

# Microsoft Kinect Sensörü Kullanarak Zemin Düzlemi Algılama

## Ground Plane Detection Using Kinect Sensor

Doğan Kırçalı, F. Boray Tek, İbrahim K. İyidir  
Robotik ve Otonom Araçlar Laboratuvarı  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Işık Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye  
{dogan, boray, ibrahim.iyidir}@isikun.edu.tr

**Özetçe**—Görüntü işleme tabanlı mobil robotların başarılı navigasyonu için zemin düzlemi algılama esastır. Bu bildiride Kinect derinlik sensöründen elde edilen derinlik bilgisine dayalı yeni ve gürbüz bir zemin düzlemi algılama algoritması önerilmektedir. Literatürdeki benzer yöntemlerin aksine, zemin düzleminin sahnedeki en büyük alan olduğunu varsayılmamaktadır. Yöntemimiz sensörün yeri görüş açısının sabit olduğu veya değişken olabileceği iki farklı durum için iki değişik algoritma halinde sunulmaktadır. Yaptığımız deneylerde her iki durum için önerdiğimiz algoritmaların oldukça başarılı olduğu gösterilmektedir.

**Anahtar Kelimeler** — Zemin düzlemi algılama; Microsoft Kinect; derinlik haritası; mobil robotlar; otonom robot navigasyonu; engel algılama.

**Abstract**—Ground plane detection is essential for successful navigation of vision based mobile robots. We introduce a novel and robust ground plane detection algorithm using depth information acquired by a Kinect sensor. Unlike similar methods from the literature, we do not assume that the ground plane covers the largest area in the scene. Furthermore our algorithm handles two different conditions: fixed and changing view angle of the sensor. We show that the algorithm is robust if the view angle is fixed whereas an additional procedure handles different view angles satisfactorily.

**Keywords** —Ground plane detection; Microsoft Kinect; depth map; mobile robots; autonomous robot navigation; obstacle detection.

### I. GİRİŞ

Microsoft Kinect orijinal olarak Xbox 360 oyun konsolu için üretilmiş, kızılötesi projektörü, RGB kamerası, tek renkli kızılötesi kamerası, mikrofon dizisi ve eğim motoru olan bir hareket algılayıcı ve çevresel giriş aygıtıdır. Cihaz 640x480 piksel derinlik haritasını ve RGB video bilgisini saniyede 30 kare olarak oluşturarak sunabilmektedir.

Zemin düzlemi algılama ve engel algılama otonom robot navigasyonu için esas olan görevlerdendir. Zemin düzlemi algılama doğrudan engel algılamak yerine harekete müsait

alanların belirlenmesi için gereklidir. Zemin düzleminin algılanması için derinlik haritasının oluşturulması gerekmektedir. Değişik yöntemler ve sensörler sahnenin derinlik haritasının oluşturulması için kullanılabilir [1]. Yöntemler aktif veya pasif olarak kategorize edilebilir [1]. Aktif yöntemler, 3D lazer, ultrasonik mesafe ölçerler veya kızılötesi projektörler gibi ek sensörler kullanırlar. Pasif yöntemler daha fazla hesaplama içeren optik akış ve stereo görme algoritmalarından oluşurlar.

Kinect kızılötesi projektörünü sahneye yapısal bir ışık düzeni yansıtmak için kullanır ve mevcut kızılötesi kamerasıyla deseni algılar. Desende oluşan bozulmalara bakarak derinlik haritasını hesaplar. Ancak derinlik bilgisi çok uzak bölgelerde, yansıtıcı yüzeylerde, desenin gölgelenmesinden dolayı nesnelerin sınırlarında ve güneş ışığında kızılötesi frekansların bulunmasından dolayı direkt güneş ışığı alan bölgelerde güvenilir olmayabilir. Sensörün kapalı alanlarda, değişik koşullar altındaki gürbüzlüğü literatürde incelenmiştir [2, 3, 7].

Elde edilen derinlik haritasından zemin düzleminin algılanmasında kullanılan yöntemlerden biri RANSAC algoritmasıdır [4, 5]. Zemin düzlemini algılanmasında kullanılan başka bir yöntemde V-disparity yöntemidir. Ancak her iki yöntemde zemin düzleminin baskın düzlem (en büyük alan) olduğunu varsayar. Zemin düzleminin en büyük alan olmadığı durumlarda iki yöntemde muhtemelen en büyük alanı zemin düzlemi olarak kabul edecektir.

Çalışmamızda zemin düzleminin en büyük alan olması şartı aranmadan, düzlemi algılayacak yeni bir algoritma sunulmuştur. Derinlik haritasında bir pikselin dikey konumu ile derinlik değeri arasında bir ilişki bulunmaktadır. Yöntemimiz bu ilişkiyi kullanarak bir zemin düzlemi modeli oluşturmaktadır. Model ile tutarlı olan pikseller zemin düzlemi olarak, modele uymayanlar ise engel olarak işaretlenir.

Bildirinin geri kalanında, Bölüm 2’de önerilen yöntem, Bölüm 3’te yapılan deneyler sunulmaktadır. Sonuçlar ve gelecek çalışmalar Bölüm 4’te sunulmuştur.

## II. YÖNTEM

Yöntemimiz iki alt yaklaşımdan oluşmaktadır: İlk olarak, sensörün görüş açısının sabit kabul edilebileceği durumlarda zemin düzlemi modelinin oluşturulması ve bu modelin zemin düzlemini algılamakta kullanılması açıklanacaktır. İkinci olarak görüş açısının sabit olmadığı, görüş açısı değişimlerini algılayan ve düzelten bir çözüm sunulmuştur.

### A. Sabit Görüş Açısı için Zemin Düzlemi Algılama

Bu bölümde sensörün görüş açısının sabit olduğu varsayılmaktadır. Birçok durumda sensör yatay düzlemle belli bir açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Sahne, sensörün görüntüleme açısına bağlı olarak belli bir perspektif ile derinlik haritasında görülür (Şekil 1(a)). Bu perspektif yakın yerler için daha fazla, uzak yerler içinse daha az pikselin tahsis edilmesine neden olur. Dolayısıyla sensöre olan lineer uzaklık, derinlik haritasında lineer olarak görünmez. Bu durum Kinect'ten alınan, yoğunluk kodlanmış derinlik haritası ile görülebilmektedir (Şekil 1(b)). Derinlik haritasından alınan tek bir sütun ile mesafenin, alttan yukarıya olacak şekilde, lineer değil üstel olarak arttığı görülür (Şekil 1(c)).

Kinect bir pikselin derinlik bilgisini hesaplayamadığında, derinlik değerini 0 olarak belirler. Ayrıca deneylerimizde saptadığımız kadarıyla, eğer sensör yerden 30cm yukarıda yerleştirilirse, zemin düzlemi için 5 m den uzak noktalardan alınan okumalar tutarlı olmamaktadır. Bu bilgilere dayanarak hiçbir engelin olmadığı bir sahnedeki derinlik haritası oluşturulmuştur. Bu derinlik haritasından değeri 0 ve 5000 den yüksek noktaları eledikten sonra herhangi bir sütunu seçip bu sütuna uyabilecek bir eğri aranmıştır. Deneme yanılma yoluyla en iyi uyum sağlayan eğrinin iki üstel sayının toplamı olan bir fonksiyon (1) olduğunu bulduk.

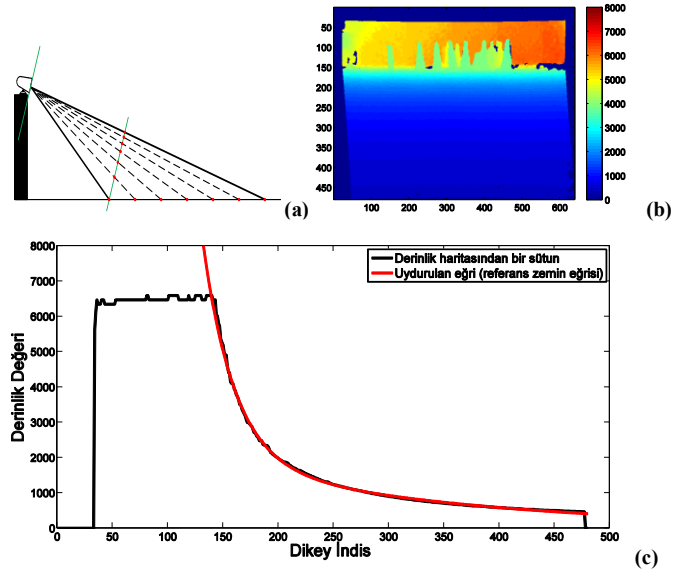
$$f(x) = ae^{bx} + ce^{dx} \quad (1)$$

$f(x)$  pikselin derinlik değeri,  $x$  pikselin dikey dizin değeridir.  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  katsayıları sensörün açısına ve yüksekliğine bağlı olarak değişir. Bizim sensör konumumuz için elde edilen katsayılar şu şekildedir:

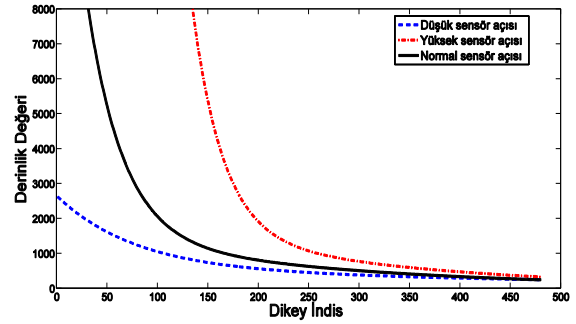
$$a=507200 \quad b=-0.0339 \quad c=3331.7 \quad d=-0.0043$$

Bu katsayılar kullanılarak eğri oluşturulmuş ve referans zemin eğrisi olarak adlandırılmıştır.

Daha önce görülmemiş bir derinlik haritası alındığında derinlik haritasının sütunlarının referans zemin eğrisi ile karşılaştırılmaktadır. Referans zemin eğrisinin altında kalan değerler zemin üzerindeki çıkıntılar (nesnelere), eğrinin üstünde kalan değerler ise girintileri (çukurları) göstermektedir. Karşılaştırma örnekler arasındaki mutlak farkın hesaplanmasıyla yapılmaktadır. Eğer fark daha önceden belirlenmiş bir eşik değeri olan  $T$ 'nin altında ise söz konusu piksel zemin düzlemi olarak kabul edilir. Daha öncede bahsedildiği gibi eğer bir pikselin değeri sıfır ise, sensörden kaynaklı bir ölçüm hatasını göstermektedir ve göz ardı edilir. Benzer bir sütun arama yaklaşımı Gong[8] tarafından sunulmuştur. Zemin düzlemi sınırları, derinlik haritasının sütunlarındaki gradyan değişimlerine bakarak algılanmıştır. Ancak, bu yaklaşımın karmaşık ortamlar için geçerli olup olmadığını gösteren herhangi bir deneysel sonuç yoktur.



Şekil 1. (a) lineer noktaların sensörün görüşüne üstel yansımaları, (b) Örnek derinlik haritası görüntüsü, (c) derinlik haritasının 517. Sütunu ve referans zemin eğrisi



Şekil 2. Farklı dikey açılar için zemin düzlemi eğrileri

### B. Değişken Görüş Açısı için Zemin Düzlemi Algılama

Sabit görüş açısı varsayımından hareketle, yukarıda açıklanan ilk algoritmamızda referans zemin eğrisi referans bir kareden bir defaya mahsus olarak hesaplanmaktadır. Bu varsayımın doğru olduğu koşullarda algoritma çok iyi sonuçlar vermektedir. Ancak sensörün görüş açısının değiştiği koşullar için kesinlikle uygun değildir. Genellikle mobil robotlar hareket ettiğinde sensör platformunun görüş açısında değişikliğe yol açarlar. Yunuslama (ing. pitch) ve yuvarlanma (ing. roll) hareketleri ek jiroskopik sabitleme donanımları kullanarak telafi edilebilir [6]. Ancak ek, karmaşık bir donanımdan kaçınmak adına hesaplamaya dayalı bir çözüm yine de anlamlı olacaktır. İkinci algoritmamızda referans zemin eğrisinin referans bir kareden elde edilmesi yaklaşımımızı değiştirerek, yakalanan her kare için yeni bir eğri kestirme yöntemine gidilmiştir.

Sensörün yuvarlanma açısı değişimi derinlik haritasının her iki ucunda farklı eğrilere ve aralarındaki sütunlarda değişimlere neden olur (Şekil 2). Buna bağlı olarak farklı yer düzlemi eğrileri oluşmaktadır. Bu durum tek bir referans zemin eğrisinin kullanılmasını olanaksız hale getirir. Bu durumda yaklaşımımız derinlik haritasını zemin düzlemine açısını kestirerek, düzeltmek için paralel olacak şekilde döndürmektir.

### III. DENEYLER

Sensörün zemin düzlemine yatay olduğu kabul edilirse, derinlik haritasında yer alan her satırın derinlik değerlerinin birbirine yakın olması beklenir. Basit bir şekilde bu durum her satırın histogramı hesaplanarak görülebilir: Öyle ki, birbirlerine yakın değerlerin histogramının normal dağılması hatta ideal durumda tek bir derinlik değerinde tepe noktası oluşturması beklenir. Buna dayanarak, derinlik haritası önceden belirlenen sabit bir sayıda farklı açılar için merkezinden döndürülür. Her döndürme açısı için elde edilen derinlik haritasının her satırı için tekrar histogram hesaplanır. Histogramların tepe değerlerinin toplamını en yüksek yapabilen açı, dönme açısı olarak kabul edilmektedir. Derinlik haritası bulunan dönme açısında döndürülür. Derinlik haritasının boyutunu aynı tutmak için döndürme işlemi sonrasında kenarlar kırılır.

Daha sonra zemin düzlemi eğrisi kestirimine başlanır. Daha önce söylendiği gibi sensörün yunuslama açısı değişimi daha önceden hesaplanmış bir referans zemin eğrisini geçersiz kılar. Ancak yakalanan yeni karede zemin düzlemi görülebilir durumda ise, zemin düzlemi eğrisi üstel fonksiyon (1) olarak kalır. Yeni kare için zemin düzlemini temsil edecek yeni bir referans zemin eğrisinin hesaplanması gerekir.

Zemin düzleminden ve nesnelere oluşan bir sahnede, bir obje tüm satırı kaplamıyorsa, bir satırdaki en yüksek değer zemin düzlemi olması beklenir. Çünkü çıkıntı nedeniyle, herhangi bir nesnenin derinlik değerinin, yer düzleminin derinlik değerinden daha küçük olması gerekir. Dolayısıyla derinlik haritasındaki her satırdaki en büyük değer alınıp bir 'derinlik zarfi' oluşturulursa referans zemin eğrisinin uydurulmasında kullanılabilir. Hesaplama daha önce bahsedilen (1) üstel eğrinin, derinlik zarfının ortanca filtre uygulanmış haline uydurulmasıyla aynı şekilde yapılır.

Eğer bir nesne bütün bir satırı kaplıyorsa, derinlik haritasının görünüşü içinde bir plato oluşturacak ve referans zemin eğrisinin bulunmasını etkileyecektir. Bu nedenle referans zemin eğrisini hesaplarken bu platolar tespit edilerek eğri uydurma algoritmasının dışında bırakılır. Derinlik değerinin aşağıdan yukarıya doğru artması gerektiğinden, eğri uydurma işlemi sırasında maksimum değer elde edilirse geri kalan değerler zemin düzleminin bir parçası olamayacağından hesaplama dışında tutulur. Eğer tüm satırı kaplayan nesnelere sonra zemin düzlemi görülebilir haldeyse bu durum referans zemin eğrisi uydurma işlemini etkilemez.

Diğer taraftan çukurlar zemin düzlemine göre daha yüksek derinlik değerine sahip olmalıdır ve bu durum derinlik haritasında ani değer yükselmelerine neden olur. Zeminde girinti bulunduğu zaman, referans zemin eğrisi derinlik zarfından kestirilirken yüksek bir hata oranı verecektir. Başka bir deyişle yüksek eğri uydurma hatası sahnede bir düşüşün olduğunu göstermektedir. Böyle bir durumda derinlik haritası dikey olarak parçalara ayrılarak algoritma her parça için tekrarlanır. Sonrasında bulunan en küçük hata oranına sahip referans zemin eğrisi tüm kare için kullanılır.

Her kare için referans zemin eğrisi hesaplandıktan sonra derinlik haritası, sabit görüş açısı durumundaki gibi, referans zemin eğrisi ile karşılaştırılır ve zemin düzlemi algılanır.

Deneysel olarak algoritma geliştirilmesi sırasında kullanılan farklı veri setleri için sınımlanmıştır. Derinlik haritası ve RGB görüntülerin boyutları 640x480 dir. Sabit ve değişken görüş açısı deneyleri iki bölümde incelenmiştir.

Öncelikle aynı sensör pozisyonunu koruyarak nesnelere, merdivenlerin bulunduğu ve derinlik haritasının tamamen alınmadığı sahnelerde yöntemimizi sıvadık. Sabit görüş açısı durumunda (Şekil 3 (a),(b)) üstel eğri değişkenleri

$$a=507200 \quad b=-0.0339 \quad c=3331.7 \quad d=-0.0043$$

olarak bulundu ve zemin düzlemi algılandı. Çoğu durumda algoritmanın tatmin edici ve güvenilir bir şekilde çalıştığını gördük.

İkinci olarak değişken görüş açısı algoritmamızı sıvadık. Yatay eksen hareketlerinin Şekil 3 (c-e) görülebilir. Şekil 3(c) sensörden alınan RGB kareyi göstermektedir. Bu kare için dönme açısı bulunarak düzeltilmiş kare Şekil 3(d)'de gösterilmektedir. Referans zemin eğrisi döndürülmüş derinlik haritasından elde edilmiş ve zemin düzlemi başarılı bir şekilde algılanmıştır (Şekil 3(e)).

Ayrıca ikinci algoritmamızı düşüşler için de denedik. Bunun için Kinect bilinmeyen bir pozisyonda bir merdivene ait basamakların önüne yerleştirilmiştir (Şekil 3(f)). Başarılı bir şekilde yer düzlemini tespit edilmiştir (Şekil 3(h)). Ayrıca, bu kareye ait derinlik görüntüsünde çok uzaktaki bazı noktaların ölçüm alınmadığı için 0 değer aldığı görülebiliyor. Bu pikseller daha önce belirtildiği gibi hesaplamalardan çıkartılmıştır. Dolayısıyla Şekil 3(h)'de görüldüğü gibi sahnenin ortası çok uzak olduğu için hatalı bir şekilde zemin düzlemi olarak algılanmaktadır.

Şekil 3(f)'de görüldüğü üzere, yöntemimiz çalışabilmesi için zemin düzleminin sahnede ki en büyük alan olmasını gerektirmiyor. Ancak şunu gördük ki zemin düzleminin sahnede kapladığı alan arttıkça algoritmanın doğruluğu artmaktadır.

Deneysel olarak Kinect'in yansıtıcı yüzeylerde başarılı bir şekilde derinlik haritasını çıkartamadığını da gözlemledik. (Şekil 3(f),(i)). Yakın kısımlarda yansıma nedeniyle okuma alınmazken daha uzak duvarlarda okuma alınabildiği görülmektedir. Algoritmamız sağlamlığını bir kez daha bu koşullar altında da çalışarak kanıtlamış oldu.

Nesnelerin çoğunlukta olduğu durumlarda da başarılı sonuç aldığımızı gözlemledik (Şekil 3 (l-n)).

Zemin düzlemi alıcı işletim eğrisi (Şekil 4) ve doğruluk oranı grafiği (Şekil 5), bu bildiriye gösterilmiştir. Yöntemin sınırladığı daha çok karenin yer aldığı video ve sonuçları laboratuvarımızın ilgili web sayfasında ve ilgili bağlantıda görülebilir.[9]

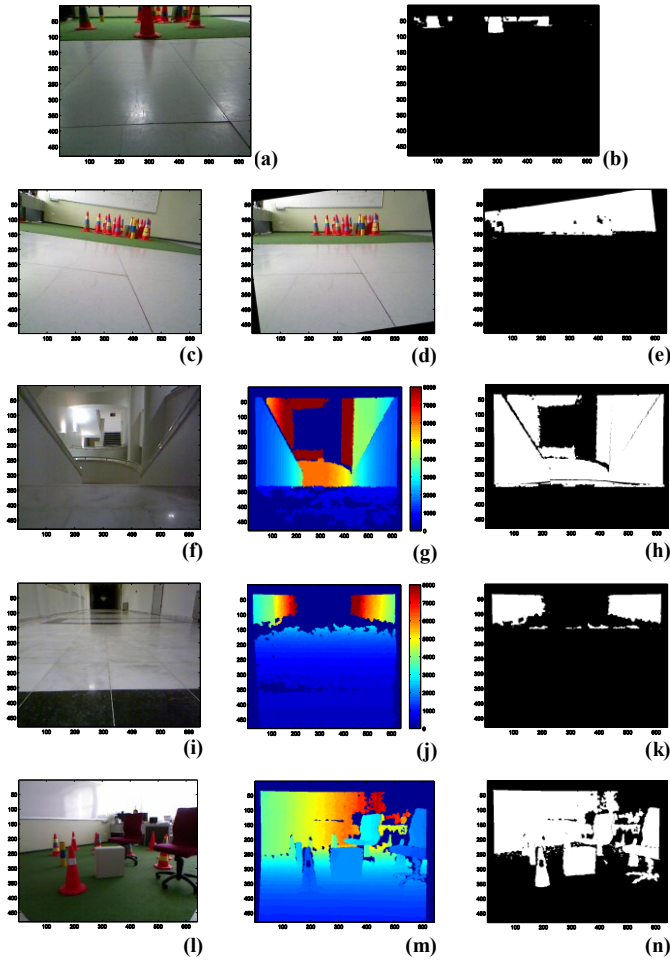
Son olarak eğer kareler daha önceden kaydedilir ve çevrimdışı olarak çalıştırılırsa, Pentium i5 480m işlemciye sahip bir dizüstü bilgisayarda 83fps gibi yüksek hızlarda çalışabildiği gözlenmiştir.

#### IV. SONUÇ

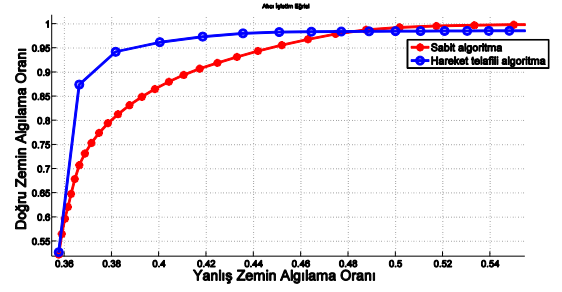
Bu bildiri Kinect sensöründen alınan derinlik bilgisini kullanarak zemin düzlemini algılayan yeni ve gürbüz bir yöntem önerilmiştir.

Önerilen yöntem yer düzlemine belli bir açıyla yerleştirilmiş Kinect sensörünün yere olan perspektifine ve gözlemlenen derinlik haritasının üstel fonksiyonuna dayalıdır. Bilinen diğer metotlardan farklı olarak, bu çalışmada yer düzleminin sahnedeki en büyük alan olduğu varsayılmamıştır. Yöntemin iki farklı algoritması sunulmuştur. İlk algoritma basit fakat sabit görüntüleme açıları bakımından oldukça gürbüz iken ikinci yöntem değişken görüş açısı durumlarını başarılı bir şekilde telafi edebilmektedir.

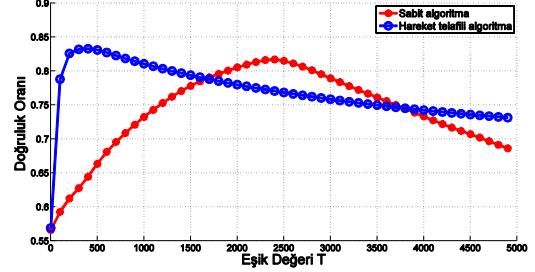
Yatay açı düzeltme algoritmanız zemin eğrisi kestirimi algoritmanız ile karşılaştırıldığında belirgin bir ek yüke sahiptir. İlerideki çalışmalar, farklı döndürme açıları için bir kütüphane tablosu oluşturarak bu işlemi hızlandırmayı amaçlayacaktır.



Şekil 3. Farklı sahnelerden deneysel sonuçlar, (b, e, h, k, n) Beyaz pikseller objeler, siyah pikseller zemin düzlemi. (a, b) Sabit sensör pozisyonunda alınan görüntü ve bulunan nesnelere. (c, d, e) Yatay açı ile yerleştirilmiş sensör, açı düzeltilmiş görüntü, bulunan zemin düzlemi. (f, g, h) Düşüşlerin olduğu bir sahne, sahnenin derinlik haritası ve bulunan zemin düzlemi. (i, j, k) Yansıtıcı yüzeyi olan bir sahne, sahnenin derinlik haritası ve bulunan zemin düzlemi. (l, m, n) Nesnelere dolu karmaşık bir sahne, derinlik haritası ve bulunan zemin düzlemi.



Şekil 4. Zemin düzlemini algılayıcı işletim eğrisi



Şekil 5. Eşik değeri T'ye göre doğruluk oranı

#### KAYNAKÇA

- [1] Sung-Yeol, K., L. Eun-Kyung, and H. Yo-Sung, Generation of ROI Enhanced Depth Maps Using Stereoscopic Cameras and a Depth Camera. Broadcasting, IEEE Transactions on, 2008; 54(4): p. 732-740.
- [2] Stowers, J., M. Hayes, and A. Bainbridge-Smith, Altitude control of a quadrotor helicopter using depth map from Microsoft Kinect sensor. in Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on. 2011.
- [3] Rougier, C., et al., Fall detection from depth map video sequences, in Proceedings of the 9th international conference on Toward useful services for elderly and people with disabilities: smart homes and health telematics. 2011, Springer-Verlag: Montreal, Canada. p. 121-128.
- [4] Zheng, C., and Green, R., Feature Recognition and Obstacle Detection for Drive Assistance in Indoor Environments. Auckland, New Zealand: Twenty-sixth International Conference Image and Vision Computing New Zealand, 29 Nov-1 Dec 2011.
- [5] Se, S., and Brady, M., Ground plane estimation, error analysis and applications, Robotics and Autonomous Systems, 31 May 2002;39(2), p. 59-71.
- [6] Wang, L., Vanderhout, R., and Shi, T., Computer vision detection of negative obstacles with the Microsoft Kinect. University of British Columbia. Engineering Projects Project Lab. ENPH 459, Project Conclusion Reports, 2012-04-02.
- [7] Khoshelham K., Elberink S.O., Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications. Sensors. 2012; 12(2): p.1437-1454.
- [8] Gong, K.; Green, R., Ground-plane detection using stereo depth values for wheelchair guidance, Image and Vision Computing New Zealand, 2009. IVCNZ '09. 24th International Conference , p.97-101.
- [9] [http://ravlab.isikun.edu.tr/ground\\_plane\\_detection](http://ravlab.isikun.edu.tr/ground_plane_detection)