

UZAKTAN ALGILAMA VERİLERİNİN DÜŞÜK MAALİYETLİ ROBOTLARIN KENTSEL ALAN NAVİGASYONUNDA KULLANIMI

Okan OKUTKAN¹, Derya MAKTAV²

¹Müh., DigiTurk Krea İçerik Hizmetleri ve Prodüksiyon A.Ş., 34353, Beşiktaş, İstanbul, okan.okutkan@digiturk.com.tr
²Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, maktavd@itu.edu.tr

ÖZET

Günümüzde mobil robotların açık alan navigasyonunda, GPS konum bilgilerinin yanı sıra, lazer tarayıcılar, SONAR, RADAR ve LIDAR gibi algılayıcılardan sağlanan veriler giderek önem kazanmaktadır. Bu tür algılayıcıların kullanımı ağırlıklı olarak mobil robotun çevresindeki engellerin algılanması, engellerden sakınılması, eş zamanlı konumlandırma ve haritalama (SLAM) işlemlerinde kullanılmakta ve robotun çevresi ile kendisi arasındaki konum, oryantasyon ilişkisi elde edilerek navigasyon yapılmaya çalışılmaktadır.

Navigasyon süreci “Neredeyim?”, “Nereye gideceğim?” ve “Nasıl gideceğim?” sorularının cevaplanmaya çalışıldığı bir süreçtir. Sürecin ilk aşaması olan “Neredeyim?” sorusuna verilecek olan cevabın doğruluğu tüm navigasyon sürecinin doğruluğunu belirlemektedir. Navigasyonda kullanılan yol bulma algoritmaları ne kadar gelişmiş olursa olsun hatalı veriler girdi olarak kullanıldığında hesaplanan rotalar da hatalı olacaktır.

Yüksek bütçeli robot projelerinde kullanılan GPS alıcılarının ve diğer algılayıcıların hassasiyetleri ve dolayısıyla maliyetleri yüksek tutularak çok daha hassas ve tutarlı navigasyon işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Günümüzde orta ve düşük maliyetli robotlarda kullanılan GPS alıcıları ± 10 m. bir konum doğruluğuna sahiptir. Bu doğruluk ile okunan bir konum bilgisi, GPS alıcısının konumunu 400m^2 'lik bir olasılık alanı içerisinde vermektedir. Küçük veya orta boyutlu bir robot için bu büyüklükteki bir alan bazı senaryolarda tüm çalışma alanını kapsayabilmektedir. Böyle bir durumda robotun çalışacağı alan içerisinde bulunduğu konumu tam olarak belirlenememekte ve navigasyon işlemi sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilememektedir. Bu nedenle mobil robot navigasyonunda kullanılan GPS konum bilgisinin doğruluğunun artırılması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ve bir lazer tarayıcı kullanılarak düşük maliyetli GPS alıcılarının konum doğruluğunun artırılması için bir algoritma tasarlanmış olup geliştirmesi halen devam etmektedir. Dijital görüntü işleme, görüntü çakıştırma tekniklerinden faydalanılarak, lazer görüntüsü, yüksek çözünürlüklü uydu görüntüsü, pusula ve atalet ölçüm ünitesi (IMU) verilerini kullanan ve düşük maliyetli GPS alıcısından okunan hatalı GPS koordinatlarının doğruluğunu arttırmak için GPS konum düzeltme vektörünü hesaplayan bir yazılım algoritması geliştirilmiştir. Lazer tarayıcıdan okunan açı ve mesafe çiftlerinin çözümlenmesi ile 2D lazer kenar haritası oluşturulmaktadır. Pusula ve UMI verileri kullanılarak bu haritanın oryantasyonu düzeltildikten sonra online harita servislerinden yararlanılarak yersel çözünürlüğü kullanılacak uydu görüntüsüne eşlenmektedir. Lazer kenar haritasının, yüksek çözünürlüklü uydu görüntüsünün Canny kenar belirme tekniği ile işlenmesi ile oluşturulan kenar haritası ile şablon eşleme yöntemi kullanılarak hizalanması sonucunda GPS konum düzeltme vektörü hesaplanmaktadır. Her ne kadar tek bir metot, tutarlı ve efektif bir konumlandırma ve navigasyon sistemi oluşturmak için yeterli olmasa da önerilen metot konumlandırma ve navigasyon algoritmalarında kullanılmak üzere düşük maliyetli GPS alıcılarının kentsel alanlardaki konum doğruluğunu artıracak ve daha sağlıklı navigasyon işlemi yapılmasına olanak tanıyacaktır.

Anahtar Sözcükler: GPS, Lazer Tarayıcı, Mobil Robot, Navigasyon, Uydu Görüntüsü.

ABSTRACT

USE OF REMOTE SENSING OF MOBILE ROBOTS IN URBAN AREA NAVIGATION

Navigation focuses on the process of monitoring and controlling the movement of a vehicle from one place to another. It can refer to any study that involves the determination of position and direction. In a broader sense, navigation is a process of trying to answer the questions where am I?, where will I go? and how will I go? The answer given to the first phase of the process, where am I? will determine the accuracy of the navigation process. Regardless of the sophistication level of the navigation path planning algorithms used, it is obvious that routes will be calculated incorrectly when wrong initial position data are used as input.

In the field of outdoor navigation of mobile robots in urban areas, GPS data as well as LASER scanners, SONAR, RADAR and LIDAR data are becoming increasingly important. These sensors are mainly used for detection of obstacles around a mobile robot, obstacle avoidance, and real-time positioning and mapping. Relationship between robot's surroundings and its location and orientation is obtained using these sensors and is used in navigation process.

In high budget mobile robot projects, very accurate and expensive GPS receivers and other sensors are used. Precise and consistent navigation operations can be performed by using these accurate sensor data. Nowadays, low cost GPS receivers used in low to medium budget robot projects have approximately a position accuracy of ± 10 meters in urban areas. This accuracy enables the determination of the position of the GPS receiver roughly in a 400m^2 area which we will define as error probability area. For

small or medium sized mobile robots, in some scenarios, an area of this size can cover the entire study area. In this case robot's exact location in the study area cannot be determined and thus navigation operations cannot be carried out precisely. Therefore increasing accuracy of the GPS location used in mobile robot navigation is of great importance.

In this paper we describe the design and implementation of a unique algorithm to increase accuracy of the GPS location that utilizes 2D laser scanner data and high resolution satellite imagery. By combining digital image processing techniques, template matching techniques and laser image, high resolution satellite imagery, compass and inertial measurement unit (IMU) data we developed an algorithm to calculate GPS error correction vector to correct erroneous GPS position obtained from low cost GPS receivers. 2D laser edge map is produced by plotting angle and distance data pairs obtained from a laser scanner. Compass and IMU data are used to correct orientation of laser edge map. Online mapping service data are used to match ground resolution of laser edge map with of satellite imagery. Our method uses high resolution satellite imagery and Canny edge detection method to produce edge map of the robot's surroundings and uses template matching techniques to align laser edge map produced from 2D laser scanner. In this alignment process GPS error correction vector is calculated by using X and Y axis translations. This method is demonstrated in computer simulations and field experiments. We believe that while a single method cannot be used to create a robust and efficient mobile robot localization and navigation system, our method will improve low cost GPS receivers' position accuracy in urban areas to be used as an input to localization and navigation planning algorithms.

Keywords: GPS, Laser Scanner, Mobile Robot, Navigation, Satellite Images

1. GİRİŞ

Son yıllarda dijital görüntülerin (hava fotoğrafları ve uydu görüntüleri, LADAR/LIDAR görüntüleri, dijital yükseklik modelleri, detaylı haritalar, vb.) robot navigasyonunda kullanımı konusundaki araştırmalara olan ilgi oldukça artmıştır. Tüm bu araştırmalarda rota planlama ve navigasyonu farklı açılardan ele alınmaktadır (Shair, S.). Nitekim, bina içi (indoor) navigasyonda robota çalışma alanı haritasının önceden girdi olarak verilmesi yaygın bir uygulamadır. Robota ayrıca lazer tarayıcı da monte edilerek, bu tarayıcı ile belirlenen çeşitli özelliklerin (nesnelere, engeller, vb.) bu harita ile karşılaştırılmasıyla, robot konumunun belirlenmesini sağlayan standart teknikler vardır (Capezio,F.). Bina dışı (outdoor) navigasyonda ise; konum belirleme işleminde, GPS verilerinin yanı sıra, pusula ve enkoder ölçümleri (Haihang,S.), sonar (Ray,A.K.), lazer tarayıcı (Joerger,M.,Andrey,S.) ve video kamera (LI,H.) verileri tamamlayıcı veri olarak kullanılmaktadır.

Bir çalışmada, robotun konumu kinematik DGPS (diferansiyel GPS) kullanılarak belirlenmiş ve lazer tarayıcı da monte edilerek SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping) yöntemi ile robotun navigasyonu hassas biçimde sağlanmıştır. Bu navigasyon sürecinde, önce hassas kinematik DGPS verileri ile konum belirlendikten sonra, lazer tarayıcı verileri ile lokal engel tanıma ve konum belirleme işlemi yapılmıştır (Joerger,M.). Diğer bir çalışmada da, GPS ve lazer tarayıcı verilerinin yanı sıra, atalet ölçüm sistemi verileri kullanılarak, engelle karşılaşıldığında yeniden rota oluşturulma işlemi üzerine yoğunlaşmıştır. Navigasyon süresince, sürekli olmayan GPS veya lazer ölçümleri arasındaki rota bölümlerinde lazer tarayıcı ve atalet ölçüm sistemi verileri kullanılarak konum farkları hesaplanmıştır. Böylece, iki GPS ölçümü arasında veya GPS sinyalinin kaybolduğu durumlarda, yaklaşık konum hesaplaması yapılarak navigasyona devam edilebilmiştir. Ayrıca atalet ölçüm sisteminden elde edilen eğim verileri ile lazer tarayıcının sürekli olarak yeryüzüne paralel olması da sağlanmıştır (Andrey,S.). Sözü edilen bu çalışmalarda GPS ve ikincil algılayıcılar kullanılarak navigasyon işlemi gerçekleştirilmiş, mevcut haritaların veya uydu görüntülerinin kullanımı yerine eş zamanlı konumlama ve haritalama yöntemi tercih edilmiş, ancak GPS konum bilgisinde bir doğruluk artırma yöntemi sunulmamıştır.

Diğer bir çalışmada ise mevcut dijital görüntülerden yararlanılmıştır. Her ne kadar dijital görüntülerin robot navigasyonunda kullanımı yeni bir fikir değil ise de, bu görüntülerin, rota üzerindeki ana noktaların konumlarının belirlenmesinde kullanılması geçtiğimiz yıllarda gene de yoğun bir araştırma konusu olmuştur. Özellikle otonom hareket eden taşıtlarla ilgili araştırmalar, otomotiv endüstrisinin bu konuya olan ilgisinin artması ile daha da önem kazanmıştır. Bu araştırmaların birçoğunda dijital görüntü üzerinde tanımlanabilen yer özelliklerinin belirlenebilmesi için lazer tarayıcılar kullanılmıştır (Wender,S., Shibuhisa,N., Weiss,T., Miyakasa,T., Peng,J.).

Bir çalışmada, lazer tarayıcı verileri ve detaylı haritalar kullanılarak otonom taşıtların kavşaklarda algıladığı nesne sınıflandırmasının iyileştirilmesi sağlanmıştır (Wender,S.). Diğer bir çalışmada da, önceden hazırlanan menzil haritası (range map), video kamera ve lazer tarayıcı kullanılarak hassas konum bilgisi elde edilmiştir (Shibuhisa,N.). Diğer bir çalışmada da, benzer şekilde, önceden oluşturulan grid tabanlı özellik haritasını ve lazer tarayıcı ile elde edilen nesne konumlarını kullanarak düşük hızlarda (~10 km/saat) hareket eden taşıtların konumlandırılmasını sağlayan bir yöntem önerilmiştir (Weiss,T.).

Ayrıca, çok katmanlı bir LIDAR kullanılarak hareket halindeki nesnelere (taşıtlar ve yayalar) algılama yöntemi de önerilmiştir. Bu çok katmanlı lazer tarayıcının, hem dikey, hem de yatay düzlemde tarama yapması sayesinde yol üzerindeki nesnelere sınıflandırılmasında, bu nesnelere hareket yönü ve hızları belirlenmiştir (Miyasaka,T.).

Diğer bir uygulamada ise; 3D-GIS verileri, jiroskop ve lazer tarayıcı verileri ile örtüştürülerek geolokasyon bilgisi elde edilmiş ve akıllı kent içi navigasyon sağlanmıştır. Ancak, önerilen bu yöntemde navigasyonun yapılacağı alanın 3D-GIS bilgisine ihtiyaç duyulması, yöntemi kullanarak navigasyon yapılmadan önce rotanın 3D haritasının çıkarılması gereksinimini doğurmaktadır ve böylece yöntemin uygulanabilirliği de azalmaktadır (Peng,J.).

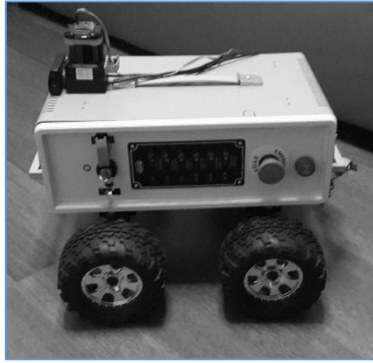
Yukarıda özetlenen bu çalışmalarda, lazer tarayıcılar, genellikle, engel algılama ve engelden sakınma işlevlerini yerine getirmekte, örneğin GPS verilerinin elde edilemediği, ya da yeterince hassas olmadığı durumlarda konum bilgisi elde etmek için kullanılmaktadır. Konum bilgisinin daha hassas elde edilebilmesi için lazer tarayıcıların da kullanıldığı çalışmalarda, robotun kendi oluşturduğu haritalarını kullanarak konum bilgisi elde edilmiştir, ancak mevcut global bir harita/görüntü kullanılarak GPS konum doğruluğunun artırılmasına yönelik bir çalışma yapılmamıştır.

Bu çalışmada ise, lokal ve global konumlama ayırımı yerine, elde edilen lokal engel-uzaklık haritası kullanılarak, global harita üzerindeki konumun GPS yardımıyla daha doğru olarak hesaplanması hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda bir konum doğruluğu iyileştirme algoritması tasarlanmıştır, ancak yazılımsal uygulaması ise halen devam etmektedir.

2. PLATFORM VE KULLANILAN VERİLER

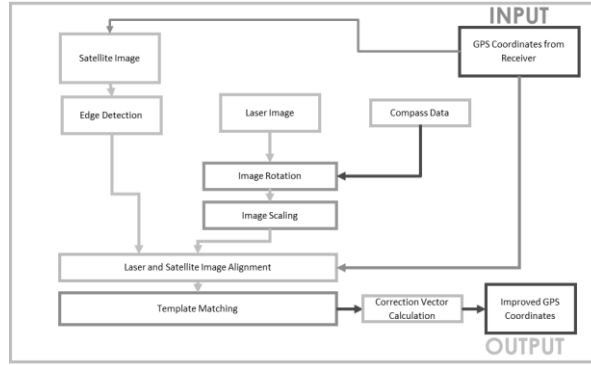
Çalışmanın temel amacı, düşük maliyetli küçük mobil robotların GPS konum doğruluğunu artırmak olduğu için, test platformunun, basit, gereksinimleri karşılayacak kadar yetkin olması ve arazi çalışmalarında bakımının kolay yapılabilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle, robotun tasarımının ve özelliklerinin geliştirilmesi, üretilmesi ve kontrolü basit olmalı, ileride gerek duyulabilecek ek özellikleri de kolaylıkla ekleyebilecek esneklikte olmalıdır. Bu nedenle robotun sürüş mekanizmasında, elektronik aksamında ve kontrol mekanizmasında karmaşık yöntemlerin kullanılmasından kaçınılmıştır.

Bu çalışmada her biri bir elektrik motoru tarafından tahrik edilen 4 adet arazi tipi teker barındıran bir diferansiyel sürüş sistemi kullanılmıştır. Gövde, elektrik ve elektronik aksamın dış etkenlerden korunması için tamamen kapalı olarak tasarlanmıştır. Mobil robot test platformu, robotun mekanik işlevlerini kontrol eden, navigasyonu sağlayan, lazer tarayıcı görüntülerini işleyen ve uydu görüntüsü ile karşılaştırmasını yapan yazılımın çalışacağı bir bilgisayarı üzerinde barındırmaktadır. Lazer verilerinin elde edilmesinde Hokuyo UTM-30-LX modeli 2D lazer tarayıcı kullanılmıştır. Lazer tarayıcıya ek olarak düşük maliyetli GPS (Garmin GLO), elektronik pusula, 9 eksenli Inertial Measurement Unit (IMU), kızılötesi ve sonar tabanlı engel algılayıcılar, motor ve sensor kontrol kartları ve kontrol bilgisayarı mevcuttur (**Şekil 1**).



Şekil 1. Mobil robot test platformu ve lazer tarayıcı.

Yöntemin uygulanması sırasında kullanılacak lazer ve uydu görüntülerinin veri miktarının yoğun olması bu bilgilerin gömülü (embedded) sistemler üzerinde işlenmesini engellemektedir. Geliştirilecek algoritmanın alt yapısı, mobil robot test platformunun donanımsal kontrolü, platformun navigasyon işlemleri, algılayıcı verilerinin okunması ve ileride kullanılmak üzere kayıt edilmesi işlevlerinin yanı sıra lazer tarayıcı verilerinin 2D menzil haritası haline dönüştürülmesi, uydu görüntüsü ile mekânsal çözünürlük eşleştirmesi, iki görüntünün koordinat ve yön eşleştirmesi, uydu görüntüsünün görüntü işleme yöntemleri ile görüntü hizalamaya hazırlanması ve son olarak da uydu görüntüsü ve lazer görüntüsünün hizalanarak GPS düzeltme vektörlerinin hesaplanması işlevlerini yerine getirecek şekilde tasarlanmıştır (**Şekil 2**).



Şekil 2. Metodun uygulanması.

Çalışmada kullanılan GPS alıcısı, lazer tarayıcı ve kontrol kartı gibi donanımlar için Windows işletim sistemi sürücülerini bulunmaktadır. Bu nedenle yazılım alt yapısı Microsoft.NET mimarisi kullanılarak hazırlanmıştır. NET mimarisinin sağladığı esneklik sayesinde proje içerisinde kullanılacak donanım kontrolleri, algılayıcı alt yordamları (subroutines), navigasyon alt yordamları ve GPS konum düzeltme alt yordamları farklı iş parçacıkları (thread) üzerinde paralel olarak çalıştırılabilmektedir. Şekil 3’te, geliştirilen algoritmanın kullanıcı arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 3. Kontrol ve işlem yazılımı.

Yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin (örn. Geoeye-1, IKONOS, WorldView 1-2), çeşitli firmaların (Google, Microsoft, Nokia, Yandeks, vb.) ücretsiz internet harita servislerinden alınması görüntü temin maliyetini azaltmakta ve sadece robotun çevresinde belirlenecek alanın görüntüsünün bilgisayarda işlenmesi sayesinde işlemci yükü de azalmaktadır. Bu çalışmada, Bing Maps servisi üzerinden elde edilen GeoEye-1 jpeg görüntüleri kullanılmıştır.

3. METODOLOJİ

3.1. Robot Navigasyonu ve GPS Hataları

Robot navigasyonu süreci ‘neredeyim ?’, ‘nereye gideceğim ?’ ve ‘nasıl gideceğim ?’ sorularının cevaplanmaya çalışıldığı bir süreçtir. Sürecin ilk aşaması olan ‘neredeyim ?’ sorusuna verilecek cevabın doğruluğu tüm navigasyon sürecinin doğruluğunu belirlemektedir. Navigasyonda kullanılan yol bulma algoritmaları ne kadar gelişmiş olursa olsun girdi verileri hatalı olduğunda hesaplanan rotaları da hatalı olacaktır. Robot navigasyonunu ‘bina içi’ ve ‘bina dışı’ olarak incelemek mümkündür.

Bina içi navigasyonda, robotun hareket edeceği alanın özellikleri, muhtemel engeller ve rotalar önceden planlanabilmekte ve robotun bina içindeki konumu çeşitli yöntemlerle belirlenebilmektedir. Bina içine önceden yerleştirilen konum belirteçleri (ön tanımlı yönlendirme işaretleri, barkodlar, manyetik etiketler, vb.) veya çeşitli ortam özellikleri (kapı, duvar, merdiven, vb.) kullanılarak konum belirlenmesi yapmak mümkündür. Bina içindeki robot çalışma ortamının önceden navigasyona hazırlanabilmesi, daha yapısal ve tanımlı özellikler barındırması, bina içi navigasyonu bina dışı navigasyona nazaran daha kolay hale getirmektedir.

Bina dışı navigasyonda ise, robotun hareket edeceği ortamın genişliği ve karmaşıklığı nedeniyle ortamın robot navigasyonu için hazırlanması çok zordur. Robotun; çevresindeki engelleri (bina, ağaç, insan, taşıt, vb.) algılaması, kendi konumunu belirlemesi ve hedefine ulaşmak için gerçek zamanlı güncellenen rotalar hesaplaması gerekmektedir. Bu tür konum belirlemede en çok tercih edilen yöntem GPS’dir. GPS ile elde edilen konum bilgisinin diğer yöntemlere göre çok daha hassas olması, çalışma ortamının önceden çeşitli işaret ve tanımlayıcılarla etiketlenmesine gereksinim duyulmaması, GPS alıcılarını mobil robotlar için ideal bir konum belirleme aracı haline getirmektedir. Robotun GPS

koordinatları (enlem, boylam) kontrol bilgisayarına aktarılmakta ve bu koordinatların zaman içerisindeki değişiminden yararlanılarak robotun hızı ve yönü belirlenebilmektedir. Konumun belirlenmesi sayesinde, mevcut veya eş zamanlı oluşturulan harita üzerinde yol planlaması yapılabilmektedir.

GPS konum belirlemesi sırasında birçok etken hatalara yol açabilmektedir, örneğin SA kodu hatası, uydu geometrisi, uydu yörünge hataları, atmosferik etkenler, saat tutarsızlığı ve hesaplamalardaki yuvarlama etkisi, rölativite etkisi gibi (Köhne,A., Henning,W.). Bir diğer hata kaynağı da, GPS sinyallerinin çevredeki yüksek binalardan ve diğer cisimlerden yansarak alıcıya ulaşmasıdır (çoklu yansıma (multipath)). Bu durumda, yansıyan sinyal, alıcıya daha uzun sürede ulaşmakta ve bu da, uydu ile alıcı arasındaki uzaklığın hesaplanmasında hatalara neden olmaktadır. Kentsel olmayan alanlarda yapılan robot navigasyonunda GPS sinyalleri çoklu yansıma etkisinden daha az etkilendiği için daha doğru konum bilgisi elde edilebilmektedir. Yansıtıcı yüzeylerin (örn. binalar) daha çok olduğu kentsel alanlarda ise çoklu yansıma etkisi GPS konum doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir. Tüm bu hatalar bir araya geldiğinde yaklaşık ± 15 m. konum hatası oluşabilmektedir. WAAS ve EGNOS gibi sistemlerin sağladığı iyileştirmeler sayesinde bu hata yaklaşık $\pm 3-5$ metreye indirgenebilmektedir. Ancak mobil robotlarda kullanılan GPS alıcıları, robot projesinin bütçesine ve robotun büyüklüğüne göre çok çeşitlilik gösterebilmektedir. Yüksek bütçeli robot projelerinde kullanılan pahalı ve hassas GPS algılayıcılarını, orta ve düşük bütçeli projelerde veya küçük boyutlu mobil robotlarda kullanmak mümkün olamamaktadır. Bu durumlarda, kullanılan düşük maliyetli GPS alıcılarının konum doğruluğu da ± 10 m. civarındadır. Açık alanlarda ve büyük boyutlu robotlar için bu hata sınırı kabul edilebilir, zira navigasyon sırasında çok geniş ve nispeten daha az engelli alanlarda çalışılmaktadır. Fakat kent içi navigasyonda robotların karşılaşılabileceği engellerin artmasının yanı sıra çoklu yansıma gibi nedenlerden dolayı GPS doğruluğunun azalması küçük ve orta boyutlu robotlar için çok ciddi navigasyon sorunları doğurabilmektedir. Bu nedenle mevcut GPS doğruluğunun, özellikle kentsel alanlarda artırılması önemlidir.

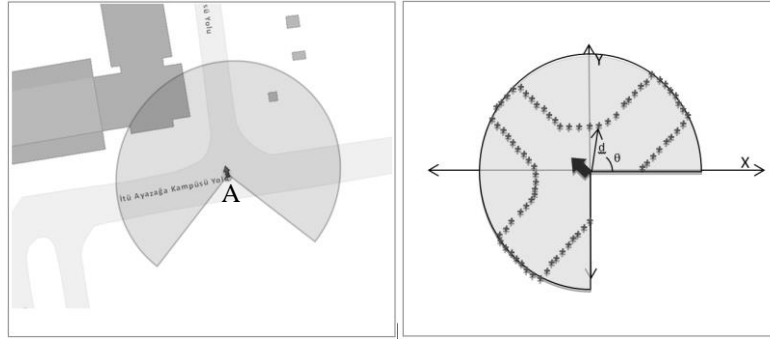
3.2. Arazi Çalışmaları

Kampüs içerisinde, İTÜ Geomatik Mühendisliği Bölümü tarafından oluşturulan ve CORS-TR ile üretilmiş mm doğruluklu kampüs GPS ağı bulunmaktadır. 23 farklı noktada ölçülen GPS (Garmin GLO) koordinatları, mevcut kampüs GPS ağı koordinatları ile karşılaştırılmış ve ölçülen GPS koordinatlarının ortalama 5,471 mm (max 11,630 m., min 1,541 m.) hatalı olduğu bulunmuştur. Mobil robot test platformu kampüs içerisinde seçilen belirli alanlarda çalıştırılarak, zaman, GPS konum bilgisi, lazer tarayıcı, pusula, atalet ölçüm birimi, kızılötesi ve ultrasonik uzaklık algılayıcı bilgilerinin elde edilmesi çalışmaları ise halen devam etmektedir. Daha sonra, bu çalışmalardan elde edilen veriler analiz edilerek lazer tarayıcı ölçümleri menzil görüntülerine dönüştürülecek ve çalışma alanına ait uydu görüntüleri ile karşılaştırılacaktır. Bu analiz bilgileri ışığında, lazer tarama görüntüsü ve uydu görüntüsü elde etme, çözünürlük eşleştirme ve kenar belirleme işlemleri tamamlanmıştır; görüntülerin karşılaştırılması ve GPS konum düzeltme algoritmalarının tasarımıyla yazılımsal geliştirilmesinin tamamlanması, test verileri yardımıyla simülasyonların yapılması işlemleri ise halen sürmektedir.

3.3. Lazer Tarayıcı ve Yüksek Çözünürlüklü Uydu Görüntüleri Kullanarak GPS Konum Doğruluğunun Artırılması

Halen devam etmekte olan bu çalışmada, lazer tarayıcı verileri ile yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin birlikte analizi ile düşük maliyetli GPS alıcılarından okunan koordinatların kent içi konum doğruluğunun artırılması hedeflenmektedir. Burada önerilen GPS konum doğruluğunu artırma yöntemi, lazer tarayıcıdan elde edilecek olan menzil bilgileri kullanılarak bir 2D menzil haritası (lazer tarayıcının etrafındaki engellerin uzaklıklarının gösterildiği harita) oluşturulması ve bu harita ile yüksek çözünürlüklü uydu görüntüsü karşılaştırılarak GPS konum bilgilerinin düzeltilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemi, i) menzil haritasının oluşturulması, ii) uydu görüntüsünün dijital işlenmesi ve kenar karşılaştırma (edge matching), iii) GPS konum düzeltme vektörünün oluşturulması şeklinde 3 ana başlıkta özetlemek mümkündür.

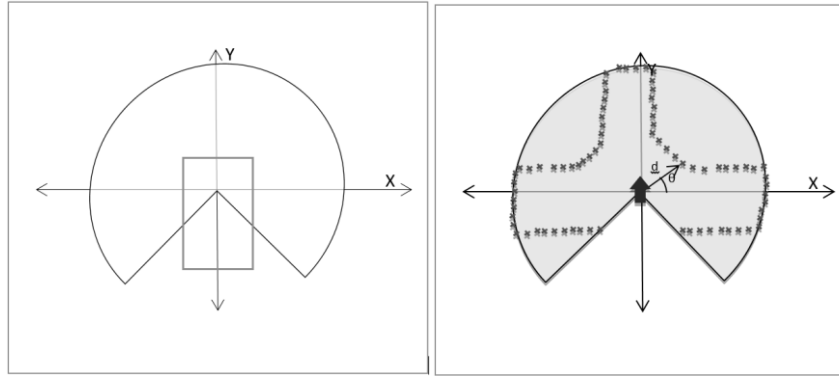
İlk aşama olarak, i) menzil haritasının oluşturulması işlemi, mobil robot test platformu üzerine monte edilmiş 2D lazer tarayıcı verilerinin bilgisayar ortamına aktarılmasıdır.



Şekil 4. a) Lazer tarayıcı menzili. b) Lazer tarayıcı verisi.

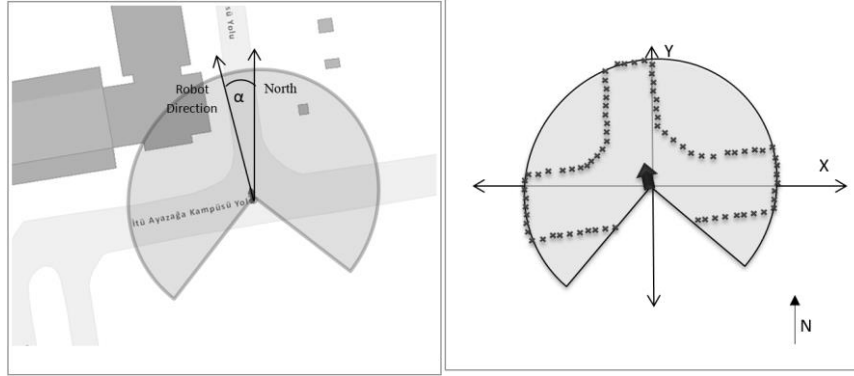
Robot A konumunda iken lazer tarayıcı 270° bir alanı tarayacak ve 0,25° aralıklarla uzaklıklar ölçülecektir (Şekil 4-a). Bu ölçümler bilgisayara ‘açı’ ve ‘uzaklık bilgileri’ olarak aktarılacaktır. Lazer tarayıcının ölçüm menzili 30 m., tarama açısı ise 270° olarak tanımlanmıştır. Lazer tarayıcının menzili içerisinde bir engel bulunması durumunda, ölçülen açı ve engel ile algılayıcı arasındaki uzaklık, engel bulunmaması durumunda ise, ölçüm yapılan açı ve maksimum uzaklık olan 30 m. değerleri bilgisayara aktarılmaktadır. 270° tarama alanı ve 0,25° açısal çözünürlük ile yapılan bir taramada toplam 1080 adet açı/uzaklık çifti elde edilmektedir. Böylece elde edilen bu açı/uzaklık çiftleri 2x1080 boyutlarında bir matris oluşturmaktadır. Bu matrisin algoritmada kullanılabilmesi için ilk olarak 2D menzil haritasına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu matris, verileri açı ve uzunluk bilgilerini içeren noktalar olarak koordinat sistemi üzerinde işaretlendiğinde Şekil 4-b elde edilmektedir.

Gösterim kolaylığı açısından lazer tarayıcının ilk yaptığı ölçüm 0°, son yaptığı ölçüm ise 270° konumlarına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Robotun ölçüm anındaki yönü ise siyah ok ile belirtilmiştir. Buradaki açı değerleri lazer tarayıcıdan okunan ham açı değerleridir. Engellerin robota göre konumlarının belirlenebilmesi için bu açısal değerlerin robot koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir. Lazer tarayıcının, robotun ön kenarına paralel yerleştirilmesi durumunda elde edilen koordinat sistemi ve lazer tarayıcı görüş alanı Şekil 5-a’da gösterilmiştir. Lazer tarayıcıdan okunan ham açı değerlerinin robot koordinat sistemine dönüştürülmesi için -45° dönmesi gerekmektedir. Bu dönme sonucunda (d,θ) lazer ölçümleri (d,θ-45°) şeklini alacaktır. Elde edilen bu noktalar ölçüm sırasına göre ardışık olarak birleştirilerek robotun çevresinde yer alan engelsiz alan belirlenecektir (Şekil 5-b).



Şekil 5. a) Lazer tarayıcının robot gövdesine göre görüş alanı. b) Lazer verilerinin robot koordinat sisteminde gösterimi.

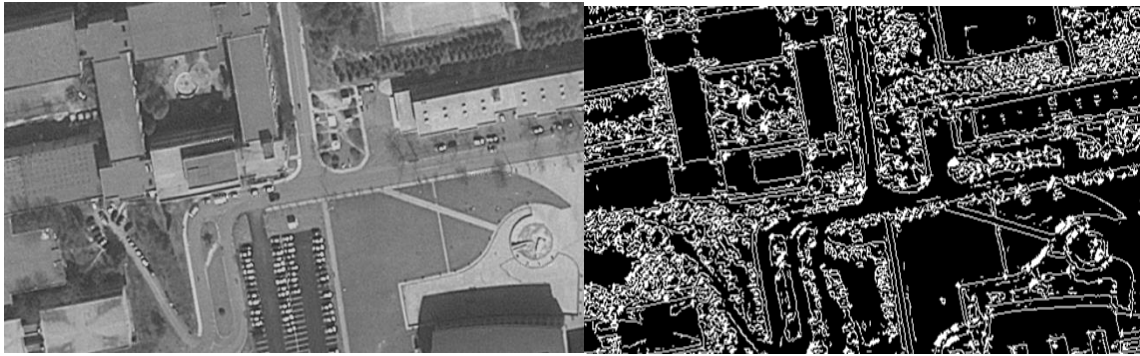
Elde edilen uzaklık grafiğinin, uydu görüntüsü ile çakıştırılabilmesi için uydu görüntüsünün kuzey yönü ile uzaklık görüntüsünün kuzey yönünün aynı doğrultuda olması gerekmektedir. Bunun için robot üzerindeki elektronik pusula verileri kullanılmaktadır. Bu pusula ile robotun yönü ile kuzey yönü arasındaki açı 0,1° çözünürlükte okunabilir. Okunan pusula açısı kullanılarak her bir ölçüm verisindeki açı bilgileri robot koordinat sisteminden uydu görüntüsü koordinat sistemine dönüştürülmelidir. Bu işlem için robot koordinat sistemindeki noktaların her birinin robotun doğrultusu ile kuzey yönü arasındaki α açısı (Şekil 6-a) kadar döndürülmesi gerekir. Bu döndürme sonucunda (d,θ) lazer ölçümleri (d,θ+ α -45°) şeklini alacaktır (Şekil 6-b).



Şekil 6. a) Robot ve kuzey yönü. b) Global koordinat sisteminde düzeltilmiş lazer verileri.

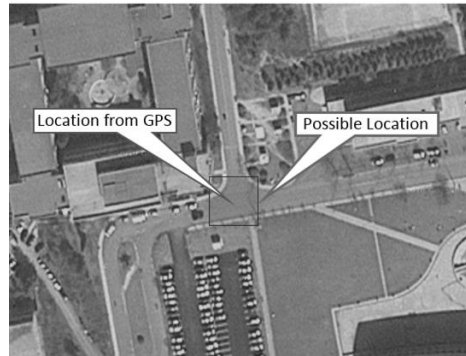
Lazer tarayıcıdan okunan ham açı değerleri üzerinde yapılan bu iki dönüşümün ardından, lazer tarayıcı verileri uydu görüntüsü koordinat sistemine dönüştürülmüş olur. Toplam dönme miktarı $\alpha-45^\circ$ şeklindedir. Bu işlemlerin sonucunda uydu görüntüsü ile karşılaştırma yapılabilecek bir lazer tarama haritası elde edilmiş olur.

Geliştirilen algoritmadaki ikinci aşama, ii) uydu görüntüsünün işlenmesi ve kenar çıkartma aşamasıdır. Uydu görüntüsünün elde edilmesi, uydu görüntüsünün mekânsal çözünürlüğünün lazer menzil haritası ile eşleşmesi ve elde edilen görüntünün algoritmada kullanılabilir hale getirilmesi bu aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada, Geoeye-1 görüntüsüne (Şekil 7-a) uygulanacak çeşitli filtre ve dönüşümler ile bu görüntü üzerindeki lazer görüntüsü ile eşleşebilecek özelliklerin daha belirgin hale getirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda Canny edge detection algoritması kullanılarak en iyi performansın elde edildiği görülmüştür (Şekil 7-b).



Şekil 7. a) Ham uydu görüntüsü. b) Kenar belirleme sonrası uydu görüntüsü.

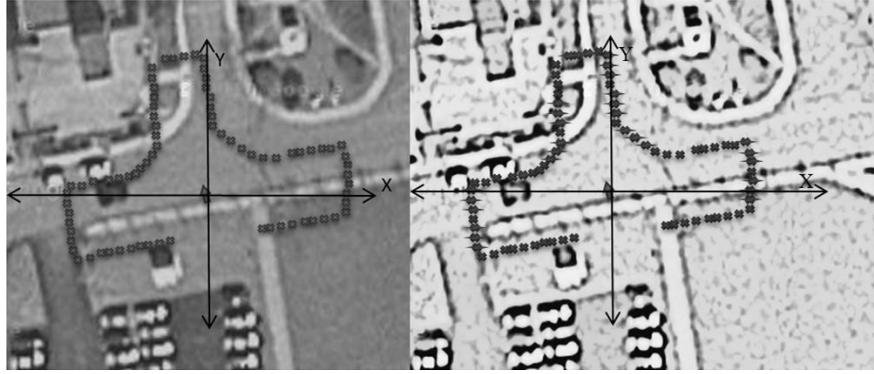
Kenar eşleştirme aşamasına gelindiğinde ise ilk olarak robot üzerindeki GPS koordinatları (enlem, boylam) okunur. Bu koordinatların, eşleştirme işlemine kullanılabilmesi için uydu görüntüsü piksel koordinatlarına (sıra, sütun) dönüştürülmesi gerekir. Sol üst köşe koordinatı (0,0) şeklindedir. Geometrik düzeltmesi yapılmış bir uydu görüntüsünün her bir pikseli için bir gerçek koordinat (enlem, boylam) eşleştirilmesi yapılabilmektedir. Uydu görüntüsü üzerinde GPS koordinatları işaretlendiğinde (Şekil 8) alıcının ± 10 m. hatası nedeniyle yaklaşık 400 m^2 bir hata olasılığı alanı oluşmaktadır. Bu çalışmada bu alanın daraltılması, yani daha doğru bir konum elde edilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 8. GPS alıcısından okunan konum.

GPS alıcısından okunan konum Şekil 6'daki koordinat sisteminin orijinine (0,0) karşılık gelmektedir. Bu bilgi ışığında oluşturulan lazer tarayıcı görüntüsü uydu görüntüsü ile karşılaştırıldığında Şekil 9 elde edilecektir. Hatalı GPS konum bilgisi nedeniyle uydu görüntüsündeki kenarlar ile lazer görüntüsündeki kenarlar karşılamamaktadır. Bu çalışmada

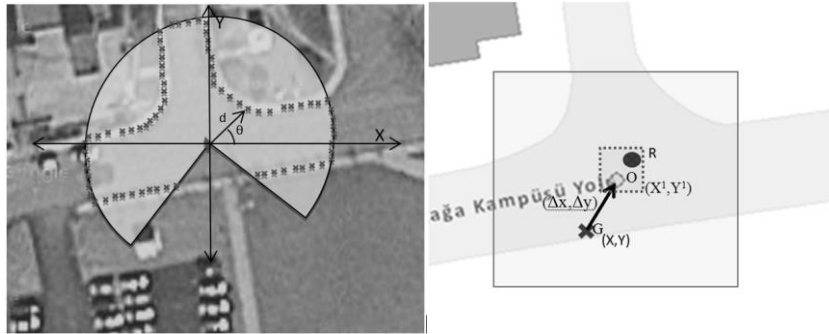
geliştirilecek doğruluk arttırma algoritmasının hedefi, uydu görüntüsünde yer alan belirgin özellikler ile lazer görüntüsündeki karşılık noktalarının çakıştırılmasıdır.



Şekil 9. Lazer verisinin uydu görüntüsü üzerinde gösterimi.

Algoritmanın çakıştırma adımında, lazer görüntüsünün, uydu görüntüsü üzerinde kaydırılması ile özelliklerin üst üste çakışması sağlanmaya çalışılacaktır. Şekle dayalı, alana dayalı ve ilişkisel görüntü eşleme yöntemlerinin irdelenmesinin ardından şekle dayalı yöntemlerin daha uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yapılan araştırmada, görüntü çakıştırma işleminin başarısını etkileyen faktörlerin başında iki görüntü arasındaki parlaklık farkı, görüntülerin ölçeği, oryantasyonu ve görüntüdeki gri değer sayısı geldiği görülmüştür. Halen geliştirilmekte olan algoritmadaki görüntü çakıştırma adımından önce uydu görüntüsü grayscale'e dönüştürülüp ardından kenar belirleme adımı gerçekleştirilmektedir. Elde edilen kenar görüntüsü ikili gri değerine (1 ve 0) sahip bir görüntü olacaktır. Benzer şekilde, lazer tarayıcıdan okunan verilerle elde edilen lazer görüntüsü de ikili bir görüntüdür. Görüntü çakıştırma adımında lazer görüntüsü, şablon, uydu kenar görüntüsü ise kaynak görüntü olarak kullanılmaktadır. Uydu görüntüsünün yersel çözünürlüğü (~50 cm) kullanılarak lazer görüntüsü ölçeklendirilecek, ardından elektronik pusula verileri kullanılarak lazer görüntüsünün kuzey yönü ile uydu görüntüsünün kuzey yönü eşleştirilecektir. Böylece iki görüntü arasındaki renk derinliği, ölçek, oryantasyon gibi farklardan kaynaklanacak eşleşme hataları minimuma indirilecektir.



Şekil 10. a) Çakıştırma sonrası lazer verisi. b) GPS konum düzeltme vektörü.

GPS konu düzeltme vektörünün oluşturulması aşamasında (iii) ise, görüntünün, X ekseninde Δx , Y ekseninde Δy kadar kaydırılması durumunda eşleşme sağlanıyorsa, elde edilen GPS düzeltme vektörü $(\Delta x, \Delta y)$ şeklinde tanımlanabilir. Okunan GPS koordinatları (x, y) GPS düzeltme vektörü kullanılarak düzeltildiğinde, düzeltilmiş GPS koordinatları (x^1, y^1) elde edilir. Şekil 10-b'de GPS alıcısından okunan koordinat G, düzeltilmiş koordinat (O), robotun gerçek koordinatı (R) ile gösterilmiştir.

Eşleştirme işlemi sonucunda GPS alıcısının hata miktarı göz önüne alınarak oluşturulan ± 10 m. hata olasılık alanı (Şekil 10-b, büyük kare), düzeltme işleminden sonra elde edilmesi hedeflenen ± 2 m. doğruluk oranında daraltılarak daha hassas konum bilgisine ulaşılabilecektir. Piksel koordinatlarından gerçek koordinatlara dönüşümün ardından hatalı GPS koordinatları düzeltilmiş olacaktır.

Geliştirilmekte olan algoritmanın hayata geçirilmesi ve saha çalışmalarında elde edilecek test verileri üzerine uygulanmasında çeşitli hata kaynaklarının sistem başarısını etkileyeceği düşünülmektedir. Bu kaynakların başlıcaları, lazer tarayıcı verilerindeki gürültü, lazer tarayıcının yere paralel olmamasından kaynaklı hatalar, uydu görüntüsünün alındığı tarih ile lazer görüntüsünün alındığı tarihlerdeki ortam değişiklikleri, mekânsal çözünürlük eşleştirme ve koordinat dönüşüm işlemleri sırasındaki hatalar, uydu görüntüsünde yer almayan taşıt, insan, vb. gibi nesnelerin lazer tarayıcı verilerinde yer alması şeklinde sayılabilir.

4. SONUÇLAR

Kampüs içerisinde konumları mm doğruluğunda bilinen noktalar üzerinde GPS ölçümleri yapılmış ve geliştirilen mobil robot test platformunda kullanılan GPS alıcısının yaklaşık ± 10 m. bir konum doğruluğuna sahip olduğu görülmüştür. Bu doğruluk, GPS alıcısının konumunu 400 m^2 'lik bir hata olasılığı alanı içerisinde vermektedir. Küçük veya orta boyutlu bir robot için bu büyüklükteki bir alan, özellikle kentsel çalışma senaryolarında tüm çalışma alanını kapsayabilmektedir. Böyle bir durumda, robotun çalışacağı alan içerisinde bulunduğu konum tam olarak belirlenememekte ve navigasyon işlemi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilememektedir. Çalışmanın sonucunda mevcut ± 10 m. konum doğruluğunun ± 2 m. düzeyine indirilmesi hedeflenmektedir. Bunun gerçekleşmesi durumunda, okunan GPS konum bilgisinin yer aldığı 400 m^2 hata olasılığı alanı 16 m^2 'ye indirilerek hata olasılığı alanı %96 oranında daraltılmış ve daha sağlıklı bir mobil robot navigasyon sistemi sağlanmış olacaktır. Hedeflenen ± 2 m. yerine ± 4 m. elde edilmesi durumunda dahi, hata olasılığı alanı 64 m^2 'ye çıkmasına rağmen 400 m^2 'lik ilk alana göre %84'lük bir daralma gerçekleşmiş olacaktır. Çalışmanın ilerleyen adımlarında farklı GPS alıcıları ile farklı hava koşullarında tekrar arazi çalışmaları gerçekleştirilerek farklı GPS alıcılarının performanslarının karşılaştırılması da hedeflenmektedir.

Önerilen yöntemin iki önemli girdisi bulunmaktadır. Bunlardan biri, lazer tarayıcı verilerinden elde edilen lazer görüntüsü, diğeri ise yüksek çözünürlüklü uydu görüntüsünün kenar belirleme yöntemleri ile dijital işlenmesinden elde edilen kenar görüntüsüdür.

Sistemin başarısını etkileyebilecek hata kaynaklarının başlıcaları, lazer tarayıcı verilerindeki gürültü, lazer tarayıcının yere paralel olmamasından kaynaklı hatalar, uydu görüntüsünün alındığı tarih ile lazer görüntüsünün alındığı tarih arasındaki ortam değişiklikleri, mekânsal çözünürlük eşleştirme ve koordinat dönüşüm işlemleri sırasındaki hatalar, uydu görüntüsünde yer almayan taşıt, insan vb. gibi nesnelerin lazer tarayıcı verilerinde yer alması şeklinde sayılabilir. Uydu görüntüsünün internet üzerinden indirilmesi ve bu görüntünün kenar bulma işlemine tabi tutularak kenar görüntüsünün elde edilmesi zaman gerektiren işlemlerdir. Algoritmanın her çalıştırılışında bu işlemlerin tekrarlanması performans kayıplarına neden olacaktır. Bu zaman kaybını engelleyebilmek için, kullanılacak uydu görüntüsü, algoritma çalışırken online olarak elde edilebileceği gibi önceden indirilerek offline olarak da elde edilebilir. Ayrıca uydu görüntüsü üzerinde kenar bulma işlemi algoritma akışı içerisinde gerçek zamanlı işlenebileceği gibi, istenirse önceden kenar belirleme işlemi yapılarak da kullanılabilir. Uydu görüntüsünün önceden indirilmesi ve kenar belirleme işleminden sonra elde edilen görüntü (edge detected image) haline getirilmesi algoritma işlem süresini azaltacağından avantaj sağlamaktadır. Ancak çalışma alanının önceden bilinmediği durumlarda indirme işlemi ve kenar bulma işlemi anlık olarak gerçekleştirilerek her koşulda algoritma için gerekli kenar görüntüsü elde edilebilmektedir. On-line ve off-line çalışabilme, önceden veya gerçek zamanlı işlem yapabilme esnekliği, önerilen yöntemin avantajlarından biridir.

Diferansiyel ve kinematik GPS gibi GPS konum hassasiyetini arttırmaya yönelik diğer yöntemler, çalışılacak arazide ön çalışma yapılmasını, alt yapı kurulmasını veya çalışma anında sabit istasyonlardan faydalanılmasını gerektirmektedir. Bu yöntemlerde kullanılan GPS alıcılarının fiyatları bu çalışmada kullanılan düşük maliyetli GPS alıcılarına nazaran çok fazladır. Ayrıca WAAS, DGPS gibi yöntemlerde olduğu gibi önceden hazırlanması gereken altyapı yatırımı veya ikincil bir GPS ünitesi gerektirmemektedir (Karsky,D.).

Özellikle otomobil firmaları ve Google gibi teknoloji firmalarının sürücüsüz taşıtlar ile yaptığı çalışmalar, askeri ve sivil amaçlı insansız kara taşıtları üzerindeki çalışmalar kent içi navigasyon ve dolayısı ile kent içindeki GPS doğruluğunun artırılmasını önemli bir konuma getirmiştir.

KAYNAKLAR

Andrey,S., 2010, Tight Coupling of GPS and INS for Urban Navigation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 10,1731.

Capezio,F.,Sgorbissa,A.,Zaccaria,R., 2007, An Augmented State Vector Approach To GPS-Based Localization, *IROS 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, syf: 2480.

Haihang,S., Muhe,G., Kezhong, H., 1997, An Integrated GPS/CEPS Position Estimation System For Outdoor Mobile Robot, *ICIPS '97. 1997 IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems*, syf: 1282.

Henning,W., National Geodetic Survey

http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/NGSRealTimeUserGuidelines.v1.1.pdf. (07.06. 2011).

Joerger,M., Pervan,B., 2006, Autonomous Ground Vehicle Navigation Using Integrated GPS and Laser-Scanner Measurements, *IEEE/ION. Position, Location, And Navigation Symposium*, syf: 988.

- Karsky,D.**, 2007, Comparing four methods of correcting GPS data: DGPS, WAAS, L-Band, and Postprocessing, Tech Tip 0471–2307–MTDC ,U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Missoula Technology and Development Center. Missoula, MT
- Köhne,A, Wößner,M.**, Position determination with GPS <http://www.kowoma.de/en/gps/positioning.htm>. (07.06.2011).
- LI,H., Nashashibi,F., Toulminet,G.**, 2010, Localization for Intelligent Vehicle by Fusing Mono-Camera, Low-Cost GPS and Map Data,*13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, syf:1657.
- Miyasaka,T., Ohama,Y.,Ninomiya,Y.**, 2009, Ego-Motion Estimation And Moving Object Tracking Using Multi-Layer LIDAR, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, syf:15-156.
- Peng,J., Najjar, M.E.E., Cappelle,C., Pomorski,D., Charpillet,F., Deeb,A.**, 2009, A Novel Geo-Localisation Method Using GPS, 3D-GIS And Laser Scanner For Intelligent Vehicle Navigation In Urban Areas, *ICAR 2009. International Conference on Advanced Robotics*, syf: 1-6.
- Ray,A.K., Behera, L., Jamshidi,M.**, 2009, GPS And Sonar Based Area Mapping and Navigation by Mobile Robots, *INDIN 2009. 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, syf: 801.
- Shair, S., Chandler, J.H., Gonz´alez-Villela, V.J., Parkin, R.M., Jackson, M.R.**, 2008, The Use Of Aerial Images and GPS For Mobile Robot Waypoint Navigation,in *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, syf: 692-699.
- Shibuhisa,N., Sato,J., Takahashi,T., Ide,I., Murase,H., Kojima,Y.,Takahashi,A.**, 2007, Accurate Vehicle Localization Using DTW Between Range Data Map And Laser Scanner Data Sequences, *Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*,syf: 975-980.
- Weiss,T., Kaempchen,N.,Qietmayer,K.**, 2005, Precise Ego-Localization In Urban Areas Using Laser Scanner and High Accuracy Feature Maps, *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, syf: 284-289.
- Wender,S.,Weiss,T.,Dietmayer,K.**, 2005, Improved Object Classification of Laser Scanner Measurements at Intersections Using Precise High Level Maps, *Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, syf: 756-761.