

MESAFE ÖLÇÜMÜ TABANLI GÜVENİLİR KONUM TESPİTİ TEKNİKLERİ VE KARA VE HAVA ARAÇLARI İÇİN ÖRNEK UYGULAMALAR

Selim TEMİZER*

Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
temizer@ceng.metu.edu.tr

Muhammed Çağrı KAYA

Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
mckaya@ceng.metu.edu.tr

Geliş Tarihi: 13 Mayıs 2013, Kabul Tarihi: 25 Temmuz 2013

ÖZET

Bu çalışmada insanlı veya insansız araçlarda kullanılabilir, kapalı/açık mekanların veya genel olarak yeryüzünün mesafe ölçen sensörler tarafından algılanabilir yüzey derinlik bilgileri kullanılarak güvenilir bir biçimde konum tespiti yapmayı sağlayan Bayes Filtreleme prensibi temelli teknikler ortak olarak incelenmiş, ve bir kısmı gerçek bir kısmı da simülasyon ortamında olmak üzere kara ve hava araçları üzerinde örnek uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Uygulamalarda öncelikle, eğer mevcut değil ise, konumlandırma yapılacak bölgenin referans derinlik haritası oluşturulur. Bu harita araç tarafından konum tespiti amacıyla kullanılacaktır. Görev başladığında araç kendi konumunu bilmemektedir ve GPS benzeri dış konumlama sistemlerinin kullanılmadığı varsayılmaktadır. Araç, her adımda üzerinde bulunan Sonar, Lidar ve/veya Sentetik Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar, SAR) benzeri derinlik algılayıcıları ile yaptığı gözlemi referans haritasıyla karşılaştırarak bulunduğu yer konusundaki tahminlerini günceller. Yeterli miktarda gözlem yapıldığında, tahmini konum ile gerçek konumun eşleştiği görülür. Sunulan ilk örnek uygulamada Pioneer P3-DX model bir araştırma robotu bir boyutlu konumlandırma yaparak kapalı alanlarda yerini tespit etmektedir. İkinci uygulamada bir İnsansız Hava Aracı (İHA) simülasyon ortamında iki boyutlu sentetik yükseklik verileri kullanarak konum tespiti yapmaktadır. Son örnekte ise yine hava araçları için gerçek sayısal arazi yükseklik verileri (Digital Terrain Elevation Data, DTED) kullanılarak konumlandırma yapılmıştır. Ayrıca ek veriler ışığında konumlandırmanın nasıl daha hızlı ve etkin yapılabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bayes Filtresi, İnsansız Araçlar/Sistemler, Konumlandırma, Pozisyon Tespiti, Sayısal Arazi Yükseklik Verisi, Sentetik Açıklıklı Radar (SAR).

RANGE MEASUREMENT BASED RELIABLE LOCALIZATION TECHNIQUES AND SAMPLE APPLICATIONS FOR LAND AND AIR VEHICLES

ABSTRACT

In this study, Bayesian Filter based reliable localization techniques that use depth information collected by range measuring sensors in indoor/outdoor environments, or terrains in general, are commonly analyzed and sample applications to both land and air vehicles have been demonstrated in real and simulated environments. For the applications, a reference depth map of the mission space is generated first, if not available already. This map is used by the vehicle for localization purposes. When the mission starts, the vehicle does not know its whereabouts and it is assumed that GPS-like external localization systems cannot be used. The vehicle compares the observations coming from onboard range sensors like Sonar, Lidar and/or Synthetic Aperture Radar (SAR) against the reference map and updates its estimated position at every step. The estimated position and the actual position equates after enough observations are made. In the first sample application presented, a Pioneer P3-DX model research robot determines its indoor position using one-dimensional localization. In the second application, an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) performs localization in a simulation environment using synthetic two-dimensional elevation data. And in the last example, UAV localization is demonstrated again using real Digital Terrain Elevation Data (DTED). A discussion about faster and more efficient localization in case of the presence of additional localization data is also presented.

* Sorumlu Yazar

Keywords: Bayes Filter, Digital Terrain Elevation Data (DTED), Localization, Position Detection, Synthetic Aperture Radar (SAR), Unmanned Vehicles/Systems.

1. GİRİŞ

İnsanlı ortamlarda ve insanlı araçlarda konum tespiti, insanoğlunun geliştirmiş olduğu çok çeşitli yetenekler ve teknikler sayesinde çözülemez bir problem olarak değerlendirilmemektedir. Örneğin güneşin, ayın ve yıldızların konumları incelenerek bile herhangi bir elektronik cihaza gereksinim duyulmadan gerekli hassasiyette konum tespiti yapmak mümkündür. Buna mukabil, insan yeteneklerine sahip olmadığı için konum belirlemesine daha somut bir şekilde ihtiyaç duyabilecek olan ve daha hızlı ve güvenilir sonuçların önem arzettiği sistemler mevcuttur ve bu çalışmanın da konusudur. Örneğin robotik sistemler ve insansız sistemler görevleri gereği bu tarz bir yeteneğe sıklıkla ihtiyaç duyabilmektedirler.

Günümüzde robotlar endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle sürekli dikkat gerektiren, hassas ve tekrarlanan işler insanlar için zor olmasına rağmen robotlar bu işleri kolaylıkla yapmaktadır. Ancak, bu robotlar genellikle buldukları yere monteli, yer değiştirmeyen (*immobile*) robotlardır ve belirli ve düzenli yapıda çalışma alanlarına sahiptirler.

Gelişen teknoloji ile birlikte robotların kullanım alanları da genişlemiş ve hareketli robotlar keşif, araştırma-inceleme, taşıma, gözlem, vb. alanlarda kullanılır olmuştur. Özellikle insansız olarak bomba imha [1], düşman bölgede gözlem, yüksek gerilim hatlarının kontrolü [2], vb. tehlikeli görevleri icra edebilme yetenekleri, robotların önemini daha da artırmıştır. Ancak bu robotlar hareket etmeleri dolayısıyla konumlarını tespit etmek zorundadırlar.

Konum tespiti, otonom kara, deniz [3] ve hava araçları için de oldukça önemli bir ihtiyaçtır. Bu araçlardan bazıları konumlarını Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System, GPS) yardımıyla tespit etmektedir. Ancak, olumsuz hava koşulları, kullanılan donanımın işlev görmemesi ve kapalı mekanlarda bulunabilme (örneğin bir tünelde ilerliyor olma) gibi çeşitli nedenlerle GPS bilgisi alınamayabilmektedir. Ayrıca gelecekte olası bir savaş durumu sebebiyle GPS sisteminin devre dışı kalabilmesi ihtimali de GPS servisinin kesilmesi anlamına gelebilecektir. Bu gibi kesintiler, aracın görevini gerçekleştirmemesi ya da kullanılmaz hale gelmesiyle sonuçlanabilir. Bu tür problemlerin çözümü için insansız araçlar ve robotik sistemler, buldukları çevreyi tanıyabilecek, ve bu sayede de konumlarını yeterli hassasiyet ile tespit edebilecek sistemlerle donatılabilirler [4, 5, 6].

İnsansız araçların konumunu tespit etme problemi genel olarak *hareketli robot konum tespiti problemi* (*mobile robot localization problem*) [7] kapsamında

değerlendirilir. Bu husus hareketli robotlar için kilit bir öneme sahiptir. Genel anlamda robotun çevresine göre konumunu ve yönelimini tespit etmeyi içerir.

Hareketli robot konum tespiti probleminin bazı türleri vardır. Bunlardan biri *pozisyon izlemedir* (*position tracking*) [8]. Bu problem, başlangıç pozisyonunu doğru olarak bilen bir robotun hareketi süresince doğru konum bilgisini korumaya çalışmasını içerir. Bir diğer tür ise *global konumlandırma problemi* (*global localization problem*) [9]. Bu problemde robot başlangıç konumunu bilmemekte, sonradan yapacağı gözlem ve hareketlerle konumunu tespit etmeye çalışmaktadır. Bir başka problem türü de *kaçırılmış robot problemi* (*kidnapped robot problem*) [10]. Burada ise kendisini büyük ölçüde konumlandırmayı başarmış bir robot, yapılan değişiklik robota bildirilmeksizin, bulunduğu yerden alınarak başka bir noktaya konulmaktadır. Sonrasında ise robotun konumunu yeniden doğru bir biçimde tespit etmesi beklenmektedir. Bu problem ayrıca konumlandırma algoritmalarının konum bilgisini ne kadar sürede geri kazandıklarını test etmek için bir ölçüt olarak da kullanılmaktadır.

Konum tespiti probleminde temel olarak üç unsur bulunmaktadır: Konum bilgisine ihtiyaç duyan bir araç, gözlem yapmakta kullanılacak bir sensör, ve sensörün gözlem bilgisi toplamak için üzerine uygulanacağı bir gözlenen nesne. Yaygın olarak ele alınan senaryolarda konum bilgisine ihtiyaç duyan aracın, sensörünü de kendi üzerinde taşıdığı, ve gözlenen nesneye göreceli olarak kendi konumunu hesapladığı durumlar ele alınır. Bu senaryoların yanısıra, sensörün araçtan bağımsız ve farklı bir konumda ve/veya sabit olabildiği ve göreceli konum hesabının üçüncü bir sistem tarafından tamamen ayrı bir yerde yapılabildiği senaryolar da mevcuttur. Yine bir başka yaygın senaryo ise, bir aracın, üzerinde taşıdığı sensörler vasıtası ile çevresinde bulunan diğer nesnelerin kendine göreceli konumlarını hesaplaması senaryosudur. Örneğin bir insansız hava aracı, üzerindeki radar ve/veya elektrooptik-kızılötesi benzeri algılayıcılar ile çevresindeki diğer hava araçlarının konumlarını kendi konumuna göreceli olarak tespit edip, sonrasında onlara çarpmamak için çeşitli manevralar planlamak amacıyla da konum tespiti algoritmalarından faydalanabilir. Bu sebeple, bu dokümanda ele alınan yöntemler de dahil olmak üzere çoğu konum tespiti algoritmaları hem gözlenen nesneye göreceli olarak bir aracın kendi konumunun tespiti için kullanılabilir, hem de aracın kendine göreceli olarak gözlenen nesnenin konumunun tespiti için kullanılabilir.

Bu makalenin yazarlarından Dr. Temizer, doktora çalışmaları sırasında yukarıda belirtilen ikinci tipteki

(kendine göreceli) konum tespiti ile ilgili olarak insansız hava araçları için (radar, elektrooptik-kızıl-ötesi, GPS, ADS-B, TCAS gibi) birçok farklı sensör ve birçok farklı konum tespiti algoritması kombinasyonunu incelemiş, karşılaştırmış ve üzerlerinde çeşitli geliştirmeler gerçekleştirmiştir [11, 12, 13]. Bu konu ile ilgili geniş bir literatür araştırması da yine bahsedilen doktora çalışmaları kapsamında sunulmuş olduğu için burada tekrarlanmamıştır. Dr. Temizer, ayrıca Kısmen Gözlemlenebilir Markov Karar Süreci (Partially Observable Markov Decision Process, POMDP) tabanlı çeşitli konum tespiti algoritmaları üzerinde de çalışmış ve bu süreçte çok geniş konum uzayına (*state space*) sahip POMDP'ler için gerçek-zamanlı çözüm teknikleri de geliştirmiştir [13]. Geliştirilmiş olan bu teknikler, gerektiğinde bu dokümanda anlatılacak olan metodlar üzerinde de uygulanabilir (bu dokümanda kullanılacak olan tekniklerin seçiminde bu kriter de önemli bir rol oynamıştır). Dokümanın ileriki kısımlarında bahsedilecek teknikler şu anda zaten gerçek-zamanlı olarak çalışmaktadırlar ve çok geniş bölgeler üzerinde konum tespiti gerçekleştirebilmektedirler, fakat çözünürlüğün artırılması ve/veya konum tespiti yapılacak bölgenin genişletilmesi gibi ihtiyaçlar sözkonusu olursa, ortaya çıkabilecek olası performans kayıplarının, geliştirilmiş olan gerçek-zamanlı çözüm teknikleri ile minimuma indirilebilmesi mümkündür. Böylece bu çalışmayı orijinal kılan önemli bir unsur, bu çalışmada ölçeklendirilebilir tekniklerin ele alınması ve büyük ölçekler için de performans kaybını önleyebilecek yöntemlerin önceden geliştirilmiş olmasıdır. Bu çalışma ayrıca konu ile ilgili olarak milli ve yaygın kullanımda olan çözümlerimizin bulunmaması açısından da pratik olarak kullanılabilir yöntemleri, çeşitli gerçek örnekler ile birlikte sunması sebebiyle orijinaldir.

Bu çalışmada, yukarıda sunulmuş olan çeşitli konum tespiti problemlerinin otonom araçlarda çözümü için *Bayes Filtresi* [14, 15] tabanlı teknikler ele alınmıştır. Kara, hava, deniz ve denizaltı sistemlerine rahatlıkla uygulanabilecek olan bu tekniklerin fizibilitesi ve verimliliği, seçilen bazı kara ve hava platformları üzerinde gerçek ortamlarda ve simülasyon ortamlarında uygulanmak sureti ile araştırılmıştır ve sonuçlar paylaşılmıştır. Dokümanın bundan sonraki bölümünde, önce kullanılan yöntem tarif edilmiş, daha sonra ise yapılan deneyler ve alınan sonuçlar üç aşamada aktarılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında Pioneer P3-DX model bir araştırma robotu ile gerçek ortamda deneyler yapılmıştır. Robot, öncelikle koridor tarzı bir görev ortamında sonar sensörleri vasıtasıyla bir boyutlu derinlik bilgisi toplamış, ve bu bilgileri bir referans derinlik haritası olarak kayıt etmiştir. Referans haritanın oluşturulması işlemi robotun kendisine yaptırılabilir gibi başka bir yolla da bu bilgi toplanabilir. Konum tespiti deneyleri aşamasında ise robot, referans haritanın kapsadığı bölge içinde bir noktaya rastgele bırakılır ve yapacağı gözlem ve

hareketlerle nerede olduğuna dair *tahmin durumunu* (*belief state*) sürekli günceller. Tahmin durumu, bu tür problemler için durum uzayı üzerindeki olasılık dağılımıdır. Yeterli miktarda gözlem yapıldığı takdirde robotun gerçek konumunu doğru olarak tespit ettiği gözlemlenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında, otonom olarak da görev yapabilmesi muhtemel olan bir hava aracı için aynı teknik, bu kez simülasyon ortamında uygulanmıştır. Araca sağlanan referans harita iki boyutlu olup, eşit büyüklükteki hücelere bölünmüş şekildedir ve aracın herhangi bir anda bu hücelerden birinin içinde olduğu varsayılmıştır. Daha sonra simülasyon ortamında araç bir hücreden diğer komşu hücelere hareket ettirilerek ve aracın yaptığı gözlemlerin benzetimi oluşturularak tahmin durumundaki değişiklikler gözlemlenmiştir. Bu deneyler de aracın kendi yerini net olarak tespit etmesi ile sonuçlanmıştır.

Üçüncü bölümde, ikinci bölümün gerçek verilerle ve gerçeğe çok daha yakın hareket ve gözlem modelleri ile sağlamasının yapılması amaçlanmıştır. Referans derinlik haritası olarak gerçek DTED (Digital Terrain Elevation Data) verileri kullanılmış, ve yine gerçekçi hava aracı hızları ile seyir eden bir hava aracının yapacağı gözlemler hesaplanarak konum tespiti deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hava aracının yapacağı gözlemler hesaplanırken, mesafe sensörlerinin son derece gürültülü okumalar yapabileceği durumların da benzetimleri yapılmış ve buna rağmen çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Üç gruptaki deneyler ve sonuçları, bir ve iki boyutlu referans verilerinin konum tespiti için kullanımını örneklemeaktadırlar. Bu deneylerin aktarılmasından sonra ise dokümanın son kısmında, konumlandırma sistemlerinin çok boyutlu veriler (örneğin yeryüzü yükseklik haritalarına ek olarak güneşin konumu gibi ek bilgi ve işaretler) ışığında nasıl daha hızlı ve verimli çalışabileceği konusunda bilgi verilmiştir.

2. YÖNTEM

Bu bölümde tarif edilecek olan yöntem, hem gerçek ortamdaki robot uygulamasının hem de simülasyon ortamlarındaki hava aracı uygulamalarının temelini oluşturmaktadır. Yöntem, temelde aracın nerede bulunduğu konusunda bir tahmine sahip olması, ve yaptığı gözlemler ile yaptığı hareketlerin etkilerini bu tahmine yansıtarak güncellemeler yapması üzerine kuruludur.

Dokümanın ilerleyen kısımlarında sunulacak olan örneklerde de görülebileceği üzere, kendisinin görev öncesi oluşturduğu ya da başkaları tarafından oluşturulmuş referans derinlik haritasına sahip olan bir otonom araç, derinlik taraması yapmasına olanak sağlayan sensörleri veya radarları yardımıyla hareketi süresince gözlem yapabilmekte ve bu gözlemler yardı-

mıyla konumunu tespit edebilmektedir. Bunu sağlamak için ilk olarak görev mahalının *ayrık (discrete)* bir hale getirilmesi gerekmektedir. Görev mahalı, konumlama için yeterli çözünürlüğe sahip küçük bölgelere ayrılır ve her bir bölge olası bir *durum (state)* olarak düşünülür. Bu sayede problem, temelde aracın hangi durumda olduğunun tespiti olarak formüle edilmiş olur.

Konum tespiti deneylerinin başlangıcında, aracın bulunma ihtimali olan her durum için *eşit olasılık dağılımı (uniform distribution)* yapılır. Sonrasında araç, bulunduğu konumda bir *gözlem (observation)* yapar ve kullandığı *sensör modeli (1)* ile tahmin durumunu günceller.

$$P(X_i | Z) = P(Z | X_i) P(X_i) / P(Z) \quad (1)$$

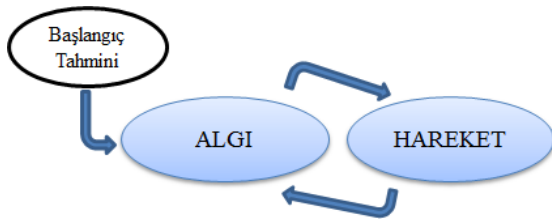
Burada ($i=1, \dots, n$) n adet durum için, X durumları ve Z yapılan gözlemi ifade etmektedir. Aracın belli bir miktar hareketi sonrası bir *geçiş (transition) modeli (2)* uygulanarak tahmin durumları tekrar güncellenir.

$$P(X_i(t)) = \sum_j P(X_j(t-1)) P(X_i | X_j) \quad (2)$$

Geçiş modeli, t anında X_i durumunda olmanın, $t-1$ anında j ile indekslenmiş durumlarda olma ihtimaline bağlı olduğunu göstermektedir.

Araç yeni bir konuma geldiğinde tekrar bir gözlem yapar ve güncellemeler tekrarlanır. Genellikle birkaç adım sonra durumlardan birisi diğerlerinden belirgin bir şekilde yüksek bir olasılığa sahip olur ve aracın gerçek konumunu temsil etmeye başlar.

Araç sürekli olarak çevresini algılama ve hareket durumları arasında geçiş yapar. Bu algı-hareket döngüsü Şekil 1'de gösterilmiştir. Sonuç olarak araç, yeterli sayıda ve konumunu diğer olası konumlardan ayırtmasına olanak sağlayacak içerikte gözlemler yapması durumunda nerede olduğunu hızlı ve doğru bir biçimde tespit edebilmektedir.



Şekil 1. Algı-hareket döngüsü.

Sensör ve geçiş modellerinin kullanımı, POMDP teknikleri ile aynı şekildedir. Basit bir örnek vermek gerekirse, Şekil 2'de görülen ve mantıksal olarak dört hücreye bölünmüş olan bir koridor örneği ele alın-

bilir. İlk başta, konumlama yapacak olan araç nerede olduğunu bilmediği için her hücrede bulunma ihtimali Şekil 2 (a)'da görüldüğü üzere her hücreye eşit olarak dağıtılmıştır. Sonrasında yapılan ilk gözlemin, söz gelimi, soldan ikinci hücreden gelme ihtimalinin, diğer hücrelerden gelme ihtimalinden daha fazla olduğu varsayılırsa, Denklem 1'deki sensör modeli, kullanılan sensör tarafından belirlenecek ihtimal değerleri ile uygulandığında, Şekil 2 (b)'dekine benzer bir ihtimal dağılımı elde edilebilir. Araç gözlem yaptıktan sonra örneğin sola doğru tam olarak bir hücre uzunluğunda bir mesafe katederse, bu durumda Denklem 2'deki geçiş modelini uygulayarak Şekil 2 (c)'de görülen ihtimal dağılımına ulaşır. Son olarak, bir sonraki algı-hareket döngüsüne başlanmadan önce standart bir normalizasyon gerçekleştirildiğinde ise Şekil 2 (d)'deki ihtimal dağılımı elde edilir.

0.25	0.25	0.25	0.25
------	------	------	------

(a) Başlangıçtaki ihtimal dağılımı.

0.15	0.60	0.15	0.10
------	------	------	------

(b) İlk gözlem sonrası ihtimal dağılımı

0.60	0.15	0.10	0.00
------	------	------	------

(c) Sola hareket sonrası ihtimal dağılımı

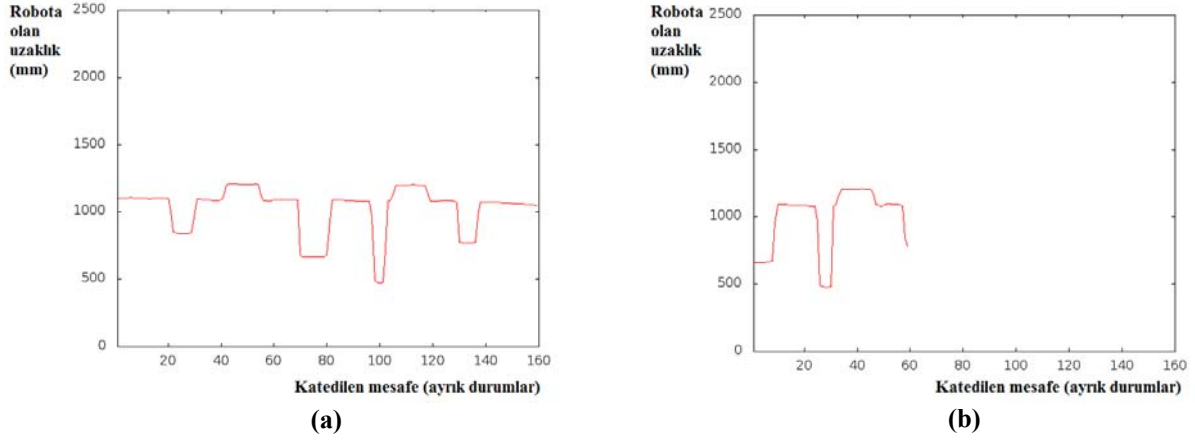
0.70	0.18	0.12	0.00
------	------	------	------

(d) Normalizasyon sonrası ihtimal dağılımı

Şekil 2. Algı-hareket döngüsünün tek bir iterasyonunun uygulanması örneği.

3. PIONEER P3-DX ARAŞTIRMA ROBOTU İLE BİR BOYUTLU KONUMLANDIRMA

Yapılan deneyler için ortam olarak Orta Doğu Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü içindeki çeşitli koridorlar seçilmiştir. Seçilen koridorların bir tarafı düz bir duvar, diğer tarafı ise kapı girintileri ve derinliği çeşitlendirmek amacıyla gelişigüzel olarak yerleştirilmiş diğer çeşitli cisimlerden oluşmaktadır. Robot, deneyler için kapı girintileri ve diğer cisimlerin olduğu duvar tarafını taramıştır. Tarama işleminde robot, üzerinde bulunan sonar sensörlerinden birini kullanmış ve sadece bu sensörün hizasında bir boyutlu derinlik bilgisi toplamıştır. Bunu yaparken robotun duvara belirli bir mesafedeki (sanal) düz bir çizgi üzerinde saniyede 2 ile 10 cm arasında değişen hızlarla ilerlemesi sağlanmıştır. Robotun hızı her deneyde, deney boyunca sabit tutulmuştur, fakat farklı deneylerde farklı sabit hızlar deneyerek sonar sensöründen



Şekil 3. (a) Koridorun referans derinlik haritası. (b) Test verisi.

yeterince hızlı veri alınabildiği sürece, kullanılan tekniğin robotun hızından etkilenmemesi gerektiği gerçeği gözlemlerle de doğrulanmıştır. Robot genelde ortalama olarak 8 metre ilerleyerek referans harita için derinlik bilgisi toplamıştır. Elde edilen bu bilgi, 5 santimetrelik hücreler halinde ayrıştırılmış, oluşan 160 hücrenin her birine bir adet ortalama derinlik bilgisi atanmıştır. Bu değer, aslında her milimetre için alınan derinlik bilgilerinin (bir hücre için 50 tane) ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Şekil 3 (a)'da örnek bir referans derinlik haritası görülmektedir.

Bu aşamanın ardından robot, koridorun kendisinin bilmediği rastgele bir noktada çalıştırılmış ve 3 metre ilerleyerek test verisi toplaması sağlanmıştır. Toplanmış olan örnek bir test verisi Şekil 3 (b)'de gösterilmektedir. Bu veri toplanırken robot bir yandan da katettiği her hücre için (5 santimetre) her bir ayrık durumda olma olasılığını hesaplamaktadır. Robotun hareketiyle birlikte çeşitli anlar için tahmin durumları Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4 (a), başlangıçta olasılıkların eşit dağıldığını göstermektedir. Şekil 4 (b)'de robot yaptığı gözlemler sonucu tahmin durumunu güncellemekte, ve koridorun birkaç noktası düşük olasılıklarla da olsa ön plana çıkmaktadır. Şekil 4 (c)'de artık bir nokta belirgin bir şekilde robotun gerçek konumunu temsil ederken, Şekil 4 (d)'de bu nokta deney boyunca aldığı en yüksek olasılık değerine ulaşmaktadır. Şekil 5'te ise robotun bu çalışma prensibi ve ihtimal dağılımlarının gelişimi görselleştirilmektedir.

4. HAVA ARAÇLARI İÇİN İKİ BOYUTLU KONUMLANDIRMA SİMÜLASYONU

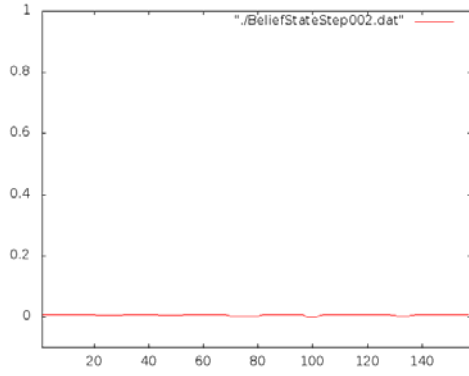
Hava araçları için konumlarını tespit edebilmeleri, bu araçların hareket alanlarının genişliği ve hızları göz önüne alındığında diğer araçlardan daha fazla önem arz etmektedir. Bu yetenek için hava aracına bağlı bir kamera yardımıyla yeryüzünün görüntüsünü alma, bu görüntüleri bölgenin yine bir hava aracıyla önceden çekilmiş ya da bir uydudan alınmış görüntüleriyle karşılaştırma gibi görüntü işlemeyle dayalı çalışmalar

yapılmıştır [4, 16, 17, 18, 19]. Dokümanın bu kısımda ise hava araçları için yeryüzü derinlik bilgisi kullanılarak konumlandırma yapılması yöntemi incelenmiştir.

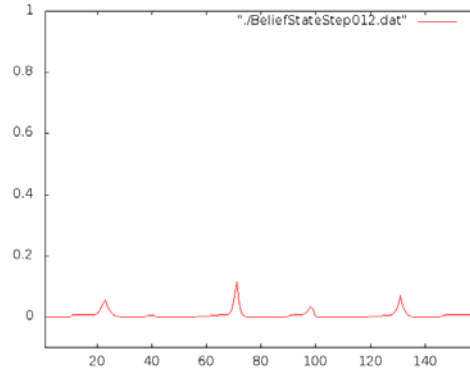
Pioneer robot ile düz bir çizgi boyunca bir boyutlu derinlik bilgisi kullanılarak konumlandırma yapılmışken, burada dikdörtgen şeklinde iki boyutlu bir alanın derinlik bilgisi kullanılarak konumlandırma yapılmıştır. Örnek olarak, bir hava aracının referans derinlik haritası önceden belirlenmiş bir alan üzerinde uçuşması ve ayrıştırılmış bu harita üzerinde konumunu tespit etmesi Java programlama dili kullanılarak hazırlanmış bir simülasyon vasıtası ile gösterilmiştir.

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) [20] gibi bir donanımına sahip bir hava aracı, yeryüzünü tarayarak derinlik bilgisi toplayabilecektir. Bu bilgi, referans derinlik haritasıyla karşılaştırılarak, Pioneer robotta olduğu gibi konum tespiti yapılabilir. Örneğin, hava aracının tarayacağı alanı 1 kilometrekarelik ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) hücrelere ayırılım ve hava aracının gözlemlerini 9 kilometrekarelik ($3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$) alanlar şeklinde yaptığını düşünelim. Bu varsayımda araç gözlemini merkezdeki 1 km^2 'lik bölge üzerinde bulunduğu sırada yapmaktadır ve her bir gözlemede, o an üzerinde bulunduğu hücreyi ve bu hücrenin hemen çevresinde bulunan 8 komşu hücreyi radarı ile taramış olacaktır.

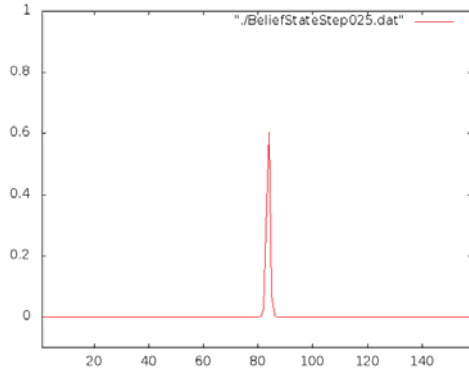
Şekil 6 (a)'da iki boyutlu bir referans derinlik haritası örneği görülmektedir. Pioneer robot üzerinde yapılan deneylerde her milimetre için yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak 5 santimetrelik bir hücreyi temsil eden tek bir derinlik değeri hesaplanmıştır. Burada da 1 kilometrekareden daha küçük birim alanların ortalama yükseklikleri kullanılarak 1 kilometrekarelik hücreler temsil edilebilir. 1 kilometrekare olarak seçilen bu birim alan, aslında kullanılan radar ya da sensörün çözünürlüğüne göre değişkenlik arz edecektir. Şekil 6 (b)'de ise aracın tek bir gözlemiyle taradığı alan temsil edilmiştir. Araç aldığı bir gözlem bilgisini referans haritadaki tüm 3×3 'lük alt matrislerle karşılaştıracak ve her biri ile bir benzerlik yüzdesi oluşturacaktır.



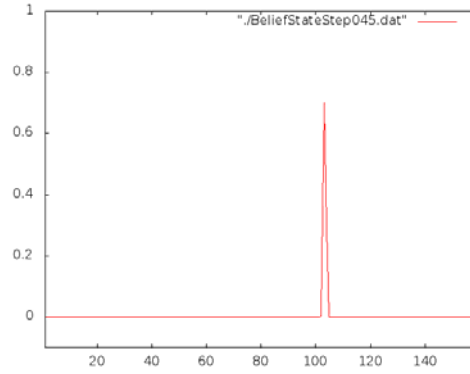
(a) 2. adım



(b) 12. adım

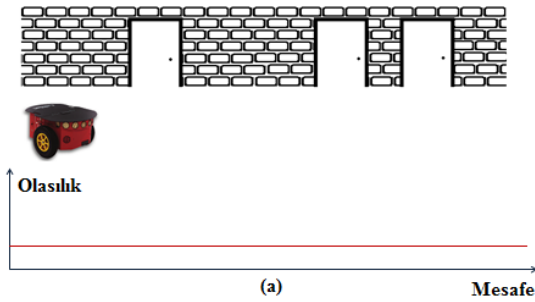


(c) 25. adım

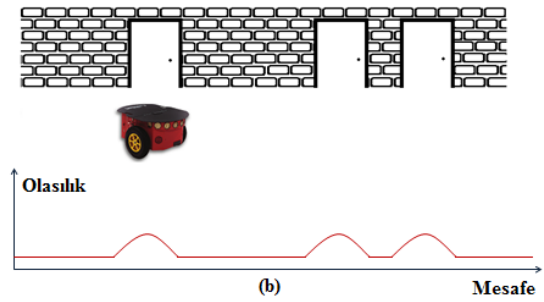


(d) 45. adım

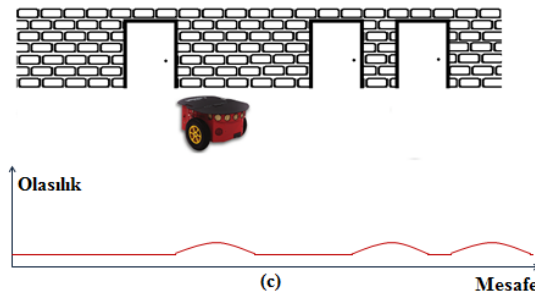
Şekil 4. Çeşitli adımlardaki ayrık durum olasılıklarının dağılımları. Yatay eksenler ayrık hücreleri, dikey eksenler ise hücrelerde bulunma olasılıklarını gösterir.



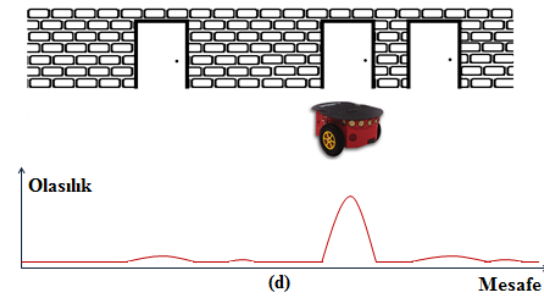
(a)



(b)

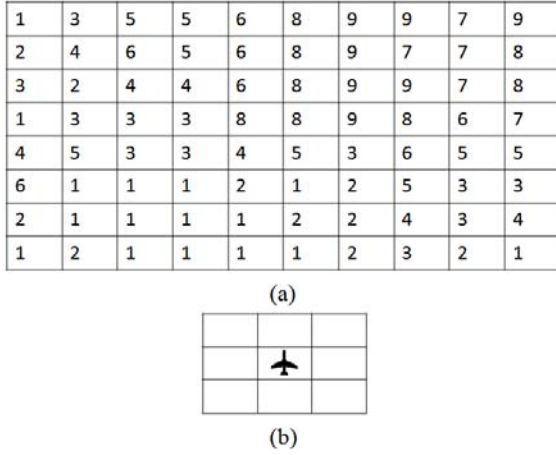


(c)



(d)

Şekil 5. Robotun gözlemler sonucu tahmin durumunu iyileştirmesi.



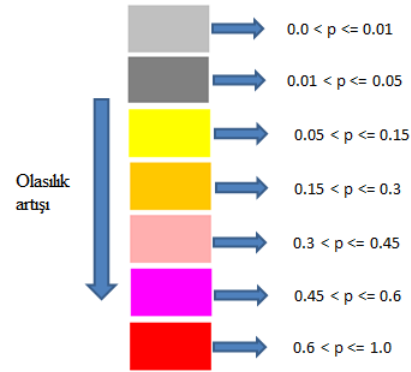
Şekil 6. (a) Rastgele ortalama yükseklik verileriyle oluşturulmuş örnek bir referans harita. **(b)** Uçağın gözlem yaptığı alanı temsil eden 3x3'lük çerçeve.

Burada matrislerin örtüşen indislerindeki değerler birbirinden çıkarılarak bir değer hesaplanmaktadır. İki matris birbirine benzer değerler taşıyorsa çıkarma işlemi sonucunda arada büyük bir fark oluşmayacak, dolayısıyla benzerlik yüzdesi büyük olacaktır. Böylece araç her yaptığı gözlemin ardından referans haritadaki tüm hücreler üzerinden geçecek ve her ayrı hücrenin olasılık değerini güncelleyecektir. Ayrıca araç belli bir yöne doğru bir veya birkaç hücre miktarı yaptığı ilerlemeleri de yine hücrelerin ihtimallerini ilerleme yönünde kaydırarak güncellemesine yansıtacaktır.

Gerçek dünyada aracın yaptığı gözlemlerde mutlaka bir hata payı olacaktır. Bu gürültü, gerçekleştirilen simülasyonlarda da göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan gözlemlerde oluşabilecek gürültünün yanı sıra rüzgar, donanım/ölçüm arızaları, vb. nedenlerle araç zannettiğinden az ya da daha fazla ilerleyerek geçiş modelinde de bir hata payı doğurabilir. Uygulamada bu hata paylarına da çeşitli olasılık değerleri atanarak yer verilmiştir.

Büyüklüğü sebebiyle sonraki sayfada sunulmuş olan Şekil 7'de ayrı simülasyon ortamında hava aracının yerini tahmin etme sürecinden seçilmiş birkaç kesit gösterilmiştir. Hücrelerin içerisindeki gri şerit, söz konusu hücrede bulunma olasılığına göre renk değiştiren bir alandır. Olasılık dağılımlarına göre renklerdeki değişim Şekil 8'de verilmiştir. Hücrenin olasılık değeri arttıkça rengi griden kırmızıya doğru değişecektir. Ayrıca, o hücrede bulunma olasılığının nümerik olarak değeri de yine renkli şeritlerin üzerinde yazmaktadır. Şekil 7 (a)'da simülasyon yeni başlatılmış, başka bir deyişle aracın nerede olduğunu bilmediği bir noktadan yeni havalandığı varsayımı yapılmıştır. Bu nedenle olasılıklar tüm hücrelere eşit olarak dağıtılmış ve hücreler aynı rengi almıştır. Şekil 7 (b)'de ise araç başlangıç hücresinde bir gözlem yapmış ve ayrıca 2 adım kadar doğu yönüne doğru ilerlemiştir. Bu ilerlemeler sonucu geçiş modeli devreye girmiştir. Bu gözlem ve ilerlemeler sonucu

aracın bulunduğu gerçek konumun olasılığı artmaya başlamıştır. Şekil 7 (c)'de araç doğuya doğru olan hareketini sürdürmüştür. Bu hareket sonrası aracın bulunduğu hücrenin olasılığı %16'yı bulduğu gibi, ard arda doğu yönünde yapılan hareketler sonrası batı tarafındaki hücrelerde bulunma olasılıkları da iyice düşmüştür. Şekil 7 (d)'de doğu ve sonrasında da güney yönünde atılmış olan yaklaşık 14 adım sonra aracın yerini %60'lara varan yüksek bir olasılıkla tespit ettiği görülmektedir. En yüksek olasılıklı durumun olasılığı ve kaç adım sonra yeterince yüksek bir olasılık değerine ulaşılacağı gibi hususlar, seçilen ortamın yüzey derinlik çeşitliliğine ve sensör ve geçiş modellerindeki gürültü miktarlarına göre değişecektir.



Şekil 8. Olasılık artışına bağlı renk değişimi.

5. GERÇEK VERİLER İLE İKİ BOYUTLU KONUMLANDIRMA SİMÜLASYONU

Bu bölümde, bir önceki bölümde anlatılan iki boyutlu konumlandırma uygulaması, referans harita olarak DTED (Seviye Sıfır) yükselti verileri kullanılarak ve gerçek hava araçlarının uçuş hızları baz alınarak tekrar edilmiştir. Ayrıca SAR benzeri derinlik ölçücü sensörlerin 100 metrelik bir standard sapmaya varan Gaussian dağılımlı gürültüye sahip ölçümler yaptığı varsayılmıştır. Seçilmiş ve uygulanmış olan bu gürültü miktarı aslında çok fazladır. Günümüz SAR radarları 10 cm çözünürlükte ölçüm yapabilmekte, hatta ultra-geniş bant sistemler kullanıldığında birkaç milimetre hassasiyette ölçümler bile elde edilebilmektedir. Yine de uygulanan yöntemin güvenilirliğini incelemek amacıyla son derece gürültülü bir sensör benzetimi yapılmış, ve buna rağmen hava aracının çok kısa süreler içinde doğru bir şekilde gerçek konumunu tespit ettiği gözlemlenmiştir.

DTED Seviye Sıfır verilerinde çözünürlük 30/3600 derecedir (30 arc seconds). Bu da yaklaşık olarak her kenarı 1 km uzunluğundaki kareler için bir yükseklik verisi demektir. Daha büyük seviyelerde (yani daha detaylı çözünürlüklerde) DTED verileri de mevcuttur. Fakat bu çalışmada, yine uygulanan tekniklerin güvenilirliğini ölçebilmek için en düşük çözünürlük olan Seviye Sıfır DTED verileri kullanılmıştır.

Mesafe Ölçümü Tabanlı Güvenilir Konum Tespiti Teknikleri ve Kara ve Hava Araçları için Örnek Uygulamalar

0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694
0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694	0.00694

(a)

9.0E-5	3.5E-4	0.01106	0.01092	0.00698	0.00789	0.00704	0.00637	0.00435	0.00823	0.00777	0.00694
1.4E-4	6.1E-4	0.00724	0.00662	0.00746	0.00704	0.0069	0.00972	0.00849	0.00921	0.00702	0.01171
1.2E-4	6.1E-4	0.00635	0.0080	0.00936	0.00435	0.00984	0.00603	0.00915	0.00798	0.01275	0.00618
1.4E-4	5.8E-4	0.01103	0.00862	0.0056	0.01073	0.00832	0.01089	0.01006	0.00883	0.00902	0.00729
1.4E-4	6.4E-4	0.00622	0.00799	0.0202	0.00817	0.00681	0.00659	0.00901	0.00691	0.00688	0.01407
1.3E-4	7.5E-4	0.01056	0.00768	0.00511	0.00617	0.00842	0.00723	0.0098	0.00769	0.00667	0.0061
1.4E-4	4.7E-4	0.00638	0.00992	0.00943	0.01169	0.00919	0.00601	0.00808	0.00788	0.00929	0.00834
1.2E-4	5.6E-4	0.00932	0.00687	0.01046	0.0092	0.00869	0.00787	0.00708	0.0087	0.00995	0.00886
1.1E-4	5.3E-4	0.00633	0.00899	0.00746	0.00546	0.00826	0.01123	0.0098	0.00835	0.00571	0.00975
1.3E-4	4.7E-4	0.00764	0.00737	0.01231	0.01099	0.00896	0.0078	0.00573	0.00858	0.00835	0.00715
1.3E-4	6.9E-4	0.00975	0.00641	0.0075	0.0090	0.00755	0.00844	0.00658	0.00564	0.00697	0.00963
9.0E-5	2.8E-4	0.00528	0.00858	0.00875	0.00906	0.00802	0.00662	0.01134	0.0056	0.0071	0.00651

(b)

Şekil 7. (Sonraki sayfada devam ediyor).

Mesafe Ölçümü Tabanlı Güvenilir Konum Tespiti Teknikleri ve Kara ve Hava Araçları için Örnek Uygulamalar

0.0	0.0	0.0	0.0	5.0E-5	1.3E-4	0.00106	0.00207	0.01748	0.01719	0.00771	0.01419
0.0	0.0	0.0	0.0	7.0E-5	2.4E-4	0.00217	0.00311	0.02281	0.01281	0.01977	0.01371
0.0	0.0	0.0	1.0E-5	4.0E-5	2.9E-4	9.1E-4	0.00292	0.01378	0.02318	0.01804	0.01217
0.0	0.0	0.0	0.0	9.0E-5	2.7E-4	0.00248	0.00442	0.01649	0.02483	0.02631	0.01603
0.0	0.0	0.0	1.0E-5	8.0E-5	3.0E-4	0.0017	0.00371	0.01617	0.02628	0.16361	0.01657
0.0	0.0	0.0	0.0	7.0E-5	3.6E-4	0.00149	0.00574	0.01255	0.01343	0.02251	0.02033
0.0	0.0	0.0	1.0E-5	1.1E-4	3.0E-4	0.00136	0.00397	0.0099	0.01654	0.0167	0.02137
0.0	0.0	0.0	1.0E-5	1.1E-4	3.0E-4	0.00199	0.00322	0.01458	0.02452	0.023	0.02668
0.0	0.0	0.0	0.0	7.0E-5	3.7E-4	0.00295	0.00423	0.018	0.01284	0.01731	0.0195
0.0	0.0	0.0	1.0E-5	9.0E-5	3.2E-4	0.00206	0.00293	0.01563	0.01423	0.01523	0.01514
0.0	0.0	0.0	0.0	6.0E-5	2.6E-4	0.00211	0.00346	0.01324	0.01226	0.01975	0.01084
0.0	0.0	0.0	0.0	5.0E-5	2.2E-4	9.2E-4	0.00265	0.00434	0.00621	0.00949	0.00626

(c)

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0E-5	2.0E-5	2.0E-5	4.0E-5	4.0E-5	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	1.0E-5	4.0E-5	6.0E-5	7.0E-5	1.2E-4	2.2E-4	2.8E-4	3.0E-5
0.0	0.0	0.0	0.0	2.0E-5	1.0E-4	2.0E-4	4.7E-4	3.8E-4	6.3E-4	7.6E-4	8.0E-5
0.0	0.0	0.0	1.0E-5	4.0E-5	1.6E-4	7.3E-4	0.00117	0.00244	0.00159	0.00141	2.0E-4
0.0	0.0	0.0	1.0E-5	9.0E-5	2.7E-4	0.00117	0.00187	0.00611	0.00342	0.00507	3.4E-4
0.0	0.0	0.0	4.0E-5	1.4E-4	3.8E-4	8.1E-4	0.0033	0.01253	0.00624	0.00484	0.00101
0.0	0.0	0.0	2.0E-5	1.6E-4	4.3E-4	0.00197	0.00551	0.00948	0.01744	0.02083	0.00181
0.0	0.0	0.0	3.0E-5	2.6E-4	3.3E-4	0.00165	0.00356	0.0233	0.03092	0.06787	0.00692
0.0	0.0	0.0	1.0E-5	6.0E-5	2.5E-4	0.00123	0.00346	0.01179	0.03729	0.60395	0.03872
0.0	0.0	0.0	0.0	1.0E-5	3.0E-5	1.0E-4	4.2E-4	0.00137	0.00375	0.03201	0.01377

(d)

Şekil 7. Hava aracının ayrık simülasyon ortamında kendini konumlandırması.

Bir önceki bölümde olduğu gibi hava aracı, bilmediği bir konumdan hareket etmekte, ve yine 3×3'lük bir hücre grubu üstünde gözlem yapmaktadır. Fakat gerçek hava aracı hızları uygulanan bu deneylerde her adımda tam 1 hücre uzunluğunda yol almak mümkün değildir. DTED Seviye Sıfır hücreleri büyük oldukları için hava aracı zaman zaman birkaç adım boyunca aynı hücre içinde kalıp, aynı gözlemleri (büyük miktarda rastgele gürültü eklenmiş olarak) yapmak durumundadır. Bir önceki örnekten farklı olmasına rağmen bu husus, sonuç itibarıyla konum tespitinin güvenilirliğini etkilememiştir. Bu noktalar dışında bir önceki bölümdeki deneylerin uygulanış şekli her hangi başka bir değişiklik yoktur.

Bu bölümde sunulacak olan deney sonuçlarında ortak olan değerler şu şekildedir:

- Hava aracı 800 km/saat sabit hızla yol almaktadır.
- Her bir adım (iki gözlem arası) bir saniye gibi bir süreye denk gelmektedir ve her bir adımda hava aracı yaklaşık 222 metre yol katetmektedir.

Şekil 9 ve Şekil 10'da örnek tipik bir deneyin sonuçları görülmektedir. Hava aracı Ankara'dan havalanıp İstanbul'a doğru Şekil 9 (a)'daki kesikli çizgi ile gösterilen düz bir rota üzerinde uçmaktadır (fakat kendisi başlangıçta nerede olduğunu bilmemektedir). Her adımda bir gözlem yapıp, gözlem sonuçlarını tahmin durumuna yansıtılmaktadır. Ayrıca hava aracının bir pusulası ve hız ölçeri olduğu ve ne yöne doğru hangi hızda gitmekte olduğunu ölçebildiği varsayılmıştır. Hava aracı, bu bilgileri kullanarak, yine her adımdan sonra tahmin durumunu hareket modeline göre de güncelleyebilmektedir. Şekil 10'da, tahmin durumunun çeşitli adımlardaki değeri görülmektedir. Tahmin durumu, temel olarak aracın bulunabileceği noktalar üzerinde bir ihtimal dağılımıdır. Şekil 10'da yüksek ihtimaller siyaha yakın ve düşük ihtimaller beyaza yakın olacak şekilde grinin tonları renklerle ifade edilmişlerdir. Bu renklendirme lineer değil logaritmik bir renklendirme olduğu için birbirine yakın tonlardaki renkler aslında çok farklı ihtimalleri temsil edebilmektedirler. Fakat genel olarak koyu tonlar her zaman daha yüksek ihtimalleri temsil etmektedir. Yine Şekil 10'daki ufak resimlerde biri büyük biri küçük olmak üzere 2 adet kare bulunmaktadır. Küçük kare, aracın gerçek yerini, büyük kare ise aracın tahmin durumundaki en yüksek ihtimale sahip olan pozisyonu (*most likely state, MLS*) göstermektedir. Araç kendini doğru biçimde konumlandırmayı başardığında, her iki kare eş merkezlere sahip olmakta ve bu durumlarda büyük kare yerine büyük bir daire çizilmektedir. Şekil 10'da görüldüğü üzere aracın ilk tahmini, olası her durum üzerine eşit olarak dağılmış olan ihtimallerden oluşmaktadır. Yani araç ilk konumu hakkında hiçbir şey bilmemektedir. Sonraki adımlar boyunca araç, yaptığı gözlemlere dayanarak bulunma ihtimali olan yerleri gittikçe daraltmış ve belli sayıda adım attıktan sonra kesin bir şekilde gerçek konumunu belirlemiştir.

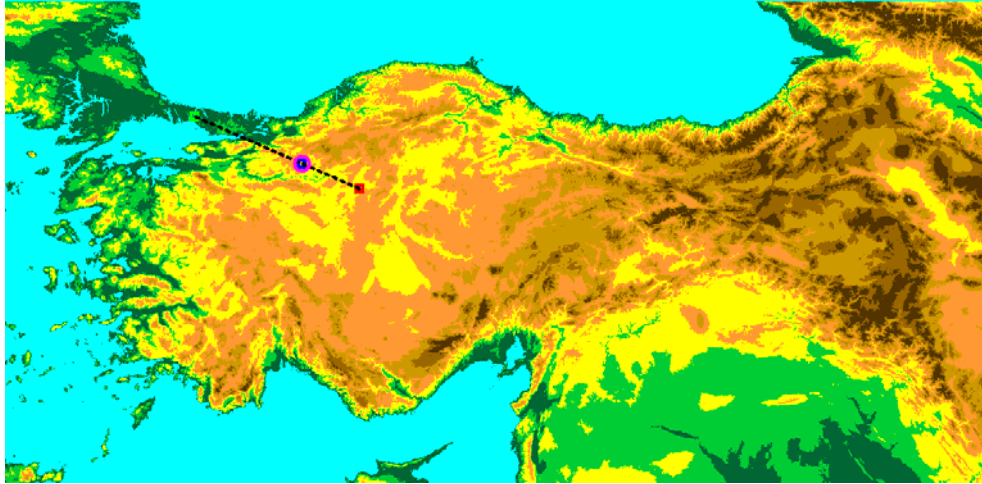
Sonrasında ise doğru konum bilgisini korumaya devam etmiştir. Bu deneydeki önemli anlar şu şekilde özetlenebilir:

- 8 adım atıldıktan sonra, yani henüz 2 km bile uçulmamış iken, ilk lokalizasyon gerçekleşmiştir. Tahmin durumu içinde en yüksek ihtimale sahip konumun (MLS) ihtimal değeri $1.47711E-4$ 'tür.
- Gerçekleşen lokalizasyona düşük bir ihtimalle erişilmiş olduğu için ve çok yüksek gürültülü gözlemler yapıldığı için lokalizasyon geçici olarak kaybedilmiş, sonrasında 23. adımda, yani 5 km'nin biraz üzerinde bir uçuş mesafesi sonrası, tekrar kazanılmıştır.
- Bu noktadan sonra hava aracı sürekli olarak doğru konum bilgisini korumuş ve ihtimalini artırmıştır.
- 100. adımda MLS ihtimal değeri 0.9999967'dir.
- 200. adıma gelindiğinde ise MLS ihtimal değeri 0.999999999998563 olarak hesaplanmıştır.

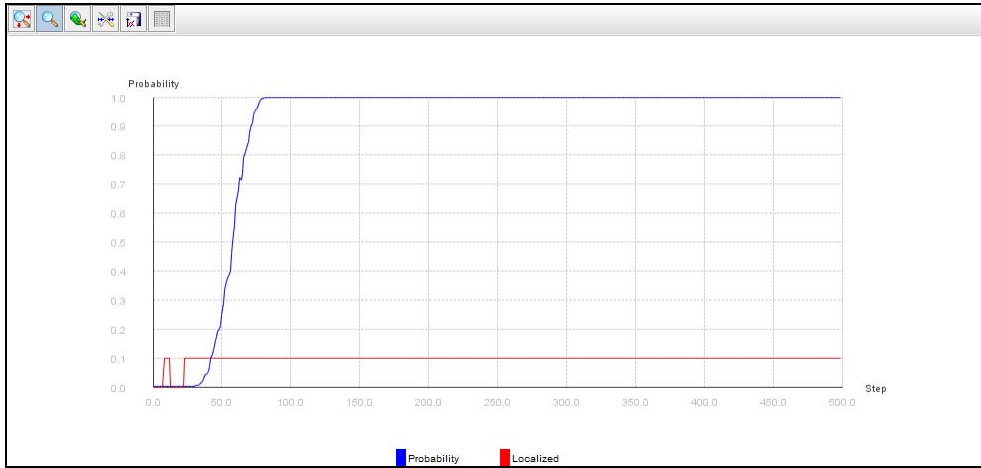
Şekil 9 (b)'de, aktarılan bilgileri özetleyen iki adet grafik (aynı eksenler üzerinde) gösterilmektedir. Yatay eksen adımları, dikey eksen ise 0 ile 1 arası ihtimal değerlerini ifade eder. Mavi renkli grafik, MLS ihtimal değerlerini, kırmızı renkli grafik ise lokalizasyonun sağlanıp sağlanmadığını işaret etmektedir. Kırmızı renkli grafik için lokalizasyon yok ise 0, var ise 0.1 değeri seçilmiştir. 0.1 değerinin sıfırdan farklı olması dışında herhangi özel bir anlamı yoktur.

Şekil 11'de 3 adet deneyin daha sonuçları toplu olarak grafikler üzerinde aktarılmıştır. Şekil 11 (a)'daki ilk deneyde uzun bir süre Tuz Gölü üzerinde uçan araç, yaptığı gözlemlerin yeterince ayırıcı olmaması sebebiyle kendi konumunu tespit etmekte zorlanmıştır. Tuz Gölü bölgesi geçildikten sonra da Türkiye'nin birbirine benzer birçok bölgesi ile aynı karakteristikte bir bölge üzerinde uçulduğu için lokalizasyon yavaş yavaş sağlanabilmiştir. Şekil 11 (b)'de ise deniz üstünde bir süre uçan ve yine konumunu tespit etmekte zorlanan hava aracı, kıyıya varır varmaz Karadeniz Bölgesi'nin ayırıcı yeryüzü dokusu ile karşılaşmış ve konumunu çabucak tespit etmiştir. Şekil 11 (c)'deki son örnekte ise Erzurum'dan hareket eden hava aracı, bölgenin ayırıcı dağlık dokusu sayesinde hemen hemen ilk adımlarından itibaren konumunu doğru olarak tespit etmiş ve bu bilgiyi uçuşu boyunca korumuştur.

Bu bölümde sunulan deneylerden çıkartılabilecek ortak sonuç, kullanılan yöntemin son derece güvenilir olduğu ve yeterli ayırıcılıkta gözlemler yapılır yapılmaz doğru sonuçları ürettiği tespitidir. Yöntem aynı zamanda farklı uçuş irtifaları ve değişken uçuş hızlarında da aynı güvenilirlikte çalışabilmektedir. Uçuş irtifasının temel olarak yöntem etkisi, kullanılan sensörün belirlenen irtifada doğru biçimde faaliyet gösterip gösteremeyeceği ve ihtiyaç duyulacak veriyi doğru formatta sunup sunamayacağı ile ilgilidir.

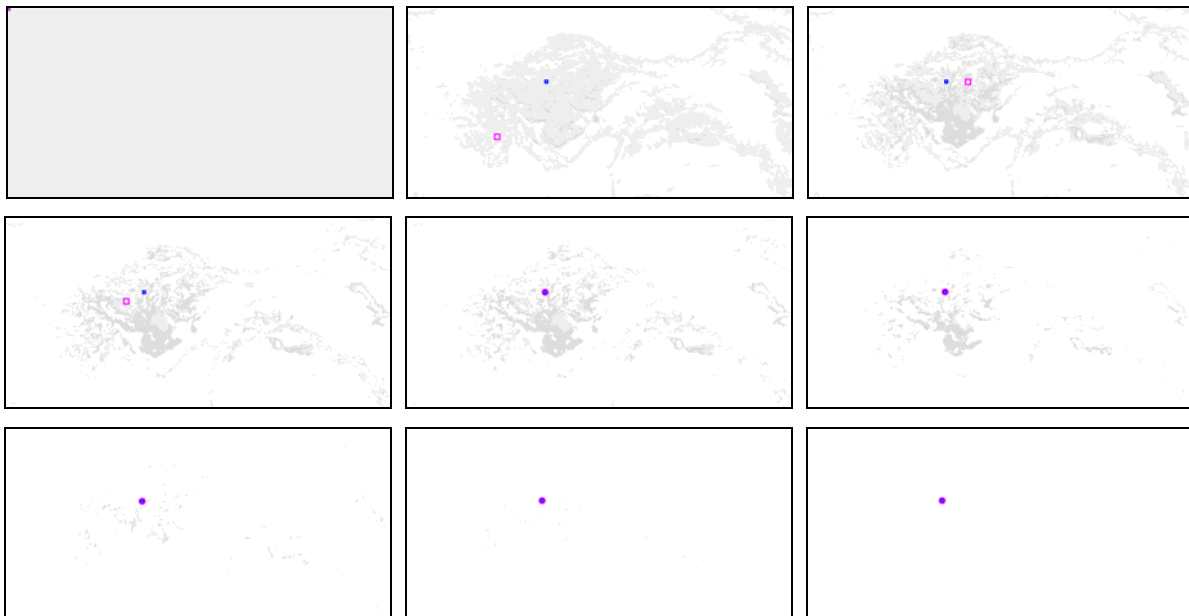


(a)

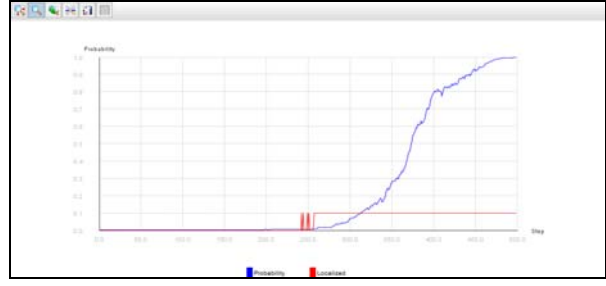
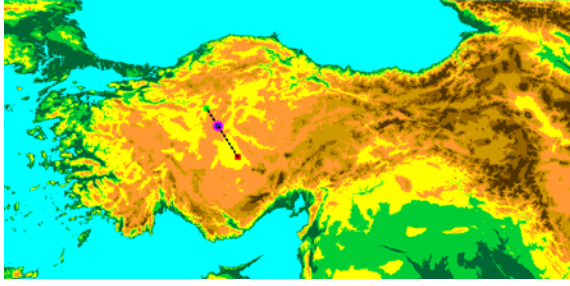


(b)

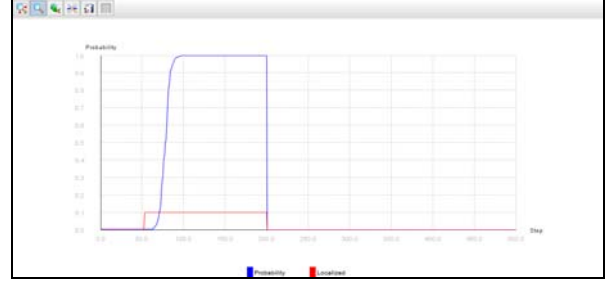
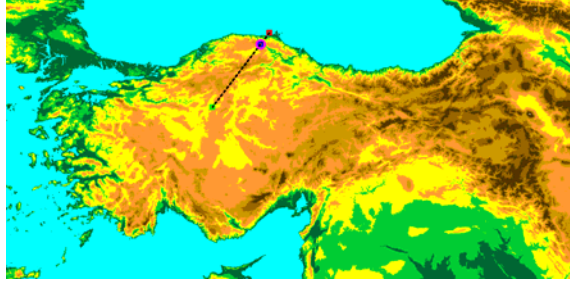
Şekil 9. (a) Türkiye DTED verisi ve Ankara-İstanbul uçuş rotası. (b) İhtimal ve konum tespit durumu grafikleri.



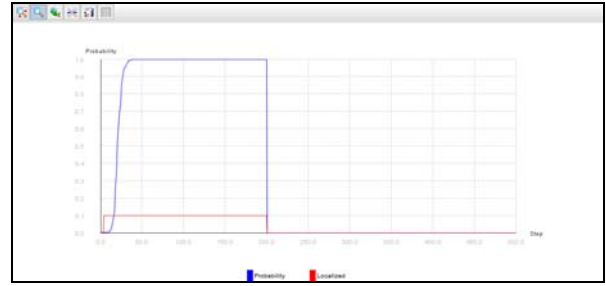
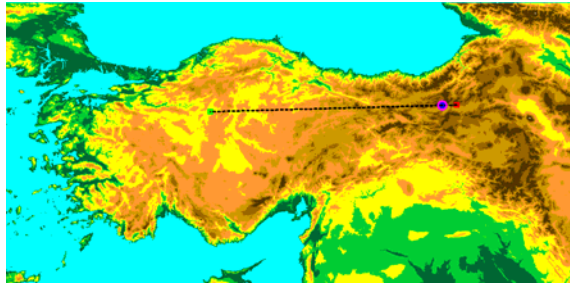
Şekil 10. Soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğru 0, 1, 2, 5, 8, 23, 50, 75 ve 85. adımlardaki ihtimal dağılımları.



(a) Aksaray'dan Tuz Gölü üzerinden Ankara'ya uçuş ve ihtimal/konum tespit durumu grafikleri (500 adım).



(b) Karadeniz'den başlayıp Sinop'tan Ankara'ya uçuş ve ihtimal/konum tespit durumu grafikleri (200 adım).



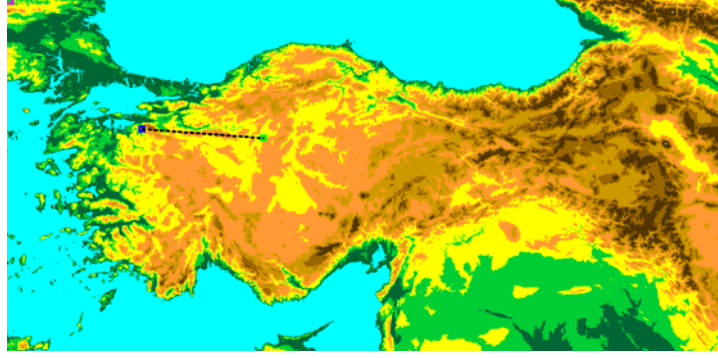
(c) Erzurum'dan Ankara'ya uçuş ve ihtimal/konum tespit durumu grafikleri (200 adım).

Şekil 11. Çeşitli zorluklardaki konum tespiti örnekleri ve grafikler.

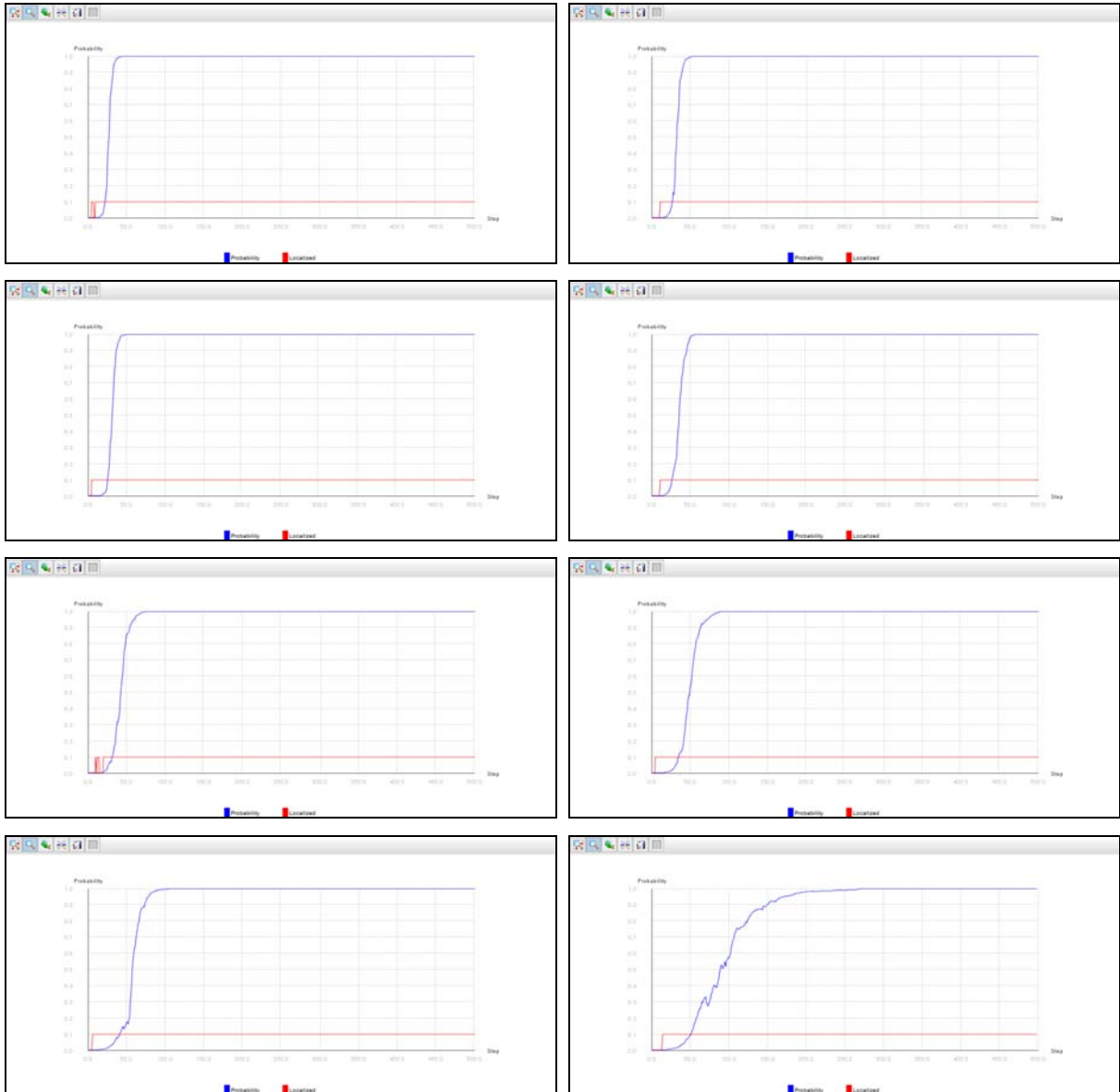
Dolayısıyla, aslında bu çalışmada ortaya konulan tekniklerin güvenilirliği ile doğrudan bir ilgisi olmasa da, özellikle günümüzde kullanılan SAR radarlarının çok gelişmiş yapılarda oldukları ve çok değişken irtifalarda rahatlıkla gerekli veriyi toplayabildiklerini söylemek mümkündür. SAR sistemleri 3 ile 4 km gibi düşük irtifalarda kullanılabildikleri gibi [21], yüzlerce kilometre uzaklıktan gezegenlerin yüzeylerini taramak için de kullanılabilmektedirler, ve sağladıkları verinin çözünürlüğü, bu çalışmada kullanılan DTED (Seviye Sıfır) verilerinden çok daha yüksektir.

Değişken uçuş hızlarının sunulan yöntemlerin performanslarına etkisi ise temelde konum tespiti sürelerinin değişmesi yönündedir. Bunun sebebi, hızlı giden bir aracın genel olarak daha kısa süreler içinde ayırdedici nitelikte gözlemler yapabilme ihtimalinin daha fazla olmasıdır. Yavaş giden bir araç, özellikle de DTED Seviye Sıfır gibi düşük çözünürlüklü bir referans haritası kullanıyorsa, bir hücreden diğerine geçinceye kadar sürekli birbirine çok benzer gözlemler yapacak, ve ancak diğer hücreye geçtikten sonra farklı bir gözlem yaparak konumunu belirlemek için faydalı olabi-

lecek bir bilgi toplamış olacaktır. Buna mukabil, hızlı giden bir araç, hücreler arasında daha hızlı hareket edeceği için, daha kısa süreler içinde konumunu tespit etmesine yarayacak farklı gözlemler yapma şansı bulacaktır. Şekil 12'de, seçilen bir rota üzerinde farklı hızlarda hareket edildiği zaman konum tespitinin hangi adımlarda gerçekleşebileceği ile ilgili bir örnek sunulmuştur. Şekil 12 (a)'da gösterilen Bursa-Ankara arası uçuş rotası, sırası ile 1000, 800, 600, 400, 200, 100, 50 ve 10 km/saat hızlarda uçulmuş ve Şekil 12 (b)'deki grafiklerde de görüldüğü gibi hız düştükçe, konum tespiti için daha fazla adım atılması gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır. Daha fazla adım atmak, aslında referans haritada hücreler arasında geçiş yaparak ayırdedici gözlemler yapabilme şansı bulmak anlamına gelmektedir. Dolayısıyla aslında gözlemlerin sayısının değil ayırdedici olmalarının önemi bu örnekte de yine ortaya çıkmaktadır. Yine Şekil 12 (b)'deki grafiklerde görüldüğü gibi, hızdan bağımsız olarak, yeterli gözlem yapıldığında aracın konumu, kullanılan teknikler ile doğru ve güvenilir bir biçimde (çok yüksek ihtimal değerleri ile) tespit edilebilmektedir.



(a) Bursa'dan Ankara'ya uçuş rotası.



(b) Soldan sağa ve yukarıdan aşağıya sırasıyla 1000, 800, 600, 400, 200, 100, 50 ve 10 km/saat hızlardaki uçuşlar için ihtimal/konum tespit durumu grafikleri.

Şekil 12. Aynı güzergah üzerinde çeşitli hızlardaki konum tespiti örneklerine ait grafikler.

1000 ile 10 km/saat arasında değişen hızlarda yapılan bu deneyler sonucunda, sunulan tekniklerin hemen hemen tüm ticari/askeri hava araçları, insansız hava araçları ve hatta model uçak/helikopter kategorisindeki hava araçları üzerinde rahatlıkla uygulanabileceği görülmektedir. Özellikle insansız araçlar için örnek vermek gerekirse Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk ortalama 575 km/saat hızla, General Atomics MQ-1 Predator ise ortalama 150 km/saat hızla uçabilmektedir. Yerli insansız hava araçlarımızdan TUSAŞ Anka ise ortalama 200 km/saatlik bir uçuş hızına sahiptir. Model hava araçları kategorisinden bir örnek ise 18 km/saat hızla ulaşabilen Parrot AR Drone helikopteridir. Özetle, uygun sensörleri taşıyabilen herhangi bir hava platformu üzerinde çok değişken hızlarda konum tespiti yapabilmek mümkündür.

6. ÇOK BOYUTLU KONUMLANDIRMA

Şimdiye kadar sunulmuş olan uygulamalarda bir ve iki boyutlu gözlemler yapılarak, yine bir ve iki boyutlu referans haritaları ile karşılaştırılmıştır. Her bir boyut, aslında yeni bir bilgi kaynağı demektir. Her problemin çözümünde olduğu gibi konum tespitinde de daha fazla bilgi, daha hızlı ve verimli çözümler anlamına gelmektedir. Örneğin DTED verileri kullanılan bir önceki bölümdeki deneyler sırasında hava aracına ek bir bilginin daha geliyor olması, hava aracının tahmin durumunu güncellerken birçok ihtimali hızla elimine etmesine yardımcı olacaktır. Mesela hava aracı herhangi bir şehir üzerinde uçarken o şehire ait olduğunu bildiği bir yeryüzü işaretini (*landmark*) tanıyabilirse, bu durumda tanıdığı işaretin görüş mesafesi dışında kalan tüm konum ihtimallerini sıfıra indirebilecektir. Yine benzer şekilde güneşin veya ayın hava aracından görünür konumları da, tahmin durumu güncelleme sırasında birçok pozisyonun olasılık ihtimallerini sıfırlayabilir. Sonuç olarak, ek bilgilerin mevcut olduğu durumlarda bu bilgiler ışığında çok daha hızlı ve daha yüksek ihtimallerle konum tespiti gerçekleştirilebilir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada Bayes Filtresi temelli konum tespiti metodları ortak olarak incelenmiş ve hem gerçek hem de simülasyon ortamlarında insansız ve otonom kara ve hava araçlarına uygulanmıştır. Kara aracı üzerindeki deneyler, bir boyutlu derinlik bilgilerinin yeterli ayırdedicilikte olması koşulu ile santimetre ve altındaki çok yüksek çözünürlüklerde konum tespiti yapılabileceği sonucuna işaret etmektedir. Java programlama dili kullanılarak oluşturulmuş olan simülasyon ortamlarında ise hava aracı uygulamaları gerçekleştirilmiş ve bu deneylerde de kullanılan referans haritaların çözünürlüğü oranındaki hassasiyetlerle hızlı ve yüksek ihtimalli konum tespitleri gözlemlenmiştir. Uygulamaların ortak sonucu olarak kullanılan metodların ve bu çalışma kapsamında uygulanış şekillerinin son derece verimli ve güvenli olduğu belirtilebilir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan metodların çeşitli diğer metodlar ile detaylı karşılaştırmaları, yazarlardan Dr. Temizer'in bu çalışmaya zemin hazırlayan önceki çalışmalarında sayısal sonuçları ile birlikte sunulmuştur [11, 12, 13]. Önceki çalışmalarda fazlaca yer almayan ve konum tespitinde önemli bir kategori olan Parçacık Filtresi (*Particle Filter*) tabanlı tekniklerin kendi aralarında karşılaştırmaları ile ilgili olarak da kapsamlı çalışmalar bulunmaktadır [22]. Parçacık filtresi tabanlı metodların bu dokümanda ele alınan Bayes filtresi tabanlı metodlar ile karşılaştırılmaları durumunda ise temel olarak şu husus ön plana çıkmaktadır: Bu çalışmada sunulan teknikler, sensör ve geçiş modellerini algı-hareket döngüsünün her iterasyonunda durum uzayının tüm elemanlarına uygulamaktadır. Normal olarak bu hesaplama yöntemi, çok büyük durum uzayları kullanıldığında performans kaybına sebep olmaktadır. Parçacık filtresi tabanlı metodlar ise, durum uzayı üzerinde örnekleme yaparak, sensör ve geçiş modellerini seçilen bazı durumlara uygulama temeline dayanmaktadır ve bu sayede performans kaybını azaltmayı hedeflemektedirler. Parçacık filtresi tabanlı metodlarda ayrıca algı-hareket döngüsünün her bir iterasyonunda bazı durumlar düşük ihtimalleri temsil ettikleri için elenirler ve bunun karşılığında tespit edilmek istenen konumu temsil ettiği varsayılan yeni durumlar, bir sonraki iterasyonda hesaplama katılarak durum tespiti problemi çözülmeye çalışılır.

Parçacık filtresi temelli metodların zayıf taraflarından birisi, eğer ilk konum hakkında herhangi bir ipucu yoksa, ilk önce ele alınabilecek durumların nasıl belirleneceği problemidir. Bir diğer problem ise, tüm durum uzayı yerine belirli bir altküme üzerinde işlem yapıldığı için, zaman zaman gerçek konum yerine, altküme içindeki gerçek konuma en yakın olan ama gerçek konum olmayan bir konumun tespit edilmesi olasılığıdır. Bu çalışmada kullanılan Bayes filtresi temelli çözümler, istisnasız bir biçimde tüm durum uzayı üzerinde uygulandığı için, parçacık filtresi temelli metodların belirtilen zayıf yönlerine göre üstünlük göstermektedirler. Ayrıca dokümanda sunulan örneklerin hepsi gerçek-zamanlı olarak çalışmaktadır ve parçacık filtresinin çözmeyi hedeflediği performans kaybı problemi yaşanmamıştır.

Konum tespiti uygulamalarında problemin ölçeğinin büyütülmesi ve/veya çözünürlüğün artırılması istenirse, Bayes filtresi temelli metodların performansının olumsuz etkilenmesi yüksek bir olasılıktır. Fakat parçacık filtresi benzeri tekniklerin kullanımına geçilmeden önce performansı artırmak adına denenebilecek yöntemler mevcuttur [11, 12, 13].

KAYNAKLAR

- [1] Costo, S., Molfino, R., “A New Robotic Unit for Onboard Airplanes Bomb Disposal”, *35th International Symposium on Robotics, ISR*, 2004.
- [2] Debenest, P., et al, “Expliner – Robot for Inspection of Transmission Lines”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3978-3984, 2008.
- [3] Nakatani, T., Ura, T., Sakamaki, T., Kojima, J., “Terrain Based Localization For Pinpoint Observation of Deep Seafloors”, *IEEE OCEANS 2009 – EUROPE*, 2009.
- [4] Karan, O., Eraslan, H. A., Kurnaz, S., “Topografik Bilgiler ve Uydu Görüntü Verilerini Kullanarak 3 Boyutlu Alan Tanıma Sistemi”, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Cilt No. 4, Sayı No. 4, pp. 31-40, 2010.
- [5] Eroğlu, O., Yılmaz, G., “A Novel Fast and Accurate Algorithm for Terrain Referenced UAV Localization”, *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, GA, ABD, pp. 660-667, 2013.
- [6] Temel, S., Ünalı, N., “Opportunities and Challenges of Terrain Aided Navigation Systems for Aerial Surveillance by Unmanned Aerial Vehicles”, *Kitapta Bölüm, Augmented Vision and Reality*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1-15, 2013.
- [7] Thrun, S., Fox, D., Burgard, W., “Robust Monte Carlo Localization for Mobile Robots”, *Artificial Intelligence*, No. 128, pp. 31-40, 2001.
- [8] Schiele, B., Crowley, J., “A Comparison of Position Estimation Techniques Using Occupancy Grids”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA-94)*, pp. 1628-1634, 1994.
- [9] Burgard, W., Derr, A., Fox, D., Cremers, A. B., “Integrating Global Position Estimation and Position Tracking for Mobile Robots: The Dynamic Markov Localization Approach”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'98)*, pp. 730-735, 1998.
- [10] Engelson, S., McDermott, D., “Error Correction in Mobile Robot Map Learning”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France*, pp. 2555-2560, 1992.
- [11] Temizer, S., Kochenderfer, M. J., Kaelbling, L. P., Lozano-Peréz, T., Kuchar, J. K., “Unmanned Aircraft Collision Avoidance Using Partially Observable Markov Decision Processes”, *Massachusetts Institute of Technology Lincoln Laboratory, Advanced Concepts Program, Project Report ATC-356, Lexington, Massachusetts, ABD*, 2009.
- [12] Temizer, S., Kochenderfer, M. J., Kaelbling, L. P., Lozano-Peréz, T., Kuchar, J. K., “Collision Avoidance for Unmanned Aircraft using Markov Decision Processes”, *Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation, and Control Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Sheraton Centre Toronto, Toronto, Ontario, Kanada*, 2010.
- [13] Temizer, S., “Planning under Uncertainty for Dynamic Collision Avoidance”, *Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, ABD*, 2011.
- [14] Thrun, S., Burgard, W., Fox, D., “Probabilistic Robotics”, *MIT Press, ABD*, 2005.
- [15] Cassandra, A. R., Kaelbling, L.P., Kurien, J. A., “Acting Under Uncertainty: Discrete Bayesian Models for Mobile-Robot Navigation”, *Intelligent Robots and Systems IEEE*, pp. 963-972, 1996.
- [16] Hounam, D., Wagel, K., “A Technique for the Identification and Localization of SAR Targets Using Encoding Transponders”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No. 1, pp. 3-7, 2001.
- [17] Kim, J., Sukkarieh, S., “Airborne Simultaneous Localisation and Map Building”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 406-411, 2003.
- [18] Angeli, A., Filliat, D., Doncieux, S., Meyer, J., “2D Simultaneous Localization and Mapping for Micro Air Vehicles”, *European Micro Aerial Vehicles (EMAV)*, 2006.
- [19] Redding, J., McLain, T., Beard, R., Taylor, C., “Vision-Based Target Localization from a Fixed-Wing Miniature Air Vehicle”, *American Control Conference*, pp. 2862-2867, 2006.
- [20] C. A. Wiley, “Synthetic Aperture Radars: A Paradigm for Technology Evolution”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, V. AES-21, N. 3, pp. 440-443, 1985.
- [21] Hensley, W. H., Doerry, A. W., Walker, B. C., “Lynx: A High-Resolution Synthetic Aperture Radar”, *SPIE Aerosense*, Volume 3704, 1999.
- [22] Marchetti, L., Grisetti, G., Locchi, L., “A Comparative Analysis of Particle Filter Based Localization Methods”, *Proceedings of RoboCup Symposium, Lecture Notes in Computer Science*, Volume 4434, pp 442-449, 2007.

ÖZGEÇMİŞLER

Selim TEMİZER

Yrd. Doç. Dr. Selim TEMİZER, yüksek lisans ve doktora eğitimi 2001 ve 2011 yıllarında Massachusetts Institute of Technology'de (MIT) tamamladı. Şu anda Orta Doğu Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. İlgili alanları yapay zeka, robotik, dinamik çarpışma önleme sistemleri, insansız araçların kontrolü ve simülasyon sistemleridir.

Muhammed Çağrı KAYA

Muhammed Çağrı KAYA, 2009 yılında Fırat Üniversitesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nden mezun oldu. Şu anda Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmakta ve yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir. Çalışma alanları nesne yönelimli programlama dilleri ve robotlar için hareket planlaması ve kontrolüdür.