

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**STEREO HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ İLE
DERİNLİK ÇIKARTIMI**

Ali Can KARACA

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

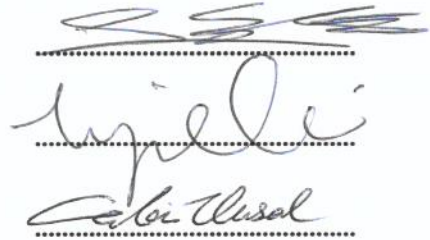
STEREO HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ İLE
DERİNLİK ÇIKARTIMI

Ali Can KARACA

Prof.Dr. Sarp ERTÜRK
Danışman, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. M. Kemal GÜLLÜ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Cabir VURAL
Jüri Üyesi, Marmara Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 21.01.2014

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tez kapsamında Türkiye’de ve dünyada ilk defa oluşturulan ve panoramik görüntüler üzerinden derinlik tespit edebilen hiperspektral görüntüleme sistemi önerilmiştir. Ülkemizde bu konudaki araştırmaların azlığı nedeniyle bu tez çalışmasının bu konuda çalışacak araştırmacılara faydalı olmasını temenni ederim.

Hiperspektral görüntüleme sisteminin geliştirilmesinde bana çalışma fırsatı veren ve destekleyen değerli hocam Prof. Dr. Sarp Ertürk’e, teknik anlamda çok şey öğrendiğim Muharrem Elmas’a, çalışmaların sırasında bana yardımcı olan değerli hocalarım Doç. Dr. M. Kemal Güllü ve Dr. Alp Ertürk’e, hayatım boyunca beni destekleyen aileme, en sıkıntılı, stresli anlarımda yanımda olan ve benden destek ve sabrını esirgemeyen Fatma Gürler’e ve güzel ve anlayışlı bir çalışma ortamını paylaştığımız KULİS’teki tüm araştırmacı arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ocak - 2014

Ali Can KARACA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ	1
1. HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME.....	3
1.1. Hiperspektral Görüntüleme Sistemlerindeki Temel Kavramlar.....	4
1.1.1. Spektral kapsama	4
1.1.2. Spektral çözünürlük	4
1.1.3. Uzamsal çözünürlük	5
1.1.4. Radyometrik çözünürlük.....	5
1.1.5. Bant sayısı.....	6
1.1.6. İşaret gürültü oranı.....	7
1.2. Hiperspektral Görüntü Kübü.....	7
1.3. Hiperspektral Görüntü Alma Yöntemleri.....	7
2. STEREO HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ.....	10
2.1. Stereo, Panoramik ve Hiperspektral Görüntüleme Literatürüne Genel Bakış	10
2.2. Stereo Hiperspektral Görüntüleme Sisteminin Bileşenleri	11
2.3. Hiperspektral Kameraların Kalibrasyonu.....	13
3. DÖNEREK ÇİZGİ TARAYAN KAMERALAR İLE STEREO GÖRÜNTÜLEME TEORİSİ	16
3.1. Dönerek Çizgi Tarayan Kameranın Temel Kavramları	17
3.2. Dönerek Çizgi Tarayan Kameraların Epipolar Geometrisi.....	18
3.3. Uzamsal Örnekleme	21
3.4. Uzamsal Örnekler Arasındaki Mesafe	22
3.4.1. Yatay örnekler arasındaki uzaklıklar	24
3.4.2. Dikey örnekler arasındaki uzaklıklar	26
3.4.3. Derinlik örnekleri arasındaki uzaklıklar	26
3.4.4. Uzamsal örnekler arasındaki mesafelerin deneysel değerlendirilmesi	26
4. STEREO HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLERİNDEN DERİNLİK KESTİRİMİ.....	29
4.1. Stereo Eşlemede Kullanılan Yöntemler	29
4.2. Stereo Eşleme Algoritmasının Seçimi.....	30
4.3. Önerilen Derinlik Kestirim Algoritması	32
4.3.1. Başlangıç cezalarının hesabı.....	34
4.3.2. Hiperspektral görüntü çiftinin bölütlenmesi	35
4.3.3. Ceza biriktirilmesi.....	36
4.3.4. Örtük bölgelerin tespiti ve doldurulması	37

4.4. Stereo Hiperspektral Görüntüleme Sistemiyle Alınan Görüntülerin Özellikleri.....	38
4.4.1. Deney 1	39
4.4.2. Deney 2	39
4.5. Önerilen Algoritma Sonuçları ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması	40
4.5.1. Deney 1	41
4.5.2. Deney 2	42
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	48
KAYNAKLAR	50
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	55
ÖZGEÇMİŞ	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Aynı bölgenin farklı uzamsal çözünürlüklerde görüntülenmesi (Bir pikselin fiziksel boyutları (a) 2×2 , (b) 5×5 , (c) 10×10 metre iken).....	5
Şekil 1.2.	Aynı bölgenin farklı radyometrik çözünürlüklerle elde edilmiş görüntüleri (a) Yüksek radyometrik çözünürlük, (b) Düşük radyometrik çözünürlük	6
Şekil 1.3.	Hiperspektral görüntü kübü.....	8
Şekil 1.4.	Farklı nesnelere ait piksel spektrumları	8
Şekil 1.5.	Farklı tarama yöntemleri (a) Nokta Tarama, (b) Alan tarama, (c) Çizgi Tarama	9
Şekil 2.1.	Panoramik hiperspektral stereo görüntüleme sistemi.....	11
Şekil 2.2.	Stereo hiperspektral görüntüleme sisteminin 3D modeli	12
Şekil 2.3.	Görüntüleme spektrometresinin iç yapısı.....	13
Şekil 2.4.	Kalibrasyon ışığına ait kamera görüntüsü (a) Uzamsal hizalama öncesi, (b) Uzamsal hizalama sonrası	14
Şekil 2.5.	Piksel koordinatlarının dalga boyu ile eşleştirmesi.....	14
Şekil 2.6.	Kalibrasyon lambasına ait dalga boyu kalibrasyonu öncesi (eski) ve sonrası spektrumlar.....	15
Şekil 3.1.	(a) Alan tarayan kamera, (b) çizgi tarayan kamera	16
Şekil 3.2.	Alan tarayan kameralar için epipolar geometri	17
Şekil 3.3.	Döner çizgi tarayan kameraya ait temel kavramlar.....	18
Şekil 3.4.	Farklı panoramik görüntüler (a) Çok-bakış açılı panoramalar, (b) Paralel eksenli panoramalar, (c) Eş eksenli panoramalar, (d) İç içe panoramalar, (e) Simetrik panoramalar	19
Şekil 3.5.	Stereo uzamsal örnekler (a) Sağ kamera için izdüşüm çizgileri, (b) Sol kamera için izdüşüm çizgileri, (c) Örneklerin oluşumu (d) Çizgiler yok iken örneklerin dağılımı.....	22
Şekil 3.6.	(a) W iki kat arttığında örneklerin dağılımı (b) R iki kat arttığında örneklerin dağılımı (ölçekli çizim)	23
Şekil 3.7.	Örneklerin dağılımı ve uzaklıkların gösterilmesi.....	24
Şekil 3.8.	Örneklerin kuşbakışı gösterilmesi ve bazı uzaklıklar	25
Şekil 3.9.	Yatay örnek uzaklıklarının derinlik katmanı ve derinliğe göre değişimi	27
Şekil 3.10.	Dikey örnek uzaklıklarının derinlik katmanı ve derinliğe göre değişimi	27
Şekil 3.11.	Derinlik örnek uzaklıklarının derinlik katmanı ve derinliğe göre değişimi	28
Şekil 4.1.	Bölge eşleme algoritmalarındaki tarama yaklaşımı (a) referans görüntü, (b) hedef görüntü	30
Şekil 4.2.	Önerilen stereo eşleme algoritmasının akış şeması.....	32
Şekil 4.3.	Örnek çok bantlı Census dönüşümü.....	35
Şekil 4.4.	Sağ-sol derinlik tutarlılığının kontrolü.....	37
Şekil 4.5.	(a) Birinci sahneye, (b) ikinci sahneye ait renkli görüntüler.....	39

Şekil 4.6.	Üçüncü sahneye ait renkli görüntü.....	40
Şekil 4.7.	Hiperspektral görüntülerden alınan 39×39 pencere boyutundaki dört bölgenin bölüt ağırlıkları	42
Şekil 4.8.	(a) Birinci sahneye ait (b) ikinci sahneye ait (c) üçüncü sahneye ait bölütleme haritaları	43
Şekil 4.9.	N parametresinin değişimine bağlı derinlik haritası sonuçları (a) İkinci sahneden alınan bir bölüm, (b) Üçüncü sahneden alınan bir bölüm, N=1 iken (c) ikinci sahneye ait, (d) üçüncü sahneye ait derinlik haritası, N=10 iken (e) üçüncü sahneye ait, (f) üçüncü sahneye ait derinlik haritası	44
Şekil 4.10.	Sahnelerin örtük bölge doldurma öncesi derinlik haritaları	44
Şekil 4.11.	İlk sahneye ait derinlik haritaları (a) Renkli görüntüsü, (b) Önerilen yaklaşım, (c) SGM, (d) CostFilter, (e) AdaptingBP	45
Şekil 4.12.	İkinci sahneye ait derinlik haritaları (a) Renkli görüntüsü, (b) Önerilen yaklaşım, (c) SGM, (d) CostFilter, (e) AdaptingBP	46
Şekil 4.13.	Üçüncü sahneye ait derinlik haritaları (a) Renkli görüntüsü ve bazı bölgelerdeki bölüt ağırlıkları, (b) Önerilen yaklaşım, (c) SGM, (d) CostFilter, (e) AdaptingBP	47

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Spektroskopi, görüntüleme ve hiperspektral görüntülemenin farkları	4
Tablo 4.1. Bölge temelli stereo eşleme ölçütleri	31

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

C	: Kameranin optik merkezi
R	: Dönme merkezi ile kameranin optik merkezi arasındaki mesafe (cm)
f	: Lens odak uzaklığı, (mm)
ω	: Kameranin süpürme açısı, ($^{\circ}$)
γ	: Açısal görüntü çözünürlüğü
φ	: Görüntüdeki bir yatay koordinat
L	: Görüntüdeki bir dikey koordinat
ϕ	: Kameranin y eksenindeki dönme açısı, ($^{\circ}$)
W	: Bir tam turda kameranin aldığı toplam sütun sayısı
k_{\max}	: Maksimum derinlik katman sayısı
G_k	: Yataydaki komşu iki örnek arasındaki uzaklık, (mm)
H_k	: Dikeydeki komşu iki örnek arasındaki uzaklık, (mm)
U_k	: Derindeki komşu iki örnek arasındaki uzaklık, (mm)
D_k	: Derinlik mesafesi, (m)
k	: Derinlik katmanı
τ	: Piksel boyutu (μm)
N	: Spektral bant sayısı
W_c	: Her piksel için kodlanacak Census pencere boyutu
W_m	: Stereo eşleme için kullanılacak pencere boyutu
T	: Spektral açı eşiği, (radyan)
S_{\max}	: Maksimum etiket sayısı
I_R	: Referans görüntü
I_L	: Hedef görüntü
d_{\min}	: Minimum derinlik farkı
d_{\max}	: Maksimum derinlik farkı
W_r	: Referans görüntüdeki eşleme penceresi
W_t	: Hedef görüntüdeki eşleme penceresi
d_p	: Öklid uzaklığı (Grup uzaklığı)
O_L	: Standart stereo görüntülemelerde sol kameranin izdüşüm noktası
O_R	: Standart stereo görüntülemelerde sağ kameranin izdüşüm noktası
e_L	: Sol görüntüde oluşan epipolar çizgi
e_R	: Sağ görüntüde oluşan epipolar çizgi
$y_{\text{öteleme}}$: Dikeyde oluşan öteleme

Kısaltmalar

CCD	: Charge Coupled Device (Yüklenme İliştirilmiş Cihaz)
DP	: Dinamik Programlama
FPS	: Frame Per Second(Saniyede Alınan Çerçeve Sayısı)
FWHM	: Full Width at Half Maximum (Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik)
LASW	: Locally Adaptive Support Weighting (Yerel Adaptif Destek Ağırlıklandırması)
LIDAR	: Light Detection and Ranging (Işık Algılama ve Mesafelendirme)
NCC	: Normalized Cross Correlation (Normalize Edilmiş Çapraz İlinti)
SAD	: Sum of Absolute Difference (Mutlak Farkların Toplamı)
SGM	: Semi Global Matching (Yarı Genel Eşleme)
SNR	: Signal Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
SSD	: Sum of Square Difference (Kare Farkların Toplamı)
ZSAD	: Zero Mean Sum of Absolute Difference (Mutlak Farkların Sıfır Ortalama Toplamı)
ZSSD	: Zero Mean Sum of Square Difference (Kare Farkların Sıfır Ortalama Toplamı)

STEREO HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ İLE DERİNLİK ÇIKARTIMI

ÖZET

Bu tez kapsamında panoramik görüntüleme sistemlerinin geniş bir alanda görüntü alabilme özelliği, stereo görüntüleme sistemlerinin derinlik bilgisi verebilme özelliği ve hiperspektral görüntüleme sistemlerinin yüksek ayırt edicilik özelliği tek sistemde toplanmıştır. Görüntüler döner platform üzerine monte edilen iki çizgi tarayan hiperspektral kamera tarafından toplanmış ve panoramik hiperspektral görüntü kübüne dönüştürülerek stereo görüntüleme için uygun hale getirilmiştir. Geliştirilen sisteme ait kalibrasyon prosedürleri paylaşılmış ve teorik incelemeleri kritik parametreleriyle tezde verilmiştir.

Önerilen bölge temelli stereo eşleme algoritmasında bölüt ağırlıklandırılmalı bir ceza biriktirme yaklaşımı kullanılmış ve ceza ölçütü olarak çok bantlı Census algoritması önerilmiştir. Böylece görüntünün hiperspektral özellikleri hem bölütleme sırasında hem ceza hesabında kullanılmıştır. Sistem tarafından üç farklı sahneye ait üç görüntü alınmış ve geliştirilen özgün stereo eşleme algoritmasıyla derinlik haritaları çıkartılmıştır. Bu sonuçlar literatürde mevcut üç farklı yöntemle ait sonuçlarla karşılaştırılmış ve önerilen yaklaşımın diğer yaklaşımlardan daha iyi sonuçlara sahip olduğu gösterilmiştir.

Geliştirilen özgün sistem ve derinlik haritası kestirim algoritması, değişim tespiti, hedef tespiti ve hedef izleme gibi uygulamalarda kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Hiperspektral Görüntüleme, Panoramik Görüntüleme, Stereo Görüntüleme.

DEPTH EXTRACTION USING STEREO HYPERSPECTRAL IMAGING SYSTEM

ABSTRACT

In the thesis, the wide area image acquisition property of panoramic imaging systems, the depth information acquisition property of stereo imaging systems and the high differentiation property of hyperspectral imaging systems are combined into a single system. The images are collected by two line scan hyperspectral cameras which are mounted on a rotary stage with the acquired images are converted into panoramic hyperspectral image cubes. The system has been optimized for stereo imaging. The calibration procedures of the system are explained and theoretical analysis is given considering critical parameters.

In the proposed local based stereo matching method, a segment weighting cost aggregation approach is used and multiple band Census algorithm is proposed as cost function. In this way, hyperspectral properties of the images are used in calculation of the cost function as well as the segmentation. Three sample images are acquired using the system in three different scenes and their depth maps are obtained by the proposed novel stereo matching algorithm. The results of the proposed method are compared with results of three different stereo methods available in the literature and it is shown that the proposed method gives better performance.

The proposed novel system and novel depth map estimation method can be used in many applications such as change detection, target detection and target tracking.

Keywords: Hyperspectral Imaging, Panoramic Imaging, Stereo Imaging.

GİRİŞ

Hiperspektral görüntüleme sistemleri, görünür ve kızılötesi dalga boyları aralığında ve dar bant genişliklerinde yüzlerce spektral bant görüntüsü toplama becerisine sahiptir. Her bir görüntü elemanına ait spektral bilgi, temsil edilen bölgeye ait kimyasal ve fiziksel özelliklere bağlıdır ve bu bilgi farklı nesneler için önemli seçicilik özellikleri sağlamaktadır. Bu sebeple, hiperspektral görüntüleme kullanımı giderek artan etkili bir görüntüleme yöntemidir. Gıda endüstrisinde kalite analizi [1], adli tıpta kan analizi [2], minerallerin haritalandırılması [3], ilaçların analizi [4] ve geri dönüşümü [5] yaygın kullanım alanlardan bazılarıdır.

Hiperspektral görüntüleme sistemleriyle oluşturulan elde edilen görüntülerde hedef tespiti [6], hedef izleme [7], sınıflandırma [8], bölütleme [9] ve değişim tespiti [10] gibi konular üzerinde pek çok yaklaşım araştırılmış ve başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Fakat hiperspektral görüntüleme sistemleri tarafından sağlanan görüntü elemanlarında sadece iki boyutlu uzamsal koordinatları sağlanmakta olup derinlik ile ilgili herhangi bir bilgi vermemektedir. Literatürdeki çalışmalarda derinlik bilgisi sağlamak için hiperspektral görüntüleme sistemleri ile LIDAR sistemleri birleştirilmektedir [11] ancak LIDAR aktif sensörlerin kullanımı gerektiğinden özellikle savunma uygulamalarında dezavantaj oluşturabilmektedir. Bu tezde, sektördeki gereksinime cevap vermek amacıyla hiperspektral ve stereo görüntüleme özellikleri bir sistemde birleştirilmiştir. Ayrıca, döner platform üzerine yerleştirilmiş olduğundan ve görüntüleri çizgi tarama yöntemiyle aldığından dolayı görüntüler panoramik görüntüleme özelliğine de sahip olmaktadır.

Hiperspektral görüntülemenin spektroskopi ve standart görüntüleme teknikleriyle karşılaştırılması ve hiperspektral görüntü özellikleri Bölüm 1’de verilmiştir. Ayrıca, hiperspektral görüntüleme sistemlerinin görüntü alma teknikleri anlatılmış ve bu sistemlere ait önemli kavramlar verilmiştir.

Stereo görüntüleme, hiperspektral görüntüleme ve panoramik görüntüleme literatüründeki araştırmalar Bölüm 2’de paylaşılmıştır ve oluşturulan sistemin

farklılıklarına değinilmiştir. Görüntüleme sistemin bileşenleri ve özellikleri de bu bölümde açıklanmıştır. Son olarak, hiperspektral kameranın kalibrasyonundaki üç önemli adım olan spektral, uzamsal ve arka-odak uzaklığı düzenlemelerine yer verilmiştir.

Bölüm 3'te, sistemin çizgi tarama temelli stereo görüntüleme geometrisi teorik olarak incelenmiştir. Derinliğin hassasiyetine ilişkin parametreler de bu bölümde incelenmiş olup toplam örneklerin sayısı ve bu örneklerin uzaydaki dağılımlarının değişimi verilmiştir. Son olarak farklı parametrelerle yapılan simülasyon sonuçları grafiklerle gösterilmiştir.

Bölüm 4'te, stereo görüntülemedeki algoritma literatürü incelenmiş ve önerilen özgün derinlik kestirim yaklaşımı ayrıntılarıyla açıklanmıştır. Stereo hiperspektral görüntüleme sistemi ile alınan görüntülerin özellikleri ve deneysel koşullar paylaşılmıştır. Bunun yanı sıra önerilen yaklaşıma ait derinlik haritası sonuçları literatürde mevcut stereo uyumlama yaklaşımlarının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Son olarak, tez kapsamında yapılan çalışmalar genel olarak değerlendirilmekte, sonuçlar ve ileriki çalışmalar için öneriler ele alınmaktadır.

1. HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME

Hiperspektral görüntüleme son yıllardaki kontrol, endüstri, tıp, geri dönüşüm ve uzaktan algılama gibi alanlardaki giderek artan kullanımı sayesinde oldukça etkin bir yöntem olduğunu kabul ettirmiştir. Hiperspektral görüntülemeyi böylesine etkin kılan durum ise görüntüleme ve spektroskopi özelliklerinin bir araya gelmesidir [2].

Standart görüntüleme sistemleri bazı uygulamalarda şekil, renk ve boyut üzerinden hızlı, ucuz ve güvenilir sınıflandırma sonuçlarının vermesinin yanında aynı renge sahip nesnelerin kimyasal ve/veya görünmeyen etkilerini göstermekte verimsiz olmaktadır. Çünkü standart görüntüleme sistemlerinde kullanılan sensörlerde geniş birkaç spektral bantta sağlanmaktadır. Örneğin, RGB görüntülerde 400-700 nm arası üç farklı spektral bant ile ifade edilmektedir.

Herhangi bir nesne geniş bantlı bir ışık kaynağı ile aydınlatıldığında nesneden yansıyan, iletilen, saçılan nesne tarafından emilen enerjinin mor berisi, görünür ve kızılötesi bölgesindeki davranışları nesneye ait kimyasal özellikleri vermektedir. Bu sebeple, görünür, mor berisi ve kızılötesi spektrometrelerle alınan veriler önemli seçicilik özelliği sağlamaktadır. Buna rağmen, görüntüleme sistemleri gibi geniş bir alanı görüp uzamsal bilgiyle destekleyememektedir.

Spektroskopi, görüntüleme ve hiperspektral görüntüleme arasındaki temel farklar Tablo 1.1’de verilmiştir. Hiperspektral görüntülemede spektral bant görüntüleri gösterildiğinden literatürde kimyasal görüntüleme olarak da anılmaktadır. Ayrıca, bir nesnenin geneline ait bir spektral bilgi çıkarmak için aynı ışıklılık ortamından bulunan farklı uzamsal noktaların bilgileri birleştirilebilmektedir. Hiperspektral görüntülemenin diğer önemli özellikleri, örnek hazırlama ihtiyacının olmaması, sürekli kalibrasyona ihtiyaç duyulmaması ve pasif bir şekilde çalışıp nesnenin kimyasını bozmamasıdır. Bunun yanında, yansıma temelli çalışan bütün sistemler gibi gelen ışığa bağlı olarak hiperspektral görüntü sistemlerinin ürettiği görüntü kalitesi değişebilmektedir [2].

Tablo 1.1. Spektroskopi, görüntüleme ve hiperspektral görüntülemenin farkları [2]

	Spektroskopi	Görüntüleme	Hiperspektral Görüntüleme
Uzamsal bilgi	✗	✓	✓
Spektral bilgi	✓	✗	✓
Kimyasal bilgi içeren görüntüler	✗	✗	✓
Spektral bilgi için esneklik	✗	✗	✓

1.1. Hiperspektral Görüntüleme Sistemlerindeki Temel Kavramlar

Bir hiperspektral görüntüleme sisteminin kalitesinin tanımlanması ve diğerleriyle karşılaştırılabilmesi için bazı temel kavramlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kavramlar, spektral aralık, spektral çözünürlük, uzamsal çözünürlük, radyometrik çözünürlük, spektral bant sayısı ve işaret-gürültü oranı olup sırasıyla başlıklar altında açıklamalarıyla birlikte verilmiştir.

1.1.1. Spektral kapsama

Spektral kapsama, hiperspektral görüntüleme sisteminin hangi dalga boyları aralığında çalıştığını gösterir. Hiperspektral görüntüleme sistemleri sensörlerin belli aralıklarda daha verimli çalışması nedeniyle genellikle beş farklı aralıkta üretilmektedir. Bunların en çok kullanılan üçü, görünür ve yakın kızıl ötesi bölgesinde 400-1000 nm dalga boyu aralığında, yakın kızıl ötesi bölgesinde 900-1700 nm dalga boyu aralığında ve kısa dalga boylu kızıl ötesi bölgesinde 900-2500 nm dalga boyu aralığındaki hiperspektral görüntüleme sistemleridir. Ayrıca, orta dalga boylu kızıl ötesinde 3-5 μm ve uzun dalga boylu kızıl ötesi bölgesinde 7,5-14 μm spektral kapsamalarına sahip hiperspektral görüntüleme sistemleri de bulunmaktadır.

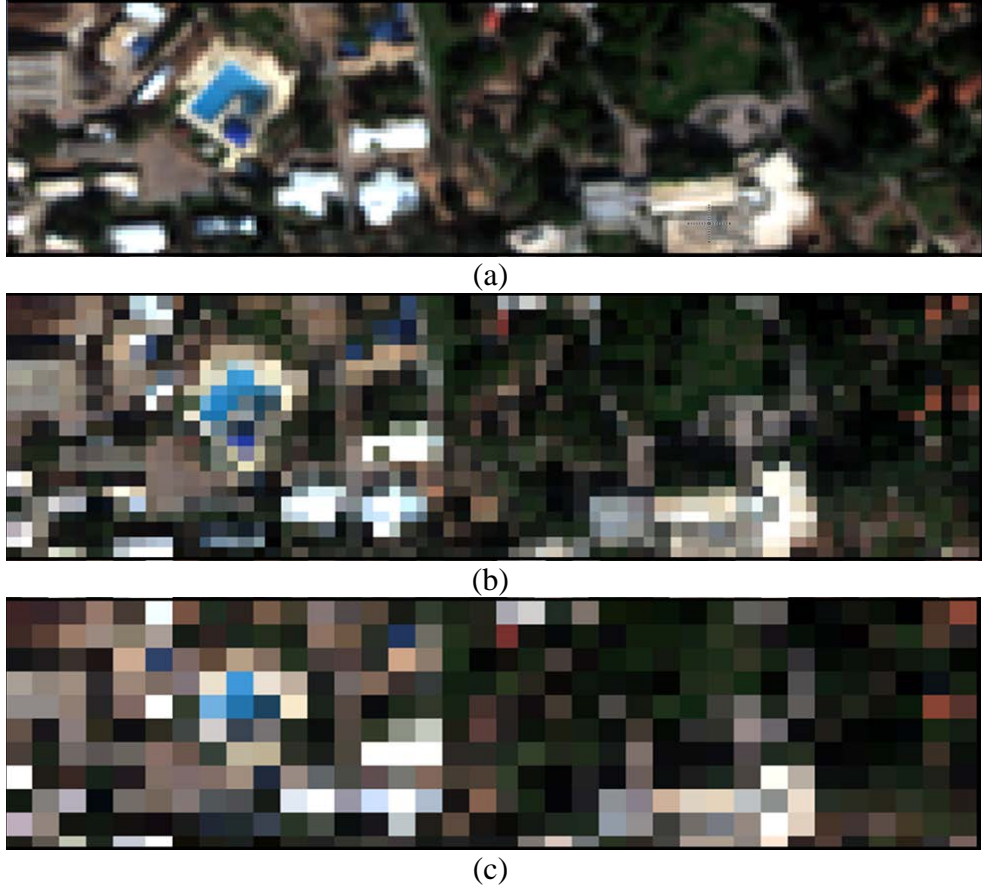
1.1.2. Spektral çözünürlük

Bir hiperspektral görüntüleme sisteminin spektral çözünürlüğü, sistemin spektral özellikleri çözebilme gücü (resolving power) ile ilgilidir ve çözebileceği en dar spektral aralığı olarak tanımlanır. Spektral çözünürlüğün genliği, optik kısmın dalga

boyu ayırıştırma özelliği, giriş yarığı genişliği ve kamera lensine ait diyafram açıklığı tarafından belirlenmektedir.

1.1.3. Uzamsal çözünürlük

Hiperspektral görüntüleme sistemlerinin uzamsal çözünürlüğü, sensörün ayırık bir nesne olarak görebileceği en küçük nesne boyutunu belirler. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi yüksek uzamsal çözünürlük görüntüdeki detayları ön plana çıkartmaktadır. Uzamsal çözünürlük, kamera sensörünün piksel sayısı, kullanılan objektif lensin bakış açısı ve görüntüleme mesafesi (uzaklığı) tarafından belirlenmektedir.



Şekil 1.1. Aynı bölgenin farklı uzamsal çözünürlüklerde görüntülenmesi (Bir pikselin fiziksel boyutları (a) 2×2 , (b) 5×5 , (c) 10×10 metre iken [12])

1.1.4. Radyometrik çözünürlük

Radyometrik çözünürlük, doğrudan kamera sensörü ile ilgili bir özellik olup her piksele düşen ışığın şiddetinin grinin değişik tonları olarak derecelendirilmesidir. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi derecelendirme ne kadar yüksek olursa ayırt edicilik o

kadar artacaktır. Ancak yüksek radyometrik çözünürlükler de görüntü boyutlarını arttırmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 1.2. Aynı bölgenin farklı radyometrik çözünürlüklerle elde edilmiş görüntüleri (a) Yüksek radyometrik çözünürlük, (b) Düşük radyometrik çözünürlük [12]

1.1.5. Bant sayısı

Bant sayısı, hiperspektral veya multispektral görüntüleri karakterize etmek için önemli parametrelerden biridir. Örneğin, multispektral görüntülerde bant sayısı 10 civarında iken hiperspektral görüntülerde 100-300 spektral bant civarında

olmaktadır. Buna rağmen tek başına bant sayısı hiperspektral görüntüleme sistemlerinin kalitesini belirlemez.

1.1.6. İşaret gürültü oranı

İşaret-gürültü oranı (SNR), ölçülen yansımanın sensör ve diğer elektronik devreler tarafından üretilen gürültüye oranı olarak tanımlanır. Hiperspektral görüntüleme sistemlerinde SNR değeri daima dalga boyuna bağlı değişmektedir çünkü spektral aralığın her noktasındaki algılama verimi farklıdır.

1.2. Hiperspektral Görüntü Kübü

Hiperspektral görüntü, iki boyutlu uzamsal bilgi ve tek boyutlu spektral bilgiyi içerisinde barındırdığından üç boyutlu özelliğini vurgulamak için hiperspektral görüntü kübü olarak da bilinmektedir. Şekil 1.3'te verilen örnek hiperspektral görüntü kübünde x ve y eksenleri görüntüye ait uzamsal bilgiyi tanımlarken, z eksenini içerdiği bant sayısını göstermekte ve spektral bilgiyi tanımlamaktadır. Özellikle bant sayısının yüksek olduğu görüntülerde her bir piksel ayrıntılı bir spektrum bilgisine sahip olmaktadır.

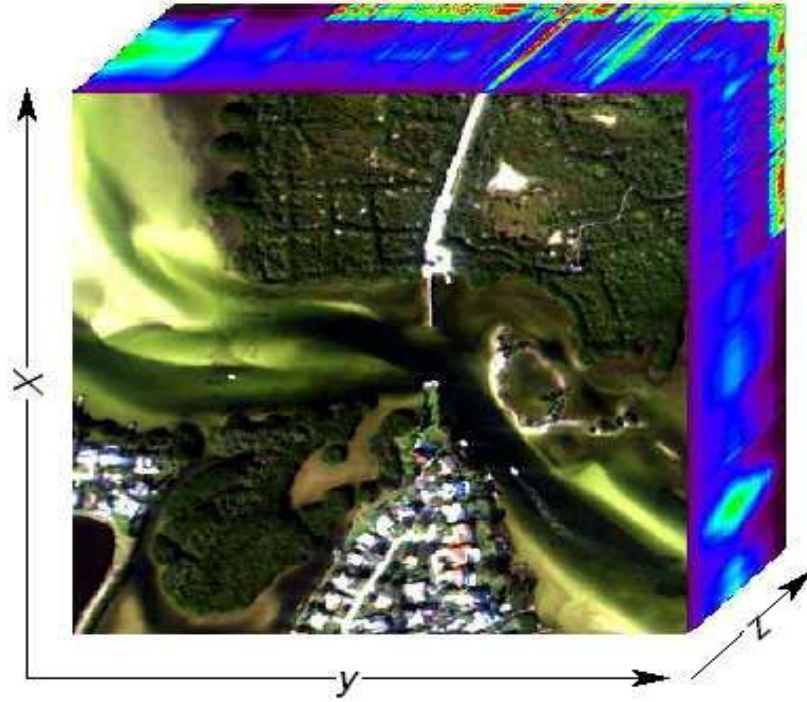
Şekil 1.4'te savunma sektöründe hizmet veren bir firmaya [13] ait spektral imza kütüphanesindeki bazı nesne spektrumları verilmiştir. Bahsedilen bütün nesneler göz ile bakınca yeşil renginde gözükmesine rağmen farklı dalga boylarındaki karakteristikleri önemli ayırt edicilik sağlamaktadır. Ayrıca hiperspektral görüntüler, türlerin kendi içindeki farklılığın yakalanmasına da olanak tanımaktadır. Örneğin, iki farklı ağaç türü arasındaki farklılık ya da yüzey üzerinde bulunan farklı madenler hiperspektral görüntüleme ile ayırt edilebilmektedir.

1.3. Hiperspektral Görüntü Alma Yöntemleri

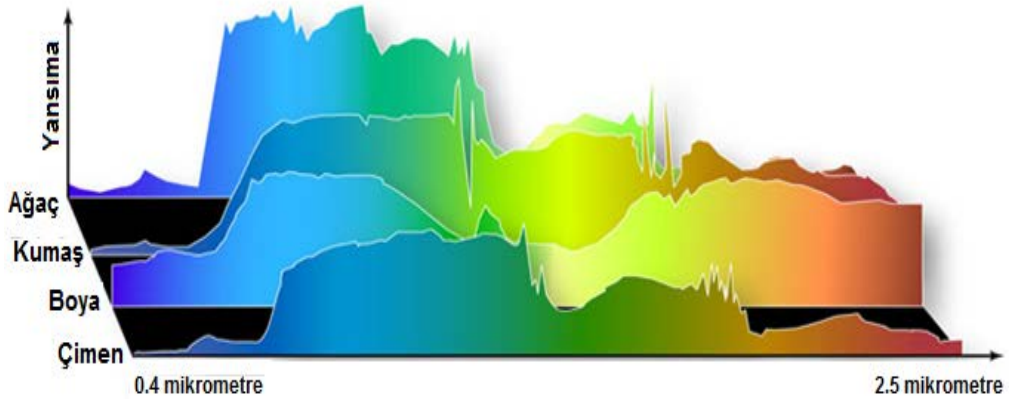
Hiperspektral görüntülerin oluşturulması için üç farklı tarama yöntemi bulunmaktadır: nokta tarama, alan tarama ve çizgi tarama. Şekil 1.5'te bu üç farklı taramaya ait şekiller verilmiştir.

Nokta tarayarak hiperspektral görüntü oluşturan sistemler x ve y yönünde kontrollü olarak gezerek uzamsal tarama gerçekleştirirler. Her nokta için spektrumlar

kaydedilir ve sonrasında alınan spektrumlar birleştirilerek hiperspektral görüntüler oluşturulmaktadır.



Şekil 1.3. Hiperspektral görüntü kübü [1]

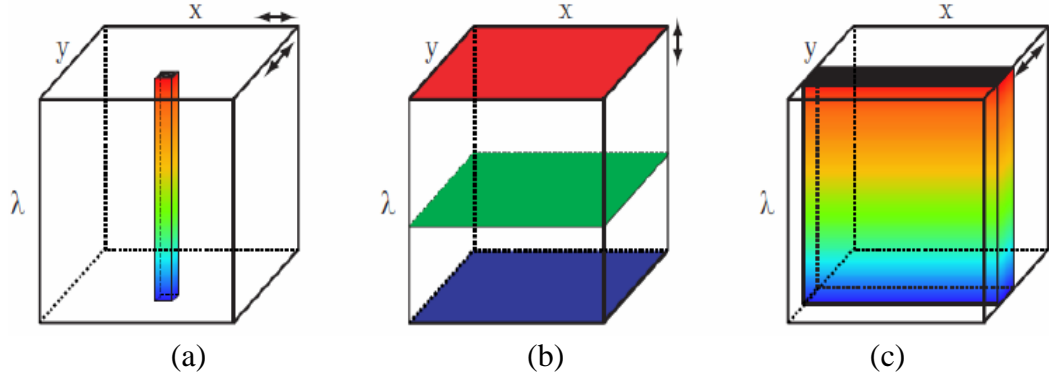


Şekil 1.4. Farklı nesnelere ait piksel spektrumları [13]

Alan tarayan sistemlerde ise kameralar önüne yerleştirilen farklı dalga boylarında görüntü alabilecek şekilde ayarlanabilen filtreler kullanılarak ardışık olarak dalga boyu değiştirilerek görüntüler alınmaktadır. Böylece taranan spektral bantlar bir anlamda üst üste konularak hiperspektral görüntüler oluşturulmaktadır.

Üçüncü ve aralarında en çok kullanılan yöntem olan çizgi tarama ile hiperspektral görüntü alan sistemler her seferinde bir çizgiye ait spektrumları ölçerek

kaydetmektedir. Bu sistemlerde y yönünde yapılan bir uzamsal tarama ile farklı çizgilere ait spektrumlar yakalanıp görüntüler biriktirilerek hiperspektral görüntü oluşturulmaktadır.



Şekil 1.5. Farklı tarama yöntemleri (a) Nokta tarama, (b) Alan tarama, (c) Çizgi tarama [14]

2.STEREO HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME SİSTEMİ

2.1.Stereo, Panoramik ve Hiperspektral Görüntüleme Literatürüne Genel Bakış

Stereo görüntüleme bir derinlik algılama yöntemi olup üç boyutlu televizyonların da hayatımıza girmesiyle oldukça yaygınlaşmıştır. Günümüzde akıllı robotlarda [15], otonom araçlarda [16], insan-bilgisayar arayüzlerinde [17] ve savunma-güvenlik uygulamalarında [18] da kullanım alanı bulmaktadır. Ayrıca, yapılan akademik çalışmalarda sadece RGB görüntüleme sistemlerine değil multispektral görüntüleme sistemlerine de stereo özelliği kazandırılmıştır. Örneğin, [19]'de IKONOS multispektral uydu görüntülerinden üç boyutlu bina çıkartımı önerilmiştir. Bir başka çalışmada optik filtreler yardımıyla altı-kanallı multispektral stereo görüntüleme sistemi [20] oluşturulmuştur. [21]'de ise RGB ve kızılötesi kameralar kullanılarak dört spektral görüntü bandı üzerinden derinlik haritası oluşturulması verilmiştir.

Panoramik görüntü, bir manzara veya bir yapıyı yatayda yan yana veya dikeyde üst üste olmak kaydıyla birden fazla çekim yaparak görüntülerin birleştirilmesiyle oluşan çok geniş açılı bir görüntüdür. Stereo görüntülemeye olduğu gibi ilerleyen teknolojiyle birlikte gelişen ve büyüyen bir görüntüleme yöntemidir. Panoramik görüntüler farklı görüntü birleştirme yöntemlerinin kullanılmasıyla oluşturulabilmektedir. Kullanılan yöntemlerden biri, standart kameralarla alınan görüntü dizisinde ardışık çerçevelerdeki örtüşen bölgeleri bulup bunları geometrik dönüşümlerle aynı düzleme çekmektir. Örneğin, [22]'de akıllı telefonlar için bu yöntem temelli bir yaklaşım izlenmiştir. Panorama oluşturma'nın bir diğer yolu da çizgi tarayan kameraları düzgün bir hızla hareket ettirerek hareket esnasında belirli aralıklarla alınan görüntüyü birleştirmektir. Bu yöntem, hiperspektral ve multispektral görüntülemeye daha çok tercih edilen bir yöntem olmuştur. Örneğin [8]'de panoramik hiperspektral kamera ile hedef izleme çalışması yapılmış, [23]'te ise panoramik hiperspektral görüntülerde taş karakterizasyonu açıklanmıştır.

Literatürde stereo ve panoramik görüntüleme özelliklerini birleştiren sistemler de bulunmaktadır. Örneğin, [24]'de matris kameralar üzerinden bütün-yönlü (omni-

directional) kamera sistemiyle alınan görüntüler üzerinden panoramik görüntüler oluşturulmuş ve bu görüntüleri kullanarak stereo bilgisi oluşturulmuştur. Çizgi tarayan sistemlerle yapılmış bazı çalışmalar da bulunmaktadır. Hepsinde temel mantık, döner bir sistem üzerine monte edilen kameralardan toplanan görüntüler üzerinden derinlik bilgisinin çıkartılmasıdır. Dönerek çizgi tarayan veya bu şekilde panoramik görüntü oluşturan kameraların epipolar geometrisi, sensör kalibrasyonu, uzamsal örnekleme ve görüntü kalitesi konularının teorisi [25]'te verilmiştir.

[26]'da lazerle uzaklık bulan bir sistemle hiperspektral kamera görüntüleri birleştirilmiştir. Fakat bu sistemlerde görüntü toplama işlemi uzun sürmekte ve çakıştırma problemleri oluşmaktadır. Tek dönen kamera ve planar aynalar kullanılarak üç boyutlu panoramik görüntülerin oluşturulması [27]'de verilmiştir.

2.2. Stereo Hiperspektral Görüntüleme Sisteminin Bileşenleri

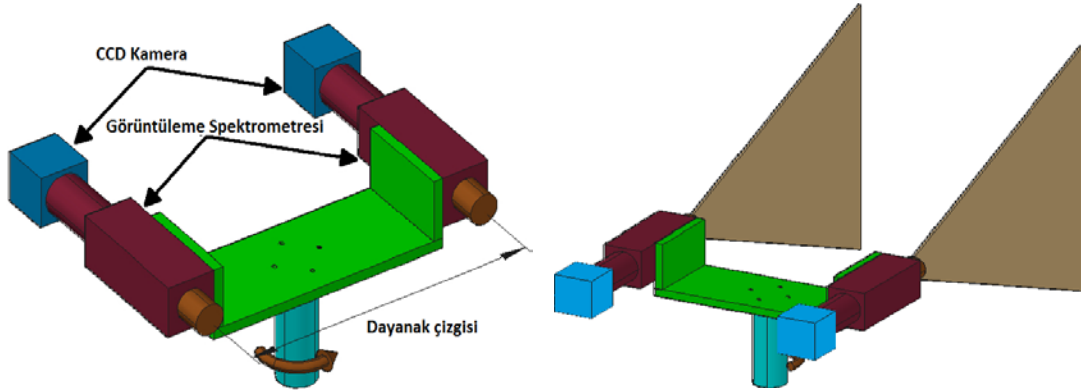
Hiperspektral görüntüleme, stereo görüntüleme ve panoramik görüntüleme hakkında yapılan geniş çalışmalara rağmen hepsini içinde barındıran bir sistem henüz literatürde bulunmamaktadır. Bu başlık altında bu üç özelliği de bir araya getiren görüntüleme sistemi ve ayrıntıları anlatılacaktır.

Panoramik hiperspektral stereo görüntüleme sistemi hiperspektral kamera çifti, görüntü alımını yapacak bilgisayar ve döner platform olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Hiperspektral kamera çifti Şekil 2.1'de görüldüğü gibi döner platform üzerine monte edilmiştir. Döner platformun açısal hızı, 0,016 ve 0,5 tur/saniye arasında ayarlanabilmektedir.



Şekil 2.1. Panoramik hiperspektral stereo görüntüleme sistemi

Tezde kullanılan bu sistemin çalışma prensibi çizgi tarama yöntemi üzerine kurulmuştur. Sistemde kullanılan hiperspektral kamera, bir kamera lensi, yüksek duyarlılığa sahip bir CCD kamera ve bir görüntüleme spektrometresinden oluşmaktadır ve bu bileşenler sırasıyla turuncu, mavi ve kırmızı renklerinde Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Stereo hiperspektral görüntüleme sisteminin 3D modeli

Kullanılan görüntüleme spektrometresi, 400-1000 nm dalga boyu aralığında görünür ve yakın kızılötesi bölgelerini kapsamaktadır ve 2,8 nm spektral çözünürlüğüne sahiptir. Görüntüleme spektrometresinin iç yapısı Şekil 2.3’te verilmiştir. Spektrometrenin prensibi, giriş yarığı üzerinden gelen ışığı optik sayesinde dalga boylarına ayırıştırarak monokromatik kamera algılayıcısı üzerine iz düşürmektedir. Bir başka deyişle spektrometre giriş yarığına karşılık gelen hedefteki bölgeden yansıyan ışınların spektrumunu monokromatik algılayıcıya yansıtmaktadır. Bu nedenle, hareketsiz bir sistemde spektrometre hep aynı çizgiyi görecektir. Bölüm 1’de bahsedilen çizgi tarama mantığında görüntü oluşturulabilmesi için diğer çizgilerin de taranması gerekmektedir. Bunun için hızı ayarlanabilen bir döner hareketli platforma kullanılmaktadır.

Kullanılan kamera 14 bit derinliğinde 1392×1040 piksellik tam çözünürlükle USB arayüzü üzerinden görüntü sağlamaktadır. Saniyede alınan görüntü sayısını arttırmak için çözünürlük 400×300 piksele düşürülmüş ve bu sayede 40,7 FPS'lere ulaşılmıştır. 400 piksel uzamsal bilgiyi, 300 piksel spektral bilgiyi göstermekte olup dalga boyu aralığı 500-875 nm’dir. Görüntüleme spektrometresi önüne eklenen lens ise 25 mm odak uzaklığına sahip F/1,8 özelliklerindedir.



Şekil 2.3. Görüntüleme spektrometresinin iç yapısı [28]

Hiperspektral kamera çifti, Şekil 2.2’de yeşille gösterilen simetrik bir mekanik parça yardımıyla döner sistem üzerine monte edilmiştir. Kameralar arasındaki uzaklığın sisteme etkisini incelemek amacıyla bu mesafe için iki farklı değerde (10 ve 20 cm) performans incelenmiştir.

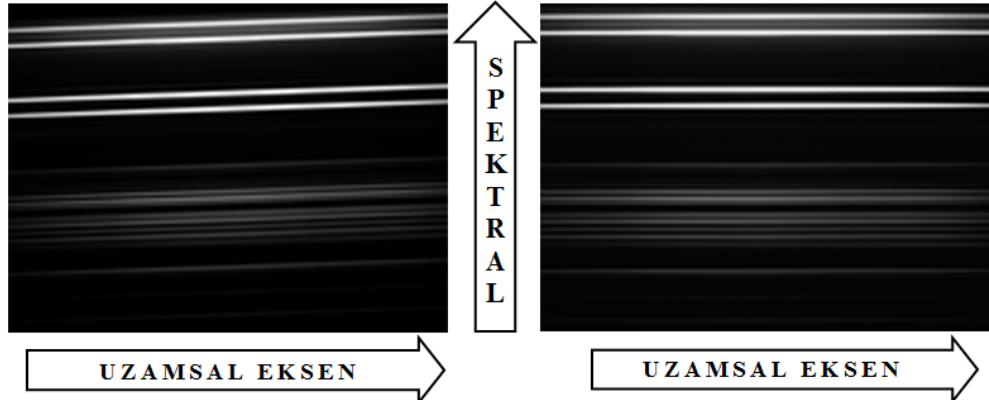
2.3. Hiperspektral Kameraların Kalibrasyonu

Objektif lens, görüntüleme spektrometresi ve CCD kameranın birbirine monte edildikten sonra bazı kalibrasyon prosedürlerinin yapılması gerekmektedir. Bütün kalibrasyon prosedürleri boyunca Avalight-Cal (Hg-Ar) kalibrasyon lambası [29] kullanılmıştır. Lamba, 400-1000 nm aralığında bilinen dalga boylarında tepe yapan bir spektruma sahip olduğundan sistem kalibrasyonu bu lamba ile rahatlıkla yapılabilmektedir.

Öncelikle, uzamsal hizalama kalibrasyonu yapılmalıdır. Bu kalibrasyon, kalibrasyon lambası hiperspektral kameranın önünde konumlandırıldığında oluşan görüntüde spektral eksen olarak belirlenen eksenindeki tepe noktalarını aynı hizaya çekilerek giriş yarığı (slit) üzerindeki her noktanın spektrumunu aynı hizaya getirmektedir. Kalibrasyon ışığına ait uzamsal hizalama yapılmadan önceki kamera görüntüsü Şekil 2.4 (a)’da yapıldıktan sonraki hali ise Şekil 2.4 (b)’de verilmiştir. Hizalama yapıldıktan sonra kamera-spektrometre arasındaki bağlantı sabitlenmelidir.

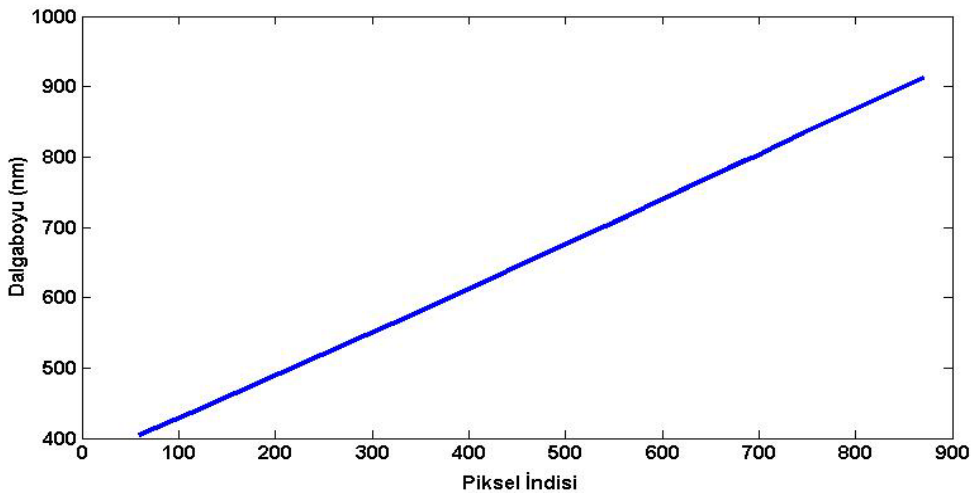
İkinci kalibrasyon prosedürü arka-odak uzaklığının ayarlanması için yapılır. Bu uzaklık, görüntüleme spektrometresi ile kamera arasındaki uzaklıktır ve doğru ayarlanmazsa spektral çözünürlüğü düşmekte ve bulanık görüntüler oluşturmaktadır.

Bu sebeple, görüntüleme spektrometresinin çıkış kısmındaki odaklama merceği ileri-geri hareket ettirilerek en uygun kısımda konumlandırılmalıdır. Bu ayar, farklı kameralar kullanıldığında değiştirilmesi gerekir.



Şekil 2.4. Kalibrasyon ışığına ait kamera görüntüsü (a) Uzamsal hizalama öncesi, (b) Uzamsal hizalama sonrası

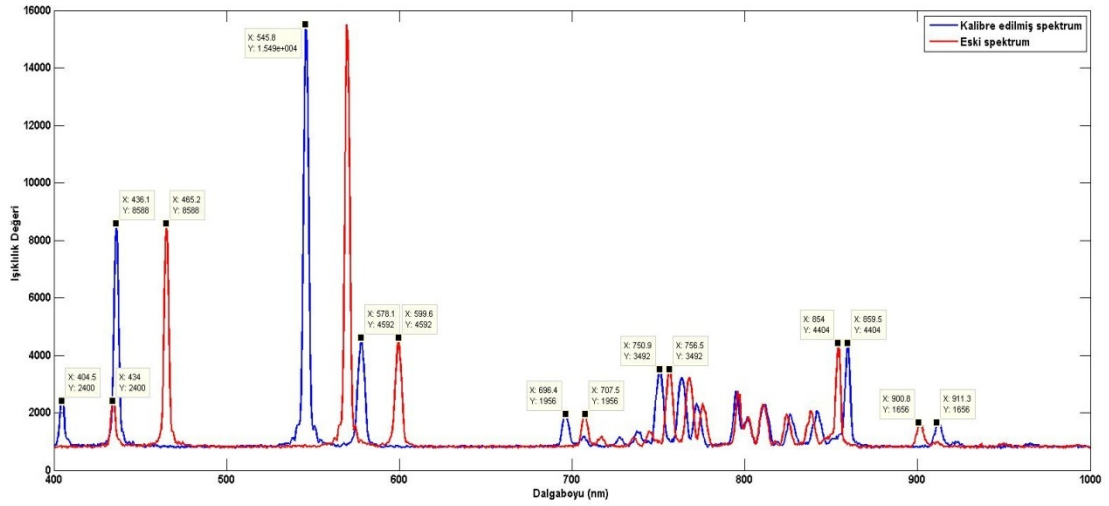
Hiperspektral kamera için yapılacak son kalibrasyon ise spektral kalibrasyondur ve kalibrasyon prosedürlerinin yapılma sırası önemlidir. Bu prosedürde, bilinen dalga boylarında tepe yapan noktalar görüntü üzerindeki görüntü elemanlarıyla eşleştirilir. Bu eşleşme üzerinden üç veya daha yüksek derecede polinom uydurularak dalga boyu-piksel ilişkisi modellenir. Model oluşturulduktan sonra herhangi bir pikselin dalga boyu bulunabilir. Şekil 2.5'te piksel-dalga boyu eşleştirmesi, Şekil 2.6'da ise elde edilen polinom ile konumlandırılan yeni spektrum çizimi ve örneklerin 400-1000 nm arasına doğrusal yerleştirildiği durumdaki eski spektrum çizimi verilmiştir.



Şekil 2.5. Piksel koordinatlarının dalga boyu ile eşleştirmesi

Objektif lens ayarında ise uzaklığa ve uygulamalara göre ayarlama yapılması gerektiğinden herhangi bir standart prosedür bulunmamaktadır. Diyafram açıklığının olabildiğince kapalı tutulması, görüntüdeki netliği ve spektrum çözünürlüğünü iyileştirilecektir. Bunun dışında, kullanılan lenslerin minimum çalışma uzaklığının altında kullanılması da görüntüdeki netliği bozacaktır.

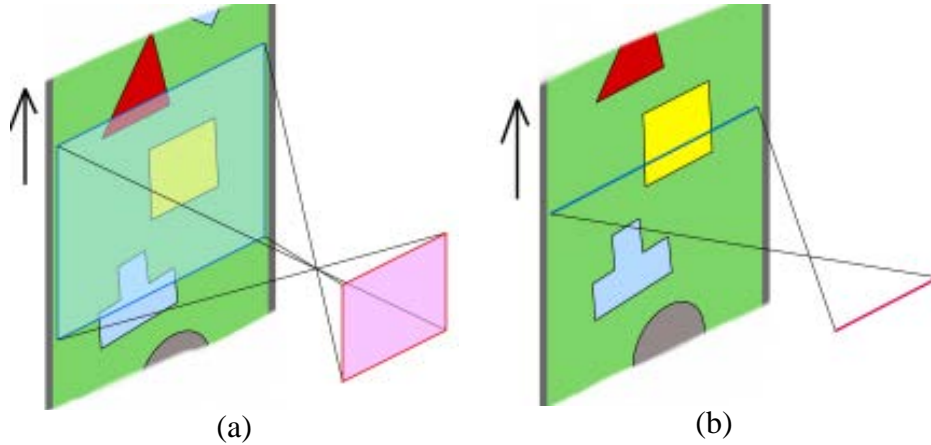
Her iki hiperspektral kamera için de yukarıda belirtilen kalibrasyonlar yapılmıştır. Kalibrasyon lambasının spektral tepe koordinatları her iki kamerada yakın piksellerde olduğu için sol hiperspektral kamera için üretilen model katsayıları sağ hiperspektral kamera için de kullanılmıştır.



Şekil 2.6. Kalibrasyon lambasına ait dalga boyu kalibrasyonu öncesi (eski) ve sonrası spektrumlar

3.DÖNEREK ÇİZGİ TARAYAN KAMERALAR İLE STEREO GÖRÜNTÜLEME TEORİSİ

Standart sayısal kameralar, alan tarama (area scan) ve çizgi tarama (line scan) yoluyla görüntüleri toplayacak şekilde tasarlanırlar [30]. Alan tarayan kameralar, belli bir alanı objektif lensler tarafından matris sensörleri üzerine düşürerek görüntü elde ettiğinden matris-sensörlü kameralar da denmektedir. Çizgi tarayan kameralar ise bir alanı almayıp sadece lens tarafından çizgisel sensör üzerine düşürülen çizgisel bölgeye ait ışıklılıkları toplarlar. Şekil 3.1’de alan ve çizgi tarayan kameralara ait görüntüler verilmiştir.

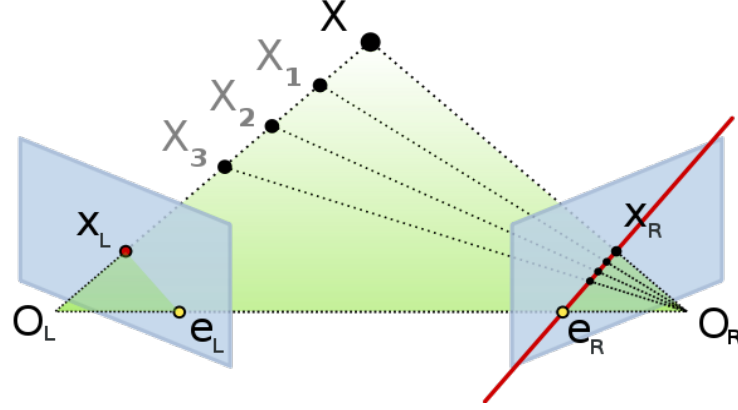


Şekil 3.1. (a) Alan tarayan kamera, (b) çizgi tarayan kamera [30]

Bu tezde kullanılan hiperspektral kamera, CCD kamera önüne yerleştirilen görüntüleme spektrometresi yardımıyla çizgi tarayarak görüntü almaktadır. Bu sebeple, kullanılan hiperspektral kameranın epipolar geometrisi ve uzamsal örnekleme teorisi çizgi tarayan kameralarla benzer şekilde yorumlanmalıdır.

İki farklı kamera üç boyutlu bir sahneyi veya objeyi farklı bakış açılarıyla görüntülediğinde, stereo görüntüleme amacıyla imge satırları üzerinden karşılık düşen eleman aramasını gerçekleştirmek için stereo geometri önem taşımaktadır. İki iğne deliği (pinhole) kameranın X noktasına baktığı durumdaki görüntüsü Şekil 3.2’de verilmiştir. Burada O_L ve O_R noktaları iki kameranın izdüşüm merkezleri olup

x_L ve x_R noktaları X noktasının görüntülerdeki izdüşümleridir. X noktası O_L - X çizgisi üzerinde hareket ettirildiğinde, sağ kameradaki görüntüde izdüşümü e_R - x_R çizgisi üzerinde olmaktadır ve bu çizgi epipolar çizgi olarak adlandırılmaktadır. Simetrik olarak X noktası O_R - X çizgisi üzerinde hareket ettirilirse sol kameradaki görüntüde izdüşümü e_L - x_L epipolar çizgisi üzerinde olmaktadır [31].



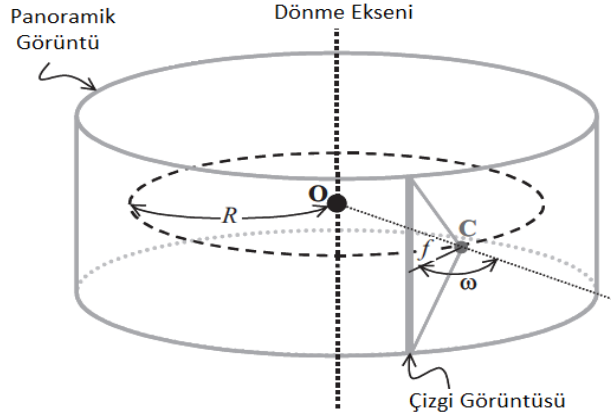
Şekil 3.2. Alan tarayan kameralar için epipolar geometri [31]

Anlatılan geometrik ilişkiler kullanılarak matris-sensörlü kameralarda stereo görüntüleme iyi araştırılmış bir konu olup stereo görüntülemenin temeli oluşturulmuştur.

3.1. Dönerek Çizgi Tarayan Kameranın Temel Kavramları

Dönerek çizgi tarayan kameralarda dikkate alınması gereken bazı parametreler vardır. Şekil 3.3'te bu durumdaki görüntüleme modelinin geometrisi verilmiştir. R parametresi, kameranın optik merkezi C ile dönme ekseninin merkezi O noktası arasındaki mesafe olup dönme yarıçapı olarak bilinmektedir. f parametresi kamera önünde kullanılan lensin odak uzaklığı olup süpürme açısı ω ise kamera sensörünün tarama normaliyile yaptığı açıdır [32].

Kamera, dönme esnasında kamera parametreleri ve performansına bağlı olarak belli aralıklarla çizgi görüntülerini almaktadır. Alınan her görüntü daha önceden alınan görüntülerle birleştirilerek panoramik görüntü elde edilmektedir. Böylelikle çok geniş bir açıya sahip görüntü oluşturulmaktadır.



Şekil 3.3. Döner çizgi tarayan kameraya ait temel kavramlar [32]

Bir tam turda alınan çizgi sayısı W iken açısal görüntü çözünürlüğü γ , Denklem (3.1)'deki gibi ifade edilmektedir. Bir tam turda alınan çizgi sayısı W , hareketli sistemin açısal hızı sabit iken kameranın saniyede alınan görüntü sayısının artırılmasıyla veya kameranın görüntü alma hızı sabitken hareketli sistemin açısal hızın azaltılması ile olmak üzere toplam iki şekilde değişebilir.

$$\gamma = \frac{360^\circ}{W} \quad (3.1)$$

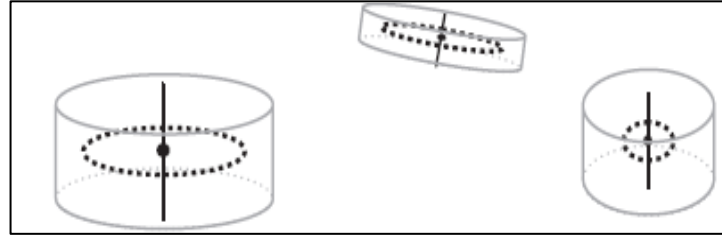
Herhangi bir panorama üzerindeki bir nokta $E_p(R, f, \omega, \gamma)$ 'nin imge koordinatları (φ, L) ile gösterilmektedir. Yatay koordinat φ , esasında $[0, 2\pi)$ arasında değişmektedir. Düşey koordinat ise L ile gösterilmiştir.

3.2. Dönerek Çizgi Tarayan Kameraların Epipolar Geometrisi

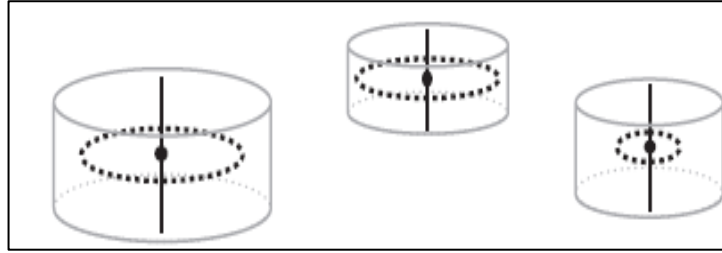
Matris sensörlü kameraların epipolar geometrisi, epipolar çizgilerle tanımlanmasına rağmen dönerek çizgi tarayan kameralarda epipolar geometri Jordan eğrileriyle tanımlanmaktadır [25]. Dönerek çizgi tarayan kameraların oluşturduğu görüntüler panoramik olduğundan bu eğriler panoramik görüntüler üzerinde tanımlıdır. Bu sebeple, genel olarak stereo görüntü çifti tabiri yerine panoramik görüntü çifti ifadesi kullanılmıştır.

Kameraların birbirine göre olan konumuna göre panoramik görüntüler farklı başlıklar altında toplanmakta ve buna bağlı olarak geometri değişiminden dolayı panoramik

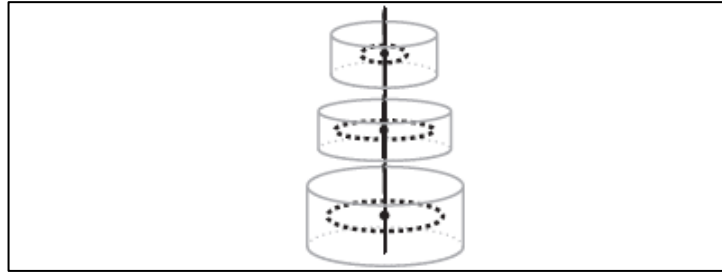
görüntüler üzerindeki epipolar eğrilerin teorisi değişmektedir. Şekil 3.4'te en temel çoklu panorama başlıkları ilgili modelleriyle birlikte verilmiştir.



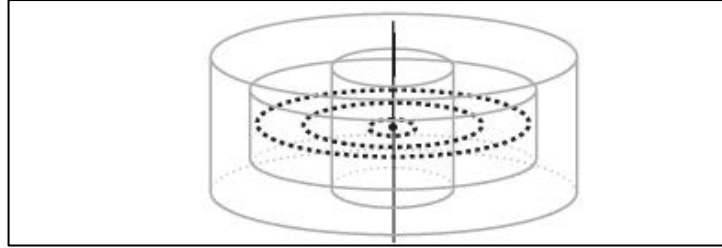
(a)



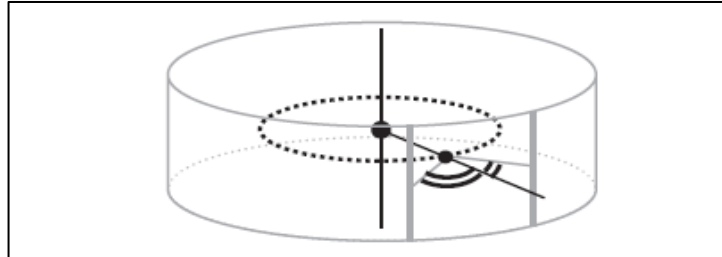
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 3.4. Farklı panoramik görüntüler (a) Çok-bakış açılı panoramalar, (b) Paralel eksenli panoramalar, (c) Eş eksenli panoramalar, (d) İç içe panoramalar, (e) Simetrik panoramalar [25]

Farklı panoramik görüntüleme yaklaşımları farklı uygulama alanlarında önerilmektedir. Örneğin, gözetleme veya sanal gerçeklik turları için paralel eksenli panoramalar; yatayda daha fazla bilgi alabilmek ve bunu üç boyutlu uygulamalarda kullanabilmek için eş eksenli panoramalar; stereo görüntüleme ve üç boyutlu sahne oluşturma için ise simetrik panoramalar kullanılmaktadır.

Simetrik panorama modeline en yakın model iç içe panoramalardır. Bu sebeple, simetrik panorama epipolar geometrisi, iç içe panorama epipolar geometrisi denklemi üzerinden çıkartılmaktadır [25].

İç içe panorama çifti olan $E_{p1}(R_1, f_1, \omega_1, \gamma_1)$ ve $E_{p2}(R_2, f_2, \omega_2, \gamma_2)$, panoramik görüntü çifti üzerindeki (ϕ_1, L_1) ve (ϕ_2, L_2) eş görüntü noktaları iken ϕ_1 ve L_1 bilindiğinde ilgili epipolar geometrisi Denklem (3.2)'de verilmiştir [25].

$$L_2 = \frac{L_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) (R_2 \sin(\omega_2) - R_1 \sin(\phi_2 + \omega_2 + \phi - \phi_1))}{-R_1 \sin(\omega_1) - R_1 \sin(\phi_2 - \omega_1 + \phi + \phi_1)} \quad (3.2)$$

Bu denklemde, ϕ sembolü kameranın y-ekseninde oluşan dönmesini göstermektedir. İç içe panorama çiftine ait dönme yarıçapı uzaklıklarının, odak uzaklıklarının ve açısız dönme çözünürlüğünün aynı olduğu, süpürme açılarının toplamının 360 derece olduğu (örneğin $-\omega$ ve ω kullanıldığında) ve y-ekseninde herhangi bir dönme oluşmadığında simetrik panorama geometrisi oluşmaktadır. Bu durumda oluşan denklemler Denklem (3.3)'te verilmiştir. Denklem (3.2)'de $R_1 = R_2$, $f_1 = f_2$, $\gamma_1 = \gamma_2$, $\omega_1 = (2\pi - \omega_2)$ ve $\phi = 0$ yerine konulduğunda Denklem (3.3) oluşmaktadır.

$$L_2 = \frac{L_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) (R_2 \sin(\omega_2) - R_1 \sin(\phi_2 + \omega_2 + \phi - \phi_1))}{-R_1 \sin(\omega_1) - R_1 \sin(\phi_2 - \omega_1 + \phi + \phi_1)} \quad (3.3)$$

$$L_2 = L_1$$

Bütün panorama başlıklarından sadece bu özel durumda epipolar eğri olarak tanımlanan geometri düz çizgilere dönüşmektedir. Böylece, (ϕ_1, L_1) noktasının epipolar eğrisi (ϕ_2, L_1) noktasında olmaktadır. Bu sebeple, simetrik panoramaların

diğer panoramalara göre stereo görüntüleme için kullanımı daha kolay ve yaygındır [25].

3.3. Uzamsal Örnekleme

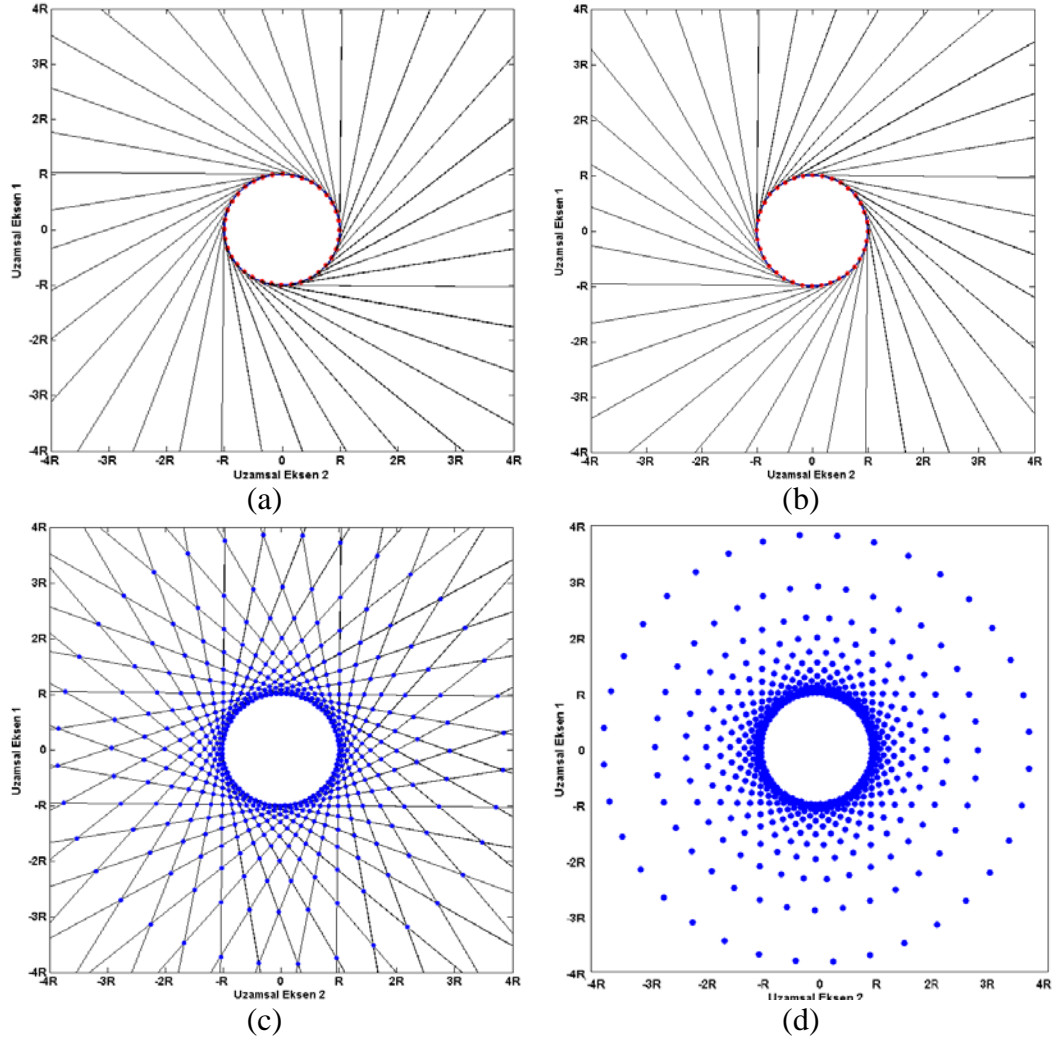
Uzamsal örneklemeye görüntü örneklerinin üç boyutlu uzayda nasıl bir dağılıma sahip olduğunu gösterir. Bu analiz sayesinde hangi bölgelerin daha detaylı alındığını ve derinlik algısını arttırabilmek için hangi parametrelerin değiştirilmesi gerektiği daha iyi görülebilir [25]. Şekil 3.5'te uzamsal örneklerin dağılımı verilmiştir.

Şekil 3.5 (a) ve Şekil 3.5 (b)'de sağ ve sol kameranın belli bir R ve W değerlerindeki tam tur tarama sonucunda oluşan izdüşüm çizgileri verilmiştir. Şekil 3.5 (c)'de bu iki izdüşüm çizgilerinin üst üste eklenmesiyle oluşan grafik verilmiştir. Şekil 3.5 (d)'de ise Şekil 3.5 (c)'deki izdüşüm çizgileri olmadan uzamsal örneklerin dağılımı gösterilmiştir. W değerinin etkisini analiz etmek için Şekil 3.6 (a)'da W değeri 2 kat artırılmış hali verilmiştir. Ayrıca, R değerinin etkisini analiz etmek için de Şekil 3.6 (b)'de R değeri 2 kat artırılmıştır. Örneklerin gösterildiği grafiklerin yanlarında örneklerin ne kadar geniş bir alanda dağıldığını gösterebilmek için değerler verilmiştir. Şekiller analiz edildiğinde örnek sayısının W'nin artmasıyla arttığı görülmektedir. R'nin değiştirilmesi durumunda ise örnek sayısının etkilenmediği görülmüştür, ancak R ardışık derinlik katmanları arasındaki uzaklığı doğrusal olarak etkilemektedir.

Uzamsal örneklerin toplam sayısının değişkenlere bağlı denklemi Denklem (3.4)'te verilmiştir. Denklem bir tam tur için tanımlanmıştır ve maksimum örnek sayısının süpürme açısı 90° olduğunda elde edildiği görülmektedir. Bu sebeple, sistem tasarımında kameralar 90° süpürme açısı olacak şekilde konumlandırılmıştır.

$$SR = W \times H \times k_{\max}, k_{\max} = \frac{(\omega \bmod 180^\circ)W}{180^\circ} = \frac{W}{2} \quad (3.4)$$

Burada H oluşturulan panoramik görüntünün yüksekliği ve k_{\max} maksimum derinlik katmanı sayısını göstermektedir. Böylelikle toplam örnek sayısının bir turda alınan görüntü sayısının karesiyle orantılı olduğu görülmüştür.

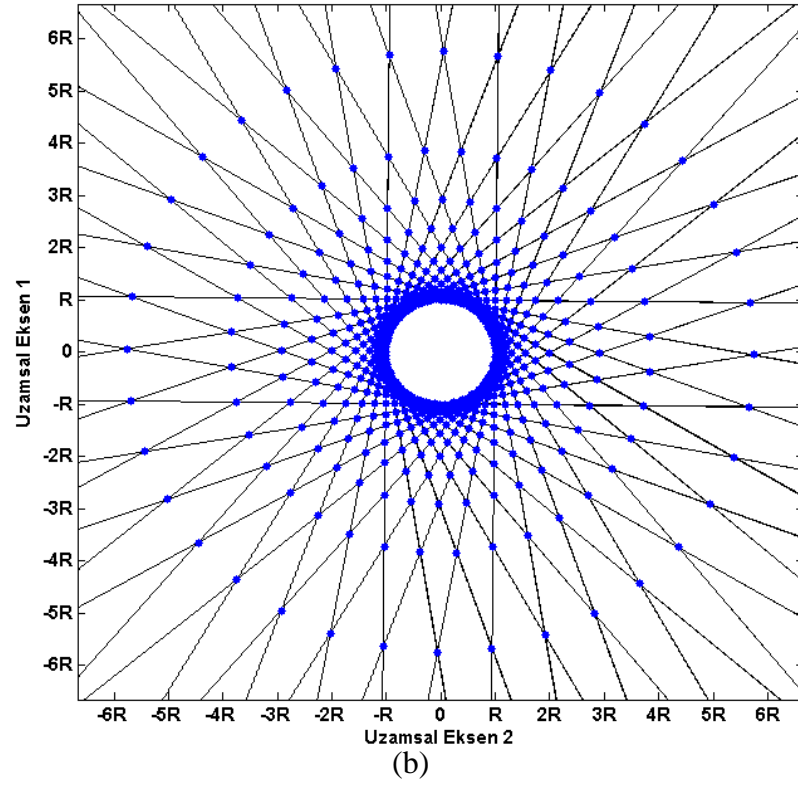
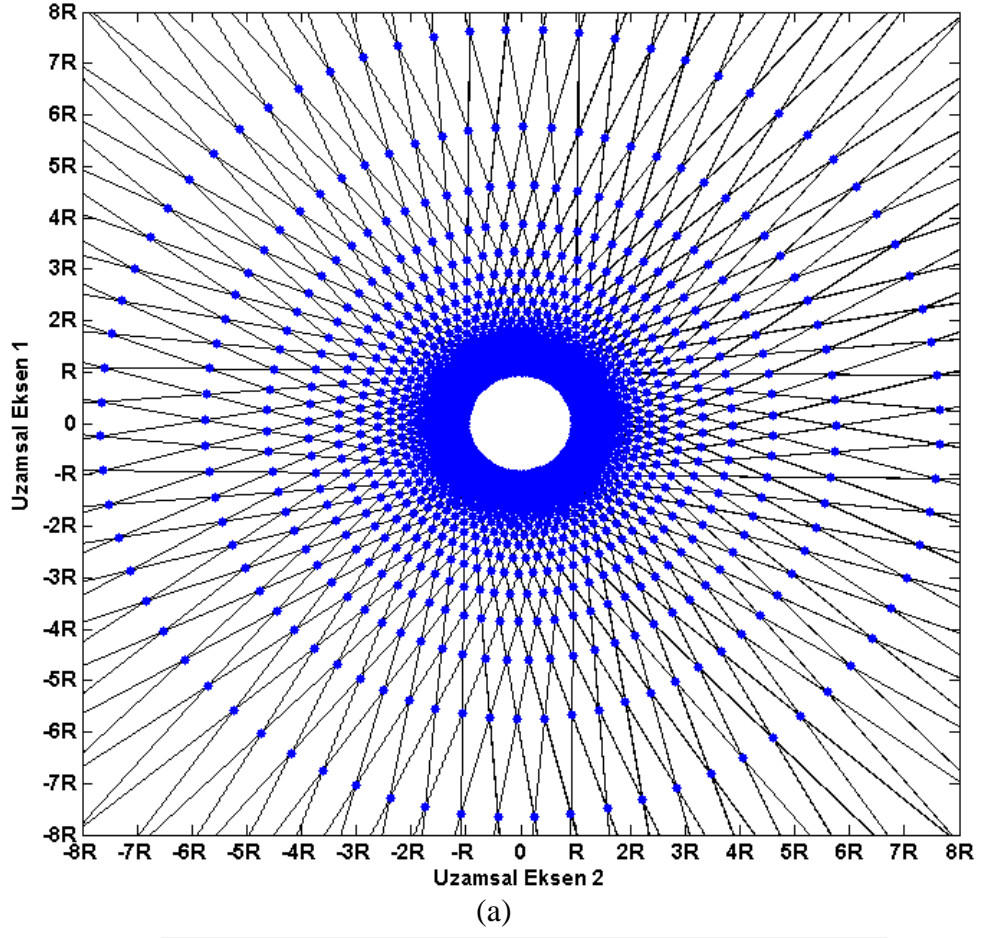


Şekil 3.5. Stereo uzamsal örnekler (a) Sağ kamera için izdüşüm çizgileri, (b) Sol kamera için izdüşüm çizgileri, (c) Örneklerin oluşumu (d) Çizgiler yok iken örneklerin dağılımı

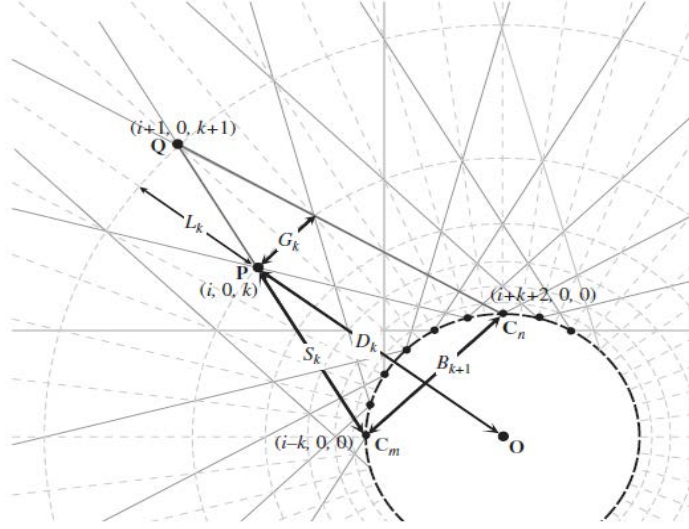
3.4. Uzamsal Örnekler Arasındaki Mesafe

Şekil 3.7’de (i, j, k) örneğinin belli bir bölgedeki komşu örnekleri gösterilmiştir ve farklı derinlikteki örnekler grinin değişen tonlarında renklendirilmiştir. Şekilde G_k olarak gösterilen uzaklık (i, j, k) ile $(i + 2, j, k)$ arasındaki mesafe olup yatay örnek uzaklığı olarak tanımlanmıştır. H_k olarak gösterilen uzaklık ise (i, j, k) ile $(i, j + 1, k)$ arasındaki mesafe olup dikey örnek uzaklığı olarak tanımlanmıştır.

U_k , (i, j, k) ile $(i, j, k + 2)$ arasındaki mesafe olup derinlik örnek uzaklığı olarak tanımlanmıştır. G_k , H_k ve U_k aynı derinlik katmanında farklı örnekler için sabit değerlerdedir.



Şekil 3.6. (a) W iki kat arttığında örneklerin dağılımı (b) R iki kat arttığında örneklerin dağılımı (ölçekli çizim)



Şekil 3.8. Örneklerin kuşbakışı gösterilmesi ve bazı uzaklıklar [25]

S_k ise, $(i-k, 0, 0)$ koordinatında gösterilen izdüşüm merkezi C_m ile $(i, 0, k)$ koordinatındaki P noktası arasındaki mesafeyi gösterir. Bu değer sinüs teoremiyle Denklem (3.7)'deki gibi bulunabilir.

$$S_k = \frac{R \sin\left(\frac{k\gamma}{2}\right)}{\sin\left(\omega - \frac{k\gamma}{2}\right)} \quad (3.7)$$

(i, j, k) noktasındaki yatay örneğin uzaklığı G_k , $\triangle Q C_m C_n$ üçgeni üzerindeki benzerlikten Denklem (3.8)'deki gibi bulunabilir [25].

$$\frac{G_k}{B_{k+1}} = \frac{S_{k+1} - S_k}{S_{k+1}}$$

$$G_k = \frac{2 R \sin \omega \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\sin\left(\omega - \frac{k\gamma}{2}\right)} \quad (3.8)$$

Denklem (3.8), D_k 'yi kullanarak Denklem (3.9)'daki gibi basitleştirilebilir. Yatay örnekler arası uzaklığın derinlik mesafesinin bir fonksiyonu olduğu görülebilir.

$$G_k = 2 D_k \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (3.9)$$

3.4.2. Dikey örnekler arasındaki uzaklıklar

Dikey örnekler arasındaki uzaklık $H_k : S_k = \tau : f$ 'ye olan oranından bulunabilmektedir. Burada τ bir pikselin dikeydeki uzunluğunu göstermektedir. Orantı kullanılarak Denklem (3.10) elde edilir [25].

$$H_k = \frac{\tau R \sin\left(\frac{k\gamma}{2}\right)}{f \sin\left(\omega - \frac{k\gamma}{2}\right)} \quad (3.10)$$

3.4.3. Derinlik örnekleri arasındaki uzaklıklar

Şekil 3.8'de gösterilen L_k iki ardışık derinlik katmanı uzaklığı göstermektedir ve D_{k+1} ile D_k uzaklıklarının farkına eşittir. Fakat örnek derinliği U_k , (i, j, k) ile $(i, j, k+2)$ arasındaki mesafe olarak tanımlandığından Denklem (3.11)'deki gibi bulunmaktadır [25].

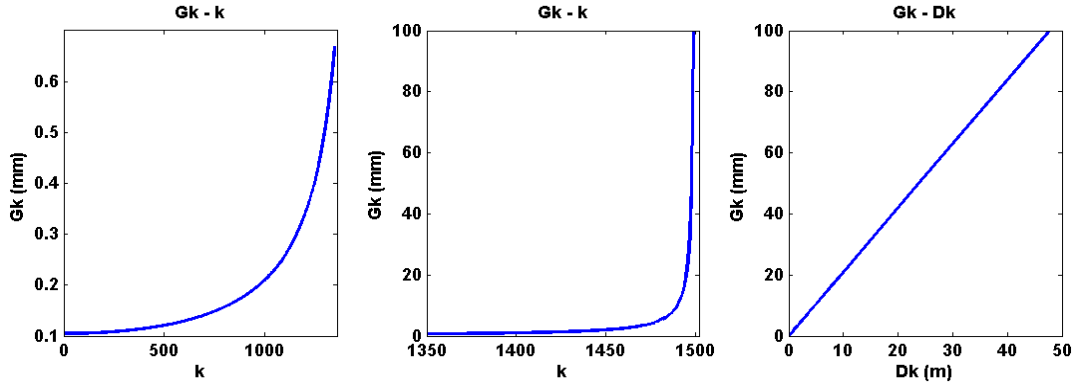
$$U_k = R \sin \omega \left(\frac{1}{\sin\left(\omega - \frac{(k+2)\gamma}{2}\right)} - \frac{1}{\sin\left(\omega - \frac{k\gamma}{2}\right)} \right) \quad (3.11)$$

3.4.4. Uzamsal örnekler arasındaki mesafelerin deneysel değerlendirilmesi

Bu başlık altında yatay, dikey ve derinlik örnekleri arasındaki mesafeler deneysel olarak incelenmiştir. Deneyde kullanılan sabit parametreler $R = 5$ cm, $W = 3000$, $f = 25$ mm, $\omega = 90$ derece ve $\tau = 12,9$ μ m olarak tercih edilmiştir. Parametreler gerçek sistemde kullanılan değerlere yakın seçilmiştir.

Yatay örneklerin incelenmesine yönelik uzaklıkların derinlik katmanına ve derinlik mesafesine göre değişimi Şekil 3.9'da verilmiştir. Derinlik katmanlarına bağlı grafiklerde hızlıca artma olduğundan mesafeler iki farklı pencerede çizdirilmiştir. Grafikler incelendiğinde yatay örneklerin uzaklıklarının derinlik mesafesine bağlı değişimi doğrusala yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca grafik üzerinden derinlik

katmanında kaybedilecek bölgelerin yorumları yapılabilir. Örneğin, 30 metre uzaktaki bir hedefin genişliği 6 cm'den daha düşükse örnek değeri taşımayacaktır.

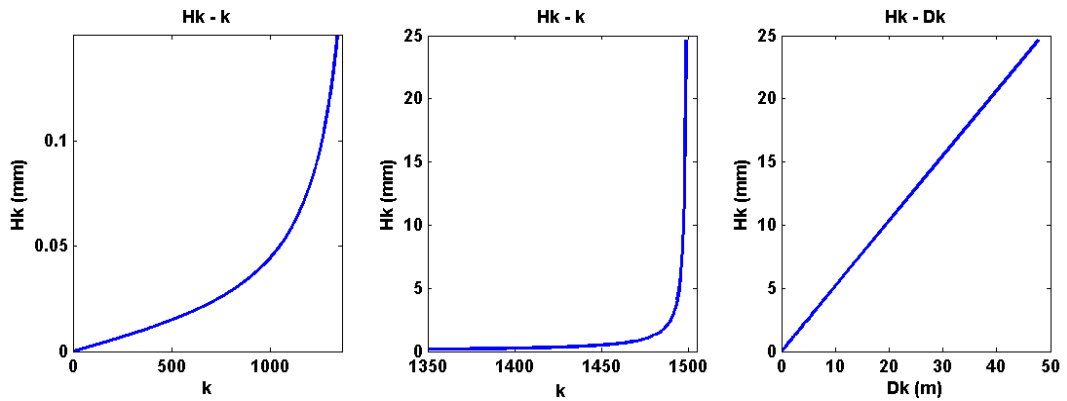


Şekil 3.9. Yatay örnek uzaklıklarının derinlik katmanı ve derinliğe göre değişimi

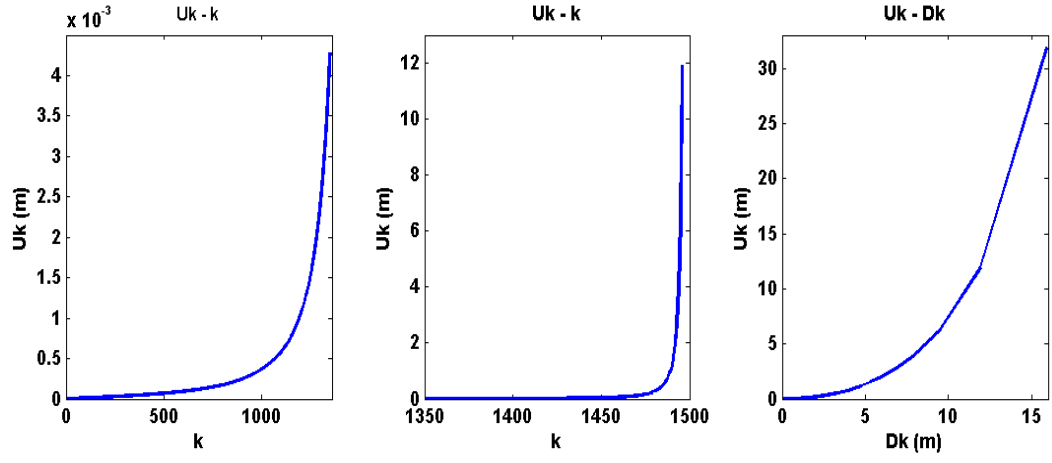
Dikey örneklerin incelenmesine yönelik uzaklıkların derinlik katmanına ve derinlik mesafesine göre değişimi Şekil 3.10'da yer verilmiştir. Dikey örneklerin uzaklıklarının da derinlik katmanına göre hızla arttığı, derinlik mesafesine bağlı değişimin ise doğrusala yakın olduğu görülmektedir.

Derinlik örneklerinin incelenmesine yönelik uzaklıkların derinlik katmanına ve derinlik mesafesine göre değişimi Şekil 3.11'de yer verilmiştir. Derinlik örneklerin uzaklıklarının derinlik katmanına göre çok daha hızlı arttığı, ayrıca derinlik mesafesine bağlı değişimin de üstel bir fonksiyon şeklinde olduğu görülmektedir.

Dikeyde, yatayda ve derindeki komşular arasında mesafelerin hesaplanması hangi derinlikte hangi mesafedeki örnekleri kaybedeceğimi söyleyeceğinden genel analiz yapabilmek açısından oldukça faydalı olacaktır.



Şekil 3.10. Dikey örnek uzaklıklarının derinlik katmanı ve derinliğe göre değişimi



Şekil 3.11. Derinlik örnek uzaklıklarının derinlik katmanı ve derinliğe göre değişimi

4.STEREO HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLERİNDEN DERİNLİK KESTİRİMİ

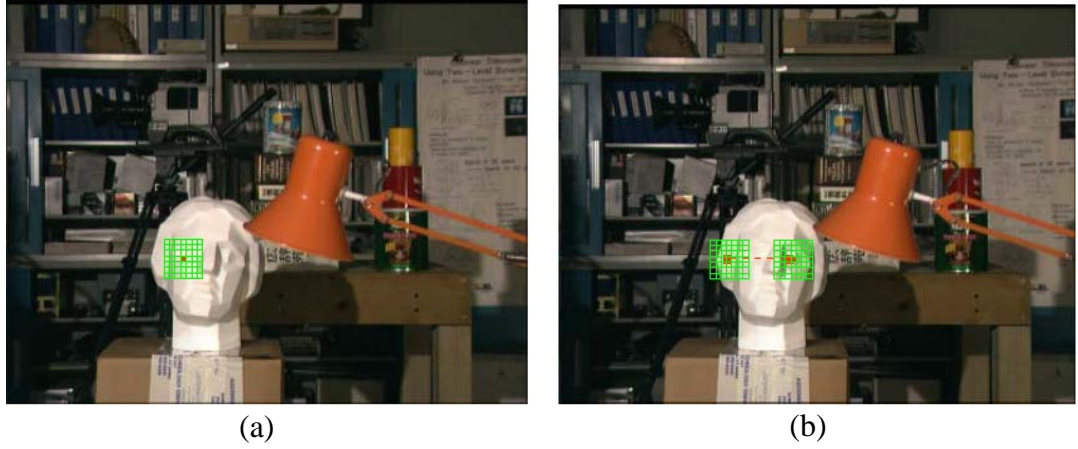
4.1.Stereo Eşlemede Kullanılan Yöntemler

Son yıllarda stereo eşleme için pek çok algoritma geliştirilmiş ve bu algoritmaların benzer aşamalara sahip olduğu [33]'te gösterilmiştir. Bu aşamalar, stereo eşleme cezalarının hesaplanması, derinlik farkı optimizasyonu ve derinlik farkı iyileştirilmesi başlıkları altında toplanabilir. Stereo eşlemede algoritmaların karmaşıklığı ve başarısı gibi önemli unsurları belirleyen algoritma adımı esasında derinlik farkı optimizasyonudur ve genellikle stereo eşleme algoritmaları bu başlık altında isimlendirilmektedir. Optimizasyon algoritmaları, bölgesel, genel ve yarı-genel olmak üzere üç temel yaklaşımdan oluşmaktadır.

Bölgesel yöntemlerde [34-36], her derinlik farkı adayı ayrı ayrı incelendikten sonra derinlik harita ataması sadece en küçük cezaya yani en iyi eşlemeye sahip olan derinlik farklarına göre yapılır ve bu yaklaşıma literatürde kazanan-hepsini-alır yaklaşımı denmektedir. Şekil 4.1'de bu yaklaşıma ait referans bölgedeki sabit pencerenin hedefte aranması gösterilmiştir. Sabit pencerelerle yapılan basit bölgesel eşleme algoritmalarında birbirini tekrar eden bölgelerde, derinlik değişiminin ani olduğu keskin geometriye sahip bölgelerde ve düz (smooth) bölgelerde kötü sonuçlar verildiği görülmektedir. Ayrıca, pencere boyutunun büyük olması durumu detayları kaybettirirken küçük olması durumu ise stereo eşlemeyi gürültüye ve hataya açık yapmaktadır. Bu sebeple, cezaların destek ağırlıkları üzerinden biriktirilmesi algoritmaları literatürde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve karmaşıklığı arttırmasına rağmen eşleme aşamasında önemli ölçüde başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Genel yöntemler [37-39], bölgesel algoritmalara göre daha karmaşık olup buna karşılık daha doğru derinlik kestirimleri sağlamaktadır. Bu algoritmalarda, komşu piksellerin de merkez piksellerle aynı derinlikte olma eğilimi göz önünde

bulundurularak düzgünlük (smoothness) kistası eklenmiştir ve genel enerjiyi minimum yapan derinlik farkı optimizasyonla kestirilir.



Şekil 4.1. Bölge eşleme algoritmalarındaki tarama yaklaşımı (a) referans görüntü, (b) hedef görüntü [35]

Yarı-genel yöntemler [40-41], dinamik programlamayı göz önünde bulundurmaktadır. Bu yöntemler genel algoritmaların hesapsal yükünü azaltmak için geliştirilmiştir. Dinamik programlama (DP) optimizasyonundaki genel mantık, derinliği kestirilecek pikselin olduğu sütundaki komşuların sıralama (ordering) kistasına göre düzenlemektir. DP'ye benzer olarak sadece dikey değil yatayda tarama yaparak farklı tarama yönlerinden destek sağlanması için yapılmış bir çalışma [42]'de verilmiştir.

4.2. Stereo Eşleme Algoritmasının Seçimi

Bölgesel yaklaşımlar kullandıkları döngüsüz aşamalar nedeniyle daha az belleğe ihtiyaç duymakta ve gerçek zamanlı sistemlere daha kolay adapte edilebilmektedir. Bu sebeple, hiperspektral görüntülerin de oldukça büyük bellek alanları kapladığı göz önünde bulundurularak tezde geliştirilecek yöntemin bölgesel bir yöntem olmasına karar verilmiştir.

Bölgesel yöntemlerde, hangi ceza biriktirme yaklaşımının kullanılacağı önem taşımaktadır. Literatürdeki ceza biriktirme yaklaşımlarının başında gelen ve [43]'de ele alınan LASW, renk ve uzamsal benzerlikleri göz önünde bulundurularak simetrik bir ağırlık desteği sağlamaktadır. Buna alternatif olarak, [44]'de LASW'nin hesapsal yükünü azaltmak için AdaptingBP yaklaşımı geliştirilmiş ve ceza biriktirmede

bölütlenen görüntülerden sağlanan etiketler kullanılarak asimetrik bir ağırlıklandırma kullanılmıştır. Farklı bir bölütleme temelli stereo eşleme metodu SegmentSupport ise [45]'de önerilmiştir. Bu yaklaşımda ise bölütlenmiş görüntülerde arama penceresinde merkez pikselle aynı etikete sahip bölgeler ceza hesabına doğrudan katılmıştır.

Bölge temelli yöntemlerde önemli bir diğer konu ise stereo eşleme cezasının tercihidir. Tablo 4.1'de bazı parametrik stereo eşleme ceza ölçütleri verilmiştir. [47]'de bu ceza ölçütlerini de içine alan farklı stereo eşleme ceza ölçütleri karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonucunda Census dönüşümünün [48] diğerlerine göre radyometrik değişimlere daha gürbüz olduğu gösterilmiştir. Census dönüşümünün başka bir avantajı da düşük hesapsal karmaşıklığa sahip olmasıdır ve bu yüzden gerçek zamanlı çalışan gömülü sistemler üzerinde kullanılmaktadır. Census dönüşümü stereo literatüründe [49-50] RGB görüntülerin ışıklılık bileşenleri üzerinden hesaplanarak eşleme ceza değeri bu şekilde ikili kodlanmış görüntülerin Hamming uzaklıkları üzerinden bulunmaktadır.

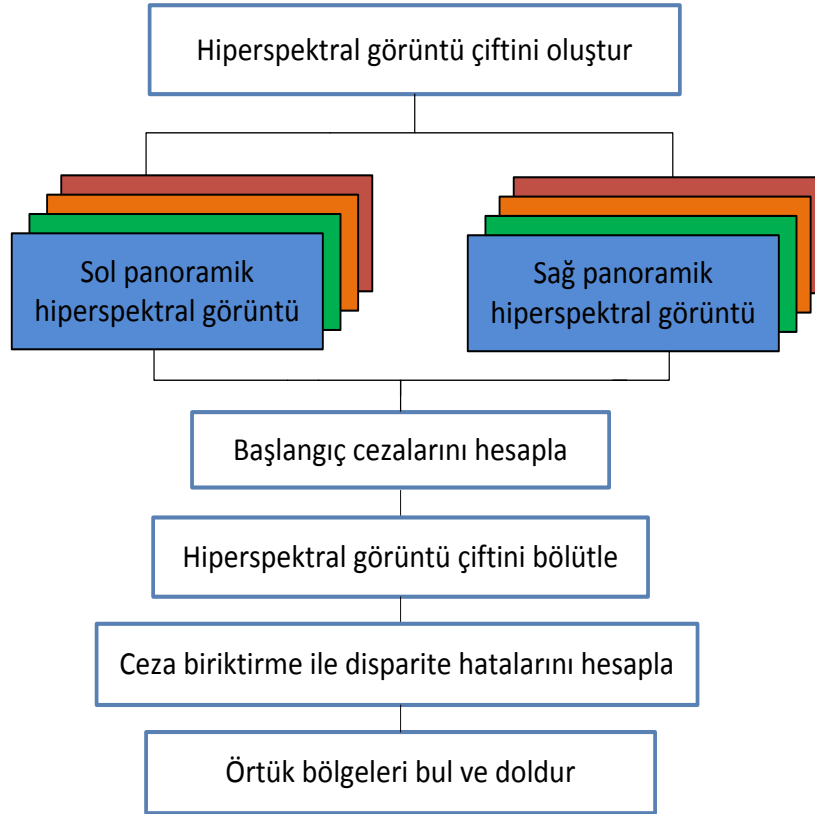
Tablo 4.1.Bölge temelli stereo eşleme ceza fonksiyonları [46]

Ölçüt	Kısaltma	Formül
Mutlak farkların toplamı	<i>SAD</i>	$\sum_{(u,v) \in W_m} I_1(u, v) - I_2(x + u, y + v) $
Mutlak farkların sıfır ortalama toplamı	<i>ZSAD</i>	$\sum_{(u,v) \in W_m} (I_1(u, v) - \bar{I}_1) - (I_2(x + u, y + v) - \bar{I}_2) $
Kare farkların toplamı	<i>SSD</i>	$\sum_{(u,v) \in W_m} (I_1(u, v) - I_2(x + u, y + v))^2$
Kare farkların sıfır ortalama toplamı	<i>ZSSD</i>	$\sum_{(u,v) \in W_m} ((I_1(u, v) - \bar{I}_1) - (I_2(x + u, y + v) - \bar{I}_2))^2$
Normalize edilmiş çapraz ilinti	<i>NCC</i>	$\frac{\sum_{(u,v) \in W_m} (I_1(u, v) \cdot I_2(x + u, y + v))}{\sqrt{\sum_{(u,v) \in W_m} I_1^2(u, v) \cdot \sum_{(u,v) \in W_m} I_2^2(x + u, y + v)}}$

Bu tezde, bölütleme temelli yaklaşımların performansından yola çıkarak, özgün bir bölüt-ağırlıklandırılmalı hiperspektral stereo eşleme algoritması önerilmiştir. Ayrıca, Census dönüşümünün görüntünün farklı spektral bantlara uygulanmasıyla oluşturulan çok bantlı Census ceza ölçütü de algoritma içerisine dahil edilmiştir. Hiperspektral görüntülerin bölütlenmesinde ise spektral açı uzaklığına bağlı alan büyütme temelli bir bölütleme algoritması kullanılmıştır.

4.3. Önerilen Derinlik Kestirim Algoritması

Önerilen hiperspektral stereo görüntü eşleme algoritması dört temel başlık altında toplanabilir. Görüntü alımıyla birlikte bütün başlıklar ve akış şeması Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Önerilen stereo eşleme algoritmasının akış şeması

Öncelikle sistem sahneye uygun bir yerde konumlandırılmış ve M adet sütun taramasını tamamladıktan sonra panoramik hiperspektral görüntüler oluşturulmuştur. Oluşan görüntü çiftinin boyutları, 400 piksel uzamsal koordinatları, 300 piksel spektral ekseni ifade ederken $400 \times M \times 300$ olmaktadır.

Kameralar ne kadar dikkatli monte edilirse edilsin, görüntü çifti arasında hafif de olsa bir bakış açısı farklılığı oluşmaktadır ve bu bakış açısı farklılığından dolayı görüntüler arasında dikeyde öteleme oluşmaktadır. Bu öteleme epipolar çizgi eşlemesini bozacağından sistem tarafından algılanıp giderilmesi gerekmektedir. Öncelikle panoramik hiperspektral görüntü çiftinin her biri için 300 bant görüntüsünün ortalaması alınarak I_L ve I_R ortalama görüntüleri oluşturulmaktadır. Sonrasında Faz Korelasyonu [51] yöntemiyle dikeydeki öteleme bulunmaktadır. Bu işlem Denklem (4.1)'de verilmiştir.

$$PC = F^{-1} \left[\frac{F(I_L) \times F^*(I_R)}{F(I_L) \times F^*(I_R)} \right] \quad (4.1)$$

$$PC = \delta(x + x_{\text{öteleme}}, y + y_{\text{öteleme}})$$

Denklem (4.1)'de F , görüntülerin Fourier dönüşümünü, F^* görüntülerin eşlenik Fourier dönüşümünü ve F^{-1} ters Fourier dönüşümünü göstermektedir. Faz korelasyonu sonucunun yüksek genlikli olduğu yüzeyin en tepe noktası öteleme miktarını göstermektedir. Kameralara ait pozisyonlar değişmediği sürece bir kez hesaplanan öteleme değeri farklılığı sürekli kullanılabilir. Dikeydeki öteleme giderildikten sonra görüntü boyutları $(400 - y_{\text{öteleme}}) \times M \times 300$ 'e düşmüştür.

Bu görüntüler üzerinden öncelikle başlangıç cezaları hesaplanmaktadır. Bu adımdaki amaç, referans görüntüdeki herhangi bir pikselin komşuluklarını göz önünde bulundurarak hedef görüntüde farklı derinlik farklarına ait ceza değerlerini bulmaktır. Başlangıç değerlerini doğrudan kullanmak kullanılan komşuluk sayısına (pencere boyutuna) bağlı olarak bazı durumlarda iyileşip bazı durumlarda kötüleşmektedir. Örneğin, pencere boyutları küçük seçildiğinde gürültüden çok etkilenilmekte, pencere boyutları büyük seçildiğinde ise görüntüdeki derinlik detayları kaybolmaktadır. Bu sebeple, ceza biriktirmesi temelli bölgesel yöntemler standart bölgesel yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar vermektedir. Bu sebeple, ikinci aşamada bölüt-ağırlıklandırılmalı ceza biriktirme algoritmasını kullanabilmek amacıyla hiperspektral görüntüler bölütlenmektedir. Daha sonra üçüncü adımda bu iki bilgi kullanılarak ceza değerleri bölütler üzerinden ağırlıklandırılmaktadır. Biriktirilen ceza değerleri üzerinden minimum cezaya derinlik farkları derinlik

haritasına atanmaktadır. Son olarak, referans görüntü sol panorama hedef görüntü sağ iken ve aksi durumda toplam iki derinlik haritası oluşturulmakta bu iki harita üzerinden tutarlı olmayan derinlik bilgilerinin bulunup derinlik farkı değerleri iyileştirilmektedir.

4.3.1. Başlangıç cezalarının hesabı

Bu tezde, hiperspektral görüntü çiftinin stereo eşlemesi için Çok-bantlı Census dönüşümü temelli eşleme cezası önerilmiştir. Önerilen ceza, merkez pikselin farklı spektral bant görüntülerindeki komşuluk ilişkisini dikkate almaktadır ve radyometrik değişimlere karşı gürbüz sonuçlar vermektedir. Bu sebeple, derinlik kestiriminde hiperspektral kameralardan alınan görüntülerin radyometrik kalibrasyonuna gerek duyulmamaktadır. Ayrıca, ceza fonksiyonu N spektral bant için paralelleştirilebilir. Algoritma detayları aşağıda verilmiştir.

1. Öncelikle spektral bant sayısı, ardışık bantların ortalamaları alınarak 300 banttan N banda düşürülür. Bu sayede, hem algoritmanın gürültüye karşı gürbüzlüğü arttırılmakta hem de hesapsal yük düşürülmektedir. Bu işlem sonrası hiperspektral görüntü boyutları $(400 - y_{öteleme}) \times M \times N$ 'e düşürülmektedir.

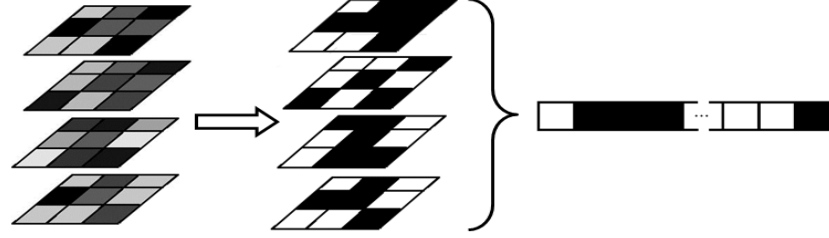
2. Her iki görüntü çiftinde, her pikselin N bantlı Census dönüşümü $W_c \times W_c$ pencere boyutlarında N farklı spektral bant için yapılmaktadır. Dönüşüm hesabı Denklem (4.2) ve Denklem (4.3)'te verilmiştir. Denklem (4.2)'de \otimes sembolü Census dönüşümü sonrası oluşan ikili kodların birleştirilerek arka arkaya getirilmesini göstermektedir. Böylelikle, her piksel için $(W_c^2 - 1) \times N$ uzunluğunda bir ikili kod oluşturulmaktadır.

$$C(x, y) = \bigotimes_{k=1}^N \bigotimes_{j=-(W_c-1)/2}^{(W_c-1)/2} \bigotimes_{i=-(W_c-1)/2}^{(W_c-1)/2} \xi(I(x, y, k), I(x + i, y + j, k)) \quad (4.2)$$

$$\xi(n, m) := \begin{cases} 0, & n \leq m \text{ ise} \\ 1, & n > m \text{ ise} \end{cases} \quad (4.3)$$

Örnek bir çok bantlı Census dönüşümü Şekil 4.3'te verilmiştir. Bu örnekten de görüleceği gibi N değeri 4 ve W_c değeri 3 seçilmiştir. Görüldüğü gibi her bant için

ayrı ayrı Census dönüşümü uygulanmakta ve oluşturulan ikili kodlar arka arkaya eklenerek ikili dizi oluşturulmaktadır.



Şekil 4.3. Örnek çok bantlı Census dönüşümü

3. Bu aşamada ise standart bölge temelli yöntemlerde olduğu gibi referans görüntüde her piksel etrafından alınan $W_m \times W_m$ pencere boyutlarındaki bölge için, hedef görüntüde d_{min} 'den d_{max} 'a kadar olan farklı derinlik farklarındaki cezaları hesaplanmaktadır. Referans görüntüdeki piksel p ve hedef görüntüdeki piksel q arasındaki ceza fonksiyonu, bu piksellerin ikili kodlarının Hamming uzaklığı üzerinden hesaplanmakta olup Denklem (4.4)'te verilmiştir. Eşleme boyunca referans görüntü I_R 'de merkez pikseli (u, v) olan blok, sadece $(u+d_{min}, v)$ ile $(u+d_{max}, v)$ arasında değil bir alt ve üst satırı olan $(u+d_{min}, v+1)$ ile $(u+d_{max}, v+1)$ ve $(u+d_{min}, v-1)$ ile $(u+d_{max}, v-1)$ arasında da aranmaktadır. Bu yaklaşım, eşlemede gürbüzlük kazandırmaktadır.

$$Ceza(p, q) = \text{Hamming}(C_1(p), C_2(q)) \quad (4.4)$$

Bu aşamalar referans görüntü sağ panoramik ve hedef görüntü sol panoramik görüntü iken ve tam tersi yönde yapılmıştır. Ayrıca her piksel için farklı derinlik farklarına ait cezalar ceza biriktirme aşamasında kullanılacağı için kaydedilmektedir.

4.3.2. Hiperspektral görüntü çiftinin bölütlenmesi

Bu aşamada, hiperspektral görüntüler için spektral açı ve alan büyültme temelli bir bölütleme algoritması önerilmiştir. Piksel spektrumun tamamı üzerinden olarak spektral açı uzaklığının kullanılması, bölütlemeye ve dolayısıyla derinlik kestiriminde gürbüz sonuçlar vermektedir. Algoritma adımları aşağıda verilmiştir.

1. Maksimum bölüt sayısı S_{\max} ve spektral açı eşiği T değerleri tanımlanır.
2. Görüntü üzerinde rastgele bir piksel seçilir ve bu pikselin komşularıyla olan spektral açı uzaklıkları Denklem (4.5)'teki gibi hesaplanır. Denklem (4.5)'te n referans piksel spektrumunu ve m komşu piksellerde herhangi birisini göstermektedir. Spektral açı uzaklığı T 'den küçük olan komşu piksellere s etiketi atanır ve referans piksel spektrumu n , s ile etiketlenmiş bölge üzerinden ortalama alınarak güncellenir. Bölge büyütme tüm komşularıyla ilgili bölge ortalama spektrumu arasındaki uzaklıklar T 'den büyük olana kadar devam ettirilir.

$$\alpha(n, m) = \arccos\left(\frac{n \cdot m}{\|n\| \cdot \|m\|}\right) \quad (4.5)$$

3. Büyütme durduğunda etiket değeri s bir artırılarak adım (2)'ye geri dönülür. Bu işlemler $s = S_{\max}$ koşulu sağlanana kadar devam ettirilir. Bölütlenmiş görüntüde etiketlenmemiş piksellere sıfır değeri atanır ve bölütleme işlemi bitirilir.

Bu işlemler her iki panoramik hiperspektral görüntü için de ayrı ayrı yapılarak bölütleme görüntüleri oluşturulur.

4.3.3. Ceza biriktirilmesi

Bölütleme ve başlangıç cezalarının hesaplanması tamamlandığında bölüt ağırlıklandırılmalı ceza biriktirilmesi adımına geçilir. Ceza biriktirmedeki temel mantık, merkez piksel ile aynı etikette bölütlenmiş bölgedeki cezaları Öklid uzaklığına göre ağırlıklandırmaktır. Aynı etikette bölütlenmeyen kısımlar da ağırlıklandırmaya katılmamaktadır. Bu işlem sonrasında kazanan-hepsini-alır mantığıyla en düşük cezaya ait derinlik değeri belirlenmektedir. Bu adımda, p_i referans görüntü I_R üzerinde alınan $W_m \times W_m$ boyutundaki W_r penceresi içerisindeki bir piksel ve p_c bu pencerenin ortasında S_c ile etiketlenmiş piksel olduğunu kabul edersek ceza biriktirme işlemi Denklem (4.6) ve Denklem (4.7)'de verildiği gibi yapılmaktadır.

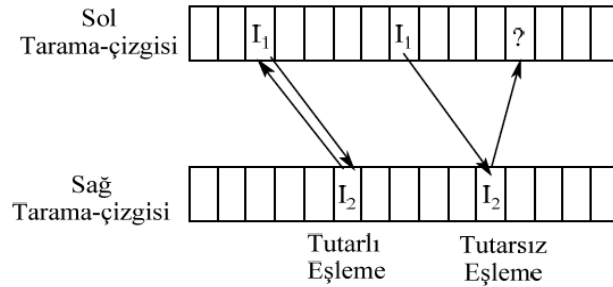
$$w_r(p_i, p_c) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{d_p(p_i, p_c)}{\gamma_p}\right), & p_i \in S_c \text{ ise} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$AC(p_i, q_i) = \frac{\sum_{p_i \in W_r, q_i \in W_t} w_r(p_i, p_c) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{Ceza(p_i, q_i)}{\gamma_c}\right)\right)}{\sum_{p_i \in W_r, q_i \in W_t} w_r(p_i, p_c)} \quad (4.7)$$

Burada, AC ağırlıklandırılmış cezayı, d_p iki piksel arasındaki Öklid mesafesini, γ_c ceza parametresini, γ_p ağırlıklandırma parametresini, q_i hedef görüntüdeki W_t eşleme penceresi içerisindeki pikseli ifade etmektedir. Bu işlem, referans görüntü sağ panoramik ve hedef görüntü sol panoramik görüntü iken ve tam tersi iken yapılmış ve iki derinlik haritası D_{LR} ve D_{RL} oluşturulmuştur.

4.3.4. Örtük bölgelerin tespiti ve doldurulması

Örtük bölgelerin tespiti için Şekil 4.4'te verilen sağ-sol derinlik tutarlılığı [32] kullanılmıştır. Sağ görüntü referans ve sol görüntü hedef görüntü iken oluşturulan derinlik haritası ile tam tersi durumunda oluşturulan derinlik haritası kullanılarak hesaplanır. Her pikselin derinlik değerlerini sağlayıp sağlamadığına bakılır ve tutarsız eşlemeler örtük bölge olarak işaretlenir. Bu şekilde bütün örtük bölgeler tespit edilir ve doldurma aşamasına geçilir. Örtük bölgeleri doldurma aşaması iki adımdan oluşmaktadır.



Şekil 4.4. Sağ-sol derinlik tutarlılığının kontrolü [32]

İlk adımda her örtük bölgedeki pikselin bölütlenmiş görüntüdeki etiketleri ele alınır ve bu etiketlerin derinlik farkı değerlerinin histogramları çıkartılır. Maksimum

histogram değeri, sıfır değerini gösteriyorsa çoğunluğun örtük bölge olduğunu ifade ettiğinden ataması yapılmaz ve ikinci aşamaya bırakılır. Eğer maksimum histogram değeri sıfır değerinden farklı ise derinlik farkı atamaları yapılır.

İkinci adımda ise [52]'de önerilen ceza süzgeçlemesi hedefleyen ağırlıklı ortanca süzgeçleme yaklaşımı kullanılmıştır ve bu yaklaşım Denklem (4.8)'de verilmiştir. Bu adımda, örtük bölgelerin tamamı doldurularak son derinlik haritasına ulaşılmaktadır. Bu algoritmanın avantajı, nesne kenarlarını koruyarak ceza biriktirmesinde sağlanan kesinliği devam ettirmesidir.

$$W_{i,j} = \frac{1}{K_i} \cdot \exp\left(-\frac{|i-j|^2}{\sigma_s^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|I_i - I_j|^2}{\sigma_c^2}\right) \quad (4.8)$$

Burada σ_s ve σ_d parametreleri uzamsal ve renk benzerlik parametreleri, K_i ise normalizasyon faktörüdür. Bu yaklaşımla, bir piksele yakın konumda ve benzer renge sahip olan komşu pikseller büyük ağırlık değerlerine sahip olacaktır. Algoritma detayları [52]'de verilmiştir.

4.4. Stereo Hiperspektral Görüntüleme Sistemiyle Alınan Görüntülerin Özellikleri

Görüntülerin toplanması sırasında önceden bahsedilen stereo geometriye uyulması için bazı şartların sağlanması gerekmektedir. Öncelikle, sistemin açısız hızı görüntü alma boyunca sabit tutulmalıdır. Sistem düz ve sert bir zemin üzerine konumlandırılmalı ve pozlama süresi piksellerin doyuma ulaşmayacağı şekilde seçilmelidir. Uzak bölgelerin görüntülenmesi isteniyorsa yüksek odak uzaklığına sahip kamera lensleri tercih edilmelidir. Eğer çok detaylı bir derinlik haritası çıkartılmak isteniyorsa hareketli platformun açısız hızı düşük değerlerde tutulmalıdır. Bu şartlar, tezde önerilen sistemle alınan görüntülerin hepsinde sağlanmıştır.

Tüm deneyler boyunca hareketli platformun hızı 360 dereceyi 50 saniyede tarayacak şekilde ayarlanmıştır. Kamera pozlama süresi 20 ms seçilmiş olup daha önceden bahsedilen kamera konfigürasyonu ile çerçeve hızı (FPS) 40,4 olmaktadır. Dolayısıyla bir tam turda alınan sütun sayısı (W) 2020 olmaktadır. Açısız görüntü çözünürlüğü (γ) bu değerler üzerinden 0,178 °/sütun olarak hesaplanmıştır.

4.4.1. Deney 1

İlk deneyde dönme yarıçapı (R) 5 cm olarak seçilmiş ve iki farklı sahnenin yaklaşık 180° açı taranmasıyla iki panoramik hiperspektral görüntü çifti alınmıştır. İlk sahnede farklı renklerde karton ve bir sandalye farklı pozisyonlarda konumlandırılmıştır. İlk sahne için $363 \times 1035 \times 300$ boyutunda hiperspektral görüntü kübü oluşturulmuştur. İkinci sahnede ise bitkiler, iki metal sütun, binalar ve derinlik farkı yaratmak amacıyla kolunu önce doğru uzatmış bir insan bulunmaktadır. İkinci sahnenin görüntü boyutları $372 \times 1035 \times 300$ olmuştur. Görüntülerin arasında ilk boyutların farklı olmasının nedeni kamera pozisyonunun değişmesi sonucu farklı dikey ötelemeler oluşmasından kaynaklanmıştır. Bu iki sahnenin renkli görüntüleri Şekil 4.5 (a) ve Şekil 4.5 (b)'de verilmiştir.

4.4.2. Deney 2

Deney 1'deki maksimum derinlik algılama mesafesini arttırabilmek amacıyla ikinci deneyde dönme yarıçapı (R) 10 cm olarak seçilmiştir. Sistem Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nin çatısında konumlandırılarak sahnenin 270° açısı taranmıştır. Üçüncü sahnenin görünüş boyutu $363 \times 1425 \times 300$ olup renkli görüntüsü Şekil 4.6'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.5. (a) Birinci sahneye ait renkli görüntü, (b) ikinci sahneye ait renkli görüntü

4.5. Önerilen Algoritma Sonuçları ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması

Önerilen algoritma için bazı parametreler deneyler boyunca sabit tutulmuştur. Eşleme pencere boyutu (W_m) değeri 39 ve Census pencere boyutu (W_c) değeri 5 seçilmiştir. Çok bantlı Census dönüşümünde kullanılan bant sayısını gösteren değer (N) 10 seçilmiştir. Sistemin minimum derinlik farkı olarak 2 girilmiştir. Bölütleme sırasında kullanılan parametrelerden maksimum etiket sayısı (S_{max}) 3000 değeri olarak deneysel şekilde belirlenmiştir. γ_p parametresine W_m parametresinin yarısı olarak 19,5 değeri, γ_c parametresine de oluşacak kod uzunluğunun dörtte biri olarak 60 değeri atanmıştır. Örtük bölge doldurma işlemimde pencere boyutu 31×31 alınmış ve σ_s ile σ_d parametrelerinin değerleri 5 seçilmiştir. Bütün parametreler deneysel olarak belirlenmiş ve literatürde kullanılanlara yakın değerler kullanılmıştır.

Şekil 4.7’de deney 1 ve deney 2’de kullanılan verilere ait bölütleme haritaları verilmiştir. Burada verilen haritalar 0-3000 arasında olan etiket değerlerinin yapay renklendirilmesiyle oluşmuştur. Bu yüzden görüntülerde verilen renkler duruma göre birden fazla etiketi temsil edebilmektedir.



Şekil 4.6. Üçüncü sahneye ait renkli görüntü

Üçüncü sahneye ait dört farklı bölge için ceza biriktirmede kullanılan bölüt ağırlıklandırma pencereleri Şekil 4.8’de verilmiştir. Pencereleere ait bölütlemelerin iyi bir şekilde oluşturulduğu görülmektedir. Öklid ağırlıklandırmasının da katılmasıyla aynı bölüt üzerindeki farklı piksellerin farklı derinliklerde olabilme ihtimali de göz önüne alınmıştır.

Çok bantlı Census dönüşümünün kullanılmasının avantajını gösterebilmek için tek bantlı ($N=1$) ve çok bantlı ($N=10$) dönüşümler ikinci ve üçüncü sahne görüntülerine

uygulanmış ve örtük bölgeler hariç durumdaki derinlik haritaları çıkartılmıştır. Derinlik haritalarında önemli farklılıkların olduğu bölgeler Şekil 4.9'da karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi N değeri arttırıldığında daha iyi eşleşmeler olmakta ve örtük bölge olarak bulunan bölgeler azalmaktadır. Fakat N değerinin çok artması hem hesapsal yükü hem de gürültüye karşı gürbüzlüğü kötü yönde etkileyeceğinden bütün deneylerde $N=10$ alınmıştır.

Önerilen yöntem, standart stereo literatüründe sıklıkla kullanılan CostFilter [52], AdaptingBP [44] ve SGM [42] yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Görüntü algoritmaları, RGB görüntüleri üzerinden çalıştığından hiperpektral görüntülerin 300 banttan 3 banda ortalama alınarak indirilmiş renkli görüntüleri kullanılmıştır. Tüm yöntemlerde, derinlik haritalarını en iyileyecek parametreler deneysel olarak belirlenmiştir.

4.5.1. Deney 1

Deney 1'de diğer yöntemlerle daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla ilk sahne için maksimum derinlik farkı 20, ikinci sahne için 32 seçilmiştir. Spektral açışiği (T), 0,06 (radyan) olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında derinlik eşlemelerini kontrol edebilmek amacıyla örtük bölge doldurulmadan oluşan derinlik haritaları Şekil 4.10'da verilmiştir.

İlk sahne için önerilen algoritmaya ait derinlik haritası Şekil 4.11 (b)'de verilmiştir. SGM, CostFilter ve AdaptingBP algoritmalarının sonuçları ise sırasıyla Şekil 4.11 (c), Şekil 4.11 (d) ve Şekil 4.11 (e)'de verilmiştir. İkinci sahne için de sonuçlar benzer sıra ile Şekil 4.12'de verilmiştir.

Yöntemlerin her iki veri üzerindeki sonuçları incelendiğinde önerilen stereo eşleme algoritmasının en başarılı derinlik haritası çıkartımı olduğu görülmektedir. Önerilen yöntemde görüntünün sol kısmında kalan siyah metal sütunların ve yakındaki bitkilerin derinliklerinin iyi yakalanabildiği gibi verinin diğer zor kısmı olan sağ taraftaki bitkilerin derinlikleri de başarılı bir şekilde bulunmuştur. Ayrıca, sahnedeki insanın kolunu öne uzatmasından kaynaklanan derinlik değişimi de yakalanmıştır. CostFilter algoritması ise önerilen yaklaşım hariç tutulduğunda diğerlerine göre daha iyi sonuçlar vermektedir. AdaptingBP algoritması, bölütlemeyi RGB görüntüler

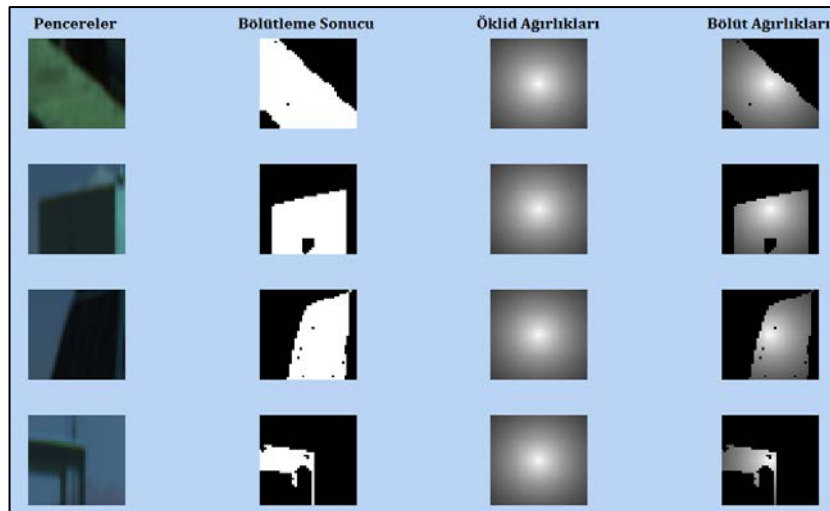
üzerinden Mean Shift algoritmasını kullanarak yaptığından yanlış bölütlenen bölgelerde performans düşmektedir. Ayrıca, her bölüt bir derinlik farkı ile gösterildiğinden bölüt içerisindeki derinlik değişimi göz ardı edilmektedir. SGM ise büyük pencere boyutları için derinlik haritalarında yumuşak geçişler oluşturmakta ve detayları kaybetmektedir. Küçük pencere boyutlarına ait sonuçlar hataların çok olması nedeniyle verilmemiştir.

4.5.2. Deney 2

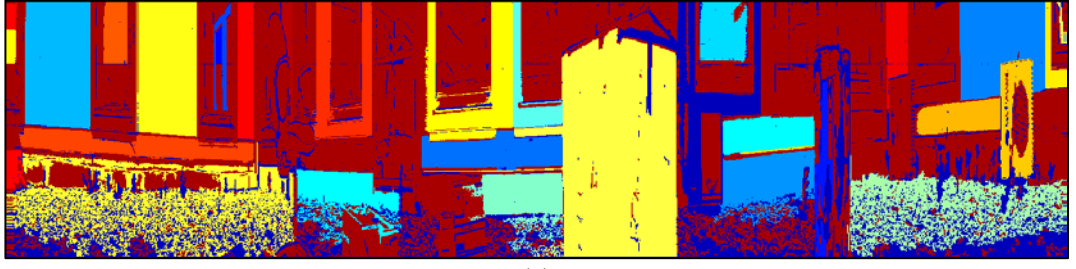
Deney 2’de diğer yöntemlerle daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla üçüncü sahne için maksimum derinlik farkı 20 ve spektral açı eşiği (T), 0,07 (radyan) olarak seçilmiştir. Üçüncü sahne için örtük bölge doldurulmadan oluşan derinlik haritaları Şekil 4.10’da ve derinlik haritaları birinci sahnede kiyle aynı sıra ile Şekil 4.13’te verilmiştir.

Yöntemlerin sonuçları incelendiğinde önerilen stereo eşleme algoritmasının üçüncü sahnede de en başarılı derinlik haritası çıkartımı olduğu görülmektedir. Bu sahnede de kenar veya köşe noktalarındaki detayları iyi yakalanabildiği gibi düz bölgelerdeki derinlik değerlerini de oldukça iyi tespit edebilmiştir. Gökyüzünde diğer üç yöntem tarafından yanlış eşleşmeler görülmektedir.

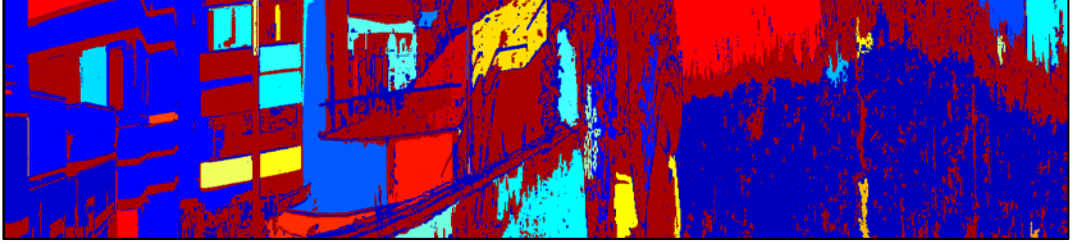
Ayrıca kameralar arası mesafenin artmasının algılanabilen derinlik uzaklığını da arttırdığı gözlemlenmiştir.



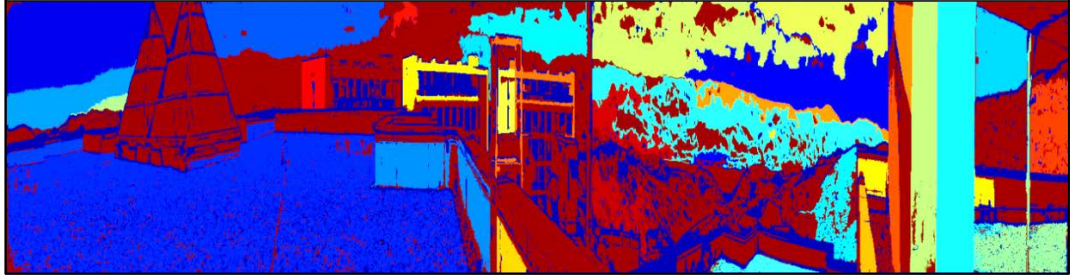
Şekil 4.7. Hiperspektral görüntülerden alınan 39×39 pencere boyutundaki dört bölgenin bölüt ağırlıkları



(a)



(b)

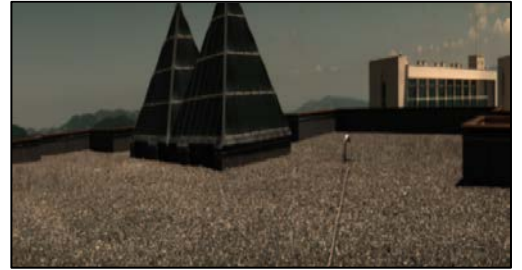


(c)

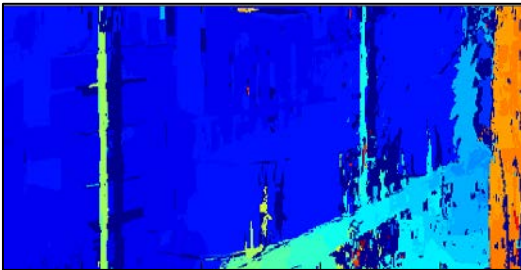
Şekil 4.8. (a) Birinci sahneye ait (b) ikinci sahneye ait (c) üçüncü sahneye ait bölütleme haritaları



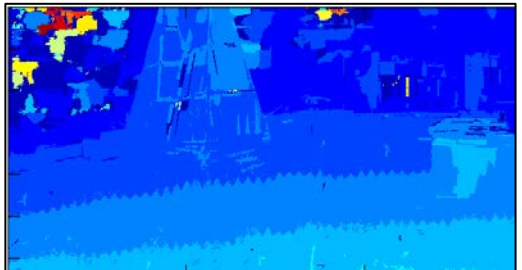
(a)



(b)

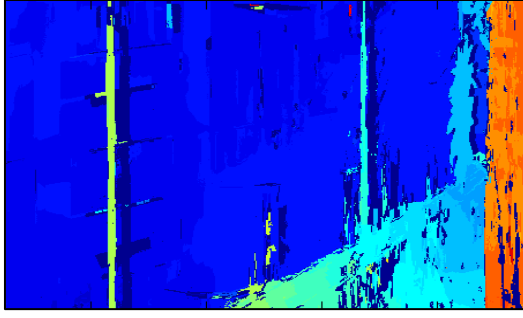


(c)

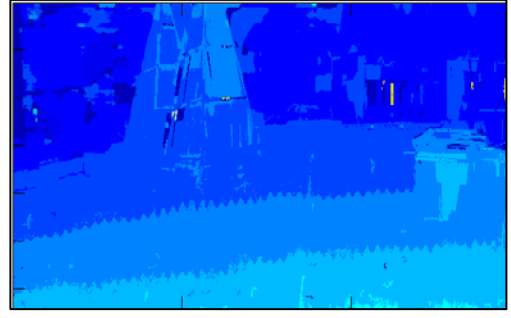


(d)

Şekil 4.9. N parametresinin değişimine bağlı derinlik haritası sonuçları (a) İkinci sahneden alınan bir bölüm, (b) Üçüncü sahneden alınan bir bölüm, N=1 iken (c) ikinci sahneye ait, (d) üçüncü sahneye ait derinlik haritası, N=10 iken (e) üçüncü sahneye ait, (f) üçüncü sahneye ait derinlik haritası

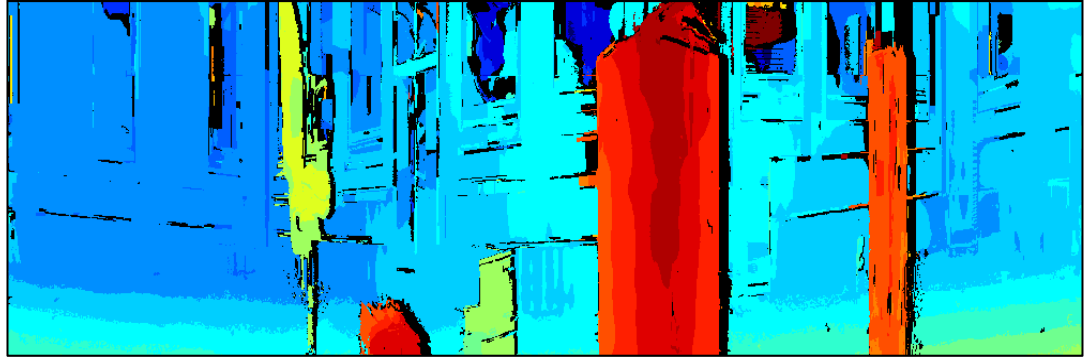


(e)

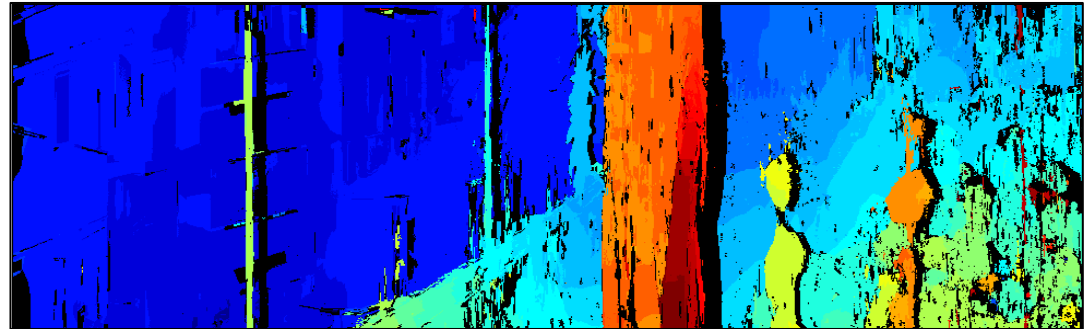


(f)

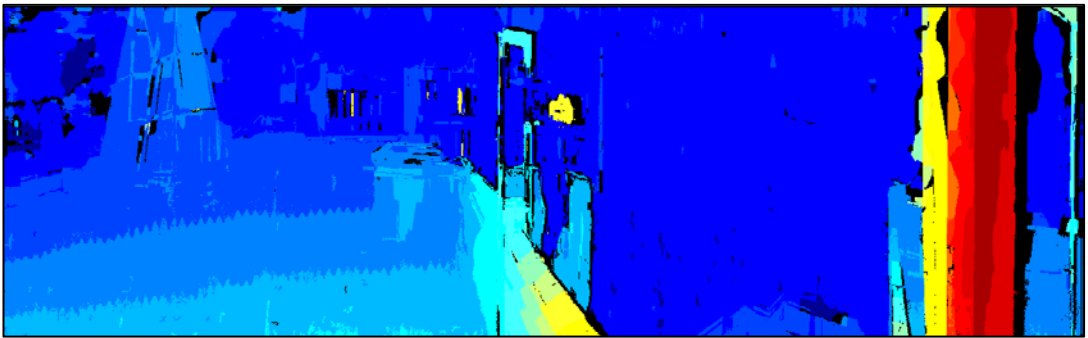
Şekil 4.9. (Devam) N parametresinin değişimine bağlı derinlik haritası sonuçları (a) İkinci sahneden alınan bir bölüm, (b) Üçüncü sahneden alınan bir bölüm, N=1 iken (c) ikinci sahneye ait, (d) üçüncü sahneye ait derinlik haritası, N=10 iken (e) üçüncü sahneye ait, (f) üçüncü sahneye ait derinlik haritası



(a)

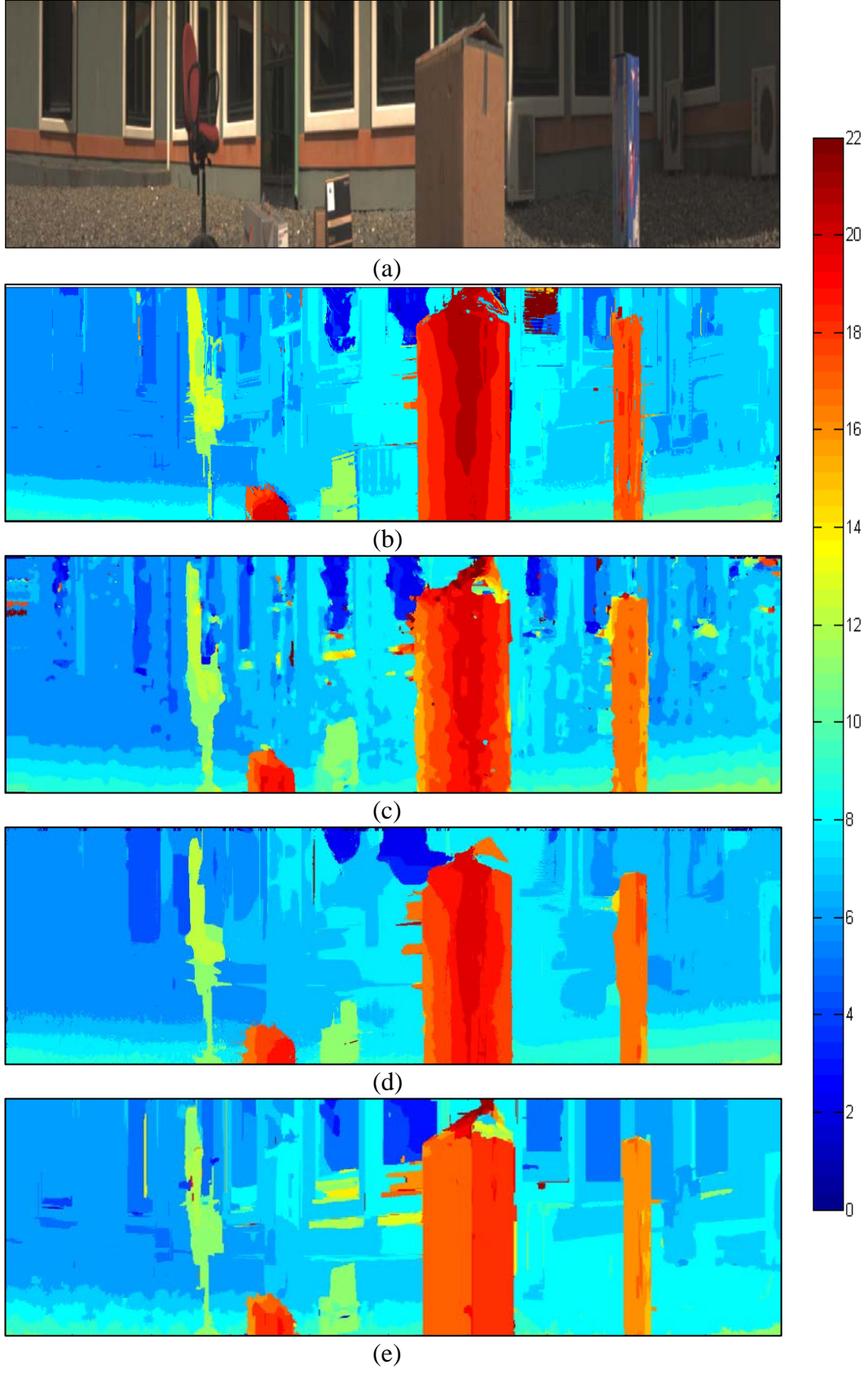


(b)

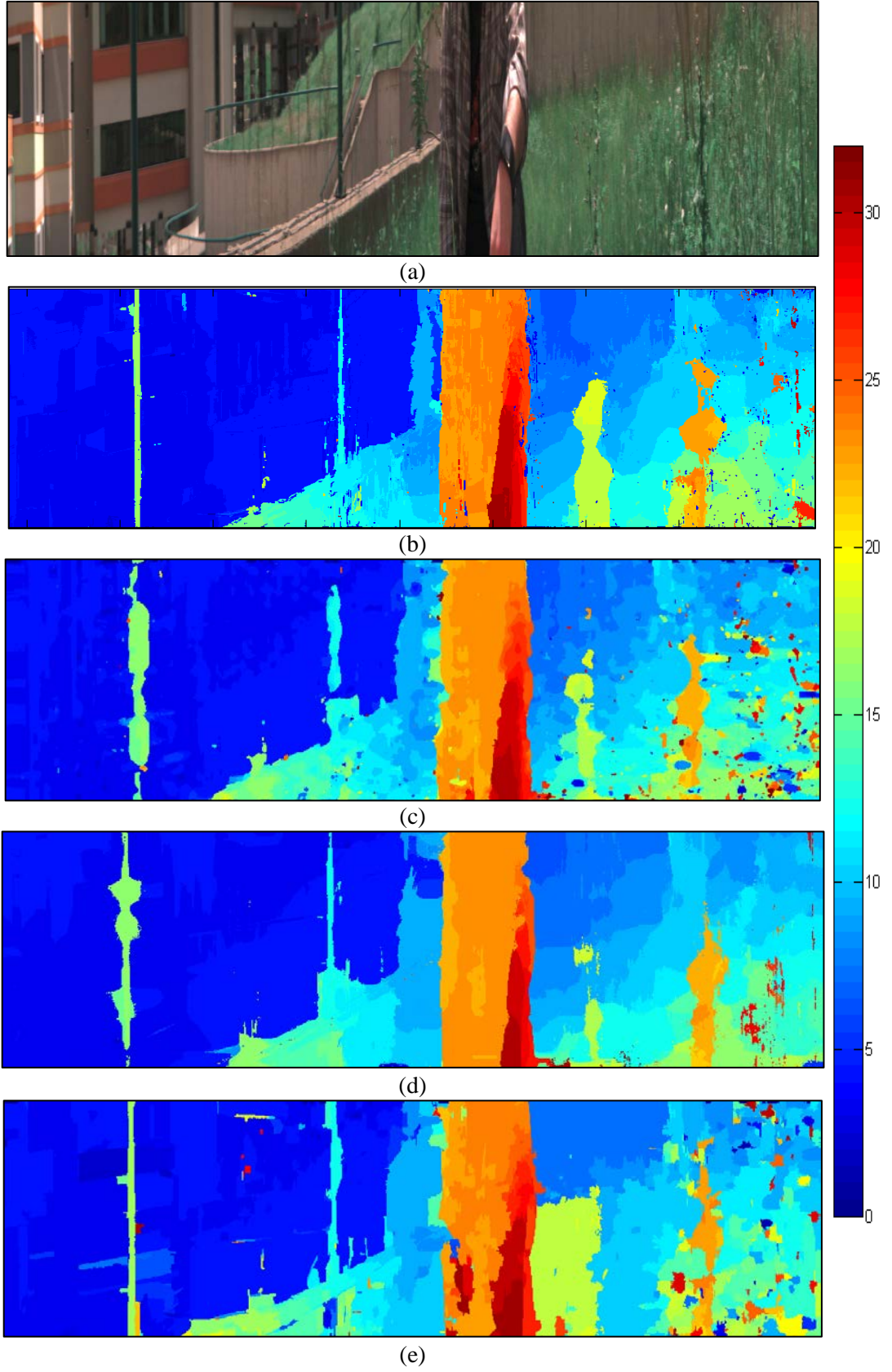


(c)

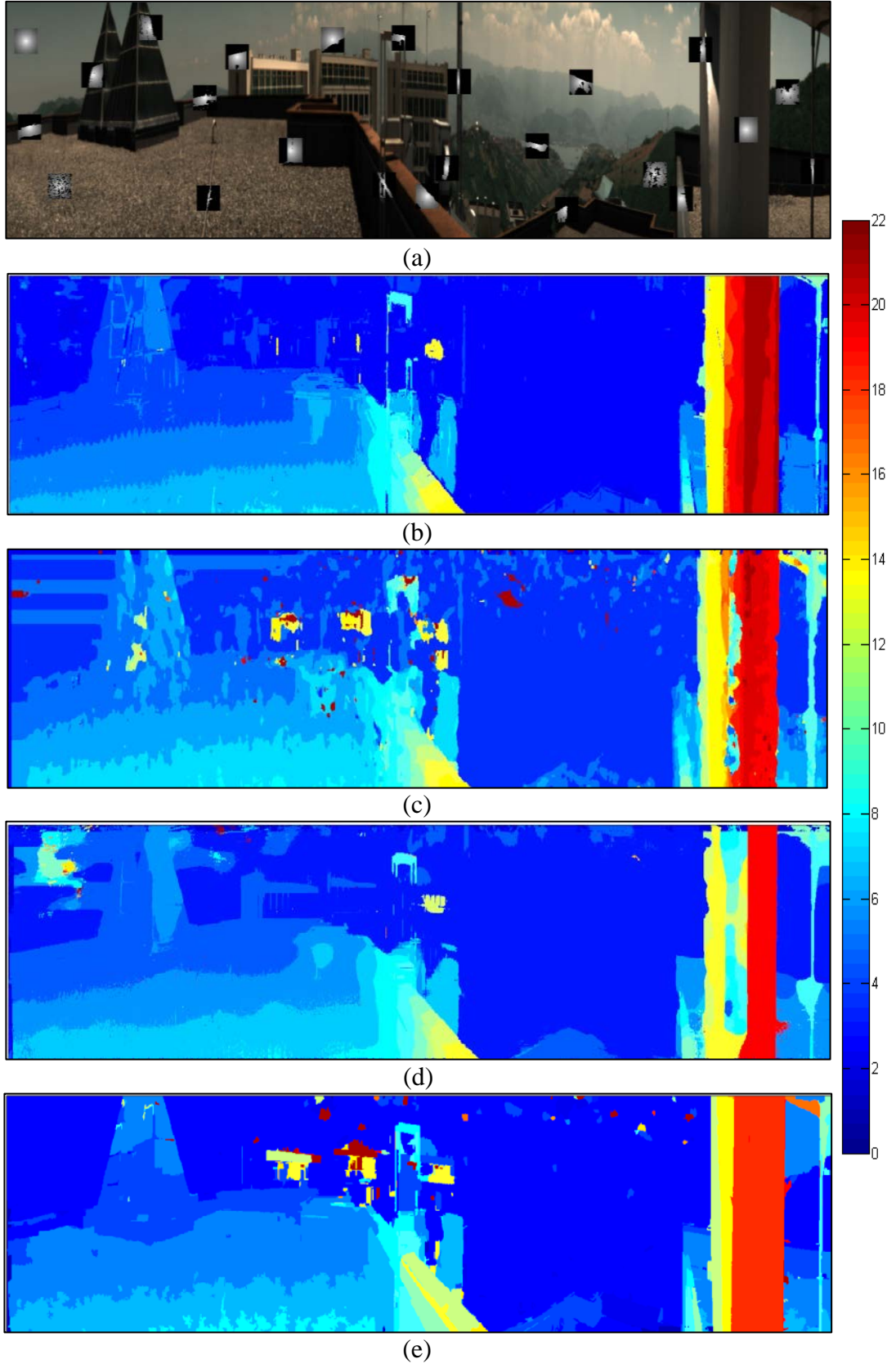
Şekil 4.10. Sahnelerin örtük bölge doldurma öncesi derinlik haritaları



Şekil 4.11. İlk sahneye ait derinlik haritaları (a) Renkli görüntüsü, (b) Önerilen yaklaşım, (c) SGM [42], (d) CostFilter [52], (e) AdaptingBP [44]



Şekil 4.12. İkinci sahneye ait derinlik haritaları (a) Renkli görüntüsü, (b) Önerilen yaklaşım, (c) SGM [42], (d) CostFilter [52], (e) AdaptingBP [44]



Şekil 4.13. Üçüncü sahneye ait derinlik haritaları (a) Renkli görüntüsü ve bazı bölgelerdeki bölüt ağırlıkları, (b) Önerilen yaklaşım, (c) SGM [42], (d) CostFilter [52], (e) AdaptingBP [44]

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında özgün bir panoramik stereo hiperspektral görüntüleme sistemi önerilmiştir. Bu sayede, panoramik görüntülerin geniş bir alanda görüntü toplayabilme özelliği, stereo görüntülemenin derinlik bilgisi verebilme özelliği ve hiperspektral görüntülerin yüksek ayırt edicilik özelliği tek sistemde toplanmıştır. Sistem tarafından alınan görüntüleri kullanarak derinlik haritası oluşturmak için özgün bir stereo eşleme algoritması önerilmiştir.

Tez kapsamında kullanılan hiperspektral kameraların kalibrasyon aşamaları verilmiştir. Çizgi tarayan stereo hiperspektral görüntüleme sisteminin teorisi incelenmiş ve sistem parametrelerinin derinlik değişimine olan etkileri tartışılmıştır. Ayrıca, alınan toplam örnek sayısı ve bu örneklerin yatayda, dikeyde ve derinlerde nasıl değiştiği teorik olarak gösterilmiştir.

Derinlik haritasının çıkartımı için bölüt ağırlıklandırılmalı ceza biriktirme temelli özgün bir stereo eşleme yöntem önerilmiştir. Ayrıca, bu yöntemde çok bantlı Census dönüşümü temelli bir ceza fonksiyonu kullanılmıştır. Önerilen yöntem sırasında bölütlemeler piksel spektrumları üzerinden yapıldığından ve ceza fonksiyonunda farklı spektral bantlardaki komşuluk ilişkisi incelendiğinden RGB görüntüler üzerinden önerilen yaklaşımlara göre daha gürbüz bir yaklaşım olmaktadır. Hiperspektral kameralarda radyometrik kalibrasyon gerektirmeyen bu yaklaşım, sistem tarafından üç adet zor panoramik hiperspektral görüntü çiftine uygulanmıştır. Çıkartılan derinlik haritası sonuçları standart stereo literatüründe sıklıkla kullanılan üç farklı yöntemle karşılaştırılmış ve diğerlerinden daha başarılı olduğu gösterilmiştir.

Önerilen sistem yüksek performansta derinlik çıkartımı yapabildiğinden değişim analizi, hedef tespiti ve hedef izleme gibi pek çok uygulamada kullanılabilir. Örneğin bir savunma sanayisi uygulaması olarak tespit edilen hedeflerin sistemden ne kadar uzak veya yakında olduğunu söyleyebilir veya yakın bölgelerde olan değişimler hiperspektral görüntülerin özellikleri üzerinden incelenebilir.

Panoramik stereo hiperspektral görüntüleme sisteminde uzak bölgelerden daha fazla örnek alabilmek için daha yüksek odak uzaklığı değerlerindeki kamera lensleri önerilmektedir. Benzer şekilde daha hassas derinlik algısı yaratmak için de saniyede alınan görüntü sayısı yüksek kameraların tercih edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Sun W. D., *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis*, Elsevier Science, London, 2010.
- [2] Edelman G. J., Van Leeuwen T. G., Aalders M. C. G., Hyperspectral imaging for age estimation of blood stains at crime scene, *Forensic Science International*, 2012, **223**, 72-77.
- [3] Krause F. A., Boardman J. W., Hungtinton J. F., Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping, *IEEE Trans. on Geo. and Rem. Sens.*, 2003, **41**, 1388-1400.
- [4] Lopes M. B., Bioucas-Dias J. M., Figueiredo M. A. T., Wolff J. C., Spectral unmixing via minimum volume simplices: Application to near infrared spectra of counterfeit tablets, *First Works. On Hyper. Imag. and Signal Proc. Evol. In Rem. Sens. (WHISPERS)*, Gronoble, France, 1-4 August 2009.
- [5] Picon A., Ghita O., Whelan P. F., Iriondo P. M., Fuzzy spectral and spatial feature integration for classification of nonferrous materials in hyperspectral data, *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2009, **5**, 483-494.
- [6] Matteoli S., Acito N., Diani M., Corsinin G., An automatic approach to adaptive local background estimation and suppression in hyperspectral target detection, *IEEE Trans. on Geo. and Rem. Sens.*, 2011, **49**, 790-800.
- [7] Tao W., Zhigang Z., Blasch E., Bio-inspired adaptive hyperspectral imaging for real-time target tracking, *IEEE Sensors Journal*, 2010, **10**, 647-654.
- [8] Melgani F., Bruzzone L., Clasification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines, *IEEE Trans. on Geo. and Rem. Sens.*, 2008, **46**, 1416-1427.
- [9] Jia X., Richards J. A., Segmented principal components transformation for efficient hyperspectral remote-sensing image display and classification, *IEEE Trans. on Geo. and Rem. Sens.*, 1999, **37**, 538-542.
- [10] Nielsen A. A., The regularized iteratively reweighted MAD method for change detection in multi-and hyperspectral data, *IEEE Trans. on Image Proc.*, 2007, **16**, 463-478.
- [11] Dalponte M., Bruzzone L., Gianelle D., Fusion of hyperspectral and LIDAR remote sensing data for classification of forest areas, *IEEE Trans. on Geo. and Rem. Sens.*, 2008, **46**, 1416-1427.
- [12] <http://ismapping.com/remote-sensing-articles-and-news/the-resolution-games/> (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2013).

- [13] <http://www.raytheon.com/>(Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2013).
- [14] Garcia-Allende P. B., Conde O. M., Lopez-Higuera J. M., Hyperspectral imaging for raw material sorting and processed product quality control, Editors: Prof. Ognyan Ivanov, *Applications and Experiences of Quality Control*, Intech, 663-686, 2011.
- [15] Bertozzi M., Broggi A., GOLD: A parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection, *IEEE Trans. on Image Process.*, 1988, **7**, 62-81.
- [16] Bertozzi M., Broggi A., Fascioli A., Mousset S., Toulminet G., Stereo vision-based vehicle detection, *IEEE Intelligent. Vehicle Symposium*, Detroit, USA, 5 October 2000.
- [17] Uchida N., Shibahara T., Aoki T., Nakajima H., Kobayashi K., 3D face recognition using passive stereo vision, *IEEE International Conference on. Image Processing*, Genoa, Italy, 11-14 September 2005.
- [18] Murray D., Jennings C., Stereo vision-based mapping and navigation for mobile robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, 25 April 1997.
- [19] Sohn H. G., Park C. H., Kim H. S., Heo J., 3D building extraction using IKONOS multispectral images, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seoul, Korea, 25-29 July 2005.
- [20] Shrestha R., Mansouri A., Hardeberg J. Y., Multispectral imaging using a stereo camera: concept, design and assessment, *EURASIP Journal on Advance in Signal Processing*, 2011, **1**, 1-15.
- [21] Campo F. B., Ruiz F. L., Sappa A. D., Multimodal stereo vision system: 3D data extraction and algorithm evaluation, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2012, **6**, 437-446.
- [22] Yingen X., Pulli K., Fast panorama stitching for high quality panoramic images on mobile phones, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, **56**, 298-306.
- [23] Kurz T. H., Buckley S. J., Howell J. A., Close range hyperspectral imaging integrated with terrestrial LIDAR scanning applied rock characterization at centimeter scale, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, **39**, 417-422.
- [24] Bunschoten R., Krose B., Robust scene reconstruction from an omnidirectional vision system, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2003, **19**, 351-357.
- [25] Huang F., Klette R., Scheibe K., *Panoramic Imaging: Sensor-Line Cameras and Laser Range-Finders*, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 2008.

- [26] Brusco N., Capeleto S., Fedel M., Pavotti A., Poletto L., Cortelazzo G. M., A system for 3D modeling frescoed historical buildings with multispectral texture information, *Mach. Vis. Appl.*, 2006, **17**, 373-393.
- [27] Jiang W., Shigeki S., Masatoshi O., Panoramic 3D reconstruction using stereo multi-perspective panorama, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2010, **24**, 867-896.
- [28] <http://www.specim.fi/index.php/products/industrial/imaging-spectrographs> (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2013).
- [29] <http://www.avantes.com/products/light-sources/item/240-avalight-hal-cal-and-dh-cal-calibrated-light-source> (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2013).
- [30] <http://elm-chan.org/works/lcam/report.html> (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2013).
- [31] http://en.wikipedia.org/wiki/Epipolar_geometry (Ziyaret tarihi: 15 Aralık 2013).
- [32] Huang F., Shou K., Klette R., Geometrical fundamentals of polycentric panoramas, *IEEE Eighth International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Vancouver, Canada, 7-14 July 2001.
- [33] Sharstein D., Szeliski R., A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms, *International Journal on Computer Vision*, 2002, **47**, 7-42.
- [34] Cıgla C., Alatan A. A., Information permeability for stereo matching, *Signal Processing: Image Communication*, 2013, **28**, 1072-1088.
- [35] Hosni A., Bleyer M., Gelautz M., Rhemann C., Local stereo matching using geodesic support weights, *IEEE International Conference on Image Processing*, Cairo, Egypt, 7-10 November 2009.
- [36] Zhang K., Lu J., Lafruit G., Cross based stereo matching using orthogonal integral images, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, **19**, 1-8.
- [37] Kolmogorov V., Zabih R. Computing visual correspondence using graph cuts, *IEEE Eighth International Conference on Computer Vision*, Vancouver, Canada, 7-14 July 2001.
- [38] Leyer M., Gelautz M., Graph-based surface reconstruction from stereo pairs using image segmentation, *International Society for Optics and Photonics*, 2007, **5665**, 288-299.
- [39] Pedro F. F., Daniel P. H., Efficient belief propagation for early vision, *International Journal of Computer Vision*, 2006, **70**, 41-54.

- [40] Veksler O., Stereo correspondence by dynamic programming on a tree, *International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, London, Canada, 20-25 June 2005.
- [41] Wang L., Liao M., Gong M., Yang R., Nister D., High-quality real-time stereo using adaptive cost aggregation and dynamic programming, *International Symposium on 3D data processing visualization and transmission*, Chapel Hill, NC, 14-16 June 2006.
- [42] Hirschmüller H., Stereo processing by semi-global matching and mutual information, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, **31**, 328-341.
- [43] Yoon K. J., Kweon I. S., Adaptive support weight approach for correspondence search, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, **28**, 650-656.
- [44] Klaus A., Sormann M., Karner K. F., Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure, *18 International Conference on Pattern Recognition*, 2006, **3**, 15-18.
- [45] Tombari F., Mattocia S., Di Stefano L., Segmentation-based adaptive support for accurate stereo correspondence, *Proc. IEEE Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology*, Santiago, Chile, 17-19 December 2007.
- [46] Aschwaden P., and Guggenbühl W., Experimental results from a comparative study on correlation-type registration algorithms, Editors: Förstner W., Ruweidel S., *Robust computer vision: Quality of vision algorithms*, Wichmann, Mountain, USA, 268-289, 1992.
- [47] Hirschmüller H., Scharstein D., Evaluation of stereo matching costs on images with radiometric differences, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, **31**, 1582-1599.
- [48] Zabih R., Woodfill J., Non-parametric local transforms for computing visual correspondence, *Proceedings of the 3rd European Conference on Computer Vision*, Stockholm, Sweden, 2-6 May 1994.
- [49] Seunghun J., Junguk C., Xuan D. P., Kyoung-Mu L., Sung-Kee P., Munsang K., Jeon J. W., FPGA design and implementation of a real time stereo vision system, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2010, **20**, 15-26.
- [50] Mei X., Sun X., Zhou M., Jiao S., Wang H., Zhang X., On building an accurate stereo matching system on graphics hardware, *International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, Barcelona, Spain, 6-13 November 2011.
- [51] Reddy B. S., Chatterji B. N., An FTT-based technique for translation, rotation and scale-invariant image registration, *IEEE Trans. on Image Processing*, 1996, **5**, 1266-1271.

- [52] Rhemann C., Hosni A., Bleyer M., Rother C., Gelautz M., Fast cost-volume filtering for visual correspondance and beyond, *IEEE Conference on Computer Vision and Patter Recognition*, Providence, Rhode Island, 20-25 June 2011.

KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER

- [1] **Karaca A. C.**, Ertürk A., Güllü M. K., Ertürk S., Automatic Waste Sorting Using Shortwave Infrared Hyperspectral Imaging System, *IEEE 5th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS 2013)*, Florida, USA, 25-28 June 2013.
- [2] **Karaca A. C.**, Ertürk A., Güllü M. K., Ertürk S., Kamuflaj Tespiti için Hiperspektral Görüntüleme, *EMO Bilimsel Dergisi*, 2013, **5**, 35-39.
- [3] **Karaca A. C.**, Ertürk A., Güllü M. K., Ertürk S., Hiperspektral Görüntüleme ile Kamuflaj Tespiti, *6. Savunma Teknolojileri Kongresi (SAVTEK 2012)*, Ankara, Türkiye, 20-22 Haziran 2012.
- [4] **Karaca A. C.**, Ertürk A., Güllü M. K., Ertürk S., Hiperspektral Görüntüleme ile Adli Belgelerdeki Bulguların Analizi, *IEEE 20th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU'2012)*, Fethiye, Türkiye, 18-20 Nisan 2012.
- [5] **Karaca A. C.**, Ertürk A., Güllü M. K., Ertürk S., Kızılötesi Hiperspektral Görüntüleme Sistemi ile Plastik Atıkların Ayırıştırılması, *IEEE 21th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU'2013)*, Girne, KKTC, 24-26 Nisan 2013.
- [6] **Karaca A. C.**, Ertürk A., Güllü M. K., Ertürk S., Hiperspektral Görüntüleme Sistemi ve Uygulamaları, *14. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*, İstanbul, Türkiye, 14 Eylül 2012.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Balıkesir'in Bandırma ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erdek'te, lise öğrenimini Bandırma Şehit Mehmet Gönenc Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 2008 yılında çift anadal programı kapsamında başladığı Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nü 2011 yılında tamamladı. 2011 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Görüntü ve İşaret İşleme Laboratuvarı'nda araştırmacı olarak görev yapmaktadır. 2011 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir.