

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEK KAMERA VE LİDAR VERİSİ İLE KONUM KESTİRİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hazal Lezki**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. İmam Şamil Yetik**

**TEMMUZ 2020**



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Hazal Lezki



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### TEK KAMERA VE LİDAR VERİSİ İLE KONUM KESTİRİMİ

Hazal Lezki

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. İmam Şamil Yetik

Tarih: Temmuz 2020

Navigasyon çözümlerinin temel bileşenlerinden biri olan konum kestirimi problemi, günümüzde çoğunlukla küresel konumlama sistemi (KKS) ile diğer kaynaklardan elde edilen verilerin (ataletsel ölçüm birimi, sayısal arazi yükseklik verisi haritaları, barometrik basınç sensörü, tekerlek kilometre sayacı vb.) bir arada kullanılmasıyla çözülmektedir. KKS sinyallerinin kullanılmadığı ortamlarda ise konum kestirimi problemi literatürdeki açık problemler arasında yerini korumaya devam etmektedir. İnsanlı veya insansız, otonom veya değil farketmeksizin, herhangi bir aracın/robotun KKS sinyallerini kullanmadığı durumlarda da seyrüsefer görevini yerine getirebilmesi için, doğru ve yüksek hassasiyetli konum kestirimi yapabilmesi gerekmektedir. Altı serbestlik dereceli konum kestirimi için kullanılan çeşitli yöntemler ile algılayıcı donanımlar detaylı incelendiğinde herbirinin çeşitli avantajlarının ve dezavantajlarının bulunduğu anlaşılmaktadır. Farklı kaynaklardan elde edilen verilerin birarada kullanıldığı yöntemlerin, altı serbestlik dereceli konum kestirimi probleminin çözümünde daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bu tez çalışmasında, tek bir kamera ve lidar sensörü kullanılarak, KKS sinyallerinin kullanılmadığı ortamlarda altı serbestlik dereceli konum bilgisinin kestirilmesi problemi ele alınmıştır. Tek bir kameradan alınan verilerin işlenmesi ile elde edilen konum bilgisinin, kestirilemeyen bir ölçek dahilinde doğru olduğu bilinmektedir.

Doğru metrik ölçülerle konum bilgisini kestirebilmek için bu ölçek bilgisinin çeşitli yöntemlerle hesaplanması gerekmektedir. Bu tezde, kameradan alınan resim kareleri üzerindeki piksellerle, Lidar sensöründen elde edilen metrik veriler kullanılarak altı serbestlik dereceli konum bilgisi mutlak ölçekler dahilinde hesaplanmıştır. Önerilen algoritmanın testleri KITTI odometri veri kümesi üzerinde yapılmıştır. KITTI odometri veri kümesi; hareketli bir otomobilin üzerine yerleştirilmiş olan stereo kameralar, Lidar, ataletsel ölçüm birimi (AÖB) ve Küresel Konumlama Sistemi'nden elde edilen verilerle oluşturulmuştur. KITTI odometri veri kümesi içerisinde yer alan tek bir renkli kamera verisi ile Lidar sensörü verileri bu tezin konusu olan algoritmanın testleri için kullanılmıştır. KKS ve AÖB'den elde edilen veriler ise önerilen Görsel-Lidar Odometri algoritmasının başarısını kıyaslamak üzere referans olarak kullanılmıştır. KITTI odometri veri kümesi kullanılarak elde edilen test sonuçları, tek bir kamera verisi ile Lidar taramaları kullanılarak geliştirilen Görsel-Lidar Odometri yönteminin, maliyetli optimizasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulmadan tutarlı konum bilgisi üretebildiğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Görsel-lidar odometri, Kamera verisi ile konum kestirimi, Gps-yoksun ortamlarda konum kestirimi, Bilgisayarlı görü

## **ABSTRACT**

Master of Science

### **LOCALIZATION USING SINGLE CAMERA AND LIDAR**

Hazal Lezki

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. İmam Şamil Yetik

Date: July 2020

The location estimation problem, which is one of the basic elements of the navigation solutions, is mostly solved by using the global positioning system (GPS) and the data obtained from other sources (inertial measurement unit, digital terrain elevation data maps, barometric pressure sensor, wheel odometer etc.). In GPS-denied environments, the position estimation problem is still an open problem in the literature. Any vehicle/robot (whether manned or unmanned, autonomous or not) must be able to perform accurate and high-precision location estimation in order to perform its navigation task even in GPS-denied environments. When the various methods used for the six degrees-of-freedom location estimation and the sensory equipment are examined in detail, it is understood that each has various advantages and disadvantages. It is obvious that the methods which use the data obtained from different sources together give better results in the solution of six degrees of freedom location estimation problem.

In this thesis, six degrees-of-freedom (6-DOF) position estimation problem in GPS-denied environments is examined by using a single camera and lidar sensor. It is known that the position information which is obtained from a single camera is accurate up to an unknown scale factor. In order to estimate location of a vehicle with accurate metric measurements, this unknown scale information should be calculated by various methods. In this study, six degrees of freedom position information is calculated within

the absolute scales by using the metric data obtained from the Lidar sensor with the pixels on the picture frames taken from the camera. Tests of the proposed algorithm were performed on the KITTI odometry dataset. KITTI odometry dataset were created with data taken from stereo cameras, Lidar, inertial measurement unit and GPS receivers which are placed on a moving car. A single color camera frames and Lidar sensor data in the KITTI odometry dataset were used to test the proposed algorithm in this thesis. Data from GPS and inertial measurement unit (IMU) were used as a reference to compare the success of the proposed Visual-Lidar Odometry algorithm. The test results obtained using the KITTI odometry dataset showed that the Visual-Lidar Odometry method, developed using a single camera data and Lidar scans, can produce consistent location information without the need for costly optimization methods.

**Keywords:** Visual-lidar odometry, Localization using camera, Localization in gps-denied environment, Computer vision



## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardımlarıyla beni yönlendiren hocam Doç. Dr. İmam Şamil Yetik'e çok teşekkür ederim. Destekleriyle her zaman yanımda olan aileme, özellikle de sevgili annem Sevda Lezki ile ablam Aylin Lezki Brechter'e en derin sevgilerimi iletiyorum.





## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> . . . . .	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> . . . . .	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> . . . . .	<b>x</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>KISALTMALAR</b> . . . . .	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Konum Tespiti . . . . .	3
1.1.1 KKS ve AÖB ile konum tespiti . . . . .	3
1.1.2 Tekerlek odometrisi . . . . .	4
1.1.3 Görsel odometri . . . . .	5
1.1.4 Lidar odometri . . . . .	10
1.1.5 Diğer yöntemler . . . . .	10
1.1.6 Bu tezin kapsamı . . . . .	11
<b>2. METODOLOJİ</b> . . . . .	<b>15</b>
2.1 Görsel-Lidar Odometri . . . . .	15
2.1.1 Lidar derinlik haritasının oluşturulması . . . . .	15
2.1.2 Kamera-lidar öznitelik eşlerine karşılık gelen 3B nokta bulutlarının bulunması . . . . .	18
2.1.3 Perspektif-n-nokta ile konum tespiti . . . . .	21
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> . . . . .	<b>23</b>
3.1 Veri Seti . . . . .	23
3.1.1 Kullanılan veri seti . . . . .	23
3.2 Başarım Metrikleri . . . . .	23
3.2.1 Bağlı poz hatası . . . . .	24
3.2.2 Mutlak gezinge hatası . . . . .	26
<b>4. SONUÇ</b> . . . . .	<b>29</b>
<b>KAYNAKLAR</b> . . . . .	<b>30</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> . . . . .	<b>35</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Ataletsel ölçüm birimi blok diyagramı . . . . .	5
Şekil 1.2: Görsel odometri blok diyagramı . . . . .	6
Şekil 1.3: Resim kareleri üzerindeki öznitelik eşleri . . . . .	8
Şekil 2.1: Görsel-lidar odometri blok diyagramı. . . . .	16
Şekil 2.2: Resim kareleri üzerine izdüşümü gerçekleştirilen lidar noktaları . . .	18
Şekil 2.3: KITTI veri kümesi üzerinde elde edilen örnek bir lidar derinlik haritası	18
Şekil 2.4: Ardışık resim karelerinin ilki üzerinden çıkarılan öznitelik noktaları .	19
Şekil 2.5: Ardışık resim karelerinin ikincisinden çıkarılan öznitelik noktaları . .	19
Şekil 2.6: Ardışık resim kareleri üzerindeki öznitelik eşleri . . . . .	19
Şekil 2.7: $p_1$ ve $p_2$ ardışık resim kareleri üzerindeki 2B öznitelik eşlerini, $P$ ; bu öznitelik eşlerine karşılık gelen 3B noktayı, $c_1$ ve $c_2$ ise hareketli kameranın merkezinin ardışık iki konumunu ifade eder. $R_1$ ve $R_2$ rotasyon matrisleri, $T_1$ ve $T_2$ ise öteleme vektörleridir. . . . .	22



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Önerilen görsel-lidar odometri (GLO) yöntemi ve esas matris (EM) ayrışımı yöntemi ile hesaplanan rotasyon bileşenine ait bağıl poz hataları (BPH). . . . .	25
Çizelge 3.2: Önerilen görsel-lidar odometri (GLO) yöntemi ve esas matris (EM) ayrışımı yöntemi ile hesaplanan öteleme bileşenine ait bağıl poz hataları (BPH). . . . .	25
Çizelge 3.3: Önerilen görsel-lidar odometri (GLO) yöntemi ve LIMO algoritması ile hesaplanan bağıl poz hataları (BPH). . . . .	26





## KISALTMALAR

<b>AÖB</b>	: Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU - Inertial Measurement Unit)
<b>BPH</b>	: Bağlı Poz Hatası (RPE - Relative Pose Error)
<b>DA</b>	: Demet Ayarlama (BA - Bundle Adjustment)
<b>DKKS</b>	: Diferansiyel Küresel Konumlama Sistemi (DGPS - Differential Global Positioning System)
<b>GO</b>	: Görsel Odometri (VO - Visual Odometry)
<b>GZK KKS</b>	: Gerçek Zamanlı Kinematik Küresel Konumlama Sistemi (RTK GPS - Real Time Kinematics Global Positioning System)
<b>ICP</b>	: Yinelemeli En Yakın Nokta (ICP - Iterative Closest Point)
<b>KKS</b>	: Küresel Konumlama Sistemi (GPS - Global Positioning System)
<b>LM</b>	: Levenberg-Marquardt Optimizasyonu (LM - Levenberg-Marquardt Optimization)
<b>MGH</b>	: Mutlak Gezinge Hatası (ATE - Absolute Trajectory Error)
<b>NDD</b>	: Normal Dağılım Dönüşümü (NDT - Normal Distribution Transform)
<b>P-n-N</b>	: Perspektif-n-nokta (P-n-P - Perspective-n-points)
<b>2B</b>	: İki Boyutlu (2D - Two Dimensional)
<b>3B</b>	: Üç Boyutlu (3D - Three Dimensional)



## 1. GİRİŞ

Günümüzde, hem askeri hem de sivil alandaki teknolojik çalışmalar, insansız araçların geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmış durumdadır. Tarım, kargo taşımacılığı, sinematografi, haritalama, askeri gözetleme ve hava desteği gibi pek çok alanda insansız araçların kullanımına duyulan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır [1]. İnsan kaynaklı hataların minimize edilmesi, verimliliğin artırılması, insan erişiminin mümkün olmadığı bölgelere erişim sağlanması, sürüş güvenliğinin artırılması, askeri bölgelerde can kaybının engellenmesi vb. amaçlar insansız araçlara olan ilginin artmasının sebeplerinden bazılarıdır. Uzaktan kumandalı, insan destekli araçların geliştirilmesiyle başlayan çalışmalar, günümüzde otonom araçlarla ilgili yapılan çalışmalara evrilmiştir [2], [3]. Araçlara otonomi yeteneği kazandıran nitelikler; algılama, karar verme ve görevi icra etme işlerinin insan desteği olmadan yapılmasını sağlayan niteliklerdir. Otonom kara araçlarından insansız hava araçlarına, su altı ve su üstü araçlardan uzayda görev yapacak araçlara kadar zaman ve mekan gözetmeksizin farklı görevleri icra edecek olan herhangi bir platforma otonomi yeteneği kazandırabilmek için; algılama, konum kestirimi, güzergah planlama gibi çeşitli alt-sistemlerin bir arada çalışacağı bir yapının kurulması gerekmektedir [4]. Farklı ortamlarda görev yapacak farklı platformlar için çözülmesi gereken problemlerin doğası değişse de, otonom bir sistemi çalışır hale getirmek için temelde aynı problemlerin çözüme kavuşturulması gerekmektedir. Araçlara navigasyon yeteneğinin kazandırılması da bu kapsamda çalışılması gereken temel problemlerden biridir.

Seyrüsefer görevlerinin dört temel bileşeni mevcuttur. Bunlar sırasıyla; çevrenin algılanması, konum kestirimi, izlenecek rotanın planlanması ve navigasyonu sağlayacak kontrol algoritmalarının geliştirilmesidir [5]. İnsanlı veya insansız, otonom veya değil farketmeksizin, herhangi bir aracın/robotun seyrüsefer görevini yerine getirebilmesi için, doğru ve yüksek hassasiyetli konum kestirimi yapabilmesi gerekmektedir. Başka bir deyişle; otonom ya da insan tarafından idare edilen bir aracın/robotun, başlangıç noktasından varış noktasına ulaşabilmesi için öncelikle aracın anlık konumunun bilinmesi gerekmektedir. Günümüzde, konum kestirimini sağlayacak pek çok sensör ve pek çok yöntem mevcuttur. Küresel Konumlama Sistemi (KKS), bu kapsamda kullanılabilen en güvenilir yöntemlerden biridir. Küresel bir ilklendirme yapmadan, robotun bir referans noktasına göre bağlı hareket miktarının tespit edilmesiyle de konum kestirimi

yapmak mümkündür [6]. Verilen bir harita üzerinde, robotun kendi konumu ile çevre nesnelere göre konumunun tespit edilmesi de, eş zamanlı konum kestirimi ve haritalama problemi kapsamında, geçmişten günümüze çalışılmaya devam edilen yöntemlerden birisidir [7]. Konum kestirimi probleminin çözümünde kullanılan algılayıcı donanımlar da çok çeşitlidir. Kullanılan yöntemler ile algılayıcı donanımlar detaylıca incelendiğinde, her birinin çeşitli avantajları ve dezavantajlarının bulunduğu görülmektedir. Tek bir algılayıcı donanım veya metod yeterli ve kesin doğrulukta bir bilgi sağlamadığı için hassas konum kestirimi yapabilmek üzere, genellikle farklı sensörlerden elde edilen verilerin füzyonunun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Günümüzde, kara ve hava araçları için konum kestirimi de büyük ölçekte küresel konumlama sistemi (KKS) ile diğer donanımlardan elde edilen verilerin (ataletsel ölçüm birimi (AÖB), barometrik basınç sensörü, tekerlek kilometre sayacı, kamera, lazer mesafe ölçüm cihazı vb.) füzyonu ile sağlanmaktadır.

KKS; en güvenilir yöntemlerden biri olmasına rağmen, yüksek çözünürlüklü (santimetre-bazında) konum bilgisi elde edebilmek için diferansiyel küresel konumlama (DKKS), gerçek zamanlı kinematik küresel konumlama (GZK KKS) vb. çözümlerin kullanılmasını gerektirmektedir [4]. KKS uydu sinyallerinin kullanılabilmesi ancak açık alanlarda mümkün olmaktadır. Mağara ve bina içlerinde, yüksek yapıların bulunduğu dar sokaklarda, tünellerde vb. kapalı ortamlarda KKS sinyalleri ile doğru konumlama yapılamamaktadır. KKS ile konumlamanın bir diğer dezavantajı da, KKS uydu sinyallerinin karıştırılmaya çok müsait oluşu sebebiyle, özellikle askeri alanlarda kritik görevlerin yerine getirilememesidir. Ataletsel ölçüm birimi (AÖB), barometrik basınç sensörü, sayısal arazi yükseklik haritaları vb. diğer donanımlar ve yöntemlere bakıldığında, hiçbirinin tek başına mutlak doğrulukta konum bilgisi üretmediği anlaşılmaktadır. Burada bahsedilen yöntemlere dair ayrıntılı bilgiler Bölüm 1.1 Konum Tespiti başlığı altında verilmiştir.

Kamera ve Lidar sensörü ile yapılan çalışmalar ise, özellikle KKS sinyallerinin kullanılmadığı ortamlarda yoğunlaşmıştır. KKS-yoksun ortamlarda konum kestirimi problemi, geçmişten günümüze uzun yıllardır çalışılmaya devam edilse de, literatürdeki açık problemler arasındaki yerini korumaya devam etmektedir. Kamera ve Lidar sensöründen elde edilen verilerin kullanıldığı, literatürdeki odometri yöntemleri, Bölüm 1.1.3 ve Bölüm 1.1.4'te anlatılmıştır.

Bu tezin ana amacı, KKS-yoksun ortamlarda lokalizasyon probleminin çözümüne yardımcı olacak görsel-lidar odometri yöntemlerini incelemek ve KKS-yoksun ortamlar için altı serbestlik dereceli konum kestirimi problemini adresleyen bir çözüm önermektir. Bu tez kapsamında önerilen Görsel-Lidar Odometri yöntemi ile ilgili ayrıntılara ise

Bölüm 2. Metodoloji başlığı altında yer verilmiştir. Önerilen yöntemin test edildiği veri kümesi ile deney sonuçları Bölüm 3’de detaylıca anlatılmıştır.

## **1.1 Konum Tespiti**

Bu kısımda, konum tespiti için kullanılan alternatif yöntemler daha detaylı bir şekilde anlatılacaktır. Giriş kısmında anlatıldığı gibi, konum kestirimi; Küresel Konumlama Sistemi (KKS), Ataletsel Ölçüm Birimi (AÖB), tekerlek odometrisi, lidar odometri, görsel odometri, sayısal arazi yükseklik verisi haritaları, barometre gibi çeşitli algılayıcılar ve haritalar kullanılarak farklı yöntemlerle yapılabilmektedir. Her bir yöntemin çeşitli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, bu sensörlerden elde edilen veriler, çoğunlukla sıkı bağlaşımlı veya gevşek bağlaşımlı füzyon yöntemleri ile birarada kullanılmaktadır.

### **1.1.1 KKS ve AÖB ile konum tespiti**

Küresel Konumlama Sistemi (KKS), kapalı olmayan ortamlarda konumlama yapabilmeyi sağlayan, navigasyon amaçlı geliştirilmiş bir sistemdir [4]. Başlangıçta askeri kullanım için geliştirilmiş olsa da, günümüzde sivil alanda kullanımı da oldukça yaygın bir hale gelmiştir. KKS ile dünyanın herhangi bir yerinden konum tespiti yapabilmek için, dünyanın etrafında belirli yörüngelerde hareket etmek üzere yerleştirilen en az 24 adet GPS uydusu bulunmaktadır. Bu uyduların buldukları yörüngeler, uydular arasındaki mesafe ve zaman senkronizasyonu ise yeryüzünde bulunan kontrol bölümü tarafından yapılmaktadır. Her bir KKS uydusu, eş zamanlı olarak buldukları konumu ve zaman bilgisini içeren bir mesaj sinyali iletmektedir. Yeryüzünde bulunan ve konumu tespit edilmek istenen KKS alıcıları ise; uyduların gönderdiği konum verisini, sinyalin gönderildiği anlık zaman bilgisini ve sinyalin alıcı tarafından alındığı zaman bilgisini kullanarak uydulara olan bağıl uzaklıklarını hesaplamaktadır. En az dört uydudan alınan uyduların anlık konum ve zaman bilgileri kullanıldığında, KKS alıcıları kendi konumlarını tespit edebilmektedir. Teoride, KKS alıcılarının kendi konumlarını hesaplayabilmeleri için üç farklı uydudan sinyal almaları yeterlidir. Ancak zaman bilgisinin doğrulanabilmesi için dördüncü bir uydudan sinyal alınması da gereklidir.

Standart KKS’ler ile konum bilgisi yaklaşık 15 metre çözünürlüğünde elde edilmektedir. Yüksek çözünürlükte konum bilgisi elde edebilmek için Diferansiyel KKS (DKKS) ve Gerçek Zamanlı Kinematik KKS (GZK KKS) gibi teknikler kullanılmaktadır. Bu teknikler için, konumu iyi bilinen sabit bir alıcı ile konumu tespit edilmek istenen gezici bir KKS alıcısı kullanılmaktadır. Ancak, bu tekniklerin doğru çalışabilmesi için, sabit alıcının konumunun yüksek doğrulukla tespit edilmiş olması ve gezici GPS alıcısının sabit alıcıya belirli bir mesafede olması gereklidir. Su altında, mağara/tünel/bina içleri

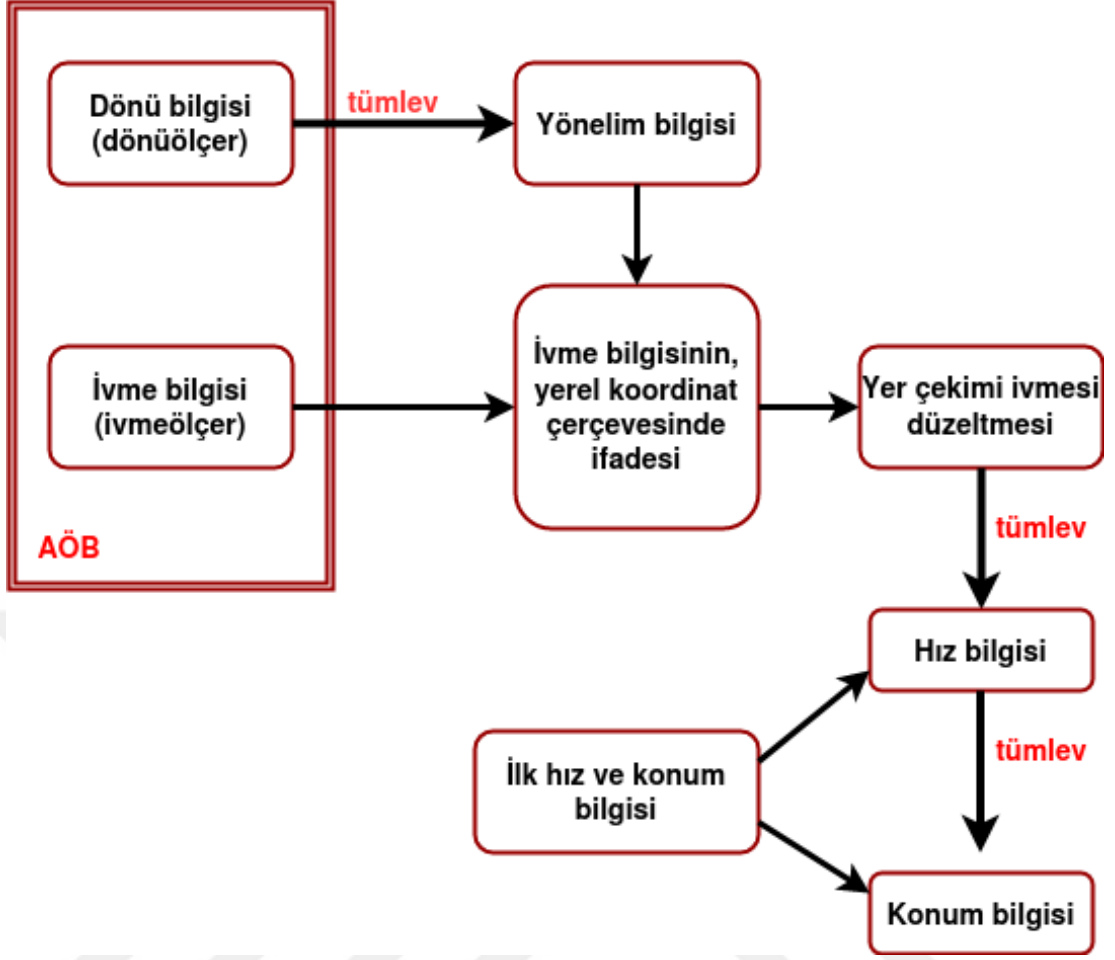
vb. alanlarda, yüksek binaların bulunduğu dar ara sokaklarda, KKS sinyalleri ile hassas konum tespiti yapmak mümkün olmamaktadır. KKS sinyallerinin karıştırılmaya oldukça müsait sinyaller oluşu da, KKS ile konum bulma probleminin dezavantajlarından biridir.

KKS kullanılarak yüksek frekanslı konum bilgisi elde edebilmek için, genellikle, KKS verileri ile daha yüksek frekanslı konum bilgisi sağlayan Ataletsel Ölçüm Birimi (AÖB) verileri birarada kullanılmaktadır. AÖB'ler, dönüölçer ve ivmeölçer yardımıyla ivme, hız ve altı serbestlik dereceli konum bilgisi sağlayan cihazlardır [4]. Bir AÖB içerisinde birbirine dik yerleştirilen 3 adet ivmeölçer ile birbirine dik yerleştirilen 3 adet dönüölçer bulunmaktadır. İvmeölçerler yardımıyla her üç eksenindeki (x, y ve z eksenleri) ivme bilgileri elde edilmektedir. Dönüölçerler ise üç eksen etrafındaki açısal hız bilgisini sağlamaktadır. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi; dönüölçerlerden elde edilen dönü bilgisinin integrali alınarak üç eksen etrafındaki yönelim bilgisi, ivmeölçerlerden alınan ivmelerin birinci integrali alınarak hız bilgisi, ikinci integrali alınarak da konum bilgisi elde edilebilmektedir.

İvmeölçerlerden ve dönüölçerlerden elde edilen işlenmemiş veriler, genellikle gürültülü verilerdir. Hem dönüölçer ölçüm gürültüsü hem de ivmeölçer ölçüm gürültüsü, elde edilen nihai konum bilgisinin hatalı olmasına sebep olmaktadır [8]. Dönüölçerler ile elde edilen gürültülü yönelim bilgileri, ivmeölçer verileri ile yapılacak olan yerçekimi düzeltmesinin de hatalı yapılmasına sebep olmaktadır. Hız ve konum bilgisi elde etmek üzere kullanılan tümlev işlemleri de konum bilgisi üzerindeki hata oranını artırmaktadır. AÖBler, aracın bir önceki anlık konumuna göre bağıl konum ve yönelim bilgisi üreten sensörlerdir. Nihai konum bilgisi, AÖB'ler ile elde edilen ardışık konumların arka arkaya eklenmesiyle elde edilir. İvmeölçer ve dönüölçer ölçümlerinin gürültülü olması sebebiyle, her bir bağıl konum bilgisi de hatalı olacağı için nihai konum bilgisi üzerindeki hata zamanla daha da artacaktır. Bu nedenle, özellikle ucuz AÖB'ler konum tespiti için tek başına kullanılabilen sensörler değildir. Diğer sensör verileri ile birlikte kullanılmaları gerekmektedir.

### **1.1.2 Tekerlek odometrisi**

Tekerlek Odometrisi, tekerlekli kara araçlarında konum kestirimi için kullanılan alternatif yöntemlerden biridir. Tekerleklerin belirli bir süre içerisindeki dönüş sayısı kullanılarak, aracın referans koordinat çerçevesinde konum kestirimi yapılabilmektedir. Tekerlek odometrisi ile konum kestirimi basit ve maliyetsiz bir yöntem olduğu için, bu yöntem pek çok uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, hava ve arazi koşulları tekerlek odometrisi yönteminin güvenilirliğini etkilemektedir. Çamurlu ve/veya ıslak



Şekil 1.1: Ataletsel ölçüm birimi blok diyagramı [4].

arazi koşullarında tekerlek kaymaları, aracı park etmek için yapılan manevralar vb. diğer durumlar tekerlek dönüş sayısını değiştirebileceğinden pozisyon kestirimi doğru şekilde yapılamayacaktır. Bu nedenle, basit ve maliyeti düşük bir yöntem olmasına rağmen, tekerlek odometrisi ile hassas konum bilgisi üretmek mümkün olmamaktadır. Tekerlek odometrisi, genellikle, diğer konum bulma tekniklerine yardımcı bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

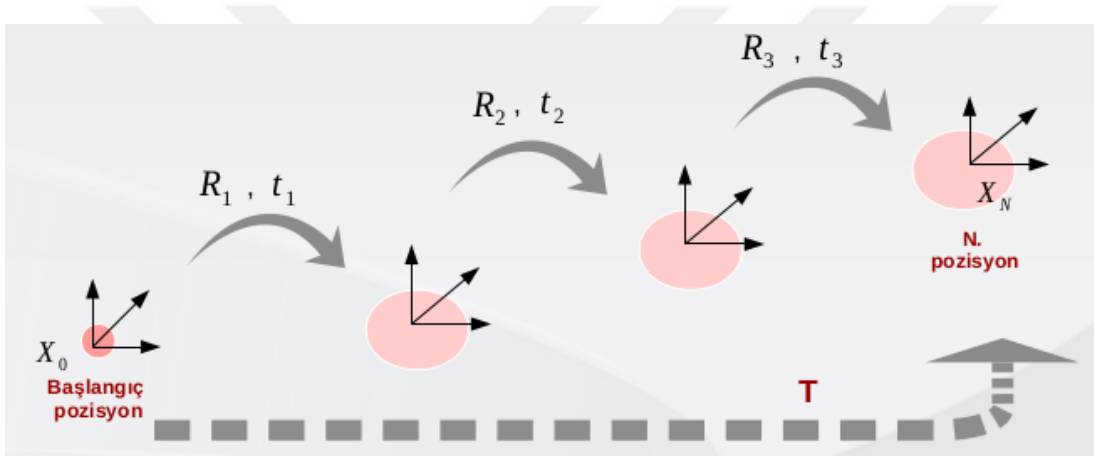
### 1.1.3 Görsel odometri

Robotik kara, hava ve su altı araçları ile yapılan ARGE çalışmalarının artması, hassas ve yüksek frekanslı konum kestirimi için kullanılabilen alternatif yöntemlerin de geliştirilmesi gerekliliğini doğurmuştur. Özellikle, (KKS)'nin kullanılmadığı iç ortamlarda, su altında, tünellerde konum tespiti sağlayabilmek ve diğer sensörler ile elde edilen hatalı konum bilgilerini düzeltmek için kullanılan güvenilir ve ucuz bir yöntem gerekliliği bulunmaktadır. Kameralar ile konum kestirimi problemi de, bu ihtiyaca yanıt verebilmek için bilgisayarlı görü ve robotik alanında uzun zamandır çalışılmakta olan

bir problemdir. Konum kestirimi için kameradan alınan görsel veriler kullanıldığı için, bu teknik görsel odometri olarak isimlendirilmektedir. Görsel Odometri problemine dair temel bilgiler ile problemin tarihçesi [9] ve [10]'da detaylıca anlatılmaktadır.

Görsel Odometri (GO), hareketli bir veya birden fazla kameradan alınan ardışık resim karelerinin işlenmesiyle konum bilgisi elde etmeyi sağlamaktadır. Bu yöntem ile, her bir resim karesinin konumu, kameradan gelen bir önceki resim karesinin konumuna göre bağlı olarak bulunmaktadır [9]. Resim karelerinin konumları, kameraların, ilgili resim karelerini yakaladığı andaki anlık konumunu ifade etmektedir.

Şekil 1.2'de, kameradan alınan ardışık resim kareleri arasındaki ilişki ile nihai konum bilgisinin nasıl elde edildiği gösterilmektedir.  $X_0$ , kameranın başlangıç konumunu,  $X_N$  ise N. konumunu ifade etmektedir ( $N = 1, 2, 3, \dots$ ).  $R$ 'ler ardışık resim kareleri arasındaki rotasyon matrisleri,  $t$ 'ler ise ardışık öteleme vektörleridir.



Şekil 1.2: Görsel odometri blok diyagramı [9].

Kameranın başlangıç konumu ile nihai konumu arasındaki dönüşüm matrisi, Eşitlik (1.4)'te verildiği gibi, ardışık rotasyon matrisleri ve öteleme vektörlerinin uç uca eklenmesiyle elde edilmektedir. 1.1, 1.2 ve 1.3'teki eşitliklerde;  $T_1, T_2$  ve  $T_3$  kameranın ardışık konumları arasındaki bağıl dönüşüm matrislerini ifade etmektedir.  $R_1$  kameranın sıfıncı ve birinci konumu arasındaki rotasyon matrisi,  $R_2$  kameranın birinci ve ikinci konumu arasındaki rotasyon matrisi,  $R_3$  ise kameranın ikinci ve üçüncü konumu arasındaki rotasyon matrisidir. Aynı şekilde,  $t_1$  kameranın sıfıncı ve birinci konumu arasındaki öteleme vektörünü,  $t_2$  kameranın birinci ve ikinci konumu arasındaki öteleme vektörünü,  $t_3$  ise kameranın ikinci ve üçüncü konumu arasındaki öteleme vektörünü ifade etmektedir.

$$T_1 = \begin{bmatrix} R_1 & t_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$



$$T_2 = \begin{bmatrix} R_2 & t_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} R_3 & t_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$T = T_3 * T_2 * T_1 = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

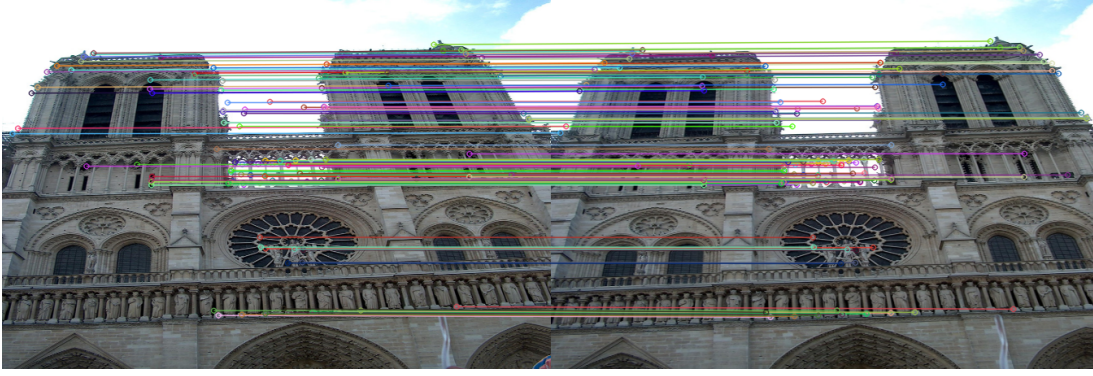
Kameranın nihai konumu ise (1.5) ve (1.6)'da verilen eşitliklerden biri kullanılarak bulunabilmektedir. İlgili eşitliklerde;  $X_N$  kameranın nihai konumunu,  $X_0$  ise başlangıç konumunu göstermektedir.  $R$ ,  $t$ ,  $T$  sırasıyla; kameranın başlangıç konumu ile nihai konumu arasındaki rotasyon matrisi, öteleme vektörü ve bağıl dönüşüm matrisidir.

$$X_N = RX_0 + t \quad (1.5)$$

$$X_N = TX_0 \quad (1.6)$$

Ardışık resim kareleri arasındaki bağıl rotasyon matrisi ile öteleme vektörünü bulmak için kullanılan yöntemler, öznitelik tabanlı yaklaşımlar ve dolaysız yaklaşımlar olmak üzere iki ayrı sınıfta incelenmektedir [11]. Öznitelik tabanlı yaklaşımlarda, resim kareleri üzerindeki belirgin noktalar elde edilerek, bu noktalar ile bunların ardışık resim kareleri üzerindeki eşleri kullanılmaktadır [12], [13]. Resim kareleri üzerindeki belirgin noktalar, genellikle nesnelere veya desenlere oluşturan köşe noktalarını ifade eden piksellerdir [14], [15], [16]. Bu pikseller, resim kareleri üzerindeki ayırt edici özniteliklerdir. Resim kareleri üzerindeki öznitelikleri diğer resim kareleri üzerinde takip etmek kolaydır. Şekil 1.3'te özniteliklerin çıkarılıp eşleştirildiği örnek resim kareleri verilmiştir. Öte yandan, düz beyaz bir duvarın fotoğrafının çekildiğini düşünelim. Çekilen fotoğraf üzerinde hiçbir desen olmayacağından, bu resim karesi üzerinden ayırt edici bir öznitelik seti çıkarmak mümkün olmayacaktır. Kamerayı hareket ettirip, duvarın farklı bir açıdan fotoğrafını çeksek bile, resim kareleri üzerinde ayırt edici pikseller olmayacağından, ikinci fotoğrafın farklı bir açıdan çekildiğini anlamak mümkün olmayacaktır.

Öznitelik tabanlı yaklaşımlarda, çoğunlukla, resim kareleri üzerindeki piksellerin tamamı kullanılmamaktadır. Resim karelerine dair önemli bilgiler taşıyan az sayıda piksel seti kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu yaklaşımlar Seyrek Görsel Odometri yöntemleri diye de isimlendirilirler. Dolaysız yaklaşımlarda ise resim kareleri üzerindeki piksellerin parlaklık değerleri kullanılmaktadır [18]. Bu yöntemler, öznitelik tabanlı



Şekil 1.3: Resim kareleri üzerindeki öznitelik eşleri [17].

yaklaşımlardan farklı olarak, genellikle piksellerin büyük bir çoğunluğunun kullanımını gerektirmektedir. Bu nedenle literatürde Yoğun Görsel Odometri yöntemleri ismiyle yer alırlar [19]. Dolaysız yaklaşımlarda çok sayıda piksele ait veri işlendiği için, bu yöntemler, işlem yükü ve işlem zamanı açısından maliyetli yöntemlerdir. Bu durum, yüksek doğrulukta sonuçlar üretmesine rağmen, Yoğun Görsel Odometri yaklaşımlarının tercih edilmemesine sebep olmaktadır. Gerçek zamanlı olarak, yüksek doğrulukta sonuçlar elde edebilmek için, dolaysız yaklaşımlar kullanmasına rağmen piksellerin tamamını değil de bir kısmını kullanan yaklaşımlar da bulunmaktadır [20], [21].

Görsel odometri çalışmaları, konum kestirimi yapılacak platformun durumuna göre, tek kamerayla [22] veya birden fazla kamerayla [23], [24] yapılabilmektedir. Uçuş süresi ve yük taşıma kapasitesi gereği kısıtlı donanım seti ile hareket etmesi gereken mini/mikro hava araçlarının lokalizasyonunu sağlamak üzere bazı durumlarda tek kamera kullanılması gerekmektedir. Tek kamera ile konum kestirimi yapabilmek için dolaysız yaklaşımları kullananlar doğrudan piksel değerlerini kullandıkları için fotometrik hatayı en aza indirmeye çalışırlar. Tek kamera ile pozisyon kestirimi için öznitelik tabanlı yaklaşımların kullanıldığı durumlarda ise, kameradan alınan ardışık resim kareleri üzerindeki öznitelikler çıkarılıp, bu özniteliklere dair nitelik tanımlayıcı vektörlerin hesaplanması gerekir. Ardışık resim kareleri üzerindeki özniteliklere ait bu nitelik tanımlayıcı vektörler yardımıyla her bir resim karesi üzerindeki özniteliklerin sonraki resim karesi üzerindeki eşleri elde edilir. İlgili öznitelik eşlerinin bulunmasının ardından kamera hareket bilgilerini (öteleme vektörü ile rotasyon matrisi) içeren Esas Matris elde edilir [25]. Dolayısı ile (1.7)'deki eşitlikte;  $E$ , 3x3 boyutlu Esas Matris'i,  $t$ , 3x1 boyutlu öteleme vektörünü,  $R$  ise 3x3 boyutlu rotasyon matrisini ifade etmektedir [9].  $[t]_x$  öteleme vektörünün, ters simetrik matris ifadesidir (1.9).

$$E = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \times R = [t]_x R \quad (1.7)$$

$$\underline{t} = [t_x, t_y, t_z]^T \quad (1.8)$$

$$[t]_x = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Esas Matrisin, tekil değer ayrıştırması yöntemi ile ayrıştırılmasının ardından [26], kameranın ardışık iki konumu arasındaki rotasyon matrisi ile öteleme vektörü elde edilmektedir. Esas matris ayrışımı yöntemi ile elde edilen rotasyon matrisi, kameranın hareketi sırasında her üç eksen etrafında yaptığı hareketin bilgisini içermektedir. Öte yandan, öteleme vektörü, kameranın üç eksen boyunca yaptığı hareketin ölçekli halini içermektedir. Esas matris ayrışımı yöntemi ile, resim kareleri üzerindeki iki boyutlu (2B) pikseller kullanılmaktadır. İlgili piksellere ait herhangi bir derinlik bilgisini kullanılmadığı için öteleme vektörünün metrik değerini elde etmek mümkün değildir. Bu nedenle, başka bir sensör verisi kullanılmadan tek bir kamera ile elde edilen rotasyon matrisinin gerçek değeri hesaplanabilmesine rağmen, öteleme vektörü belirli bir ölçek dahilinde elde edilmektedir. Gerçek öteleme vektörünü hesaplayabilmek için de ilgili ölçek bilgisinin ek yöntemlerle bulunması gerekir.

İki veya daha fazla kameranın kullanıldığı durumlarda ise ölçek problemi ortadan kalkmaktadır. Birden fazla kamera ile hem rotasyon matrisi hem de öteleme vektörünün metrik değerlerini elde etmek mümkün hale gelmektedir. Bu problemlerde, aralarında belirli bir mesafe bulunan ve aynı ana hat üzerine yerleştirilmiş olan farklı kameralardan alınan resim kareleri üzerindeki 2B öznitelik/piksel eşlerine karşılık gelen üç boyutlu (3B) noktalar üçgenleştirme yöntemi ile elde edilmektedir [9]. Bu şekilde, konum kestirimi için 2B - 2B öznitelik/piksel eşleri yerine, 3B - 2B eşler veya 3B - 3B nokta bulutu eşleri kullanılabilir. Dolayısıyla iki veya daha fazla kameranın kullanıldığı durumlarda, öteleme vektörü, ölçek hesabına gerek kalmadan kesin şekilde bulunabilmektedir.

Hem renkli resim karelerini hem de ilgili resim karelerine ait derinlik bilgisini elde edebildiğimiz RGB-D kameraları kullanarak konum kestirimi problemini adresleyen çalışmalar da mevcuttur [27].

Yukarıda da belirtildiği gibi, Görsel Odometri algoritmaları, hareketli kameranın ardışık poz bilgilerini bir önceki pozisyon bilgisine göre bağlı olarak hesaplamaktadır. Nihai konum bilgisi ise, ardışık rotasyon ve öteleme bilgilerinin arka arkaya eklenmesiyle

bulunmaktadır. Kameranın ardışık pozisyonları arasında hesaplanan her bir dönüşüm matrisi; öznitelik çıkarımı ve eşleştirilmesi sırasında meydana gelen hatalar, ışık değişimleri, lens bozulmaları vb. sebeplerden ötürü belirli bir hata payı ile hesaplanır. Her biri bir miktar hata içeren ardışık dönüşüm matrislerinin arka arkaya eklenmesiyle pozisyon bilgisi üzerindeki hata payı gitgide artacaktır. Pozisyon bilgisi üzerindeki hatanın azaltılabilmesi için döngü tespiti, demet ayarlama ve poz grafik optimizasyonu gibi çeşitli optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu tezde önerilen algoritma ise bu optimizasyon tekniklerinin hiçbirini kullanmamaktadır.

#### **1.1.4 Lidar odometri**

Üç boyutlu nokta bulutları; iki kamera ile üçgenleştirme yöntemi kullanılarak kestirilebileceği gibi, Lidar sensörüyle de elde edilebilmektedir. Lidar sensörü, etrafta bulunan nesnelere ait noktaların Lidara göre üç boyutlu uzaklığını vermektedir. Bir başka deyişle, nesnelere ait 3B noktaların; x,y ve z eksenlerinde lidar sensörünün merkezine ne kadar uzakta olduğunun bilgisini üretmektedir. Lidar ile konum bilgisi elde edebilmek için, ardışık Lidar taramalarının eşleştirilmesi gereklidir. Ardından, eşleşen nokta bulutları kullanılarak ICP [28] veya NDD [29], [30] algoritmaları ile odometri bilgisi hesaplanmaktadır. [31] ve [32]'deki çalışmalar, konum bulma problemini, lidar sensöründen elde edilen ardışık lidar taramalarını kullanarak çözmektedir.

Görsel Odometri algoritmalarında olduğu gibi, Lidar odometri algoritmaları da sensörün anlık poz bilgisini, sensörün bir önceki pozisyonuna göre bağıl olarak hesaplamaktadır. Nihai konum bilgisi de ardışık dönüşüm matrislerinin arka arkaya eklenmesiyle elde edilir. Bu nedenle, lidar taramalarının eşleştirilmesi yöntemiyle elde edilen pozisyon bilgileri üzerindeki hata miktarı zamanla artacaktır. Ayrıca, yukarıda bahsedilen ICP ve NDD algoritmaları, sensörün hızlı yer değiştirdiği durumlarda, lidar taramalarını eşleştirmekte sıkıntı yaşayacağı için başarısız sonuçlar verecektir. Bu sebeplerle, Lidar sensörünü, diğer sensörlerle birlikte kullanmak daha iyi sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır.

#### **1.1.5 Diğer yöntemler**

Yukarıda anlatılan metodlar dışında, konum kestirimi için kullanılacak; sayısal arazi yükseklik verileri, barometrik basınç sensörü, ultrasonik sensör, laser mesafe ölçücü gibi çeşitli yöntemler de mevcuttur [4]. Ancak bu yöntemlerin hiçbirisi, altı serbestlik dereceli pozisyon bilgisini büyük doğrulukla elde etmek için yeterli değildir. Sayısal arazi yükseklik verisi haritaları kullanılarak, ilgili bölgelerin yeryüzü şekillerinin yükseklik bilgisi elde edilebilirken [33]; arazi eğiminin gerekli şartları sağlamadığı

yollarda, verilen yükseklik verisi, konum bulma problemi için kullanılamamaktadır. Çeşitli yol/köprü/viyadük yapım çalışmalarının ardından ilgili bölgenin mevcut sayısal arazi yükseklik verisi haritasının güncelliğini yitirmesi de konum bulma problemi için kullanılmasını kısıtlamaktadır. Barometrik basınç sensörü, deniz seviyesinden ne kadar yüksekte olduğunun bilgisini vermektedir [34] ve sayısal arazi yükseklik verileriyle beraber 6 serbestlik dereceli konum tespiti için kullanılabilir. Lazer mesafe ölçücü ise, nesnelerin cihaza göre tek bir eksenindeki bağıl uzaklık bilgisini vermektedir. Bu yöntemlerin hiç birisi tek başına üç boyutlu (3B), 6-serbestlik dereceli (6 DOF) konum bulma problemi için yeterli ve kesin doğrulukta veri sağlamamaktadır.

Giriş kısmında verildiği gibi, birden fazla sensör verisinin füzyonu yapıldığında daha hassas bir konum bilgisi elde etmek mümkün hale gelmektedir. [35]'de lidar verisi ile elde edilen konum bilgisinin, KKS ve ataletsel ölçüm biriminden alınan verilerle füzyonu yapılmaktadır. [36]'da kamera verisi, AÖB sensöründen alınan verilerle birlikte kullanılmaktadır. [37] ve [38]'deki çalışmalarda ise kamera verisi ile lidar nokta bulutları birarada kullanılarak odometri bilgisi hesaplanmaktadır. [38]'de verilen çalışmada, kameradan elde edilen öznitelikler ile görsel odometri yöntemi uygulanmakta ve kameranın Lidar verisi ile oluşturulan 3B harita üzerinde lokalizasyonu gerçekleştirilmektedir. [39]'da; lidar verileriyle elde edilen derinlik bilgisi ile öznitelik eşleri arasındaki ilişki, aynı düzlem üzerindeki öznitelikler kullanılarak çıkarılmaya çalışılmıştır. Aynı çalışmada, demet ayarlama yöntemi için P-n-N algoritması da [40] uygulanmaktadır. Görsel veriler ve Lidar sensöründen ayrı ayrı konum bilgisi elde ederek, bu konum bilgilerini gevşek bağlantılı füzyon teknikleriyle (Genişletilmiş Kalman Filtreleme yöntemi gibi) iyileştirmek de kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. [41] ve [42]'de verilen yayınlarda, lokal ve küresel pozisyon bilgilerini hesaplamak için kamera, AÖB ve KKS'nin poz grafik optimizasyonu yöntemi ile nasıl kullanıldığı anlatılmaktadır.

### **1.1.6 Bu tezin kapsamı**

Literatürde, bir veya birden fazla sensör verisini kullanarak konum kestirimi problemini adresleyen pek çok çalışma mevcuttur. KKS ve AÖB ile konum kestirimi, üzerinde iyi çalışılmış, günümüzde sıklıkla kullanılan önemli bir yöntemdir. Sayısal arazi yükseklik verisi haritaları, barometrik sensör, lazer mesafe ölçücü ve tekerlek odometrisi ise KKS veya aöb verileri ile birarada kullanılabilir. KKS yoksun ortamlarda konum kestirimi problemi için de literatürde iyi çalışılmış çeşitli yöntemler olmakla birlikte, bu problem, günümüzde üzerinde hala çalışılması gereken açık noktalar içermektedir. İç ortamlarda, tünellerde veya su altında, konum kestirimi problemi için genellikle AÖB

ile kamera sensörleri tercih edilmektedir. Tek bir kamera ile 6 serbestlik dereceli konum bilgisini ancak bilinmeyen bir ölçek dahilinde elde etmek mümkün olduğundan, kamera verisi ile AÖB verisini birarada kullanarak ölçek bilgisini kestirmeyi deneyen bir çok çalışma mevcuttur [42], [36]. Birden fazla kamera verisi ile bu kameralar arasındaki (önceden ölçülmüş olan) anahat uzaklığını kullanarak ilgili ölçek bilgisinin kestirimini sağlayan çalışmalar da oldukça iyi bir temele oturtulmuştur [23].

Altı serbestlik dereceli konum kestirimi problemi için tercih edilen bir diğer donanım ise Lidar sensörüdür. Lidar'dan elde edilen ardışık taramaları kullanarak konum bilgisi elde etmek mümkündür. Ancak tek bir Lidar sensöründen elde edilen 3B nokta bulutları ile elde edilen konum bilgisi kısa süre içerisinde büyük hatalar içermeye başlayacaktır. Sensörün doğası gereği, ardışık taramalar arasındaki pozisyon bilgisini, kameralarda olduğu gibi izdüşüm hatasını optimize ederek iyileştirmek mümkün değildir. Tek bir lidar sensörü ile elde edilen konum bilgisini iyileştirmek için, nokta bulutlarının işlenmeden önce genellikle ön elemelerden geçirilmesi gerekmektedir [43]. Bu ön eleme sırasında nokta bulutları semantik olarak ayrıştırılarak, yer düzlemine ve hareketli cisimlere ait nokta bulutları elde edilmekte ve bu noktalar aykırı noktalar olarak işaretlenmektedir. İşaretlenen aykırı noktalar elenerek geriye kalan nokta bulutları pozisyon kestirimi için kullanılmaktadır. Lidar odometri ile yüksek doğrulukta sonuçlar elde edebilmek için ayrıca eş zamanlı lokalizasyon ve haritalama yapılması ve döngü tespiti ile pozisyon bilgisinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu işlem, aracın daha önce geçtiği bir noktadan ikinci defa geçişi sırasında aynı noktadan daha önce geçtiğinin harita yardımıyla tespit edilmesini ve bu bilgi kullanılarak pozisyon bilgisinin geriye dönük şekilde iyileştirilmesini gerektirmektedir. Döngü kapatma ve haritalama işlemleri, pozisyon bilgisinin doğruluğunu artırsa da, zaman açısından dezavantaj yaratmaktadır. Birden fazla Lidar kullanarak ilgili pozisyon bilgisini iyileştirebilmek de mümkündür. Ancak, Lidar çok pahalı ve ağır bir sensör olduğundan özellikle mini-mikro hava araçları için birden fazla Lidar kullanmak istenen bir durum değildir. Tek bir Lidar sensöründen elde edilen nokta bulutlarını daha ucuz donanımlardan alınan verilerle birlikte kullanmak hem maliyet hem de doğruluk açısından daha mantıklı olmaktadır. Literatürde, Lidar verisini AÖB verileriyle birlikte kullanan yöntemler mevcuttur [44]. Bu yöntemler, AÖB ile Lidar sensörü arasındaki harici kalibrasyon matrisinin, yani sensörler arasındaki mesafenin hatasız şekilde bilinmesini gerektirmektedir. İlgili harici kalibrasyon bilgisini elde edebilmek için kullanılan sensör setinin her üç eksen etrafında ve her üç eksen boyunca hareket ettirilmesi zorunludur. Ancak, yerde hareket eden kara araçları üzerine (araba, tank vb.) entegre edilen sensör seti için bu hareketi sağlamak mümkün değildir. Yerde hareket eden kara araçları ancak düzlemsel şekilde hareket

edebilmektedir. Bu nedenle ilgili kalibrasyon bilgisinin elde edilmesi sırasında yapılan ölçüm hataları, Lidar-ataletsel odometri bilgisinin de hatalı olmasına sebep olmaktadır.

Günümüzde, Lidar verileri ile kamera verilerini birlikte kullanarak konum kestirimi problemini çözmeyi amaçlayan az sayıda çalışma mevcut olmakla birlikte, bu konu hala üzerinde çalışılmaya devam edilen bir konudur [37], [38]. Mevcut çalışmalar, ilgili konum verisini elde edebilmek için karmaşık yöntemler uygulamaktadır. [39]'da verilen çalışma, lidar nokta bulutlarının resim kareleri üzerine izdüşümünü gerçekleştirip, izdüşümü gerçekleştirilen noktaları semantik olarak ayrıştırmaktadır. Hareketli nesnelere ait noktaları, yer düzlemine ait noktaları ve eğimli yüzeylere ait olan noktaları aykırı noktalar olarak işaretleyip, geri kalan öznelik eşleri ile nokta bulutlarını odometri için kullanmaktadır. İlgili algoritma, kameranın ardışık resim kareleri arasındaki bağıl pozisyon bilgisini Perspektif-n-Nokta algoritması ve demet ayarlama yöntemini kullanarak gerçekleştirmektedir. İlgili çalışmada, nokta bulutları işlenmeden önce semantik olarak ayrıştırıldığından, düşük örüntülü resim kareleri için kullanılacak öznelik-nokta bulutu eşi bulunmaması ihtimali doğmaktadır. Bu tarz durumlarda da, pozisyon bilgisini Esas Matris ayrışımı yöntemi ile elde etmektedir. Algoritmada döngü kapatma optimizasyon yöntemi kullanılmamıştır. İlgili yayında verilen test sonuçları incelendiğinde sonuçlar iyi görünmekle birlikte, ilgili çalışmaya ait açık kaynak kod çalıştırıldığında odometri test sonuçlarının yeterince iyi olmadığı anlaşılmaktadır.

Bu tezde ise, tek bir kamera ve lidar sensöründen elde edilen veriler kullanılarak, öznelik tabanlı bir görsel-lidar odometri algoritması geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar KITTI odometri veri kümesi [45] üzerinde test edilmiştir. Önerilen yöntemin, [39]'da verilen yöntem ile ortak noktaları bulunmakla birlikte; bu tezde, noktaların semantik ayrıştırılması, Esas matris ayrışımı yöntemi, demet ayarlama optimizasyonu gibi ek metodlar uygulanmamaktadır. Dolayısı ile bu tezde önerilen algoritma, [39]'da verilen yöntemden farklılaşmaktadır. Önerilen algoritmada karmaşık yöntemler kullanılmadan, Perspektif-n-Nokta algoritması ile odometri bilgisinin nasıl elde edildiği değerlendirilmiştir. Bu tezin 2. bölümünde (Metodoloji), ilgili çalışmaya dair detaylar verilmektedir. Bölüm 3'de, KITTI veri kümesi ile yapılan deneyler ile test sonuçlarına yer verilmektedir. Daha sonra Bölüm 4'de ise önerilen yöntem ve elde edilen test sonuçlarıyla ilgili genel bir değerlendirme yapılarak, sonuçları iyileştirmek için uygulanabilecek yöntemlere değinilmiştir.





## 2. METODOLOJİ

Bu bölümde, öncelikle, geliştirilen görsel-lidar odometri algoritması ile ilgili detaylı bilgiler verilecektir. Daha sonra görsel-lidar odometri probleminin çözümünde karşılaşılan hataların kaynaklarına değinilecek ve sonuçları iyileştirebilmek adına uygulanabilecek optimizasyon teknikleri anlatılacaktır.

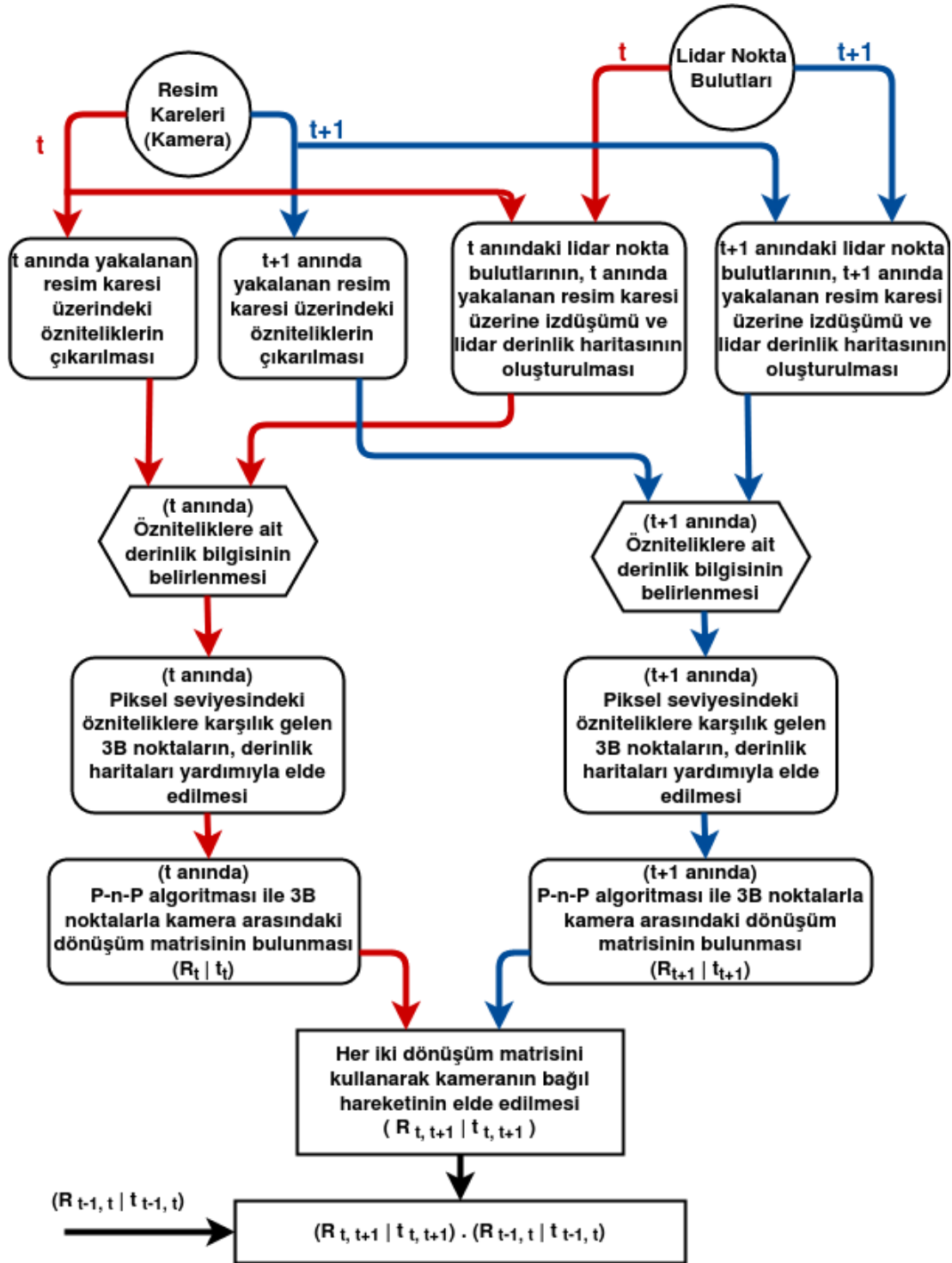
### 2.1 Görsel-Lidar Odometri

Görsel-lidar odometri, tek bir kamera ve Lidar verisi kullanılarak, altı serbestlik dereceli pozisyon bilgisinin elde edilmesi problemini çözmektedir. Bunun için kameradan alınan ardışık resim kareleri ve Lidar taramalarıyla elde edilen 3B nokta bulutları kullanılmaktadır (Şekil 2.1).

Bu tezin konusu olan algoritma ile, öncelikle ardışık resim kareleri üzerindeki öznitelikler elde edilerek, ilgili özniteliklere ait tanımlayıcı vektörler hesaplanır. Aynı zamanda, ardışık Lidar taramaları kullanılarak, ardışık resim karelerine karşılık gelen seyrek derinlik haritaları oluşturulur. Sonrasında, seyrek derinlik haritaları ile resim kareleri üzerindeki özniteliklere ait derinlik bilgisi çıkarılır. Derinlik bilgisi bilinen 2B piksellere karşılık gelen 3B noktalar, kamera yansıtma eşitliği ile elde edilir. Böylece, resim kareleri üzerindeki 2B özniteliklerin gerçek dünyadaki 3B karşılıkları elde edilmiş olur. Bulunan 2B-3B öznitelik eşleri kullanılarak pespectif-n-nokta (P-n-N) algoritması ile kameranın ardışık pozisyonları arasındaki bağıl dönüşüm matrisi elde edilir. Kameradan alınan ardışık resim kareleri için elde edilen tüm dönüşüm matrisleri arka arkaya eklendiğinde ise kameranın başlangıç pozisyonuna göre hangi açıyla ne kadar yol aldığı hesaplanmış olur. Algoritmanın detayları bu bölümün geri kalanında anlatılmıştır.

#### 2.1.1 Lidar derinlik haritasının oluşturulması

Derinlik haritası, resim karesi üzerindeki piksellere ait derinlik bilgisini gösterir. Başka bir deyişle, resim karesi üzerindeki piksellere karşılık gelen 3B noktaların kameraya uzaklığının bilgisini içerir. Lidar derinlik haritalarının bulunması işlemi, Lidar ile elde edilen 3B nokta bulutlarının resim kareleri üzerine izdüşürülmesi ile gerçekleştirilir.



Şekil 2.1: Görsel-lidar odometri blok diyagramı.

Lidar nokta bulutlarının, kameradan elde edilen resim kareleri üzerine izdüşümünü gerçekleştirebilmek için, Eşitlik 2.1 ve 2.2’de verilen kamera ve Lidar sensörleri arasındaki uzamsal kalibrasyon matrisinin bilinmesi gerekmektedir. Eşitlik 2.1’de;  $R$ ,  $3 \times 3$ ’lük rotasyon matrisini,  $t$  ise  $3 \times 1$ ’lik öteleme vektörünü ifade etmektedir. Eşitlik

2.2’de verilen  $T_{lidar}^{cam}$  ifadesi ise, lidar ile kamera arasındaki katı cisim dönüşüm matrisidir.

$$[R|t] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$T_{lidar}^{cam} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

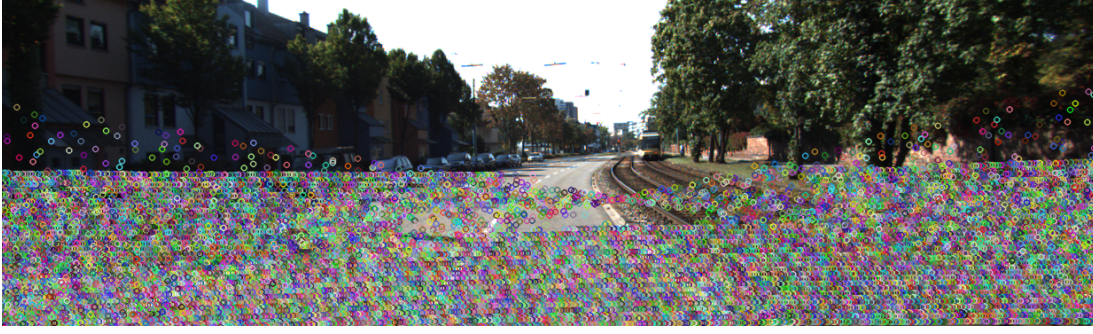
Lidar nokta bulutları ile resim kareleri arasında bir ilişki kurabilmek için gerekli olan bir başka koşul ise lidar taramaları ile kamera verisinin senkronize edilmesidir. Yani her bir lidar taramasına karşılık gelen resim karesinin bulunması gerekmektedir. Algoritmayı test etmek için kullandığımız KITTI veri kümesi [45] senkronize edilmiş ve doğrultulmuş veriler içermektedir. KITTI veri kümesindeki senkronize edilmiş veriyi kullanarak, Lidar nokta bulutlarının resim kareleri üzerine izdüşümü 2.3’te verilen eşitlikle gerçekleştirilir [45]. Verilen eşitlikte  $P_d$ , doğrultulmuş kamera koordinatları için kullanılan kamera izdüşüm eşitliği;  $R_d$  ise doğrultucu rotasyon matrisidir. Eşitlik 2.4’te ise;  $f_u$  ve  $f_v$  kameranın odak uzaklıklarını,  $c_x$  ve  $c_y$  esas noktaları ifade etmektedir. Aynı eşitlikte yer alan  $b_x$  ise, kameralar arasındaki ana hat uzunluğunu ifade eder. Daha önce de belirtildiği gibi, KITTI veri kümesi stereo kameradan alınan doğrultulmuş resim karesi çiftlerini içermektedir. Bu çalışmada yalnızca tek bir kameradan alınan (KITTI veri kümesinde verilen sol kamera) resim kareleri kullanılacağı için  $b_x$  sıfır kabul edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = P_d R_d T_{lidar}^{cam} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

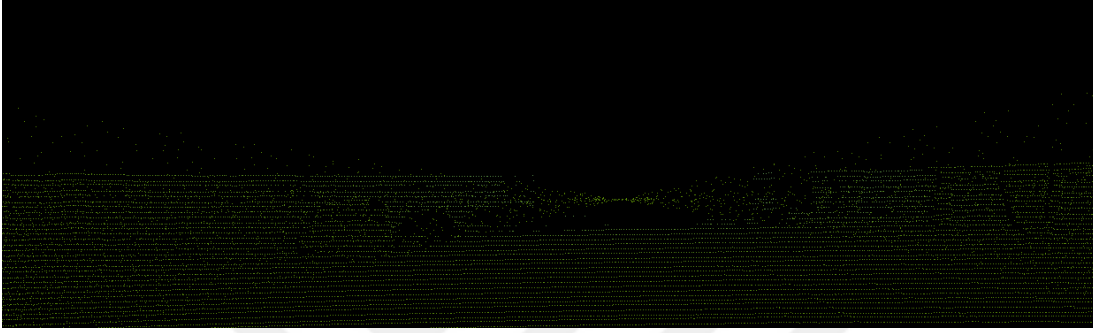
$$P_d = \begin{bmatrix} f_u & 0 & c_u & -f_u b_x \\ 0 & f_v & c_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.3 ve 2.4’te verilen eşitliklerde;  $[X \ Y \ Z \ 1]^T$ , lidar nokta bulutu içerisindeki 3B bir nokta,  $[u \ v \ 1]$  ise resim kareleri üzerindeki 2B bir pikseli gösterir.

KITTI veri kümesindeki bir resim karesi üzerine izdüşümü gerçekleştirilen Lidar noktalarını gösteren örnek şekil, 2.2’de verilmiştir. Şekil 2.3’de ise, elde edilen örnek derinlik haritası gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Resim kareleri üzerine izdüşümü gerçekleştirilen lidar noktaları.



Şekil 2.3: KITTİ veri kümesi üzerinde elde edilen örnek bir lidar derinlik haritası.

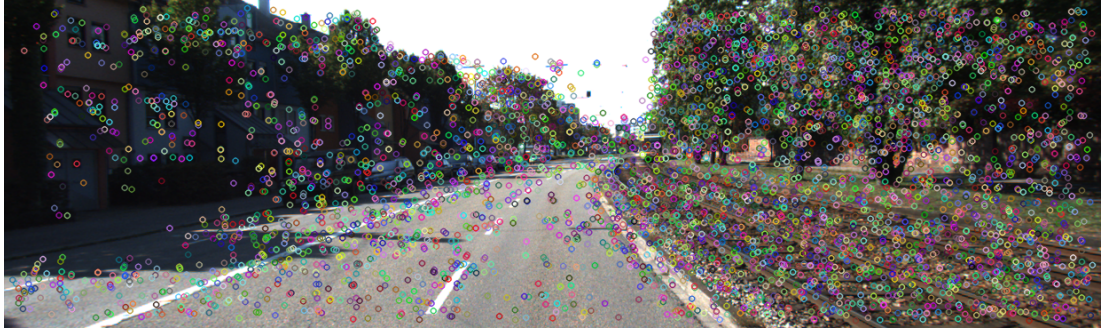
Şekil 2.2 ve 2.3’de görüldüğü gibi, lidar derinlik haritaları, resim kareleri üzerindeki tüm piksellere dair bir derinlik bilgisi bulundurmamaktadır. Lidar sensörünün taradığı alan kamera görüntülerinin yalnızca bir kısmı ile örtüşmektedir. Bu nedenle, lidar derinlik haritaları ile resim kareleri üzerindeki belirli bir piksel setine karşılık gelen derinlik bilgisi elde edilebilmektedir. Bu şekilde elde edilen derinlik haritaları, seyrek derinlik haritaları olarak adlandırılmaktadır.

### **2.1.2 Kamera-lidar öznitelik eşlerine karşılık gelen 3B nokta bulutlarının bulunması**

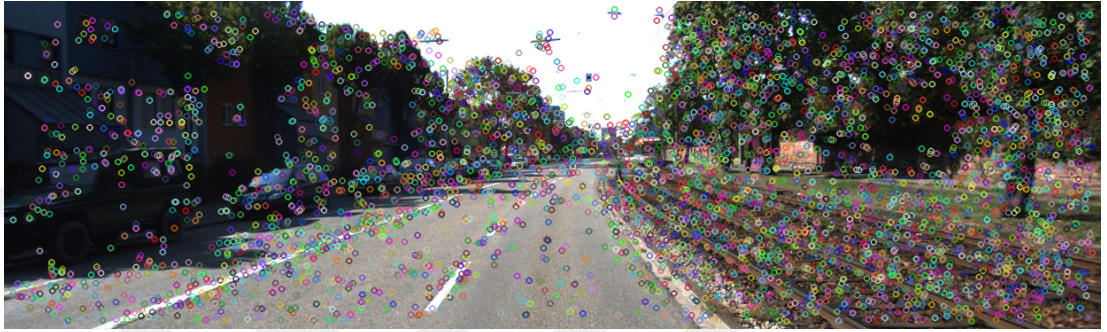
Kamera-Lidar öznitelik eşleri, Şekil 2.2 ve 2.3’de verilen lidar izdüşüm noktaları ile lidar derinlik haritaları kullanılarak elde edilir. Ancak öncelikle, kameradan alınan ardışık iki resim karesi üzerindeki öznitelik eşlerinin Bölüm 1.1.3’te anlatıldığı gibi elde edilmesi gerekmektedir. Şekil 2.4 ve 2.5’te ardışık iki resim karesi ile resim kareleri üzerindeki öznitelik noktaları gösterilmektedir.

Elde edilen özniteliklere dair hesaplanan öznitelik tanımlayıcı vektörler yardımıyla Şekil 2.6’da verilen öznitelik eşleri elde edilmiştir. Ardışık iki resim karesi üzerindeki öznitelik eşlerinin elde edilmesinin ardından, her iki resim karesine ait lidar derinlik haritaları da Bölüm 2.1.1’de anlatıldığı şekilde elde edilir.

Lidar derinlik haritaları, resim karelerindeki 2B öznitelik eşlerine karşılık gelen



Şekil 2.4: Ardışık resim karelerinin ilki üzerinden çıkarılan öznitelik noktaları.



Şekil 2.5: Ardışık resim karelerinin ikincisinden çıkarılan öznitelik noktaları.



Şekil 2.6: Ardışık resim kareleri üzerindeki öznitelik eşleri.

derinlik bilgilerine ulaşabilmek için kullanılmaktadır. Seyrek derinlik haritaları, resim karelerindeki tüm öznitelik eşlerine ait derinlik bilgisini içermemesine rağmen, konum kestirimi için yeterli sayıda öznitelik eşine ait derinlik bilgisini sağlamaktadır.

Lidar sensörü ile elde edilen 3B nokta bulutları, Lidar'dan çıkan lazer ışınlarının çarpıp geri döndüğü her bir noktayı ifade etmektedir. Bu nokta bulutlarının içerisinde, ayırt edici bir özellik içermeyen; yola, düz duvarlara ait 3B noktalar da mevcuttur. Lidar nokta bulutlarının konum tespiti için kullanılabilmesi için, tıpkı resim karelerinde olduğu gibi, ardışık taramalarda takip edilmesi kolay özniteliklerinin çıkarılması gerekir. Yukarıda anlatılan kamera-lidar öznitelik eşlerinin çıkarılması, Lidar nokta bulutu içerisindeki özniteliklerin de elde edilmesini sağlamaktadır.

Lidar derinlik haritaları yardımıyla, resim kareleri üzerindeki öznitelik eşlerine ait derinlik bilgisinin ( $Z_1$  ve  $Z_2$ ) elde edilmesinin ardından, birinci resim karesine ait özniteliklere karşılık gelen 3B noktalar ( $X_1$ ,  $Y_1$  ve  $Z_1$ ), 2.7 ve 2.8'de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilir. Eşitlik 2.5'de,  $x'_1$ ,  $y'_1$  ve  $z'_1$ , üç boyutlu noktaların ( $X_1$ ,  $Y_1$  ve

$Z_1$ ) kamera izdüşüm eşitliği ile kamera koordinatlarına dönüştürülmesiyle elde edilir. Aynı eşitlikte,  $f_u$  ve  $f_v$  kameranın odak uzunluklarını,  $c_u$  ve  $c_v$  ise esas noktaları ifade etmektedir. Eşitlik 2.6, 2.7 ve 2.8'deki,  $u_1$  ve  $v_1$  sembolleri ise birinci resim karesi üzerindeki homojen piksel koordinatlarını ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & c_u & 0 \\ 0 & f_v & c_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$u_1 = \frac{x'_1}{z'_1} \quad v_1 = \frac{y'_1}{z'_1} \quad (2.6)$$

$$X_1 = \frac{Z_1 \cdot u_1 - Z_1 \cdot c_u}{f_u} \quad (2.7)$$

$$Y_1 = \frac{Z_1 \cdot v_1 - Z_1 \cdot c_v}{f_v} \quad (2.8)$$

İkinci resim karesindeki öznitelik eşlerine karşılık gelen 3B noktalar da ( $X_2$ ,  $Y_2$  ve  $Z_2$ ), 2.11 ve 2.12'deki eşitliklerde verildiği şekilde hesaplanırsa, resim kareleri üzerindeki öznitelik eşlerine karşılık gelen 3B nokta bulutlarının, 3B dünyada aynı noktaları temsil etmesi beklenmektedir (Şekil 2.7). Eşitlik 2.9'da,  $x'_2$ ,  $y'_2$  ve  $z'_2$ , ikinci resim karesi üzerindeki üç boyutlu noktaların kamera izdüşüm eşitliği ile kamera koordinatlarına dönüştürülmesiyle elde edilir.  $f_u$  ve  $f_v$  kameranın odak uzunlukları,  $c_u$  ve  $c_v$  ise esas noktalarıdır. Tek bir kameradan alınan ardışık resim kareleri kullanıldığı için, eşitlik 2.5 ve 2.9'da aynı odak uzunlukları ile aynı esas noktalar kullanılmaktadır. Eşitlik 2.10, 2.11 ve 2.12'deki,  $u_2$  ve  $v_2$  sembolleri ikinci resim karesi üzerindeki homojen piksel koordinatlarını ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} x'_2 \\ y'_2 \\ z'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & c_u & 0 \\ 0 & f_v & c_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$u_2 = \frac{x'_2}{z'_2} \quad v_2 = \frac{y'_2}{z'_2} \quad (2.10)$$

$$X_2 = \frac{Z_2 \cdot u_2 - Z_2 \cdot c_u}{f_u} \quad (2.11)$$

$$Y_2 = \frac{Z_2 \cdot v_2 - Z_2 \cdot c_v}{f_v} \quad (2.12)$$

### 2.1.3 Perspektif-n-nokta ile konum tespiti

Perspektif-n-Nokta (P-n-N) problemi, 3B noktalar ile bunlara karşılık gelen 2B pikselleri kullanarak, kameranın pozisyonunun kestirilmesi problemidir [40], [46]. P-n-N, eşitlik 2.14'de verilen izdüşüm hatasını en aza indirmeye çalışarak, kameranın pozunu en iyi ifade eden dönüşüm matrisini ( $T_{opt}$ ) bulmaya çalışır. Bu dönüşüm matrisi,  $T_{opt}$ , dünya koordinatlarındaki 3B noktaların, 2B görüntü düzlemine izdüşülmesi için kullanılan dönüşüm matrisidir (2.13). Başka bir ifadeyle, dünya koordinatları ile kamera koordinatları arasındaki katı cisim dönüşümü matrisini işaret etmektedir.

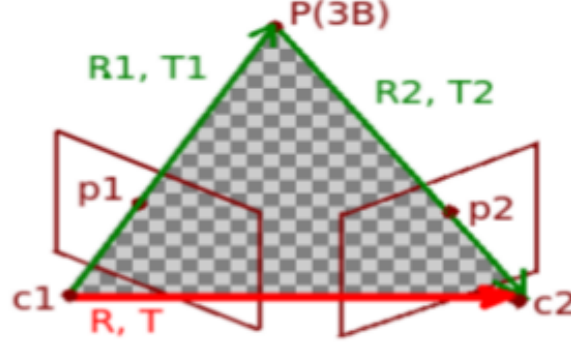
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K[R|t] = \begin{bmatrix} f_u & 0 & c_u & 0 \\ 0 & f_v & c_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} [R|t] \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

3B noktaların 2B görüntü düzlemi üzerine izdüşürülmesi işlemi doğrusal bir işlem değildir. 3B nokta bulutları ile 2B görüntü pikselleri arasındaki izdüşüm hatasının en iyilemesi için de doğrusal olmayan bir optimizasyon tekniğinin kullanılması gereklidir. Levenberg-Marquardt algoritması, izdüşüm hatasının en iyilemesi için sıkça kullanılan yinelemeli doğrusal olmayan bir optimizasyon tekniğidir. Bu tezde de Eşitlik 2.14'de verilen kamera izdüşüm matrisinin ( $T_{opt}$ ) bulunması sırasında Levenberg-Marquardt optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Eşitlik 2.14'de;  $p_1^i$ , birinci resim karesi üzerindeki her bir 2B pikseli,  $p_k^i$  ise bunlara karşılık gelen 3B noktaların birinci resim karesi üzerine yeniden izdüşürülmesi ile elde edilen 2B noktaları ifade etmektedir (Şekil 2.7).

$$T_{opt} = \operatorname{argmin}_T \left\| \sum_i (p_1^i - p_k^i) \right\|^2 \quad (2.14)$$

P-n-N ile önce Şekil 2.7'de verilen  $R_1$  ile  $T_1$  elde edilir. Daha sonra aynı 3B noktalar ile ikinci resim karesi üzerinde bunlara karşılık gelen 2B pikseller kullanılarak  $R_2$  ve  $T_2$  hesaplanır. Hareketli kameranın ardışık iki konumu arasındaki bağıl yer değiştirme miktarı R ve T; R1 rotasyon matrisi ve T1 öteleme vektörünün, R2 ve T2 ile uç uca eklenmesiyle elde edilir (2.15, 2.16).

$$R = R_2 \cdot R_1 \quad (2.15)$$



Şekil 2.7:  $p_1$  ve  $p_2$  ardışık resim kareleri üzerindeki 2B öznitelik eşlerini,  $P$ ; bu öznitelik eşlerine karşılık gelen 3B noktayı,  $c_1$  ve  $c_2$  ise hareketli kameranın merkezinin ardışık iki konumunu ifade eder.  $R_1$  ve  $R_2$  rotasyon matrisleri,  $T_1$  ve  $T_2$  ise öteleme vektörleridir.

$$T = R_2 \cdot T_1 + T_2 \quad (2.16)$$

Hareketli kameranın yeni pozisyonu, 2.17'de verilen eşitlik kullanılarak, kameranın ilk pozisyonuna göre göreceli olarak bulunur. 2.17'deki eşitlikte;  $c_1$  kameranın 3x1 boyutlu ilk pozisyonunu,  $c_2$  ise 3x1 boyutlu yeni pozisyonunu ifade etmektedir.

$$c_2 = R \cdot c_1 + T \quad (2.17)$$

Bu tezde önerilen Görsel-Lidar Odometri algoritması, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi kameranın ardışık iki resim karesi arasındaki bağıl yer değiştirme miktarını, resim kareleri üzerindeki öznitelikler ile bunlara karşılık gelen üç boyutlu noktaları kullanarak hesaplamaktadır. Kameranın başlangıç pozisyonundan itibaren nihai konumuna kadar, ardışık her iki resim karesi arasındaki bağıl dönüşüm matrisleri tek tek bulunup arka arkaya eklendiğindeyse kameranın toplam yer değiştirme miktarı elde edilmektedir. Resim kareleri üzerindeki iki boyutlu özniteliklere karşılık gelen gerçek derinlik bilgileri Lidar taramaları ile oluşturulan Lidar derinlik haritaları yardımıyla hesaplanabildiğinden, Esas Matris tekil değer ayrıştırması yönteminde karşılaşılan ölçek problemi bu yöntemde ortadan kalkmaktadır. Önerilen Görsel-Lidar Odometri algoritmasının başarısını anlamak için yapılan testler ve başarımleri bir sonraki bölümde DENEYSEL ÇALIŞMALAR başlığı altında verilmektedir.



### **3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bu bölümde, kullanılan veri kümesi ile test sonuçları anlatılacaktır.

#### **3.1 Veri Seti**

##### **3.1.1 Kullanılan veri seti**

Bu çalışmada anlatılan Görsel-Lidar odometri algoritması, KITTI odometri veri kümesi [45], [47] üzerinde test edilmiştir. KITTI odometri veri kümesi, hareketli bir otomobilin üzerine yerleştirilmiş olan 2 adet stereo kamera, Lidar, ataletsel ölçüm birimi ve Küresel Konumlama Sistemi'nden elde edilen verilerle kaydedilmiştir. İlgili veri kümesi içerisinde toplamda dört adet resim karesi dosyası mevcuttur. İlk iki dosya ilk stereo kameranın sol ve sağ çiftlerinden elde edilen gri ölçekli resimleri, son iki dosya ise diğer stereo kameranın sol ve sağ çiftlerinden elde edilen renkli resim karelerini içermektedir. Bu tezin konusu olan algoritma, tek bir kamera ve lidar verisi kullanarak odometri problemini çözmektedir. Bu nedenle, deneyler sırasında ikinci stereo çiftindeki sol kameradan alınan renkli resim kareleri kullanılmıştır. KITTI odometri veri kümesi içerisindeki 3B lidar taramaları ise, Velodyne HDL-64E lazer tarayıcı ile elde edilmiştir. Her bir lidar taraması  $N \times 4$  boyutlu vektörler halinde kaydedilmiştir.  $N \times 4$  boyutlu vektörlerin her bir dizisinin ilk üç değeri 3B noktaların lidara x, y ve z eksenlerindeki uzaklığını, dördüncü değeri ise yansıma değerini ifade etmektedir. Bu tezde, Lidar sensöründen elde edilen nokta bulutları kullanılıp, yansıma değerleri ihmal edilmiştir. KKS ve AÖB ile enlem, boylam, yükseklik, yuvarlanma açısı, yunuslama açısı, dönme açısı, lineer ve açısal hız, ivme vb. veriler kaydedilmiştir. Önerilen görsel-lidar odometri algoritmasının testlerinde, bu KKS verileri referans olarak kullanılmıştır. Kameradan alınan resim kareleri ve lidar sensöründen gelen verilerle aynı anda çalışabilmek için verilerin senkronize edilmiş olması gereklidir. KITTI veri kümesi içerisinde; her bir resim karesine karşılık, aynı zamanda alınan bir lidar taraması ile KKS/AÖB verileri bulunmaktadır. Görsel-Lidar odometri algoritmasının testleri de senkronize edilmiş bu verilerle yapılmıştır.

#### **3.2 Başarım Metrikleri**

Odometri problemlerinde sıkça kullanılan iki adet hata metriği bulunmaktadır. Bunlar, bağıl poz hatası (BPH) ile mutlak gezinge hatasıdır (MGH) [48]. Bağıl poz hatası;

odometri algoritmasıyla belirli bir zaman aralığında kestirilen hareket bilgisi ile aynı zaman aralığında referans kaynaktan alınan hareket bilgisi arasındaki hatayı hesaplamaktadır. Mutlak gezinge hatası ise, odometri algoritması ile elde edilen tüm yörünge bilgisi ile referans kaynaktan alınan tüm yörünge bilgisini hizalayıp, bunlar arasındaki mutlak poz farkını hesaplamaktadır.

Her iki hata metriği ile ilgili detaylar ve deney sonuçları Bölüm 3.2.1 ve Bölüm 3.2.2’de verilmiştir.

### 3.2.1 Bağlı poz hatası

Daha önce belirtildiği gibi, odometri algoritmalarıyla elde edilen pozisyon bilgisi, aracın ardışık pozisyonları arasındaki dönüşüm matrislerinin hesaplanıp uç uca eklenmesiyle elde edilmektedir. Bağlı poz hatası (BPH), odometri algoritması ile belirli bir zaman aralığında elde edilen bu lokal gezinge bilgisinin doğruluğunu hesaplamaktadır.

Eşitlik 3.1’de, "i" zamanındaki bağlı poz hatası verilmiştir [48].  $P_1, \dots, P_n \in SE(3)$ , kestirilen gezinge bilgisini,  $Q_1, \dots, Q_n \in SE(3)$  ise referans kaynaktan alınan gezinge bilgisini ifade etmektedir.

$$E_i = (Q_i^{-1}Q_{i+\Delta})^{-1}(P_i^{-1}P_{i+\Delta}) \quad (3.1)$$

Kameranın ardışık bağlı pozları için, eşitlik 3.1 ile "k" adet bağlı poz hatası hesapladığımızı varsayarsak, öteleme bileşenine ait ortalama karekök hatası, 3.2’de verilen eşitlik ile elde edilir. Aynı yöntem ile elde edilen rotasyon bileşenine ait ortalama karekök hatası ise Eşitlik 3.3 ile hesaplanabilmektedir.

$$RMSE(E_{i,oteleme}) = \left( \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \|\text{oteleme}(E_i)\|^2 \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

$$RMSE(E_{i,rot}) = \left( \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \|\text{rotasyon}(E_i)\|^2 \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

Sturm ve arkadaşlarının [48]’de anlattığına göre, rotasyon hataları öteleme hatalarını doğrudan etkilediğinden, karşılaştırma için yalnızca öteleme bileşenine ait RMSE değerini hesaplamak yeterli olmaktadır. Ancak rotasyon bileşenine ait hatanın etkisini analiz etmek açısından, her iki hata metriğinin de gözlemlenmesi gerekmektedir.

Görsel-Lidar odometri (GLO - bu çalışmada önerilen yöntem) algoritması ile KITTI veri kümesinin farklı dizileri kullanılarak hesaplanan rotasyon bileşenine ait bağlı poz hataları Çizelge 3.1’de verilmektedir. Görsel-Lidar Odometri yöntemi ile elde

edilen sonuçlar, Bölüm 1.1.3 Görsel Odometri başlığı altında anlatılan Esas Matris (EM) tekil değer ayrıştırması yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 3.1’de verilen sonuçlar incelendiğinde, kamera ve lidar sensörünün birarada kullanıldığı durumlarda, hesaplanan bağıl rotasyon matrisleri üzerindeki hata miktarının azaldığı görülmektedir. KITTI veri kümesindeki 5 farklı görüntü dizisi için yapılan testlerin tamamında, Görsel-Lidar Odometri algoritmasıyla, Esas Matris tekil değer ayrıştırması yöntemine kıyasla, rotasyon bileşeni için çok daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 3.1: Önerilen görsel-lidar odometri (GLO) yöntemi ve esas matris (EM) ayrışımı yöntemi ile hesaplanan rotasyon bileşenine ait bağıl poz hataları (BPH).

<b>KITTI Veri Kümesi</b>	<b>GLO - BPH (RMSE)</b>	<b>GLO - BPH (derece)</b>	<b>EM - BPH (RMSE)</b>	<b>EM - BPH (derece)</b>
<b>00</b>	0.030532	1.237131	1.970895	n/a
<b>01</b>	0.018917	0.766451	1.906316	n/a
<b>02</b>	0.024817	1.005541	1.927085	n/a
<b>04</b>	0.003634	0.147220	2.063734	n/a
<b>06</b>	0.025797	1.045309	1.934622	n/a

Çizelge 3.2’de ise, bu tez çalışmasında önerilen yöntem (GLO) ve Esas matris ayrışımı metodu ile hesaplanan öteleme bileşenine ait bağıl poz hataları gösterilmektedir. Bilindiği üzere, kamera bir açı sensörü olarak kullanılabilir. Tek bir kamera ile açı bilgisini, dolayısıyla rotasyon matrisini elde etmek mümkündür. Öte yandan tek bir kamera kullanıldığında, öteleme bileşeni ancak bilinmeyen bir ölçek dahilinde hesaplanabilmektedir. Bu nedenle, tek bir kamera için Esas Matris tekil değer ayrışımı yöntemi kullanıldığında, elde edilen öteleme vektörü hatalı olmakta ve ilgili ölçek bilgisini elde etmek için farklı kaynakların kullanılması gerekmektedir. Çizelge 3.2’de verilen sonuçlar da bu durumu destekler niteliktedir. Kamera ve Lidar sensöründen elde edilen veriler birarada kullanıldığında, başka hiçbir optimizasyon yöntemi uygulanmasa bile, elde edilen öteleme vektörü üzerindeki hatanın azaldığı görülmektedir.

Çizelge 3.2: Önerilen görsel-lidar odometri (GLO) yöntemi ve esas matris (EM) ayrışımı yöntemi ile hesaplanan öteleme bileşenine ait bağıl poz hataları (BPH).

<b>KITTI Veri Kümesi</b>	<b>GLO - BPH, metre (öteleme bileşeni için)</b>	<b>EM - BPH, metre (öteleme bileşeni için)</b>
<b>00</b>	0.864149	10.398665
<b>01</b>	2.274931	2.207519
<b>02</b>	1.113638	35.228429
<b>04</b>	1.468289	1.572428
<b>06</b>	1.156043	1.348299

Çizelge 3.3’te ise, [39]’da verilen çalışmanın sonuçları ile bu tez çalışmasında önerilen

yöntemin sonuçları karşılaştırılmaktadır. [39]'da verilen çalışmada da kamera ve Lidar verileri birarada kullanılmakta, ancak algoritma lidar nokta bulutlarının semantik ayrıştırılması, epipolar geometri kısıtları gibi yöntemler ile daha karmaşık bir hale getirilmektedir. Ayrıca ilgili çalışmada demet ayarlama optimizasyon yöntemi de uygulanmaktadır. [39]'daki yayında verilen test sonuçları incelendiğinde sonuçlar iyi görünmekle birlikte, ilgili çalışmaya ait açık kaynak kod çalıştırıldığında odometri test sonuçlarının ilgili yayında verildiği kadar iyi olmadığı anlaşılmaktadır. Çizelge 3.3'teki sonuçlar, [39]'a ait açık kaynak kodun kendi bilgisayarında yeniden çalıştırılmasıyla elde ettiğim sonuçlardır. KITTI veri kümesindeki iki farklı görüntü dizisi üzerinde yapılan test sonuçları incelendiğinde, bu makalede önerilen Görsel-Lidar Odometri (GLO) algoritmasının, döngü kapatma ve demet ayarlama gibi optimizasyon yöntemleri ile nokta bulutlarının semantik ayrıştırılması gibi işlemler uygulanmamasına rağmen, referans yayındaki çalışmanın sonuçlarını yakalayabildiği görülmektedir.

Çizelge 3.3: Önerilen görsel-lidar odometri (GLO) yöntemi ve LIMO [39] algoritması ile hesaplanan bağıl poz hataları (BPH).

KITTI Veri Kümesi	GLO - BPH (rotasyon)	GLO - BPH (öteleme)	[39] - BPH (rotasyon)	[39] - BPH (öteleme)
01	0.018917	2.274931 metre	0.017445	2.128281 metre
04	0.003634	1.468289 metre	0.014534	0.982880 metre

### 3.2.2 Mutlak gezingе hatası

Mutlak gezingе hatası, odometri algoritması tarafından kestirilen gezingе bilgisinin tamamı ile referans kaynaktan alınan gezingе bilgisi arasındaki hata oranı hakkında bilgi verir. Mutlak gezingе hatasının hesaplanabilmesi için öncelikle elde edilen poz bilgilerinin 3.4'te verilen eşitlik ile hizalanması gerekmektedir [48]. Eşitlik 3.4'te,  $P_i$  odometri algoritması ile kestirilen poz bilgisini,  $Q_i$  ise referans kaynaktan alınan poz bilgisini ifade etmektedir.  $R$ , sensörler arasındaki katı cisim dönüşüm matrisidir ve farklı koordinat çerçevelerinde elde edilen poz bilgilerini diğer koordinat çerçevesindeki poz bilgileri ile hizalamak için kullanılır.

$$F_i = Q_i^{-1} R P_i \quad (3.4)$$

Hizalanan "n" adet ardışık odometri poz bilgisi ile referans poz bilgisi arasındaki ortalama karekök hatası, 3.5'te verilen eşitlik ile hesaplanır.

$$RMSE(E_i) = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ||\text{oteleme}(F_i)||^2 \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

Bağlı poz hatasından farklı olarak, mutlak gezinge hatası için rotasyon hatalarının ayrıca hesaplanması gerekmez. Öte yandan, mutlak gezinge hatası, arka arkaya eklenen dönüşüm bilgilerinin tamamını kullandığından, zamanla hata miktarı artacaktır. Başlangıçta hesaplanan pozisyon bilgileri üzerinde yapılan herhangi bir hatanın, mutlak gezinge hatası üzerindeki etkisi büyük olacaktır. Bağlı poz hataları ayrı ayrı incelendiğinde pozların çoğunluğunda büyük hatalar yapılmasa bile, az sayıdaki bağlı pozların hatalı olması mutlak gezinge hatası üzerinde yıkıcı etkilere sebep olacaktır.

Görsel-Lidar odometri algoritması, daha önce de belirtildiği gibi, ardışık bağlı pozisyon bilgilerinin arka arkaya eklenmesiyle elde edilmektedir. Her bir bağlı pozisyon bilgisi bir miktar hata ile elde edildiğinden, nihai pozisyon bilgisi üzerindeki hata miktarı zamanla artmaktadır. Zamanla artan bu hata miktarını en aza indirebilmek için; döngü tespiti, demet ayarlama, poz grafik optimizasyonu gibi çeşitli optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Görsel-Lidar Odometri algoritmasının başarımı, bağlı pozisyon bilgilerinin karşılaştırılmasıyla değerlendirildiğinden herhangi bir optimizasyon yöntemi uygulanmamıştır. Bu nedenle, tüm gezingeye dair hesaplanan mutlak gezinge hatası anlamlı olmamaktadır. Aynı durum, Esas Matris ayrışımı yöntemi ile [39]'daki çalışmada verilen algoritma için de geçerlidir. Bu nedenle, mutlak gezinge hatası için elde edilen sonuçlar bu tezde yer almamaktadır.



#### 4. SONUÇ

Bir aracın/robotun, KKS sinyallerini kullanamadığı durumlarda da seyrüsefer görevini yerine getirebilmesi için, doğru konum kestirimi yapabilmemesi gerekmektedir. AÖB, kamera ve lidar sensörleri kullanılarak, KKS yoksun ortamlarda pozisyon kestirimi yapmak mümkün olabilmektedir. Birden fazla kaynaktan alınan verilerin birarada kullanıldığı durumlarda da daha hassas konum bilgisi elde etmenin mümkün olduğu aşikardır. Bu tezin konusu olan çalışmada ise, tek bir kamera ve lidar verisi kullanılarak altı serbestlik dereceli konum kestirimi problemi çalışılmıştır. Çalışma kapsamında, kameradan elde edilen görsel verilerle lidar sensöründen elde edilen nokta bulutu verileri kullanılarak, kamera-lidar sisteminin ardışık pozisyonları arasındaki rotasyon matrisleri ile öteleme vektörleri hesaplanmıştır. Hesaplanan ardışık rotasyon matrisleri ile öteleme vektörleri uç uca eklenerek, kamera-lidar sisteminin başlangıç pozisyonuna göre nerede bulunduğu bilgisi elde edilmiştir.

Bu tezde önerilen yöntemle (GLO) elde edilen bağıl poz hataları, KITTI veri kümesindeki 5 farklı görüntü dizisi için Esas Matris tekil değer ayrışımı yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Rotasyon bileşenine ait bağıl poz hataları incelendiğinde, bu çalışmada önerilen Görsel-Lidar odometri yönteminin testlerin tamamında Esas Matris ayrışımı yönteminden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Esas Matris tekil değer ayrışımı yöntemi ile elde edilen öteleme vektörleri için yapılacak değerlendirmede ise, tek bir kameranın yalnızca bir açı sensörü olduğu bilgisi göz önünde bulundurulmuştur. Esas matris ayrışımı yöntemiyle hesaplanan öteleme vektörü gerçek oranları dahilinde elde edilemezken, bu çalışmada GLO ile elde edilen öteleme vektörü 3B nokta bulutları yardımıyla hesaplandığından gerçek değerleri yansıtmaktadır. Öteleme vektörüne ait bağıl poz hataları incelendiğinde, Esas Matris ayrışımı yöntemindeki ölçek bilgisine dair bilinmezliğin, GLO ile çözülebileceği sonucuna ulaşılmaktadır. Hesaplanan bağıl poz hatalarına dair sonuçlar; birden fazla sensör kullanmanın, kestirilen pozisyon bilgisini optimize ettiği varsayımını destekler niteliktedir. Bu tez çalışmasında geliştirilen algoritmanın başarımı ayrıca, [39]'da verilen çalışmaya ait sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. İlgili çalışmada, nokta bulutlarının ve özniteliklerin semantik olarak ayrıştırılması, epipolar geometri kısıtları ve demet ayarlama optimizasyonu gibi çok çeşitli yöntemler de kullanılmaktadır. Bu tezde önerilen GLO algoritmasında bu ek yöntemlerin hiçbiri kullanılmamasına rağmen, elde edilen bağıl poz hataları [39]'daki çalışmanın sonuçlarını

yakalamaktadır. Önerilen Görsel-Lidar Odometri algoritmasının başarımı, bağıl pozisyon bilgilerinin karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. Döngü tespiti, demet ayarlama veya poz grafik optimizasyonu gibi herhangi bir optimizasyon kullanılmadığından, mutlak gezingе hatası değerlendirilmemiştir.

Yapılan çalışma aşağıda belirtilen yöntemlerle daha da ileriye taşınabilir.

- Eş zamanlı lokalizasyon ve haritalama ile aracın hem bağıl yer değiştirme miktarını hem de çevre nesnelere uzaklığına dair bilgileri elde etmek mümkündür. Mutlak gezingе hatasını iyileştirebilmek için, eş zamanlı lokalizasyon ve haritalama ile döngü tespiti yöntemlerinin algoritmaya eklenmesi çalışmanın kalitesini artıracaktır.
- Demet ayarlama veya poz grafik optimizasyonları yöntemlerinden biri kullanılarak elde edilen bağıl pozisyon bilgileri optimize edilebilir.
- Bu tezde, öznitelik tabanlı bir yöntem kullanıldığından, ardışık resim kareleri üzerindeki öznitelik eşlerinin belirlenmesi aşamasında yapılan hatalar, hesaplanan pozisyon bilgisinin de hatalı olmasına sebep olmaktadır. Öznitelik eşlerinin belirlenmesi aşamasında simetri testi ya da eşik değеr testi uygulanarak eşleşme hatalarının en aza indirilmesi sağlanabilir.
- Bu çalışmanın sonuçlarında da gösterildiği gibi, farklı kaynaklardan gelen verileri kullanarak konum kestirimi yapmak, elde edilen pozisyon bilgisinin iyileştirilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada verilen yöntem, AÖB'den gelen verileri veya ikinci bir kameradan alınan verileri de işleyerek konum bilgisini iyileştirecek şekilde güncellebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Clarke, R.** (2014). Understanding the drone epidemic. In: *Computer Law Security Review* 30, pp. 230–246.
- [2] **Kato, S.** et al. (2018). Autoware on Board: Enabling Autonomous Vehicles with Embedded Systems. In: *2018 ACM/IEEE 9th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS)*, pp. 287–296.
- [3] **Kato, S.** et al. (2015). An Open Approach to Autonomous Vehicles. In: *IEEE Micro* 35.6, pp. 60–68.
- [4] **Siegwart, R., Nourbakhsh, I., and Scaramuzza, D.** (2011). Introduction to Autonomous Mobile Robots, Second Edition. In: *Intelligent robotics and autonomous agents*.
- [5] Baidu Apollo team (2017), Apollo: Open Source Autonomous Driving (n.d.). <https://github.com/ApolloAuto/apollo>. alındığı tarih: 11-05-2020.
- [6] **Groves, P.** (2013). Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition. GNSS/GPS. Artech House.
- [7] **Cadena, C.** et al. (2016). Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. In: *IEEE Transactions on Robotics* 32.6, pp. 1309–1332.
- [8] **Titterton, D.** et al. (2004). Strapdown Inertial Navigation Technology. IEE radar, sonar, navigation, and avionics series. Institution of Engineering and Technology.
- [9] **Scaramuzza, D.** and **Fraundorfer, F.** (2011). Visual Odometry [Tutorial], Part I: The First 30 Years and Fundamentals. In: *IEEE Robotics Automation Magazine* 18.4, pp. 80–92.
- [10] **Fraundorfer, F.** and **Scaramuzza, D.** (2012). Visual Odometry : Part II: Matching, Robustness, Optimization, and Applications. In: *IEEE Robotics Automation Magazine - IEEE ROBOT AUTOMAT* 19, pp. 78–90.
- [11] **Yang, N., Wang, R., and Cremers, D.** (2017). Feature-based or Direct: An Evaluation of Monocular Visual Odometry. In: abs/1705.04300.
- [12] **Mur-Artal, R., Montiel, J., and Tardos, J.** (2015). ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system. In: *IEEE Transactions on Robotics* 31, pp. 1147–1163.

- [13] **Klein, G.** and **Murray, D.** (2007). Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. In: *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 225–234.
- [14] **Lowe, D.** (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: *International Journal of Computer Vision* 60, pp. 91–.
- [15] **Bay, H., Tuytelaars, T., and Van Gool, L.** (2006). SURF: Speeded up robust features. In: vol. 3951, pp. 404–417.
- [16] **Rublee, E.** et al. (2011). ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In: *2011 International Conference on Computer Vision*, pp. 2564–2571.
- [17] **Snavely, N., Seitz, S. M., and Szeliski, R.** (2006). Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. In: *SIGGRAPH Conference Proceedings*. New York, NY, USA: ACM Press, pp. 835–846.
- [18] **Engel, J., Koltun, V., and Cremers, D.** (2018). Direct Sparse Odometry. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 40.3, pp. 611–625.
- [19] **Newcombe, R. A., Lovegrove, S. J., and Davison, A. J.** (2011). DTAM: Dense tracking and mapping in real-time. In: *2011 International Conference on Computer Vision*, pp. 2320–2327.
- [20] **Forster, C., Pizzoli, M., and Scaramuzza, D.** (2014). SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry. In: *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 15–22.
- [21] **Engel, J., Sturm, J., and Cremers, D.** (2013). Semi-dense Visual Odometry for a Monocular Camera. In: *2013 IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1449–1456.
- [22] **Engel, J., Schoeps, T., and Cremers, D.** (2014). LSD-SLAM: large-scale direct monocular SLAM. In: vol. 8690, pp. 1–16.
- [23] **Mur-Artal, R. and Tardós, J. D.** (2016). ORB-SLAM2: an Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras. In: *IEEE Transactions on Robotics* 33.5, pp. 1255–1262.
- [24] **Pire, T.** et al. (2017). S-PTAM: Stereo Parallel Tracking and Mapping. In: *Robotics and Autonomous Systems (RAS)* 93, pp. 27–42.
- [25] **Hartley, R. and Zisserman, A.** (2003). Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd ed. New York, NY, USA: Cambridge University Press, pp. 257–259.
- [26] **Nister, D.** (2004). An efficient solution to the five-point relative pose problem. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 26.6, pp. 756–770.
- [27] **Zhang, J., Kaess, M., and Singh, S.** (2014). Real-time depth enhanced monocular odometry. In: *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4973–4980.

- [28] **Besl, P. J.** and **McKay, N. D.** (1992). A method for registration of 3-D shapes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14.2, pp. 239–256.
- [29] **Biber, P.** and **Strasser, W.** (2003). The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching. In: *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*. Vol. 3, 2743–2748 vol.3.
- [30] **Magnusson, M., Lilienthal, A.,** and **Duckett, T.** (2007). Scan Registration for Autonomous Mining Vehicles Using 3D-NDT. In: *Journal of Field Robotics* 24, pp. 803–827.
- [31] **Zhang, J.** and **Singh, S.** (2014). LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time. In: *Robotics: Science and Systems*.
- [32] **Li, Q.** et al. (2019). LO-Net: Deep Real-Time Lidar Odometry. In: *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 8465–8474.
- [33] **El-Sheimy, N., Valeo, C.,** and **Habib, A.** (2005). Digital terrain modeling - acquisition, manipulation, and applications.
- [34] **Hollowell, J.** (1990). Heli/SITAN: a terrain referenced navigation algorithm for helicopters. In: *IEEE Symposium on Position Location and Navigation. A Decade of Excellence in the Navigation Sciences*, pp. 616–625.
- [35] **Koide, K., Miura, J.,** and **Menegatti, E.** (2019). A portable three-dimensional LIDAR-based system for long-term and wide-area people behavior measurement. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 16.2.
- [36] **Usenko, V.** et al. (2016). Direct visual-inertial odometry with stereo cameras. In: *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1885–1892.
- [37] **Zhang, J.** and **Singh, S.** (2015). Visual-lidar odometry and mapping: low-drift, robust, and fast. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2174–2181.
- [38] **Caselitz, T.** et al. (2016). Monocular camera localization in 3D LiDAR maps. In: *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1926–1931.
- [39] **Graeter, J., Wilczynski, A.,** and **Lauer, M.** (2018). LIMO: Lidar-Monocular Visual Odometry. In: *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 7872–7879.
- [40] **Moreno-Noguer, F., Lepetit, V.,** and **Fua, P.** (2007). Accurate Non-Iterative  $O(n)$  Solution to the PnP Problem. In: *IEEE International Conference on Computer Vision*.

- [41] **Qin, T.** et al. (2019a). A General Optimization-based Framework for Global Pose Estimation with Multiple Sensors. eprint: arXiv:1901.03642.
- [42] **Qin, T.** et al. (2019b). A General Optimization-based Framework for Local Odometry Estimation with Multiple Sensors. eprint: arXiv:1901.03638.
- [43] **Chen, X.** et al. (2019). SuMa++: Efficient LiDAR-based Semantic SLAM. In: *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4530–4537.
- [44] **Hess, W.** et al. (2016). Real-Time Loop Closure in 2D LIDAR SLAM. In: *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1271–1278.
- [45] **Geiger, A.** et al. (2013). Vision meets robotics: the KITTI dataset. In: *The International Journal of Robotics Research* 32, pp. 1231–1237.
- [46] **Kneip, L., Scaramuzza, D., and Siegwart, R.** (2011). A novel parametrization of the perspective-three-point problem for a direct computation of absolute camera position and orientation. In: *CVPR 2011*, pp. 2969–2976.
- [47] **Geiger, A., Lenz, P., and Urtasun, R.** (2012). Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite. In: *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3354–3361.
- [48] **Sturm, J.** et al. (2012). A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems. In: *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 573–580.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Hazal Lezki  
**Uyruđu** : T.C.  
**Dođum Tarihi ve Yeri** : 15.11.1990 Adana  
**E-posta** : hazal.lezki@gmail.com

### ÖĐRENİM DURUMU:

- **Yüksek Lisans** : 2020, TOBB ETÜ, Elektrik ve Elektronik Müh.
- **Lisans** : 2014, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Müh.

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2019 - Halen	HAVELSAN	Bilgisayarlı Görü ARGE Mühendisi
2015 - 2019	STM	Bilgisayarlı Görü ARGE Mühendisi
2013 - 2015	Gate Elektronik	Anten Tasarımı ARGE Mühendisi

**YABANCI DİL:** İngilizce

### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Lezki, H. and Yetik, İ. Ş.** (2020). GPS-Yoksun Ortamlarda Tek Kamera ve Lidar Verisi ile Konum Kestirimi. In: 28. *Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2020)*. Gaziantep

## **DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

- **Lezki, H.**, Öztürk, İ. A., Akpınar, M. A., Yücel, M. K., Loğoğlu, K. B., Erdem, A., Erdem, E. (2018). Joint Exploitation of Features and Optical Flow for Real-Time Moving Object Detection on Drones, In *15th European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops, 2018, pp. 0-0* . Munich, Germany
- Loğoğlu, K. B., **Lezki, H.**, Yücel, M. K., Öztürk, İ. A., Küçükkömürler, A., Karagöz, B., Erdem, E., Erdem, A. (2017). Feature-Based Efficient Moving Object Detection for Low-Altitude Aerial Platforms. In *International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017, pp. 2119-2128* . Venice, Italy
- Özdemir, C., Yılmaz, B., Keçeli, S. İ., **Lezki, H.**, Sütçüođlu, Ö. (2014). Ultra Wide Band Horn Antenna Design for Ground Penetrating Radar : A Feeder Practice. In *15th International Radar Symposium (IRS), pp. 1-4, doi: 10.1109/IRS.2014.6869298*. Gdansk, Poland