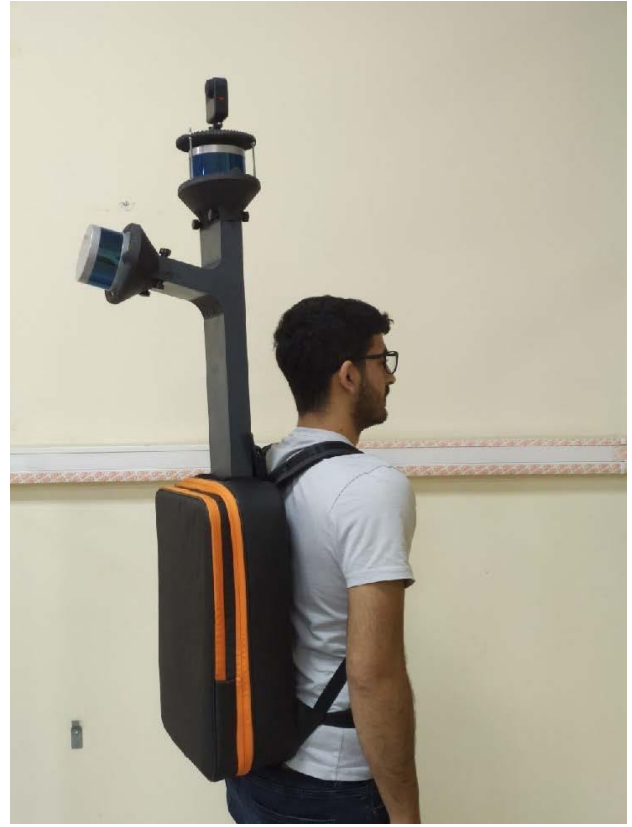
Şekil 2. Velodyne VLP-16 çalışma prensibi (Velodyne Lidar 2019)

Aynı anda gönderilen 16 adet sinyalin lidar sistemi içinde bulunan ayna mekanizması sayesinde döndürülerek dağıtılması ile saniyede 300.000 noktanın ölçümünün yapılması sağlanmaktadır. Ölçülen objenin koordinatlarının belirlenmesi aşamasında Lidar Koordinat Sistemi olarak adlandırılan, başlangıç noktası Lidarın merkezi olan bir koordinat sistemi kullanılmaktadır. Lidar tarafından gönderilen 16 adet çıkış açılarının ve obje ile Lidar arasında ölçülen uzunlukların kullanılması ile obje koordinatları Lidar Koordinat Sisteminde hesaplanabilmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Lidar Koordinat Sisteminde Objeye Koordinatlarının Hesaplanması (Velodyne Lidar 2019)

Geliştirilen sistemde 2 adet Velodyne VLP-16 Lidar sensörü kullanılmış ve sırt çantasına taşınabilir olarak tasarlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Geliştirilen sistemin genel görünümü

2.2 SLAM Algoritmaları

SLAM kavramı eşzamanlı konumlama ve haritalama olarak kullanılmaktadır ve bir robotun ortam haritasını oluşturarak bu haritayı aynı anda konumlama için kullanabileceği bir süreç olarak da tanımlanmaktadır. Hareketli bir lazer tarayıcı ile harita oluşturabilmek için lidarın konumunu bilmek gereklidir ancak lidarın konumunu bilmek için bir haritaya ihtiyaç duyulur. Bu durum robotikte bir ikilem oluşturmaktadır. SLAM bu sorunu eş zamanlı konumlama yaparak bilinmeyen bir ortam haritası oluşturarak çözer (Wang *et al.* 2011). SLAM yöntemi ile oluşturulan ortam haritasının doğruluğu, sistemler kullanılan sensörlere bağlı olduğu gibi aynı zamanda seçilen SLAM algoritması ile de doğrudan ilişkilidir.

Genişletilmiş Kalman Filtreleme Yöntemi ile SLAM (GKF-SLAM): Genişletilmiş Kalman Filtresi ile dinamik bir sistemin durumunun özyinelemeli olarak tahmini mümkün olmaktadır. GKF-SLAM yaklaşımında, robotun konumu, dönüklüğü ve gözlemlenen noktalar GKF kullanılarak tahmin edilir ve durumlar arasında korelasyonlar hesaplanarak

optimum bir tahmin elde edebilmek için elde edilen 1. korelasyonlar korunur. Robotun konumu, dönüklüğü ve gözlemleri bir durum vektörü ve kovaryans matrisi ile temsil edilir.

Robotun durumları $X_r = [x_r, y_r, \phi_r]^T$ olmak üzere, (x_r, y_r) robotun konumunu, ϕ_r robotun dönüklüğünü belirtmektedir. Özelliklerin durumları $X_m = [x_1, y_1, x_1, y_1, \dots]^T$ olmak üzere, (x_j, y_j) j noktasının konumunu temsil etmektedir. Robotun durum vektörü ise $X = [X_r, X_m]^T$ olarak tanımlanır.

Robotun t zamanda ve t zamanına bağlı olarak t+1'inci zamanda oluşturduğu kinematik model ise Eşitlik 1'de tanımlanmıştır.

$$X_r(t+1) = f(X_r(t), u(t)) + w_r(t) \quad (1)$$

Burada $u(t)$ t zamanındaki kontrol ölçüsünü ifade eder. Bu kontrol ölçüsü odometri ya da hız verisi gibi önceden t zamanda hareketi tahmin etmeye yarayan verilere dayanır. $w_r(t)$ ise sıfır ortalamalı ve Q_r kovaryanslı Gauss gürültüsünü ifade eder. f fonksiyonu robotun modeline göre değişkenlik gösteren ve robotu tanımlayan bir fonksiyonu ifade eder. Zamana bağlı durum vektörü Eşitlik 2 de tanımlanmıştır (Bailey et al. 2006).

$$\begin{bmatrix} X_r(t+1) \\ X_m(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(X_r(t), u(t)) \\ X_m(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_r(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Lidardan elde edilen gözlemleri tanımlamak için gözlem modeli oluşturulması gerekir. Gözlem modeli Eşitlik 3 de tanımlanmıştır.

$$z(t) = H(X(t)) + v(t) \quad (3)$$

Burada H fonksiyonu doğrusal olmayan koordinat dönüşümünü ifade eder. $v(t)$ ise $w(t)$ ile korelasyonu olmayan bağımsız bir Gauss gürültüsünü ifade etmektedir. GKF-SLAM durum vektörünü tahmin etmek için ve ilişkili kovaryans matrisini hesaplamak için Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanır. Kovaryans matrisi Eşitlik 4 de tanımlanmıştır.

$$P = \begin{bmatrix} P_{rr} & P_{rm} \\ P_{rm}^T & P_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Kovaryans matrisindeki P_{rr} robotun konum ve dönüklük tahminine, P_{mm} ortam haritasına karşılık gelen alt matrisi ifade eder. P_{rm} ise korelasyon matrisini ifade eder. GKF iki aşamada yinelemeli olarak SLAM problemini çözer;

1. Tüm sistemin durum geçiş modeli kullanılarak robotun mevcut konum ve dönüklükleri ve özellik konumları tahmin edilir. Elde edilen sonuçlar ile kovaryans matrisi hesaplanır.

$$\hat{X}_r(t+1|t) = f(\hat{X}_r(t|t), u(t)) \quad (5)$$

$$\hat{X}_m(t+1|t) = \hat{X}_m(t|t) \quad (6)$$

$$P(t+1|t) = \nabla F_x P(t|t) \nabla F_x^T + Q \quad (7)$$

2. Gözlem modelini kullanarak, durum vektörü ve kovaryans matrisi güncellenir.

$$K(t+1) = P(t+1|t) \nabla H_x^T S(t+1)^{-1} \quad (8)$$

$$S(t+1) = \nabla H_x P(t+1|t) \nabla H_x^T + R \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \hat{X}(t+1|t+1) &= \hat{X}(t+1|t) + \\ K(t+1) [z(t+1) - H(\hat{X}(t+1|t))] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} P(t+1|t+1) &= P(t+1|t) - K(t+1) \\ S(t+1)K(t+1)^T \end{aligned} \quad (11)$$

Grafik Tabanlı SLAM Yaklaşımı: SLAM sorununu ele almak için grafik tabanlı yaklaşımlar da geliştirilmiştir. Robotun pozu ve özellik konumları bir grafik düğümü olarak temsil edilir. Kontrol ölçümleri ve robotun gözlemediği noktaların konumları ilgili düğümler kullanılarak kenarları oluşturur. Robot pozu X_{r0}, \dots, X_{rl} , özellikler s ve durum vektörleri X_{m0}, \dots, X_{ml} olarak tanımlanmıştır. Kontrol ölçümleri ve gözlemler sırasıyla u_k ve z_k olarak tanımlanırsa sonsal olasılıklı SLAM Eşitlik 12 de tanımlanmıştır (Grisetti et al. 2010).

$$p(X_{r(0:l)}, X_{m(1:s)} | z_{1:l}, u_{1:l}) \quad (12)$$

Gözlemlerin koşullu olarak bağımsız olduğu varsayılırsa, sonsal olasılıklar Eşitlik 13 de tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} c p(X_{r0}) \prod_k [p(X_{rk} | X_{r(k-1)}, u_k) * \\ \prod_i p(z_k^i | X_{rk}, X_{mji})] \end{aligned} \quad (13)$$

Formülde c normalleştirmeyi, (X_{r0}) sonsal olasılığı, z_k^i i'inci gözlemi temsil eder.

Her ölçümde ve robotun pozunda Gauss gürültüsü olduğu varsayıldığı için durum geçiş modeli Eşitlik 14 ve 15 de gözlem modeli ise Eşitlik 16 ve 17 de tanımlanmıştır.

$$p(X_{rk} | X_{r(k-1)}, u_k) \quad (14)$$

$$\propto \exp \left\{ -\frac{1}{2} [X_{rk} - f(X_{r(k-1)}, u_k)]^T Q_r^{-1} [X_{rk} - f(X_{r(k-1)}, u_k)] \right\} \quad (15)$$

$$p(z_k | X_{rk}, X_{m(1:s)}) \quad (16)$$

$$\propto \exp \left\{ -\frac{1}{2} [z_k - H(X_{rk}, X_{m(1:s)})]^T R^{-1} [z_k - H(X_{rk}, X_{m(1:s)})] \right\} \quad (17)$$

Eşitlik 15 ve Eşitlik 17 deki Q_r ve R durum ve gözlem gürültülerine karşılık gelen kovaryans matrisleridir. Durum ve gözlem matrisleri yazıldıktan sonra negatif logaritmik sonlu olasılık denklemi Eşitlik 18 de tanımlanmıştır.

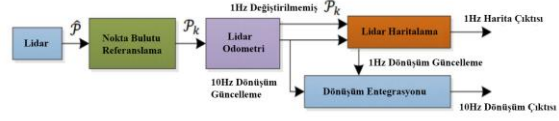
$$\begin{aligned} & -\log p(X_{r(0:l)}, X_{m(1:s)} | z_{1:l}, u_{1:l}) \\ & \propto \sum_k [X_{rk} - f(X_{r(k-1)}, u_k)]^T Q_r^{-1} [X_{rk} - f(X_{r(k-1)}, u_k)] + \sum_k [z_k - H(X_{rk}, X_{m(1:s)})]^T R^{-1} [z_k - H(X_{rk}, X_{m(1:s)})] = \Psi(X) \end{aligned} \quad (18)$$

Burada $X = [X_r^T, X_m^T]^T$ dir. Kontrol ölçülerinin ve robotun yaptığı gözlemlerin olasılığını minimize etmek için 'Maximizing Likelihood' yöntemi kullanılır. Eşitlik 19'daki maliyet fonksiyonu ile en uygun değer hesaplanır (Koide *et al.* 2020).

$$\hat{X} = \underset{X}{\operatorname{argmin}} \Psi(X) \quad (19)$$

Lidar Odometri ve Haritalama (LOAM): LOAM algoritması, düşük odometri kaymasına sahip haritalar oluşturabilmek için geliştirilmiş bir algoritmadır. Geliştirilen yöntemde IMU gibi ek sensör ölçümlerine ihtiyaç duyulmadan düşük odometri kayması ve düşük hesaplama yoğunluğu ile yoğun nokta bulutu elde edilmektedir (Zang and Singh 2014). Hesaplama karmaşıklığını azaltabilmek için ve performans optimizasyonu için LOAM algoritması temel olarak iki ana bölümden oluşur. İlk algoritma LIDAR'ın hızını ve konumunu belirleyebilmek için yüksek frekanslı ancak düşük doğruluklu odometri verisi üretir. İkinci algoritma odometri verisi kullanarak nokta bulutlarını hassas bir şekilde eşler. Her iki algoritma kenar ve düzlemsel alanların noktasal özelliklerini çıkarıp, t+1

zamanda üretilen kenar ve düzlemsel alanları eşlemeyi esas alır. Kullanılan odometri algoritmasında, tespit edilen özellikler kullanılarak LIDAR'ın konumu, dönüklüğü ve hızı tahmin edilir.



Şekil 5. LOAM Algoritması Akış Diyagramı (Zang and Singh 2014).

Şekil 5 de LOAM algoritmasının akış diyagramı gösterilmiştir. Lidardan alınan nokta bulutu verileri P olarak gösterilmiştir. Algoritma başlangıçta bir koordinat sistemi oluşturur ve alınan verileri kaydeder. Buradaki temel sorun lidardan gelen her veri kendine ait lokal koordinat sisteminde geldiğinden dolayı koordinat sistemleri arasında dönüşüm yapılması gerekir. Gelen sensör verilerinin kenar ve düzlemsel özellikleri çıkartılarak eşlenir bu sayede sabit bir koordinat sisteminde haritalama yapılabilir. Birleştirilmiş ve kaydedilmiş nokta bulutları diyagramda P_k olarak tanımlanmıştır. Lidar odometri algoritması lidarın mevcut hızını dönüklüğünü ve konumunu hesaplar. Hesaplanan odometri verisi ile kaydedilmiş nokta bulutlarına (P_k) ek bir düzeltme getirilir. Son olarak 10 Hz hızında ve 1 Hz hızında çalışan iki algoritma entegre edilerek sonuç nokta bulutu elde edilir. Elde edilen nokta bulutlarının konumsal doğruluğunu etkileyen en önemli faktör odometri hesabının doğruluğudur. LOAM algoritmasında kullanılan odometri hesabı özellik çıkarma ve özellik eşleştirme olmak üzere 2 ana başlık altında incelenir.

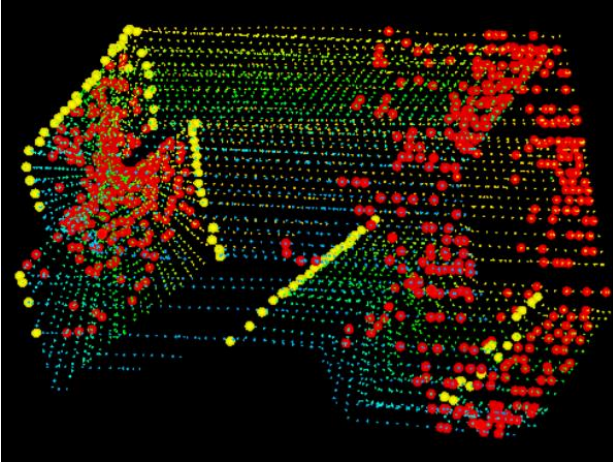
i) Özellik Çıkarma: Hareketli bir lidar sisteminde, lidarın ürettiği her veri farklı bir koordinat sisteminde olacaktır. Hareketli sistemlerde 3 eksende hareket olabileceğinden koordinat dönüşümü yapabilmek için iki yöntem vardır. İlk yöntemde lidarın konumu ve dönüklüğünün bilinmesi gerekir fakat SLAM probleminde olduğu gibi lidarın konumunun belirlenebilmesi için ortam haritasına ihtiyaç duyulur ve bu durum ek sensör verileriyle çözülebilir. İkinci yöntem ise düzlemsel

bölgelerin ve kenarların özelliklerinin çıkartılıp eşleştirilmesine dayanır.

Lidardan alınan nokta bulutunda yüzeyin düzgünlüğü tespit etmek için Eşitlik 20 kullanılır.

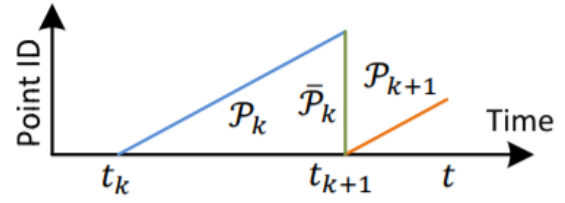
$$c = \frac{1}{|S| \| \bar{X}_{(k,i)}^L \|} \left\| \sum_{j \in S, j \neq i} (X_{(k,i)}^L - X_{(k,j)}^L) \right\| \quad (20)$$

Burada S aynı taramada lidar tarafından alınan nokta kümesini ifade eder. Taramadaki her nokta c değerlerine göre sıralanır. Maksimum c değerine sahip noktalar kenar özelliklerini belirtirken, minimum c değerine sahip noktalar düzlemsel alanları ifade eder. Özellik noktaları 4 alt bölgeye bölünür. Daha sonra kenar özellikleri ve düzlemsel özellikler için belirli bir eşik değeri belirlenir. Her alt bölge maksimum 2 kenar noktası ve 4 düzlemsel nokta sağlayacak şekilde ayarlanır ve belirtilen kriterlere göre özellik noktaları belirlenir (Zang and Singh 2014).



Şekil 6. Nokta bulutundan çıkarılan kenar noktaları (sarı) ve düzlemsel noktaların (kırmızı) bir örneği.

ii) *Özellik Eşleştirme:* Hareketli bir lidarın t_k zamanında üretilen nokta bulutu (P_k) ile t_{k+1} zamanda üretilen nokta bulutu (P_{k+1}) arasında ortak bir alan oluşturulmalıdır. Şekil 7 de görüldüğü gibi P_k ve P_{k+1} nokta bulutları zaman damgaları ile lokal koordinat sistemleri oluşturulur. Bu koordinat sistemleri arasında dönüşümü sağlamak, \widehat{P}_k nokta bulutunu elde edebilmek için iki nokta bulutundaki düzlemsel ve kenar özellikleri eşleştirilir ve ortak koordinat sistemine kaydedilir. Özellikleri eşleyebilmek için iki tarama bölgesinde ortak alanın olması gerekir.



Şekil 7. Zaman damgalı iki LIDAR taramasının koordinat sistemlerinin birleştirilmesi

LOAM algoritmasında, tarama boyunca lidarın mevcut konumunu ve dönüklüğünü hesaplanır, \widehat{P}_k her iterasyon sonunda güncellenir ve tarama sonunda sonuç nokta bulutunu oluşturur. Çıkarılan özellikler eşleştirilirken P_k 'den çıkarılan özellikler ile P_{k+1} 'den çıkarılan özellikler arasındaki mesafe hesaplanır ve çıkan sonuçlara göre noktalar eşleştirilir. Kenarı özelliğini eşleştirebilmek için en az 4 noktaya ihtiyaç duyulur ve kenar özelliklerinin arasındaki mesafe hesaplanırken Eşitlik 21 kullanılır.

$$d_\epsilon = \frac{|\widehat{X}_{(k+1,i)}^L - \widehat{X}_{(k,j)}^L| \times |\widehat{X}_{(k+1,i)}^L - \widehat{X}_{(k,l)}^L|}{|\widehat{X}_{(k,j)}^L - \widehat{X}_{(k,l)}^L|} \quad (21)$$

Düzlemsel özellikleri eşleştirilirken en az 6 noktaya ihtiyaç duyulur ve düzlemsel özelliklerin arasındaki mesafe hesaplanırken Eşitlik 22 kullanılır.

$$d_H = \frac{|(\widehat{X}_{(k+1,i)}^L - \widehat{X}_{(k,j)}^L) \times ((\widehat{X}_{(k,j)}^L - \widehat{X}_{(k,l)}^L) \times (\widehat{X}_{(k,j)}^L - \widehat{X}_{(k,m)}^L))|}{|(\widehat{X}_{(k,j)}^L - \widehat{X}_{(k,l)}^L) \times (\widehat{X}_{(k,j)}^L - \widehat{X}_{(k,m)}^L)|} \quad (22)$$

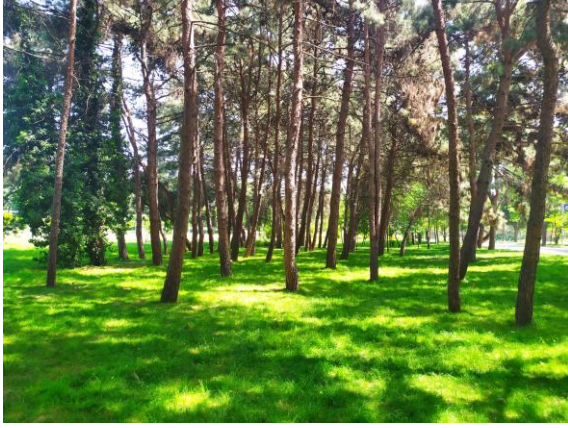
2.3 Çalışma Bölgeleri

Çalışma kapsamında geliştirilen sistemin doğruluk analizleri için Şekil 8 de verilen, kapalı alan (Şekil 8a), açık alan (Şekil 8b) ve ağaçlık alandan (Şekil 8c) oluşan 3 farklı bölge seçilmiştir.

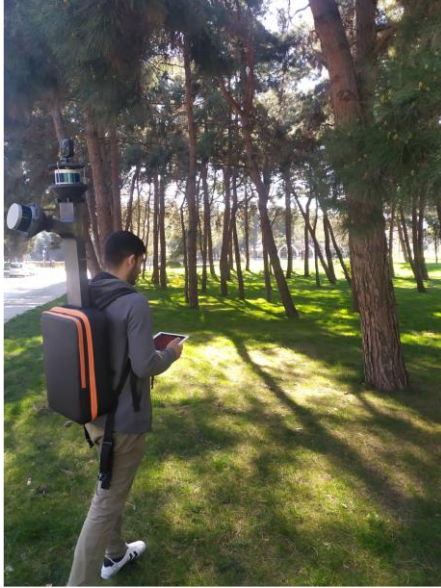


Şekil 8. Çalışma bölgeleri

Sistemin ağaçlık alanda ölçme doğruluğunu belirleyebilmek için Şekil 9 da gösterilen ağaçlık alan, sırt çantasına monte edilen taşınabilir lazer tarama sistemi ile ölçülmüştür (Şekil 10).

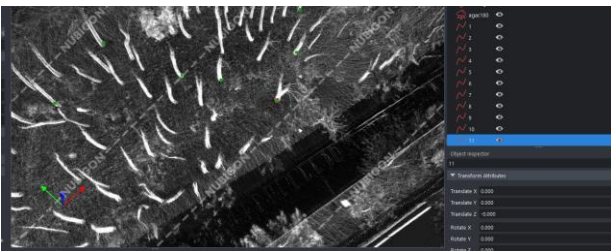


Şekil 9. Test sahası olarak seçilen ağaçlık alan



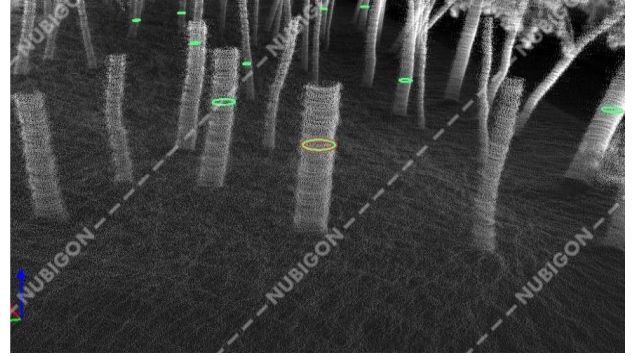
Şekil 10. Ağaçlık alanda yapılan ölçmeler

Şekil 9 da verilen 2800m² alana sahip ağaçlık alanının ölçüm süresi toplam 10 dk sürmüştür ve ölçüm sonucunda Şekil 11 de verilen nokta bulutu elde edilmiştir.



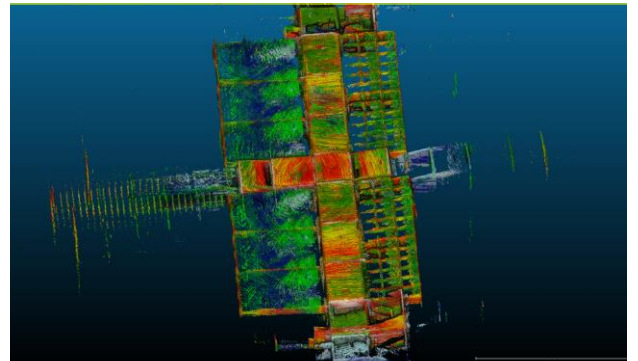
Şekil 11. Ağaçlık alana ait nokta bulutu

Sistemin ağaçlık alanda doğruluğunu belirleyebilmek için nokta bulutunda da bulunan 20 adet ağacın gövdesinin zeminden 1.30m yükseklikteki çevre uzunlukları metre ile ölçülmüş ve söz konusu ağaç gövdelerine ilişkin yarıçap değerleri belirlenmiştir. Seçilen 10 ağacın nokta bulutu verisi üzerinden de yine zeminden 1.30m yükseklikteki çevre uzunlukları ve yarıçap değerleri Nubigon yazılımı denemem sürümü kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 12).



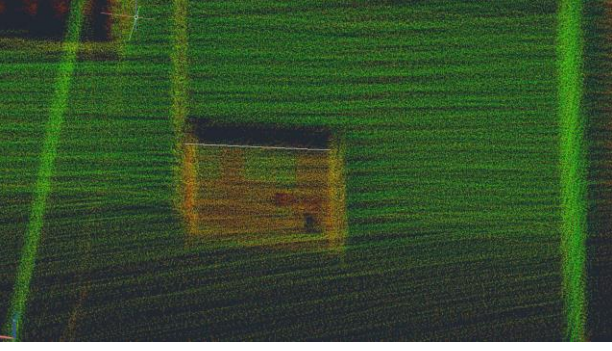
Şekil 12. Nokta bulutu üzerinde ağaç gövde yarıçaplarının belirlenmesi

Ağaçlık alanda yapılan testlerin ardından sistemin bina içi gibi kapalı alanlardaki ölçme doğruluğunun belirlenebilmesi amacıyla Şekil 8 de işaretlenen, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi D Blok da test çalışmaları yapılmıştır. Toplam 5 dakika süren ölçme işlemi sonucunda söz konusu alana ilişkin elde edilen nokta bulutu verisi Şekil 13 de verilmiştir.

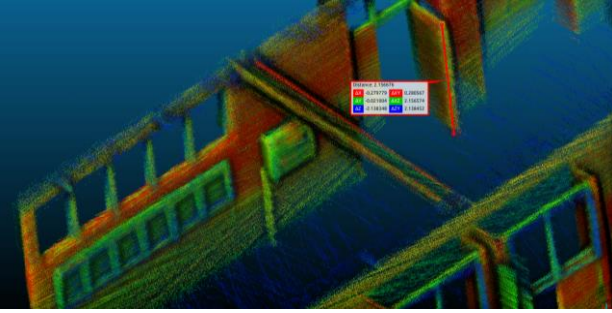


Şekil 13. Kapalı alana ilişkin nokta bulutu verisi

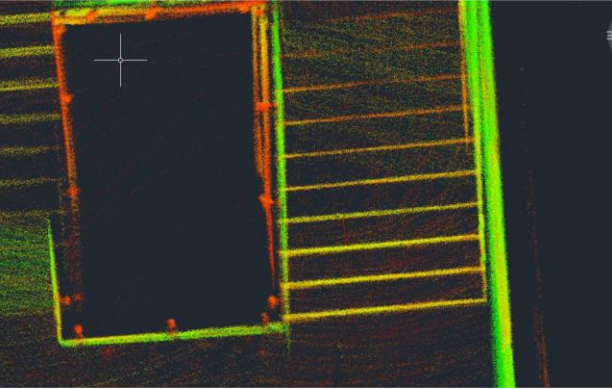
Sistemin kapalı alanda doğruluğunu belirleyebilmek için, Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16 da verilen sırasıyla duvar panosu, kapı ve merdiven gibi detayların boyutları sahada metre ile ölçülmüş ve nokta bulutu verisinden elde edilen değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 14. Nokta bulutu verisinde duvar panosu detay görünümü

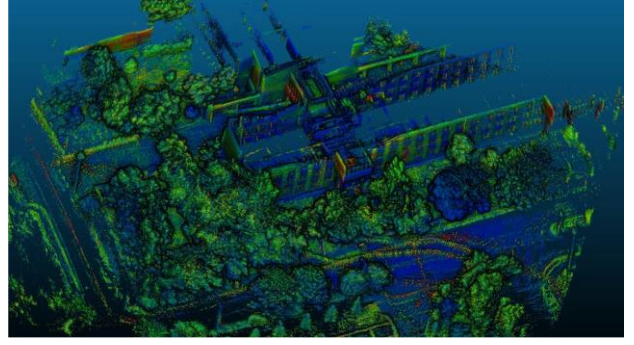


Şekil 15. Nokta bulutu verisinde kapı detay görünümü



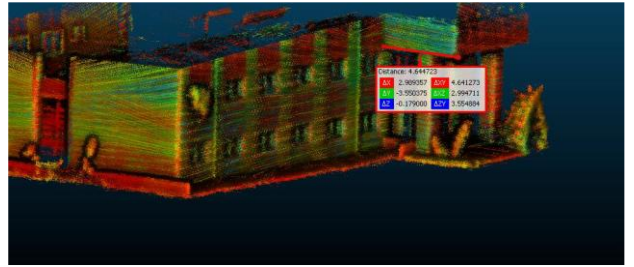
Şekil 16. Nokta bulutu üzerinde kapı detay görünümü

Ağaçlık ve kapalı alanlarda yapılan testlerin ardından sistemin açık alanlardaki performansının belirlenebilmesi için Şekil 8 de işaretlenen, Şekil 17 de ise nokta bulutu verilen, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi çevresinde 15 dakika süren test çalışmaları yapılmıştır.

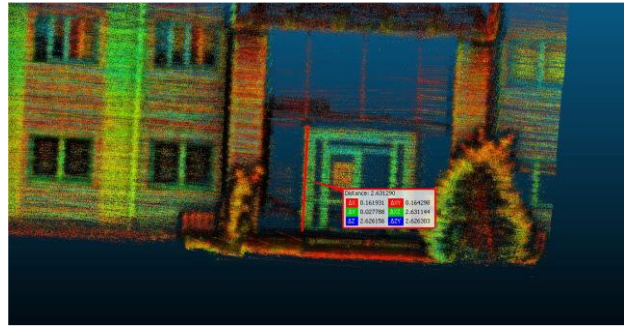


Şekil 17. Açık alanda elde edilen nokta bulutu verisi

Sistemin açık alanda, dış mekanda doğruluğunu belirleyebilmek için Şekil 18 ve Şekil 19 da verilen, farklı boyutlarda cephe elemanları sahada yersel jeodezik yöntemler ile ölçülmüş ve nokta bulutu verisinden elde edilen değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 18. Açık alanda kontrol ölçüleri-1



Şekil 19. Açık alanda kontrol ölçüleri-2

3. Bulgular

Ağaçlık alanda yapılan test ölçmeleri sonucunda sistemin ağaçlık alanlarda doğruluğunun belirlenebilmesi için 20 adet ağacın zeminden 1.30 m yükseklikteki gövde yarıçaplarının sahada metre ile ölçüm yapılarak bu veriler bilinen değerler olarak ele alınmış ve nokta bulutundan elde edilen gövde yarıçapları ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 1 de ağaçlık alanda yapılan ölçme sonuçları verilmiştir.

Çizelge 1. Ağaçlık alan ölçüm sonuçları.

Ağaç No	Lidar Yarıçap (cm)	Bilinen Yarıçap (cm)	Fark (cm)
1	11.0	14.0	-3.0
2	13.3	11.0	2.3
3	13.5	15.0	-1.5
4	16.9	16.0	0.9
5	18.5	20.0	-1.5
6	18.7	19.0	-0.3
7	19.2	19.0	0.2
8	19.5	22.0	-2.5
9	19.5	18.0	1.5
10	19.6	19.0	0.6
11	19.8	16.0	3.8
12	20.2	26.0	-5.8
13	20.5	21.0	-0.5
14	21.2	21.0	0.2
15	22.5	23.0	-0.5
16	22.7	21.0	1.7
17	24.2	28.0	-3.8
18	25.6	25.0	0.6
19	26.6	27.0	-0.4
20	26.9	27.0	-0.1
Standart Sapma (cm)			2.1

Kapalı alanda yapılan test ölçmeleri sonucunda sistemin kapalı alanlarda doğruluğunun belirlenebilmesi için Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16 da verilen sırasıyla duvar panosu, kapı ve merdiven gibi toplam 20 adet detayın boyutları sahada metre ile ölçülerek bu veriler bilinen olarak ele alınmış ve nokta bulutu verisinden elde edilen değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 2 de kapalı alanda yapılan ölçme sonuçları verilmiştir.

Çizelge 2. Kapalı alan ölçüm sonuçları.

Ölçü No	Lidar Uzunluk (m)	Bilinen Uzunluk (m)	Fark (m)
1	0.062	0.030	-0.032
2	0.062	0.040	-0.022
3	0.151	0.175	0.024
4	0.170	0.190	0.020
5	0.250	0.235	-0.015
6	0.283	0.300	0.017
7	0.321	0.303	-0.018
8	0.480	0.450	-0.030
9	0.579	0.563	-0.016
10	0.677	0.655	-0.022
11	0.747	0.780	0.033
12	0.838	0.800	-0.038
13	0.840	0.820	-0.020
14	1.076	1.093	0.017
15	1.119	1.093	-0.026
16	1.184	1.130	-0.054
17	1.249	1.205	-0.044
18	1.340	1.310	-0.030
19	2.152	2.140	-0.012
20	2.310	2.280	-0.030
Standart Sapma (m)			0.024

Açık alanda yapılan test ölçmeleri sonucunda sistemin açık alanlarda doğruluğunun belirlenebilmesi için Şekil 18 ve Şekil 19 da örnek

olarak verilen toplam 20 adet detayın boyutları sahada ölçülerek bu veriler bilinen olarak ele alınmış ve nokta bulutu verisinden elde edilen değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 3 de açık alanda yapılan ölçme sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3. Açık alan ölçüm sonuçları.

Ölçü No	Lidar Uzunluk (m)	Bilinen Uzunluk (m)	Fark (m)
1	0.083	0.080	0.003
2	0.090	0.130	-0.040
3	0.196	0.180	0.016
4	0.705	0.760	-0.055
5	0.706	0.745	-0.039
6	0.741	0.730	0.011
7	0.746	0.740	0.006
8	1.287	1.290	-0.003
9	1.288	1.290	-0.002
10	1.310	1.290	0.020
11	1.677	1.700	-0.023
12	1.680	1.700	-0.020
13	1.729	1.720	0.009
14	1.745	1.720	0.025
15	2.172	2.160	0.012
16	2.631	2.670	-0.039
17	2.711	2.770	-0.059
18	4.645	4.600	0.045
19	15.874	15.840	0.034
20	17.975	18.000	-0.025
Standart Sapma (m)			0.030

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında geliştirilen bir taşınabilir lazer tarama sisteminin farklı alanlarda doğruluğunu ve kullanılabilirliğini belirleyebilmek için ağaçlık alan, kapalı alan ve açık alandan oluşan 3 farklı bölgede test ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sistemin ağaçlık alanlardaki doğruluğunu belirleyebilmek için seçilen 20 adet farklı ağacın zeminden 1.30 m yükseklikteki çevre uzunlukları metre ile ölçülmüş ve bu veriden ağaç gövde yarıçapları hesaplanmıştır. Bununla birlikte sistem ile üretilen 3 boyutlu nokta bulutu verisi üzerinden de aynı ağaçların gövde yarıçapları hesaplanmıştır. Metre ile elde edilen gövde yarıçaplarının bilinen olarak alınması ile her bir ağaç için fark değerleri elde edilmiştir. 20 ağaç için hesaplanan fark değerlerinin standart sapması 2.1 cm olarak belirlenmiştir. Bu değer sistemin ağaçlık alanda doğruluğu olarak ele alınabilir. Toplam 2800m² lik alanın taşınabilir lazer tarama sistemi ile ölçümü ve nokta bulutunun elde edilmesi için harcanan süre toplam 10dk dır. Sistemin süre açısından sağlayacağı avantajı belirleyebilmek için aynı alanın yersel lazer tarayıcı ile ölçümü için

harcanması gereken minimum süre 60 dk olarak hesaplanmıştır.

Sistemin kapalı alanların ölçümündeki doğruluğunu belirleyebilmek için ise kapalı alana ilişkin nokta bulutu verisi üzerinde farklı boyutlarda detaylar seçilerek sahada metre ile ölçülmüş ve bu verilerin bilinen olarak alınmasıyla kapalı alan için 20 farklı detay uzunluğunun farkları hesaplanarak Çizelge 2 de verilmiştir. Kapalı alanda 20 farklı detay için hesaplanan fark değerlerinin standart sapması 2.4 cm olarak belirlenmiştir. Geliştirilen sistem ile söz konusu kapalı alanın ölçümü 5 dk sürmüştür. Aynı alanında yersel lazer tarayıcı ile ölçümü için gereken minimum süre 20 dk olarak hesaplanmıştır.

Yine sistemin açık alanlardaki doğruluğunu belirleyebilmek için 20 farklı detay belirlenerek uzunlukları klasik yersel yöntemler ile belirlenmiş ve aynı detaylara ilişkin nokta bulutundan hesaplanan uzunlukları arasındaki farklar hesaplanarak Çizelge 3 de verilmiştir. Açık alanda 20 farklı detay için yapılan çalışma sonucunda farkların standart sapması 3.0cm olarak belirlenmiştir. Söz konusu alanın geliştirilen sistem ile ölçümü 15 dk sürmüştür. Aynı alanın yersel lazer tarayıcı ile ölçümü için gereken minimum süre 45dk olarak hesaplanmıştır.

Liang *et al.* (2014) de yapılan çalışmada mobil lazer tarama sistemi ile 0.4ha lık ağaçlık alanda yapılan ölçümler sonucunda sistem ile elde edilen ağaç gövde yarıçaplarının doğruluğu 2.36cm olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde Pierzchala *et al.* (2018) de yaklaşık 900m² lik alanda IMU ve GNSS donanımlarını da içeren bir mobil lidar sistemi ile yapılan ölçüm sonucunda belirlenen ağaç gövde yarıçaplarının doğruluğu 2.38cm olarak hesaplanmış ve sistemin ormanlık alanların haritalarının üretimi için gereken doğruluğu sağladığı ifade edilmiştir. Sepasgozar *et al.* (2014) de ise elde taşınabilir mobil lidar sistemi ile kapalı alanda yapılan çalışma sonrasında farklı boyutlarda detaylar için yapılan kontrollere göre sistemin doğruluğu 3.0cm olarak belirlenmiş ve bu doğruluk değerinin bina modellerinin hızlı bir şekilde çıkarılmasında yeterli olacağı ifade edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen doğruluk değerlerinin literatürdeki çalışmalar ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte bu çalışmada geliştirilen sistemde GNSS ve IMU donanımları kullanılmamıştır. Sisteme GNSS in eklenmesi ile global anlamda geo-referanslanmış nokta bulutu verisinin elde edilebileceği öngörülmektedir. Yine ölçme sistemin üç eksendeki anlık dönüklüklerini ölçebilen IMU donanımı ile sistemin desteklenmesi durumunda SLAM algoritmalarındaki belirsizliklerin ortadan kalkacağı ve buna bağlı olarak elde edilen 3 boyutlu nokta bulutunun doğruluğunun artacağı değerlendirilmektedir.

Elde edilen doğruluk değerleri irdelendiğinde sistemin ormanlık alanlarda yapılacak ağaç rölövesi çalışmalarında kullanılabileceği, aynı zamanda süre ve buna bağlı olarak klasik yöntemlere göre maliyet avantajı sağlayacağı görülmektedir. Benzer şekilde kapalı alan ölçümleri sonucunda elde edilen doğruluk değerleri incelendiğinde de sistemin özellikle mimari plan ve kesit belirleme çalışmalarında kullanılabileceği, zaman olarak da klasik yöntemlere göre önemli avantaj sağlayacağı görülmektedir. Açık alanda yapılan test çalışmalarından elde edilen doğruluk değerlerine göre de sistemin halihazır harita üretim çalışmalarında, kadastro yenileme çalışmalarında, arazi modelleme çalışmalarında vb. çalışmalarda zaman açısından klasik yöntemlere sağladığı avantaj ile kullanılabileceği görülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi aşamasında sağladığı donanım desteği için BeGeo Yazılım Teknolojileri A.Ş.' ne teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

- Arp, H. and Tranarg, C., 1982. Mapping in tropical forests: a new approach using the laser APR [Airborne Profile Recorder]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **48**.
- Bailey, T. Nieto, J. Guivant, J. Stevens, M. Nebot, E. 2006. Consistency of the EKF-SLAM Algorithm, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and*

- Systems, 09-15 October 2006, Beijing, China, doi: 10.1109/IROS.2006.281644.
- Cabo, C. Del Pozo, S. Rodriuez-Gonzalvez, P. Ordonez, C. Gonzalez-Aguilera, D., 2018. Comparing terrestrial laser scanning (TLS) and wearable laser scanning (WLS) for individual tree modeling at plot level. *Remote Sensing*, **10(4)**, 1-16, doi: 10.3390/rs10040540.
- Glennie, C., 2009. Kinematic terrestrial light-detection and ranging system for scanning. *Transportation research record*, **2105(1)**, 135–141, doi: 10.3141/2105-17.
- Gollob, C. Ritter, T. Nothdurft, A., 2020. Forest inventory with long range and high-speed personal laser scanning (PLS) and simultaneous localization and mapping (SLAM) technology. *Remote Sensing*, **12(9)**, 1-43, doi: 10.3390/rs12091509.
- Grisetti, G. Kümmerle, R. Stachniss, C. Burgard, W. A., 2010. Tutorial on Graph-Based SLAM. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, **2**, 31–43, doi: 10.1109/MITS.2010.939925.
- Harding, D.J. Bufton, J.L. Frawley, J.J., 1994. Satellite laser altimetry of terrestrial topography: vertical accuracy as a function of surface slope, roughness, and cloud cover. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **32**, 329-339, doi: 10.1109/36.295048.
- Hickman, G.D. and Hogg, J.E., 1969. Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements. *Remote Sensing of Environment*, **1**, 47-58, doi: 10.1016/S0034-4257(69)90088-1
- Koide, K. Miura, J. Menegatti, E., 2019. A portable three-dimensional LIDARbased system for long-term and widearea people behavior measurement. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **16**, 1-16, doi: 10.1177/1729881419841532.
- Koide, K. Miura, J. Yokozuka, M. Oishi, S. Banno, A. 2020. Interactive 3D Graph SLAM for Map Correction. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **6**, 40–47, doi:10.1109/LRA.2020.3028828.
- Lefsky, M.A. Harding, D.J. Keller, M. Cohen, W.B. Carabajal, C.C. Espirito-Santo, F.D.B. Hunter, M.O. Oliveira, R. 2005. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophysical research letters*, **32**, 1-4, doi: 0.1029/2005GL023971.
- Liang, X. Hyyppa, J. Kukko, A. Kaartinen, H. Jaakkola, A. Yu, X. 2014. The Use of a Mobile Laser Scanning System for Mapping Large Forest Plots, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **11**, 1504-1508, doi: 10.1109/LGRS.2013.2297418.
- Mossmann, F. and Stiller, C., 2011. Velodyne SLAM. *In Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 5–9 June 2011, Baden-Baden, Germany.
- Nelson, R. Krabill, W. Tonelli, J., 1988. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, **24**, 247-267, doi: 10.1016/0034-4257(88)90028-4.
- Nüchter, A. Lingemaan, K. Hertzberg, J. Surmann, H., 2007. 6D SLAM—3D Mapping Outdoor Environments. *Journal of Field Robotics*, **24**, 699–722, doi: 10.1002/rob.20209.
- Pierzchala, M. Giguere, P. Astrup, R., 2018. Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM, *Computers and Electronics in Agriculture*, **145**, 217-225, doi: 0.1016/j.compag.2017.12.034.
- Sepasgozar, S. Lim, S. Shirwzhan, S., 2014. Implementation of Rapid As-built Building Information Modeling Using Mobile LiDAR, *Construction Research Congress 2014*, Atlanta, USA, doi: 10.1061/9780784413517.022.
- Sobczak, L. Filus, K. Domanski, A. Domanska, J., 2021. LiDAR Point Cloud Generation for SLAM Algorithm Evaluation. *Sensors*, **21**, 1-21, doi: 10.3390/s21103313.
- Stefano, F.D. Chiappini, S. Gorreja, A. Balestra, M. Pierdicca, R., 2021. Mobile 3D scan LiDAR: a literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **12(1)**, 2387-2429, doi: 10.1080/19475705.2021.1964617.
- Velodyne LiDAR. 2019. VLP-16 User Manual, <https://velodynelidar.com/wpcontent/uploads/2019/12/63-9243-Rev-E-VLP-16-User-Manual>. (Online, 2019).
- Wang, Z. Huang, S. Dissanayake, G., 2011. Simultaneous Localization and Mapping Exactly Sparse Information Filters, *New Frontiers in Robotics*; World Scientific: Singapore, **3**. ISBN: 978-981-4350-31-0, doi: 10.1142/8145.
- Wang, K. Zhou, J. Zhang, W. Zhang, B., 2021. Mobile LiDAR Scanning System Combined with Canopy Morphology Extracting Methods for Tree Crown Parameters Evaluation in Orchards. *Sensors*, **21**, 1-15, doi:10.3390/s21020339.
- Yang, J.C. Lin, C.J. You, B.Y. Yan, Y.L. Cheng, T.H., 2021. RTLIO: Real-Time LiDAR-Inertial Odometry and Mapping for UAVs. *Sensors*, **21**, 1-21, doi: 10.3390/s21123955.

Zhang, J. Singh, S., 2017. Low-drift and real-time lidar odometry and mapping. *Autonomous Robots*, **41**, 401–416, doi: 10.1007/s10514-016-9548-2.