



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

stereo görme ile hareketli görüntü..

Yüksek Lisans Tezi

emre özgündüz

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE VE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Yer No (DDC) : 2368-144.....

Kayıt No : 4180.....

Geldiği Yer : Fen Bil. Enst.....

Tarih : 27/10/08.....

Fiyat : 4,20-.....

Fatura No :

Ayniyat No : 42.....

Ek :

25507020399930004970800001

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

X14-83

STEREO GÖRME İLE HAREKETLİ GÖRÜNTÜLERDE
ENGELLERİN UZAKLIK VE BOYUTLARININ GERÇEK
ZAMANLI BULUNMASI

Emre ÖZGÜNDÜZ

FBE Bilgisayar Mühendisliği Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd.Doç. Dr. M. Elif Karslıgil

E. Karslıgil

Prof. Dr. A. Cenk Şenmez

Doç. Dr. Cem Ünsalan

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Görüntü Tabanlı Engel Tespiti	2
1.2 Literatürdeki Engel Tespit Etme ve Aşma Sistemleri	3
1.3 Tez Çalışmasında Tasarlanan Sistem	6
2. STEREO GÖRME	8
2.1 Stereo Eşleme	9
2.1.1 Kısıtlar	10
2.1.2 Stereo Eşlemede Yaşanan Belli Başlı Problemler	12
2.1.3 Stereo Eşleme Algoritmaları	14
2.2 Kamera Kalibrasyonu ve Düzeltme	20
2.2.1 Hedef Görüntü Üzerinde Ön İşlemler	23
2.2.2 Kamera Parametreleri	23
2.2.3 Epipolar Doğru Kısıtı	25
2.2.4 Görüntülerin Düzeltilmesi (Rektifikasyon)	25
3. SİSTEM TASARIMI	30
3.1 Görüntü Alımı	33
3.2 Görüntülerin Düzeltilmesi (Rektifikasyon)	33
3.3 Stereo Eşleme Algoritması	34
3.3.1 Satır Satır Eşleme	35
3.3.2 Maliyet Fonksiyonu	36
3.3.3 Benzersizlik Ölçüsü Fonksiyonu	36
3.3.4 Kısıtlar	37
3.3.5 Dinamik Programlama ile Eşleme	38
3.3.6 Eşleme Algoritmasının Adımları	40
3.3.7 Stereo Uzaklık Haritasının İyileştirilmesi	43
3.4 Engel Tespiti ve Engellerin Kameraya Olan Uzaklığının Hesaplanması	51
3.4.1 Engel Tespiti	51
3.4.2 Engellerin Kameraya Olan Uzaklığının ve Boyutlarının Bulunması	56
4. UYGULAMA ve DENEYSEL SONUÇLAR	59

4.1	Engellerin Kameraya Olan Uzaklığının “Look-up Table (LUT)” Kullanılarak Bulunması	64
4.2	Sabit Platform, Hareketli Ortam	67
4.3	Hareketli Platform, Sabit Ortam	71
4.4	Hareketli Platform, Hareketli Ortam	74
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	76
KAYNAKLAR.....		79
ÖZGEÇMİŞ.....		83

SİMGE LİSTESİ

C_L	Sol kameranın izdüşüm merkezi
C_R	Sağ kameranın izdüşüm merkezi
I_L	Sol kameraya karşılık gelen görüntü düzlemi
I_R	Sağ kameraya karşılık gelen görüntü düzlemi
P	Üç boyutlu ortamdaki bir nokta
b	Kameralar arasındaki mesafe
f	Odak uzaklığı
Z	Derinlik bilgisi
d	Fark değeri
$E(d)$	Global enerji fonksiyonu
T_e	Harici parametreler
T_i	Dahili parametreler
x_w, z_w, y_w	Dünya referans çerçevesi koordinatları
x, y, z	Kamera çerçevesi koordinatları
u, v	Görüntü çerçevesi koordinatları
r_{ij}	Rotasyon matrisi
t_j	Öteleme matrisi

KISALTMA LİSTESİ

SAD	(Sum Absolutes of Differences) Farkların Mutlak Değeri
SSD	(Sum Square Difference) Farkların Karesi Toplamı
GP	Graph Cut
DP	(Dynamic Programming) Dinamik Programlama
MF	(Maksimum Flow) Maksimum Akış
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
cm	Santimetre

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Stereo Görme.....	3
Şekil 2.1 Stereo Görme'nin genel prensibi.....	8
Şekil 2.2 Nesnelerin görüntü düzleminde oluşması	9
Şekil 2.3 (a) Orjinal resim (b) Doğru stereo uzaklık haritası	10
Şekil 2.4 Epipolar düzlem ve epipolar doğru	11
Şekil 2.5 Epipolar kısıt	11
Şekil 2.6 Sıralılık kısıtı	12
Şekil 2.7 Desensiz ortamlarda stereo eşleme.....	13
Şekil 2.8 Epipolar doğru kısıtı kaybolduğunda stereo eşleme.....	13
Şekil 2.9 Farklı ışıklandırma koşullarında elde edilmiş görüntü çifti	13
Şekil 2.10 İlişki temelli eşleme algoritması.....	16
Şekil 2.11 Farklı pencere boyutları ile denenmiş ilişki temelli eşleme algoritmasının sonuçları.....	16
Şekil 2.12 (a) Maliyet matrisi (b) Matristeki iki piksel arasında izin verilen yollar	18
Şekil 2.13 Özellik temelli stereo eşleme	18
Şekil 2.14 Bazı stereo eşleme algoritmalarının sonuçları	20
Şekil 2.15 Sembolik kalibrasyon sonuçları	21
Şekil 2.16 Kalibrasyon için çekilmiş örnek görüntü çiftleri.....	22
Şekil 2.17 Satranç tahtasının üç boyutlu uzaya sembolik olarak yerleşimi	23
Şekil 2.18 Kamaeranın dahili ve harici parametreleri	23
Şekil 2.19 (a) Orjinal sol ve sağ resim çifti (b) Rektifikasyon sonucu elde edilen resim çifti	29
Şekil 3.1 Tasarlanan sistemin başlangıç adımları.....	30
Şekil 3.2 Kalibrasyon şablonunun farklı açılardan ve uzaklıklardan çekilmiş görüntüleri.....	31
Şekil 3.3 Tasarlanan sistemin gerçek zamanlı adımları	32
Şekil 3.4 Şekil 3.2'deki görüntülerin rektifikasyon sonucu elde edilen görüntüleri	34
Şekil 3.5 Örnek eşleme sırası	35
Şekil 3.6 Komşu Piksellerin Ara Değer Yoğunlukları	36
Şekil 3.7 (a) Arama matrisi (b) Çizgilerle bölünmüş hücre için, olası bir önceki eşleşmeler (c) Çizgilerle bölünmüş hücre için, olası bir sonraki eşleşmeler	39
Şekil 3.8 $\gamma(q) < \gamma(p)$ olduğunu kabul edersek p eşlemesi için sağa doğru tarama yapılmazsa arama algoritmasının karmaşıklığı azaltılmış olur.....	39
Şekil 3.9 Birchfield satır satır eşleme algoritması akış diyagramı	40
Şekil 3.10 Bu çalışmada kullanılan dinamik programlama ile eşleme algoritması.....	42

Şekil 3.11 (a) Sol resim (b) Sağ resim (c) Stereo uzaklık haritası.....	43
Şekil 3.12 Stereo uzaklık haritasının iyileştirilmesi için uygulanan adımlar	44
Şekil 3.13 (3 x 1) boyutlarındaki pencere için tanımlanmış yatay yöndeki yoğunluk değişimleri.....	45
Şekil 3.14 (3 x 1) boyutlarındaki pencere için tanımlanmış dikey yöndeki yoğunluk değişimleri.....	46
Şekil 3.15 Gereksiz yoğunluk değişimlerinden arındırılmış dikey yöndeki yoğunluk değişimini gösteren yeni resim	47
Şekil 3.16 Gereksiz yoğunluk değişimlerinden arındırılmış yatay yöndeki yoğunluk değişimini gösteren yeni resim	47
Şekil 3.17 Güvenilir bölgelerin dikey yönde yayılması sonucu elde edilen yeni stereo uzaklık haritası.....	48
Şekil 3.18 Güvenilir bölgelerin yatay yönde yayılması sonucu elde edilen yeni stereo uzaklık haritası.....	49
Şekil 3.19 Dikey yönde filtre uygulanmış stereo uzaklık haritası.....	50
Şekil 3.20 Yatay yönde filtre uygulanmış stereo uzaklık haritası	50
Şekil 3.21 Küçük bir stereo uzaklık haritası için elde edilmiş etiketlenmiş görüntü	51
Şekil 3.22 (a) Orjinal sol resim (b) Orjinal sağ resim	52
Şekil 3.23 Eşleme algoritması sonucu elde edilen stereo uzaklık haritası	53
Şekil 3.24 Stereo uzaklık haritasının bağlı bileşen analizi ile bölütlenmesi sonucu elde edilen etiketlenmiş görüntü.....	54
Şekil 3.25 Bağlı bileşen analizi ile etiketlenmiş görüntüye göre elde edilen nesneler.....	54
Şekil 3.26 Belirli bir büyüklüğün altındaki bölütlerin elemine edilmesi sonucu elde edilen nesneler	55
Şekil 3.27 Belirli bir büyüklüğün altındaki bölütlerin elenmesi sonucu elde edilen nesneler	56
Şekil 3.28 Çeşitli stereo uzaklık haritaları için elde edilmiş uzaklık ve genişlik ölçümleri.....	58
Şekil 4.1 Yapay ışık ile aydınlatılmış ortamda çekilmiş görüntüler ve bu görüntülerden elde edilen stereo uzaklık haritaları	60
Şekil 4.2 Gün ışığı ile aydınlatılmış ortamda çekilmiş görüntüler ve bu görüntülerden elde edilen stereo uzaklık haritaları	61
Şekil 4.3 Homojen ışıklı ortamda çekilmiş görüntüler ve bu görüntülerden elde edilen stereo uzaklık haritaları	62
Şekil 4.4 Tsukuba, Map ve Sawtooth resimlerinden elde edilen stereo uzaklık haritaları ve doğru stereo uzaklık görüntüleri	63
Şekil 4.5 (a) Orjinal sol resim (b) Stereo uzaklık haritası (c) Engel olarak tespit edilen	

bölgeler	66
Şekil 4.6 Sabit platform, hareketli ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar	68
Şekil 4.7 Sabit platform, hareketli ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar	69
Şekil 4.8 Sabit platform, hareketli ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar	70
Şekil 4.9 Platformun hareketli, ortamın durağan olduğu uygulamadaki çalışma prensibi.....	71
Şekil 4.10 Hareketli platform, sabit ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar	72
Şekil 4.11 Hareketli platform, sabit ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar	73
Şekil 4.12 Hareketli platform, hareketli ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar.....	74

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1 “Tsukaba”, “Sawtooth” ve “Monochromatic Map” resim çiftleri için Farklı Yöntemlerle elde edilmiş stereo uzaklık haritalarındaki doğru eşleşme oranları	64
Çizelge 4.2 Mesafe ölçümünde elde edilen sonuçlar ve hata oranları.....	65
Çizelge 4.3 Sabit platform, hareketli ortam uygulamasında elde edilen sonuçlar ve hata oranları	69
Çizelge 4.4 Hareketli platform, sabit ortam uygulamasında elde edilen sonuçlar ve hata oranları	73
Çizelge 4.5 Hareketli platform, hareketli ortam uygulamasında elde edilen sonuçlar ve hata oranları	75

ÖNSÖZ

Kendi teknolojisini kendi üretilen, teknoloji konusundaki dışa bağımlılığını azaltmayı hedefleyen ülkemizde, farklı robot uygulamalarında kullanılabilecek bir sistemin geliştirilmesi, ülkenin stratejik bilim ve teknoloji hedefleri ile uyumludur. Bu bağlamda, insan görme sistemini taklit etmeye çalışan otonom araçlara ve mobil robotlara, gerçek zamanda engel tespiti yapabilme ve karşılaştığı engelleri aşabilme özelliklerini kazandırmayı hedefleyen tezimi tamamladım.

Tezimi gerçekleştirme sürecinde, bilgisini ve deneyimlerini bana aktaran değerli hocam ve tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. M. Elif Karşılıgil'e, tez çalışmamı başlatmam için beni yönlendiren Sayın Yrd. Doç. Dr. A. Gökhan Yavuz'a, Y.T.Ü Bilgisayar Mühendisliği Bölümündeki bütün hocalarıma ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen, beni yüreklendiren ve bana güvenen sevgili anneme, babama, ablama ve halama da ayrıca teşekkür ederim.

ÖZET

Engel tesbiti ve engel aşma konularındaki çalışmalar, başta askeri uygulamalar olmak üzere, sınır muhafaza, itfaiye, polis ve sivil savunma konularında faaliyet gösteren robot uygulamalarının; insan yaşamına elverişli olmayan ortamlarda (radyasyonlu ortam, su altı, uzay, vb.) uzaktan kontrollü olarak çalışan operasyonel uygulamaların; şüpheli şahısların teşhisi, trafik kontrolü ve düzenlenmesi, insansız gözetim, insansız araç navigasyonu, depo yönetimi gibi sistemlerin en önemli araştırma alanlarından biridir.

Bu projede, iki kamera ile alınan hareketli görüntüleri değerlendirerek, otonom araçlara ya da mobil robotlara engel tanıma ve engel aşma özelliklerini kazandırmayı hedefleyen gerçek zamanlı bir sistem geliştirilmiştir.

Geliştirilen sistem iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama sistemin gerçek zamanlı adımları uygulanmadan önce ihtiyaç duyulan kamera kalibrasyonu adımlarından oluşur. Kamera kalibrasyonu sonucu iki kameranın iç ve dış parametreleri elde edilir. Eğer görüntü alımı yapacak kameralar paralel olacak ve optik eksenlerde dönme olmayacak şekilde konumlandırılmışsa, kamera kalibrasyonu aşaması uygulanmadan doğrudan ikinci aşamaya geçilir. İkinci aşama sistemin gerçek zamanlı adımlarından oluşur. Bu aşamada öncelikle iki adet 90 derece görme açısına sahip, renkli video kamera ile eş zamanlı olarak görüntü alımı yapılır. Alınan görüntüler, önceden kamera kalibrasyonu yapılmışsa, kalibrasyon parametreleri kullanılarak düzeltilir. Böylece görüntülerdeki eş piksellerin aynı y koordinatlarında olması sağlanır. Bu adım, kameraların paralel olmaması durumunda uygulanır. Eğer görüntü alımı, paralel olarak konumlandırılmış kameralardan yapılmışsa elde edilen görüntülerin düzgün olduğu kabul edilir ve stereo eşleme adımına geçilir. Stereo eşleme adımında, sağ ve sol kameradan elde edilmiş eş zamanlı görüntülerin, Birchfield dinamik programlama yöntemi ile işlenmesi sonucu stereo uzaklık haritası elde edilir. Ardından stereo uzaklık haritası üzerinden arka arkaya gelen ve aynı fark değerine sahip olan aralıkların bulunmasıyla engeller tespit edilir. Son olarak engel olarak tespit edilen bölgedeki fark değeri ile kameraların geometrik yerleşiminden yararlanılarak engelin kameralara olan uzaklığı ve gerçek dünyadaki boyutları bulunur.

Platformun durağan değil hareketli olması, hareketi esnasında sistemin çalışacağı ortamın sürekli değişmesi, dolayısıyla ortamdaki engellerin daha önceden belirlenmiş sabit nesneler olmaması, stereo görme özelliği kullanılarak görüntünün üç boyutlu değerlendirilmesi ve tüm bu işlemlerin gerçek zamanlı yapılması geliştirilen sistemde göz önünde bulundurulmuş karmaşıklık düzeyi yüksek problemlerdir.

Geliştirilen sistem, üç farklı gerçek zamanlı uygulama ile test edilmiştir. İlk uygulamada kameraların monte edildiği platform sabit, ortamdaki nesneler hareketlidir. İkinci uygulamada kameraların monte edildiği platform hareketli, ortamdaki nesneler sabittir. Üçüncü ve son uygulamada ise hem kamera platformu hem de ortamdaki nesneler hareketlidir. Doğru ve güvenilir stereo uzaklık haritası elde etmenin, tüm uygulamalardaki engel tespiti ve engellerin kameraya olan uzaklığının bulunması aşamalarının başarıyla sonuçlanmasını sağlayan en önemli faktör olduğu görülmüştür. Düzgün bir stereo uzaklık haritası elde edilmesi durumunda, engelin kameraya olan uzaklığı ve boyutları, +10 cm, -10 cm hatayla doğru hesaplanmıştır. Aynı zamanda gerçekleştirilen sistemin gerçek zamanlı bir uygulamanın en büyük gereksinimlerinden biri olan hız konusunda yeterli olduğu görülmüştür. Yapılan testler sonucunda, tüm sistemin başarısını etkileyen başlıca faktörler, ortamın ışık şiddeti, kameraların ışıklandırılma seviyeleri, arka plan deseni, ortamdaki nesnelerin hareket hızı ve ortamdaki nesnelerin kameraya olan mesafesi olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Stereo, Engel Tesbiti, Engel Aşma, Kameraya Olan Uzaklık

ABSTRACT

Object detection and obstacle avoidance applications are among the most important research areas of especially military applications, robotic applications utilized for border protection, fire-fighting, police and civil defense; and remote controlled operational robotic applications, where the environment is not suitable for human life (radiation, underwater, space etc.). Research in this area is also beneficial for systems like tracking suspects, monitoring and regulating traffic, surveillance without human, vehicle navigation without human and warehouse management.

In this project, a system, which enables autonomous vehicles or mobile robots to detect and avoid obstacles in real-time using two active cameras in dynamic environments, was developed.

The system is based on two fundamental parts, namely calibration and real time stages. The first stage is camera calibration steps, which is the initial phase of the system. Intrinsic and extrinsic parameters of the cameras are calculated as a result of the calibration. If the cameras that capture image are to be parallel and positioned so that optical axes would not rotate, calibration step can be skipped. The second part consists of the real time steps. In this part, two cameras having 90 degrees viewing capability used for synchronized capturing. The captured images are rectified if the camera calibration steps were performed. Hence, the same pixels of the images would have the same y coordinates. This step is applied if the cameras are not parallel. If images were captured via parallel cameras, the images are considered as having the same y coordinates for same pixels, and proceeds to stereo matching. The synchronized images, which are captured from right and left cameras, are processed with Burchfield dynamic programming methodology, and disparity map is obtained. From disparity map, the obstacles are detected by finding intervals having same disparity value. Finally, obstacle's distance and real dimension are calculated using the disparity value of the region that is defined as an obstacle and the cameras geometrical position.

The fact that the platform is moving in a changing environment having not preset obstacles makes the problem quite complex for the system. Also, using stereo vision studying on 3D geometry and performing all of these processes in real-time are challenges of the systems.

System is tested in three different applications. In the first application, the platform which cameras are entagrated to is stable and the objects in the environment are mobile. In the second application, the platform which cameras are entagrated to is mobile and the objects in the environment are stable. In the third application, both the platform which cameras are entagrated to and the objects in the environment are mobile. Obtaining correct and reliable stereo disparity map is the most important factor in accurate obstacle detection and estimating exact distances of the obstacles to the cameras. In the case of obtaining correct disparity map, the distance between the obstacle and the camera, and the dimensions of the obstacle are estimated correctly with the ± 10 cm tolerance. As seen from results the performed system is sufficient in runtime, and that is crucial in a real-time system. In the results of the tests, the major factors that effects the performance of the system are determined as illuminance intensity in the environment, illumination levels of the cameras, background texture, movement velocities of the objects in the environment, and the distances between the obstacles and the cameras.

Keywords: Stereo, Object Detection, Obstacle Avoidance, Distances Between The Obstacles and The Cameras.

1. GİRİŞ

Hayvanlar ve insanlar evrim süreçleriyle iyileştirilmiş karmaşık görsel sistemleri sayesinde zorlu algılama problemlerini başarıyla çözerler. Mühendisler yarım yüzyıldır insanların algısal yeteneklerini fizyolojik ve psikolojik bulguların da yardımıyla bilgisayarlarda modellemek için uğraşmaktadırlar.

Bilgisayarla Görme, önceleri yapay zekâ konusunun bir alt dalıyken günümüzde başlı başına bir bilim dalı olmuştur. Bilgisayarla Görme, biyolojik görüşün tamamlayıcısıdır. Biyolojik görüşte insan ve hayvanların görme algıları incelenir, psikolojik süreçler dahilinde modellenerek çeşitli çalışmalar yapılır. Aynı şekilde Bilgisayarla Görme’de de yapay görüş sistemleri oluşturmak amacıyla yazılım ve donanım alanlarında çeşitli çalışmalar yapılmaktadır (M. Özsoy, 2007).

Bilgisayarla Görme çalışmaları, bilgisayar ortamına aktarılmış bir veya birden fazla görüntünün değerlendirilerek 2 veya 3 boyutlu olarak anlamlandırılması için yapılan çalışmalardır. Nesnelerin yerinin bulunması, nesne tanıma, izleme, hareket anlama bilgisayarlı görmenin ilgilendiği konulardan bazılarıdır.

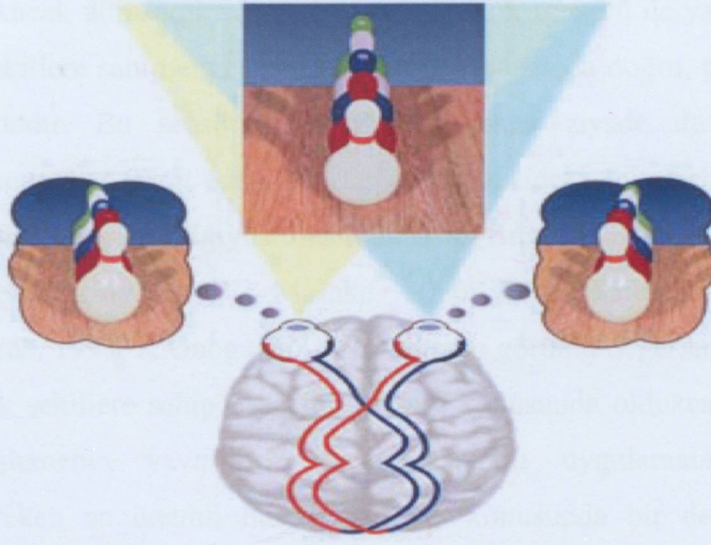
Bilgisayarla Görme çalışmaları çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Medikal (hastaya tanı koymak, tümörlerin tespit edilmesi); Sanayii (hedef ürünün hatalara karşı kontrolünün yapılması); Askeriye (düşman askerlerinin yada araçlarının yerini algılayan füzeler); Otonom araçlar (belli bir bölgede yangın çıkıp çıkmadığını araştıran araçlar) bilgisayarla görmenin kullanıldığı alanlardan bazılarıdır.

Bu projede, dinamik ortamlarda hareketli kamera ile hareket planı üzerindeki engelleri tespit eden bir sistem tasarlanmıştır. Engel tanıma ve engel aşma konularındaki çalışmalar, başta askeri uygulamalar olmak üzere, sınır muhafaza, itfaiye, polis ve sivil savunma konularında faaliyet gösteren robot uygulamalarının; insan yaşamına elverişli olmayan ortamlarda (radyasyonlu ortam, su altı, uzay, vb.) uzaktan kontrollü olarak çalışan operasyonel uygulamaların; insansız gözetim, insansız araç navigasyonu, depo yönetimi gibi sistemlerin en önemli araştırma alanlarından biridir.

1.1 Görüntü Tabanlı Engel Tespiti

Son yıllarda otomatik kontrollü araç ve otonom mobil robot uygulamaları, bilgisayarla görme konusunda çalışma yapan araştırmacıların çok fazla ilgisini çekmeye başlamıştır. Literatürde, mobil platform için görsel navigasyon ile ilgili bir çok yaklaşım sunulmuştur. Örneğin DeSouza ve Kaka (2002), Bertozzi (2000) ile Kastrinaki (2003), görüntü tabanlı otonom araçlar konusunda çok önemli araştırmalar yapmışlardır. En zor ve ilgi çekici konulardan biri ise bilinmeyen çevre şartlarında ve çevredeki engellerin görünüşü hakkında hiç bir ön bilgi olmadan karşılaşılan engellerin tespit edilmesidir. Bir çok araştırmacı robotik görme sisteminin insan görme sistemini taklit etmesi gerektiğini ve bunun stereo görüntü ile sağlanmasının mümkün olduğunu savunmaktadır. Stereo görüntü sisteminin diğer tekniklere göre (optik akış ya da model tabanlı) avantajı, tüm sahnenin tanımlanmasının yapılabilmesi, hareketli ya da hareketsiz nesnelerin kompleks bir engel modeli tanımlamadan tespit edilebilmesi ve çevresel koşulların değişimine daha az hassas olmasıdır. Stereo görüntü ile sahnenin üç boyutlu tanımını yapmak mümkündür. Çıkarılan bu yapıdan çevredeki engeller hakkında bilgi toplanabilir.

İnsan görme sistemi üç boyutlu dünyayı tekgözlü ve çiftgözlü ipuçlarını kullanarak algılar. Nesnelerin yerleri, geometrisi ve gölgeleme tekgözlü ipuçlarını oluşturur. Çiftgözlü ipuçları ise sağ ve sol gözün algıladığı ayrı resimlerden oluşur (Şekil 1.1). Bir nesnenin iki resimdeki konumları arasındaki farka stereo uzaklık denir (Aksay, Bici, Akar, 2005). Nesnelerin stereo uzaklık bilgisi işlenerek, ortamdaki nesnelerin uzaklıkları algılanır. Stereo görüntüleme sistemleri iki göz arasındaki uzaklığı birbirinden hafifçe ayrılmış iki paralel kamera kullanarak taklit etmeye çalışır. Stereo kamera aracıyla alınmış bir çift resmi kullanarak, sahnenin derinlik bilgisi elde edilebilir. Böylece insan görme sisteminin binoküler özelliğinin yanında paralaks özelliği de taklit edilmiş olur. Asıl zorluk, iki görüntüdeki birbirine karşılık gelen aynı noktaları bulmaktır. Bu işleme stereo uzaklık eşleme (disparity matching) denir. Eşleşen pikseller arasındaki uzaklık bilgisi ise stereo uzaklık haritasında, diğer bir deyişle stereo uzaklık haritasında (disparity map) saklanır. Literatürde, stereo görüntü ile engel tespiti yapan çalışmaların çoğu, stereo uzaklık haritasının nasıl çıkarılması gerektiği üzerine yoğunlaşmışlardır.



Şekil 1.1 Stereo Görme (www.vision3d.com)

Stereo eşleme algoritmasının başarısı üç boyutlu modellemede kullanılan sahne geri-çatımı için önemlidir. Ancak otonom mobil robot ve otomatik kontrollü araçlarda engel tespiti için mükemmel bir stereo eşleme algoritmasına ihtiyaç yoktur. Asıl önemli olan, karşılaşılan engelleri aşmak için sahnedeki nesnelerin mobil robota ya da araca olan uzaklığı ve kapladığı alanın tespit edilmesidir.

Bugüne kadar, stereo görüntü kullanarak engel tespiti yapan çalışmaların bir çoğu gerçek zamanlı kullanım için uygun değildir. Çünkü bu çalışmalar, mobil platformun hareketli olmasından kaynaklanan kamera titreşimi problemi ile ilgilenmemekte aynı zamanda uygulama ortamının geniş, desensiz ve tek düze olduğu durumlarda engelleri tespit etmede başarısız kalmaktadır. Literatürde bu eksiklikleri gidermek için engel tespit etme algoritmalarını güçlendirme çalışmaları devam etmektedir. Ancak bu çalışmalar sonucunda algoritmaların çalışma süreleri uzamış bu da gerçek zamanlı uygulamaların en önemli gereksinimlerinden biri olan hız konusunda bir dezavantaj oluşturmuştur.

1.2 Literatürdeki Engel Tespit Etme ve Aşma Sistemleri

Geçtiğimiz 10 yıl içerisinde; navigasyon, gözetim sistemleri ve robot platformu alanlarında yapılan çalışmalarda önemli bir yer tutan engel tespiti ve engel aşma konuları üzerindeki araştırmalar günümüzde de yoğun olarak devam etmektedir.

Bugüne kadar engel tanıma konusunda yapılan uygulamalar 2 kategori altında toplanabilir. İlk kategoride, kolay uygulanabilirliği ve hızlı engel tanıma konusundaki başarısı sebebiyle tercih edilen ultrasonik ve lazer uzaklık sensörü uygulamaları yer almaktadır (J.Borenstein, 1989;

Vandorpe, 1996). Ancak ultrasonik sensör ve lazer uzaklık sensörü ile yapılan çalışmalar üç boyutlu karmaşık şekillere sahip engelleri tespit etme konusunda doğru, güvenilir bir çözüm ortaya koyamamaktadır. Bu sensörler aracılığıyla, daha ziyade duvarlar ve robotun çevresindeki büyük engeller tespit edilebilir. Diğer kategorideki çalışmalar ise engel tanıma ve aşma problemi için görsel bilgiyi kullanmaktadır (Brendan M. Collins, 2006; Seydou Soumare, 2002; L.M. Lorigo, 1997; Masako, 2000; D. J. Kriegman, 1989; Guo-Wei Zhao, 1993; K. Yoshida, 1999; K. Onoguchi, 1997). Stereo görüntü değerlendiren uygulamalar, üç boyutlu karmaşık şekillere sahip nesneleri tanıma konusunda oldukça başarılıdır. Ancak stereo görüntü işlemenin yavaşlığı, gerçek zamanlı uygulamalarda göz önünde bulundurulması gereken en önemli husus olan hız konusunda bir dezavantajdır. Stereo görüntü bilgisini kullanarak gerçek zamanda engel tanımayı amaçlayan sistemlerde, çoğunlukla bu dezavantajı ortadan kaldırmak için yapılan çalışmalar üzerine yoğunlaşmıştır.

Borenstein (1989) tarafından gerçekleştirilen sistemde, gerçek zamanlı engel aşma problemine, ultrasonik sensör kullanılarak hızlı bir çözüm getirilmiştir. Ancak bu sistemde sadece 2 boyutlu ve duvar gibi büyük nesneler tespit edilebilmiştir.

Okada N., Hongbin Zha, Nagata T., Kondo E., Morooka K.'dan (1998) oluşan çalışma grubu ve Taylor, R.M. ile Probert, P.J., yaptıkları çalışmalarda engel tespiti için lazer uzaklık sensörü kullanmışlardır. Yatay olarak ışın yayan lazer sensör kullandıkları için, ancak iki boyutlu objeleri yakalayabilmişler, yüksekliği az olan veya karmaşık şekle sahip üç boyutlu engelleri tespit edememişlerdir.

İki boyutlu lazer uzaklık sensörü ile 3 boyutlu objeleri tespit etmeyi başaran Vandorpe J, Van Brussel H., ve Xu H.'nin (1996) gerçekleştirdiği sistemde amaç, sabit bir mekanın haritasını çıkarmak olduğu için hız, sistemin doğru çalışabilirliği açısından önemli bir unsur değildir. Hızın en önemli faktör olduğu gerçek zamanlı otonom robot navigasyonu uygulamalarında böyle bir sistemin kullanılması uygun değildir.

Seydou Soumare, Akihisa Ohya ve Shinichi Yuta'dan (2002) oluşan çalışma grubu, projelerinde geleneksel iki kameralı stereo görme yaklaşımı yerine aktif stereo yöntemini kullanmışlardır. Bu yaklaşımda, engel tespiti için dikey olarak ışın yayan lazer sensörünü, engelleri aşmak için ise stereo görüntü bilgisini kullanmışlardır. Lazer ışınlarının dikey olarak yayılması sayesinde üç boyutlu engelleri tespit edebilmişlerdir. Sistemin çalışacağı ortamın gün ışığında iyi aydınlatılmış olması, engel tespitinde doğabilecek hataları minimuma indirmek için kabul edilmiş kısıttır.

Sistemin çalıştığı ortam ile tespit edilecek engellerin daha önceden bilindiğini kabul eden L.M. Lorigo, R.A. Brooks ve W.E.L. Grimson'dan (1997) oluşan çalışma grubu bu bilgileri ve monoküler kameradan alınan görüntüyü harmanlayarak engel aşma problemine çözüm getirmiştir. Sistemin çalıştığı ortamın sınırlarının daha önceden çizilmiş ve ortamdaki engellerin daha önceden biliniyor olması, geliştirilen sistemin farklı ortamlarda doğru çalışabilirliğini kısıtlamaktadır.

Tsukuba Üniversitesi, akıllı robot geliştirme laboratuvarında, Masako Kumano ve Akihisa Ohya (2000) tarafından gerçekleştirilen projede, otonom robotlar için engel aşma problemi, sadece görüntü bilgisi kullanılarak çözülmüştür. Bu çalışmada, iki kameradan alınan görüntüler üzerindeki çakışan noktaların parlaklık değerlerinden yararlanılarak engel tespiti yapılmıştır. Geliştirilen algoritma oldukça hızlıdır. Ancak gerçekte engel olmayan bazı bölgeler engel olarak tanınabilmektedir.

D. J. Kriegman, E. Triendl (1989) ve K.Onoguchi, N.Takeda, M.Watanabe (1997) çalışmalarında, stereo görüntü üzerinden engel tanıma için kullanılan algoritmanın iyileştirilmesiyle, engel tanıma problemine hızlı bir çözüm getirmiştir. Geliştirilen yöntem, bütün nesnelerin zemin üzerinde olduğunu kabul etmiştir. Engel tespiti, sağ ve sol görüntünün çakışan bölgeleri arasındaki parlaklık değerleri karşılaştırılarak bulunmuştur. Bu çalışmaların zayıf tarafıysa az desenli ortamlardaki nesnelerin tespit edilememesidir.

Kohtaro Sabe (2004) bulunduğu ortamın haritasını çıkaran ve karşılaştığı engelleri aşan QRIO isminde akıllı bir robot tasarlamıştır. QRIO, engel tanıma işlemini, stereo görüntü sistemini kullanarak elde ettiği bilgiden bulunduğu ortamın zemin bilgisini çıkararak gerçekleştirmiştir. Sadece ev gibi kapalı ortamlarda çalışabilecek şekilde tasarlanmış olan sistemde, tüm engellerin zemin üzerinde olduğu kabul edilmiştir.

Darius Burschka ve Stephen Lee (2002) tarafından yapılan çalışmada mobil araçlar için stereo tabanlı bir engel aşma sistemi sunulmuştur. Sistemin ilk adımında, görüntüdeki yer yüzeyi modellenmekte ve görüntüden çıkarılmaktadır. Daha sonra geriye kalan görüntü, bağlı parçalara ve fark alanlarına bölütlenmektedir. Engel olarak tanımlanmış bağlı parçaların zemin yüzeyine yerleştirilmesinden sonra yol planlama adımına geçilmektedir. Sistemin zayıf tarafı ise, az desenli ortamlarda stereo görüntünün yeniden yapılandırılması sonucu, desensiz yüzeye sahip büyük nesnelerin tespitinde hatalar oluşmasıdır.

Engel aşma için geliştirilen algoritmalar genellikle yol planlama yöntemlerini kullanır (O. Khatib, 1995; Barraquand, 1991; Borenstein, J., Koren, 1989; Latombe, 1991; K. Gupta, A. P.

del Pobil, 1998). Yol planlama yöntemlerinin çoğu, ortamdaki engellerin ve hedef noktasının statik olduğunu kabul ederek geliştirilmiştir. Hedef noktanın hareketli olduğu sistemlerde, güzergah üzerindeki karşılaşılan engelleri aşmak için dinamik yol planlama algoritmaları geliştirilmiştir (Perez, L.G., Alegre, 2004; C.-H. Chen, C. Cheng, D. Page, 2006).

De Souza, G.N., Kak, A.C (2002) tarafından son yirmi yıldaki iç ve dış ortamlarda mobil robot navigasyonu hakkında yapılmış çalışmalar ve bu çalışmalarda kullanılmış yol planlama yöntemleri incelenmiştir.

Nesne takibi yaparken eş zamanlı olarak karşılaşılan engelleri aşan sistemlerde, genellikle nesne takibi için video kameradan alınan görüntü, engel tespiti içinse sensörler kullanılmıştır. C.-H. Chen, C. Cheng (2006) ve A. Tsalatsanis, K. Valavanis (2007) tarafından gerçekleştirilecek sistemlerde takip edilecek objenin hareketini belirlemek amacıyla kamera, engellerden kaçınmak için ise lazer uzaklık sensörü kullanılmıştır.

P. Jia, H. Hu, T. Lu ve K. Yuan'dan oluşan çalışma grubu (2007), tekerlekli sandalye kullanan yürüme engelli ve yaşlı insanlar için yüz mimiklerine göre tekerlekli sandalyeyi hareket ettiren bir sistem tasarlamıştır. Kameradan alınan görüntü üzerinde gerçek zamanlı yüz bulma ve takibi gerçekleştirilmektedir. Tekerlekli sandalye hareket halindeyken güzergahı üzerindeki karşılaştığı engelleri 6 adet ultrasonik sensor yardımıyla aşmaktadır.

C.S. Hong, S.M. Chun, J.S. Lee ve K.S. Hong'dan (1997) oluşan çalışma grubu futbol oynayan robotlar için görüntü tabanlı nesne takibi ve engel aşan bir sistem geliştirilmiştir. Engeller robot üzerine yerleştirilmiş 8 adet kızıl ötesi sensörler yardımıyla tespit edilmektedir. Nesne takibi ve engel aşma algoritmaları robot ile radyo frekansı aracılığıyla haberleşen bir bilgisayar üzerinde çalışmaktadır.

1.3 Tez Çalışmasında Tasarlanan Sistem

Bu projede, iki kamera ile alınan hareketli görüntüleri değerlendirerek, otonom araçlara ya da mobil robotlara engel tanıma ve engel aşma özelliklerini kazandırmayı hedefleyen gerçek zamanlı bir sistem geliştirilmiştir.

Geliştirilen sistem iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, sistemin gerçek zamanlı adımları uygulanmadan önce ihtiyaç duyulan kamera kalibrasyonu adımlarından oluşur. Kamera kalibrasyonu sonucu iki kameranın iç (intrinsic) ve dış (extrinsic) parametreleri elde edilir. Eğer görüntü alımı yapacak kameralar paralel ve optik eksenlerde dönme olmayacak şekilde konumlandırılmışsa, kamera kalibrasyonu aşaması uygulanmadan doğrudan ikinci

aşamaya geçilir. İkinci aşama sistemin gerçek zamanlı adımlarından oluşur. Bu aşamada öncelikle her iki kameradan eş zamanlı olarak görüntü alımı yapılır. Alınan görüntüler, önceden kamera kalibasyonu yapılmışsa, kalibrasyon parametreleri kullanılarak düzeltilir. Eğer görüntü alımı, paralel olarak konumlandırılmış kameralardan yapılmışsa elde edilen görüntülerin düzgün olduğu kabul edilir ve stereo eşleme adımına geçilir. Stereo eşleme adımı sonucunda sağ ve sol kameradan elde edilen eş zamanlı görüntüler kullanılarak stereo uzaklık haritası çıkarılır. Ardından stereo uzaklık haritası üzerinden engellerin konumu, kameralara olan uzaklığı ve kapladığı alan tespit edilir.

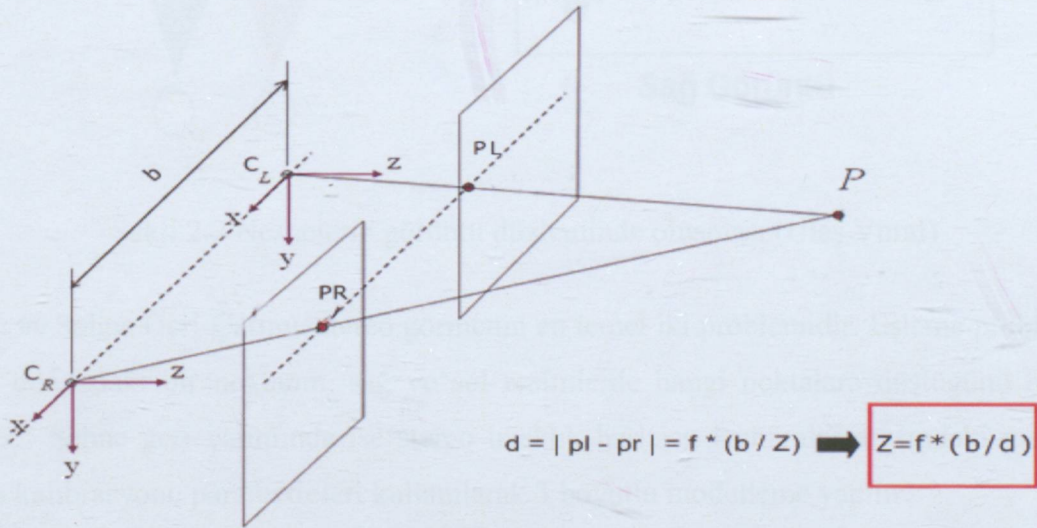
Platformun durağan değil hareketli olması, hareketi esnasında sistemin çalışacağı ortamın sürekli değişmesi, dolayısıyla ortamdaki engellerin daha önceden belirlenmiş sabit nesneler olmaması, stereo görme özelliği kullanılarak görüntünün üç boyutlu değerlendirilmesi ve tüm bu işlemlerin gerçek zamanlı yapılması geliştirilen sistemde göz önünde bulundurulan karmaşıklık düzeyi yüksek problemlerdir.

Çalışmanın 2. bölümünde, stereo görme konusunun temel prensiplerinden, 3. bölümde sistem tasarımından bahsedilmiş, 4. bölümde deneysel sonuçlar verilmiş, sonuç bölümünde ise sistemin başarısı değerlendirilmiştir.

2. STEREO GÖRME

Farklı noktalardan çekilmiş en az iki tane resimden üç boyutlu yapıyı elde etme yöntemine stereo görme (stereopsis) denir (Ulaş Vural). Bu yöntemin en klasik örneği insan gözüdür. İnsan, iki gözü ile elde ettiği görüntü bilgilerini işleyerek gerçek dünyanın yapısını saptar.

Stereo görmenin psikolojide ve biyolojide zengin bir tarihi varken son zamanlarda bilgisayarla görmenin de ilgilendiği başlıca konulardan biri olmuştur. Stereo görme, doğrudan derinlik ölçebilme özelliği ile 3 boyutlu algılama için çok önemli bir metottur. Şekil 2.1’de stereo görmenin genel prensibi açıklanmaktadır. P noktası sahnedeki herhangi bir noktadır. C_L ve C_R sol ve sağ kameranın izdüşüm merkezleridir. I_L ve I_R ise her bir kameraya karşılık gelen görüntü düzleimidir. Sadece sol kameranın görüntü düzlemindeki konum bilgileri bilinen bir P izdüşüm noktası, C_L ’den P ’ye uzanan ışın üzerindeki herhangi bir yerde olabilir. Ancak P noktasının, sağ kamera görüntü düzlemindeki bilgileri de bilindiğinde, üçgenleme tekniğinden yararlanılarak iki ışının kesişiminden P noktasının ortamdaki asıl yeri bulunur. b , C_L ve C_R arasındaki yani kameralar arasındaki uzaklık (baseline); p_l ve p_r , P ’nin sağ ve sol kameranın görüntü düzlemindeki yerleri; f , odak uzaklığı ve Z de, b ’den P noktasına olan uzaklık olsun. Üçgenlerin benzerliği kullanılarak Z yani derinlik bilgisi Eşitlik 2.1’deki gibi hesaplanabilir.



Şekil 2.1 Stereo Görme’nin genel prensibi (David Jacobs)

P noktasının sağ ve sol görüntü düzlemi üzerindeki konum farkı(disparity): $d = |p_l - p_r|$,

Kameralar arasındaki mesafe (baseline): $b = |C_L - C_R|$,

Odak uzaklığı (focal length):

f ,

P noktasının kameralara olan gerçek uzaklığı (depth):

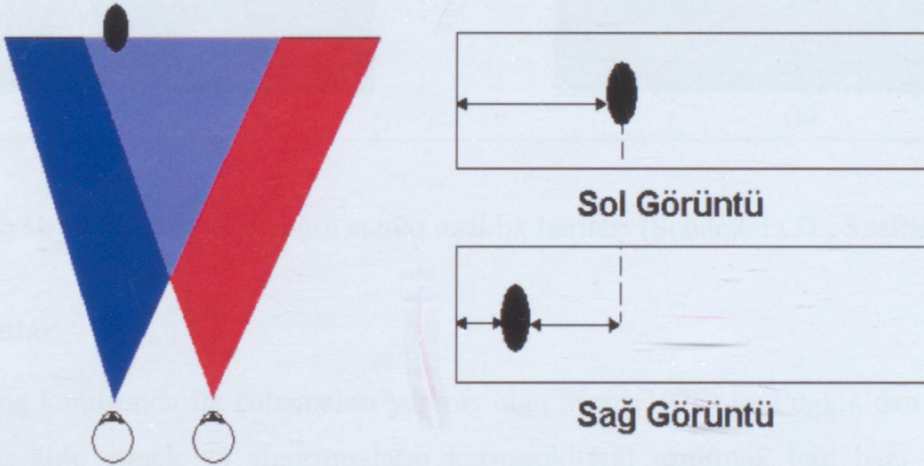
Z ise

$$(b - d) / (Z - f) = b / Z \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1'den Z 'yi yani derinlik bilgisini elde ederiz.

$$Z = (f * b) / d \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2'de, d dışındaki bütün terimler, sistemin bilinen sabit değerleridir. Bir noktanın gerçek uzaklığını bulmak için bu ifadenin hesaplanması gerekir. Kameraların yerleştirilme konumlarına göre nesneler görüntü düzlemlerinde farklı yerlere düşerler (Ulaş Vural) (Şekil 2.2). Bu iki noktanın görüntü düzlemlerinde birbirlerine olan mesafeleri farkı (d , disparity) verir.



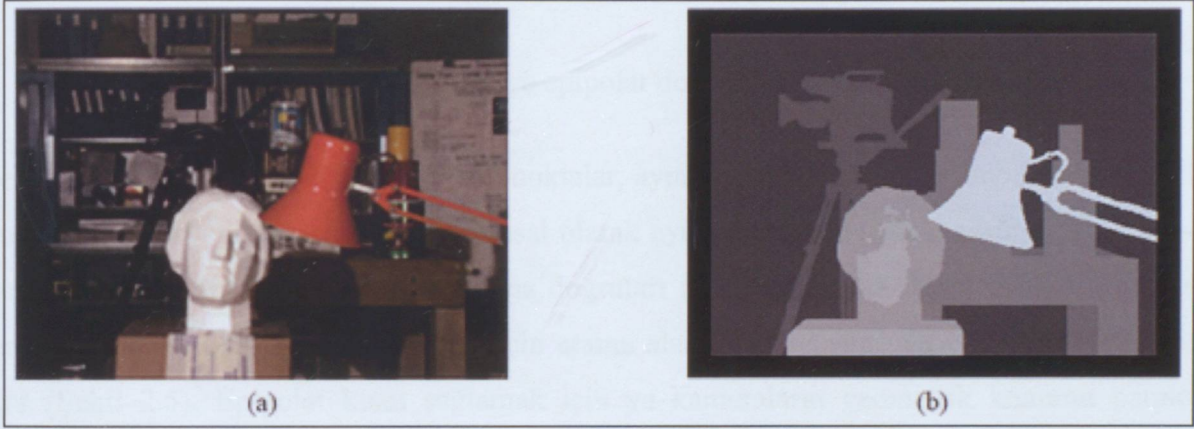
Şekil 2.2 Nesnelerin görüntü düzleminde oluşması (Ulaş Vural)

Eşleme ve Sahne Geri-Çatımı, stereo görmeyen en temel iki problemidir. Eşleme probleminde gerçek dünyadaki bir noktanın, sağ ve sol resimlerde hangi noktalara düştüğünü bulmaya çalışırız. Sahne geri-çatımında ise stereo uzaklık haritası, kameralar arasındaki mesafe ve kamera kalibrasyonu parametreleri kullanılarak 3 boyutlu modelleme yapılır.

2.1 Stereo Eşleme

Stereo eşleme problemi, 3 boyutlu bir noktanın farklı görüntü düzlemlerinde karşılık geldiği noktaları bulmaya çalışır. Başka bir deyişle stereo eşleme problemi, bir resimdeki herhangi bir pikselin ya da piksel grubunun, diğer eş resimdeki karşılık geldiği konumu bulmaya çalışır. Eşleşen noktaların konumları arasındaki fark, stereo uzaklık (disparity) değerini verir.

Görüntü düzlemindeki her bir nokta için farkları temsil eden bir başka görüntü elde edersek buna da stereo uzaklık haritası (disparity map) adı verilir (Şekil 2.3). Stereo uzaklık haritasında açık renkli bölgeler yani fark değeri yüksek olan bölgeler kameraya yakın olan bölgeleri; koyu bölgeler yani fark değeri düşük olan bölgeler ise kameraya uzak olan bölgeleri temsil eder. Stereo uzaklık haritasını kullanarak resimdeki ortamın, gerçek dünyadaki geometrisi öğrenilebilir. Bu özelliğiyle gerçek zamanlı stereo görme sistemi, robotik alanının ihtiyaç duyduğu başlıca konulardan biridir.



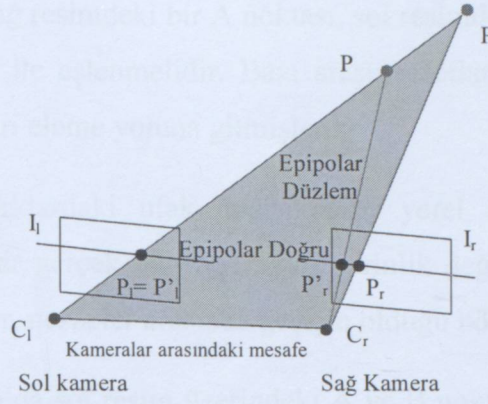
Şekil 2.3 (a) Orjinal resim (b) Doğru stereo uzaklık haritası (Scharstein D., Szeliski R., 2002)

2.1.1 Kısıtlar

Stereo görme konusunda ilk çalışmaları yapmış olan Marr (1976) ve Poggio'dan (1979) beri iyi sonuçlar elde etmek ve algoritmaların karmaşıklığını azaltmak için bazı kısıtlamalar getirilmiştir. Bu kısıtlamalar genellikle iki türdür:

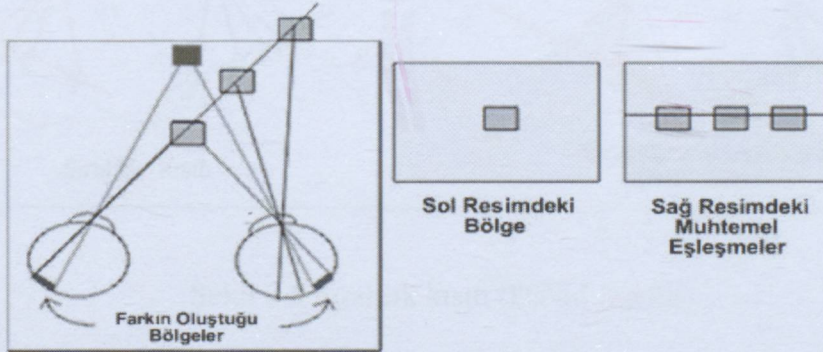
- Görüntüleme sistemindeki geometrik kısıtlar
 - Yatay epipolar doğru kısıtı
- Sahnedeki geometrik ve fiziksel kısıtlar
 - Süreklilik kısıtı
 - Teklik kısıtı
 - Uygunluk kısıtı
 - Pürüzsüzlük kısıtı
 - Sıralılık kısıtı

Yatay epipolar doğru kısıtı: Dünyadaki herhangi bir 3 boyutlu noktanın, kameralardaki izdüşüm merkezlerine doğru bir alan tanımlanırsa bu alana epipolar düzlem denir. Epipolar düzlem ile görüntü düzleminin kesiştiği yere ise epipolar doğru denir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Epipolar düzlem ve epipolar doğru (Marti Gaëtan, 1998)

Her iki görüntü düzlemi üzerindeki aynı noktalar, aynı epipolar doğru üzerinde bulunur. Eğer kameraların görüntü düzlemleri eş doğrusal olarak ayarlanmış ve bir tane görüntü düzlemine paralelse, epipolar doğru ile yatay tarama doğruları (horizontal scan lines) paralel olur. Bu şartlar sağlandığında, eşleme problemi için arama alanı iki boyuttan, tek boyuta indirgenmiş olur (Şekil 2.5). Epipolar kısıtı sağlamak için ya kameraların geometrik konumu paralel olarak ayarlanmalıdır ya da resimler kalibrasyon sonucu elde edilen parametrelerin yardımıyla rektifikasyon işlemi yapılarak düzeltilmelidir.



Şekil 2.5 Epipolar kısıt (mathcs.holycross.edu)

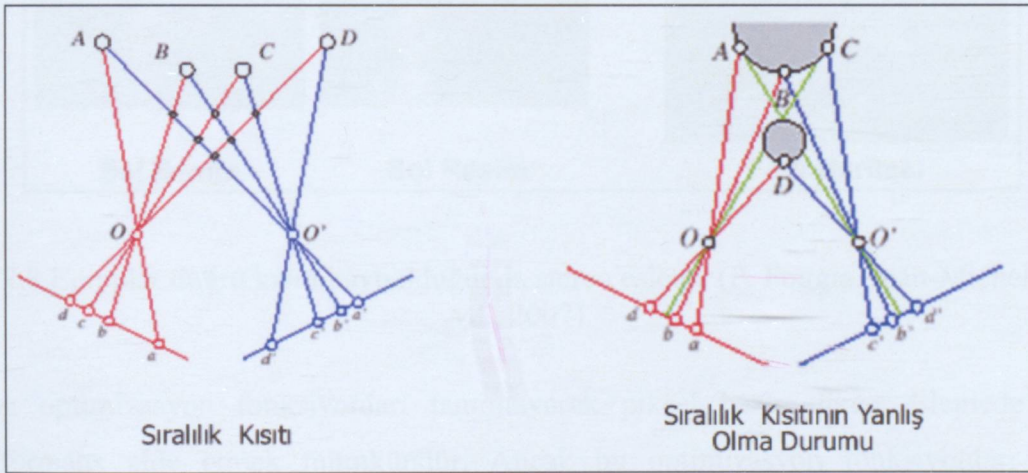
Süreklilik kısıtı: Bir yüzeyin hemen hemen her yerinde farkın çok yavaş değiştiğini kabul eder. Bu kısıt derin kenarlar için ihlal edilir.

Teklik Kısıtı: Sol resimdeki bir alan, sağ resimdeki sadece tek bir alan ile eşleşebilir. Eğer resimlerde aynı alandan birden fazla varsa hatalı eşlemeler olabilir. Bu konuda insan gözü de hataya düşebilmektedir. Bu kısıt özellikle sadece opak yüzeyleri kapsayan resim çiftlerinde başarılı sonuçlar verir.

Uygunluk Kısıtı: Eğer sağ resimdeki bir A noktası, sol resimdeki bir B noktası ile eşleşiyorsa, B noktası da A noktası ile eşlenmelidir. Bazı araştırmacılar eşleme problemine çift yönlü bakarak yanlış eşleşmeleri eleme yoluna gitmişlerdir.

Pürüzsüzlük Kısıtı: Farklardaki ufak değişiklikler yerel alanlardaki ufak değişiklikleri gösterirken, büyük farklar gerçek dünyadaki ani derinlik değişimlerinden kaynaklanır. Yani farklardaki ani değişimler, nesneler arasında geçişin olduğu bölgelere işaret eder.

Sıralılık Kısıtı: Şekil 2.6'da sol resim üzerindeki A ve B noktalarının, sağ resimdeki AA ve BB noktaları ile eşleştiğini varsayalım. Eğer A noktası, B noktasından daha soldaysa AA noktası da, BB noktasından daha solda olmalıdır. Eğer bir nesnenin kendisi ile arkaplanı arasındaki fark, nesnenin genişliğinden daha büyükse bu kısıtlamada hatalar olabilir. Bu kısıtı ihlal edebilecek ip, kolon gibi nesnelere resimlerde nadir rastlandığı düşünülürse, bu kısıtı kullanmak hatalı eşleşmeleri azaltır.



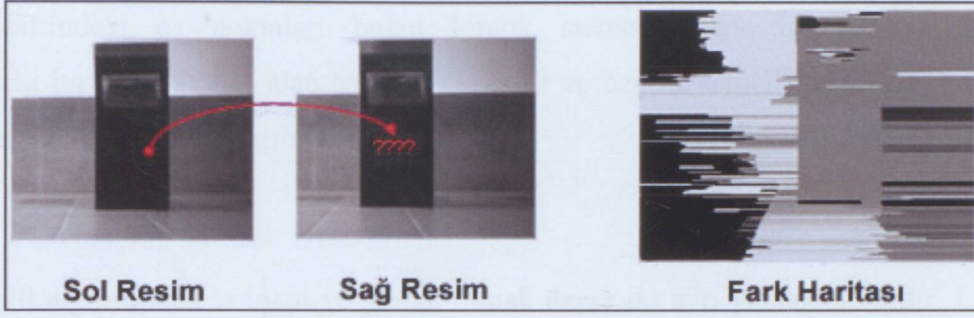
Şekil 2.6 Sıralılık kısıtı (David Jacobs)

2.1.2 Stereo Eşlemede Yaşanan Belli Başlı Problemler

Yukarıda bahsi geçen kısıtların doğruluğunu garanti altına alabildiğimiz bir düzenek kurabilirsek, bu düzenden elde edilen stereo resim çiftinin enerji dağılımları neredeyse eşit olacaktır. Ancak gerçek uygulamalarda, tüm bu kısıtları sağlayabilmek neredeyse imkansızdır. Örneğin, mobil platform engebeli yüzeylerde hareket ederken platforma entegre edilmiş kameralarda vibrasyon oluşur. Bunun sonucunda da bu kameralardan elde edilen görüntüler arasında lokal ve global bozulmalar olur. Stereo eşlemede yaşanan belli başlı problemler aşağıda listelenmiştir (P. Foggia, Jean-Michel Jolion vd., 2007).

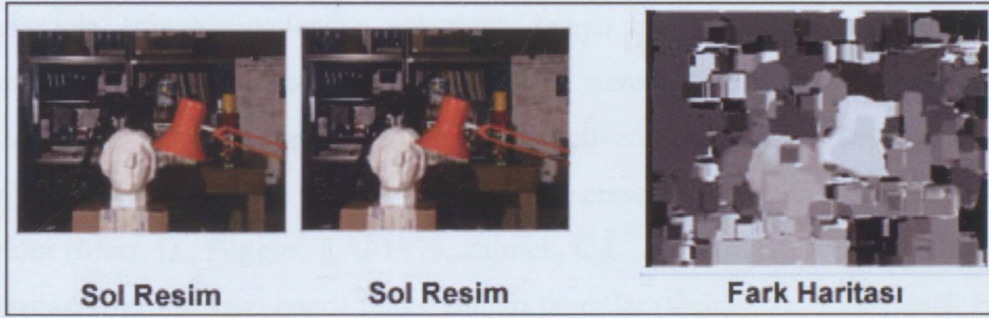
- Resim çifti arasında bire bir piksel bazlı eşleme yapmak, tekdüze ve desensiz ortamlarda

uygun değildir (Şekil 2.7).



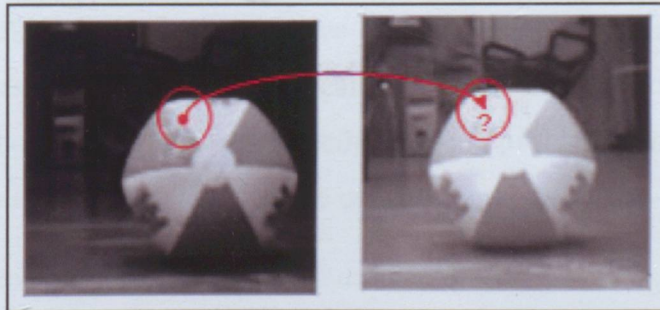
Şekil 2.7 Desensiz ortamlarda stereo eşleme (P. Foggia, Jean-Michel Jolion vd., 2007).

- Mobil platformun hareketi kameralar üzerinde mekanik vibrasyon oluşturur. Bunun sonucunda da epipolar doğru kısıtı kaybolur. (Şekil 2.8)



Şekil 2.8 Epipolar doğru kısıtı kaybolduğunda stereo eşleme (P. Foggia, Jean-Michel Jolion vd., 2007).

- Bazı optimizasyon fonksiyonları tanımlayarak piksel bazlı stereo eşlemede iyi bir performans elde etmek mümkündür. Ancak bu optimizasyon fonksiyonları çalışma zamanını çok uzatmaktadır.
- Kamera çiftinin farklı koşullarda (ışıklandırma, parazit, odaklanma) çalışıyor olması, sağ ve sol görüntünün birbirinden farklı olmasına sebep olur (Şekil 2.9). Bu da stereo eşlemenin başarısız olması demektir.



Şekil 2.9 Farklı ışıklandırma koşullarında elde edilmiş görüntü çifti (P. Foggia, Jean-Michel Jolion vd., 2007).

2.1.3 Stereo Eşleme Algoritmaları

Görüntü çiftindeki eş noktaları bulan birçok stereo eşleme algoritması mevcuttur. Literatürdeki bu algoritmalar alan temelli teknikler ve özellik temelli teknikler olmak üzere iki temel kategoride sınıflandırılabilir.

Alan Temelli Algoritmalar:

Alan temelli algoritmalarda lokal ve global olmak üzere iki ayrı yaklaşım vardır. Lokal alan temelli algoritmalarda (Kanade, T., Okutomi, M, 1994; Veksler, O. 2001), stereo çiftindeki her bir piksel için eşleme yapılır. Bu yöntemde her bir pikselin, aynı stereo uzaklık değerine sahip bir pencere ile etrafının sarıldığı düşünülür. Bu pencereler korelasyon ya da benzer bir teknikle eşlenir. Bu yöntem sonucunda elde edilen stereo uzaklık haritası, otonom mobil robot uygulamalarında ihtiyaç duyulandan çok daha detaylı bilgi içerir. Ayrıca, uygun pencere boyutunun seçilememesi durumunda ise elde edilen stereo uzaklık haritası, sadece homojen ortamlar için değil, dokulu ortamlar için de oldukça güvenilir olabilir. Diğer taraftan global alan temelli yaklaşımlar stereo uzaklık değerini, bir piksel ve o pikselin komşularını hesaba katarak bulur (Marr, D., Poggio, T.A, 1976; Zitnick, C.L., Kanade, T, 2000); ya da tüm stereo uzaklık haritası üzerinde bazı enerji fonksiyonları tanımlar (Geiger, D., Ladendorf, B., Yuille, A., 1995; Boykov, Y., Veksler, O., Zabih, R., 2001) Bu yaklaşım, homojen bölgelerde daha başarılıdır. Fakat parametrelerinin ayarlanması çok güçtür ve çok fazla zaman alır.

Özellik Temelli Algoritmalar:

Özellik temelli yaklaşımlar(Marr, D., Poggio, T.A.,1979; Candocia, F., Adjouadi, M, 1997) sadece köşe, kenar gibi özel pikselleri eşleştirir. Bu yöntemler etkili ve doğru sonuçlar üretir. Ancak sadece özel noktalar için stereo uzaklık değeri hesaplar. Oysaki nesnelerin boyutu, şekli gibi bilgiler otonom mobil robot uygulamalarında robotun, dinamik çevredeki engelleri tespit edip, aşabilmesi için gereklidir.

Literatürde, farklardaki büyük değişimleri ve keskin derinlik farklarını ortaya çıkarmak amacıyla renk bölütlemesi kullanan bir kaç çalışma da mevcuttur (Tao, H., Sawhney, H.S., 2000). Bu metodlar homojen ortamlardaki yanlış eşleşme problemlerini çözmek için, piksel tabanlı algoritmaların sonuçlarını iyileştirmeye çalışır.

Stereo eşleme algoritmaları, genel olarak dört adımdan oluşur:

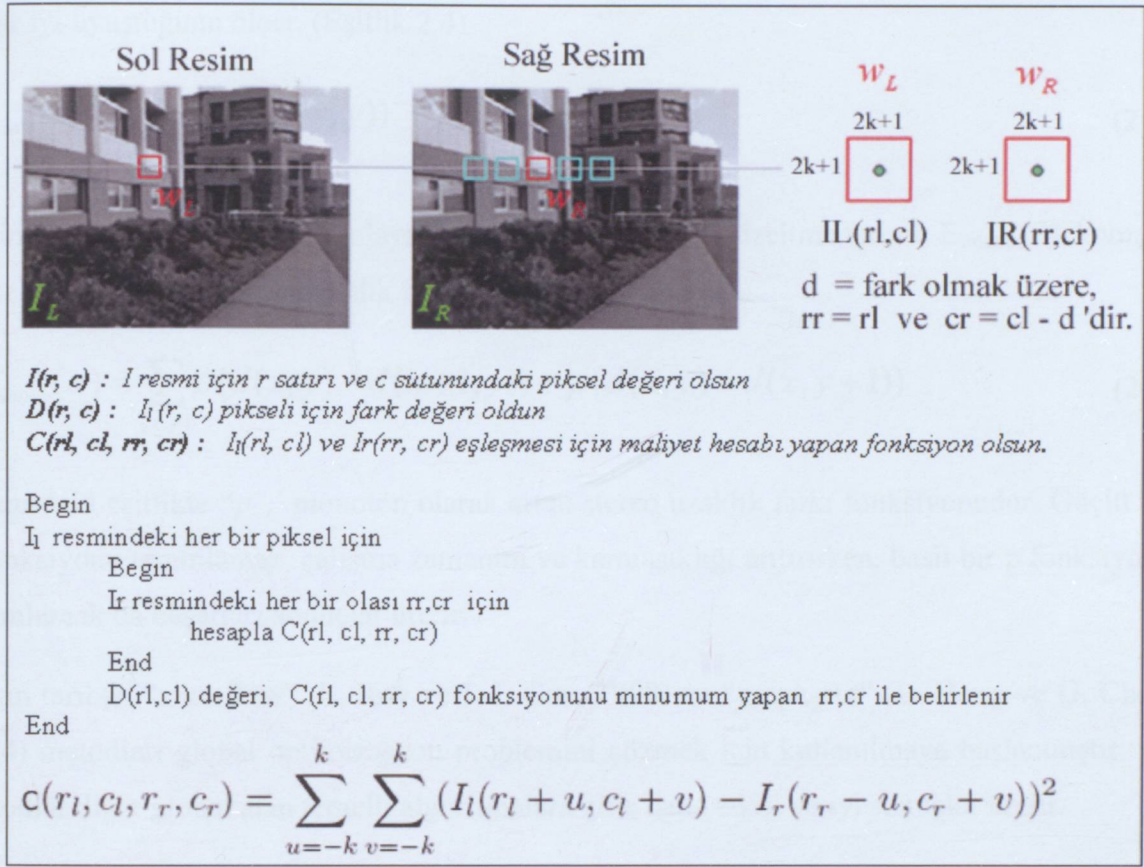
- 1- Eşleme maliyeti hesabı
- 2- Maliyetlerin toplanması

- 3- Stereo uzaklık değerlerinin hesaplaması ve optimizasyonu
- 4- Bulunan stereo uzaklık değerlerinin iyileştirilmesi

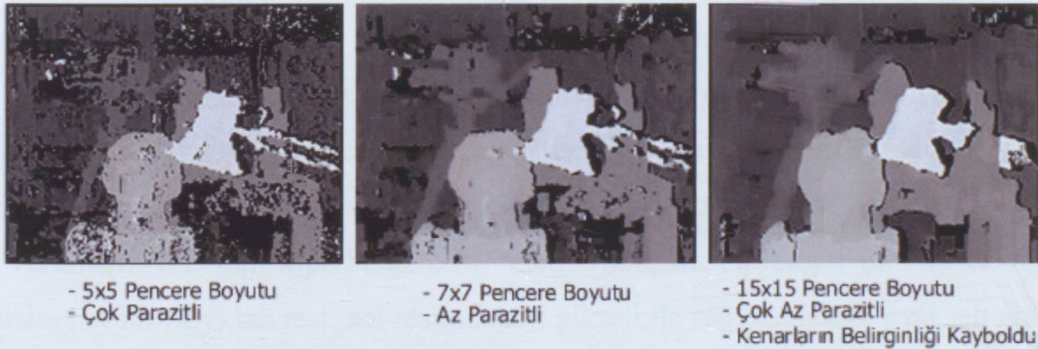
Eşleme maliyeti hesabında tanımlanan maliyet fonksiyonu ile resim çiftindeki karşılıklı piksellerin birbirleri ile ne kadar iyi eşleştiği hesaplanır. Maliyetlerin toplanması adımı bir eşleme sırası için toplam maliyet hesabı yapılır. Üçüncü adımda en düşük maliyetli eşleme sırası için stereo uzaklık değerleri hazırlanır. Bu adımların tüm piksellere uygulanmasıyla stereo uzaklık haritası elde edilir. Son olarak, tanımlanan çeşitli fonksiyonlarla elde edilen stereo uzaklık haritasının iyileştirilmesi sağlanır. Lokal algoritmalarda 4. adım uygulanmaz. Global algoritmalarda ise 1. adımdan sonra genellikle 2. adım uygulanmadan 3. adıma yani fark hesaplamasına geçilir (Scharstein, D., Szeliski, 2002). Aşağıda belli başlı eşleme algoritmaları incelenmiştir.

İlişki Temelli Eşleme Algoritmaları: İlişki temelli algoritma, lokal alan temelli bir tekniktir. İlişki temelli bir algoritmada, sol resimdeki bir bölgenin, sağ resimde hangi bölgede olduğu, arama penceresi kullanılarak bulunur. Bu algoritmada öncelikli olarak belirli bir arama alanı ve yeterli büyüklükte bir arama penceresi boyutu seçilir. Şekil 2.11’de de görüldüğü gibi ilişki penceresinin boyutunu çok küçük seçmek, yanlış eşleşmelere ve parazite sebep olurken, çok büyük seçmek hem işlem zamanını arttırmakta hem de resimdeki detayların kaybolmasına neden olmaktadır. Bu problemi aşmak için, eşleme algoritmasını farklı pencere boyutlarıyla deneyerek, en uygun pencere boyutunu bulan bazı yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Bununla birlikte algoritmanın önemli bir kısmını maliyet fonksiyonu oluşturur. Maliyet fonksiyonu ile karşılaştırılan pencerelerin çerçevelediği piksellerin birbirleriyle ne kadar iyi eşleştiği ölçülür. Farkların Mutlak Değeri (SAD, Sum Absolute Difference), Farkların Karesi Toplamı (SSD, Sum Square Difference) ve Çapraz İlişki yaygın olarak kullanılan maliyet fonksiyonlarından bazılarıdır. İlişki temelli eşleme algoritmasının adımlarının açıklandığı Şekil 2.10’da maliyet fonksiyonu olarak farkların kareleri toplamı kullanılmıştır.



Şekil 2.10 İlişki temelli eşleme algoritması



Şekil 2.11 Farklı pencere boyutları ile denenmiş ilişki temelli eşleme algoritmasının sonuçları

Global Alan Temelli Eşleme Algoritmaları: Global metodlar genellikle maliyetlerin toplanması adımını atlayarak, tüm işlemlerini fark hesaplama adımıyla yaparlar. Bir çok global metod, enerji minimizasyonu bünyesinde formüle edilir. Amaç, global enerjiyi minimize eden stereo uzaklık fonksiyonunu bulmaktır. (Eşitlik 2.3)

$$E(d) = E_{data}(d) + \lambda E_{smooth}(d) \quad (2.3)$$

$E_{data}(d)$, toplam eşleşme maliyetini kullanarak stereo uzaklık fonksiyonunun resim çifti ile ne

kadar iyi uyuştuğunu ölçer. (Eşitlik 2.4)

$$E_{data}(d) = \sum_{(x,y)} C(x, y, d(x, y)) \quad (2.4)$$

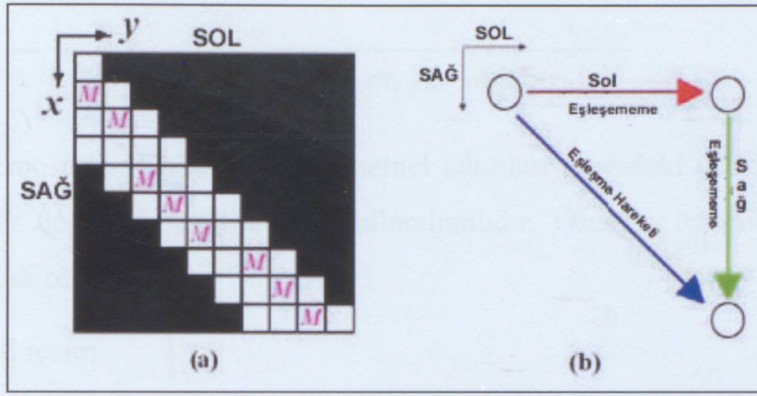
Optimizasyon hesaplamasını kolaylıkla yönetebilmek için, düzeltme terimi, $E_{smooth}(d)$, komşu pikseller arasındaki stereo uzaklık farkını ölçer. (Eşitlik 2.5)

$$E_{smooth}(d) = \sum_{(x,y)} \rho(d(x, y) - d(x+1, y)) + \rho(d(x, y) - d(x, y+1)) \quad (2.5)$$

Yukarıdaki eşitlikte “ p ”, monoton olarak artan stereo uzaklık farkı fonksiyonudur. Güçlü bir p fonksiyonu tanımlamak, çalışma zamanını ve karmaşıklığı artırırken, basit bir p fonksiyonu tanımlamak da başarısız sonuçlar üretir.

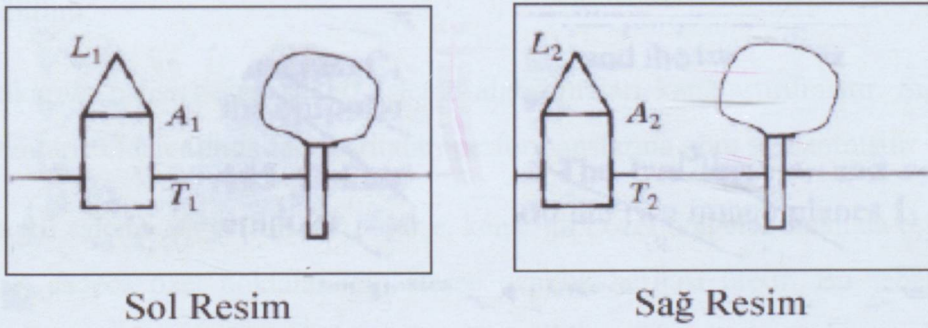
Yakın tarihte, “max-flow” (S. Roy ve I. J. Cox, 1998) ve “graph-cut” (L. Hong ve G. Chen, 2004) metodları global optimizasyon problemini çözmek için kullanılmaya başlanmıştır. Bu metodlar diğer global alan temelli algoritmalara göre daha etkili ve iyi sonuçlar üretir.

Dinamik Programlama ile Eşleme Algoritmaları: Bazı global alan temelli algoritmalar, Richard Bellman tarafından 1953 yılında bulunmuş dinamik programlama metoduna dayanır. Dinamik programlama stereo eşleme problemi için etkin bir yöntemdir. Bu metod grafın sol üst köşesinden, sağ alt köşesine giden en optimum yolu bulur. En optimum yol, sıralılık kısıtını sağlayan, en az maliyetli ve en iyi eşleşmelere sahip olan yoldur. Bu yöntemde grafın düğümlerinde, sağ ve sol resimdeki eşleşen piksellerin ağırlık değerleri tutulur. Şekil 2.12 (a)’da maksimum farkı üç piksel olan on piksele sahip iki tarama satırı için örnek bir maliyet matrisi verilmiştir (G. Van Meerbergen, M. Vergauwen, M. Pollefeys, L. Van Gool, 2001). Bu matrisite her bir (x,y) hücresi, sol resimdeki x pikseli ile sağ resimdeki y pikseli arasındaki olası eşleşmeleri gösterir. Matrisite eşleşen pikseller “M” ile gösterilmiştir. Düğümler arasında izin verilen üç çeşit hareket vardır.(Şekil 2.12 (b))



Şekil 2.12 (a) Maliyet matrisi (b) Matristeki iki piksel arasında izin verilen yollar (G. Van Meerbergen, M. Vergauwen, M. Pollefeys, L. Van Gool, 2001).

Özellik Temelli Eşleme Algoritmaları: Bu algoritmalarındaki en önemli nokta sağ ve sol resim arasında eşleşebilecek iyi özellikleri tespit etmektir. Genel olarak özellik çıkarımında kenar, sınır çizgisi ve köşeler kullanılır. Örneğin Şekil 2.13'te sol resimdeki L_1 , A_1 , T_1 ve sağ resimdeki L_2 , A_2 , T_2 , geometrik özellikleriyle, eşleşebilecek iyi özelliklere sahip özel bölgelerdir.



Şekil 2.13 Özellik temelli stereo eşleme

Stereo eşleme için tek bir özellik değil, bir özellik seti kullanılmalıdır. Örneğin özellikler bir sınır çizgisi için çıkarılacak olunursa,

- çizginin uzunluğu (l),
- çizginin doğrultusu (θ),
- çizginin orta noktasının koordinatları (m),
- çizginin ortalama yoğunluk bilgisi benzerlik ölçüsü için kullanılabilir (i).

Eşitlik 2.6'da yukarıdaki özellik seti için benzerlik ölçüsü fonksiyonu tanımlanmıştır. Eşitlikteki w_0, w_1, w_2, w_3 hangi özelliğin daha önemli olduğunu vurgulamak için kullanılan ağırlık değerleridir.

$$S = \frac{1}{w_0(I_l - I_r)^2 + w_1(\theta_l - \theta_r)^2 + w_2(m_l - m_r)^2 + w_3(i_l - i_r)^2} \quad (2.6)$$

Özellik temelli stereo eşleme algoritmasının temel adımları aşağıdaki gibidir: Stereo eşleme için tek bir özellik değil, bir özellik seti kullanılmalıdır. Örneğin özelliklerimizi bir sınır çizgisi için çıkaracak olursak:

I_l ve I_r : Sağ ve sol resim,

$F_{l1}, F_{l2}, \dots, F_{lN}$ ve $F_{r1}, F_{r2}, \dots, F_{rN}$: Özellik tanımlayıcıları ve her iki resim için ilgili tanımlayıcıya bağlı özellik seti,

$R(F_l)$: Sağ resimde, sol resimdeki F_l özelliğinin aranacağı bölge olsun.

Sol resimdeki her bir F_l özelliği için

Begin

- F_l ile $R(F_l)$ bölgesindeki her bir özellik için benzerlik hesaplanır.
- Benzerliği maksimum yapan F_r özelliği seçilir.
- $d(F_l, F_r)$ kaydedilir.

End

Tüm bu işlemlerden sonra, eşleşen bölgelerin konumları arasındaki fark bilgisi kullanılarak stereo uzaklık bilgisi bulunur. Yani, bu yöntemle stereo uzaklık haritası sadece özel noktalar için çıkarılabilir.

Aşağıda, yukarıda bahsi geçen stereo eşleme algoritmaları karşılaştırılmıştır. Şekil 2.14'de çeşitli yöntemlerle elde edilmiş fark haritaları performanslarına göre sıralanmıştır:

Özellik temelli eşleme algoritmaları, köşe, kenar gibi özel bölgeler arasında eşleme yapar. Bu metodlar, sadece özel noktalar için stereo uzaklık haritası üretir. Bu sebepten dolayı gerçek uygulamalar için kullanışlı bir yöntem değildir. Çalışma zamanlarının kısa olması sebebiyle gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilirler. Genellikle doğru sonuçlar üretirler. Resim çiftinin farklı koşullarda (ışık, odaklanma, vb.) elde edilmiş olması durumuna kısmen duyarsızdır.

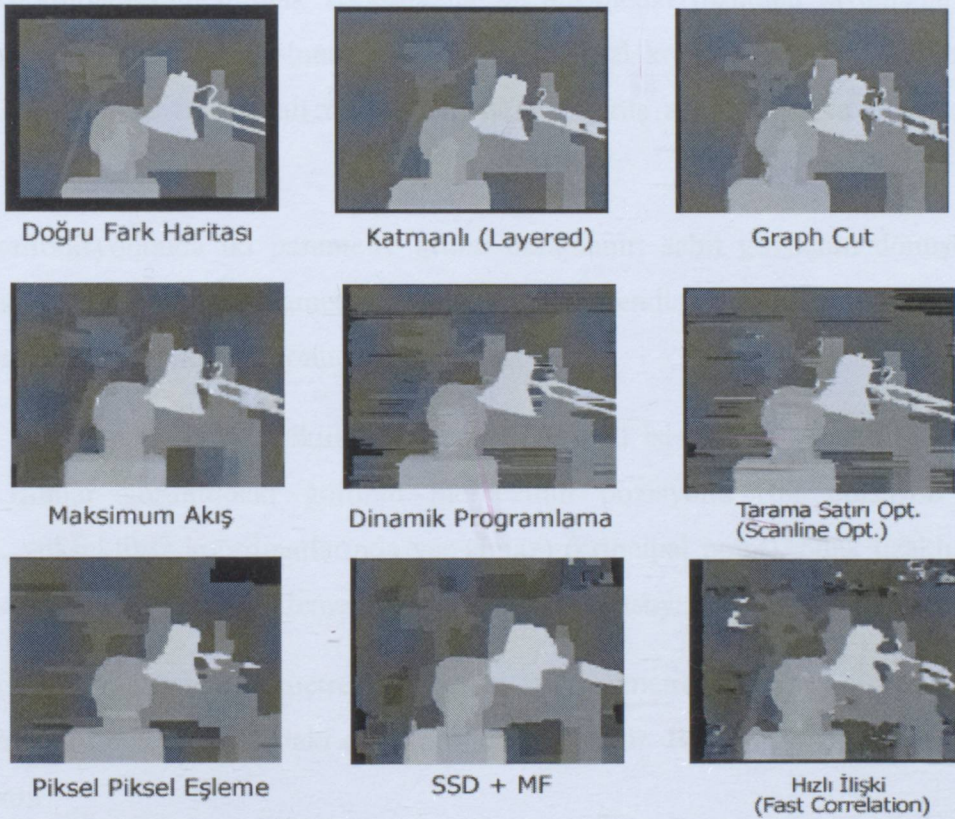
Alan temelli eşleme algoritmaları, resim çiftinin her bir noktası için eşleme yapar. Bu metodlar stereo uzaklık haritasını, otonom mobil uygulamaların ihtiyaç duyduğundan çok daha detaylı üretirler. Ürettiği stereo uzaklık haritası, sahne geri-çatımında kullanılabilir. Genellikle çalışma süreleri çok uzundur. Güçlü geometrik kısıtlamalara ihtiyaç duyarlar (yatay epipolar doğru kısıtı). Resim çiftinin farklı koşullarda (ışık, odaklanma, vb.) elde edilmiş olması durumunda, eşlemelerde hatalar oluşur.

Lokal yaklaşımlar, sadece piksel bazlı çözüm getirirler. Resmin geri kalanıyla ilgilenmezler.

Global yaklaşımlardan daha hızlıdır. Tekrar eden ve tekdüze desenlerde yanlış eşleşmeler yaparlar. Uygulaması kolaydır.

Global yaklaşımlar, global optimizasyon fonksiyonu ile tüm resim için bir çözüm üretmeye çalışır. Lokal yaklaşımlardan daha yavaştır. Gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılamazlar. Tekrar eden ve tek düze desenlerde iyi sonuçlar üretirler. Eşleme maliyeti fonksiyonunun parametrelerinin ayarlanması güç ve karmaşıktır. İşlem hızı yavaştır.

Dinamik programlamayı kullanan eşleme algoritmaları, sıralılık kısıtını sağlayan, en az maliyetli ve en iyi eşleşmelere sahip olan optimum yolu bulmaya çalışır. Alan temelli algoritmalara nazaran daha iyi sonuçlar üretir. Alan temelli yaklaşımlardan daha hızlıdır. Uygulaması zordur.



Şekil 2.14 Bazı stereo eşleme algoritmalarının sonuçları (Scharstein, D., Szeliski, 2002).

2.2 Kamera Kalibrasyonu ve Düzeltme

Kısa sürede ve doğru stereo uzaklık haritası çıkarabilmek için sağ ve sol kameralardan alınan görüntülerde eşleşen pikseller görüntü düzleminde aynı y koordinatlarında yer almalıdır. Buna epipolar doğru kısıtı denir. Bu kısıtın sağlanabilmesi için, kameraların görüntü düzlemleri paralel ve doğrusal olmalıdır. Fakat bu geometrik koşulu, özellikle gerçek zamanlı otonom mobil uygulamalarında her zaman sağlamak mümkün olmamaktadır. Epipolar doğru kısıtını

sağlayabilmek için görüntüler kamera kalibrasyonu sonucu elde edilen parametrelerin yardımıyla düzeltilmelidir. Düzeltilmiş görüntülerde eşleşen pikseller aynı y koordinatlarında yer almaktadır.

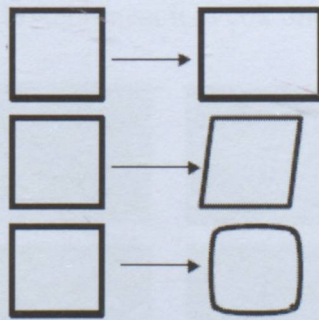
Kamera kalibrasyonu problemi, görüntü üzerindeki piksellerin gerçek ortamda hangi noktalar ile eşleştiği ile alakalıdır. Perspektif projeksiyon üzerine yayılmış her bir piksel gerçek ortamda bir noktalar ışını ile eşleşir. Kalibrasyon, iki boyutlu görüntü üzerinden sistemin dahili ve harici parametrelerini hesaplayan ve üç boyutlu bilgi oluşturmak için ön bilgi sağlayan bir tekniktir.

Kamera kalibrasyonu problemi hem iç hem de dış oryantasyon problemlerini içerir. Görüntü düzlemi koordinatlarının mutlak koordinatlar ile arasındaki ilişkiden faydalanarak kamera pozisyonu ve oryantasyonu bulunur. Görüntüdeki piksel koordinatlarının, görüntü düzlemi üzerindeki pozisyonu ile alakalı olarak asıl nokta, görüş açısı oranı ve lensteki bozulma miktarı bulunur.

Kamera kalibrasyonunda iki parametre grubu hesaplanır: sabit gövdenin dönüşümü (rigid body transform) için harici parametreler ve kameranın kendisi için dahili parametreler. Şekil 2.15 'de sembolik kalibrasyon sonuçları görülmektedir.

Öncelikle kameraya göre değişiklik gösteren ve görüntü işlemeyi etkileyen iç parametreler bulunur. Bunlar görüntüdeki görüntü merkezinin pozisyonu (bu pozisyon genellikle genişlik/2, yükseklik/2 koordinatlarında yer almaz) (principal point), odak uzaklığı, satır ve sütun pikselleri için farklı ölçekleme faktörleri, sapma katsayısı, lens bozulma katsayısıdır

Daha sonra kameranın dış parametreleri bulunur. Bu parametreler, gerçek dünya koordinatları ve kamera koordinatları arasındaki dönüşüm için kullanılır. Bunlar dönme açıları ve öteleme bileşenleridir.



Şekil 2.15 Sembolik kalibrasyon sonuçları
(<http://www.umiacs.umd.edu/~ramani/cmssc828d/lecture9.pdf>)

Kamera kalibrasyonu problemine üretilen çözümler fotogrametri alanında geliştirilmiştir. Fotogrametri, kamera pozisyonlarının ve uzaklık ölçülerinin sahne koordinatlarıyla arasındaki ilişkilerinden yararlanarak kamera pozisyonunu ve oryantasyonunu bulmayı amaçlar. Fotogrametride dört kalibrasyon problemi vardır:

Mutlak oryantasyon, mutlak koordinat sistemi ile kalibrasyon noktalarının koordinat sistemi arasındaki dönüşümünü belirler.

Bağıl oryantasyon, kalibrasyon noktalarının sahneye projeksiyonundan yararlanarak iki kamera arasındaki bağıl pozisyonu ve oryantasyonu belirler.

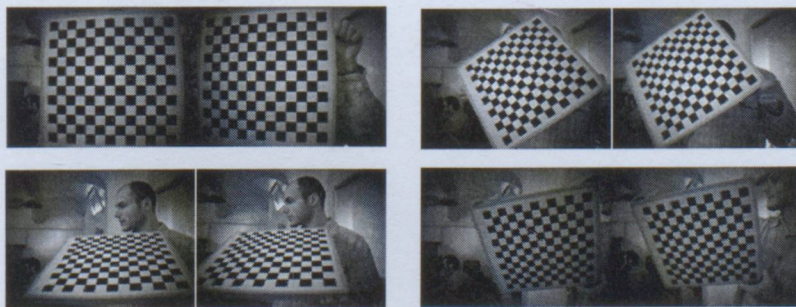
Dış oryantasyon, kalibrasyon noktalarının sahneye projeksiyonundan yararlanarak kameranın pozisyonunu ve oryantasyonunu belirler.

İç oryantasyon, kamera sabitini, asıl noktanın lokasyonunu ve lens bozulumunun düzeltilmesini içeren kameranın dahili geometrisini belirler.

Kamera kalibrasyonu genel olarak 3 adımdan oluşur:

1. Görüntü alımı
2. Alınan görüntüler üzerindeki kenarları bulmak için ön işlem fonksiyonlarının gerçekleştirilmesi
3. Her iki kamera için dahili ve harici parametrelerin hesaplanması

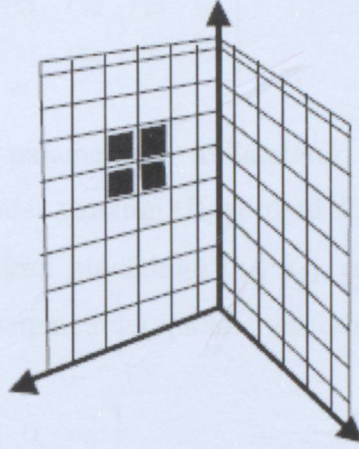
Görüntü alımı aşamasında farklı açılardan ve uzaklıklardan satranç tahtasının (Tsai ızgarası) birçok resmi çekilir. Resimler sağ ve sol kamera için aynı anda çekilir. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi satranç tahtası her iki kamera tarafından tamamı görülecek şekilde yerleştirilmelidir. Dahili ve harici parametrelerin hesaplanabilmesi için satranç tahtasındaki tüm köşelerin ön işlemci fonksiyonu ile tespit edilmesi gerekmektedir. Farklı açılardan ve değişik uzaklıklardan bir çok resmin çekilmesi, gerçek zamanlı uygulamanın çeşitli görüş açılarına sahipken doğru sonuçlar üretebilmesi için çok önemlidir.



Şekil 2.16 Kalibrasyon için çekilmiş örnek görüntü çiftleri (www.vision.deis.unibo.it)

2.2.1 Hedef Görüntü Üzerinde Ön İşlemler

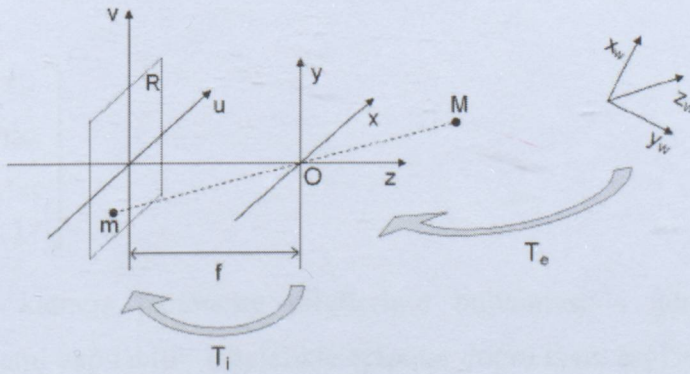
Öncelikle Canny kenar bulma yöntemi ile kenarlar bulunur. Bulunan kenarlar bir doğruya oturtulur. Görüntü köşelerini elde etme amacıyla doğrular kesiştirilir. Daha sonra eğer hedefin hepsi görüntüde yer alıyorsa, görüntüdeki köşeler ile üç boyutlu satranç tahtasının köşeleri eşleştirilir. Bu şekilde gerçek ortam koordinatları ile görüntü koordinatları eşleştirilmiş olur. Şekil 2.17’de satranç tahtasının üç boyutlu uzayda sembolik yerleşimi gözükmemektedir.



Şekil 2.17 Satranç tahtasının üç boyutlu uzaya sembolik olarak yerleşimi
(<http://www.umiacs.umd.edu/~ramani/cmssc828d/lecture9.pdf>)

2.2.2 Kamera Parametreleri

Üç boyutlu dünyadaki bir noktayı iki boyutlu görüntüdeki bir noktaya dönüştürebilmek için özel kamera parametrelerinin bilinmesi gerekir. İki çeşit kamera parametresi vardır. Bunlar; kameranın geometrik ve optik karakteristiklerini tanımlayan dahili parametreler ve kameranın dünya referans sistemindeki pozisyonunu ve oryantasyonunu tanımlayan harici parametrelerdir.



Şekil 2.18 Kameranın dahili ve harici parametreleri (Annika Kuhl, 2005)

Şekil 2.18’de görüldüğü gibi iki veya daha fazla kamera içeren bir sistemin modellenmesi için

üç farklı koordinat sistemi gerekir: dünya referans çerçevesi (x_w, z_w, y_w), optik orjin merkezli kamera çerçevesi (x, y, z) ve görüntü çerçevesi (u, v).

Homojen dünya koorinatlarda verilen üç boyutlu bir nokta, T_e harici parametreleri olarak ifade edilen r_{ij} rotasyonu ve t_j ötelemesi ile kamera çerçevesine dönüştürülebilir (Eşitlik 2.7).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = T_e \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad T_e = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Daha sonra bu nokta, dahili parametreler kullanılarak iki boyutlu görüntü düzlemine dönüştürülür. Bu parametreler; odak uzaklığı (f), görüntü düzleminin merkezi olan esas nokta (u_0, v_0), milimetre cinsinden piksel büyüklüğü (k_0, k_1), $\alpha = f / k_0$ ve $\beta = f / k_1$ bilgileri kullanılarak oluşturulur. Dahili parametreler kullanılarak dönüşüm (Eşitlik 2.8)' deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ s \end{bmatrix} = T_i \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad T_i = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

(u, v, s) homojen olduğundan dolayı u' ve v' piksel koordinatlarını elde edebilmek için (u, v, s) teker teker s' 'ye bölünür. $z = 0$ ve $s = 0$ olması durumunda, odak düzlemi üzerindeki noktaların, sıfıra bölme tanımlı olmamasına bağlı olarak görüntü düzlemi koordinatlarına dönüştürülemez. Bu nokta üzerinden geçen düz bir çizgi ve optik merkez görüntü düzlemi ile kesişmez, bunlar görüntü düzlemine paraleldir. Özet olarak, dünya koordinatlarında verilen bir noktayı iki boyutlu görüntü düzlemine dönüştürebilmek için aşağıdaki eşitlik kullanılır (Eşitlik 2.9).

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ s \end{bmatrix} = T_i T_e \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Dahili ve harici kamera parametre bilgilerinin bulunmasıyla görüntülerin düzeltilmesi (rektifikasyon) işlemi yapılabilir. Böylelikle epipolar doğru kısıtı sağlanmış olur.

2.2.3 Epipolar Doğru Kısıtı

Kameranın dahili ve harici parametrelerini ayrı ayrı bilmek epipolar kısıtı sağlamak için yeterli değildir. Epipolar kısıt, epipolar doğru ile yatay tarama çizgilerinin çakıştığını garanti eder. Böylece her iki resimdeki eş noktaların konumları arasında sadece yatay yönde farklılıklar olur. Bu da arama uzayını 3 boyuttan 2 boyuta düşürür.

İki kamera kullanılarak dünya referans çerçevesindeki her bir $w = [x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T$ noktası, $P = T_i \ T_e$ lineer dönüşümü ile uygun görüntü çerçevesi üzerine düşürülebilir (Eşitlik 2.10). m_1 , sol görüntü çerçevesi, m_2 sağ görüntü çerçevesi ise,

$$m_1 = P_1 w, \ m_2 = P_2 w \quad (2.10)$$

olur.

Epipolar kısıta bağlı olarak resimleri düzeltmek için, P_1 ve P_2 projeksiyon matrisleri aşağıdaki özel durumları sağlamalıdır:

1. Her iki kamera aynı odak uzaklığına sahip olmalıdır
2. Her iki kamera aynı odak düzlemine sahip olmalıdır.
3. Her iki kameranın da optik merkezi sabit olmalıdır.
4. Sağ ve sol resimdeki her bir noktanın dikey koordinatları uyuşmalıdır.

Bu şartları kullanarak P_1 ve P_2 hesaplanır ve alınan görüntüler epipolar kısıtı sağlayacak şekilde dönüştürülür.

2.2.4 Görüntülerin Düzeltilmesi (Rektifikasyon)

Rektifikasyon, epipolar doğruların görüntü satırlarına eşleşmesi amacıyla yapılan stereo görüntülerin yeniden örneklenmesi işlemidir. Rektifikasyon işlemi sonucunda, sol ve sağ görüntü düzlemleri eş düzlemler, yatay eksenler ise doğrusal olmuşsa (optik eksenlerde dönme olmamışsa), epipolar doğru kısıtı başarıyla sağlanmış ve stereo eşleme problemi iki boyuta düşürülmüştür (Zhiwei Zhu, Ming Jiang, Chih-ting Wu).

Rektifikasyon matrisi oluşturabilmek için sistemin harici parametrelerine ihtiyaç duyulur. Dünya referans çerçevesindeki bir P noktası için,

$$P_r = R_r P + T_r \quad (2.11)$$

$$P_l = R_l P + T_l \quad (2.12)$$

P_r sağ kamera çerçevesindeki üç boyutlu noktanın koordinatları, P_l sol kamera çerçevesindeki üç boyutlu noktanın koordinatları, R_r ve R_l sol ve sağ kamera çerçevesindeki noktanın rotasyon dönüşüm matrisleri, T_r ve T_l sol ve sağ kamera çerçevesindeki noktanın öteleme dönüşüm matrisleridir.

Eşitlik 2.11 ve 2.12'den

$$P_l = R_l P + T_l = R_l [R_r^{-1} (P_r - T_r)] + T_l = R_l R_r^{-1} P_r - R_l R_r^{-1} T_r + T_l \quad (2.13)$$

elde edilir.

P_l ile P_r arasındaki ilişki Eşitlik 2.14'de gösterilmiştir.

$$P_l = R P_r + T \quad (2.14)$$

Bu eşitlikten yararlanarak stereo sistemin harici parametre matrisleri, Eşitlik 2.15 ve 2.16'da gösterildiği gibi elde edilir.

$$R = R_l R_r^{-1} = R_l R_r^T \quad (2.15)$$

$$T = T_l - R_l R_r^T T_r = T_l - R T_r \quad (2.16)$$

Öncelikle bu harici parametreler elde edilir, daha sonra üçlü bağımsız dikey birim vektörleri içeren R_{rect} , rektifikasyon matrisi oluşturulur.

$$e_1 = \frac{T}{\|T\|} \quad (2.17)$$

$$e_2 = \frac{\begin{bmatrix} -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix}}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}} \quad (2.18)$$

$$e_3 = e_1 \times e_2 \quad (2.19)$$

$$R_{rect} = \begin{pmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ e_3^T \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Bir sonraki eşitlik, bir görüntünün rektifikasyon matrisi ile nasıl rektifiye edileceğini ve rektifikasyon işleminin doğruluğunu sağlamak amacıyla dahili parametreler üzerinde yapılan düzeltmeleri gösterir.

$$P_l = RP_r + T \quad (2.21)$$

Eşitlik 2.21'in her iki tarafına da rektifikasyon matrisi uygulanırsa

$$RrectP_l = RrectRP_r + RrectT \quad (2.22)$$

elde edilir. Eşitlik 2.23'ün rektifiye edilmiş sol ve sağ kamera çerçevesindeki bir noktanın koordinatları olduğu kabul edilirse,

$$P_l' = RrectP_l \quad P_r' = RrectRP_r \quad (2.23)$$

$$RrectT = \begin{pmatrix} \|T\| \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

eşitliğinden

$$P_l' = P_r' + \begin{pmatrix} \|T\| \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

elde edilir. Bu aşamada, rektifiye edilmiş sol ve sağ kamera çerçevelerindeki nokta aynı y ve z koordinatlarına sahiptir. Daha sonra sol ve sağ görüntüler üzerindeki rektifikasyon etkisi incelenir. P_l ve P_r aşağıdaki eşitliklerdeki gibi kabul edilirse,

$$P_l' = \begin{bmatrix} x_l' \\ y_l' \\ z_l' \end{bmatrix} \quad P_r' = \begin{bmatrix} x_r' \\ y_r' \\ z_r' \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Rektifikasyon işleminde dahili kamera parametrelerine aşağıdaki gibi değer verilir (Eşitlik 2.27).

$$W_{lrect} = \begin{pmatrix} fs_{xl} & 0 & c_{0l} \\ 0 & fs_{yl} & r_{0l} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad W_{rrect} = \begin{pmatrix} fs_{xr} & 0 & c_{0r} \\ 0 & fs_{yr} & r_{0r} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

Bu dahili kamera parametreleri kalibrasyon işlemi sürecinde elde edilen parametrelerden farklı olabilir, çünkü bu dahili parametreler rektifikasyonu sağlamak amacıyla düzeltilmiştir. Bir sonraki argüman, dahili parametreler üzerindeki ihtiyaçları gösterir.

P_r ve P_l noktaları görüntü çerçeveleri üzerine düşürülürse aşağıdaki eşitlikler elde edilir

(Eşitlik 2.28).

$$\begin{bmatrix} u_l' \\ v_l' \\ w_l' \end{bmatrix} = W_{lrect} \begin{bmatrix} x_l' \\ y_l' \\ z_l' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fs_{xl}x_l' + c_{0l}z_l' \\ fs_{yl}y_l' + r_{0l}z_l' \\ z_l' \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} u_r' \\ v_r' \\ w_r' \end{bmatrix} = W_{rrect} \begin{bmatrix} x_r' \\ y_r' \\ z_r' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fs_{xr}x_r' + c_{0r}z_r' \\ fs_{yr}y_r' + r_{0r}z_r' \\ z_r' \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Rektifikasyon işleminin amacı, P_l ve P_r noktalarını görüntülerde aynı dikey koordinatlara işaret etmesini sağlamaktır (Eşitlik 2.29):

$$\frac{fs_{yl}y_l' + r_{0l}z_l'}{z_l'} = \frac{fs_{yr}y_r' + r_{0r}z_r'}{z_r'} \quad (2.29)$$

$z_l' = z_r'$ ve $y_l' = y_r'$ eşitlikleri bilindiğine göre,

$$fs_{yl}y_l' + r_{0l}z_l' = fs_{yr}y_r' + r_{0r}z_r' \quad (2.30)$$

ve

$$(fs_{yl} - fs_{yr})y_l' + (r_{0l} - r_{0r})z_l' = 0 \quad (2.31)$$

yazılabilir. Bu eşitlikleri elde edebilmek için her y ve z koordinatı için aşağıdaki eşitlikler sağlanmalıdır (Eşitlik 2.32).

$$fs_{yl} = fs_{yr} \quad r_{0l} = r_{0r} \quad (2.32)$$

Eşitlik 2.32'deki kısıtlar sağlanırsa rektifikasyonun doğruluğu onaylanır. Kamera kalibrasyonu işleminden elde edilen parametreler belirli hatalar verdiği için ve iki görüntüdeki aynı üç boyutlu nokta için farklı y koordinatları üretildiğinden Eşitlik 2.32'deki kısıtlar sağlanmadığı için sol ve sağ görüntüleri rektifiye etmek amacıyla yeni bir kamera parametre kümesi kullanılmalıdır.

Uygulama esnasında, Eşitlik 2.32'deki kısıtlar sağlandığı sürece dahili parametre matrislerine ikisinin ortalaması veya birinin değeri atanabilir. Takip eden adımlarda, hem sol hem de sağ rektifikasyon için kullanılacak olan yeni kamera dahili matrisi W_{new} olarak adlandırılır.

Rektifiye edilmiş görüntü ile orjinal görüntü ilişkilendirilirse, sol görüntünün rektifikasyonu için:

$$\lambda_l \begin{pmatrix} c_l \\ r_l \\ 1 \end{pmatrix} = W_{ol} * R_l * P \quad \lambda_r \begin{pmatrix} c_l' \\ r_l' \\ 1 \end{pmatrix} = W_{new} Rect * R_l * P \quad (2.33)$$

W_{ol} kamera kalibrasyonundan elde edilmiş olan dahili matris, λ ise ölçekleme faktörüdür.

Eşitlik 2.33'den

$$\lambda \begin{pmatrix} c'_l \\ r'_l \\ 1 \end{pmatrix} = W_{new} * Rect * W_{ol}^{-1} * \begin{pmatrix} c_l \\ r_l \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

elde edilir.

Rektifikasyon işlemi, Eşitlik 2.34 kullanılarak gerçekleştirilir. Şekil 2.19'da görüldüğü gibi paralel ve doğrusal olmayan örnek bir resim çifti için rektifikasyon işlemi uygulanmış, sonucunda sol ve sağ görüntü düzlemleri eş düzlemli, yatay eksenler ise doğrusal olmuştur.



(a)



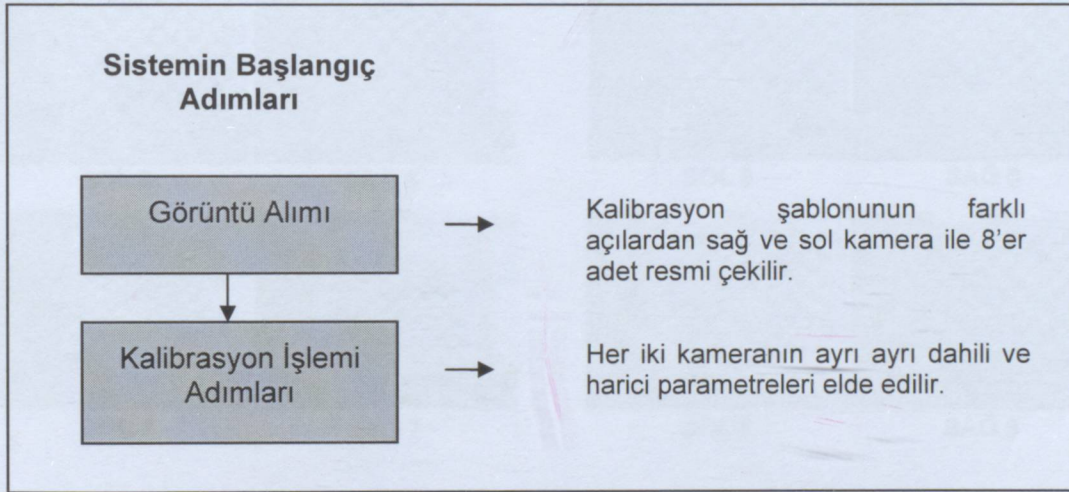
(b)

Şekil 2.19 (a) Orjinal sol ve sağ resim çifti (b) Rektifikasyon sonucu elde edilen resim çifti (Jong-Seung Park ve Bum-Jong Lee, 2007)

3. SİSTEM TASARIMI

Bu projede, iki kamera ile alınan hareketli görüntüleri değerlendirerek, otonom araçlara ya da mobil robotlara engel tanıma ve engel aşma özelliklerini kazandırmayı hedefleyen gerçek zamanlı bir sistem geliştirilmiştir.

Geliştirilen sistem iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada uygulamanın gerçek zamanlı adımları gerçekleştirilmeden önce, sistemin kullanacağı başlangıç değerleri bulunur. Sistemin ihtiyaç duyduğu başlangıç değerleri, kamera kalibrasyonu sonucu elde edilen dahili ve harici parametrelerdir. Eğer görüntü alımı yapacak kameralar paralel olacak ve optik eksenlerde dönme olmayacak şekilde konumlandırılmışsa, kamera kalibrasyonu aşaması uygulanmadan doğrudan ikinci aşamaya geçilir. İkinci aşama sistemin gerçek zamanlı adımlarından oluşur. Şekil 3.1’de sistemin başlangıç adımları görülmektedir.



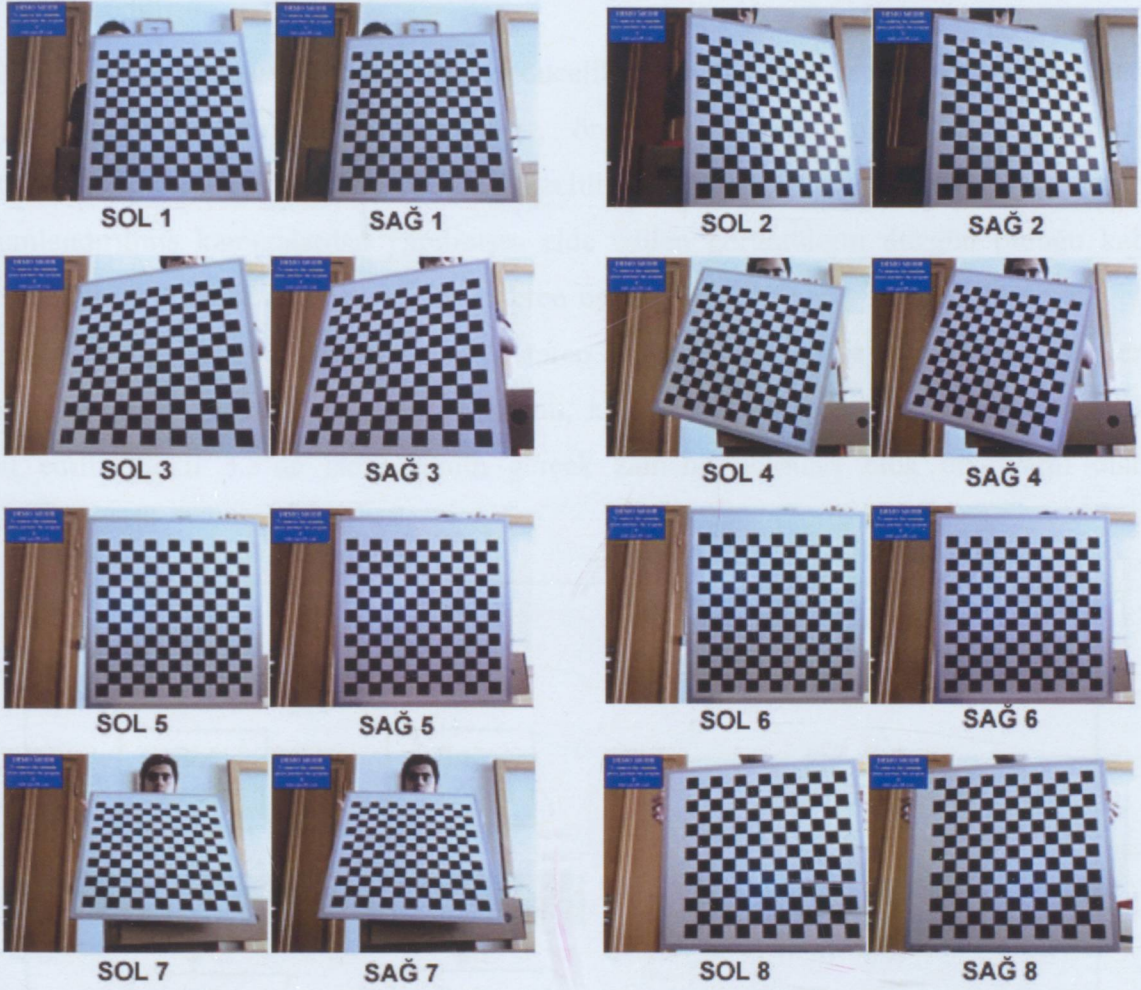
Şekil 3.1 Tasarlanan sistemin başlangıç adımları

Sistemin başlangıç adımları epipolar doğru kısıtını sağlamak amacıyla, stereo görüntülerin düzeltilmesi aşamasının ihtiyaç duyduğu dahili ve harici parametrelerin elde edilmesi için uygulanır. Başlangıç adımları Şekil 3.1’den de görüldüğü gibi,

- görüntü alımı ve
- kalibrasyon işlemi adımlarından oluşur.

8'er adet resmi çekilir. Resimler sağ ve sol kamera için aynı anda çekilir. Şablon, her iki kamera tarafından tamamı görülecek şekilde yerleştirilir. Resimlerden elde edilen bilgiler ışığında kalibrasyon işlemi adımları uygulanır ve her iki kameranın ayrı ayrı dahili ve harici parametreleri elde edilir. Bu parametrelerin bir kere elde edilmesi gerçek zamanda görüntülerin rektifiye edilmesi için yeterlidir. Bu çalışmada 3 cm x 3 cm boyutlarında, yatay

ve dikey yönde 13 x 13 adet kare içeren kalibrasyon şablonunun, her bir kamera için 8'er adet resmi çekilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Kalibrasyon şablonunun farklı açılardan ve uzaklıklardan çekilmiş görüntüleri

Kalibrasyon adımında, 8 görüntü çifti için, aşağıdaki adımlar tekrar edilir: Kalibrasyon adımları “Open Computer Vision Library” (sourceforge.net/projects/opencv/) kütüphanesinin fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1. Sağ ve sol resim, gri seviyesine dönüştürülür.
2. Kalibrasyon şablonunun içindeki köşelerin pozisyonları belirlenir. Eğer tüm köşeler bulunamazsa kameralar kalibre edilemez. Örneğin Şekil 3.2'deki 13 x 13 adet kareye sahip kalibrasyon şablonu için toplam köşe sayısı 12 x 12'dir. Eğer bu işlem sonucunda 12 x 12 adet köşe bulunamazsa, kalibrasyon işlemi devam etmez. Kalibrasyon şablonundaki köşeler şu şekilde bulunur:

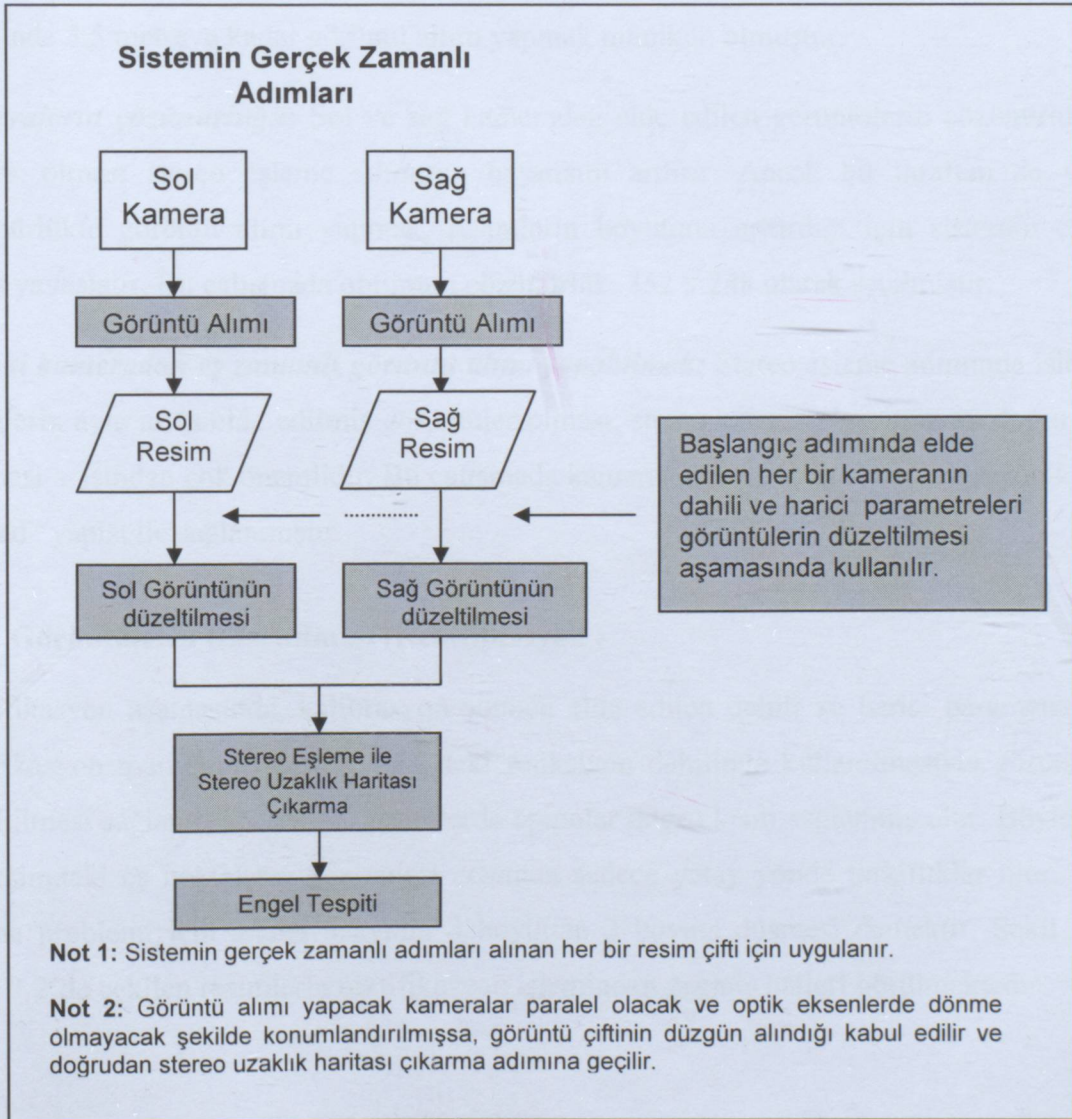
Görüntüye genişleme (dilaton) işlemi uygulanarak kareler birbirlerinden ayrılır.

Görüntü siyah-beyaza çevrilir.

Kareye benzer her kapalı kutunun köşeleri bulunur.

3. Bulunulan köşelerin koordinat bilgileri, kullanılarak kameraların dahili ve harici parametreleri ayrı ayrı hesaplanır.
4. Her iki kamera için bulunan dahili ve harici parametreler ışığında rektifikasyon matrisi elde edilir.

Sistemin gerçek zamanlı aşamasında ise öncelikle her iki kameradan eş zamanlı olarak görüntü alımı yapılır. Alınan görüntüler, önceden kamera kalibrasyonu yapılmışsa, kalibrasyon parametreleri kullanılarak düzeltilir. Eğer görüntü alımı, paralel olarak konumlandırılmış kameralardan yapılmışsa elde edilen görüntülerin düzgün olduğu kabul edilir ve stereo eşleme adımına geçilir. Stereo eşleme adımında sağ ve sol kameradan elde edilmiş eş zamanlı görüntüler kullanılarak stereo uzaklık haritası elde edilir. Ardından stereo uzaklık haritası üzerinden engellerin konumu, kameralara olan uzaklığı ve kapladığı alan tespit edilir. Şekil 3.3’de ise sistemin gerçek zamanlı adımları blok diyagramı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Tasarlanan sistemin gerçek zamanlı adımları

3.1 Görüntü Alımı

Görüntü alımı iki adet 90 derece görme açısına sahip, renkli video kamera ile yapılır. Kameralardan görüntü alımı yaparken dikkat edilmesi gereken dört önemli husus vardır:

Kameraların konumlandırılması: Daha önce de bahsedildiği gibi kameraların birbirine paralel olacak şekilde konumlandırılması, kamera kalibrasyonu ve görüntülerin düzeltilmesi adımlarını geçmemizi sağlar. Bu da gerçek zamanlı bir sistem tasarımı için en önemli husus olan çalışma zamanı konusunda önemli bir avantaj sağlar.

Kameraların arasındaki mesafe: Sistemin çalışacağı ortama göre kameraların arasındaki mesafeye karar verilir. Kameraların arasındaki mesafenin büyük olması daha geniş ve uzak bir alanı görmeyi sağlarken, kameraların arasındaki mesafenin küçük olması kısa mesafelerde daha ayrıntılı ve doğru sonuçlar alınmasını sağlar. Bu çalışmada kameralar arasındaki mesafe 12 cm olarak belirlenmiştir. Kameraların arasındaki mesafenin 12 cm ile sabitlenmesi sayesinde 3.5 metreye kadar görüntü alımı yapmak mümkün olmuştur.

Kameraların çözünürlüğü: Sol ve sağ kameradan elde edilen görüntülerin çözünürlüğünün yüksek olması stereo eşleme adımının başarısını artırır. Ancak bir taraftan da yüksek çözünürlükte görüntü alımı yapmak, resimlerin boyutunu arttırdığı için sistemin çalışma hızını yavaşlatır. Bu çalışmada optimum çözünürlük, 352 x 288 olarak seçilmiştir.

Her iki kameradan eş zamanlı görüntü alımı yapabilmek: Stereo eşleme adımında işlenecek resimlerin aynı anda elde edilmiş görüntüler olması, stereo eşleme algoritmanın doğru sonuç üretmesi açısından çok önemlidir. Bu çalışmada kameralar arasındaki senkronizasyon kurulan "thread" yapısı ile sağlanmıştır.

3.2 Görüntülerin Düzeltilmesi (Rektifikasyon)

Rektifikasyon aşamasında, kalibrasyon sonucu elde edilen dahili ve harici parametreler ile rektifikasyon matrisinin, Eşitlik 2.34'deki fonksiyon dahilinde kullanılmasıyla görüntülerin düzeltilmesi sağlanır. Düzeltelen resimlerde epipolar doğru kısıtı sağlanmış olur. Böylece her iki resimdeki eş noktaların konumları arasında sadece yatay yönde farklılıklar olur. Bu da eşleme problemi için arama uzayının 3 boyuttan 2 boyuta düşmesi demektir. Şekil 3.4'te, Şekil 3.2'de çekilen resimlerin rektifikasyon işleminden geçmiş halleri görülmektedir.



Şekil 3.4 Şekil 3.2'deki görüntülerin rektifikasyon sonucu elde edilen görüntüleri

3.3 Stereo Eşleme Algoritması

Stereo eşleme problemi, bir resimdeki herhangi bir pikselin ya da piksel grubunun, diğer eş resimdeki karşılık geldiği konumu bulmaya çalışır. Eşleşen bölgelerin konumları arasındaki farkları temsil eden görüntüye stereo uzaklık denir. Stereo eşleme, genellikle çalışma süresi maliyeti çok yüksek olan bir işlemdir. Stereo eşleme algoritmasını daha başarılı ve hızlı kılmak için bir önceki adımda rektifikasyon işlemi sonucunda y eksenini doğrultusunda paralellliği sağlanmış görüntüler kullanılır.

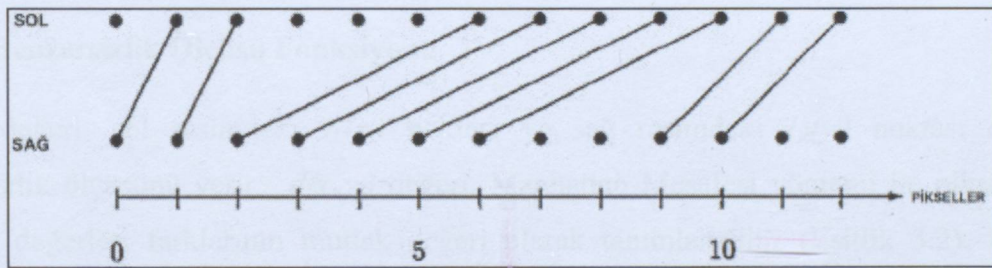
Bu çalışmada stereo eşleme problemi için kameraların paralel ya da görüntülerin rektifiye edilmiş olduğunu kabul eden Birchfield satır satır eşleme algoritması (Stan Birchfield ve Carlo Tomasi, 1999) kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan stereo eşleme algoritmasının en önemli dört özelliği aşağıda listelenmiştir:

1. Birçok stereo eşleme algoritmasının hatalı sonuçlar verdiği tekdüze ve dokusuz bölgelerdeki eşleme problemi büyük bir oranda aşılmıştır.

2. Görüntü örnekleme sonucu yaşanan hatalı eşleme problemi, pikseller arasındaki benzersizlik ölçüsünü bulan fonksiyon ile bertaraf edilmiştir.
3. Dinamik programlamanın en büyük dezavantajlarından biri olan çalışma süresi maliyeti, kötü düğümlerin elenmesiyle azaltılmıştır.
4. Satır satır eşleme sonucu elde edilen stereo uzaklık haritası, tanımlanan iyileştirici fonksiyonlar ile dikey ve yatay yönde taranarak yanlış eşleşmeler mümkün olduğunca temizlenmiştir.

3.3.1 Satır Satır Eşleme

Sol resmin bir satırındaki pikselleri, sağ resmin eş satırındaki pikseller ile eşlemeye satır satır eşleme denir. Bu eşleme algoritmasında her bir satır diğer satırlardan bağımsız olarak değerlendirilir. Bir satır çiftini eşlemek için bir çok kombinasyon vardır. Bu kombinasyonlardan en az maliyetli olan eşleşme en iyi eşleşme olarak seçilir. Şekil 3.5’de örnek bir eşleşme kombinasyonu verilmiştir. Eşleşmelerin maliyeti, maliyet fonksiyonu ile belirlenir (Eşitlik 3.1)



Şekil 3.5 Örnek eşleme sırası (Stan Birchfield ve Carlo Tomasi, 1999)

Sol resimdeki pikselin konumunu x , sağ resimdeki eş pikselin konumunu y ile gösterecek olursak, her bir eşleşmeyi de (x,y) çifti ile gösterebiliriz. Şekil 3.5’deki görülen eşleşme sırası şu şekildedir: $M = \{(1,0), (2,1), (6,2), (7,3), (8,4), (9,5), (10,6), (11,9), (12,10)\}$

Sağ satırda yer alan y koordinatındaki bir piksel ile eşleşen sol satırda yer alan x koordinatındaki bir piksel için stereo uzaklık değeri, $d(x) = x - y$ 'dir. Stereo uzaklık değerinin küçük olduğu noktalar, uzak bölgeleri gösterirken, fark değerinin büyük olduğu noktalar yakın bölgeleri gösterir. Şekil 3.5'teki örnekte, ortadaki beş eşleşme yakın bir bölgeye aitken, sol uçtaki iki eşleşme en uzak bölgeye tekabül eder. Eşleşemeyen pikseller bir kamera tarafından görülen diğer kamera tarafından görülemeyen noktalardır. Diğer bir deyişle üst üste çakışan piksellerdir. Üst üste çakışan pikseller kümesi, iki taraftan eşleşen pikseller ile sınırlandırılır. Piksellerin eşleşememesi durumu, genellikle bölgeler arasındaki geçişlerin olduğu yerlerde yani kenarların çevresinde oluşur.

3.3.2 Maliyet Fonksiyonu

Her bir eşleme sırası M ile, eşleme sırasının maliyeti ise $\gamma(M)$ fonksiyonu ile ifade edilsin. Bu fonksiyon, M 'nin ne kadar yanlış bir eşleme olduğunu ölçer. Yani en iyi eşleme sırası, en düşük maliyete sahip olan eşleme sırasıdır. Eşleme sırası maliyetini ölçen fonksiyon Eşitlik 3.1'de görülmektedir.

$$\gamma(M) = N_{occ} \kappa_{occ} - N_m \kappa_r + \sum_{i=1}^{N_m} d(x_i, y_i) \quad (3.1)$$

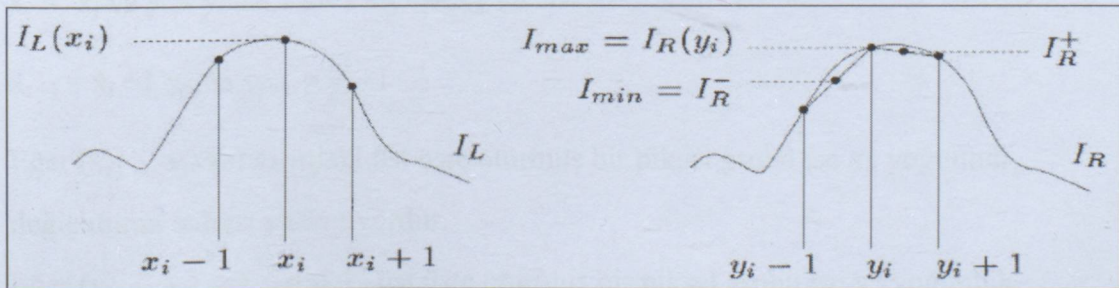
Olası bir eşleme sırası için toplam maliyet, her bir üst üste çakışan piksel grubu için sabit bir ceza, her bir eşleşen piksel için sabit bir ödül ve eşleşen piksellerin benzersizlik ölçüsü toplamı ile ifade edilir. Yukarıdaki eşitlikte κ_{occ} , üst üste oturan piksel grubu için sabit ceza; κ_r , eşleşme için sabit ödül; $d(x_i, y_i)$, x_i ve y_i pikselleri arasındaki benzersizlik ölçüsü; N_{occ} üst üste çakışan piksel grubunun sayısı; N_m ise eşleşen piksellerin sayısıdır.

3.3.3 Benzersizlik Ölçüsü Fonksiyonu

$d(x_i, y_i)$ değeri, sol resimdeki $I_L(x_i)$ noktası ve sağ resimdeki $I_R(y_i)$ noktası arasındaki benzersizlik ölçüsünü verir. $d(x_i, y_i)$ değeri, Manhattan Mesafesi yöntemi ile piksellerin gri seviyesi değerleri farklarının mutlak değeri olarak tanımlanabilir (Eşitlik 3.2). Ancak bu ölçünün, görüntü örnekleme sonucu oluşabilecek yoğunluk farklarının aniden değiştiği bölgelerde kullanılması uygun değildir.

$$d(x_i, y_i) = |I_L(x_i) - I_R(y_i)| \quad (3.2)$$

Bu sebepten dolayı bu çalışmada, görüntü örneklemesine duyarsız olan bir benzersizlik ölçüsü fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon yoğunluk farkı ölçülecek piksellerin komşularının ara değerlerini de hesaba katarak çalışır. Şekil 3.6'da benzersizlik ölçüsü fonksiyonun nasıl çalıştığı görülmektedir.



Şekil 3.6 Komşu Piksellerin Ara Değer Yoğunlukları (Stan Birchfield ve Carlo Tomasi, 1999)

Öncelikle $I_R(y_i)$ 'nin komşularının doğrusal ara değer yoğunluğu olan I_R^- ve I_R^+ Eşitlik 3.3 'de görüldüğü gibi hesaplanır. (Stan Birchfield ve Carlo Tomasi, 1999)

$$\begin{aligned} I_R^- &: \frac{1}{2} * (I_R(y_i) + I_R(y_{i-1})) \\ I_R^0 &: I_R(y_i) \\ I_R^+ &: \frac{1}{2} * (I_R(y_i) + I_R(y_{i+1})) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Ardından yukarıda hesaplanan değerlerden minimum ve maksimum yoğunluk değerleri bulunur (Eşitlik 3.4).

$$I_{Rmin} = \min(I_R^-, I_R^0, I_R^+), I_{Rmax} = \max(I_R^-, I_R^0, I_R^+) \quad (3.4)$$

Yukarıda $I_R(y_i)$ için yapılan hesaplamaların aynısı $I_R(x_i)$ için de yapıldıktan sonra,

$$d_1 = \max(0, I_L(x_i) - I_{Rmax}, I_{Rmin} - I_L(x_i)) \text{ ve } d_2 = \max(0, I_R(x_i) - I_{Lmax}, I_{Lmin} - I_R(x_i)) \quad (3.5)$$

benzersizlik ölçüleri hesaplanır. Son olarak d_1 ve d_2 değerlerinden minimum olan değer, x_i ve y_i arasındaki benzersizlik ölçüsü olarak belirlenir (Eşitlik 3.6).

$$d(x_i, y_i) = \min(d_1, d_2) \quad (3.6)$$

3.3.4 Kısıtlar

Eşleme algoritması belirli kısıtlar altında çalışır. Bu kısıtlar muhtemel eşleşme sırasını bulmak için sistematik bir arama yapmayı ve olası olmayan eşleme sıralarını elemek için getirilmiştir. Eşleme algoritmasına getirilen kısıtlar şu şekildedir:

$$K1. 0 \leq x_i - y_i \leq \Delta \quad i=1, \dots, N_m$$

$$K2. y_1 = 0$$

$$K3. x_{N_m} = n - 1$$

$$K4. x_i < x_j \text{ ve } y_i < y_j \text{ ise } 1 \leq i < j \leq N_m$$

$$K5. x_{i+1} = x_i + 1 \text{ ya da } y_{i+1} = y_i + 1$$

K6. Eğer $(x_i, \dots, x_j)$ sol satırdaki üst üste oturmuş bir piksel grubu ise x_j , yoğunluk değişiminin soluna yaslanıyordur.

K7. Eğer $(y_i, \dots, y_j)$ sağ satırdaki üst üste oturmuş bir piksel grubu ise y_i , yoğunluk değişiminin sağına yaslanıyordur.

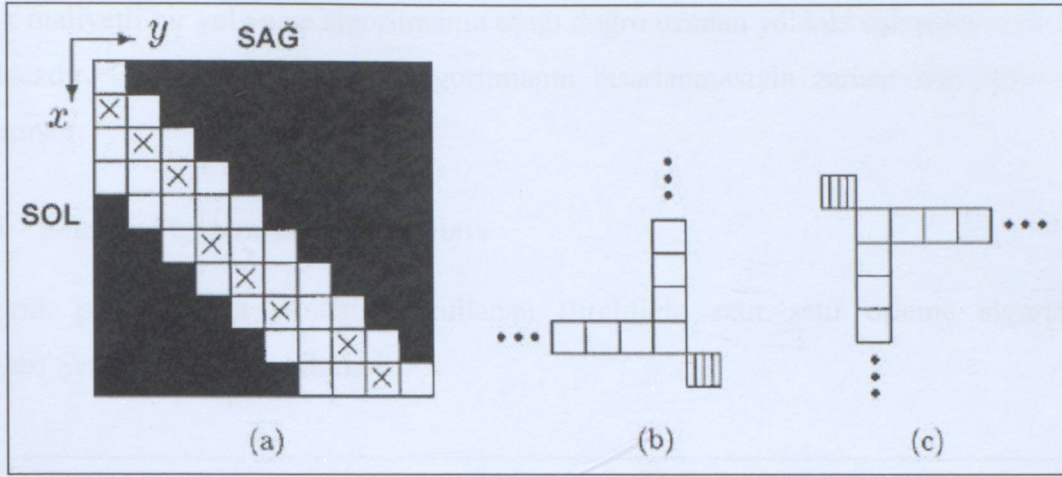
K1 kısıtında olası fark değeri 0 ile maksimum fark değeri olan Δ arasında değişebileceği gösterilmektedir. Bu kısıtla arama alanı daraltılmıştır. Aynı zamanda görüntüler daha önce düzeltildiği için fark değeri negatif bir değer alamaz. K2 ve K3 kısıtında sağ satırda yer alan en soldaki piksel ile sol satırda yer alan en sağdaki pikselin bir sonraki satırdaki pikseller ile eşleşeceği kabul edilir. K4 kısıtı, dinamik programlamayı kolaylaştırmak için teklik kısıtını ve sıralılık kısıtını sağlar. K5 kısıtı iki resimde piksellerin aynı anda üst üste oturmamasını sağlar. K6 ve K7 kısıtı ise desensiz ortamlardaki eşleme problemini aşmak için getirilmiş kısıtlardır. Bu kısıtlar, yoğunluk değişiminin beraberinde derinlik devamsızlığını da (yakındaki nesne ile uzaktaki nesne arasındaki yoğunluk değişimi) getirdiğini varsayar.

3.3.5 Dinamik Programlama ile Eşleme

Bu çalışmada optimum eşleme sırasını bulmak için dinamik programlama yöntemi kullanılmıştır. Algoritmanın tasarımı yukarıda açıklanan maliyet fonksiyonu, benzersizlik ölçüsü fonksiyonu ve tanımlanan kısıtlar dahilinde yapılmıştır.

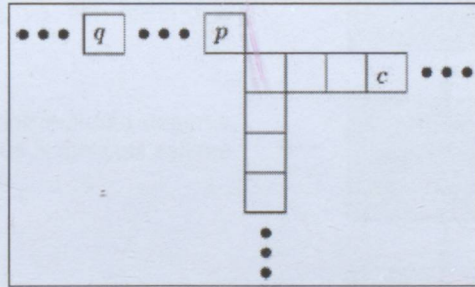
Şekil 3.7 (a)'da maksimum fark değeri 3 olacak şekilde, 10 piksele sahip iki satır için arama matrisi gösterilmiştir. Her bir (x,y) hücresi, sol resimdeki x pikseli ile sağ resimdeki y pikseli için olası eşleşmeleri göstermektedir. K1, K2 ve K3 kısıtında belirtildiği gibi matristeki bir çok hücrenin eşleşmesine izin yoktur. Bu hücreler siyah renkle gösterilmiştir. Eşleme sırasındaki eşleşmeler ise "x" ile işaretlenmiş hücrelerdir. Aşağıdaki örnekte eşleme sırası: $\{(1, 0), (2, 1), (3, 2), (5, 3), (6, 4), (7, 5), (8, 7), (9, 8)\}$ şeklindedir. "x" işaretine sahip olmayan herhangi bir satır ya da sütun çakışmanın olduğu bir piksele işaret eder.

Şekil 3.7 (b)'de K4 ve K5 kısıtına göre her (x_i, y_i) eşleşmesi için olası bir önceki eşleşmelerin, (x_{i-1}, y_{i-1}) , hangi hücrelerde olabileceği, Şekil 3.7 (c)'de ise yine K4 ve K5 kısıtına göre her (x_i, y_i) eşleşmesi için olası bir sonraki eşleşmelerin, (x_{i+1}, y_{i+1}) , hangi hücrelerde olabileceği gösterilmektedir.



Şekil 3.7 (a) Arama matrisi (b) Çizgilerle bölünmüş hücre için, olası bir önceki eşleşmeler (c) Çizgilerle bölünmüş hücre için, olası bir sonraki eşleşmeler (Stan Birchfield ve Carlo Tomasi, 1999)

Dinamik programlamada yukarıdan aşağı ve sağdan sola tarama yapılarak ilgili her bir hücrenin bir önceki muhtemel eşleşmeleri taranır ve ilgili hücre için en düşük maliyetli yol, en iyi yol olarak seçilir. Bir önceki eşleşme olarak öncelikle çakışmayan piksel, ardından sol tarafta çakışan pikseller, daha sonra da sağ tarafta çakışan pikseller incelenir. Ancak her bir hücre için bu aramayı yapmak zaman açısından çok maliyetlidir.



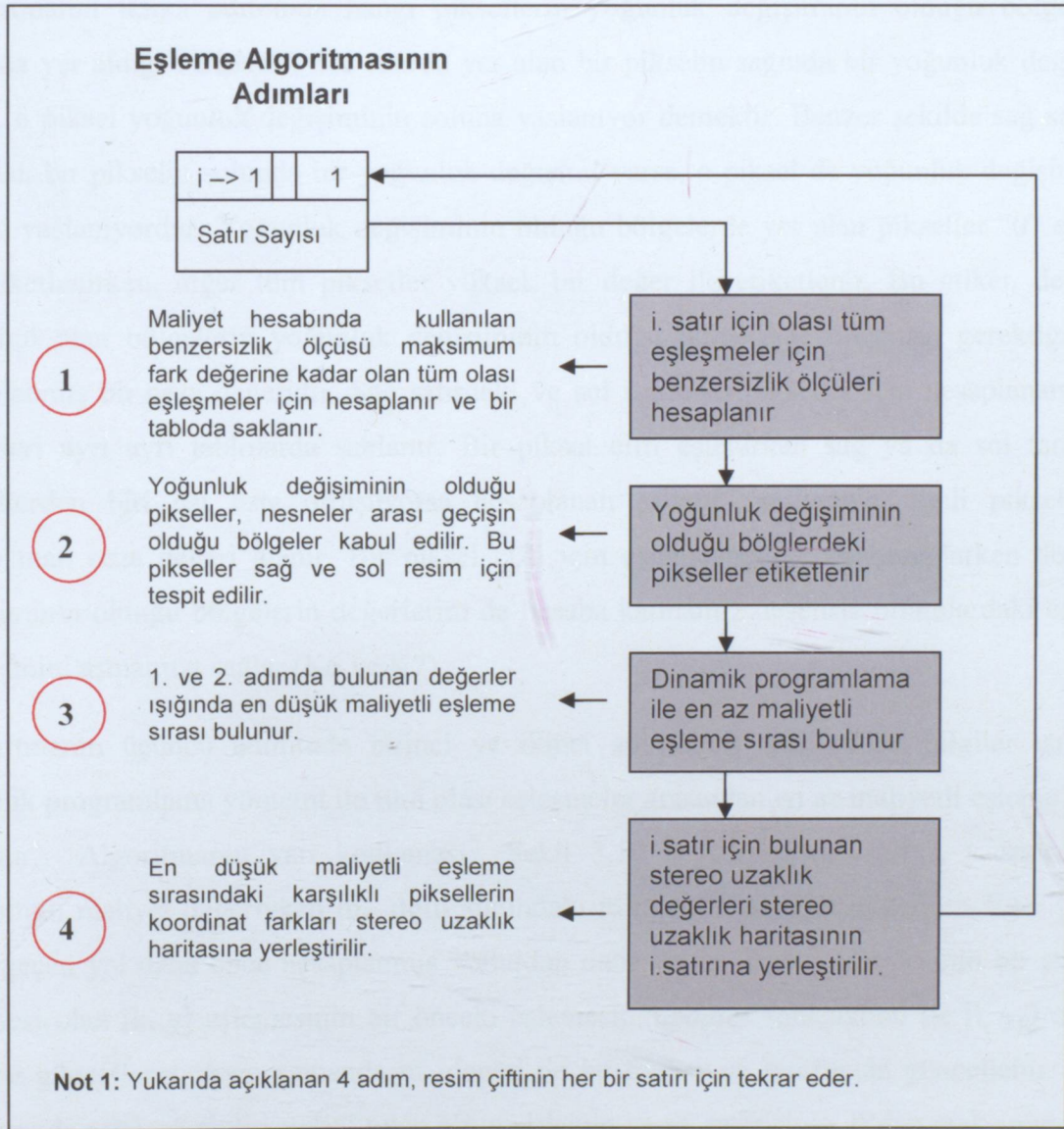
Şekil 3.8 $\gamma(q) < \gamma(p)$ olduğunu kabul edersek p eşleşmesi için sağa doğru tarama yapılmazsa arama algoritmasının karmaşıklığı azaltılmış olur.

Şekil 3.8'de görüldüğü gibi aralarında sağ resim için çakışan pikseller kümesi olan bir p eşleşmesi ve bu eşleşmeyi takip eden bir c eşleşmesi olduğunu kabul edelim. Aynı zamanda p ile aynı satırda ve p'nin daha solunda yol maliyeti daha düşük olan ($\gamma(q) < \gamma(p)$) bir q eşleşmesi olduğunu varsayarsak; q eşleşmesi, c'nin olası bir önceki eşleşmelerinden biri olur; ve c'den q'ya uzanan yolun maliyeti, c'den p'ye uzanan yolun maliyetinden küçük olur. Bu durumda algoritmanın p'den c'ye doğru uzanan yoldaki eşleşmeleri taraması yani soldan sağa doğru yayılmasına gerek yoktur. Aynı şekilde p'nin bitişiğindeki sütunun üst tarafında daha

düşük maliyetli bir yol varsa algoritmanın aşağı doğru uzanan yoldaki eşleşmeleri de taraması gereksizdir. Bu kısıtlar dahilinde algoritmanın tasarlanmasıyla zaman maliyetini oldukça azaltmıştır.

3.3.6 Eşleme Algoritmasının Adımları

Dinamik programlama yöntemini kullanan Birchfield satır satır eşleme algoritmasının adımları Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Birchfield satır satır eşleme algoritması akış diyagramı

Algoritmanın adımları uygulanmadan önce üst üste oturan piksel grubu için sabit ceza, eşleşen pikseller için sabit ödül ve maksimum stereo uzaklık değeri (maximum disparity) sabitleri belirlenir. Bundan sonraki adımlar sağ ve sol görüntünün her bir satırı için tekrar

edilir. Eşleşmelerin maliyetini hesaplayıp, optimum eşleme sırasını bulmadan önce her bir adımda ihtiyaç duyulacak benzersizlik ölçüsü hesaplaması ve yoğunluk değişiminin olduğu sınır bölgeleri, ilgili satırdaki tüm pikseller için bir kere de hesaplanır

Algoritmanın birinci adımında sağ satırdaki her bir piksel için “0” stereo uzaklık değerinden izin verilen maksimum stereo uzaklık değerine kadar olan tüm olası eşleşmelerin benzersizlik ölçüsü, 3.3.3’de açıklanan yöntem ile hesaplanır ve elde edilen değerler benzersizlik tablosuna yerleştirilir.

Algoritmanın ikinci adımında hangi piksellerin yoğunluk değişiminin olduğu bölgelerin yanında yer aldığı belirlenir. Sol satırda yer alan bir pikselin sağında bir yoğunluk değişimi varsa, o piksel yoğunluk değişiminin soluna yaslanıyor demektir. Benzer şekilde sağ satırda yer alan bir pikselin solunda bir yoğunluk değişimi varsa, o piksel de yoğunluk değişiminin sağına yaslanıyordur. Yoğunluk değişiminin olduğu bölgelerde yer alan pikseller “0” etiketi ile etiketlenirken, diğer tüm pikseller yüksek bir değer ile etiketlenir. Bu etiket, derinlik değişimi olan bölgelerin yoğunluk değişiminin olduğu bölgelerde oluşması gerektiği için tanımlanmış bir ceza değeridir. Sağ satırdaki ve sol satırdaki pikseller için hesaplanan ceza değerleri ayrı ayrı tablolarda saklanır. Bir piksel çifti eşlenirken sağ ya da sol taraftaki piksellerden biri üst üste örtüşüyorsa hesaplanan eşleme maliyetine, ilgili piksel için hesaplanan ceza değeri atanır. Bir piksel çifti için eşleme maliyetini hesaplarken derinlik değişiminin olduğu bölgelerin değerlerini de hesaba katmamız desensiz ortamlardaki eşleme problemini aşmamızı sağlar (K6 ve K7).

Algoritmanın üçüncü adımında birinci ve ikinci adımlarda elde edilen bilgiler ışığında dinamik programlama yöntemi ile tüm olası eşleşmeler arasından en az maliyetli eşleme sırası bulunur. Algoritmanın yarı kodlaması Şekil 3.10’da verilmiştir. $m_x[x]$, x satırındaki minimum maliyet değeri m_y , ilgili sütündaki minimum maliyet değeridir. Eğer $[i, y_p]$ ‘den geçen yol daha önce hesaplanmış yollardan daha iyi ise $[i, y_p]$ eşlemesinin bir sonraki eşlemesi olan $[k, y]$ eşlemesinin bir önceki eşlemesi, “update” fonksiyonu ile $[i, y_p]$ olacak şekilde güncellenir. Aynı zamanda m_x değeri de bu fonksiyon tarafından güncellenir. 1 - 7 satırlarında eşleşme maliyetlerini tutan phi matrisinin ve m_x matrisinin, 0’dan maksimum fark değerine kadar olan tüm olası eşleşmeler için ilk değerleri atanır. 9. satırda ise m_y ’nin ilk değeri belirlenir. 11 - 20 satırları her bir $[i, y_p]$ hücresi için tekrar edilir. Her bir hücrenin bir sonraki eşlemesi bitişiğindeki hücre olacak şekilde aynı maliyet hesabı yapılır. 13 - 16 satırlarında eğer ilgili hücre bulunduğu sütunun en iyilerinden biriye sol tarafta üst üste oturan piksel grubu olacak şekilde bir sonraki eşleme aranır. 18 - 20 satırlarında ise eğer ilgili

hücre bulunduğu satırın en iyisiye sağ tarafta üst üste oturan piksel grubu olacak şekilde bir sonraki eşleme aranır.

Algoritmanın dördüncü adımında ise üçüncü adımda bulunan optimum eşleme sırasındaki piksel çiftlerinin koordinatları arasındaki farklar, son eşleşmeden başlayarak ilk eşleşmeye kadar stereo uzaklık haritasının ilgili satırına atanır.

```

1  For i ← 0 to MAXDISP
2  Phi[i,0] = diss[i,0]
3  For y ← 1 to COLS - 1
4  For i ← 0 to MAXDISP
5  Phi[i,y] = ∞
6  For x ← 0 to COLS - 1
7  mx[x] = ∞
8  For yp ← 0 to COLS - 2
9  my = min{phi[0,yp], phi[1,yp], ..., phi[MAXDISP,yp]}
10 For i ← 0 to MAXDISP
11   update(i, yp, i, yp+1)
12   if phi[i, yp] ≤ my then
13     y = yp+1
14     for k ← i + 1 to MAXDISP
15       if VL[y + k - 1] then
16         update(i, yp, k, y)
17   if phi[i, yp] ≤ mx[i + yp] and VR[yp + 1] then
18     for k ← 0 to i - 1
19       y = yp + i - k + 1
20       update(i, yp, k, y)

update(i, yp, k, y)
21 if k == i then
22   phinew = phi[i, yp] + diss [y, k] - Kr
23 else
24   phinew = phi[] + diss [y, k] - Kr + KOCC
25 if phinew < phi[i,y] then
26   phi[i,y] = phinew
27   imY[y][k] = yp;
28   imD[y][k] = i;
29   mx[y + i] = min(mx[y + i], phinew)

```

Şekil 3.10 Bu çalışmada kullanılan dinamik programlama ile eşleme algoritması

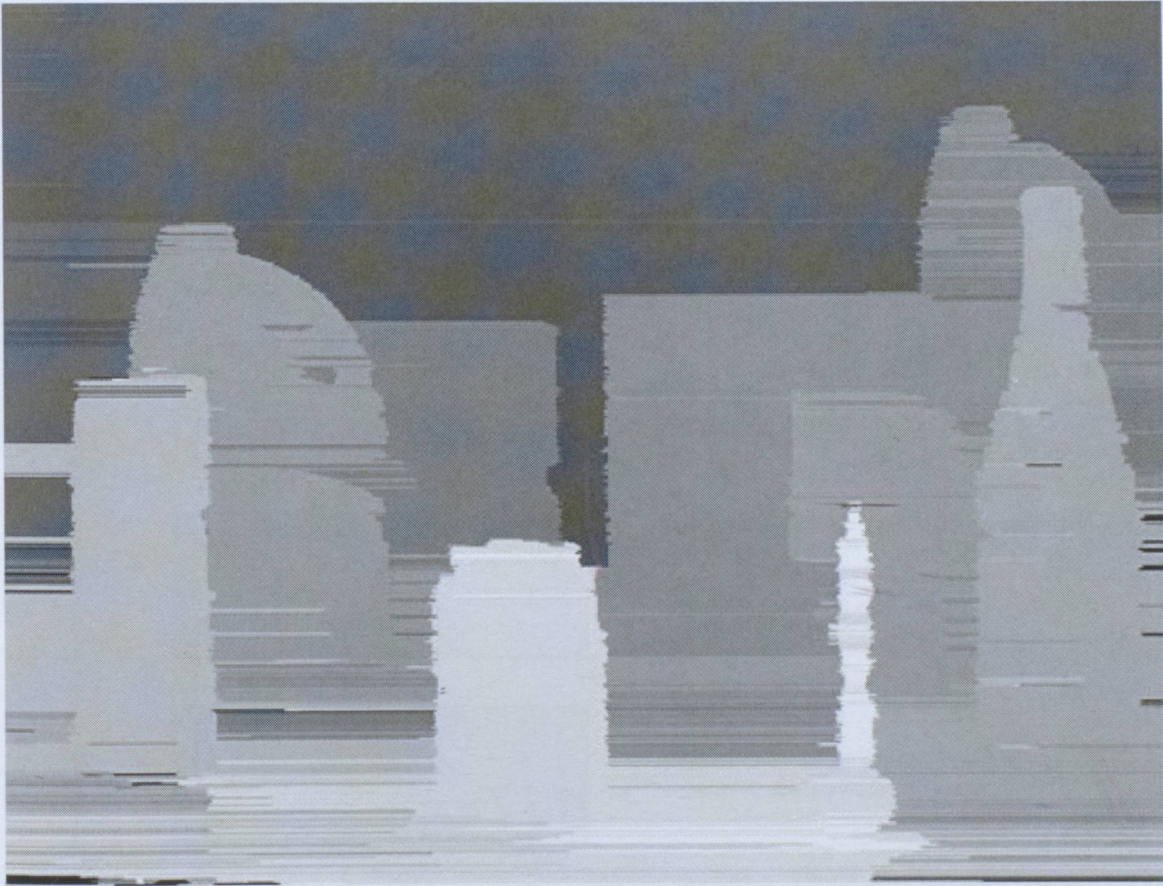
Şekil 3.11 (a) ve (b) 'deki resim çiftlerine dinamik programlama ile satır satır eşleme algoritması uygulandığında elde edilen stereo uzaklık Şekil 3.11 (c) 'de görülmektedir. Stereo uzaklık haritasındaki açık renkli bölgeler yakın bölgeleri işaret ederken, koyu renkli bölgeler uzak bölgeri işaret eder. Şekil 3.11 (c) 'den de görüldüğü gibi, satır satır eşlemeye bağlı olarak nesnelerin sınır çizgilerinde bazı hatalı eşleşmeler olmuştur. Bu bozulmalar, stereo uzaklık haritasının iyileştirilmesi için tanımlanan çeşitli fonksiyonlarla mümkün olduğunca düzeltilmiştir.



(a) Sol Resim



(b) Sağ Resim



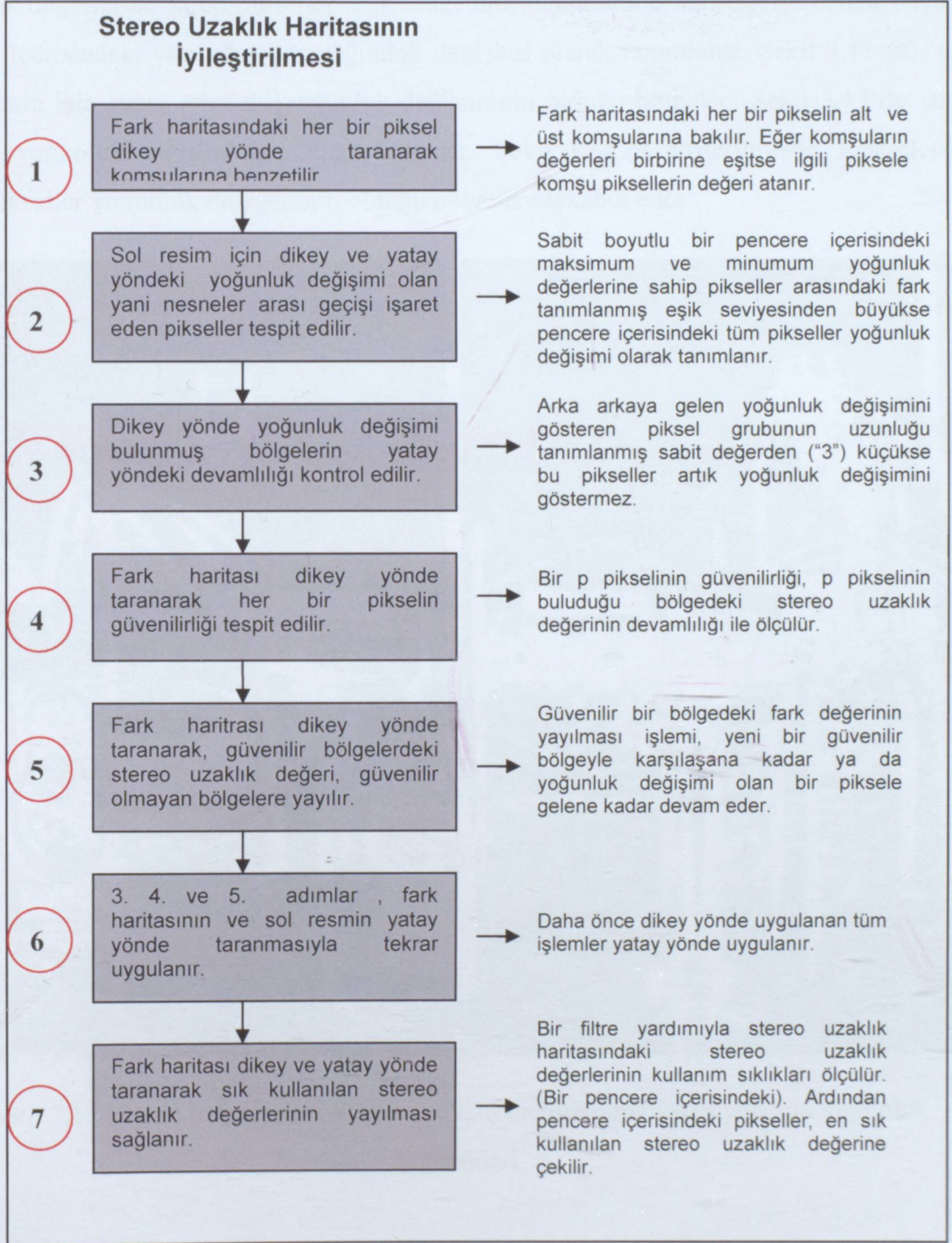
(c) Fark Haritası

Şekil 3.11 (a) Sol resim (b) Sağ resim (c) Stereo uzaklık haritası

3.3.7 Stereo Uzaklık Haritasının İyileştirilmesi

Doğal görüntülerde, komşu satırlar birbirinden ayrı düşünülemez. Eşlemelerin sadece satır bazında yapılması çalışma süresini oldukça azaltırken, diğer taraftan da satırlar arasındaki bilgilerin değerlendirilememesine neden olur. Bitişik satırlar arasındaki bilgiler eşleme sırasında iki boyutlu uzayda arama yaparak değerlendirilebilir. Ancak arama uzayının iki

boyuta çıkması çalışma süresi maliyetini çok artırır. Bu çalışmada da tek boyutlu uzayda arama yapan satır satır eşleme algoritması kullanılarak elde edilen stereo uzaklık haritasının dikey yönde tarama yapan bazı fonksiyonlarla iyileştirilmesi sağlanır. Şekil 3.12' de stereo uzaklık haritasının iyileştirilmesi için uygulanan adımlar gösterilmiştir.

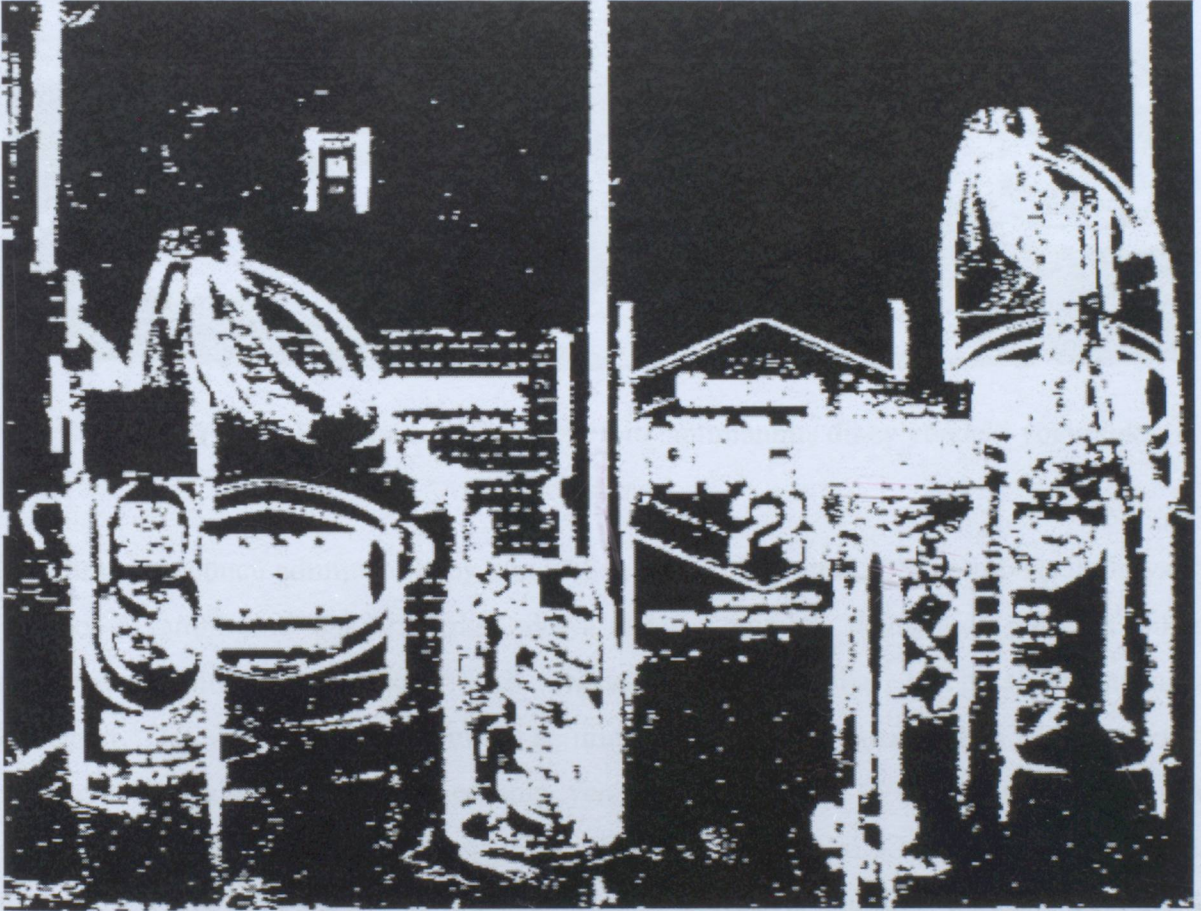


Şekil 3.12 Stereo uzaklık haritasının iyileştirilmesi için uygulanan adımlar

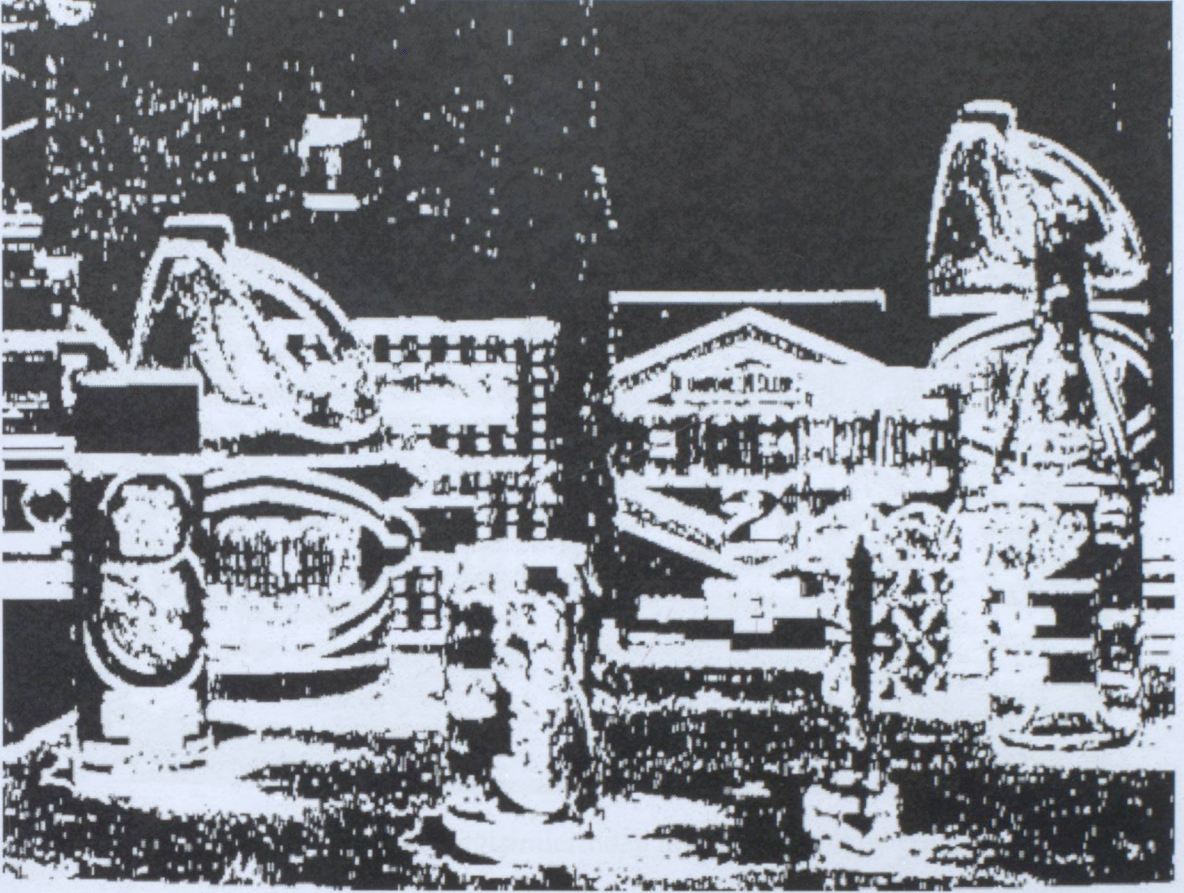
Algoritmanın birinci adımında stereo uzaklık haritasındaki her pikselin dikey yöndeki bitişik komşularının (altındaki ve üstündeki) değerleri karşılaştırılır. Eğer komşularının değerleri birbirine eşitse ilgili piksele komşu piksellerin sahip olduğu fark değeri atanır (Eşitlik 3.7).

$$\begin{aligned} \text{if (disp_map}[i-1][j] == \text{disp_map}[i+1][j]) \\ \text{disp_map}[i][j] = \text{disp_map}[i-1][j]; \end{aligned} \quad (3.7)$$

Algoritmanın ikinci adımında sol resim için sabit boyutlu bir pencere içerisindeki yoğunluk değişimi yatay ve dikey yönde taranır. Pencere içerisindeki maksimum ve minimum yoğunluk değerlerine sahip pikseller arasındaki fark tanımlanmış eşik seviyesinden büyükse pencere içerisindeki tüm pikseller yoğunluk değişimi olarak tanımlanır. Şekil 3.11 (a) 'daki sol görüntü için yatay yöndeki yoğunluk değişiminin olduğu bölgeler Şekil 3.13'de, dikey yöndeki yoğunluk değişiminin olduğu bölgeler Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Resimlerdeki beyaz pikseller yoğunluk değişiminin olduğu bölgelere tekabül eder.



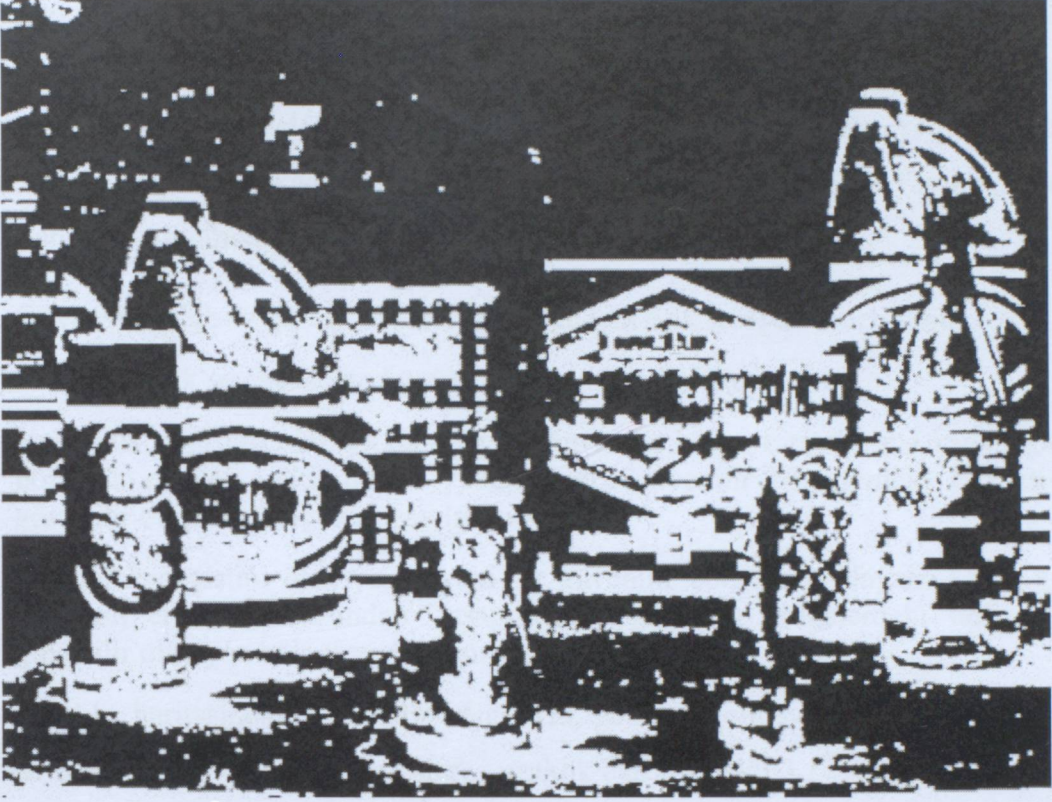
Şekil 3.13 (3 x 1) boyutlarındaki pencere için tanımlanmış yatay yöndeki yoğunluk değişimleri



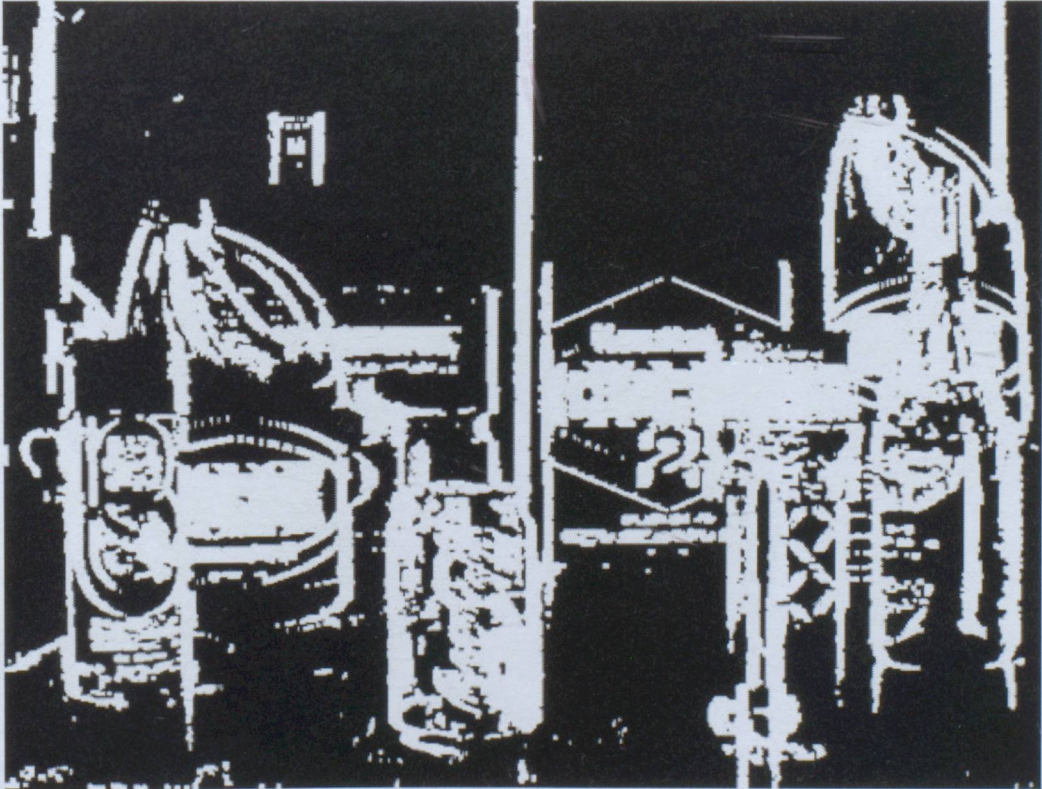
Şekil 3.14 (3 x 1) boyutlarındaki pencere için tanımlanmış dikey yöndeki yoğunluk değişimleri

Algoritmanın üçüncü adımında dikey yöndeki yoğunluk değişimini gösteren piksellerin yatay yöndeki devamlılığına bakılır. Arka arkaya gelen yoğunluk değişimini gösteren piksel grubunun uzunluğu tanımlanmış sabit değerden ("3") küçükse bu pikseller resimden temizlenir. Dikey yöndeki yoğunluk değişimini gösteren resimdeki (Şekil 3.14) gereksiz piksellerin temizlenmesiyle elde edilmiş yeni resim, Şekil 3.15'de gösterilmiştir. Aynı işlemler yatay yöndeki yoğunluk değişimini gösteren resim (Şekil 3.13) için de dikey yönde uygulanır. Yatay yöndeki yoğunluk değişimini gösteren resmindeki gereksiz piksellerin temizlenmesiyle elde edilmiş yeni resim, Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

Algoritmanın dördüncü adımında stereo uzaklık haritasındaki her bir piksel için güvenilirlik hesabı yapılır. Bir p pikselinin güvenilirliği, p pikselinin bulunduğu bölgedeki fark değerinin devamlılığı ile ölçülür. Tarama y yönünde yapılır. Örnek verecek olursak, arka arkaya gelen [4 6 6 6 7 7 7 7 2 9 9 9 9] değerlerine sahip olan fark değerleri kümesi için her bir farkın güvenilirliği, [1 3 3 3 4 4 4 4 1 5 5 5 5] olur.



Şekil 3.15 Gereksiz yoğunluk değişimlerinden arındırılmış dikey yöndeki yoğunluk değişimini gösteren yeni resim

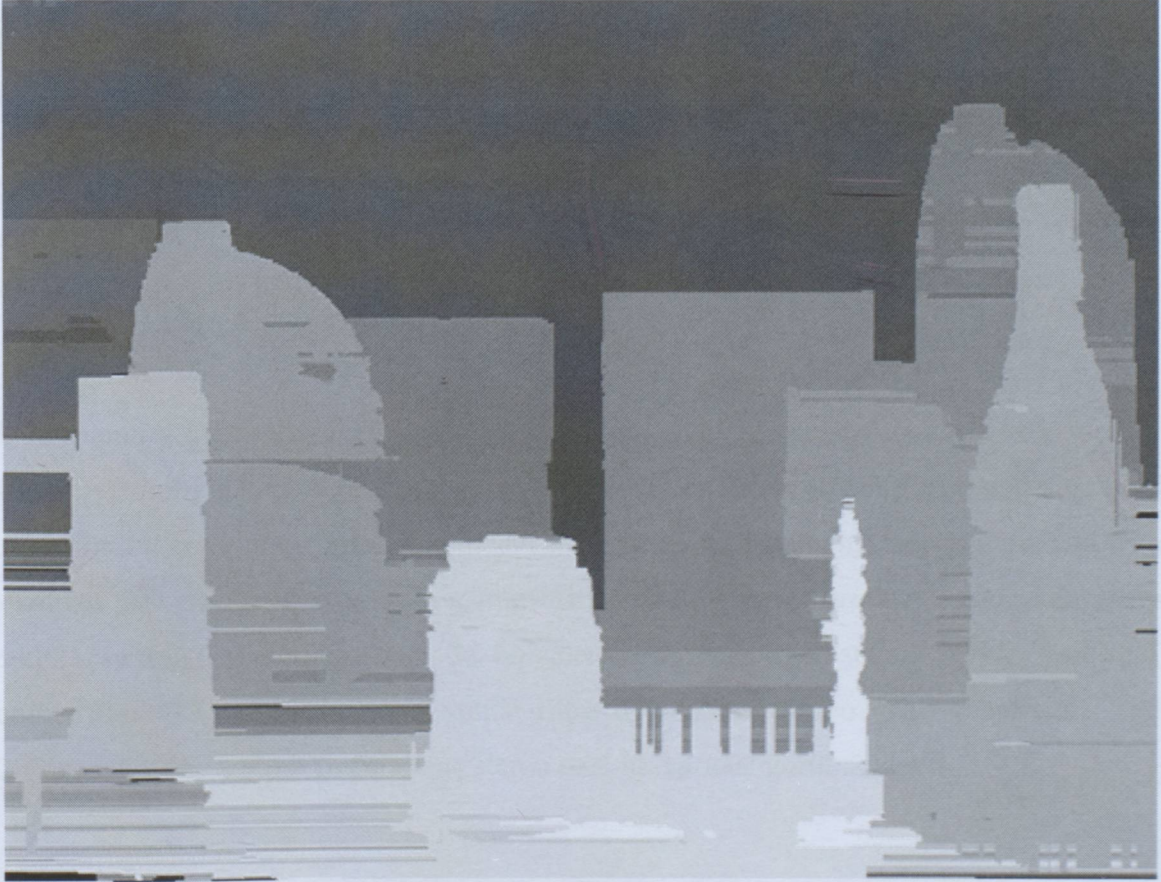


Şekil 3.16 Gereksiz yoğunluk değişimlerinden arındırılmış yatay yöndeki yoğunluk değişimini gösteren yeni resim

Algoritmanın beşinci adımında, üçüncü adımda bulunan yoğunluk değişimini gösteren bölgeler ve dördüncü adımda elde edilen güvenilirlik haritası kullanılarak, stereo uzaklık haritasındaki güvenilir bölgelerin sahip olduğu stereo uzaklık değerlerinin, yoğunluk değişimi olan bir bölgeye rastlayana kadar güvenilir olmayan bölgelere dikey yönde yayılması sağlanır. Algoritmanın bu adımında uygulanan alt adımlar şu şekilde özetlenebilir:

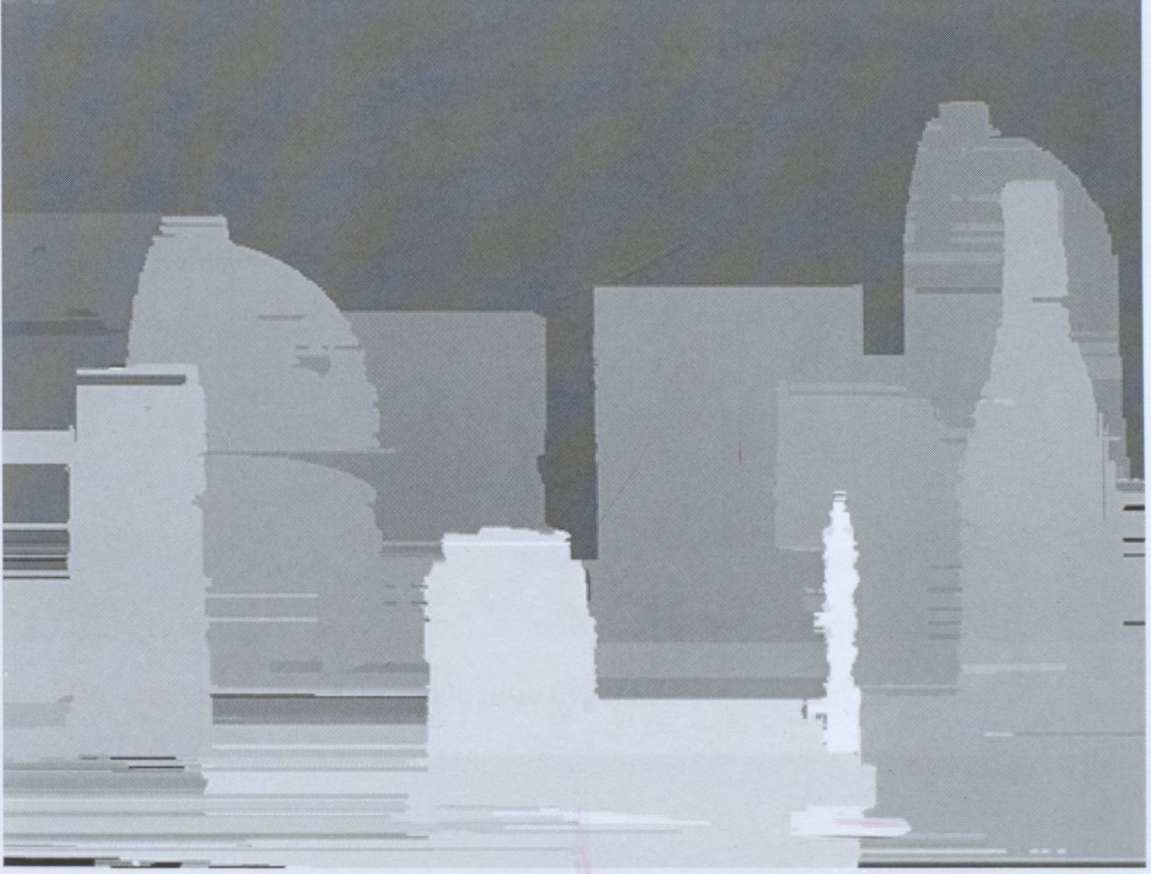
1. Güvenilir bölge ve güvenilir olmayan bölge için eşik seviyeleri belirlenir.
2. Güvenilir eşik seviyesinden büyük olan ilk nokta bulunur.
3. Yoğunluk değişimi olan ya da yeni bir güvenilir bölgeye rastlayana kadar, güvenilir bölgenin en üst noktasından yukarı doğru güvenilir bölgelerdeki fark değerinin güvenilir olmayan bölgelere yayılması sağlanır.
4. Yoğunluk değişimi olan ya da yeni bir güvenilir bölgeye rastlayana kadar güvenilir bölgenin en alt noktasından aşağı doğru güvenilir bölgelerdeki fark değerinin güvenilir olmayan bölgelere yayılması sağlanır.

Stereo uzaklık haritasındaki güvenilir bölgelerin, güvenilir olmayan bölgelere dikey yönde yayılması sonucunda elde edilen yeni stereo uzaklık haritası Şekil 3.17 'de gösterilmektedir.



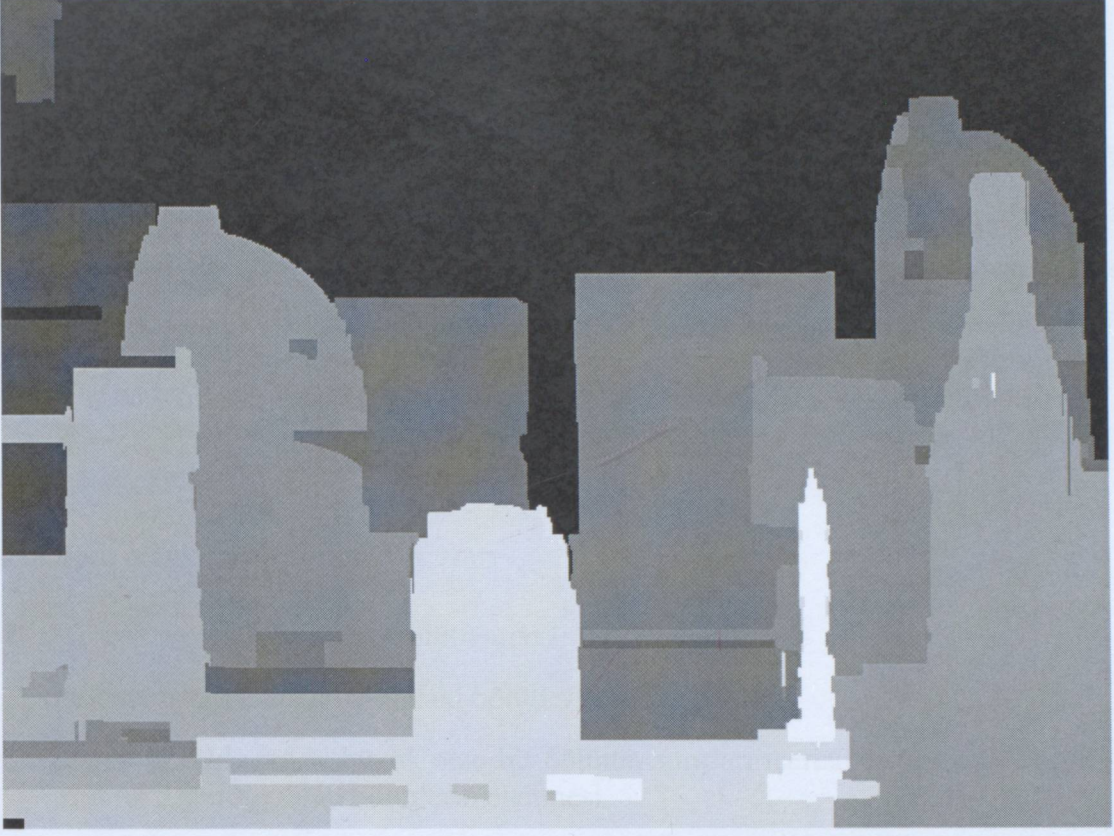
Şekil 3.17 Güvenilir bölgelerin dikey yönde yayılması sonucu elde edilen yeni stereo uzaklık haritası

Algoritmanın üçüncü ve dördüncü adımları yatay yön için tekrar edildikten sonra stereo uzaklık haritasındaki güvenilir bölgelerin, güvenilir olmayan bölgelere yatay yönde yayılması sonucunda elde edilen yeni stereo uzaklık haritası Şekil 3.18 'de gösterilmektedir.

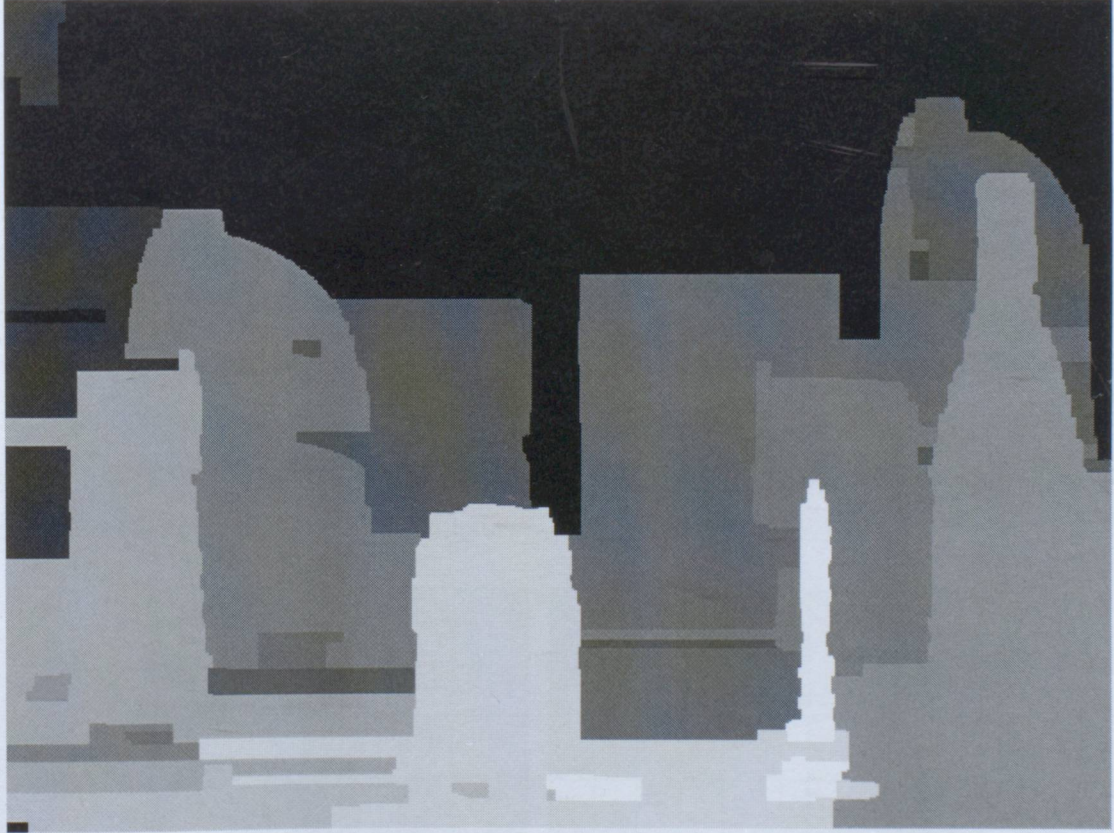


Şekil 3.18 Güvenilir bölgelerin yatay yönde yayılması sonucu elde edilen yeni stereo uzaklık haritası

Algoritmanın yedinci adımında stereo uzaklık haritası dikey yönde ve yatay yönde taranır ve bir filtre yardımıyla komşu pikseller pencere içindeki en çok kullanılan renk değerine çekilir. Bu işlem sabit boyutlu bir pencere içindeki tüm piksellere uygulanır. Pencere içindeki en çok kullanılan fark değeri ilgili piksele atanır. Böylece hem stereo uzaklık haritasındaki stereo uzaklık çeşitliliği azaltılmış, hem de bölgeler arasındaki ufak stereo uzaklık farklılıkları elenmiş olur. Şekil 3.19'da dikey yönde filtre uygulanmış stereo uzaklık haritası, Şekil 3.20'de yatay yönde filtre uygulanmış stereo uzaklık haritası görülmektedir.



Şekil 3.19 Dikey yönde filtre uygulanmış stereo uzaklık haritası



Şekil 3.20 Yatay yönde filtre uygulanmış stereo uzaklık haritası

3.4 Engel Tespiti ve Engellerin Kameraya Olan Uzaklığının Hesaplanması

Satır satır eşleme algoritması sonucunda elde edilen stereo uzaklık haritası, engel tespiti aşamasında kullanılır. Engel tespiti aşaması iki temel adımdan oluşur. Öncelikle, stereo uzaklık haritasından yararlanılarak ortamdaki engel teşkil edebilecek tüm nesneler tespit edilir. Ardından kamera kalibrasyonu sonucu elde edilen odak uzaklığı parametresi ve nesnelerin fark değeri kullanılarak tespit edilen engellerin, kameraya yani mobil platforma olan uzaklığı ve boyutu hesaplanır.

3.4.1 Engel Tespiti

Engel tespiti adımı üç alt adımdan oluşur:

1. Stereo uzaklık haritasının bölütlenmesi.
2. Belirli bir büyüklüğün altındaki bölütlerin elenmesi.
3. Stereo uzaklık değeri büyük olan bir bölütün sınırları içerisinde yer alan küçük stereo uzaklık değerine sahip bölütlerin elenmesi.

Bölütleme işlemi için, bağlı bileşen analizi (connected component analysis) yöntemi değiştirilerek uygulanmıştır. Bağlı bileşen analizi yöntemi ile stereo uzaklık haritasındaki her bir piksel sahip olduğu fark değerine ve komşuluk ilişkisine göre etiketlenir. Bölütleme işlemi sonucunda aynı etikete sahip pikseller grubu bir nesneyi temsil eder. Etiketleme işleminde her bir pikselin sekiz komşusu ile olan benzerliği ölçülür. Benzer pikseller aynı etiket ile etiketlenir. Benzerlik ölçüsü için piksellerin stereo uzaklık değerleri arasındaki farkın belirli bir eşik seviyesinden küçük olmasına bakılır. Şekil 3.21'de küçük bir stereo uzaklık haritası için elde edilmiş etiketlenmiş görüntü görülmektedir. Aşağıdaki örnekte stereo uzaklık değerleri arasındaki benzerlik, eşik seviyesi "1" için ölçülmüştür. Etiketleme işlemi sonucunda elde edilen "A, B, C" etiketleri, stereo uzaklık haritasının üç bölüte ayrıldığını gösterir. Başka bir deyişle aşağıda yer alan stereo uzaklık haritası için "A, B, C" ile etiketlenmiş üç adet nesne bulunmuştur.



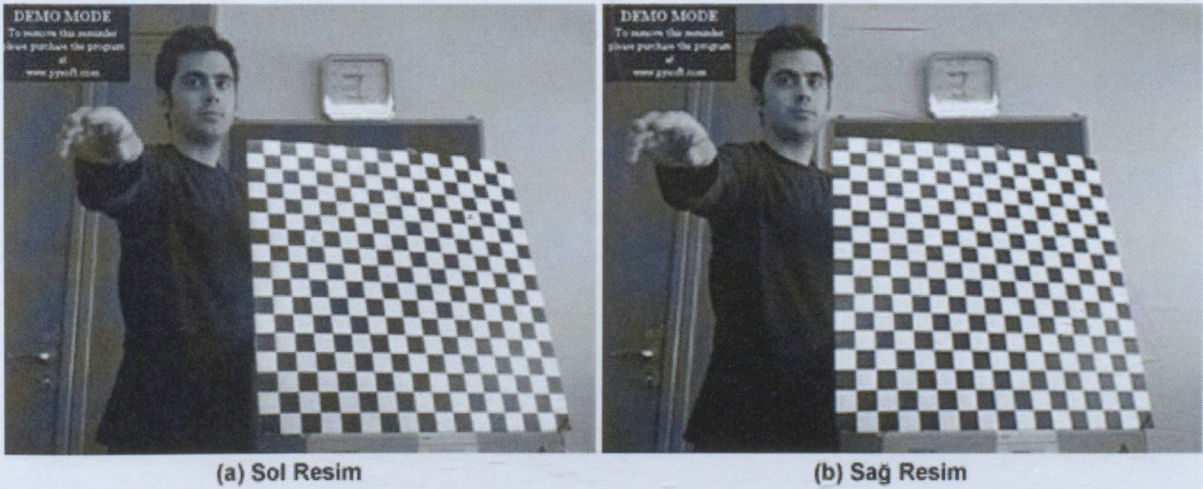
Şekil 3.21 Küçük bir stereo uzaklık haritası için elde edilmiş etiketlenmiş görüntü

Bu işlemin ardından engel olamayacak büyüklükteki gereksiz bölütler elenir. Örneğin, Şekil 3.21'deki etiketlenmiş görüntü için minimum bölüt alanı "3" olarak belirlenirse, "B" etiketi ile etiketlenmiş bölüt elenir.

Stereo uzaklık haritasında büyük stereo uzaklık değerine sahip piksel grupları kameraya yakın nesneleri işaret ederken, küçük stereo uzaklık değerine sahip piksel grupları kameraya uzak nesneleri işaret eder. Yakın nesnenin koordinatları içerisinde yer alan uzaktaki bir nesnenin görülmesi imkansızdır. Dolayısıyla stereo uzaklık değeri büyük olan bir bölütün sınırları içerisinde yer alan küçük stereo uzaklık değerine sahip bölütler elenir. Bu bölütler, stereo eşleme adımıyla meydana gelen yanlış eşlemeler sonucunda ortaya çıkmış bölütlerdir.

Tüm bu adımlar sonucunda, hareketli mobil platforma engel teşkil edebilecek ortamdaki tüm nesneler tespit edilir. Her bir nesne için, bölge sınırları, bölgenin ortalama fark değeri, bölgedeki maksimum fark değeri ve toplam piksel sayısı engel aşma adımıyla kullanılmak üzere saklanır.

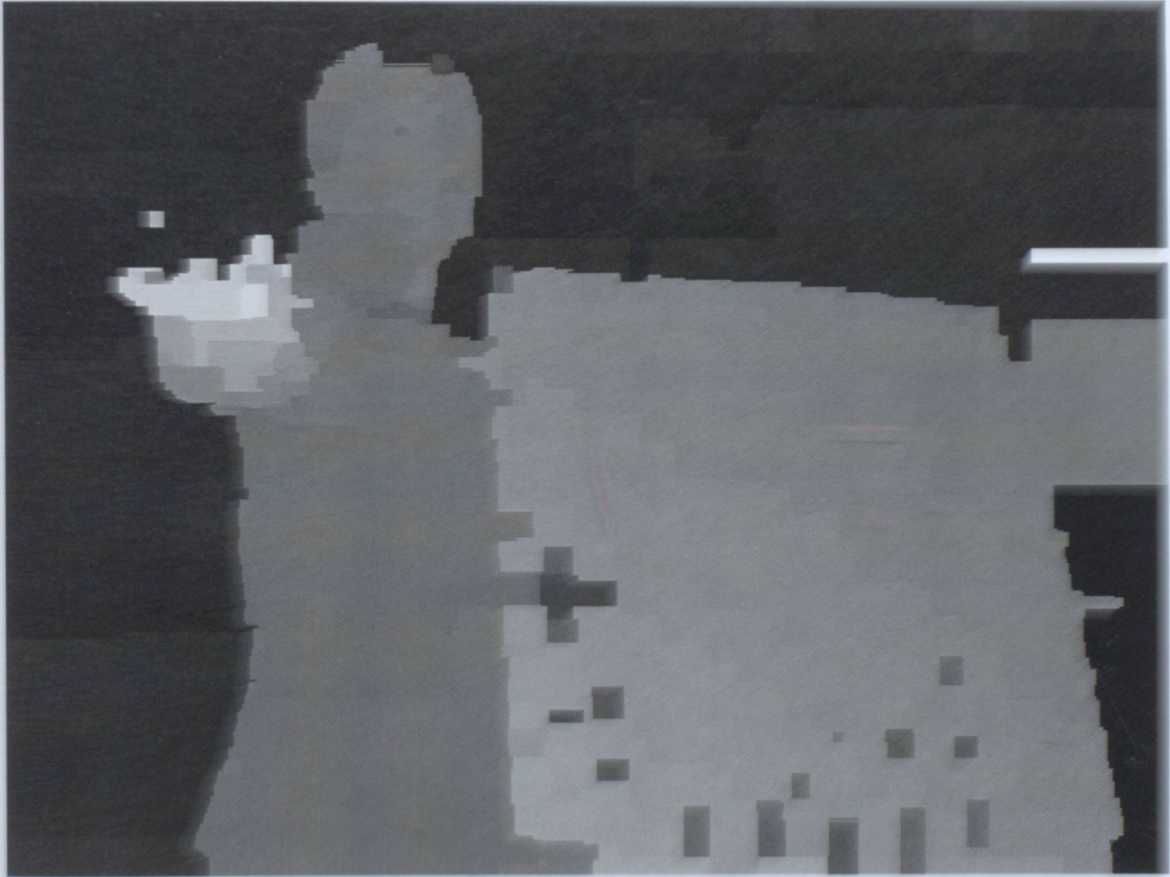
Yukarıda anlatılan engel tespiti aşamasının adımları bir örnek resim çifti ele alınarak ayrıntılı olarak incelenmiştir. Şekil 3.23'de, Şekil 3.22 (a) ve Şekil 3.22 (b)'deki resim çiftine stereo eşleme algoritması uygulanması sonucu elde edilen stereo uzaklık haritası görülmektedir.



Şekil 3.22 (a) Orjinal sol resim (b) Orjinal sağ resim

Stereo uzaklık haritası incelendiğinde satranç tahtasının üzerindeki stereo uzaklık değerinin sağ üst çaprazdan sol alt çapraza doğru arttığı görülür. Bunun sebebi satranç tahtasının sağ üst köşesi daha gerideyken, sol alt köşesinin kameraya daha yakın pozisyonda olmasıdır. Aynı şekilde modelin eli satranç tahtasının önünde olduğu için stereo uzaklık değeri daha fazlayken, modelin vücudu satranç tahtasının arkasında olduğu için stereo uzaklık değeri daha azdır. Tüm bunlar, stereo uzaklık haritasının genel olarak doğru olduğunu gösterir. Bu

aşamadan sonra stereo uzaklık haritasını kullanarak ortamdaki nesnelerin nasıl tespit edileceğine karar verilmelidir. Akla ilk gelen stereo uzaklık haritasının bölütlenmesidir. Ancak bölütleme işlemi zaman maliyeti yüksek olan bir işlemdir. Aynı zamanda normal bir bölütleme işlemi arkaya ya da öne doğru eğik duran ve çıkıntılı yüzeye sahip nesnelerin farklı nesnelermiş gibi bölütlenmesine sebep olur. Örneğin satranç tahtası tek bir bölge olarak değil bir çok bölgeden oluşacak şekilde bölütlenir. Oysa ki engel tespiti için satranç tahtasının tek bir nesne olarak belirlenmesi gerekir. Bu sebeplerden ötürü bu çalışmada, çalışma süresi maliyeti bölütleme işleminden çok daha az olan bağlı bileşen analizi yöntemi ile stereo uzaklık haritasındaki her bir pikselin sahip olduğu stereo uzaklık değerine ve komşuluk ilişkisine göre etiketlenmesi yöntemi seçilmiştir.



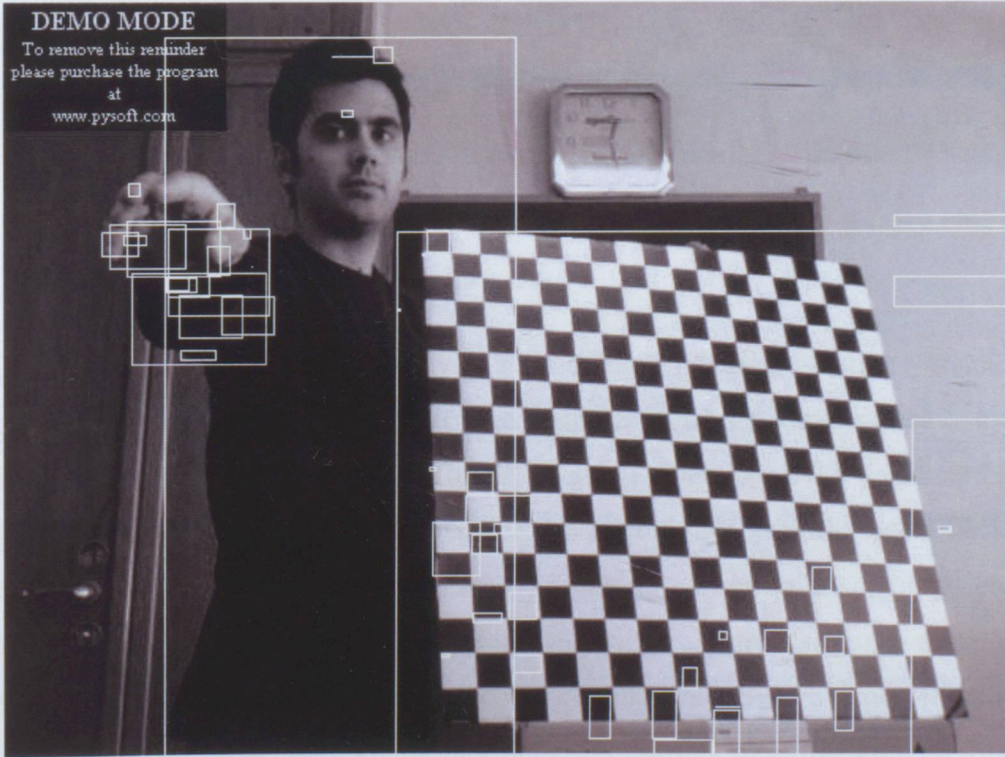
Şekil 3.23 Eşleme algoritması sonucu elde edilen stereo uzaklık haritası

Şekil 3.24'de, Şekil 3.23'deki stereo uzaklık haritasının bağlı bileşen ile bölütlenmesi sonucu elde edilen etiketlenmiş görüntü görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi içinde çeşitli stereo uzaklık değerleri barındıran satranç tahtasının tümü, stereo eşleme adımıındaki yanlış eşlemelerden kaynaklanan problemler haricinde, aynı etiket değeri ile etiketlenmiştir.

Şekil 3.25'de ise bağlı bileşen analizi ile etiketlenmiş görüntüye göre elde edilen nesneler orjinal resim üzerinde çerçeve içerisine alınmış olarak gösterilmektedir.



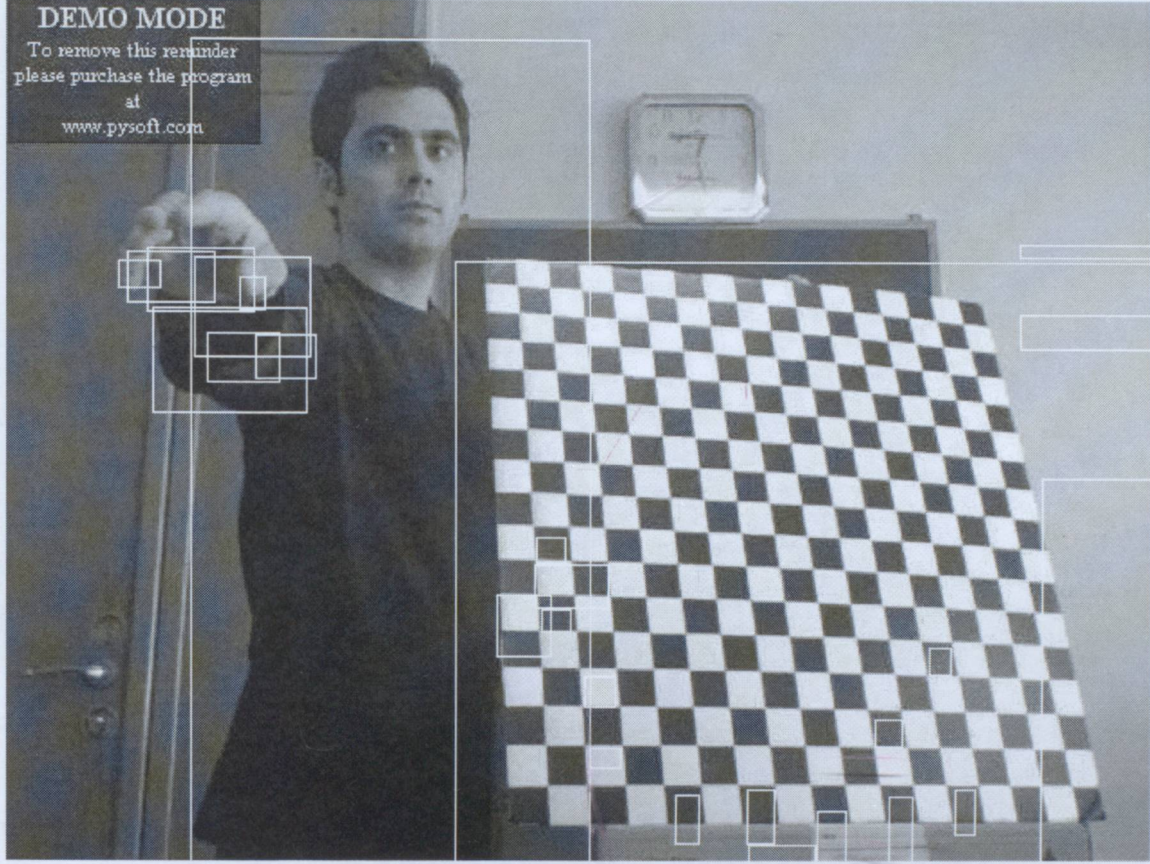
Şekil 3.24 Stereo uzaklık haritasının bağlı bileşen analizi ile bölütlenmesi sonucu elde edilen etiketlenmiş görüntü



Şekil 3.25 Bağlı bileşen analizi ile etiketlenmiş görüntüye göre elde edilen nesneler

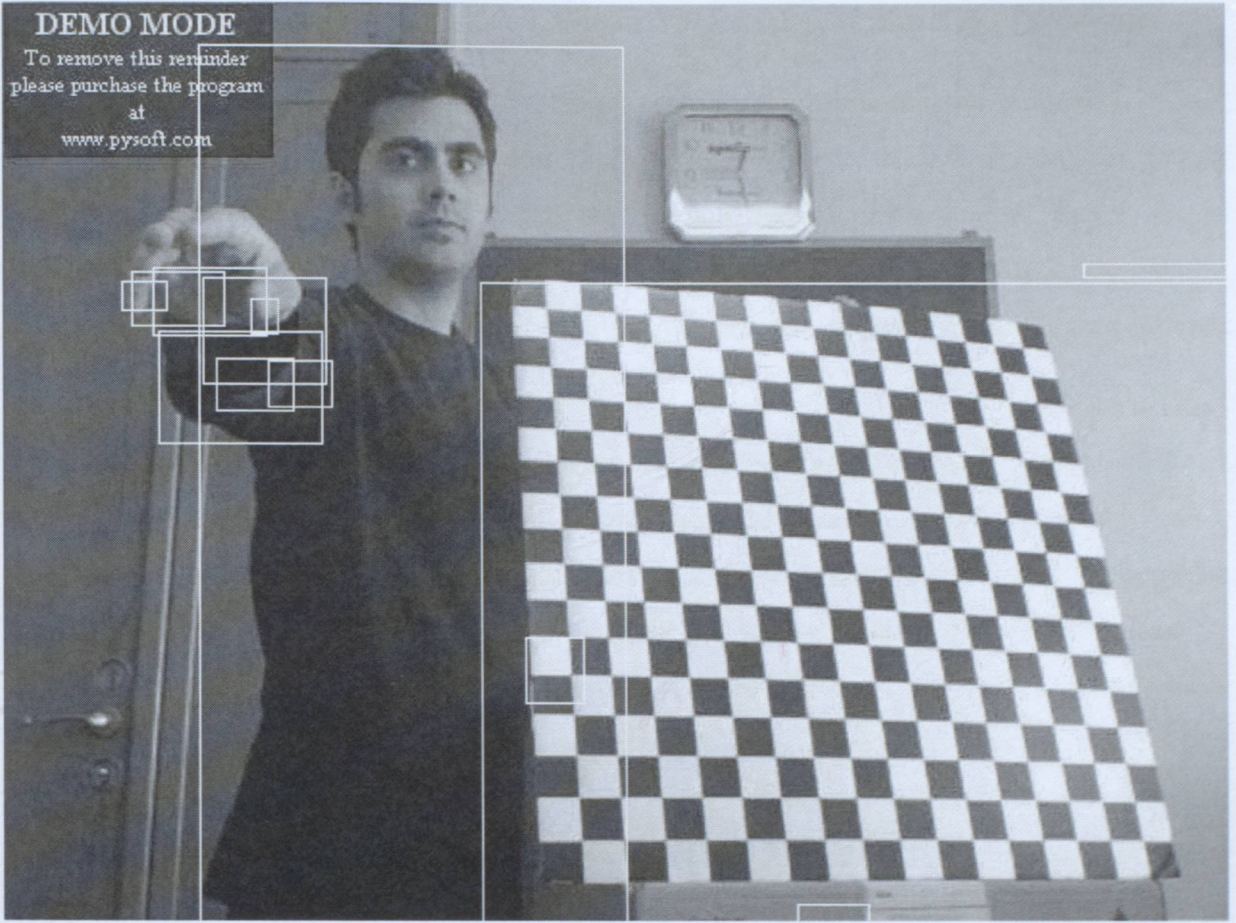
Etiketleme işlemi sonucunda elde edilen bölütlerden çok küçük olanları dikkate almaya gerek yoktur. Çünkü bu bölütler genelde, daha büyük bir nesnenin parçası ya da çok uzakta yer alan,

engel olarak kabul edilmemesi gereken bölütlerdir. Şekil 3.26'da kapladığı alan yüz pikselden daha az olan bölütlerin elenmesi sonucu elde edilen bölütler görülmektedir. Şekil 3.25'de görülen satranç tahtasındaki ve modelin elinin üstündeki bir çok küçük bölüt, Şekil 3.26'da yer almamaktadır.



Şekil 3.26 Belirli bir büyüklüğün altındaki bölütlerin elemine edilmesi sonucu elde edilen nesneler

Şekil 3.26'daki stereo uzaklık değeri büyük olan satranç tahtasının içinde yer alan küçük stereo uzaklık değerine sahip bölütler, stereo eşleme algoritmasındaki yanlış eşleşmeler sonucu ortaya çıkmış bölütlerdir. Ortamda tekerlek lastiği gibi ortası delik ya da cam gibi arka tarafını gösteren şeffaf nesneler olmadığı sürece, bu tür bölütler kesinlikle elenmesi gereken bölütlerdir. Genellikle bu özelliklere sahip nesnelerin ortamlarda nadiren bulunduğu düşünülürse, bu tür bölütlerin hepsini elemek algoritma karmaşıklığını ve hatalı engel tepitlerini azaltmak açısından yerinde olur. Şekil 3.27 'de stereo uzaklık değeri büyük olan bir bölütün sınırları içerisinde yer alan küçük fark değerine sahip bölütlerin elenmesi sonucu elde edilen bölütler görülmektedir.



Şekil 3.27 Belirli bir büyüklüğün altındaki bölütlerin elenmesi sonucu elde edilen nesneler

3.4.2 Engellerin Kameraya Olan Uzaklığının ve Boyutlarının Bulunması

Engellerin kameraya olan uzaklığı daha önce de bahsedildiği gibi, kameraların arasındaki mesafe, odak noktası ve stereo uzaklık değeri kullanılarak hesaplanır (Eşitlik 3.8).

$$\text{distance} = (b \times f) / \text{disparity} \quad (3.8)$$

Burada distance, engelin kameraya olan uzaklığını; b, kameralar arasındaki mesafeyi; f, odak uzaklığını; disparity ise stereo uzaklık değerini göstermektedir.

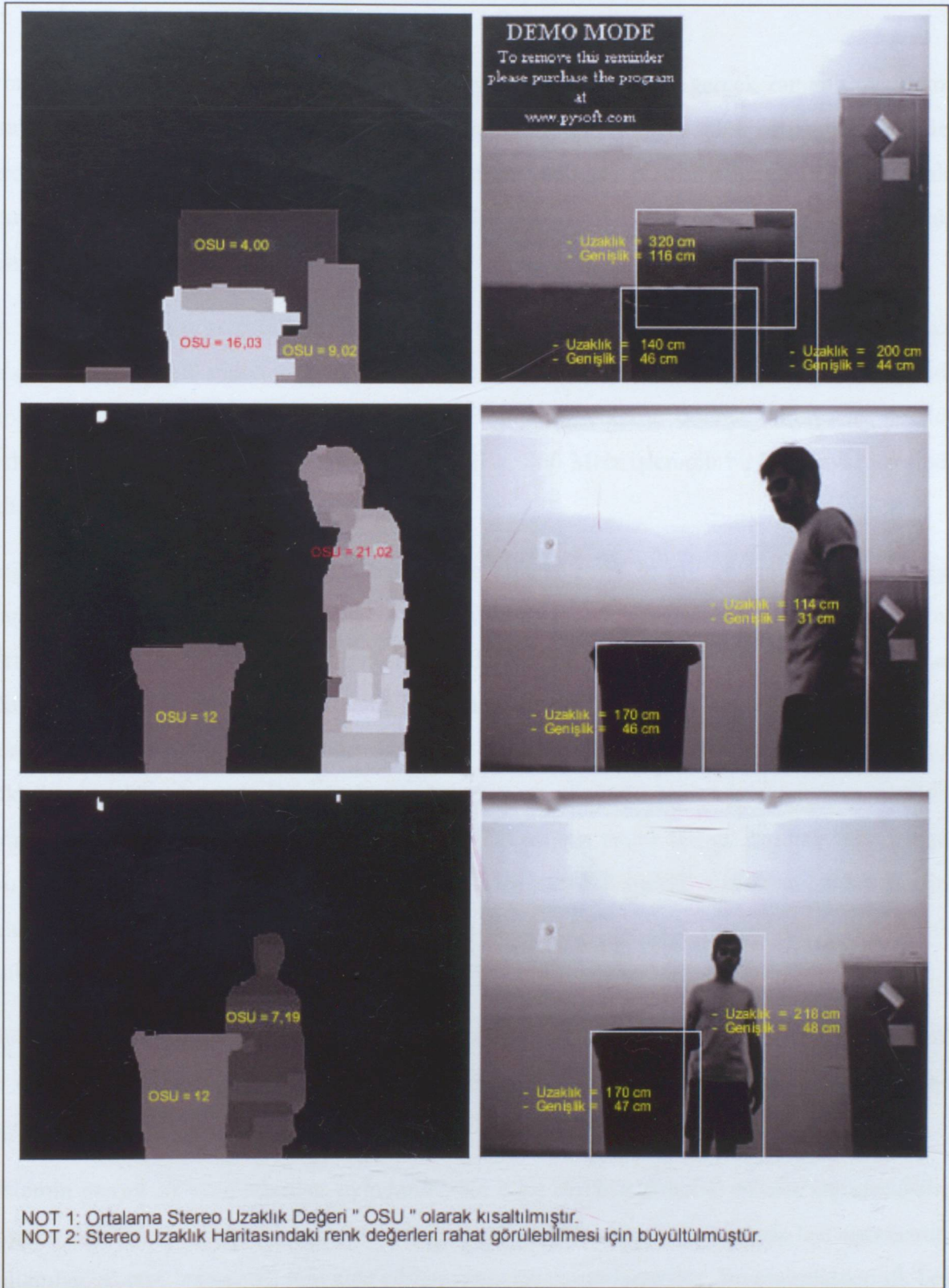
Eşitlik 3.8’de kameralar arasındaki mesafe ve kameranin odak uzaklığı daha önceden belirlenmiş sabit değerlerdir. Tek değişken tespit edilen engelin stereo uzaklık değeridir. Yukarıdaki eşitlikten de görüldüğü gibi stereo uzaklık değeri ile engelin kameraya olan uzaklığı ters orantılı olarak değişmektedir. Yüksek stereo uzaklık değerleri yakın mesafelere işaret ederken, düşük stereo uzaklık değerleri uzak mesafelere işaret eder. Ancak, yapılan deneysel çalışmalar sonucunda bu eşitliğin her zaman doğru sonuçlar vermediği görülmüştür. Özellikle kameraya uzak konumdaki nesnelerin, yani stereo uzaklık değeri düşük olan

nesnelerin mesafe ölçümlerinde, Eşitlik 3.8'in, hassas sonuçlar üretmediği görülmüştür.

Bu hatayı önleyebilmek için sistemin başlangıç aşamasında, minimum stereo uzaklık değeri ile maksimum stereo uzaklık değeri aralığındaki her bir stereo uzaklık değeri için gerçek uzaklık değerleri bulunmuş ve bir tabloda (lookup table) saklanmıştır. Engel tespiti aşamasında ise engel olarak tespit edilen nesnenin ortalama stereo uzaklık değerine karşılık gelen gerçek uzaklık değeri sistemin başlangıç aşamasında hazırlanan tablodan çekilerek kullanılmıştır.

Bir nesne üzerinde tek bir stereo uzaklık değeri bulmak her zaman mümkün olmamaktadır. z ekseni yönünde derinlik değişimi gösteren bir nesnede çeşitli stereo uzaklık değerleri bulunur. Örneğin Şekil 3.23 'teki stereo uzaklık haritasında modelin elinde tuttuğu satranç tahtasının her bir noktası kameraya aynı uzaklıkta değildir ve satranç tahtası çeşitli stereo uzaklık değerleri ile ifade edilmiştir. Bu sebepten dolayı engel olarak tespit edilen bir nesnenin kameraya olan mesafesi hesaplanırken, nesneyi temsil eden tek bir stereo uzaklık değeri bulunması gerekir. Bu çalışmada, engel olarak tespit edilen nesnenin sınırları içerisindeki piksellerin sahip olduğu stereo uzaklık değerlerinin ortalaması, ilgili nesneyi temsil eden stereo uzaklık değeri olarak kabul edilmiştir.

Stereo uzaklık değerini kullanarak, engel olarak tespit edilen nesnelerin boyutunun bulunması da mümkündür. Tüm stereo uzaklık değerleri için resimdeki bir pikselin kaç santimetreye karşılık geldiği bulunursa resimdeki nesnelerin gerçek dünyadaki boyutları bulunabilir. Bu çalışmada gerçek boyutları bilinen bir nesnenin çeşitli mesafelerden bir çok resmi çekilmiş ve her bir stereo uzaklık değeri için bir pikselin kaç santimetreye karşılık geldiğini gösteren bir tablo elde edilmiştir. Bu tabloyu elde ettikten sonra, engel olarak tespit edilen bir nesnenin boyutunu öğrenmek için, sadece nesnenin resimdeki piksel cinsinden uzunluğunun ve ilgili nesnenin ortalama stereo uzaklık değerinin bilinmesi yeterlidir. Şekil 3.28'de çeşitli stereo uzaklık haritaları için elde edilmiş sonuçlar görülmektedir.



Şekil 3.28 Çeşitli stereo uzaklık haritaları için elde edilmiş uzaklık ve genişlik ölçümleri

4. UYGULAMA ve DENEYSEL SONUÇLAR

C programlama dili kullanılarak geliştirilen bu sistem için üç farklı gerçek zamanlı uygulama tasarlanmıştır. İlk uygulamada kameraların monte edildiği platform sabit, ortamdaki nesneler hareketlidir. İkinci uygulamada kameraların monte edildiği platform hareketli, ortamdaki nesneler sabittir. Üçüncü ve son uygulamada ise hem kamera platformu hem de ortamdaki nesneler hareketlidir.

Bu uygulamalarda görüntü alımı, aralarındaki mesafe 12 cm olan iki adet 90 derece görme açısına sahip, renkli video kamera (Microsoft VX - 7000) ile 352 x 288 çözünürlüğünde yapılmıştır. Kameralar birbirlerine paralel ve optik eksenlerde dönme olmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Uygulamalar, Pentium M, 2 GHz, 800 MHz işlemcili bir bilgisayar üzerinde çalıştırılmıştır.

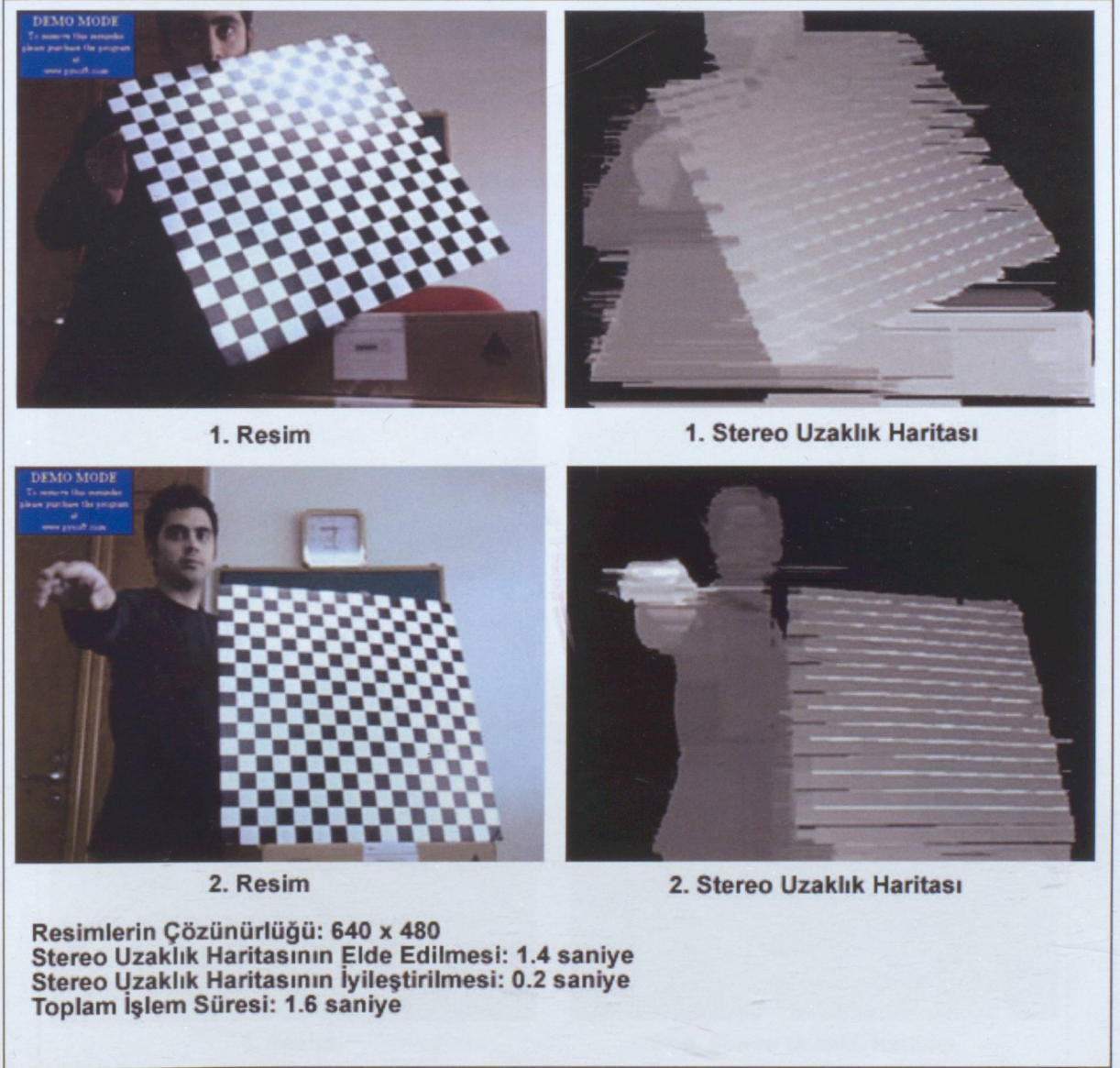
Doğru ve güvenilir stereo uzaklık haritası elde etmek, engel tespiti ve engellerin kameraya olan uzaklığının bulunması aşamalarının başarıyla sonuçlanmasını sağlayan en önemli faktördür. Yani stereo uzaklık haritasının elde edilme aşaması, sistemin genel başarısını etkileyen en önemli adımdır. Bölütleme işlemine dayanan “graph cut” ve “layered stereo” gibi stereo eşleme yöntemleri, en doğru sonuçları üretir. Ancak, çalışma zamanı maliyeti çok yüksek olan bu yöntemlerin gerçek zamanlı bir uygulamada kullanılması uygun değildir. Amacı, dinamik ve durağan ortamlarda, gerçek zamanlı engel tespiti yapmak olan bu tez çalışmasındaki en önemli unsur, stereo uzaklık haritasını kullanarak engellerin kameraya olan uzaklığını ve kapladığı alanı doğru bir şekilde tespit edebilmektir. Bunun için çok ayrıntılı, mükemmel bir stereo uzaklık haritası elde etmeye gerek yoktur.

Bu tez çalışmasında stereo eşleme adımında, görüntü örneklemesine hassas olmayan, desenli ve desensiz ortamlarda başarıyla çalışan ve çalışma zamanı maliyeti düşük olan Birchfield algoritması (Stan Birchfield ve Carlo Tomasi, 1999) kullanılmıştır.

Sistemin gerçek zamanlı adımları uygulanmadan önce Birchfield stereo eşleme algoritmasının başarısı farklı ortamlarda çekilmiş bir çok görüntü ile test edilmiştir. Aşağıda test aşamasında kullanılan 10 adet resim çifti için elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Bu resimlerden ilk beşi tez çalışma ortamında elde edilen görüntülerden oluşurken, geriye kalan beş tanesi, farklı laboratuvarlardan elde edilmiş görüntülerdir. Bu 10 adet resim çifti, desenli ve desensiz arka plan, çok ışıklı ve az ışıklı ortam, mat ve parlak yüzeyli nesneler, paralel ve eğik konumlanmış nesneler gibi çeşitli durumları göstermektedir. Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4 'te her bir resim çiftinin orjinal sol resmi ve her bir resim çifti için elde edilmiş stereo uzaklık

haritaları görülmektedir.

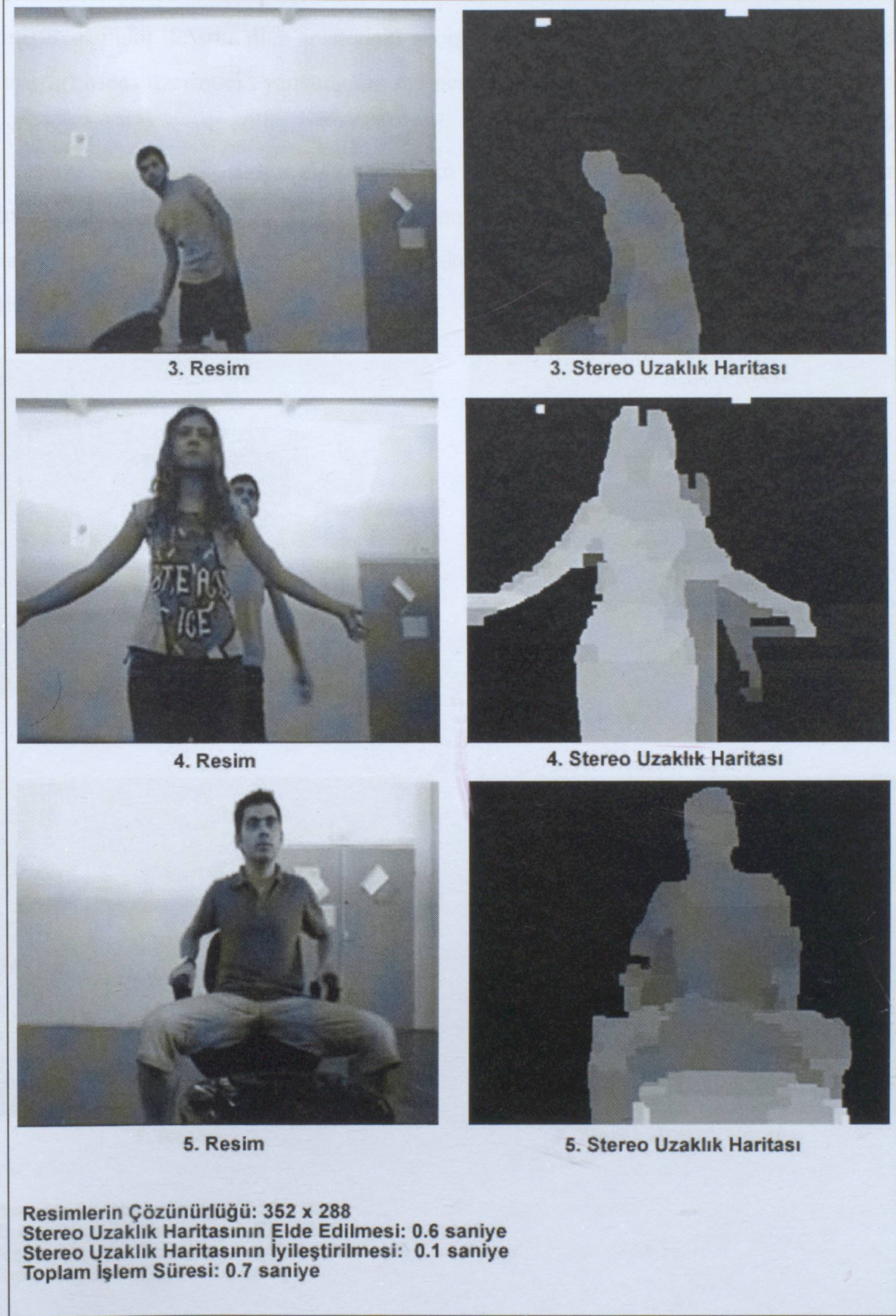
Şekil 4.1'de çekimin yapıldığı ortam yapay ışık ile aydınlatılmıştır. Parlak bir yüzeye sahip olan satranç tahtası, her iki resimde de z eksenini doğrultusunda derinlik değişimine sahiptir. Her iki resim için de stereo uzaklık haritası başarıyla bulunmuştur. Ancak, özellikle satranç tahtasının kenarlarında ve modelin sol tarafında, desensiz arka plana bağlı olarak bazı yanlış eşleşmeler olmuştur.



Şekil 4.1 Yapay ışık ile aydınlatılmış ortamda çekilmiş görüntüler ve bu görüntülerden elde edilen stereo uzaklık haritaları

Şekil 4.2 'deki çekimler gün ışığı ile aydınlatılmış ortamda yapılmıştır. Ortamın homojen olarak aydınlatılmamasına ve desensiz arka plana rağmen, nesneler arası geçişin olduğu bölgeler başarılı bir şekilde yakalanmıştır. 4. resimde, arkadaki modelin kolu ile öndeki

modelin kolu arasında desensiz arka plana bağılı olarak hatalı eşleşmeler oluşmuştur.



Şekil 4.2 Gün ışığı ile aydınlatılmış otamda çekilmiş görüntüler ve bu görüntülerden elde edilen stereo uzaklık haritaları

Şekil 4.3'teki görüntüler Birchfield laboratuvarından çekilmiş resimlerden oluşmaktadır. Desenli araka plana sahip 6. resimde, masa lambasının kenarları başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Kutular ile arka plan arasındaki geçiş bölgesi kesin sınır çizgileriyle birbirlerinden ayrılmıştır. Masa üzerindeki yansımalarla rağmen, masa boyunca değişen derinlik değişimi de hatasız bir şekilde tespit edilmiştir. 7. resimde lamba ile masa arasındaki tek desenli bölge kapı aralığı ve kapı tokmağıdır. Masa ise hem meyilli hem de tek düze desenslidir. Tüm bu zorluklara rağmen lambanın ve masanın kenarları başarılı bir şekilde bulunmuştur. Aynı zamanda masa üzerinde geriye doğru gidildikçe, stereo uzaklık değerinin azaldığı net bir şekilde tespit edilmiştir.



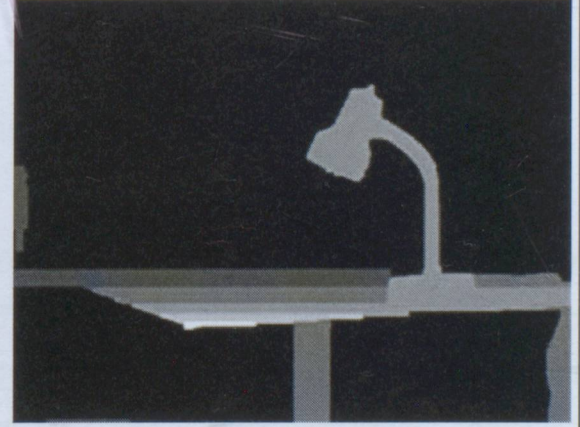
6. Resim



6. Stereo Uzaklık Haritası



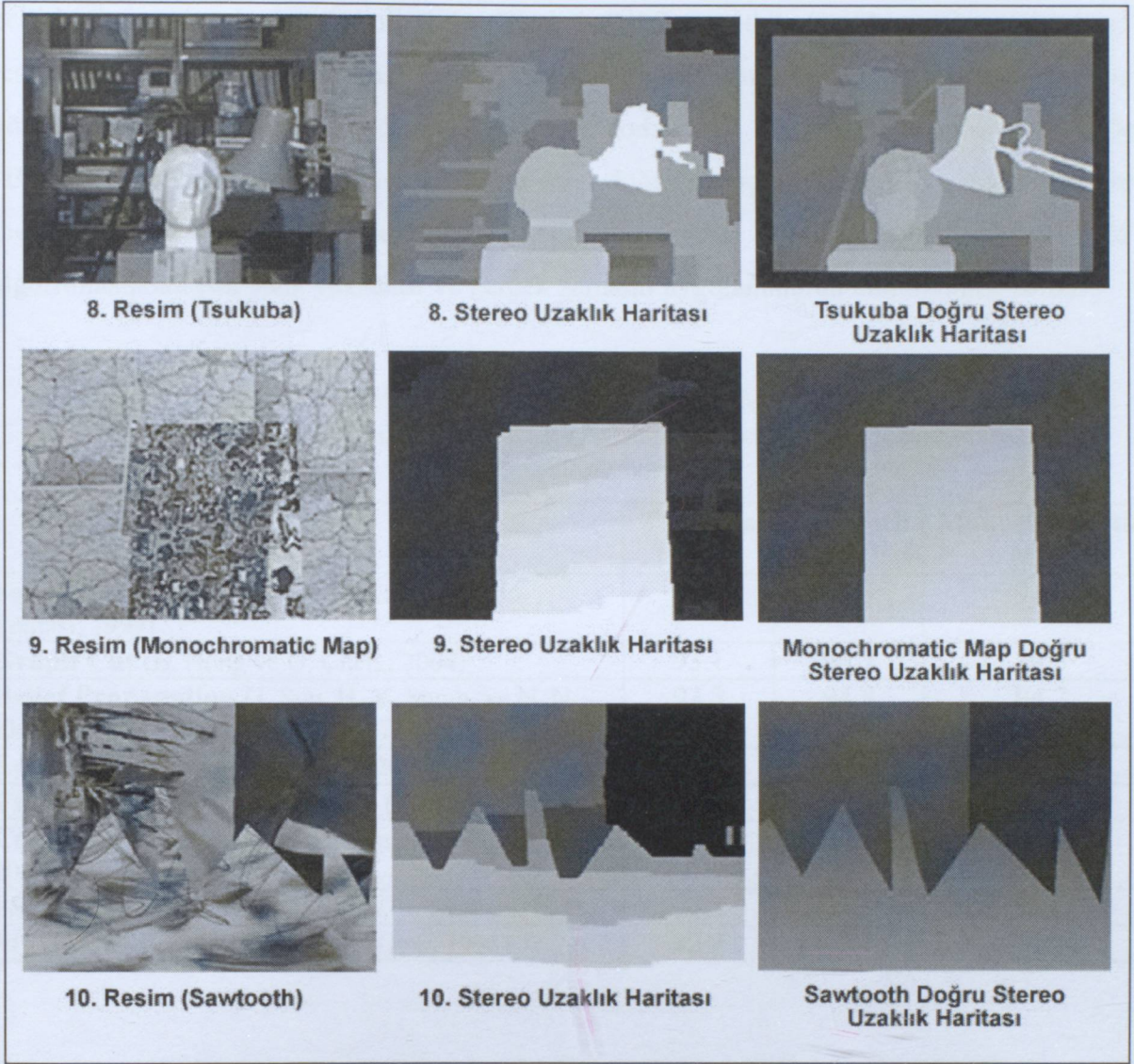
7. Resim



7. Stereo Uzaklık Haritası

Resimlerin Çözünürlüğü: 630 x 480
 Stereo Uzaklık Haritasının Elde Edilmesi: 1.4 saniye
 Stereo Uzaklık Haritasının İyileştirilmesi: 0.2 saniye
 Toplam İşlem Süresi: 1.6 saniye

Şekil 4.3 Homojen ışıklı ortamda çekilmiş görüntüler (Stan Birchfield ve Carlo Tomasi, 1999)
 ve bu görüntülerden elde edilen stereo uzaklık haritaları



Şekil 4.4 Tsukuba, Map ve Sawtooth resimlerinden elde edilen stereo uzaklık haritaları ve doğru stereo uzaklık görüntüleri (<http://vision.middlebury.edu>)

Şekil 4.4’de, Middlebury Laboratuvarı görüntü veritabanından alınmış “Tsukuba”, “Monochromatic Map” ve “Sawtooth” resim çiftlerinden Birchfield Stereo Eşleme yöntemi ile elde edilmiş stereo uzaklık haritaları ve bu resimlerin doğru stereo uzaklık haritaları görülmektedir. Tsukuba resim çifti için elde edilen stereo uzaklık haritasında, görüntünün genel yapısı ve keskin sınır geçişleri korunmuştur. Sağ üst köşede, video kamerada, masada ve lambanın boyun bölgesinde ise belirgin hatalı eşleşmeler görülmektedir. Elde edilen stereo uzaklık haritası, doğru stereo uzaklık haritası ile karşılaştırıldığında piksellerin % 80’inin doğru eşleştiği görülmüştür. Aynı karşılaştırma elde edilen “Sawtooth” ve “Monochromatic Map” görüntüleri için yapıldığında, “Sawtooth” resmi için elde edilen stereo uzaklık haritasında piksellerin %82.3’ünün, “Monochromatic Map” resmi için elde edilen stereo uzaklık haritasında ise piksellerin %93.2’sinin doğru eşleştiği görülmüştür. Çizelge 4.1 ‘de

belli başlı stereo eşleme yöntemleriyle, “Tsukaba”, “Sawtooth” ve “Monochromatic Map” resim çiftleri için elde edilmiş stereo uzaklık haritalarındaki doğru eşleşme oranları görülmektedir (<http://vision.middlebury.edu>). Tablodan da görüldüğü gibi literatürde, “Birchfield” stereo eşleme algoritmasından daha doğru sonuçlar üreten eşleme algoritmaları mevcuttur. Ancak bu yöntemlerin hepsinin çalışma süresi maliyeti “Birchfield” algoritmasından çok daha yüksektir ve gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılması zordur.

Çizelge 4.1 “Tsukaba”, “Sawtooth” ve “Monochromatic Map” resim çiftleri için Farklı Yöntemlerle elde edilmiş stereo uzaklık haritalarındaki doğru eşleşme oranları (<http://vision.middlebury.edu>)

Algoritma	Tsukuba	Sawtooth	Monochromatic Map
Satır Satır Eşleme (Stan Birchfield ve Carlo Tomasi, 1999)	80	82.3	93.2
Graph Cut (L. Hong ve G. Chen., 2004)	93.1	96.7	84.5
Belief Propagation (J. Sun, H. Y. Shum, ve N. N. Zheng, 2003)	93.3	94.8	94.7
Layered (M. Lin ve C. Tomasi., 2002)	90	96.6	94.7
Tree Dynamic Programming , (O. Veksler., 2005)	90	92.3	87
Cooperative Algorithm (L. Zitnick ve T. Kanade, 2000)	81.7	84.4	87.6
SSD + min-filter (D. Scharstein, R. Szeliski, 2002)	71.5	75.5	91.6
Maximum-flow (S. Roy ve I. J. Cox., 1998)	82.9	82.8	84

4.1 Engellerin Kameraya Olan Uzaklığının “Look-up Table (LUT)” Kullanılarak Bulunması

Mesafe ölçümünün başarısını test etmek için, ilk başta kameraya uzaklığı 10 cm olan bir nesnenin, kameraya uzaklığı 300 cm olana kadar, 10’ar cm arayla resimleri çekilmiş ve her bir resim için ilgili nesnenin kameraya olan mesafesi, hem eşitlik 3.8 kullanılarak hem de sistemin başlangıç aşamasında oluşturulan LUT kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır (Şekil 4.5). Her iki mesafe ölçüm yöntemi için de elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Yapılan ölçümler esnasında kameraya 90 cm’den daha yakın olan nesneler için, sistemin başlangıç aşamasında belirlenen maksimum stereo uzaklık değeri (30 piksel) kısıtının ihlal edilmesine bağlı olarak stereo uzaklık haritasının hatalı bir şekilde elde edildiği görülmüştür. Dolayısıyla 90 cm’den daha yakın nesneler için yapılan mesafe ölçümleri gerçeği yansıtmamaktadır. Aynı zamanda kameraların arasındaki mesafenin 12 cm olduğu bu sistemde, kameraya uzaklığı 300 cm’den daha fazla olan nesneler, stereo uzaklık değerinin negatif değer almasına bağlı olarak (şaşı bakma durumu) tespit edilememiştir.

Çizelge 4.2 Mesafe ölçümünde elde edilen sonuçlar ve hata oranları

Gerçek Uzaklık (cm)	Stereo Uzaklık Değeri (piksel)	LUT ile Bulunan Uzaklık (cm)	LUT Hata Oranı (%)	$\text{dist} = (b \times f) / \text{disp}$ Formülü ile Hesaplanan Uzaklık	$\text{dist} = (b \times f) / \text{disp}$ Formülü ile Hesaplanan Hata Oranı (%)
100	29	102	2	77	23
110	25	113	2.6	90	18
120	22	121.5	1.125	102.35	15.7
130	20	132.25	1.7	112.5	13.4
140	17	142.5	1.7	132	6
150	15	153	2	150	0
160	13	158.5	0.9	173	8
170	11	173	1.7	204	20
180	10	176	2.2	225	25
190	9	193.5	1.8	250	31
200	8	205.5	2.7	281	40
210	7	213	1.4	321	52
220	6	216.5	1.59	375	70
230	5	228	0.8	450	95
240	5	235	2	450	87.5
250	4	251	0.4	562.5	125
260	3	265	1.9	750	188
270	3	269	0.3	750	177
280	2	286	2.1	1125	301
290	2	290	0	1125	287
300	1	298.5	0.5	2250	650

Çizelge 4.2'den de görüleceği gibi, özellikle kameraya uzak konumdaki nesnelerin, yani stereo uzaklık değeri düşük olan nesnelerin mesafe ölçümlerinde, Eşitlik 3.8'in, hassas sonuçlar üretmediği, LUT kullanılarak yapılan mesafe ölçümlerinde ise gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Dolayısıyla geliştirilen sistem için tasarlanan uygulamalarda, engel olarak tespit edilen nesnelerin kameraya olan uzaklıkları, LUT kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5 (a) Orjinal sol resim (b) Stereo uzaklık haritası (c) Engel olarak tespit edilen bölgeler

Aşağıdaki bölümlerde farklı senaryolar için sistem başarısı değerlendirilecektir.

4.2 Sabit Platform, Hareketli Ortam

Kameraların monte edildiği platformun sabit, ortamdaki nesnelerin hareketli olduğu bu uygulamada amaç, ortamdaki engel teşkil edebilecek nesneleri tespit etmek; aynı zamanda bu nesnelerin kameralara olan uzaklığının ve boyutlarının bulunmasıdır.

Bu uygulamada yakalanan her bir çerçevenin işlenmesi gerekmektedir. Çünkü uygulamanın çalıştığı ortamdaki nesnelerin hareketli olmasından dolayı ortamda ani değişimler olabilir ve uygulamanın gereği olarak bu değişimler anında yakalanmalıdır. Bu ihtiyacın karşılanabilmesi için sistem çalışma süresi maliyeti mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Gerçeklenen sistemde, 352 x 288 çözünürlükte yakalanan bir görüntü çifti için eşleme adımı 0.6 saniye, stereo uzaklık haritasının iyileştirilmesi adımı 0.1 saniye, engel tespiti adımı ise 0.2 saniye sürmektedir. Yani bir görüntü çifti için toplam işlem süresi 0.9 saniyedir. Bu da uygulamanın en büyük gereksinimlerinden biri olan çalışma süresi maliyeti probleminin aşılması demektir.

Tasarlanan sistemin başarısı, bir çok gerçek zamanlı video çekimi yapılarak test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda sistemin başarısını etkileyen faktörler belirlenmiştir. Bunlar ortamın ışık şiddeti, kameraların ışıklandırılma seviyeleri, arka plan, ortamdaki nesnelerin hareket hızı ve ortamdaki nesnelerin kameraya olan mesafesidir.

Ortamın ışık şiddeti: Ortam, ne karanlık ne de çok ışıklandırılmış olmalıdır. Karanlıkta ortamdaki nesneler net bir şekilde görülemezken, çok ışıklandırılmış ortamda stereo eşleme adımının başarısını düşüren ışık parlamaları ve yansımalar oluşabilmektedir.

Kameraların ışıklandırılma seviyelerindeki farklılıklar: Sağ ve sol kameranın farklı seviyelerde ışıklandırılması, kameralardan eş zamanlı olarak elde edilen görüntülerdeki aynı noktaların renk seviyelerinin farklı olmasına yol açar. Bu da iki görüntüdeki piksellerin renk bilgisini kullanarak eşleme yapan Birchfield stereo eşleme algoritmasının hatalı eşleşmeler üretmesine sebep olur.

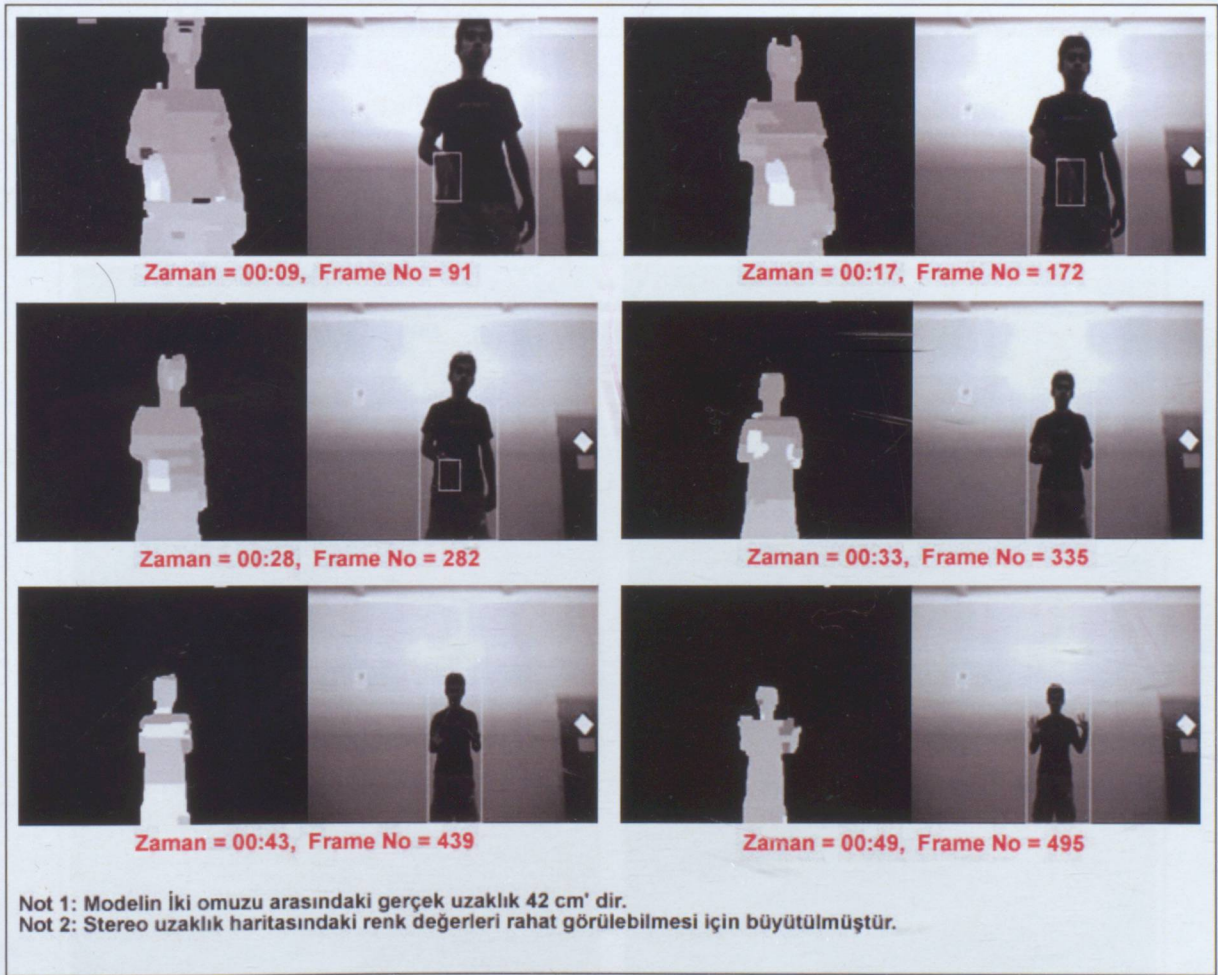
Arka plan: Eğer ortamda aynı stereo uzaklık değerine sahip nesneler birbirine çok yakın konumlanmışsa ve arkalarındaki plan tekdüze ve desensizse nesnelerin birbirlerine bakan sınır çizgileri hatalı eşleşmelere bağlı olarak birleşir.

Ortamdaki nesnelerin hareket hızı: Eğer ortamdaki nesnelerin hareket hızı sağ ve sol kameranın görüntü yakalama hızından yüksekse, resim çiftindeki aynı nesnelerin konumları

farklı yerlerde olabilir. Yani işlenecek resim çiftindeki ortamlar farklı olabilir. Bu da sistemin, ilgili resim çifti için yanlış sonuç üretmesine sebep olur.

Ortamdaki nesnelerin kameraya olan mesafesi: Ortamdaki nesnelerin kameraya belirli bir mesafeden daha fazla yaklaşması sistemin başarısını iki sebepten dolayı düşürebilir. Birincisi kısa mesafelerde nesnelerin hareketinin kameralarda ani ışık oynamalarına sebep olması ve bunun kameraların ışık seviyelerinde farklılıklara yol açmasıdır. İkincisi ise kameralara çok yakın mesafedeki nesneler için gerçek stereo uzaklık değerinin sistem sabiti olarak belirlenen maksimum stereo uzaklık değerinden (stereo eşleme için tarama alanı) daha büyük olması durumudur.

Şekil 4.6'da gün ışığı ile aydınlatılmış bir ortamda yapılan video çekiminden çeşitli anlarda yakalanan bazı görüntüler için elde edilen sonuçlar görülmektedir.



Şekil 4.6 Sabit platform, hareketli ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar

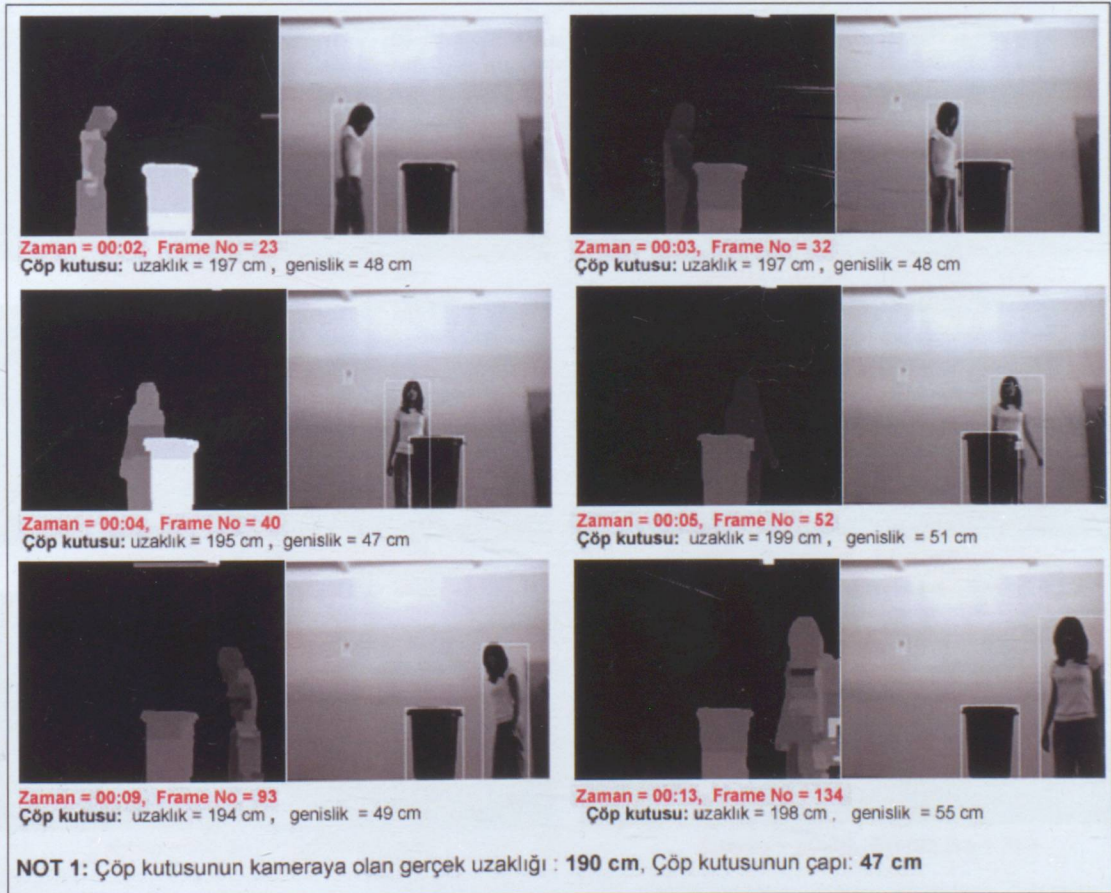
Şekil 4.6 için, LUT kullanılarak elde edilen mesafe ölçümleri Çizelge 4.3'de görülmektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi modelin kameraya olan uzaklığının tespitindeki hata oranı % 0 ila % 7 arasında değişmektedir. Her bir görüntüde, modelin hareketli olmasından ötürü

kapladığı alanın değişmesine bağlı olarak, modelin gerçek boyutlarının bilinemeyeceğinden modelin kaplanığı genişlik için herhangi bir hata oranı hesaplanmamıştır. Ancak modelin kolları kapalıyken ve cepheden bakılırken kapladığı alanın 42 cm olduğu bilinmektedir. Bu bilgi dahilinde, LUT kullanılarak hesaplanan veriler incelendiğinde, gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edildiği görülür.

Çizelge 4.3 Sabit platform, hareketli ortam uygulamasında elde edilen sonuçlar ve hata oranları

Çerçeve No	Ortalama Stereo Uzaklık Değeri (piksel)	Gerçek Uzaklık (cm)	Hesaplanan Uzaklık (cm)	Hata Oranı (%)	Modelin Kapladığı Genişlik (cm)
91	26.9	90	94.3	4.3	50.3
172	16.63	120	124.42	3.68	47.09
282	10.92	150	156.874	4.5	48.3
335	7.95	180	180.63	0.35	45.7
439	5.28	210	220.68	5	44.8
495	2.94	240	255.88	6.6	60

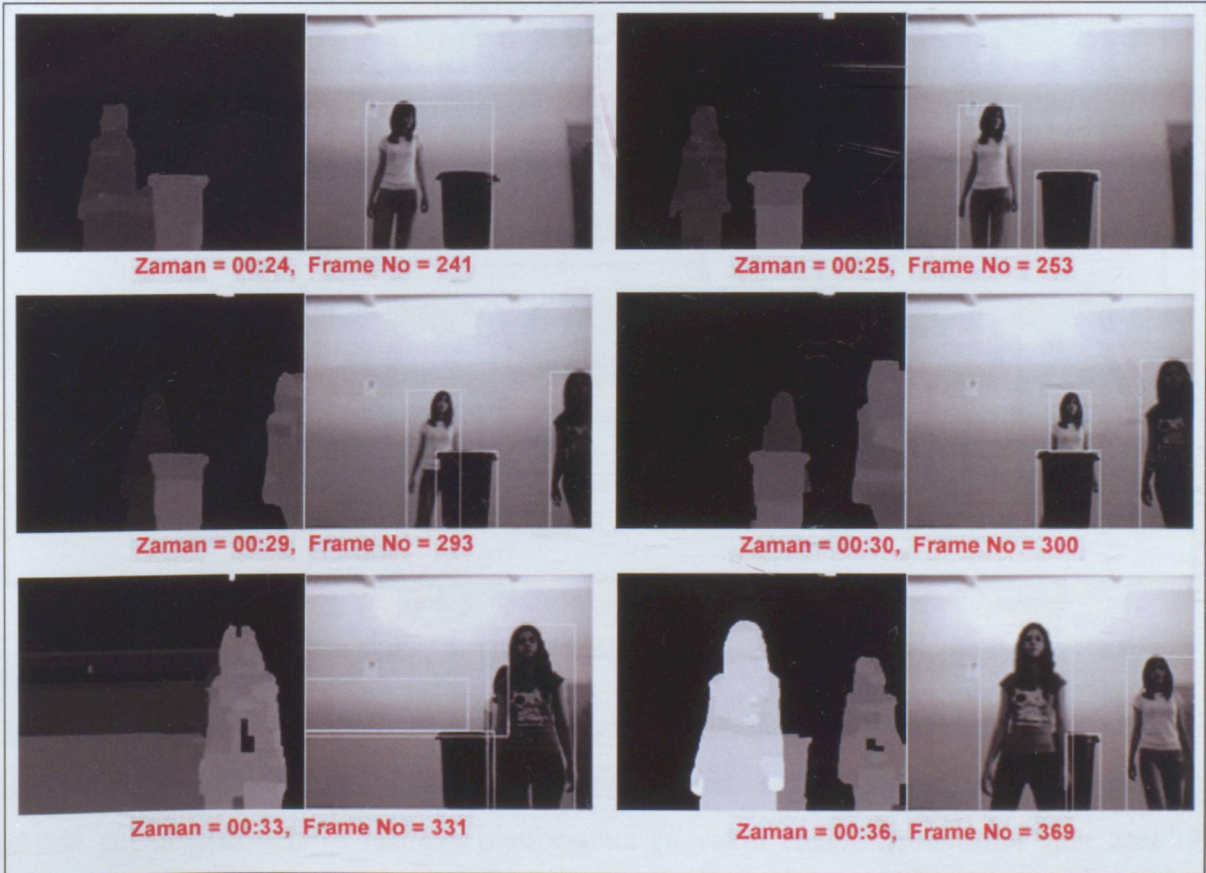
Şekil 4.7 ve 4.8’de ise bir diğer sabit platform, hareketli ortam uygulamasının çeşitli anlarında yakalanan bazı görüntüler için elde edilen sonuçlar görülmektedir.



Şekil 4.7 Sabit platform, hareketli ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar

Yukarıdaki resimlerde yer alan çöp kutusunun konumu, çekimin her anında sabit olmasına rağmen, hesaplanan kameraya olan uzaklık ve engelin genişliği ölçülerinde ufak değişiklikler olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ortamdaki ışık şiddetinin değişimine bağlı olarak stereo uzaklık haritasında meydana gelen ufak değişimlerdir. Çekim anında yakalanan tüm resim çiftlerinin işlenmesi sonucu elde edilen sonuçlar incelendiğinde, düzgün bir stereo uzaklık haritası elde edilmesi durumunda, engelin kameraya olan uzaklığı ve genişliği bilgilerinin +10 cm, -10 cm hatayla doğru hesaplandığı görülmüştür. Örneğin, Şekil 4.7'deki çöp kutusu, gerçekte 47 cm çapında ve kameralardan 190 cm uzaklığındadır.

Sistemin başarısı daha önce de bahsedildiği gibi bazı faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, Şekil 4.8'de, 241. çerçeve için elde edilmiş sonuçlar incelendiğinde, ortamda iki adet nesne olmasına rağmen bu nesnelerin tek bir nesne gibi algılandığı ve uzaklık hesaplamalarının yanlış yapıldığı görülür. Bunun sebebi, aynı stereo uzaklık değerine sahip nesnelerin birbirine çok yakın konumlanması ve arkalarındaki planın tek düze olmasıdır. 331. çerçevede ise modelin kameralara çok yaklaşması ve ani hareket değişimlerinde bulunmasından dolayı sağ ve sol kameranın ışıklandırılma seviyelerinde farklılıklar oluşmuştur. Bu da stereo eşleme algoritmasının yanlış sonuçlar üretmesine neden olmuştur.

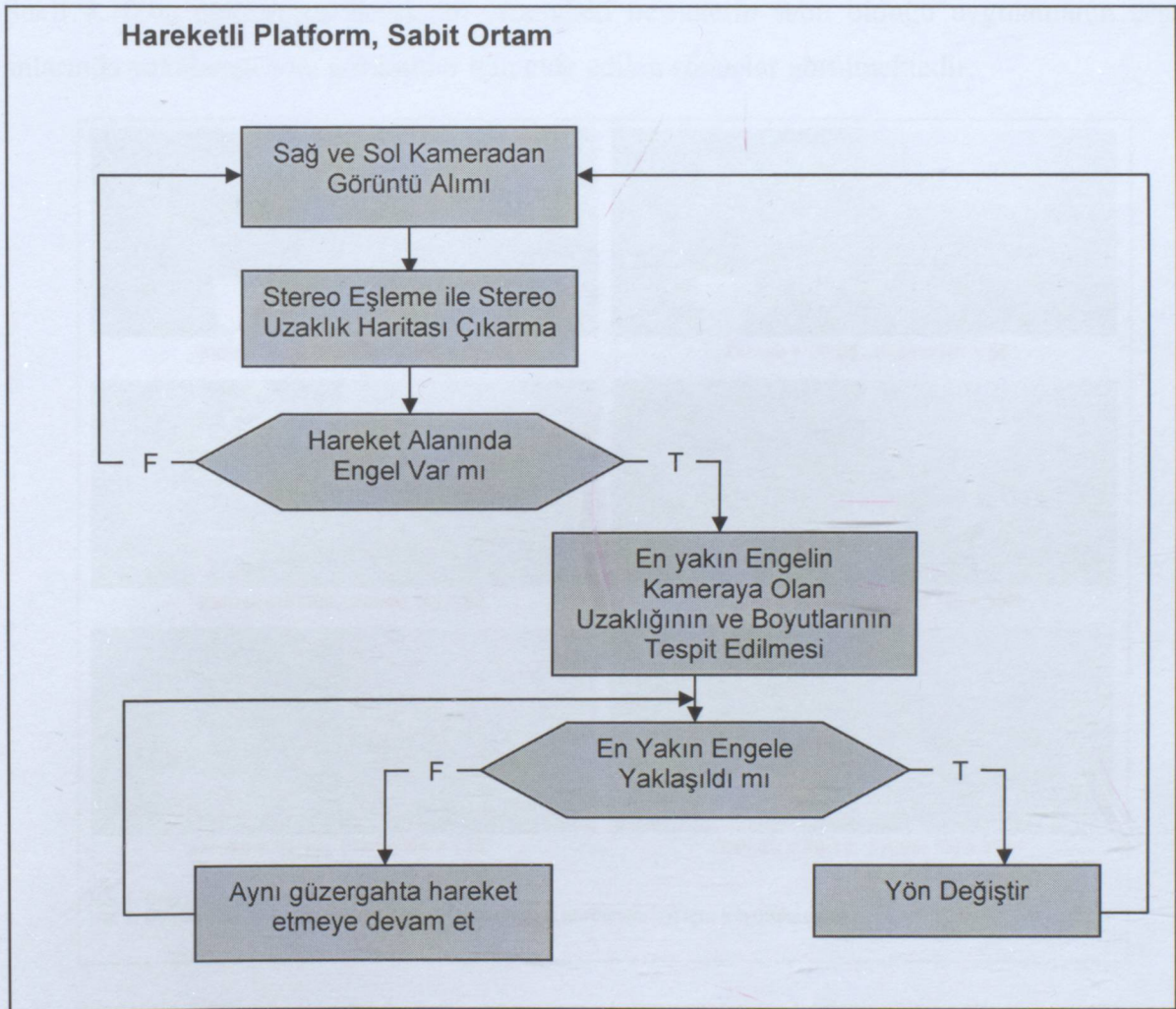


Şekil 4.8 Sabit platform, hareketli ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar

4.3 Hareketli Platform, Sabit Ortam

Kameraların monte edildiği platformun hareketli, ortamdaki nesnelerin durağan olduğu kabul edilen bu uygulamada amaç, hareketli platformun hareket alanındaki en yakın nesnenin tespit edilmesidir.

Bu uygulamada yakalanan resim çiftinin tüm pikselleri işlenmez. Sadece hareketli platformun hareket alanındaki bölgenin işlenmesi yeterlidir. Bu uygulamanın bir robota ya da araca entegre edilmesiyle hareket planı üzerindeki engelleri tanıyan ve aşan otonom bir sistem geliştirilmesi mümkündür.



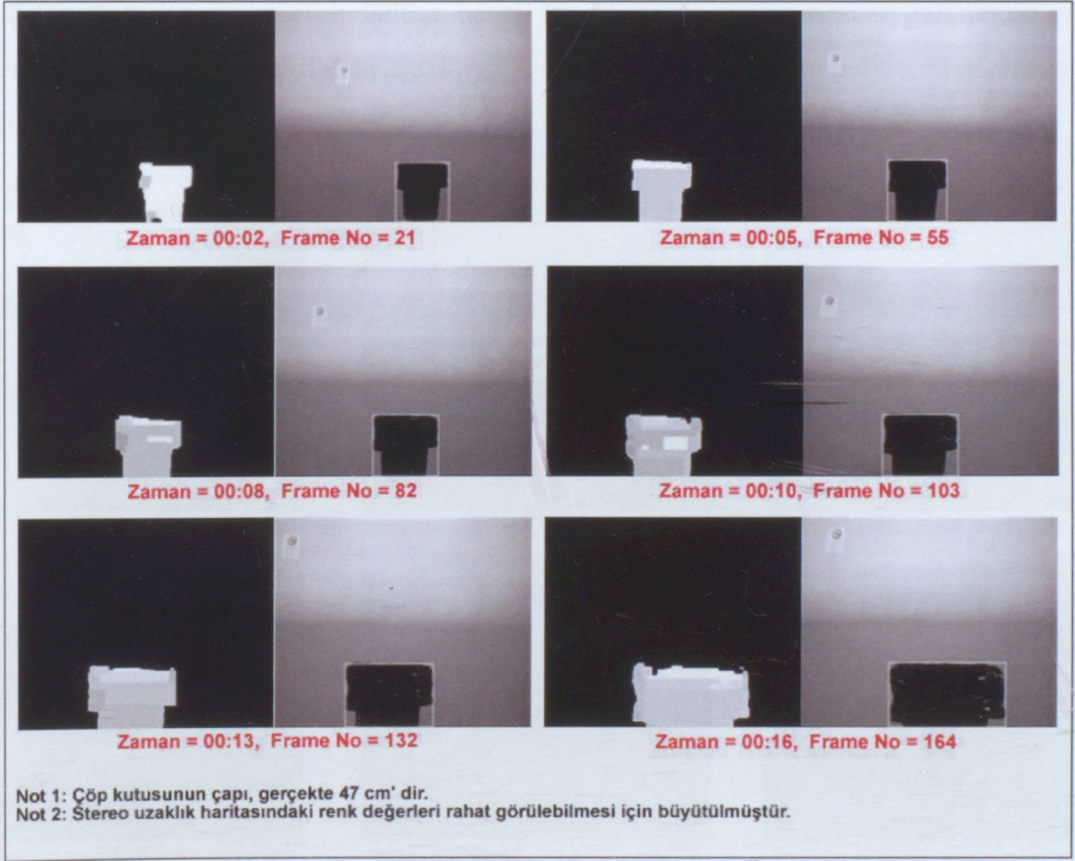
Şekil 4.9 Platformun hareketli, ortamın durağan olduğu uygulamadaki çalışma prensibi

Hareketli platform, kendi hareket alanı üzerinde herhangi bir engelin tespit edilmesi durumunda, engelin yanlarındaki boşluğa bağlı olarak sağından veya solundan geçecek şekilde yol değiştirmelidir. Kamera platformuna en yakın engelin, platforma olan uzaklığı santimetre cinsinden hesaplanabildiği için, kamera platformunun hızının da bilinmesi durumunda, engelin tespit edilmesi anından, yol değiştirme anına kadar geçecek sürenin

hesaplanabilmesiyle, bu süre boyunca ortam görüntüsünün değerlendirilmemesi mümkün olur. Stereo görüntü değerlendirmenin çalışma süresi maliyetinin büyüklüğü düşünüldüğünde, engel tespiti işleminin gerekmedikçe yapılmaması, engellere takılmadan ilerlemeye çalışan sistemlerin asıl görevlerini yapabilmeleri için zamanı daha efektif kullanmalarını sağlamış olacaktır. Uygulamanın çalışmasına ait akış diagramı Şekil 4.9'da görüldüğü gibidir.

Bir önceki uygulamanın başarısını etkileyen faktörler, bu uygulama için de geçerlidir. Bu faktörlere ilaveten, platformunun hareketli olmasına bağlı olarak kameralarda meydana gelen gürültü ve titreşimler de sistemin başarısını etkileyen önemli faktörlerdir.

Şekil 4.10'da platformun hareketli, ortamdaki nesnelerin sabit olduğu uygulamanın çeşitli anlarında yakalanan bazı görüntüler için elde edilen sonuçlar görülmektedir.



Şekil 4.10 Hareketli platform, sabit ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar

Şekil 4.10 için, LUT kullanılarak elde edilen mesafe ölçümleri Çizelge 4.4'de görülmektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi çöp kutusunun kameraya olan uzaklığının tespitindeki hata oranı % 0 ila % 3 arasında değişmektedir. Engel olarak tespit edilen nesnenin (çöp kutusunun) çapı gerçekte yaklaşık 47 cm'dir. Bu uygulamada da, LUT kullanılarak hesaplanan veriler incelendiğinde, gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edildiği görülür.

Çizelge 4.4 Hareketli platform, sabit ortam uygulamasında elde edilen sonuçlar ve hata oranları

Çerçeve No	Ortalama Stereo Uzaklık Değeri (piksel)	Gerçek Uzaklık (cm)	Hesaplanan Uzaklık (cm)	Hata Oranı (%)	Engelin Kapladığı Genişlik (cm)
21	3.89	240	241.56	0.65	55.6
55	6.13	210	208.02	0.95	49.8
82	8.20	180	178.79	0.67	50.9
103	12.61	150	148.65	0.9	50.1
132	16.87	120	121.5	1.25	48.57
164	27.38	90	91.98	2.05	54.78

Hareketli platform, sabit ortam uygulamasında sadece kameraya en yakın mesafedeki nesneler engel olarak kabul edilmektedir. Kameranın yerleştirildiği platformun hareket alanı, resmin ortasındaki 212 piksellik alan olarak belirlenmiştir. Yani sağdan ve soldan 70'er piksellik alan dikkate alınmaz. Resim çiftinin sadece belirli bir bölgesinin işlenmesi uygulamanın çalışma süresi maliyetini azaltır. Şekil 4.11'de, kırmızı çizgiler arasında kalan bölge, platformun görüş alanını işaret etmektedir.



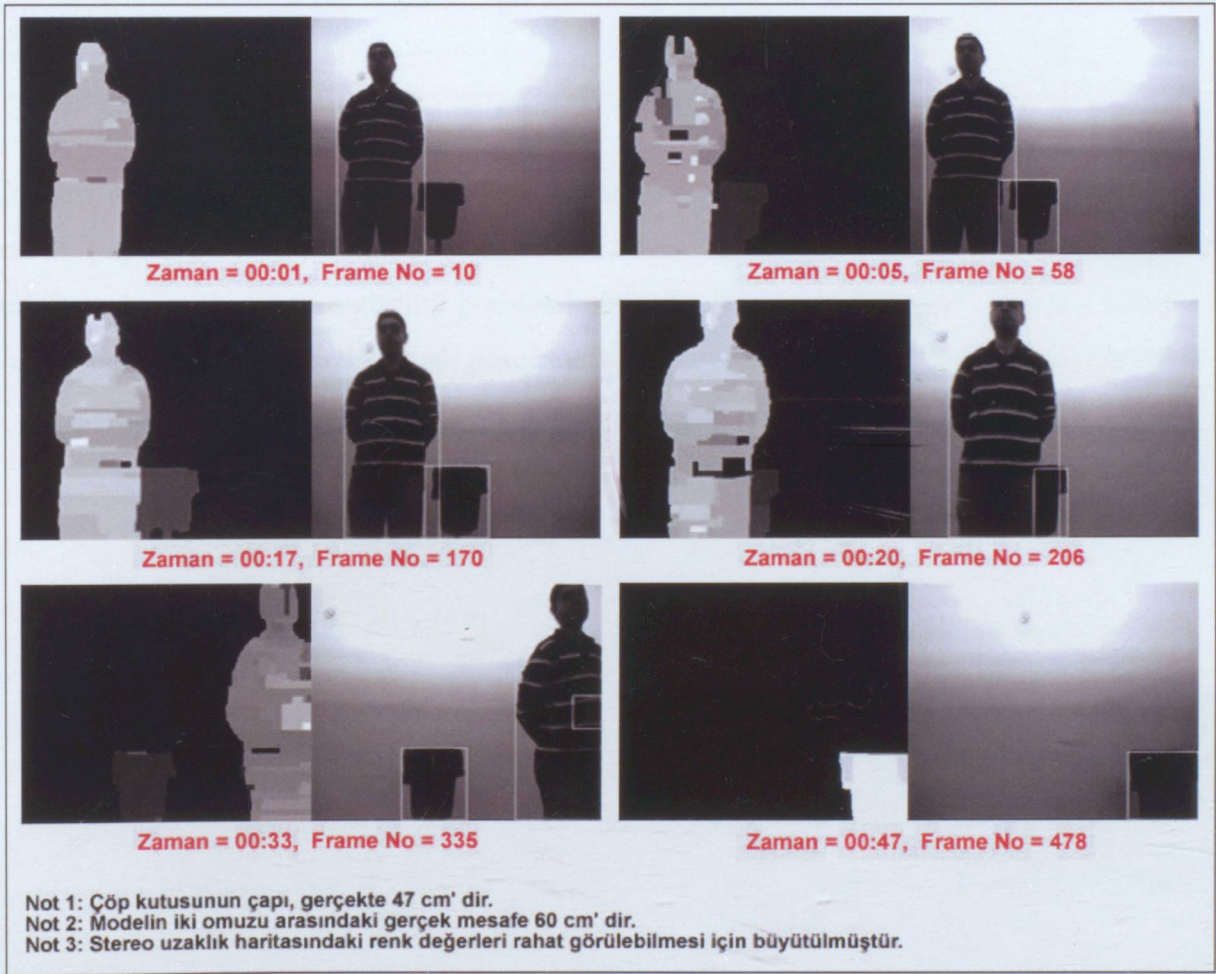
Şekil 4.11 Hareketli platform, sabit ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar

Bu uygulamada maksimum stereo uzaklık değerine bağlı olarak, platform ile nesne arasındaki mesafe 1 metrenin altına indiğinde, stereo eşleme adımında hatalı sonuçlar oluştuğu görülmüştür.

4.4 Hareketli Platform, Hareketli Ortam

Bu uygulamada, görüntü alımında yakalanan her bir çerçevenin değerlendirilmesi gerekmektedir. Çünkü, nesnelerin hareketli olmasına bağlı olarak ortamda ani değişimler olabilir. Önceki uygulamaların başarısını etkileyen faktörler bu uygulama için de geçerlidir.

Şekil 4.12’de hem platformun hem de ortamdaki nesnelerin hareketli olduğu uygulamanın çeşitli anlarında yakalanan bazı görüntüler için elde edilen sonuçlar görülmektedir.



Şekil 4.12 Hareketli platform, hareketli ortam için yapılan çekimde elde edilen sonuçlar

Şekil 4.12 için, LUT kullanılarak elde edilen mesafe ölçümleri Çizelge 4.5’de görülmektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi engel olarak tespit edilen nesnelerin kameraya olan mesafelerinin hesabındaki hata oranı, % 0 ila % 10 arasında değişmektedir. Ortamdaki nesnelerden modelin kolları kapalıyken ve cepheden bakılırken kapladığı alan 60 cm, çöp

kutusunun çapı ise 47 cm'dir.

Çizelge 4.5 Hareketli platform, hareketli ortam uygulamasında elde edilen sonuçlar ve hata oranları

Çerçeve No	Ortalama Stereo Uzaklık Değeri (piksel)	Gerçek Uzaklık (cm)	Hesaplanan Uzaklık (cm)	Hata Oranı (%)	Engelin Kapladığı Genişlik (cm)
10 (model)	8.8	180	175.19	2.77	58.80
58 (model)	12.37	150	151.4	0.9	56.4
58 (Çöp Kutusu)	3.0	240	255	6.25	56.6
170 (model)	12.77	150	146.75	2.16	57.2
170 (Çöp Kutusu)	4	240	240	0	59.28
206 (model)	16.95	120	120.53	0.44	58.3
206 (Çöp Kutusu)	4.4	210	233.8	10.9	25.9
335 (model)	14.96	135	132.46	1.88	45.5
335 (Çöp Kutusu)	4.98	225	225.27	0.12	54.2
478 (Çöp Kutusu)	478	180	175.08	2.7	45.5

Çalışma süresi maliyeti düşük, tek düze ve desensiz ortamlarda büyük oranda doğru engel tesbiti yapan bu uygulamanın, kamera platformu hareketine bağlı olarak görüntülerde meydana gelen titreşim ve gürültü problemlerinin de aşılması durumunda insansız gözetim, insansız araç navigasyonu, hareketli nesne takibi gibi uygulamalara entegrasyonu sağlanabilir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Kendi teknolojisini kendi üretip, teknoloji konusundaki dışa bağımlılığını azaltmayı hedefleyen ülkemizde, farklı robot uygulamalarında kullanılabilecek bir sistemin geliştirilmesi, ülkenin stratejik bilim ve teknoloji hedefleri ile uyumludur. Bu tez çalışmasında ise insan görme sistemini taklit etmeye çalışan otonom araçlara ve mobil robotlara, gerçek zamanda engel tespiti yapabilme, tespit edilen engellerin kameraya olan uzaklığını ve gerçek dünyadaki boyutlarını hesaplayabilme özelliklerini kazandırmak hedeflenmiştir.

Platformun durağan değil hareketli olması, hareketi esnasında sistemin çalışacağı ortamın sürekli değişmesi, dolayısıyla ortamdaki engellerin daha önceden belirlenmiş sabit nesneler olmaması, stereo görme özelliği kullanılarak görüntünün üç boyutlu değerlendirilmesi ve tüm bu işlemlerin gerçek zamanlı yapılması geliştirilen sistemde göz önünde bulundurulmuş karmaşıklık düzeyi yüksek problemlerdir.

Geliştirilen sistem iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama sistemin gerçek zamanlı adımları uygulanmadan önce ihtiyaç duyulan kamera kalibrasyonu adımlarından oluşur. Kamera kalibrasyonu sonucu iki kameranın iç ve dış parametreleri elde edilir. Eğer görüntü alımı yapacak kameralar paralel olacak ve optik eksenlerde dönme olmayacak şekilde konumlandırılmışsa, kamera kalibrasyonu aşaması uygulanmadan doğrudan ikinci aşamaya geçilir. İkinci aşama sistemin gerçek zamanlı adımlarından oluşur. Bu aşamada öncelikle aralarındaki mesafe 12 cm olan, iki adet 90 derece görme açısına sahip, renkli video kamera ile 352 x 288 çözünürlüğünde eş zamanlı olarak görüntü alımı yapılır. Alınan görüntüler, önceden kamera kalibrasyonu yapılmışsa, kalibrasyon parametreleri kullanılarak düzeltilir (rectification). Böylece görüntülerdeki eş piksellerin aynı y koordinatlarında olması sağlanır. Bu adım, kameraların paralel olmaması durumunda uygulanır. Eğer görüntü alımı, paralel olarak konumlandırılmış kameralardan yapılmışsa elde edilen görüntülerin düzgün olduğu kabul edilir ve stereo eşleme adımına geçilir. Stereo eşleme adımında, sağ ve sol kameradan elde edilmiş eş zamanlı görüntülerin, dinamik programlama yöntemi ile işlenmesi sonucu stereo uzaklık haritası elde edilir. Ardından stereo uzaklık haritası üzerinden arka arkaya gelen ve aynı fark değerine sahip olan aralıkların bulunmasıyla engeller tespit edilir. Son olarak engel olarak tespit edilen bölgedeki fark değeri ile kameraların geometrik yerleşiminden yararlanılarak engelin kameralara olan uzaklığı ve gerçek dünyadaki boyutları bulunur.

Doğru ve güvenilir stereo uzaklık haritası elde etmek, engel tespiti ve engellerin kameraya olan uzaklığının bulunması aşamalarının başarıyla sonuçlanmasını sağlayan en önemli faktör

olarak belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında stereo eşleme adımında, görüntü örneklemesine hassas olmayan, desenli ve desensiz ortamlarda başarıyla çalışan ve çalışma zamanı maliyeti düşük olan Birchfield algoritması (Stan Birchfield ve Carlo Tomasi, 1999) kullanılmıştır. Birchfield algoritmasıyla, engellerin kameraya olan uzaklığını ve kapladığı alanı doğru bir şekilde tespit edebilmek için yeterli doğrulukta ve güvenilirlikte sonuçlar elde edilmiştir.

Geliştirilen sistem, üç farklı gerçek zamanlı uygulama ile test edilmiştir. İlk uygulamada kameraların monte edildiği platform sabit, ortamdaki nesneler hareketlidir. İkinci uygulamada kameraların monte edildiği platform hareketli, ortamdaki nesneler sabittir. Üçüncü ve son uygulamada ise hem kamera platformu hem de ortamdaki nesneler hareketlidir. Düzgün bir stereo uzaklık haritası elde edilmesi durumunda, engelin kameraya olan uzaklığı ve boyutları, %0 ila %10 arası bir hatayla hesaplanmıştır. Aynı zamanda gerçekleştirilen sistemin gerçek zamanlı bir uygulamanın en büyük gereksinimlerinden biri olan hız konusunda yeterli olduğu görülmüştür. Bir resim çifti için toplam işlem süresi, Pentium M, 2 GHz, 800 MHz işlemcili bir bilgisayar için 0.9 saniye sürmektedir.

Geliştirilen sistemin en büyük avantajları, sadece görüntü bilgisini değerlendirerek engel ve mesafe tesbiti yapabilmesi, gerçek zamanlı bir uygulamada kullanılabilecek düzeyde hızlı olması ve modüler yapısı sayesinde başka uygulamalara da entegre edilebilir olmasıdır.

Geliştirilen sistemin en büyük dezavantajı ise stereo uzaklık haritasının elde edilmesi aşamasında kullanılan Birchfield algoritmasının ortam şartlarına bağlı olarak çok çabuk kırılmasıdır.

Çeşitli ortamlarda yapılan birçok video çekimi sonucunda, sistemin başarısını etkileyen dış faktörler, ortamın ışık şiddeti, kameraların ışıklandırılma seviyeleri, ortamın arka plan deseni, ortamdaki nesnelerin hareket hızı ve ortamdaki nesnelerin kameraya olan mesafesi olarak belirlenmiştir. Stereo uzaklık haritasının çıkarılması adımında, bölütleme yöntemine dayanan bir stereo eşleme algoritması kullanarak bu dış faktörlerden minimum derecede etkilenmek mümkün olmasına rağmen, bu algoritmaların çalışma hızlarının gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilmesi için yetersiz olduğu görülmüştür.

Geliştirilen sistemin dinamik çevre koşullarına olan dayanıklılığını arttırmak için ilerki çalışmalarda, çalışma süresi maliyeti düşük olan, bölütleme yöntemine dayanan bir stereo eşleme algoritması geliştirilmesi ve hareketli platforma bağlı olarak kameralardan alınan görüntülerde meydana gelen parazit ve titremelerin, kamera stabilizasyonu yöntemiyle giderilmesi konularına çözüm üretilmelidir.

Yapılan literatür araştırması sonucunda, sadece görüntü bilgisini değerlendirerek engel tespiti ve engel aşma işlemlerini başarıyla yapabilen gerçek zamanlı çalışmaların sayısının oldukça az olduğu görülmüştür. Konuyla ilgili ulusal çalışmalar incelendiğinde ise görüntü bilgisini değerlendirerek engel tanıma ve aşma işlemlerine birlikte çözüm üreten gerçek zamanlı bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bu yapıyla, geliştirilen sistemin bir mobil robota ya da araca entegre edilmesi, ülkemizin teknoloji konusundaki dışa bağımlılığını azaltma hedefleri ile uyumlu olacaktır.

KAYNAKLAR

A. Tsalatsanis, K. Valavanis, A. Yalcin, (2007), "Vision Based Target Tracking and Collision Avoidance for Mobile Robots", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Volume 48, Number 2, pp. 285-304.

A.Ohya, A.Kosaka ve A.Kak, (1998), "Vision-Based Navigation By A Mobile Robot With Obstacle Avoidance Using Single-Camera Vision And Ultrasonic Sensing", *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol.14, pp.969-978.

Aksay, A.; Bici, M.O.; Akar, G.B. , (2005), "Using Disparity Map Compensation For Stereo Image Coding", *Signal Processing and Communications Applications Conference*, Proceedings of the IEEE 13th Volume , Issue , 16-18 May 2005.

Albert Ali Salah, (2006), "İnsan Ve Bilgisayarda Yüz Tanıma", Boğaziçi Üniversitesi.

Annika Kuhl, (2005), "Comparison of Stereo Matching Algorithms for Mobile Robots", The University of Western Australia.

Barraquand, J. ve Latombe, J.C., (1991), "Robot motion planning: a distributed representation approach", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 10 No. 6, pp. 628-49.

Bertozzi, M., Broggi, A., Fascioli, A., (2000), "Vision-based intelligent vehicles: State of the art and perspectives.", *Robotics and Autonomous Systems* 32, 1-16.

Borenstein, J. ve Koren, Y., (1989), "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots", *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics B*, Vol. 19 No. 5, pp. 1179-87.

Boykov, Y., Veksler, O., Zabih, R., (2001), "Fast Approximate Energy Minimization Via Graph Cuts.", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 23(11), 1222-1239.

Brendan M. Collins, Alain L. Kornhauser, (2006), "Stereo Vision for Obstacle Detection in Autonomous Navigation", Princeton University May 24.

C.-H. Chen, C. Cheng, D. Page, A. Koschan, M. Abidi, "A Moving Object Tracked by a Moving Robot with Real-time Obstacles Avoidance," in *Proc. IEEE International Conference on Pattern Recognition ICPR 2006*, Vol. III, Hong Kong, pp. 1091-1094, August 2006.

C.S. Hong, S.M. Chun, J.S. Lee, K.S. Hong, (1997), "A Vision-Guided Object Tracking And Prediction Algorithm For Soccer Robots", *International Conference On Robotics And Automation*, Albuquerque, New Mexico, IEEE.

Candocia, F., Adjouadi, M., (1997), "A Similarity Measure For Stereo Feature Matching.", *IEEE Transaction on Image Processing* 6, 1460-1464.

D. J. Kriegman, E. Triendl ve T. O. Binford, (1989), "Stereo Vision And Navigation In Buildings For Mobile Robots", *IEEE Trans. Robotics Automat.*, vol. 5, no. 6, pp. 792-803, Dec.

Darius Burschka, Stephen Lee, Gregory Hager, (2002), "Stereo-Based Obstacle Avoidance in Indoor Environments with Active Sensor Re-Calibration", 2066-2072.

David Jacobs, Frank Dellaert, Octavia Camps, Steve Seitz, "Stereo Vision, Reading Chapter 11".

De Souza, G.N., Kak, A.C.: , (2002), "Vision for Mobile Robot Navigation", A Survey. IEEE

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 24(2), 237–267.

ECSE 6650 Computer Vision, Final Project.

G. Van Meerbergen, M. Vergauwen, M. Pollefeys, L. Van Gool, (2001), “A Hierarchical Stereo Algorithm Using Dynamic Programming,” *smbv*, p. 0166, IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision (SMBV'01).

Geiger, D., Ladendorf, B., Yuille, A., (1995), “Occlusions And Binocular Stereo.”, *International Journal of Computer Vision* 14, 211–226.

Guo-Wei Zhao, Shin'ichi Yuta, (1993), “Obstacle Detection by Vision System for an Autonomous Vehicle”, *Intelligent Vehicles Symposium*, pp.31-36.

J. Sun, H. Y. Shum, N. N. Zheng, (2003), “Stereo matching using belief propagation.”, *PAMI* 2003

J.Borenstein ve Y.Koren, (1991), “Histogramic In Motion Mapping For Mobile Robot Obstacle Avoidance”, *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol.7, pp.535-539.

J.Borenstein, (1989), “Real-Time Obstacle Avoidance For Fast Mobile Robots”, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol.19, pp.1179-1187.

Jong-Seung Park ve Bum-Jong Lee, (2007), “View Synthesis from Two Unrectified Images”, 2007 IEEE.

K. Gupta, A. P. del Pobil, (1998), “Practical Motion Planning in Robotics: Current Approaches and Future Directions”, John Wiley & Sons, West Sussex.

K.Higashijima, H.Onda ve T.Ogasawara, (1998), “A study on Estimation Wire Obstacle using Ultrasonic Sensors and Planning for Avoidance”, *Proc. IEEE/RSJ IROS 98*, vol.3, pp.1622-1627.

K.Onoguchi, N.Takeda, M.Watanabe, (1997), “Obstacle Location Estimation Using Planar Projection Stereopsis Method”, *IEEE ICRA 97*, vol.3, pp.2553-2558.

K.Yoshida, S.Yokota ve I.Watabe, (1999), “A Real-time Motion Stereo Vision Based on Brightness Difference”, *Proc. IEEE/RSJ IROS 99*, vol1, pp.77-82.

Kanade, T., Okutomi, M., (1994), “A Stereo Matching Algorithm With An Adaptive Window: theory and experiment.”, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 16(9), 920–932.

Kastrinaki, V., Zervakis, M., Kalaitzakis, K., (2003), “A survey of video processing techniques for traffic applications.”, *Image and Vision Computing* 21, 359–381.

Kohtaro Sabe, Masaki Fukuchi, Jens-Steffen Gutmann, Takeshi Ohashi Kenta Kawamoto, Takayuki Yoshigahara, (2004), “Obstacle Avoidance and Path Planning for Humanoid Robots using Stereo Vision”, *FTocedlngs ofthe 2004 IEEE*.

Koren, Y. ve Borenstein, J., (1991), “Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation”, *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 1398-404..

L. Hong ve G. Chen, (2004), “Segment-based stereo matching using graph cuts.”, *CVPR* 2004.

- L.M. Lorigo, R.A. Brooks, W.E.L. Grimson., (1997), "Visually Guided Obstacle Avoidance in Unstructured Environments", Proc. IROS97, IEEE/RSJ., pp. 373-379.
- Latombe, J.C., (1991), "Robot Motion Planning", Kluwer Academic Publishers, Boston, MA..
- M. Lin, C. Tomasi, (2002), "Surfaces with occlusions from layered stereo".
- M. Sharir, (1997), "Algorithmic Motion planning", Handbook of Discrete and Computational Geometry, CRC Press, Boca Raton, Florida, 733-754.
- Makbule Gülçin Özsoy, (2007), "Bilgisayarlı Görme".
- Marr, D., Poggio, T.A., (1976), "Cooperative Computation Of Stereo Disparity." Science 194(4262), 283-287.
- Marr, D., Poggio, T.A., (1979), "A Computational Theory Of Human Stereo Vision." RoyalP B(204), 301-328.
- Marti Gaëtan, (1998), "Stereo Vision for Mobile Robotics", Micro-Engineering Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne.
- Masako Kumano Akihisa Ohya, Shin'ichi Yuta, (2000), "Obstacle Avoidance of Autonomous Mobile Robot Using Stereo Vision Sensor", Proceedings of the 2nd International Symposium on Robotics and Automation, 497-502.
- O. Khatib, (1995), "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," International Journal of Robotics Research, vol. 5, no. 1, pp. 90-98.
- O. Veksler, (2005), "Stereo correspondence by dynamic programming on a tree.", CVPR 2005.
- Okada, N.; Hongbin Zha; Nagata, T.; Kondo, E.; Morooka, K., (1998), "3-Dimensional Object Model Construction From Range Images Taken By A Range Finder On A Mobile Robot Intelligent Robots And Systems", 1998 IEEE/RSJ International Conference on Volume 3, 1853 - 1858.
- P. Foggia, Jean-Michel Jolion, A. Limongiello ve M. Vento, (2007), "Stereo Vision for Obstacle Detection: A Graph-Based Approach", Springer, Volume 4538/2007.
- P. Jia, H. Hu, T. Lu, K. Yuan, (2007) "Head Gesture Recognition for Hands-free Control of an Intelligent Wheelchair". vol. 34, n1, pp. 60-68
- Perez, L.G., Alegre, M.C.G., Ribeiro, A., Guinea, D. ve Canas, J.M., (2004), "Perception and tracking of dynamic objects for optimization of avoidance strategies in autonomous piloting of vehicles", paper presented at International Conference Spatial Cognition, pp. 500-19.
- S. Roy, I. J. Cox, (1998), "A maximum-flow formulation of the N-camera stereo correspondence problem.", ICCV 1998.
- Scharstein, D., Szeliski, R., (2002), "A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms.", International Journal of Computer Vision 47(1), 7-42.
- Seydou Soumare, Akihisa Ohya, Shinichi Yuta, (2002), "Real-Time Obstacle Avoidance by an Autonomous Mobile Robot using an Active Vision Sensor and a Vertically Emitted Laser Slit", IOS Press, pp.301-308.
- Stan Birchfield ve Carlo Tomasi, (1999), "Depth Discontinuities by Pixel-to-Pixel Stereo",

International Journal of Computer Vision 35(3), 269–293.

T.Nakamura ve M.Asada, (1996), “Stereo Sketch: Stereo Vision-based Target Reaching Behavior Acquisition with Occlusion Detection and Avoidance”, Proc. IEEE ICRA 96, vol.2, pp.1314-1319.

Tao, H., Sawhney, H.S., (2000), “Global Matching Criterion And Color Segmentation Based Stereo.” In: WACV00, pp. 246–253.

Taylor, R.M. Probert, “Range Finding and Feature Extraction by Segmentation of Images for Mobile Robot Navigation”, P.J. Dept. of Eng. Sci., Oxford Univ.

Vandorpe, J.; Van Brussel, H.; Xu, H., (1996), “Exact Dynamic Map Building For A Mobile Robot Using Geometrical primitives Produced By A 2d Range Finder Robotics And Automation”, 1996 IEEE International Conference on Volume 1, 901 – 908.

Veksler, O., (2001), “Stereo Matching By Compact Windows Via Minimum Ratio Cycle.”, In: Proceedings of the International Conference on Computer Vision, Vancouver, Canada, vol. I, pp. 540–547.

Y.K. Hwang, N. Ahuja, (1992) “Gross Motion Planning - A Survey”, ACM Computing Surveys 24, no. 3, Sep. 1992, 219-291.

Zhiwei Zhu, Ming Jiang, Chih-ting Wu, “Analysis of Stereo Image Rectification Algorithms”,

Zitnick, C.L., Kanade, T. , (2000), “A cooperative algorithm for stereo matching and occlusion Detection.”, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence 22(7), 675–684.

INTERNET KAYNAKLARI

<http://mathcs.holycross.edu/~croyden/vision/notes/Lecture17>

<http://vision.middlebury.edu>

<http://www.umiacs.umd.edu/~ramani/cmsc828d/lecture9.pdf>

<http://www.vision.deis.unibo.it/smatt/stereo/Calibration.html>

<http://www.vision3d.com>

<http://sourceforge.net/projects/opencv>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 21.02.1983

Doğum yeri İstanbul

Lise 1998-2001

Afyon Kocatepe Anadolu Lisesi Demirel Fen Lisesi

Lisans 2001-2005

Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik – Elektronik Fak.
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurumlar

11.2005 - Devam ediyor

YTÜ Eğitim Fakültesi Araştırma Görevlisi
(Görev Yeri: Bilgi İşlem Daire Başkanlığı)

