

Genişletilmiş Kalman Filtresi Yöntemine Dayalı Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama Algoritması

Simultaneous Localization and Mapping Using Extended Kalman Filter

Sırma Yavuz, Zeyneb Kurt, M. Serdar Biçer

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi
sirma,zeyneb@ce.yildiz.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, Genişletilmiş Kalman Filtresi'ne (GKF) dayanarak Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Harita Oluşturma problemine çözüm öneren bir algoritma sunulmuştur. Uygulama için ucuz ve kısıtlı algılama kapasitesine sahip bir robot kullanılmıştır. Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF) metodu, Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Harita Oluşturma algoritmalarının çevrim kapama ve veri ilişkilendirme olarak bilinen en sık karşılaşılan iki problemine başarılı bir çözüm önermektedir.

Abstract

In this study, an offline statistical estimation algorithm based on Extended Kalman Filter method is developed to solve the SLAM (Simultaneous Localization and Map Building) problem. For the application, a robot equipped with only simple and cheap sensors is used. Two of the most frequent problems in SLAM algorithms which are known as loop closing and data association are effectively solved by Extended Kalman Filter method.

1. Giriş

Eş zamanlı konum belirleme ve haritalama problemi, literatürde çok çeşitli yöntemler kullanılarak çözülmüş bir problemdir [1]. Önerilmiş çözümlerin bir kısmı kamera ya da lazer algılayıcılar gibi maliyetli algılayıcılar kullanılarak geliştirilirken, büyük bir kısmı da kızılötesi ve sonar gibi çok daha ucuz algılayıcılar kullanılarak geliştirilmiştir [2].

Bu çalışmada kullanılan robot, eş zamanlı yer belirleme ve haritalama çalışmalarında kullanılmak üzere Yıldız Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir¹[3]. Robot, çevresini sadece kızılötesi algılayıcılar kullanarak algılayabilmektedir. Önerilen ve gerçekleştirilen algoritma yardımı ile robot, bulunduğu mekanda kendi konumunu otonom olarak güncelleyebilecek ve ortamın haritasını çevrimdışı çalışarak çıkarabilecektir. Geliştirilen ve sunulan algoritma çevrimdışı çalıştığı için algoritma çalıştırılmadan önce robot, haritası çıkarılacak kapalı

¹ Bu araştırma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir. Proje No: 27-04-01-01.

mekanda el yardımı ya da belli komutları yerine getiren bir kod parçası yardımı ile gezdirilerek ölçüm verisi toplanmıştır. Ölçüm verisi, robotun çevresindeki engellere olan mesafesini ölçebilmek amacıyla kullanılan kızılötesi algılayıcılardan alınan bilgileri; robotun aldığı mesafeyi ölçebilmek amacıyla kullanılan ve ön teker üzerinde bulunan artımlı kodlayıcıdan gelen bilgiyi; ön tekerin gövdeyle yaptığı açıyı ölçebilmek amacıyla kullanılan ve robotun üst kısmında bulunan potansiyometreden gelen bilgileri içermektedir.

Önerilen algoritma tarafından bu verilerin değerlendirilebilmesi amacıyla veriler, algoritma çalışmaya başlamadan önce kontrollü olarak toplanmalıdır. Kontrollü olarak veri toplayabilmek amacıyla da bluetooth vasıtası ile haberleşen bir bilgisayar ve robottan oluşan otonom bir sistem kullanılmıştır.

Robotun ortamda bulunan engellere olan mesafesini ölçebilmek amacıyla kızılötesi algılayıcılardan alınan bilgiler ile artımlı kodlayıcıdan ve potansiyometreden alınan bilgiler bilgisayara bluetooth modülü üzerinden aktarılmaktadır. Bilgisayar ise gelen algılayıcı bilgilerine bağlı olarak üreteceği komutları robota yine bluetooth üzerinden aktarır.

2. Genişletilmiş Kalman Filtresi Yöntemi

Eş zamanlı konum belirleme ve harita çıkarımı sürecinde genelde uygulamanın çevrimiçi ya da çevrimdışı olmasına bakılmaksızın istatistiksel bir tahmin yöntemi kullanılmaktadır. Bunun sebebi kullanılan algılayıcıların da kendi sistem dinamiklerinin var olması ve bunların bozulabilir nitelikte olmasıdır. Başka bir deyişle, sistemin durumu güdültülü algılayıcı verisinden yola çıkılarak oluşturulduğundan, bir kestirici çeşitli algılayıcılardan gelen veriyi birleştirerek sistemin mümkün olan en kesin tahminini yapabilmelidir.

Literatürde geliştirilmiş olan uygulamaların özellikle gerçek zamanlı olanlarında en yaygın olarak doğrusal Kalman Filtresi kullanılmaktadır. Smith vd. 1985-1990 yılları arasında SLAM problemine bir çözüm getiren ve günümüzde hala etkin olarak kullanılan bir Kalman Filtresi uygulaması önermişlerdir [4]. Ancak doğrusal Kalman Filtresi yöntemi "veri ilişkilendirme" olarak bilinen, "robotun geçtiği bir yerden tekrar geçtiğini anlaması" problemine çözüm getiremez.

Literatürde önerilmiş olan bir başka istatistiksel tahmin yöntemi ise "Beklenti Enbüyütlme" yöntemidir. Bu yöntem, veri ilişkilendirme problemine bugüne kadar getirilmiş en

başarılı çözümü sunmuştur. Thrun vd. de BE yöntemine dayanan bir SLAM algoritması geliştirmişlerdir [5]. Ancak bu yöntem de gerçek zamanlı uygulanamamaktadır.

Gerçek zamanlı çalışmasına rağmen doğrusal Kalman filtresi kadar etkin ve hızlı olamayan çeşitli “parçacık filtresi” yöntemleri de veri ilişkilendirme probleminde çözüm getirebilmektedir. Bu nedenle Yuen ve MacDonald tarafından parçacık filtresi yöntemi tercih edilmiştir [6]. Yuen ve MacDonald’ın simülasyon üzerinde yaptığı çalışma, Kurt ve Yavuz tarafından geliştirilerek gerçek bir robot üzerinde uygulanmıştır. [7].

Eş zamanlı konum belirleme ve haritalama probleminde kamera görüntüsüne dayanan bir çözüm öneren Panzieri ve Pascucci çalışmalarında Genişletilmiş Kalman Filtresi yöntemi kullanmışlardır [8]. Kullandıkları robotun üzerinde bulunan bir web kamerası aracılığı ile ortam algılanmakta ve haritalama yapılmaktadır. GKF’ye dayanan bir başka çözüm ise Singh ve Kaltor tarafından önerilmiştir [2]. Her iki GKF çalışmasında da veri ilişkilendirme probleminde başarılı çözümler önerilmiştir.

Bu çalışmada ise sadece kızılötesi algılayıcılar kullanılan bir robot ile GKF’ye dayanan ve çevrimdışı çalışan bir eş zamanlı konum belirleme ve haritalama algoritması geliştirilmiştir.

2.1. Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF) Yönteminin Özellikleri

Genişletilmiş Kalman Filtresi yöntemi, doğrusal Kalman Filtresi’ne dayanarak geliştirilmiştir. GKF, doğrusal olmayan sistem modellerini doğrusallaştırarak doğrusal olmayan sistemlere standart Kalman Filtresi yöntemini uygular. Bu uygulamanın gerçekleştirilebilir olması için sistemdeki tüm doğrusal modellerin iyi bir yaklaşımla doğrusallaştırılabilmesi zorunludur.

Standart Kalman Filtresi (KF), ayrıntı veriler üzerinde özyinelemeli olarak çalışan bir veri işleme yöntemidir. Artımlı ve özyinelemeli bir yapısı olduğundan belirli bir andaki değerleri hesaplamak için sadece bir önceki anı bilmek yeterlidir, daha eski anlara dair durumların ve ölçümlerin saklanması gerek yoktur.

Standart KF, ölçüm verisini, sistemle ilgili ön bilgileri ve algılayıcı verilerini birleştirir ve hatayı en küçük yapan istatistiksel bir tahmin üretir.

Standart KF’de sistem modeli iki aşamaya ayrılır oluşturulur. İlk aşamada tahmin; ikinci aşamada ise düzeltme işlemi yapılır. İlk aşamaya “zaman güncellemesi”; ikinci aşamaya “ölçüm güncellemesi” de denilir.

A: sistemin “k-1” anından k anına geçiş matrisi;

B: kontrol işaretleri için kullanılan geçiş matrisi;

P: sistem hatasının kovaryans matrisi (sistemin hatası ile hatanın transpozunun çarpımı yoluyla elde edilir)

Q: gürültünün kovaryans matrisi olmak üzere;

İlk aşama olan tahmin sürecinde aşağıdaki denklem sistemi kullanılmaktadır:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1}^- + Bu_{k-1} \quad (1)$$

$$P_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (2)$$

Sistemin k anındaki durumu x_k , k anında bilgisayardan robota gitmek üzere üretilen en son kontrol verisi ise u_{k-1} olarak gösterilmiştir.

K: Kalman kazanımı;

H: ölçümü tahmin etmek için kullanılan geçiş matrisi;

R: tahmin edilen ölçüm ile gerçek ölçümler arasındaki farkın (ölçüm hatasının) kovaryans matrisi olmak üzere

Düzeltilme aşamasında kullanılan denklem sistemi:

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (3)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (5)$$

şeklinde. Sistemde k anında alınan gözlem bilgisi z_k ile gösterilmiştir.

Standart KF sadece doğrusal sistemlere uygulanabilir. Robot lokalizasyonu ve haritalama problemleri doğrusal süreçler değildir. Dolayısıyla eş zamanlı konum belirleme ve haritalama yapabilmek amacıyla Genişletilmiş Kalman Filtresinin (GKF) kullanılması mantıklı görülmektedir.

Bu amaçla kullanılan GKF’nin birtakım avantaj ve dezavantajları mevcuttur. En genel avantajları:

- Artımlı olarak uygulanabilir olması,
- Kapalı çevrimleri doğru kapayabilmesi,
- Kısmen dinamik ortamlarda da çalışabilmesi,
- Çeşitli filtrelerin yaptığı işleri tek başına yapabilmesi olarak sıralanabilir.

GKF’nin dezavantajları ise:

- “Veri ilişkilendirme” problemini çözmeye karmaşıklığının $O(n^3)$ olması, dolayısı ile GKF’nin çoğu zaman gerçek zamanlı uygulanamaması,
- Doğrusallaştırma işlemleri esnasında hata yapılırsa GKF’nin tutarsız ve hatalı sonuçlar üretebilmesi,
- Gerçeklenmesi ve uyarlanmasının zor oluşu, şeklinde belirtilebilir. Ancak yöntem zaman aralığının tamamen doğrusal olduğu sistemlerde çok güvenilir sonuçlar verebilir.

3. GKF ile Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Harita Oluşturma Algoritması

3.1. Robotun Yapısı

Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama sistemleri, bir robotun konumu (location) ve gezindiği çevre ile alakalıdır. Daha önce de belirtildi üzere, bu çalışmada robot kapalı bir ortamda kontrollü olarak gezdirilerek algılayıcı verisi toplanmıştır. Bu kontrollü gezinim esnasında robot ve bilgisayar bluetooth modülü aracılığı ile haberleşmektedirler.

Uygulamamızda kullanılan robot bir ön ve iki arka olmak üzere, üç tekerlek üzerine yerleştirilen bir platformdan oluşmaktadır. Önde yön belirleyen ve çekme işini yapan bir teker, arkada ise birbirine bir mülle bağlı iki teker mevcuttur.

Kullanılan sistemde artımlı kodlayıcı yardımı ile gidilen yolun miktarı ve tekerin üst kısmındaki potansiyometre yardımı ile de ön tekerin gövde ile yaptığı açı bilinmektedir.

Robotun yanlarına ikişer adet, ön ve arkasına ise birer adet olmak üzere toplam 6 adet Sharp GP2D12 kızılötesi algılayıcılar kullanılmıştır.

Kullanılan kızılötesi mesafe algılayıcının kalibrasyon işlemi için farklı malzemelerden yapılmış duvarlar için ölçümler yapılmıştır. 2 cm aralıkla 1 metreye kadar bütün

mesafeler için algılayıcının çıkış gerilimi ölçülmüştür. Robot seyri esnasında algılayıcılarından ölçülen voltajın karşılık geldiği en doğru mesafe değerini belirlemek için bir başvuru çizelgesi kullanmak yerine gerilimle mesafe ilişkisi üssel olarak modellenmiştir :

$$mesafe = a * gerilim^b + c \quad (8)$$

3.2. GKF Algoritmasının Adımları

GKF'nin uygulanabilmesi için öncelikle sistem doğrusallaştırılmalıdır. Parametreler doğrusallaştırıldıktan sonra standart KF uygulanarak GKF gerçekleştirilmiş olur.

Öncelikle robotun matematiksel modeli elde edilmelidir. Çalışmada kullanılan robot, ön teker orta nokta koordinatları (x_1, y_1) , arka teker orta nokta koordinatları (x_2, y_2) ve ön tekerin gövde ile yaptığı açı (θ_1) kullanılarak modellenmiştir. Bundan sonraki adımlarda, algoritmanın takibini kolaylaştırmak amacı ile, ön ve arka teker orta nokta koordinatları genel olarak tek bir x ve y sembolü ile, ön tekerin gövdeyle yaptığı açı miktarı da olan ϕ ile gösterilmiştir.

Tanımlı verilen robot modeli dışında, dönüm noktalarının (landmark) pozisyonu da sistem durum vektöründe tutulmaktadır. Bu çalışmada yapay dönüm noktaları kullanılmamış, bunun yerine mekanı oluşturan duvarlar ve ortamda bulunabilecek engeller dönüm noktaları olarak algılamada kullanılmıştır. Başlangıçta henüz bir engel görülmediğinden dönüm noktalarının pozisyonu verilmeden, sadece robotun ilk pozisyonu ile işleme başlanır.

Robot modeli (9) nolu bağıntıdaki gibi ifade edilir:

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \end{bmatrix} \quad (9)$$

Dolayısıyla bir sonraki durum (10) nolu bağıntıdaki gibi olacaktır:

$$f(x, u, w) = \begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ \phi(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) + \Delta x(k) \\ y(k) + \Delta y(k) \\ \phi(k) + \Delta \phi(k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sistem doğrusal olmadığından Jacobian hesabı yapılarak sistem (11) nolu bağıntıdaki gibi doğrusallaştırılmıştır:

$$F(k) = \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial \phi} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial \phi} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial \phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Delta y \\ 0 & 1 & -\Delta x \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Algılayıcı bir menzil (r) ve bağıl istikamet (β) değeri döndürecektir. Dolayısıyla algılayıcı modeli (12) nolu bağıntıdaki gibi olur:

$$Z(k) = \begin{bmatrix} z_r \\ z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2} \\ \arctan\left(\frac{y_i - y_r}{x_i - x_r}\right) - \phi + \frac{\pi}{2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

x_i ve y_i landmark koordinatlarıdır. Algılayıcı modelinin de Jacobian hesabı yapılmalıdır. $r = \sqrt{(y_i - y_r)^2 + (x_i - x_r)^2}$ iken:

$$J_h(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x} & \frac{\partial h_1}{\partial y} & \frac{\partial h_1}{\partial \phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_r - x_i}{r} & \frac{y_r - y_i}{r} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Tanımlanan bu matris, her bir dönüm noktası (landmark) için hesaplanmalıdır.

Bir sonraki adımda durum vektörü ve kovaryans matrisi ilk değerlerine ayarlanmalıdır. P kovaryans matrisine ait tahmin (14) bağıntısı ile hesaplanır.

$$P(k)^- = F(k)P(k-1)F(k)^T + B(k)GB(k)^T \quad (14)$$

Bu bağıntıda;

B: Giriş kazanç matrisi

Q: Hata kovaryans matrisidir.

Bundan sonar ölçümleri güncellenir ve ardından yeni bir dönüm noktası olup olmadığı kontrol edilir. Yeni bir dönüm noktası bulunmuş ise durum vektörüne eklenerek bütün matrislerin boyutları yeniden düzenlenir:

$$x_{est}(;k) = x(;k) + K * (z(k) - h(k)) \quad (15)$$

$$P(k) = P(k)^- - K(k)SK(k)^T$$

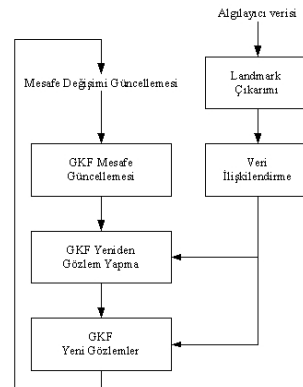
S yenilenmiş kovaryans ve K ise Kalman kazancı olmak üzere (16) nolu bağıntıdaki gibi hesaplanırlar:

$$S = J_h(k)P(k)^- J_h(k)^T + R(k) \quad (16)$$

$$K(k) = P(k)^- J_h(k)^T S^{-1}$$

R, determinantı 1 olan 1x1 boyutunda bir matristir. Bu adımdan sonra gözlemlenen dönüm noktaları sisteme eklenir. Daha sonra robot yine hareket ederek algılayıcı verilerinden yeni dönüm noktaları belirler ve yeni noktalar eklenerek sistem güncellenir.

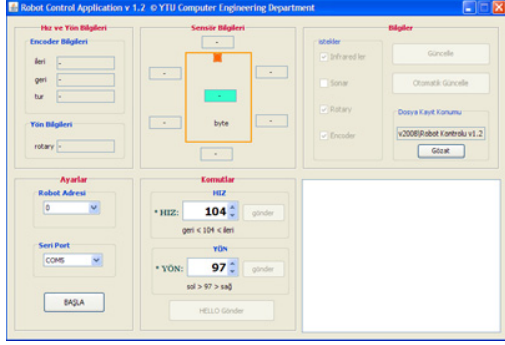
Algoritmanın blok diyagramı Şekil-1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 1: GKF blok diyagramı

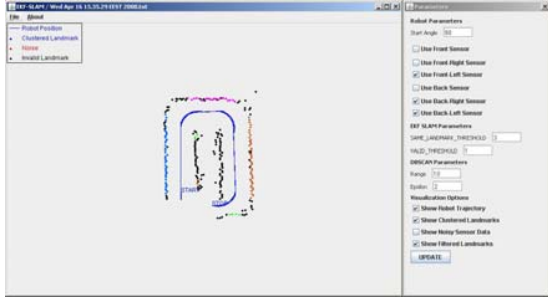
4. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada önerilen Genişletilmiş Kalman Filtresi yönteminin uygulanması için kullanılacak verilerin toplanması için Şekil-2’de arayüzü gösterilen bir kumanda programı ile robot kontrollü olarak gezdirilmiştir.



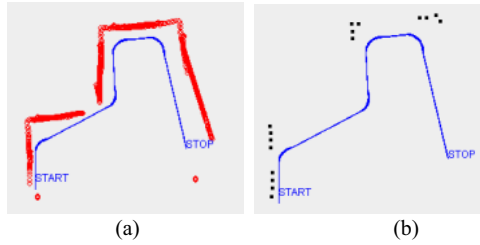
Şekil 2: Robot Geziniminde Kullanılan Kontrol Programı Arayüzü

GFK uygulamasına ait parametrelerin değiştirilebildiği, orjinal kızılötesi algılayıcı verilerinin, robotun izlemiş olduğu yörüngenin ve uygulama sonunda oluşan haritanın izlenebildiği arayüz ise Şekil-3’de görülmektedir.



Şekil 3: GFK Uygulaması Arayüzü

GFK uygulamasına ait parametrelerin değiştirilebildiği, orjinal kızılötesi algılayıcı verilerinin, robotun izlemiş olduğu yörüngenin ve uygulama sonunda oluşan haritanın izlenebildiği arayüz ise Şekil-3’de görülmektedir.



Şekil 4: (a) Robot Yörüngesi (mavi sürekli çizgi) ve GFK Uygulaması Sonucu (kırmızı) (b) GFK Uygulaması Sırasında Hatalı Olarak Değerlendirilerek Elenen Dönüm Noktaları

Bu çalışmadaki sunulan uygulamada algılayıcı verilerinin çok gürültülü olabileceği ortamlarda sonuçları iyileştirebilmek amacı ile GFK algoritmasının bulunduğu dönüm noktalarından istenilen bir eşik değerinin dışında olanları dikkate almaması sağlanmıştır. Özellikle köşe dönme sırasında, kızılötesi algılayıcılardan gelen veriler büyük ölçüde hatalı olabilmekte ve elde edilecek haritayı bozabilmektedir. Şekil-4’de örnek bir yörünge için bu şekilde elde edilen sonuçlar görülmektedir.

5. Sonuçlar

Eş zamanlı konum belirleme ve harita oluşturma çalışmalarının geniş bir uygulama alanı vardır: arama kurtarma çalışmalarında en kısa zamanda mümkün olan her yerin aranmasının sağlanması; deprem, yangın gibi insanların çalışmasının ve erişiminin zor olduğu koşullarda canlı tespitinin en etkin ve hızlı biçimde tamamlanabilmesi için ve şehir haritalarının çıkartılmasında kullanılabilirler.

Bu çalışmada Genişletilmiş Kalman Filtresi’ne dayalı bir eş zamanlı konum belirleme ve harita oluşturma algoritması önerilmiştir. Kısıtlı kızıl ötesi algılayıcılarla donatılmış bir mobil robot üzerinde yapılan denemeler sonucunda GFK yönteminin klasik Kalman Filtresi yönteminin aksine veri ilişkilendirme probleminde başarılı bir çözüm getirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca geliştirilen algoritmanın gerçek zamanlı olmaması uygulama alanları açısından bazı kısıtlamalar getirirse de elde edilen haritalarda diğer yöntemlerde sıklıkla ortaya çıkan kaymaların en aza indiği gözlenmiştir.

6. Kaynakça

- [1] S. Thrun. Robotic mapping: A survey. In G. Lakemeyer and B. Nebel, editors, Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium. Morgan Kaufmann, 2002.
- [2] Singh, S., Kantor, G., et. al., “Recent Results in Extensions to Simultaneous Localization and Mapping”, *Springer Tracts in Advanced Robotics*, Vol 5, pp. 1-11, 2003.
- [3] Kurt, Z., “Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalamaya Yönelik Akıllı Algoritmaların Geliştirilmesi”, *MSc. Thesis*, Yıldız Teknik Üniversitesi FBE Bilgisayar Müh., 2007.
- [4] Smith, R., Self, M. and Cheeseman, P., *Autonomous Robot Vehicles*, Springer-Verlag New York Inc., New York, 1990.
- [5] Thrun, S., Fox, D. and Burgard, W., "A Probabilistic Approach to Concurrent Mapping and Localization for Mobile Robots", *Machine Learning*, 31:29–53,1998.
- [6] Yuen, D.C.K. and MacDonald, B.A., "A Comparison between EKF and Sequential Monte Carlo Techniques for Simultaneous Localisation and Map-building", *Australian Conference on Robotics and Automation*, Auckland, New Zealand,2002.
- [7] Kurt, Z., Yavuz, S., “Sıralı Monte Carlo Yöntemine Dayalı Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama Algoritması”, *SIU 2008 - IEEE 16. Sinyal İşleme, İletişim ve Uygulamaları Kurultayı*, 2008.
- [8] Panzneri, S., Pascucci, G., et. al., “Vision based navigation using Kalman approach for SLAM”, *11th Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 1-5, 2003.