

Düşük Çözünürlüklü Görüntülerden
Yüksek Çözünürlüklü Görüntü Elde Etme

Kemal Özkan

DOKTORA TEZİ

**Elektrik Elektronik Mühendisliği
Anabilim Dalı**

Mart 2007

Reconstruction Of A Single High Resolution Image
From Low Resolution Images

Kemal Özkan

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Electrical & Electronics Engineering

March 2007

DÜŞÜK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜLERDEN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ
GÖRÜNTÜ ELDE ETME

KEMAL ÖZKAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı
TELEKOMİNİKASYON – SİNYAL İŞLEME Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Erol SEKE

Mart 2007

Kemal ÖZKAN' ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı “DÜŞÜK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜLERDEN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜ ELDE ETME” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erol SEKE

Üye : Doç. Dr. M. Bilginer GÜLMEZOĞLU

Üye : Doç. Dr. Ö. Nezih GEREK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Atif ÇAY

Üye : Yrd. Doç. Dr. Selçuk CANBEK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

DÜŞÜK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜLERDEN YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜ ELDE ETME

KEMAL ÖZKAN

ÖZET

Görüntü işleme tekniklerinin günlük hayatımıza girişi, kolayca fark edilmese bile, hemen her alanda gerçekleşmektedir. Birçok askeri, tıbbi ve ticari uygulama yüksek çözünürlüklü görüntüleri hedeflemekte ancak algılayıcının çözünürlüğü elde edilen görüntüler için sınırlayıcı olmaya devam etmektedir. Çözüm ise düşük kaliteli ve düşük çözünürlüklü çoklu resimleri kullanarak yüksek çözünürlüklü tek bir resim elde etme tekniklerinin geliştirilmesidir. Yaklaşım yeni olmamakla beraber, kaliteli görüntülere olan ihtiyaç sebebi ile her zaman araştırmaya açıktır. Bu doktora tezi ile alandaki gelişmeleri uygulama ve özgün katkı olanaklarının araştırılması amaçlanmıştır. Öncelikle, yüksek çözünürlüklü görüntülerin elde edilebilmesi için esas olan görüntüler arasındaki kayma ve farkların alt piksel seviyesinde belirlenmesi konusu üzerinde çalışılmıştır. Daha sonra, alt piksel kaymaların bilinmesi ile birçok yüksek çözünürlük elde etme yaklaşımı ve algoritması üzerinde çalışılmış, önemli bir birikim sağlanmış ve kayda değer sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Görüntü Çakıştırma, Yüksek Çözünürlük

RECONSTRUCTION OF A SINGLE HIGH RESOLUTION IMAGE FROM LOW RESOLUTION IMAGES

KEMAL ÖZKAN

SUMMARY

Image processing applications, although not very obvious to be easily noticed, find their way into our daily life in almost every field. Many military, medical and commercial applications aim for higher resolution images, however the resolution of the image sensors continue to be main limiting obstacle in front. The solution is to develop techniques for creation of a single high resolution and high quality picture using multiple low resolution images. Although this approach is not new, because of the need for higher quality images, is always open to research. The objective in this thesis is to evaluate the possibilities for the applications of new developments in the area and provide unique contributions. Initially, subpixel registration, which is the most essential part of the superresolution, has been the main research area in the project. With clear knowledge on the registration parameters, several superresolution approaches and algorithms have been implemented building considerable experience and noteworthy results.

Keywords : Image Registration, Super Resolution

TEŞEKKÜR

Gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Yrd. Doç. Dr. Erol SEKE'ye ve tezimin tüm aşamalarında sabır ve ümitle bana destek olan sevgili aileme, Bilgisayar Bölümü Öğretim elemanlarından Dr. Nihat Adar ve Dr. Selçuk Canbek hocalarıma ve de Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü araştırma görevlisi C.Murat Kandemir'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	x
SİMGELELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Sayısal Görüntü İşlemenin Tarihçesi.....	3
1.2 Görüntü Algılama Sistemleri.....	5
1.3 Görüntünün Sayısallaştırılması.....	8
1.4 Uzamsal Çözünürlüğün Artırılması.....	13
1.5 Temel Görüntü Modeli.....	19
2. İMGE ÇAKIŞTIRMA.....	24
2.1 İmge Çakıştırmadaki Genel Problemler.....	25
2.2 Blok Karşılaştırmaya Dayanan Yöntemler.....	28
2.3 Gradyen Tabanlı Yöntemler.....	29
2.4 Faz Tabanlı yöntemler.....	31
3 YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜK.....	37
3.1 Örnekleme.....	40
3.2 Frekans Bölgesindeki Yüksek Çözünürlük Yöntemleri.....	43
3.3 Özyinelemeli Geri Yayılım Algoritması.....	45
3.4 Olasılıksal Yöntemler.....	49
3.5 Küme Teorisi Yöntemleri.....	51
3.6 Gözü Kapalı Onarım Yöntemleri.....	53
4. TEZ KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	56
4.1 Hücre Alanları ile İmge Çakıştırmaya.....	56
4.1.1 İmge çakıştırmaya deneysel çalışmaları.....	70
4.2 Modifiye Edilmiş Alt Gradyen Yöntemi.....	87
4.2.1 Modifiye edilmiş alt gradyen yönteminin deneysel çalışmaları.....	90
4.3 Aykırı Değer Ayıklamalı Özyinelemeli Geri Yayılım Algoritması.....	91
4.3.1 Aykırı değer ayıklamalı özyinelemeli geri yayılım algoritması deneysel çalışmaları.....	95
4.4 Döngülü Yüksek Çözünürlük Algoritmalarında Bulanıklığın Belirlenmesi.....	97
4.4.1 Döngülü yüksek çözünürlük algoritmasında bulanıklığın belirlenmesi yönteminin deneysel sonuçları.....	99
5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL 1.1 GÜRÜLTÜ TEMİZLEME	4
ŞEKİL 1.2 KONTRAST VE KÖŞE İŞLEMLERİ	4
ŞEKİL 1.3 GÖRÜNTÜNÜN OLUŞUMU	5
ŞEKİL 1.4 YÜKTEN BAĞLAŞIMLI AYGIT	6
ŞEKİL 1.5 YBA GÖRÜNTÜ ALGILAYICISINDA YÜK OLUŞUMU	7
ŞEKİL 1.6 YBA GÖRÜNTÜ ALGILAYICISINDA İMGE OLUŞUMU	7
ŞEKİL 1.7 BAYER MOTİFİ	8
ŞEKİL 1.8 GÖRÜNTÜ EDİNME İŞLEMİ	9
ŞEKİL 1.9 SAYISAL GÖRÜNTÜ TEMSİLİ	10
ŞEKİL 1.10 TEMEL GÖRÜNTÜLEME MODELİ	10
ŞEKİL 1.11 ODAKLANMAMA BULANIKLIĞI	12
ŞEKİL 1.12 DEVİNİM BULANMASI	12
ŞEKİL 1.13 ATMOSFERDEN KAYNAKLANAN BULANMA	13
ŞEKİL 1.14 DÇ GÖRÜNTÜLERDEN YÇ GÖRÜNTÜ ELDE ETME YÖNTEMİ	15
ŞEKİL 1.15 DEVİNİM TEMELLİ YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜK PROBLEMİNİN AYDINLATICI ÖRNEĞİ	17
ŞEKİL 1.16 GERÇEK DÜNYA VERİLERİ İLE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜK DENEYİ. A) A'DAKİ KIRMIZI DİKDÖRTGEN BÖLGE YAKINLAŞTIRILMIŞ B) DÇ GÖRÜNTÜLERDEN BİR TANESİ C) ELDE EDİLEN YÇ GÖRÜNTÜ	17
ŞEKİL 1.17 A) OLDUKÇA KÖTÜ ÖTELEMELERE SAHİP 4 DÇ PİKSEL. B) İYİ BİR ÖTELEME DAĞILIMI.	19
ŞEKİL 1.18 ÜRETİLEN VE ÜRETİLMEK İSTENEN GÖRÜNTÜLERİN VARSAYILAN CCD HÜCRE MATRİSİ.	20
ŞEKİL 1.19 DÖNME VE ÖTELEME İÇEREN GENEL BİR GÖRÜNTÜLEME MODELİ	20
ŞEKİL 2.1 TAM PİKSEL ÖTELEMELERE SAHİP GÖRÜNTÜLERİ KULLANARAK GÜRÜLTÜ AZALTMA	27
ŞEKİL 2.2 BLOK KARŞILAŞTIRMA YÖNTEMİ	29
ŞEKİL 2.3 ARALARINDA ÖTELEME BULUNAN BİRBİRİNİN AYNI İKİ İMGE	32
ŞEKİL 2.4 EVRE İLİNTİSİNİN (SOLDAKİ) VE ÇAPRAZ İLİNTİNİN (SAĞDAKİ) TERS FOURIER DÖNÜŞÜMÜ	33
ŞEKİL 3.1 YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜK AŞAMALARI	37
ŞEKİL 3.2 ÖRNEKLEME VE ÖRTÜŞME ETKİSİ	41
ŞEKİL 3.3 GERİ ÇATMA ÇEKİRDEK ÖRNEKLERİ	42
ŞEKİL 3.4 GÖRÜNTÜ BÜYÜTMEDE ARA DEĞERLEME KULLANILMASI	42
ŞEKİL 3.5 DÇ SİNYALLER İLE YÇ SİNYALLER ARASINDAKİ ÖRTÜŞME İLİŞKİSİ	43
ŞEKİL 3.6 ÖZYİNELEMELİ GERİ YAYILIM ALGORİTMASI	46
ŞEKİL 3.7 DIŞBÜKEY KÜMELERE İZDİŞİM ALGORİTMASI	51
ŞEKİL 4.1 NOKTA ÖRNEKLEME	57
ŞEKİL 4.2 ALAN ÖRNEKLEME	57
ŞEKİL 4.3 YBA GÖRÜNTÜ ALGILAYICISI	58
ŞEKİL 4.4 DÇ PİKSELLERİN YÇ AYRIK IŞIK DEMETLERİNDEN ELDE EDİLMESİ	59
ŞEKİL 4.5 1-BOYUTLU GAUSSİAN EĞRİSİNİN LİNEER YAKLAŞIMI	60
ŞEKİL 4.6 DÇ İMGENİN YÇ IŞIK DEMETLERİNDEN ELDE EDİLMESİ	61
ŞEKİL 4.7 ÇOKLU ÇÖZÜNÜRLÜK YAKLAŞIMI VE HÜCRE ALANLARI İLE İMGE ÇAKIŞTIRMA	69
ŞEKİL 4.8 A) LENA İMGESİ, B) KAYDIRILMIŞ LENA (5.65, 8.43) SNR=40DB	71
ŞEKİL 4.9 A) PENTAGON İMGESİ, B) KAYDIRILMIŞ PENTAGON (5.65, 8.43) SNR=50DB	71

ŞEKİL 4.10 A) REFERANS PENTAGON GÖRÜNTÜSÜ B) (0.5,0.5) ÖTELENMİŞ VE 0.5 GAMMA İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ C) B YE GÜRÜLTÜ EKLENMİŞ GÖRÜNTÜ D) GAMMA 1.75 İLE DÜZELTİLMİŞ GÖRÜNTÜ	74
ŞEKİL 4.11 VANDEWALLE VE ÇALIŞMA GRUBUNUN ÇEKTİKLERİ GERÇEK GÖRÜNTÜLER	82
ŞEKİL 4.12 ÖNERİLEN YÖNTEMLE TAHMİN EDİLEN PARAMETRELERİ KULLANARAK KÜBİK ARA DEĞERLEME İLE ELDE EDİLEN YÇ SONUÇ GÖRÜNTÜSÜ	82
ŞEKİL 4.13 VANDEWALLE VE ÇALIŞMA GRUBUNUN ÖNERDİKLERİ YÖNTEMLE HESAPLANAN PARAMETRELERİ KULLANARAK KÜBİK ARA DEĞERLEME İLE ELDE EDİLEN YÇ SONUÇ GÖRÜNTÜSÜ	83
ŞEKİL 4.14 KÜBİK ARA DEĞERLEME İLE ELDE EDİLEN YÇ SONUÇ GÖRÜNTÜSÜNÜN DETAYLI GÖRÜNÜMLERİ (A) ÖNERİLEN YÖNTEM (B) VANDEWALLE VE ÇALIŞMA GRUBUNUN ÖNERDİKLERİ YÖNTEM.....	83
ŞEKİL 4.15 GERÇEK WEB CAM UYGULAMASINDA KULLANILAN GÖRÜNTÜLER.....	84
ŞEKİL 4.16 ÖNERİLEN YÖNTEMLE HESAPLANAN PARAMETRELERİ KULLANARAK KÜBİK ARA DEĞERLEME İLE ELDE EDİLEN SONUÇ GÖRÜNTÜSÜ	85
ŞEKİL 4.17 VANDEWALLE VE ÇALIŞMA GRUBUNUN ÖNERDİKLERİ YÖNTEMLE HESAPLANAN PARAMETRELERİ KULLANARAK KÜBİK ARA DEĞERLEME İLE ELDE EDİLEN SONUÇ GÖRÜNTÜSÜ	85
ŞEKİL 4.18 KÜBİK ARA DEĞERLEME İLE ELDE EDİLEN YÇ SONUÇ GÖRÜNTÜSÜNÜN DETAYLI GÖRÜNÜMLERİ(A, C) ÖNERİLEN YÖNTEM (B, D) VANDEWALLE VE ÇALIŞMA GRUBUNUN ÖNERDİKLERİ YÖNTEM.....	86
ŞEKİL 4.19 AYKIRI DEĞER AYIKLAMA İLE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜK ELDE ETME ALGORİTMASI.....	95
ŞEKİL 4.20 TUZ VE BİBER GÜRÜLTÜSÜ EKLENMİŞ DÇ GÖRÜNTÜLERDEN YÇ GÖRÜNTÜ SONUÇLARI	96
ŞEKİL 4.21 ÇERÇEVELERDEN BİRİNDE DEVİNİM TAHMİN HATASI OLAN DÇ GÖRÜNTÜLERDEN YÇ GÖRÜNTÜ SONUÇLARI	96
ŞEKİL 4.22 ÖTELENMİŞ VE DÖNDÜRÜLMÜŞ LENA GÖRÜNTÜLERİ.(X _s , Y _s , A) OLMAK ÜZERE	100
ŞEKİL 4.23 ÖNERİLEN YÖNTEM SONUNDA ELDE EDİLMİŞ YÇ LENA GÖRÜNTÜSÜ	100

TABLOLAR DİZİNİ

TABLO 4.1 LENA GÖRÜNTÜSÜNÜN SONUÇLARI LENA, $x_s = 8.43, y_s = 5.65$	72
TABLO 4.2 PENTAGON GÖRÜNTÜSÜNÜN SONUÇLARI PENTAGON, $x_s = 8.43, y_s = 5.65$	72
TABLO 4.3 LENA GÖRÜNTÜSÜNÜN DEĞİŞİK GAMMA DEĞERLERİ SONUÇLARI LENA, ($x_s = 0.5, y_s = 0.5$).....	74
TABLO 4.4 LENA GÖRÜNTÜSÜNÜN $\gamma = 0.5$ OLDUĞUNDAKİ SONUÇLARI ($x_s = 0.5, y_s = 0.5$)75	
TABLO 4.5 PENTAGON GÖRÜNTÜSÜNÜN $\gamma = 0.5$ OLDUĞUNDAKİ SONUÇLARI ($x_s = 0.5,$ $y_s = 0.5$).....	75
TABLO 4.6 PENTAGON GÖRÜNTÜSÜNÜN $\gamma = 1.75$ OLDUĞUNDAKİ SONUÇLARI ($x_s = 0.25,$ $y_s = 0.5$).....	75
TABLO 4.7 LEAVES GÖRÜNTÜSÜNE AİT SONUÇLAR	77
TABLO 4.8 CASTLE GÖRÜNTÜSÜNE AİT TEST SONUÇLARI.....	79
TABLO 4.9 ORTALAMA KARE HATALARI.....	81
TABLO 4.10 GERÇEK GÖRÜNTÜ UYGULAMASI(RES_CHART).....	81
TABLO 4.11 GERÇEK GÖRÜNTÜ UYGULAMASI (WEB CAM).....	84
TABLO 4.12 MODİFİYE EDİLMİŞ ALT GRADYEN YÖNTEMİNİN TEST SONUÇLARI	90
TABLO 4.13 LENA GÖRÜNTÜSÜ SONUÇLARI.....	96
TABLO 4.14 PENTAGON GÖRÜNTÜSÜ SONUÇLARI.....	96
TABLO 4.15 SNR DEĞERLERİ.....	99

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Alt piksel	Subpixel
Ara değerlendirme	Interpolation
BMOY (CMOS)	Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
BHDT	Blok Histogramları Değişinti Toplamı
Çakıştırma	Registration
Çözünürlük	Resolution
DBKİ (POCS)	Dış bükey kümelerle İzdüşüm (Projections of Convex sets)
DÇ	Düşük Çözünürlük
Evre ilintisi	Phase correlation
FD	Fourier Dönüşümü
FKT	Fark Karelerin Toplamı
Geri Yayılım	Back Propagation
Gözü Kapalı Ters Evreşim	Blind Deconvolution
KFD	Kesikli Fourier Dönüşümü
Modifiye Edilmiş Alt Gradyen	Modified Subgradient
NYF (PSF)	Nokta Yayılım Fonksiyonu (Point Spread Function)
Nicemleme	Quantization
ÖEK (RLS)	Özyinelemeli En Küçük Kareler (Recursive Least Square)
Örnekleme	Sampling
SFD	Sürekli Fourier Dönüşümü
SOEB (MAP)	Sonsal Olasılığı En Büyükleme (Maximum a Posteriori Probability)
YBA (CCD)	Yükten Bağımlı Aygıt (Charge Coupled Devices)
Yeniden oluşturma	Reconstruction
YÇ	Yüksek Çözünürlük

1. GİRİŞ

Çevrede olup biten olayları kaydetmek ve kalıcı kılmak, teknolojik gelişim sürecinde insanlığın önemli uğraş alanlarından biri olmuştur. İlk geliştirilen fotoğraf ve video makineleriyle siyah beyaz görüntü kaydı yapılabilirken, ilerleyen yıllarda renkli görüntü elde edilmiştir. Dijital teknolojinin gelişimiyle birlikte ses ve video görüntüleri bilgisayar ortamında kolaylıkla işlenebilecek biçimde kaydedilmeye başlanmıştır.

Görüntünün bilgisayar ortamına aktarılabilmesiyle birlikte görüntü işleme cihazlarının hız ve kapasitelerinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Zaman ilerledikçe daha yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmeye olanak veren sayısal resim işlemcileri geliştirilmeye başlanmıştır. Yüksek çözünürlük bir görüntü içerisinde bilgi miktarının, dolaylı olarak da piksel sayısının fazla olmasıdır. Yüksek çözünürlüklü bir görüntünün daha fazla detay içermesi çeşitli uygulamalarda kritik bir fayda sağlayabilir. Örneğin, yüksek çözünürlüklü medikal görüntü bir doktora doğru teşhis koymasına daha fazla yardımcı olabilir. Yüksek çözünürlük kullanarak birbirine benzer nesnelere birbirlerinden ayırt edilebilirler. Eğer yüksek çözünürlüklü görüntü kullanılırsa, bilgisayarlar ile görüntü tanımanın performansı artırılabilir. 1970 li yıllardan beri Yükten Bağlı Ayrıştırıcı (YBA) ve Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken (BMOY) görüntü duyucuları sayısal görüntülerin yakalanmasında geniş çaplı olarak kullanılmışlardır [1]. Bu duyucuların kullanılması birçok görüntü uygulamasında uygun olmasına rağmen, şu anki çözünürlük seviyesi ve üretim maliyetleri gelecekteki talepleri karşılayamayacağı görülmektedir. İşaret işleme teknikleri düşük çözünürlüklü (DÇ) görüntülerden yüksek çözünürlüklü (YÇ) görüntü elde etmek için yeni umut verici bir yaklaşımdır. Bu konuya literatürde yüksek çözünürlük, yüksek çözünürlüklü görüntü üretme veya basit olarak çözünürlük yaklaşımı denilmektedir.

Bu doktora tezinin amacı modern görüntü algılayıcılarından elde edilmiş ve birbirlerine göre çok küçük kaymaları bulunan birçok görüntü verisini ve her bir görüntünün diğer görüntülerin tespit edemediği ayrıntıların bir kısmını tespit ettiği

bilgisini kullanarak daha yüksek çözünürlüklü görüntülerin elde edilmesi amacı ile algoritmalar geliştirmektedir. Tezin en önemli katkıları şöyledir:

1. Kamera düzlemine paralel olan dönme ve öteleme miktarları alt piksel seviyesinde tahmin edilebilen bir yöntem önerilmiştir.
2. Yüksek çözünürlük problemi bir en uygun şekle sokma yöntemi olarak modellenerek çözümü yapılmıştır
3. Gözlem görüntülerindeki olan veya yüksek çözünürlük problemi için oluşturulan modelde olabilecek hatalardan kaynaklanan aykırı değerleri gideren özyinelemeli gürbüz geri yayılım algoritması gerçekleştirilmiştir.
4. Döngülü yüksek çözünürlük algoritmasında bulanıklaşmayı tespit eden ve gidermeye çalışan bir yöntem önerilmiştir.

Tezin genel yapısı şu şekildedir;

Bölüm 1’de yüksek çözünürlük problemine genel bir bakış yapılmıştır. Burada görüntüyü bozma etmenleri verildikten sonra genel kabul görmüş model ve varsayımlara değinilmiştir. Daha sonra ise literatürde kabul görmüş ve tez süresince kullanılan modelin matematiksel modeli çıkartılmıştır.

Görüntülerin çakıştırılması görüntü uygulamalarında çoğu zaman gerekli olan bir durumdur. Yüksek çözünürlük elde etmek için de ilk önce görüntülerin çakıştırılması gerekmektedir. Görüntü çakıştırma ne kadar iyi yapılırsa elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntünün kalitesi o ölçüde artmaktadır. Bölüm 2 görüntü çakıştırma konusuna ayrılmıştır.

Bu tezin konusu olan yüksek çözünürlüklü görüntü elde etme Bölüm 3 de yüksek çözünürlük probleminin ilk kez ortaya çıktığı zamandan itibaren yapılmış olan çalışmalar önerdikleri yöntemler ve yaptıkları katkılarla beraber ayrıntılı olarak ele alınmışlardır. En son bölüm ise tez kapsamında yapılan çalışmalara ayrılmıştır.

1.1 Sayısal Görüntü İşlemenin Tarihçesi

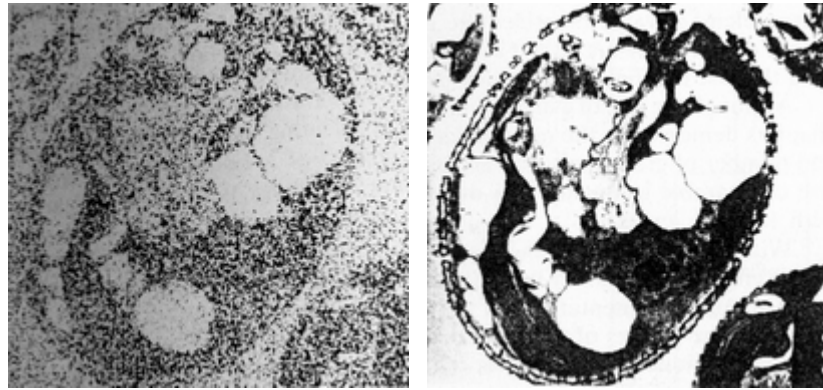
Görüntü işleme tekniklerinin günlük hayatımıza girişi hemen her alanda gerçekleşmektedir. Görüntü işleme konusundaki araştırmalar iki başlıkta toplanabilir[1]:

- Görüntüyü kişinin işleyeceği şekilde iyileştirme
- Otonom bir sistemin işleyip sonuç üretebileceği bir forma dönüştürme

Birinci kategorideki ilk uygulama, Londra ve New York arasında deniz altından geçen kablolarla gazetede basılmak üzere resimlerin gönderilmesi için sayısallaştırılması olmuştur. 1920 li yıllarda Bartlene hattının oluşturulmasıyla Atlantik'ten bir resmin transfer edilmesi önceleri bir hafta sürerken 3 saatten daha az gibi bir zaman indirilmiştir. Bu ilk sayısal görüntülerin kalitesini artırmada karşılaşılan ilk problemler görüntüleme rutinleri ve parlaklık seviyeleri ile ilgili sorunlardı[1].

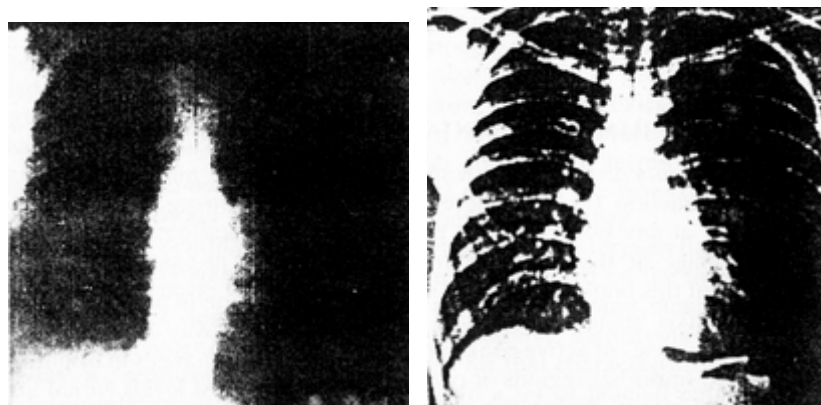
İlk Bartlene sisteminde 5 ayrı parlaklık seviyesi kodlanabiliyordu. 1929 yılında bu kodlanabilen seviye sayısı 15'e yükseltildi. 1964 yılında Jet Propulsion laboratuvarlarında, uzay roketi Ranger 7 den gelen ay'ın görüntülerindeki üzerindeki kameradan kaynaklanan çeşitli bozulmaların bilgisayar teknikleri kullanılarak düzeltilmiştir. Bu teknikler; Surveyor uzay aracından, Mars'a yapılan Mariner deneme uçuşlarından, aya gönderilen Apolla'dan ve diğer uzay araçlarından alınan görüntülerin işlenmesinde kullanılan tekniklerin temelini oluşturmaktadır. Uzay araştırmalarının yanı sıra daha birçok uygulamada görüntü işleme teknikleri kullanılmaktadır. Hatta ilgisiz olduğu düşünülen birçok alanda bile insanların görüntü üzerinde yorum yapabilmesi için görüntülerin bir dizi işlemlere tabi tutulması gerekmektedir. Örneğin tıbbi alanda x-ray gibi görüntülerin daha kolay yorumlanabilmesi için bilgisayar sistemlerinde bu görüntülerin bilgisayar rutinleri yardımıyla kontrastların iyileştirilmesi ve parlaklık seviyelerinin ayarlanması sağlanmaktadır[1].

Coğrafya alanında da havadan veya uzaydan çekilen resimlerle çevre analizi yapmak için bu teknikler kullanılabilir. Arkeolojide de el yapımı özelliklerini kaybetmiş tarihi eserlerin zarar görmemiş hallerinin görüntüsünü elde etmek mümkündür. Fizikte ve benzer alanlarda yüksek enerji plazmaları ve elektron mikroskobu gibi uygulamalarda görüntü işleme teknikleri kullanılabilir. Benzer teknikler astronomi, biyoloji, nükleer tıp, savunma ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir. Şekil 1.1 (a)'da elektronik gürültüye maruz kalmış bir hücre görünmektedir. Şekil 1.1 (b)'de ise bu gürültünün çeşitli teknikler kullanılarak kaldırılmış halini görmekteyiz.



(a) Gürültülü görüntü (b) Gürültü temizlenmiş görüntü
Şekil 1.1 Gürültü temizleme ([2])

Şekil 1.2'de bir x-ray'e ait bir resim ve (b) de bu resmin kontrast ve köşe işlemleri yapıldıktan sonraki hali görülmektedir.

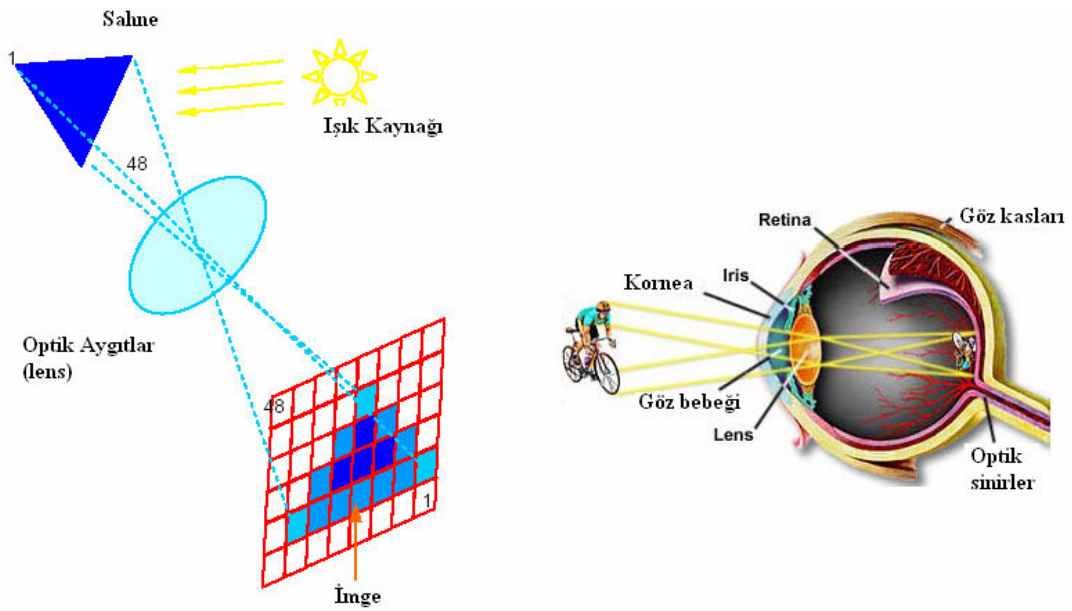


(a) Orijinal görüntü (b) Netleştirilmiş görüntü
Şekil 1.2 Kontrast ve köşe işlemleri ([2])

Bu uygulamalar, birinci kategoride anlatılan görüntü işlemenin uygulama alanına girmektedir. İkinci kategoride yapılan tipik uygulamalar karakter tanıma, endüstriyel makinelerle ürün sınıflandırılması ve kontrolü, askeri uygulamalar, parmak izi tanıma, x-ray'lerin ve kan örneklerinin incelenip bilgisayar tarafından yorumlanması, havadan ve uydudan çekilmiş resimlerle hava durumu tahmini ve ürün ve mahsuller hakkında yorum yapmak gibi uygulamalardır.

1.2 Görüntü Algılama Sistemleri

Fotoğraf makinesinde, görüntüsü alınan cismin uzaklığına bağlı olarak yapılması gereken odaklama ayarı, merceğin ileri geri oynatılmasıyla yapılırken, göz bu işlemi merceğin kırma derecesini değiştirerek sağlamaktadır. Işık yoğunluğu karşısındaki düzenlemeler fotoğraf makinesinde diyaframın açıklığının değiştirilmesiyle sağlanırken, göz bunu, iris adı verilen renkli kısım ile sağlamaktadır (Şekil 1.3).

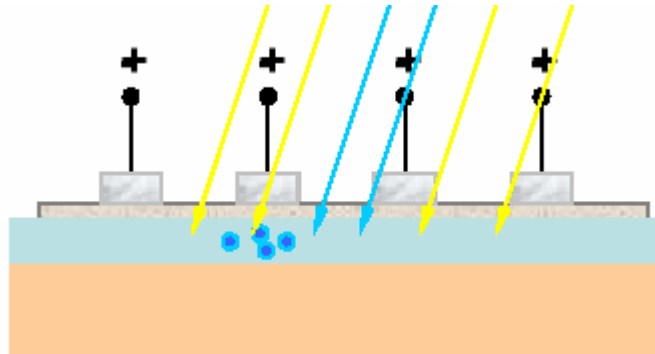


Şekil 1.3 Görüntünün oluşumu

Yarıiletken üretim teknolojisi ve bilgisayar bilimlerindeki gelişmelerin sonunda sayısal fotoğraf makineleri ortaya çıkmıştır. Fotoğraf makineleri, temelde odaklayıcı mercek, iris-deklanşör ikilisi ve renge duyarlı fotoğraf filminden oluşur. Sayısal fotoğraf makinelerindeyse, yine odaklayıcı mercek, iris-deklanşör ikilisi bulunur ama film yerine yarıiletken görüntü algılayıcı bir eleman vardır. Görüntü algılayıcı, mikroişlemci tarafından kontrol edilir ve çekilen görüntüler, fotoğraf filmi yerine sayısal olarak yarıiletken bellekte saklanır.

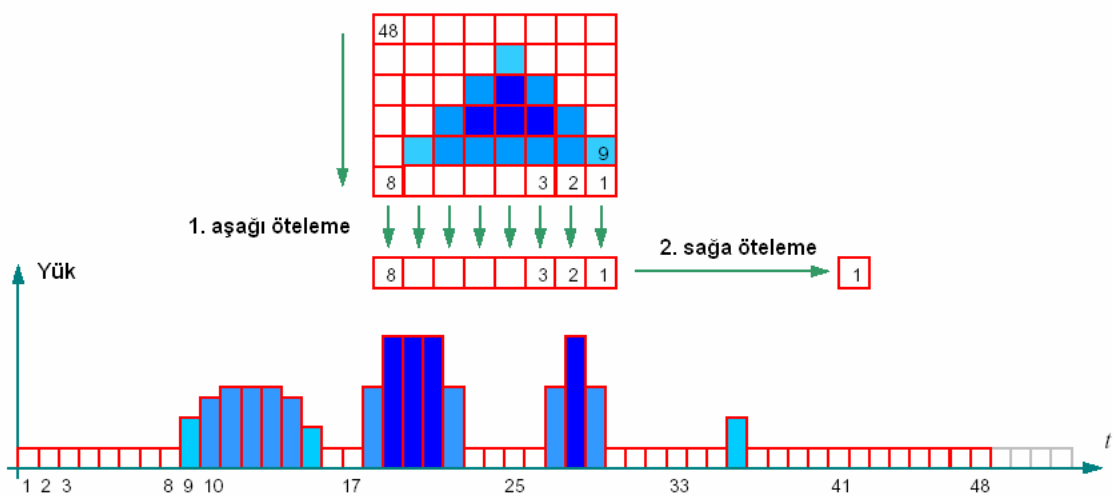
Sayısal fotoğraf makineleri, geleneksel fotoğrafçılığın temeli sayılan gümüş tuzları içeren film şeridi yerine yarı iletken YBA ya da BMOY algılayıcılar kullanılır. YBA'lar son derece nitelikli görüntü sağladıklarından sıkça kullanılır. Ne var ki, bunların çok fazla güç tüketmeleri ve aynı yonga üzerinde işlevi farklı devre elemanların yapımına uygun olmamaları, kullanımlarını sınırlamaktadırlar. BMOY algılayıcılar, az güç tüketmeleri ve aynı yonga içinde birçok işlevsel eleman içerebilmelerine karşın, YBA'lar kadar nitelikli görüntü oluşturamazlar [3]. Bunların yanında gelişen teknolojiyle birlikte BMOY tipi algılayıcıların kullanıldığı bazı uygulamalarda YBA kalitesine yakın görüntüler elde edilmiştir [4].

YBA'lar, ışığa duyarlı silikon hücrelerden oluşan matrislerdir. Bir foton, yarıiletken kristal yapısındaki hücrelerden birine çarptığında, bir miktar elektronu serbest bırakır (Şekil 1.4). O hücreye ne kadar foton gelirse, serbest kalan elektron sayısı o kadar fazla olur. Elektron miktarı, yani yük ölçülerek, o noktacığın aydınlanma düzeyini veren göreceli sayısal bir değer elde edilebilir[5].



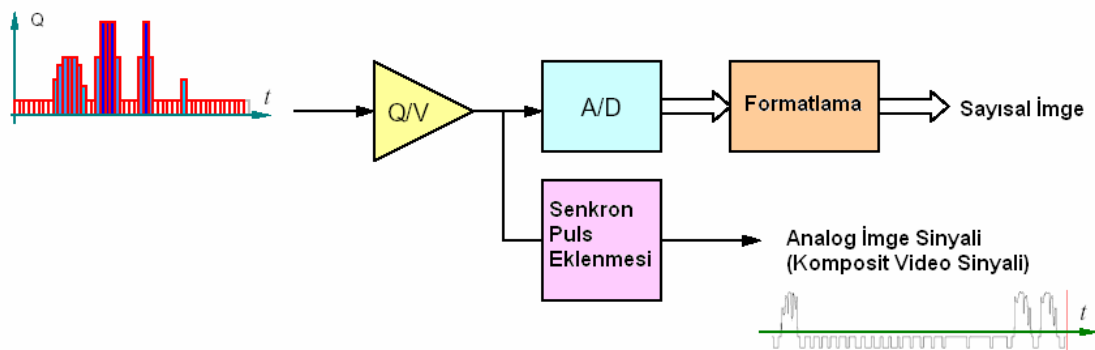
Şekil 1.4 Yükten bağımlı aygıt

YBA'larda, Şekil 1.5'de de görüldüğü gibi hücre değerleri satır satır okunur. Bu okuma işlemi sırasında ışık düşmeyi sürdürürse, görüntü bulanıklaşacaktır. Bunu önlemek için bazı sayısal fotoğraf makineleri, geleneksel makinelerde olduğu gibi, hızla açılıp kapanan perde düzenekleri içerir[6].



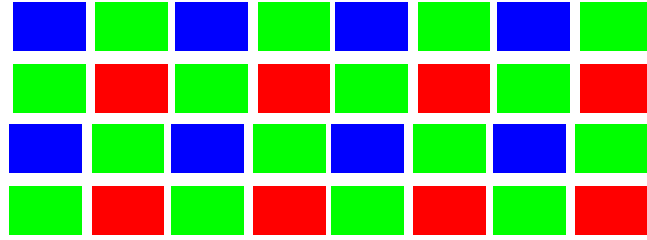
Şekil 1.5 YBA görüntü algılayıcısında yük oluşumu

Uygulamada, bir YBA yongası, sözünü ettiğimiz toplayıcı katmanın yanı sıra, elektrik yükünü saklayan ve aktaran ek öğeler içerir (Şekil 1.6). Fotoğraf kalitesinde bir görüntü yakalayabilmek için, tüm sistemin hızlı ve eş güdümlü çalışması gerekir. Elektron yük değerleri korunmalı ve hızla saptanmalıdır[7].



Şekil 1.6 YBA görüntü algılayıcısında imge oluşumu

YBA matrisindeki hücreler aslında renk körüdür. Komşu noktacıkların her biri, üç ana renk olan kırmızı, yeşil ve maviden sadece birini geçirecek renk filtreleriyle örtülmüştür. Renkler, yaygın olarak, Kodak firmasınınca bulunmuş “Bayer” motifine uygun olarak dizilirler(Şekil 1.7). Donanım ya da yazılım düzeyindeki bir algoritma, her noktacığın kendine ait rengin şiddetine, komşu noktacıklara ait renklerin şiddetlerinin ortalamasını ekleyerek, standart RGB (kırmızı-yeşil-mavi) kodlamasına uygun noktacığın değerini elde eder. Zayıf aydınlatma koşullarında, renkli YBA kullanılması verimli değildir[7].



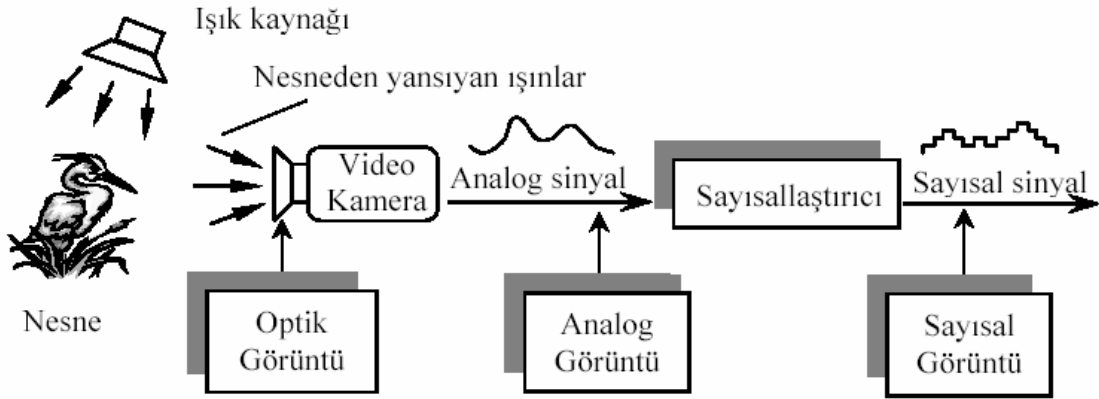
Şekil 1.7 Bayer motifi ([5])

YBA teknolojisindeki yaklaşımın yanı sıra uygulamada daha yeni bir görüntüleme yongası tipi olan BMOY’lerin öncü çalışmaları 1990’larda NASA yapmış ve ilk ticari ürünler 1998’den itibaren pazar bulmaya başlamıştır. YBA’lardan farklı olarak, BMOY teknolojisinde, algılayıcılar, depolayıcılar, güçlendiriciler, hatta karmaşık görüntü algoritmaları gerçekleştiren bileşenler bile aynı yonga içinde bir arada üretilebilmektedir. Üstelik BMOY hücre değeri, YBA’larda olduğu gibi baştan sona, satır satır okunmak zorunda değildir. Rasgele erişim özelliğiyle, herhangi x,y koordinatındaki değer doğrudan okunabilmektedir[7].

1.3 Görüntünün Sayısallaştırılması

Görüntünün sayısallaştırılması, kameradaki görüntünün optik-elektrik mekanizma ile elektrik sinyallere dönüştürülmesi işlemidir. Görüntünün sayısallaştırılmasındaki bazı temel aşamalar şu şekildedir: Birinci aşama, görüntü edinme işlemidir. Şekil

1.8’de görüntü yakalama aşamaları gösterilmiştir[8]. Burada bir ışık kaynağı ile aydınlatılmış nesne mevcuttur. Nesneden yansıyan ışınlar optik formda kameraya aktarılır. Nesneyi tanımlayan bu ışınlar, kamerada elektrik sinyallerine dönüştürülür. Böylece görüntü analog forma çevrilmiş olur. Analog sinyaller bir sayısal dönüştürücüde sayısal sinyallere dönüştürülür. Son aşamada sayısal forma dönüştürülen görüntü artık bilgisayar ortamına aktarılarak işlenecek hale getirilmiş olur[9].

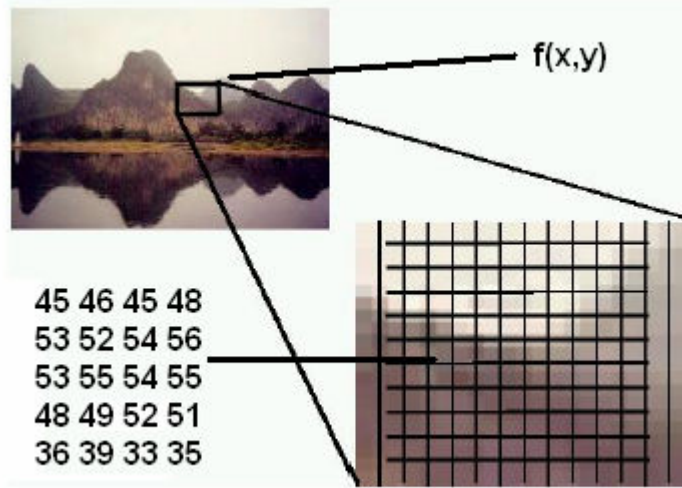


Şekil 1.8 Görüntü edinme işlemi

Görüntü, iki boyutlu ışık şiddet fonksiyonudur. Bu fonksiyon $f(x, y)$ şeklinde gösterilir. Burada x ve y kartezyen koordinatları, (x, y) noktasındaki f 'in sayısal değeri ise parlaklık değeri veya görüntünün ilgili noktadaki gri seviye değeridir. Bir sayısal görüntü, satır ve sütun indisleri görüntü içerisindeki herhangi bir noktayı tanımlayan elemanlardan meydana gelmiş bir matris olarak göz önüne alınabilir. Bu matrisin her bir elemanının sayısal değeri, kendisine karşılık gelen noktadaki gri seviye değerine eşittir. Bu sayısal dizinin veya matrisin her bir elemanına görüntü elemanı, resim elemanı veya piksel denir[10].

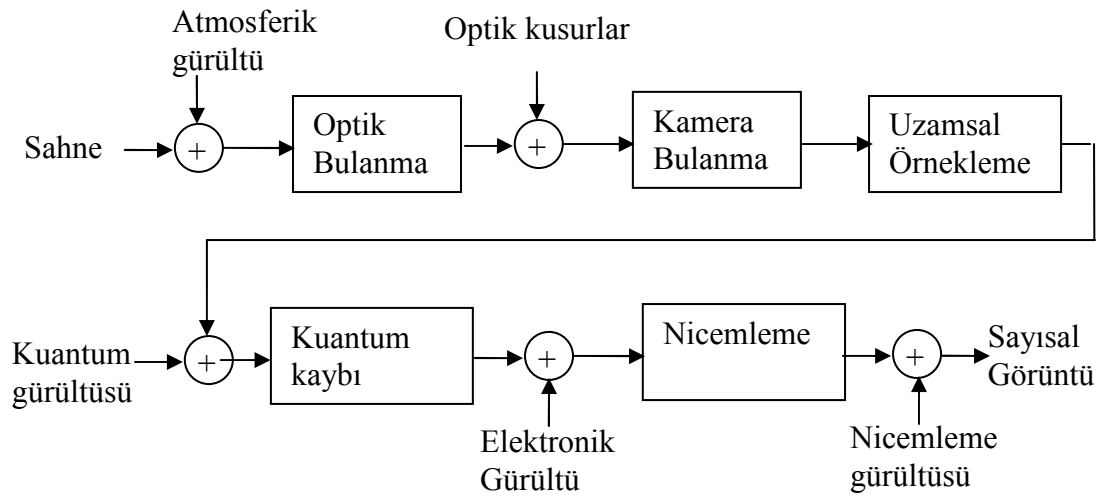
Bir görüntü fonksiyonunu, $f(x, y)$, bilgisayarda işlemeye uygun hale getirebilmek için, fonksiyonu Şekil 1.9’da görüldüğü üzere hem uzaysal koordinatlar olarak, hem de

genlik olarak sayısallaştırmak gerekir. Kartezyen koordinatların sayısallaştırılmasına örnekleme ve genliğin sayısallaştırılmasına da nicemleme denir



Şekil 1.9 Sayısal görüntü temsili

Elbette ki sayısal görüntünün elde edilme aşamasında Şekil 1.10'da da görüldüğü üzere cismin gerçek görüntüsü ile sayısal görüntü arasında birçok ilave (ve kontrol dışı) işlem bulunmaktadır. Bunlar, modellenmenin kriterlerine bağlı olarak; fotonların ortamda kırılması, ışık mercek sisteminden geçerken bu sistemin ideal olmamasından dolayı eklenen bozulma ve gürültü, algılayıcı sensörlerin safsızlıklarının değişkenliği



Şekil 1.10 Temel görüntüleme modeli

dolayısıyla hücreler arasında bir homojenliğin tam olarak yaratılamaması, foton-voltaj fonksiyonunun doğrusal olmaması ve bu nedenle tam olarak çevrime yansıtılamaması olarak özetlenebilir. Ayrıca, birden çok görüntü gerektiğinden aynı algılayıcı ile ardışıl olarak alınan sayısal görüntüler arasında zaman-mekan korelasyonu tam olarak sağlanamamaktadır. Yani, bu görüntüler aynı t_0 zamanında alınmadığından dolayı ardışıl resimler arasında cisimler hareket etmiş olabilir.

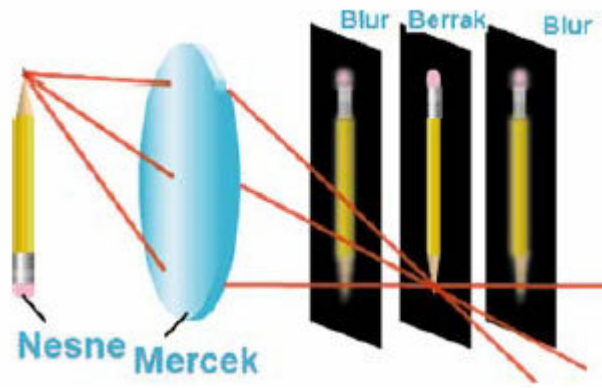
Sayısal görüntü elde edilirken bozma etkeni genel olarak 2 türlü karşımıza çıkar. Bunların en temeli gözlem gürültüsüdür. Gözlem gürültüsü rast geledir ve film-tanesi gürültüsü, nicemleme gürültüsü veya daha başka rast gele bozan etken olabilir. Belirtilen her bir gürültünün nasıl bir bozulmaya sebep olduğu gerekirci olarak bilinmemektedir. Diğer bir bozulma kaynağı ise bulanmadır. Bulanma düzgün odaklanmamış lensten, kamera ile sahne arasındaki göreceli devinimden veya atmosferden kaynaklanabilir. Bulanma etkisini kaldırmak için yapılan ters alma işleminin birçok problemi vardır. Birincisi, ters alma işlemi gürültüyü yükseltmektedir. İkincisi bu işlem tersi alınamayabilmektedir veya birden çok çözüm olabilmektedir. Üçüncüsü, bulanmış görüntü tipik olarak bir bulanık sahnenin bir pencere versiyonudur, bundan dolayı bulandırmanın tersini alma işlemi pencerenin sınır bilgilerinin kaybolmasına neden olabilmektedir. Son olarak, bulanıklığın kendisi bilinmemektedir veya tamamen belirlenmemektedir.

Gerek film kameralarında gerekse dijital kameralarda görüntünün oluşturulması ilkesi aynıdır. Bu işlem için birkaç sıralı mercekten oluşan lens ünitesi kullanılır. Dışbükey mercek içinden geçen ışın yardımıyla gerçek resim biçimlendirilir. Işığın mercek içindeki hareketi iki unsurdan etkilenir:

- Işık huzmesinin lense giriş açısı
- Lensin yapısı

Nesneden merceğe yansıyan ışığın mercek içine giriş açısı, nesneyle mercek arasındaki mesafeye göre değişir. Mercek nesneye yaklaştığında mercek dışına çıkan

ışın huzmeleri daha uzak noktada buluşur. Bu durum, elde edilen kopyanın büyümesine neden olur. Mercek uzaklaştığında mercekten çıkan ışın huzmeleri daha yakın noktada buluşur. Böylece resmin kopyası küçülür. Mercekten çıkan ışın huzmeleri kesişmeleri gereken noktada buluşmayacak şekilde yüzeye çarpacak olursa elde edilen kopyada bulanıklık meydana gelir (Şekil 1.11). Örneğin, kameranın nesneye çok fazla yaklaştırılması durumunda görüntüde bulanıklık meydana geldiği görülür.



Şekil 1.11 Odaklanmama bulanıklığı

İkinci bulanma formu ise devinimden kaynaklanan bulanmadır (Şekil 1.12). Devinim bulanıklığı genel olarak öteleme, dönme ve oran değişimi gibi çeşitli bulandırmaları içine alır. En yaygın olanı basit bir formda olan tekdüze doğrusal devinim bulanıklığıdır. Sahnenin kameraya göre göreceli olarak sabit bir hızda ve sabit açıyla yatay ekseninde T periyodu süresince ötelendiği kabul edilir.



Şekil 1.12 Devinim bulanması

Bir diğer bulanma formu ise atmosferden kaynaklanan bulanma Őeklidir (Şekil 1.13). Atmosferik bulandırma hava durumu tahmini için uzay görüntüleri gibi görüntülerde ortaya çıkan ve atmosferin etkilerinden kaynaklanan bulandırma formudur. Her ne kadar hava akımı rasgele bir süreç olsa da bulanma etkisi Gaussian olarak modellenir.



Şekil 1.13 Atmosferden kaynaklanan bulanma

1.4 Uzamsal Çözünürlüğün Artırılması

Eskiye göre oldukça kaliteli algılayıcıların üretilebilmesine rağmen daha kaliteli ve çok sayıda görüntü elemanı (piksel) içeren görüntüler elde edebilmeye yönelik çalışmalar hala devam etmektedir. Yani, eldeki sayısal görüntülerin kalitesi ve çözünürlüğü ne olursa olsun, bunlar kullanılarak daha iyilerinin üretilmesi çalışmaları daima araştırma–geliştirmeye açıktır. Algılayıcı üretim teknikleriyle uzamsal çözünürlüğü artırmanın en kestirme çözümü piksel boyutunu küçültmek ve birim alan başına düşen piksel sayısını artırmaktır. Ancak piksel boyutu azaltılırsa üzerlerine düşen ışık miktarı da azalır bu da elde edilen görüntüde gürültünün baskın hale gelmesine sebep olur. Gürültünün ilave etkisine maruz kalmadan piksel boyutlarını

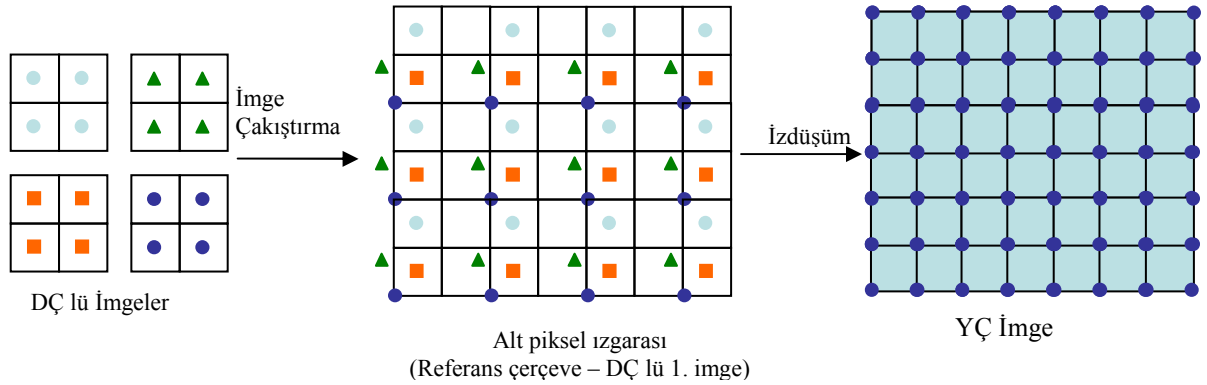
azaltabilmenin teknolojik sınırları vardır ki bu sınırlar YBA sensörleri için 0.35 mm^2 BMOY uygulamaları için 40 mm^2 olarak öngörülmüştür[11].

Uzamsal çözünürlüğü artırmanın diğer bir yolu ise yonga boyutlarını artırmaktır. Bu işlem de elektriksel sığanın artmasına yol açar. Büyük sığa yük transfer oranını hızlandırmayı güçleştirdiği için bu yöntem verimli olmamaktadır[12]. Yüksek hassaslıktaki merceklerin ve görüntü algılayıcıların pahalı olması birçok yüksek çözünürlüklü görüntü uygulamalarında sorun oluşturmaktadır. Bundan dolayı uzamsal çözünürlüğü artırmak için algılayıcıların ve algılayıcı üretim maliyetlerini düşürmek için yeni bir yaklaşıma ihtiyaç vardır.

Sinyal işleme teknikleri düşük çözünürlüklü görüntülerden yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmek için yeni umut verici bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımın en önemli avantajı daha düşük maliyet içermesi ve var olan düşük çözünürlüklü görüntülerin kullanılmasıdır. Çok bilinen görüntü işleme yöntemleri ile birçok görüntü bozulma işlevi önceden bilinen işlem parametreleri kullanılarak tersine döndürülebilir ya da en azından azaltılabilir. Örneğin bulanıklık önceden tahmin edilen bulanıklık parametreleri kullanılarak, [13] ve [14]'de yapıldığı gibi, oldukça azaltılabilir. Ancak bu, yüksek çözünürlük elde etme işlemi değil, sadece göze daha iyi, keskin ve net görünen bir görüntü elde etme işlemidir. Yüksek çözünürlük ne yüksek frekans bileşenleri artırılarak daha keskin görünen görüntüler elde etmektir ne de piksel sayısını arttırmaktır. Yüksek çözünürlük, [15] ve [16]'da değinildiği gibi gerçeğe, ışığın oluşturduğu gerçek ve sürekli görüntüye olan yakınlıktır. Daha önce sayısallaştırma ile kaybedilmiş bilgilerin görüntünün sadece bazı görüntü operasyonlarından geçirilmesi ile yeniden görüntüye eklenemeyeceği ve bunun bilgi kuramına aykırı olduğu açıktır. Kaybolan bu verilerin başka bir kaynak kullanılarak eklenmesi gereklidir. Bu kaynak ya da kaynaklar, aynı yerin biraz farklı görüntüleme parametreleri ile alınmış görüntüleri olabilir. Yüksek çözünürlük, aynı yerin farklı parametrelerle alınmış görüntülerinde birbirlerinden bağımsız veri olabileceğini ve bir görüntüde kaydedilmemiş bir detayın diğer bir görüntüde kaydedilmiş olabileceği varsayımı ile çalışır ve bu verileri bir tek yüksek çözünürlüklü görüntü üretmek için kullanır.

Elimizde bu şekilde küçük farklı parametrelerle kaydedilmiş görüntüler olduğunu varsayarsak (Şekil 1.14) yüksek çözünürlüklü bir resmin aşağıdaki basamaklar ile elde edildiği genellenebilir.

1. Referans bir koordinat sistemine göre, tüm resimlerin tüm piksellerinin koordinatlarını alt piksel seviyesinde bul (alt piksel çakıştırma) ve bu piksellerin oluşturduğu düzenli olmayan bir örnekleme ızgarasına sahip bir görüntü elde et (ya da edildiğini varsay).
2. Düzenli olmayan örnekleme ızgarası üzerindeki pikselleri kullanarak düzenli ve daha yoğun bir ızgaraya sahip görüntüyü tahmin et, ki bu da bizim yüksek çözünürlüklü görüntümüz olsun



Şekil 1.14 DÇ görüntülerden YÇ görüntü elde etme yöntemi ([11])

Bu basamaklar, başka bozulmaları da düzeltmeyi amaçlayan özyinelemeli bir algoritma içine konulabilir. Düzeltilecek bozulmalar ne olursa olsun, yüksek çözünürlüğün aslında alt piksel çakıştırma işleminde gerçekleştirildiği söylenebilir. Önemli miktardaki pratik ve teorik çalışmanın sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- 1 Görüntülerdeki örtüşme miktarı, birden çok görüntü kullanılarak elde edilebilecek en yüksek çözünürlüğü belirler. Eğer görüntüler Nyquist oranı ile örneklenmiş gibi bir alçak geçiren süzgeçten geçirilmiş ise (örneğin optik yol üzerindeki aşırı bulanıklıklar ile), yüksek çözünürlük elde etmek imkansızdır. Çünkü Nyquist'in örnekleme kuramına göre, zaten tek bir resim kullanılarak

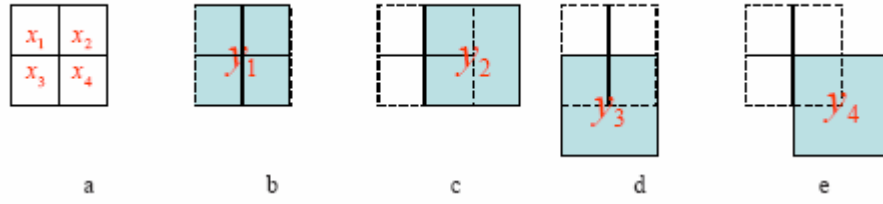
sürekli resim elde edilebilir. Yine de, gürültüyü azaltma işlemleri hala geçerliliğini korumaktadır, yani bu resimlerin ortalaması alınarak ilişkisiz gürültünün etkisi azaltılabilir.

- 2 Görüntüleme parametrelerinin (kayma, bulanıklık, dönme) görüntüler arasında farklı olması gereklidir ve bu farklılıkların hassas bir şekilde tahmini (alt piksel çakıştırma) esastır.
- 3 Gürültü ve görüntü alma işleminin aşırı basitleştirilmiş modellenmesi alt piksel çakıştırma ve dolayısı ile yüksek çözünürlük önünde duran en önemli engellerdir.

Yüksek çözünürlüğün arkasında yatan temel fikir gürültülü, bulanıklaşmış DÇ görüntü dizilerinden YÇ görüntü elde etmektir. Elde edilen YÇ görüntü daha fazla yüksek frekans bilgilerine sahip, herhangi bir DÇ giriş görüntülerine göre daha az gürültülü ve daha net görüntüdür. Çok basit bir şekilde devinim temelli yüksek çözünürlük algoritması Şekil 1.15’ de gösterilmiştir. Şekil 1.15 a’da görüldüğü gibi 4 tane YÇ pikseli vardır. Görüntüleme kamerasının alt piksel devinim yapacak şekilde kontrol edilebildiği kabul edilirse, 4 adet DÇ sahip görüntü elde edilebilir. Bunlar şekilde b-e arasında gösterilmiştir. Nokta Yayılım Fonksiyonu (NYF) doğrusal olarak bilindiği ve sınır piksellerin gri seviyesi 0 kabul edilirse bulanıklaşmış DÇ görüntüler ile YÇ görüntü arasındaki ilişkiyi veren aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

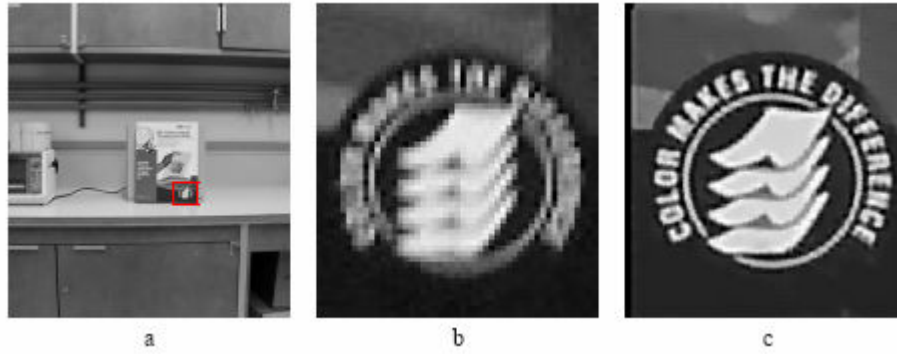
$$\begin{aligned}
 y_1 &= h_1x_1 + h_2x_2 + h_3x_3 + h_4x_4 + n_1 \\
 y_2 &= 0x_1 + h_2x_2 + 0x_3 + h_4x_4 + n_2 \\
 y_3 &= 0x_1 + 0x_2 + h_3x_3 + h_4x_4 + n_3 \\
 y_4 &= 0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + h_4x_4 + n_4
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Burada y_i ler yakalanan DÇ görüntüleri, x_i ler YÇ görüntü piksellerinin değerlerini, h_i ler bilinen NYF elemanlarını ve n_i lerde DÇ çerçevelerin oluşumu sırasındaki ek gürültüyü göstermektedir. Özel bir durum olarak, ek gürültü sıfır kabul edilirse yukarıdaki eşitlik sistemi çözülebilir. Maalesef gerçek hayattaki görüntüleme sistemleri bu kadar basit bir şekilde modellenemez.



Şekil 1.15 Devrim temelli yüksek çözünürlük probleminin aydınlatıcı örneği
a) 4 piksele sahip YÇ görüntüsü (b)–(e) 1 piksele sahip DÇ görüntü

[18] numaralı kaynaktan alınan Şekil 1.16 gerçek hayata ait bir deneyi göstermektedir. Bu deneyde, 26 adet görüntü OLYMPUS C-4000 kamerası ile yakalanmıştır. Bu görüntülerden birisi Şekil 1.16 a da gösterilmektedir. Dijital kameranın piksel sayısının sınırlı olmasından dolayı, görüntüler b’de görüldüğü üzere yaklaşıldığı zaman temiz değildir. Bu noktada yüksek çözünürlük algoritmaları ile kaybolan DÇ görüntüdeki veriler onarılabilmektedir.



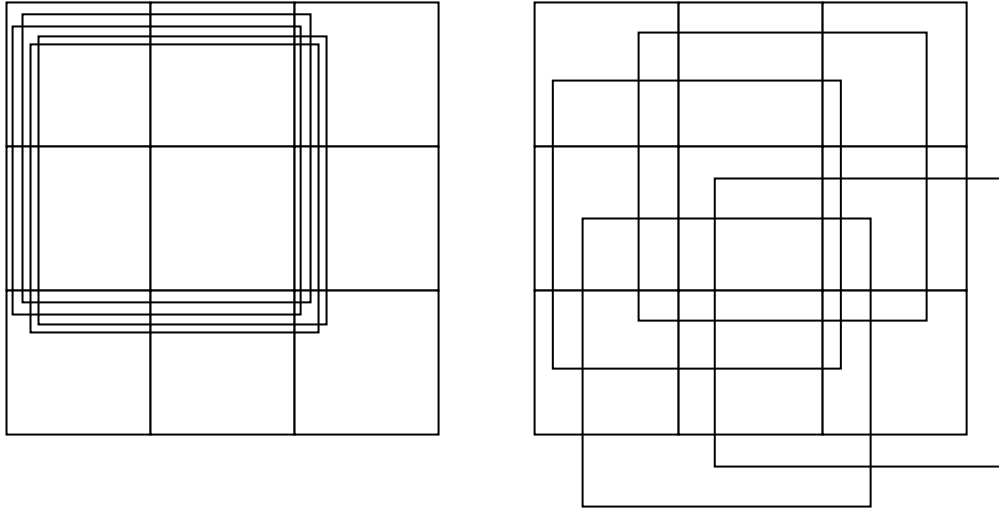
Şekil 1.16 Gerçek dünya verileri ile yüksek çözünürlük deneyi. a) a’daki kırmızı dikdörtgen bölge yaklaşılmış b) DÇ görüntülerden bir tanesi c) Elde edilen YÇ görüntü ([18])

Düşük çözünürlüklü görüntülerden yüksek çözünürlüklü görüntüleri nasıl elde ederiz? Eğer düşük çözünürlüklü görüntüler tam sayı birimlerince kaydırılırlarsa, her görüntünün çakışan bölgeleri aynı bilgiyi içerir. Böylece yüksek çözünürlüklü görüntüden yeniden görüntü üretmek için kullanılacak yeni bir bilgi oluşmaz. Eğer düşük çözünürlüklü görüntüler birbirlerinden farklı alt piksellerin kaydırılmasına sahip olursa ve örtüşme olursa hiçbir görüntü bir başka görüntüden elde edilemez. Bu

durumda her düşük çözünürlüklü görüntüde bulunan bilgi yüksek çözünürlüklü görüntü elde edebilmek için işletilebilir. DÇ görüntüler tek bir görüntü algılayıcı ile aynı resim alanın görüntüsünün farklı açılardan elde edilmesi veya birden çok algılayıcı ile aynı resim alanın görüntülenmesi ile elde edilebilir. Tek bir algılayıcı kullanıldığı zaman ardışık olarak elde edilen görüntüler arasında zaman ve mekan olarak farklılıklar olabilmektedir. Mesela, farklı zamanlarda görüntü çekerken görüntünün içinde bulunan objeler yer değiştirebilmektedir. Bazı durumlarda ise, örneğin uzaktan algılama hava araçları ile yapıldığında algılayıcıların kendisi hareket edecek ve görüntüler arasında resim alanı farklılıkları oluşacaktır.

Uygun öteleme ve dönmenin özellikle vurgulanması gerektiğini bir uç nokta ile örneklendirmek mümkündür. Elimizde 4 adet farklı doğrusal ötelemeye sahip görüntü olduğunu varsayalım. Analitik olarak hemen çözünürlüğün iki katına çıkarılabileceği düşünülebilir. Ancak, bu ötelemeler farklı olmasına rağmen 0,1 piksel gibi yakın olması durumunda YÇ piksellerin çoğu hep aynı DÇ piksellerin içinde kalacaktır. Örnekleminin nokta değil de alan örnekleme olduğu göz önüne alındığında, analitik olarak yine de çözümün bulunacağı varsayımı yanlıştır. Çünkü gürültünün etkisi hiç hesaba katılmamıştır. Büyük kısmı aynı bölgeyi örnekleyen DÇ pikseller birbirlerine çok yakın değerler üreteceklerdir. Bu ise en küçük gürültünün dahi DÇ piksellerin birbirlerine göre değerlerinde (farklarında) sonucu etkileyen önemli değişikliklere sebep olacaktır. Yani örneklerin farklı DÇ piksellere düştüğü bölgelerde YÇ piksellerin güvenilirliği yüksek olacak ancak diğer bölgeler neredeyse sadece aradeğerleme ile üretilmiş olacaklardır. Ayrıca imge çakıştırma işleminde yapılan hatalar sonucunda dahi DÇ piksellerin birbirlerine göre konumlarının değişebileceği açıktır. Bu durum Şekil 1.17’de temsil edilmiştir. Dönme varsa bazı bölgelerde çok iyi bazı bölgelerde çok kötü dağılım gerçekleşebilir, ancak bu bölgeler genellikle oldukça küçük olacaklardır.

Yüksek çözünürlük algoritmalarında asıl amacın örneklenmiş düşük çözünürlüklü görüntülerden yüksek çözünürlüklü görüntü elde etme olmasına rağmen, gürültülü ve bulanık görüntülerin onarım tekniklerini de kapsar. Görüntü onarımı bulanıklaşmış



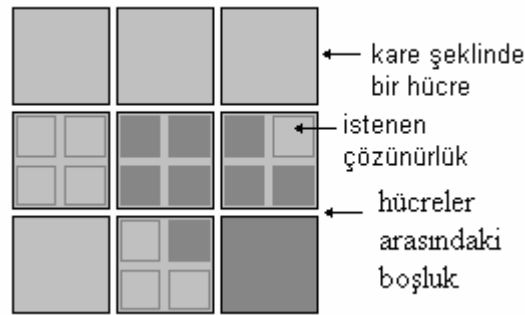
Şekil 1.17 a) Oldukça kötü ötelemelere sahip 4 DÇ piksel. b) iyi bir öteleme dağılımı.

veya gürültülü görüntülerin tekrar elde edilebilmesidir, ama bu görüntünün boyutunu değiştirmez. Görüntü onarımı ve yüksek çözünürlüklü görüntülerin yeniden yapılandırılması birbirine yakın teorilere sahiptirler. Hatta yüksek çözünürlüklü görüntülerin yeniden yapılandırılmasını görüntü onarımının ikinci kuşak problemi olarak tanımlayabiliriz.

1.5 Temel Görüntü Modeli

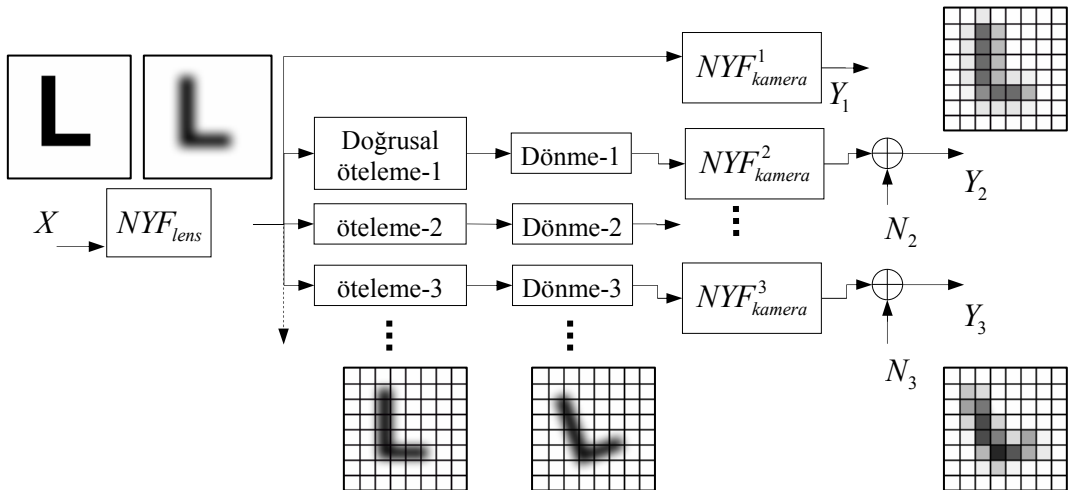
Benzer çalışmalar literatürde mevcut olup önerilen yöntemlerin hemen hepsi bir model belirleme ve model üzerinde formüllenen hatayı yinelemeli yöntemlerle azaltma tekniklerini ara değerlendirme ile birleştiren bir yaklaşım sunmaktadırlar ([18]-[19]). Çözünürlüğü artırma sadece sayısal görüntü içindeki görüntü elemanlarını (piksel) kopyalayarak sayısını artırma değildir. Şekil 1.18'de gösterilen YBA hücreleri yapıları dolayısı ile üzerlerine düşen foton miktarı ile bağıntılı olarak yük üretirler. Yani fotonun hücre üzerinde nereye düştüğü önemli değildir. Eğer hücreyi Şekil 1.18'deki gibi sanal alt hücrelere bölersek hücrede elde edilen yükün bu dört sanal hücrede üretilen yüklerin toplamı olacağı kabul edilebilir. Bu bağıntıya, her bir piksel yükünün

voltaja çevrildiğini göz önüne alırsak, piksel için voltaj karşılığı açısından bakıldığında gerçek hücrede elde edilen voltajın, dört sanal hücrede elde edilen voltajların ortalaması olacağı kolayca görülebilir. Aslında yapılması gereken çalışma bu 4 sanal piksel değerinin bulunması olarak özetlenebilir.



Şekil 1.18 Üretilen ve üretilmek istenen görüntülerin varsayılan CCD hücre matrisi.

Temel görüntüleme modeli Şekil 1.10'da verilmişti. YBA algılayıcılar kullanıldığında ve algılayıcıların doğrusal olmayan tepkileri ihmal edildiğinde, genel ve



Şekil 1.19 Dönme ve öteleme içeren genel bir görüntüleme modeli

daha kullanışlı bir görüntü algılama modeli Şekil 1.19'daki gibi özetlenebilir. Nokta Yayılım Fonksiyonu (NYF) siyah düzlem içindeki küçük bir beyaz noktanın optik

yayılmadan dolayı dağılması ve genellikle Gaussian bir parlaklık karakteristiğini göstermesini modeller. Yani NYF, sistemin birim darbeye tepkisi olarak tanımlanabilir. Birinci kısım (optik bulanma, NYF_{lens}) optik sistemde oluşan bulanıklaşma işlevi, ikinci kısım ise (kamera bulanması, NYF_{kamera}) algılayıcı hücrelerinin ışık fotonlarının toplanması ile oluşan bulanıklaşmayı temsil eder. Model içinde temsil edilen hiçbir transfer fonksiyonunun etkisi ters dönüşüm yöntemi ile giderilemez, çünkü bu fonksiyonlar ya tam olarak bilinmemektedir ya da tersi olmayan fonksiyonlardır. Bu modeldeki amaç algoritmaları bu etkilere karşı dirençli ya da duyarsız hale getirmektir. Çünkü çözünürlük artırıcı algoritmalar bu etkilerin tersine türevseldir, yani gürültüye karşı duyarlıdır.

Görüntüler arasındaki ötelenme, verilen modele göre, görüntüler arasındaki uzamsal farklar olarak tanımlanmaktadır. Ancak X kuramsal bir görüntü olduğundan genellikle görüntülerden birisi referans görüntü olarak seçilir ve diğerleri ile arasındaki uzamsal ötelenmeler hesaplanmaya çalışılır. [13], [15] ve ilgili referansları bulandırma işlevini iki kısma ayırır. YBA görüntü algılayıcı hücreleri üzerine düşen fotonların toplanarak önce elektriksel yük, daha sonra da elektriksel gerilime dönüştürülmesi işlevi (1.2)'de gösterildiği gibi hücre yüzey alanı üzerinde ışık şiddetinin bir entegrali olarak ifade edilir.

$$Y_L = \int_z X(z)W(z-m)dz \quad (1.2)$$

Burada W bulandırma çekirdeği ve m ise görüntüler arasındaki ötelemeden dolayı matematiksel olarak koordinat sistemi kaymasını temsil eden bir vektördür. Bu ötelemenin her bir görüntü içinde aynı, görüntüler arasında farklı olduğu varsayılmaktadır. Bulandırmanın birinci kısmı optik yol üzerindeki mercek, açıklık gibi çeşitli etkenleri, ikinci kısmı ise YBA görüntü algılayıcı hücreler üzerindeki toplama işlevini temsil eder. Bu model matematiksel eşitlik halinde yazılırsa (1.3)'deki eşitlik elde edilir.

$$Y = \left[NYF_{kamera}(x, y) ** F(NYF_{lens}(x, y) X(x, y)) \right] \downarrow + N \quad (1.3)$$

Burada ** 2 boyutlu evrişim işleci, F burulma işleci (sahnenin kamera koordinat sistemine izdüşümü), \downarrow sayısallaştırma işleci, N sistem gürültüsü ve Y 'de sayısallaşmış, gürültülü sonuç görüntüsüdür.

Yüksek çözünürlük yöntemi sayısal görüntülerin onarımı olduğundan, eşitlik 1.3'deki genel sürekli yüksek çözünürlük modelini matris simgelimi olarak yazmak mümkündür. YÇ görüntünün boyutu $L_1 N_1 \times L_2 N_2$ ise bunu vektör normunda $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_M]^T$ şeklinde yazılabilir. Burada $M = L_1 N_1 \times L_2 N_2$, L_1 ve L_2 parametreleri ise sırasıyla yatay ve dikey indirgeme katsayılarını göstermektedir. DÇ görüntünün boyutlarının ise N_1 ve N_2 olduğu açıkça görülmektedir. k nıncı DÇ görüntüde vektör normunda $y_k = [y_{k1}, y_{k2}, y_{k3}, \dots, y_{kN_1 N_2}]^T$ şeklinde yazılabilir. Şekil 1.19'deki modelde her bir DÇ görüntü YÇ görüntünün eğme, bulandırma ve indirgemeye tabi tutularak elde edildiğinden ve ayrıca her DÇ görüntüye farklı gürültü eklendiğinden modelimiz

$$y_k = DB_k F_k X + n_k, \quad 1 \leq k \leq p \quad (1.4)$$

olur. Burada;

F_k : eğme matrisi

B_k : bulandırma matrisi

D : indirgeme matrisi

n_k : gürültü vektörü

p : elimizdeki DÇ lü görüntü sayısıdır.

DÇ görüntüler elde edilmesi sırasında YÇ görüntüdeki hareket eğme matrisi F_k da tanımlanır. Bu durum bölgesel veya evrensel olabileceği gibi dönme ve benzeri durumları da içerir. Hareket bilgisi genellikle bilinmez, ancak DÇ görüntülerden biri

referans seçilerek tahmin edilmeye çalışılır. Bulandırma optik sistemden (odaklama, kırınım limitleri vb), orijinal resim alanı ile görüntüleme sistemi arasındaki bağılı hareketten ve DÇ görüntü sensörlerin NYF'sinden kaynaklanmaktadır. İndirgeme matrisi (D), eğilmiş ve bulanmış YÇ görüntüden örtüşmüş olan DÇ görüntüler elde eder. Her ne kadar burada DÇ görüntülerin büyüklükleri aynı olsa da genel olarak değişik indirgeme matrisleri kullanarak değişik boyutlarda DÇ görüntüler elde edilebilir. (1.4)' de verilen modele göre p adet denklem tek bir matris-vektör formunda (1.5)'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DBF_1 \\ DBF_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ DBF_p \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ n_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ H_p \end{bmatrix} X + n \quad (1.5)$$

Görüldüğü gibi DÇ görüntüler YÇ görüntü piksellerinin bir katsayı ile (ağırlıkla) toplamlarına gürültü eklenmesi ile oluşmuştur. Burada $H_k = DBF_k$ dir ve bulandırma, eğme ve indirgeme matrislerini içerir.

2. İMGE ÇAKIŞTIRMA

Alt piksel imge çakıştırma birçok görüntü işleme problemi içinde yer alır ve doğruluk derecesi sonucu etkileyen en önemli etkenlerden birisidir[20]. Ortak bir görüntü alanını kapsayan iki ya da daha çok görüntü arasındaki doğrusal ötelenme, burulma ve benzeri doğrusal ya da doğrusal olmayan geometrik işlemlerin nicel olarak bulunması olarak tanımlanan imge çakıştırma, uydu görüntüleme, haritalama, tıbbi amaçlı görüntüleme, video dizilerinden kaliteli resim basma gibi askeri ve ticari birçok uygulamanın temelinde yer almaktadır. En basit halinde çakıştırma, görüntülerin katı olduğunu (bir bütün halinde hareket ettiğini) ve aralarında sadece doğrusal ötelenme olduğunu varsayar. Birçok uygulamada piksel seviyesinde bulunması yeterli olan ötelenmenin yüksek çözünürlük uygulamalarında çok daha hassas hesaplanması gerekmektedir.

Çoğu imge çakıştırma algoritması, çakıştırılacak görüntülerin aynı görüntüden tek bir görüntü algılayıcısı tarafından bağıl olarak kısa bir zaman farkı ile algılayıcı ya da görüntü hareket ederken elde edildiğini, bu görüntülerin bir yüksek çözünürlüklü (ya da sürekli) görüntüden farklı doğrusal ya da doğrusal olmayan işlemler ile türetildiğini ya da türetilebileceğini varsayar. İster uzamsal ister frekans uzayında yapılsın çakıştırma işlemi yeterince hassas yapılmadıkça istenilen düzeyde yüksek çözünürlük elde etmek mümkün değildir. Yüksek çözünürlük üretme yöntemlerindeki ana fikir ve yaklaşım düşük çözünürlüklü bir resimde kayıt edilememiş detayların alt piksel seviyesindeki ötelenmeler sayesinde bir diğer resimde kaydedilmiş olma olasılığıdır. Böylelikle iki ya da daha çok görüntüde içerilen farklı detaylar/veriler kullanılarak daha detaylı ve yüksek çözünürlüklü tek bir resim elde etmek mümkün olmaktadır([21]-[27]).

En basit görüntü çakıştırma işlemi, iki görüntü arasında sadece öteleme farkı olması durumunda bağıl yer değiştirmenin bulunmasıdır. Ötelemesiz görüntü çakıştırma probleminin Fourier dönüşümü yaklaşımıyla çözümü geçmişte iki-boyutlu evre tekniği ile yapılmıştır. Literatürde frekans alanındaki çalışmaların yanı sıra uzamsal alanda yapılan çalışmalar da mevcuttur. Uzamsal alanda yapılan çalışmalar iki başlık altında

toplanabilir. Birincisi iki resim arasındaki ilinti bulunması, ikincisi ise ilgin dönüşüm prensibine göre çalışır.

2.1. İmge Çakıştırmadaki Genel Problemler

Doğru görüntü çakıştırma yüksek çözünürlüğün temelini oluşturmaktadır. İmge çakıştırma kendi başına ayrı bir problemdir. Tom ve Katsaggelos [28]'de “ İmge çakıştırma tahmini kötü konumlanmadan, açıklık probleminden ve çerçeveler arasındaki çakışan ve çakışmayan bölgelerden dolayı zor bir problemdir” diye ifade etmişlerdir. YÇ onarımın doğruluğu görüntü çakıştırmanın doğruluğuna bağlıdır. İmgeler arasındaki sapmanın tahmininde görüntünün parlaklık seviyeleri kullanılır. Parlaklık değerinin yanı sıra renk bilgisini de kullanan tahmin yöntemleri de mevcuttur. Görüntüler arasındaki sapmaların tespit edilmesi aşamasında parlaklık seviyelerinin kullanılması bazı problemleri de beraberinde getirecektir. İmgeler arasındaki sapmanın tahminindeki genel problemler aşağıdadır:

- Bölgesel veya evresel devinim

Eğer sahne durağan, sadece kamera hareket ediyorsa, göreceli sapma evrenseldir. Bununla birlikte, çerçeve içindeki nesnelere de hareket edebilir. Örneğin görüntü kaydedilirken sahnedeki insanlar veya arabalar hareket halinde olabilir. Bu gibi durumlarda, hareket eden her objenin bireysel olarak belirlenmesi gerekir.

- Doğrusal olmayan devinim

Birçok devinim gerçek dünya şartlarında doğrusal değildir. Ancak devinim tahmini yapılacak olan görüntü 3 boyutlu dünyanın 2 boyutlu görüntü düzlemine izdüşümüdür.

- Sahnenin bütün veya bölgesel bir bölgesinin parlaklığının değişmesi

Yansıma veya tek düze olmayan aydınlamadan kaynaklanan parlaklık değişimleri çerçevelerde görülebilmektedir.

- Birbirini tutma ve açıklık problemi

Çok basit bir örnek olarak, her tarafı aynı renge sahip olan bir nesne kamera önünden geçerken ne kadarlık hareket ettiği söylenemez. Başka bir örnek ise tuğla duvarlar gibi birbirini tekrar eden örüntülere sahip olan nesnelerdir. Bütün tuğlalar birbirinin benzeri olduğundan dolayı kameranın duvara göre gerçekte ne kadar hareket ettiğini tahmin etmek zordur.

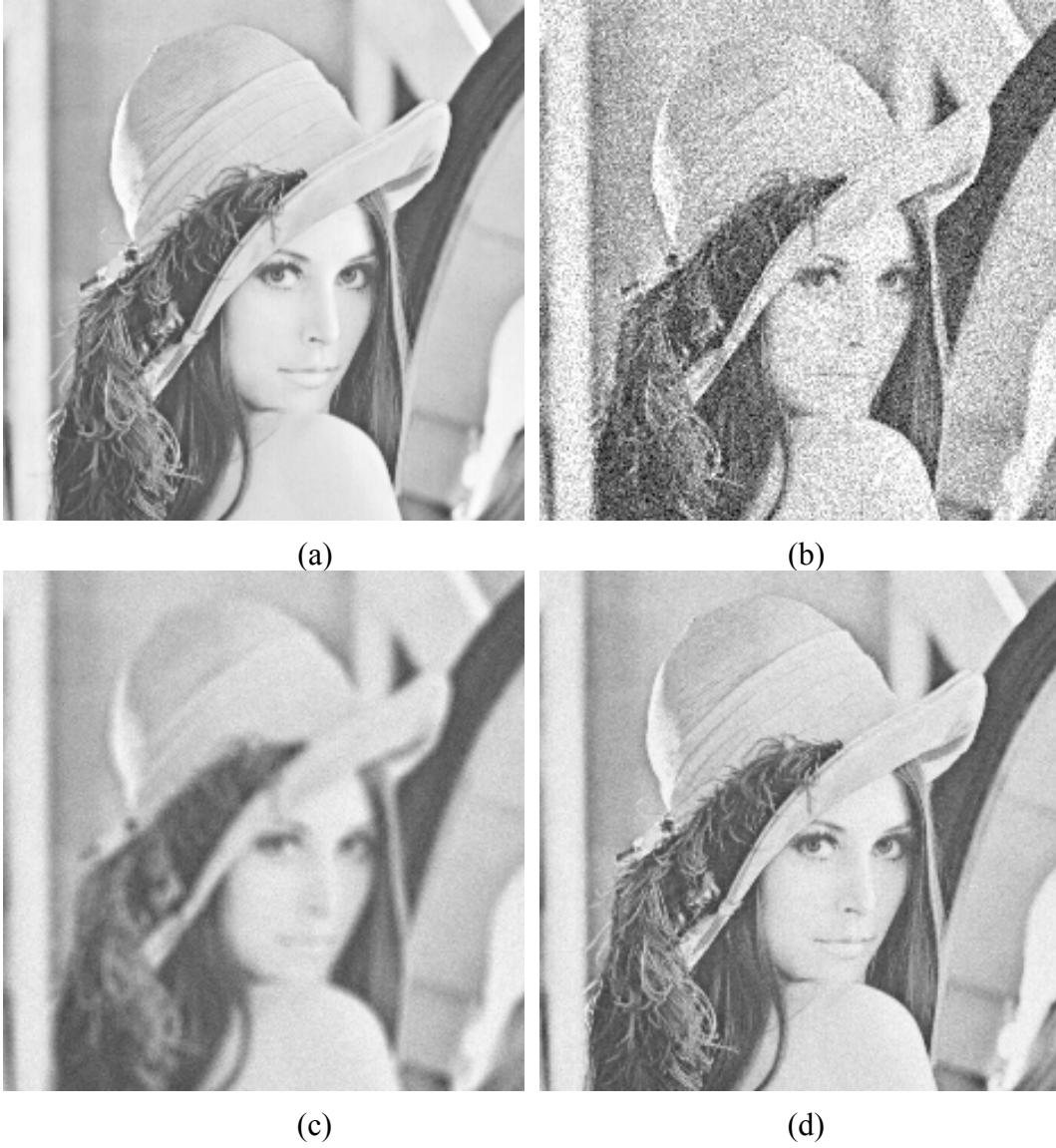
- Devininim alt piksel seviyelerinde hesaplanma gereksinimi

Birçok uygulamada, piksel seviyesinde bulunması yeterli olan ötelenmenin yüksek çözünürlük uygulamalarında çok daha hassas hesaplanması gerekmektedir. Yüksek çözünürlük üretme yöntemlerindeki ana fikir ve yaklaşım düşük çözünürlüklü bir resimde kayıt edilememiş detayların alt piksel seviyesindeki ötelenmeler sayesinde bir diğer resimde kaydedilmiş olma olasılığıdır. Böylelikle iki ya da daha çok görüntüde içerilen farklı detaylar/veriler kullanılarak daha detaylı ve yüksek çözünürlüklü tek bir resim elde etmek mümkün olmaktadır

- Gürültü

Görüntüler kaydedilirken gürültüden dolayı çakıştırılacak çerçevelerin piksel değerleri rasgele değişebilir. Piksel değerlerinin değişmiş olması çakıştırma algoritmalarının başarımını olumsuz olarak etkilemektedir.

YÇ görüntüler sadece piksel sayısı artırılmış değil aynı zamanda içerdiği veri miktarı ve detay olarak nitelikli, gerçeğe daha yakın görüntülerdir. Piksel sayısı arttırılmasa da, kullanılan görüntü kaydedici aygıtlar ve diğer benzeri etkiler dolayısı ile doğal olarak kalitesini yitiren görüntülerde kaybolan detayların geri kazanımı da sadece netleştirme değil yüksek çözünürlük elde etme işlemleri arasında sayılabilir. Her iki durumda da görüntüler arasındaki geometrik ötelenmelerin hesaplanması gerekmektedir. Görüntüler arasında rotasyon ya da diğer geometrik işlemler olmaksızın gerçekleşen tam piksel kaymalar ortak alan için yeni bir bilgi getirmediğinden sadece ilintisiz gürültünün ayıklanması için kullanılabilir. Şekil 2.1’de tam piksel kaymalarda gürültünün azaltılması ile ilgili bir örnek verilmiştir. Şekil 2.1 a’da orijinal Lena görüntüsü görülmektedir. (a)’daki görüntü her iki yönde de tam piksel seviyesinde



Şekil 2.1 Tam piksel ötelemelere sahip görüntüleri kullanarak gürültü azaltma
 (a) Orijinal görüntü (b) Gürültü eklenmiş (c) Ortalama alınarak (d) Çakıştırılarak

ötelenip (0, 1, 2, 3, 4 piksel) gürültü eklenmiştir. Ötelenmiş ve gürültü eklenmiş görüntülerden bir tanesi (b)'de görülmektedir. Elde edilen 25 görüntünün ortalaması alınarak gürültü azaltılmaya çalışılmıştır. Eğer ortalama alınırken görüntüler arasındaki ötelemeler dikkate alınmaz ise (c)'de görüldüğü gibi ilintisiz gürültü azalmasına rağmen elde edilen görüntü bulanık olacaktır. (d) ise ötelemeler dikkate alınarak ortalama alınmış sonucu göstermektedir. Eğer görüntüler farklı bulandırma işlevlerinden geçmiş ise aralarında tam piksel öteleme olsa dahi daha yüksek çözünürlük elde etmek ya da resim niteliğini artırmak için kullanılabileceği [27], [29], [31] ve [32]'de

bildirilmiştir. Görüntüleri, aralarında istenildiği kadar kayma ve benzeri işlev olacak şekilde üretmek çoğu zaman pratik olarak mümkün değildir. Bu işlevlerin miktarları görüntüler elde edildikten sonra alt piksel imge çakıştırma yöntemleri ile bulunur. İmge çakıştırmada popüler olan yöntemler şöyledir.

2.2 Blok Karşılaştırmaya Dayanan Yöntemler

Kavramsal olarak en basit yöntemdir. Çakıştırılacak çerçevelerden birisi referans olarak seçilir. Diğer çerçeveden bir blok seçilerek referans görüntüsünde döndürülüp, ötelenerek blok arasındaki ilinti hesaplanır. Evrensel devinimlerde ise çerçevelerin kendileri kullanılır. Şekil 2.2’de blok karşılaştırma yöntemi görülmektedir. En küçük ilintiyi veren aranan sonuçtur. Bloklar arasındaki ilintinin ölçümü için en yaygın kullanılan fark karelerin toplamıdır(FKT). İki çerçeve $f(x,y)$ ve $g(x,y)$ ise fark karelerinin toplamı aşağıdaki gibidir.

$$FKT(d_1, d_2) = \sum_{j=-n_1}^{n_1} \sum_{j=-n_2}^{n_2} (f(x+i, y+j) - g(x+i-d_1, y+j-d_2))^2 \quad (2.4)$$

Görüntüler arasındaki çapraz ilinti normalize edilerek evrensel parlaklık değişiminden etkilenmesi önlenir. Uzamsal alanda normalize edilmiş çapraz ilinti \hat{f} ve \hat{g} , f ve g ’nin ortalamasını göstermek üzere (2.5)’de verildiği gibidir[33]

$$C(d_1, d_2) = \frac{\sum_{j=-n_1}^{n_1} \sum_{j=-n_2}^{n_2} (f(x+i, y+j) - \hat{f})(g(x+i+d_1, y+j+d_2) - \hat{g})}{\sqrt{\sum_{j=-n_1}^{n_1} \sum_{j=-n_2}^{n_2} (f(x+i, y+j) - \hat{f})^2 \sum_{j=-n_1}^{n_1} \sum_{j=-n_2}^{n_2} (g(x+i+d_1, y+j+d_2) - \hat{g})^2}} \quad (2.5)$$



Şekil 2.2 Blok karşılaştırma yöntemi

2.3 Gradyen Tabanlı Yöntemler

Yatay öteleme x_0 , dikey öteleme y_0 ve dönme açısı θ olan iki görüntü arasındaki bağıntı

$$f_2(x, y) = f_1(x \cos \theta - y \sin \theta + x_0, y \cos \theta + x \sin \theta + y_0) \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir (geometrik dönüşüm kuralı). $\sin \theta$ ve $\cos \theta$ Taylor serisi şeklinde açılırsa ve sadece ilk 2 terimi alınırsa (2.7) elde edilir.

$$f_2(x, y) \approx f_1\left(x + x_0 - y\theta - \frac{x\theta^2}{2}, y + y_0 + x\theta - \frac{y\theta^2}{2}\right) \quad (2.7)$$

f_1 , Taylor serisi şeklinde açıldığında da birinci dereceden denklem elde edilir.

$$f_2(x, y) = f_1(x, y) + \left(x_0 - y\theta - \frac{x\theta^2}{2} \frac{\partial f_1}{\partial x}, \left(y_0 + x\theta - \frac{y\theta^2}{2} \frac{\partial f_1}{\partial y} \right) \right) \quad (2.8)$$

f_2 görüntüsü ile f_1 görüntüsü (θ açısı ile dönmüş ve x_0, y_0 kadar ötelenmiş) arasındaki hata fonksiyonu (2.9)'daki gibi tanımlanır[34].

$$E(x_0, y_0, \theta) = \sum \left[f_1(x, y) + \left(x_0 - y\theta - \frac{x\theta^2}{2} \right) \frac{\partial f_1}{\partial x} + \left(y_0 + x\theta - \frac{y\theta^2}{2} \right) \frac{\partial f_1}{\partial y} - f_2(x, y) \right]^2 \quad (2.9)$$

Hata fonksiyonunu en küçük yapmak için x_0, y_0 ve θ ya göre kısmi türevlerinin alınıp sıfıra eşitlenerek üretilen denklem çözülür. Kısmi türev sonucunda (2.10)'daki denklem sistemi elde edilir.

$$\begin{aligned} \sum f_x^2 x_0 + \sum f_x f_y y_0 + \sum A g_x \theta &= f_x f_t \\ \sum f_x f_y x_0 + \sum f_y^2 y_0 + \sum A f_y \theta &= f_y f_t \\ \sum A f_x x_0 + \sum A f_y y_0 + \sum A^2 \theta &= A f_t \end{aligned} \quad (2.10)$$

Burada

$$f_x = \frac{\partial f_1}{\partial x}, \quad f_y = \frac{\partial f_1}{\partial y}, \quad f_t = f_2 - f_1 \quad \text{ve} \quad A = x f_y - y g_x \quad (2.11)$$

dir. Hareket parametreleri x_0, y_0 ve θ , denklem (2.10) çözülerek hesaplanabilir. Görüntü kesikli zamanda olduğunda görüntüler arasındaki yer değiştirme kabul edilebilir değerlere sahip olmayabilir. Bundan dolayı verilen iki görüntü arasındaki hareket vektörü özyinelemeli olarak hesaplanır.

1. Başlangıç olarak görüntülerde hareket olmadığı kabul edilir.

2. Denklem (2.10) yardımıyla yaklaşık hareket vektörleri hesaplanır ve tahmin hareket vektörüne eklenir.
3. f_2 görüntüsü f_1 görüntüsüne doğru tahmin hareket vektörüne göre eğilir ve eğilmiş f_2 görüntüsü ile adım 2'ye geri dönülür.

Her özyineleme esnasında f_2 görüntüsü f_1 görüntüsüne yaklaşır ve adım 2'de hesaplanan artık düzeltmeler giderek küçülür. Özyineleme artık düzeltmeler sıfıra yaklaştığında durdurulur. f_1 görüntüsü özyineleme esnasında değişmediğinden, 12 katsayının 9 tanesi sadece 1 kez hesaplanır, f_2 görüntüsüne bağlı diğer 3 katsayı her özyinelemede tekrar hesaplanır. Bu da özyineleme işlem süresini azaltır.

2.4 Faz Tabanlı yöntemler

Faz tabanlı yöntemler Fourier dönüşümünün öteleme özelliğine dayanmaktadır. Uzamsal alanda aralarında öteleme bulunan iki fonksiyonun Fourier dönüşümü alındığında, genlikleri sabit kalmakla birlikte aralarında doğrusal evre farkı oluşmaktadır. Matematiksel tanımı ise aşağıdadır.

Eğer iki fonksiyon $f_1(x, y)$ ve $f_2(x, y)$, aralarında öteleme farkı var ise aralarındaki ilişki

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir. Fourier öteleme özelliğine göre aralarındaki ilişki

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) e^{-i(u x_0 + v y_0)} \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir. Normalize edilmiş çapraz güç spektrumu tanımı ise

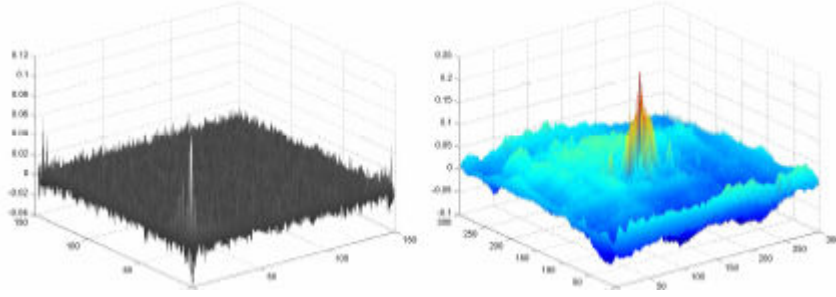
$$\frac{F_2(u, v) F_1(u, v)^*}{|F_1(u, v)| |F_2(u, v)|} = e^{-i(ux_0 + vy_0)} \quad (2.14)$$

şeklindedir. Burada * kompleks eşleniği göstermektedir. (2.14) numaralı denklemin çözümü için iki yol vardır. Bunlardan birincisi doğrudan frekans alanında çalışmaktır. Bunun için ikisi frekans eksenini biri de iki görüntü arasındaki evre farkı olan 3-boyutlu Euclidean uzayı düşünülür. Bu uzayda $ux_0 + vy_0 = 0$ ile tanımlanan düzlem ile orijine dik olan (x_0, y_0) vektörü arasındaki eğim öteleme miktarını verir. Ancak bu yöntem gürültülü evre ilintisi olduğunda sağlıklı bir sonuç vermez.

İkinci çözüm yolu ise daha pratik ve gürültüye karşı güçlü olan normalize edilmiş çapraz güç spektrumunun ters Fourier dönüşümü alınma yöntemidir. (x_0, y_0) öteleme farkı basit şekilde bulunabilir, çünkü denklem (2.14)'ün ters Fourier dönüşümü alındığında sonuç merkezi (x_0, y_0) 'da olan Dirac delta fonksiyonudur. Şekil 2.3 birbirinden göreceli olarak (9,5) piksel ötelenmiş 2 görüntüyü göstermektedir. Şekil 2.3'de ise bu görüntülerin evre ilintisi ve normalize edilmiş çapraz ilintisi verilmiştir.



Şekil 2.3 Aralarında öteleme bulunan birbirinin aynı iki imge



Şekil 2.4 Evre ilintisinin (soldaki) ve çapraz ilintinin (sağdaki) ters Fourier dönüşümü

Evre ilintisindeki doruk nokta daha keskin ve daha iyi tanımlanabilmektedir. Doruk noktanın yanındaki ikinci nokta ileride bahsedilecek olan alt piksel devinim tahmininde kullanılabilir. Bununla birlikte denklem (2.11) sadece öteleme vektörü tam sayı olduğu zaman geçerlidir. Bundan dolayı, tamsayı olmayan öteleme miktarlarını tespit etmede ara değerlendirme yapılmaktadır[34].

[34]'e göre, aralarında alt piksel öteleme bulunan iki görüntünün evre ilintisi genellikle (x_m, y_m) koordinatlarında ana bir tepe ve bunun yanında $(x_m \pm 1)$ ve $(y_m \pm 1)$ olan tepelere sahiptir. Bu üç tepe noktasını kullanarak alt piksel ötelemeler bulunmaktadır. Ana tepe noktasının koordinatları $(0,0)$ noktasında ve diğer iki tepe noktasının koordinatları $(1,0)$ ve $(0,1)$ noktalarında olsun. Dirac delta fonksiyonu sıkıştırılmış sinc fonksiyonuna çok yakındır. Pratik olarak dirac delta fonksiyonu yerine sinc fonksiyonu alınır. Dolayısıyla normalize edilmiş çapraz güç spektrumu

$$\tilde{C}(x, y) \approx \frac{\sin(\pi(x - x_0))}{\pi(x - x_0)} \frac{\sin(\pi(y - y_0))}{\pi(y - y_0)} \quad (2.15)$$

halini alır. Koordinatlar yerine yazıldığında

$$C(0,0) = \frac{\sin(\pi x_0)}{\pi x_0} \frac{\sin(\pi y_0)}{\pi y_0} \text{ ve}$$

$$C(1,0) = \frac{\sin(\pi(1-x_0))}{\pi(1-x_0)} \frac{\sin(\pi y_0)}{\pi y_0} \quad (2.16)$$

elde edilir. İki taraf birbirine bölünüp düzenlenirse

$$\frac{\sin(\pi(1-x_0))}{\pi(1-x_0)} = \frac{C(1,0)}{C(0,0)} \frac{\sin(\pi x_0)}{\pi x_0} \quad (2.17)$$

ve basitleştirilirse

$$\Delta x = x_0 = \frac{C(1,0)}{C(1,0) \pm C(0,0)} \quad (2.18)$$

elde edilir. Aynı şekilde y_0 bulmak için $C(0,1)$ ve $C(0,0)$ kullanılır.

Aralarında öteleme ve dönmede olan görüntüler arasındaki ilişki (2.19)'daki gibidir.

$$f_2(x) = f_1(R(x + \Delta x)) \quad (2.19)$$

Burada;

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \Delta x = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \text{ ve } R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

dir. (2.20)'deki eşitlik frekans bölgesinde aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned}
F_2(u) &= \iint_x f_2(x) e^{-i2\pi u^T x} dx \\
&= \iint_x f_1(R(x + \Delta x)) e^{-i2\pi u^T x} dx \\
&= e^{i2\pi u^T \Delta x} \iint_{x'} f_1(Rx') e^{-i2\pi u^T x'} dx'
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Burada $x' = x + \Delta x$ koordinat dönüşümü ile birlikte $F_2(u)$, $f_2(x)$ 'in Fourier dönüşümünü göstermektedir. Başka bir dönüşümle birlikte ($x'' = Rx'$) iki görüntünün Fourier dönüşümünün genlikleri arasındaki ilişki (2.22)'daki gibi elde edilebilir.

$$\begin{aligned}
|F_2(u)| &= \left| e^{i2\pi u^T \Delta x} \iint_{x'} f_1(Rx') e^{-i2\pi u^T x'} dx' \right| \\
&= \left| \iint_{x'} f_1(Rx') e^{-i2\pi u^T x'} dx' \right| \\
&= \left| \iint_{x''} f_1(x'') e^{-i2\pi u^T (R^T x'')} dx'' \right| \\
&= \left| \iint_{x''} f_1(x'') e^{-i2\pi (Ru)^T x''} dx'' \right| \\
&= |F_1(Ru)|
\end{aligned} \tag{2.22}$$

(2.22) numaralı eşitlikten de görüldüğü üzere görüntülerin Fourier dönüşümünün genlikleri sadece aralarındaki dönmeye bağlıdır. Çünkü uzamsal bölgedeki ötelemeler sadece Fourier dönüşümün evre bilgisini etkilemektedir. Dönme tahmini için ilk akla gelen referans görüntüyü sabit tutup diğer görüntüyü belli açılarla döndürerek genlikler arasındaki en büyük ilintiyi veren döndürme açısını seçmektir. Bu hesaplama açısından verimli bir yöntem değildir. Bunun yerine genlikleri kutupsal koordinata çevrilerek döndürme açısı hesaplanabilir. x ve y ızgarasını r, θ ızgarasına dönüştürmek için ara değerlemeye ihtiyaç vardır. Genel olarak daha fazla enerji içeren düşük frekanslar için ara değerleyici kullanmak hata yapmaya sebep olmaktadır. Ara değerlendirme yerine α açısına bağlı frekans bilgilerini içeren $h(\alpha)$ fonksiyonunu hesaplanır [37].

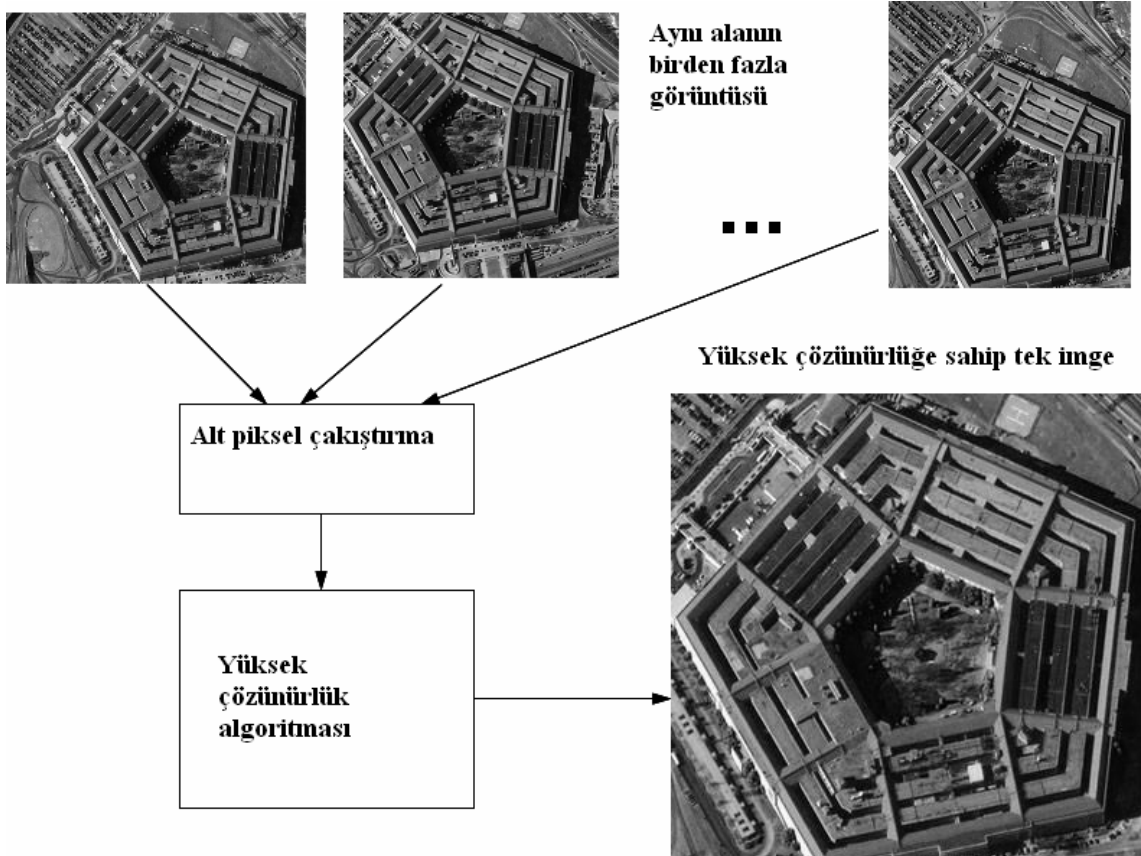
$$h(\alpha) = \int_{\alpha - \frac{\Delta\alpha}{2}}^{\alpha + \frac{\Delta\alpha}{2}} \int_0^{\infty} |F(r, \theta)| dr d\theta \quad (2.23)$$

Pratik olarak, $\alpha - \frac{\Delta\alpha}{2} < \theta < \alpha + \frac{\Delta\alpha}{2}$ aralığındaki açılara denk gelen dikdörtgen bölgedeki değerlerin ortalamasını hesaplanır. Böylece yüksek değerlere sahip olan düşük frekansların etkisini azaltılır. Daha sonra bu ortalama değerler arasındaki en büyük ilintiyi veren değeri dönme açısı olarak seçilir.

3 YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜK

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi bir izleme alanının birden fazla düşük çözünürlüklü görüntüleri kullanılarak tek bir yüksek çözünürlüklü sayısal görüntü elde etme işlemi (yüksek çözünürlük) uzun yıllardır kullanım alanı bulmaktadır. Yüksek çözünürlük, görüntü işlemenin olduğu her uygulamada kendine yer bulabilmektedir. Bunlara örnek olarak

- 1 Aynı bölgenin birden fazla sayıdaki uydu görüntüleri ile yüksek çözünürlük
- 2 MR görüntülerinde kullanılarak gürültünün giderilmesi
- 3 Sayısal fotoğraf makinelerinde daha üstün görüntüler elde edilmesi
- 4 Film çerçeveleri kullanılarak yazdırma amaçlı tek bir kaliteli görüntü elde edilmesi



Şekil 3.1 Yüksek çözünürlük aşamaları

sayılabilir([38]-[42]). Görüntü onarımında yapılmaya çalışılan bir YÇ görüntüden elde edildiği varsayılan ve elimizde var olan DÇ görüntü kümesinden YÇ görüntüyü ters model kullanarak geri elde etmektir. Burada ters modelin amacı verilen DÇ çerçevelerden tek bir tane YÇ sahip çerçeve elde etmektir. DÇ görüntüler YÇ görüntüden matris çarpımları ile elde edildiğinden dolayı, mantıksal olarak onarım problemi sistem matrisinin tersini alma işlemidir. İlk önce sistemin kötü konumlanmış olduğunu söylemek gerekir. Hadamard diffrensiyal denklemlerle çalışmalarında bir problemin iyi konumlanmış olma şartlarını aşağıdaki gibi olması gerektiğini söylemiştir[43].

1. her veri için geçerli olması
2. çözümün tek olması
3. verinin sürekli olması

Elimizde olan bütün DÇ çerçeveler YÇ çerçevenin belli bir bilgisini verebilir. Alternatif olarak, bazı çerçeveler artık bilgilere (aynı piksel kümelerine) sahip olabilir. Bundan dolayı sistem matrisinin tersini almak mümkün olmamaktadır

Daha önce de üzerinde durulduğu gibi, yüksek çözünürlük uygulamalarında amaç, yüksek frekans bileşenleri daha kuvvetli olan ya da piksel sayısı daha fazla olan görüntüler elde etmek değildir. Bu bahsedilenler de yan ürün olarak elde edilebilir ancak asıl amaç gerçeğe, gerçek sürekli görüntüye daha yakın görüntüler elde etmektir. Bu ise algılayıcılar tarafından görüntü elde etme işleminin nasıl gerçekleştiğini doğru olarak bilmek ile mümkün olabilir. Yani algılayıcının modeli tam olarak bilinmez ve formülasyon ona göre yapılmaz ise gerçeğe yaklaşmak çok daha zordur. Bazı genel-geçer kabullenmeler ile sadece bir miktar ileriye gitmek mümkün olabilir.

Sayısal durağan resimler üzerinde yüksek çözünürlük çalışmaları, frekans alanı ve parlaklık alanında olmak üzere başlıca iki şekilde yapılmaktadır. Frekans alanındaki çalışmalar genel olarak örtüşme bölgesindeki frekans bileşenlerinin bilinmeyenler olarak atanması ve birden çok resim yardımıyla bulunmasını hedeflemektedir. Ayrıca

bu amaca yönelik yöntemlerin uygulanmasında özyinelemeli teknikler de bulunmaktadır. Nyquist'in örnekleme kuramına göre, sürekli bir işaretin kendi düzenli örneklerinden yeniden oluşturulabilmesi için örnekleme frekansının işaret içindeki en yüksek frekansın iki katı değere sahip olması gerekmektedir. Bu ise çoğu doğal işaretin, özellikle görüntü işaretlerinin, öncelikle alçak geçiren bir süzgeçten geçirilmesi gerekliliğini getirir. Çünkü sürekli görüntünün bant sınırlı olmadığı kabul edilmektedir. Işık demetlerinin önüne konacak her türlü süzgeç, örneğin bulandırma süzgeci, yüksek frekans bölgesindeki işaretleri bastırarak örtüşmeyi önler. Yani görüntüyü bozar. Herhangi bir süzgeç kullanmadan da, algılayıcılar tarafından oldukça iyi görüntüler (insan gözü için) elde edilmektedir. Bunun nedeni ise çoğu algılayıcıların aslında nokta örnekleme değil alan örnekleme hücrelerinden oluşmasıdır. NYF_{kamera} ismi ile daha önce bahsettiğimiz ve bu hücreler tarafından ortaya konulan süzgeç, yüksek frekans bileşenlerinin toplanarak ortalama bir miktar güç kaybına uğramasına sebep olur. Böylelikle örtüşme bölgesine çok yakın frekanslarda dahi bozulma azdır, ancak vardır. Tabii ki, toplanarak birbirinin etkisini götürme işlemi bazı tür görüntülerde oldukça büyük bir bozulmaya sebep olabilir. Bahsettiğimiz işlem bu tür görüntüler içermeyen sıradan görüntüler için geçerlidir.

Nyquist'in örnekleme kuramına uygun örneklenmiş resimlerin ise yüksek çözünürlük uygulamaları açısından bir kötü özelliği vardır. Bunlar kullanılarak daha yüksek çözünürlük elde etme imkanı yoktur, çünkü kaybolan frekans bileşenleri ile ilgili tüm veriler yok edilmişlerdir. Bu durumda elimizde bu gibi resimlerden hangi sayıda olduğunun bir önemi yoktur, çünkü hepsi aynı sürekli (süzgeçten geçmiş) resmin değişik noktalardan örneklenmiş halidirler. Ancak biliyoruz ki çoğu görüntü algılayıcısında, özellikle konulmadı ise, bir örtüşme engelleyici süzgeç yoktur. Yani az da olsa yüksek frekans bölgelerinde örtüşme mevcuttur. Aslında gerçek görüntülerin bant sınırlı olmadığı düşünülürse tüm bileşenlerde örtüşme olduğu sonucuna varılabilir. Ancak düşük frekans bileşenlerinde örtüşmeden doğan bozulmalar, algılayıcıların kendi ürettiği gürültü ve nicemeleme gürültüsü arasında kaybolup gitmektedir ve hesaplanması olası görünmemektedir.

3.1 Örnekleme

Gerçek sahnenin piksellere dönüştürülme işlemi matematiksel olarak görüntü yakalama ve örnekleme olarak formülize edilir. Optik sistem 2 boyutlu sürekli sinyaller üzerine uygulanmış uzamsal, doğrusal alçak geçiren süzgeç olarak modellenir. Bant sınırlı bu sinyal foto sezicilerin uzamsal dağılımı ile belirlenen örnekleme oranına göre örneklenir[44]. Algılayıcıların az ve birbirinden uzak olmasından dolayı yetersiz örnekleme oranı örtüşmeye sebep olur. Ayrıca optik sistem sinyali bulanık hale getirir. Bu iki etki kaçınılmazdır. Bununla birlikte modern görüntüleme sistemleri dizayn edilirken bu iki etkiyi azaltabilecek çalışmalar yapılmaktadır[45].

Bir boyutlu x eksenini boyunca gerçek sahneyi temsil eden $x(t)$ fonksiyonunu ele alalım. Basit olarak gösterebilmek için başlangıç örnekleme ızgarası tamsayı koordinatlarında olduğu kabul edilirse örnekleme işlemi matematiksel olarak $x(t)$ sinyalinin $comb(t)$ çarpımı olarak modellenir. Burada

$$comb(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t-k) \quad (3.1)$$

dir. Bu sonuç dürtü dizisi tamsayı ötelenmiş ideal dürtülerin o noktalardaki sinyal değeri ile ağırlıklandırılması toplamıdır.

$$x[n] = x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-n) \quad (3.2)$$

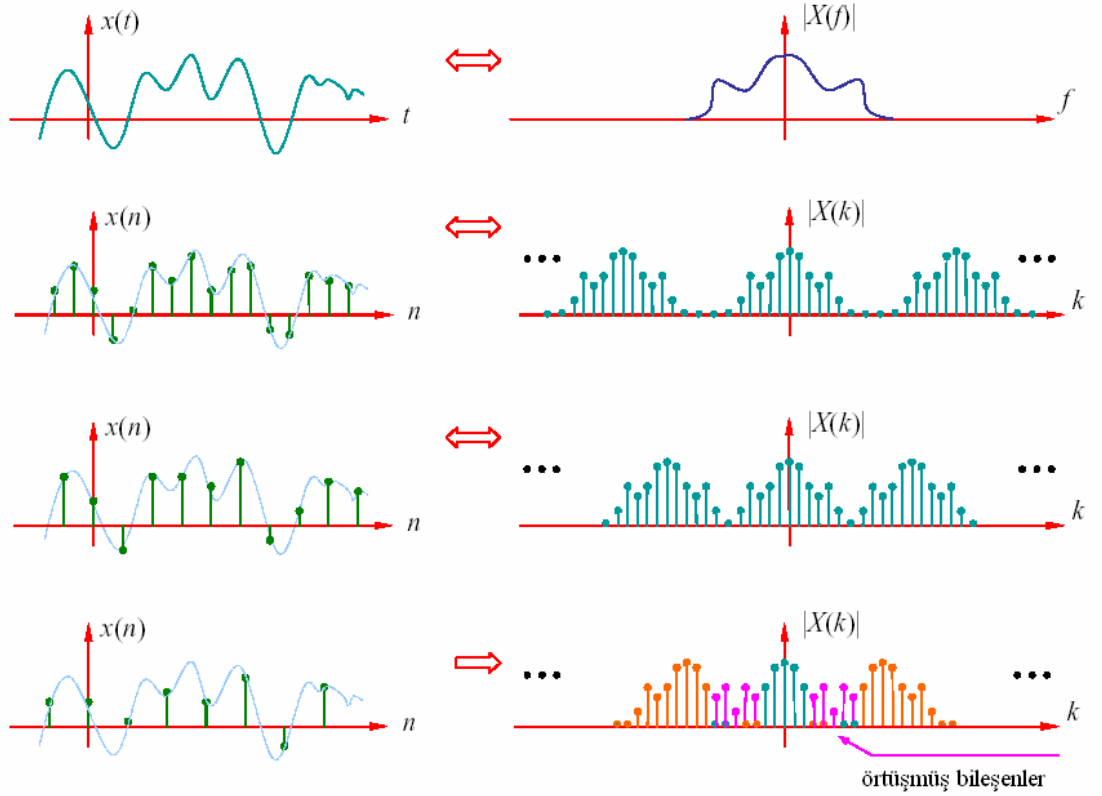
Nyquist'in örnekleme kuramı, sürekli bir işaretin kendi düzenli örneklerinden örnekleme frekansının işaret içindeki en yüksek frekansın iki katı değere sahip ise örneklerinden tam olarak geri elde edilebildiğini gösterir[45]. Matematiksel olarak ideal süzgeçleme ile sinyalin geri elde edilmesi aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$x_y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \text{sinc}(t-n) \quad (3.3)$$

Örneklemenin etkisi Fourier bölgesinde daha iyi anlaşılır. $x(t)$ ile $\text{comb}(t)$ 'in çarpımlarının Fourier dönüşümü $x(t)$ 'in orijinal spektrumun yanı sıra 2π nin katlarında da gözükür.

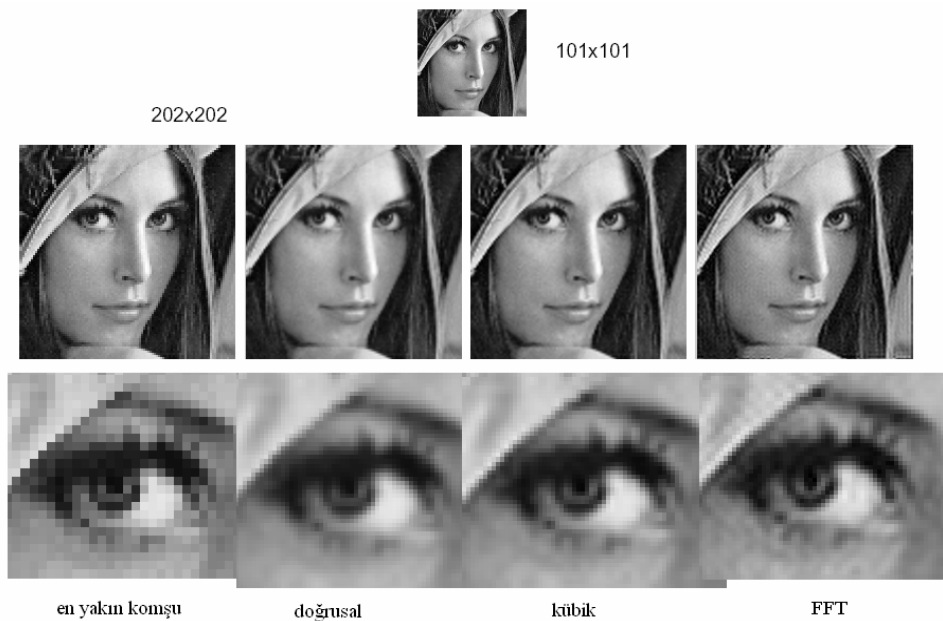
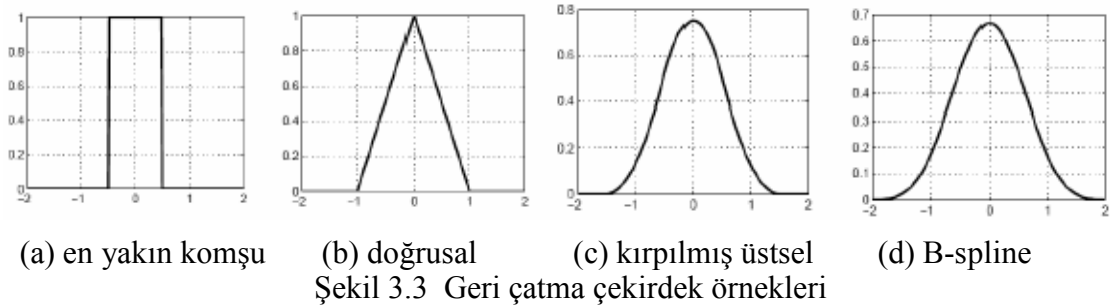
$$X(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(2\pi(f-k)) \quad (3.4)$$

Burada $X(f)$ sürekli sinyal $x(t)$ 'in Fourier dönüşümüdür. Eğer sinyal Nyquist oranının altında örneklenirse 2π 'in katlarındaki kopya spektrumları üst üste binerek Şekil 3.2'de de görüldüğü gibi orijinal spektrumu bozar. Bu etki örtüşme olarak bilinir.



Şekil 3.2 Örnekleme ve örtüşme etkisi

Gerçek dünyada ideal süzgeçleme oluşturulamaz. sinc geri çatma fonksiyonu ilk dezavantajı sonsuz dayanaklı olmasıdır (eşitlik 3.3 toplamın sınırları). Başlangıç sinyali sınırlı aralıkta $[0..M-1]$ olsa bile bu aralıkta geri çatılmış sürekli fonksiyon için sonsuz toplama ihtiyacı vardır. İkinci dezavantajı ise sinc fonksiyonunun çok yavaş sönümlenmesidir. Sonsuz dayanakla birlikte sinc çekirdeğini kullanarak direk evreşim yapma olasılığı sınırlıdır. Bazı yazarların yapmak istediği gibi sınırlı dayanaklı sinc fonksiyonunun yaklaşımı olan çekirdekler kullanmaları bazı örtüşme bozulması ortaya çıkarır ([46]-[50]). Şekil 3.3'de sinc geri çatma çekirdeğine alternatif bazı çekirdekleri ve Şekil 3.4'de ise alternatif geri çatma ile görüntünün boyutunun uzamsal alanda büyütülmesi görülmektedir. Alternatif olarak, ara değerlemeyi Fourier dönüşümün öteleme özelliğini kullanarak frekans bölgesinde uygulanırsa bazı özel kabullenmelerle periyodik sınırlı büyütme elde edilebilir[51].

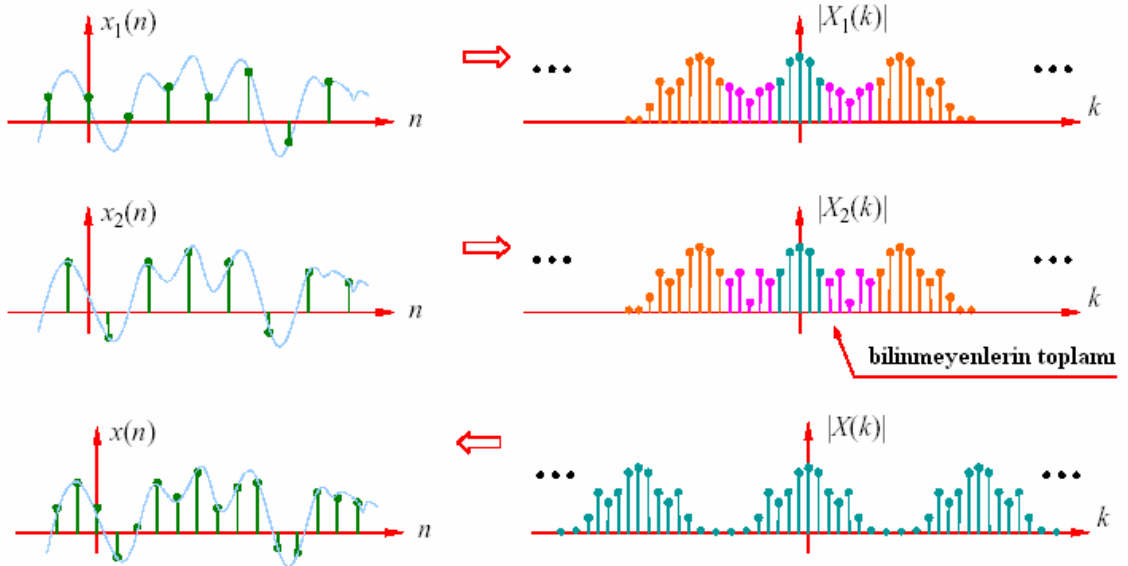


3.2 Frekans Bölgesindeki Yüksek Çözünürlük Yöntemleri

Onarım problemlerinde en eski çalışmalar frekans bölgesinde yapılan çalışmalardır. Frekans bölgesindeki yüksek çözünürlük onarım yöntemleri 3 temel prensibe dayanmaktadır:

1. FD öteleme özelliği
2. Orijinal YÇ görüntünün sürekli FD (SFD) ile gözlem görüntülerin Kesikli FD (KFD) arasındaki örtüşme
3. Orijinal YÇ görüntünün bant sınırlı kabulmesi

Örneğin, bir boyutlu Nyquist oranının altında örneklenmiş 2 tane DÇ sinyal ele alalım. Bahsedilen üç özellik yardımı ile örtüşme olan bu iki sinyalden Şekil 3.5’de de görüldüğü gibi örtüşme olmayan YÇ çözünürlüklü sinyal elde edilebilir.



Şekil 3.5 DÇ sinyaller ile YÇ sinyaller arasındaki örtüşme ilişkisi

Aralarında örtüşme bulunan, bozulmuş DÇ görüntülerin Kesikli FD (KFD) katsayıları ile bulunması istenen YÇ görüntünün sürekli FD (SFD) katsayıları arasında

eşitlik (3.5)'de matris vektör simgelemi olarak verilen bir denklem sistemi oluşturulur ve bu denklem sistemi çözülmeye çalışılır.

$$Y = \Phi F \quad (3.5)$$

Bu eşitlikte Y kolon vektördür ve elemanları gözlem görüntüsünün KFD katsayılarını içermektedir. Φ matrisi aranan YÇ görüntünün SFD katsayı vektörü ile gözlem görüntülerin KFD mü arasındaki ilişkiyi, F ise aranan YÇ görüntünün SFD katsayılarını göstermektedir. Yüksek çözünürlük onarımı gözlem görüntülerinin KFD lerini ve Φ matrisini hesaplayarak, bilinmeyen F in SFD lerini (3.5)'deki denklem kullanılarak hesaplanmasına ve ters KFD mü alınarak onarılmış görüntünün bulunmasına dönüşür.

Frekans bölgesindeki çalışmalar ilk olarak 1984 yılında Landsat 4 uydusundan alınan imgelerin çözünürlüğünün artırılması ihtiyacından dolayı Tsai and Huang tarafından yapılmıştır[21]. Elde edilen imgeler durağan bir görüntüden alt örneklenmiş ve aralarında evrensel ötelemelerin olduğu varsayılan bir model olarak düşünülmüştür. Örnekleme frekansı Nyquist oranı altında olmak üzere ideal dürtü örnekleme kabul edilmiştir[42]. Uydu hareketinden doğan ve görüntü elde etme sırasında ortaya çıkan gürültüler ihmal edilmiştir.

Tsai ve Huang'ın önerdiği yaklaşımdaki 2 kısıt Tekalp, Özkan ve Sezan tarafından ele alınıp incelenmiştir. [26]'da Tsai ve Huang'ın yaklaşımını doğrusal, uzamsal değişmez NYF etkileri ve bunun yanında gözlem gürültülerini içeren yeni bir yaklaşımla geliştirmişlerdir. Tsai ve Huang gibi periyodik örnekleme kabul etmişler, ancak dürtü örnekleme yerine sistem NYF'sini algılayıcıların NYF'si olarak seçmişlerdir. [21]'deki gibi evrensel öteleme modeli hala kullanmakla beraber frekans alanında gürültü içeren, bozulmuş ve eksik örneklenmiş gözlem görüntülerin formüllerini vermişlerdir. Gözlem gürültüsünden dolayı (3.5)'deki denklem sistemini en küçük kareler yaklaşımıyla çözmüşlerdir. Bunun yanı sıra [26]'yı geliştirerek, uzamsal alanda ara değerlendirme-onarım için Dış Bükey Kümelere İzdüşüm (DBKİ)

onarımı önermişlerdir. Bu konu ileride bahsedilecektir. Tekalp'in "Digital Video Processing" kitabında yüksek çözünürlük onarımı ile ilgili seçilen yöntemlerle alakalı güzel bir önizleme bulunmaktadır [52]. Kitapta Tekalp yüksek çözünürlük problemine giriş yapmakta ve hareketin etkilerini, duyucuları ve optik sistem NYF sini içeren çeşitli gözlem modelleri tartışmaktadır. Frekans alanındaki Tsai ve Huang'ın modeli ve onun Tekalp tarafından geliştirilmiş modeli aynı kaynakta ele alınmıştır. Ayrıca ileride değinilecek olan DBKİ yöntemi de önizlemesi ve örnekleri ile bulunmaktadır.

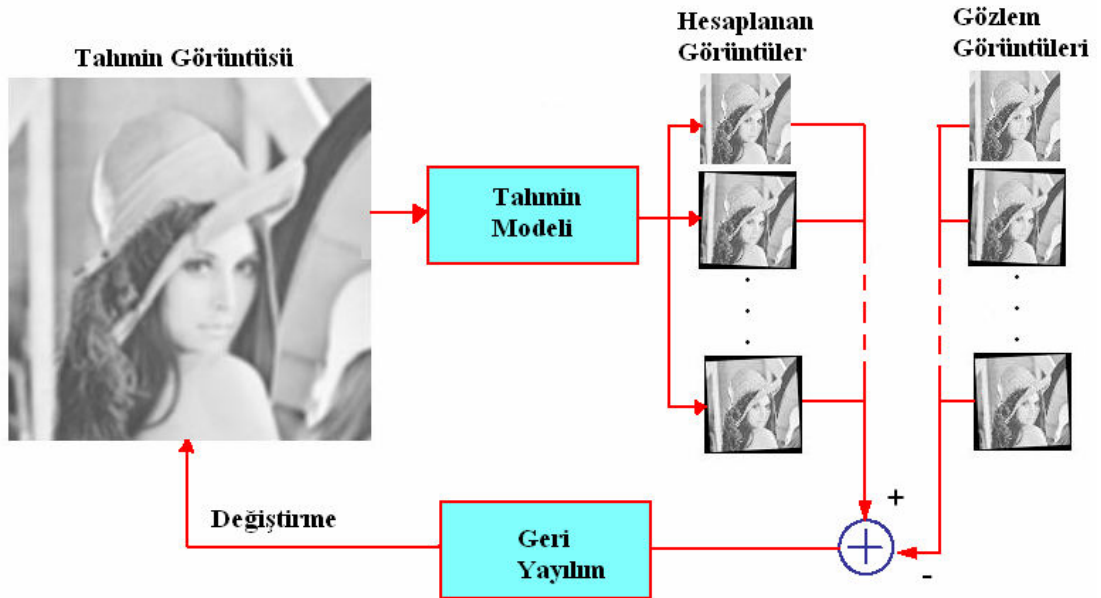
Kim, Bose ve Valenzuela, Tsai ve Huang'ın geliştirdiği ve evrensel öteleme modelini kullanmış bununla birlikte uzamsal bulanıklaşma etkisinden kaynaklanan gürültüyü de ele almıştır ve eşitlik (3.5)'i çözmek için öz yinelemeli en küçük kareler (ÖEKY), ağırlıklandırılmış ÖEKY çözüm yöntemlerini ve Tikhonov düzenleme terimini de içermektedir([53]-[58]).

Frekans bölgesindeki onarım yaklaşımı her ne kadar gerçekleştirme zamanı az ve basit olmasına rağmen birçok zayıflıkları vardır. İdeal örnekleme kabullenmesi gerçek hayattaki görüntüleme sistemlerindeki algılayıcıların uzamsal ve zamansal tümlevini alma karakteristiğine göre gerçek dışıdır(açıklık zamanı sırasında). Ayrıca, kaydedilen görüntü verilerin üzerindeki optik sistemden kaynaklanan etkiler dikkate alınmamıştır. Bunun yanı sıra bozulma gürültüleri ihmal edilmiştir. Bu gürültülerin denklem (3.5)'deki çözüm üzerindeki etkisi fazladır. Bunun yanı sıra kabul edilen evrensel öteleme modeli genel olarak yeterli bir model değildir. Evrensel öteleme modeli frekans bölgesindeki yaklaşımlarda sınırlıdır. Ama bununla birlikte, frekans alanındaki yaklaşımlarının limiti olmasına rağmen ilgi çekici olabilmekte ve bu konuda yapılan çalışmalar ileriki yıllardaki uzamsal bölgedeki çalışmalara önderlik yapmıştır.

3.3 Özyinelemeli Geri Yayılım Algoritması

Özyinelemeli yöntemlerinin hemen hepsi basit ve onarım için benzet ve düzelt yaklaşımıyla çalışmaktadır ve YÇ onarımında da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bilinmeyen bir sahneden elde edilmiş ve çoğu zaman bozulmuş bir grup DÇ görüntü elimizde olsun. Her ne kadar aradığımız sahne bilinmese de başlangıç için tahmini sahnenin elimizde olduğunu varsayalım. Sahne ile gözlem görüntü dizileri arasındaki görüntü işlemleri bilinirse, başlangıçta tahmini olarak elimizde olan görüntüden benzetim yaparak elimizde olan gözlem görüntü dizileri ile karşılaştırılabilir ve kalıntı hatası bulunabilir. Kalıntı hatası ne kadar düşük olursa tahmin edilen görüntü aranan görüntüye o kadar yakın olacaktır. Bu hata bilgisi tahmini artırmak için kullanılabilir. Geri yayılım olarak bilinen bu işlem, gerçek görüntüye daha yakın görüntü elde etmek için kullanılır. Geri yayılma işlemi kalıntı hatası en küçük olasıya kadar özyinelemeli olarak devam ettirilir. Özyinelemeli işlemi 2 ana adıma bölmek mümkündür: gözlem görüntülerin benzetilmesi, bulunan hata geri yayılarak orijinal görüntünün tahmin edilmesi.



Şekil 3. 6 Özyinelemeli geri yayılım algoritması

Bilinmeyen ayrık X görüntüsünü, tipik olarak alt örnekleme ve devinimi içeren H operatörü ile tabi tuttuğumuzda DÇ sahip görüntüler elde ettiğimiz bir model ele alalım. Bu durum cebirsel olarak (3.6)'daki gibidir.

$$Y = HX \quad (3.6)$$

X görüntüsünün j adımıdaki tahmin görüntüsü \tilde{X}^j eşitlik (3.6) yardımıyla benzetilirse benzetim sonucu DÇ görüntüler elde edilir.

$$\tilde{Y}^{(j)} = H\tilde{X}^{(j)} \quad (3.7)$$

Benzetilmiş DÇ görüntülerle, $\tilde{Y}^{(j)}$, elimizde olan DÇ görüntüler Y arasındaki hata hesaplanıp geri yayılım işleci H^{BP} ile tahmin görüntüsü ÖGY işlemine tabi tutularak güncellenir. Tipik olarak H^{BP} , H işlecinin yaklaşık olarak tersidir. Matematiksel olarak

$$\begin{aligned} \tilde{X}^{(j+1)} &= \tilde{X}^{(j)} + H^{BP} (Y - \tilde{Y}^{(j)}) \\ &= \tilde{X}^{(j)} + H^{BP} (Y - H\tilde{X}^{(j)}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Eşitlik (3.8)'de özyineleme işlemi ÖGY yöntemi, H işleci öngörü ve H^{BP} de geri yayılım işleci olarak bilinmektedir ve Landweber özyinelemesinin [59] değişik bir formudur[60]. Öngörü ve geri yayılım işlecinin nasıl seçileceği çok geniştir. Keren, Peleg ve Brada [21] ile Peleg, Keren ve Schweitzer [23] ÖGY yöntemini YÇ uygulamalarında ilk kullanan kişilerdir. [21] ve [23]'de verilen yaklaşımlar yerel en küçüklere takılabilmektedir. Yerel en küçüğe takılmayı [61] ve [62]'deki benzetimli tavlama kullanarak çözülebilir.

Hadamard'ın iyi konumlanmış problemde 3 şartın olduğunu hatırlamak gerekir[43]. Kötü konumlanmış problemlerinin çözümlerinin en iyi yolu önceden bilinen bilgilerle çözüm uzayını kısıtlamaktır. Daha öncede değinildiği gibi YÇ onarım problemi kötü konumlanmışdır. Eksik belirtilmiş durumda (birbirinin tekrar olmayan DÇ çerçevelerin sayısının büyütme çarpanından az olma durumu) eşitlik (3.7)'yi sağlayan sonsuz çözüm vardır. Kare veya artık belirtilmiş durumlar ise kararlı değildir. Ölçümlerdeki küçük

bir gürültü bile final çözümünde büyük sarsıma sebep olmaktadır. Bundan dolayı, çözümü kararlı hale getirebilmek için düzenleme terimine ihtiyaç vardır. Ayrıca, düzenleme terimi final çözümündeki yapay olguları kaldırmaya ve yakınsama hızını da artırmaya yardımcıdır. Birçok olası düzenleme terimi olmasına rağmen YÇ görüntüde keskin kenar sağlayan ve uygulaması kolay olan düzenleme seçilir.

Düzenleme terimi ölçümlerdeki eksik bilginin arzulanan YÇ görüntüdeki önsel bilgilerini kullanarak telafi etmeye yarar ve genellikle ceza çarpanı olarak maliyetin en küçükleme işlevi olarak eklenir.

$$\tilde{X} = \underset{X}{\text{ArgMin}} \left[\sum_{k=1}^N P(Y, HX) + \lambda \psi(X) \right] = \underset{X}{\text{ArgMin}} J(X) \quad (3.9)$$

Burada λ düzenleme parametresi ve skalerdir. ψ ise düzenleme ceza işlevidir. En küçük hata çözümü için X 'e göre türev alınıp sıfıra eşitlenirse (3.10)'daki gibidir.

$$\frac{\partial J(X)}{\partial X} = 0 = 2\lambda \psi^T \psi \tilde{X} - 2H^T (Y - H\tilde{X}) \quad (3.10)$$

$$\tilde{X} = (H^T H + \lambda \psi^T \psi)^{-1} H^T Y \quad (3.11)$$

Düzenleme teriminin rolünü (3.11) eşitliğinde görmemiz mümkündür. Düzenleme terimi olmadığı zaman eşitlik çözümünde $(H^T H)^{-1}$ terimi ortaya çıkar. Aşağı örnekleme matrisi ile çarpıldığı zaman H matrisi sıfır satır veya sütunlara sahip olur, bu da H matrisini tekil yapar. Aşağı örnekleme tersi alınamayan bir işleç olduğundan bu açıktır. Yukarıdaki eşitlik eksik değerleri başkasıyla koyan düzenleme terimi olmadan tersi alınmaz.

Burada ψ genellikle türevsel, Laplacian veya birim matrisi gibi yüksek geçiren işlecidir [26]. Bu sezginin arkasında ψ birim matrisi olduğunda görüntünün toplam enerji sınırı veya türev veya Laplacian seçilmesi durumunda ise uzamsal yumuşatmaya zorlar. Gürültünün giderilmesi ve netleştirme için en başarılı düzenleştirme yöntemlerinden birisi tam değişim (TD, total variation) yöntemidir [63]. TD kriteri görüntüdeki toplam değişimdir. Gürültü ve kenar pikseller yüksek frekans içerdiğinden dolayı, düzenleştirme işlemi ile yok edildiğinde onarım işlemi keskin kenar içermeyebilir. Belirli tipteki düzenleştirme maliyet işlevi bazı özel görüntü tiplerinde başarılı olmakta, bütün görüntüler için genel bir düzenleştirme olmamaktadır. Örneğin en büyük entropi düzenleştirme nesne noktaların keskin onarılmasını üretir. Bu durum astronomik görüntülerdeki yıldızlar için uygun olmasına rağmen doğal görüntüler için uygun değildir([64]-[67]).

3.4 Olasılıksal Yöntemler

Kötü konumlanmış problemlerin çözümünde önceden bilinen bilginin olması çözümün mantıklı olmasını sağlar. Rasgele olmayan işlemlerin aksine, olasılıksal yöntemler gözlem işlemi için olasılıksal modeller kullanmakta ve ters problemin çözümü için bilinen istatistiksel tahmin teoremlerini kullanırlar. Kötü konumlanmış ters problemimin çözümlerinde uygun olan ve Bayesçi yöntem olarak bilinen bu yaklaşımlar, bilinmeyenin önsel olasılık yoğunluk fonksiyonunu önsel kısıt olarak alırlar. Şu ana kadar anlatılan yöntemlerle olasılıksal yöntemin arasındaki en önemli fark, önceki yöntemlerdeki gözlem ve bilinmeyenin rasgele olmadığı şimdi ise olasılıksal olmasıdır. Yani olasılıksal yaklaşımlarda gözlem, bilinmeyen ve gürültü bir olasılıksal işlemdir ve olasılıksal eşitliklere alakalıdır. Bayesçi teknikler oldukça başarılıdır ve kötü konumlanmış ters problem çözümleri başta olmak üzere geniş bir uygulama alanı vardır.

Bilinmeyen X ile gözlemlerin arasındaki gürültüyü de içeren doğrusal olasılıksal gözlem modeli (3.12)'deki gibi tanımlanır.

$$Y = HX + N \quad (3.12)$$

Sonsal olasılığın en büyükleme yaklaşımı bilinmeyen X vektörünün tahmini için sonsal $P(X|Y)$ en küçükleyecek (3.13)'deki bir tahmin \tilde{X} bulmaktır.

$$\tilde{X} = \underset{X}{\text{ArgMax}} [P(X|Y)] \quad (3.13)$$

Bayes kuralını [68] kullanarak (3.13)'ü genişletirsek (3.14)'ü elde ederiz.

$$\tilde{X} = \underset{X}{\text{ArgMax}} \left[\frac{P(Y|X)P(X)}{P(Y)} \right] \quad (3.14)$$

Bu eşitliği en büyükleme Y bağı değildir, dolayısıyla

$$\tilde{X} = \underset{X}{\text{ArgMax}} [P(Y|X)P(X)] \quad (3.15)$$

elde edilir. Logaritma tekdüze artan işlev olduğuna göre, (3.15)'den (3.16) yazılabilir.

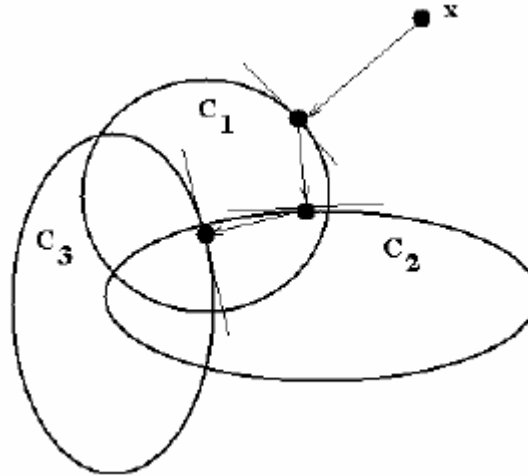
$$\tilde{X} = \underset{X}{\text{ArgMax}} [\log P(Y|X) + \log P(X)] \quad (3.16)$$

Burada $\log P(Y|X)$ logaritmik-olabilirlik işlevi, $\log P(X)$ ise de X için önsel veya önsel yoğunluk logaritması denilmektedir. Sonsal olasılığı en büyükleme (SOEB) için toplamdaki 2 terimi de en büyükleme gerekir. İlk terim olasılıksal davranışı, yani tahmin edilmeye çalışılan bilinmeyen ile gözlemler arasındaki kısıtları göstermektedir. İkinci terim ise yine olasılıksal anlamdadır ve bilinmeyen nasıl bir bilgi içerdiğini gösterir. Bu terim Bayesçi formülün gücünü gösterir, şöyle ki bütün olası çözümler içinde anlamlı çözümün hangisi olacağı kısıdındır. Eğer gürültü Gaussian

kabul edilirse ve önsel olarak X dışbükey işlev seçilirse, [69]'da görüldüğü üzere eşitlik (3.26)'nın en iyilenmesi dışbükeydir ve bu da \tilde{X} için bir çözümün bulunmasını ve bu çözümünde tek olmasını sağlamaktadır. Bu da kötü konumlanmış problem olsa bile bilinmeyen için yeterli sayıda kısıt yazılabilirse çözüm bulunabilmekte ve bu çözümde tek olmaktadır.

3.5 Küme Teorisi Yöntemleri

Dışbükey Kümelere İzdüşüm (DKİ) formülleri, YÇ onarımında olurlu çözüm için kısıt kümelerini kullanmak olarak tanımlanır. Bu kısıtlar gözlem verilerinin aslına sadakat olması, pozitiflik, sınırlı enerji, yumuşaklık ve benzeri kısıtlar olabilmektedir. YÇ onarım problemi bu kısıt kümelerinin kesişimi olarak dizayn edilir. DKİ vektör uzayındaki herhangi bir başlangıç noktasından eşanlı olarak bütün kısıt kümelerini sağlayacak özyinelemeli bir işlemdir. Verilen k dışbükey kısıt setlerinin kesişimi boş küme değilse özyinelemeli olarak DKİ bütün kısıtlarda dolaşır(Şekil 3.7). Bu özyineleme kısıtlar dışbükey ise yakınsar. Stark ve Oskoui YÇ görüntü onarımında DKİ yaklaşımını ilk önerenlerdir [70]. DKİ için daha detaylı bilgi [71]'de bulunabilir. Önsel veriler DKİ'de çok kolay bir şekilde kullanılabilir. İstenen çözüm karakteri için dışbükey olmak şartı ile kısıtlar eklenebilir. Bu setler maliyet işlevinde gösterilmesi zor olan pozitiflik veya sınırlı enerji kısıtlamaları da olabilir([72], [73]).



Şekil 3.7 Dışbükey kümelere izdüşüm algoritması

DÇ görüntüler ile YÇ görüntü arasındaki ilişkinin (3.17)'deki gibi olduğu daha önceden de verilmişti

$$y_k = H_k X \quad (3.17)$$

Kısıt kümesi (3.18)' deki gibi tanımlanır.

$$C_k = \{X : H_k X = y_k\} \quad (3.18)$$

Bu kümeler çözüm tahmini için bütün olası değerleri içerir. Ekstra görüntünün gözlenmesi eşitlik (3.18)'de yeni bir küme anlamına gelmektedir. Yeterince kısıt yazılabilirse kötü konumlanmış sistem iyi konumlanmış hale gelir. Kümelerin izdüşüm işleci (3.19)'daki gibidir.

$$P_k X = \begin{cases} X & \text{Eğer } H_k X = y_k \\ X + \frac{y_k - H_k X}{H_k H_k^T} H_k^T & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (3.19)$$

P_k , X 'in C_k kümesine izdüşümüdür. DKİ formülasyonunda başlangıç değeri bütün kısıtlara tutarlı olacak bir şekilde seçilmelidir. p kısıt kümelerinin toplam sayısını göstermek üzere n ninci tahmin X 'in izdüşüm serilerini kullanarak güncellenmesi (3.20) verildiği gibidir.

$$X^{n+1} = P_1 P_2 P_3 \dots P_p X^n \quad (3.20)$$

YÇ lü görüntünün tahmini için bu izdüşüm serileri tekrarlı olarak uygulanır. Kısıtların kapalılığı ve dışbükeyliliği özyinelemenin yakınsamasını sağlar [71]. Yüksek çözünürlük çözümü başlangıç değerine bağlıdır. Verilerin tutarlılık kısıtlarını ek olarak, çözümün belli bir aralıkta seçilmesi, sınırlı enerji, bir referans görüntüye benzerlik gibi

önsel bilgilerde kısıt olarak eklenebilir. Bu gibi önsel bilgilerin kısıt olarak eklenebilmesi gürültü, tutarsızlık ve eksik veriden dolayı kaynaklanan problemlere rağmen için gürbüz bir performans sağlanabilir.

3.6 Gözü Kapalı Onarım Yöntemleri

Birçok pratik uygulamalarda görüntülen sahne ile ilgili ön bilgi edinme pahalı, tehlikeli veya fiziksel olarak imkansız olmaktadır. Örneğin, uzaktan algılama veya astronomi gibi uygulamalarda orijinal görüntünün istatistiksel modelinin çıkartılması zordur veya görüntü elde edilmeden sahne hakkında özel bilgilerin bilinmesi imkansızdır ([74], [75]). Buna ilaveten, bozulma doğru olarak tespit edilemeyebilir. Hava / uydu görüntülerinde ve astronomide, NYF karakteristiği rasgele işlem olduğundan dolayı doğru olarak modellenemez [76]. Tıbbi video konferans gibi gerçek zamanlı görüntü uygulamalarında NYF parametreleri bilinmemektedir [77]. Bununla birlikte, bozulma modelini tahmin edilirken yapılan hata onarım sonucunu doğrudan etkilemektedir [52]. Bu gibi problemlerden dolayı, bu tür uygulamalarda algoritmanın hem sistem matrisini hem de orijinal sahne görüntüsünü tahmin etmesi gerekmektedir. Sırasıyla sistem matrisini (veya tersini) ve bilinmeyen görüntüyü tahmin etmeye gözü kapalı görüntü onarımı denir.

Yukarıda bahsedilen problemlerden dolayı yüksek çözünürlük algoritmalarında pratik olarak sistem matrisi (NYF) onarımdan önce hesaplanmaya çalışılır. NYF tahmini yapıldıktan sonra onarım için herhangi bir klasik onarım tekniği kullanılabilir ([78]-[81]).

Bu sınıftaki en popüler onarım tekniği olan özyinelemeli gözü kapalı ters evreşim yöntemi Ayers ve Dainty tarafından önerilmiştir [82]. Tahmin edilmeye çalışan görüntü $\tilde{f}(x, y)$, tahmin NYF $\tilde{h}(x, y)$ ve doğrusal bozulmuş görüntü $g(x, y)$ olsun. Başlangıç değeri için rasgele bir görüntü seçildikten sonra uzamsal ve Fourier alanında değişmeli

olarak bilinen kısıtlara zorlamaya çalışılır. Kısıtlar görüntü ve NYF hakkında bilinen bilgilerdir. Görüntü ve NYF pozitif olduğu kabul edilir. k nıncı özyinelemede

$$\tilde{H}_k(u, v) = \frac{G(u, v) \tilde{F}_{k-1}^*(u, v)}{|\tilde{F}_{k-1}(u, v)|^2 + \frac{\alpha}{|\tilde{H}_{k-1}(u, v)|^2}} \quad (3.21)$$

$$\tilde{F}_k(u, v) = \frac{G(u, v) \tilde{H}_{k-1}^*(u, v)}{|\tilde{H}_{k-1}(u, v)|^2 + \frac{\alpha}{|\tilde{F}_{k-1}(u, v)|^2}} \quad (3.22)$$

Burada α gürültünün enerjisidir ve eğer mümkünse gürültünün bozma seviyesi ile belirlenir. Güvenilir onarım için α dikkatli seçilmelidir. Bu algoritma belli bir özyineleme sayısına ulaşıncaya kadar veya tahmin yakınsamaya başlayasıya kadar devam eder. Bu yöntemin popüler olmasının en özenli nedeni hesaplama kolaylığıdır. Bunu temel alan bir sürü değişik yöntemler önerilmiştir. Genellikle farkları, gerçek görüntü ve NYF kabullenmeleri ve bunların görüntü ve Fourier alanında nasıl uygulanacağı kabullenmelerdir ([82]-[87]). Aynı yöntemin değişik bozulmuş görüntüler için geliştirilmiş halleri [88]'de bulunabilir. Bu yöntemin bir başka avantajı ise gürültüye karşı duyarlılığıdır çünkü Wiener süzgeçlere benzeyen denklemler kullanılmasıdır (eşitlik 3.21 ve 3.22). Bu yöntemin en büyük dezavantajı güvenilirlikten yoksun olmasıdır. Teklik ve yakınsama özelliği kesin değildir. Bunun yanı sıra, onarım başlangıç görüntü tahminine duyarlıdır ve algoritma genellikle kararlı değildir.

Eşlenik gradyen yöntemi özyinelemeli gözü kapalı ters evreşim yönteminin kararlılık problemini azaltmak için Lane tarafından önerilmiştir [89]. Görüntü ve NYF belirli bir sınırdan pozitif olduğu kabul edilmiştir. Temel olarak, aşağıdaki maliyet fonksiyonunu eşlenik gradyen en iyilemesi yöntemi ile en küçükleme işlemidir.

$$J(\hat{f}(x, y), \hat{h}(x, y)) = \sum_{(x, y) \in \mathcal{I}^f} \hat{f}^2(x, y) + \sum_{(x, y) \in \mathcal{I}^h} \hat{h}^2(x, y) + \sum_{\forall (u, v)} |G(u, v) - \hat{F}(u, v) \hat{H}(u, v)|^2 \quad (3.23)$$

Burada γf ve γh görüntüdeki ve NYF tahminindeki bilinen kısıtlara uymayan piksel değerleridir. Bu algoritma makul düşük hesaplama karmaşıklığına sahiptir, gürültüye karşı oldukça gürbüzdür ve en küçükleme rutini de genellikle yerel en küçük tuzakına takılır.

4. TEZ KAPSAMINDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

Sayısal görüntü işleme son yıllarda önemi giderek artmakta ve buna paralel olarak ta gelişmekte olan bilim dalıdır. Görüntü işleme uygulama alanlarından yer bilim ve hava fotoğraflarının yorumlanması her ne kadar çok öncelere dayansa da yoğun bilgisayar kullanımı, uydu görüntüleri, tıbbi görüntüleme, sivil ve askeri alanlara yönelik çalışmaların gelişmesi son 40 yıl içerisinde gerçekleşmiştir.

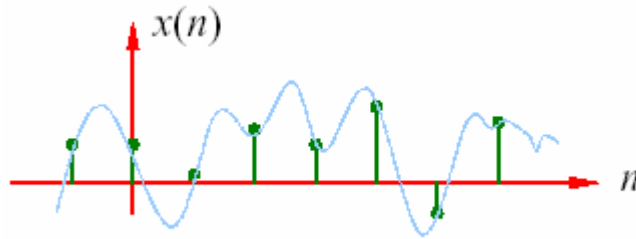
Görüntü işleme alanında kaydedilen ilerlemelerle birlikte tüketici pazarında da yüksek çözünürlüklü sayısal görüntü işleme araçlarına olan ilgi artmıştır. Görüntü işleme teknolojisinde kaydedilen ilerlemelerle mega piksellerce görüntü elde edebilmesine rağmen daha yüksek çözünürlüklü görüntü elde etme isteği devam etmektedir. Dolayısıyla görüntü işleme bilimi ve teknikleri önemini korumaya devam edecektir. Görüntü işleme teknikleri görüntüde var olan bilgilerin daha anlaşılır ya da ihtiyaca daha uygun hale getirmesinin yanı sıra varolan bilgilere ekstra bilgi de eklemektedir.

Bu doktora tezi ile alandaki gelişmeleri uygulama ve özgün katkı olanaklarının araştırılması amaçlanmıştır. Tezde yapılan çalışmalar temel olarak iki başlık altında toplanabilir: Görüntülerin karşılaştırılması ve yüksek çözünürlük çalışmaları. Yüksek çözünürlük uygulamanın temeli olan görüntü karşılaştırma konusunda hücre alanları yöntemi olarak isimlendirdiğimiz yöntemle alt piksel seviyelerinde karşılaştırma yapılmış, daha sonraki çalışmalar yüksek çözünürlük alanında olmuştur. Bundan sonraki bölümlerde yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçların katkısı verilecektir.

4.1 Hücre Alanları ile İmge Karşılaştırma

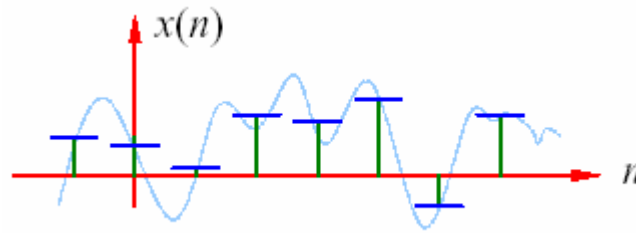
Gerçek sahnenin piksellere dönüştürülme işlemi matematiksel olarak görüntü yakalama ve örnekleme olarak formülize edilir. Bölüm 3.1’de klasik anlamda

örnekleme teoremi verilmişti. Klasik örnekleme teoremine göre Şekil 4.1’de görüldüğü gibi örnek değerleri ele alınan fonksiyonun örnek alınan noktasındaki değeridir.



Şekil 4.1 Nokta örnekleme

Ancak gerçek görüntü uygulamalarında örnekleme nokta örnekleme değildir, Şekil 4.2’de de görüldüğü gibi örnek noktası civarındaki noktaların ortalamasıdır.



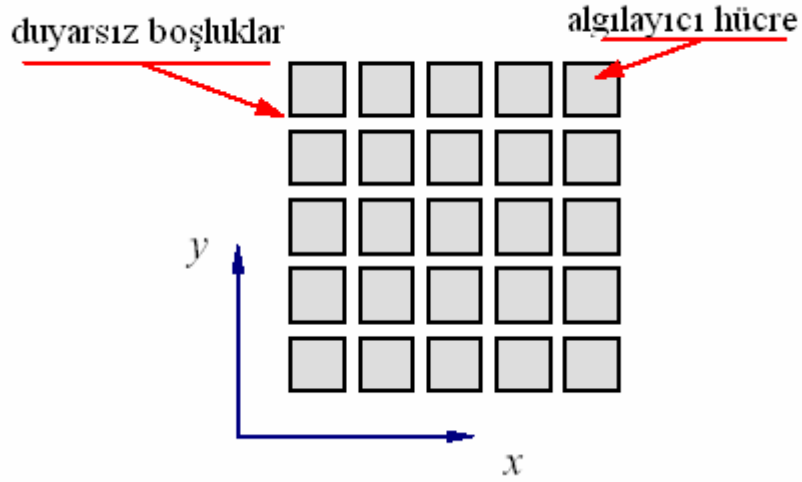
Şekil 4.2 Alan örnekleme

Görüntü algılayıcı hücreleri üzerine düşen fotonların toplanarak önce elektriksel yük, daha sonra da elektriksel gerilime dönüştürülmesi işlevi (4.1)’de gösterildiği gibi hücre yüzey alanı üzerinde ışık şiddetinin bir entegrali olarak ifade edilir.

$$V_{hücre} = Q \left(\int_{\Delta x} \int_{\Delta y} \int_{\Delta t} F(x, y, t) dt dy dx \right) \quad (4.1)$$

Burada F ışık şiddetini Q ise sayısallaştırma / nicemlemeyi göstermektedir. Normal olarak YBA hücreleri arasında fiziksel ve elektriksel gereklilikten dolayı boşluklar vardır (Şekil 4.3) ve optik sistemden geçen tüm fotonlar hücreler üzerine

düşmeyebilir. Ancak çoğu modern YBA görüntü algılayıcılarda bu boşluklar öylesine küçüktür ki imalatçı broşürlerinde sıfır olarak verilmekten çekinilmemektedir. Bu tezde de hücreler arasındaki boşluk olmadığı varsayılmıştır.

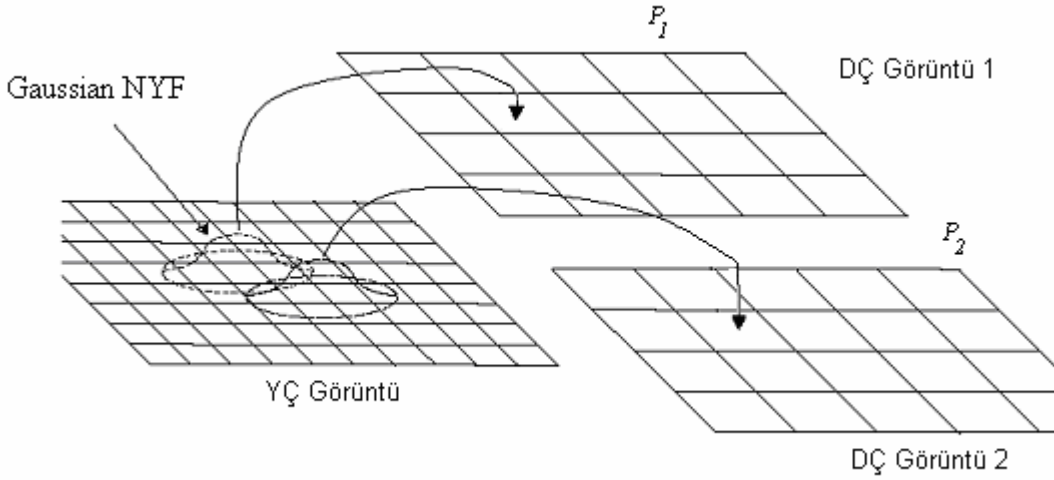


Şekil 4.3 YBA görüntü algılayıcısı

Sayısal görüntülerimizin sürekli bir ışık görüntüsünden değil de, ayrık ışık demetlerinin oluşturduğu ama elimizdekilerden daha yüksek çözünürlüklü bir görüntüden üretildiği varsayılır ise (ki bu varsayım [13] ve [15]'de ispatsız olarak kullanılmıştır) Şekil 4.4'de gösterilen yapı ortaya çıkar. Burada iki boyutlu Gaussian eğrilerin altında kalan YÇ piksellerin (ayrık ışık demetleri) DÇ piksele katkısı yine (4.1)'deki entegral ile belirlenir. Yani entegral sınırları YÇ pikselin kare alanı, W bir gaussian, X ise YÇ pikselin değeri olur. Şekil 4.4'de gösterildiği gibi DÇ piksellerin değerleri ilgili YÇ piksellerin bir ağırlıklı ortalamasıdır. Bu ağırlık fonksiyonu da 2-boyutlu Gaussian olarak kabul edilir.

İki boyutlu Gaussian fonksiyonu

$$g(x, y) = \exp\left(\frac{(x - \mu_x)^2 + (y - \mu_y)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.2)$$



Şekil 4.4 DÇ piksellerin YÇ ayırık ışık demetlerinden elde edilmesi

şeklinde. Burada μ_x, μ_y Gaussian fonksiyonun ortalama değerlerini, σ ise standard sapmasını göstermektedir. Pratik uygulamalarda Gaussian fonksiyonunun normalize edilmiş hali kullanılmaktadır. Normalize edilmiş fonksiyonun kesikli ifade matrisini, boyutlarını 3×3 aldığımızda W_1 ile gösterirsek (standard sapma örnekte 0.5 alınmıştır)

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \\ 0.0838 & 0.6193 & 0.0838 \\ 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

bulunur. Matris elemanlarının toplamının 1 olmasına dikkat edilir. Uygulamalarda Gaussian *NYF* fonksiyonunun geçerli genişliği tahmin algoritmaları ile bulunabilir. Kuramsal olarak sürekli *NYF* fonksiyonunun sınırları yoktur. Ancak, *NYF* Şekil 1.19'daki gibi ikiye ayrıldığından ve burada sadece NYF_{kamera} ile ilgilendiğimizden seçilen matris boyutu sadece hangi büyüklükteki doğrusal ötelemeler ile ilgilendiğimiz bir sonucudur. 3×3 ' lük bir NYF_{kamera} ile her iki yönde $(-0.5, +0.5)$ aralığında kalan ötelemeler temsil edilebilir.

Gaussian fonksiyonu (x_0, y_0) kadar ötelediğimiz zaman oluşan fonksiyon da

$$g(x+x_0, y+y_0) = \exp\left(\frac{(x-\mu_x+x_0)^2 + (y-\mu_y+y_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.4)$$

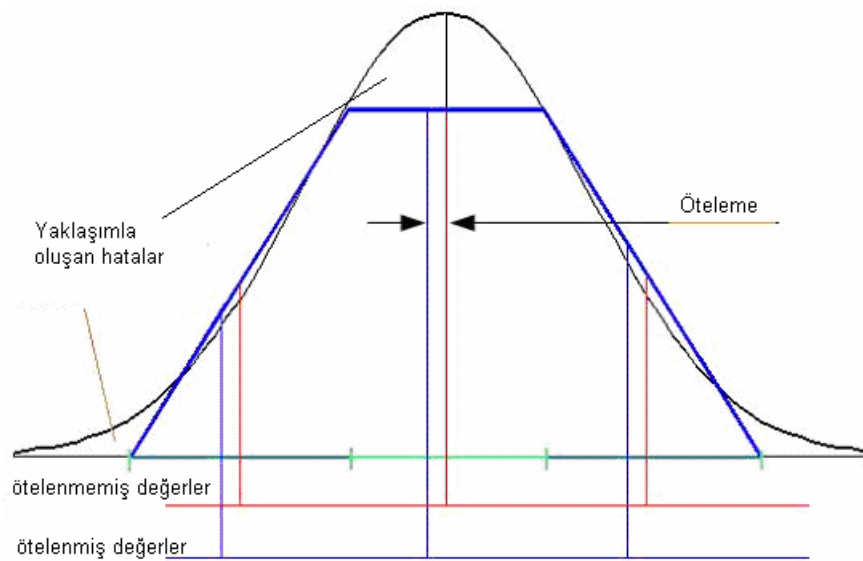
şeklindedir. Yine 3x3 matris formatında gösterirsek

$$W_2 = \begin{bmatrix} 0.0004 & 0.0067 & 0.0020 \\ 0.0221 & 0.3638 & 0.1096 \\ 0.0221 & 0.3638 & 0.1096 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Burada öteleme miktarları $x_0 = 0.5$, $y_0 = 0.2$ ve $\sigma = 0.5$ alınmıştır. W_2 ile W^2 'in farkı ise W^2 'in vektörize edilmiş sütun matrisi olmasıdır. Yani örnekte

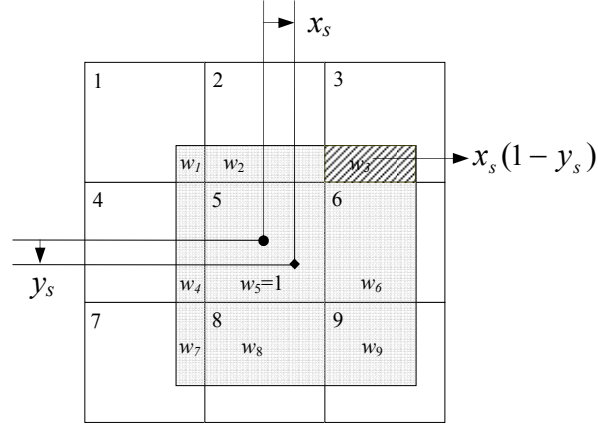
$$W^2 = [0.0004 \quad 0.0067 \quad 0.0020 \quad 0.0221 \quad 0.3638 \quad 0.1096 \quad . \quad . \quad .] \quad (4.6)$$

dir. Şekil 4.5'de Gaussian eğrisi gösterilmiş, Gaussian yerine doğrusal yaklaşımının kullanılması durumunda ortaya çıkan yapı ve hatalar da işaretlenmiştir.



Şekil 4.5 1-Boyutlu Gaussian eğrisinin lineer yaklaşımı

Yaklaşımındaki ağırlıkların iki-boyutlu eşdeğeri ise Şekil 4.6'daki w_i alanlarıdır. Şekil 4.6'da 9 küçük kare ayrıık komşu ışık demetlerini, büyük kare ise YBA hücrelerini temsil etmektedir.



Şekil 4.6 DÇ imgenin YÇ ışık demetlerinden elde edilmesi

Bir ayrıık ışık demetinden hücre üzerine düşen foton miktarı Şekil 4.6'da da görüldüğü gibi ışık demetini ve hücreyi temsil eden karelerin kesişim alanı ile orantılıdır (foton yoğunluğunun demet içinde homojen olduğu kabullenmesi ile). Böylece hücre üzerine düşen toplam foton sayısı, ya da eşdeğer olarak hücrede üretilen yük ve dolayısı ile gerilim hücre ile kesişen ayrıık ışık demetleri şiddetlerinin kesişim alanları ile ağırlıklandırılmış toplamına (4.7)'deki gibi doğrusal olarak ilintili olacaktır.

$$P_L = \sum_{i=1}^9 P_H(i) w(i) \quad (4.7)$$

$w(i)$, i 'inci ışık demetini temsil eden küçük kare ile YBA hücrelerini temsil eden büyük karenin kesişiminde oluşan dikdörtgensel bölgenin alanı, $P_H(i)$ ise i 'inci ayrıık ışık demeti şiddetidir. Kolayca görüleceği gibi (4.7) (4.1)'in ayrıık eşdeğeridir. (4.7) kullanılarak Şekil 1.19'deki modelin k numaralı öteleme bloğunun ayrıık sürümü matris formunda yazılabilir.

$$P_L^k = P_H W^k \quad (4.8)$$

Burada P_H ayrık ışık demetlerinden oluşan görüntü matrisinin vektörize edilmiş formudur. Her bir 3×3 'lük matrisin satırları birleştirilerek 1×9 'luk satırlar ve bunlar da birleştirilerek $(2N+1)(2M+1) \times 9$ 'luk matris oluşturulur. W^k kesişim dikdörtgenlerinin alanlarından oluşan 3×3 ağırlık matrisinin satırlarının aynı şekilde birleştirilerek 9×1 'lik sütun matrisi haline getirilmiş şeklindedir. P_L^k ise k 'nıncı $N \times M$ görüntünün $NM \times 1$ 'lik sütun matrisidir.

W^k matrisini sadece öteleme ve alt-örnekleme operatörü olarak düşünersek, sadece ayrık ışık demetleri matrisi değil herhangi bir görüntü üzerinde de uygulanabileceğini görürüz. P_L^1 ve P_L^2 görüntülerini ele alalım. Bu görüntüler, modelimize göre W^1 ve W^2 operatörleri ile ötelenmiş görüntülerdir. W^1 ile ötelenmiş görüntü olan P_L^1 görüntüsünün W^2 ile de ötelenmesi durumunda toplamda W^{12} kadar bir ötelemenin (alt-örnekleme işlemini görmezden gelirse) gerçekleştiğini söyleyebiliriz. Aynı şekilde W^2 ile ötelenmiş görüntü olan P_L^2 görüntüsünün W^1 ile ötelenmesi ile W^{21} kadarlık bir toplam öteleme elde edilecektir. W^{21} ile W^{12} ötelemelerinin aslında aynı miktarda ötelemeler olduğu gerçeğini kullanarak

$$P_L^1 W^2 = P_L^2 W^1 \quad (4.9)$$

eşitliğini yazabiliriz. Buradan

$$P_L^1 W^2 - P_L^2 W^1 = 0 \quad (4.10)$$

ve $P_L^1 - P_L^2$ ve $W^1 - W^2$ matris çiftlerinin

$$\begin{bmatrix} P_L^1 & P_L^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W^2 \\ W^1 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.11)$$

şeklinde yazılması ile homojen doğrusal denklem sistemi elde edilir. Homojen sistemin çözülebilmesi için kısıt denklemleri olarak görüntü enerjilerinin korunumu

$$\sum_j W^k(j) = 1, \quad k = 1, 2 \text{ ve } j = 1 \dots 9 \quad (4.12)$$

kullanılır ise sistem eşitlik-kısıtlı-en-küçük-kareler [90] yöntemi ile çözülebilmemiş gibi görünse de burada çözüm önünde oldukça önemli birkaç problem vardır. Şekil 4.6'ya ikinci bir bakış ile görülebileceği gibi kesişim alanlarını ifade eden 9 sayı doğrusal olmayan bir şekilde birbirlerine bağımlıdırlar. Diğerlerini etkilemeden herhangi birisini değiştirmek mümkün değildir. Dikkatli bir analiz aslında elimizde 4 adet bağımsız sayı olduğunu diğerlerinin bunlara bağımlı olduğunu göstermeye yeterlidir. Yani (4.11)'deki denklem sistemimizin rankı 4x2 dir (her bir W^k için 4). Buna karşılık sadece 1x2 eşitlik kistası konulmuş ve rankı 9x2 yapmak için 4x2 bağımsız bağıntı daha gerekli olduğundan sistemin bu haliyle tek çözüm üretmesi mümkün değildir. Nokta yayılım fonksiyonunun birçok araştırmacının kabul ettiği yaklaşık bilinen bir Gaussian olduğu varsayımı yapıldığında bu eksiklik giderilebilir. Ancak Gaussian kısıtının doğrusal denklem sistemine eklenmesi mümkün değildir. Bu durumda *doğrusal-olmayan-kısıtlı-en-küçük-kareler* çözümü için özyinelemeli en uygun şekle sokma teknikleri kullanılabilir. Özyineleme ise, alt piksel ötelemenin hesabında tercih etmediğimiz bir yaklaşımdır. Çünkü alt piksel imge çakıştırmanın amaçlarından birisi, daha önce de değinildiği gibi, yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmektir ki ön işlem sayılabilecek bir hesabın kendisinin karmaşıklığı asıl işlemten daha fazla olmamalıdır. Yine de özyinelemeli alt piksel imge çakıştırma teknikleri geliştirilmiş [91] ve iyi (iyileştirme özyinelemenin doğasında vardır) sonuçlar alındığı bildirilmiştir.

Eşitlik (4.7)'yi, kesişim alanlarını evrensel ötelemeler x_0 ve y_0 cinsinden yazarak yeniden düzenleyelim. Şekil 4.6 bize hücreler arasındaki bağıntıyı göstermektedir. Örneğin $W(2)$ ve $W(8)$ birbirinin tamamlayıcısıdır ve toplamları 1'dir. Şekilden diğer birbirine lineer bağımlı hücre kesişmelerini x_0 ve y_0 ötelemeleri cinsinden yazarsak aşağıdaki bağıntıları elde edilir.

$$\begin{aligned}
w(1) &= (1-x_s)(1-y_s) & w(2) &= 1-y_s & w(3) &= x_s(1-y_s) \\
w(4) &= 1-x_s & w(5) &= 1 & w(6) &= x_s \\
w(7) &= y_s(1-x_s) & w(8) &= y_s & \text{ve} & w(9) &= x_s y_s
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Buradan da eşitlik kısıtlarını (4.14)'deki gibi elde ederiz.

$$\begin{aligned}
w(5) &= 1 \\
w(2) + w(8) &= 1 \\
w(4) + w(6) &= 1 \\
w(1) + w(3) + w(7) + w(9) &= 1 \\
w(1) + w(6) + w(8) - w(9) &= 1 \text{ ve} \\
w(3) - w(6) + w(9) &= 0
\end{aligned} \tag{4.14}$$

(4.14)'dekine benzer daha birçok eşitlik kısıtı yazılabilmesine rağmen diğer yazılan kısıtlar birbiriyle lineer bağımlı olmaktadır. Kısıtlarımızın hücre alanları yaklaşımı ile elde edildiğini göz önünde tutarak eşitlik kısıtlı en küçük kareler denklemini

$$\begin{aligned}
I_{L1}W_{12} &= b \\
BW_{12} &= d
\end{aligned} \tag{4.15}$$

şeklinde yazabiliriz. Burada, W_0 sıfır ötelemeyi temsil etmek üzere $b = I_{L2}W_0$, B ve d , kısıt denklemleri (4.14)'deki katsayılar, I_{L1} ve I_{L2} ise çakıştırmayı istediğimiz iki sayısal görüntünün vektörize edilmiş matris halindeki piksel değerleridir. Sıfır öteleme ise Şekil 4.6'daki büyük karenin küçük 9 adet küçük karenin tam ortasında durması ile oluşan durum olup kesişen alanlar simetrik ve

$$W_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \end{bmatrix}^T \tag{4.16}$$

şeklinde yazılabilir. Hücre alanları ile alt piksel görüntü çakıştırmanın ilk olarak kullanımı [92] ve [93]'de gösterilmiştir.

Hücre alanları yönteminin gürültüye karşı duyarlılığının hesaplanması gerekir. Burada yapılması gereken, algoritma ile bulunacak ötelemelerin gürültüyü temsil eden pertürbasyonlara bağımlılığını ifade eden bir formülasyon bulunmasıdır. Yöntemin ana noktası eşitlik kısıtlı en küçük kareler sistemidir. Amacımıza uygun *Eşitlik Kısıtlı En Küçük Kareler Sistemi*

$$\begin{aligned} Ax &= b \\ Bx &= d \end{aligned} \quad (4.17)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada $A \in \mathfrak{R}^{m \times 9}$ ve $b \in \mathfrak{R}^{m \times 1}$ matrisleri imgelerin piksel değerlerinden oluşturulmuş vektörize edilmiş matrisler ve $B \in \mathfrak{R}^{6 \times 9}$ ve $d \in \mathfrak{R}^{6 \times 1}$ ise (4.14)'de belirtilen kısıtların matrisleridir. m , imgelerin çakışan bölgelerindeki piksel sayısını göstermektedir ve imgelerdeki tüm pikseller kullanılır ise $m = N \times M$ 'dir. x ise (4.7)'de ifade edilen ağırlıklardır (Şekil 4.6). x_6 ve x_8 , sırasıyla yatay ve dikey ötelemelere eşit olduklarından, özel öneme sahiptirler. Algoritma tamamen resimler arasındaki farklara dayandığından resimlerdeki gürültüyü imgelerin sadece bir tanesinde olan pertürbasyonlar şeklinde gösterebiliriz.

$$\begin{aligned} A(x + \Delta x) &= b + \Delta b \\ B(x + \Delta x) &= d \end{aligned} \quad (4.18)$$

Δb pertürbasyonuna karşılık bulunacak çözümdeki hatalar da Δx olarak gösterilmiştir. Tabii ki (4.17) ve (4.18) kullanılarak

$$\begin{aligned} A\Delta x &= \Delta b \\ B\Delta x &= 0 \end{aligned} \quad (4.19)$$

şeklinde hata sistemi yazılabilir. B matrisinin kolon rankı $p = 6$ 'dır (4.14). (4.19)'da satır ve sütun yer değiştirme işlemleri ile

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

yazıldığında B 'nin ilk 6 sütununun rankı 6 olur ki bu da sonraki işlemlerimizi basitleştirir. B matrisi bu işlemten sonra

$$\begin{aligned} B_p &= B(:, 1:p) \\ B_q &= B(p+1:9, :) \end{aligned} \quad (4.21)$$

şeklinde iki parçaya ayrılabilir, ki B_p $p \times p$ olup rankı p 'dir. x vektörünü de buna uygun şekilde iki parçaya ayırırsak

$$B_p \Delta x_p + B_q \Delta x_q = 0 \quad (4.22)$$

elde edilir. Burada

$$\Delta x_p = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta x_4 \\ \Delta x_5 \\ \Delta x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - \Delta x_s)(1 - \Delta y_s) \\ 1 - \Delta y_s \\ \Delta x_s (1 - \Delta y_s) \\ 1 - \Delta x_s \\ 1 \\ \Delta y_s (1 - \Delta x_s) \end{bmatrix} \text{ ve} \quad (4.23)$$

$$\Delta x_q = \begin{bmatrix} \Delta x_6 \\ \Delta x_8 \\ \Delta x_9 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Her iki tarafı B_p^{-1} ile çarpıp düzenlersek

$$\Delta x_p = -B_p^{-1} B_q \Delta x_q \quad (4.25)$$

elde edilir. (4.25) ve

$$A_p \Delta x_p + A_q \Delta x_q = \Delta b \quad (4.26)$$

(4.21)'dekine benzer bir işlemle elde edilen (4.26) kullanılırsa (4.27) elde edilir.

$$(A_q - A_p B_p^{-1} B_q) \Delta x_q = \Delta b \quad (4.27)$$

Buradan

$$C \Delta x_q = \Delta b \quad (4.28)$$

yazılabilir. Burada

$$C = (A_q - A_p B_p^{-1} B_q) \quad (4.29)$$

dir. (4.28)'ün en-küçük-kareler çözümü, bu durumda,

$$\Delta x_q = C^\Gamma \Delta b \quad (4.30)$$

olmaktadır. Burada Γ tersi-gibi (pseudo-inverse) operasyonu olup $C^\Gamma \in \mathfrak{R}^{3 \times m}$ 'dir. (4.23) ve (4.24)'den biliyoruz ki

$$\begin{aligned}\Delta x_s &= C^\Gamma(1,:) \Delta b \\ \Delta y_s &= C^\Gamma(2,:) \Delta b\end{aligned}\tag{4.31}$$

dir. Bu durumda her iki yöndeki hataların normları

$$\begin{aligned}\|\Delta x_s\| &= \|C^\Gamma(1,:)\| \|\Delta b\| \\ \|\Delta y_s\| &= \|C^\Gamma(2,:)\| \|\Delta b\|\end{aligned}\tag{4.32}$$

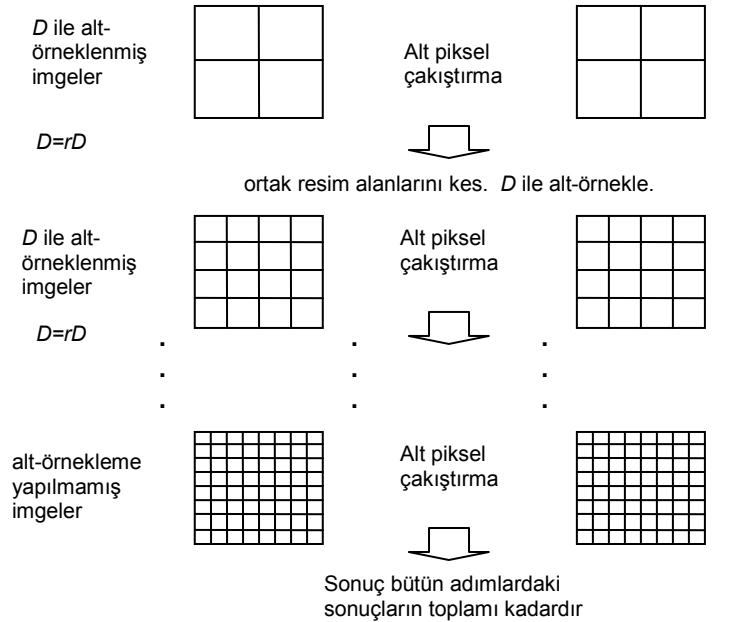
olur. Yani, ötelemelerin bulunmasında yapılan hatanın normu¹, imgelerdeki gürültünün normuna doğrusal olarak bağlıdır[94]. (4.32)'de eşitliklerin sağ tarafındaki katsayılar, m sisteme giren piksel sayısı olmak üzere, m adet değerin normu olduğuna göre az sayıda pikseldeki gürültünün bir etkisi olmadığı anlaşılır. 0.01 piksellik bir öteleme hatası için bütün piksellerin değerlerinde ortalama 0.01'lik aynı yönde bir hata olması gereklidir [94].

Yukarıda tanımlandığı hali ile hücre alanları yöntemi 1 pikselden büyük ötelemeleri hesaplayamadığından, büyük ötelemeleri hesaplamak için çoklu çözünürlük yöntemi geliştirilmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır[94]. Çoklu çözünürlük algoritmasının akışı Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Başlangıçta çakıştırılacak resimler D oranında alt-örneklenirler. D 'nin seçimi uygulamaya göre önem kazanmaktadır. Alt-örnekleme sonucunda her iki yöndeki ötelemenin alt-örneklenmiş imgedeki 1 pikselden küçük olması gereklidir. Alt örnekleme için yine hücre alanları ile bulunan ağırlıklar

¹ (Vektör normları *Frobenius norm* ya da, birçok referansta, $\|a\| = \frac{\text{sqrt}(a^T a)}{\text{sqrt}(M)}$ şeklinde

tanımlanır ve ilintisiz-beyaz gürültü durumunda tayfsal güçtür.)

kullanılabilir. Yani, alt-örneklenmiş resimdeki bir pikselin üretimi için asıl resimde ilgili bölgeye karşı gelen D^2 adet pikselin ortalaması kullanılır. Alt-örneklenmiş resimler üzerinde hücre alanları yöntemi ile alt piksel çakıştırma yapılır. Bulunan kaymalar asıl resimlerde birçok piksel seviyesinde olabileceği için bulunan bu kaymalar asıl resim koordinatlarına çevrilir ve her iki resimde çakışmayan (ortak olmayan) alanlar resimlerden çıkarılır. Aynı işlemler ilgisiz kısımları kesilmiş resimler üzerinde tekrar edilirken her seferinde alt-örnekleme oranı azaltılır. Oranın ne kadar azaltılacağı, alt piksel çakıştırmadan beklenen hassasiyet ile karar verilir. Çok gürültülü resimlerde her basamakta alt-örnekleme oranının yarıya indirilmesi uygun iken, deneysel çalışmalardan görüldüğü üzere[96], kaliteli resimlerde hassasiyet 0.02 pikseller seviyesinde gerçekleşmektedir ve sadece birkaç basamakta asıl resim çözünürlüğü üzerinde çalışma olanağı bulunmaktadır. Ancak, bu tez çerçevesinde en iyi oranların nasıl seçileceği konusunda ayrıntılı bir çalışma yapılmamıştır.



Şekil 4.7 Çoklu çözünürlük yaklaşımı ve hücre alanları ile imge çakıştırma

Şu ana kadar anlatılan kısımda sadece öteleme olan görüntülerin karşılaştırılması için yinelemeli çoklu çözünürlük yaklaşımından bahsedildi. Burada ise önerilen yöntem dönme de içerecek şekilde geliştirilmiştir. Öteleme için yine aynı yöntem kullanılmıştır. Dönme için ise, referans görüntüsü belli açılarla (0.1 aralıklarla) döndürülmüş ve karşılaştırılacak görüntü de en büyük ilintiyi veren açı dönme açısı olarak belirlenmiştir.

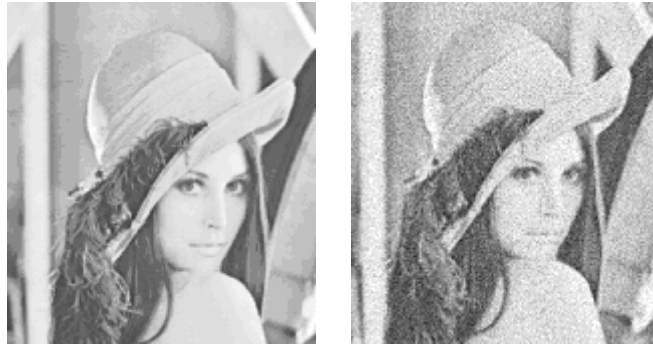
Çakıştırma için önerilen algoritmanın adımları aşağıdadır.

1. Dönme etkisinin az olduğu merkeze yakın bir bölge seçilir.
2. Yinelemeli çoklu çözünürlük yaklaşımı ile öteleme miktarı bulunur.
3. Bulunan öteleme miktarı kadar karşılaştırılacak görüntü ötelenir.
4. Referans görüntüsü belli aralıklara döndürülür ve ötelenmiş görüntü ile en büyük ilintiyi veren aralık dönme açısı olarak belirlenir.
5. Çakıştırılacak görüntüler bulunan dönme açısı kadar döndürülür.
6. Çakıştırılacak görüntüler referans noktasına gelecek şekilde ters ötelenir ve döndürülür.
7. Çakıştırılacak görüntü piksellerinin ortalamadan farkları bulunmuştur. Belli bir eşik değerinden büyük olan farka ait pikseller aykırı değer olarak kabul edilir. Bundan sonraki hesaplamalarda aykırı değer olarak tespit edilen piksel değerleri hesaba katılmaz.
8. Eğer bulunan dönme ve öteleme miktarları belli bir epsilon değeri kadar veya belli bir özyineleme sayısına ulaşıncaya kadar adım 2 ye dönlür.

4.1.1 İmge karşılaştırmanın deneysel çalışmaları

Yöntemlerin sonuçlarının doğruluğu ancak ötelemeleri bilinen imgelerin algoritmalara uygulanması ile ispatlanabilir. O nedenle yapay olarak kaydırılmış resimler üretme ihtiyacı vardır. Yüksek çözünürlüklü Lena ve Pentagon imgelerinden değişik miktarlarda doğrusal kaydırılmış (alt piksel seviyesinde) düşük çözünürlüklü

resimler elde edilmiştir. Bunun için [97]'de kullanılan yöntemle benzer bir yöntem kullanılmıştır. Aslında bu yabancı bir yöntem değildir. Şekil 4.4'de gösterilen ve hücre alanları bölümünün ilk kısımlarında anlatılan yöntemin bir eşdeğeridir. Yani resimler alt-örneklenirken kaydırma operasyonunu temsil eden matrisin elemanları bulandırma fonksiyonu istenilen miktarlarda kaydırılarak hesaplanmıştır. Tam sayı piksel kaymalar ise herhangi bir görüntü işleme yazılımı yardımı ile gerçekleştirilebilir ve öyle yapılmıştır (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9). Örneğin Şekil 4.8'da $x_s=5.65$ 'lik ötelemenin 0.65'lik kısmı Şekil 4.4'deki yöntemle, 5 piksellik kısmı ise bir görüntü işleme yazılımının kesme özelliği kullanılarak elde edilmiştir. Bu ötelemeler tek başına bir şey ifade etmezler. Ötelemenin tanımlı olabilmesi için en az iki resim gereklidir ki ötelemelerin farkı çakıştırma algoritmaları tarafından bulunur.



Şekil 4.8 a) Lena imgesi, b) Kaydırılmış Lena (5.65, 8.43) SNR=40dB



Şekil 4.9 a) Pentagon imgesi, b) Kaydırılmış Pentagon (5.65, 8.43) SNR=50dB

Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de sırasıyla Lena ve Pentagon imgeleri ile yapılan deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir. Hücre alanları yönteminin, sonuçlara göre (bilinen ötelemelere olan yakınlık), karşılaştırılan diğer yöntemlere üstünlüğü belirgindir. Gradyen tabanlı özyinelemeli geometrik dönüşüm tekniği ([23]) gürültünün artması ile önemli hatalar üretmeye başlamıştır. Bu sonuç türevlerin gürültüye duyarlı olmasına bağlanabilir. Bu deneysel çalışmada sadece öteleme yapılmış, dönme uygulanmamıştır.

Tablo 4.1 Lena görüntüsünün sonuçları Lena, $x_s=8,43$, $y_s=5,65$

SNR	Hücre Alanları		Faz İlintisi		Geom, Dönüşüm	
60	8,4138	5,6779	8,3433	5,6723	8,5255	5,6848
55	8,4151	5,6777	8,3646	5,6539	8,5284	5,6742
50	8,4153	5,6812	8,3967	5,6335	8,5264	5,6569
45	8,4102	5,6783	8,4248	5,6125	8,5133	5,7064
40	8,4202	5,6785	8,4431	5,5962	8,5602	5,6317
35	8,4196	5,6795	8,4517	5,5703	8,6097	5,6766
30	8,3231	5,6721	8,4447	5,5554	8,3370	5,2830

Tablo 4.2 Pentagon görüntüsünün sonuçları Pentagon, $x_s=8,43$, $y_s=5,65$

SNR	Hücre Alanları		Faz İlintisi		Geom, Dönüşüm	
60	8,4138	5,6817	8,3480	5,6725	8,4819	5,6918
55	8,4147	5,6817	8,3695	5,6583	8,4807	5,6916
50	8,4146	5,6821	8,3947	5,6413	8,4809	5,6919
45	8,4151	5,6819	8,4187	5,6173	8,4815	5,6933
40	8,4136	5,6823	8,4361	5,6013	8,4817	5,6962
35	8,4128	5,6811	8,4553	5,5902	8,4764	5,6838
30	8,4181	5,6804	8,4615	5,5747	7,2257	3,8213

Hücre alanları yöntemi ve ilgin dönüşüm gibi doğrudan piksel değerlerini kullanan yöntemlerin genel parlaklık oynamalarına ve resmin gamma değerine oldukça bağımlı olacağı açıktır. Şekil 4.10’da değişik gamma değerlerine sahip olan görüntüler verilmiştir. [95]’de hücre alanları yönteminin parlaklık değişimlerinden en az etkilenmesi için bir yöntem önerilmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Bu yöntemde piksel değerleri yerine

$$\Delta f(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

şeklinde tanımlanan bir türev süzgecinden geçmiş değerler kullanılmaktadır. Böylece piksel değerlerindeki bağıl değişim önem kazanmaktadır. Türev ise

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} &\approx \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x} \text{ ve} \\ \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} &\approx \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y} \end{aligned} \quad (4.34)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Türev değerlerinin kullanıldığı algoritma da verilen gamma değerleri oynanmış imgeler üzerinde uygulanmış ve sonuçlar ise Tablo 4.3 ile Tablo 4.6 arasında gösterilmiştir. Ötelenmiş ve gürültü eklenmiş görüntüler iki boyutlu evre ilintisi ([35], [97]), ilgin dönüşüm ([24]) ve alanlar tekniklerine uygulanmış ve ötelenme miktarlarında bulunan hatalar karşılaştırılmıştır. Gerçekçi bir karşılaştırma için diğer çalışmalarda, varsa, kullanılan/önerilen ara değerlendirme ve özyineleme kısımları uygulanmamıştır. (0,5, 0,5) piksel ötelenmiş genel parlaklık dengesi sağlanmış (PDS) Lena görüntüsü ile aynı ötelemelere sahip 0,5 ve 1.75 gamma değerlerine göre düzeltilmiş görüntülerle hesaplanan öteleme sonuçları verilmiştir. Parlaklık seviyelerin sonuçları ne kadar etkilediği Tablo 4.3'de açıkça görülmektedir. Diğer tablolarda parlaklık etkisi giderilmiş alanlar yöntemi en yüksek başarıyı (en küçük hata) göstermiş, en kötü sonuçlar ise ilgin dönüşüm yöntemi ile üretilmiştir. Alanlar ve evre ilintisi yöntemleri düşük gürültü seviyelerinde birbirlerine yakın sonuçlar üretmiş, yüksek gürültü seviyelerinde ise evre ilintisi gürültünün etkisini göstermeye başlamıştır. İlgün dönüşüm ise yüksek gürültü seviyelerinde tamamen hatalı ötelemeler bulmuş olup yöntemin gürültü içeren görüntülerin alt piksel öteleme hesabında doğrudan kullanılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır. İlk iki yöntem gürültüde başarıyı doğal



Şekil 4.10 a) Referans pentagon görüntüsü b) (0.5,0.5) ötelenmiş ve 0.5 gamma ile düzeltilmiş görüntü c) b ye gürültü eklenmiş görüntü d) gamma 1.75 ile düzeltilmiş görüntü

olarak içerdikleri düzenleme sayesinde sağlamışlardır.

Tablo 4.3 Lena görüntüsünün değişik gamma değerleri sonuçları Lena, ($x_s=0.5, y_s=0.5$)

SNR	PDS	$\gamma=0.5$	$\gamma=1.75$
45	0.5001 0.5003	0.2947 0.5535	0.7221 0.4333
40	0.4985 0.5012	0.2949 0.5520	0.7209 0.4347
35	0.4956 0.5025	0.3063 0.5492	0.7163 0.4377
30	0.4976 0.5074	0.3250 0.5477	0.7076 0.4362
25	0.5046 0.5028	0.3731 0.5360	0.6739 0.4457
20	0.5022 0.4988	0.4236 0.5214	0.6084 0.4553
15	0.4923 0.4991	0.4684 0.4852	0.5672 0.4535

Tablo 4.4 Lena görüntüsünün $\gamma=0.5$ olduğundaki sonuçları ($x_s=0.5$, $y_s=0.5$)

SNR	Alanlar		Evre İlintisi		İlgin Dönüşüm	
45	0.4997	0.4974	0.4237	0.4382	-0.0580	1.0476
40	0.4976	0.4962	0.4460	0.4639	-0.0802	1.1279
35	0.4965	0.4966	0.4680	0.4734	-0.0009	1.2351
30	0.4964	0.4965	0.4747	0.4913	0.2181	0.9664
25	0.5006	0.5037	0.4822	0.4838	0.6803	0.7882
20	0.5215	0.4991	0.5270	0.4952	1.3100	1.4080
15	0.4938	0.4944	0.5535	0.5507	1.5267	1.7223

Tablo 4.5 Pentagon görüntüsünün $\gamma=0.5$ olduğundaki sonuçları ($x_s=0.5$, $y_s=0.5$)

SNR	Alanlar		Evre İlintisi		İlgin Dönüşüm	
60	0.5036	0.5008	0.4756	0.4893	0.7077	0.6756
55	0.5030	0.5010	0.4767	0.4849	0.7062	0.6759
50	0.5028	0.5016	0.4875	0.4924	0.7056	0.6782
45	0.5006	0.4985	0.4863	0.4882	0.6950	0.6801
40	0.5021	0.4968	0.4898	0.4918	0.7065	0.6850
35	0.4997	0.5052	0.4889	0.4898	0.8055	0.8735
30	0.5067	0.5096	0.4872	0.4782	1.0147	1.1343

Tablo 4.6 Pentagon görüntüsünün $\gamma=1.75$ olduğundaki sonuçları ($x_s=0.25$, $y_s=0.5$)

SNR	Alanlar		Evre İlintisi		İlgin Dönüşüm	
60	0.2468	0.5031	0.1658	0.4747	0.2429	0.4928
55	0.2466	0.5031	0.1988	0.4799	0.2425	0.4911
50	0.2500	0.5039	0.2404	0.4844	0.2397	0.4947
45	0.2627	0.5062	0.2951	0.4822	0.2483	0.5006
40	0.2881	0.5095	0.3492	0.4833	0.2412	0.5157
35	0.3498	0.5106	0.3809	0.4915	0.2370	0.6028
30	0.4156	0.5027	0.4322	0.4937	0.2760	0.7426

Şu ana kadar verilen deneysel çalışmalarda görüntüler arasında sadece öteleme olduğu kabul edilmişti. Daha sonraki deneysel çalışmalarda ötelemenin yanı sıra dönme de uygulanmıştır. Önerilen yöntem çeşitli yapay ve gerçek görüntülere uygulanmış ve kayda değer sonuçlar üretilmiştir. Önerilen yöntemin en büyük

dezavantajı ise dönme ve ötelemelerin küçük olması gerektirmesidir. Büyük öteleme ve dönmelerde hata yapılması kaçınılmazdır. Bu hatanın önüne geçilebilmesi için görüntüler ilk önce kabaca çakıştırılabilir. Benzetim için, döndürülmüş ve ötelenmiş görüntüler elde edebilmek için Vandewalle ve çalışma grubunun yaptığı gibi ilk önce yüksek çözünürlüklü bir görüntü alınmış, bu görüntü tam piksel seviyesinde ötelenmiş ve döndürülmüştür[36]. Görüntüleme sistemini gerçekleyebilmek için tam piksel ötelenmiş ve döndürülmüş görüntüler alçak geçiren bir filtreden geçirilerek alt örnekleme işlemine tabi tutularak DÇ görüntüler elde edilmiştir.

Bu deneysel çalışma sırasında dönme ve öteleme miktarları rast gele seçilmiş çok sayıda yapay olarak elde edilen görüntüler üzerinde denenmiş, burada sadece 2 adet görüntünün sonuçları Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de verilmiştir. Tablo 4.7 ‘leaves’, Tablo 4.8 ise ‘castle’ görüntüsüne ait sonuçları içermektedir. Bu tablolarda görüntü numarasını, ikinci sütun yatay yöndeki gerçek öteleme miktarını göstermektedir. Üçüncü sütun ise bütün piksel değerlerinin kullanılması ile elde edilen, dördüncü sütun ise aykırı değerleri kullanmadan elde edilen sonuçları göstermektedir. Sonraki sütun ise Vandewalle ve çalışma grubunun önerdiği yöntemle tahmin edilen öteleme miktarlarını göstermektedir. Altıncı sütun ise dikey yöndeki gerçek öteleme miktarıdır. Sonraki 3 sütun yine aykırı değersiz, aykırılı değerli ve Vandewalle ve çalışma grubunun önerdikleri yöntemle bulunan sonuçlardır. En sondaki dört sütun ise açı miktarı ve tahmin edilen sonuçları göstermektedir. Sonuçlara bakıldığı zaman aykırı değer kullanılmadığı zaman da yine başarılı sonuçlar (küçük hatalar) elde edilmiştir. Aykırı değerleri hesaba katmayarak daha hassas tahminlerde bulunulduğu tablolardan görülmektedir. Ayrıca Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de verilen 50 adet görüntünün sonuçların ortalama kare hataları verilmiştir. Ortalama kare hatası (4.35)’deki hesaplanmıştır.

$$\text{ortalama kare hata} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \hat{x}_n)^2 \quad (4.35)$$

Burada \hat{x} tahmin değeridir. Tablo 4.9’da görüldüğü gibi en büyük başarıyı (en küçük hatayı) aykırı değer kullanan hücre alanları yöntemi vermiştir.

Tablo 4.7 leaves görüntüsüne ait sonuçlar

	x	Aykırı değersiz x	Aykırı değerli x	Vand. x	y	Aykırı değersiz y	Aykırı değerli y	Vand. y
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3.2500	3.2468	3.2472	3.2861	4.8750	4.8948	4.8758	4.8662
3	2.8750	2.8451	2.8507	2.8664	2.5000	2.5199	2.5205	2.5170
4	1.2500	1.2497	1.2309	1.2495	5.0000	5.0321	5.0531	5.0154
5	3.5000	3.5016	3.5004	3.4069	5.1250	5.1509	5.1379	5.1499
6	4.1250	4.1190	4.1102	4.1065	2.3750	2.4009	2.3995	2.3947
7	3.8750	3.8705	3.8764	3.9025	3.7500	3.7290	3.7227	3.7306
8	4.8750	4.9020	4.8976	4.8912	3.8750	3.9001	3.9084	3.8655
9	0	0.0096	0.0014	-0.0182	0.3750	0.4003	0.4038	0.3944
10	4.5000	4.5081	4.5152	4.5865	5.0000	5.0292	5.0218	4.9377
11	3.0000	2.9794	2.9906	3.0822	4.5000	4.4938	4.4946	4.4508
12	3.0000	2.9508	2.9622	3.0045	3.8750	3.8651	3.8538	3.8806
13	0	0.0157	0.0067	-0.0009	0.5000	0.5197	0.5174	0.5105
14	5.5000	5.4800	5.4722	5.4767	1.3750	1.3988	1.3980	1.3980
15	2.3750	2.3680	2.3613	2.3918	4.2500	4.2265	4.2192	4.2449
16	1.5000	1.5149	1.5066	1.4915	3.2500	3.2255	3.2423	3.2451
17	0.3750	0.3590	0.3524	0.3559	1.8750	1.8978	1.8829	1.8943
18	4.8750	4.8991	4.9004	4.8892	2.7500	2.7792	2.7883	2.7405
19	0.5000	0.4904	0.4836	0.5010	1.7500	1.7742	1.7569	1.7598
20	4.8750	4.8503	4.8577	4.8831	5.7500	5.7533	5.7483	5.7519
21	2.5000	2.4895	2.4805	2.5264	3.1250	3.1429	3.1533	3.1211
22	3.7500	3.7497	3.7546	3.8082	1.7500	1.7388	1.7433	1.6944
23	5.3750	5.3805	5.3850	5.4560	4.3750	4.3820	4.3710	4.3051
24	4.5000	4.4828	4.4881	4.4988	4.5000	4.5281	4.5209	4.5099
25	3.0000	2.9664	2.9799	3.0060	4.3750	4.3827	4.3902	4.3802
26	4.2500	4.2553	4.2438	4.1909	0.2500	0.2725	0.2589	0.2802
27	1.5000	1.5048	1.5104	1.5921	5.6250	5.6169	5.6242	5.5889
28	0.8750	0.8544	0.8636	0.8625	5.0000	5.0080	5.0302	4.9939
29	2.2500	2.2657	2.2585	2.2429	2.5000	2.4913	2.4954	2.4962
30	1.0000	0.9726	0.9873	1.0277	3.8750	3.8450	3.8323	3.8609
31	3.0000	2.9581	2.9670	3.0285	2.1250	2.1414	2.1614	2.1104
32	2.2500	2.2427	2.2312	2.2527	2.7500	2.7672	2.7563	2.7568
33	4.2500	4.2340	4.2182	4.2625	1.7500	1.7783	1.7863	1.7416
34	0.8750	0.8527	0.8592	0.8997	4.2500	4.2544	4.2670	4.2515
35	1.6250	1.6151	1.6154	1.6546	5.6250	5.6404	5.6306	5.6233
36	3.8750	3.8626	3.8693	3.9506	4.0000	3.9589	3.9393	3.9457
37	4.3750	4.3868	4.3768	4.3681	1.8750	1.8808	1.8614	1.8755
38	3.2500	3.2577	3.2516	3.1638	4.1250	4.1524	4.1447	4.1481
39	2.6250	2.6157	2.6180	2.6240	0.6250	0.6506	0.6348	0.6310
40	0.7500	0.7538	0.7479	0.7579	3.2500	3.2263	3.2421	3.2421
41	3.8750	3.8612	3.8657	3.8678	2.1250	2.1142	2.1340	2.1240
42	3.7500	3.7463	3.7489	3.6831	1.3750	1.3893	1.3752	1.4017
43	1.1250	1.1242	1.1116	1.1295	3.6250	3.6447	3.6364	3.6335
44	3.0000	2.9585	2.9662	3.0233	1.1250	1.1451	1.1609	1.1104
45	5.8750	5.9323	5.9273	5.9035	4.3750	4.3858	4.3787	4.3521
46	4.2500	4.2579	4.2504	4.3136	2.3750	2.3820	2.3737	2.3150
47	1.7500	1.7211	1.7218	1.7310	0.8750	0.9017	0.8799	0.8948
48	0.2500	0.2360	0.2201	0.2622	1.6250	1.6446	1.6492	1.6236
49	3.6250	3.6365	3.6385	3.6542	4.6250	4.6176	4.6093	4.6063
50	1.6250	1.6283	1.6273	1.7007	3.7500	3.7363	3.7462	3.7128

Table 4.7 leaves görüntüsüne ait sonuçlar (devam ediyor)

	Açı	Aykırı değersiz Açı	Aykırı değerli Açı	Vand. Açı
1	0	0	0	0
2	-2	-2.0	-2	-2.3
3	-3	-3.0	-3	-3.1
4	-2.5	-2.5	-2.5	-2.6
5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.1
6	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
7	1.5	1.5	1.5	1.4
8	0	0.0	0	-0.1
9	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
10	0.5	0.5	0.5	0
11	0.5	0.5	0.5	0
12	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6
13	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6
14	-3	-3.0	-3	-3
15	0	-0.1	0	-0.1
16	1	1.0	1	1.1
17	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
18	0	0.0	0	-0.1
19	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6
20	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6
21	-2	-2.0	-2	-2.3
22	0.5	0.5	0.5	0
23	0.5	0.5	0.5	0
24	-2.5	-2.5	-2.5	-2.6
25	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6
26	-0.5	-0.5	-0.5	-0.1
27	0.5	0.5	0.5	0
28	1	1.0	1	1.1
29	1	1.0	1	1.1
30	1.5	1.5	1.5	1.4
31	-1	-1.0	-1	-1.3
32	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6
33	0	0.1	0	-0.1
34	-1	-1.0	-1	-1.2
35	-1	-1.0	-1	-1.2
36	2	2.0	2	1.6
37	1	1.0	1	1.1
38	-0.5	-0.5	-0.5	-0.1
39	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6
40	1	1.0	1	1
41	1	1.0	1	1.1
42	-0.5	-0.5	-0.5	-0.1
43	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6
44	-1	-1.0	-1	-1.3
45	1.5	1.5	1.5	1.4
46	0.5	0.5	0.5	0
47	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
48	0	0.1	0	-0.1
49	1.5	1.5	1.5	1.4
50	0.5	0.5	0.5	0

Tablo 4.8 castle görüntüsüne ait test sonuçları

	x	Aykırı değersiz x	Aykırı değerli x	Vand. x	y	Aykırı değersiz y	Aykırı değerli y	Vand. y
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3.2500	3.2274	3.2564	3.1875	4.8750	4.8744	4.8349	4.8611
3	2.8750	2.8548	2.8402	2.8095	2.5000	2.5201	2.5332	2.4940
4	1.2500	1.2491	1.2407	1.1836	5.0000	5.0333	5.0852	4.9874
5	3.5000	3.4922	3.5009	3.4962	5.1250	5.1549	5.1724	5.1290
6	4.1250	4.1324	4.1272	4.0634	2.3750	2.3962	2.3885	2.3667
7	3.8750	3.8667	3.8752	3.9359	3.7500	3.7381	3.7181	3.7667
8	4.8750	4.8975	4.8919	4.9243	3.8750	3.8959	3.9363	3.9007
9	0	0.0175	0.0228	-0.0584	0.3750	0.3895	0.3827	0.3592
10	4.5000	4.4980	4.4928	4.5553	5.0000	5.0293	5.0515	5.0226
11	3.0000	2.9774	2.9588	3.0541	4.5000	4.5005	4.5475	4.5249
12	3.0000	2.9443	2.9588	2.9888	3.8750	3.8759	3.8361	3.8868
13	0	0.0231	0.0266	-0.0112	0.5000	0.4947	0.4966	0.5117
14	5.5000	5.4865	5.4745	5.4374	1.3750	1.3976	1.4011	1.3723
15	2.3750	2.2510	2.3652	2.3750	4.2500	4.3198	4.1949	4.2500
16	1.5000	1.4962	1.5047	1.5079	3.2500	3.2390	3.2781	3.2426
17	0.3750	0.3615	0.3651	0.3563	1.8750	1.8909	1.8508	1.8943
18	4.8750	4.8993	4.9388	4.9224	2.7500	2.7712	2.7527	2.7757
19	0.5000	0.4797	0.4913	0.4464	1.7500	1.7617	1.7383	1.7270
20	4.8750	4.8390	4.8521	4.8638	5.7500	5.7572	5.7394	5.7617
21	2.5000	2.4745	2.4797	2.4402	3.1250	3.1529	3.1760	3.1095
22	3.7500	3.7396	3.7344	3.7996	1.7500	1.7392	1.7407	1.7738
23	5.3750	5.3787	5.3747	5.4289	4.3750	4.3854	4.3990	4.3959
24	4.5000	4.4847	4.4804	4.4821	4.5000	4.5249	4.5190	4.5210
25	3.0000	2.9557	2.9557	2.9888	4.3750	4.3866	4.4193	4.3867
26	4.2500	4.2641	4.2666	4.2462	0.2500	0.2684	0.2579	0.2538
27	1.5000	1.5055	1.4923	1.5563	5.6250	5.6166	5.6340	5.6528
28	0.8750	0.8601	0.8439	0.8826	5.0000	5.0275	5.1050	4.9925
29	2.2500	2.2461	2.2665	2.2576	2.5000	2.4806	2.4834	2.4920
30	1.0000	0.9816	0.9744	1.0611	3.8750	3.8504	3.8257	3.8961
31	3.0000	2.9720	2.9443	2.9926	2.1250	2.1457	2.2120	2.1326
32	2.2500	2.2540	2.2524	2.1947	2.7500	2.7548	2.7306	2.7302
33	4.2500	4.3305	4.2349	4.2500	1.7500	1.6672	1.7898	1.7500
34	0.8750	0.8616	0.8415	0.9176	4.2500	4.2618	4.3058	4.2901
35	1.6250	1.6158	1.6215	1.6697	5.6250	5.6410	5.6176	5.6639
36	3.8750	3.8653	3.8705	3.8902	4.0000	3.9538	3.9153	3.9844
37	4.3750	4.3753	4.3983	4.3823	1.8750	1.8630	1.8065	1.8669
38	3.2500	3.2610	3.2643	3.2463	4.1250	4.1566	4.1735	4.1289
39	2.6250	2.5960	2.6135	2.5734	0.6250	0.6317	0.6302	0.6057
40	0.7500	0.7556	0.7414	0.7581	3.2500	3.2401	3.2893	3.2430
41	3.8750	3.8727	3.8494	3.8830	2.1250	2.1300	2.2024	2.1179
42	3.7500	3.7361	3.7434	3.7462	1.3750	1.3825	1.3742	1.3787
43	1.1250	1.1452	1.1355	1.1138	3.6250	3.6134	3.6157	3.6367
44	3.0000	2.9720	2.9449	2.9926	1.1250	1.1483	1.2120	1.1327
45	5.8750	5.8692	5.8677	5.9369	4.3750	4.3669	4.3868	4.3883
46	4.2500	4.2597	4.2609	4.3004	2.3750	2.3857	2.3953	2.3978
47	1.7500	1.7057	1.7292	1.6904	0.8750	0.8981	0.8548	0.8618
48	0.2500	0.2693	0.2414	0.2500	1.6250	1.5797	1.6454	1.6250
49	3.6250	3.6257	3.6434	3.6871	4.6250	4.6237	4.6020	4.6417
50	1.6250	1.6206	1.6158	1.6781	3.7500	3.7327	3.7361	3.7775

Table 4.8 castle görüntüsüne ait test sonuçları (devam ediyor)

	Açı	Aykırı değersiz Açı	Aykırı değerli Açı	Vand. Açı
1	0.0	0.0	0	0.0
2	-2.0	-2.0	-2.0	-1.9
3	-3.0	-3.0	-3.0	-2.9
4	-2.0	-2.5	-2.5	-2.4
5	-0.0	-0.5	-0.5	-0.5
6	-2.5	-2.5	-2.5	-2.4
7	1.5	1.5	1.5	1.4
8	0.0	0.0	0.0	-0.1
9	-2.5	-2.5	-2.5	-2.4
10	0.5	0.5	0.5	0.4
11	0.5	0.5	0.5	0.4
12	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
13	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
14	-3.0	-3.0	-3.0	-2.9
15	0.0	0.1	0.1	0.0
16	1.0	1.0	1.0	1.0
17	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
18	0.0	-0.1	0.0	-0.1
19	-1.5	-1.5	-1.5	-1.4
20	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
21	-2.0	-2.0	-2.0	-1.9
22	0.5	0.5	0.5	0.4
23	0.5	0.5	0.5	0.4
24	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
25	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
26	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
27	0.5	0.5	0.5	0.4
28	1.0	1.0	1.0	1.0
29	1.0	1.0	1.0	1.0
30	1.5	1.5	1.5	1.4
31	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
32	-1.5	-1.5	-1.5	-1.4
33	0.0	-0.1	-0.1	0.0
34	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1
35	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1
36	2.0	2.0	2.0	2.0
37	1.0	1.0	1.0	1.0
38	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
39	-1.5	-1.5	-1.5	-1.4
40	1.0	1.0	1.0	1.0
41	1.0	1.0	1.0	1.0
42	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
43	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
44	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
45	1.5	1.5	1.5	1.4
46	0.5	0.5	0.5	0.4
47	-2.5	-2.5	-2.5	-2.4
48	0.0	-0.1	-0.1	0.0
49	1.5	1.5	1.5	1.4
50	0.5	0.5	0.5	0.4

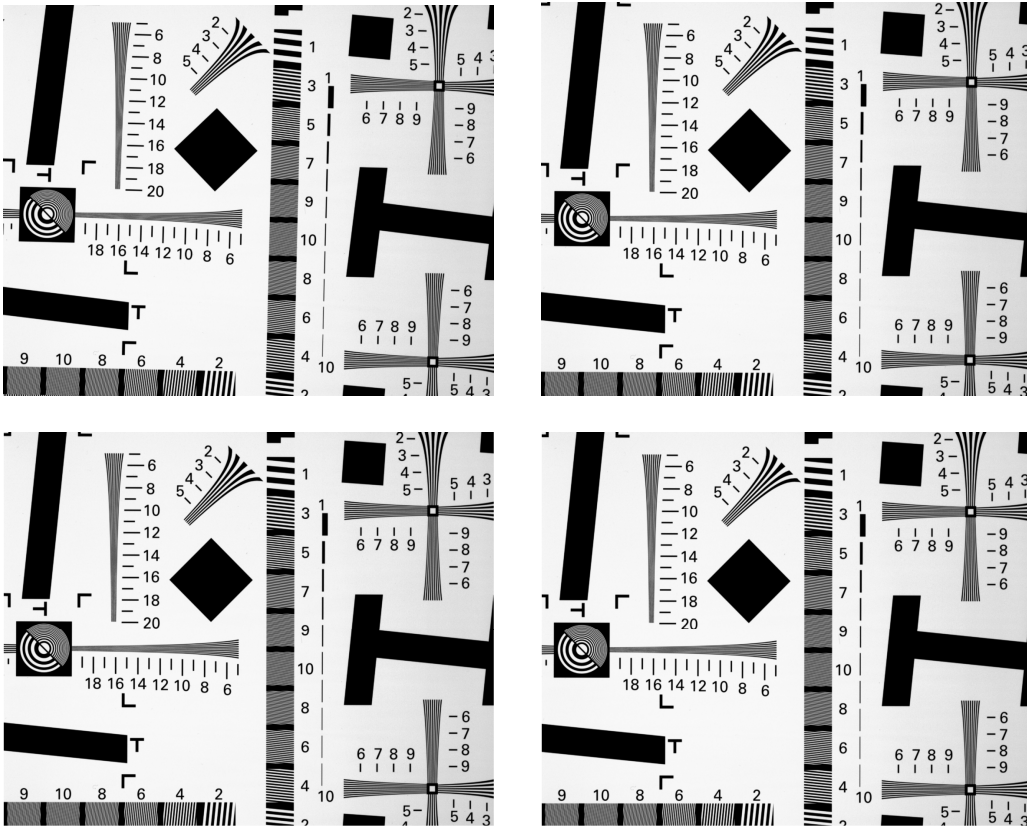
Tablo 4.9 Ortalama kare hataları

Görüntü	Vandewalle		Aykırı değer kullanmadan		Aykırı değer kullanarak	
	Öteleme	Dönme	Öteleme	Dönme	Öteleme	Dönme
Leaves	0.0012	0.0648	0.4502×10^{-3}	0.6000×10^{-3}	0.3750×10^{-3}	0
Castle	0.0010	0.0052	0.0012	0.0008	0.7017×10^{-3}	0.6×10^{-3}

Önerilen algoritma gerçek görüntülere de uygulanarak test edilmiştir. Burada verilen gerçek görüntülerin ilki Vandewalle ve çalışma grubunun kullandıkları görüntü kümesidir. İkinci ise tarafımızdan çekilmiş görüntülerdir. Gerçek görüntü uygulamalarında öteleme ve dönme tam olarak bilinmediğinden bulunan değerleri test edebilmek için bu görüntü ve tahmin edilen hareket parametrelerini kullanarak kübik ara değerlendirme ile görüntüler 4 katına çıkartılmıştır. İlk gerçek uygulamada verilen her iki yöntemde aşağı yukarı aynı hareket parametrelerini bulmuştur. 4 katına çıkartılan görüntülerdeki fark alt piksel seviyelerinde olduğu için gözle tespit edilmesi zordur. Tablo 4.10'da, Şekil 4.11 verilen 4 adet görüntünün bulunan öteleme ve dönme açılarının sonuçları verilmiştir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de ise sırasıyla önerilen yöntemle ve Vandewalle ve arkadaşlarının önerdikleri yöntemle tahmin edilen parametreleri kullanarak kübik ara değerlendirme ile elde edilen sonuç görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.14 ve Şekil 4.18'de ise kübik ara değerlendirme ile elde edilen görüntülerin bir bölgesinin büyütülerek detaylı gösterimi görülmektedir.

Tablo 4.10 Gerçek görüntü uygulaması(res_chart)

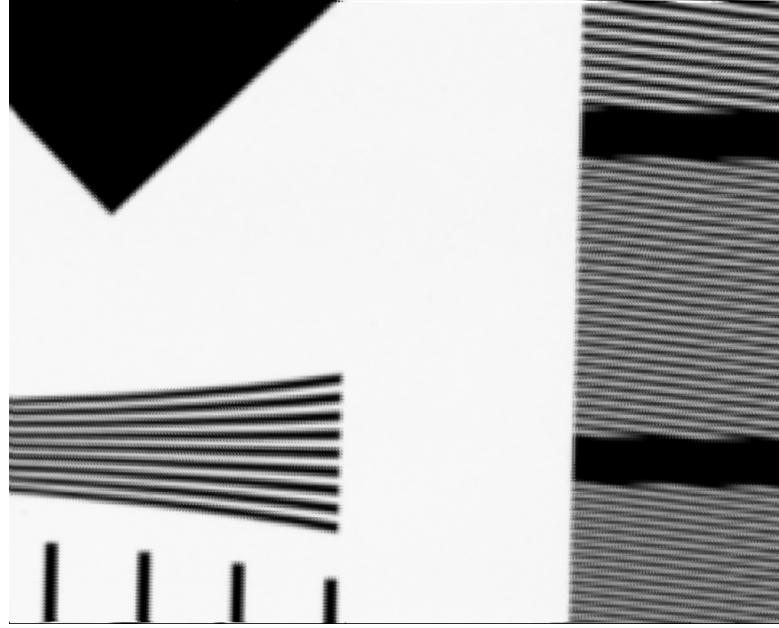
İmgeler	Vandewalle			Önerilen		
	x	Y	Açı	X	Y	açı
İmge2	1.1125	1.7114	0.9	1.2330	1.8759	1
İmge3	3.1045	2.1324	1.2	2.7036	2.4485	1.2
İmge4	0.8806	2.5488	1.2	0.5010	3.0513	1.2



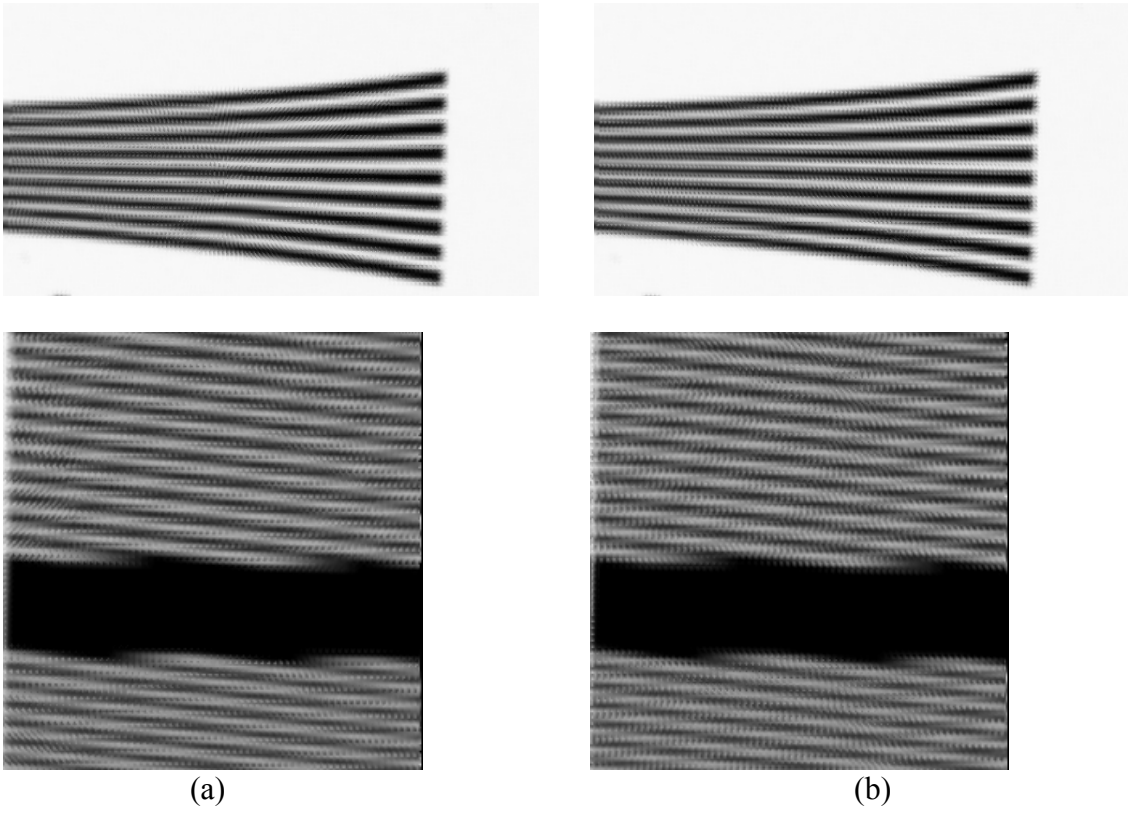
Şekil 4.11 Vandewalle ve çalışma grubunun çektikleri gerçek görüntüler



Şekil 4.12 Önerilen yöntemle tahmin edilen parametreleri kullanarak kübik ara değerlendirme ile elde edilen YÇ sonuç görüntüsü



Şekil 4.13 Vandewalle ve çalışma grubunun önerdikleri yöntemle hesaplanan parametreleri kullanarak kübik ara değerlendirme ile elde edilen YÇ sonuç görüntüsü



Şekil 4.14 Kübik ara değerlendirme ile elde edilen YÇ sonuç görüntüsünün detaylı görünümleri (a) Önerilen yöntem (b) Vandewalle ve çalışma grubunun önerdikleri yöntem

Daha sonraki gerçek uygulamada ise tarafımızdan Asus marka webcam ile çekilmiş görüntülerdir. Şekil 4.15’de de görüldüğü gibi 4 adet görüntü web cam ile yakalanmış görüntülerden bir tanesinin bir bölgesinde diğer görüntülerden farklı bir bölge bulunmaktadır. 4. görüntüde “digital image processing” kitabı yerine başka bir kitap konulmuştur. Tablo 4.11’de elde edilen öteleme ve dönme miktarları verilmiştir.

Tablo 4.11 Gerçek görüntü uygulaması (web cam)

İmgeler	Vandeville			Alan		
	X	Y	Açı	x	y	açı
İmge2	1.2813	3.5639	0	2.7018	5.5269	0.1000
İmge3	1.9175	0.8848	-0.1000	3.0199	0.8564	0.2000
İmge4	0.8642	0.7262	-0.1000	1.2465	0.7819	0.1000



Şekil 4.15 Gerçek web cam uygulamasında kullanılan görüntüler

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de ise yine kübik ara değerlendirme ile elde edilen görüntüler görülmektedir. Daha sonraki şekiller ise kübik ara değerlendirme ile elde edilen sonuç görüntülerin büyütülmüş halleridir. Bu çalışmada ise önerilen yöntemin sonuçları gözle görülebilecek fark oluşturmuştur.



Şekil 4.16 Önerilen yöntemle hesaplanan parametreleri kullanarak kübik ara değerlendirme ile elde edilen sonuç görüntüsü



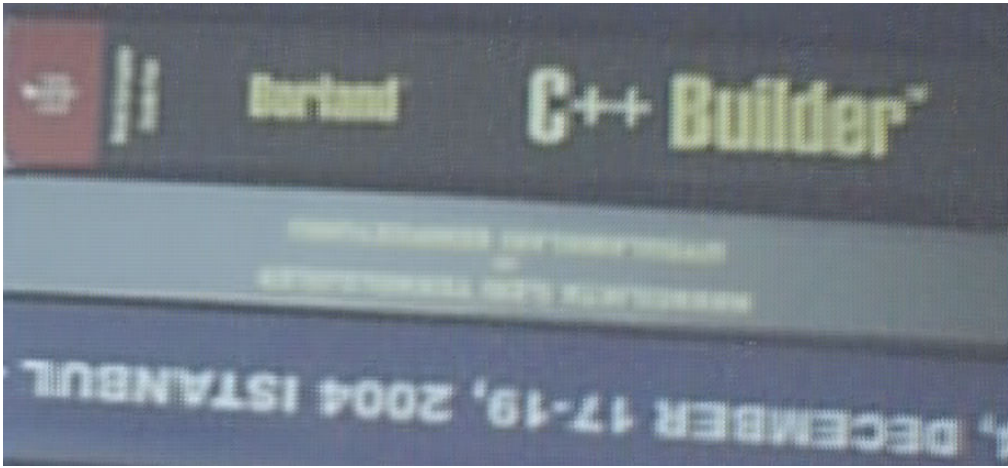
Şekil 4.17 Vandewalle ve çalışma grubunun önerdikleri yöntemle hesaplanan parametreleri kullanarak kübik ara değerlendirme ile elde edilen sonuç görüntüsü



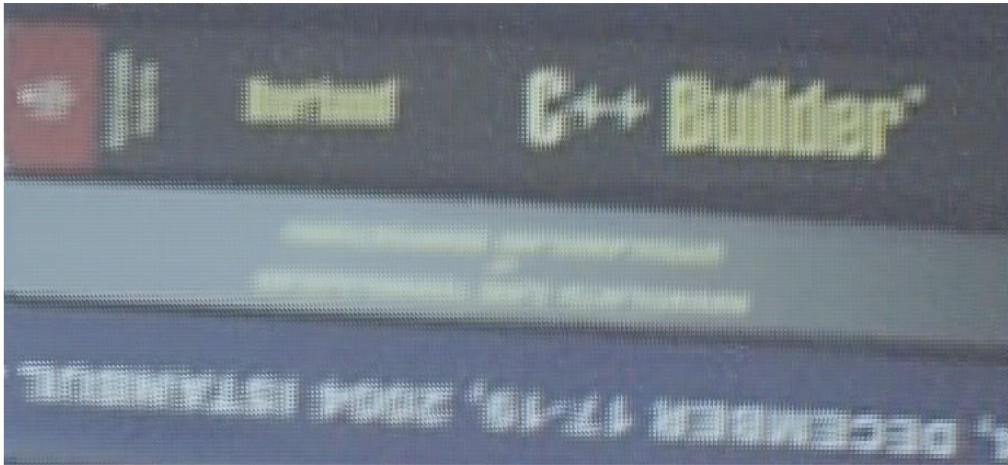
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.18 Kübik ara değerlendirme ile elde edilen YÇ sonuç görüntüsünün detaylı görünümleri(a, c) Önerilen yöntem (b, d) Vandewalle ve çalışma grubunun önerdikleri yöntem

4.2 Modifiye Edilmiş Alt Gradyen Yöntemi

Şekil 1.19’da verilen modelin bütün bozulmaları (NYF_{lens} , dönme, doğrusal öteleme ve NYF_{kamera}) tek bir bozulma matrisi Eşitlik (4.36)’daki gibi yazmanın mümkün olduğu Bölüm 1’de verilmişti

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DBF_1 \\ DBF_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ DBF_p \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ n_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ H_p \end{bmatrix} X + n \quad (4.36)$$

Burada ;

F_k : eğme matrisi

B : bulandırma matrisi

D : indirgeme matrisi

n_k : gürültü vektörü

p : elimizdeki DÇ görüntü sayısıdır.

(4.36) numaralı denklem sistemini Y_k kolon vektör halinde yazılmış elimizdeki DÇ lü görüntü piksellerini, H_k sistem matrisini, N_k gürültü vektörünü, X ise aranan çözümü göstermek üzere tek bir matris simgelemi şeklinde (4.37)’deki gibi yazılabilir.

$$Y_k = H_k X + N_k \quad (4.37)$$

Burada elimizde olan DÇ görüntülerden (Y_k) ve hesaplanan bozulma matrisi ile (H_k) yardımı ile X vektörünün bulunması istenmektedir.

$$\tilde{X} = \underset{X}{\text{ArgMin}} \left[\sum_{k=1}^p \|H_k X - Y_k\|_l \right] \quad (4.38)$$

Burada l norm derecesini göstermektedir. En küçük kareler çözümü için $l = 2$ olmalıdır ve dolayısıyla,

$$\begin{aligned} \tilde{X} &= \underset{X}{\text{ArgMin}} \left[\sum_{k=1}^p \|H_k X - Y_k\|_2^2 \right] \\ &= \underset{X}{\text{ArgMin}} \left[\sum_{k=1}^p [H_k X - Y_k]^T [H_k X - Y_k] \right] \end{aligned} \quad (4.39)$$

En küçükleme problemini çözmek için (4.39) X 'e göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse (4.40)'daki eşitlik elde edilir.

$$\frac{\partial \sum_{k=1}^p [H_k X - Y_k]^T [H_k X - Y_k]}{\partial X} = 0 \Rightarrow RX = T \quad (4.40)$$

Burada $R = \sum_{k=1}^p H_k^T H_k$ ve $T = \sum_{k=1}^p H_k^T Y_k$ dir. Birçok YÇ algoritması en küçükleme için

aşağı yukarı aynı ifadeleri kullanmaktadır. $f(X) = \sum_{k=1}^p \|H_k X - Y_k\|_2^2$ ve $g(X) = RX - T$ eşitlikleri tanımlanırsa yüksek çözünürlük problemi eşitlik kısıtlı en küçükleme problemine (birincil problem) dönmektedir.

$$\begin{aligned} \text{en küçükle} & f(X) \\ \text{şartı altında} & g(X) = 0 \end{aligned} \quad (4.41)$$

ve 8 bitlik gri görüntüler için $S = \{X \mid 0 \leq X_i \leq 255\}$ 'dir. Birincil problem için keskin Lagrangian fonksiyonu (4.42)'deki gibi tanımlanır.

$$L(X, u, c) = f(X) + c \|g(X)\| - u^T g(X) \quad (4.42)$$

İkili problemde $H(u, c) = \underset{X \in S}{\text{ArgMin}} L(X, u, c)$ şeklinde tanımlanmaktadır.

Yukarıdaki tanımlamalara göre modifiye edilmiş alt gradyen algoritması aşağıdaki gibidir.

Başlangıç Adımı :

$c_1 \geq 0$ olmak üzere (u_1, c_1) çifti seçilerek ana adıma geçilir.

Ana Adım :

1. Verilen (u_1, c_1) çiftine göre aşağıdaki alt problem çözülür.

$$\begin{array}{l} \text{en küçük} \quad f_0(X) + c_k \|g(X)\| - u^T g(X) \\ \text{\textit{şartı altında}} \quad X \in S \end{array}$$

Eğer $g(X_k) = 0$ ise aranan çözüm X_k bulunmuştur, algoritma durdurulur, aksi takdirde 2. adıma geçilir.

2. $u_{k+1} = u_k - s_k g(X_k)$ ve $c_{k+1} = c_k + (s_k + \varepsilon_k) \|g(X_k)\|$ ile yeni (u_1, c_1) çifti seçilir.

Burada s_k ve ε_k pozitif skalar adım sayısıdır, $k, k+1$ yapılır ve adım 1'e geri dönülür.

Adım sayısının hesaplanması:

$$s_k = \frac{\alpha_k (H_k - H(u_k, c_k))}{5 \|g(X_k)\|^2} \text{ şeklinde hesaplanır. Burada } 0 < \alpha < 2 \text{ arasında bir sayı ve}$$

H_k ise yaklaşık ikili problem çözümüdür. R. Gasimov tarafından geliştirilen ve burada yüksek çözünürlük problemine uygulanmış olan bu algoritma ile ilgili daha detaylı bilgi [98] ve [99]'dan edinilebilir.

4.2.1 Modifiye edilmiş alt gradyen yönteminin deneysel çalışmaları

Bahsedilen yöntemin yüksek çözünürlük problemine uygulanması [100]'de görülebilir. Matematiksel bir sonuç verebilmek için benzetim yapılmıştır. Benzetimde YÇ görüntü ilk önce standart sapması 1 olan Gaussian süzgeçten geçirilerek NYF_{lens} benzetilmiştir. Daha sonra YÇ görüntü alt örnekleme işlemine tabi tutulmuştur. Alt örnekleme işlemi ise YÇ görüntünün her bir 1., 2., 3. , 4. piksellerinin birleşimlerinin yatay ve dikeyde alınarak yapılmıştır. Böylece 16 adet DÇ görüntülü resim elde edilmiştir. Daha sonra ise 16 resimden 10 tanesi tamamen rasgele olarak alınarak DÇ görüntü seti oluşturulmuştur. Sonuçların karşılaştırılması için Milanfar ve çalışma grubunun [17] Matlab ortamında hazırlanmış olan GUI kullanılmıştır. Tablo 4.12'de görüldüğü gibi en yüksek başarıyı (yüksek PSNR² değerini) modifiye edilmiş alt gradyen yöntemi göstermiştir.

Tablo 4.12 Modifiye edilmiş alt gradyen yönteminin test sonuçları

SR Method	PSNR		
	Lena	Pentagon	West
Modified Subgradient	33.4161	30.8420	29.1737
Iterative Back-Propagation	33.2293	30.3488	28.8303
Shift and Add	28.6408	24.1591	24.0363
S&A + Wiener deblurring	28.0102	23.9269	23.5592
S&A + Blind Lucy deblurring	28.9118	24.6817	24.5644
Bilateral S&A	26.7535	22.7632	22.8964
S&A with iterative deblurring	31.3950	29.0181	27.8278
Bilateral S&A with iterative deblurring	30.4077	27.0301	27.0401
Median S&A with iterative deblurring	31.4427	29.1402	27.8908
Iterative Norm 2	31.4194	27.5811	26.7484
Iterative Norm 1	30.8372	26.0370	25.7105
Norm 2 data with L1 regularization	32.9629	29.8037	23.0127
Robust (Median Gradient) with L2 regul.	28.6674	23.9520	23.9056
Robust (Median Gradient.) with L1 regul.	28.2438	23.4529	23.3274
Cubic interpolation	29.7381	25.3722	25.0729

$$^2 PSNR = 20 \log \left(\frac{255^2}{(x - \tilde{x})^2} \right)$$

4.3 Aykırı Değer Ayıklamalı Özyinelemeli Geri Yayılım Algoritması

Görüntü bozulma problemi devinim, doğrusal bulanma, alt örnekleme ve Gaussian gürültü olarak modellendiğini daha önceden belirtmiştik. DÇ görüntüler bir sahnenin aynı kameranın çok az farklı kaymaları ile elde edilmiştir. Her birinin büyüklüğü $N_1 \times N_2$ olan p adet DÇ görüntü kaydedildiğini kabul edelim. Arzulanan X YÇ görüntüsünün büyüklüğü L_1 ve L_2 yatay ve dikey yöndeki aşağı örnekleme çarpanını göstermek üzere, $N = L_1 N_1 \times L_2 N_2$ 'dir. DÇ görüntüler YÇ görüntüye devinim, bulanıklık ve alt örnekleme ile bağımlıdır. $k = 1, 2, \dots, p$ olmak üzere k nıncı DÇ çerçevesi $y_k = [y_{k,1}, y_{k,2}, \dots, y_{k,M}]$ olsun Burada $M = N_1 \times N_2$ 'dir. Bütün DÇ görüntü kümesi kolon vektör halinde (4.43)'deki gibi gösterilebileceği

$$Y = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_p^T]^T = [y_1, y_2, \dots, y_{pM}]^T \quad (4.43)$$

ve gözlenen DÇ resimler ile YÇ görüntü arasındaki ilişkinin (4.44)'deki gibi modellenebildiği daha önce de belirtilmişti.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_p \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} DBF_1 \\ DBF_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ DBF_p \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ n_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ H_p \end{bmatrix} X + n \\ &\Downarrow \\ Y &= HX + N \end{aligned} \quad (4.44)$$

Burada ;

F_k : eğme matrisi

B : bulandırma matrisi

D : indirgeme matrisi

n_k : gürültü vektörü

p : elimizdeki DÇ görüntü sayısıdır.

DÇ görüntü y_k verildiğinde aşağı örnekleme işleci D bilinmemektedir. Bulandırma işleci ve kamera mercek karakteristiği genel olarak bilinmemektedir. Bununla birlikte, bulandırma işlemi uzamda değişmez kabul edilip, normalize edilmiş ve negatif elemanlara sahip olmayan $m_1 \times m_2$ boyutlarında 2 boyutlu bir işleç ile iyi bir şekilde yaklaşım yapılabilir. Bundan dolayı, bu çalışmada 5×5 boyutlarında standart sapması ($\sigma = 2$) olan bir Gaussian işleci kullanılmıştır. Ayrıca, her resmin referans resme göre sahne devinimi genel olarak bilinmemektedir, ancak bu çalışmada benzetim sırasında görüntüler oluşturulurken kullanılan devinim parametreleri saklanarak, yüksek çözünürlük algoritmasında kullanılmıştır. Son olarak, birçok birbirinden bağımsız gürültü kaynağı olarak bilinmeyen değişintili beyaz Gaussian dağılımlı gürültü kabul edilmiştir.

Kaydedilen görüntülerin hemen hemen hepsinde bozukluk vardır ve bu bozukluk birincil olarak görüntüleme sistemindeki kusurlarından meydana gelir. Görüntüdeki bozukluk görüntü sistemi ile cisim arasındaki bağıl devinimden, lensin odaklama bozukluğundan veya görüntü alınan ortamın elverişsiz şartlarından kaynaklanabilir. Bu durum gürültünün eklenmesiyle daha da karmaşık hale gelir. Sonuç olarak elimizde bozulmaya uğramış, gürültülü bir resim var ve yeniden görüntü elde etme işleminden beklenen, asıl görüntüye en yakın görüntüyü elde etmektir. Birçok durumda elde görüntüdeki bozukluk ve gürültüye ait net bilgi yoktur ve hatta bu bilgiler olsa bile yeniden görüntü elde etme çözümü kötü konumlanmış bir problemdir. Şöyle ki, verilerdeki küçük değişimler (gürültüden dolayı) bile sonuç üzerinde büyük etkiler doğurabilir. Sistem matrisinin (H) büyüklüğünden ve kötü konumlanmış olmasından dolayı doğrudan çözümler neredeyse imkansız hale gelmektedir. Bundan dolayı bu tür kötü konumlanmış sistemlerde yinelemeli algoritmalar tercih edilmektedir. Yinelemeli yöntemler çözümü bulasıya kadar tekrarlı adımlar kullanan yöntemler olarak karakterize edilir. Her adımda aranılan çözüme doğru yakınsadığı umulur. Üstelik tek bir yineleme

doğrudan çözülemeye göre çok daha kısa zaman almaktadır. Yinelemeli algoritmalarla çalışırken yakınsama olması ve yakınsama oranı çok önemlidir. Bir sonuca varılabilmesi için algoritmanın kabul edilebilir ya da uygulamaya uygun bir şekilde yakınsaması gerekir. Eğer yakınsama hızlıysa yineleme bir kaç adımda durmakta ve çözüm için iyi bir yaklaşım olmaktadır.

Eşitlik (4.44)'de tanımlanan sistemi çözebilmek için bildik yinelemeli geriye yayılım algoritması (4.45)'deki yineleme denklemi ile ifade edilebilir.

$$X_{k+1} = X_k + \beta(Y - HX_k) \quad (4.45)$$

Burada β yakınsama hızı parametresidir ve literatürdeki birçok kaynakta da belirtildiği gibi yeniden uyarlanabilir olarak (4.46)'daki gibi hesaplanabilir.

$$\beta = \frac{\|r\|_2^2}{\|H^T r\|_2^2} \quad (4.46)$$

Burada $r = Y - HX$ 'dir. (4.45)'de verilen eşitlikte devinimin ve bulanıklığın tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Resimlerden herhangi birisinin tamamında veya belli bir bölgesinde yapılacak devinimin ve bulanıklığın tahmin hataları sonuç görüntüsünde istenmeyen durumlar ortaya çıkarmaktadır. Bunun yanı sıra tuz ve biber gürültüsü gibi yerel olarak etkili olan gürültülü ortamlarda verilen algoritma kötü sonuçlar üretebilmektedir. Bunlardan dolayı, bu çalışmanın da ana konusu olan ve yerel olarak ortaya çıkan aykırı değerlerin yok edilmesi gerekir. Bunun için hesaplama yükü az ve (4.45)'deki denkleme uygulanması kolay olan bir yöntem önerilmiştir[100]. İlk önce YÇ görüntüsünün ilgilenilen pikselleri ile alakalı olan DÇ çerçeve dizisindeki pikseller arasındaki fark vektörü hesaplanmıştır.

$$Z_i = [r_{1,i}, r_{2,i}, \dots, r_{p,i}] \quad (4.47)$$

Burada $r_{k,i} = Y_{k,i} - HX$, k nıncı çerçevenin i ninci pikseli ile model matrisinin X vektörü ile çarpılması sonucu ortaya çıkan hata miktarıdır. Z_i vektöründeki ortalamadan büyük hata miktarları o noktadaki aykırı değerlere karşılık gelmektedir ve aykırı değerlerin hesaplarda kullanılmaması gerekir. Aykırı değerlere sahip olan piksellerin YÇ tahmin görüntüsü üzerindeki etkisini azaltabilmek için (4.48)'deki denklem ile ağırlık vektörü hesaplanır.

$$Z_i = \frac{1}{\left[\text{abs}(Z_i - \text{ortanca}(Z_i)) \right] + 1} \quad (4.48)$$

DÇ çerçevelerin bütün pikselleri için ağırlık vektörleri hesaplanır ve bu ağırlık vektörleri bütün sistemin ağırlık vektörü için bir araya getirilir.

$$Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_{MN}] \quad (4.49)$$

Hesaplanan sistem ağırlık vektörünün (4.45) numaralı denkleme uygulanması ise (4.50)'deki gibidir.

$$X_{k+1} = X_k + \beta \{ Z \otimes (Y - HX_k) \} \quad (4.50)$$

Burada sistem ağırlık vektörü ile hata vektörünün çarpımı, \otimes , karşı gelen elemanların çarpımı ile hesaplanır. Önerilen algoritma Şekil 4.19'da verilmiştir.

ALGORİTMA

*YÇ görüntü için başlangıç tahmini yap
Her bir DÇ/YÇ piksel için hata miktarını
hesapla ve hata vektörünü oluştur
(4.48) ve (4.49)'u kullanarak ağırlık vektörünü
oluştur
Hata vektörü ile ağırlık vektörünü eleman eleman
çarp
Çarpım sonucunu kullanarak YÇ görüntüyü düzelt
Herbir resim için istenilen hata seviyesine
ulaşılıncaya kadar*

Şekil 4.19 Aykırı değer ayıklama ile yüksek çözünürlük elde etme algoritması

4.3.1 Aykırı değer ayıklamalı özinelemeli geri yayılım algoritması deneysel çalışmaları

Şekil 4.19'da verilen algoritma, bilinen parametrelerle yapay olarak bozulmuş birçok görüntü ile denenmiştir. Bu deneylerin iki tanesinin sonuçları örnek olarak verilmiştir. Tablo 4.13 ve Tablo 4.14'de sonuçları verilen deneylerde odaklanma bulanıklığı olarak 5×5 boyutlarında ve standart sapması 2 olan Gaussian işleç kullanılmıştır. Doğrusal devinim için $[(0,0),(2.25,1.5),(0.75,-1.25),(-0.5,3),(0.75,0.75)]$, ve dönme için $[0,3,-1,0.8,0]$ parametre setleri kullanılmıştır. DÇ görüntüler üzerine sırasıyla 60 dB ve 40 dB Gaussian ve tuz & biber gürültüsü eklenmiştir. Ayrıca devinim hatalarını gösterebilmek için YÇ onarım algoritmasında en son çerçevedeki devinim parametreleri hatalı olarak $(1.70,0.65)$ alınmıştır. Ayrıca modelde olabilecek hatalara karşı algoritmanın gürbüzlüğünü gösterebilmek için standart sapması 2 olan Gaussian işleç yerine standart sapması 1 olan Gaussian işleç kullanılmış ve sonuçları Tablo 4.13 ve Tablo 4.14'de 'Model H' satır başlığı ile verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar, aykırı değerleri ayıklayan yeni algoritmanın kübik aradeğerleme ve yinelemeli geriye yayılım (YGY) sonuçları ile karşılaştırıldığında daha gürbüz olduğu görülmüştür. Örnek olması açısından 2 adet sonuç görüntüsü Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir.

Tablo 4.13 Lena görüntüsü sonuçları

Gürültü	LENA		
	Kübik	Klasik YGY	Önerilen
YOK	29.0256	33.7588	34.1383
60 dB	29.0240	33.6677	34.0403
40 db	28.8764	30.7838	31.1699
Tuz biber	24.1896	20.6794	31.8109
Devinim H.	28.9289	28.0049	31.5789
Model H.	29.0256	31.3121	31.4351

Tablo 4.14 Pentagon görüntüsü sonuçları

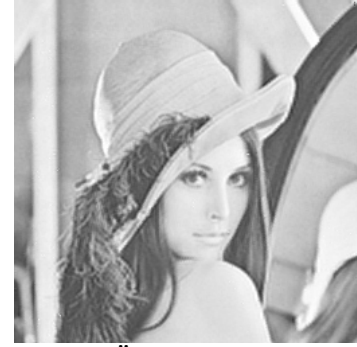
Gürültü	PENTAGON		
	Kübik	Klasik YGY	Önerilen
YOK	24.2215	29.7293	30.2153
60 dB	24.1012	29.7196	30.2099
40 db	24.0111	27.6214	27.6400
Tuz biber	22.8682	20.4036	27.1286
Devinim H.	23.8905	24.8269	27.1233
Model H.	24.0215	27.2271	27.2916



a) Kübik ara değerlendirme



b) Klasik YGY metodu



c) Önerilen yöntem

Şekil 4.20 Tuz ve biber gürültüsü eklenmiş DÇ görüntülerden YÇ görüntü sonuçları



a) Kübik ara değerlendirme



b) Klasik YGY metodu



c) Önerilen yöntem

Şekil 4.21 Çerçevelerden birinde devinim tahmin hatası olan DÇ görüntülerden YÇ görüntü sonuçları

4.4 Döngülü Yüksek Çözünürlük Algoritmalarında Bulanıklığın Belirlenmesi

Şekil 1.19’da verilen genel modelde optik yayılma ve odaklama bulanıklığı (NYF_{lens}) tüm DÇ görüntüler için aynı olduğu kabullenilmişti. Aslında farklı görüntü algılayıcıları kullanılır ise (YBA kamera ve IR kameranın aynı anda kullanması veya farklı lensler kullanılması gibi) NYF_{lens} ’de farklı olabilmektedir ([29], [31]). Ancak bu durum olağan değildir. Örneğin, uzaydan çekilen ardışıl görüntülerde genellikle tek bir görüntü algılama cihazı kullanılmaktadır. Tek bir görüntü algılama cihazının kullanılmasından dolayı YÇ görüntü elde etme algoritmaları NYF_{lens} bloğunun çıkışındaki YÇ görüntüyü üretmekte, arzulanan gerçek kesikli YÇ görüntü elde edilememektedir. Ortak bir NYF_{lens} durumunda her DÇ görüntüde NYF_{lens} için aynı bilgi bulunduğundan dolayı NYF_{lens} ’i tahmin edebilmek için istatistiksel yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada NYF_{lens} ’in Gaussian optik yayılma olduğu ve algılayıcı ya da cisimlerin hareketi ile oluşan bozulmayı içermediği varsayılmıştır. Görüntüler bir bulandırma bloğundan (NYF_{lens}) geçirildiğinde bulandırma miktarına (Gaussian’ın değişintisine) bağlı olarak histogramları değişmektedir. Tasarlanan algoritma görüntülerdeki histogram değişiminden faydalanarak Gaussian’ın değişintisini en iyileştirmektedir. ÖGY algoritması öncelikle bir kuramsal YÇ görüntü tahmin eder. Bu işlem genellikle DÇ görüntülerden birisinin yukarı örneklenmesi ve ara değerlendirilmesi ile yapılmaktadır. Daha sonra kuramsal YÇ görüntü ve görüntüleme modeli kullanılarak DÇ görüntüler üretilir. Üretilen ve eldeki DÇ görüntüler arasındaki fark kuramsal YÇ görüntünün güncellenmesi için kullanılır. Belirlenen sayıda yineleme sonunda kuramsal YÇ görüntünün son hali algoritma sonucu olarak alınır.

ÖGY algoritması içerisine NYF_{lens} ’in en iyileştirilmesi ile ilgili düzenlemeler ise şu şekilde entegre edilmiştir. Her bir ÖGY özyinelemesi sonunda elde edilen DÇ

görüntüler içindeki 5×5 'lik blokların histogram değışintisi ayrı ayrı hesaplanmış ve her bir DÇ görüntü için histogram değışintileri toplamı bulunmuştur. Bu toplama 'blok histogramları değışinti toplamı' (BHDT) ismi verilsin. Aynı görüntünün ardışıl DGİ özyinelemelerinden elde edilen BHDT'ler (4.51) denklemindeki gibi hesaplanmıştır.

$$\sigma_{k+1} = \sigma_k + \lambda \left(\frac{BHDT_{k+1} - BHDT_k}{BHDT_{k+1}} \right) \quad (4.51)$$

BHDT'ler denkleminde kullanılarak bir sonraki ÖGY yinelemesinde kullanılacak olan bulanıklık değışintisinin ne olması gerektiği belirlenmiştir. Denklem (4.51)'de k özyineleme sayısını ve σ değışintiyi göstermektedir. λ ise yaklaşım hızı parametresidir. σ 'nın başlangıç değeri 0.1 alınmıştır.

Tüm algoritma içinde iki önemli seçenek ve girdi vardır. Birincisi NYF_{kamera} ve öteleme+dönme geometrik dönüşümlerinin seçimi ve uygulanmasıdır. [15]'deki çalışmada vurgulandığı gibi, alt piksel öteleme hesabının hassasiyetinin hayati önemde olduğu deneysel çalışmalarda görülmüştür. İkinci önemli seçenek ise eldeki resimler ile YÇ görüntüden üretilen resimler arasındaki farkın (hata) YÇ'yi düzeltmekte nasıl kullanılacağıdır. Bu çalışmada her iki seçim de Şekil 4.6 da açıklanan ağırlıkların kullanılması yönünde yapılmıştır. Her bir DÇ pikselin YÇ koordinat sisteminde yeri hesaplanıp o bölgedeki YÇ pikseller ile Şekil 4.6 da gösterilen ortak alanları bulunmuştur ve bu alanlar DÇ pikselin değerini hesaplamak için kullanılmıştır. Bulunan DÇ piksel değeri ile asıl DÇ görüntünün aynı noktadaki piksel değeri arasındaki fark ilgili YÇ piksellerin değerlerini yeniden ayarlamak için kullanılmıştır. Ayarlamaların (arttırma ya da azaltma) büyüklüklerini kesişim alanları belirlemiştir. İlgili YÇ pikseller yenilendikten sonra bir sonraki DÇ piksele, resimdeki tüm pikseller işleminden geçtikten sonra bir sonraki DÇ görüntüye geçilir. Tüm resimler için saklanan toplam hata değeri istenilen sınırın altına düştüğü zaman özyineleme döngüsünden çıkılır. Bu durumda kuramsal YÇ görüntü olarak üretilen ve döngüsel olarak yenilenen görüntü aranan sonuçtur.

4.4.1 Döngülü yüksek çözünürlük algoritmasında bulanıklığın belirmesi yönteminin deneysel sonuçları

Algoritma birçok ötelenmiş ve döndürülmüş DÇ görüntü üzerinde denendikten sonra genel sonuçları temsil eden 3 set DÇ görüntü ve özyineleme sonuçları Tablo 4.15’de verilmiştir. Bir başarı ölçütünün konulabilmesi için DÇ görüntülerin gerçek YÇ görüntülerden üretilmesi gerekmektedir. Böylelikle, algoritmalarla üretilen YÇ görüntü ile asıl YÇ görüntü arasındaki farkın azlığını gösteren SNR değerleri ile değişinti değerleri hesaplanıp tablolarda karşılaştırılabilmektedir. Gerçek uygulamalarda ise bu olanak yoktur. DÇ test görüntülerinin elde edilme yöntemi ise hemen tüm referanslarda eşdeğerdir ve şu şekildedir. YÇ görüntü geometrik dönüşümler kullanılarak bilinen öteleme ve dönme miktarları ile ötelenir ve döndürülür. Elde edilen dönmüş ve ötelenmiş YÇ resim yeni koordinat sistemine göre düzgün olmayan bir ızgara üzerinde olacağı için düzgün bir ızgaraya göre ara değerlendirme yapılır. Bu arada resim alanından çıkan kısımlar ve oluşan boşluklar için bir şey yapılmamıştır. Boşluklara sadece sıfır değeri yazılmıştır. Bu durum, Şekil 4.22’de görülen siyah bölgeler olarak ortaya çıkar. Şekil 4.23 elde edilen YÇ görüntü ve de Tablo 4.15 görüldüğü gibi önerilen algoritma sonuç görüntülerde önemli düzelme sağlamaktadır. Tabloda kübik sütunu 4 resimden kübik ara değerlendirme sonucunu, ÖGY sütunu kübik ara değerlendirme ile üretilen YÇ görüntü üzerinde varsayılan değerler kullanılarak orijinal ÖGY uygulanması ile elde edilen en iyi SNR değerlerini, ‘önerilen’ sütunu ise ÖGY algoritması içine bulanıklığı için önerilen yöntemin kullanılması ile elde edilen SNR değerlerini göstermektedir.

Tablo 4.15 SNR değerleri

	gerçek $\sigma = 0.5$, varsayılan $\sigma = 0.8$			
	bikübik	ÖGY	önerilen	bulunan σ
Lena	29.75	31.00	34.56	0.4964
Penta	26.72	28.66	32.30	0.4905
West	22.29	27.15	30.45	0.5040
	gerçek $\sigma = 0.8$			
Lena	28.50	33.04	32.97	0.7936
Penta	24.07	31.25	30.38	0.8020
West	22.02	29.75	28.88	0.8048
	gerçek $\sigma = 1.0$			
Lena	27.85	31.39	31.96	1.0001
Penta	23.34	29.01	29.12	1.0010
West	21.79	27.63	27.85	1.0063



Şekil 4.22 Ötelenmiş ve döndürülmüş Lena görüntüleri. (x_s, y_s, α) olmak üzere
 a) (0, 0, 0) b) (8.3, 2.4, 5) c) (1.9, 2.6, -8) d) (4.6, 3.3, 10)



Şekil 4.23 Önerilen yöntem sonunda elde edilmiş YÇ Lena görüntüsü
 (SNR=34.56 Tahmin edilen değişinti =0.4964)

Deneysel çalışmalar tüm DÇ görüntülerde aynı bulanıklık değerinin olduğu durumlar ile yapılmıştır. Ancak, önceki bölümde tanımlanan algoritmanın farklı bulanıklığa sahip DÇ resimler üzerinde de uygulanabileceği açıktır. Bu durumda ileriki çalışmaların resim içinde farklı bölgelerin farklı bulanıklığa sahip olduğu örneklerle yönleneceği söylenebilir.

5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez çerçevesinde alt piksel ötelemelerin hesabı ve alt piksel ötelenmiş düşük çözünürlü görüntülerden yüksek çözünürlüklü görüntü elde etme alanlarında katkılar sağlanmıştır. Tezde özetlenen veriler ışığında görüntü algılama modelinin mümkün olan en hassas şekilde belirlenmesi yüksek çözünürlük çalışmaları için esas olduğundan, gerçek sürekli kamera görüntülerinden algılama modelinin üretme yönünde ağırlık kazanmıştır. Görüntü algılama modelinden ayrı olarak ele alınabilecek konu ise alt piksel çakıştırma parametrelerin iyileştirilmesidir. İyi bir yüksek çözünürlük çalışması yukarıdaki bahsedilen her iki konunun da başarısına bağlıdır.

Düşük çözünürlüklü resimlerden yüksek çözünürlüklü resim elde etme hedefine de ulaşılmış olmasına rağmen araştırmaların sona ermesi söz konusu değildir. Bu tezde görüntü çakıştırma olarak kamera düzlemine paralel hareketler ele alınmıştır. Gerçek uygulamalarda sadece kamera düzlemine paralel olmayan hareketlerde mevcuttur. Bundan sonraki çalışmalar bu yönde olması beklenmektedir. Bu kapsamda görüntüler içindeki özellikleri kullanarak görüntü çakıştırma yapılması planlanmaktadır. Ayrıca bu tez çalışmasında görüntü algılama modelindeki bulanıklaşma parametreye bağlı bulanıklaşma olarak kabul edilmiş ve bu parametrenin tahmin edilmesi üzerine çalışılmıştır. Bundan başka olan bulanıklaşma (devinim bulanıklaşma gibi) bu tez sırasında ele alınmamıştır. Yüksek çözünürlük uygulamalarında model ve hareket parametreleri önceden tahmin edilerek yüksek çözünürlük görüntü elde edilmeye çalışılır. Bölüm 3.6 da hem bu parametreleri tahmin eden hem de yüksek çözünürlük elde etmeye çalışan yöntemlere değinilmişti. Bundan sonra yapılması planlanan görüntü çakıştırma, model parametrelerini tahmin etme ve yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmeyi bir arada yapan bir algoritma geliştirmektir. Ayrıca bu tez çalışmasında yapılmayan gürültünün karakteristiğini belirleyerek etkilerini giderme de ileriki çalışmalara bırakılmıştır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] I. Akiyama et al., A 1280x980 Pixel CCD Image Sensor,. Proceedings of the 1986 International Solid State Circuits Conference, San Fransico, CA, February, 1986
- [2] R. Gonzalez, R. E. Woods, Digital Image Processing,. Addison-Wesley Publishing Company, New York ,1992.
- [3] <http://www.image-designer.com/digital-camera-ccd.html>
- [4] <http://electronics.howstuffworks.com/question362.htm>
- [5] <http://www.apogee-ccd.com>
- [6] <http://www.foveon.net>
- [7] S. H. Lim, Video Poecessing Applications of High Speed CMOS Image Sensors, Phd thesis, Standford Univercity, March, 2003
- [8] J.S. Lim, 2 Dimensional Signal and Image Processing, Prentice Hall, New Jersey, 1990
- [9] A. G. Baxes, Digital Image Processing Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1994
- [10] R. M. Haralick, L. G. Shapiro, Computer and Robot Vision, Addison Wesley Publishing Co., USA, 1993
- [11] S. C. Park, M. K. Park, M. C. Kang, Superresolution Image Reconstruction :A Technical Overview, IEEE Signal Processing Magazine, May, 2003
- [12] A. K. Katsaggelos, S. K. Efstratiadis, A class of iterative signal restoration algorithms, IEEE Trans. Acoust, Speech, Signal Process, ASSP-38, 5 May 1990, 778-786
- [13] Bernard Jahne, Digital image processing: concepts, algorithms, and scientific applications, Springer-Verlag, 3rd edition, 1995.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [14] S. Baker, T. Kanade, Limits on Super-Resolution and How to Break Them, Proceedings of 2000 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000, pp. 372-379.
- [15] Z. Lin, H. Shum, Fundamental Limits of Reconstruction-Based Superresolution Algorithms under Local Translation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol..26, no.1, 2004, pp. 83-97
- [16] S. Farsui, A Fast and Robust Framework for Image Fusion and Enhancement, PhD Thesis, University of California, Santa Cruz, December 2005
- [17] A. Zomet, A. Rav-Acha, and S. Peleg, Robust super resolution, in Proc. of the Int.Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), vol. 1, pp. 645–650, Dec.2001.
- [18] N. Nguyen, P. Milanfar, and G. H. Golub, A computationally efficient image superresolution algorithm, IEEE Trans. Image Processing, vol. 10, pp. 573–583, Apr. 2001.
- [19] M. Elad and Y. Hel-Or, A fast super-resolution reconstruction algorithm for pure translational motion and common space invariant blur, IEEE Trans. Image Processing, vol. 10, pp. 1187–1193, Aug. 2001.
- [20] E. Seke, K. Özkan, N.Adar, S. Canbek, Düşük çözünürlüğe Sahip Görüntülerden Yüksek Çözünürlüğe Sahip Görüntüler Elde Edilmesi, Proje Raporu, 200315035, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Şubat 2006, Eskişehir
- [21] R. Y. Tsai and T. S. Huang. Multiframe image restoration and registration, Advances in Computer Vision and Image Processing, volume 1, pages 317–339. JAI Press Inc., 1984.
- [22] D. Keren, S. Peleg, and R. Brada, Image sequence enhancement using subpixel displacements, in Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 1988, pp. 742–746.
- [23] S. P. Kim, N. K. Bose, and H. M. Valenzuela, Recursive reconstruction of high resolution image from noisy undersampled multiframe, IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 38, no. 6, pp. 1013–1027, 1990.
- [24] M. Irani, S. Peleg, Improving resolution by Image Registration, CVGIP: Graphical Models and Image Processing, vol. 53, 1991, pp. 231–239.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [25] A. M. Tekalp, M. K. Ozkan, and M. I. Sezan, High-resolution image reconstruction from lower-resolution image sequences and space-varying image restoration, in Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, San Francisco, CA, 1992, vol. III, pp. 169–172.
- [26] A. Patti, M. I. Sezan, A. M. Tekalp, Superresolution Video Reconstruction with Arbitrary Sampling Lattices and Nonzero Aperture Time, IEEE Transactions on Image Processing, vol.6, no.8, 1997, pp.1064-1076.
- [27] M. Elad, A. Feuer, Restoration of a Single Superresolution Image from Several Blurred, Noisy and Undersampled Measured Images, IEEE Transactions on Image Processing, Vol.6, No.12, 1997, pp.1646-1658.
- [28] Brian C. Tom, Aggelos T. Katsaggelos, Resolution Enhancement of Video Sequences Using Motion Compensation, Proc. IEEE International Conference On Image Processing, Switzerland, 1996, 1:713-916
- [29] A. K. Katsaggelos, R. W. Schafer, Iterative deconvolution using different distorted versions of an unknown signal, Proceedings 1983 Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Boston, MA, April 1983, pp. 659-662
- [30] R. K. Ward, Restorations of Differently Blurred Versions of an Image with Measurement Errors in the PSF's, IEEE Transactions on Image Processing, pp. 369-381, 1993
- [31] M. K. Özkan, A. M. Tekalp, M. I. Sezan, POCS Based Restoration of Space-Varying Blurred Images, IEEE Transactions on Image Processing, pp. 450-454, 1994
- [32] G. Harikumar, Y. Bresler, Perfect Blind Restoration of Images Blurred By Multiple Filters: Theory and Efficient Algorithms, IEEE Transactions on Image Processing, pp. 219, 1999.
- [33] E. Trucco, A. Verri, Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Prentice-Hall, 1998.
- [34] M. Irani, S. Peleg, Improving resolution by Image Registration, CVGIP: Graphical Models and Image Processing, vol. 53, 1991, pp. 231–239.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [35] H. Shekarforoush, M. Berthod, J. Zerubia, Subpixel Image Registration by Estimating the Polyphase Decomposition of the Cross Power Spectrum, INRIA, France, Res. Rep. 2707, 1995
- [36] Andrey Krokhin, Superresolution in Image Sequences, Ms thesis, Northeastern University, Boston, Massachusetts, September 2005
- [37] P. Vandewalle, S. Süsstrunk, M. Veterli, A frequency Domain Approach to Registration of Aliased Images with application to Super-Resolution, EURASIP Journal on Applied Signal Processing, ID 71459, 2006
- [38] H. Andrews and B. Hunt, Digital Image Restoration,. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1977.
- [39] A. Katsaggelos, editor, Digital Image Restoration. Springer-Verlag, 1991.
- [40] R. Lagendijk and J. Biemond, Iterative Identification and Restoration of Images, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [41] A. Jain, Fundamentals of Digital Image Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [42] S. Borman, Topics in Multiframe Superresolution Restoration, PhD thesis, Notre Dame, Indiana, April 2004
- [43] J. Hadamard, Lectures on the Cauchy Problem in Linear Partial Differential Equations, Yale University Press, New Haven, CT, 1923.
- [44] J. Russ, The Image Processing Handbook, CRC Press. 2002.
- [45] S. Chaudhuri (editor), Super-resolution imaging, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [46] K-C .Chu, B3-splines for interactive curve and surface fitting, Computers and Graphics, Vol. 14, No. 2, 1990, pp.281–288. SPL E0.1.34
- [47] W. K Pratt, Digital Image Processing, JohnWiley and Sons, New York, USA, 1978, ISBN 0–471–01888–0. UL 9428.c.3814

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [48] R. G. Keys, Cubic convolution interpolation for digital image processing, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-29, pp. 1153–1160, Dec. 1981.
- [49] D. P. Mitchell and A. N. Netravali, Reconstruction filters in computer graphics, Comput. Graph., vol. 22, Aug, 1988, pp. 221–288.
- [50] J. D Foley, A. van Dam, S. K Feiner and J. F. Hughes, Computer Graphics: Principles and Practice, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA, 1990, ISBN 0–201–12110
- [51] P. Thévenaz, T. Blu, and M. Unser, Image Interpolation and Resampling, in Handbook of Medical Imaging, Processing and Analysis, I.N. Bankman, Ed., Academic Press, San Diego Ca, USA, 2000, pp. 393-420.
- [52] A. Tekalp, Digital Video Processing, chapter 17. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1995.
- [53] S. Kim and W. Su, Recursive high-resolution reconstruction of blurred multiframe images. In Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, volume 4, pages 2977-2980, Toronto, Canada, May 1991.
- [54] S. Kim and W. Su, Recursive high-resolution reconstruction of blurred multiframe images. IEEE Transactions on Image Processing, 2: 534-539, October 1993.
- [55] A. Tikhonov and V. Arsenin, Solutions of Ill-Posed Problems. V. H. Winston & Sons, Washington, D.C., 1977.
- [56] W. Su and S. Kim, High-resolution restoration of dynamic image sequences. International Journal of Imaging Systems and Technology, 5(4):pp 330-339, 1994.
- [57] S. Kim and W. Su, Subpixel accuracy image registration by spectrum cancellation. In Proceedings of the IEEE International Conference of Acoustics, Speech and Signal Processing, volume V, pp 153-156, Minneapolis, MN, April 1993.
- [58] C. Davila, Recursive total least squares algorithms for adaptive filtering. In Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 1853-1856, Toronto, Canada, 1991.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [59] L. Landweber, An iterative formula for Fredholm integral equations of the first kind. *American Journal of Mathematics*, pp. 615-624, 1951.
- [60] M. Irani and S. Peleg, Super resolution from image sequences. In *Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition*, volume 2, pages 115-120, Atlantic City, NJ, June 1990.
- [61] S. Kirkpatrick, C. Gellat, Jr. and M. Vecchi, Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598): 671-680, May 1983.
- [62] S. Geman and D. Geman, Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 6(6): 721-741, June 1984.
- [63] L. Rudin, S. Osher, and E. Fatemi, "Nonlinear total variation based noise removal algorithms," *Physica D*, vol. 60, pp. 259–268, Nov. 1992.
- [64] A. Bovik, *Handbook of Image and Video Processing*. New Jersey: Academic Press Limited, 2000.
- [65] A. Bovik, *Handbook of Image and Video Processing*. New Jersey: Academic Press Limited, 2000.
- [66] T. F. Chan, S. Osher, and J. Shen, The digital TV filter and nonlinear denoising, *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 10, pp. 231–241, Feb. 2001.
- [67] S. Farsiu, M. Elad and P. Milanfar, Multi-frame demosaicing and superresolution from under-sampled color images. In C. Bouman and E. Miller, editors, *Computational Imaging II*, volume 5299 of *Proceedings of the SPIE*, San Jose, CA, USA, January 2004
- [68] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, third edition, 1991.
- [69] R. Schultz and R. Stevenson, Improved definition video frame enhancement. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, volume 4, pages 2169-2172, Detroit, MI, May 1995.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [70] H. Stark and P. Oskoui, High-resolution image recovery from image-plane arrays, using convex projections. *Journal of the Optical Society of America A*, 6(11): 1715-1726, 1989.
- [71] D. Youla and H. Webb, Image restoration by the method of convex projections: Part 1- Theory. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, MI-1(2): 81-94, October 1982.
- [72] P. Oskoui-Fard and H. Stark, Tomographic image reconstruction using the theory of convex projections. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 7(1): 45-58, March 1988.
- [73] A. Patti, M. Sezan and A. Tekalp, High resolution standards conversion of low resolution video. In *Proceedings of the IEEE International Conference of Acoustics, Speech and Signal Processing*, volume 4, pages 2197-2200, Detroit, MI, 1995.
- [74] J. P. Muller, *Digital Image Processing in Remote Sensing*, pp. 226-269, Philadelphia: Taylor & Francis, 1988.
- [75] R. H. T. Bates, Astronomical speckle imaging, *Phys. Rep.*, vol. 90(4), pp. 203- 97, Oct. 1982.
- [76] T. J. Schulz, Multiframe blind deconvolution of astronomical images, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 10(5), pp. 1064-1073, May 1993.
- [77] M. J. B. Crowther and M. C. Fernandez, Imaging in videoconferencing now: telemedicine in Somalia, *Advanced Imaging*, pp. 28-31, Oct. 1993.
- [78] M. Cannon, Blind deconvolution of spatially invariant image blurs with phase, *IEEE Trans. Acoust. , Speech, Signal Process. ,* vol. 24(1), pp. 58-63, Feb. 1976.
- [79] M. M. Chang, A. M. Tekalp and A. T. Erdem, Blur identification using the bispectrum, *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 39(10), pp. 2323-2325, Oct. 1991.
- [80] R. Fabian and D. Malah, Robust identification of motion and out-of-focus blur parameters from blurred and noisy images, *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, vol. 53(5), pp. 403-412, Sept. 1991.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [81] B. Chalmond, PSF estimation for image deblurring, *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, vol. 53(4), pp. 364-372, July 1991.
- [82] G. R. Ayers and J. C. Dainty, Iterative blind deconvolution method and its applications, *Optics Letters*, vol. 13(7), pp. 547-549, July 1988.
- [83] B. L. K. Davey, R. G. Lane and R. H. T. Bates, Blind deconvolution of noisy complex-valued image, *Optics Communications*, vol. 69(5,6), pp. 353-356, Jan. 1989.
- [84] J. H. Seldin and J. R. Fienup, Iterative blind deconvolution algorithm applied to phase retrieval, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 7(3), pp. 428-433, Mar. 1990.
- [85] N. Miura and N. Baba, Extended-object reconstruction with sequential use of the iterative blind deconvolution method, *Optics Communications*, vol. 89, pp. 375-379, 1992.
- [86] N. Miura, N. Baba, S. Isobe, M. Noguchi and Y. Norimoto, Binary star reconstruction with use of the blind deconvolution method, *Journal of Modern Optics*, vol. 39(5), pp. 1137-1146, May 1992.
- [87] F. Tsumuraya, N. Miura and N. Baba, Iterative blind deconvolution method using Lucy's algorithm, *Astron. Astrophys.*, vol. 282(2), pp. 699-708, Feb. 1994.
- [88] N. Miura, K. Ohsawa and N. Baba, Single-frame blind deconvolution by means of frame segmentation, *Optics Letters*, vol. 19(10), pp. 695-697, May 1994.
- [89] R. G. Lane, Blind deconvolution of speckle images, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 9(9), pp. 1508-1514, Sept. 1992.
- [90] A. Bjorck, *Numerical Methods for Least Squares Problems*, *SIAM Press*, ch. 5, 1996.
- [91] R. J. Althof, M. G. J. Wind, J. T. Dobbins, A Rapid and Automatic Image Registration Algorithm with Subpixel Accuracy, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, pp. 308-316, 1997.
- [92] E. Seke, K. Özkan, Registration of Subpixel Translations Using a Piecewise Linear Approximation of PSF, *WSEAS Multiconference ICOSSIP-2004 Izmir, Turkey, September 13-16, 2004* (also appeared in *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, vol 1, no 4, October 2004)

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- [93] E. Seke, K. Özkan, Least-Squares Subpixel Image Registration Using CCD Cell Areas, International Conference on Informatics ICI-2004, 01-04 September 2004, İzmir-Çeşme
- [94] E.Seke, K.Özkan, Least Squares Sub-pixel Registration Refinement Using Area Sampler Model, Journal of Mathematical Imaging and Vision, September 2006
- [95] E. Seke, K. Özkan, Hücre Alanları Yöntemi İle Subpixel İmge Çakıştırma Parlaklık Etkisinin Giderilmesi, HİTEK 2004 Havacılıkta İleri Teknolojiler Sempozyumu, Aralık 2004, İstanbul
- [96] E. Seke, K. Özkan, Multiresolution Approach to Subpixel Registration by Linear Approximation of PSF, ICCI 2004 International Conference on Computational Intelligence, 17-19 2004, İstanbul (also appeared in International Journal of Signal Processing, vol.1, no.3, pp.171-174, 2004).
- [97] H. Foroosh, J. B. Zerubia, M. Berthod, Extension of Phase Correlation to Subpixel Registration, IEEE Transactions on Image Processing, vol.11, no.3, pp. 188-200, 2003.
- [98] R. N. Gasimov, Augmented Lagrangian duality and nondifferentiable optimization methods in nonconvex programming, Journal of Global Optimization 24 (2002) 187–203.
- [99] R. N. Gasimov, A.M. Rubinov, On augmented Lagrangians for optimization problems with a single constraint, Journal of Global Optimization 28 (2004) 153–173.
- [100] K.Özkan, E.Seke, N.adar, S.Canbek, Iterative Super Resolution Reconstruction Using Modified Subgradient Method, Intl. Workshop on Multimedia Content Representation, Clasification and Security, September 2006 Istanbul
- [101] K.Özkan, E.Seke, Düşük çözünürlüklü görüntülerden aykırı değer ayıklaması kullanarak gürbüz yüksek çözünürlüklü görüntü elde etme yöntemi, ELECO 2006, Bursa,Türkiye, Ocak 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Kemal Özkan 17 Mart 1975 Antalya doğumludur ve Türkiye cumhuriyeti vatandaşıdır. İlk ve orta öğrenimini Antalya’da, lise eğitimini Antalya Endüstri Meslek Lisesinde okul birincisi olarak tamamlamıştır. Eskişehir Osmangazi Üniversite’sinden 1998 yılında Lisans ve 2000 yılında Yüksek Lisans derecelerini almıştır. Aynı üniversitede 1998 yılından itibaren akademik çalışmalarını sürdürmektedir. Çalışma konuları Sayısal İşaret İşleme ve Görüntü İşleme dir. Evli ve bir kız çocuğu babasıdır.