

Doğrultulu Maksimum Yöntemiyle Ultrasonik Ark Haritalarının İşlenmesi ve Varolan Yöntemlerle Karşılaştırması

Directional Processing of Ultrasonic Arc Maps and its Comparison with Existing Techniques

Billur Barshan ve Kerem Altun

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Bilkent Üniversitesi 06800, Bilkent, Ankara

billur@ee.bilkent.edu.tr, kaltun@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe

Uzaklık ölçümlerinden elde edilen ultrasonik ark haritalarının (UAH) işlenmesi için geliştirilen doğrultulu maksimum (DM) yöntemi, bilinen yöntemlerle karşılaştırılmaktadır. Yöntem, ark haritalarını ortamın sınırlarına dik doğrultularda işleyerek harita çıkarımındaki hatayı azaltmayı ve ultrasonik duyuculara özgü açısal belirsizliğin, ileri-dereceli yansımaların, çapraz ve hatalı ölçümlerin olumsuz etkilerini yok etmeyi amaçlamaktadır. Karşılaştırma, deneysel çalışmalar esas alınarak yapılmış, bir gezer robotun ortamdan elde ettiği ultrasonik uzaklık ölçümleri kullanılmıştır. Birbirini tamamlayıcı nitelikte üç değişik başarımlı ölçütü belirlenmiştir. DM, ortalama mutlak hata ölçütü ile doluluk oranı arasında iyi bir denge sağlamak ve saniyenin onda birinden az işlem süresi gerektirmektedir. Yöntem seçiminde her yöntemin kendine özgü avantaj ve dezavantajları gözönünde bulundurulmalıdır.

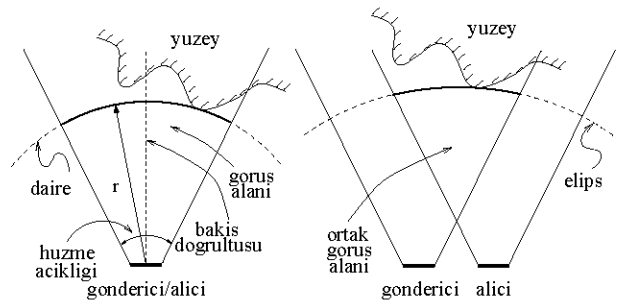
Abstract

Directional maximum (DM) technique for processing ultrasonic arc maps (UAMs) is proposed and compared to existing techniques. It employs directional processing in extracting the map of the environment from UAMs. DM aims at overcoming the intrinsic angular uncertainty of ultrasonic sensors in map building, as well as eliminating noise and cross-talk related misreadings. The comparison is based on experiments with a mobile robot which acquired ultrasonic range measurements through wall following. Three complementary performance criteria are used. The DM technique offers a very good compromise between mean absolute error and correct detection rate, with a processing time less than one tenth of a second. It is also superior in range accuracy and in eliminating artifacts, resulting in the best overall performance. The results indicate several trade-offs in the choice of UAM processing techniques.

1. Giriş

Ultrasonik duyucular, dayanıklı, hafif, ucuz ve pratik olmaları nedeniyle akıllı sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu duyuculardan elde edilen veriler doğru

modellenir, yorumlanır ve uygun yöntemlerle işlenirse doğruluk payı yüksek harita çıkarımı gerçekleştirilebilir. Ultrasonik duyucuların hüzmeye açıklığı, ilgili sıklık aralığı nedeniyle oldukça geniş olup tek bir duyucu ile uzaklığı ölçülen yüzeyin, geniş görüş alanı içerisinde hangi açısal doğrultuda olduğunu belirlemek mümkün değildir. Dolayısıyla tek bir ultrasonik duyucu, doğruluğu yüksek uzaklık bilgisi sağlamasına rağmen hüzmeye açıklığından daha iyi açısal çözünürlük sağlayamaz. Ayrıca, çoklu ve ileri-dereceli yansımalar, çapraz konuşmalar ve hatalı ölçümler, ultrasonik verilerin değerlendirilmesinde karışıklık ve yanlış yorumlamalara neden olabilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen yöntemle bunların etkisi büyük ölçüde azaltılmakta ve çoklu yansımaların içerdiği bilgi de değerlendirilebilmektedir. Ultrasonik duyuculara özgü açısal belirsizlik, elde edilen verilerin ark haritasına dönüştürülerek ortamın sınırlarına dik doğrultularda işlenmesi sonucu etkin bir biçimde azaltılmakta, doğruluk payı yüksek harita çıkarımı sağlanmaktadır. Yöntem, sayısı ve yapısı değişken duyucu düzeneklerine ve sentetik dizimlere uygulanabilmesi bakımından gerekli olan esnek ve dayanıklı yapıya da sahiptir.



Şekil 1: Gönderici ve alıcının (a) aynı, (b) ayrı cihazlar olduğu durumlar.

Bu çalışmada sadece uçuş süresine dayalı uzaklık ölçümleri kullanılmaktadır. Sık kullanılan bir yaklaşım, geniş hüzmeye açıklığı duyucunun bir sınırlaması olarak kabul edip yansıma noktasının bakış doğrultusunda yer aldığı varsayarak bu doğru üzerinde, ölçülen uzaklığa bir

işaret koymaktır. Bu yöntemden aşağıda bakış doğrultusu (BD) yöntemi olarak söz edeceğiz. Karşılaştırılan tüm yöntemlerde, açısız belirsizliği temsil eden dairesel ve eliptik arklar çizilmektedir. Aynı duyucu hem gönderici hem alıcı olarak kullanıldığında, yansıtıcı cisim, yarıçapı r ve genişliği yaklaşık hüzmeye açıklığı kadar olan bir çembersel ark üzerinde herhangi bir yerde olabilir (Şekil 1(a)). Gönderici ve alıcı farklı cihazlar ise, yansıma noktası, odak noktaları gönderici ve alıcının bulunduğu konumlara karşılık gelen bir eliptik ark üzerindedir (Şekil 1(b)). Her iki durumda da arklar, yansıma noktalarında yüzeye teğettirler. Açısız belirsizliği temsil eden bu arklar, **ultrasonik ark haritası (UAH)** adı verilen iki boyutlu bir matrise kaydedilmektedir. Çok sayıda arkın çizimi sonucu oluşan UAH'nda koyulaşan kısımların işlenmesiyle hüzmeye açıklığının çok ötesinde açısız çözünürlük elde edilebilir.

2. UAH İşleme Yöntemleri

Aşağıda yöntemlerin herbiri kısaca özetlenmekte olup ayrıntılı bilgi, verilen kaynaklardan sağlanabilir.

Bakış Doğrultusu (BD) yönteminde yukarıda değinilmiş olup geçmişte en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde UAH'daki arkların herbiri tek bir noktaya (arkın orta noktası) indirgenmekte ve harita bu noktalardan oluşmaktadır.

Oylama ve Eşikleme (OE) yönteminde bir pikselden geçen her ark, o pikselin doluluğuna verilmiş bir oy gibi düşünülerek her pikselden geçen arklar sayılır. Daha sonra uygun bir eşik değeri belirlenerek bu eşik değerinin üzerinde kalan piksel değerleri saklanır, diğer pikseller sıfırlanır [4]. Eşik değerinin üzerindeki pikseller haritayı oluşturur.

Doğrultulu Maksimum (DM) yönteminde veriler ilgi doğrultusu adı verilen, ortamdaki yüzeylere dik olan doğrultularda işlenmektedir. Böylelikle veri elde etme ve işleme sürecine bir yön kavramı katılmaktadır [1]. Bu çalışmada, gezer robot, ortamdan aldığı uzaklık ölçümleri yardımıyla ortamın sınırlarına uzaklığını yaklaşık 80 cm'de sabit tutmaya çalışarak sınırlara paralel hareket etmekte ve bir yandan da yeni veriler toplamaktadır. UAH oluşturulurken her pikselden geçen arkların sayısı kaydedilir. Elde edilen UAH, robotun izlediği yolun belirlediği ilgi doğrultularında taranır ve her doğrultuda sadece belli bir eşik değerinin üzerinde olup üzerinden en çok ark geçen piksel kalacak şekilde temizlenir. Eğer herhangi bir doğrultuda birden fazla maksimum varsa bunların medyanı alınıp, o doğrultudaki diğer pikseller sıfırlanır. Bu şekilde UAH belli doğrultularda işlenerek gereksiz uzantı, parça ve kalıntılardan arındırılır.

Morfolojik İşleme (Mİ) yaklaşımında, imge işlemede yaygın olarak kullanılan erozyon, genişletme, inceltme gibi morfolojik operatörler, elde edilen UAH'nda yer alan gereksiz uzantı, parça ve kalıntıları yok ederek doğruluğu yüksek harita çıkarımı için kullanılır [3]. İmge işlemede bu operatörler çoğunlukla ikili imgelere uygulanmıştır. Burada ise Mİ, uzaklık bilgisini ve açısız belirsizlikleri temsil eden UAH'larına uygulanmaktadır. Bu çalışmada değişik morfolojik operatörler denenmiş ve en iyi sonuçlar parametre değeri 7 olan inceltme operatörü ile elde edilmiştir.

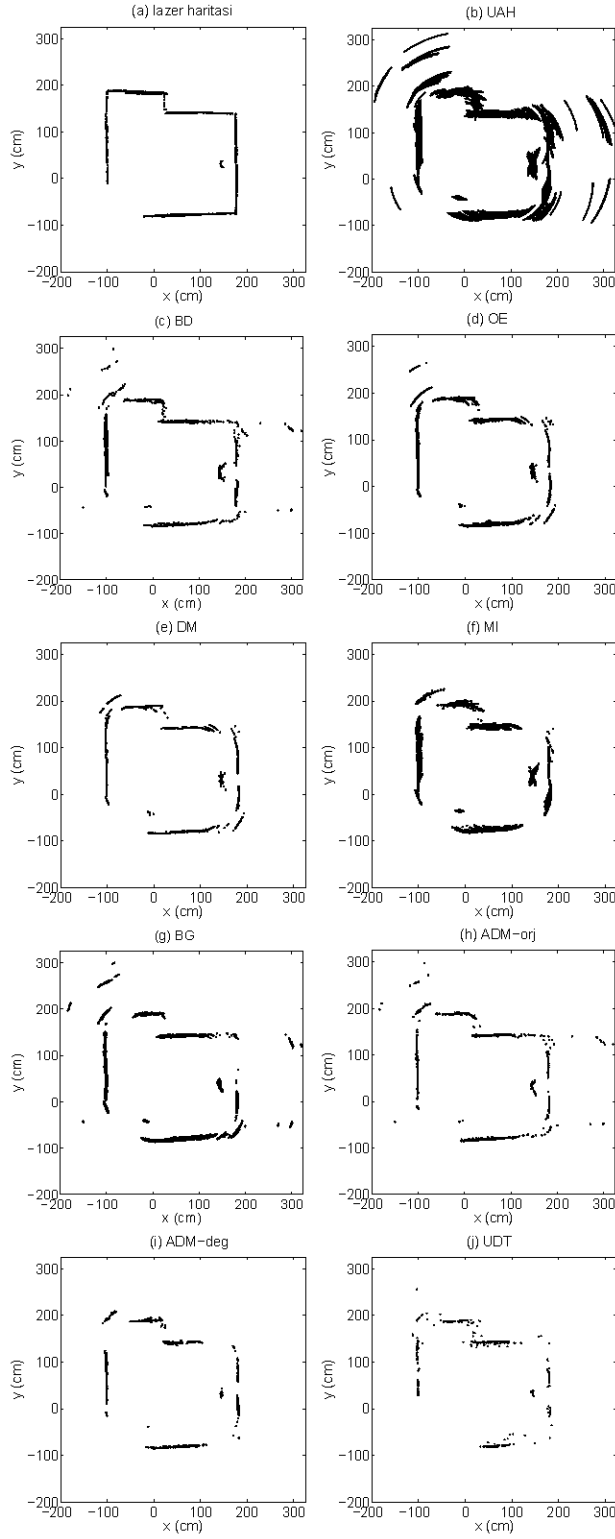
Bayesçi Güncelleme (BG) yönteminde ortam, her bir elemanı UAH'nın bir pikseline karşılık gelen kare şeklindeki kafeslere ayrılır. Başlangıçta her pikselin boşluk/doluluk olasılığı eşit alınır ($1/2$). Uzaklık ölçümleri elde edildikçe, çizilen her ark için duyucunun görüş alanı içinde bulunan piksellerin boş olma olasılığı, arkın üzerinden geçtiği piksellerin ise dolu olma olasılığı Bayes kuralına göre artırılır [2]. Arkla sınırlanmış bölgenin dışında kalan piksellerin boşluk/doluluk olasılıkları değiştirilmez. Elde edilen doluluk olasılıkları bir eşikten (burada 0.999) geçirilerek dolu sayılan ve haritayı oluşturan pikseller belirlenir.

Ark-Doğrultusal Medyan (ADM) yönteminde UAH'ndaki her arkın diğer arklarla kesişim noktaları bulunur. Daha sonra her ark için bu kesişim noktalarının medyanı alınarak sinyalin geliş doğrultusu buna göre kestirilir ve medyana karşılık gelen pikselin değeri korunur. Arkın diğer kısımları ise sıfırlanır [5]. Eğer ark diğer arklarla hiç kesişmiyorsa, yansıma noktası olarak arkın orta noktası alınır (BD yöntemindeki gibi). Eğer arkın tek bir kesişim noktası varsa o nokta alınır. Kaynak [5]'de verilen orijinal ADM yönteminde (ADM-orj) üç veya daha fazla kesişimi olan arklar için kesişimlerin medyanı alınmıştır. Kesişim noktalarının sayısı üçten büyük ve çift ise en ortadaki iki kesişim noktasının orta noktası alınır ve haritada buraya bir nokta konur. Sadece iki kesişimi olan arklar kullanılmaz. ADM yöntemi BD yönteminin oldukça geliştirilmiş bir hali olarak düşünülebilir. Bu çalışmada orijinal ADM yöntemine ek olarak bu yöntemde iki küçük değişiklik yaptık: hiç kesişimi olmayan arkları harita çıkarımında kullanmadık; iki kesişimi olan arkları ise diğer çift kesişimli arklarda olduğu gibi kesişim noktalarının orta noktalarını alarak değerlendirdik (ADM-değ).

Üçgenlemeye Dayalı Tümleşim (ÜDT) yöntemi ortamdaki özneliklerin sivri kenar ve köşeler gibi noktasal nitelikte olduğunu varsayıp buna göre üçgenleme yapan bir geometrik modele dayalıdır [6]. Dolayısıyla da ortamda bulunan duvar gibi düz yüzeylerin doğruluğu yüksek bir biçimde belirlenmesi için çok uygun değildir. ÜDT yönteminde ultrasonik ölçümler elde edildikçe en son 20 ölçüm değerlendirilip aynı özneliğe karşı gelen 5 m'nin altındaki ölçümler üçgenleme yoluyla birleştirilmektedir. Bu yöntemdeki n_t parametresi, ortamdaki bir özneliğe ait başarılı üçgenlemelerin sayısıdır. n_t 'ye 1'den 8'e kadar değerler verilerek elde edilen sonuçlar incelenmiştir. n_t değeri büyüdükçe elde edilen noktaların doğruluğu yükselmekte, ancak çıkarılan haritanın doluluk oranı azalmaktadır. Bu yöntemin uygulanmasında Kaynak [6]'da verilen parametrelerin aynısını kullanılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Karşılaştırma, birbirini tamamlayıcı nitelikte üç değişik başarımlı ölçütü çerçevesinde yapılmıştır: Lazerle elde edilen ve gerçeğe çok yakın olduğu için mutlak doğru olarak kabul edilen harita ile ultrasonik duyucularla elde edilen harita arasındaki ortalama mutlak fark, haritanın lazer haritasına göre doluluk oranı, ve bilgisayar ortamındaki işleme süresi. Bir yöntem için ortalama mutlak fark hesaplanırken o yöntemle elde edilen haritadaki her noktanın kendisine en yakın lazer noktasına uzaklığı bulunur ve bu



Şekil 2: (a) Lazerle elde edilen gerçeğe oldukça yakın harita ve (b) UAH; (c) BD, (d) OE, (e) DM, (f) Mİ, (g) BG, (h) ADM-orj, (i) ADM-değ, (j) ÜDT sonuçları.

yöntem	ortalama mut.hata (piksel)	doluluk oranı	işlem süresi (saniye)
BD	6.06	0.631	0.001
OE (eşik= 5)	2.63	0.883	0.074
DM (eşik= 5)	2.37	0.883	0.078
Mİ (inceltme,7)	4.89	0.820	0.082
BG (eşik= 0.999)	4.85	0.754	0.566
ADM-orj	4.78	0.606	1.054
ADM-değ	1.68	0.522	0.871
ÜDT ($n_t \geq 2$)	2.70	0.414	0.010

Tablo 1: Yöntemlerin başarımlarını karşılaştırması.

uzaklıkların haritadaki tüm dolu noktalar üzerinden ortalaması alınır. Doluluk oranı ise dolu veya boş olduğu lazer verileri tarafından da doğrulanan ilgi doğrultularının toplam ilgi doğrultusu sayısına oranıdır. Karşılaştırmanın anlamlı olması için her yöntem aynı UAH'sını [Şekil 2(b)] işlemektedir. Deneysel çalışmalarda, Nomad 200 gezer robotu üzerinde bulunan, rezonans sıklığı 49.4 kHz ve dalgaboyu 6.9 mm olan üç adet Polaroid duyucusundan yararlanılmıştır. Duvar, köşe, kenar ve silindirlere oluşan ortamlarda gezer robotun ortamın sınırlarını izlemesi sonucu elde edilen ultrasonik uzaklık ölçümleri, yöntemlerin harita çıkarımı amacıyla karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Deneysel çalışmalara bir örnek olarak Şekil 2 ve buna karşılık gelen karşılaştırma sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. ADM-değ en küçük ortalama mutlak hatayı vermesine karşılık doluluk oranı açısından sondan ikincidir. Bu yöntemle elde edilen haritaların doğruluk payı oldukça yüksek, ancak doluluk oranları düşüktür. Sırasıyla DM ve OE yöntemlerinin hataları ADM-değ'den biraz daha büyük olup bunları ÜDT, ADM-orj, BG, Mİ ve BD izlemektedir. DM ve ADM-değ yöntemleri haritayı gereksiz uzantı, parça ve kalıntılardan arındırmakta en başarılı yöntemlerdir. En yüksek doluluk oranı DM ve OE yöntemleriyle elde edilmiştir. Bunların arkasından Mİ, BG, BD ve ADM-orj gelmektedir. ADM-değ ve ÜDT yöntemlerinin doluluk oranları ise en düşüktür. BD yöntemi basitliği nedeniyle en az işlem süresini gerektirmekte, bunu ÜDT ve OE izlemektedir. Daha sonra DM, Mİ, BG, ADM-değ, ADM-orj gelmektedir. ADM yöntemleri düşük doluluk oranı verip yüksek işlem süresi gerektirdiği için gerçek zaman uygulamaları için çok uygun olmayabilir. Sürenin çoğu ark kesişim noktalarının kaydı tutmak ve bunların medyanlarını hesaplamak için gerekmektedir. Burada bir başarımlar ölçütü olarak kullanılmamakla birlikte DM ile elde edilen haritanın hatları diğerlerine göre çok daha ince olup uzaklıktaki belirsizliğin daha az olduğunu göstermektedir. DM, Mİ, ve OE yöntemlerinin her birinin farklı avantajları olup hangisinin seçileceği uygulamanın gereksinimlerine bağlı olacaktır. DM, ortalama mutlak hata ve doluluk oranı arasında iyi bir denge sağladığı ve saniyenin onda birinden az işlem süresi gerektirdiği için birçok durumda uygun bir yöntemdir. Ayrıca uzaklıktaki belirsizliği azaltmakta ve UAH'nı arındırmakta üstündür. Bazı durum-

larda diğer yöntemler de uygun seçimler olabilir. Örneğin, UAH çok sayıda arktan oluşuyorsa ve işlem süresi ve hafıza çok sınırlayıcı değilse ADM yöntemi uygun olabilir. Eğer gerçek zamanda basit ve hızlı işlem yapılması gerekiyor, ancak çok yüksek doğruluk gerekmiyorsa bir çok uygulamada olduğu gibi BD yöntemi kullanılabilir. ÜDT ise kenar, köşe, ince silindirik gibi özneliklerin fazlaca bulunduğu ortamlarda kullanılmaya uygun bir yöntemdir.

Çalışmanın son aşamasında, değişik yöntemlerle elde edilen haritalara ve lazer haritasına aktif yılan kontür eğrileri uyarlanmıştır. Böylelikle çıkarılan haritalardaki kopukluklar yok edilip ilk iki başarımlı ölçütü birleştirilmektedir. Yılan eğrisi [7], önceden tanımlanmış bir enerji kriterinin en küçük değerini almasını sağlayan parametrik ve kapalı bir eğridir: $\mathbf{v}(s) = [x(s), y(s)]$, $s \in [0, 1]$. Bu çalışmada aşağıdaki enerji kriteri kullanılmıştır:

$$\mathcal{E} = \int_0^1 \left[\frac{1}{2} \left(\alpha \left\| \frac{d\mathbf{v}}{ds} \right\|^2 + \beta \left\| \frac{d^2\mathbf{v}}{ds^2} \right\|^2 \right) + P(\mathbf{v}) \right] ds \quad (1)$$

Burada α ve β sabit katsayılar, $P(\mathbf{v})$ ise harita üzerinde tanımlanmış bir potansiyel fonksiyondur. Bu fonksiyon, ortamdaki boş veya dolu her noktanın, belli bir yöntemin verdiği haritadaki dolu noktalardan en yakın olanına uzaklığı bulunması sonucu elde edilen Öklid uzaklık dönüşümüyle belirlenmiştir. Yukarıdaki enerji kriterini en küçükleyen yılan eğrisini bulmak bir değişimler hesabı problemi olup genel analitik çözümü yoktur. Özyinelemeli çözüm aşağıdaki denklemlerle bulunabilir [8]:

$$x_{t+1} = (A + \gamma I)^{-1} \left(\gamma x_t - \kappa \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{(x_t, y_t)} \right) \quad (2)$$

$$y_{t+1} = (A + \gamma I)^{-1} \left(\gamma y_t - \kappa \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{(x_t, y_t)} \right) \quad (3)$$

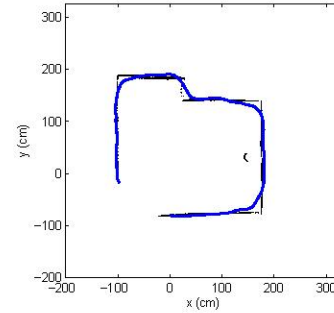
Burada t özyineleme adımını, γ Euler adımını, κ yılan eğrisini minimuma doğru çeken kuvvetin ağırlık katsayısını belirtmektedir. Ayrıca I birim matrisi, A ise α ve β değerlerine bağlı bir matrisi göstermektedir.

Örnek olarak DM yönteminin sonucuna uyarlanan yılan eğrisi Şekil 3'de lazer haritası ile birlikte gösterilmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada UAH'larının işlenmesi için geliştirilen DM yöntemi sunulmuş ve varolan yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Kullanılan yöntem, basit olmasının yanı sıra sayısı ve yapısı değişken algılayıcı düzeneklerine ve sentetik dizilimlere uygulanabilmesi bakımından gerekli esnek ve dayanıklı yapıya da sahiptir. Ultrasonik duyuculara özgü açısal belirsizlik, elde edilen verilerin UAH'larına dönüştürülerek işlenmesi sonucu etkin bir biçimde ortadan kaldırılmış, kuvvetlendirilmiş olan özneliklerden ortamın haritası doğruluk payı yüksek bir biçimde çıkarılmıştır. Ayrıca bu yöntem ileri-dereceli yansımalarla hatalı ve çapraz ölçümleri büyük ölçüde azalttığı ve çoklu yansımaları da değerlendirebildiği için dayanıklıdır. Yöntemin başarımı, gerçek ultrasonik uzaklık ölçümleri kullanılarak önceden bilinen yöntemlerle

karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara yılan eğrilerinin uyarlanmasıyla haritalardaki kopukluklar ortadan kaldırılmıştır. Bu çalışmanın temel fikri olan birden fazla ultrasonik duyucudan elde edilen verilerin UAH'larına dönüştürülüp belli doğrultularda işlenmesi sadece ultrasonik duyucular için değil düşük açısal çözünürlükle uzaklık ölçümünün söz konusu olduğu sonar, radar, optik algılama ve metroloji, uzaktan algılama, jeofiziksel uygulamalar, akustik mikroskopi gibi birbirinden oldukça farklı ölçek ve yapıdaki alanlara da uygulanabilir. Çalışma üç boyuta ve polar koordinatlara da genişletilebilir.



Şekil 3: Ortamın lazerle elde edilmiş haritası ve DM sonucuna uyarlanan yılan eğrisi (düz ve kalın çizgi).

5. Kaynakça

- [1] Barshan, B., "Directional processing of ultrasonic arc maps and its comparison with existing techniques," *Int. J. Robotics Research*, 2007.
- [2] Elfes, A., "Sonar-based real-world mapping and navigation," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, RA-3(3):249-265, Haziran 1987.
- [3] Barshan, B., ve Bağıkent, D., "Morphological surface profile extraction with multiple range sensors," *Pattern Recogn.*, 34(7):1459-1467, Temmuz 2001.
- [4] Barshan, B., "Ultrasonic surface profile determination by spatial voting," *Elect. Lett.*, 35(25):2232-2234, Aralık 1999.
- [5] Choset, H., Nagatani, K., ve Lazar, N. A., "The arc-transversal median algorithm: A geometric approach to increasing ultrasonic sensor azimuth accuracy," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, 19(3):513-522, Haziran 2003.
- [6] Wijk, O., ve Christensen, H. I., "Triangulation-based fusion of sonar data with application in robot pose tracking," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, 16(6):740-752, 2000.
- [7] Kass, M., Witkin, A., ve Terzopoulos, D., "Snakes: Active contour models," *Int. J. Computer Vision*, cilt 1, 1987, pp. 321-331.
- [8] Menet, S., Saint-Marc, P., ve Medioni, G., "Active contour models: Overview, implementation and applications," in *Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man Cybern.*, pp. 194-199, Los Angeles, CA, Kasım 1990.