

# Hudut Hedefleri Temelli Otonom Keşif Algoritması Uygulaması

## Frontier-Based Autonomous Exploration Algorithm Implementation

Erkan Uslu, Furkan Çakmak, Muhammet Balcılar, M. Fatih Amasyalı, Sırma Yavuz  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye  
{erkan, furkan, muhammet, mfatih, sirma}@ce.yildiz.edu.tr,

**Özetçe**—Keşif algoritmaları, ortama ilişkin öncül bilgiye sahip olunmadığı durumda, çeşitli kriterlere göre en yüksek katkıyı sağlayacak hedeflerin belirlenmesini ifade etmektedir. Otonom mobil robotlar için keşif algoritmaları; haritalama, gezinim, konum belirleme ve engel kaçınımı ile yakından ilişkilidir. Bu çalışma ile hudut hedefleri yöntemi kullanılarak otonom keşif uygulaması gerçekleştirilmiştir. Hudut hedefleri, gezinim ve haritalama sırasında anlık olarak hesaplanan boş olduğu bilinen alanlar ile keşfedilmemiş alanların arasındaki sınırları ifade etmektedir. Gerçeklenen hudut hedefleri temelli keşif algoritması, Robot İşletim Sistemi (Robot Operating System - ROS) uyumlu olup; çalışma ile farklı hudut hedefi atama yaklaşımları, oluşan gezeğin uzunluğuna ve dolayısıyla tüm alanın keşif süresine etkisi karşılaştırılabilir olarak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler** — keşif, hudut hedefleri.

**Abstract**—Exploration is defined as the selection of target points that yield the biggest contribution to a specific gain function at an initially unknown environment. Exploration for autonomous mobile robots is closely related to mapping, navigation, localization and obstacle avoidance. In this study an autonomous frontier-based exploration strategy is implemented. Frontiers are defined as the border points that are calculated throughout the mapping and navigation stage between known and unknown areas. Frontier-based exploration implementation is compatible with the Robot Operating System (ROS). Also in this study the effect of different frontier target assignment approaches are comparatively analyzed by means of total path length and thereby total exploration time.

**Keywords** — exploration, frontier-based.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TÜBİTAK (EEEAG- 113E212) ve Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü YTU-BAPK (2015-04-01-GEP01) tarafından desteklenmiştir.

### I. GİRİŞ

Otonom mobil robotlar için önemli gereksinimlerden birisi de bulundukları ortama ilişkin uzamsal modeller ve haritalar elde edebilmeleridir. Otonom robotlar, kısmen bilinen bir ortama ilişkin artımlı haritalama işlevini etkili olarak gerçekleştirebilmek için, iyi keşif stratejilerine ihtiyaç duymaktadırlar. Kullanılan harita yapısına (kafes-grid, nokta, çizgi temelli, metrik, topolojik haritalar) ve hedef seçim kriterine (maliyet, kazanç) bağlı olarak farklı ana başlıklar altında incelenmesi gereken keşif algoritmaları mevcuttur.

[1] ile robotun eş merkezli çemberler boyunca hareket etmesi ile keşif yapılması önerilmiştir. [2] ile robotun rastgele olarak seçilmiş güvenli hedef noktalarına ilerlemesi ile keşif yapılması önerilmiştir. Literatürde otonom keşif algoritmaları için en iyi sonraki adımı bulacak şekilde fırsatçı (greedy) yaklaşım temelli olarak önerilmiş yöntemler mevcuttur. En iyi sonraki adım, alternatiflerin bir değerlendirme fonksiyonu ile işlenmesi sonucunda bulunur. [3] alternatif hedefleri, hedef noktasından görülebilen keşfedilmemiş bölgenin alanı ve hedef noktaya olan uzaklığı bir maliyet/kazanç fonksiyonu ile birleştirilerek değerlendirir. Hedef noktadan görülebilen keşfedilmemiş alan hedef nokta civarında belirli bir yarıçaptaki keşfedilmemiş bölge alanı olarak tanımlanmıştır. [4] ile bağıl entropi temelli alternatif hedef değerlendirilmesi yapılmıştır. Alternatif hedefler değerlendirilirken hedef noktadan görülecek tüm noktaların katkısı, hedef noktasından ilk defa görülecek noktaların katkısı, hedef noktasından görülen daha önce keşfedilmiş noktaların katkısı ve hedef noktaya ulaşım maliyetinin etkisi ayrıştılarak hesaplanmaktadır.

Bu çalışma ile hudut hedefleri yöntemi kullanılarak otonom keşif uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bölüm II ile hudut hedefleri yöntemi ve adımları anlatılmıştır. Bölüm

III ile deney düzeni ve deneysel sonuçlara yer verilmiştir. Bölüm IV ile ise genel çıkarımlara ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara yer verilmiştir.

## II. HUDUT HEDEFLERİ TEMELLİ KEŞİF ALGORİTMASI

Hudut hedefleri temelli keşif algoritması [5] ile önerilmiştir. Hudut hedefleri, gezinim ve haritalama sırasında anlık olarak hesaplanan boş olduğu bilinen alanlar ile keşfedilmemiş alanlar arasındaki sınırları ifade etmektedir. Robotun herhangi bir hudut noktasına ilerlemesi ve önceden keşfedilmemiş noktaların görülmesi ile haritaya yeni bilgi eklenmiş olmaktadır. Peş peşe hudut noktalarına ilerlenmesi de hudut hedefleri temelli keşif algoritmasını tanımlar.

Bir robotun bilinen bir haritada gidebildiği tüm noktalar erişilebilir olarak tanımlanmış olsun. Erişilebilir tüm noktalardan robotun başlangıç noktasına bir yol tanımlanabilir olması gerektiğinden dolayı, erişilebilir noktaların komşu ve bitişik olduğu söylenebilir. Kısmen haritalanmış bir ortamda ise robotun bulunduğu noktadan başlayan yolların kısmen haritalanmış alanlardan geçeceği aşikârdır. Keşfedilmemiş bölgelerdeki erişilebilir noktalara tanımlanmış yollar ise hudut noktalarından en az bir kere geçecektir. Keşfedilmemiş bölgelerdeki erişilebilir noktalara tanımlı yollar, birkaç kez hudut noktasına kadar takip edilerek tamamlanabilecektir. Kısmen haritalanmış bir ortamda robot başlangıç noktasından tüm erişilebilir noktalara tanımlı yolları, tam sensör bilgisi ve tam/mükemmel motor kontrolü yardımıyla, hudut temelli olarak izleyerek alanın tamamının haritalanabilmesini sağlar. Haritalama alanının artması ile birlikte hudutlardan elde edilen kazançlar giderek azalsa da, hudut temelli keşif sonlu bir zaman sonucunda haritalamayı garanti eder. Pratikte ise gürültülü sensör ve motor/sürüş kontrolünün etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.

Hudut hedefleri temelli keşif algoritmasının adımları aşağıda verilmiştir:

```
while ( !haritalama_bitti & !yeterli_hudut_noktası_yok )
    M ← Güncel_harita
    R ← Robot_konumu
    F ← Hudut_noktaları_bul (M)
    Fc ← Bağlantılı_bileşen (F)
    foreach Fc
        Fcg ← Merkez_bul (Fc)
    Fhedef ← argming {Uzaklık (Fcg, R)}
```

### A. Eşanlı konum belirleme ve haritalama

Çalışmada eşanlı konum belirleme ve haritalama (simultaneous localization and mapping - SLAM) algoritması olarak gMapping [6] algoritması kullanılmıştır. gMapping yönteminde harita temsili metrik modelde doluluk kafesi (occupancy grid) yapısındadır. Metrik kafes modeli farklı sensörlerden gelen verilerin tümleştirilmesinde ve yüksek çözünürlükte iyi sonuç

vermektedir. Fakat özellikle geniş alanlarda haritada kafes sayısının artması ile hesapsal maliyeti yüksektir [7]. Doluluk kafesi yapısında bir kafese ilişkin doluluk olasılığı, o kafes hücresinin dolu olarak görüldüğü durum sayısının, kafes hücresinin sensör tarafından görüldüğü durumların toplamına oranı olarak hesaplanır (1). Keşfedilmemiş alanlar için doluluk olasılığı 0,5 olarak iklendirilmektedir.

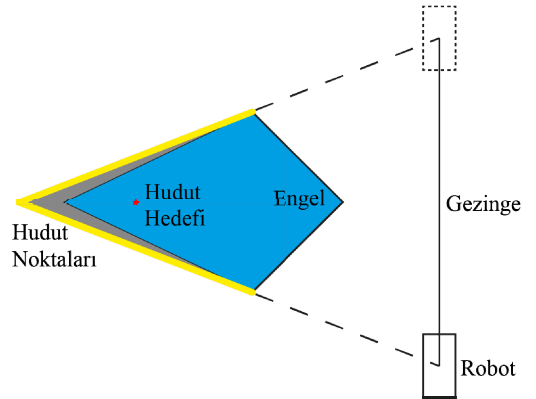
$$p(x,y) = \frac{\#dolu}{\#dolu + \#boş} \quad (1)$$

### B. Hudut hedeflerinin belirlenmesi

Hudut aday noktaları, kendisi boş olarak işaretlenmiş ve bir keşfedilememiş komşusu olan noktalardır. Fakat gerek gerçek lazer mesafe sensörlerinde gerekse ışın yayılımı ile bu durumu simüle eden uygulamalarda uzun mesafelerde görülen alan parçalı olarak boş ve dolu şeklinde işaretlenmektedir. Dolayısıyla bu parçalı gösterimden kaynaklanan gereksiz aday nokta seçiminin giderilebilmesi için bu çalışmada hudut noktaları: yerel bir pencerede yeteri kadar boş ve dolu kafes içeren, boş işaretli merkezler olarak seçilmiştir. Hudut noktaları metrik koordinatları ile tutulmaktadır.

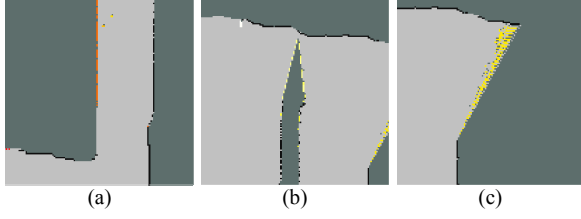
Bulunan hudut noktaları mesafe bazlı olarak bağlantılı bileşen analizi ile öbeklere ayrıştırılır. Belirli bir sayıdan daha fazla elemana sahip hudut öbeklerinin ağırlık merkezleri hesaplanarak hudut hedef adayları olarak belirlenir. Hedef adayları içerisinde belirli bir kriteri en iyileyeni ana keşif hedefi olarak atanır.

Hudut hedeflerinin robot harekete geçmeden önce erişilebilir olup olmadığı her zaman tespit edilemeyebilir. Hudut hedefinin erişilemez olduğu ancak gezinim sırasında anlaşılabilir. Şekil 1 ile hudut hedefinin erişilemez bir yerde olduğu durum örneği verilmektedir. Sarı ile gösterilen hudut öbeği için hesaplanan hudut hedefi (öbek ağırlık merkezi) mavi ile gösterilen engel üzerinde oluşmaktadır. Bu gibi durumlar göz önünde bulundurularak gerek gezinim gerekse keşif katmanlarında durumun uygun şekilde ele alınması gerekmektedir.



Şekil 1. Hudut hedefinin engel üzerinde olduğu bir durum

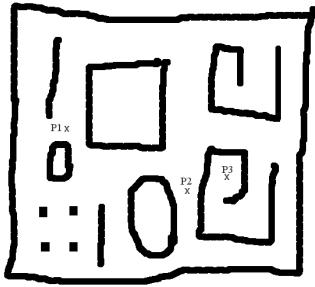
Şekil 2 ile karşılaşılan farklı tiplerdeki hudut öbekleri verilmektedir. (a) ile verilen hudut öbeği: çıkışı olan dar ve kısa bir koridorun, girişinden görüldüğü durumda elde edilen çizgisel (turuncu) hudut öbeğidir. (b) ile verilen hudut öbeği: geniş bir engelin karşından sağdan ve soldan görülmesi sonucunda engel gölgesinin kesişmesi ile elde edilen üçgensel (açık sarı) hudut öbeğidir. (c) ile verilen hudut öbeği: uzaktan görülen bir açık alan durumunda elde edilen parçalı (sarı) hudut öbeğidir.



Şekil 2. Oluşan farklı tipteki hudut öbekleri: (a) çizgisel, (b) üçgensel, (c) parçalı öbekler

### III. DENEYSEL SONUÇLAR

Deneyisel sonuçlar için Stage [7] ortam ve robot simülasyonu kullanılmıştır. Simülasyon haritası olarak oluşturulan ortam çeşitli geometrik engellere sahip, spiral odaların olduğu, dar/geniş geçişler içeren bir ortamdır ve yaklaşık  $50 \times 50 \text{ m}^2$  olarak  $0,05 \text{ m}$  çözünürlükle simüle edilmektedir (Şekil 3). Simüle sensör olarak  $270$  derece görüş açısında  $30 \text{ m}$  lazer mesafe sensörü yatay görüş alanıyla kullanılmıştır. ROS [8] yığını üzerine geliştirilen yazılım yardımıyla otonom keşif algoritması gerçekleştirilmiştir. ROS'un "stage\_ros", "rviz", "gmapping", "move\_base" paketleri kullanılmıştır. "move\_base" paketi ile birlikte yerel planlayıcı olarak dinamik pencere yaklaşımı (dynamic window approach -DWA) ve global planlayıcı olarak "navfn" eklentileri kullanılmıştır. DWA yönteminde robot kontrol uzayı ayrıklaştırılarak, herbir kontrol çiftinin ( $v_x$ : doğrusal hız,  $\omega_z$ : açısal hız) belirli bir süre boyunca değerlendirilmesi ile oluşan kısa gezinmeler puanlandırılır. Engelle çarpmayacak olan kısa rotalar içerisinden; engellere, hedefe, takip edilecek ana rotaya uzaklık/yakınlık ve hız açısından en yüksek puana sahip olanı seçilir ve uygulanır. Global planlayıcı olarak kullanılan "navfn" eklentisi ile seçilen hedef noktaya Dijkstra algoritması ile rota hesaplanmaktadır.



Şekil 3. Kullanılan simülasyon haritası

Hudut noktalarının tespitinde  $5 \times 5$  boyutunda yerel bir pencere ile değerlendirme yapılarak etrafında  $10$  adet boş ve  $8$  adet keşfedilmemiş kafes mevcut olan boş pencere merkezleri hudut noktası olarak belirlenmiştir. Hudut noktaları öbeklenirken, bağlantılı bileşen analizinde mesafe kesim değeri olarak  $25 \text{ cm}$  kullanılmıştır. Kafes çözünürlüğü düşünüldüğünde  $3$  kafes yarıçapında mesafe temelli komşuluk kullanılmış olmaktadır.



Şekil 4. En yakın hudut hedefleri ile keşif adımları

Gerçeklenen hudut hedefleri temelli keşif algoritması başlangıç durumunda, robotun etrafında tam bir dönüş yapması ile etkinleşir. Sonrasında ise kısmen keşfedilmiş haritalarda her seferinde belirli bir kritere göre seçilmiş olan hudut öbeği merkezine gidilerek keşif gerçekleştirilir.

Şekil 4 ile robot pozisyonuna en yakın hudut öbeğinin keşif hedefi seçildiği durum için elde edilen hudut noktaları, hudut öbekleri, öbek merkezleri, robot konumu ve çizilen rotalar adım adım görülebilmektedir.

Hudut hedefleri seçiminde 3 farklı yaklaşım (en yakın hudut öbeği, en büyük hudut öbeği ve rastgele öbek seçimi yaklaşımları), tüm alanın haritalanmasına kadar geçen süre ve toplam kat edilen yol cinsinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Denemelerde Şekil 3 ile belirtilen başlangıç noktaları kullanılmıştır. Tablo 1 ile, belirtilmiş başlangıç noktalarından farklı atama kriterlerine göre yapılmış hudut hedef seçimleri sonucunda hesaplanan toplam yol uzunlukları ile haritanın tamamlanma süreleri verilmiştir.

Başlangıç Noktası		Hudut Hedef Seçim Yaklaşımı		
		En Yakın	En Büyük	Rastgele
P1	Süre (sn)	1479	2086	2142
	Yol (m)	331	500	449
P2	Süre (sn)	2595	3089	2202
	Yol (m)	577	686	469
P3	Süre (sn)	1610	1492	1581
	Yol (m)	345	340	370

**Tablo 1. En yakın, en büyük ve rastgele hudut hedefleri için farklı başlangıç noktalarında elde edilen toplam gezinde ve geçen süreler**

Hudut hedefleri temelli keşif, [5] ile tanımlandığı şekliyle en yakın hudut öbeğini seçmektedir. Bunu kanıtlar nitelikte sonuçlar Tablo 1 ile verildiği gibi elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yakın öbek seçiminin, genel olarak, en büyük ve rastgele öbek seçimine kıyasla daha başarılı olduğu görülmektedir.

Şekil 1 ile ifade edilen durumun oluşma sıklığı, hudut hedef seçim yaklaşımına göre en fazladan en aza şu şekilde sıralanmaktadır: (rastgele) > (en yakın) > (en büyük).

Tek seferde tamamı lazer mesafe sensörü ile görülemeyecek yapıdaki oda ve benzeri ortamlar söz konusu olduğunda, tekrarlı ziyaretleri minimuma indirmesi beklenen en yakına hudut hedefi atama yaklaşımının dahi yeterli performansta sonuçlar üretmediği gözlenmiştir. Bu tarz durumların özel olarak ele alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

#### IV. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında hudut hedefleri temelli keşif algoritmasının ROS uyumlu olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak Stage simülasyon ortamı ve ROS yığını kullanılarak, geliştirilen hudut hedef

temelli keşif algoritması deneysel olarak farklı senaryolarla test edilmiştir. Testler ile farklı hedef atama yaklaşımları haritanın tamamlanmasına kadar geçen toplam süre ve kat edilen yol bakımından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Gelecek çalışmalarda tasarlanan algoritmanın gerçek robot platformu üzerinde kullanılması hedeflenmektedir. Tekrarlı ziyaret sayısını azaltacak yönde, hudut tespitin, hedefe varmadan önce belirli aralıklarla tekrarlanmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre farklı hudut hedef atama yaklaşımlarının diğerlerine göre başarılı olduğu durumlar oluşmasıyla, tüm keşif boyunca tek bir hedef atama yaklaşımı yerine bu yaklaşımlardan birini anlık seçerek uygulayan karma bir yaklaşım söz konusu olabilir.

#### KAYNAKÇA

- [1] R. Sim and G. Dudek, "Effective Exploration Strategies for the Construction of Visual Maps," in *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*, 2003.
- [2] L. Freda and G. Oriolo, "Frontier-Based Probabilistic Strategies for Sensor-Based Exploration," in *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, 2005.
- [3] H. H. Gonzales-Banos and J.-C. Latombe, "Navigation strategies for Exploring Indoor Environments," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 10-11, pp. 829-848, 2002.
- [4] F. Amigoni and V. Caglioti, "An information-based exploration strategy for environment mapping with mobile robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, no. 5, pp. 684-699, 2010.
- [5] B. Yamauchi, "A Frontier-Based Approach for Autonomous Exploration," in *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 1997. CIRA'97., Proceedings., 1997 IEEE International Symposium on*, 1997.
- [6] G. Grisetti, C. Stachniss and W. Burgard, "Improved Techniques for Grid Mapping With Rao-Blackwellized Particle Filters," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 1, pp. 34-46, 2007.
- [7] H. Karaoğuz, Ö. Erkent, H. Bayram and H. I. Bozma, "Tek Robottan Çoklu Robotlara Ortam Haritalama," *EMO Bilimsel Dergi*, vol. 2, no. 4, pp. 105-118, 2012.
- [8] R. Vaughan, "Massively multi-robot simulation in stage," *Swarm Intelligence*, vol. 2, no. 2-4, pp. 189-208, 2008.
- [9] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler and A. Y. Ng, "ROS: an open-source Robot Operating System," in *ICRA workshop on open source software*, 2009.