SAÜ Fen Bil Der 20. Cilt, 2. Sayı, s. 111-119, 2016

Stereo kamera sisteminde aykırılık haritaları yardımıyla nesne uzaklıklarının tespit edilmesi

Mücahit Soyaslan[1*], Ergün Nart[2], Özdemir Çetin[3]

26.07.2015 Geliş/Received, 14.12.2015 Kabul/Accepted

ÖZ

Bu çalışmada stereo kamera sistemi ile farklı cisimlerin derinliklerinin yani paralel kamera düzlemine uzaklıklarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Kurulan test düzeneğinde sağ ve sol görüntünün elde edilmesi için iki adet sabitlenmiş kamera ve bunlardan alınan görüntüleri işleyen bir adet bilgisayar bulunmaktadır. Kameralar sabit olarak yerleştirildikten sonra satranç tahtası yardımıyla kalibre edilmiştir. Kalibre işleminden sonra her iki kamera için esas ve temel matrisler, birinci ve ikinci kameralar arasında dönme ve öteleme matrisi bulunmuştur. Ardından sol ve sağ kameradan alınan iki adet görüntü üzerinde doğrultma işlemi gerçekleştirilmiştir. Buna bağlı olarak derinlik haritası ve uzaklık bilgisine ulaşılmıştır. Derinlik bilgisi bulma işleminin robot ve araçlardaki uzaklık algılama sistemlerinden engelliler için uzaklık tayinine kadar birçok alanda kullanılması mümkündür.

Anahtar Kelimeler: stereo görme, derinlik haritası, görüntü işleme, uzaklık tayini

Object distance detection through disparity map in stereo camera system

ABSTRACT

In this study, it is intended to detect various objects' depths consequently distances from parallel camera plane with stereo camera system. In the established test setup, there are two fixed cameras for capturing left and right image and a computer for processing the images. After cameras were placed fixedly, they were calibrated with chessboard. Subsequently calibration; the intrinsic parameters, essential and fundamental matrices, rotation and translation matrices between left and right cameras were occurred. Then rectification process performed to the images which captured from left and right cameras. Accordingly, depth map and knowledge of distance has been obtained. It is possible to use the depth knowledge process in many fields involved robot and vehicle distance detect systems to handicapped distance determination.

Keywords: stereo vision, depth map, image processing, distance detection

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author
1 Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya - msoyaslan@sakarya.edu.tr
2 Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya - enart@sakarya.edu.tr
3 Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya - ocetin@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde 3 boyutlu görüntü teknolojisi büyük gelişmeler kaydetmiştir. Bu teknoloji ise insanların görme sisteminin modellenmesi sonucu ortaya çıkan stereo görme kavramı ile geliştirilmiştir. Gerek üretilen 3 boyutlu kameralar gerekse elde edilen 3 boyutlu görüntü ve filmlerin temelinde derinlik çıkarımının bulunduğu bir gerçektir. Bilgisayarlı görme olarak anılan bütün bu çalışmaların ortaya çıkması için sağlam bir matematik ve bilgisayar bilimi; az da olsa fizik, sezgi psikolojisi ve sinir bilimi bilgisine ihtiyaç vardır [1]. Yapılan çalışmanın giriş bölümünde gerçekleştirilen literatür çalışmalarından bahsedilecek olup, 2. bölümde stereo görme ve kamera kalibrasyonu konusunda teorik bilgi verilecektir. 3.Bölümde kurulan test düzeneğinden ve bulunan parametreler belirtilecek ve son bölümde uzaklık kestirimine yönelik veriler yorumlanacaktır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, stereo görme ve uzaklık tespiti ile ilgili birçok makale ve kitap bulunmaktadır. Araçların önündeki engellerin tespit edilmesi problemini ele alan çalışmalarda çeşitli düzenekler kullanılmıştır. Burie, Bruyelle ve Postaire'nin [2] çalışmalarında araç üzerine 2 adet lineer kamera koyulması ile sıralı stereo görüntüler elde edilmiş, sağ ve sol görüntünün yeni bir kenar bulma prosedürü ile analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kurulan sistem gerçek trafikte test edilmiştir. Hareket halindeki araçların yol güvenliğini artırmak için, "genel engel ve yol bulma sistemi" adı verilen bir stereo görme tabanlı donanım ve yazılım mimarisi Bertozzi ve Broggi [3] tarafından tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen sistem, simetrik veya belli bir şekli olmayan engellerin ve kurulmuş bir ortamdaki boyalı şerit işaretlerin algılanmasını mümkün kılmıştır. Huh ve ark. [4] stereo görme sensörleri kullanarak bir engel tanıma sistemi geliştirmiştir. Bu sistemde başlangıçta eşleşen çiftlerin sağlıklı bir şekilde tespit edilebilmesi için özellik eşleştirme, epipolar sınır ve özelliklerin toplanması işlemleri kullanılmıştır. Başlangıcın belirlenmesinden sonra sistem, engelleri takip eden algoritmayı çalıştırmakta ve yol boyunca önündeki veya önüne çıkabilecek engelleri tespit etmektedir. Sizintsev ve Wildes [5] 3D yüzey kusurlarında binoküler görme kestirimi vasıtasıyla etkili iyileştirmeler yapmak için kenarlardaki bozulmaları düzelten bir metot önermişlerdir. Özüağ ve ark. [6] standart ışık kaynakları yardımıyla tek pozda yüz geometrisinin 3D olarak elde edilmesi için pasif bir stereo sistem kurmuşlardır. Stereo çiftlerinden derinlik bilgisini elde ettikten sonra her katmandaki derinlik haritaları üzerinden gürültü giderimi ve yumuşatma işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. En son olarak stereo çiftleri için elde edilen nokta bulutlarını birleştirilip, iyileştirme ve nokta azaltma ile nihai modeli elde etmişlerdir. Bhowmick ve ark. [7] yayaları algılayan ve onların araçtan ne kadar uzakta olduğunu tespit eden kompakt bir stereo görüş sistemi sunmuşlardır. Stereo görüş sisteminin uygulamalarında insan üzerindeki eş noktaları tespit eden yeni bir yaklaşım öne sürerek ölçüm için gerekli üçgenlere ayırmayı sağlamaya çalışmış ve elde ettikleri sonuçlara göre %80 başarı elde etmişlerdir. Llorca ve ark. [8] ilgili bölge tespiti, sınıflandırma ve bu bölgenin takibi olarak 3 ana başlığa ayrılan yayaların akıllı araçlar vasıtasıyla algılanmasında kilit nokta olarak gördükleri ilgili bölge tespitini incelemişlerdir. Lai ve ark. [9] mobil robotlarda uzaklık bilgisini elde etmek için TMS320DM642 DSP tabanlı bir stereo görme sistemi tasarlamışlardır. Gauss filtresinden geçirdikleri görüntülere Sobel kenar bulma işlemini uyguladıktan sonra lokal stereo eşleştirme algoritması ile hedefin uzaydaki konumunu tespit etmişlerdir. Tekil nokta uzaklıklarının bulunmasında %99 başarı sağladıkları uygulamada, uzaklık bulma algoritması DSP/BIOS işletim sisteminde gerçek zamanlı olarak yürütülmüştür. Hamzah ve ark. [10] otonom bir araçta yer bilgisini stereo görme kullanarak bulan bir metot üzerinde çalışmışlar ve stereo eşleştirme sonucunda mutlak farkların toplamı algoritmasını (SAD) kullanarak elde ettikleri derinlik haritasından uzaklıkları hesaplamışlardır. Navigasyon sırasında uzaklıkların tespit edilmesi için Matlab eğri uydurma araç kutusunu (cftool) kullanarak piksel değerlerini çıkarmışlardır. Xue ve Wu [11] zayıf ışıklı ortamlardan veya stereo kameralara gelebilecek hasarlardan kaynaklı problemleri çözmek için aktif stereo görsel kontrolünde düzeltilebilir bir metot önermişlerdir. Görüntü ve ışık düzlemi arasındaki homografiyi baz alan bir matematik modeli ve ışık kaynağı görüsü için kalibrasyon metodunu geliştirmişler, yaptıkları deneysel çalışmalar ile kullandıkları metodun doğruluğunu ispatlamışlardır. Ross ve ark. [12] derinlik kestiriminde kamera kalibrasyonuna gerek kalmadan mobil robot navigasyonu için yeni bir stereo görme metodu geliştirmişlerdir. Hesaplama süresinden ortalama % 40 zaman kazancı sağlayan metotta, stereo benzeşimindeki blok eşleştirmesi için adaptif aday eşleme penceresi kullanılmıştır. Kytö ve ark. [13] insan tabanlı uygulamalarda stereo kamera derinlik çözünürlüğü ve insan derinlik çözünürlüğü arasında bir kıyaslama yapmaya olanak tanıyan ve stereo kamera derinlik doğruluğunu hesaplayan bir metot sunmuşlardır. Stereo kamera derinlik doğruluğunu ölçmek için iki adet SLR kameradan oluşan stereo sistemini kurmuşlar ve derinlik çözünürlüğünün SLR kameralarda normal stereo keskinliğinden daha iyi olduğunu 0.7-5.8 m aralığında yaptıkları ölçümlerde tespit etmişlerdir. Budiharto ve ark. [14] ise stereo görüsünü kullanarak birden fazla hareketli engelden kurtulabilen ve kapalı alanlarda kullanılan bir servis robotu tasarlamışlardır. Stereo kamera sisteminin kullanıldığı, hareketli engeller arasından geçerek bir kupayı istenen müşteriye

götürebilen servis robotunda, görme sensörleri bozukluklarını Bayes yaklaşımı yardımıyla gideren yeni bir metot geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada ortamda yürüyen insanlar hareketli engeller olarak belirlenmiş olup bunların hızları, yönleri ve uzaklıkları stereo kameralar ile tespit edilerek muhtemel çarpışmalardan kurtulma amaçlanmıştır. Gerçek zamanlı insan takibinde kullanılan mobil robotlardaki problemleri ele alan Petrović ve ark. [15], stereo görme ile insanların algılanmasını ve takibini birleştirerek modifiye edilmiş Kalman filtresi yardımıyla yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Kullanılan Kalman filtresi ile insanların 3D koordinatları robot kamerasından alınan veriler ile sürekli en uygun değere güncellenmektedir. Geliştirilen metodu hem açık hem de kapalı ortamda değişik senaryolar ile deneyip bir insanın takibinde sistem performansını test etmişlerdir. Gövem ve ark. [16] üç boyutlu görüntü üzerinde derinlik tabanlı keskinlik ve zıtlık iyileştirme algoritmasının Xilinx Spartan6 FPGA üzerinde doğrulanmasını incelemişlerdir. Vestel'in 1080p 3DTV şasesi üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalarda algoritmanın sadece önde bulunan nesneler için iyileştirme sağladığını gözlemlemişlerdir.

Yapılan çalışmaların çoğu stereo kalibrasyonunu, stereo derinlik tespitini ve görüntüden uzaklık kestirimini dolayısıyla 3D koordinatlara ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda elde edilen derinlik haritaları ile stereo kamera sistemlerinin önünde bulunan engellerin konumları belirlenmekte ve kurulan stereo sistemleri günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Önerilen sistemde iki adet kameradan oluşan stereo kamera düzeneği paralel olarak sabitlenmiş olup, önündeki engellerin bir bilgisayar vasıtasıyla fotoğrafları çekilmekte ve kamera sistemine olan uzaklık haritalarının çıkarılması sağlanmaktadır. Bu işlemin yapılabilmesi için ilk önce kameraların kalibrasyonun yapılması gerekmektedir. Bunun için 'Matlab Computer Vision System Toolbox' kullanılmıştır [17]. Ayrıca MathWorks [20] sitesinden yer alan stereo görme örnekleri yapılan çalışmada referans olarak kullanılmıştır. Birbirine uzaklıkları bilenen kameraların kalibrasyon verileri ve derinlik haritaları kullanılarak engellerin kamera düzleminden ne kadar uzakta olduğu anlaşılabilmektedir.

2. STEREO GÖRÜSÜ (STEREO VISION)

Stereo görüsü veya çiftli görselleştirme basitçe birden çok kamera kullanılarak gerçekleştirilen bir derinlik bulma işlemi olarak tanımlanabilir. Stereo görüsünde yapılmak istenen, birbirine göre konumu bilenen kameralardan alınan görüntülerin çeşitli işlemlerden geçirilmesi suretiyle kameraların önündeki nesnelerin gerçek uzaydaki koordinatlarının belirlenmesidir. Stereo görmeye verilebilecek en iyi örnek insan gözleridir, zira insan gözünün birini kapattığında derinlik algısı kısmen ortadan kalkmaktadır. Bilgisayarlar vasıtasıyla yapılan stereo görme işleminde ise farklı kameralardan elde edilen iki fotoğraftaki örtüşen noktalar belirlenmekte, kameralar arasındaki uzaklık ve örtüşen noktalar yardımıyla noktaların 3D koordinatları tespit edilmektedir. Pratikte iki kamera kullanılması durumunda uygulanan adımlar 4 ana başlık altında incelenmektedir [18].

i. Radyal ve teğetsel lens bozukluklarının matematiksel olarak giderilmesi (undistortion): Lens düzleminden görüntü düzlemine geçerken cisimlerin şekillerinde bazı bozulmalar meydana gelmektedir. Bu aşamanın sonucunda görüntülerin dağılmamış halleri elde edilmekte ve cisimlerin kenarlarındaki bozulmalar giderilmektedir.

ii. Kameralar arasındaki açılara ve uzaklıklara göre düzeltme yapılması (rectification): Bu aşamadan sonra eşleşen epipolar çizgiler y yönünde aynı hizaya getirilmekte ve görüntüler arasında sadece x yönünde farklılıklar oluşmaktadır. Bu işlem stereo eşleme işleminin daha gerçekçi ve net hesaplanmasına olanak sağlamaktadır.

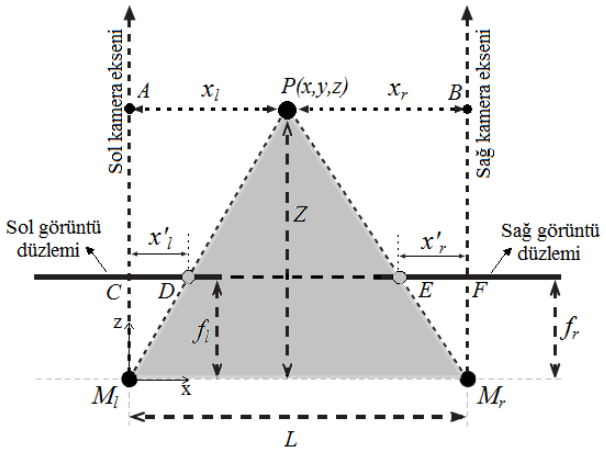
iii. Sağ ve sol kamera görüntülerindeki aynı cisimlerin tespit edilmesi (correspondence): Sağ ve sol kamerada aynı cisimlerin tespit edilmesi sonucunda, görüntü düzlemindeki x yönündeki farklılıklardan (x'l -x'r) yararlanarak fark haritaları elde edilmektedir.

iv. Üçgenleştirme ile derinlik haritasının çıkarılması (reprojection): Konumları bilinen kameraların geometrik yerlerinden faydalanarak üçgenleştirme işlemi yapılmakta ve fark haritaları derinlik haritalarına dönüştürülebilmektedir.

2.1. Stereo Görüntü Sistemi (Stereo Vision System)

Kamera düzlemleri tam olarak hizalanmış ve lens bozuklukları tamamen giderilmiş bir kamera çifti incelendiğinde, kamera eksenleri ve görüntü düzlemleri birbirine paralel olan bir sistemin oluştuğu gözlenecektir. Bahsedilen sistem Şekil 1'de şematik çizimi gösterilen standart bir stereo görüntü düzeneğidir. Düzenek sağ ve sol kameralardan ve bir adet cisimden oluşmaktadır. Sol kameranın yansıma merkezi (center of projection) yani lens merkezi M_l, sağ kameranın yansıma merkezi ise M_r'dir. M_l ve M_r noktalarının arasında kalan L uzaklığı referans uzaklığı (baseline) olarak adlandırılmaktadır. Sağ ve sol kameraların odak uzaklıkları (focal length) f_l ve f_r'dir. Kameraların M_l ve M_r yansıma noktaları ile P(x,y,z) noktasının oluşturduğu düzleme epipolar düzlem denilmektedir. P noktasının sol ve sağ kameraya göre olan x yönündeki uzaklıkları sırasıyla xl ve xr'dir. Sol ve

sağ görüntü düzlemlerindeki x'_l ve x'_r yatay fark değerleri olarak adlandırılmaktadır. Bu değerlerin arasındaki fark (x'_l -x'_r) görüntüler arasındaki aykırılık yani fark değeridir (disparity). Diğer bir ifadeyle d uzaklığı, iki görüntü üst üste getirildiğinde aynı noktalar arasındaki x yönündeki mesafesidir. P noktasının kameraların yansıma noktalarına olan uzaklığı Z derinliğini (depth) vermektedir [1-18]. Derinlik ile görüntüler arasındaki aykırılık (d) ters orantılı olup Şekil 1'deki çizimden Z derinlik değeri benzer üçgenler yardımıyla çıkarılabilmektedir.



Şekil 1. Standart stereo görüntü sistemi (Standard stereo vision system) [1,18]

Kameraların odak uzaklıklarının birbirine eşit olduğu kabul edilmektedir. Bu ifade Eşitlik 1'de gösterilmiştir. Sağ ve sol görüntü düzlemleri arasındaki aykırılık yani fark değeri de Eşitlik 2'de ifade edilmektedir. x yönünde başlangıç noktası sol kamera ekseni seçilmesi durumunda, P noktasının x koordinatı $x = |x_l|$ yazılabilmekte ve $x_r = |x - L|$ olduğu Şekil 1'den çıkarılmaktadır. Benzerlik ifadelerindeki değerler uzaklık olduğundan negatif işaretlerin bir önemi yoktur. Dolayısıyla denklemlerdeki negatif işaretler yok sayılabilmektedir. Açıklanan ifadeler doğrultusunda Şekil 1'de PAM_l ve DCM_l üçgenlerinde benzerlik ilişkisi kurulduğunda Eşitlik 3 elde edilmektedir.

$$f = f_l = f_r \tag{1}$$

$$d = x'_l - x'_r \tag{2}$$

$$\frac{X}{x'_l} = \frac{Z}{f} \tag{3}$$

PBM_r ve EFM_r üçgenlerinde benzerlik ilişkisi kurulduğunda Eşitlik 4 elde edilmektedir.

$$\frac{X-L}{x'_r} = \frac{Z}{f} \tag{4}$$

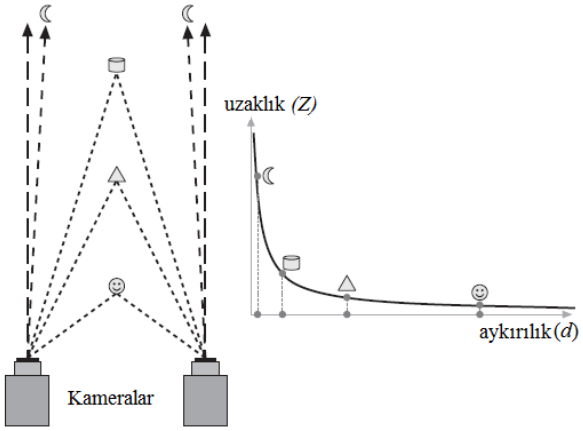
Eşitlik 3 ve Eşitlik 4 ortak çözülürse P noktası ve kamera yansıma merkezi arasındaki derinlik olan Z uzaklığı Eşitlik 5'teki gibi bulunmaktadır.

$$Z = \frac{f*L}{x'_l - x'_r} \tag{5}$$

Bulunan ifadeden anlaşılacağı üzere aykırılık değerinin bilinmesi ile cisimlerin uzaklıkları kolaylıkla tespit edilebilmektedir.

2.2. Derinlik ve Aykırılık İlişkisi (Depth and Disparity Relationship)

Derinlik ve aykırılık değerlerinin birbiri ile ters orantılı olduğu Eşitlik 5'te bulunmuştu. Bu değerlerin arasında ayrıca doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Eğer aykırılık 0'a yaklaşırsa, aykırılıktaki küçük değişimler derinlikte büyük değişimlere sebep olacaktır. Eğer aykırılık büyükse, aykırılıktaki değişimler derinlik değerinde büyük bir değişim etkisi yapmayacaktır. Dolayısıyla stereo görüntü sistemlerinde kameralara yakın olan cisimlerin derinlik çözünürlüklerinin daha yüksek olacağına, kameradan uzaklaştıkça ise derinlik çözünürlüğünün azalacağına varılabilmektedir [18]. Derinlik ve aykırılık arasındaki doğrusal olmayan durum Şekil 2'de gösterilmektedir.

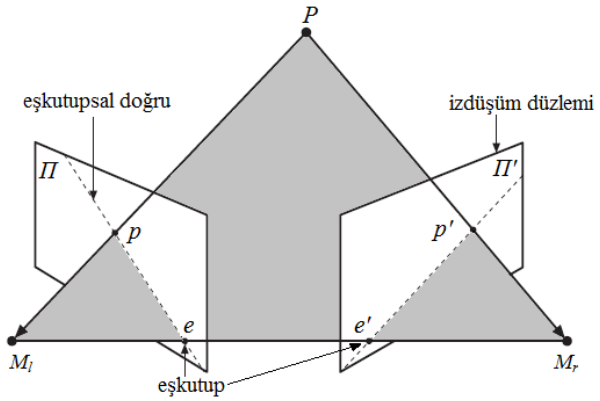


Şekil 2. Uzaklık-Aykırılık ilişkisi (Distance-Disparity relationship) [18]

2.3. Eşkutupsal Gepmetri (Epipolar Geometry)

Stereo görüntü sisteminin temelinde eşkutupsal geometri olarak adlandırılan düzlem ve çizgi geometrisi bulunmaktadır. Şekil 3'te eşkutupsal geometri elemanları gösterilmektedir. Eşkutupsal düzlemi PM_lM_r üçgeni oluşturmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi yansıma merkezleri arasındaki uzaklık L referans uzaklığıdır. pe ve pe' doğruları eşkutup doğruları (epipolar lines), e ve e' noktaları ise eşkutup noktaları (epipole) olarak adlandırılmaktadır. Eğer p ve p'aynı noktanın görüntüleri

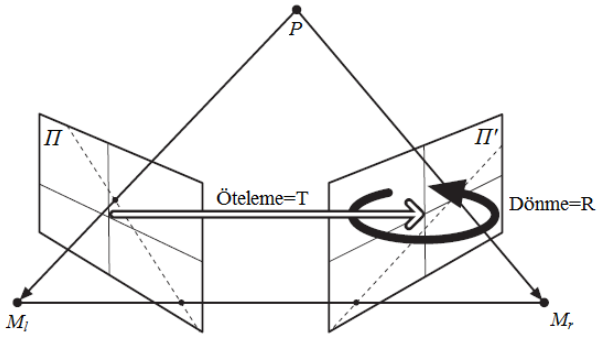
ise p', p ile bağlantılı olan eşkutup doğrusu üzerinde bulunmalıdır. Bu eşkutupsal koşul stereo görme ve hareket analizinde temel bir rol oynamaktadır. Kamera görüntülerindeki her 3D nokta, görüntülerin eşkutup çizgilerinde kesiştiği eşkutupsal bir düzlemle ifade edilebilmektedir [1-19].



Şekil 1. Eşkutupsal geometri düzlemi (Epipolar geometry plane) [19]

2.4. Esas ve Temel Matrisler (The Essential and Fundamental Matrix)

Görüntülerin çakıştırılması işleminde gerekli olan iki matristen biri esas matris (E) diğeri de temel matris (F) olarak adlandırılmaktadır. E matrisi, fiziksel uzayda (gerçek koordinat sisteminde) kameraların aralarındaki öteleme ve dönme bilgilerini içermektedir. Kamera görüntü düzlemleri arasındaki öteleme ve dönme hareketi Şekil 4'te gösterilmiştir. F matrisi, E matrisinin içeriğine ek olarak kameraların iç parametrelerini (intrinsic parameters) de içermektedir. Bu yüzden F matrisi kameraların piksel koordinat sisteminde ifade edilmektedir. E matrisi tamamen geometrik bir matristir ve görüntü ile arasında herhangi bir ilişki yoktur. P noktasının sol kamerada görünen konumu ile sağ kamerada görünen konumunun fiziksel koordinatları ile ilişkilidir (p ve p'). F matrisi ise cisim noktalarının sağ ve sol görüntü düzlemlerindeki görüntü koordinatları (pikselleri) ile ilgilidir (q ve q').



Şekil 2. Kamera görüntü düzlemleri arasında öteleme ve dönme hareketi (Translation and rotation movement between camera vision planes) [18]

Sol kamerayı baz alırsak M_l koordinat merkezi olacaktır. İncelenen noktanın konumu p'dir. Diğer kameranın orijini ise L kadar uzaktadır. P noktası sağ kamerada p' olarak gözükmektedir ve kamera koordinatları p'=R(p-L)'dir. Düzlemdeki tüm x noktalarının n normal vektörü ile a noktasından geçtiği düşünülürse Eşitlik 6 yazılabilmektedir [18].

$$(x - a).n = 0 \tag{6}$$

6 eşitliği eşkutupsal düzleme uygulanırsa Eşitlik 7 elde edilmektedir.

$$(p - L)(L \,\mathrm{X}\, p) = 0 \tag{7}$$

$p' = R(p - L)$ denkleminin her iki tarafı R^{-1} ile çarpılırsa Eşitlik 8 elde edilmektedir.

$$p - L = R^{-1}.p' \tag{8}$$

$R^{-1} = R^T$ yazılırsa ve Eşitlik 7'de yerine konursa Eşitlik 9 elde edilmektedir.

$$(R^T.p')^T(L \,\mathrm{X}\, p) = 0 \tag{9}$$

9 eşitliği matris çarpımı şeklinde Eşitlik 10'daki gibi yazılabilmektedir.

$$(L \,\mathrm{X}\, p) = Sp \tag{10}$$

S matrisi ve denklemler düzenlenirse aşağıdaki eşitlikler elde edilmektedir.

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -L_z & L_y \\ L_z & 0 & -L_x \\ -L_y & L_x & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$(p')^T RSp = 0 \tag{12}$$

$$E = RS \tag{13}$$

$$(p')^T Ep = 0 \tag{14}$$

Eşitlik 13'teki **Esas matris** olup RS çarpımına eşittir ve piksel koordinatları ile herhangi bir ilişkisinin bulunmadığı rahatlıkla anlaşılabilmektedir.

Görüntüdeki bir piksel ile diğer görüntüdeki eşleşen eşkutup doğruları arasındaki ilişkiyi bulabilmek için iki kamera arasındaki iç parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. Bunun yapılabilmesi için p yerine piksel koordinatı olarak q değişkeni ve ilgili kamera iç parametreleri atanır. K kamera iç parametreleri olarak atanırsa, q Eşitlik 15'teki gibi yazılmaktadır (K_l sol

kamera iç parametreleri, K_r sağ kamera iç parametreleridir).

$$q = Kp \tag{15}$$

$p = K^{-1}q$ yazılırsa ve esas matrisin olduğu denklemde yerine konursa Eşitlik 16 elde edilmektedir.

$$(q')^T (K_r{}^{-1})^T E\, K_l{}^{-1}\, q = 0 \tag{16}$$

Eşitlik 16'dan ***F* temel matrisi** çekilip yazılırsa Eşitlik 17'deki gibi elde edilecektir. Eşitlik 17'ye dikkatle bakılırsa *F*'nin esas matris ile aynı formda olduğu anlaşılacaktır. Fakat temel matris *F*'de kullanılan ifadeler piksel uzayındaki değişkenler iken esas matris *E*'de kullanılan ifadeler fiziksel uzaydaki değişkenlerdir.

$$F = (K_r{}^{-1})^T E\, K_l{}^{-1} \tag{17}$$

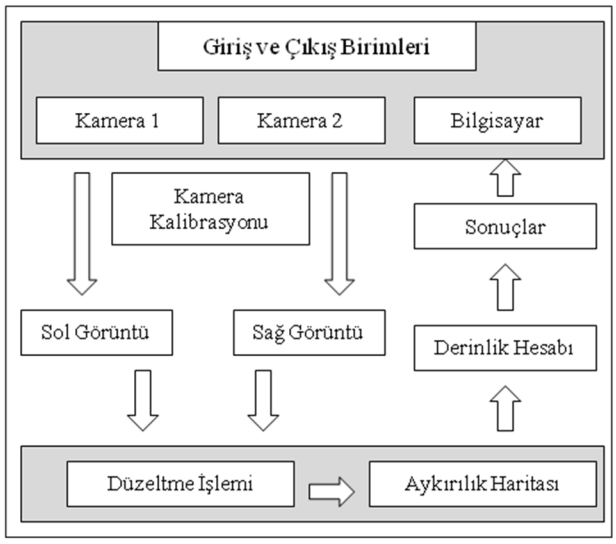
$$(q')^T F\, q = 0 \tag{18}$$

3. TEST DÜZENEĞİ VE PARAMETRELERİN ÇIKARIMI (EXPERIMENTAL SETUP AND GETTING PARAMETERS)

Gerçekleştirilen sistemde birbirine yatay olarak konumlandırılmış 2 adet kamera bulunmaktadır. Kullanılan kameraların odak uzaklıkları 4 mm'dir. Alınan görüntüler 640X360 piksel boyutlarındadır. Kameraların birbirine göre konumlarının tam olarak tespit edilebilmesi ve lens bozukluklarının giderilebilmesi için ilk önce kamera kalibrasyonu yapılmıştır. Bu işlem sonucunda her iki kamera için iç parametreler ve sağ kameranın sol kameraya göre olan öteleme ve dönme matrislerine ulaşılmıştır. Öteleme matrisi verisine göre kameralar arasındaki *L* mesafesinin 7.23 cm olduğu bulunmuştur. Ayrıca bölüm 2'de bahsedilen *E* esas matrisi ve *F* temel matrisi elde edilmiştir. Stereo kamera düzeneği ve uzaklık bulma algoritması Şekil 5'te gösterilmiştir.

Sağ kameranın sol kameraya göre olan dönme matrisi Eşitlik 19'da, öteleme matrisi ise Eşitlik 20'de verilmiştir. Sol ve sağ kameraların iç parametreleri sırasıyla Eşitlik 21 ve 22'deki gibi elde edilmiştir. Esas matris ve temel matris ise Eşitlik 23 ve 24'te sırasıyla gösterilmektedir.





Şekil 3. Test düzeneği ve uzaklık bulma algoritması (Experimental setup and distance detection algorithm)

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.0036 & 0.0088 \\ -0.0035 & 0.9999 & -0.0106 \\ -0.0088 & 0.0106 & 0.9999 \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$T = [-7.2304 \quad -0.0714 \quad -0.0089] \tag{20}$$

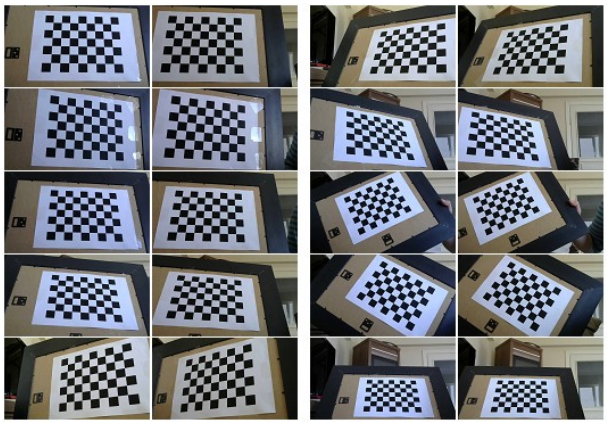
$$Sol_i_p = \begin{bmatrix} 1401.8 & 0 & 0 \\ 0 & 1400.7 & 0 \\ 646.96 & 359.23 & 1 \end{bmatrix} \tag{21}$$

$$Sağ_i_p = \begin{bmatrix} 1400.8 & 0 & 0 \\ 0 & 1399.9 & 0 \\ 646.11 & 350.99 & 1 \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$E = \begin{bmatrix} 5.9608e-4 & -0.0548 & -0.0452 \\ -0.0096 & 0.0766 & 7.2302 \\ 0.0713 & -7.2298 & 0.0770 \end{bmatrix} \tag{23}$$

$$F = \begin{bmatrix} 3.0357e-10 & -2.7907e-08 & -2.2638e-05 \\ -4.9030e-09 & 3.9069e-08 & 0.0052 \\ 5.2458e-05 & -0.0052 & 0.0210 \end{bmatrix} \tag{24}$$

Kamera kalibrasyonu için 10'ar adet fotoğraf kullanılmıştır. Bu fotoğraflar satranç tahtasının çeşitli açılardan çekilmiş görüntüleridir. Satranç tahtası 9x7 karedir ve bir karenin ölçüsü 2.5 cm'dir. Kalibrasyon işlemi literatürde genellikle OpenCV ve Matlab kullanılarak yapılmıştır. Kurulan test düzeneğindeki kameraların kalibrasyonu Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon için kullanılan fotoğraflar Şekil 6'da gösterilmiştir.



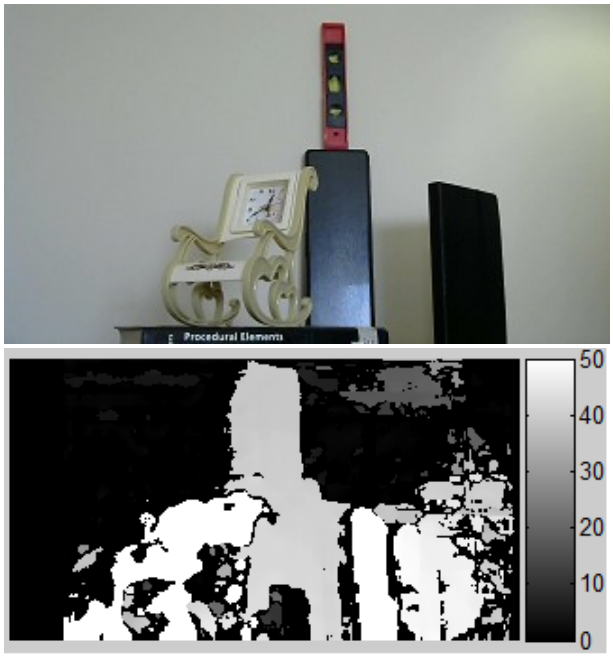
Şekil 4. Sol ve sağ kamera kalibrasyon görüntüleri (Left and right camera calibration images)

Referans olarak seçilen sol kameradan bir adet, sağ kameradan da bir adet olmak üzere kameralar önünde bulunan cisimlerin görüntüsü alınmıştır. Bu görüntülerin ilk halleri ve düzeltme işlemlerinden sonraki halleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Üst üste bindirilmiş sağ ve sol görüntülerin düzeltmeden önceki ve sonraki halleri kıyaslanırsa, düzeltme işlemi sonucunda görüntülerin aynı hizaya getirildiği (y yönünde) ve birbirlerine göre sadece x yönünde farklarının kaldığı anlaşılacaktır. Cisimlerin kenarlarından çizilen beyaz çizgiler ilk başta çakışmazken düzeltme işleminden sonra çakışmaktadır.

Düzeltme işleminden sonra aykırılık haritası çıkarılabilmektedir. Düzeltilmiş sol ve sağ görüntünün 0-50 renk aralığında aykırılık haritası elde edilmiştir. Bu haritada açık renkler yakın nesneleri, koyu renkler ise uzak nesneleri ifade etmektedir. Aykırılık haritası Şekil 8'de gösterilmiştir. Farklı nesnelerin belirli bölgelerinden seçilen 5 farklı nokta için uzaklık (derinlik) hesabı yapılmıştır. Aykırılık haritası ile uzaklık ilişkisinin doğrusal olmadığı Bölüm 2.2'de açıklanmıştır. Bu bağlamda elde edilen aykırılık haritasındaki tüm uzaklıklar için doğru sonuçlar alınması mümkün değildir. Test verisi olarak seçilmiş noktaların uzaklıkları hesaplanırken aykırılık değeri β=0.065 kazanç değeri ile çarpılmıştır. Böylelikle gerçek uzayda 70-100 cm aralığında yapılan ölçümlerde, yüksek oranda doğru sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 1'de bu aralıklarda yapılmış ölçümler ve hesaplanan hata değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5. Düzeltmeden önce ve sonraki üst üste bindirilmiş görüntüler (Over lapped images before and after rectification)



Şekil 6. Sol görüntü ve aykırılık haritası (The left image and disparity map)

Tablo 1. Hesaplanan uzaklık değerleri ve hata oranları (Calculated distance values and error ratios)

Aykırılık değeri (piksel)	Gerçek Uzaklık (cm)	Ölçülen Uzaklık (cm)	Hata (%)
39	105	113	7.61
47	95	94.27	0.76
52	84	85.20	1.42
59	78	75.09	3.73
62	73	71.46	2.10

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Tablo 1'den anlaşılacağı üzere aykırılık değeri arttıkça uzaklık mesafesi azalmaktadır. Ölçülen değerler bu aralığın doğrusala yakın olduğu aralıktadır. Diğer yakın ve uzak noktalarda alınan sonuçlardaki hata oranları yüksek çıkmıştır. 70-100 cm aralığında hata oranları ortalama %3 civarında seyretmektedir. Seçim noktaları aykırılık haritasındaki cisimlerin orta bölgelerinden elde edilmiştir. Cisimlerin diğer bölgelerinden alınan sonuçlarda yüksek hata oranları gözlenmiştir. Bunun nedeni ise aykırılık haritasının yeterli doğruluğa ulaşamamış olmasıdır. Aykırılık haritasının doğruluğu çeşitli filtrelerin ve kenar bulma algoritmalarının kullanılması suretiyle geliştirilebilmektedir. Kurulan test düzeneği ile offline olarak görüntü fotoğrafları alınmıştır. Uygulamanın sonraki çalışmalarında aykırılık haritası daha yüksek doğrulukta elde edilebilir ve nesnelerin video görüntülerinin yakalanması sağlanarak görüntülerden gerçek zamanlı nesne uzaklıkları tespit edilebilir. Ayrıca bu düzenek robotların engelleri tanıması veya araçlarda yayaların tespit edilmesi gibi yerlere de geliştirilerek uygulanabilir. Videodan görüntü yakalanması ve nesnelerin belirlenmesi ile alakalı birçok uygulama mevcuttur. Bu uygulamalara eklenecek bir nesne veya yaya uzaklık tanıma sistemi hem mobil robotlar için, hem otomobiller için hem de sanayide kullanılabilecek diğer uzaklık tanıma sistemleri için önemli bir gelişme olacaktır. Uygulamanın ilerleyen aşamalarında kameralar ile döner bir sistem oluşturularak çekilecek çoklu fotoğraflarla nesnelerin 3D nokta bulutları da elde edilebilir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

[1] R. Hartley, ve A. Zisserman, "Multiple view geometry in computer vision", New York: Cambridge University Press, 2004.

[2] J. C. Burie, J. L. Bruyelle ve J. G. Postaire, "Detecting and localising obstacles in front of a moving vehicle using linear stereo vision", Mathl. Comput. Modeling Journal, cilt 22, no. 4-7, pp. 235-246, 1995.

[3] M. Bertozzi ve A. Broggi, "GOLD: A parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection", IEEE Transactions on Image Processing, cilt 7, no. 1, January, 1998.

[4] K. Huh, J. Park, J. Hwang ve D. Hong, "A stereo vision-based obstacle detection system in vehicles", Optics and Lasers in Engineering cilt 46, pp. 168-178, 2008.

[5] M. Sizintsev ve R.P. Wildes, "Coarse-to-fine stereo vision with accurate 3D boundaries", Image and Vision Computing cilt 28, pp. 352-366, 2010.

[6] E. Özüağ, M.K. Güllü, O.Urhan, S. Ertürk ve T.İşken, "Çok-Bakışlı stereo yaklaşımı ile yüksek çözünürlüklü bir 3-b model oluşturma yaklaşımı", 20. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, 2012.

[7] B. Bhowmick, S. Bhadra, ve A. Sinharay, "Stereo vision based pedestrians detection and distance measurement for automotive application", IEEE 2011 Second International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, pp. 25-29, 2011.

[8] D.F. Llorca, M.A. Sotelo, A.M. Hellín, A. Orellana, M. Gavilán, I.G. Daza ve A.G. Lorente "Stereo regions-of-interest selection for pedestrian protection: A survey", Transportation Research Part C cilt 25, pp. 226-237, 2012.

[9] X-b. Lai, H-s. Wang ve Y-h. Xu, "A real-time range finding system with binocular stereo vision", International Journal of Advanced Robotic Systems, cilt. 9, p. 27, 2012.

[10] R.A. Hamzah, S.I. Salim, ve H.N. Rosly, "An effective distance detection of obstacles in stereo vision application", Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering, cilt 1, no. 3, pp. 49-53, 2010.

[11] T. Xue, ve B.Wu, "Reparability measurement of vision sensor in active stereo visual system", Measurement, cilt 49, pp. 275-282, 2014.

[12] O.M. Ross, R. Sepúlveda, O. Castillo ve J. Quiñones, "Efficient stereoscopic video matching and map reconstruction for a wheeled mobile robot", Int. J. Adv. Robotic Sy. cilt 9, p.120, 2012.

[13] M. Kytö, M. Nuutinen, ve P. Oittinen, "Method for measuring stereo camera depth accuracy based on stereoscopic vision",Proc. SPIE7864, Three-Dimensional Imaging, Interaction, and Measurement, 78640I January 27, 2011.

[14] W. Budiharto, A. Santoso, D. Purwanto ve J. Jazidie, "Multiple moving obstacles avoidance of service robot using stereo vision", TELKOMNIKA, cilt 9, no.3, pp. 433-444, December, 2011.

[15] E. Petrović, A. Leu, D. Ristić-Durrant, ve V. Nikolić, "Stereo vision-based human tracking for robotic follower",International Journal of Advanced Robotic Systems,cilt 10, p. 230, 2013.

[16] B. Gövem, M. Sayınta, E. Somçağ ve F. Dönmez, "Stereo görüntülerde derinlik tabanlı 3b keskinlik ve zıtlık iyileştirme uygulaması", IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), cilt 1, no. 4, pp. 24-26 April, 2013.
[17] MATLAB Computer Vision System Toolbox, http://www.mathworks.com/help/vision/index.html.
[18] G. Bradski, ve A. Kaehler, "Learning OpenCV", USA, ISBN: 978-0-596-51613-0, O'Reilly Media, Inc, 2008.
[19] D.A. Forsyth, ve J. Ponce, "Computer vision: a modern approach", PrenticeHall, 2011.
[20] http://www.mathworks.com/help/vision/stereo-vision.html