

YERSEL MOBİL LAZER TARAMA TEKNOLOJİSİ: TOPCON IP-S2 ÖRNEĞİ

L. Karasaka, F. Yıldız

Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği, 42075 Konya, Türkiye
(lutfiye, fyildiz)@selcuk.edu.tr

ANAHTAR KELİMELELER: Fotogrametri; Mobil Haritalama ; Lazer Tarama; Lidar

ÖZET:

İnsanoğlunun 20 yılı aşkın bir süredir 3B coğrafi bilgiye yüksek çözünürlüklü, doğru, hızlı ve uygun bir maliyetle ulaşarak gerçek bir dünya modeli oluşturma ve elde ettiği bilgiyi 3B görselleştirme isteği lazer tarama teknolojisinin hızla gelişmesine yol açmıştır. Son yıllarda hızla küreselleşen dünyada yüksek çözünürlüklü 3B model oluşturma çalışmalarına yeni bir boyut getiren yersel lazer tarama sistemlerinin geldiği son nokta yersel mobil lazer tarama teknolojisidir. Bu yeni teknoloji hareketli bir platform üzerine entegre edilen yüksek performanslı GNSS/IMU navigasyon sensörleri ve digital görüntüleme sensörleri ile birlikte eş zamanlı olarak genel bir koordinat sisteminde coğrafi veri toplayan bir sistemdir. Mobil lazer tarama sistemleri LiDAR teknolojisini kullanır. Açılımı "*Light Detection and Ranging*" olan Lidar lazer darbeleri ile algılayıcı sensör ve nesne arasındaki mesafe ölçme prensibine dayanır. Bu çalışmanın amacı yersel mobil lazer tarama sistem bileşenleri, sistemin matematiksel modeli ve koordinat sistemleri, doğrudan georeferanslama için GNSS/IMU entegrasyonunun önemi ve bu pazarda yer alan birkaç büyük firmanın son mobil haritalama sistemlerinin performansları ve TOPCON IP-S2 uygulaması hakkında bilgi vermektir.

KEY WORDS: Photogrammetry; Mobile Mapping; Laser Scanning, Lidar

ABSTRACT:

The human beings has been wanted to reach to 3D geographical information correctly, quickly, appropriately, and cost effective over a more than 20 years period. Cerating a real-world model and obtained the information request of 3D visualization has led to rapid development of laser scanning technology. In recent years, the last point where the terrestrial laser scanning system's that has brought a new dimension to high resolution 3D modeling works comes to mobile terrestrial laser scanning technology in globalizing rapidly world. This new technology is a system which simultaneously collect geographic-referenced data together with high performance GPS / IMU navigation sensors and digital imaging sensors integrated on a mobile platfrom. Mobile laser scanning systems use LiDAR technology. LiDAR- light and detection and ranging- is an active remote sensing method which is based on range-finding measurements of the distance between the sensor and the object. The objective of this works is to give knowledge about mobile laser scanning system components, mathematical models and coordinate systems, the signification of GNSS/IMU integration for direct-georeferencing, the latest mobile laser scanning systems of several large companies and its performance and finally is to give information about the TOPCON-S2 application.

1. GİRİŞ

Farklı disiplinler tarafından birçok uygulamada kullanılan lazer teknolojisinin ilk çıkış noktası 1916 yılında Albert Einstein' ın ortaya koymuş olduğu ışığın yayılma teorisine dayanmaktadır. Ancak dünyada lazer teknolojisi alanındaki araştırmalar, 1950'li yılların sonlarında başlamış 60 yıla yakın bir süreçte yapılan araştırmalarla bugünlere gelinmiştir. İlk lazerin 1960 yılında Theodore Maiman tarafından geliştirilmesinden bu yana lazer teknolojisi alanında yapılan araştırmalar 50 yılı aşkın bir süredir hızla gelişerek devam etmektedir. Özellikle 1990'lardan sonra bu alanda Ar-Ge'ye yönelik bilimsel çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Bugün lazer teknolojisi farklı platformlarda endüstriyel tasarımdan tıbbi görüntülemeye kadar oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yersel lazer tarama sistemleri de bu alanda hızla gelişen teknolojilerden biridir. Yersel lazer tarayıcılarla elde edilen 3 boyutlu (3B) bilgi günümüzde pek çok mühendislik uygulamalarında farklı disiplinler tarafından kullanılmaktadır. Yersel lazer tarama teknolojisi ile taranması düşünülen objeler küçük yapılar olabildiği gibi geniş, büyük ve karmaşık geometrilili yapılar da olabilirler. Çalışma alanları yoğun nokta bulutu içeren mimari yapılar veya kentsel alanlar ise yersel lazer tarayıcılar üç boyutlu verinin doğru, hızlı ve ekonomik bir şekilde elde edilmesinde yetersiz kalmaktadır. Yersel lazer tarayıcıların eksiklikleri dikkate alınarak 3 boyutlu bilgiye daha hızlı ve daha etkin ulaşabilmek için yersel lazer

tarama teknolojisi navigasyon sensörleri ve görüntüleme sensörleri ile bütünleştirilerek yeni bir mekânsal veri toplama tekniği geliştirilmiştir. Bugün için lazer tarama teknolojisinin geldiği son nokta yersel mobil lazer tarama sistemleridir. Bu yeni teknoloji hareketli bir platform üzerine entegre edilen yüksek performanslı GNSS/IMU navigasyon sensörleri ve digital görüntüleme sensörleri ile birlikte eş zamanlı olarak genel bir koordinat sisteminde coğrafi veri toplayan bir sistemdir. Bu çalışmanın amacı yersel mobil lazer tarama teknolojisi hakkında bilgi vermek ve Topcon IP-S2 mobile lazer tarama sisteminin farklı hızlarda elde etmiş olduğu verinin 3B şehir modelleme, fotogrametrik röleve gibi çalışmalarındaki yeterliliğini ve kullanılabilirliğini araştırılmıştır.

2. MOBİL LAZER TARAMA TEKNOLOJİSİ

İnsanoğlunun 20 yılı aşkın bir süredir 3B coğrafi bilgiye yüksek çözünürlüklü, doğru, hızlı ve uygun bir maliyetle ulaşarak gerçek bir dünya modeli oluşturma ve elde ettiği bilgiyi 3B görselleştirme isteği lazer tarama teknolojisinin hızla gelişmesine yol açmıştır. Özellikle kompleks objelere ait hızlı ve etkin 3B veri elde etmede hava ve yersel lazer tarama teknolojisi diğer geleneksel ölçme yöntemlerine göre üstünlük sağlamaktadır. İlk olarak 1970'li yıllarda hava platformlarında kullanılan lazer tarama sistemleri doğrudan georeferanslama çözümlerinin olmaması nedeni ile kullanım alanları sınırlı

kalmıştır. GNSS (Global Navigation Satellite System), INS (inersiyal navigasyon sistem) sistemleri ve bu sistemlerle toplanan verilerin birleştirilmesi için matematik modelin geliştirilmesinden sonra hava lazer tarayıcıları LiDAR modelleme çalışmalarında kullanılmaya başlamıştır. Aynı zaman periyodunda topoğrafik ve endüstriyel uygulamalar için de yersel statik lazer tarama sistemleri geliştirilmiştir. Ancak yersel statik lazer tarayıcıların yoğun nokta bulutu içeren mimari yapılar veya şehir modelleme gibi çok geniş alanlardaki kullanım zorluğu, hava lazer tarayıcıları ile kentsel modelleme çalışmalarında elde edilen nokta bulutu verisinin sadece bina çatıları ve bina ayak izleri ile sınırlı kalması gibi eksiklikler bir dezavantaj olarak söylenebilir. Her iki sistemin bu eksiklikleri dikkate alınarak 3B bilgiye daha hızlı ve daha etkin ulaşabilmek için yersel lazer tarama teknolojisi navigasyon sensörleri ve görüntüleme sensörleri ile bütünleştirilerek yeni bir mekânsal veri toplama tekniği geliştirilmiştir. Çoklu sensör entegreli bu yeni teknik *yersel dinamik lazer tarama* olarak adlandırılmaktadır. Literatürde bu yeni teknoloji için "*yersel mobil lazer tarama*", "*mobil haritalama sistemi*" gibi farklı kullanım ifadeleri de yer almaktadır.

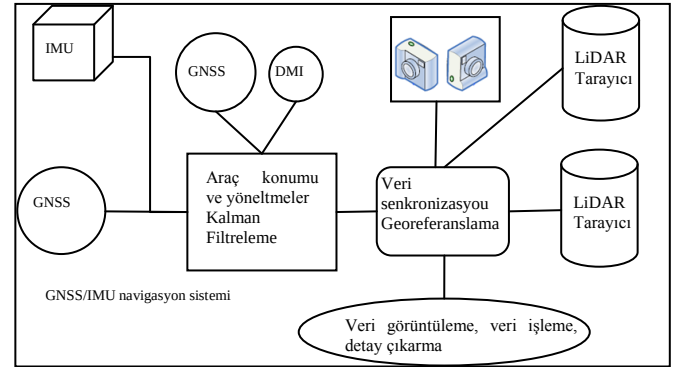
Mobil haritalama sistemi " hareketli bir platform üzerine entegre edilen yüksek performanslı GNSS/IMU navigasyon sensörleri ve digital görüntüleme sensörleri ile birlikte eş zamanlı olarak genel bir koordinat sisteminde coğrafi veri toplayan bir teknolojidir.

Mobil lazer tarama sistemlerinin tarihsel gelişimi incelendiğinde ilk işlevsel yersel mobil haritalama sisteminin 90'lı yılların başlarında Ohio State Üniversitesi Harita Dairesi'nde geliştirildiği görülmektedir. 1991 yılında GPSVan™ projesi olarak başlatılan bu çalışma ilk **doğrudan georeferanslama** ve **tam digital yersel haritalama** sisteminin geliştirilmesine önderlik etmiştir (Bossler ve Toth, 1995; Grejner-Brzezinska ve ark., 2004; El-Sheimy, 2008). Aynı dönem içinde Calgary Üniversitesi mobil karayolu haritalama çalışmalarında kullanılması amaçlanan VISAT™ mobil lazer tarama sistemini geliştirmek için GEOFIT firması ile birlikte ortak bir proje başlatılmıştır (Schwarz ve ark., 1993; El-Sheimy ve ark., 1995; Grejner-Brzezinska ve ark., 2004). 1990'lı yılların ortalarına gelindiğinde aynı tasarıma benzer daha fazla sistem geliştirilmiş ve mobil haritalama sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Daha sonraki yıllardaki karavan, tren, kamyon gibi hareketli platformlar üzerine çoklu sensör entegre edilerek geliştirilen mobil haritalama sistemlerine GIM™ (1994), KiSS™ (1995), TruckMAP™ (1996), GI-EYE™ (2002), GPSVision™ (2007) örnek olarak verilebilir. 1991-2007 yılları arasında geliştirilen bu sistemler ile ilgili ayrıntılı bilgi El-Sheimy' nin (2008) yılındaki çalışmasında yer verilmiştir.

Yersel lazer tarama sistemleri veya bir başka ifade ile mobil haritalama sistemleri lidar tekniği temeline dayanmaktadır. Açılımı "**L**ight **D**etection and **R**anging" olan LiDAR, lazer darbeleri kullanarak bir nesne veya bir yüzeyin uzaklığını anlamaya yarayan bir teknolojidir. Mobil Lidar terimi lazer tarayıcılar için oldukça yaygın olarak kullanılan bir ifadedir. Yersel mobil lazer tarama sistemleri hava LiDAR sistemlerine benzemektedirler. Farklı üretici firmaların mobil haritalama sistem bileşenleri arasında küçük farklılıklar olsada genel olarak temel sistem bileşenleri aynıdır. Şekil 1. yersel mobil lazer tarama sistemi kavramının temel mimarisini özetlemektedir. Bir mobil haritalama sistemi; konumlama ve navigasyon bileşenleri, görüntüleme ve lazer tarama sensör bileşenleri ve veri toplama/veri işleme yazılımları olmak üzere üç temel bileşenden oluşur. Navigasyon sensörü GPS ve IMU/INS bileşenlerinden oluşmaktadır. Görüntüleme ve lazer tarama sensörleri ise CCD kameralar ve lazer tarayıcılardır. GPS/GNSS ile birleştirilmiş IMU/INS sistemi, hava fotogrametrisi veya yersel mobil haritalama projeleri gibi kinematik uygulamalarda

görüntüleme sensörlerinin yönlendirilmesi için güçlü bir teknik olarak görülmektedir.

Bu kombinasyon son yirmi yıl içinde çoğu araştırmacının dikkatini çekmiştir. Bu teknoloji, araç ve görüntüleme sensörleri için hem konumlama hemde yöneltme sağlamaktadır (Silva ve ark., 2003). Bir mobil haritalama sisteminin genel doğruluğu büyük bir ölçüde navigasyon araçlarının doğruluğuna ve bu araçların tümleşik çözümlerine bağlıdır (Hassan ve ark., 2006).



doğruluğunun belirlenmesinde önemli bir rolü vardır. Bir başka ifadeyle nihai sonuç ürünü nokta bulutu verisinde yer alan her bir noktanın konumsal doğruluğunu IMU/INS sisteminin doğruluğu etkilemektedir. IMU (inersiyal measurement unit) birimi içinde yer alan ivmeölçer ve jiroskopun performansını tanımlamak için kullanılan birkaç parametre vardır. Genellikle IMU tasarlayıcıları bir IMU birimi içinde kullanılan jiroskop tamamlayıcısının performans özelliklerini dikkate alarak ivmeölçer seçerler. Kullanıcılar IMU doğruluğunu belirlemek için genellikle **gyro bias** olarak adlandırılan kilit bir performans parametresine odaklanırlar. Mobil haritalama sistemlerinde çoğunlukla optik jiroskop kullanılır (Yen ve ark., 2010).

2.2 Görüntüleme ve lazer tarama sensörleri

Mobil haritalama sisteminin temel bileşenlerinden olan görüntüleme sensörleri **pasif görüntüleme sensörü** ve **aktif görüntüleme sensörü** olarak ikiye ayrılır. Pasif görüntüleme sensörlerine video veya dijital kameralar, multi-spektrum veya hiper-spektrum örnek verilebilir. Aktif görüntüleme sensörlerine ise lazer uzaklıkölçerler veya tarayıcılar, yapay açıklıklı radar (SAR) örnek verilebilir. Bu sensörler obje uzayı hakkında gri tonlama, kamera ile obje arasındaki mesafe gibi tanımlayıcı ve geometrik bilgiler vermektedir. Bir yersel mobil haritalama sisteminin en önemli bileşenlerinden biri şüphesiz ki lazer tarayıcılarıdır. Bir lazer tarayıcı belli bir zaman aralığında, A noktasına yerleştirilmiş bir lazer telemetresinden yayılan sinyal ve bu sinyalin B noktası gibi bir nesne yüzeyinden yansdıktan sonra geri dönen sinyalini kaydederek iki nokta arasındaki mesafeyi ölçer (Angelopoulou ve Wrigh, 1999; Pfeifer ve Brie, 2007; Petrie ve Toth, 2008).

$$R=1/2 \cdot c \cdot \Delta t \quad (1)$$

R; A,B noktası arasındaki mesafe (aralık)
c; elektromanyetik radyasyonun hızı (ışık hızı)
 Δt ; ölçülen zaman aralığı

Mobil haritalama çalışmaları için farklı üretici firmalar tarafından tasarlanan 2B lazer tarayıcılara Optech, Reigl, Z+F, Phoneix Sci, Sick, Faro, Velodyne LiDAR tarama sistemleri örnek olarak verilebilir. 2B lazer tarayıcılar saniyede binlerce nokta ölçümü yapabilme yeteneğine sahip ileri lazer ölçme teknolojileri kullanırlar. Başlangıçta ilk mobil haritalama sistemlerinde 3B lazer tarayıcılar kullanılmıştır. Şu anda ise hareketli bir platform üzerine entegre edilmiş birden fazla 2B lazer tarayıcılar kullanılmaktadır. Üçüncü boyut, sistem yörüngesi boyunca hareket ederken zaman içinde değişen tarayıcı konumuna göre belirlenmektedir. Bazı 2B LiDAR tarayıcıların maksimum görüş açıları 360°nin altında tasarlanmıştır. Bu durum ise tarama esnasında boşlukların kalmaması için birden fazla lazer tarayıcının kullanılmasını gerektirir ve dolayısıyla sistem maliyetinin artmasına sebep olur. Günümüzde kullanılan yeni nesil lazer tarayıcıların 360°lik görüş açısına sahip olmaları kullanılan lazer sensör sayısını azaltmıştır. 2B LiDAR tarama sistemleri kodlayıcı ile motorize dönen bir ayna ve bir LiDAR sensöründen oluşur. Bir LiDAR tarayıcının tarama hızı (scan rate) motorize dönen aynanın hızına bağlıdır. Mobil haritalama uygulamalarında bir lazer tarayıcının tarama hızının yüksek olması saniyede binlerce nokta bulutu üretilmesinden daha önemlidir.

Mobil haritalama sistemlerinde bir pasif görüntüleme sensörü olan dijital CCD (Charge Coupled Device) kameralar kullanılır. Bu tür kameraların en önemli özelliği diğer görüntü algılayıcılarından daha fazla geometrik doğruluk imkânı sağlamasıdır. Fotogrametrik uygulamalarda kullanılan CCD kameralar, elektromanyetik spektrumun görünür ve orta

kızılötesi bölgelerinde çalışırlar. CCD kameralar, nesnelerden yayılan veya yansıyan ışık/radyasyonları algılamak ve onu elektrik sinyallerine dönüştürmek için elektronik dedektörler kullanırlar. Dedektörler üzerine düşen fotonyükleri ayıran ve depolayan birim piksel olarak adlandırılır. Fotogrametrik çalışmalarda kullanılan bir CCD kamera için en önemli parametreler, dedektör matrisinin boyutu ve piksel genişliğidir (Büyüksalih, 1999). CCD kameraların yüksek piksel çözünürlüğüne sahip olması gerekir. Mobil haritalama sistemlerinde dijital görüntüler veya videolar çoğunlukla LiDAR verisi ile birlikte toplanır. Kullanılan kameraların kamera obtüratörü GNSS/IMU saati ile senkronize edilmiştir. Dolayısıyla toplanan dijital görüntüler kusursuzca georeferanslanmaktadır. Dijital kameralar GPS anteni ile birlikte aracın üzerinde yer alan platforma monte edilirler. Bazı firmaların mobil lazer tarama sistemleri, yatay düzlemde 360°lik panoramik görüntüler elde etmek için birden fazla kamera kullanırken (Şekil 3a), bazı firmalar ise daireye benzer bir konfigürasyon ile tek bir dikey kameraya ilave birden fazla CCD kamera objektifinin yerleştirilmesi ile farklı görüntüler elde edebilmektedir (Şekil 2 (a)-(b), Şekil 3).



Şekil 2. (a) VMX-250-CS6 kamera (b) LAYDBUG kamera



Şekil 3. (a) Panoramik görüntü, (b) Küresel görüntü, (c) Kubbe görünümü (d) Çoklu kamera görünümü

2.3 Veri toplama ve veri işleme yazılımları

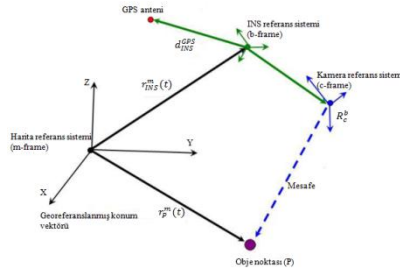
Yersel mobil lazer tarama sistem bileşenlerinin bir diğer önemli unsuru yazılımlardır. Her yersel mobil lazer tarama sistemi anlık olarak sistem bileşenlerini izlemek, veri toplamak ve veri işlemek için kendine özel yazılımlar kullanır. Son zamanlarda nokta bulutu işleyen yazılımların sayısında önemli ölçüde artış görülmektedir. Yazılımların seçimi nihai gereksinimlere göre belirlenir.

3. YERSEL MOBİL LAZER TARAMANIN MATEMATİK MODELİ

Yersel mobil lazer tarama sisteminin matematik modeli doğrudan georeferanslamadır. Üç boyutlu uzayda çoklu sensör bileşenlerinin (görüntüleme ve navigasyon sensörleri) eksen kümeleri bir başka ifadeyle koordinat sistemleri arasındaki ilişki, mobil haritalama sisteminin geometrik çatısını oluşturur (Şekil 4). Mobil haritalama sensörleri ile taranan objelerin zaman değişkenli üç boyutlu konumları lokal veya global bir referans koordinat sisteminde belirlenmektedir. Bir mobil haritalama

sistemi üç veya daha fazla koordinat sisteminden oluşur. Bu koordinat sistemlerini ifade etmek gerekirse;

- Kamera sensörü koordinat sistemi (c-frame)
- Navigasyon sensörü koordinat sistemi(b-frame)
- Lokal veya global harita referans sistemi (m-frame)



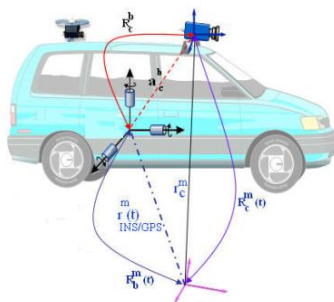
Şekil 4. Doğrudan georeferanslamanın geometrik yapısı (Yousif, 2010)

LiDAR verilerinin georeferanslanması, kamera referans sisteminden (c-frame) harita referans sistemine (m-frame) 3B vektörel koordinat dönüşümü problemi olarak tanımlanır. Harita referans sistemi eğrisel jeodezik koordinatlar (enlem, boylam, yükseklik), UTM veya 3TM (transversal merktor) gibi herhangi bir yer sabit koordinat sistemi (earth fixed coordinate system) olabilir. Kamera koordinat sisteminin (c-frame) konum ve yönelimleri harita referans/koordinat sistemine göre değişmektedir. Georeferanslama ile herhangi bir (t) zamanında kamera izdüşüm merkezinin harita referans sistemindeki konumu ve kamera koordinat sistemi ile harita referans sistemi arasındaki dönüşüm matrisi belirlenmektedir. Herhangi bir obje noktası için georeferanslama formülü aşağıda ifade edildiği şekilde yazılabilir.

$$r_p^m = r_c^m(t) + \mu_c^m R_c^m(t) r_p^c \quad (2)$$

(2) eşitliği kamera izdüşüm merkezi koordinatlarının doğrudan belirlenebildiğini göstermektedir. Ancak bu durum pratikte mümkün değildir. Çünkü navigasyon sensörlerinin izdüşüm merkezi (GPS anteni ve INS) ile görüntüleme sensörleri uzayda aynı konumda yer almazlar. Farklı merkezler arasında küçük ötelemeler ve dönüklüklerin olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 5 de görüldüğü üzere INS ve kamera sensörleri aynı hizada değildir. INS referans sistemi ve kamera referans sistemi arasında dönüklük " R_b^c " kalibrasyon ile elde edilmektedir. Bu durum şu şekilde formülize edilir;

$$R_c^m = R_h^m(t).R_c^b \quad (3)$$



Şekil 5. Georeferanslama elemanları ve referans sistemleri arasındaki ilişki (Hassan, 2006)

INS ve kamera bileşenlerinin arasındaki vektör INS referans sisteminde (b-frame) a_c^b olarak ifade edilirse;

$$r_c^m(t) = r_{INS}^m(t) + R_b^m(t)a_c^b \quad (4)$$

$$r_c^m(t) = r_{INS}^m(t) + R_b^m(t)a_c^b \quad (4)$$

(3) ve (4) eşitlikleri (2) eşitliğine uygulanırsa temel georeferanslama formülü aşağıda belirtildiği gibi yazılabilir.

$$r_p^m = r_{INS/GPS(t)}^m + R_b^m(t)[\mu_c^m R_c^b r_p^c + a_c^b] \quad (5)$$

(5) eşitliğinde mobil haritalama koordinat sisteminde ölçülen bir noktanın koordinatları (r_p^c), harita referans sistemindeki koordinatları (r_p^m) ile ilişkili olduğu açıkça ifade edilmektedir.

Formülü oluşturan değişkenler ile ilgili açıklama:

r_p^m : Harita referans sisteminde bir obje noktasının (p) 3B koordinat vektörü-bilinmeyen

$r_{INS/GPS(t)}^m$: entepole edilen navigasyon sensörünün (INS/GPS) harita referans sisteminde koordinat vektörü

$R_b^m(t)$: INS referans sistemi ve harita referans sistemi arasındaki dönüklük matrisi

(t) : Görüntü yakalama zamanı

R_c^b : Kamera referans sistemi ve INS referans sistemi arasındaki dönüklük matrisi (kalibrasyonla belirlenir)

R_c^m : Kamera referans sistemi ile harita referans sistemi arasındaki dönüklük matrisi

μ_c^m : Harita referans sistemi ve kamera sensörü arasındaki ölçek faktörü

r_p^C : Kamera referans sisteminde bir objenin konum vektörü-ölçülen

r_c^m : Kamera izdüşüm merkezinin harita referans sistemindeki konumu

a_c^b : Kamera ve INS referans sistemlerinin merkezleri arasında sabit vektör (kalibrasyonla belirlenir)

r_c^a , μ_c^a ve R_c^a değişkenlerinin doğrudan ölçümleri genellikle yapılamadığı için (2) eşitliğindeki terimler dolaylı ölçümler hesaba alınarak genişletilmelidir. Ayrıca mobil haritalama sistemleri stabil sistemler olmadığı için sistemin konum ve yönelimleri harita referans sistemine göre zamanla değişmektedir ve (2) eşitliği bu değişimi yansıtacak şekilde modifiye edilmelidir. Bu değişimler göz önüne alındığında mobil haritalama sistemleri için georeferanslama formülü aşağıda ifade edildiği şekilde yazılır.

$$r_p^m = r(t)_{GPS}^m + R(t)_{IMU}^m (r_{IMU/c}^{IMU} - r_{IMU/GPS}^{IMU} + \mu_c^m R_c^{IMU} r_p^c) \quad (6)$$

(4.16)

4. DOĞRUDAN GEO-REFERANSLAMA İÇİN GNSS/IMU ENTEGRASYONUN ÖNEMİ

CCD kamera görüntülerinde görünür objelerin 3B koordinatlarını belirleyebilmek için aşağıda belirtilen bilgiler gereklidir.

- Pozlama anında kamera perspektif merkezinin konumu
- Pozlama anında kamera yönelimleri
- Kamera sensörünün iç geometrisi
- Distorsiyon parametreleri

İlk iki parametre grubu dış yöneltme elemanları olarak bilinirken son iki parametre grubu iç yöneltme elemanlarıdır. Gerek yersel gerek hava fotogrametrisinde genel problem kameranın iç ve dış yöneltme elemanlarının belirlenmesidir. Dış

yöneltme elemanları GPS ve INS kombinasyonu ile belirlenmektedir. İç yöneltme elemanlarının belirlenmesi ise kamera kalibrasyon işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Dış yöneltme elemanlarının GPS/INS entegrasyonu ile belirlenmesi, dış yöneltmenin anlık (real time) ölçme işlemi ile bağlantılı olduğu ve dış yöneltme elemanlarının hızlı bir şekilde değiştiği anlamına gelir (Hassan2006; El-Sheimy, 2008). Prensip olarak iç yöneltme, sistem statik durumdayken ve ölçme işlemine başlamadan önce yapılır. Anlık georeferanslama sistem dinamik konumdayken dış yöneltme elemanlarının anlık olarak hesaplanması ile mümkündür. Ne yazık ki GPS donanımı her ortamda düzgün bir biçimde çalışmadığı için anlık georeferanslama her zaman mümkün olmayabilir. Zayıf uydu geometrisi, faz kesikliği (cycle slip), uydu kesintisi ve aracın manevraları esnasında oluşan dinamik geçikme gibi etkiler GPS ölçümlerini etkilemektedir. Özellikle GPS sinyalleri kentsel alanlarda yüksek binalar, tüneller, altgeçitler gibi yapılarda zayıf uydu geometrisi nedeniyle kesintiye uğramaktadır. Bu gibi durumlarda anlık georeferanslama doğruluğu beklenen düzeyde olmamaktadır. Son on yılda mobil lazer tarama teknolojisinde gözlenen gelişmeler doğrudan georeferanslamanın GPS ve INS entegrasyonu ile mümkün olduğunu göstermektedir. GPS/INS entegrasyonu ile herhangi bir zaman diliminde elde edilen tüm dış yöneltme bilgileri yeterli doğruluk ile kullanılabilir hale gelmektedir (Wright ve El-Sheimy 2003; Toth, 1997; Schwarz ve ark., 1993, El-Sheimy, 2008). Bu sensörlerin etkin bir şekilde kombinasyonu ve sensör verilerinin birleşik olarak işlenmesi bütün sistem doğruluğunu artıracaktır.

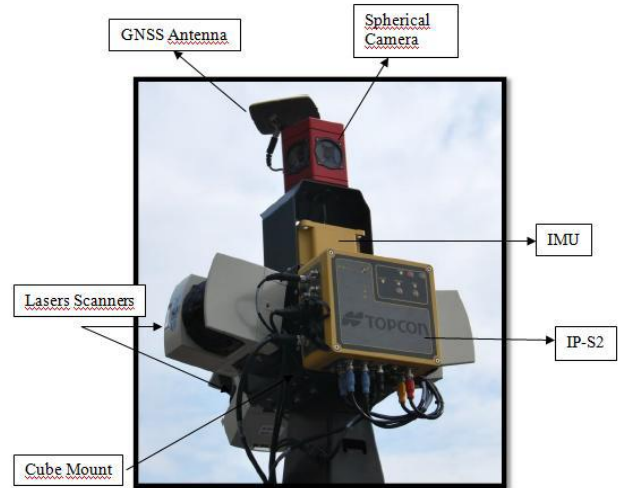
5. MOBİL LAZER TARAMA SİSTEMLERİ

Gün geçtikçe 3B bilgiye olan talebin giderek artması nedeniyle ticari olarak işletilen birçok yersel mobil lazer tarama sistemlerinin varlığı göze çarpmaktadır. Bu pazarda yer alan firmalara Optech LYNX Mobile Mapper, Reigl, Topcon, StreetMapper, Trimble ve DYNASCAN- MDL örnek olarak verilebilir. Çizelge 1. de mobil lazer tarama sistemleri pazarında yer alan altı büyük firmanın en son geliştirdikleri mobil haritalama sistemlerinin özellikleri özetlenmektedir. Bir mobil lazer taramada veri kalitesini lazer tarayıcı özellikleri ve 3B navigasyon sistemlerinden elde edilen konum ölçülerinin doğruluğu belirler. Özellikle lazer tarama teknolojisi, tarayıcının maksimum menzili, sinyal tekrarlaması oranı, tarama frekansı, doğruluk aralığı ve hassasiyeti ve nokta yoğunluğu bir lazer tarayıcının karakteristik özelliklerinden bazılarıdır.

6. TOPCON IP-S2 ÖRNEĞİ



Şekil 6. Topcon IP-S2 mobil haritalama sistemi



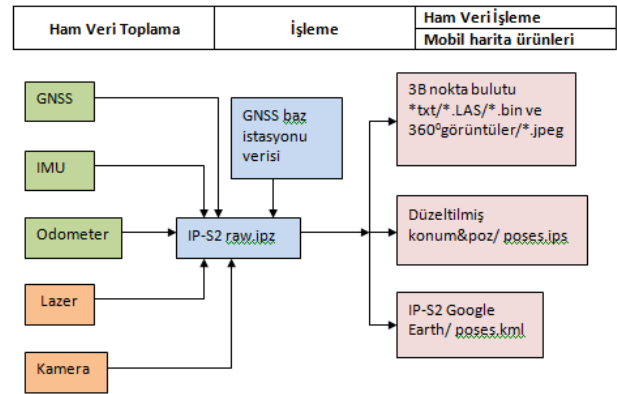
Şekil 7. Topcon IP-S2 bileşenleri

Topcon IP-S2 (Integrated Positioning) sürekli konum ve yön bilgisi toplamak için farklı sensörlerle donatılmış bir sistemdir. Tüm yersel mobil lazer tarama sistemlerinde olduğu gibi Topcon IP-S2 sistem bileşenleri 3 ana başlık altında sınıflandırılabilir;

- Görüntüleme birimleri (360° panoramik görüntü kamerası, lazer tarayıcı)
- Konumlandırma birimleri (GNSS, IMU, Odometer)
- Entegrasyon birimleri (araç içi yazılım, araç içi bilgisayar, veri toplama yazılımları)

IP-S2 sisteminin görüntüleme ve konumlandırma sensörlerinin bütünlük görseli Şekil 7. de verilmiştir.

Şekil 8. Topcon IP-S2 mobil lazer tarama sisteminin iş akış şeması olup, veri toplamak için kullanılan donanımları ve veri işleme sonucu elde edilen mobil harita ürünlerini özetlemektedir.



Şekil 8. IP-S2 iş akış şeması

6.1 Veri toplama

Çalışmanın amacı Topcon IP-S2 mobile lazer tarama sisteminin farklı hızlarda elde etmiş olduğu verinin 3B şehir modelleme, fotogrametrik röleve gibi çalışmalarındaki yeterliliğini ve kullanılabilirliğini test etmektir.

	Optech Lynx Mobile Mapper	Reigl	Topcon	Topcon	Trimble	MDL
Model	M1	VMX-450	IP-S2	IP-S2 HD	MX8	M500 X-PLANE
Lidar sensör sayısı	1-2	2	3	1 (velodyne HDL-64E)	2 (Reigl VQ-250)	2
Kamera (Mpx)	4	6 (5MP)	6 (2MP)	6	6 (5MP)	-
Maksimum menzil	200m %20	1.5 -800m	80m	120m	200m	500m
Doğruluk	8mm	5mm	-	-	5mm	1cm
Mutlak doğruluk	±5cm	8mm	±45mm	±20mm	10mm	±5cm
FOV (degree)	360°	360°	90°-180°	360°	360°	360°
Mesafe Ölçme yöntemi	TOF	TOF	TOF	TOF	TOF	TOF
Lazer ölçme hızı	75-500kHz	300kHz-1.1MHz	100kHz	100MHz	200Hz	30Hz
Tarama frekansı	80-200 Hz		75 Hz	15Hz	-	-
Dakikadaki tarama hızı	500,000 nokta/sn	1.1 milyon nokta/sn (550,000*2)	54,000(18,000*3) nokta/sn	1,3 milyon nokta/sn	(300,000*2) nokta/sn	72,000(36,000*2) nokta/sn
Veri depolama sıcaklığı	-40°C ile +60°C	-20°C ile +50°C	-40° to +70°C	-10°C ile +80°C	-	-20°C ile +70°C
Çalışma sıcaklığı	-10°C ile +40°C	-10°C ile +40°C	-30°C ile +60°C	-10°C ile +40°C	10°C ile +40°C	-20°C ile +60°C
Güvenilirlik sınıflaması	Class 1 eye-safe	Class 1 eye-safe	Class 1 eye-safe	Class 1 eye-safe	Class 1 eye-safe	Class 1 eye-safe
Güç gereksinimi	12VDC	11-15 VDC	12 VDC	12-14 VDC	12 VDC	12 VDC

Çizelge 1. Mobil lazer tarama sistemlerinin karşılaştırılması



Şekil 9. Uygulama alanı

Uygulama şehir merkezinde 20 km uzaklıkta Konya ili Meram ilçesi Hatıp mahallesinde gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık olarak 40,000 m² lik bir alan üzerine kurulan bu yeni yarı-yerleşim alanında 32 adet iki katlı müstakil ev bulunmaktadır. Çalışma alanının şehir merkezinden uzak bir bölgede seçilmesinin nedeni yaya ve araç trafiği gibi çalışmayı olumsuz yönde etkileyebilecek unsurların olmamasıdır. Uygulamada kullanılan çalışma güzergâhı yaklaşık 400 metre olup Şekil 8. de belirtildiği gibidir. Çalışma güzergâhı içerisinde kullanılan mobil lazer tarayıcının maksimum ölçme menzili dikkate alınarak 34 adet obje yüzeyi (binalar, elektrik kutuları, elektrik direkleri) seçildi. Seçilen yüzeyler üzerine 50cm*50cm boyutunda siyah zemin üzerine siyah-beyaz çeyrek daire merkezli hedef işareti tesis edildi. En uzak hedef işareti,

kullanılan mobil lazer tarayıcının maksimum tarama menzili düşünülerek 45 metrelik bir mesafeye tesis edilerek reflektörsüz ölçme yapabilen Topcon GPT 3007 ile hedef işaretlerine koordinat verildi. IP-S2 sisteminin ilgili çalışma bölgesindeki verimliliğini test etmek amacıyla hız, mesafe ve hava koşulu olarak 3 parametre tanımlanmıştır. Bu parametreler ile ilgili gerekli açıklama Çizelge 2.de verilmiştir.

Parametreler	Açıklama
Mesafe	Lazer sensörlerinin maksimum lazer sinyali gönderme menziline dikkate alınarak hedef işaretlerinin tesisi
Hız	Aracın "10km/saat-15km/saat, 20km/saat-25km/saat ve 30km/saat-35km/saat" hızına bağlı olarak toplanan verilerin değerlendirilmesi
Hava koşulu	Güneşli hava-açık bir gökyüzü

Çizelge 2. Uygulama için araştırma parametreleri

Mobil lazer ölçme işlemine başlamadan önce mobil lazer tarayıcısının topladığı nokta bulutu verilerini WGS-84 sisteminde koordinatlandırabilmek ve hassasiyeti artırmak için sabit bir istasyona GPS alıcısı kuruldu. Başlangıç konumunun yüksek doğruluğu söz konusu çalışma güzergâhının kinematik modelinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Mobil LiDAR verisi elde etme çalışmalarına başlamadan önce yapılması gereken bir diğer önemli uygulama ise aracın hız ve konumunun belirlenmesinde önemli bir yeri olan IMU bileşeninin tam olarak devreye girmesi için yapılan araç manevralarıdır. IMU bileşeni içerisindeki üç ivmeölçer ve jiroskopu devreye sokan

bu uygulama aracın **sekiz sürüş modeli** şeklindeki manevraları ile gerçekleştirilir.

Lazer sensörlerinin maksimum lazer sinyali gönderme menzili göz önünde bulundurularak çalışma güzergâhı içinde ölçme ve değerlendirmede kullanılacak bina, elektrik direği, elektrik kutuları gibi detaylar üzerine farklı mesafe derinliklerinde tesis edilen hedef işaretleri Çizelge 2 de belirtilen hız aralıklarında üç ayrı oturum planında taranmıştır.

6.2 Veri işleme

Mobil LiDAR teknolojisi kısa sürede çok büyük miktarda veri üretebilen bir sistemdir. Genellikle toplanan ham verinin işlenmesi ve detay çıkarımı için harcanan büro çalışması veri toplamak için harcanan zamanın yaklaşık 2-10 katı kadardır. Mobil LiDAR sistemleri ile toplanan ham veriyi işlemek için geliştirilen yazılımlar yersel mobil lazer tarayıcı üreten firmalara özel çözümlerdir. Bir başka ifadeyle mobil LiDAR sistem tedarikçileri ancak kendi yazılımları ile ham veri çözümlemesi yapabilen pazarlama stratejisi izlemektedirler. IP-S2 yersel mobil lazer tarama sistemi ile toplanan ham verileri işlemek için TOPCON tarafından geliştirilen **GeoClean** yazılımı kullanılmaktadır. Bütünleşik IP-S2 sisteminin tüm sensörlerine ait ham veriler tek bir iş istasyonu üzerinde işlenmektedir. Bu çalışmada, IP-S2 sistemi ile toplanan ham verileri kullanılabilir hale getirmek için (post-process) yapılan işlemleri üç gruba ayırmak mümkündür.

- Bunlardan ilki aracın yörüngesini hesaplamaktır. Yörünge hesaplama yöntemi GNSS alıcısı, IMU, Odometer verileri ile sabit referans istasyon verilerinin entegrasyonu temeline dayanmaktadır
- Aracın konumu ve yörüngesini hesaplamak için navigasyon sensörlerine (GNSS, IMU, Odometer) ait ham veriler birleştirildikten sonra LiDAR verileri ve görüntü verileri birleştirilir
- Son işlem adımı ise görüntüleme sensörleri (lazer ve kamera) ile elde edilen ham verinin işlenerek GNSS+INS verileriyle birleştirilmesi sonucu oluşan georeferanslanmış nokta bulutu verisidir. Her bir lazer noktası renk, yoğunluk ve konum bilgisi ihtiva eder. IP-S2 mobil haritalama sistemi ile elde edilen nokta bulutu verisi üzerinden görselleştirme ve basit detay çıkarımı TOPCON firması tarafından geliştirilen Spatial Factory yazılımı ile yapılabilmektedir.

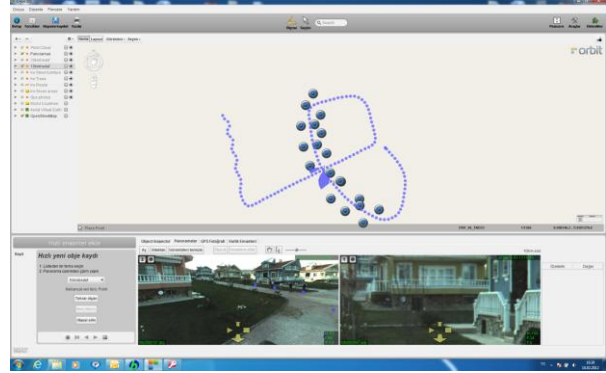
Çalışma bölgesine ait ham verilerin post-process sonrası Spatial Factory yazılımı ile elde edilen georeferanslanmış görüntü kümeleri ile ilgili görsel şekil 10' da verilmiştir.



Şekil 10. Çalışma bölgesinin 3B nokta bulutu görüntüsü

Verilerin Orbit AIM3 yazılımında değerlendirilmesi:

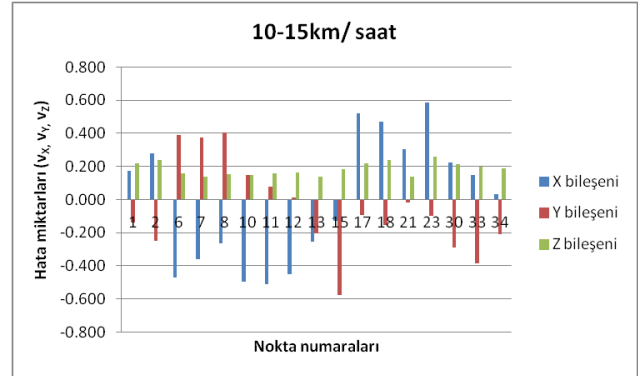
Değerlendirme öncesi hazırlık çalışmalarında, çeşitli objeler üzerine yapıştırılarak sabitlenen hedef işaretlerinin 3B koordinat bilgilerini (x,y,z) nokta bulutu ile ilişkilendirilmiş panoramik görüntüler üzerinden sorgulamak için Orbit AIM3 yazılımı kullanıldı (Şekil 11).



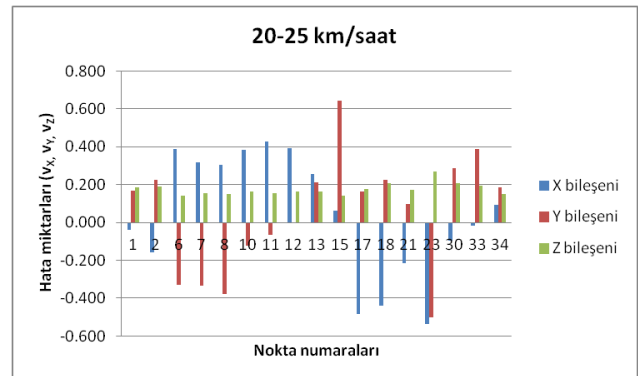
Şekil 11. Orbit AIM3 yazılımı

6.3 Veri setlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

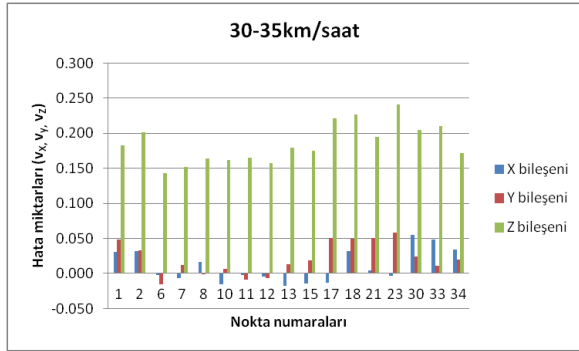
Yersel mobil LiDAR yöntemiyle detaylar üzerinde seçilen noktalarda koordinat belirleme hassasiyeti jeodezik olarak elde edilmiş koordinatlar ile karşılaştırılmıştır. İstatistiksel değerlendirmeler, her iki yöntemle elde edilen hedef işaretine ait koordinat verileri için bir dizi hesaplamalar yapılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçları yorumlanmıştır. Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14 sırasıyla 10-15km/saat, 20-25km/saat ve 30-35km/saat lik hızlara ait x, y ve z yönündeki hata miktarlarını göstermektedir.



Şekil 12. x, y ve z bileşenlerine ait hata miktarları



Şekil 13. x, y ve z bileşenlerine ait hata miktarları



Şekil 14. x, y ve z bileşenlerine ait hata miktarları

Çizelge 3. de özetlenen istatistiksel büyüklüklere göre z bileşeninin her üç hız verisinde benzer ve sistematiklik içerdiği, fakat x, y bileşenlerinin 10-15 km/saat ve 20-25 km/saat hızlarda benzer karakterde olup 30-35 km/saat lik verilerin daha hassas ve doğru olduğu açıkça görülmektedir. Bu sistematiklik her üç hız içinde geçerli olup büyüklükleri yaklaşık aynıdır. z bileşeninin RMS değerlerinin küçük olması hataların belirli bir bölgede birbirine yakın olduğunu, standart sapmasının RMS değerinden 6 kat büyük olması da hataların belirli bir bölgede yığıldığını, kısacası bir sistematiklik içerdiğini işaret etmektedir (Karasaka, 2012).

Hız	10-15 km/saat			20-25 km/saat			30-35 km/saat		
	V_x	V_y	V_z	V_x	V_y	V_z	V_x	V_y	V_z
$[V_{ort}](m)$	-0,01	-0,06	0,19	0,04	0,05	0,18	0,01	0,02	0,19
$[\sigma](m)$	0,38	0,28	0,20	0,33	0,31	0,18	0,03	0,03	0,19
$[RMS](m)$	0,38	0,27	0,04	0,32	0,30	0,03	0,02	0,02	0,03

Çizelge 3. Üç farklı hızın baz bileşenlerine ait baz uzunluk hatası ve standart sapmaları

7. SONUÇ

Topcon IP-S2 mobil tarama sisteminin 3B şehir modelleme çalışmalarındaki yeterliliğini ve fotogrametrik röle ve çalışmalarında kullanılabilirliğini test etmek amacıyla bir dizi ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçme ve değerlendirmeler sonucunda aracın 30km/saat 'in altındaki düşük hızlarda fotogrametrik röle ve amaçlı çalışmalar için yeterli konum doğruluğuna ulaşamadığı dikkat çekmektedir. (Puento ve ark., 2013) yılında yapmış oldukları çalışmada Topcon marka haritalama sisteminin, mobil tarama sistemleri pazarında yer alan diğer markalar ile kıyaslandığında (Reigl, Trimble, Optech, street Mapper ve Dynscan) konumsal değerlendirme için en iyi veriyi ürettiğini, dış yöneltme parametrelerinde ise hatalı değerler ürettiğini ve bu durumun GNSS konumlama verilerinden kaynaklandığı kanatine varmışlardır. Düşük hızlarda elde edilen konumsal karesel ortalama hata verilerini, GNSS/IMU sensörler bileşenleri çözümlemelerinin etkilediği literatürde yer alan benzer çalışmalar ile de desteklenmektedir (Niu ve ark., 2010; Godha, 2006). Her ne kadar aracın 30-35km/saat lik hızla elde etmiş olduğu veriler çalışmadan beklenen doğruluğu karşılamış olsa da yapılan çalışma bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Topcon IP-S2 yersel mobil lazer tarama sisteminin 1/20 ve daha büyük ölçekli röle ve çalışmalarından ziyade 1/100 ve 1/200 ölçekli cephe yenileme ve sokak sağlıklılaştırma projelerinde kullanımının daha uygun olacağı kanatine varılmıştır. Topcon IP-S2 dünyada birçok caddenin panoramik görüntülerini temin

etmek için kullanılmaktadır. Ancak daha doğru ve detaylı nokta verisi gerekli olduğunda beklenen ihtiyaçları karşılamadığı görülmektedir. IP-S2' nin daha az doğruluk gerektiren 3B kent modelleme çalışmaları için daha uygun olduğu söylenebilir. Yersel mobil lazer tarama sistemlerinin seçimi uygulamanın amacına göre belirlenmelidir. Bir mobil lazer tarama sisteminin tüm yersel uygulamalar için kullanılabileceğini söylemek yanlış olur. Seçilecek olan mobil haritalama sisteminin teknik özellikleri yapılacak uygulamanın gereksinimlerini karşılar nitelikte olmalıdır. Lazer sensörlerinin saniyede ürettiği nokta sayısı kapasitesi, tarama frekansı, lazer sinyali menzili ve kamera çözünürlüğü gibi teknik özellikler mutlaka dikkate alınmalıdır. Mobil ölçme esnasında elde edilen nokta bulutu yoğunluğu doğrudan lazer sinyali tekrarlama oranı, tarama hızı, tarama mesafesi ve aracın sürüş hızı gibi parametreler ile ilişkilidir.

Literatürde yer alan çalışmalar yersel mobil lazer tarama verilerinden 3B şehir modelini oluşturan bina ve kent mobilyaları gibi yer üstü objelerin hızlı bir biçimde çıkarılabildiğini göstermektedir. Ülkemiz için yersel mobil lazer tarama teknolojisinin kullanımının yaygınlaşmasıyla kentsel alanların değişim hızını belirleyen binaların üç boyutlu modellenmesi hızlı bir biçimde yapılabilecektir. Yersel mobil lazer tarama sistemleri ile elde edilen sonuç ürünün sayısal olması, üç boyutlu verinin görselleştirilmesi, yönetilmesi ve CBS ortamında sunulması gibi farklı uygulama alanlarında da kullanılmasına olanak sağlaması, ülkemizde gelecekte yapılabilecek birçok çalışmaya ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

- Angelopoulou, E., and Wright, JR, 1999, Laser scanner technology, Department of Computer&Information Science Technical Reports, Univesity of Pennsylvania, MS-CIS-99-16, June 28,1999
- Bossler, J., ve Toth, C., 1995, Accuracies obtained by GPSVanTM proceedings, *GIS/LIS'95 Annual Conference*, 14-16 November, International; American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, 1:70-77
- Büyüksalih, G., 1999, Kızılötesi CCD kameralar ve teknik özellikleri, *Harita Dergisi*, Temmuz 1999, Sayı:122
- El-Sheimy, N., Schwarz, K.P., Gravel, M., 1995, Mobile 3-D positioning using GPS/INS/video cameras, *Proceedings, Mobile Mapping Symposium*, 24-26 May, Columbus, Ohio (OSU Center for Mapping, Columbus, Ohio), pp.236-249
- El-Sheimy, N., 2008, Land mobile mapping systems, *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008 ISPRS Congress Book*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47805-2, Chapter 7
- Godha, S., 2006, Performance evaluation of low cost MEMS-Based IMU integrated with GPS for land vehicle navigation application, Master of Science, Calgary Univesity, Department of Geomatics Engineering, Calgary/Alberta, pp.210
- Grejner-Brzezinska, D.A., Li, R., Haala, N.,Toth, C., 2004, From mobile mapping to telegeoinformatics: Paradigm shift in geospatial data acqusition, processing, and management, *Photogrammetric Engineering &Remote Sensing*, Vol.70, No.2, February 2004, pp.197-210

- Hassan T., Ellum C., and El-Sheimy N. (2006). "Bridging Land-based Mobile Mapping Using Photogrammetric Adjustments". ISPRS Commission I Symposium. From Sensors to Imagery", Marne-la-Vallée, FRANCE, 3rd-6th July 2006
- Karasaka, L., 2012, A study on the ability of using rolove projects with mobile terrestrial laser systems, Ph.D thesis, SU The Graduate School of Natural and Applied Science, Konya: Turkey; 2012
- Kahveci, M., Yıldız, F., 2009, GPS/GNSS Uydularla konum belirleme sistemleri, Nobel Yayınevi, ISBN 978-975-591-203-5, 221 sayfa
- Kurt, O, 2005, Yapay uydu bazlı alıcılarda çoklu frekansın önemi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 28 Mart - 1 Nisan 2005, Ankara
- Niu, X., Zhang, H., Chiang, K.W., and El-Sheimy, N., 2010, Using land-vehicle steering constraint to improve the heading estimation of MEMS GPS/INS georeferencing sytems, The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission-I, ISPRS Convergence in Geomatics, June 15-18, 2010 Calgary, Alberta, Canada
- Petrie, G., and Toth, K.C., 2008, Terrestrial laser scanners, Topographic Laser Ranging and Scanning, 593 pg., ISBN: 13:978-1-4200-5142-1, Taylor&Francis, New York
- Pfeifer, N and Briese, C., 2007, Laser scanning-principles and applications, Geo-Sibir, Nowosibirsk, III International Scientific Confernece, pp. 93 - 112, 2007
- Puento, I., Jorge H, G., Scanhez, M., Arias, P., 2013, Review of mobile mapping and surveying technologies, Journal of Measurement, 46 (2013) 2127-2145
- Schwarz, K.P., Chapman, M., Cannon, M.E., Gong, P., 1993, An integrated INS/GPS approach to the georeferencing of remotely sensed data, Photogrammetric Engineering&Remote Sensing, 59(11):1667-1674
- Silva, J.F.C., Camargo, P.O., and Gallis R.B., 2003 Development of a low-cost mobile mapping system: A South America Experience, Photogrammetric Record 18(101): 5-26(March-2003)
- Toth, C.K., 1997, Direct sensor platform orientation: Airborne integrated mapping system (AIMS), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Comm. III, part3-2W3:148-155
- Yen, K., Akin, K., Lofton, A., Ravani, B., and Lasky A., 2010, Using mobile laser scanning to produce digital terrein models of pavement surfaces, AHMCT Reseach Report: UCD-ARR-10-11-30-01, November 30
- Yousif, H., Li, J., Chapman, M., Shu, Y., 2010, Accuracy enhancement of terrestrial mobile lidar data using theory of assimilation, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK. 2010
- Wright, B., El-Sheimy, N., 2003, Real-time direct georeferencing of thermal images for identification and location of forest fire hotspots, 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zurich, Switzerland, September 22-25, 2003