

Kızılberisi Algılayıcılardan Elde Edilen Sinyallerle Yüzey Özelliklerinden Bağımsız Konum Kestirimi

Range Estimation Using Simple Infrared Sensors Without Prior Knowledge of Surface Parameters

Çağrı Yüzbaşıoğlu ve Billur Barshan

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi 06800, Bilkent, Ankara

{cagri, billur}@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, basit ve düşük maliyetli kızılberisi algılayıcılarla, farklı yansıma özelliklerine sahip yüzeylerin konum kestirimi için yeni bir yöntem ileri sürülmektedir. Kızılberisi algılayıcılardan elde edilen yeğnlik sinyalleri, yüzeyin özelliklerine ve algılayıcılara göre olan konumuna bağlıdır. Bu nedenle, kızılberisi algılayıcılarla yapılan önceki çalışmalarda, yüzeylerin konum kestirimi için öncelikle yüzey özellikleri bulunmakta veya yüzeye ilgili bazı varsayımlarda bulunmaktadır. Bu çalışma ise yüzey özelliklerine gerek duymaksızın, konum kestirimi için yeni bir yöntem ileri sürmektedir. Önerilen yöntem, çeşitli yüzeyler kullanılarak deneysel olarak doğrulanmıştır. 12.5–45 cm arasına yerleştirilen yüzeylerin konum kestiriminde, ortalama mutlak hata 0.21 cm olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, kızılberisi algılayıcılar, önerilen yöntemle özellikleri bilinmeyen bir yüzeyin yüksek doğrulukla konum kestiriminde kolayca kullanılabilirler.

Abstract

This paper describes a new method for range estimation using low-cost infrared sensors. The intensity data obtained with infrared sensors depends highly on the surface properties and the configuration of the sensors and the surface. Therefore, in many of the related studies, either the properties of the surface are determined first or certain assumptions about the surface are made in order to calculate the distance and the orientation of the surface relative to the sensors. In this paper, we propose a novel method for position estimation of surfaces with infrared sensors without the need to determine the surface properties first. The method is verified experimentally with planar surfaces covered with white paper, wooden block, bubbled packing material, white styrofoam, blue and brown cardboard. The overall absolute mean error in the range estimates has been calculated as 0.21 cm in the range from 12.5 to 45 cm. The results obtained demonstrate that infrared sensors can be easily used for localization to an unexpectedly high accuracy without prior knowledge of the surface parameters.

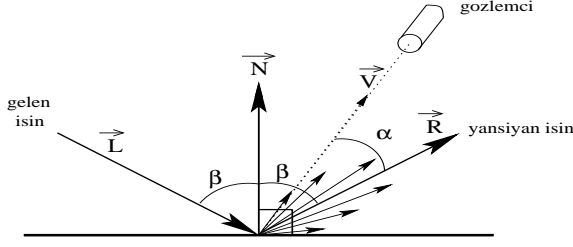
1. Giriş

Kızılberisi algılayıcılar, robotik uygulamalarda çevrenin tanınması için sıkça kullanılan düşük maliyetli cihazlardır. Bu algılayıcılar, genellikle biri alıcı diğeri verici olmak üzere çift olarak kullanılmaktadır. Alıcı tarafından algılanan ışığın yeğnliği esas olarak yüzey özellikleri ile alıcı, verici ve yüzeyin birbirlerine göre olan konumlarına bağlıdır. Dolayısıyla, yeğnlik ölçümleri yeterli doğrulukla konum kestirimi için tek başına yeterli olmamaktadır. Bu sorunun çözümüne bir yaklaşım, uygun sinyal işleme yöntemleriyle öncelikle yüzey özelliklerinin belirlenmesidir [1, 2]. Bu çalışmada sunulan yaklaşım ise yeğnlik ölçümlerindeki parametre sayısını azaltmak üzere, alıcı ve vericiyi önceden bilinen belirli bir konfigürasyona göre yerleştirmektir. Buradaki yöntem, ortam aydınlatmasını, dağınık ve aynasal yansımaları tek bir formülde birleştiren Phong aydınlatma modeline [3] dayanır:

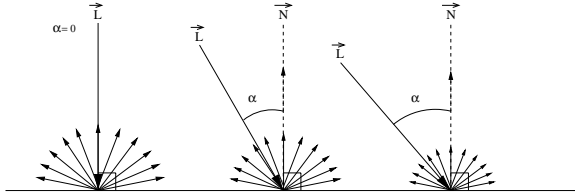
$$I = I_a k_a + I_i [k_d (\vec{L} \cdot \vec{N})] + I_r [k_s (\vec{R} \cdot \vec{V})^n] \quad (1)$$

Burada, I_a ve I_i ortam aydınlatmasını ve gelen ışığın yeğnliğini, k_a , k_d ve k_s yüzeyin ortam aydınlatması, dağınık ve aynasal yansıma katsayılarını, \vec{L} , \vec{N} , \vec{R} ve \vec{V} ise Şekil 1’de gösterildiği gibi, sırasıyla ışık kaynağını, yüzey normalini, yansıyan ışığı ve gözlemcinin bakış doğrultusunu gösteren birim vektörleri temsil etmektedirler. Yukarıdaki toplamda ilk terim olan ortam aydınlatması kızılberisi alıcıyı kaplayan süzgeç tarafından minimize edilmekte, aslında sıfırlanmaktadır. Yine aynı toplamda, ikinci terimle ifade edilen dağınık yansımada ise, Şekil 2’de gösterildiği gibi, gelen ışık tüm yönlere eşit şiddette dağılmaktadır. Bununla birlikte, yansıyan ışığın yeğnliği, gelen ışık ile yüzey normali arasındaki açının kosinüsüyle orantılıdır (Lambert kosinüs yasası) [4]. Son olarak, üçüncü terimle temsil edilen aynasal yansımada ise, Şekil 1’de gösterildiği gibi, yansıyan ışığın yüzey normali ile yaptığı açı gelen ışığın yüzey normali ile yaptığı açıya eşit olmaktadır.

Bu çalışmada, biri alıcı, diğeri verici olmak üzere iki algılayıcı kullanılmaktadır. Alıcı ve verici, üzerinde ayrı ayrı hareket edebilecekleri doğrusal bir platforma



Şekil 1: Aynasal yansımada.



Şekil 2: Farklı geliş açıları için dağınık yansımada.

yerleştirilmişlerdir. Buradaki yöntemin ana fikri, alıcı-verici çifti doğrusal platform boyunca hareket ettirilirken, alıcıdan elde edilen yeğinlik ölçümlerinin maksimum olduğu noktaları kaydetmek ve o anda alıcı-verici çifti arasındaki mesafeyi kullanarak konum kestiriminde bulunmaktır.

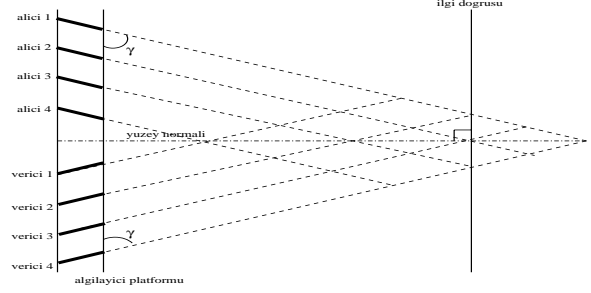
Bölüm 2’de, farklı şekillerde konumlandırılmış yüzeyler için önerilen konum kestirimi teknikleri ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Son bölümde ise, elde edilen sonuçlar irdelenmektedir.

2. Konum Kestirimi

Bu çalışmada kullanılan kızılberisi algılayıcıların herbiri [5], metal muhafaza içinde bir alıcı bir de verici içermektedir. Algılayıcıları değişen uzaklıklarda bir alıcı-verici çifti olarak kullanabilmek için, algılayıcılardan birinin vericisi ve diğer algılayıcının da alıcısı, opak maddelerle kapatılmıştır. Algılayıcılar, 20–28 V dc giriş voltajı ile çalışmakta ve yüzeyden yansıyan ışığın yeğinliğiyle orantılı bir analog çıkış voltajı vermektedirler. Alıcı, ortam aydınlatmasının etkisini minimize edecek bir kızılberisi süzgeç ile kaplanmıştır. Verici kapatıldığında, alıcıdan okunan yeğinlik ölçümü sıfır olmaktadır. Vericinin gönderdiği ışığın yeğinliği bir potansiyometre ile ayarlanabilmektedir. Alıcının çıkışı, 10-bitlik, mikro-işlemci uyumlu, çevirme zamanı 200 μ sec ve çözünürlüğü 1 mV düzeyinde olan bir analog/sayısal çevirici ile işlendikten sonra bir PC’ye gönderilmektedir.

Algılayıcılar, Şekil 3’de gösterildiği gibi, doğrusal platformla önceden belirlenmiş sabit bir açı (bu çalışmada $\gamma = 60^\circ$) yapmakta ve PC kontrollü adım motorları tarafından hareket ettirilmektedirler. Adım motorların adım boyu 1.8° ’dir ve her bir adım algılayıcıların doğrusal platform üzerinde 0.25 cm’lik yer değiştirmesine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, algılayıcılar arasındaki uzaklığı ölçmek için motorların attıkları adım sayısını kaydetmek yeterlidir.

Bu çalışmada alıcının topladığı yeğinlik ölçümleri ile alıcı-verici çifti arasındaki uzaklığı kullanarak konum kestirimi yapmak için izlenen süreç şöyledir: vericinin bir konu-

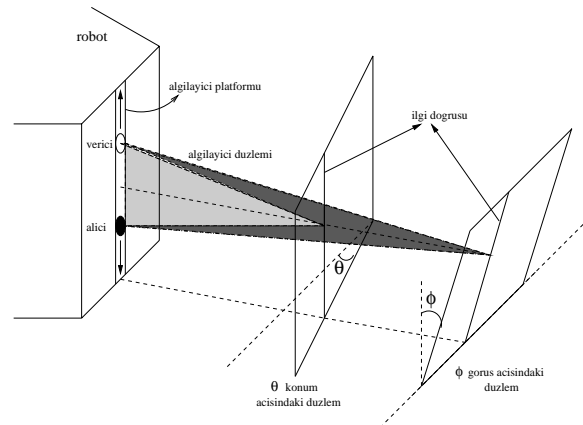


Şekil 3: İlgili doğrusu, algılayıcılar platformuna paralel olduğunda ($\phi = 0^\circ$) deneysel düzeneğin yandan görünüşü.

mu için, alıcı, doğrusal platform boyunca kayarak yeğinlik ölçümü toplar ve ölçümler, motorun her adımı için alıcı-verici çifti arasındaki uzaklık ile birlikte kaydedilir. Alıcı, platform üzerindeki hareketini tamamladığında, kaydedilmiş olan yeğinlik ölçümleri karşılaştırılarak, en büyük ölçüm ve ona karşılık gelen alıcı-verici çifti arasındaki uzaklık bulunur. Vericinin o anki konumu için bulunan bu maksimum ölçüm ve alıcı-verici uzaklığı bilgileri kaydedilir. Bu süreç, vericinin farklı konumları için tekrarlanarak bir grup alıcı-verici uzaklığı ve yeğinlik ölçümü bilgisi elde edilir. Şekil 3’de gösterildiği gibi, verici 4. konumdayken, alıcıdan okunan ölçüm, alıcının 2. konumu için ve benzer olarak verici 3. konumdayken, alıcıdan okunan ölçüm, alıcının 3. konumu için elde edilir.

Algılayıcı düzlemi ve uzaklığın ölçüldüğü ilgi doğrusu Şekil 4’te gösterilmiştir. Yüzeyin konumu, Şekil 4’te gösterildiği gibi, θ ve ϕ açılarıyla belirlenir. ϕ ’nin sıfır olması, algılayıcıların hareket platformu ile ilgi doğrusunun birbirlerine paralel olması anlamına gelir ve bu durumda sistemin geometrisi oldukça basitleşir. ϕ ’nin sıfıra eşit olması için şu iki koşulun sağlanması gerekir: (i) Vericinin tüm konumları için, maksimum yeğinlik ölçümlerinin birbirine eşit olması gerekir. (ii) Maksimum yeğinlik ölçümlerine karşılık gelen, alıcı-verici uzaklıkları da tüm durumlarda eşit olmalıdır.

$\phi = 0^\circ$ ve $\phi \neq 0^\circ$ durumları sonraki bölümlerde ayrı ayrı incelenecektir.



Şekil 4: Genel durum, $\theta \neq 0^\circ$ ve $\phi \neq 0^\circ$.

2.1. $\phi = 0^\circ$ olan Yüzeyler

$\phi = 0^\circ$ olduğunda, daha önce belirtildiği üzere, algılayıcıların hareket platformu ile ilgi doğrusu birbirlerine paralel olurlar. Dolayısıyla, $\phi = 0^\circ$ olduğu saptandığında, konum kestirimi için geriye sadece θ açısı kalır. Aslında, θ 'nın değeri uzaklık kestirimi için gerekli değildir. Bunu göstermek için, önce, en basit durum olan $\phi = 0^\circ$ ve $\theta = 0^\circ$ durumunu ele alalım.

2.1.1. $\phi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$

Bu durumda, hem dağınık hem de aynasal yansıma etkilidir. Aynasal yansımadan kaynaklanan alıcı ölçümü, alıcının, $\psi_i = \psi_r = \psi$ eşitliğini sağlayan konumu için maksimum olur. Dağınık yansıma, Denklem (1)'de ifade edildiği gibi, bütün yönler eşit olarak dağılsa da alıcıdan okunan ölçüm, yine alıcının, $\psi_i = \psi_r = \psi$ eşitliğini sağlayan konumunda maksimum olur çünkü bu noktada, yansıyan ışın ile alıcının doğrultusu birebir örtüşürler. Dolayısıyla, alıcı ile verici yüzey normali ile eş uzaklıkta olduğunda, dağınık ve aynasal yansımalar, alıcının aynı konumunda maksimum olarak ölçülürler. Bu durumda, algılayıcıların hareket platformu ile ilgi doğrusu arasındaki uzaklık şu şekilde hesaplanır:

$$d = a \tan \gamma \quad (2)$$

Bu denklemde a , alıcı ile verici arasındaki uzaklığın yarısı ve $\gamma = 60^\circ$ 'dir. Bu sonucu doğrulamak için, farklı aynasal ve dağınık yansıma özelliklerine sahip yüzeyler için, 12.5 cm'den 45 cm'ye kadar 2.5 cm'lik aralıklarla ölçümler alınmıştır. Her bir uzaklık adımı için, 50 ölçüm üzerinden hesaplanan tüm ortalama hata değerleri, bu çalışmada kullanılan yüzeyler için şöyle bulunmuştur: (a) tahta için 0.15 cm; (b) beyaz kağıt için 0.23 cm; (c) beyaz köpük için 0.16 cm; (d) kabarcıklı ambalaj malzemesi için 0.22 cm; (e) mavi karton için 0.35 cm; (f) kahverengi karton için 0.15 cm. Ayrıca, 12.5–45 cm uzaklık aralığında, bu çalışmada kullanılan bütün yüzeyler üzerinden hesaplanan mutlak ortalama hata değeri 0.21 cm olarak bulunmuştur. Bu hata değeri, beklenen hata değeri ile uyumludur çünkü algılayıcılar 0.25 cm'lik adımlarla hareket ettirilmekte ve bu adım ölçüsünün yarısı, maksimum ayrıklaştırma hatasına denk gelir. Bu da hedef yüzeylerin konum kestiriminde $0.125 \tan \gamma = 0.23$ cm'lik bir mesafeye karşılık gelir. Dolayısıyla, algılayıcıların, 0.25 cm'lik adımlarla hareketi hataların temel sebebidir.

2.1.2. $\phi = 0^\circ, \theta \neq 0^\circ$

Bu durumda, aynasal yansımanın, alıcı ölçümlerine hiç etkisi yoktur çünkü alıcının görüş alanı ile aynasal yansımanın oluşturduğu düzlem örtüşmemektedirler. Dolayısıyla, alıcıdan alınan ölçümlerin esas kaynağı, dağınık yansıyan ışınlardır. Bununla birlikte, alınan ölçümlerde sadece algılayıcı düzlemi üzerinde hareket eden dağınık yansımadan kaynaklanan ışınlar etkilidir. Dolayısıyla, bu durum da, Bölüm 2.1.1'deki duruma dönüşür ve doğrusal platform ile yüzey arasındaki uzaklık da yine Denklem (2)'deki gibi hesaplanır.

0.5 m x 1 m boyutlarında, 1 cm kalınlığında tahta yüzey için, 12.5–45 cm aralığında, 2.5 cm'lik adımlarla, $\theta = 20^\circ$ durumunda ölçümler alınmıştır. Bu durumda, mutlak ortalama hata değeri 0.16 cm olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte,

θ 'nın 30° 'den büyük değerleri için, ortalama hata değeri artma eğilimindedir.

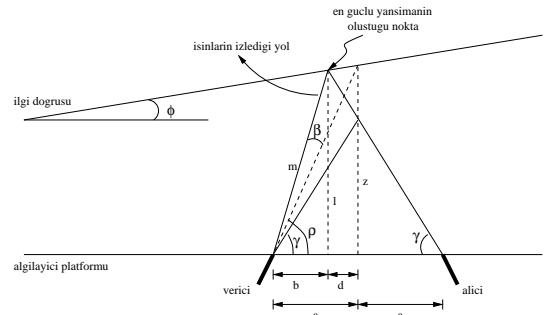
Sonuç olarak, konum kestirimi için izlenen yol üzerinde θ değerinin etkisi yoktur. Konum kestirimi, $\theta = 0^\circ$ ve $\theta \neq 0^\circ$ durumlarında aynı şekilde yapılır.

2.2. $\phi \neq 0^\circ$ olan Yüzeyler

$\phi \neq 0^\circ$ olduğunda, ilgi doğrusu ile doğrusal platform, birbirlerine paralel olmadıkları ve dolayısıyla aralarındaki uzaklık değişken olduğu için, izlenmesi gereken süreç daha karmaşıktır. Bununla birlikte, $\phi = 0^\circ$ durumunda olduğu gibi burada da, aynı nedenlerden dolayı, θ 'nın değeri izlenen süreci değiştirmeyecektir. Dolayısıyla, düzene geometrisinin karmaşıklığının artmaması için θ sıfıra ayarlanacaktır.

ϕ 'nin çok küçük değerlerinden başlayarak (yaklaşık 3°), aynasal yansıma, alıcı tarafından algılanmaz. Bunun nedeni, ϕ 'nin bu değerleri için, yansıyan ışın demetinin, algılayıcıların hareket platformunun üzerine düşmemesidir. Bu çalışmada, ϕ açısı 5° 'lik açılarla artırıldığı için, aynasal yansımanın, ϕ 'nin 3° 'den küçük değerlerinde etkisi düşünülmemiştir. Dolayısıyla, bu durumda alıcıdan okunan değerler, tamamen dağınık yansımadan kaynaklanmaktadır.

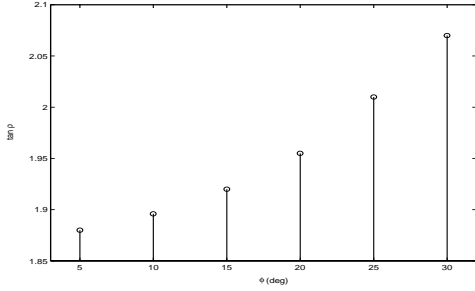
Eğer kızılberisi algılayıcılar birer noktasal kaynak gibi düşünülürse o zaman algılayıcıların hareket platformundan (alıcı-verici aralığının orta noktasından) ilgi doğrusuna olan uzaklık $\phi = 0^\circ$ durumunda olduğu gibi hesaplanır. Bu yaklaşım hatalı sonuçlar vermiştir ki bunlar şu şekilde açıklanabilir: huni şeklindeki bir hacimde yayılan ışınlar ilgi doğrusuna ϕ 'den dolayı, farklı noktalarda, farklı açılarla ulaşırlar. Denklem (2) gereği, daha az açıyla gelen veya daha az yol kaydeden ışınlar daha güçlü yansır. Dolayısıyla, en güçlü yansımanın olduğu nokta sağa veya sola kayar. Bu nedenle, modelimizi Şekil 5'teki gibi geliştirdik. Bu modelde β , vericinin görüş hizasından, en güçlü yansıma noktasına olan ek açıdır ve l de en güçlü yansıma noktasından, hareket platformuna olan uzaklıktır. Dolayısıyla, l 'nin bulunması için ϕ 'nin dışında β 'nin da bulunması gerekir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta şudur: l doğrusu hareket platformu, alıcı-verici aralığının ortasına gelecek şekilde kesmemektedir ve bu, işlemlerin karmaşıklığının artmasına sebep olur. β açısı, ϕ 'nin sabit bir değeri için sabit olduğundan, ρ 'nun sabit olduğu ve alıcı-verici aralığının orta noktasından yüzeye olan, z uzaklığının, l 'nin yerine kullanılabileceği gösterilebilir.



Şekil 5: Düzeneğin geliştirilmiş modeli.

ρ sadece ϕ ve β 'ya bağlı olduğu için, sabit ϕ ve β değerleri

için ρ sabittir. Bu da, bize konum kestirimi için ρ ve z' 'yi, l' 'nin yerine kullanma şansını verir. z' 'nin, hareket platformunu orta noktada kesmesi ama l' 'nin hareket platformunu kestiği noktanın karmaşık hesaplar gerektirmesi yüzünden, z' 'yi l' 'nin yerine kullanmak oldukça avantajlıdır. Deneysel olarak bulunan ρ değerleri, ϕ 'nin 5° 'den 30° 'ye kadar 5° 'lik açılarla artan değerleri için Şekil 6'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ρ 'nun bulunması için kullanılacaktır.

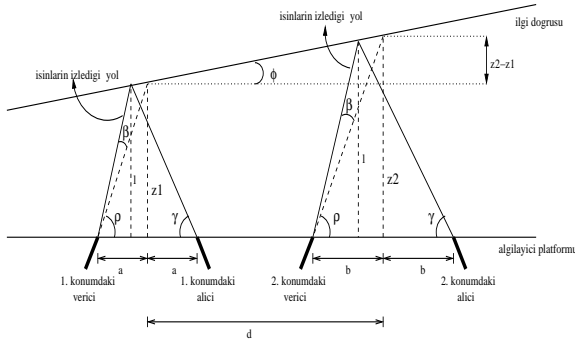


Şekil 6: 30° 'ye kadar ϕ 'ye karşılık gelen $\tan \rho$ değerleri.

ρ 'nun değerleri, ϕ 'ye bağlı olduğu için, ϕ 'nin değerinin bulunması gerekir. İzlenmesi gereken süreç şudur: vericinin iki farklı konumu seçilir ve karşılık gelen alıcı konumları Şekil 7'deki gibi bulunur. Bu iki durumdaki alıcı-verici mesafesi $2a$ ve $2b$ olarak kaydedilir. İlk alıcı-verici aralığının orta noktası ile ikinci alıcı-verici aralığının orta noktası arasındaki uzaklığa d dersek;

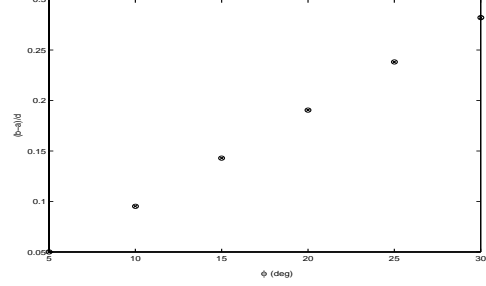
$$\begin{aligned} z_1 &= a \tan \rho \\ z_2 &= b \tan \rho \\ \tan \phi &= \frac{z_1 - z_2}{d} = \frac{b - a}{d} \tan \rho \\ \frac{\tan \phi}{\tan \rho} &= \frac{b - a}{d} \end{aligned}$$

ρ , sabit bir ϕ değeri için sabit olduğundan, $(b - a)/d$ ifadesini, ϕ 'nin bir göstergesi olarak kullanabiliriz. Bunun için, Şekil 8'de gösterildiği gibi, farklı ϕ değerleri için, $(b - a)/d$ değerleri deneysel olarak bulunmuştur. Şekil 8'de de açıkça görüldüğü gibi, $(b - a)/d$ oranı ϕ değerlerinin tahmini için kullanılabilir.



Şekil 7: $\phi \neq 0^\circ$ durumunda konum kestirimi.

Sonuç olarak, ilgi doğrusu ile hareket platformu arasındaki uzaklığı bulmak için izlenmesi gereken tüm prosedür şudur;



Şekil 8: $(b - a)/d$ oranına karşılık gelen ϕ değerleri.

- Eğer ϕ sıfır değilse, $(b - a)/d$ oranı bulunur ve buna karşılık gelen ϕ değeri, $(b - a)/d$ ve ϕ grafiğinden bulunur.
- ρ değeri ise, $\tan \rho$ ve ϕ grafiğinden bulunur.
- ρ da bulunduktan sonra, alıcı-verici aralığının orta noktasından ilgi doğrusuna olan uzaklık $z = a \tan \rho$ olarak bulunur.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı yüzeylerin kızılberisi algılayıcılar kullanılarak konumlarının belirlenmesi için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntem, yüzeylerin farklı konumlarını, ayrı ayrı değerlendirmiştir. Bütün durumlar için, kullanılan yüzeylerin gerçek uzaklıklarının formüle edilebilmesi için, önerilen deneysel düzenden elde edilen sonuçlar dikkatle incelenmiştir. Yüzey özelliklerine ihtiyaç duymaması, yöntemin, farklı ortamlarda her türlü yüzey için kullanılmasını, hızlı ve basit olmasını sağlamaktadır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, yöntemin yüksek bir kesinlikle konumlandırma yapabildiği ve dolayısıyla robot ve diğer akıllı sistem uygulamalarında rahatlıkla kullanılabileceği görülmektedir.

4. Kaynakça

- [1] P. M. Novotny and N. J. Ferrier, "Using infrared sensors and the Phong illumination model to measure distances," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1644–1649, Detroit, MI, 10–15 May 1999.
- [2] G. Benet, F. Blanes, J. E. Simó and P. Pérez "Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 40, pp. 255–266, 2002.
- [3] B. T. Phong, "Illumination for computer generated pictures," *Communications of the ACM*, 18(6), pp. 311–317, June 1975.
- [4] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, p. 182, Oxford UK Pergamon, 6th ed., 1980.
- [5] Matrix Elektronik, AG, Kirchweg 24 CH-5422 Oberehrendingen, Switzerland, *IRS-U-4A Proximity Switch Datasheet*, 1995