Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 23, Sayı 3, 759-769, 2019

Süleyman Demirel University
Journal of Natural and Applied Sciences
Volume 23, Issue 3, 759-769, 2019

DOI: 10.19113/sdufenbed.527888

Otonom Araçlarda Navigasyon İçin Düşük Maliyetli, Taşınabilir ve 360^0 Görüş Alanına Sahip Yeni Bir 3B LIDAR Sisteminin Geliştirilmesi

Ahmet KAĞIZMAN[*1], **Erdinç ALTUĞ**[2]

[1*]İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 34437, İstanbul
[2] İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34437, İstanbul

(Alınış / Received: 15.02.2019, Kabul / Accepted: 09.10.2019, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2019)

Anahtar Kelimeler
3B LIDAR,
ROS,
Nokta bulutu,
Navigasyon,
Lazer tarayıcı,
Engelden kaçınma

Özet: Son yıllarda otonom araçlar üzerinde yapılan çalışmalar gittikçe artmaktadır ve özellikle engel tespiti, haritalama, rota planlama, navigasyon gibi birçok alanda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada ise aracın otonomluğuna ciddi katkı sağlayan yüksek maliyetli ve büyük boyutlu 3B LIDAR'lar yerine standart 2B lazer tarayıcı kullanılarak çok daha düşük maliyetli, portatif ve 360 derece görüş alanına sahip yeni bir 3B LIDAR sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sistemin elde edilmesi temel olarak 2B lazer tarayıcının belli bir eksen etrafında dönmesine ve bu lazer tarayıcı tarafından yayınlanan mesafe verilerinin 3B Kartezyen nokta kümesi olarak adlandırılan nokta bulutu verilerine dönüştürülmesine dayanır. 3B LIDAR sistemi bir bütün olarak incelendiğinde istenen verimde çalışabilmesi için içerdiği bileşenlerin koordineli olarak çalışması gerekir. Bu nedenle bu yazılım ve donanım haberleşmesini yönetmek için bilgisayar tarafından kontrol edilebilen bir yazılım platformu olan ROS (Robot İşletim Sistemi) kullanılmıştır. Ayrıca, sisteme hareket özelliği kazandırmak için bir mobil araç tasarlandı ve LIDAR sisteminin bu mobil araca entegre edilmesiyle yeni sistem navigasyon işlemine hazır hale getirildi. Navigasyon için aracı bir noktadan diğerine otonom olarak hareket ettirmek ve hareket esnasında meydana gelebilecek tüm engellerden kaçınmak için Gezinme Yığını olarak adlandırılan bir dizi algoritma ve ROS düğümleri kullanıldı. Yapılan deneyler, geliştirilen 3B LIDAR sisteminin otonom araçlarda tüm yönlü olarak nesne tespiti için ekonomik ve etkili bir çözüm olduğunu göstermektedir. Yapılan navigasyon testleri de geliştirilen sistemin kapalı ortamlarda engel tespiti ve engelden kaçınma gibi görevlerin yerine getirilmesinde başarılı olduğunu göstermektedir.

Development of A Low-Cost, Portable and 360^0 Field of View New 3D LIDAR System for The Navigation of Autonomous Vehicles

Keywords
3D LIDAR,
ROS,
Point cloud,
Navigation,
Laser scanner,
Obstacle avoidance

Abstract: In recent years, studies on autonomous vehicles have been progressively increasing and especially, intensive works have been carried out in many areas like obstacle detection, mapping, localization, path planning, navigation, and obstacle avoidance. In this study, it was aimed to develop a new 3D LIDAR system with much lower cost, portable and 360-degree field of view by using standard 2D laser scanner instead of high-costing and large dimension 3D LIDARs which contribute seriously to the autonomy of the vehicle. The acquisition of a new 3D LIDAR system is mainly based on the rotation of the 2D laser scanner about certain axis and the conversion of the distance data published by this laser scanner into point cloud data, which is called as the 3D Cartesian point cluster. When the 3D LIDAR system is examined as a whole, it needs to communicate in coordinately the components it contains in order to operate at the desired efficiency. Therefore, in order to manage this software and hardware communication, ROS (Robot Operating System), which is a software platform that can be controlled by the computer, was used. In addition, a mobile vehicle was designed to be gained motion feature to the system. The 3D LIDAR platform was integrated into the designed mobile vehicle and the new system was made ready for navigation. For navigation, a number of algorithm and ROS nodes, called Navigation Stack, were used to autonomously move the vehicle from one point to another and avoid all obstacles that may occur during movement. Experiments show that the developed 3D LIDAR system provides an economical and effective solution for all directional object detection in autonomous vehicles. The navigation tests also show that the developed system is successful in performing tasks such as obstacle detection and obstacle avoidance in indoor environments.

*İlgili yazar: kagizman@itu.edu.tr

1. Giriş

Araçlarda tam otonomluğun sağlanabilmesi için birbirleriyle uyumlu bir şekilde çalışan birçok algılayıcıya ihtiyaç vardır. Bu algılayıcılar sayesinde otonom araç 360^0'lik bir açıda çevresi hakkında kapsamlı bir bilgiye sahip olur ve bu çevresel bilgiler ışığında engelleri tespit edebilir. Ayrıca bu algılayıcılar kullanılarak aracın dünya üzerinde bulunduğu konumu, hızı, direksiyon pozisyonu, fren durumu ve bulunduğu konumdan ne kadar uzakta olduğuyla alakalı bilgiler de elde edilebilir. Bu yüzden otonom araçlar kamera, LIDAR, Radar gibi birçok algılayıcıyla donatılmıştır. Bu algılayıcılardan biri olan ve aracın otonomluğuna büyük katkı sağlayan LIDAR, lazer ışığını kullanarak insan, yol işaretleri veya araç ayırt etmeksizin bütün engelleri belli bir mesafe aralığında tespit edebilen, bulunduğu çevrenin yüksek çözünürlüklü 3 boyutlu haritasını çıkarabilen, hızlı ve yüksek doğruluk oranına sahip bir uzaktan algılama teknolojisidir. Bu algılayıcıyı diğerlerinden ayıran en önemli özelliği nesneleri 3 boyutlu olarak daha hassas bir şekilde tanımlayabilmesi ve konumlarını daha net bir şekilde algılayabilmesidir. Bu nedenle iyi bir LIDAR otonom araçlar için oldukça önemli bir yere sahiptir. 3B lazer tarayıcı olarak da adlandırılan bu algılayıcı, otonom veya mobil araçlarda engel tespiti [1-3], çarpışmadan veya engelden kaçınma [4-5], eş zamanlı konum tespiti ve haritalama [6-7], ve navigasyon [8-10] gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Fakat bu tarayıcıların kullanıldığı çalışmalar oldukça maliyetlidir. Ayrıca, kullanılan bazı 3B lazer tarayıcıların boyutları ve ağırlıkları da oldukça büyüktür. Örneğin, Google firmasının otonom araç çalışmalarında kullandığı LIDAR sistemi 75000$ değerinde ve kontrol mekanizmalarıyla birlikte yaklaşık 80 kg ağırlığındadır [11]. Belirtilen nedenlerden dolayı birçok araştırmacı çalışmalarında standart 2B lazer tarayıcıları bir eyleyici yardımıyla belli bir eksen etrafında döndürerek ve elde edilen mesafe verilerini nokta bulutu verilerine dönüştürerek kendi 3B lazer tarayıcılarını oluşturmuşlardır [12-15].

Bu çalışmada, belirtilen çalışmalardan farklı olarak daha ekonomik, portatif ve hem kara hem de hava araçlarında kullanılabilecek düzeyde yeni bir 3B LIDAR sistemi tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan sistemin ek bilgisayar kullanımı gerektirmemesi de yapılan çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran özelliklerdendir. Yani, tasarlanan sistemde bilgisayarla karşılaştırıldığında oldukça küçük ve en az bilgisayar kadar yüksek performansa sahip Jetson TX1 adında geliştirme kartı kullanılmış ve sistem daha portatif hale getirilmiştir.

Bu çalışmada 3B LIDAR sistemini yüksek verimlilik ve güvenilirlikte çalıştırmak için ROS (Robot Operating System) adı verilen bir yazılım platformu kullanılmıştır [16]. Ayrıca eyleyici olarak ROS platformunda hazır kütüphanesi bulunan Servo motor yerine sistemin çalışma hızını arttırmak amacıyla Enkoderli DC motor kullanılmıştır [17-20]. Servo kullanıldığında ROS-Servo haberleşmesi Servo motorun ROS platformundan yayınlanan açı verisine abone olmasıyla sağlanmaktadır. Fakat aynı yöntem ROS platformunda hazır kütüphanesi olmayan Enkoderli DC motor için uygulandığında ROS'dan gelen açı ile Enkoderden gelen açı eşleştirilememiştir. Bu nedenle ROS-Enkoderli DC motor haberleşmesinde farklı bir yöntem uygulanmıştır [20].

Tasarlanan sistem, önce LIDAR'ın 3B tarama yeteneklerini test etmek ve sabit bir ortamda en yakın engelin mesafe ve açısını tespit etmek için otonom bir iç ortam golf aracına entegre edildi. Daha sonra sisteme hareket kazandırmak ve navigasyon işlemlerini gerçekleştirmek için diferansiyel sürüş modeline sahip ve ortadaki iki tekerinde Enkoderli DC motor bulunan bir mobil araç tasarlandı ve geliştirilen sistem bu mobil araca entegre edildi. İç ortam golf aracı ve mobil araç şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Otonom iç ortam golf aracı ve mobil araç

Öte yandan, mobil araç ile navigasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle ROS platformunda araçtaki sensörlerden gelen veriler kullanılarak aracın bulunduğu ortamın haritasının oluşturulması gerekir. Ortamın haritası olmadan navigasyon işlemi gerçekleştirilemez. Mobil aracın bulunduğu ortamın bir temsili olarak ifade edilen ve çevre hakkında bilgi veren harita, aracın bulunduğu konumdan başka bir konuma doğru hareket etmesi veya bir yerden bir nesneyi alıp başka bir yere götürmesi gibi eylemleri gerçekleştirebilmesi için temel bir ihtiyaçtır. Fakat iyi bir navigasyon için aracın sadece çevresi hakkında bilgi sahibi olması yeterli değildir. Aynı zamanda, yapılmak istenen görevi yerine getirebilmesi için haritaya göre hangi konumda ve hangi yönde olduğunu bilmesi gerekir. Yerelleştirme olarak bilinen bu durum aracın oluşturulan haritaya göre konumunu tahmin etme işlemi olarak ifade edilir. Haritalama ve yerelleştirme işlemini gerçekleştirdikten sonra aracın nereye ve nasıl gitmesini söyleyecek bir sisteme ihtiyaç vardır. Yol planlama olarak adlandırılan bu sistem temel olarak aracın mevcut yerini ve gitmek istediği konumu girdi olarak alır ve belirlenen noktaya ulaşmayı sağlayan en iyi ve en hızlı yolu çıktı olarak

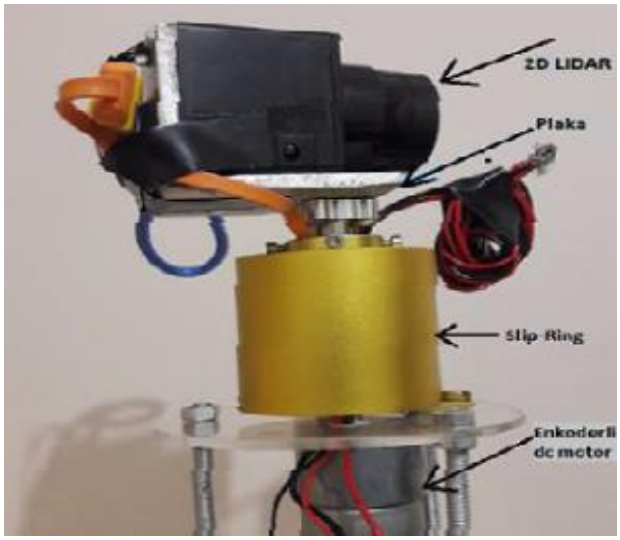
verir. Bu yol planlaması sayesinde araç belirlenen noktaya en hızlı ve en doğru şekilde gider. Bu işlemler gerçekleştirildikten sonra kullanılan ROS navigasyon yığını sayesinde aracın, odometri (IMU ve Enkoder) ve lazer tarama verileri kullanılarak engellere çarpmadan belirlenen hedefe ulaşması sağlanmıştır.

Bu makale aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir. Bir sonraki bölümde yeni 3B LIDAR sistemi ve mobil araç sisteminin tasarımı açıklanmaktadır. Bölüm 3'te AB lazer tarayıcıdan 3 boyutlu nokta bulutu görüntüsü elde etme aşamaları ve tasarlanan mobil araçla gerçekleştirilen navigasyon işlemleri ele alınmaktadır. Deneyler Bölüm 4'te anlatılmaktadır. Sonuçlar ve gelecekteki çalışmalar ise Bölüm 5'te verilmektedir.

2. Sistem Tasarımı

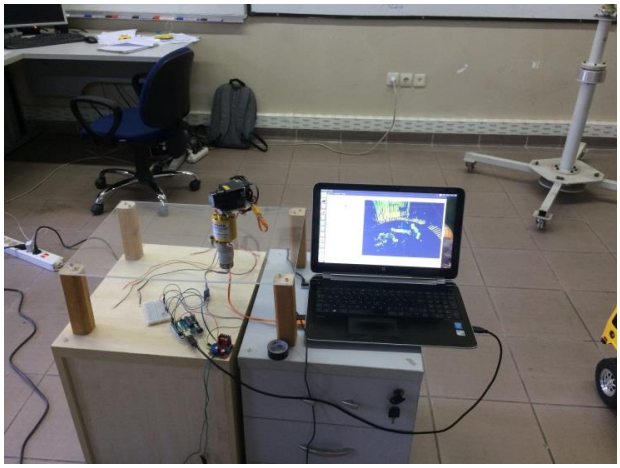
2.1. 3B LIDAR sistemi tasarımı

Bu bölümde hem otonom araçlarda hem de mobil araçlarda uygulanmak üzere çevrenin 3 boyutlu geometrik görüntüsünü elde edebilen bir sensör sistemi tasarlanmıştır. Bu 3 boyutlu görüntünün elde edilebilmesi için temel olarak uçuş süresi ölçüm prensibine göre çalışan standart 2B lazer tarayıcıya ve bu lazer tarayıcıyı belli bir eksende döndürecek mekanik bir dönme elemanına ihtiyaç vardır. Tarayıcıyı döndürmek için Servo motor veya DC motor gibi mekanik eyleyiciler kullanılabilir. Bu çalışmada lazer tarayıcı olarak, kısa mesafe (5.6 metreye kadar) iç ortam sensörü olan Hokuyo-URG-04LX-UG01, eyleyici olarak ise Servo motor yerine sistemin tarama hızını arttırmak için yüksek çözünürlüklü Enkoderli DC motor kullanılmıştır. Farklı tarama düzlemleri ve farklı dönme eksenleri farklı görüş alanlarının oluşmasına sebebiyet verdiği için, lazer tarayıcı ve motorun kombinasyonu sistemde oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada dört faklı tarama metodundan biri olan sapma üst taraması (Yawing scan top) metoduna göre kombinasyon sağlanmıştır. Bu metoda göre tarama düzlemi olarak dikey tarama düzlemi, dönme ekseni olarak da z dönme ekseni seçilmiş ve lazer tarayıcı bu şekilde motora entegre edilmiştir. Bunun yanı sıra, olası kalibrasyon problemlerinin önüne geçmek için 2B lazer tarayıcının tarama ekseninin merkezi ile dönme ekseni aynı hizaya getirilmiştir. Bunun yapılmaması, hatalı verilerin üretilmesine, çeşitli yazılımsal hatalara ve kök noktaların oluşmasına sebep olur. Bu yüzden hem lazer tarayıcıyı hem de motoru istenen pozisyona getirebilmek için L şeklinde bir plaka tasarlanmıştır. Ayrıca, lazer tarayıcı ile DC motor arasına, sisteme sınırsız dönüş özelliği kazandırmak, lazer tarayıcının dönüşü esnasında kabloların birbirine dolanmasına engel olmak ve dönen bu sisteme güç ve sinyal iletimini sağlamak için kayar halka (slip-ring) olarak adlandırılan elektromekanik bir cihaz da eklenmiştir. Sistemdeki DC motoru istenen verimde tahrik etmek için bir motor sürücü entegresi ve bu sistemi kontrol edip Enkoder verilerini okumak için ise bir geliştirme kartı kullanılmıştır. Tasarlanan 3B lazer tarayıcının döner sistemi şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 3B lazer tarayıcının döner sistemi

2B lazer tarayıcıdan gönderilen mesafe verileri 3 boyutlu çevre bilgisi veren nokta bulutu verilerine dönüştürülür. Elde edilen bu 3B nokta bulutu verileri oldukça yoğun bir veriler topluluğudur. Bu veriler topluluğunun ortamın 3 boyutlu görüntüsünü detaylı bir şekilde gösterebilmeleri, akış hızlarının yüksek olmasına bağlıdır. Yani bu nokta bulutu verilerinin akış hızları ne kadar yüksek olursa o kadar net görüntü elde edilmiş olur. Bu yüzden hem yüksek güç verimliliğine sahip hem de yüksek hesaplama performansı gösteren donanımsal olarak çok güçlü bilgisayarlara ihtiyaç duyulur. Tasarlanan sistemde önce normal dizüstü bilgisayar vasıtasıyla 3 boyutlu görüntü elde edilmiş daha sonra ise sistemi daha portatif hale getirmek için küçük ve yüksek hesaplama performansı sağlayan bir geliştirme kiti kullanılmıştır. Bilgisayar kullanılarak elde edilen 3B LIDAR platform şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Bilgisayar kullanılarak elde edilen 3B LIDAR platformu

Bilgisayar kullanarak elde edilen 3B nokta bulutu görüntüsü ve yapılan çeşitli deneylerden sonra en az bilgisayar kadar yüksek performansa sahip Jetson TX1 adında geliştirme kartı kullanıldı. Bu geliştirme kartı bilgisayara göre çok daha küçük olduğundan 3B LIDAR sisteminin daha portatif hale gelmesine katkı sağlamıştır. Daha sonra Jetson TX1 geliştirme kartı ve 3B görüntü için gereken tüm bileşenleri içeren mekanik bir platform tasarlanmıştır. 810 gr ağırlığında, 0.36 cm kalınlığında ve 21x21x17 boyutlarında olan bu platform sayesinde sistem portatif olmanın yanı sıra, hem kara hem de hava araçlarında kullanılabilme özelliğine de sahip olmuştur. Platformun içinde her bir komponent için ayrı ayrı hazneler mevcuttur. Tasarlanan platform kullanılarak elde edilen yeni taşınabilir 3B LIDAR sistemi şekil 4'de gösterilmektedir.

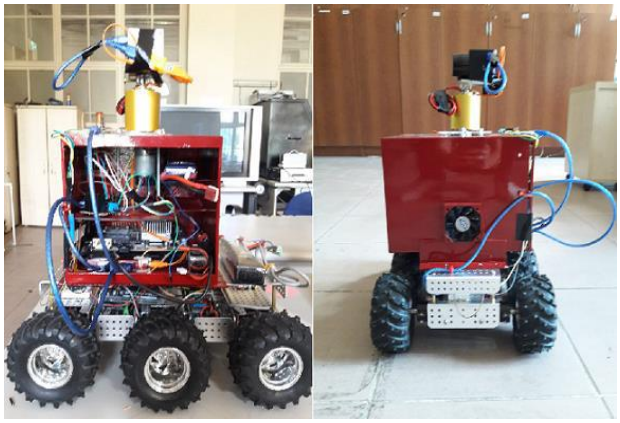


Şekil 4. Portatif 3B LIDAR platformu

2.2. Mobil araç tasarımı

3B LIDAR sistemi elde edildikten sonra bu sisteme hareket özelliği kazandırmak ve navigasyon işlemlerinde kullanmak amacıyla bir mobil araç tasarlandı. Bu araç, her biri ayrı bir motor tarafından sürülen 6 adet tekerlek ve bir alüminyum iskeletten oluşmaktadır. Aracın 6 tekerlekli olmasının sebebi yük taşıma kapasitesinin arttırılması ve daha dengeli bir şekilde hareketinin sağlanmasıdır. Çalışmanın ana hedeflerinden biri olan ve odometri olarak adlandırılan aracın başlangıç konumundan itibaren pozisyonunu tahmin etmek ve hızını belirlemek için Enkoderlere ihtiyaç vardır. Bu Enkoderler sayesinde aracın tekerleklerinin dönüş miktarına dayanan hareket kontrolü sağlanmaktadır. Bu nedenle aracın orta sağ ve orta sol tekerleklerindeki motorlar çıkarılarak yerine aynı özellikteki Enkoderli DC motorlar entegre edilmiştir.

Çalışma kapsamında navigasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için gereken BNO055 model IMU sensörü araca entegre edildi. Bu sensörü kullanarak mutlak konum, açısal hız vektörü, ivme vektörü, doğrusal ivme vektörü gibi bilgiler elde edilebilir. Fakat bu çalışmada navigasyon işlemi için imu sensöründen sadece yuvarlanma (roll), yunuslama (pitch) ve sapma (yaw) verileri kullanılmıştır. Bu veriler USB hattını USB protokolü kullanmadan RS232 gibi seri hatta dönüştüren FTDI dönüştürücü kartı kullanılarak ROS ortamına aktarılmıştır. Navigasyon işlemi için gerekli olan Enkoder konum verisini seri haberleşme ile ROS platformuna aktarmak için ise bir geliştirme kartı kullanılmıştır. Ardından, aracın orta sağ ve sol tekerleklerindeki Enkoderlerden elde edilen mesafe verileri ROS platformuna gönderilerek navigasyona uygun hale getirildi. Şekil 5, 3B LIDAR sistemin mobil araca entegrasyonunu göstermektedir.



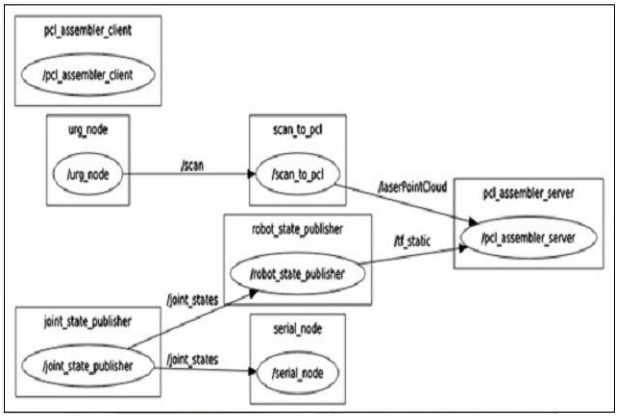
Şekil 5. 3B LIDAR sistemi ve mobil araç entegrasyonu

3. Yazılım

Lazer tarayıcılar kullanılarak 3 boyutlu görüntü elde edilmesinin temeli engel yüzeyine gönderilen ışınların nokta bulutu verilerine dönüştürülmesine dayanmaktadır. Çünkü bu noktalara karşılık gelen mesafeler 3 boyutlu bir harita oluşturulmasını sağlar. Nokta bulutu, tespit edilecek nesnenin yatay ve dikey yönde belirli bir açı altında nokta dizileri şeklinde taranmasının sonucunda elde edilen noktasal görüntüye verilen bir isimdir. Bir nesnenin dış yüzeyinin temsili olarak da ifade edilir. Bu nokta bulutları sayesinde bir nesnenin geometrisi ve o nesnenin ortamdaki diğer nesnelerle arasındaki çevresel ilişki hakkında bilgi edinilir.

2 boyutlu mesafe verileri yayınlayan lazer tarayıcıdan 3 boyutlu nokta bulutu görüntüsünün elde edilmesi ROS yazılım platformunda gerçekleştirildi. ROS, robot bileşenlerinin bilgisayar üzerinden kontrol edilmesini sağlayan açık kaynaklı bir yazılım sistemidir. Bir ROS sistemi yayıncı/abone mesajlaşma yöntemini kullanarak diğer düğümlerle (node) iletişim kuran ve hesaplama işlemini gerçekleştiren düğümlerden oluşur. Bir sistem birçok düğümden oluşur ve her düğüm bir görevin yerine getirilmesinden sorumludur. Bu düğümleri, başlıklar (topics) tarafından yayınlanan mesajlar vasıtasıyla birbirleriyle iletişim kurarlar. Başlıklar bir düğümden diğerine mesaj taşıyan otobüsler olarak adlandırılırlar. Bir düğüm bir başlık ile mesaj gönderdiğinde bu düğümün bir başlık yayınladığı anlamına gelir. Benzer şekilde bir düğüm bir başlık aracılığıyla mesaj aldığında bu düğümün bir başlığa

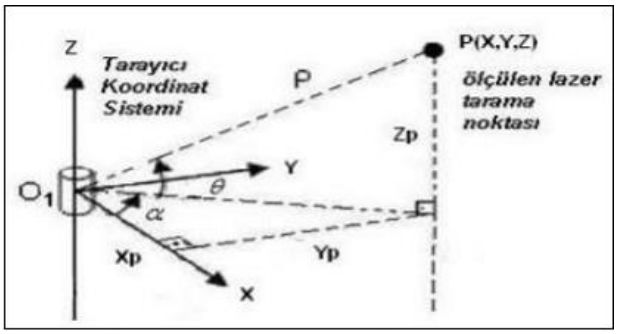
abone olduğu anlamına gelir. Aynı zamanda, bir düğüm birçok başlık yayınlayabilir ve birçok bağlığa abone olabilir. Şekil 6'da 2B lazer tarayıcıdan 3 boyutlu nokta bulutu verilerinin elde edilmesini sağlayan düğüm-başlık haberleşme grafiği gösterilmiştir. Dikdörtgenler düğümleri, yaylar ise başlıkları temsil etmektedir. Şekilde görüldüğü üzere bir düğüm birden fazla başlık yayınlayabilir ve birden fazla başlığa abone olabilir.



Şekil 6. Düğüm-Başlık haberleşme grafiği

3.1. 3B nokta bulutu verilerinin elde edilmesini sağlayan geometrik dönüşümler

Lazer tarayıcılar tespit edilecek nesnenin yüzeyini saniyede on binlerce noktanın X,Y,Z Kartezyen koordinatlarını elde edecek şekilde belli bir açı altında yatay ve düşey yönde nokta dizileri şeklinde tararlar ve nesnenin nokta bulutu halinde görünmesini sağlarlar. Fakat düzgün bir nokta bulutu verisi elde edebilmek için tarayıcıdan elde edilen ve farklı yönlerde konumlanan noktaların tek bir koordinat sisteminde toplanmaları gerekmektedir. Aynı zamanda Bir XYZ bulutu elde etmek için lazer tarayıcı ve kullanılan motor tarafından elde edilen verilerin dönüştürülmesi gerekir. Şekil 7'de lazer nokta yakalamanın geometrik temsili gösterilmektedir. Bu şekle göre lazer tarayıcının konumlandırıldığı nokta başlangıç noktası olarak kabul edilir.



Şekil 7. Nokta bulutu dönüşümleri

Şekilde gösterilen ρ değeri lazer tarayıcı ile ölçülen nesne arasındaki eğik mesafeyi temsil etmektedir. Ölçüm doğrusunun x ekseni ile yatay düzlemde yaptığı açı α, ölçüm doğrusunun yatay düzlemle yaptığı eğim açısı da θ olarak ifade edilir. Tez çalışmasında kullanılan Hokuyo lazer tarayıcı 683 ölçüm değeri sunar. Bu yüzden kullanılan bu lazer tarayıcı ile ölçülen nesne arasında bu eğik mesafe değerlerini temsil eden tam 683 ölçüm değeri sağlanır. Aynı zamanda kullanılan motorun açı değeri ve kullanılan lazerin çözünürlüğü 0.352^0 olduğu için bu lazer açı değeri de bilinmektedir. Motor bir nokta bulutunu yakaladığında lazer ölçümleri motor dönerken sürekli olarak kaydedilir. Bu şekilde 683 lazer ölçümü bir düzleme karşılık geldiğinde ilgili motor açısı da kaydedilir. Motor dönmeyi bitirdiğinde elde edilen verileri kullanarak dönüşümler yapılır. Elde edilen bu veriler arasındaki geometrik ilişki ve taranan noktaların kullanılan lazer tarayıcı merkezli XYZ koordinatları aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir.

$$X = \rho.\cos(\theta).\cos(\alpha) \quad (1)$$

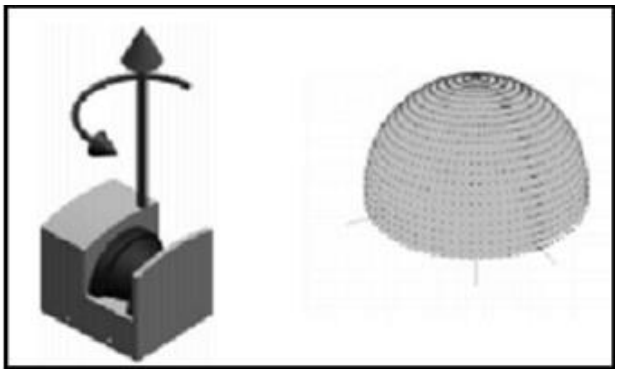
$$Y = \rho.\cos(\theta).\sin(\alpha) \quad (2)$$

$$Z = \sin(\alpha) \quad (3)$$

3.2. 3B nokta bulutu görüntüsünün elde edilme aşamaları

ROS yazılım platformu üzerinde 2 boyutlu veri yayınlayan lazer tarayıcıdan 3 boyutlu nokta bulutu görüntüsünün elde edilmesi sürecinde sırasıyla aşağıdaki işlemler uygulanmıştır:

- Tarama için eksen ayarlaması yapıldı. 3 boyutlu görüntü elde edilebilmesi için öncelikle tarayıcının belli bir eksen etrafında dönmesi gerekir. Bu dönme ekseninin tarayıcının ölçüm noktasında uygulanması amacıyla dört farklı tarama yönteminden biri olan sapma üst taraması kullanılmıştır. Bu yönteme göre lazer tarayıcı dikey tarama yapacak ve z dönme ekseninde dönecek şekilde konumlanmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Sapma üst taraması (Yawing scan top)

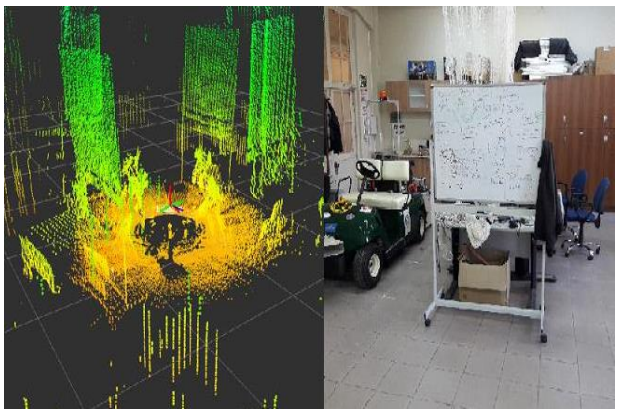
- URDF (Birleşik Robot Tanım Formatı) robot modeli ve TF dönüşüm çerçeveleri oluşturuldu. URDF, robotu oluşturan bütün bağlantıları içeren bir modeldir. Robotu oluşturan bu bağlantıların ne kadar uzun olduğu, eklemlerin nasıl hareket edeceği, aktuatör ve algılayıcıların hangi

pozisyon ve yönelimlerde olduğu gibi birçok konuda bilgi sağlar. TF ise her bir robot bağlantısının, motor ve algılayıcıların merkezi koordinat çerçevesine göre hangi zamanda nerede bulunduğunu bildiren pakettir. Bu paketler kullanılarak lazer tarayıcının tarayacağı eksen robot işletim sistemine aktarıldı be base_link olarak ifade edilen lazer tarayıcının üzerinde bulunduğu sabit platform ile laser_link olarak ifade edilen lazer tarayıcı arasındaki bağlantı ilişkisi oluşturulmuştur.

- 2B lazer tarayıcıdan yayınlanan lazer tarama verileri 3 boyutlu nokta bulutu verilerine dönüştürüldü. Lazer tarama, sensor_msgs /LaserScan.msg mesaj tipi olarak /scan başlığında yayınlanmaktadır. Bu mesaj tipi sayesinde lazer tarafından gönderilen her vuruşun açısı ve mesafesi elde edilebilmektedir. Bu mesaj tipi işlenmemiş aralık verileriyle çalışmayı sağlar. Bu yüzden nokta bulutu olarak adlandırılan 3B Kartezyen (x,y,z) biçiminde çalışmak çok daha uygundur. 3B Kartezyen nokta kümesi olarak tarama yapmak için lazer tarayıcının yayınladığı LaserScan mesajı nokta bulutu mesajına dönüştürülmelidir. Nokta bulutu mesajı da sensor_msgs/PointCloud.msg veya sensor_msgs/PointCloud2.msg mesaj tipi olarak /Point_Cloud başlığında yayınlanır. Bu dönüşüm 3 boyutlu görüntü elde edilebilmesi için gereklidir.

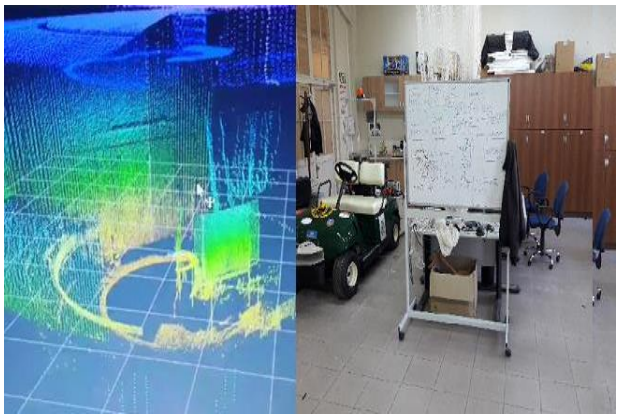
- ROS-Arduino haberleşmesi sağlandı. Temelde, lazer tarayıcının belirlenen eksen etrafında hareket etmesini sağlayan Enkoderli DC motorun kontrol edilmesi görevini yerine getiren arduinonun görevi bununla sınırlı değildir. DC motor kontrolü ve Enkoder verilerini okumanın yanı sıra, bu verileri seri haberleşme yoluyla ROS platformuna göndermekten de sorumludur. Bu yüzden bu mikro denetleyici ile robot işletim sisteminin haberleşmesi gerekir.

- Farklı konumlardaki tüm lazer tarama verileri tek bir başlık altında nokta bulutu verisi olarak yayınlanmıştır. Bu adımla birlikte 2 boyutlu lazer tarayıcıdan 3 boyutlu görüntü elde edilmiş oldu. Fakat Servo motor yerine Enkoderli DC motor kullanılması bu görüntünün anlamsız sonuçlar vermesine sebep oldu. Normalde, Servo motor kullanıldığında motorun robot işletim sisteminden yayınlanan açı verisine abone olmasıyla ROS-Servo haberleşmesi sağlanmaktadır. Aynı yöntem Enkoderli DC motor için uygulandığında ise robot işletim sisteminden yayınlanan açı verisi ile Enkoderden gönderilen açı verisi eşleştirilememiştir. Bu yüzden lazer tarayıcının taradığı alanda bulunan bir adet nesne birden fazla nesne olarak görüntülenmiştir. Şekil 9'da tarama alanında bulunan bir adet tahtanın dört adet olarak görüntülendiği gösterilmektedir.



Şekil 9. ROS-Enkoderli DC motor senkronizasyon sorunu

- ROS-Enkoder senkronizasyonu sağlandı. Enkoderden gelen açı ile robot işletim sisteminden gönderilen açının eşleşmemesinden dolayı ROS-Servo haberleşmesinde kullanılan yöntemden farklı bir yöntem denenmiştir. Bu yönteme göre Enkoderden elde edilen açı verisi seri haberleşme yoluyla robot işletim sistemi platformuna gönderilmiş ve gönderilen bu veri, seri iletişimden okunduktan sonra robot işletim sistemi platformuna uygun hale getirilerek yayınlanmıştır. Böylelikle hem ROS-Enkoder haberleşmesi sağlanmış hem de istenilen ölçüde 3 boyutlu görüntü elde edilmiştir (Şekil 10).



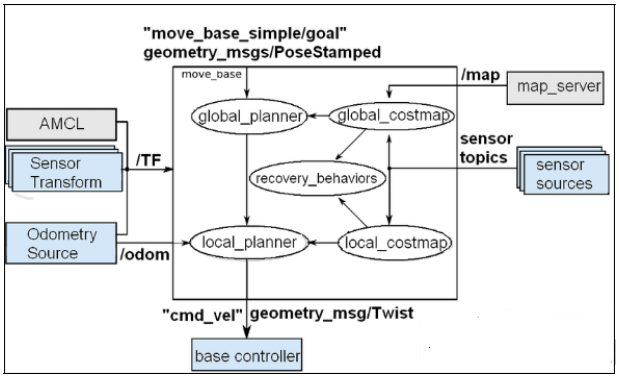
Şekil 10. Kapalı bir ortamın 3 boyutlu görüntüsü

3.3. Navigasyon

Geliştirilen 3B LIDAR sistemi ile navigasyon işleminin yapılabilmesi için ROS platformu içinde bulunan Navigasyon Yığını (Navigation Stack) kullanıldı. Navigasyon Yığını, aracın bir noktadan diğerine otonom olarak hareket etmesi ve kaybolmadan yolunda bulabileceği tüm engellerden kaçınması için kullanılan bir dizi ROS düğüm ve algoritmasıdır. Görevi, aracın mevcut konumunu, gitmek istediği konumu, odometri verilerini (Enkoder, IMU) ve lazer tarayıcı gibi sensörlerden gelen verileri almak ve bu verileri işleyerek aracı belirtilen hedefe hareket ettirmek için kullanılacak hız verilerini çıkarıp mobil tabana göndermektir.

Navigasyon yığınının kullanılabilmesi için aracın ROS'u çalıştırması, bir TF dönüşüm ağacının olması

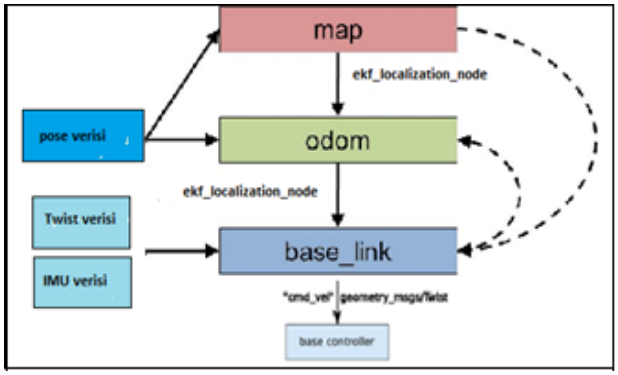
ve doğru ROS ileti türleri kullanılarak sensör verilerinin yayınlanması gerekir. Ayrıca, bu paketin araç üzerinde yüksek düzeyde performans gösterebilmesi için şekil ve dinamik olarak yapılandırılması gerekir. Şekil 11, navigasyon yığınının nasıl düzenlendiğini gösteren genel bir bakış sunmaktadır [21].



Şekil 11. ROS navigasyon yığını [21].

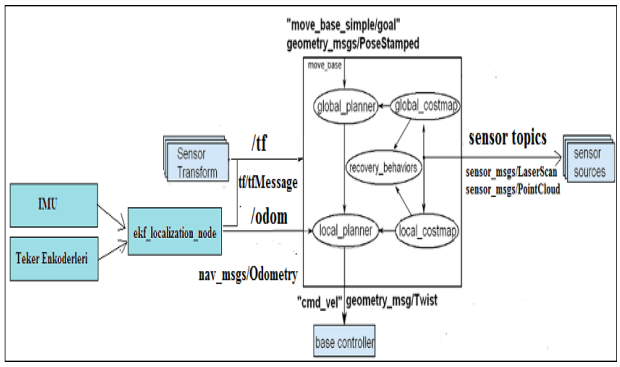
Şekle göre beyaz renk doğrudan otonom navigasyon için kullanılmak üzere ROS platformunda mevcut olan yığını temsil eder (move_base). Bu move_base paketi aracın istenen konuma hareket etmesini sağlar. Yani navigasyon işleminin yapıldığı yer burasıdır. Move_base paketi ile harita üzerinden 2 boyutlu bir hedef belirlenip, aracın belirlenen yere en kısa ve engellerden kaçacak şekilde yol çizmesi (yeşil ok) ve yolu takip eden aracın hız verisinin çıktı olarak verilmesi sağlanır. Şekildeki gri renkli bileşenler de isteğe bağlı olarak sağlanan düğümlerdir. Mavi bileşenler ise her araç platformu için oluşturulmalıdır.

Aracı yerelleştirmek için yine ROS platformu üzerinde bulunan robot_localization paketi kullanıldı. Yerelleştirme işlemi için kullanılan sensörün öncelikle dönüştürülmesi gerekir (Şekil 12).



Şekil 12. Sensör- TF dönüşümü

Şekle göre iki adet genişletilmiş kalman filtresi (EKF) yapısı kullanıldı. Birinci yapı olan ekf-odom ile odom-base_link arasında TF oluşturularak odometry/filtered başlığında aracın odometrisi paylaşıldı. EKF-odom yapısına IMU sensöründen yuvarlanma (roll), yunuslama (pitch) ve sapma (yaw) verileri, Enkoderden ise konum verisi girildi. Python kodu ile konum verisi hız verisine çevrilerek EKF'ye lineer x ve açısal z hızı sokuldu. Konum verisinin kullanılmamasının sebebi kalman filtresinin aracın hızını kullandığında daha doğru bir konumlandırma yaptığının gözlemlenmesidir. İkinci yapı olan ekf-map ile map-odom arası TF oluşturularak odometry/filtered_map adında bir başlık yayınlandı. Bu başlığın sadece TF'si kullanıldı. Bu yapıda da IMU sensörünün aynı verilerinden faydalanıldı. EKF-map yapısının oluşturulmasının temel amacı, nokta bulutları kullanılarak oluşturulan haritanın daha iyi bir konumlandırmaya sahip olmasıdır. Sonuç olarak navigasyon yığını ve robot_localization paketinin ortak kullanımıyla mobil araç başarılı bir şekilde navigasyon işlemini gerçekleştirmiştir. Aracın sorunsuz bir şekilde navigasyon yapmasını sağlayan paketlerin akış şeması Şekil 13'te gösterilmektedir.



Şekil 13. Navigasyon akış şeması

4. Deneyler

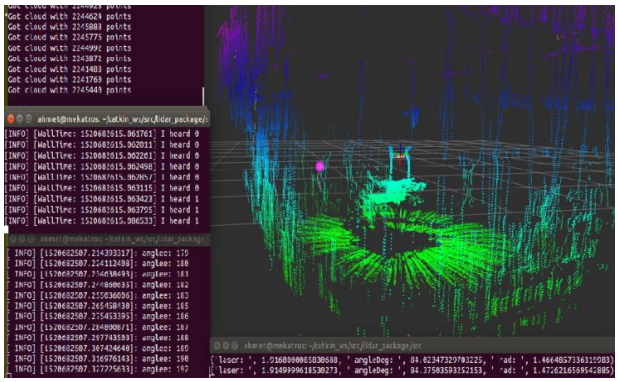
Tasarlanan sistem hem tarama özelliklerini test etmek hem de sabit bir ortamda sisteme en yakın engelin mesafesini ve açısını tespit etmek için ilk olarak iç ortam otonom golf aracına entegre edilmiştir. Bu deneydeki amaç, sabit bir sistemde tüm yönlü tarama sonucunda araca en yakın engelin tespit edilmesi olduğu için 3B LIDAR sistemi araca baş aşağı olacak şekilde kurulmuştur. Şekil 14, engel tespiti için kullanılan deney düzeneğini göstermektedir.



Şekil 14. Otonom golf aracı üzerine kurulan sistem

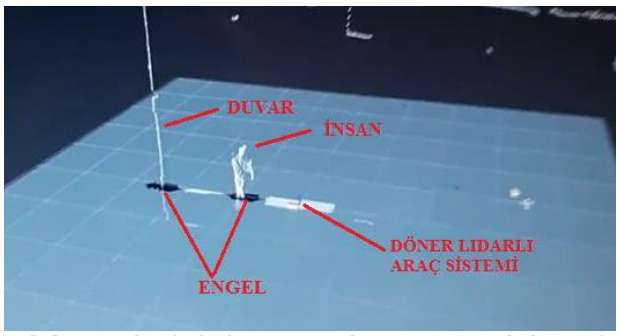
Bu deneyde öncelikle ortamın 3 boyutlu görüntüsü elde edilerek geliştirilen 3B LIDAR'ın merkezinden itibaren 5,6 metrelik mesafe aralığında bulunan bütün engellerin uzaklığı tespit edildi. Daha sonra belirtilen aralıkta tespit edilen bütün engeller arasından sisteme en yakın engelin mesafesi ve açısı

bulundu. Fakat başlangıçta lazer tarayıcı tarafından en yakın engel olarak tarama aralığında bulunan araç ve zemin görüldü. Bu problemi çözmek için lazer tarayıcının zemin ve aracı gösteren bütün mesafe ve açı değerlerine lazerin belli açısal sınırları içindeki sensor_msgs/LaserScan noktalarını ihmal eden LaserScanAngularBoundsFilter filtrelemesi uygulandı. Bu filtreleme işleminden sonra araca en yakın engelin mesafesi ve açı değeri başarıyla tespit edildi ve bu engelin bulunduğu konum Rviz (ROS Visualization) görselleştirici platformunda PointStamp noktası olarak gösterildi. Belirlenen aralıklarda eğer engel yoksa Rviz platformundaki bu PointStamp noktası sistemin merkezinde konumlanacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca engel tespit edildiğinde aracın stop lambasının yanması sağlanarak araca engeli uyarıcı bir özellik de kazandırılmıştır. Şekil 15'te Rviz platformunda PointStamp noktası (mor top) olarak gösterilen en yakın engelin mesafe ve açısının yanı sıra, Enkoderden okunan açı değerleri, elde edilen nokta bulutu verileri ve engel algılandığında aracın stop lambasının yandığını gösteren veriler de gösterilmektedir.



Şekil 15. En yakın engel tespiti

Jetson TX1 geliştirme kartı ile gerçekleştirilen deneyde ise çeşitli ROS paket ve yığınları kullanılarak mobil araç üzerinde navigasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu navigasyon işlemini gerçekleştirmek için 2B Lazer tarayıcı, tekerlek Enkoderleri ve IMU olmak üzere 3 tip sensör kullanıldı. Navigasyon için gerekli olan ortamın haritası, yapısında costmap olarak adlandırılan maliyet haritası bulunduran ve aracın istenen pozisyona taşınmasını sağlayan move_base paketi kullanılarak oluşturuldu. Bu haritaya göre siyah renk engelleri, beyaz renk de engelsiz bir ortamı temsil eder (Şekil 16). Tarayıcı sabitken, sistemin önünde engel olduğunda hemen engel tespit edilir ve engelin bulunduğu yerde siyah bir alan oluşur. Engel kaldırılır kaldırılmaz ise o siyah alan hiçbir gecikme olmadan ortadan kalkar. Aracın doğru bir navigasyon yapabilmesi için bu hayati öneme sahiptir. Çünkü hareketli bir sistemde engellerin hemen tespit edilmesi, aracın önündeki engel ortadan kalktığında da hiçbir gecikme yaşanmadan haritanın kendini güncelleyerek engelin bulunduğu siyah alanı ortadan kaldırması gerekir.



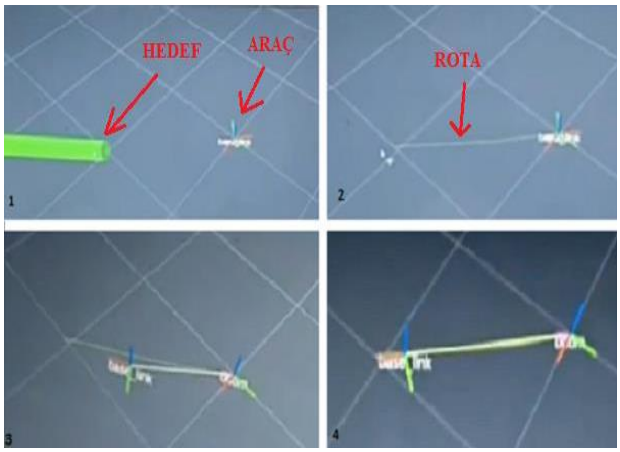
Şekil 16. Nokta bulutlarının engeli tespit ettiğinde haritada oluşan görüntü

Lazer tarayıcı döndüğünde ise haritada 360°'lik görüş alanında bulunan bütün engeller tespit edilmiştir. Fakat mobil araç hareket etmeye başladığında güncellenen haritaya göre dönen LIDAR'ın engelleri tespit edebilmesinde yaklaşık 3 saniyelik bir gecikme yaşanmıştır. Yani, araç engeli geçtikten sonra haritada yaklaşık 3 saniye o engelin bulunduğu siyah alan ortadan kalkmamaktadır. Bu durum navigasyon işlemi için ciddi bir sorundur. Aracın hızı yavaşlatılıp, lazer tarayıcının dönme hızı arttırılarak yaşanan bu gecikme süresi 1 saniyenin altına kadar düşürülmüştür.

Aracın yerelleştirilmesi için ise robot_localization paketi kullanıldı. Çünkü uygun bir navigasyonun gerçekleştirilebilmesi için aracın hangi pozisyona ve hangi yöne baktığını bilmesi gerekir. Bu nedenle haritalama işleminden sonra ROS platformunda lokalizasyon olarak ifade edilen konum tahmini yapıldı ve aracın mevcut konumundan belirlenen hedef konumuna doğru otonom olarak doğru bir şekilde gidip gitmediği test edildi. İyi bir yerelleştirmenin önemli parametrelerinden biri olan odometri, aracın sadece tekerleklerinin dönüşünden kendi konumunu ne kadar iyi tahmin edebileceğini ölçer. Yapılan çalışmada araç yerelleştirilmesi için Enkoderden elde edilen konum verisi kullanılmadı. Konum verisinin türevi alınıp birim dönme hızı bulunarak tekerin bu birim dönme hızından lineer x ve açısal z hızı elde edildi ve kalman filtresine gönderildi. Çünkü yerelleştirme için kullanılan kalman filtresinin aracın hız parametresini kullandığında çok daha iyi bir yerelleştirme yaptığı tespit edildi. Şekil 17'de gösterilen 1 no'lu resimde aracın gitmesi istenen hedef manuel olarak Rviz platformu üzerinde işaretlenmiştir. 2 no'lu resimde ise hedef işaretlendikten hemen sonra aracın işaretlenen hedefe nasıl gideceğini belirten yol planı elde edilmiştir. 3 ve 4 no'lu resimlerde ise aracın işaretlenen hedefe doğru hesaplanan rota üzerindeki hareketi gösterilmiştir.

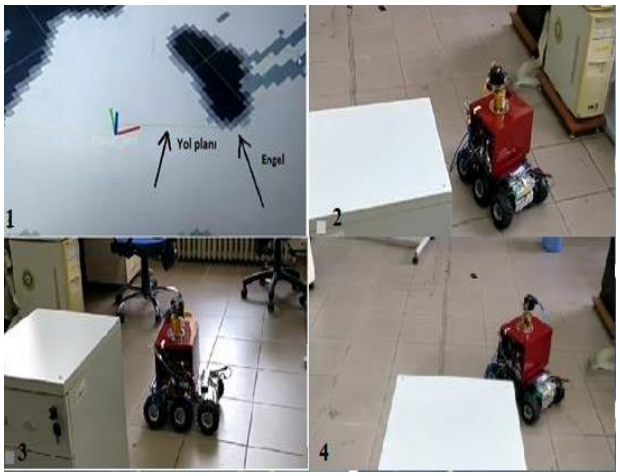
Şekilde görüldüğü üzere araç hedef konuma doğru başarılı bir şekilde hareket etmiş fakat belirlenen hedef ile gerçekte ulaştığı hedef arasında 4,7 cm 'lik fark tespit edilmiştir. Ulaştığı hedeften tekrar mevcut konumuna geri dönmesi istendiğinde ise bu fark 9,5 cm olarak belirlenmiştir. Aracın mevcut konumuna

dönerken elde edilen farkın çok daha fazla olmasının sebebinin navigasyon yığınının davranışından kaynaklandığı tespit edildi. Çünkü hedef TF orijinine göre +x yönünde ayarlandığında costmap haritasının içindeki yerel planlayıcı kararlı plan yaptı ve araç hızlı bir şekilde hareket ederek hedefe ulaştı. Fakat hedef TF orijinine göre –x yönünde ayarlandığında ise yerel planlayıcı çok daha az kararlı plan yaptı ve araç çok yavaş hareket etti. Yerel planlayıcıdaki bu sorundan dolayı gidiş ve dönüş arasında yaklaşık 3,8 cm 'lik fark tespit edilmiştir.



Şekil 17. Araç yerelleştirme deneyi

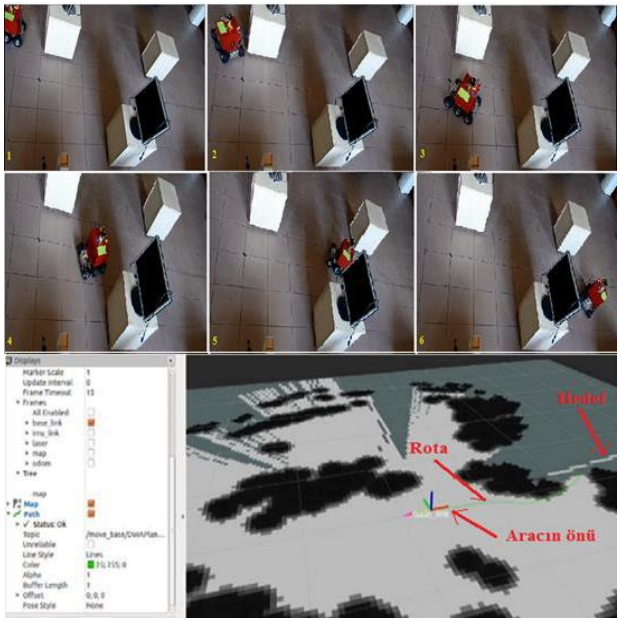
Haritalama ve yerelleştirme deneyinden sonra araç üzerinde navigasyon testi yapıldı. Bu testteki amaç aracın bir engelin arkasında bulunan hedefe engele çarpmadan ulaşabilmesinin sağlanmasıdır. Bunun için Şekil 18'de gösterildiği gibi öncelikle önünde sadece bir engel bulunan bir hedef belirlenmiştir.



Şekil 18. Basit bir ortamda navigasyon deneyi

Bu hedefe göre araç, 1 no'lu resimde gösterildiği gibi bir yol planı oluşturmuş (yeşil ok) ve bu hedefe doğru hareket etmeye başlamıştır. Araç belirlenen hedefe engele çarpmadan ulaşmasına rağmen, araç hareket ettikçe güncellenen haritaya göre dönen LIDAR'ın engelin konumunu tespit edebilmesinde yaşanan saniyelik gecikmeler tam verimli bir navigasyon işleminin gerçekleşmesine engel teşkil etmiştir. Bundan dolayı araç hızlı hareket ettiğinde, LIDAR'ın engeli güncellenen haritaya göre belirlemede yetersiz kaldığı sonucuna varılmıştır. Fakat aracın hızının yavaşlatılması, LIDAR'ın dönüş hızının arttırılması ve LIDAR'dan yayınlanan nokta bulutu sayılarının düşürülmesiyle navigasyon işleminde ciddi iyileşmeler sağlanmıştır.

Şekil 19'da ise daha karmaşık ve birden fazla engelin bulunduğu bir hedef belirlenmiş ve belirlenen bu hedefe göre aracın hareketi test edilmiştir. Aracın oluşturulan haritadaki hareketi, yol planı ve gerçek ortamdaki hareketi şekilde gösterilmektedir. Laboratuvar ortamında yapılan bu deneye göre de aracın önündeki engellere çarpmadan belirlediği rota çerçevesinde işaretlenen hedefe ulaştığı görülmektedir.



Şekil 19. Karmaşık bir ortamda navigasyon deneyi

5. Sonuçlar

Bu çalışmada yüksek maliyetli ve büyük boyutlu 3B LIDAR'lar yerine 2B lazer tarayıcı kullanılarak çok daha düşük maliyetli, portatif ve 360^0 görüş alanına sahip yeni bir 3B LIDAR sistemi geliştirilmiştir. Tasarlanan bu sistem, önce LIDAR'ın 3B tarama yeteneklerini test etmek ve sabit bir ortamda en yakın engelin mesafe ve açısını tespit etmek için otonom bir iç ortam golf aracına entegre edildi. Daha sonra sisteme hareket kazandırmak ve navigasyon işlemlerini gerçekleştirmek için bir mobil araç tasarlandı ve geliştirilen sistem bu mobil araca entegre edildi. Yapılan deneyler geliştirilen sistemin otonom araçlarda tüm yönlü nesne algılamaları için ekonomik ve etkili bir çözüm sağladığını göstermektedir. Yapılan navigasyon testleri de sistemin kapalı ortamlarda engel tespiti ve engelden kaçınma gibi durumlarda başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

İleriki çalışmalar gerçekleştirilen navigasyon işleminin daha da iyileştirilmesini ve geliştirilen

sisteme engeli tanıma özelliği kazandırılmasını içermektedir.

Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Araştırma Projeleri Ofisinin MGA-2018-40801 sayılı projesi ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumunun (TÜBİTAK) 115E345 no'lu projelerin desteği ile yapılmıştır.

Kaynakça

[1] Kim J. U., J. Min J., Kong, H. B. 2017. 3D Object Detection Method Using Lidar Information in Multiple Frames. International Conference on Image Analysis and Proceeding, 11-15 September, Catania-Italy, 276-286.

[2] Chen X., Ma H., Wan J., Li B., Xia T. 2017. Multi-View 3D Object Detection Network for Autonomous Driving, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 21-26 July, Honolulu- Hawaii- United States, 1608-1617.

[3] Li B., Zhang T., Xia T. 2016. Vehicle Detection from 3D LIDAR Using Fully Convolutional Networks. Conference: Robotics: Science and Systems XII, 18-22 June, University of Michigan-United States, 1608-1617.

[4] Li J., Bao H., Han X., Pan F., Pan W., Zhang F., Wang D. 2017. Real time self-driving car navigation and obstacle avoidance using mobile 3D laser scanner and GNSS, Multimedia Tools and Applications, 76(21), 23017-23039.

[5] Zhao M., Stasinopoulos S., Yu Y. 2017. Obstacle detection and avoidance for autonomous bicycles, 13th IEEE Conference on Automotion Science and Engineering, 20-23 August, Xi'an-China, 1310-1315.

[6] Liang W., Zhang, Y., Wang J. 2017. Map- Based Localization Method for Autonomous Vehicles Using 3D-LIDAR, IFAC-PapersOnLine, 50(1), 276-281.

[7] Dube R., Gawel A., Sommer H., Nieto J., Siegwart R., Cadena C. 2017. An online multi-robot SLAM systems for 3D LIDARs, IEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 24-28 September, Vancouver-Canada, 1004-1011.

[8] Park J. K., Park T. H. 2015. Autonomous System of Mobile Robot Using Laser Scanner for Corridor Environment, Journal *of* Institute of Control, 21(11), 1044-1049.

[9] Pfrunder A., Borges P.V.K., Romero A.R., Catt G., Elfes A. 2017. Real-time autonomous ground vehicle navigation in heterogeneous environments using a 3D LIDAR, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 24-28 September, Vancouver-Canada, 2601-2608.

[10] Naes, T. 2017. Ego-localization Navigation for Intelligent Vehicles using 360 degree LIDAR Sensor for Point Cloud Mapping, Gürcistan Güney Üniversitesi, Makine Fakültesi, Yüksek Lisans Tezi, 85 s, Gürcistan.

[11] Michael Bernard. 2016. Tesla & Google disagree about LIDAR-Which is right?. http://cleantechnica.com/2016/07/29/tesla-google-disagree-lidar-right/ (Erişim Tarihi: 05.04.2018).

[12] Martinez J. L., Morales J., Reina A. J., Mandow A., Boter A. P., Cerezo A. G. 2015. Construction and calibration of low-cost 3D laser scanner with 360 degree field of view for mobile robots, IEEE International Conference on Industrial Technology, 17-19 March, Seville-Spain, 149-154.

[13] Morales J., Martinez J. L., Mandow A., Boter A.P., Cerezo A.G. 2011. Design and Development of a Fast and Precise Low-Cost 3D Laser Rangefinder, IEEE International Conference on Mechatronics, 13-15 April, Istanbul-Turkey, 621-626.

[14] Maurelli, F., Droeschel, D., Wisspeintner, T., May, S., Surmann, H. 2009. A 3D laser scanner system for autonomous vehicle navigation, International Conference on Advanced Robotics, 22-26 June, Munich-Germany, 1-6.

[15] Wang, C., Meng, L., She, S., Mitchell, I.M., Li, T., Tung, F., Wan, W., Meng, M.Q.H., Silva, C.W. 2017. Autonomous mobile robot navigation in uneven and unstructured indoor environments, IEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 24-28 September, Canada-Vancouver, 109-116.

[16] Quinley, M., Gerkey, B., Conley, K., Faust, J., Foote, T., Leibz, J., Berger, E., Wheeler, R., Ng, A. 2009. ROS: an open-source Robot Operating System, ICRA workshop an open source software, 3(1), 1-6.

[17] Zhang, A., Hu, S., Chen, Y., Liu, H., Yang, F., Liu, J. 2008. Fast Continuous 360 Degree Color 3d Laser Scanner, The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Information Sciences, 37(B1), .409-414.

[18] Ocando, M.G., Certad, N., Alvarado, S., Terrones, A. 2017. Autonomous 2D SLAM and 3D mapping of an environment using a single 2D LIDAR and ROS, Latin American Robotics Symposium (LARS) and Brazilian Symposium on Robotics (SBR), 8-11 November, Curitiba-Brazil, 1-6.

[19] Moon Y. G., Go S. J., Yu K. H., M Lee M. C. 2015. Development of 3D laser range finder system for object recognition, *IEEE International*

Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Busan-South Korea, 1402-1405,

[20] Kağızman, A. 2018. Otonom araçlar için 2B lazer tarayıcı kullanılarak yeni 3B LIDAR sistemi elde edilmesi ve engel tespiti, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 100 s, Türkiye.

[21] Eppstein, E. 2009. Setup and Configuration of the Navigation Stack on a Robot. http://wiki.ros.org/navigation/Tutorials/Robot Setup (Erişim Tarihi: 02.05.2017).