

# Kızılötesi Algılayıcılardan Elde Edilen Sinyallerle Hedef Ayırdetme ve Konum Kestirimi

Tayfun Aytac ve Billur Barshan  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Bilkent Üniversitesi 06533, Bilkent, Ankara  
{taytac, billur}@ee.bilkent.edu.tr

## Özetçe

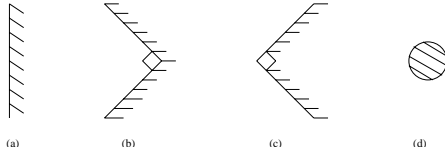
Bu çalışmada, basit ve düşük maliyetli kızılötesi algılayıcıların iç mekanlarda düzlem, köşe, kenar ve silindir gibi sıkça karşılaşılan hedef ilkellerinin ayırdedilmesinde ve konum kestiriminde kullanımı incelenmektedir. Bu tip algılayıcıların yeğinlik ölçümleri büyük ölçüde hedefin konumuna ve yüzey özelliklerine bağlı olup, bu ilişki analitik olarak kolayca ifade edilememektedir. Bu bildiride açısız yeğinlik taramalarını işleyerek hedefleri ayırdedebilen bir yöntem ileri sürüyoruz. Bu yaklaşım hedefin türünü konumdan bağımsız olarak belirleyebilmektedir. Hedef türü belirlendikten sonra, konumu  $(r, \theta)$  da saptanmaktadır. Bütün hedef türleri için, ortalama %97 doğru ayırdetme oranı gerçekleştirilmekte, hedeflerin konumları sırasıyla 0,8 cm ve  $1,6^\circ$  ortalama mutlak erim ve açısız konum hatalarıyla kestirilmektedir. Uygulanan yöntem, basit kızılötesi algılayıcılardan elde edilen verilerin uygun yöntemlerle işlenmesiyle çok daha fazla bilgi çıkarılarak bilinen uygulamaları dışında da kullanılabilceğini göstermektedir.

## 1 Giriş

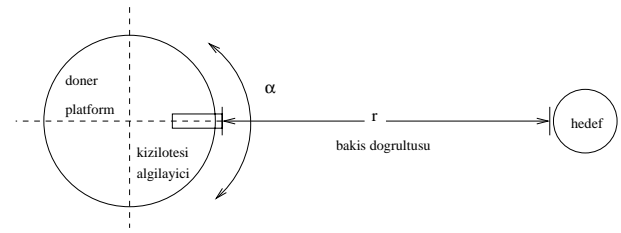
Kızılötesi algılayıcılar ucuz, kullanımı ve erişimi kolay aygıtlardır. Ancak, hedeflerden yansıyan sinyal hedefin geometrisine ve yüzey özelliklerine bağlı olduğundan, tek bir yeğinlik değerine dayanarak güvenilir erim kestiriminde bulunmak mümkün değildir. Ayrıca, hedefin özellikleri, erimi ve açısız konumu bilinmeden basit yeğinlik ölçümleri kullanılarak belirlenememektedir. Bu çalışmada, hedefleri konumdan bağımsız olarak ayırdeden bir tarama mekanizması ve yöntem ileri sürüyoruz. İleri sürdüğümüz yöntemin doğruluğu referans taramalarının sayısını artırarak, hedef ayırdetme ve konum kestirme işlemindeki hesaplama yoğunluğunu artırmadan ölçeklenebilmektedir.

Kızılötesi içeren örüntü tanıma çalışmalarının çoğu iki boyutlu imgelerde öznelik ya da nesne çıkarımıyla ilgilidir. Bu sınıfa yüz tanıma, otomatik hedef tanıma, hedef izleme, otomatik araç sezimi, uzaktan algılama, gürültülü arkaplanlarda hedef saptama ve ayırdetme ve otomatik arazi analizi gibi çalışmalar girmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen konumdan bağımsız örüntü tanıma ve konum kestirimi, çoğunlukla imgeler üzerinde gerçekleştirilen işlemlerden [1], doğrudan hedeflerin çeşitli imgeleme sistemleriyle elde edilen fotografik imgelerinin değil de, dönen bir noktasal algılayıcıdan elde edilen açısız yeğinlik taramalarının işlenmesi bağlamında farklıdır. Ayırdedilen hedefler kordinatlarını belirlemeye çalıştığımız iki boyutlu imgelerden öte, algılayıcı sistemine göre konumunu kestirmek istediğimiz uzayda derinliği olan nesnelere dir.

Kızılötesi algılayıcıların başlıca uygulama alanları arasında robotbilim ve otomasyon, süreç kontrolü, uzaktan algılama ve güvenlik sistemleri yer almaktadır. Özellikle yakın hedeflerin saptanmasında [2], sayma işlemlerinde [3], erim ve derinlik gözetiminde [4], zemin algılamada, konum kontrolünde [5] ve engel saptamada kullanılmaktadırlar. Kaynak [6]'da, kızılötesi algılayıcılar gezgin robot yöngüdümlünde kapı aralıklarında kenarların yerinin belirlenmesinde sonar algılayıcılarla birlikte kullanılmıştır. [7]'de bilinen bir uzaklıkta konumlanmış düzlemsel hedefin yüzey değişkenleri Phong aydınlatma modeliyle belirlenerek kızılötesi algılayıcılar yakın mesafeler (3–25 cm) için erim ölçer olarak modellenmiştir. Kaynak [8] bir odadaki insanların konumlarını belirleyen pasif bir kızılötesi algılayıcı sistemini anlatmaktadır. Kızılötesi algılayıcılar ayrıca farklı atık maddelerin otomatik olarak ayıklanmasında kullanılmıştır [9]. Ancak bildiğimiz kadarıyla basit kızılötesi algılayıcılar ilk kez bu çalışmada hedef ayırdetme amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 1: Deneyde kullanılan hedeflerin kesit alanları: (a) düzlem, (b) köşe, (c) kenar, (d) silindir.



Şekil 2: Deney düzeneği.

## 2 Hedef Ayırdetme ve Konum Kestirimi

Çalışmada kullanılan kızılötesi algılayıcı [10] bir alıcı-verici ünitesinden oluşmakta ve ölçümün yeğinliğiyle orantılı analog gerilim çıktısı sağlamaktadır. Alıcı penceresi ortam aydınlatmasının yeğinlik ölçümlerine etkisini en aza indirmek için kızılötesi süzgeç ile kaplanmıştır.

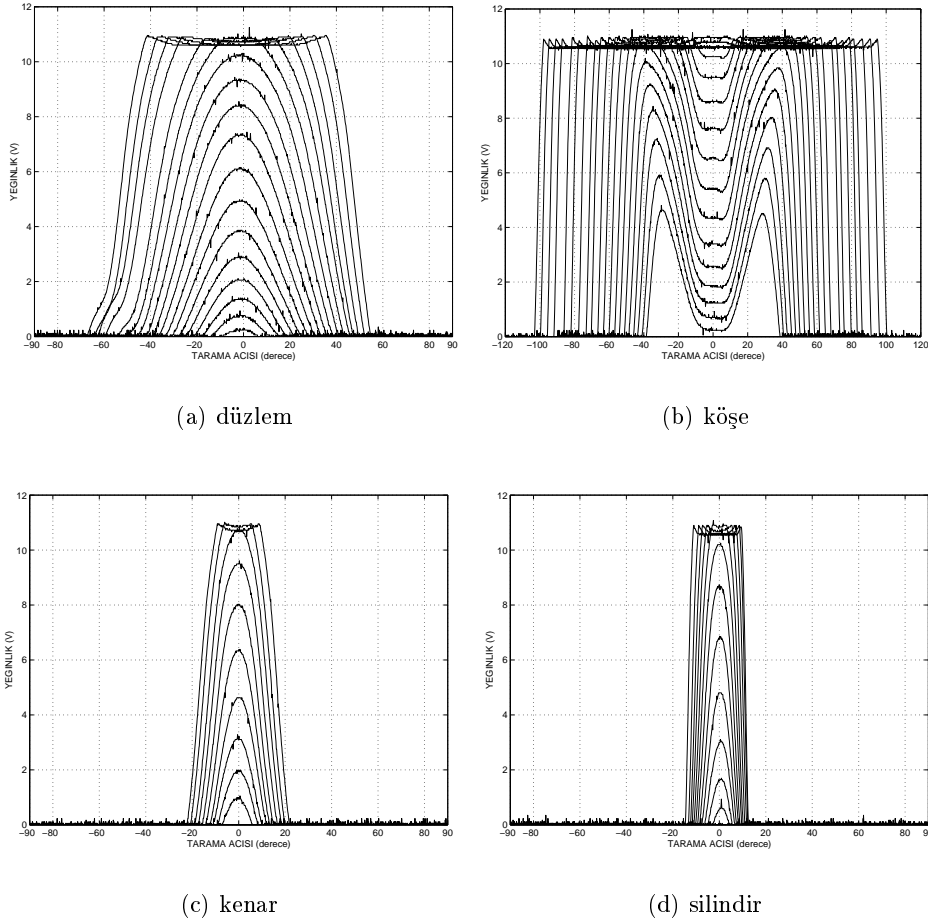
Çalışmada, kesit alanları Şekil 1'de verilen 120 cm boyunda düz tahtadan yapılmış düzlem,  $90^\circ$  köşe,  $90^\circ$  kenar ve 48 mm yarıçapında silindir hedefleri kullanılmıştır. Yöntemimiz her hedefin belli bir açı aralığında taranmasına dayanmaktadır. Bu hedef ilkellerinden açısal tarama ölçümleri elde etmek için, kızılötesi algılayıcı 15,2 cm yarıçapında döner bir platform [11] üzerine yerleştirildi (Şekil 2). Her hedef için,  $\theta = 0^\circ$  açısal konumunda, 2,5 cm aralıklarla, 15 cm'den her hedefin en büyük saptanabilme uzaklığına kadar referans veri kümeleri kaydedildi. Elde edilen referans taramaları düzlem, köşe, kenar ve silindir için Şekil 3'de verilmektedir. Yeğinlik taramaları  $\theta$ 'dan bağımsız fakat  $r$ 'ye bağlıdır; yani  $r$ 'deki değişimler sadece basit bir ölçeklemeye neden olmamaktadır. Daha sonra görüleceği gibi, bu taramalar çeşitli hedef türlerini oldukça doğru olarak ayırdetmek ve konumlarını kestirmek için yeterli bilgiyi içermektedirler. Şekil 3(b), köşe hedefi için ayırdedici bir özellik olarak iki tümsekten oluşan tarama örüntüsünü göstermektedir (bu iki tümsek köşeyi oluşturan birbirine dik iki düzlemde gelen yansımalar sonucu oluşmaktadır). Bu şekillere bakarak benzer yeğinlik örüntülerine sahip olan silindir ve kenar hedeflerinin ayırdedilmesinde en fazla güçlük karşılaşılabileceği beklenmektedir.

Yeğinlik taraması kaydedilen hedeflerin türü ve konumu şu şekilde belirlenmektedir: İlk önce kaydedilen tarama  $I(\alpha)$ 'nın, doyuma ulaşmış ve ulaşmadığı kontrol edilmektedir. Bu durum daha sonra Bölüm 2.3'de ayrıca ele alınacaktır. Köşe hedefi, tümsekler değil de merkez yeğinlik değeri doyum bölgesine girdiği zaman doyuma ulaşmış kabul edilmektedir.

Hedefin türünü belirlemek için Şekil 3'teki ilgili eğriyle doğrudan karşılaştırma, hedefin erimi bilinmediğinden mümkün olmamaktadır ve tüm eğrilerle her uzaklık için karşılaştırma yapmak da çok fazla işlem gerektirecektir. Bu nedenle, Şekil 3'teki örüntülerin erime tekdüze bir bağımlılık gösterme özelliğini kullandık. Ayrıca, gözlenen örüntü, referans taramalarıyla karşılaştırıldığında, Bölüm 2.1 ve 2.2'de verilen aralarındaki fark ölçütlerine göre, tek bir en küçük değer etrafında tekdüze bir artış veya azalış göstermektedir. Bu yüzden tüm referans taramalarını dikkate almaktansa, merkez değerleri gözlenen örüntünün merkez değerine en yakın olan dört referans tarama örüntüsüyle (her hedef türü için bir tane) karşılaştırarak doğruluktan ödün vermeden işlem sayısını azaltmış olduk. Bu yaklaşım, hesaplama maliyetini artırmadan, sistemin doğruluğunu artırmayı mümkün kılmaktadır. Deneme olarak, gözlenen örüntünün merkez değerinin altında ve üstünde kendisine en yakın merkez değerlerine sahip referans yeğinlik taramalarıyla ve mevcut tüm referans yeğinlik taramalarıyla karşılaştırmalar yapılmıştır. Daha çok işlem gerektiren bu denemeler tek bir dördütlü tarama ile elde edilen sonuçları iyileştirmemiştir. Aslında, Bölüm 2.2'de tartışılan uyumlu süzgeç kullanılmasıyla sonuçlar dört tarama seçilmesi durumunda iyileşmektedir, bunun nedeni tarama sayısını baştan sınırlandırarak küçük bir olasılıkla da olsa gürültü ve diğer nedenlerden kaynaklanan hatalı eşlemelerin baştan elenmesidir.

### 2.1 En Küçük Kareler Yaklaşımı

İlk önce hedefin açısal konumu saptanmaktadır; Gözlenen örüntünün doyuma ulaşmadığını varsayarak, iki tümseğe sahip olup olmadığını kontrol ediyoruz. Eğer sahipse, hedef köşedir ve iki tümseğin orta



Şekil 3: Farklı uzaklıklara konumlanmış çeşitli hedefler için yeğinlik taramaları.

noktasının açısal konumunu ve ona karşılık gelen yeğinlik değerini buluyoruz. Eğer iki tümseğe sahip değilse, örüntünün en büyük yeğinlik değerini ve ona karşılık gelen açıyı hesaplıyoruz. Bu açısal değer doğrudan hedefin açısal konum kestirimi olarak alınabilir. Alternatif olarak, örüntülerin ağırlık merkezi aşağıdaki gibi bulunarak hedefin açısal konumu kestirilmektedir:

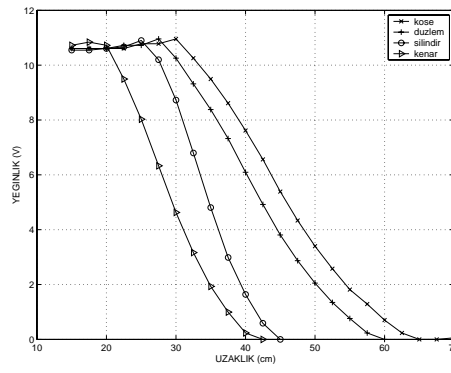
$$\theta_{\text{merkez}} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i I(\alpha_i)}{\sum_{i=1}^n I(\alpha_i)} \quad (1)$$

Örüntülerin simetrik olduğu göz önünde bulundurulursa, ideal koşullarda örüntünün en büyük değeri ile ağırlık merkezindeki değerinin çakışması beklense de uygulamada arada küçük farklar olmaktadır. Biz sonuçları her iki durum için de tablo halinde vereceğiz. Buradan itibaren, her iki kestirimi de örüntünün ‘merkez açısı’ olarak tanımlıyoruz.

Her örüntü için merkez açısındaki yeğinlik değerinin uzaklığa göre değişimi (Şekil 3) yöntemimizde önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 4’de bu eğriler en büyük yeğinlik değerine (köşe hedefi için merkez değerine) göre verilmektedir.

Bu yaklaşımda, gözlenen örüntünün merkezi dört referans taramasındaki ile karşılaştırılarak aralarındaki en küçük kareler farkları karşılaştırılıyor. Karesi alınmış fark, bire yakın olan çarpanlara bile duyarlı olduğundan gözlenen örüntünün merkez değerinin aşağısında ve yukarısında en yakın iki referans taraması arasında doğrusal aradeğerleme uygulanarak elde edilen referans taramaları kullanılmıştır. Gözlenen örüntü ile dört referans taraması arasındaki ortalama-kareler farkı aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$\mathcal{E}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [I(\alpha_i - \alpha_{\text{kayma}}) - I_j(\alpha_i)]^2 \quad j = 1, 2, 3, 4. \quad (2)$$



Şekil 4: Çeşitli hedefler için merkezi yeğinlik değerinin uzaklığa göre değişimi.

$I_j(\alpha_i)$  aradeğerleme uygulanmış referans taramalarını göstermektedir. Burada  $\alpha_{\text{kayma}}$  her iki örüntüyü de aynı doğrultuya getirmek için kullanılan açısal kayma değeridir. En küçük  $\mathcal{E}$  değerine karşılık gelen hedef gözlenen hedefin türü olarak kabul edilmektedir. Hedef türü belirlendikten sonra, doğrusal aradeğerleme kullanılarak hedefin erimi saptanmaktadır. Böylece hedefin doğruluğu referans taramalarının kaydedildiği 2,5 cm aralıklara sınırlanmamaktadır.

## 2.2 Uyumlu Süzgeç Yaklaşımı

Diğer bir alternatif olarak, gözlenen örüntüyü ve referans taramalarını karşılaştırmak için uyumlu süzgeç [12] kullanılmıştır. Uyumlu süzgecin dürtü tepkisi  $h(\alpha_i)$ , süzgeç çıkışı gözlenen örüntüyle  $j$ nci referans tarama arasındaki çapraz-ilintiye eşit olacak şekilde  $I_j(-\alpha_i)$ 'ya eşitlenmiştir. Her referans taraması toplam enerjisinin kareköküyle normalleştirilmiştir. Gözlenen örüntü ile normalleştirilmiş dört tarama arasındaki çapraz-ilinti aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$y_j(l) = \frac{\sum_k I(\alpha_k) I_j(\alpha_{k-l})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [I_j(\alpha_i)]^2}} \quad l = 1, \dots, 2n - 1 \quad \text{ve} \quad j = 1, 2, 3, 4. \quad (3)$$

En büyük çapraz-ilinti değerine karşı gelen tarama türü gözlenen hedefin türü olarak alınmakta ve bu en büyük değer gerçekleştiği açı, hedefin konum açısı olarak kabul edilmektedir. Hedefin erimi Şekil 4'de açı kestiriminin yapıldığı yeğinlik değerinde doğrusal aradeğerleme yapılarak bulunmaktadır.

## 2.3 Doyuma Ulaşmış Taramalar

Gözlenen örüntünün doyuma ulaştığı durumda, en küçük kareler yaklaşımında, kaydırılmış gözlenen örüntü ile tüm doyuma ulaşmış referans taramaları arasındaki ortalama-kareler farkı hesaplanarak, en küçük ortalama-kareler farkı hedef türünün belirlenmesinde kullanılmaktadır. Hedefin erimi en küçük ortalama-kareler farkını veren taramaninkine eşit alınmıştır. Benzer bir şekilde, uyumlu süzgeç için, gözlenen örüntü ile kaydedilmiş bütün doyuma ulaşmış referans taramaları arasındaki ilinti hesaplanmış, en yüksek ilintiye veren hedef, doğru hedef türü olarak seçilmiştir. Erim saptaması yine en iyi eşlenen taramaninkisi olarak alınmıştır.

Doyum durumunda doğrusal aradeğerleme mümkün olmadığından, erim kestiriminin doğruluğu referans taramalarının toplandığı 2,5 cm aralığıyla sınırlıdır. Bu durumda,  $\pm 1,25$  cm'den daha iyi bir en büyük hata ve 0,625 cm'den daha iyi bir ortalama hata bekleyemeyiz. Hassasiyetin yeterli olmadığı durumda, 2,5 cm aralıkları küçültülerek hassasiyet iyileştirilebilir. Sinyalin doyuma ulaşmadığı durumlarda ise, Şekil 3'den doğrusal aradeğerlemeyle gerçekleştirilen erim kestiriminin hassasiyetinin 2,5 cm ile sınırlı olmadığını vurgulamak isteriz.

### 3 Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde, hedefleri rasgele uzaklık ve açısız konumlara yerleştirip  $(r, \theta)$ , 120 test taraması toplayarak ileri sürdüğümüz yöntemi deneysel olarak test ediyoruz. Hedefler  $-45^\circ$ 'den  $45^\circ$ 'ye, 15 cm'den her hedefin gözlenebileceği en büyük uzaklığa kadar (Şekil 4) rasgele yerleştirildi.

En küçük karelere dayalı hedef ayırdetme sonuçları Tablo 1 ve 2'de hedef ayırdetme dizeyi olarak verilmiştir. Tablo 1, en büyük (ya da köşe için merkez) yeğlilik değerini kullanarak elde edilen sonuçları vermektedir. Tablo 2 ise bu sonuçları ağırlık merkezindeki yeğlilik değerine göre göstermektedir. Bütün hedef türleri için ortalama doğruluk, hedef ayırdetme tablosunda köşegen üzerindeki doğru kararların toplamını toplam deneme sayısına (120) bölerek bulunmaktadır. En büyük/merkez değerine ve ağırlık merkezine göre doğru ayırdetme oranları sırasıyla %93 ve %89'dur.

Uyumlu süzgeç kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir. Bütün hedef türleri için doğru ayırdetme oranı, en küçük kareler yaklaşımından daha iyi olup, %97'dir. Uyumlu süzgeç köşe hedeflerinin yanı sıra düzlemleri de %100'lük bir oranla doğru olarak hesaplanmaktadır (tablolarda D: düzlem, KÖ: köşe, K: kenar ve S: silindir için kullanılmıştır).

Tablo 1: Hedef ayırdetme dizeyi: en küçük karelere dayalı ayırdetme (en büyük/merkez değeri).

hedef	ayırdetme sonuçları				toplam
	D	KÖ	K	S	
D	29	-	1	-	30
KÖ	-	30	-	-	30
K	1	-	26	3	30
S	4	-	-	26	30
toplam	34	30	27	29	120

Tablo 2: Hedef ayırdetme dizeyi: en küçük karelere dayalı ayırdetme (ağırlık merkezi).

hedef	ayırdetme sonuçları				toplam
	D	KÖ	K	S	
D	30	-	-	-	30
KÖ	-	30	-	-	30
K	5	-	23	2	30
S	4	-	2	24	30
toplam	39	30	25	26	120

Tablo 3: Hedef ayırdetme dizeyi: uyumlu süzgece dayalı ayırdetme.

hedef	ayırdetme sonuçları				toplam
	D	KÖ	K	S	
D	30	-	-	-	30
KÖ	-	30	-	-	30
K	-	-	29	1	30
S	-	-	3	27	30
toplam	30	30	32	28	120

Tablo 4: Mutlak erim ve açısız konum kestirim hataları.

yöntem		D	KÖ	K	S	ort. hata
en küçük kareler (en büyük/merkez)	$r(\text{cm})$	1.0	0.7	1.1	1.8	1.2
	$\theta(\text{deg})$	4.1	5.7	2.3	1.7	3.5
en küçük kareler (ağırlık merkezi)	$r(\text{cm})$	0.5	0.7	4.3	1.5	1.7
	$\theta(\text{deg})$	2.9	2.8	3.0	2.4	2.8
uyumlu süzgeç	$r(\text{cm})$	0.7	0.7	0.8	1.0	0.8
	$\theta(\text{deg})$	1.2	1.7	1.8	1.8	1.6

Tablolarda görüleceği gibi, köşe hedefleri belirleyici örüntülerinden dolayı kullanılan yöntemden bağımsız olarak her zaman doğru olarak ayırdedilmektedirler. Köşe hedeflerinden sonra en yüksek doğrulukla düzlemsel hedefler ayırdedilmişlerdir. Silindir ve kenar hedefleri yeğlilik taramalarından da beklenildiği gibi en çok karıştırılan hedef türleridir. Hatalı olarak ayırdedilen hedeflerin tümü neredeyse yansıma sinyalinin oldukça zayıf olduğu uzak erimlerde konumlanmışlardır.

Farklı yaklaşımlar için mutlak erim ve açısız konum hataları Tablo 4'de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi en küçük kareler yönteminin en büyük/merkez ve ağırlık merkez değerine dayalı yaklaşımları, erimi sırasıyla ortalama 1,2 cm ve 1,7 cm mutlak hatayla kestirmektedir. Uyumlu süzgeçte mutlak ortalama erim kestirimi hatası en küçük kareler yaklaşımındaki erim hatasından daha iyi olup 0,8 cm'dir.

Açısız konum kestiriminde ise, uyumlu süzgeç ortalama mutlak  $1,6^\circ$  açısız hatayla en küçük kareler yönteminden üstündür. Silindir hedeflerin örüntülerinde tepe değerleri etrafındaki sivrilikten dolayı, en küçük kareler yönteminde silindirler diğer hedeflere göre açısız olarak daha iyi konumlandırılmışlardır. Diğer taraftan, köşe hedeflerinin açısız konumlandırılmaları diğer hedeflere göre daha az doğrudur. Bunun nedeni özellikle en küçük kareler yöntemindeki en büyük/merkez değeri yaklaşımında, köşe örüntülerinin merkez değerlerinin bulunmasındaki zorluktur. Ağırlık merkezi kullanıldığında ise yeğlilik

sinyallerindeki gürültülerin etkisi azaldığından, ortalama olarak en büyük/merkez değeri yaklaşıma göre daha iyi açısal konum kestirimi elde edilmektedir.

## 4 Sonuç

Bu çalışmada düzlem, köşe, kenar ve silindir gibi sıkça karşılaşılan hedeflerin basit kızılötesi algılayıcılarla ayırılması ve konum kestirimi gerçekleştirilmiştir. Hedef ayırtma, erim ve açısal konum kestirimi açısından farklı yaklaşımlar karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın en önemli katkısı yeğlilik örüntüleri hedefin uzaklığına, açısal konumuna ve yüzey özelliklerine bağlı olmasına ve bu ilişki analitik olarak kolayca ifade edilememesine rağmen, konumdan bağımsız olarak hedef ayırtmayı gerçekleştirmiş olmasıdır. Ortalama %97 doğru hedef ayırtma oranı, ve 0,8 cm ve 1,6° ortalama mutlak erim ve açısal konum hatalarıyla hedeflerin konum kestirimi gerçekleştirilmiştir. İleri sürdüğümüz yöntem referans tarama sayısını artırarak işlem yoğunluğunu artırmadan doğruluğun artırılabilmesi açısından ölçeklenebilir.

Burada sunulan sonuçlar orta sayıda hedef tipinden oluşan bilinmeyen ortamların gözetiminin gerektiği robot ve akıllı sistem uygulamalarında güvenilir şekilde kullanılabilirler. Bir çok yapay ortam bu sınıflandırmaya girmektedir. Biz hedef ayırımı dört temel hedef türü için gösterdik. Fakat, topladığımız verilere dayanarak, bu sayının hedefler çok benzer olmamak koşuluyla en az ona kadar artırılacağı tahmin edilmektedir. Şu anki çalışmalarımız hedefin konumu bilinmeden yeğlilik taramasına dayanarak hedef geometrisinin yanı sıra yüzey özelliklerinin de çıkarılması üzerine yoğunlaşmıştır. Ön sonuçlar bu bildiriye ileri sürülen yöntemlerin biraz değişikliklerle veya olduğu gibi belli bir geometri ve yüzeyin birleşimini genelleştirilmiş bir hedef türü olarak değerlendirerek bu duruma da uygulanabileceğini göstermektedir.

## Kaynakça

- [1] Yu F. T. S. ve Yin S., ed., *Selected Papers on Optical Pattern Recognition*, vol. MS 156 of *SPIE Milestone Series*, Bellingham, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1999.
- [2] Lumelsky V. J. ve Cheung E., “Real-time collision avoidance in teleoperated whole-sensitive robot arm manipulators,” *IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics*, 23(1), s. 194–203, Ocak/Şubat 1993.
- [3] Hand A. J., “Infrared sensor counts insects,” *Photonics Spectra*, 32(11), s. 30–31, Kasım 1998.
- [4] Wikle H. C., Chin B. A., Kottilingam S. ve Zee R. H., “Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process,” *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1–3), s. 228–233, 15 Haziran 2001.
- [5] Butkiewicz B., “Position control system with fuzzy microprocessor AL220,” *Computational Intelligence Lecture Notes in Computer Science*, 1226, s. 74–81, 1997.
- [6] Flynn A. M., “Combining sonar and infrared sensors for mobile robot navigation,” *International Journal of Robotics Research*, 7(6), s. 5–14, Aralık 1988.
- [7] Novotny P. M. ve Ferrier N. J., “Using infrared sensors and the Phong illumination model to measure distances,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, s.1644–1649, Detroit, MI, A.B.D., 10–15 Mayıs 1999.
- [8] Hashimoto K., Morinaka K., Tsuruta T. ve Yoshiike N., “High performance human information sensor,” *Sensors and Actuators A—Physical*, 79(1), s. 46–52, 25 Ocak 2000.
- [9] Scott D. M., “A 2-color near-infrared sensor for sorting recycled plastic waste,” *Measurement Science and Technology*, 6(2), s. 156–159, Şubat 1995.
- [10] *IRS-U-4A Proximity Switch Datasheet*, Matrix Elektronik AG, Kirchweg 24 CH-5422 Oberehrendingen, İsviçre, 1995.
- [11] *RT-12 Rotary Positioning Table*, Arrick Robotics, P.O. Box 1574, Hurst, Teksas, A.B.D., 76053, URL: [www.robotics.com/rt12.html](http://www.robotics.com/rt12.html), 2002.
- [12] Goodman J. W., *Introduction to Fourier Optics*, s.246–249, 2. Baskı, McGraw-Hill, New York, A.B.D., 1996.