

İnsansız Araçlarla Düzlemsel Olmayan Alanların Taranması

Çağlar Seylan¹ Fatih Semiz² Özgür Saygın Bican³

Öz

Günümüzde insansız araçlarla alan taraması, yani bir alanın tümünün veya bir kısmının insansız araçlarla en az efor ile dolaşılması, alan taramasına duyulan ihtiyaç ve insansız araçların kullanımının artmasıyla beraber hızla önem kazanmaktadır. İnsansız araçlarla alan taramasının, İHA'lar ile bir alanda keşif yapmaktan robotlar ile mayınlı arazilerin mayınlardan arındırılmasına, büyük alışveriş merkezlerinde yerlerin robotlarla temizlenmesinden büyük arazilerde çim biçmeye kadar pek çok uygulaması mevcuttur. Problemin tek araçla alan taraması, birden fazla araçla alan taraması, çevrimiçi (arazinin nasıl olduğu daha önceden bilinmiyorsa) alan taraması gibi pek çok versiyonu mevcuttur. Ayrıca arazide çeşitli büyüklüklerde engeller de bulunabilmektedir. Doğal olarak, bu problem üzerinde birçok araştırmacı çalışmaktadır ve günümüze kadar pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çok büyük bir kısmı, MKA yaklaşımını kullanmaktadır. Bu yaklaşımda temel olarak, düzlemsel bir arazi, aracın görüş alanına göre eş büyüklükte karelere bölünmekte ve bu karelerin merkezleri birer düğüm olarak kabul edilerek araziden kenarları birim ağırlıkta olan bir çizge elde edilmektedir. Sonra bu çizgenin MKA'sı bulunup bu MKA'nın etrafı araçlar tarafından turlanmaktadır. Bizim önerdiğimiz metod düzlemsel olmayan arazilerin de insansız araçlar ile taramasına çözüm getirmektedir. Biz de çözümde MKA yaklaşımını temel aldık, ancak arazi düzlemsel olmadığı için çizgedeki kenarlara birim ağırlık vermek yerine iki kare arasındaki eğime bağlı ağırlıklar verdik. Bu yaklaşım ile aynı zamanda özellikle İHA'lar için rüzgârın şiddeti ve yönü de hesaba katılarak bir rota elde edilip alan taraması yapılabilir.

Anahtar Kelimeler: Alan taraması, Çizge teorisi, İHA (İnsansız Hava Aracı), MKA (Minimum Kapsama Ağacı), Rota planlama

Scanning Non-planar Areas with Unmanned Vehicles

Abstract

The importance of area coverage with unmanned vehicles, in other words, traveling an area with an unmanned vehicle such as a robot or an UAV completely or partially with minimum cost, is increasing with the increase in usage of such vehicles today. Area coverage with unmanned vehicles are used today in exploration of an area with UAVs, sweeping mines with robots, cleaning ground with robots in large shopping malls, mowing lawn in an large area etc. The problem has versions such as area coverage with a single unmanned vehicle, area coverage with multiple unmanned vehicles, on-line area coverage (The map of the area that will be covered is not known before starting the coverage) with unmanned vehicles etc. In addition, the area may have obstacles that the vehicles cannot move over. Naturally, many researches are working on the problem and a lot of researches

¹ Yazışma adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Müh.Böl., çağlar.seylan@ceng.metu.edu.tr

² Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Müh.Böl.

³ Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Müh.Böl.

have been done on the problem until today. Spanning tree coverage is one of the major approaches to the problem. In this approach, at the basic level, the planar area is divided into identical squares according to range of sight of the vehicle, and centers of these squares are assumed to be vertexes of a graph. The vertexes of this graph is connected with the edges with unit costs and after finding minimum spanning tree of the graph, the vehicle strolls around the spanning tree. The method we propose suggests a way to cover a non-planar area with unmanned vehicles. The method we propose also takes advantage of spanning tree coverage approach, but instead of assigning unit costs to the edges, we assigned a weight to each edge using slopes between vertexes those the edges connect. We have gotten noticeably better results than the results we got when we did not consider the slope between two squares and used classical spanning tree approach.

Keywords: Area coverage, Graph theory, MST (Minimum Spanning Tree), Route planning, UAV (Unmanned Aerial Vehicle)

Giriş

Günümüzde insansız araçlar için en önemli problemlerden birisi alan taramasıdır. Alan taraması bir arazinin her yerini dolaşmak olarak tanımlanabilir. Alan taraması yapılırken göz önünde bulundurulan en önemli kısıtlardan bir tanesi bu taramayı olabildiğince verimli yapmaktır. Bu amaca ulaşmak için, bir yandan taranan alan maksimize edilmeye çalışılırken, bir yandan da harcanan zaman ve yakıt minimize edilmeye çalışılır.

Arazileri verimli bir şekilde taramak için en sık kullanılan yaklaşımlardan bir tanesi kapsama ağacı yöntemidir. Kapsama ağacının tanımı şu şekildedir: “*G bağlı bir çizge olsun. Hem ağaç olan hem de G'nin tüm düğüm noktalarını kapsayan bir alt çizgeye kapsama ağacı denir.*”

Problemin tek araçla alan taraması, birden fazla araçla alan taraması, çevrimiçi alan taraması (taranacak alanın haritası daha önceden bilinmiyorsa), çevrimdışı alan taraması veya engel bulunan arazilerin taranması, engel bulunmayan arazilerin taranması gibi çeşitli varyasyonları mevcuttur.

Günümüzde alan taramasının İHA'lar ile bir alanda keşif yapmaktan robotlar ile mayınlı arazilerin mayınlardan arındırılmasına, büyük alışveriş merkezlerinde yerlerin robotlarla temizlenmesinden büyük arazilerde çim biçmeye kadar pek çok uygulaması mevcuttur (Choset, 2001; Zheng, Jain, Koenig ve Kempe, 2005; Jones, 2008).

Bu konuda bugüne kadar yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmı taranacak arazileri düzlemsel olarak ele almıştır. Bu çalışmanın amacı,

düzlemsel arazilerde alan taraması için geliştirilen mevcut yaklaşımlar üzerine geliştirmeler yapılarak düzlemsel olmayan arazilerin de verimli olarak taranabileceği bir yaklaşım türetmektir.

İlgili Çalışmalar

Alan taramasında, en önemli problemlerden bir tanesi arazinin bilgisayar ortamında nasıl gösterileceğidir. Daha açık söylemek gerekirse problem, sürekli gerçek dünyanın kesikli bilgisayar dünyasında nasıl gösterilebileceğidir. Çözümlerden bir tanesi Elfes (1987) tarafından önerilen araziye, araziye eş hücrelere bölerek yakınsamaktır. Bilinmeyen ve yapılandırılmamış alanlar için, Elfes sonar tabanlı gerçek dünya harita ve navigasyon sistemi önermiştir. Bu yaklaşımla araziye bilgisayar ortamında gösterebilmek için bir yaklaşım bulmuştur. Bu yaklaşımda arazi, eş hücrelerden oluşan iki boyutlu bir dizi olarak gösterilmiştir. Hücre, hücreye bir araç girince veya aracın algılayıcısı hücreyi algılayınca gezilmiş olarak kabul edilir. 2 boyutlu dizideki tüm hücreler gezildiğinde alan taranmış olur.

İnsansız araçlarla alan taramasına diğer hücre tabanlı bir yaklaşım ise Gabriely ve Rimon tarafından önerilen kapsama ağacı yaklaşımıdır (Gabriely ve Rimon, 2001). Bu yaklaşımda araziye, arazi eş hücrelere bölünüp daha sonra bu hücrelerden bir çizge elde edilerek yakınsanmıştır. Daha sonra bu çizgenin kapsama ağacı bulunur ve etrafı bir ya da birden fazla araçla dolaşılır. Dolaşma bittiğinde alan taranmış olur.

Hert, Tiwari ve Lumelsky otonom su altı araçlarına 3 boyutlu su altı alanlarının taranması için rota planı yapan kısmi kesikli bir algoritma önermiştir (Hert, Tiwari ve Lumelsky, 1996). Önerilen algoritma çevrimiçidir (Taranacak olan su altındaki alan tarama başlamadan önce bilinmemektedir.) Bu yaklaşımdaki hücreler tamamen sabit değildir, enleri sabit fakat boyları değişkendir. Bu algoritma ile basit bağlantılı ya da basit olmayan bağlantılı alanlar taranabilmektedir. Algoritmanın özyinelemeli bir doğası vardır ve araç alanı paralel düz çizgiler boyunca zigzag hareketi yaparak tarar. Alan adalar ve koylar içerebilir. Koylara girerken ya da çıkarken koyların içindeki bazı alanlar birden fazla taranabilir ya da bazı alanlar hiç taranmayabilir (Bu tür koylara saptırıcı koy denir). Bu tür koyları taramak için özel yaklaşımlara gerek vardır. Alan ada içerdiği zaman, yani

alan basit bağlantılı değilse, aynı prosedürler üzerinde küçük değişiklikler yapılarak alanın tamamen taranması sağlanır.

Alanın hücrelere ayrılması bir yakınsama olmak zorunda değildir, tam da olabilir. Alan tam olarak hücrelere ayrılırken, öyle farklı bölgelere ayrılır ki bu bölgelerin birleşimi alanı tam olarak verir (Choset, 2001). Tam olarak hücrelere ayırma tekniklerinden bir tanesi alanı yamuksal şekilde ayırmaktır. VanderHeide ve Rao yamuksal şekilde alan ayırma tabanlı çevrimiçi bir alan taraması metodu önermiştir (VanderHeide ve Rao, 1995). Temel olarak, insansız araç alan hakkında bilgi toplama fazından sonra alanı dikdörtgenlere ayırır ve her dikdörtgen için ayrı bir rota planlaması yapar. Daha sonra her dikdörtgen için bulunan rotaları birleştirir ve tek bir rota elde eder.

Önerilen Yaklaşım

Bugüne kadar önerilen metotlar genelde düz alanlarda alan taraması yapmak içindir. Biz bu yazıda düzlemsel olmayan, engebeli yüzeyleri taramak için, insansız araçlara rota planlaması yapan bir yaklaşım sunuyoruz. Bizim yaklaşımımız da temel olarak Gabriely ve Rimon'un yaklaşımı (Gabriely ve Rimon, 2001) gibi Kapsama Ağacı Taraması yöntemini kullanmaktadır. Ancak bu yöntemde, kapsama ağacı oluşturulurken, araziden elde edilen çizgenin kenarlarına birim ağırlık yerine komşu iki düğüm arasındaki eğime bağlı bir ağırlık atanır. Daha sonra oluşan çizgenin minimum kapsama ağacı bulunarak bu ağacın etrafı dolaşılır.

10	10	10	10	10	10	20	20	20	30
20	30	30	20	20	20	30	30	30	40
20	30	30	20	30	40	40	30	30	30
30	30	30	30	30	40	40	40	40	40
20	20	30	40	40	50	50	50	50	50
20	20	30	40	50	50	60	50	50	40
20	20	20	30	40	40	50	40	40	30
20	20	20	40	40	50	40	30	40	30
30	30	30	40	40	40	40	30	30	20
20	20	20	30	30	30	30	20	20	10

Şekil 1. Arazi İçin Örnek Matris

Arazi, bilgisayarda her bir elemanı o noktanın yüksekliğini (Belli bir yere göre) belirten bir $N \times M$ 'lik matris ile gösterilir. Şekil 1'de bu matrise bir örnek görülmektedir.

İnsansız araca bağlı kameranın görüş açısının ya da daha genel bir söylemle araca bağlı cihazın kapsama alanının, matriste bir karelik alana denk geldiği farz edilmektedir. Bu matris N. Hazon'ın yaklaşımındaki gibi her kenarı iki kare olan (daha genel bir söylemle aracın kapsama alanı çapının iki katı uzunluğunda) daha büyük karelere ayrılır (Hazon, 2005) (Şekil 2).

10	10	10	10	10	10	20	20	20	30
20	30	30	20	20	20	30	30	30	40
20	30	30	20	30	40	40	30	30	30
30	30	30	30	30	40	40	40	40	40
20	20	30	40	40	50	50	50	50	50
20	20	30	40	50	50	60	50	50	40
20	20	20	30	40	40	50	40	40	30
20	20	20	40	40	50	40	30	40	30
30	30	30	40	40	40	40	30	30	20
20	20	20	30	30	30	30	20	20	10

Şekil 2. Alt Karelere Ayrılmış Matris

Bu matristen $(N/2) \times (M/2)$ 'lik yeni bir matris üretilir. Bu matrisin her bir elemanı eski matrisin 2×2 'lik karelerinin içindeki elemanlara (Şekil 2'de kalın sınırlarla belirtilen) denk gelmektedir. Yeni matristeki her bir eleman da eski matristeki gibi yükseklik belirtmektedir. Bu yükseklikler eski matristeki 2×2 'lik karelerdeki 4 elemanın aritmetik ortalaması alınarak bulunur ve gerçek araziye yakınsama yapılır. Yani, bir 2×2 'lik kare içindeki elemanlar H_1, H_2, H_3, H_4 ise yeni matriste bu kareye denk gelen elemanın değeri H_{yeni} , bu dört elemanın aritmetik ortalamasıdır (şekil 3).

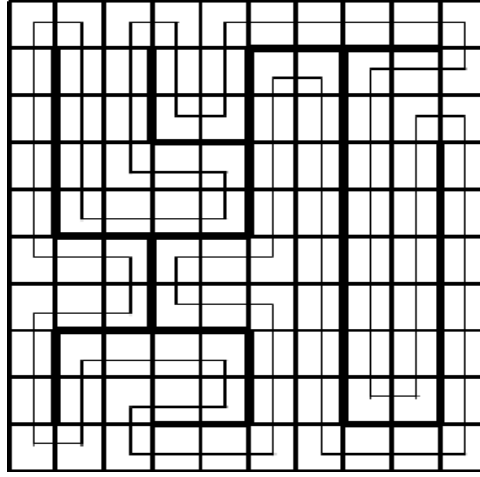
$$\begin{array}{|c|c|} \hline H_1 & H_2 \\ \hline H_3 & H_4 \\ \hline \end{array} \longrightarrow \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4}$$

Şekil 3. Alt Matristeki Dört Elemanın Aritmetik Ortalaması

Yeni matristeki her bir hücre aynı zamanda bir düğüm noktasıdır. Her düğüm noktası ile, kendisine karşılık gelen hücrenin komşuları kenarlar aracılığıyla bağlıdır (Her bir hücre, kendisinin sağındaki, solundaki, üstündeki ve altındaki hücre ile komşudur, çapraz hücreler komşudan sayılmaz.)

Kenarların ağırlıkları, bağladıkları düğüm noktaları arasındaki eğime bağlı bir fonksiyon aracılığıyla bulunur. Bu fonksiyon, düğüm noktaları arasındaki yatay uzaklık d , yükseklikleri arasındaki fark h ise, doğrudan aradaki uzaklığı veren Pisagor bağıntısı, yani $\sqrt{d^2 + h^2}$, özellikle İHA'lar için rüzgârın yönü ve şiddetine bağlı bir bağıntı, ya da amaca göre çok daha karmaşık bir bağıntı olabilir.

Çizge bu şekilde oluşturulduktan sonra minimum kapsama ağacı bulunur ve bu kapsama ağacının etrafı Y. Gabriely ve E. Rimon'un yaptığı yaklaşımdaki gibi araçlar tarafından turlanır (Gabriely ve Rimon, 2001). Yükseklik matrisi Şekil 1'deki gibi olan matriste, doğrudan Pisagor bağıntısına göre bulunmuş çizgenin, bu yaklaşıma göre turlanırken ortaya çıkan rota Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Kapsama Ağacının Turlanması

Test Sonuçları

Testlerde 15 tane girdi kullanıldı. Girdiler, rastgele üretilmiş araziler olup 250x250 matris şeklinde gösterilmiştir. Girdilerdeki arazilere en fazla 30 adet engel konulmuştur. Bütün girdiler aynı olup, testlerde bizim önerdiğimiz yaklaşım ile şimdiye kadar düzlemsel arazileri taramada kullanılan doğrudan kapsama ağacı yaklaşımını kullanan metodu karşılaştırdık. Bunu yaparken her birinin ortalama eğimi farklı olan girdiler denedik. Yaklaşım test edilirken kullanılan girdilere <http://www.ceng.metu.edu.tr/~e1631126/> adresinden ulaşılabilir.

Ortalama eğim, bütün komşu hücre ikililerinden elde edilen eğimlerin toplamının çizgedeki kenar sayısına bölümünden elde edilmiştir. İki hücre arasındaki eğim, iki hücrenin ortalama yükseklikleri arasındaki farkın bu hücreler arasındaki yatay uzaklığa bölümü olarak tanımlanmıştır.

Testlerde metot, çizgedeki kenarlara ağırlık atamada kullanılan iki farklı ağırlık fonksiyonu kullanılarak denenmiştir. Bu fonksiyonlardan ilki, kenarlara doğrudan Pisagor bağıntısı kullanılarak bulunan, hücreler arasındaki doğrusal uzaklığı bulmaktadır. Diğeri ise yine ilk fonksiyon gibi Pisagor bağıntısını kullanarak hücreler arasındaki doğrusal uzaklığı bulmaktadır. Ancak bunu doğrudan kenarların ağırlığı olarak kullanmak yerine buna, artan eğim ile beraber artan bir ceza puanı eklemektedir. Fonksiyonlar ve test sonuçları daha detaylı olarak aşağıda açıklanmıştır.

Doğrudan Pisagor Bağıntısını Kullanan Ağırlık Fonksiyonu

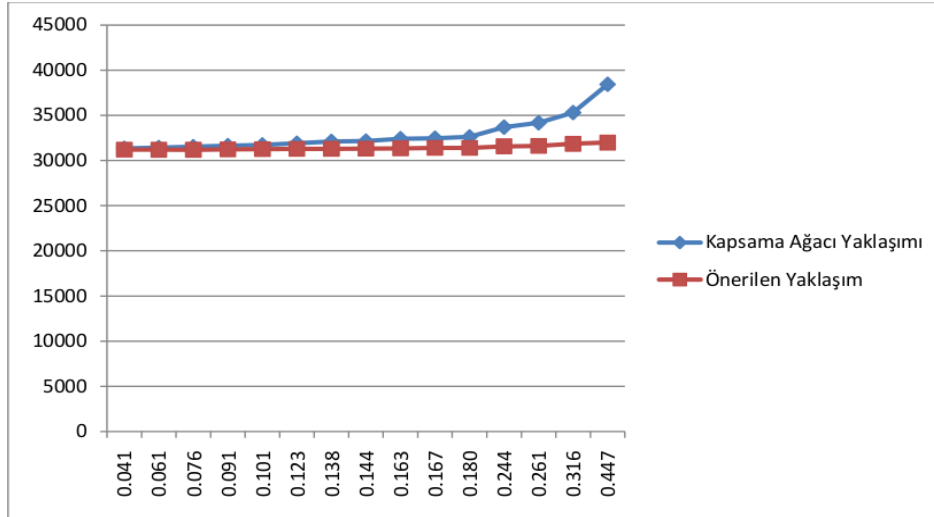
Ortalama yükseklikleri h_1 ve h_2 olan, aralarındaki yatay uzaklık ise d olan hücrelere karşılık gelen düğümler arasındaki kenarlara,

$$w = \sqrt{h_1 - h_2 / d^2 + d^2} \quad (1)$$

fonksiyonuna göre ağırlık atanmıştır. Girdi numarasına göre ortalama eğim, kapsama ağacı yaklaşımına göre bulunan ağaçtaki kenarların ağırlıkları toplamı ve önerdiğimiz metoda göre (Herhangi bir kapsama ağacından ziyade minimum kapsama ağacına göre) bulunan ağaçtaki kenarların ağırlıkları toplamı çizelge 1’de gösterilmiştir. Eğime bağlı olarak değişen kenar ağırlıkları toplamı çizelge 2’de gösterilmiştir (Dikey eksen ağırlıklar toplamına, yatay eksen ortalama eğime karşılık gelmektedir.).

Tablo 1. İki Metodun Denklem (1)'e Göre Karşılaştırılması

Girdi No	Ortalama Eğim	Kapsama Ağacı Yaklaşımı	Önerilen Yaklaşım
Girdi-1	0.041	31347.4	31193.6
Girdi-2	0.061	31429.8	31192.0
Girdi-3	0.076	31523.4	31184.9
Girdi-4	0.091	31639.1	31230.6
Girdi-5	0.101	31720.5	31251.1
Girdi-6	0.123	31908.1	31284.4
Girdi-7	0.138	32107.4	31293.4
Girdi-8	0.144	32146.8	31306.2
Girdi-9	0.163	32410.0	31349.7
Girdi-10	0.167	32464.5	31395.0
Girdi-11	0.180	32608.3	31382.8
Girdi-12	0.244	33693.2	31568.5
Girdi-13	0.261	34176.4	31609.5
Girdi-14	0.316	35306.8	31844.6
Girdi-15	0.447	38438.3	31981.4

Tablo 2. İki Metodun Denklem (1)'e Göre Karşılaştırılması

Ek Olarak Eğime Bağlı Ceza Puanı da Kullanan Ağırlık Fonksiyonu

Ortalama yükseklikleri h_1 ve h_2 olan, aralarındaki yatay uzaklık ise d olan hücrelere karşılık gelen düğümler arasındaki kenarlara,

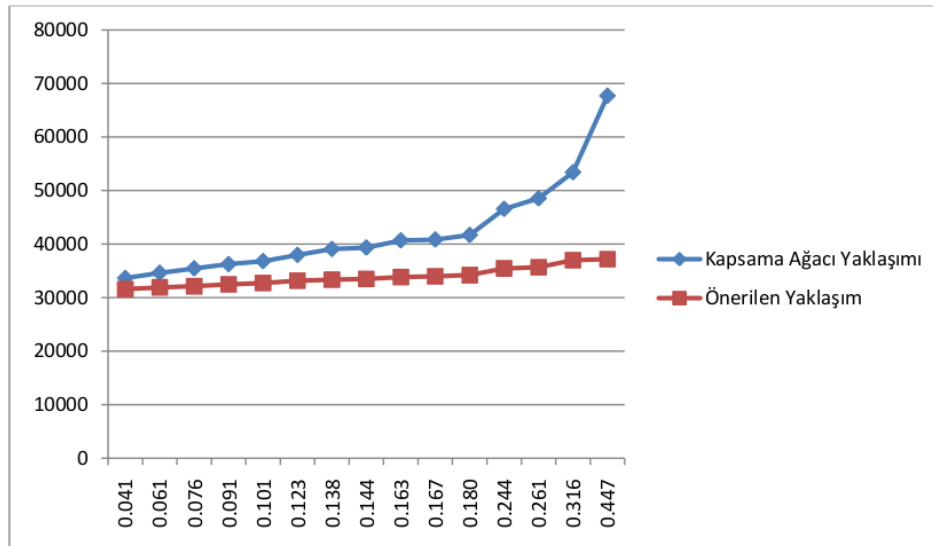
$$w = \sqrt{h_1 + h_2} / d * \left[\frac{|h_1 - h_2|}{d} \right] \quad (2)$$

fonksiyonuna göre ağırlık atanmıştır. Bu fonksiyon, ilk fonksiyona yine eğime bağlı bir ceza puanı eklenerek elde edilmiştir. İlk fonksiyondaki şekilde sonuçlar çizelge 3 ve çizelge 4'te gösterilmiştir.

Tablo 3. İki Metodun Denklem (2)'ye Göre Karşılaştırılması

Girdi No	Ortalama Eğim	Kapsama Ağacı Yaklaşımı	Önerilen Yaklaşım
Girdi-1	0.041	33618.1	31578.1
Girdi-2	0.061	34614.1	31901.9
Girdi-3	0.076	35440.0	32108.5
Girdi-4	0.091	36230.7	32468.1
Girdi-5	0.101	36785.4	32695.4
Girdi-6	0.123	37953.1	33147.8
Girdi-7	0.138	39047.1	33347.6
Girdi-8	0.144	39325.0	33481.9
Girdi-9	0.163	40666.2	33813.4
Girdi-10	0.167	40826.5	33976.9
Girdi-11	0.180	41677.3	34196.6
Girdi-12	0.244	46548.1	35443.8
Girdi-13	0.261	48515.4	35676.8
Girdi-14	0.316	53395.8	36982.7
Girdi-15	0.447	67680.1	37171.3

Tablo 4. İki Metodun Denklem (2)'ye Göre Karşılaştırılması



Yorumlar

İki yaklaşım doğrudan Pisagor bağıntısını kullanan ağırlık fonksiyonu ile test edildiğinde, önerilen yaklaşım diğer yaklaşıma göre biraz daha verimli rotalar bulmaktadır. Arazinin ortalama eğimi arttıkça (Özellikle 0.5'e yaklaştıkça) aradaki fark daha belirgin hale gelmektedir. Yaklaşımlar Pisagor bağıntısına ek olarak eğime bağlı ceza puanı da kullanan ağırlık fonksiyonu ile test edildiğinde, yine önerilen yaklaşım diğer yaklaşıma göre daha verimli rotalar bulmaktadır, ancak aradaki fark bu sefer daha belirgindir. Arazinin ortalama eğimi arttırıldıkça aradaki fark ilk ağırlık fonksiyonu kullanıldığı zamankine göre çok daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle ortalama eğim 0.5'e yaklaşırken, önerilen yaklaşımda toplam ağırlık yavaş bir artış göstermiştir, ancak diğer yaklaşımda toplam ağırlık neredeyse üstel bir biçimde artış göstermiştir.

Sonuç

Makalede düzlemsel olmayan arazilerin insansız araçlarla verimli bir şekilde taranması için yeni bir metot önerilmiştir. Bu metot, temel olarak, kapsama ağacı yaklaşımında bulunan kenarlara birim ağırlık yerine eğime bağlı bir fonksiyona göre atanan ağırlıkları kullanmaktadır. Testlerde önerilen metot kapsama ağacı metodu ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak önerilen metot diğer metoda göre daha verimli sonuçlar verse de kenarlara eğimi daha fazla hesaba katmak için atanan ağırlıklarda eğimin uzaklığa göre etkisi daha da arttırıldığında aradaki fark daha da artmaktadır.

Düzlemsel yüzeylerden elde edilen herhangi bir kapsama ağacı aynı zamanda minimum kapsama ağacı olacağından önerilen yaklaşımla arada rotanın verimi açısından bir fark olmaz. Ancak yüzey düzlemsel değilse ortalama eğime bağlı olarak minimum kapsama ağacı herhangi bir kapsama ağacına göre daha verimli sonuçlar verir. Bu nedenle herhangi bir kapsama ağacının etrafı dolaşılmaktansa minimum kapsama ağacının etrafı dolaşılırsa, düzlemsel olmayan arazilerde, tarama için daha verimli rotalar elde edilmiş olur.

Teşekkür Notu

Makalenin yazarları olarak, ODTÜ-TSK MODSİMMER'e bu makaleye desteğinden dolayı ve Doç. Dr. Veysi İşler'e yaptığı büyük katkılar ve yardımlardan dolayı teşekkürü borç biliriz.

Kaynakça

- Choset, H. (2001). Coverage for Robotics—A Survey of Recent Results. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 31, 113-126.
- Elfes, A. (1987). Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation. *IEEE J. Robotics Autom*, 3, 249-265.
- Gabriely, Y. ve Rimon, E. (2001). Spanning-tree based coverage of continuous areas by a mobile robot. *Ann. Math. Artif. Intell.*, 31(1-4), 77-98.
- Hert, S., Tiwari, S. ve Lumelsky, V. (1996). A Terrain-Covering Algorithm for an AUV. *Autonom. Robots* 3, 91-119.
- Hazon, N. (2005). *Robust and Efficient Multi-Robot Coverage*. Bar-Ilan University Department of Computer Science, Ramat-Gan, Israel.
- Jones, P.J. (2008). *Cooperative Area Surveillance Strategies Using Multiple Unmanned Systems*. School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, ABD.
- VanderHeide, J. ve Rao, N.S.V. (1995). Terrain Coverage of an Unknown Room by an Autonomous Mobile Robot. *Technical report ORNL/TM-13117*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- Zheng, X., Jain, S, Koenig, S. ve Kempe, D. (2005). Multi-Robot Forest Coverage, *In Proc. IROS*.