




Localization for mobile robots using skyline in panoramic images

Ahmet Buğra Koku 

Department of Mechanical Engineering, Middle East Technical University, Ankara, 06800, Turkey

Highlights:

- Signal extraction from skylines in panoramic images to be used in localization
- Use of skyline in mobile robot localization
- Applicability of the proposed method on small-scale mobile robots operating outdoors

Keywords:

- Panoramic images
- Skyline
- Robot localization
- Image-based localization
- Territorial robots

Article Info:

Research Article
Received: 17.04.2017
Accepted: 30.10.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.570898

Correspondence:

Author: Ahmet Buğra Koku
e-mail: kbugra@metu.edu.tr
phone: +90 312 210 5251

Graphical/Tabular Abstract



Figure A. Skylines found on photos that are taken from the same spot at different times

Purpose: Variety of small size and low-cost panoramic cameras are available on the market. The purpose of this work is to investigate the usability of these panoramic cameras for localization purposes especially in small-scale outdoor mobile robots. It should be noted that many mobile robots are territorial (i.e. operate in a bounded region), hence reliable map-based local navigation enhances the usability of such robots.

Theory and Methods:

Figure A illustrates the observation that motivates this research: Skylines on panoramic images that are captured from the same reference point at different times under different lighting conditions turn out to be very similar. Using the obvious fact that, skyline will gradually change as one moves away from this reference point, the skyline obtained at the reference point can be used as a signature signal that defines / identifies this point. Hence, skylines can be used for localization. In this study, a way of extracting signature signals from panoramic images is proposed. Signals extracted from consecutive points on a line is used to form a map. Once the map is formed, test images that are around this line are acquired at different times under different lighting conditions. The skyline signal extracted from a test image is then compared to the ones on the map using a proposed similarity measure. The map image that yields the maximum similarity that is above a certain threshold is associated with the test image and test image is considered to be localized. The study also investigates the effect of image resolution on both localization performance and computation time. Along with practical guidelines for applying the proposed method in practice, test images and source codes are provided as well.

Results:

Through rigorous experiments (two of which are given in the paper) it is shown that if a region is properly mapped, sub-meter localization accuracy is possible.

Conclusion:

What differentiates this work from others in the literature is not that skyline is used for localization purposes, but it is shown that using readily available and low cost panoramic cameras sub-meter localization can be achieved, hence, the proposed method can be used in mobile robots. Given the small size of these cameras, proposed method offers a practical localization method for small-scale outdoor robots. The dependency of the skyline being detectable by the preferred camera imposes the limitation that proposed method cannot be used during the night.



Panoramik görüntülerde gökyüzü sınır çizgisini kullanarak hareketli robotlar için yer kestirimi

Ahmet Buğra Koku*^{ID}

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06800, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Panoramik görüntülerdeki gökyüzü sınır çizgisinden konumlandırma için işaret çıkarımı
- Gökyüzü sınır çizgisinin hareketli robot konumlandırılmasında kullanılması
- Önerilen yöntemin dış ortamda çalışan küçük boyutlu hareketli robotlar için uygun olması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 17.04.2017
Kabul: 30.10.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.570898

Anahtar Kelimeler:

Panoramik görüntü,
gökyüzü sınır çizgisi,
robot konumlandırılması,
görüntü tabanlı
konumlandırma,
bölgesel (teritoryal) robotlar

ÖZET

Robotik alanındaki ilerlemeler 20. yüzyılın sonuna doğru robotları fabrika ortamlarından çıkarmıştır. Zaman içinde robotların günlük hayatımızdaki yerinin daha da artması beklenmektedir. Diğer taraftan, robotların fabrikalardaki güvenli alanlar dışında çalışmaya başlamalarına rağmen, birçok robotun hala önceden sınırları belirlenmiş alanlarda çalışması yapacakları işlerin doğası itibarı ile beklenmektedir. Dolayısıyla, bir robotun işlevselliğinin artması bakımından çalışacağı bölgeyi iyi tanıması gerekecektir. Bu çalışmada panoramik görüntülerden elde edilen gökyüzü sınır çizgisinin robot konumlandırması için kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Robotun konumlandırılması için önce ilgili bölgeden çekilen panoramik görüntüler kullanılarak bir tür harita üretilmiş, daha sonra aynı bölgeden farklı zaman ve hava şartlarında çekilen görüntülerin bu harita üzerinde konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem görüntünün küçük bir kısmına odaklandığı için, görüntünün tümünü işleyen yöntemlere göre bu yöntem farklı kapasitedeki (özellikle düşük hesaplama kabiliyetli) platformlarda daha kolay uygulanabilir niteliktedir.

Localization for mobile robots using skyline in panoramic images

H I G H L I G H T S

- Signal extraction from skylines in panoramic images to be used in localization
- Use of skyline in mobile robot localization
- Applicability of the proposed method on small-scale mobile robots operating outdoors

Article Info

Research Article
Received: 17.04.2017
Accepted: 30.10.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.570898

Keywords:

Panoramik images,
skyline,
robot localization,
image-based localization,
territorial robots

ABSTRACT

Advances in robotics liberated robots from factory floors by the end of 20th century. Use of robots in our daily lives is only expected to increase in time. Robots, while relieving us of the burden of tedious, hard and dangerous tasks, most of them are still expected to be territorial, i.e. they will operate in a predefined or rather bounded environment. For enhanced performance, a robot should be familiar with its territory. In this work, use of skylines extracted from panoramic images is studied in order to provide localization. To achieve localization, first a special map is prepared using a series of panoramic images taken from the territory. Images, those taken from the vicinity of this map at different times and under different weather conditions, are localized on this map. Given that the proposed method only focuses on a small portion of the panoramic image, it is relatively easier to implement in various hardware platforms (especially those with limited computational capabilities) in comparison to the methods that process the whole image.

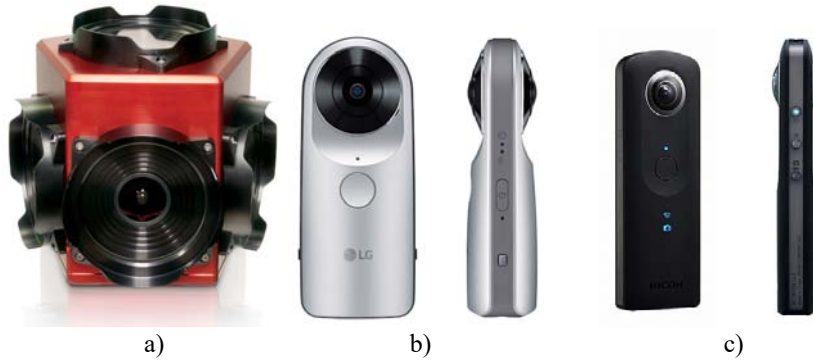
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknoloji ile birlikte robotlar 20. yüzyılın sonuna doğru endüstriyel ortamlardan kurtularak günlük hayatımızda yer almaya başlamıştır. Bu gidişatin da zaman içinde robotları günlük hayatımızın ayrılmaz bir parçası haline getirmesi kaçınılmaz görünmektedir. Çok tekrarlı, sıkıcı, zor ya da tehlikeli işleri üzerimizden alan ve daha da fazlasını alacağı öngörülen robotların büyük bir kısmının kendilerine ait bir görev bölgesi olacağını öngörmek mümkündür. Diğer bir deyişle insanlarla aynı ortamları paylaşacak robotların, büyük bir kısmının bölgesel (teritoryal) robotlar olarak işlevlerini yürüteceği söylenebilir. Bununla bir robotun kullanım hayatı boyunca tek bir bölgede çalışacağı değil, robotun uzun sürelerle bir ya da sayılı birkaç bölgede çalışacağı kastedilmektedir. Her ne kadar keşif ve benzeri görevlerdeki gezgin robotların belirli bir bölge ile özdeşleştirmek mümkün değilse de, robotların genişleyen kullanım amaçları ve artan sayıları göz önüne alındığında bunların gene de çok büyük bir kısmının sınırlı bölgelerde uzun süreli olarak görev üstleneceği öngörülmektedir. Bu makalede ele alınan çalışmayı başlatan temel etken, nerede ise tam küresel görüntü oluşturabilen çok mercekli kameraların fiyatında yakın zamanda gerçekleşen ucuzlama sonrası araştırma ve mühendislik uygulamaları için bu kameraların elverişli hale gelmesi ve bu kameraların bahsedilen bölgesel robotlar tarafından konumlandırma amaçlı kullanılabilir olmasıdır. Önceki yıllarda FLIR (eski adıyla Point Grey) firmasının Şekil 1a'da görünen *Ladybug* kamerasının farklı modelleri yıllar içinde panoramik görüntü yakalamak için farklı amaçlarla kullanılmıştı [1-6]. Ne var ki, bu ve benzeri kameralar gerek boyutları ve gerekse yüksek (20.000 ABD doları civarındaki) fiyatları nedeniyle robotik uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılamamıştır. Bu kameralar özel uygulamalar göz önünde tutularak tasarlanmış olup, yüksek görüntü kalitesi ile aslında birçok robotik uygulamasının ihtiyaç duyacağı çok üzerinde bir kapasiteye sahiptirler.

Son yıllarda ise daha geniş kitlelere hitap edecek düşük maliyetli (100-500 ABD doları bandında), neredeyse tam küresel (iki eksen de 360°) görüntü oluşturabilen çift

mercekli kameralar dünyanın önde gelen kamera üreticileri tarafından piyasaya sürülmüştür. Şekil 1b ve Şekil 1c'de görünen *LG 360 R105* ve *Ricoh Theta S* bunlara örnek olarak verilebilir. Aksi yönlere bakan 2 duycudan (sensörden) gelen görüntüleri birleştirerek küresel görüntüyü oluşturan bu kameralar, çok sayıda kamera barındıran pahalı alternatiflerine oranla daha basit bir yapıya sahip oldukları gibi, çok daha küçük ve hafif oldukları için mobil uygulamalar için de uygundur.

Bu tip kameraların küçük boyutları, hafiflikleri, kablolu ya da kablosuz kullanım imkânı sunmaları ve erişilebilir fiyatları ile hareketli robotlar üzerinde kullanılmalarının artması beklenmektedir. Her ne kadar bu kameralardan gelen görüntülerin çok farklı amaçlar için işlenmesi mümkünse de, bu çalışmada panoramik görüntülerin konum belirlemede nasıl kullanılacağı konusu üzerine odaklanılmıştır. Buradaki basitlikten kasıt, kameradan gelen görüntünün tümü yerine sadece gökyüzü sınır çizgisinin konum belirleyici işaret olarak kullanılmasıdır. Panoramik görüntüleri konumlara eşleştirirken tüm görüntülerden gökyüzü sınır çizgilerini gösteren tek boyutlu işaretler çıkarılıp, yeni gelen bir görüntünün işareti ile haritadaki görüntülerin işaretleri karşılaştırarak konumlandırma yapılırken işaretlerin çapraz korelasyonuna bakılmaktadır. Bu sebeple önerilen metod yapısı itibarı ile basit olup, eşleştirme sırasında görüntülerin bütününe bakan yöntemlere göre özellikle hesaplama kabiliyeti sınırlı donanımlar için oldukça uygundur. Yakın zamanda düşük hesaplama kabiliyetli kartların robotik alanında da kullanımının yaygınlaştığı görülmektedir [7, 8]. Önerilen yaklaşımla zaman içinde *Raspberry Pi*® benzeri bir anakart ve düşük maliyetli bir küresel kamera ile oldukça küçük form faktörüne sahip robotların küresel görüntüleri işleyerek kendilerini konumlandırması mümkün görünmektedir. Dolayısı ile bu çalışma ile küçük boyutlu ve düşük maliyetli bir konumlandırma modülü geliştirilmesi ve gerek dış ortam için tasarlanmış [9] gerekse küçük form faktörlü robotlarda [10, 11] bu modülün kullanılmasının önü açılmış olacaktır. Hali hazırda robotik uygulamalarında sıklıkla kullanılan OpenCV görüntü işleme kütüphanesinin [12, 13] ve yakın zamanda açık kaynaklı hale gelen TensorFlow [14]



Şekil 1. Küresel kamera örnekleri: a) FLIR firması tarafından üretilen Ladybug5 b) LG firması tarafından üretilen LG 360 R105 c) Ricoh firması tarafından üretilen Theta S

(Spherical camera samples: a) Ladybug5 manufactured by FLIR b) LG 360 R105 manufactured by LG c) Theta S manufactured by Ricoh)

hesaplama altyapısının ARM tabanlı işlemlerde de kullanılabilir hale gelmesi bu beklentiyi güçlendirmektedir.

Küresel kameraların robotikte daha yaygın kullanılması kamera görüntülerinden olası tüm faydalı bilgilerin çıkarılmasını da gerekli kılacaktır. Görüntü tabanlı konum bilgisi de bu faydalı bilgiler arasında olup, bunun düşük hesaplama maliyeti ile elde edilmesi şüphesiz uygulamalara katkı sağlayacaktır. Ne var ki, şunu da vurgulamak gerekir ki, araştırmanın bu ilk aşamasında söz konusu konumlandırma yaklaşımı küresel konumlandırma sistemine (GPS) doğrudan bir alternatif olmaktan çok, ilk etapta kısıtlı şartlarda tek başına kullanılabilen, yeri geldiğinde de GPS ile birlikte kullanılan bir sistem olacaktır. Öncelikle GPS işaretlerini (sinyallerini) ulusal olarak üretmediğimizi düşünürsek, dış ortamda konumlama yapan robotların bu işaretin varlığına ve doğruluğuna bağımlı olması çok önemli bir dezavantaj olarak görülmektedir. Diğer taraftan, kendi GPS işaretlerimizi üretiyor olsak bile konumlama gibi bir robotun işleyişindeki en önemli gereksinimlerden birisini dış işarete bağımlı hale getirdiğimizde, civardaki basit bir işaret bozucu sistem bile robotu çalışamaz hale getirebilmektedir. Dolayısıyla, düşük maliyetli, dış kaynaklı sinyallere bağımlı olmayan otonom konumlandırma, hareketli robotlar için önemli bir yetenek olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmanın ilerleyen aşamalarında artırılmış konum hassasiyetinin daha geniş alanlarda elde edilmesi hedeflenmektedir.

Özetle, bu çalışmanın amacı, dış ortamlarda görev yapan bölgesel robotların konumlanmasında panoramik görüntülerden elde edilen gökyüzü sınır çizgisinin belirleyici bir veri olarak kullanılabilirliğini araştırmaktır. Panoramik görüntüleri ve bu görüntülerdeki gökyüzü çizgisini konumlama amaçlı kullanmak kendi başına yeni bir fikir olmayıp, literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışma, kullanılan donanımın ve yer kestirim algoritmasının basitliği, buna rağmen metre altı hassasiyetle konumlama yapılabildiğinin gösterilmiş olması bakımından literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılmaktadır.

Literatürde panoramik görüntülerin tümüne odaklanan bütüncül çalışmalar olduğu gibi, ufuk ve gökyüzü çizgisini kullanan çalışmalar da bulunmaktadır. Bütüncül yaklaşımlara örnek vermek gerekirse, bir kısım çalışmalarda (panoramik olmayan) görüntü kütüphaneleri ile test görüntüleri karşılaştırılmış, öznitelik eşleştirmesi ile test görüntülerinin kütüphane görüntüleri ile ilintisi kurularak konumlandırma gerçekleştirilmiştir [15, 16]. Robertson'un yöntemi resimlerdeki binaların yüzeylerinden faydalanarak kullanarak konumlama yapmaktadır. Bu amaçla yatay ve dikey kaybolan noktalar aracılığı ile kameranın bina yüzeyine olan açısı bulunmakta, sonra da bu görüntüler eşleştirme için doğrultularak ortak bir düzleme taşınmaktadır. Harris köşe bulucularından da faydalanılarak görüntü eşleştirmeleri yapılmaktadır. Çalışma sonucunda %95'e yakın başarımla görüntüler eşleştirilmiştir [15]. Her ne kadar bu başarımlar yüksek görünse de, önerilen yöntem bina yüzeylerinin varlığına bağlı olup, şehir merkezleri dışında kullanımı mümkün değildir. Benzer şekilde şehrin

bina yoğun kısımlarından örneklenen GPS etiketli görüntüler ile daha sonra bu bölgeden çekilmiş görüntüler arasında SIFT öznitelikleri ve hareket kestirimleri kullanılarak konumlama Zhang tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada herhangi bir donanım kullanılmamış olup hazır veri setleri kullanılmış ve sonuçta 2-16 metre arasında konumlama hataları elde edilmiştir [16]. Hazır veri setlerinin yanı sıra, internette indirilen panoramik görüntüler kullanılarak cadde üzerinde yer kestirimi yapılan çalışmalar da bulunmaktadır. Görüntülerin tümüne odaklanılan bu çalışmalarda farklı açılardan benzer yerler için elde edilmiş panoramik olmayan görüntüler panoramik sokak görüntüleri ile eşleştirilmektedir. Bu çalışmalardaki panoramik görüntüler için Google Sokak Görüntüleri kullanılmış, test görüntüleri de panoramik olmayan kameralardan elde edilmiştir [17-19]. Majdik bir mikro insansız hava aracı üzerindeki panoramik olmayan bir kameradan elde ettiği görüntüleri önceden kaydedilmiş panoramik sokak görüntüleri ile eşleştirmiştir [17]. Bunu yaparken karşılıklı görüntülerde özniteliklerin eşleştirilebilmesi için bir tür sanal bakış açısı geliştirmiş ve bunu SIFT benzeri bir betimleyici ile tanımlamıştır. Agarwal ise birçok yöntemi ve donanımı harmanlayarak metre-altı konumlama elde etmiştir. Bu çalışmada kamera, GPS ve odometre kullanılmıştır. Kameradan elde edilen ardışık görüntülerden optik akış yöntemi ile kameranın 3 boyutlu hareketi kabaca kestirilmiş, GPS ve odometri kullanılarak da arama uzayı küçültülmüştür [18]. Her ne kadar bu yaklaşım metre-altı ve 6 serbestlik dereceli konumlandırma imkânı sağlasa da, 3 boyutlu modelleme gerektiren yöntemin karmaşıklığı, farklı donanımlara ihtiyaç duyması yöntemin kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. Agarwal'a benzer bir yaklaşım izlese de, Yu'nun önerdiği çözümde odometri ve GPS kullanımına gerek bulunmayıp, doğrultulmuş sokak görüntüleri SIFT ve MSER görsel kelimeleri ile eğitilmiş, EPnP-RANSAC kullanılarak poz kestirimi gerçekleştirilmiştir. 300 metreye yakın bir cadde üzerinde gerçekleştirilen çalışma sonucunda ortalama 6,5 metre hata ile konum kestirimi yapılmıştır [19].

Bütüncül bu yaklaşımlarda panoramik görüntüler hazır olarak alındığı ve bu hazır görüntüler de yoğun olarak şehir merkezlerine ait olduğu için, şehir merkezinden uzak bölgelerde bu yöntemlerin nasıl bir performans sunacağı belli değildir. Bu çalışmada önerilen yöntemse kendi haritasını kullanması ve binaların varlığına ihtiyaç duymaması ile daha genel bir kullanım sunmaktadır. Ayrıca önerilen yöntem bütüncül yöntemlerin aksine görüntünün tümü yerine, görüntüdeki çok sınırlı bir bölgeye (gökyüzü sınır çizgisine) baktığı için de bütüncül yöntemlere göre daha basit ve yüksek performanslı olacaktır.

Az sayıda da olsa, literatürde konumlama için gökyüzü sınır çizgisini kullanan çalışmalar da bulunmaktadır. Binaların ayırt edici dış silüetlerindeki doğru parçalarını kullanarak görüntüler arasında eşleştirme yapan Johns %88 civarında bir başarımla elde etmiştir [20]. Balıkgözü kamera ile şehir içinde bina çatılarının belirlediği gökyüzü sınır çizgilerini kullanan Ramalingam ise, bu görüntülerdeki kapalı poligonları birbiri ile eşleştirerek %95 civarında bir başarımla

elde ettiğini ifade etmektedir [21]. Naval ise geniş alanlarda dağların oluşturduğu gökyüzü sınır çizgilerini ve sayısal yükseklik haritalarını (digital elevation map) kullanılarak robot konumunu kestirmiştir. Bu süreçte robot konumuna ait hipotezler doğrusal olmayan bir optimizasyon sürecinden geçirilerek en uygun hipoteze ulaşılmıştır. Sonuçta ortalama konumlandırma hataları sentetik görüntülerde 127, gerçek görüntülerde 393 metre olarak elde edilmiştir [22].

Gökyüzü sınır çizgisini konumlamada kullanan çalışmalar göz önüne alındığında, bu çalışmaların ya binaların yoğun olarak bulunduğu ortamlar için geliştirilmiş olup diğer ortamlarda denenmediği ya da elde edilen hata oranlarının hareketli robot uygulamaları için kabul edilebilir sınıra çok üstünde olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın odağında yer alan ve bölgesel olarak çalışacağı düşünülen robotların kullanım alanlarının ise sadece caddeler ile sınırlandırılması çok gerçekçi değildir. Dolayısı bu çalışmada elde edilen yöntemin ağaçların, binaların ve açık alanların bir arada bulunduğu ortamlarda çalışması hedeflenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmayı özgün kılan, sadece gökyüzü sınır çizgisini kullanan, ağaçlık alanlar ve binaların bir arada bulunduğu ortamlarda, farklı ışık şartlarına rağmen konumlandırma başarımı yüksek, hareketli robot uygulamalarında kullanılabilecek bir yöntemin geliştirilmesi olmalıdır.

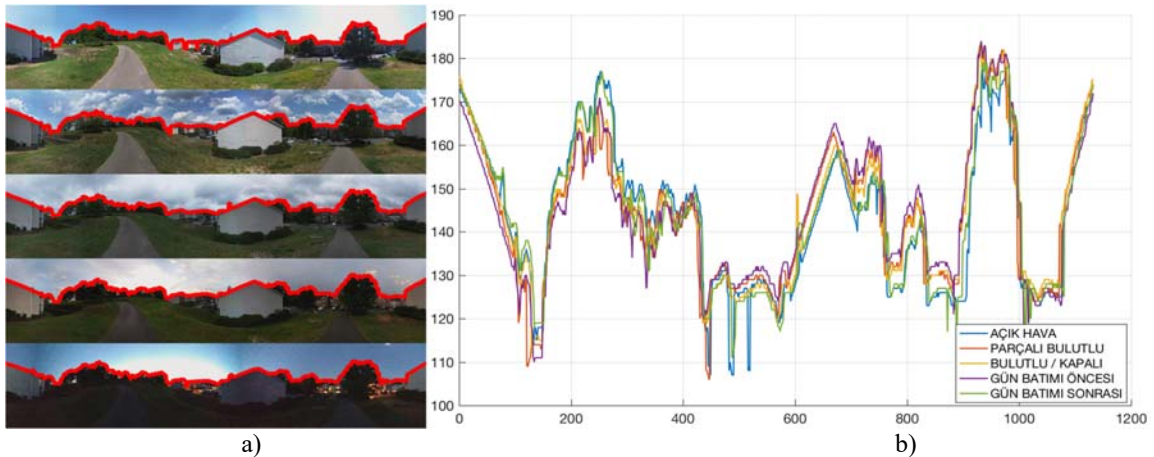
Makale şu şekilde yapılandırılmıştır: Bu girişin ardından, bir sonraki bölümde temel kavramlar ve problem tanımı sunulmaktadır. Çözüm yaklaşımının sunulduğu yöntem bölümünü bulgular ve değerlendirme takip etmektedir. Sonuçlar bölümü ile makale tamamlanmaktadır.

2. TEMEL KAVRAMLAR VE PROBLEM TANIMI (BASIC CONCEPTS AND PROBLEM DEFINITION)

Hareketli robotların görevlerini başarılı bir şekilde tamamlayabilmeleri için buldukları ortamda konumlarını en azından görev gereksinimlerini karşılayacak kadar kestirmeleri büyük önem arz etmektedir. Diğer bir deyişle,

bir robotun konumlama hassasiyeti robotun kabiliyetleri ve görev gereksinimleri ile ilişkilidir. Örneğin robot belirli bir alanın etrafında sınır takibi yapacak ise ve robotun üzerindeki engelden sakınma ve yerel (lokal) hedef takip algoritmaları robotun yakın çevresi ile sorunsuzca etkileşmesini sağlıyor ise, bu robotun milimetre hassasiyetinde konumlama ihtiyacı yoktur. Konumlama sistemi genel yönelimi doğru ve tutarlı olarak sağladığı takdirde algı menziline olan yerel hedeflere ulaşabilen ve bu süreçte önüne çıkan engellerden de sakınabilen robotların görev başarımı için lokal davranışların doğru uygulanması, global konumlamadan yüksek çözünürlükte bilgi sunmasından daha önemli hale gelmektedir. Diğer bir deyişle, yakın mesafe algılama, planlama ve eyleme kabiliyetleri arttıkça robotların konumlama hassasiyetine olan ihtiyacı da birçok uygulamada azalabilmektedir. Bu çalışmada önerilen yöntemin kullanılacağı robotik sistemlerde de benzer kabiliyetlerin bulunması beklenmekte olup, önerilen bu yöntemi başarımı için sürekli ve milimetrik konumlama ihtiyacı duyan robotlarda kullanmak mümkün olmayacaktır. Bu bağlamda bu çalışma metrik harita tabanlı robotik uygulamalarından topolojik ve nitel (qualitative) navigasyon uygulamaları için daha uygundur [23]. Bu çalışmada gökyüzü sınır çizgisi kullanılarak dış ortamda çalışan robotlar için konumlama yapılması hedeflenmektedir. Gökyüzü sınır çizgisi, ufuk çizgisi gibi düz bir çizgi olmayıp, bulunulan nokta itibarı ile gökyüzü ile yeryüzünü ayıran sürekli çizgidir. Şekil 2'de farklı zamanlarda aynı noktadan çekilmiş panoramik fotoğraflar için bu çalışmada kullanılan yöntem ile hesaplanmış gökyüzü sınır çizgileri görülmektedir.

Aydınlanma şartlarındaki değişiklikler veya ortamdaki hareketli nesnelerin çok olması, görüntünün tümüne odaklanan konumlama algoritmalarının kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. Gökyüzü sınır çizgileri ise ışık şiddet ve yönünden göreceli olarak daha az etkilenmekte, civardaki hareketli cisimlerin de sınır çizgisi ile etkileşimi genelde sınırlı kalmaktadır. Şekil 2a'da aynı noktadan 5 farklı zamanda çekilen görüntüler sunulmuştur. Gün içinde güneşli



Şekil 2. a) Aynı noktadan farklı zamanlarda çekilen fotoğraflar ve bulunan gökyüzü sınır çizgileri b) Sınır çizgilerinin işaret olarak incelendiğindeki benzerlikleri

(a) Skylines found on photos that are taken from the same spot at different times b) Similarity of skylines when plotted as signals)

ve açık havada, parçalı bulutlu havada, bulutlu ve kapalı havada, parçalı bulutlu bir havada hemen gün batımı öncesi ve sonrası olmak üzere 5 değişik zamanda çekilen bu fotoğraflar incelendiğinde, görüntülerde renk tabanlı öznelilikler çıkarmaya çalışan metotların başarılı olması mümkün görünmemektedir. Oysa Şekil 2’de görüldüğü üzere, bu 5 farklı görüntüde de birbirine son derece benzer gökyüzü sınır çizgileri bulunabilmektedir. Kaldı ki, burada sınır çizgisi bulmak için kullanılan algoritma da geliştirmeye açık olup, çalışma şu aşamada bu konuya odaklanmamaktadır. Çalışmanın temelini oluşturan gözlem birbirine yakın noktalarda sınır çizgilerinin birbirine benzer olup, noktaların arası açıldıkça bu benzerliğin de azalmasıdır. Dolayısı ile gökyüzü sınır çizgilerinin birbirine yakın konumları tespit için kullanılması mümkün olup, bunun da özellikle robotik uygulamalarda konumlama amaçlı kullanılabilmesi söz konusudur. Bu çalışmanın ana hedefi, bir bölgede çekilmiş bir seri fotoğraftan çıkarılan gökyüzü sınır çizgilerini bir nevi harita gibi düzenleyip, daha sonra farklı zamanlarda aynı bölgede çekilen fotoğrafları kullanarak, bu fotoğrafların çekildiği noktaların haritada nereye yakın olduğunun tespit edilmesidir. Bu çalışma kapsamında kullanılan *konumlandırma* ya da *yer kestirimi* tabirleri, GPS örneğinde olduğu gibi mutlak bir konumlandırmayı değil, daha önce çıkarılmış harita içindeki bağıl konumlandırmayı kastetmektedir. Çalışmanın başında anlatıldığı üzere, bölgesel çalışan robotlarda konumlandırma ihtiyacının belirli bir bölge için yerel ve bağıl olarak sağlanması çoğu durumda uygulama başarımı için yeterli görülmektedir. Bu bakımdan sunulan yöntemin başarımı da mutlak mesafeler üzerinden değil, eldeki görüntüden üretilen işaretin haritadaki işaretler ile karşılaştırıldığında, haritadaki doğru işaretin ne kadar yüksek benzerlik değerine sahip olduğu ile değerlendirilmelidir. Bu çalışmadaki yöntemi kullanacakların dikkat etmesi gereken önemli bir husus da, haritadaki noktaların hangi sıklıkla seçileceğidir. Kullanılacak robotun yerel davranış kabiliyetleri ve uygulama yapılan alanın coğrafi şartları bir arada düşünülerek ihtiyaç duyulan minimum sayıdaki harita noktası tespit edilmelidir. Noktalar arası mesafe kimi uygulamalarda 1 metre alına inebilecek isek, kimi uygulamalarda rahatlıkla 5-10 metre olabilir. Çalışma ortamının şartlarına bağlı olarak da bu noktaların eşit aralıklı seçilmemesi de söz konusu olabilir. Bu sebepler gene önerilen yöntemin başarımını mutlak ölçüler yerine bağıl harita noktaları üzerinden yapılmasını gerektirmektedir. Her ne kadar bu çalışma ile bağıl bir konumlandırma yöntemi önerilse bile, bu konumlama başarılı bir şekilde yapıldığı takdirde, bu bağıl haritadaki referans noktaların mutlak koordinatlar ile bağdaştırılarak mutlak konumlanmanın sağlanması da kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Bir sonraki bölümde harita çıkarma ve sonradan elde edilen resimlerin bu harita üzerindeki noktalarla bağdaştırılması konuları detaylıca anlatılmaktadır.

3. YÖNTEM (METHOD)

Bu kısımda panoramik görüntüler kullanılarak nasıl yerel konumlandırma yapıldığı anlatılacaktır. Bu çalışmada

kullanılan tüm panoramik görüntüler *LG 360 R0115* kamerası kullanılarak elde edilmiştir. Kameradan elde edilen orijinal görüntüler “5660x2830” boyutlarında olup bu çözünürlük gerekenin çok üzerindedir. Hem harita olarak saklanacak işaretlerin boyutunu düşürmek, hem de hesaplamaları hızlandırmak için alınan görüntüler kullanılan yazılım kütüphanesinde yer alan görüntü boyutlandırma komutu (*imresize*) ile alt-örnekleyerek küçültülmüştür. Gökyüzü çizgisi genelde görüntünün orta kısımlarında toplandığı için, haritalanan alanlar incelenmiş ve görüntülerin gökyüzü sınır çizgisini içermeyen kısımları işleme sürelerini düşürmek için alt ve üst kısımlardan eşit oranda atılmıştır. Diğer bir deyişle görüntüler alt ve üstten kırılmıştır. Haritayı oluşturan görüntüler üzerinden bu atılacak oranlar belirlendikten sonra aynı bölgedeki tüm konumlandırma çalışmalarında aynı oranlar kullanılmıştır. Bu çalışmada tüm yazılımlar MATLAB® ortamında gerçekleştirilmiştir.

Bu süreçte, öncelikle konumlama yapılacak alanın haritalanması yapılmakta, sonra haritalanmış bu bölge ve civarından farklı zamanlarda toplanan görüntüler gene bu harita üzerinde konumlandırılmaktadır. Sadece görüntü kullanılarak konumlama yapılan bu araştırmanın ilk ayağında çizgisel yörüngeler üzerinde konumlandırma üzerinde durulmuştur. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında haritadan kasıt, bir alan içinde değil, bir yörünge üzerindeki noktalardan toplanmış bir seri görüntüyü temsil eden işaret dizileridir. Benzer şekilde, bu çalışma özelinde konumlandırmadan kasıt eldeki bir görüntünün harita üzerindeki en yakın nokta ile eşleştirilmesidir. Bu durumda konumlandırma başarımı da, görüntünün eşleştirildiği nokta ile gerçek noktanın arasında kaç nokta olduğu ile orantılı bulunmaktadır.

Bir yörünge haritasının çıkarılması için o bölgeden bir yörünge boyunca panoramik görüntüler alınmaktadır. Her bir görüntü yukarıda bahsedildiği üzere önce alt-örnekleme ve kırma sonrası $D \times Y$ piksellik boyuta getirilir. Boyutlandırılmış görüntüleri g_i ile gösterir ve yörünge üzerinden toplam n görüntü alındığını varsayarsak, haritayı oluşturacak görüntü kümesi $G = \{g_1, \dots, g_n\}$ elde edilir.

Haritalanacak yörüngeden elde edilen her bir görüntüden (g_i), o görüntünün çekildiği konumu temsil etmek üzere gökyüzü sınır çizgisi çıkartılmakta ve bu çizgi bir işaret olarak kaydedilmektedir. Eldeki her bir görüntü (g_i) için ilgili konum tanımlayıcı işaretin (s_i) bulunması süreci Tablo 1’deki algoritmada anlatılmaktadır. Sunulan algoritmalarda $\| \cdot \|_1$ l^1 -normuna ve $\langle \cdot, \cdot \rangle$ iç çarpıma karşılık gelmektedir.

Bu çalışmanın asıl amacı gökyüzü sınır çizgisini en hassas şekilde belirlemek olmadığı için, farklı aydınlatma şartlarında tekrarlanabilir cevap veren bir eşikleme yöntemi yeterli bulunmuştur. Bu eşik değeri Otsu’nun yöntemi [24] kullanılarak elde edilen değerlerin belirli bir yüzdesi olarak belirlenir. Bu yüzde, haritalanacak alanın görüntüleri incelenerek bir kere belirlenir ve bu alanla ilgili gerçekleştirilen tüm çalışmalarda bu eşik değeri kullanılır.

Tablo 1. Algoritma: Bir görüntüye karşılık gelen işaretin hesaplanması.
(Algorithm: Calculation of the signal corresponding to an image)

Girdi: $D \times Y$ boyutlarında görüntü (g),
Çıktı: Görüntü g 'ye karşılık gelen işaret s , $s \in \mathbb{R}^D$

- Kırmızı, yeşil ve mavi (RGB) katmalarından oluşan renkli görüntü g 'den mavi (B) katmanı alınarak gri-tonlamalı görüntü (b) oluşturulur.

$$b = g(1:Y, 1:D, 3)$$

- Gri tonlamalı görüntü (b) için otomatik olarak bulunan bir eşik değeri (μ) kullanılarak siyah-beyaz görüntüye (\bar{b}) çevrilir, bu çevrim sonucunda gökyüzüne ait kısımlar büyük oranda beyaz, diğer kısımlar çoğunlukla siyah hale gelir:

$$\bar{b}(i, j) = \begin{cases} 0, & b(i, j) < \mu \\ 1, & b(i, j) \geq \mu \end{cases}, i = 1, \dots, Y, j = 1, \dots, D$$

- Siyah-beyaz görüntüye gürültülerden kurtulmak ve gökyüzü sınırını netleştirmek amacı ile önce aşındırma E ("erosion") ve genişleme D ("dilation") morfolojik operatörleri y_a ve y_g yapısal elemanları kullanılarak (\bar{b}) üzerinde uygulanır:

$$\bar{b} = D(E(\bar{b}, y_a), y_g)$$

- Elde edilen siyah-beyaz görüntünün her bir sütunu için yukarıdan aşağıya doğru piksel değerleri incelenir ve beyazdan siyaha ilk dönüş değeri o sütun için işaret değeri olarak kaydedilir:

$$s(j) = (Y - k \mid \bar{b}(i, j) = 1 \forall i \leq k, \quad \bar{b}(k - 1, j) = 0), \quad i = 1, \dots, Y, j = 1, \dots, D$$

- Görüntüdeki tüm sütunlar işlendikten sonra ortaya çıkan işaret (s) ortalaması sıfır olacak şekilde kaydırılır.

$$s(j) = s(j) - \frac{\|s\|_1}{D}, \quad j = 1, \dots, D$$

Eşiklenerek elde edilen görüntülere aşındırma ve genişleme morfolojik operatörleri uygulanarak kendisinden işaret üretilen nihai siyah beyaz görüntü oluşturulur. Sırasıyla aşındırma ve genişleme morfolojik operasyonlarda kullanılan yapısal elemanlar y_a ve y_g Eş. 1'deki gibidir:

$$y_a = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, y_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Örnek bir görüntü için Tablo 1'de sunulan algoritmanın adımları ve sonucu Şekil 3'de sunulmaktadır. Elde edilen siyah beyaz görüntünün her bir sütununda yukarıdan aşağıya doğru ilerlenirken, bulunan ilk siyah piksel koordinatı o sütundaki işaret değeri olarak kaydedilir. Hesaplamalarda görüntülerin sol alt köşesi merkez (0,0) noktası olarak alınmıştır. Sonuçta görüntü kümesi G içindeki her bir görüntü g_i için 1440 elemanlı bir vektör ($s_i \in \mathbb{R}^{1440}$) elde edilmiş olur¹. Sıralı olarak bu işaretleri barındıran küme $H = \{s_1, \dots, s_n\}$ ise ilgili yörüngenin haritasına karşılık gelmektedir.

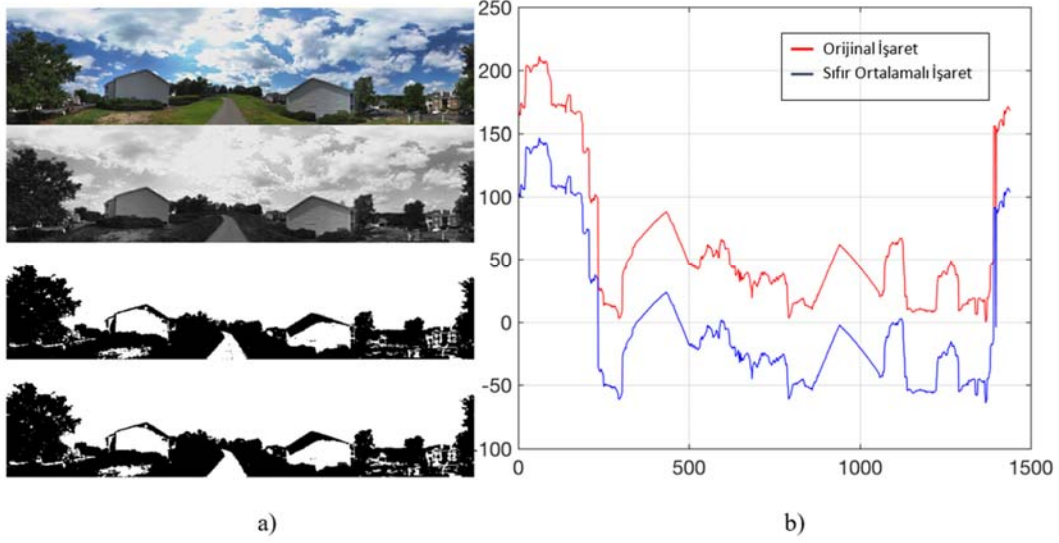
Bölgesel harita H çıkarıldıktan sonra amaç harita üzerindeki noktalara yakın yerlerden çekilmiş görüntülerin harita üzerindeki noktalarla eşleştirilmesidir. Bu eşleştirme sırasında benzerliği tanımlayan bir ölçüt fonksiyonu $B(s_k, s_l)$ kullanılmaktadır. Bu fonksiyon, iki işareti alıp, benzerlik değerini $[0, 100]$ kapalı aralıkta döndürmektedir. Kameranın hareketi ve bu hareket

sirasındaki olası dönmelerden dolayı, iki işaretin eşleştirmenin ilk adımında birbirleri ile en yüksek korelasyon değerini verecek şekilde hizalanmaları gerekmektedir. İşaretler 360°'lik panoramik görüntülerden gelmekte olduğu için elde edilen işaretlerin son ve ilk değerleri aslında birbirinin devamı niteliğindedir. Dolayısı ile bu işaretler periyodik işaretler gibi değerlendirilebilir. Hizalama ile işaretlerdeki kamera çekim açısından kaynaklı kaymaların telafi edilmesi mümkün olmaktadır. İki işaret için benzerlik değeri $B(s_k, s_l)$ Tablo 2'de verilen algoritmada anlatıldığı şekilde hesaplanır.

İşaretleri örtüştürmek amacıyla 2. adımda gerçekleştirilen kaydırma işlemi sırasında s_k işareti kaydırılırken işaretin aslında 360 derecelik bir görüntüye karşılık geldiğinin dikkate alınarak hesaba katılması gerekmektedir. Diğer bir deyişle s_k işareti N adım sağa kaydırıldığında, işaretin sonundaki N eleman alınarak işaretin başına eklenmelidir. Sonuç olarak benzerlik fonksiyonu birbirine çok benzer işaretler için 100'e yakın değerler, birbirinde benzemeyen işaret çiftleri için de düşük değerler vermektedir. Fonksiyon çıktısının anlaşılabilirliği açısından benzerlik değeri yüzde olarak $[0, 100]$ verilmektedir. $A_d > A_l$ olduğu durumlarda negatif değer yerine Eş. 3'de görüldüğü üzere fonksiyon 0 (sıfır) değerini döndürmektedir. Eş. 4'de A_l ile görünen bölme işleminin dolayı $B(s_k, s_l) \neq B(s_l, s_k)$ eşitsizliği de not edilmelidir.

Bir bölgenin haritası çıkarıldıktan sonra o bölgedeki bir test noktasından alınan panoramik görüntü bu harita ile

¹ Bu örnekte görüntü genişliği $D = 1440$, yüksekliği $Y = 361$ ve eşik değeri μ , OTSU yönteminden gelen değerin %70'idir.



Şekil 3. a) Yukarıdan aşağıya: kameradan gelen renkli görüntü, renkli görüntünün mavi kanalından oluşturulan gri tonlamalı görüntü, eşiklenerek elde edilmiş siyah beyaz görüntü, morfolojik operasyonlar sonrası elde edilen nihai siyah beyaz görüntü b) Siyah beyaz görüntüden elde edilen işaretler: Orijinal işaret ve sıfır ortalamalı işaret
 (a) Top to bottom: color image obtained from the camera, gray scale image obtained from the blue channel of the color image, binary image obtained after thresholding, final binary image obtained after application of morphological operators b) Signals obtained from the binary image: the original (red) and the zero-mean (blue) signals

Tablo 2. Algoritma: İki işaret arasındaki benzerlik değerinin hesaplanması
 (Algorithm: Calculation of similarity between two signals)

Girdiler: Görüntülerden elde edilmiş iki işaret ($\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l$), $\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l \in \mathbb{R}^D$
Çıktı: Girdi olarak verilen iki işaret arasındaki benzerlik değeri, $B(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l)$
<ul style="list-style-type: none"> $\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l$ işaretleri arasında en yüksek korelasyon değerini sağlayacak şekilde \mathbf{s}_k işareti kaydırılarak $\hat{\mathbf{s}}$ elde edilir.
$f(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l, j) = \langle [\mathbf{s}_k(j+1:D) \mathbf{s}_l(1:j)], \mathbf{s}_l \rangle, j = 1, \dots, D$
$N = \arg \max_j (f(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l, j))$
$\hat{\mathbf{s}} = [\mathbf{s}_k(N+1:D) \mathbf{s}_k(1:N)]$
<ul style="list-style-type: none"> Hizalanmış iki işaret $\hat{\mathbf{s}}$ ve \mathbf{s}_l arasında kalan toplam alan (A_d) ve test işaretinin altında kalan alan (A_l) bulunur¹. Eş. 2
$A_d = \ \hat{\mathbf{s}} - \mathbf{s}_l\ _1$ (2)
$A_l = \ \mathbf{s}_l\ _1$ (3)
<ul style="list-style-type: none"> Benzerlik değeri bu alanları kullanarak $[0, 100]$ kapalı aralığında hesaplanır:
$B(\mathbf{s}_k, \mathbf{s}_l) = \max\left(0, \left(1 - \frac{A_d}{A_l}\right) \cdot 100\right)$ (4)

karşılaştırılmakta, yani bu görüntüye ait işaret ile haritadaki tüm işaretlerin arasındaki benzerlikler hesaplanmaktadır. En yüksek benzerlik değerine sahip nokta bu test noktasının haritadaki karşılığı olarak kabul edilmektedir. Bir noktanın konumlandırma başarımı, o noktanın haritada eşleştirildiği nokta ile gerçekten ait olduğu nokta arasındaki toplam nokta sayısının haritadaki toplam nokta sayısına oranı kullanılarak, Tablo 3'de sunulan algoritma ile hesaplanmaktadır. Eldeki test görüntüsünün tam olarak harita üzerindeki bir noktadan alınmayabileceği de göz önüne alınırsa benzerlik fonksiyonunun bu noktaya yakın noktalar için yüksek, daha uzaktaki noktalar için de daha düşük değerler üretmesi, ayrıca benzerliğin yüksek olduğu noktalarda başarımın da

yüksek olması beklenmekte olup, testler de bu beklentiye doğrular niteliktedir. Vurgulanması gerekli olan önemli bir husus ise, bir bölgenin haritası çıkarıldıktan sonra, konumlamada kullanılmadan önce haritanın kendi içindeki tutarlılığının (öz-tutarlılığının) bulunmasının gerekliliğidir. Öz-tutarlılık ile harita üzerindeki tüm noktaların birbiri ile çapraz karşılaştırması kastedilmektedir. Haritaya uygulanan bu çapraz karşılaştırma ile bir noktanın kendisi ve haritadaki diğer tüm noktalar ile olan benzerlik değeri Tablo 2'de anlatılan algoritma ile bulunmaktadır. Böylelikle her bir noktanın yakın komşuları dışında daha uzak noktalarla benzerliğinin olup olmadığının tespiti yapılabilmektedir. Zira kısıtlar değerlendirilirken de vurgulandığı üzere;

Tablo 3. Algoritma: Test noktasından elde edilen görüntünün konumlandırma başarımlarının hesaplanması.
(Algorithm: Calculation of localization performance of the image acquired from the test point)

Girdiler: Test noktasından alınan görüntüden çıkarılan işaret, (\mathbf{s}_t), test noktasının en yakın olduğu harita noktasının indeksi k ve harita \mathbf{H}

Çıktı: Test noktasının haritadaki konumlandırma başarımlarının yüzdesi $Y(\mathbf{s}_t, k, \mathbf{H})$

• \mathbf{s}_t işareti için haritada (\mathbf{H})’deki en yüksek benzerlik değerini veren işaretin indeksi i bulunur.

$i = \arg \max_j (B(\mathbf{s}_t, \mathbf{s}_j)), j = 1, \dots, n, \mathbf{s}_j \in \mathbf{H}$

• İndeks hatasının haritadaki toplam işaret sayısına oranı kullanılarak yüzdelik başarımların değeri bulunur. (Eş. 5)

$$Y(\mathbf{s}_t, k, \mathbf{H}) = 100 \cdot \left(1 - \frac{|k-i|}{n}\right) \quad (5)$$

simetrik ögeler içeren bölgelerde olabildiği gibi, farklı noktalardan benzer işaretler elde edilebilmekte olup, harita kullanılmadan böylesi durumların tespiti gerekmektedir. Ayrıca, bölgenin doğası / coğrafi yapısı itibarı ile bir simetri söz konusu olmadan da harita üzerindeki noktalar arasında kısmi benzerlikler söz konusu olabilmektedir. Haritanın sağlıklı bir şekilde kullanılabilirliğini belirlemek için harita öz-tutarlılığı hesaplanmalı ve her noktanın kendisinden sonra en çok kendisine en yakın noktalar ile benzer olduğundan emin olunmalıdır. Ayrıca, birbirine uzak noktalar arasındaki en yüksek benzerlik değeri bulunarak bu değer özellikle tek noktadan alınan bir görüntünün haritada konumlandırıldığı durumlarda bir tür güvenilirlik katsayısı olarak kullanılmalıdır. Haritada diyagonal etrafındaki bantta bulunan benzerlik değerlerine sahip çok sayıda diyagonale uzak noktanın varlığı bir haritayı önerilen yöntem açısından kullanılamaz hale getirebilecektir. Bu bakımdan öz-tutarlılık matrisinin uygulama öncesi muhakkak detaylıca incelenmesi uygulama başarımı için gereklidir.

Bir sonraki bölümde önerilen yöntemin nasıl uygulanacağını, örnek uygulama başarımlarını ve kısıtları göstermek üzere gerçekleştirilen deneyler üzerinden anlatılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER (RESULTS AND EVALUATIONS)

Bu kısımda farklı deneylerin sonuçları sunularak önerilen yöntemin kabiliyetleri ve kısıtları gösterilerek bu yöntemin uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

4.1. Deneyler (Experiments)

Önerilen yöntemin fiili olarak nasıl kullanılacağı, uygulama sırasında karşılaşılabilecek olası sorunlar ve bu sorunların nasıl çözülebileceği 3 farklı deney senaryosu üzerinden gösterilmektedir. Bu deney senaryolarını incelerken, bunların önerilen yöntemi açıklamak için sunulduğu göz ardı edilmemelidir. Diğer bir deyişle, klasik deneysel çalışmaların aksine, bu çalışmada deney sonuçlarından yola çıkarak yöntem geliştirilmemektedir, bilakis buradaki deneylerin amacı anlatılan yöntemin kullanım şeklini örnekler üzerinden göstermektir. Birinci deneyde 45 metrenin biraz üzerindeki uzunlukta bir yörünge üzerinde adım adım yöntem bölümünde önerilen metodun nasıl

kullanılacağı gösterilmektedir. Bu deneyde öz-tutarlılık matrisinin amacı, kullanılırken kritik bölgelerin nasıl seçileceği, konumlandırma sonuçlarının nasıl değerlendirilmesi gerektiği gibi hususlar açıklanmaktadır. Konumlandırma işlemi test görüntülerinden elde edilen işaret ile haritadaki işaretlerin karşılaştırarak en yüksek benzerlik değerini veren işaretin aranan konum olarak seçilmesi olarak tanımlanabilir ki söz konusu bu eşleştirmenin yapılmaması gereken durumların da olabileceği gene bu kısımda gösterilmektedir. Bu deneyde detayların görülebilmesi amacı ile tüm test senaryoları için benzerlik değerleri grafikler halinde sunulmuştur. Ayrıca Tablo 3’de verildiği şekilde hesaplanan konumlandırma başarımları da tablolar halinde verilmiştir.

İkinci deneyde, birincisi ile aynı yörünge üzerinden ve tek bir noktadan farklı zaman ve atmosfer şartlarında toplanan (Şekil 2’de gösterilmiş) görüntülerin konumlandırma başarımları incelenmiş, gökyüzü sınır çizgisinin değişen şartlara rağmen gürbüz bir şekilde konum tanımlayıcı olarak kullanılabileceği bu örnek üzerinden gösterilmiştir.

Son deneyde ise, 100 metrenin üzerinde bir yörünge üzerinde konumlandırma çalışması yapılmış, bu süreçte de kullanılan görüntülerin çözünürlüğü (dolayısı ile işaret vektörlerinin boyu) değiştirilerek bunun konumlandırma başarımları hesaplanmış, sonuçlar hesaplama zamanları da göz önüne alınarak değerlendirilmiştir.

4.1.1. Deney 1 (Experiment 1)

İlk deneyde, haritalanan bir bölgede gerçekleştirilen farklı konumlandırma denemeleri yer almaktadır. Konumlandırma yapılacak haritayı oluşturmak amacı ile bir yörünge üzerinden ardışık olarak toplam 62 noktadan {P1, P2, ... , P62} ortalama 0,75m aralıklarla toplanan panoramik görüntüler kullanılarak toplanmıştır. Bu görüntüler 1 derecelik açıya 4 piksel düşecek şekilde (15 ark dakika çözünürlükte) alt-örnekleme yolu ile yeniden boyutlandırılmış ve yukarıda anlatıldığı şekilde yörünge haritası $\mathbf{H} = \{\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_{64}\}$ oluşturulmuştur. Görüntülerden konum tanımlayıcı işaretler elde edilirken eşik değeri olarak OSTU yönteminden gelen değer %70’i kullanılmıştır. Haritalamanın yapıldığı alana ait uydu görüntüsü, haritası çıkarılan yörünge ve test senaryolarının yerleri Şekil 4’de sunulmaktadır. Bu haritanın

kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla, öncelikle haritanın öz-tutarlık matrisi, haritayı oluşturan 62 görüntünün her birinin diğer görüntüler ile benzerliği bulunarak, Eş. 6'da verildiği üzere hesaplanmıştır.

$$C(i, j) = B(s_i, s_j), \quad i, j = 1, 2, \dots, 62 \quad (6)$$



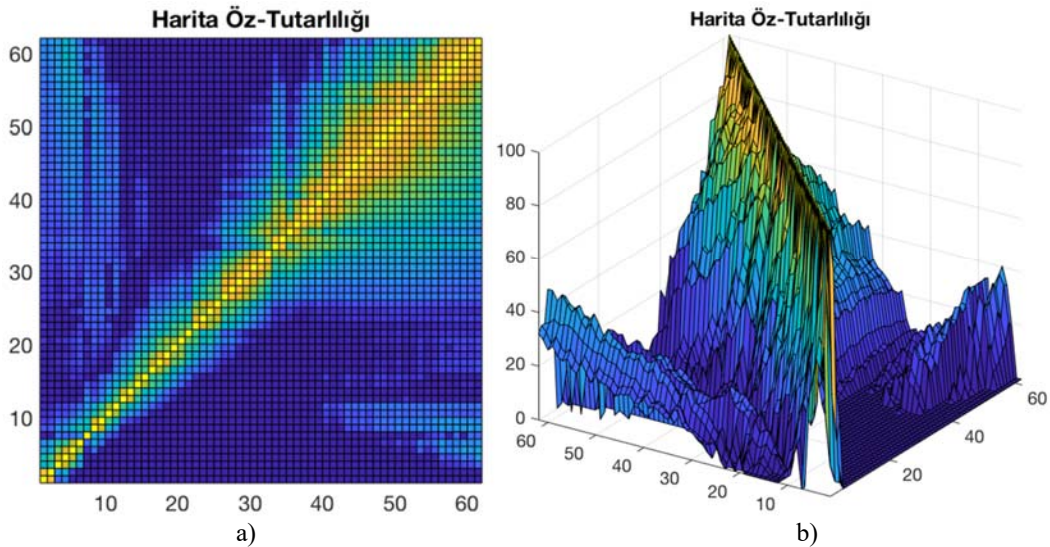
Şekil 4. Haritası çıkarılan yörünge P1-P62 noktaları arasındadır. 6 farklı test senaryosu da T1, ..., T6 olarak gösterilmektedir. Buradaki elips ve daireler görüntü toplanan bölge ve noktaları, kesik çizgiler de görüntü toplanan yörüngeleri temsil etmektedir. Haritalanan yörüngeye ilk noktanın GPS koordinatları: [36° 4'31.26"N, 86°55'38.30"W]

(The path for which a map is formed is between points P1-P62. 6 different test scenarios are shown as T1, ..., T6. The ellipses and circles indicate the regions and points, dashed lines indicate paths along which images are acquired. GPS coordinates of the first point on the mapped path: [36. 36° 4'31.26"N, 86°55'38.30"W])

Bu hesaplama sonunda öz-tutarlılığı yüksek bir harita için $C(i, j)$ içindeki en yüksek değerlerin önce matrisin diyagonalinde, sonra da azalarak diyagonal etrafındaki bantta yer alması beklenmelidir. Diyagonaldeki tüm değerlerin 100 olması gerektiği Eş. 4'e göre aşıkardır. H haritası için elde edilen öz-tutarlılık matrisi Şekil 5'de verilmekte olup, sonuç haritanın öz-tutarlı kabul edilebileceğini göstermektedir. Yalnız, bu harita kullanılabilir kabul edilse bile, haritası çıkarılan yörünge başındaki ve sonundaki, özellikle P1-P10 ile P50-P60 arasındaki benzerlik değerlerinin 45-50 arasına çıkması bu noktaların birbirine bir ölçüde benzediğini göstermektedir. Bu harita özelinde değerlendirecek olur isek, tek nokta için gerçekleştirilen eşleştirmelerde, bu aralıklardaki eşleştirme sonuçlarının görüntü için elde edilen benzerlik değeri 45-50 komşuluğunda ya da altında kalıyor ise, eşleştirmenin gerçekleştirilmemesi, diğer bir deyişle, bu noktanın haritada bulunduğu sonucuna varılmaması daha uygun olacaktır. Bu örnekten çıkarılacak ilk sonuç, haritalanan her alan için öz-tutarlılık matrisinin incelenmesinin gerekliliğidir. Bu inceleme sonucunda, öncelikle önerilen yöntemin o bölgede kullanılabilirliği değerlendirilmeli, harita kullanılabilir bulundu ise, kritik bölgeler incelenerek, konumlandırma için yeterli kabul edilebilecek uygun benzerlik değerleri tespit edilmelidir.

Şekil 5'te verilen haritanın kullanılabilirliğine kanaat getirdikten sonra konumlama performansı Şekil 4'de gösterilen test senaryoları üzerinden değerlendirilmiştir. Bu senaryolardan ilk dört tanesi (T1-T4), harita üzerindeki bir nokta civarından toplanan görüntülerin konumlandırmasını yaparken, diğer iki senaryoda (T5, T6) bir noktada harita ile kesişen doğrusal yörüngeler üzerinden toplanan görüntülerin konumlandırılması gerçekleştirilmektedir.

T1-T4 test senaryolarının her biri haritalanmış yörünge üzerinde 4 farklı noktaya karşılık gelmektedir. Bu noktaların



Şekil 5. Yörünge haritasının öz-tutarlılığı: a) C matrisinin 2 boyutlu görüntüsü b) C matrisinin 3 boyutlu görüntüsü
(Self-consistency of the map a) 2D plot of C matrix b) 3D plot of C matrix)

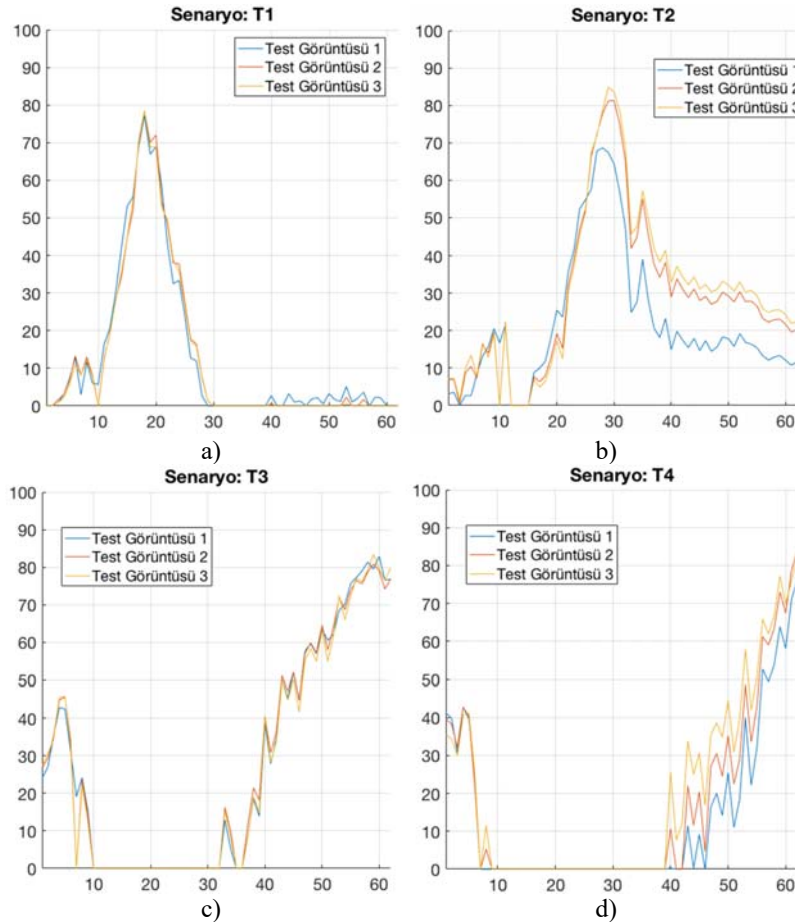
her birinin civarından ($\pm 0,75m$ komşuluğundan) üçer adet test görüntüsü (G_1-G_3) alınmıştır. Bu testlerin amacı, yörüngeye yakın noktalardan alınan görüntülerin yörüngedeki en yakın noktalar ile doğru şekilde eşleşip eşleşmeyeceğinin belirlenmesidir. Bu senaryolardaki test görüntülerinin haritadaki noktalar ile benzerlik değerleri Şekil 6'da, Tablo 3'de anlatılan algoritmaya göre hesaplanarak konumlandırma başarımları de Tablo 4'de sunulmaktadır. Her bir senaryoda görüntüler bir nokta etrafından aldığı için Tablo 4'de ortalama başarımlar da verilmiştir. T1 için P18'e, T2 için P30'a, T3 için P59'a ve T4 için de T62'ye yakın noktalardan görüntüler alınmıştır. Görüntü toplama işlemi farklı zamanlarda yapıldığı için yerler yaklaşıktır. Kaldı ki, bu çalışmada amaç daha önce de bahsedildiği üzere yüksek hassasiyetli konumlama olmayıp, noktalar arasındaki yakınlık ilişkisini doğru kurmaktır. Şekil 6'da görüldüğü üzere bu elde edilen sonuçlarda benzerlik değerleri ilgili noktalarda en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu testler sonucunda, farklı zamanlarda bile olsa, yörüngeye yakın noktalardan elde edilen görüntülerin, önerilen yöntem ile haritalanmış yörüngede ilgili noktalar ile eşleştiği

gösterilmiştir. Dolayısı ile önerilen yöntemin, haritalanmış yörüngeye yakın noktalar için çalıştığı sonucuna varılabilir.

Tablo 4. Birinci deneydeki T1-T4 senaryolarındaki her bir görüntü (G_1-G_3) için konumlandırma başarımları (Localization success rates for images (G_1-G_3) in scenarios (T1-T4) in the first experiment)

	G_1	G_2	G_3	Ortalama Başarımlar
T1	100,00	100,00	100,00	100,00
T2	96,77	100,00	98,39	98,39
T3	98,39	100,00	100,00	99,46
T4	100,00	100,00	100,00	100,00

Bir sonraki test senaryosu (T5), haritalanan yörünge bitişinden başlayarak, gitgide uzaklaşan noktaların harita ile nasıl eşleştirileceğini sorgulamaktadır. Bu senaryoda toplam 5 görüntü alınmış olup, Şekil 4'de gösterildiği üzere ilk 4 görüntü P62'den giderek uzaklaşan noktalara ait olup, 5. görüntü ise ilk 4 görüntü ile aynı doğrultuda fakat P62'den çok uzak bir noktadan alınmıştır. Bu test sonucunda, test noktası P62'den uzaklaştıkça benzerliğin de gitgide azaldığı

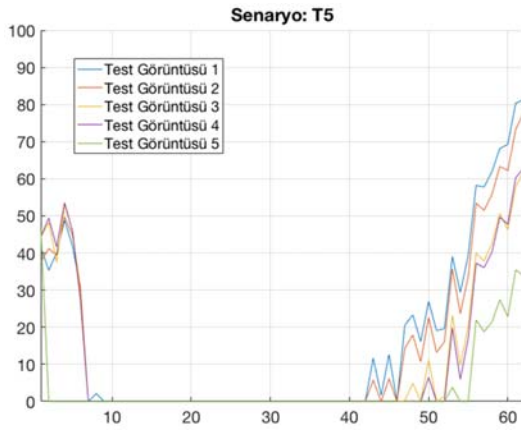


Şekil 6. T1-T4 senaryolarında 3 farklı konumdan alınan görüntüler için hesaplanan benzerlik değerleri: a) T1 için görüntüler P18 civarından alınmıştır b) T2 için görüntüler P30 civarından alınmıştır c) T3 için görüntüler P59 civarından alınmıştır d) T4 için görüntüler P62 civarından alınmıştır

(Similarity values for images obtained from 3 different locations in scenarios T1-T4: a) Images for T1 are obtained from the vicinity of point P18 b) Images for T2 are obtained from the vicinity of point P30 c) Images for T3 are obtained from the vicinity of point P59 d) Images for T4 are obtained from the vicinity of point P62)

gözlenmiştir. Bu 5 görüntünün harita ile benzerlik grafikleri Şekil 7’de, konumlandırma başarımları da Tablo 5’te sunulmaktadır.

Şekil 7’de görüldüğü üzere, P62’ye en yakın olan 1. test noktası en yüksek benzerlik değerini vermekte olup noktalar P62’den uzaklaştıkça benzerlik değeri düşmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken 5. test noktasıdır. Zira bu nokta ilk 4 nokta ile aynı doğrultuda, ama yörüngeye oldukça uzak bir noktadan alınmıştır. Şekil 7’de de görüldüğü üzere bu nokta için artık yörünge başındaki noktalar, her ne kadar noktalar arasında bir yakınlık yok ise de, daha benzer hale gelmiştir. Bu test sonuçları da göstermektedir ki, önerilen yöntemdeki benzerlik ölçütü, yörüngeden uzaklaşan konumlar için tutarlı şekilde azalan benzerlik değerleri üretmektedir. Benzer şekilde, önerilen yöntem bir nokta yörünge üzerinde olmasa bile en yakın noktaları kestirebilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus ise, bir nokta için bulunan en yüksek benzerlik değeri bile belli bir eşik değerinin altında ise bu noktanın haritada konumlandırılmamasının gerekliliğidir. Daha önce de vurgulamış olan bu gerekliliğin önemi deneyin bu kısmında gözler önüne serilmiştir.



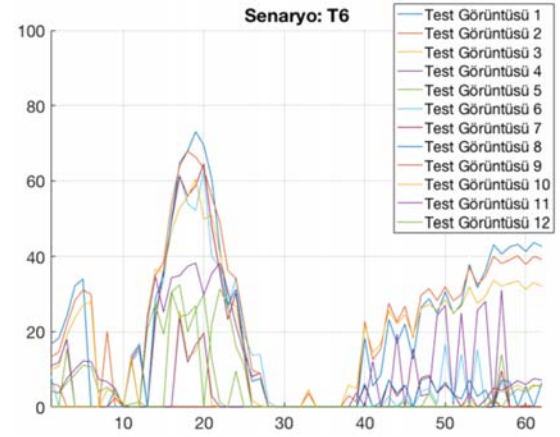
Şekil 7. T5 senaryosu için benzerlik değerleri.
(Similarity values for scenario T5)

Tablo 5. Birinci deneydeki T5 senaryosundaki her bir görüntü (G₁-G₅) için konumlandırma başarımları
(Localization performance of images (G₁-G₅) in scenario T5 of the first experiment)

	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅
T5	100,00	100,00	100,00	100,00	1,61

Önerilen yöntemin son testi (T6), yörüngeye dikine kesen bir hat üzerinden toplanan 12 görüntü ile gerçekleştirilmiş olup görüntülerin harita ile benzerlik grafikleri Şekil 8’de, konumlandırma başarımları da Tablo 6’da sunulmaktadır. Burada görüldüğü üzere T6 üzerindeki bir kısım noktalar

P17-P20 aralığında en yüksek benzerlik değerlerine ulaşmakta olup, özellikle T6 üzerindeki noktaların haritalanmış yörüngeye yaklaştıkları durum (6-10. test görüntüleri) en yüksek benzerlik değerlerini verip, bu noktalar tutarlı bir şekilde konumlandırma yapılabilecek benzerlik seviyelerine ulaşmaktadır. Konumlandırma başarımları da benzer şekilde haritalanan yörüngeye yaklaştıkça artış göstermektedir.



Şekil 8. T6 senaryosu için benzerlik değerleri.
(Similarity values for scenario T6)

T1-T4 sonucunda önerilen yöntemin haritalanmış yörüngeye yakın noktaları başarılı bir şekilde harita üzerinde konumlandığı sonucuna ulaşılmıştır. T5 sonucunda ise haritadan uzaklaştıkça benzerlik değerlerinin düştüğü, bir yerden sonra ise elde edilen benzerlik değerlerinin kullanılamaz olduğu görülmüştür. T6 sonucunda ise harita yörüngesini dikine kesen bir hat üzerinden görüntüler alınmış ve T5’de elde edilen sonuçların bir başka açıdan sağlaması yapılmıştır. Sonuç olarak da bu örnek üzerinden önerilen yaklaşımın yörünge haritalamasında ve sonrasında elde edilen görüntülerin yörüngede konumlandırılmasında nasıl kullanılabileceği gösterilmiştir.

4.1.2. Deney 2 (Experiment 2)

Bu çalışmada gökyüzü sınır çizgilerinin tercih edilmesinin ana sebebi küçük hareketlerle bile değişiklik gösteren küçük boyutlu konum tanımlayıcı bir işarete dönüşmesidir. Bununla birlikte gökyüzü sınır çizgisinden çıkarılan bu işaretin atmosferik şartlar ve ışık değişikliklerine karşı gürbüz olması da bu tercihi güçlendiren bir etken olmaktadır. Şekil 2’de Deney 1’de sunulan yörünge üzerindeki 18. nokta (P18) yakınlarından farklı zaman ve atmosferik şartlarda alınan görüntülerin konumlandırma başarımları Tablo 7’de sunulmaktadır. Bu görüntüler sırası ile gün içinde güneşli ve açık havada, parçalı bulutlu havada, bulutlu ve kapalı havada, parçalı bulutlu bir havada hemen gün batımı öncesi

Tablo 6. Birinci deneydeki T6 senaryosundaki her bir görüntü (G₁-G₁₂) için konumlandırma başarımları
(Localization performance of images (G₁-G₁₂) in scenario T6 of the first experiment)

	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇	G ₈	G ₉	G ₁₀	G ₁₁	G ₁₂
T6	32,25	35,48	40,32	38,71	96,77	98,39	98,39	100,00	98,39	100,00	100,00	95,16

ve sonrası olmak üzere 5 farklı zamanda çekilmiştir. Bu deney bir önceki deney ile aynı bölgede gerçekleştirildiği için, aynı harita kullanılmış ve tüm işlemler aynı parametrelerle gerçekleştirilmiştir.

Başarımlar incelendiğinde 2-4. görüntüler %100'lük başarımla P18 ile eşleştirilmiş olup, 1. görüntü P19, 2. görüntü ise P17 ile eşleştirilmiş olup, tek noktalık bu hata %98,39'luk başarıma karşılık gelmektedir. Tüm bu görüntüler için ise P17-P19 birbirine çok yakın ve diğer tüm noktalardan yüksek benzerlik değeri vermektedir. Bu deney sonucunda da gökyüzü sınır çizgisinin ışık ve atmosferik değişikliklerden konumlama kabiliyetini ortadan kaldıracak kadar etkilenmediği sonucuna varılmaktadır.

Tablo 7. Şekil 2'de sunulan görüntülerin konumlandırma başarımları

(Localization performance of images presented in Figure 2)

	1	2	3	4	5
P18	98,39	100,00	100,00	100,00	98,39

4.1.3. Deney 3 (Experiment 3)

Son deneyde, hem ilk deneye oranla daha uzun bir yörünge üzerinden haritalama yapılmış, hem de bu yörünge kullanılarak görüntülerin çözünürlüğünün konumlandırma başarımına etkisi incelenmiştir. 1,5 metrelik eşit aralıklarla alınan 76 görüntü (P1, ... P76) ile toplamda 114 metre uzunluğunda bir yörünge haritalanmıştır. Haritalanan bölge ve yörünge Şekil 9'da gösterilmekte olup, yörünge üzerindeki 6 test noktası (T1, ... , T6) sırası ile haritadaki P2, P11, P24, P42, P52, P59 ve P74 noktalarına karşılık gelmektedir. Test noktalarının her birinin $\pm 0,50$ metre komşuluğundan 3 farklı zamanda toplam 15'er görüntü alınmıştır. Elde edilen görüntülerden harita ve test işaretleri çıkarırken, görüntü genişliği sırası ile 45, 90, 180, 360, 720 ve 1440 piksel olacak şekilde alt-örnekleme ve 6 farklı harita (H^{45} , H^{90} , H^{180} , H^{360} , H^{720} , H^{1440}) elde edilmiştir. Bu çözünürlükler en düşük değerinde 8 dereceye bir piksel iken en yüksek değerinde 1 dereceye 4 piksele karşılık gelmektedir. Harita görüntülerinin ve öz-tutarlılık matrisinin incelenmesi sonrasında görüntülerden konum tanımlayıcı işaretler çıkarmak için eşik değeri olarak OSTU yönteminden gelen değerlerin %60'ının kullanılmasına karar verilmiştir. Deney 1'e benzer şekilde tüm haritalar için her bir test noktasından alınan görüntüler ilgili harita üzerindeki en yüksek benzerlik değerini veren nokta ile eşleştirilerek konumlandırma işlemi tamamlanmıştır. Sonuçta her bir nokta için elde edilen ortalama konumlandırma başarımları Tablo 8'de verilmektedir.

Doğal olan beklenti yüksek çözünürlükteki haritaların yüksek başarımla göstermesidir ki, Tablo 8'deki sonuçlar bu beklentiye doğrular niteliktedir. Bu deney ile vurgulanmak istenen bir husus da, özellikle T4 noktası için elde edilen göreceli düşük konumlama başarımının sebebine aittir. T4 test noktası, harita üzerinde P42 noktasına yakın olup, bu civardan alınan 15 görüntünün 10 tanesi P42 ve P41 noktaları ile eşleştirilirken, bir nokta P46, 4 nokta ise son

derece ilgisiz olan P68 ile eşleştirilmiştir. Bunun sebebi tek tek görüntüler incelenerek araştırıldığında sorunun önerilen algoritmada değil, test görüntülerinde olduğu anlaşılmıştır. Kullanılan kameranın iki farklı lensten aldığı görüntüyü birleştirerek panoramik görüntü oluşturduğu göz önüne alındığında, bu görüntüleri birleştiren algoritmanın sonuçları etkileyeceği aşikardır. P68 ile eşleştirilen görüntü haritadaki karşılığı ve o civardan çekilen diğer görüntüler ile karşılaştırıldığında, iki ayrı görüntü birleştirilirken her ne kadar birleşme noktaları denk gelmiş olsa bile, görüntülerin orta kısmında gökyüzü sınır çizgisinin deforme olduğu (orta kısmın büküldüğü ya da düzleştiği) görülmüştür.

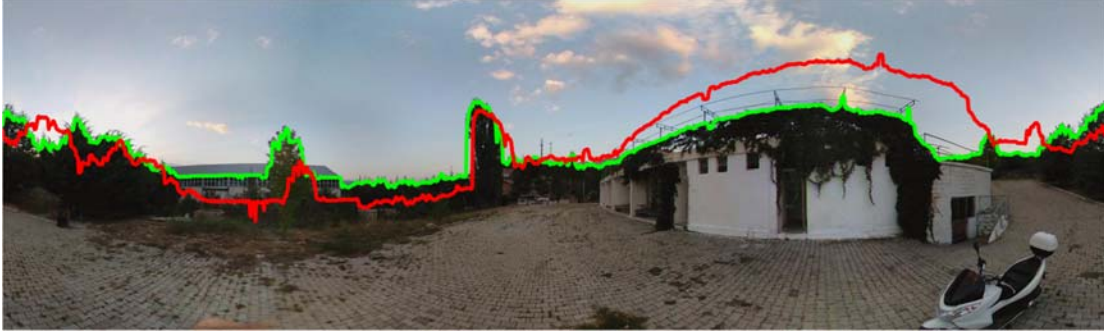


Şekil 9. Haritası çıkarılan yörünge P1-P76 noktaları arasındadır. Haritalanan yörünge üzerindeki ilk noktanın GPS koordinatları: [38° 4'24.88"N, 30°26'56.36"E] (The path for which a map is formed is between points P1-P76. GPS coordinates of the first point on the mapped path: [38° 4'24.88"N, 30°26'56.36"E])

Şekil 10'da doğru örnek görüntü üzerinde bulunan gökyüzü sınır çizgisi yeşil ile deforme olmuş görüntüden bulunarak doğru çizgi ile eşleştirilmiş gökyüzü sınır çizgisi ise kırmızı ile gösterilmiştir. Panoramik görüntünün birbirine zıt şekilde yerleştirilmiş 2 farklı kameradan gelen görüntülerin birleştirilmesi ile oluşturulduğu göz önüne alınarak Şekil 10'daki örnek görüntünün sağ ve sol yarısı incelendiğinde, hataya sebep olan görüntüden gelen (kırmızı) gökyüzü çizgisinin orta kısımlarda büküldüğü görülmektedir. Görüldüğü üzere kullanılan kameranın panoramik görüntü üretme performansı önerilen algoritmanın başarımını doğrudan etkilemektedir. Bundan çıkarılabilecek ilk sonuç, haritalamada kullanılacak görüntülerin titizlikle incelenerek, deforme olmuş görüntülerin haritada kullanılmaması olmalıdır. Çıkarılabilecek diğer bir sonuç ise, kullanılan kameranın deforme görüntü üretme sıklığına bağlı olarak, uygulama sırasında aynı noktadan birden çok görüntü alarak, bu görüntülerin tümü için elde edilen konumlandırma bilgisinin orta değerini kullanarak konumlandırma yapmak olabilir. Bu aşamada değerlendirilmesi uygun olacak diğer

Tablo 8. Farklı çözünürlüklerde oluşturulan haritalar (H^{45}, \dots, H^{1440}) üzerinde 6 farklı noktadan (T1, ..., T6) alınan test görüntülerinin ortalama konumlandırma başarımları
(Average localization performances of test images taken from 6 different points (T1, ..., T6) on maps (H^{45}, \dots, H^{1440}) with different resolutions)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
H^{45}	76.93	83.16	85.00	89.74	68.95	78.07
H^{90}	92.98	96.23	94.56	91.67	82.54	98.77
H^{180}	99.12	96.32	96.84	88.68	96.58	99.21
H^{360}	99.12	95.44	97.63	90.35	96.58	98.86
H^{720}	92.81	95.96	96.84	90.53	98.42	98.86
H^{1440}	99.12	95.35	99.21	90.26	98.68	98.77



Şekil 10. Kameradan gelen normal ve deforme görüntülerin ürettiği sinyal örnekleri
(Examples of signals generated using normal and deformed images acquired from the camera)

bir veri de bu görüntülerin işlenerek konumlandırmanın yapılması için geçen süre olacaktır. Her bir harita için harita hazırlama ve bir test görüntüsünü haritada eşleştirme için geçen ortalama süreler (milisaniye cinsinden) Tablo 9’da sunulmaktadır. Tüm bu hesaplamalar aynı bilgisayar üzerinde yapılmıştır². Konumlandırma için bir işaretin haritadaki diğer bir işaret ile karşılaştırılırken çapraz korelasyona bakıldığı düşünüldüğünde, görüntü konumlandırma için geçen sürenin işaret genişliğine bağlı olarak üssel artması beklenmelidir.

Tablo 9. Farklı çözünürlüklerde oluşturulan haritalar (H^{45}, \dots, H^{1440}) için harita oluşturma ve ortalama görüntü konumlandırma süreleri
(Map creation and average image localization times for maps created at different resolutions (H^{45}, \dots, H^{1440}))

	Harita oluşturma süresi (ms)	Test görüntüsü konumlandırma süresi (ms)
H^{45}	187,82	2,81
H^{90}	196,87	3,12
H^{180}	238,45	3,71
H^{360}	316,45	4,96
H^{720}	605,77	8,56
H^{1440}	1742,54	23,30

Tablo 9’da sunulan görüntü işleme süreleri de bu beklentiyi doğrular niteliktedir. Karşılaştırma amaçlı fikir vermesi için harita oluşturma süreleri de sunulmuş olmakla birlikte,

uygulamada harita oluşturma en başta bir kere yapılacağı için bu süreler herhangi bir kısıt oluşturmamaktadır. Oysa görüntü konumlandırma işlemleri her yeni görüntü için gerçekleştirilecektir. Buradaki görüntü konumlandırma süreleri görüntünün okunmasından konumlandırma işleminin sonuna kadar alt-örnekleme dâhil bütün adımları içermektedir.

Tablo 8 ve Tablo 9’da verilen sonuçlar, bir noktaya kadar algoritmanın başarımlarını çok düşürmeden ciddi zaman kazanımları elde etmenin mümkün olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla ile bir uygulamada çözünürlük kararı verilmeden farklı çözünürlüklerde görüntüler için hem başarımlar hem de hesaplama sürelerine bakılarak en uygun çözünürlük belirlenmelidir.

4.2. Değerlendirmeler (Assessments)

Önerilen yöntemin başarımlarını artırmak için, bir bölgede uygulama yapmadan önce, haritalama için alınan görüntüler incelenerek, bu görüntülerde kamera kaynaklı deformasyonlar olup olmadığı incelenmeli, gerekirse sorunlu görüntüler tekrar alınarak haritalama işlemi deforme olmamış görüntülerle tamamlanmalıdır. Her ne kadar, konumlandırma sırasında deforme görüntülerin kameradan gelmesi mümkünse de, bu sırada sürekli görüntü geldiği için, bu tür hataların filtrelenmesi mümkündür, oysa haritadaki hata tüm süreci etkileyecek nitelikte ve kalıcıdır. Haritalamada kullanılacak görüntüler belirlendikten sonra

² Tüm hesaplamalarda 2012 model 8 Gb Ram 2.6GHz i7 işlemcili Macbook Pro dizüstü bilgisayar kullanılmıştır.
1642

siyah beyaz görüntü elde etmede kullanılan eşik değeri, bu görüntüler kullanılarak deneme yanılma yolu ile kolayca bulunabilmektedir. Bunun için OTSU'nun yöntemi ile bulunan eşik değerinin farklı yüzdeleri kullanılarak elde edilen siyah beyaz görüntülerden konum tanımlayıcı işaretler çıkarılır. Bu işaretlerden gökyüzü sınır çizgisine en uygun işareti üreten yüzdelik değeri sabit eşik değeri olarak seçilerek tüm uygulamada bu değeri kullanılır. Bu çalışma sürecinde genellikle %60 - %80 aralığındaki değerlerin iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 8 ve Tablo 9 değerlendirildiğinde, düşük kabiliyetli donanımlarda çalışılacağı zaman düşük çözünürlükteki (H^{180} örneğinde olduğu gibi) haritaların bile kabul edilebilir başarımlar ile kullanılabilmesi görülmektedir. Dolayısı ile uygulamaya başlamadan önce farklı çözünürlükteki haritalar için birkaç deneme yapılarak başarımlar ve zaman değerleri izlenerek haritalarda kullanılacak çözünürlüğün belirlenmesi önerilmektedir. Bu çalışmada paralel hesaplama yöntemlerinden yararlanılmamış olmakla birlikte, önerilen algoritma yapısı itibarı ile paralel hesaplamaya uygundur.

Önerilen konumlama yönteminin başarılı şekilde çalışmasını engelleyecek bazı kısıtlar da mevcuttur. Bu yöntemin en bariz kısıtı, yöntemin doğası itibarı ile gökyüzü çizgisinin kamera tarafından algılanabilir olmasıdır ki, bu da yöntemi, gün ışığı kullanan kameralar için gecenin büyük bir kısmında kullanılamaz hale getirmektedir. Çalışmanın amaçlarından bir tanesi de düşük maliyetli bir çözüm geliştirmek olduğu için bu aşamada gecenin karanlık saatlerinde gökyüzü çizgisini bulabilecek kameralar üzerinde durulmamıştır.

Çalışma sırasında gözlemlenen diğer bir kısıt ise simetrik öğeler içeren alanlarda birbirine benzer birden çok noktanın bulunmasıdır. Örneğin büyük bir açık otoparkta aydınlatma direkleri ve ağaçlar yol merkezine göre simetrik bir yapı içerip, özellikle otoparkın merkez bölgesinde yer alan yollar üzerinde birbirinden ayırt edilemez bölgeler ortaya çıkabilmektedir. Dolayısı ile uygulama yapılacak bölgede önce görüntüler toplanmalı ve öz-tutarlılık matrisi hesaplanmalıdır. Öz-tutarlılık matrisi incelenerek birbirine benzer fakat ayrı bölgelerin var olup olmadığı belirlenmelidir. Bu farklı bölgelerdeki noktaların karşılıklı en yüksek benzerlik değerleri incelenerek, Deney 1'de anlatıldığı üzere, bu bölgelere ait konumlandırılmalar için minimum kritik benzerlik değeri belirlenmeli, bunun benzerlik değerinin altındaki değerler için o bölgelerde konumlandırma yapılmamalıdır.

Bu bölümde sunulan deneyler aracılığı ile önerilen yöntem ile bir yörüngenin haritalanarak konumlamada kullanılıp kullanılmayacağı değerlendirilmesinde, uygun bulunan bölgelerde bu yörüngeye yakın noktalardan alınan görüntülerin yörünge haritası üzerinde konumlandırılmasının nasıl yapılacağı gösterilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmanın sonuçlarını hem bulguları hem de bundan sonraki araştırma yönünü göstermesi bakımından değerlendirmek gerekir. Öncelikle panoramik görüntülerden elde edilen gökyüzü sınır çizgisinin küçük boyutlu robotların konumlanmasında kullanılabilir nitelikte olduğu bu çalışma ile gösterilmiştir. Gökyüzü sınır çizgilerinin konum betimleyici bir işaret olarak kullanılması hem panoramik görüntülere oranla çok daha küçük büyüklükteki veriler ile konumların tanımlanmasını sağlamakta, hem de göreceli basit işaret işleme yöntemleri ile harita üzerinde bağlı konumlandırmayı mümkün kılmaktadır. Bu çalışma sonuçları, dış ortam robotlarının, özellikle arazide çalışanların, GPS gibi harici bir işaret kaynağına bağlı kalmaksızın bir harita oluşturup bu harita üzerinde planlama yapabileceğini göstermiştir. 1 metre altında bile konumlama hassasiyetinin elde edilebileceği gösterilmiş olup bu sonuç düşük maliyetli donanımlar ile küçük robotların kabiliyetlerinin önemli ölçüde artırılabilirliğinin bir örneğini teşkil etmektedir³.

Önerilen metodun bahsedildiği üzere uygulamada bazı kısıtları da kaçınılmaz olarak mevcuttur. Araştırmanın devamında bu kısıtların en aza indirilmesi, gökyüzü sınır çizgisi hesaplanmasının daha da iyileştirilmesi ve çizgisel yörüngelerin ötesinde, geniş alanlarda konumlandırma yapılabilmesi öncelikli olarak planlanmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Payá, L., Gil, A., Reinoso, O., A State-of-the-Art Review on Mapping and Localization of Mobile Robots Using Omnidirectional Vision Sensors, *Journal of Sensors*, 2017. (doi: 10.1155/2017/3497650)
2. Fiala, M., Roth, G., Automatic alignment and graph map building of panoramas, *IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications*, Ottawa, Canada, 2005.
3. Tardif, J. P., Pavlidis, Y., Daniilidis, K., Monocular visual odometry in urban environments using an omnidirectional camera, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2008)*, Nice, France, 2531-2538, 2008.
4. Anati, R., Daniilidis, K., Constructing topological maps using markov random fields and loop-closure detection, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 37-45, 2009.
5. Krüchel, K., Nolden, F., Ferrein, A., Scholl, I., Intuitive visual teleoperation for UGVs using free-look augmented reality displays, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2015)*, Seattle, WA, ABD, 4412-4417, 2015.
6. Mirzaei, F. M., Kottas, D. G., Roumeliotis, S. I., Analytical least-squares solution for 3d lidar-camera calibration, *Robotics Research*, 183-200, 2017.

³ Bu çalışmada kullanılan tüm görüntü ve kaynak kodlara aşağıdaki adresten ulaşılabilir:
http://users.metu.edu.tr/kbugra/research/GS_TR01.html

7. Higtuti, V. A. H., Guerrero, H. B., Velasquez, A. E. B., Pinto, R. M., Tinelli, L. M., Magalhães, D. V., Milori, D. M. B. P., Low-cost embedded computer for mobile robot platform based on raspberry board, ABCM International Congress of Mechanical Engineering (Cobem2015), Rio de Janeiro, Brezilya, 2015.
8. Atasoy A., Kaya E., Toptas E., Kuchimov S., Kaplanoglu E., Ozkan M., 24 DOF EMG controlled hybrid actuated prosthetic hand, 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Orlando, FL, ABD, 5059-5062, 2016. (doi: 10.1109/EMBC.2016.7591864)
9. Bettemir, Ö.H., Tombaloğlu B., Design and manufacture of a -small scale autonomous construction machine for grading, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (3), 617-625, 2013.
10. Kılıç A., Kapucu A., Design and construction of a modular reconfigurable robot module OMNIMO, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 521-530, 2016.
11. Karcı H., Tangel A., Design and prototype implementation of a 5-DOF mobile robot arm based on FPGA, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (2), 295-302, 2016.
12. Bradski, G., ve Kaehler, A., Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library, O'Reilly Media, Inc., UK, 2008.
13. Chang, C. K., Siagian, C., Itti, L., Mobile robot vision navigation & localization using gist and saliency, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010), IEEE/RSJ, 4147-4154, 2010.
14. Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., ... & Kudlur, M., TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning, OSDI 16, 265-283, 2016.
15. Robertson, D. P., Cipolla, R., An Image-Based System for Urban Navigation, Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC 2004), 19 (51), 165-174, 2004. (doi: 10.5244/C.18.84)
16. Zhang, W., Kosecka, J., Image based localization in urban environments, Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, Chapel Hill, NC, USA, 33-40, 2006.
17. Majdik, A.L., Albers-Schoenberg, Y., Scaramuzza, D., MAV Urban localization from Google Street View Data, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013), IEEE/RSJ, 3979-3986, 2013.
18. Agarwal, P., Burgard, W., Spinello, L., Metric localization using Google street view, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2015), Hamburg, Germany, 3111-3118, 2015.
19. Yu, L., Joly, C., Bresson, G., Moutarde, F., Monocular urban localization using street view, IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2016), Phuket, Tayland, 1-6, 2016.
20. Johns, D., Dudek, G., Urban position estimation from one dimensional visual cues, Canadian Conference on Computer and Robot Vision, Quebec, Kanada, 22-28, 2006.
21. Ramalingam, S., Bouaziz, S., Sturm, P., Brand, M., Geolocalization using skylines from omni-images, International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), Kyoto, Japan, 23-30, 2009.
22. Naval Jr, P. C., Robot self-localization from single mountain images, Proceedings of the Philippine Computing Science Congress, Manila, NCR, Philippines, 83-88, 2000.
23. Bonin-Fonti F., Ortiz, A., Oliver G., Visual Navigation for Mobile Robots: A Survey, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 53 (3), 263-296, 2008. (doi: 10.1007/s10846-008-9235-4)
24. Otsu, N., A threshold selection method from gray-level histograms, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9 (1), 62-66, 1979.