

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜLERDEN
SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Metin TOYRAN**

**Anabilim Dalı : ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
Programı : TELEKOMÜNİKASYON MÜHENDİSLİĞİ**

HAZİRAN 2008

**DÜŞÜK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜLERDEN
SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Metin TOYRAN
(504051319)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Nisan 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ahmet Hamdi KAYRAN

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Melih PAZARCI (İ.T.Ü.)

Yard. Doç. Dr. Mustafa KAMAŞAK (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında benden değerli zamanını esirgemeyen, sahip olduğu bilgi birikimini benimle paylaşan ve çalışma süresince beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet Hamdi Kayran'a, benden yardımlarını ve hoşgörülerini esirgemeyen TÜBİTAK UEKAE'deki mesai arkadaşlarıma, fikirleri ve katkılarıyla beni yönlendiren ağabeyim Yük. Müh. Mustafa Toyran'a, beni her koşulda destekleyen ve cesaretlendiren aileme teşekkür ederim. Bu çalışmayı hayatımda sahip olduğum şeylerden en güzeli ve en değerlisi olan babam Hasan Toyran ve annem Gönül Toyran'a armağan ediyorum.

Haziran 2008

Metin Toyran

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
SEMBOL LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çözünürlük Nedir?	6
1.2 Süper Çözünürlüklü Görüntüleme	7
1.3 Uygulama Alanları	8
1.4 Temel Kavramlar	9
1.4.1 Alt Örneklemeye	9
1.4.2 Üst Örneklemeye.....	10
1.4.3 İnterpolasyon Teknikleri.....	11
2. SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA PROBLEMİ	13
2.1 Problemin Tanımı.....	13
2.2 Gözlem Modeli	16
2.3 Görüntülerin Hizalanması.....	20
2.4 Süper Çözünürlüklü Görüntünün Oluşturulması	27
3. FREKANS BÖLGESİ YAKLAŞIMIYLA SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA.....	33
3.1 Düzlemsel Hareket Kestirimi.....	33
3.1.1 Kayma Miktarının Kestirimi	35
3.1.2 Dönme Miktarının Kestirimi.....	37

3.2	Dönme Miktarının Kestirimine Farklı Bir Yaklaşım	39
3.3	Kısmen Örtüşmüş Görüntü İşaretleri İçin Düzlemsel Hareket Kestirimi	42
3.4	Görüntünün Yeniden Oluşturulması Tekniği	45
4.	UYGULAMALAR VE ANALİZ	47
4.1	Algoritmanın Analizi.....	47
4.2	Algoritmanın Test Görüntüleri Üzerindeki Sonuçları ve Analizi.....	50
4.3	Algoritmanın Performansını Arttırıcı Yeni Bir Yaklaşım	57
4.4	Görüntü Sayısının Algoritmaya Etkileri.....	64
4.5	Görüntülerdeki Yönlülüğün Algoritmaya Etkileri	65
4.6	Görüntü Boyutlarının Algoritmaya Etkileri.....	67
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	68
	KAYNAKLAR.....	71
	ÖZGEÇMİŞ	78

KISALTMALAR

ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
LMS	: En Küçük Ortalama Kareler Yöntemi
RLS	: Özyineli En Küçük Kareler Yöntemi
MAP	: En Büyük Sonsal
ML	: En Büyük Olabilirlik
PSF	: Noktasal Yayılım Fonksiyonu
DFT	: Ayrık Fourier Dönüşümü
A/D	: Analog Sayısal Dönüştürücü
CFT	: Sürekli Fourier Dönüşümü
CLS	: Sınırlandırılmış En Küçük Kareler Yöntemi
SNR	: İşaret Gürültü Oranı
MSE	: Ortalama Karesel Hata
SR	: Süper Çözünürlük
HR	: Yüksek Çözünürlük
POCS	: Konveks Kümeye İzdüşürme Yöntemi
MI	: Karşılıklı Bilgi
CP	: Kontrol Noktası
CCD	: Yük Kuplajlı Cihaz
CMOS	: Tümleşik Metal Oksit Yarı İletken
SFR	: Uzaysal Frekans Cevabı
MTF	: Modülasyon Transfer Fonksiyonu
MRI	: Manyetik Rezonans ile Görüntüleme
CT	: Bilgisayarlı Tomografi
NMR	: Nükleer Manyetik Rezonans
NTSC	: Ulusal Televizyon Sistem Komitesi
HDTV	: Yüksek Çözünürlüklü Televizyon

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1: Algoritma Sonucu Hesaplanan Görüntüler Arasındaki Hareket Kestirim Parametreleri.....	54
Tablo 4.2: Görüntüler Arasındaki Gerçek Hareket Parametreleri	54
Tablo 4.3: Algoritmaların Performanslarının Karşılaştırılması.....	57
Tablo 4.4: Bu Çalışmada Önerilen Algoritma Öteleme Miktarının Hesaplanmasında Diğer Algoritmalarından Daha Başarılıdır	57
Tablo 4.5: Gerçek Hareket Kestirim Parametreleri	59
Tablo 4.6: 360° Derece Boyunca Hesaplanmış Hareket Kestirim Parametreleri	59
Tablo 4.7: 180° Boyunca Hesaplanmış Hareket Kestirim Parametreleri.....	59
Tablo 4.8: $H(\alpha)$ 'nın 360° ve 180° Boyunca Hesaplanması İçin Geçen Süre.....	60
Tablo 4.9: Şekil 4.3.2'deki 360° ile 90°, 180°, 270° Boyunca Oluşturulan Görüntüler Arasındaki Ortalama Karesel Hata	61

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1: Örnek bir SFR Fonksiyonu (a) Sayısal bir kameraya ait SFR fonksiyonu, (b) ISO'nun sayısal kameralara ait SFR fonksiyonunun hesaplanmasında kullandığı tablo	7
Şekil 1.2: İdeal Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma Tekniği	8
Şekil 2.1 : Gözlem Modeli	17
Şekil 2.2: Yüksek Çözünürlüklü Grid Üzerindeki İnterpolasyon İhtiyacı	17
Şekil 2.3: Düşük Çözünürlüklü Sensörün Noktasal Yayılım Fonksiyon	18
Şekil 2.4: Görüntü Hizalama İşlemi. (a) ve (b) Özniteliklerin belirlenmesi, (c) ve (d) Özniteliklerin değişmeyen öznitelik tanımlayıcılarıyla karşılaştırılması, (e) Dönüşüm modelinin kestirimi, (f) Uygun bir interpolasyon tekniğinin kullanılarak görüntünün yeniden örneklenmesi ve dönüşümün gerçekleştirilmesi.....	23
Şekil 2.5: Alan Tabanlı Öznitelik Karşılaştırmasının Fourier Yöntemiyle Gerçekleştirilmesi. (a) Küçük bir bölgenin tüm görüntü üzerinde hizalanması, (b) Maksimum nokta birbiriyle örtüşen noktayı göstermektedir	26
Şekil 2.6: Düzgün Olmayan İnterpolasyon Tekniği ile Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma Şeması	27
Şekil 2.7: Düzgün Olmayan İnterpolasyon Tekniğindeki Hizalama, İnterpolasyon ve Görüntüyü Yeniden Oluşturma İşlemleri	28
Şekil 2.8: Düzgün Olmayan İnterpolasyonla Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma. (a) En yakın komşuluk interpolasyon tekniği, (b) Çift doğrusal interpolasyon tekniği, (c) Dört görüntü kullanılarak düzgün olmayan interpolasyon tekniği, (d) (c)'ye uygulanan bulanıklık giderme işlemi	29
Şekil 3.1: Dönme İşleminin Görüntüler Üzerindeki Etkisi. (a) $f_1(x,y)$ görüntü işareti, (b) $f_1(x,y)$ 'nin $\theta_0 = -15,82^\circ$ derece döndürülmesiyle elde edilen $f_2(x,y)$ görüntü işareti, (c) ve (d) $f_1(x,y)$ ve $f_2(x,y)$ işaretlerinin genlik spektrumları olan $ F_1(u,v) $ ve $ F_2(u,v) $ dönme işleminden etkilenmez.....	38
Şekil 3.2: Dönme İşleminin Uzay Domeninde İncelenmesi ($\theta_0 = 25^\circ$). (a) Orijinal Görüntü, (b) Döndürülmüş görüntü	40
Şekil 3.3: Dönme İşleminin Frekans Domeninde İncelenmesi. Uzay bölgesindeki bir görüntü döndürülürse görüntünün fourier dönüşümünün genliği de aynı oranda döner($\theta_0 = 25^\circ$). (a) Şekil 3.2 (a)'daki orijinal görüntünün, (b) Şekil 3.2 (b)'deki döndürülmüş görüntünün fourier dönüşümünün genliği.....	40
Şekil 3.4: Dönme Açısının Kestirimi. (a) Şekil 3.2'deki görüntülerin Fourier dönüşümlerinin genliklerinin $H(\alpha)$ 'nın fonksiyonu olarak	

grafikleri(mavi orijinal, kırmızı döndürülmüş görüntü), (b) $H_1(\alpha)$ ve $H_2(\alpha)$ arasındaki korelasyon eğrisi $\theta_0 = 25^\circ$ noktasında maksimuma ulaşmıştır	41
Şekil 3.5: İzdüşürme İşleminde Dolaylı Dönme Açısının Kestiriminde Ortaya Çıkan Karışıklık. (a) Fourier Spektrumu Dairesel Özellik Gösteren Bir Görüntülerin dönme miktarı bu çalışmada önerilen yöntemle göre doğru bir şekilde hesaplanamaz. (b) $H(\alpha)$ ortalama frekans içeriği bu tip görüntüler için sabit kalır	42
Şekil 3.6: Orijinal Sürekli Zamanlı Bir İşaret ve Onun Frekans Spektrumu	44
Şekil 3.7: Örneklenmiş İşaretin Zaman ve Frekans Bölgesi Gösterilimi (örtüşme)	44
Şekil 3.8: Alçak Geçiren Süzgeçten Geçirilmiş İşaretin Zaman ve Frekans Bölgesi Gösterilimi (örtüşen bileşenler temizlenmiş).....	44
Şekil 4.1: Tukey(Keskinleştirilmiş Kosinüs) Penceresi	49
Şekil 4.2: Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma Algoritmasında Kullanılan Pencere. (a) Orijinal görüntü Tukey Penceresi ile çarpılarak dairesel olarak simetrik hale getiriliyor, (b) Görüntü alçak geçiren süzgeçten geçirilerek yeniden oluşturma şartları sağlanır (örtüşen kısımlar ayrılır)	49
Şekil 4.3: Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma Algoritmasının Bir Test Görüntüsü Üzerinde İncelenmesi. (a) Referans Görüntü (512x512), (b) Referans Görüntüden Oluşturulan Düşük Çözünürlüklü Test Görüntüleri (görüntü kısmı 128x128 olan 144x144'lük görüntüler).....	51
Şekil 4.4: Şekil 4.3'teki Görüntüler Kullanılarak (a) Bu Çalışmada Önerilen Algoritma Sonucu Elde Edilen Süper Çözünürlüklü Görüntü (görüntü kısmı 256x256 olan 288x288'lik görüntü), (b) Test Görüntülerinden Birinin EnYakın Komşuluklu İnterpolasyon Yöntemiyle Büyütülmesi Sonucu Elde Edilen Görüntü (256x256)	52
Şekil 4.5: Aynı Sahneye Ait 400x528 Boyutlarında Düşük Çözünürlüklü Görüntüler.....	53
Şekil 4.6: Aynı Sahneye Ait Birden Fazla Düşük Çözünürlüklü Görüntü Kullanılarak Oluşturulan 800x1056 Boyutlarındaki Süper Çözünürlüklü Görüntü	54
Şekil 4.7: Algoritmanın Uydu Görüntüleri Üzerinde Uygulanması (a) Uydudan elde edilmiş referans görüntü, (b) Bu referans görüntüden elde edilen gözlem görüntüleri	55
Şekil 4.8: Algoritmanın Uydu Görüntüleri Üzerinde Uygulanması. (a) Algoritma sonucu elde edilen görüntü, (b) Şekil 4.7'deki gözlem görüntülerinden birinin Çift Doğrusal interpolasyon tekniği kullanılarak gerçekleştirilen görüntü büyütme işlemi sonucu elde edilen görüntü	56
Şekil 4.9: Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma Algoritmasının İşlemsel Karmaşıklığının Azaltılması. (a) 300x229 boyutlarında düşük çözünürlüklü görüntüler, (b) $H(\alpha)$ 'nın 360° , (c) $H(\alpha)$ 'nın 180° boyunca hesaplanması sonucu elde edilen 600x458 boyutlarındaki süper çözünürlüklü görüntü.....	58
Şekil 4.10: Farklı Açılımlarda Elde Edilen Süper Çözünürlüklü Görüntülerin Karşılaştırılması. $H(\alpha)$ 'nın (a) 360° , (b) 90° , (c) 180° , (d) 270° boyunca hesaplanması sonucu elde edilen görüntü.....	61

Şekil 4.11: Seçilen Her Açı Aralığında Oluşturulan Süper Çözünürlüklü Görüntü ile 360° Boyunca Oluşturulan Süper Çözünürlüklü Görüntü Arasındaki Ortalama Karesel Hatanın Değişimi	62
Şekil 4.12: Doğru bir hizalama işlemi sonrasında oluşturulan süper çözünürlüklü görüntü	63
Şekil 4.13: Hatalı bir hizalama işlemi sonucu elde edilen görüntü	63
Şekil 4.14: Düşük çözünürlüklü görüntülerden birine uygulanan çift kübik interpolasyon sonucu elde edilen görüntü	64
Şekil 4.15: Görüntü Sayısına Bağlı Olarak Hesaplanan Ortalama Karesel Hata.....	65
Şekil 4.16: Görüntülerin Frekans Spektrumunun Algoritma Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi	66

SEMBOL LİSTESİ

L	: Alt örnekleme katsayısı
D	: Alt örnekleme matrisi
W	: Ağırlık matrisi
C	: Dışbükey küme
θ_0	: Dönme miktarı
R	: Düzlemde dönme matrisi
	: Küçük bir sayı
	: Polar düzlemde görüntü yarıçapı
K	: İşaretin maksimum frekansı
T	: İşaret periyodu
κ	: İşaretin fourier serisi katsayıları
t_0	: İşaretin zamanda öteleme miktarı
N	: İşaretten alınan örnek miktarı
θ_m	: Kestirim açısı
x_m	: Kayma miktarı kestirimi
Q	: Çapraz güç spektrumu
N_{HR}	: Yüksek çözünürlüklü görüntünün örnekleme frekansı
f_{LR}	: Düşük çözünürlüklü görüntü
f_{HR}	: Yüksek çözünürlüklü görüntü
$f_{LR,m}$: Düşük çözünürlüklü m. görüntü
$f_{LR,w,0}$: Pencereden geçirilmiş düşük çözünürlüklü referans görüntüsü
$f_{LR,w,m}$: Pencereden geçirilmiş düşük çözünürlüklü m. görüntü
$F_{LR,w,0}$: $f_{LR,w,0}$ görüntüsünün Fourier Dönüşümü
$F_{LR,w,m}$: $f_{LR,w,m}$ görüntüsünün Fourier Dönüşümü

DÜŞÜK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜLERDEN SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA

ÖZET

Son yıllarda daha fazla görüntü kalitesi sağlayan kameralara olan talep çok hızlı bir şekilde artış göstermiştir. Ancak donanım seviyesinde elde edilecek çözünürlük miktarının sınırlı kalması bu konuda farklı çalışmalarını tetiklemiştir. Bu alandaki büyük talep yüksek çözünürlüklü görüntü elde etme tekniklerinin hızlanmasını sağlamıştır. Görüntü iyileştirmenin ikinci nesil problemi olarak bilinen süper çözünürlüklü görüntü oluşturma teknikleri bu probleme bir çözüm olarak akademik dünyaya hızlı bir şekilde girmiştir.

Bu çalışmada gereken yüksek frekans içeriğini elde etmek için aynı sahneye ait bir dizi gözlem görüntüsü kullanılarak yüksek çözünürlüğe sahip ve örtüşme etkisi görülmeyen bir görüntü oluşturulmuştur. Genellikle kullanılan gözlem görüntüleri arasında küçük kaymalar veya daha karmaşık hareketler olur, böylece her görüntü aynı sahne için farklı bilgiler içerir. Bu çalışma ağırlıklı olarak bu hareket miktarlarının kestirimi üzerinde yoğunlaşmıştır. Çünkü süper çözünürlüklü görüntü oluşturma aşamasında hareket miktarının kestirimi en temel adımı oluşturmaktadır. Hatalı bir hareket kestirimi sonrasında uygulanan yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturma işlemi bilinen interpolasyon yöntemleriyle gerçekleştirilen görüntü büyütme işlemlerine göre çok daha kötü sonuçlar verir. Diğer bir anlatımla, hareket parametrelerinin doğru kestirimi süper çözünürlüklü görüntü oluşturma işlemi için bir ön koşuldur. Bu işleme görüntü hizalama işlemi denilir.

İdeal durumda elde edilen görüntü işaretlerinde örtüşme etkisinin olmadığı kabul edilir ve bu görüntüler üzerinde düzlemsel kayma ve dönme miktarları hesaplanarak süper çözünürlüklü görüntü oluşturma aşamasına geçilebilir. Ama gerçek durumda sayısal bir görüntüyü elde ederken görüntüleme sisteminin odağının ayarlanamaması, kırılma limit değerlerinden kaynaklanan optik bozukluklar, hareketten kaynaklanan bulanıklık etkisi, sensörde oluşan gürültü ve sensörün yetersiz kalması gibi nedenlerden dolayı görüntüde bozulmalar gözlenir. Bunların başında da örtüşme etkisi gelir. Bu çalışmada görüntü işaretinin spektrumunun örtüşme olmayan alçak frekans bölgeleri kullanılarak düzlemsel kayma ve dönme parametreleri hesaplanmıştır. Böylece örtüşme etkisine uğramış görüntü işaretleri kullanılarak örtüşme etkisi görülmeyen süper çözünürlüklü görüntü oluşturulmuştur.

SUPER RESOLUTION IMAGE RECONSTRUCTION FROM LOW RESOLUTION IMAGES

SUMMARY

For last ten years, demand on the high resolution cameras has tremendously increased. Since current resolution level of the image sensors is limited, new approaches towards increasing spatial resolution are required. One promising approach is named super resolution which use signal processing to obtain a high resolution image.

In this thesis, a set of input images of the same scene are used to extract such high frequency information and create a higher resolution aliasing-free image. There is usually small shift or more complex motion between the observation images. Therefore, they include slightly different information about the scene. In this thesis, it is mostly focused on the estimation of motion parameters, which is also called image registration. Accurate subpixel motion estimation is a very important factor in the success of the super resolution image reconstruction algorithm. Resulting image after the unsuccessful motion parameters estimation is much worse than the image which is zoomed using interpolation techniques.

In ideal cases, images are assumed to be aliasing-free, non-blurred and noiseless. However, in the process of recording a digital image, there is a natural loss of spatial resolution caused by the optical distortions, motion blur, sensor noise and insufficient sensor density. Thus, the recorded image is usually suffers from blur, noise and aliasing effects. In this thesis, the planar shift and rotation parameters are computed using only image spectra which is free of aliasing(low frequency part). Therefore, an aliasing-free super resolution image is reconstructed using a set of aliased images.

1. GİRİŞ

Geçen son on yılda, sayısal kameralar hızla artan piksel sayıları ve çok kullanışlı modelleriyle hızlı bir evrim geçirmiştir. 1993 yılında, CCD ve CMOS sensörlerdeki 0,3 mega piksel olan piksel sayısı bugün hızla artarak en yeni profesyonel modellerde 39 mega piksel gibi ciddi rakamlara ulaşmıştır. Bu boyuttaki görüntü kalitesi kamera üreticileri için en çok satan özelliklerin başında gelmektedir.

Sayısal bir görüntüdeki piksel sayısı o görüntünün çözünürlüğü olarak bilinir. Daha fazla piksel kapasitesine sahip olan kameralara artan talep süper çözünürlüklü görüntüleme konusuna olan ilgiyi çok ciddi ölçüde arttırmıştır. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma, aynı sahnenin birbirinden farklı birkaç görüntüsünün (düşük çözünürlüklü) alınıp bunların birleştirilmesiyle daha yüksek çözünürlüklü tek bir görüntü elde etme işlemidir. Örneğin, bir fotoğrafçı dört mega piksellik kamerasıyla dört tane görüntü çektikten sonra, onları birleştirerek on altı mega piksellik bir görüntü elde edebilir.

Süper çözünürlük terimi ilk defa Papoulis tarafından 1968'de kullanılmıştır [1]. Papoulis, görüntülerin boyutlarının sonlu ve bant genişliğinin sınırlı olması gibi özellikleri kullanarak ekstra yüksek frekans bilgisinin hesabının mümkün olduğunu göstermiştir ve süper çözünürlük kavramını kullanmıştır. 1984 yılında, Tsai ve Huang birden fazla görüntü kullanan ilk süper çözünürlük algoritmasını sunmuştur [2]. Çalışmalarında, frekans bölgesi yöntemiyle uydu görüntülerinin çözünürlüklerinin bir dizi giriş görüntüsü kullanılarak artırılmasından bahsedilmiştir. Tsai ve Huang görüntüler arasındaki hareket parametrelerini bulmak için yeniden oluşturulacak işaretin belirli bir frekansa göre bant sınırlı kalmasına dikkat etmiştir. Bunu sağlayan değerler test edilerek belirlenmeye çalışılmıştır. Yine çalışmalarında en iyi değerlerden küçük sapmalarda oluşturulan işaretin bant genişliğinin daha büyük olduğu gösterilmiştir. Böylece yüksek çözünürlüklü görüntünün FFT katsayıları, FFT tabanlı algoritmalarla etkin bir şekilde hesaplanabilmektedir.

Mevcut süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniklerinin başarılı analizleri Borman ve Stevenson [3] ve Park [4] tarafından sunulmuştur. Son zamanlarda, süper çözünürlüklü görüntü oluşturma üzerine IEEE'de (Kang ve Chadhuri [5] tarafından düzenlenmiştir) ve EURASIP'de (Ng [6] tarafından düzenlenmiştir) özel oturumlar açılmıştır. Geçtiğimiz son birkaç yılda, Chadhuri tarafından hareketsiz (*motionless*) süper çözünürlüklü görüntü oluşturma ile ilgili ve süper çözünürlüklü görüntülemeledeki çeşitli diğer konularla ilgili iki kitap yayınlanmıştır [7, 8]. Son olarak, bazı süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritmaları için Matlab'de gerçekleştirilen uygulamalar Farsiu [9] ve Vandewalle [10] tarafından sunulmuştur.

Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritmasında çözülmesi gereken iki ana problem vardır. Birincisi, bütün görüntüler ortak bir grid üzerinde birbirleri üzerinde doğru bir şekilde hizalanmalıdırlar. İkincisi, bu görüntülerden daha yüksek çözünürlükte yeni bir görüntü oluşturulmalıdır. Bu iki aşamadan herhangi biri doğru yapılmazsa sonuçta elde edilecek görüntü beklenen kalitede olmaz ve hiçbir çözünürlük kazancı elde edilemez. Bu nedenle, bu çalışmada ağırlıklı olarak ilk aşama üzerinde durulmuştur.

Brown [11], ve Zitova ve Flusser [12] mevcut görüntü hizalama teknikleri üzerinde faydalı incelemeler yapmışlardır. Frekans domeni tekniklerinin detaylı analizinden önce *uzay domeni* tekniklerinin analizinin özetle yapılmasında fayda vardır. Popüler tekniklerden biri, bir görüntüdeki belirgin özelliklerin bulunması ve bu özelliklerin farklı görüntülerde bunlara karşı düşen özelliklerle ilişkilendiren bir fonksiyonun bulunmasını öneren bir yaklaşımdır [13, 14, 15]. Diğer bir yaklaşım ise, Taylor serisi tekniğidir. Hareket parametreleri Taylor serisindeki bilinmeyenleri oluşturur. Bu bilinmeyenler Taylor serisinden türetilen bir dizi denklemin çözülmesiyle hesaplanır. Taylor serileri sadece küçük sapma değerlerinde iyi bir yaklaşım verdikleri için, bu tip hizalama teknikleri genelde arka arkaya iteratif bir şekilde uygulanırlar (Gauss piramidi) [16, 17]. Irani, bu hareket parametrelerinin hesaplanmasında, iteratif teknikleri kullanarak çoklu-çözünürlük (*multiresolution*) yaklaşımını sunmuştur [18]. Diğer teknikler optik akış alanları [19] hesaplar; böylece görüntünün her bir pikseli için bir hareket vektörü elde ederler.

Ötelenmiş görüntülerdeki hareket miktarının hesaplanması için kullanılan korelasyon tabanlı teknikler hem uzay domeninde hem de frekans domeninde kullanılabilir. Bu

teknikler tamamen Őu gerçeğe dayanır: iki görüntü işareti arasındaki korelasyon bu iki görüntünün doğru bir Şekilde hizalandığı durumda en büyük değerini alır. Frekans bölgesinde, korelasyon çok etkin bir Şekilde görüntülerin spektrumlarının çarpımının kullanılmasıyla hesaplanabilir. Bu yöntemi kullanan bir çalışma Anuta [20] tarafından sunulmuştur. Uzak tabanlı korelasyon tekniğini kullanan bir çalışma ise Zokai ve Wolberg [21] tarafından sunulmuştur. Bu çalışmada, uzak domenindeki görüntülerde büyük miktarda dönme ve ölçekleme etkisi olduğu kabul edilmiş ve bunun için görüntülere *log-polar* adında bir dönüşüm uygulanmıştır.

Frekans domeni yöntemleri görüntünün düzlemine paralel bir düzlemde olan hareket parametrelerinin hesabına olanak sunar. Düzlemsel öteleme (kayma), frekans bölgesinde doğrusal faz kayması olarak ifade edilirken, uzak bölgesinde görüntüde oluşan dönme etkisi, frekans bölgesinde de aynı miktarda dönme etkisine neden olur [1]. Frekans bölgesi tekniklerini kullanan görüntü hizalama teknikleri işlem karmaşıklığı açısından çok kullanıŐlıdır ve örtüşme gibi etkileri modellemek için çok uygun bir altyapı sunarlar.

Eğer görüntüler yeterli örnekleme hızında örneklenmiŐse ve görüntüler arasında sadece düzlemsel ötelemeden kaynaklanan bir hareket farklılığı varsa, bu öteleme miktarı görüntüler arasındaki doğrusal faz farkı olarak hesaplanabilir (Kim ve Su [22], Stone [23], Vandewalle [24]). Düzlemsel öteleme iki yönde olabileceği için ötelemenin yatay ve dikey bileşenleri Hoge [25]'un sunduğu tekil değer ayrıŐtırması yöntemiyle bulunur. Frekans domeni tekniği ile öteleme miktarının hesaplanmasında sürekli değerlere sahip parametrelerin kestirimi de yapılabilir (örneğin, x yönünde 2.1'lik bir öteleme gibi). Foroosh [26] çalışmasında faz korelasyonu yöntemini geliŐtirerek, bu yöntemde işaret gücünü kullanmıştır. Çalışmasında önerdiği bu düşünceyi kullanarak alt piksel (*subpixel*) bölgesine ait öteleme bilgilerini elde etmiştir.

Zaman domeninde, görüntüde gerçekteŐen düzlemsel bir dönme, frekans bölgesinin de aynı açı değerinde dönmesine neden olur. Bu hareket de görüntü hizalama işleminin bir parçası olarak düşünülebilir ve görüntü hizalama algoritmalarında incelenebilir. Reddy ve Chatterji [27] ve Marcel [28] sundukları görüntü hizalama algoritmalarında öteleme ve dönme etkilerini birlikte incelemiŐlerdir. Bu çalıŐmalarda, dönme miktarının hesaplanması için, görüntüler kutupsal düzleme

taşınmışlardır. Böylece dönme etkisi kutupsal düzlemde öteleme etkisine dönüştürülmüştür. Lucchese ve Cortelazzo [29], dönme miktarının kestirimine farklı bir yaklaşım getirmişlerdir. Çalışmalarında, bir görüntü işaretinin fourier dönüşümünün genliği ile döndürülmüş görüntünün (aynı görüntü işaretine dönme etkisinin uygulanması sonucu elde edilir) fourier dönüşümünün genliğinin bir çift dikgen (ortogonal), sıfır geçişli doğruya sahip olduklarını gösterilmiştir. Lucchese ve Cortelazzo, bu doğruların eksenlerle yaptıkları açının görüntüler arasındaki dönme miktarının yarısına eşit olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada inceleme öteleme miktarının hesabı ise Marcel'in önerdiği yöntem ile aynıdır.

Bir sahnedeki yüksek frekans bileşenlerini temsil etmek için yeteri kadar örnek noktası (piksel) olmayan görüntü örtüşmeye uğramıştır denir. Eğer giriş görüntüleri örtüşme etkisine uğramışsa, bahsedilen bu basit ilişkiler artık geçerli olmaz. Ancak, eğer örnekleme frekansı yeteri kadar büyükse, spektrumun bir kısmında örtüşme görülmez. Görüntülerin hizalanması için örtüşmenin olmadığı bu spektrum bölgesi kullanılabilir [22, 23, 30]. Bu çalışmada incelenen teknik radyal izdüşümler olarak işlemsel karmaşıklığı azaltır. Bir diğer izdüşüm tabanlı hizalama tekniğinde Radon dönüşümü kullanılır. Bu yöntem Robinson ve Milanfar [31] tarafından sunulmuştur. İzdüşüm tabanlı teknikler görüntüleri belirli yönlere izdüşürmeleri nedeniyle mevcut bilgi miktarında azalmaya neden olurlar, ama işlemsel karmaşıklık ciddi oranda azaltılır ve gürültüye karşı dayanıklılığın artmasını sağlarlar [32, 33].

Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniklerinin ikinci kısmında ise görüntünün yeniden oluşturulması problemi incelenir. Bu adımda, yüksek çözünürlüklü bir görüntü hizalanmış bir dizi düşük çözünürlüklü görüntüden elde edilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi, Tsai ve Huang [2] tarafından bir frekans domeni yöntemi önerilmiştir. Bu çalışmada da buna benzer bir görüntü oluşturma yaklaşımı incelenmiştir. Kim [34] bu algoritmayı bulanıklık ve gürültü modellerini de içerecek şekilde genişletmiştir. Son zamanlarda, çoğunlukla uzay domeni tekniklerinde kullanılan bazı yeni teknikler de geliştirilmiştir.

Görüntünün yeniden oluşturulması konusunda güzel bir analiz Park [4] tarafından sunulmuştur. Bu işlem için kullanılan bir dizi doğrusal olmayan interpolasyon teknikleri vardır [35, 36, 37, 38, 39]. Bu tekniklerde düzensiz olarak yerleşmiş örnekler interpolasyon işlemine tabi tutularak bant sınırlı bir görüntü oluşturulur. Bu

çalışmada da ağırlıklı olarak böyle bir yöntem kullanılmıştır. Öncelikle, düzensiz örnekler üzerinde QHull algoritması [40, 41] uygulanarak üçgenler (*triangulation*) hesaplanır. Daha sonra, görüntü değerleri çift kübik interpolasyon ve hesaplanan üçgenler kullanılarak düzgün aralıklandırılmış bir grid üzerine yerleştirilir. Yine bu işlem için kullanılan diğer bir teknik ise POCS yaklaşımını temel alır (örneğin, Patti [42]). Bu tekniklerde, yüksek çözünürlüklü görüntü hakkında bilinen ölçümler ve tahminler kullanılır. Bunların her birinin oluşturduğu kümeye dışbükey (*convex*) küme denir. Bunu kullanan yöntemlerde, yeniden oluşturulacak görüntü bu dışbükey kümeye sürekli izdüşürülerek aranan doğru sonuca ulaşılmaya çalışılır. Belirli bir sayıda gerçekleştirilen iterasyondan sonra, yeniden oluşturulmuş görüntü farklı kümelerin kesişimi sonucu elde edilen görüntüye yakınsar. Benzer şekilde, iteratif geri izdüşüm tekniklerinde [16, 17, 43], bir görüntü oluşturma modeli kullanılarak, tahmini bir yüksek çözünürlüklü görüntü için gerekli düşük çözünürlüklü görüntülerin ne olacağı kestirilmeye çalışılır. Daha sonra gerçek düşük çözünürlüklü görüntüler ile görüntü oluşturma modeline göre kestirilen düşük çözünürlüklü görüntüler arasındaki fark hesaplanıp, bu farka göre tahmini yüksek çözünürlüklü görüntü düzeltilir. Zomet [44]'in sunduğu çalışmada, farklı görüntülere uygulanan geri izdüşüm işlemlerinden elde edilen hata değerlerinin ortancası kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Zomet bu yaklaşımla normal geri izdüşüm tekniğiyle elde ettiğinden daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Farsiu [45] standart L_2 enküçültme işlemini L_1 enküçültme işlemi ile değiştirerek yeni ve kararlı bir süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritması önermiştir. Farsiu'nun önerdiği bu yöntem daha keskin görüntü işaretleri üretmiştir. Farsiu yine çalışmasında bir düzenleme terimi kullanarak algoritmasını daha kararlı bir hale getirmiştir. Farsiu, çalışmasında algoritmasınının Zomet [44]'in algoritmasıyla birlikte kullanıldığı zaman çok iyi sonuçlar elde edildiğini göstermiştir.

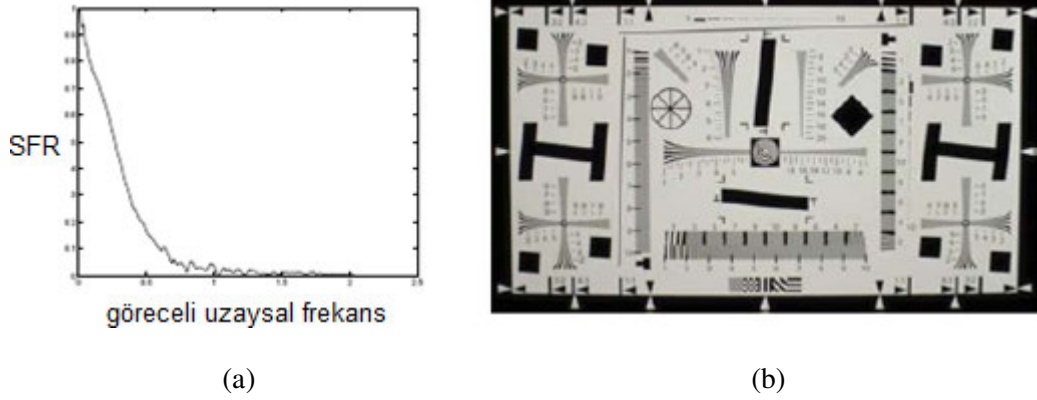
Goldberg, sonlu impuls cevabı (FIR) ile süzgeçleme yaklaşımı sunmuştur [46]. Elad ve Feuer [47], süper çözünürlüklü video işareti oluşturmak için LMS ve RLS algoritmalarını kullanan uyarlamalı süzgeç yaklaşımı kullanmışlardır. Son olarak, en büyük sonsal (MAP) yaklaşımı yine süper çözünürlüklü görüntünün oluşturulması için kullanılabilir [13, 14, 48, 49]. Ayrıca, Elad ve Feuer [50] en yüksek olasılık (ML) kestirimi ile POCS tekniğini birleştirerek melez bir yöntem önermiştir.

Birinci bölümde süper çözünürlüklü görüntü oluşturma işlemi için bilinmesi gereken bazı temel kavramlardan özetle bahsedilmiştir. İkinci bölümde ise, önce süper çözünürlüklü görüntü oluşturma problemi tanıtılmış, ardından görüntülerin elde edilmesi sırasında kullanılan gözlem modelinden bahsedilmiştir. Bu bölümde son olarak, literatürde mevcut olan görüntü hizalama teknikleri ve yüksek çözünürlüklü görüntünün oluşturulması yöntemleri özetlenmiştir. Üçüncü bölümde ise, bu çalışmada önerilen ve yeni bir yaklaşım olan frekans bölgesi yaklaşımı ile süper çözünürlüklü görüntü oluşturma yöntemi detaylı olarak anlatılmıştır. Görüntüler arasındaki düzlemsel hareket parametrelerinin kestirimi matematiksel olarak açıklanmıştır. Bu işlem daha sonra kısmen örtüşmüş olan görüntülere genişletilmiştir. Son olarak, süper çözünürlüklü görüntünün oluşturulmasından bahsedilmiştir. Dördüncü ve son bölümde ise, bu çalışmada önerilen yöntemin gerçek görüntüler üzerinde ayrıntılı analizi yapılmış, sonuçları gösterilmiş ve algoritmanın davranışı hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

1.1 Çözünürlük Nedir?

İlk olarak, çözünürlük kavramından ne anlaşıldığı açıklanmalıdır. Örneğin, bir görüntünün her bir pikseli dört defa tekrarlanarak görüntünün boyutu dört katına çıkarılırsa çözünürlükte bir kazanç elde edilir mi? Diğer taraftan, bir görüntü işaretine bulanıklaştırma filtresi uygulansın. Sonuçta elde edilen görüntünün boyutlarında bir değişim olmayacaktır. Ancak, yeni görüntünün çözünürlüğü hala aynı mıdır?

Yukarıdaki örnekler çözünürlüğü belirlemek için bir görüntüdeki piksel sayısından daha farklı şeylerin olduğunu göstermektedir. Çözünürlük, bir görüntüdeki detayların ayırt edilebilmesiyle ilgilidir. Uluslararası Standart Organizasyonu (ISO), sayısal bir kameranın çözünürlüğünün belirlenmesi ve uzaysal frekans cevabının (SFR) hesaplanması için kesin bir metot önermiştir [51]. Sayısal görüntüleme sistemlerindeki bu uzaysal frekans cevabı analog görüntüleme sistemlerindeki modülasyon transfer fonksiyonuna (MTF) karşı düşer. Şekil 1.1'de örnek bir SFR fonksiyonu ve ISO'nun SFR fonksiyonunu hesaplamak için kullandığı tablo görülmektedir.



Şekil 1.1: Örnek bir SFR Fonksiyonu (a) Sayısal bir kameraya ait SFR fonksiyonu, (b) ISO'nun sayısal kameralara ait SFR fonksiyonunun hesaplanmasında kullandığı tablo

O halde, çözünürlük şöyle tanımlanabilir [51]: Optik çözünürlük, bir görüntünün detaylarını gösteren ve sayısal kameraların ne kadar hassas olduğunu bir ölçüsüdür. Görüntü çözünürlüğü, bir görüntüdeki görülebilen detay miktarının bir ölçütüdür.

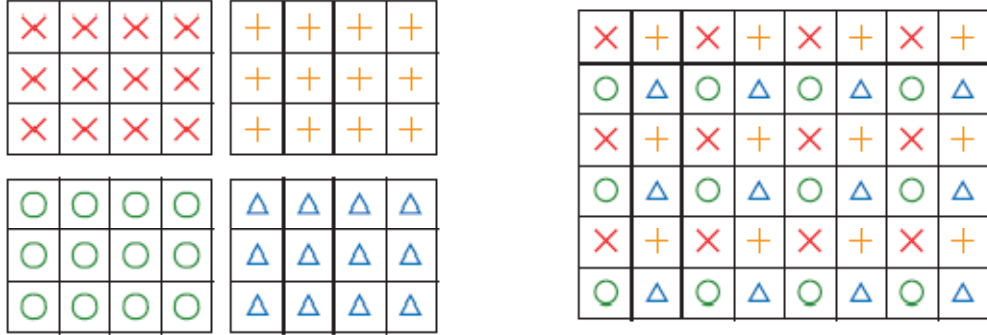
1.2 Süper Çözünürlüklü Görüntüleme

Eğer süper çözünürlüklü görüntü oluşturma teknikleriyle bir görüntünün çözünürlüğü arttırılmak isteniyorsa, elde edilecek görüntüde daha fazla detay bilgisi elde edilmelidir. Aynı sahnenin görüntüleri birbirlerine eklenerek ekstra bilgiler elde edilmeye çalışılır. Aslında bu bilgi sahnenin yüksek frekans bilgilerini oluşturacaktır.

Görüntüye bu şekilde yüksek frekans bilgisi eklemenin farklı yolları vardır. Eğer görüntünün tipi (yüz, metin, çizim vs.) biliniyorsa, bu bilgi frekans bilgisi eklenirken kullanılabilir. Örneğin, görüntünün karakterlerden oluşan bir metin görüntüsü olduğu biliniyor olsun. Bu durumda, görüntüdeki karakterler tanıma yöntemleriyle belirlenip yerlerine daha keskin ve daha kaliteli karakterler yerleştirilebilir. Görüntü modelinin bilinmesi yüksek frekans bilgisinin hesaplanmasına olanak sunar. Bu çalışmada süper çözünürlüklü görüntü oluşturmak için daha soyut yaklaşımlar incelenmiştir. Belirli görüntü modelleri yerine, her görüntüye uygulanabilecek çok daha genel yöntemler üzerinde durulacaktır. Ayrıca bu çalışmada, görüntülerdeki örtüşme bilgisi kullanılarak yüksek frekans bilgisi hesaplanacaktır.

Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniklerinde bir dizi düşük çözünürlüklü görüntü kullanılarak daha yüksek çözünürlüklü tek bir görüntü oluşturulur.

Kullanılan düşük çözünürlüklü görüntülerin bazı küçük farklılıklarının olduğu kabul edilir. Çoğunlukla bu farklılıklar küçük kamera hareketlerinden kaynaklanır. İdeal durumda çekilen dört görüntüden biri referans olarak seçildiğinde diğer görüntülerin buna göre yatay, dikey veya diagonal yönlerde bir piksel boyunun yarısı kadar kaydığı kabul edilir. Birinci görüntünün pikselleri diğer üç görüntünün piksellerinden arada boşluk kalacak şekilde ayrılarak çözünürlüğü her iki yönde iki katına çıkmış bir görüntü elde edilir. Bu durum Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2: İdeal Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma Tekniği

Ancak, görüntüler arasındaki kayma miktarı genellikle bir piksel boyunun yarısı kadar olmamakta ve keyfi değerler alabilmektedir. Bununla birlikte birçok uygulamada bu hareket bilgileri bilinmemekte, bu nedenle önce hesaplanması gerekmektedir. İlerleyen kısımlarda bu bilgilerin nasıl hesaplanacağı üzerinde durulacaktır.

1.3 Uygulama Alanları

Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma teknikleri birçok çeşitli alana (uzaktan algılama, tıp, askeri uygulamalar, haritacılık, bilimsel çalışmalar vs.) uygulanabilir. Daha önce de bahsedildiği gibi, herhangi bir kullanıcı aynı sahneden aldığı bir dizi görüntüden daha yüksek çözünürlüklü bir görüntü elde edebilir (görüntüler arasında kullanıcının el hareketinden kaynaklanan küçük farklılıkların olduğu kabul edilmektedir). Benzer şekilde, uydu veya uzaydan çekilen görüntülerde belirgin olmayan bazı detaylar bu görüntülerden oluşturulan süper çözünürlüklü görüntülerde belirgin olabilir. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma teknikleri, bir dizi video kümesinden tek bir video işareti veya yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturmak için de kullanılır. Örneğin, güvenlik kameralarından alınan birkaç video çerçevesi kullanılarak ek bilgiler elde edilebilir ve böylece yüksek çözünürlüklü tek bir görüntü

oluşturulabilir. Aynı teknik düşük çözünürlüklü video içeriğinin kalitesinin artırılarak yüksek çözünürlüklü video elde etmek için de kullanılabilir. Buna örnek olarak, NTSC video işaretinin HDTV işaretine dönüştürülmesi verilebilir. Yine askeri, medikal ve haritacılık uygulamalarında görüntü büyütme işlemlerine sık sık ihtiyaç duyulur. Örneğin, askeri ve güvenlik uygulamalarında sahnelerdeki suçlunun yüzü veya bir arabanın plakası gibi bazı nesnelerin belirlenmesi gibi ihtiyaçlar olur. Bu sahnelerden alınan görüntülerden oluşturulan süper çözünürlüklü görüntüler kullanılarak karar verme aşamasındaki başarımlar ciddi oranda artacaktır. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniği, kısıtlı çözünürlükte ancak aynı sahneden birden fazla görüntü elde edilebilen medikal uygulamalarında da çok kullanışlı olabilir. Bunlara örnek olarak Bilgisayarlı Tomografi (CT) ve Manyetik Rezonans ile Görüntüleme (MRI) verilebilir. Bu uygulamalarda, alınan görüntüler birleştirilerek doktorun doğru teşhis koyma ihtimali artırılmaktadır.

1.4 Temel Kavramlar

1.4.1 Alt Örnekleme

İşaret işlemede alt örnekleme işlemi bir işaretin örnekleme hızının azaltılması olarak bilinir. Bu işlem genellikle veri hızının azaltılması ya da veri boyutunun düşürülmesiyle yapılır. Alt örnekleme katsayısı genellikle birden büyük bir tamsayı veya rasyonel sayıdır. Zaman bölgesindeki örnekleme aralığı bu katsayıyla çarpılarak veya bu işleme eşdeğer olarak örnekleme hızı bu katsayıya bölünerek işaretin örnekleme hızı azaltılmış olur. Örneğin, kompakt disk kalitesindeki bir ses işareti 5/4 oranında alt örneklenirse örnekleme hızı 44.100 Hz'den 35.280 Hz'e düşer. Bu işlem bit hızını 1.411.200 bit/sn'den 1.128.960 bit/sn'ye indirir.

Alt örnekleme işlemi doğrudan örnekleme hızını azalttığı için Shannon-Nyquist örnekleme teoremine ait kriterin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmelidir. Eğer örnekleme teoremi sağlanmıyorsa, elde edilen sayısal işarete örtüşme etkileri ortaya çıkacaktır. Örnekleme teoreminin sağlandığının garanti edilmesi için alçak geçiren süzgeç kullanılır. Bu süzgeç örtüşme önleyici süzgeç görevi görür ve işarete alt örnekleme işlemi uygulanmadan önce uygulanıp işaretin bant genişliğini azaltır. Bu nedenle, alt örnekleme işleminde örtüşme önleyici süzgeç olarak alçak geçiren bir süzgeç seçilmelidir.

Alt örnekleme işlemi, $f(k)$ sayısal bir işaret ve M de alt örnekleme katsayısını göstermek üzere iki adımda gerçekleştirilebilir:

1. $f(k)$ işareti alçak geçiren bir süzgeçten geçirilerek örnekleme teoreminin sağlandığı garanti edilir. Bu süzgeçin impuls cevabı teoride kesim frekansı π/M olan bir sinc işaretidir. Bu işlem sonucunda elde edilen işaret $g(k)$ ile gösterilsin.
2. Her M örnekten birinin alınmasıyla veri miktarı azaltılır;

$$h(k) = g(Mk) \quad (1.1)$$

İlk adımda bahsedilen süzgeç, ideal alçak geçiren süzgeç olarak bilinir ve pratikte gerçekleşmesi imkansızdır. Pratikte, bunun yerine daha yumuşak geçişli alçak geçiren özellikte gerçekleştirilebilen süzgeçler kullanılır. Alt örnekleme işleminin geri dönüşümü yoktur. Veri kaybı kaçınılmazdır ve kaybedilen veriler tekrardan normal yollarla elde edilemez.

1.4.2 Üst Örnekleme

Üst örnekleme, bir işaretin örnekleme hızının artırılması işlemidir. Üst örnekleme katsayısı genelde birden büyük bir tamsayı veya rasyonel sayıdır. Bu katsayı ile örnekleme hızı çarpılır veya buna eşdeğer olarak örnekleme periyodu bu sayıya bölünür. Örneğin, kompakt disk kalitesindeki bir ses dosyası $5/4$ oranında üst örneklenirse, örnekleme hızı 44.100 Hz'den 55.125 Hz'e çıkacaktır. Bu da bit hızının 1.411.200 bit/sn'den 1.764.000 bit/sn'ye çıkması anlamına gelir. İşaretin frekansları ise (Nyquist-Shannon örnekleme teoremini sağlayan bileşenler) 22.050 Hz'den 27.562,5 Hz'e çıkmıştır (5.512,5 Hz'lik bir artış).

Üst örnekleme işlemi için $f(k)$ ile gösterilen sayısal bir işaret olsun ve L üst örnekleme katsayısını göstereyin. Üst örnekleme işlemi iki adımda gerçekleştirilebilir:

1. $f(k)$ sayısal işaretindeki her iki örneğin arasına $L-1$ tane sıfır eklenir veya buna eşdeğer olarak $g(k)$ ile gösterilen üst örnekleme fonksiyonu şöyle tanımlanabilir:

$$g(k) = \begin{cases} f\left(\frac{k}{L}\right) & , \frac{k}{L} \text{ tamsayı} \\ 0 & , \text{diğer} \end{cases} \quad (1.2)$$

2. Alçak geçiren süzgeçten geçirilir. Teoride bu süzgeçin impuls cevabı kesim frekansı π/L olan sinc işaretidir.

İkinci adımda kullanılan süzgeç, ideal alçak geçiren bir süzgeçtir ve pratikte gerçekleşmesi imkansızdır. Pratikte, kullanılan süzgeçler gerçekleştirilebilir olup ideal olmadığı için örtüşme etkileri ortaya çıkacaktır. Bu tip örtüşme etkileri sonlu impuls cevaplı alçak geçiren süzgeçler kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Böylece süzgeç tasarımındaki karmaşıklık azaltılmış olur. Orijinal süzgeç L tane alt süzgeçlere ayrılır ve bu alt süzgeçlerin her birinin çıktısı sırayla dizilerek süzgeçlenmiş çıkış dizisi elde edilir. Eğer orijinal işaret Nyquist-Shannon örnekleme teoremini sağlıyorsa üst örneklenmiş işaret de sağlar. Alt örnekleme işleminde örtüşme önleyici süzgeç olarak alçak geçiren bir süzgeç kullanılıyordu. Burada interpolasyon süzgeci alçak geçiren süzgeç özelliğinde kullanılır.

1.4.3 İnterpolasyon Teknikleri

İnterpolasyon işlemi, ayrık bir küme içerisinde bulunan ve değerleri bilinen veri noktalarının kullanılarak yeni noktalar oluşturulmasını sağlayan tekniktir.

Mühendislik uygulamalarında, genellikle deneyler veya örnek alma işlemleri sonucunda bir dizi veri kümesi elde edilir. Ardından, bu veri kümesini modellemek için bu verilere en çok uyan bir fonksiyon oluşturulur. Bu işlem matematikte eğri uydurma veya regresyon olarak adlandırılır. İnterpolasyon işlemi eğri uydurma probleminin özel bir halidir. Bu teknikte kullanılan fonksiyon tam olarak veri noktalarından geçmelidir. Bir diğer problem ise, karmaşık bir fonksiyonun basit bir fonksiyonla ifade edilmesidir. Bu da interpolasyon işlemiyle yakından ilişkilidir. Örneğin, fonksiyon bilinsin ancak fonksiyon çok karmaşık olduğu için hesaplama işlerinde etken bir şekilde kullanılamaz. Bu durumda mevcut karmaşık fonksiyondan bir dizi örnek veriler alınır ve ardından interpolasyon kullanılarak bu veri kümesini sağlayan daha basit bir fonksiyon elde edilir. Orijinal fonksiyon yerine kullanılan daha basit bir fonksiyonla her zaman tam olarak doğru sonuç elde edilemeyebilir. Ancak, problemin karmaşıklığına bağlı olarak oluşan hataya tolere edilebilir.

İnterpolasyon ingilizce “Interpolation” kelimesinden gelir. Bu kelimedeki “inter” sözcüğü “arasında” anlamına gelmektedir. “pole” ise nokta veya düğüm anlamındadır. Dolayısıyla iki veri noktası arasında yeni bir nokta hesabı yapmaya interpolasyon denmiştir. İnterpolasyonun en basit formu iki komşu noktanın ortalamasının alınarak orta noktanın bulunmasıdır. Bu doğrusal interpolasyonla aynı sonucu verir. Birçok interpolasyon tekniği mevcuttur. İnterpolasyon teknikleri yapılan çalışmaya göre karmaşıklık, doğruluk ve gerek duyulan örnek kümesi vs. gibi kriterler göz önüne alınarak seçilir. Bu çalışmada süper çözünürlüklü görüntü oluşturma aşamasında çift kübik interpolasyon tekniği kullanılmıştır.

Çift kübik interpolasyon tekniği, çok değişkenli interpolasyon tekniğinin iki boyuttaki halidir. Ayrık noktalarda bilinen değerlere sahip olan iki değişkenli fonksiyonun bu ayrık noktalar arasındaki değerleri interpolasyonla kestirilebilir. Çift kübiklik, interpolasyon sonucu elde edilen fonksiyonun ve türevinin her yönde süreklilik gösterdiğini ifade eder. Görüntü işlemede ise, gerçekleştirilen görüntü büyütme işlemlerinde kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte aranan noktanın piksel değeri bu noktaya en yakın 4x4 pikselin beraber kullanılmasıyla bulunur (ağırlıklı ortalama olarak). Bu piksellerin her birinin uzaklığı farklı olduğu için hesaplamada yakındaki piksellerin ağırlığı daha fazladır. Çift kübik interpolasyon tekniği diğer tekniklere oranla daha keskin görüntüler üretir. Mevcut teknikler arasında işlem zamanı ve çıktı kalitesi açısından en iyi sonuçlar veren teknik olarak gösterilebilir. Bu nedenle, mevcut birçok görüntü düzenleme yazılımları (Adobe Photoshop dahil), yazıcı sürücülerini ve kameralarda tümleşik olarak bulunan sistemler bu tekniği kullanırlar.

2. SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA PROBLEMİ

2.1 Problemin Tanımı

Görüntü işleme gerektiren uygulamaların çoğunda yüksek çözünürlüklü görüntülerle çalışılmak istenir. Yüksek çözünürlüklü bir görüntü, görüntüdeki piksellerin şiddetinin fazla olması anlamına gelir. Bu tip görüntüler daha fazla detay bilgisi içermektedir. Görüntülerin yüksek detay bilgisi kritik birçok uygulamada ihtiyaç duyulan bir özelliktir. Örneğin, medikal uygulamalardan elde edilen görüntülerin yüksek kalitede olması doktorun doğru teşhis koyması açısından önemlidir. Uydu görüntülerinde nesnelerin birbirinden ayırt edilebilmesi yine yüksek çözünürlükle ilgilidir. Yine görüntü tanıma işlemlerinin performansı yüksek çözünürlüklü görüntüler kullanıldığında önemli oranda artacaktır. 1970'li yıllardan beri CCD ve CMOS görüntü sensörlerini kullanan sayısal kameralar kullanılmaktadır. Bu sensörler birçok görüntü işleme uygulamaları için yeterli gibi görünse de mevcut çözünürlük gelecekteki talepleri karşılamaya yeterli gelmeyecektir. Örneğin, insanlar ileride daha yüksek çözünürlüklü sayısal kameralar isteyecekler ve bunların fiyatlarının bugünkü sayısal kameralarla aynı olmasını bekleyeceklerdir. Yine bilim adamları çalışmalarında kullanmak üzere hiçbir bozukluk içermeyen 35mm filminden elde edilmiş görüntüye yakın yüksek çözünürlüklü görüntülere ihtiyaç duyacaklardır. Bu nedenle, mevcut çözünürlüğü arttırmanın yolları bulunmalıdır.

Çözünürlüğü arttırmanın doğrudan bir yolu piksel boyutlarını düşürmektir. Diğer bir anlatımla, birim alana düşen piksel sayısı arttırılmalıdır. Bunu gerçekleştirmenin yolu sensör teknolojisine bağlıdır. Piksel boyutu azaldıkça mevcut ışık miktarı da azaltılmış demektir. Bu, görüntülerde kaliteyi düşüren ve bozucu bir etki olan sağanak gürültüsüne (*shot noise*) neden olur. Mevcut sensör teknolojileriyle sağanak gürültüsü etkilerine neden olmadan piksel boyutlarını azaltma imkanı kısıtlıdır. 0.35µm CMOS için en uygun piksel boyutu 40µm² olarak sınırlıdır. Bugünkü sensör teknolojileriyle bu değere neredeyse ulaşılmıştır. Bu nedenle, daha yüksek çözünürlüklü görüntüler için farklı çözümler aranmalıdır. Diğer bir yöntem ise,

mikroyonga boyutunun arttırılması olabilir. Bunun için de sığanın arttırılması gerekir. Sığanın yüksek değerlerinde yük akış hızı düştüğü için bu yaklaşım da çok etkin değildir. Yüksek çözünürlüklü merceklerin ve görüntü sensörlerinin kullanımı çok pahalı olmaktadır. Dolayısıyla, mevcut sensör ve optik teknolojilerinin bu tür problemleri ortadan kaldıran yeni yöntemlere ihtiyacı vardır.

Bir yöntem Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma tekniğidir. Bu teknikte düşük çözünürlüklü görüntü kümesinden yüksek çözünürlüklü tek bir görüntü elde etme amaçlanmaktadır. Son yıllarda, bu tür problemlere çözüm üreten çözünürlük iyileştirme yaklaşımları etkin bir şekilde sunulmuş ve bu çalışmalara süper çözünürlüklü ve yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturma adı verilmiştir. Süper çözünürlükteki süper kelimesi düşük çözünürlüklü görüntüleme sistemlerindeki bazı kısıtlamaların ortadan kaldırılarak daha kaliteli bir görüntünün elde edildiği anlamına gelir.

İşaret işleme yaklaşımının en büyük avantajı ekonomik olması ve mevcut düşük çözünürlüklü sistemlere uygulanabilmesidir. Bir sahneden birçok görüntü elde edilebiliyorsa, bu görüntülerden süper çözünürlüklü görüntü oluşturma çok faydalı bir tekniktir.

O halde, birden fazla düşük çözünürlüklü görüntü kullanarak yüksek çözünürlüklü görüntü nasıl elde edilir? Bunun için öncelikle aynı sahneden alınabilen düşük çözünürlüklü görüntülerin sayısı önemlidir. Belirli bir sahneden elde edilmiş olan düşük çözünürlüklü görüntüler birbirlerine göre belirli bir oranda hareket etmiştir (öteleme ve dönme etkisi). Diğer bir anlatımla, aynı sahnenin çok az farkla değişik görüntüleri elde edilir. Dolayısıyla, düşük çözünürlüklü görüntüler birbirlerinden elde edilemezler. Eğer düşük çözünürlüklü görüntüler tamsayının katları şeklinde ötelenmişlerse, her görüntü aynı bilgiyi taşır ve bunlar birbiri cinsinden elde edilebileceği için ekstra bir bilgi elde edilemez. Bunun için düşük çözünürlüklü görüntülerin birbiri cinsinden elde edilememesi önemlidir. Elde edilecek ek bilgi miktarı görüntüler arasındaki farka bağlıdır. Bu yeni bilgiler yüksek çözünürlüklü görüntü oluştururken kullanılır. Aynı sahneden farklı görüntüler alabilmek için sahnenin hareketli olması gerekir. Aynı kameradan farklı çekimler yapılarak ya da farklı yerlere koyulan kameralardan aynı sahne farklı açılarla çekilerek aynı sahnenin farklı görüntüleri elde edilebilir. Ancak, çekilen bu görüntülerde bulanıklık etkileri

gözlemlenebilir. Buna sebep olan faktör görüntüleme sisteminin hareketli olması (örn, uydular), ya da sahnedeki nesnelere hareketleri veya çekimden kaynaklanan titreme hareketleri bunun nedeni olabilir. Bu gibi etkenlerin bilinmesi uygulanan süper çözünürlük algoritmasının başarımını doğrudan etkiler. Aksi halde, yöntem en baştan hatalı uygulanmış olur.

Sayısal bir görüntüyü kaydederken aşağıdaki etkenlerden dolayı çözünürlük kaybına rastlanır:

- Odağın ayarlanamaması, kırılma limit değeri gibi etkenlerden kaynaklanan optik bozukluklar,
- Hareketten kaynaklanan bulanıklık etkisi,
- Sensörde oluşan gürültü,
- Sensörlerin yetersiz kalması,

Bu nedenle, kaydedilen görüntüde genellikle bulanıklık, gürültü ve örtüşme etkileri gözlenir. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritmasındaki amaç, düşük çözünürlüklü görüntülerden yüksek çözünürlüklü bir görüntü elde etmek olsa da, görüntülerdeki gürültü ve bulanıklık etkilerinin temizlenmesi için görüntü onarım (*restoration*) tekniklerinden de faydalanılır (yüksek kalitede görüntü elde etmek için).

Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniğinde kullanılacak olan onarım problemi görüntü işleme uygulamalarında iyi bir şekilde belirlenmiştir. Görüntü onarım işlemlerinin amacı görüntüden gürültü ve bulanıklık gibi etkilerin temizlenmesidir (görüntünün iyileştirilmesi). Ama bu tekniklerde görüntünün boyutlarında bir değişiklik olmaz. Aslında, görüntü onarımı ve süper çözünürlüklü görüntü elde etme teknikleri teorik olarak birbirine benzer. Ama süper çözünürlük tekniğinde görüntünün boyutları büyütülür. Bu özelliği ile süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniğine görüntü onarım tekniğinin ikinci nesil problemi denilebilir.

Süper çözünürlüklü görüntü oluşturmada kullanılan tekniklerden biri de görüntünün interpolasyonla boyutlarının büyütülmesidir. İyi bilinen interpolasyon teknikleri olmasına rağmen düşük çözünürlüklü bir görüntü kullanılarak elde edilen görüntünün kalitesi sınırlıdır. Düşük çözünürlüklü görüntü elde ederken kaybolan yüksek frekans bileşenleri ya da örnekleme sonucu ortaya çıkan örtüşme etkileri yalnızca interpolasyon teknikleriyle giderilemez. Dolayısıyla, yalnızca interpolasyon

teknikleri süper çözünürlüklü görüntü oluşturma teknikleri olarak düşünülemez. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniğinde aynı sahneye ait farklı görüntüler kullanılarak elde edilen ek bilgiler yüksek çözünürlüklü yeni görüntünün oluşturulmasında kullanılır. Aynı sahneden elde edilen farklı görüntülerden elde edilen bilgilerin birleştirilmesiyle o sahnenin süper çözünürlüklü görüntüsü oluşturulur.

2.2 Gözlem Modeli

Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma problemini analiz etmek için ilk olarak yüksek çözünürlüklü görüntü ile düşük çözünürlüklü görüntüler arasında ilişki kurabilen bir gözlem modeli oluşturmak gerekir. Literatürde birçok gözlem modeli hem video işaretleri hem de görüntü işaretleri için önerilmiştir. Bu bölümde görüntüler için gözlem modelinden bahsedilmiştir. Bu model video işaretleri için genişletilebilir.

$L_1N_1 \times L_2N_2$ boyutlarında istenen yüksek çözünürlükte bir \mathbf{X} görüntüsü olsun. \mathbf{X} görüntüsü Nyquist örnekleme hızında veya bundan daha büyük oranda örneklenmiş ve bant sınırlı bir görüntü olsun. L_1 ve L_2 parametreleri yatay ve dikey yönlerdeki alt örnekleme katsayılarını gösterir. Bu durumda gözlemlenen düşük çözünürlüklü her görüntü $N_1 \times N_2$ boyutlarında olacaktır. Örneğin, k . düşük çözünürlüklü görüntü \mathbf{y}_k ile gösterilirse bunun boyutu $N_1 \times N_2$ olarak yazılabilir. Modelde, görüntüleme sisteminden ve hareketten kaynaklanan yamulma (*warping*), bulanıklık (*blurring*) ve gürültü gibi etkenler de göz önüne alınmıştır. Bütün etkenler göz önünde tutulursa, gözlem modeli aşağıdaki gibi bir ifadeyle modellenebilir:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{D}\mathbf{B}_k\mathbf{M}_k\mathbf{X} + \mathbf{n}_k, \quad 1 \leq k \leq p \quad (2.1)$$

$\mathbf{M}_k = L_1N_1L_2N_2 \times L_1N_1L_2N_2$ boyutundaki Yamuklaştırma Matrisi

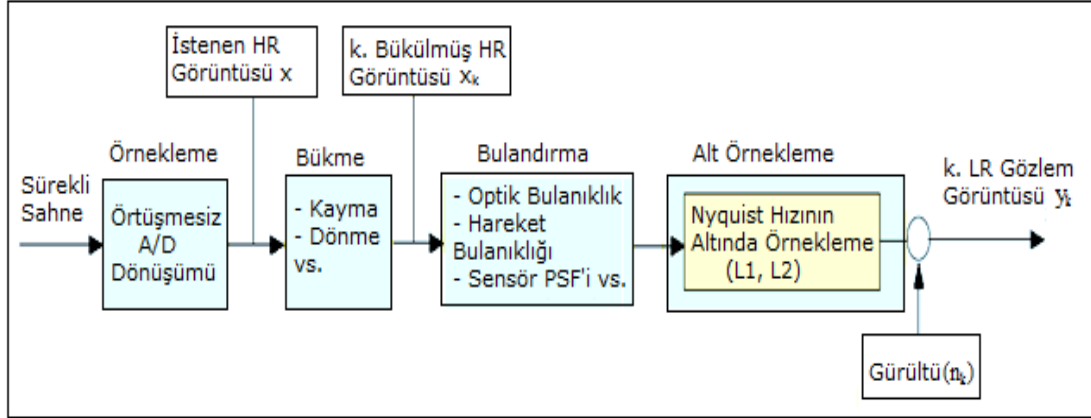
$\mathbf{B}_k = L_1N_1L_2N_2 \times L_1N_1L_2N_2$ boyutundaki Bulanıklaştırma Matrisi

$\mathbf{D} = (N_1N_2)^2 \times L_1N_1L_2N_2$ boyutlarındaki Alt Örnekleme Matrisi

$\mathbf{n}_k =$ Gürültü Vektörü

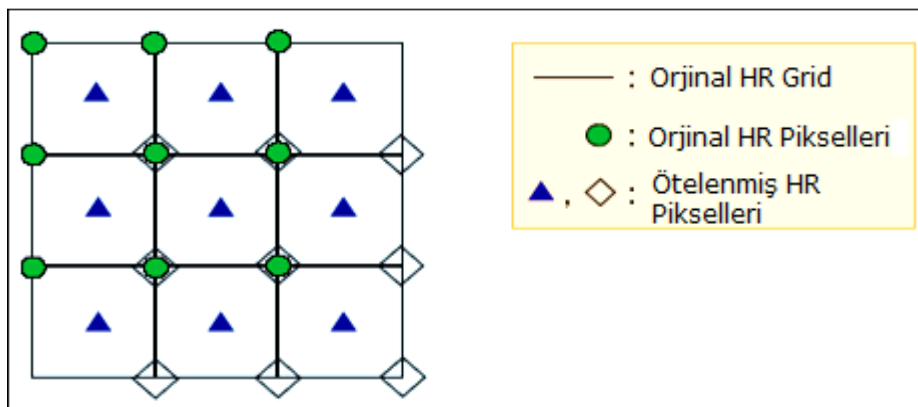
Bu gözlem modeline ilişkin blok diyagramı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu şekilde, gözlem görüntülerinin nasıl elde edildiği blok diyagramı olarak gösterilmiştir. Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi görüntüleme sistemi, çekim yapılan ortam ve çekim

yapılırken kamerada hareketlerden kaynaklanan etkenler beklenen yüksek çözünürlüklü görüntü üzerinde yamuklaştırma, bulanıklaştırma ve örtüşme gibi bozucu etkilere sebep olur.



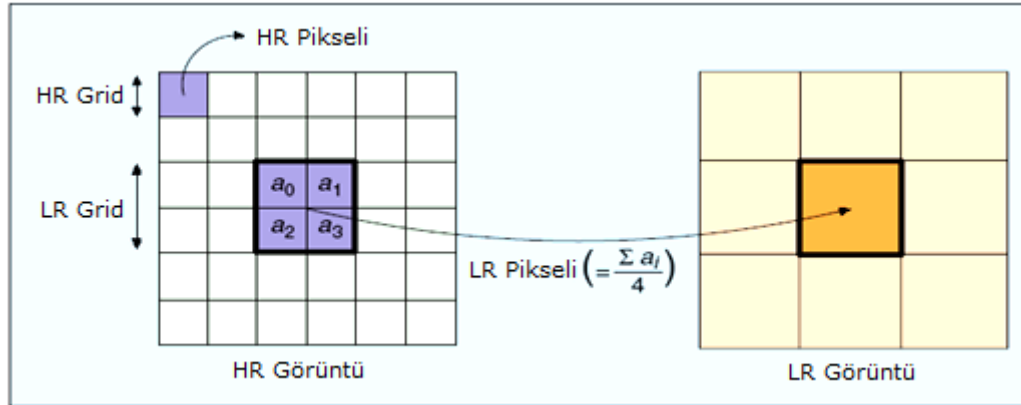
Şekil 2.1 : Gözlem Modeli

Gözlem modelindeki ifadeye yakından bakılırsa görüntünün elde edilmesi sırasında oluşan yamulma M_k matrisi ile gösterilmiştir. Bu matris, görüntüdeki çevirme, döndürme v.b. gibi etkileri ifade eder. Genelde bu bilgi bilinmediği için eldeki gözlem görüntülerinden bir referans olarak seçilir ve diğerleri bu görüntüyle karşılaştırılarak hareket miktarı kestirilebilir. Böylece, her gözlem görüntüsünün piksellerinin referans görüntüsünün pikselleri arasındaki mesafeler belirlenmiş olur. Bu gözlem görüntüleri yüksek çözünürlüklü bir grid üzerine yerleştirilir. Bu aşamada piksel aralıkları yüksek çözünürlüklü grid üzerine düşmüyorsa interpolasyon kullanılmalıdır. Bu durum Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Yüksek Çözünürlüklü Grid Üzerindeki İnterpolasyon İhtiyacı

Bulanıklık etkisi daha çok optik sistemden kaynaklanır; görüntüleme sistemi ile sahne arasında göreceli bir hareketten ya da düşük çözünürlüklü görüntüleme sisteminin (kamera) sensörünün noktasal yayılım fonksiyonundan (PSF) kaynaklanır. Bu etkiler B_k bulanıklık matrisiyle ifade edilir. Görüntü onarım uygulamalarında optik sistemden ya da hareketten kaynaklanan bulanıklık incelenir. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma uygulamalarında düşük çözünürlüklü görüntüleme sistemlerinin sensörlerinin sınırlı duyarlılıkta olması bulanıklık etkisi açısından önemli bir faktördür. Düşük çözünürlüklü sistemlerin sensörlerinin noktasal yayılım fonksiyonları görüntü üzerinde ortalama alma etkisine neden olur. Bu durum Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Görüntü işleme uygulamalarından hatırlanacağı gibi ortalama operatörü görüntü üzerinde bulanıklık etkisi yapar. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma uygulamalarında bulanıklık miktarının belirli olduğu kabul edilir. Bu değer belirli değilse, bunu hesaplayan ek işlemlerin de hesaba katılması gerekir.



Şekil 2.3: Düşük Çözünürlüklü Sensörün Noktasal Yayılım Fonksiyon

Alt örnekleme matrisi D ile gösterilmiş olup yamulma ve bulanıklık işlemlerine uğratılmış yüksek çözünürlüklü görüntü üzerinde örtüşme etkisine neden olur. Bu aşamada görüntülerin boyutları değiştirilmez ama istenirse düşük çözünürlüklü her görüntü için farklı bir D_k matrisi kullanılarak farklı boyutlarda düşük çözünürlüklü görüntüler elde edilebilir. Ancak, bu çalışmada ilgilendiğimiz konu bu olmadığı için bu konu incelenmeyecektir. Bulanıklık etkisi örtüşmenin izlerini kapatan bir faktör gibi düşünülse de, süper çözünürlüklü görüntü oluşturma uygulamalarında düşük çözünürlüklü görüntülerin örtüşme etkisine uğradıkları kabul edilir.

(2.1) nolu denklemle verilen gözlem modeli biraz düzenlenirse, örneğin yüksek çözünürlüklü X görüntüsünün katsayılarını birleştirip, düşük çözünürlüklü görüntü piksellerini yüksek çözünürlüklü görüntü piksellerinin ağırlıklandırılması ve üzerine gürültü bindirilip toplanması gibi düşünülürse, (2.1) denklemi aşağıdaki forma gelir:

$$y_k = W_k x + n_k, \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (2.2)$$

x : Orijinal yüksek çözünürlüklü görüntü matrisi

W_k : Bulanıklık, hareket ve alt örnekleme etkilerini içeren ağırlık matrisi

n_k : Gürültü vektörü

y_k : Elde edilen düşük çözünürlüklü gözlem görüntü matrisi

(2.2) denklemdeki gözlem modeli referans alınır, süper çözünürlüklü görüntü oluşturmanın hedefi düşük çözünürlüklü y_k görüntülerini kullanarak yüksek çözünürlüklü x görüntüsünün elde edilmesidir.

Literatürde önerilen süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniklerinin çoğunda üç aşamadan bahsedilir. Bunlar: görüntü hizalama işlemi, interpolasyon ve görüntü onarımdır. Bu adımlar önerilen süper çözünürlüklü görüntü elde etme tekniğine göre ayrı ayrı ya da aynı anda uygulanabilir.

Hareket bilgisinin tahmini olarak hesaplanmasına görüntü hizalama işlemi denir. Bu aşamada düşük çözünürlüklü bir görüntü referans alınarak diğer düşük çözünürlüklü görüntülerin kayma miktarları kestirilmeye çalışılır. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritmasının başarımında kayma miktarının doğru olarak hesaplanmasının önemi çok büyüktür. Düşük çözünürlüklü görüntüler arasındaki kayma miktarı keyfi olduğu için hizalanan bu görüntüler düzgün olarak aralıklandırılmış yüksek çözünürlüklü grid üzerine oturmaz. Bu durumda, düzgün olarak yerleştirilmiş düşük çözünürlüklü görüntü grubuna interpolasyon teknikleri uygulanarak eşit aralıklı ve grid üzerine oturan süper çözünürlüklü görüntü elde edilir. Bu işlemden sonra görüntünün kalitesini arttırmak için görüntü onarım teknikleri uygulanabilir. Görüntü onarım işleminin uygulanmasıyla görüntü üzerindeki bulanıklık ve gürültü etkisi temizlenmiş olur.

Önerilen değişik yöntemler arasındaki temel farkları belirleyen faktörler şunlardır: hangi gözlem modelinin seçildiği, görüntülerin hizalanması işlemi için hangi yöntemin seçildiği, ne tür bir görüntü oluşturma metodu kullanıldığı, algoritmanın

hangi bölgede uygulandığı (zaman ya da frekans) veya düşük çözünürlüklü görüntü elde etmek için hangi tekniğin kullanıldığı. Onun dışında uygulanan adımlar aynıdır.

(2.2)'de gösterilen gözlem modeline göre süper çözünürlüklü görüntü oluşturmak için iyi bilinen üç tane yöntem vardır. Bunlar: düzgün olmayan interpolasyon tekniği, düşük çözünürlüklü görüntüler arasındaki örtüşme etkisini kullanan frekans bölgesi yaklaşımı ve istatistiksel yöntem olan konveks kümeye izdüşürme (POCS) yaklaşımıdır. Bu çalışmada görüntülerin frekans bölgesi analizini kullanılarak süper çözünürlüklü görüntü oluşturma yöntemi incelenecektir.

2.3 Görüntülerin Hizalanması

Görüntü hizalama, aynı sahneden farklı zamanlarda, farklı görüş açılarından veya farklı sensörlere sahip cihazlarla alınan iki veya daha fazla görüntünün üst üste koyulması işlemidir. Bu işlemde görüntüler (referans ve diğerleri) geometrik olarak hizalanır. Görüntülerin birleştirilmesi, görüntülerdeki değişimlerin tespiti ve çok kanallı görüntü iyileştirme gibi kullanılacak bilginin birçok farklı kaynaklardan elde edildiği durumlarda bu işlemin önemi artar. Görüntü hizalama işlemi genellikle uzaktan algılama (çevresel değişimlerin izlenmesi, hava durumu yayınları, süper çözünürlüklü görüntülerin oluşturulması vs.), tıp (bilgisayarlı tomografi ve NMR verilerinin birleştirilmesiyle hasta hakkında daha belirgin sonuçların elde edilmesi), haritacılık, bilgisayarla görü vs. alanlarında yaygın olarak kullanılır.

Son yıllarda görüntü elde etme cihazları çok hızlı bir gelişme göstermiş, elde edilen görüntülerin çeşitliliği otomatik hizalama işlemi üzerindeki araştırmaların artmasını ve hızlanmasını sağlamıştır.

Görüntü hizalama işlemi uzaktan algılama, tıbbi uygulamalar, bilgisayarla görü vs. gibi alanlarda çok geniş uygulama imkanına sahiptir. Görüntülerin elde edilmesine göre bu işlem dört ana grupta uygulanabilir:

- **Farklı görüş açıları:** Aynı sahneye ait görüntüler farklı görüş açılarından elde edilir. Burada amaç, sahnenin daha büyük iki veya üç boyutlu görüntüsünün oluşturulmasıdır. Uzaktan algılama ve bilgisayarla görü alanlarında sıklıkla kullanılır.

- **Farklı zamanlarda:** Aynı sahneye ait görüntüler farklı zamanlarda çekilir (genellikle farklı koşulların olduğu durumlarda). Burada amaç, art arda elde edilen görüntülerdeki değişikliğin tespit edilmesidir. Uzaktan algılama uygulamalarında çevrenin gözlenmesi, bilgisayarla görü uygulamalarında güvenlik amacıyla görüntülerdeki değişimlerin tespiti ve hareketlerin takibinde, tıbbi uygulamalarda ise yaranın iyileşmesinde ve tümörlerin durumlarının izlenmesinde bu teknik kullanılır.

- **Farklı sensörler:** Aynı sahnenin görüntülerinin farklı sensörlere sahip cihazlarla çekilmesidir. Amaç, farklı kaynaklardan elde edilen bilginin birleştirilerek sahnenin daha karmaşık ve detaylı temsilini sağlamaktır. Örneğin, uzaktan algılama uygulamalarında farklı sensörlerle çekilmiş görüntülerin birleştirilmesi (daha iyi uzaysal çözünürlük sağlayan pankromatik görüntüler, daha iyi spektral çözünürlüğe sahip renkli görüntüler, bulut etkisi ve güneşin parlaklığından etkilenmeyen radar görüntüleri).

- **Sahnedeki Modele:** Sahnenin görüntüleri ve sahneye ait model birlikte hizalanır. Model, sahnenin bilgisayarda temsil edilmesidir. Örneğin, haritalar veya coğrafi sistemlerde kullanılan sayısal yükselti modelleri vs. Burada amaç, elde edilen görüntülerin modeldeki yerlerinin tespit edilmesi ve onların karşılaştırılmasıdır. Uzaktan algılama uygulamalarında havadan ve uydudan alınan verilerin haritalara hizalanması, tıbbi uygulamalarda hastadan alınan görüntülerin sayısal anatomi atlaslarındakilerle karşılaştırılması vs.

Hizalanacak görüntülerin çok çeşitlilik göstermesinden ve karşılaşılabilecek görüntü kusurlarının çok farklı olabilmesi nedeniyle, tüm hizalama işlemlerine uygulanabilen tek bir metot geliştirmek mümkün değildir. Her metot, görüntüler arasındaki geometrik bozulmalarla birlikte radyometrik bozulmaları ve gürültünün neden olduğu etkileri de göz önünde bulundurmalıdır. Hizalama tekniklerinin büyük çoğunluğu dört adım içerir. Bu adımlar Şekil 2.4'te de gösterilmiştir:

- **Özelliklerin Belirlenmesi:** Belirgin özellikler (sınırlar, köşeler, çevre, çizgilerin kesiştiği yerler vs.) otomatik olarak belirlenir. Bir adım daha ileri gidilirse, bu özellikler literatürde kontrol noktaları (CP) denilen noktalarla temsil edilebilirler. Bu noktalar genellikle ağırlık merkezi, çizgiler için uç noktalar, kolaylıkla ayırt edilebilen noktalar vs. gibi seçilir.

- ***Özniteliklerin Karşılaştırılması:*** Bu adımda referans ve gözlem görüntülerinin belirlenen öznitelikleri arasındaki benzerlikler belirlenir. Bunun için birçok öznitelik tanımlayıcıları kullanılır.

- ***Dönüşüm Modelinin Kestirimi:*** Referans ve gözlem görüntülerinin hizalanması için kullanılan eşleme fonksiyonunun tipi ve parametreleri belirlenir. Bu parametreler bir önceki adımda belirlenen öznitelikler arasındaki benzerlikler kullanılarak hesaplanır.

- ***Görüntünün Yeniden Örneklenmesi ve Dönüşümün Gerçekleştirilmesi:*** Bu adımda gözlem görüntüsü eşleme fonksiyonu kullanılarak yeni koordinat değerlerine taşınır (dönüşüm gerçekleştirilir). Koordinat ekseninde tamsayılarla karşı düşmeyen görüntü değerleri interpolasyonla uygun yerlere taşınır.



(a)



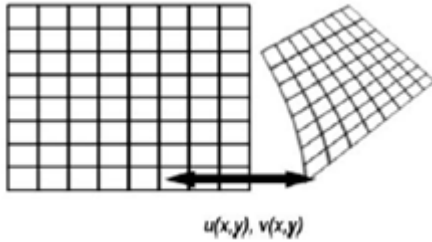
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 2.4: Görüntü Hizalama İşlemi. (a) ve (b) Özniteliklerin belirlenmesi, (c) ve (d) Özniteliklerin değişmeyen öznitelik tanımlayıcılarıyla karşılaştırılması, (e) Dönüşüm modelinin kestirimi, (f) Uygun bir interpolasyon tekniğinin kullanılarak görüntünün yeniden örnekleme ve dönüşümün gerçekleştirilmesi

Şekil 2.4(a) ve (b)'de özniteliklerin belirlenmesi için görüntüde sayılarla gösterildiği gibi kenar ve köşe noktaları seçilmiştir. (c) ve (d)'de ise, belirlenmiş olan özniteliklerden birbirlerine karşı düşenler değişmeyen sayılarla numaralandırılmıştır ve karşılaştırma için bu numaralar kullanılır. (e)'de dönüşüm modelinin kestirimi

sırasında eşleştirilen özellikler kullanılmaktadır. Hizalama işleminin her adımının gerçekleşmesinde bir takım problemlerle karşılaşılır. İlk olarak, incelenen durum için ne tür özniteliklerin uygun olduğuna karar verilmelidir. Öznitelikler birbirinden kolayca ayırt edilebilmelidir. Ayrıca, özniteliklerin fiziksel olarak ifade edilebilmesi de aranan bir özelliktir. Referans ve gözlem görüntüleri aynı sahneyi tamamen aynı şekilde kapsamasa bile veya gözlem görüntüsünde bazı beklenmedik değişimler (nesne oklüzyonu) olsa bile bunlardan elde edilen öznitelik kümesinde yeteri kadar ortak bileşenler olmalıdır. Öznitelik belirleme yöntemleri özniteliklerin belirlenmesinde yüksek doğruluğa sahip olmalı ve görüntülerdeki bozulmalardan etkilenmemelidir. İdeal durumda, algoritma görüntüdeki olası bozulmalardan bağımsız olarak aynı sahneye ait tüm görüntülerde aynı öznitelikleri bulmalıdır.

Özniteliklerin karşılaştırılması aşamasında yanlış özniteliklerin bulunması veya görüntülerdeki bozulmalardan kaynaklanan problemler ortaya çıkabilir. Birbirleriyle eşleşmesi gereken öznitelikler farklı görüntüleme sistemleri (sensörler) ve farklı koşullarda yapılan çekimlerden dolayı birbirlerinden farklı olabilirler. Bu nedenle, öznitelik tanımlayıcıları seçilirken bu etkenler göz önünde bulundurulmalıdır. Öznitelik tanımlayıcıları görüntülerde ortaya çıkabilecek bozulmalardan etkilenmemelidir.

Eşleme fonksiyonun seçimi görüntülerin ne şekilde elde edildiği ve görüntülerdeki beklenen bozulma miktarı gibi daha önceden bilinen bilgiler ışığında yapılır. Eğer hiçbir bilgi yoksa, seçilen model mümkün olan tüm bozulmalardan etkilenmeyecek kadar genel ve esnek seçilmelidir. Bu fonksiyon seçilirken göz önüne alınması gereken diğer bazı önemli noktalar da şunlardır: öznitelik belirleme metodunun doğruluğu, öznitelik karşılaştırılmasının güvenilirliği ve kabul edilebilen hata miktarı.

Son olarak, yeniden örnekleme metodu işlemsel karmaşıklıkla seçilen interpolasyon tekniğinin doğruluğuna bağlı olarak seçilir. En yakın komşuluklu veya çift doğrusal interpolasyon tekniği birçok durumda yeterlidir, ancak bazı uygulamalar daha kesin sonuçlar veren tekniklere ihtiyaç duyabilirler.

Öznitelik belirleme aşamasında görüntüdeki gözle görünür ve diğerlerinden kolayca ayırt edilebilen özellikler çıkartılır. Belirli bölgeler (ormanlar, nehirler, araziler vs.), çizgiler (bölge sınırları, caddeler, nehirler vs.), noktalar (bölgelerin köşeleri,

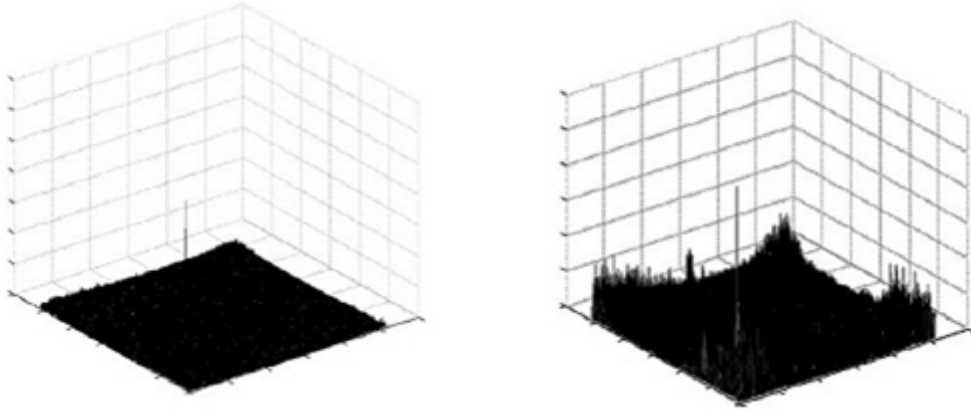
çizgilerin kesiştiği yerler vs.) öznitelikler olarak belirlenir. Bölgelerin belirlenmesinde bölütleme algoritmaları, çizgilerin belirlenmesinde standart kenar kestirim algoritmaları, noktaların belirlenmesinde dalgacık dönüşümü ve farklı matematiksel yöntemler kullanılır.

Öznitelik karşılaştırma aşamasında ise, *Alan Tabanlı* ve *Öznitelik Tabanlı* olmak üzere iki yaklaşım kullanılır. Her bir yaklaşım farklı yöntemler içermektedir. Alan Tabanlı öznitelik karşılaştırmada belirli nesnelere bulunmasıyla uğraşılmaz, doğrudan görüntü üzerinde çalışılır. Benzerliklerin kestirimi için görüntülerin daha önceden belirlenmiş boyutlardaki bir kısmı veya tamamı incelenir. Alan tabanlı teknikler şunlardır: özilişki tekniği, fourier teknikleri, karşılıklı bilgi (MI) teknikleri ve optimizasyon teknikleri. Öznitelik tabanlı diğer yaklaşımda ise, referans ve gözlem görüntülerine ait özniteliklerin belirlendiği ve iki öznitelik kümesinin mevcut olduğu kabul edilir. Bu yöntemde çeşitli öznitelik tanımlayıcıları ve görüntüler arasındaki uzaysal ilişkiler kullanılarak bu iki küme arasındaki ikili benzerlikler belirlenmeye çalışılır. Öznitelik tabanlı teknikler şunlardır: uzaysal ilişkilerin kullanıldığı yöntemler, değişmeyen tanımlayıcıların kullanıldığı yöntemler, relaksasyon yöntemleri, piramitler ve dalgacıklar. Alan tabanlı yöntemler görüntülerin belirgin özelliklerinin görüntünün yapısından elde edilemediği aksine gri seviye ve renk bilgisinden elde edildiği durumlarda kullanılır. Bu tekniklerde kullanılan görüntülere ait piksel şiddeti fonksiyonları benzer olmalıdır (en azından istatistiksel olarak birbirlerine bağımlı olmalıdırlar). Geometrik açıdan bakılırsa, alan tabanlı yöntemlerde görüntüler arasında sadece ötelemeye ve kısıtlı miktarda dönmeye izin verilir. Ancak teorik olarak bütün oranlarda dönme ve ölçeklemeye imkan sunmaktadır, fakat bu işlem çok fazla işlem karmaşıklığı getirdiği için genelde bu miktarlar küçük tutulur. Öznitelik tabanlı tekniklerde ise, daha çok görüntüdeki bölgesel ve yapısal bilgiler kullanılır. Bu teknikte birbirinden yapısal olarak tamamen farklı görüntüler bile hizalanabilirler (örneğin havadan çekilmiş bir fotoğraf ile bir harita). Bu tekniğin en büyük dezavantajı, özniteliklerin belirlenmesinin çok zor olması ve zamanla kararsızlaşabilmesidir. Bütün öznitelik tabanlı tekniklerin en can alıcı özelliği görüntüler arasındaki tüm farklılıklara rağmen sağlam bir şekilde kullanılacak değişmeyen tanımlayıcılara sahip olunamamasıdır.

Bu çalışmada frekans bölgesi teknikleri kullanıldığı için alan tabanlı tekniklerden Fourier yöntemi üzerinde durulacaktır. Bu teknikte görüntüler frekans bölgesinde Fourier dönüşümleriyle temsil edilirler. İşlemlerin çok daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi isteniyorsa veya görüntüler değişen koşullar altında çekildiyse ya da görüntüler frekansa bağlı gürültüye maruz kalmışsa, frekans bölgesi teknikleri görüntülerin hizalanmasında daha uygundur. Ötelenmiş ve kaydırılmış görüntülerin frekans bölgesi yöntemleri kullanılarak hizalanması için Fourier'in öteleme teoremine dayanan faz korelasyonu yöntemi kullanılır. Bu yöntemde referans ve gözlem görüntüler arasındaki çapraz güç spektrumu hesaplanır ve bu ifadenin tersi alınarak sıçramanın olduğu yer belirlenir. Bu işlemler bir örnek üzerinde Şekil 2.5'deki gibi gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.5: Alan Tabanlı Öznitelik Karşılaştırmasının Fourier Yöntemiyle Gerçekleştirilmesi. (a) Küçük bir bölgenin tüm görüntü üzerinde hizalanması, (b) Maksimum nokta birbiriyle örtüşen noktayı göstermektedir

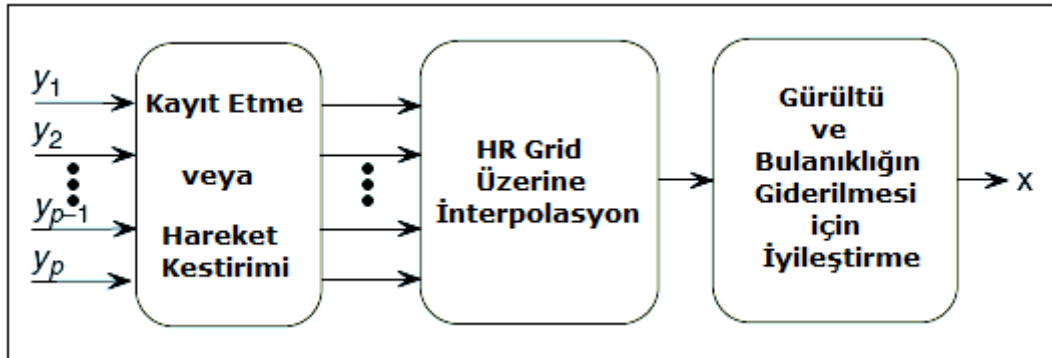
Bu yöntem, frekansa bağlı gürültü, düzgün olmayan ve zamanla değişen ışıklandırma bozukluklarına karşı çok güçlüdür. Ayrıca, hizalanacak görüntülerin boyutları büyükse hizalama işlemi esnasında harcanan süre miktarı diğer tekniklere oranla çok daha azdır.

2.4 Süper Çözünürlüklü Görüntünün Oluşturulması

Literatürde süper çözünürlüklü görüntü oluşturmak için önerilen birçok yöntem mevcuttur. Bunlardan başlıcaları: düzgün olmayan interpolasyon tekniği, frekans bölgesi yaklaşımı, dışbükey kümeye izdüşürme tekniği, deterministik ve stokastik yaklaşımlar, yinelemeli geriye izdüşüm tekniği, uyarlamalı filtreleme yaklaşımı vs. gibidir. Bu başlık altında bunlar ana hatlarıyla tanıtılmaya çalışılacaktır.

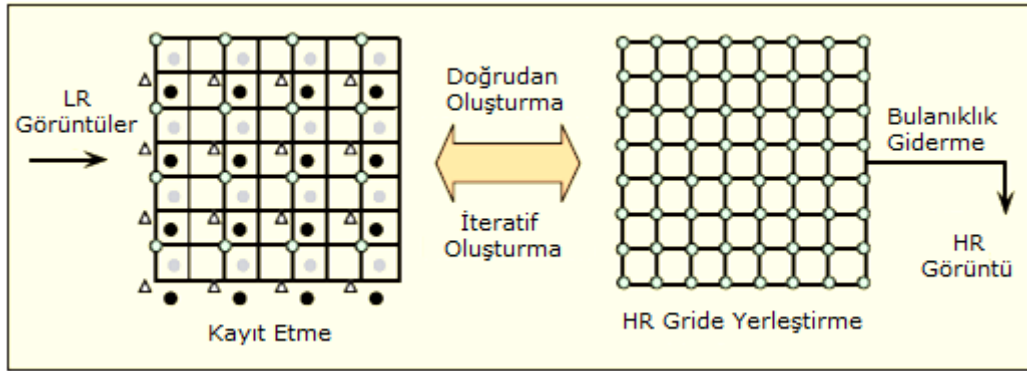
Düzgün olmayan interpolasyon tekniği, süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniklerinin en sezgisel olanıdır. Üç aşamadan oluşur ve bu aşamalar Şekil 2.6'da gösterilmiştir:

- i. Göreceli hareketin kestirimi, örneğin görüntülerin hizalanması (görüntüler arasındaki hareket bilgisi belli değilse)
- ii. Düzgün olmayan interpolasyonla çözünürlüğü iyileştirilmiş görüntünün üretilmesi
- iii. Bulanıklığın giderilmesi aşaması



Şekil 2.6: Düzgün Olmayan İnterpolasyon Tekniği ile Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma Şeması

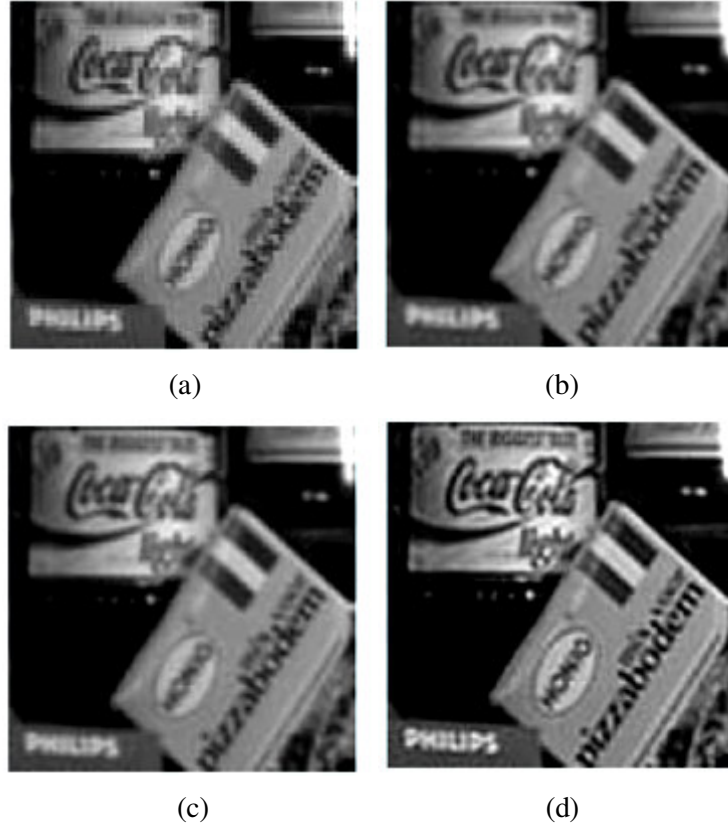
Bu işlemlerin sırasıyla gerçekleştirilmesi Şekil 2.7'deki gibi gösterilmiştir:



Şekil 2.7: Düzgün Olmayan İnterpolasyon Tekniğindeki Hizalama, İnterpolasyon ve Görüntüyü Yeniden Oluşturma İşlemleri

Hesaplanan göreceli hareket bilgisi kullanılarak yüksek çözünürlüklü görüntüye ait pikseller yüksek çözünürlüklü grid üzerine yerleştirilir. Bu aşamada bu noktalar arasındaki mesafe eşit değildir ve düzgün bir dağılım göstermezler. Doğrudan veya iteratif yeniden oluşturma teknikleri kullanılarak eşit aralıklı olmayan bu noktalar kümesi yüksek çözünürlüklü grid üzerine eşit aralıklı olarak yerleştirilmiş olur [52]-[55]. Düzgün olmayan interpolasyon sonucu yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturulduktan sonra, bulanıklık etkilerinin giderilmesi ve gürültünün temizlenmesi için görüntü iyileştirme teknikleri kullanılır. Görüntüyü iyileştirmek için gürültü temizlemeyi kapsayan herhangi bir dekonvolüsyon tekniği kullanılabilir.

Bu teknik kullanılarak gerçekleştirilen bir simülasyonun sonucu Şekil 2.8'deki gibi verilmiştir. Bu simülasyonda orijinal 256x256 yüksek çözünürlüklü görüntüden yatay ve dikey yönde iki faktörle yapılan alt örnekleme sonucu dört tane düşük çözünürlüklü görüntü oluşturulmuştur. Bu deneyde sadece çekim yapılan görüntüleme cihazının sensöründen kaynaklanan bir bulanıklık etkisinin olduğu kabul edilmiştir ve 20dB Gauss gürültüsü görüntülere eklenmiştir. Şekil 2.8(a)'da tek bir düşük çözünürlüklü görüntüden en yakın komşuluk (*nearest neighbourhood*) interpolasyon yöntemiyle oluşturulmuş bir görüntü görülmektedir. (b)'de yine tek bir düşük çözünürlüklü görüntüden çift doğrusal (*bilinear*) interpolasyon tekniğiyle oluşturulmuş görüntü görülmektedir. (c)'de ise dört tane düşük çözünürlüklü görüntüden düzgün olmayan interpolasyon sonucu elde edilen görüntü görülmektedir. (d)'de ise (c)'de elde edilen görüntünün Wiener filtresinden geçirilerek bulanıklık etkisi giderilmiş görüntü görülmektedir.



Şekil 2.8: Düzgün Olmayan İnterpolasyonla Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma. (a) En yakın komşuluk interpolasyon tekniği, (b) Çift doğrusal interpolasyon tekniği, (c) Dört görüntü kullanılarak düzgün olmayan interpolasyon tekniği, (d) (c)'ye uygulanan bulanıklık giderme işlemi

Düzgün olmayan interpolasyonla süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniğinin en önemli avantajı işlem karmaşıklığının düşük olmasıdır. Böylece, bu teknik gerçek zamanlı uygulamaların gerçekleştirilmesine olanak sağlar. Ancak, bu modelde bütün düşük çözünürlüklü görüntülerin aynı karakteristikte bulanıklık ve gürültüye maruz kaldığı kabul edilmiştir. Ayrıca, bu algoritmanın en uygun sonucu vermesinin bir garantisi de yoktur. Çünkü, görüntü iyileştirme aşaması interpolasyon aşamasında yapılan hataları görmezden gelir ve sadece bulanıklık ve gürültü açısından iyileştirme sunar.

Frekans domeni yaklaşımında düşük çözünürlüklü görüntülerdeki örtüşme alışlagelmişten sıra dışı bir şekilde kullanılarak yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilir. Düşük çözünürlüklü görüntüler arasındaki göreceli hareket bilgisi kullanılarak düşük çözünürlüklü görüntü ile elde edilmeye çalışılan yüksek çözünürlüklü görüntü arasında bir sistem denklemi ile ilişki kurulur [56]. Frekans bölgesi yaklaşımı prensip olarak üç başlıkta incelenebilir:

- i. Fourier dönüşümünün öteleme özelliği,
- ii. Orijinal yüksek çözünürlüklü görüntünün sürekli fourier dönüşümü (CFT) ile düşük çözünürlüklü gözlem görüntülerinin ayrık zamanlı fourier dönüşümü (DFT) arasındaki örtüşme ilişkisi,
- iii. Yüksek çözünürlüklü görüntünün band sınırlı olduğunun kabul edilmesi,

Yukarıda sıralanan bu özellikler, gözlem görüntülerinin DFT katsayılarının (örtüşmeye maruz kalmış) elde edilmeye çalışılan görüntünün CFT örnekleriyle ilişkilendirilmesine (bir sistem eşitliği ile) imkan verir.

Bu çalışmada, frekans bölgesi yaklaşımına yeni bir bakış açısı getirilmiş olup fourier dönüşümünün öteleme özelliğine ek olarak gözlem görüntülerinin birbirine göre döndürüldüğü durum da incelenmiştir. Dönme açısının kestirimi öteleme miktarının kestirimine göre daha zor bir işlem olup literatürde bu işlem için farklı yaklaşımlar sunulmuştur. Bu çalışmada, dönme açısının hesaplanmasında yeni bir yaklaşım sunulmuş, ardından da performansı farklı görüntüler üzerinde analiz edilmiştir. Daha sonra bu yaklaşımın performans analizi yapılmış ve algoritmayı hızlandıran yeni bir yaklaşım getirilmiştir. Ayrıca örtüşme etkisine maruz kalmış görüntüler için de bir inceleme yapılmıştır ve bunlardan da süper çözünürlüklü görüntü elde edilmiştir (belirli kısıtlar altında). Çalışmada bu yaklaşımlar detaylı bir şekilde incelendiği için bunlara ait detaylar ilerleyen bölümlerde anlatılmıştır.

Frekans bölgesi yaklaşımının en önemli avantajı teorik olarak basit olmasıdır. Düşük çözünürlüklü görüntülerle süper çözünürlüklü görüntü arasındaki ilişki frekans bölgesinde açık bir şekilde ifade edilmiştir. Frekans bölgesi yaklaşımı paralel çalışmaya olanak sağladığı için donanım karmaşıklığını azaltır ve maliyet açısından avantaj sağlar. Gözlem modelinin sadece hareket bilgisiyle ve sensörden kaynaklanan bulanıklık etkisiyle sınırlı olması bir dezavantajdır.

Dışbükey Kümeye İzdüşürme yaklaşımı süper çözünürlüklü görüntü oluşturma işlemine iteratif bir yaklaşım sunar. Görüntülerin hizalanması esnasında elde edilen bilgiler kullanılarak görüntünün interpolasyonunu ve iyileştirilmesini aynı anda gerçekleştirerek süper çözünürlüklü görüntüyü oluşturur. Düzgün olmayan interpolasyon tekniğinin bir açığı olan bu özellik bu teknikte ortadan kalkmıştır.

Bu yaklaşımda elde mevcut bulunan bilginin çözüm için kullanılması ulaşılabilecek çözümün kapalı dışbükey bir C_i kümesinin bir elemanı olmaya zorlar. Diğer bir anlatımla, belirli özellikleri sağlayan bir vektör kümesi olarak tanımlanan C_i gerçek çözümü de kapsar. Eğer bu küme içinde tüm elemanlar kesişiyorsa, çözüm bütün dışbükey kümelere izdüşüm yöntemiyle bulunabilir:

$$C_s = \bigcap_{i=1}^m C_i \quad (2.3)$$

C_i 'lerin her biri dışbükey bir kümedir. Böylece, çözümün de aslında dışbükey bir küme olduğu görülür. Dışbükey kümeye izdüşürme yaklaşımının en önemli avantajı basit olması ve güçlü bir uzay bölgesi gözlem modeli olmasıdır. Eldeki mevcut verinin uygun bir şekilde kullanılabilmesine imkan sunar. Ancak, bu metodun dezavantajı çözümün tek olmayabilmesi, sonuca yavaş ulaşma ve çok yüksek işlem karmaşıklığıdır.

Deterministik ve Stokastik süper çözünürlüklü görüntü oluşturma yaklaşımında problemin iyi tanımlanmadığı (yetersiz düşük çözünürlüklü görüntü sayısı ve iyi koşullanmamış bulanıklık giderme işlemleri yüzünden) kabul edilmiştir ve bunun için düzenleme önerileri sunulmuştur. İyi tanımlanmamış bu problemlerden kaynaklanan eksiklerin giderilmesi için önerilen yöntemlere genel olarak düzenleme (regule etme) denir. Bu yaklaşımda deterministik ve stokastik teknikler kullanılmaktadır. Genel olarak Kısıtlanmış En Küçük Kareler (*Constrained Least Squares*) yöntemi ve En Büyük Sonsal (*Maximum a Posteriori*) yöntemi kullanılır. Görüntünün modellenmesindeki sağlamlık ve esneklik süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniklerinin en büyük avantajıdır. Ayrıca gürültü sürecinin Gauss olduğu durum altında en büyük sonsal kestirimi çözümün teklifiğini garanti eder.

Bunun dışında, Yinelemeli Geriye İzdüşüm, Uyarlamalı Filtreleme vs. gibi başka süper çözünürlüklü görüntü oluşturma teknikleri de vardır ancak bu çalışmada bunlar incelenmeyecektir. Bunlarla ilgili literatürde birçok kaynak mevcuttur. Bu çalışmada süper çözünürlüklü görüntü elde etmek için görüntülerin frekans bölgesi analizi yapılacaktır.

Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniğinde temel problem birkaç düşük çözünürlüklü görüntüden yüksek çözünürlüklü bir görüntü elde etmektir. Bunu yaparken temel olarak iki adım vardır:

- Görüntülerin Kaydedilmesi
- Yüksek Çözünürlüklü Görüntünün Oluşturulması

Daha önce de bahsedildiği gibi, görüntülerin doğru olarak hizalanması tekniğin başarımı açısından büyük önem taşır. Birçok süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniği bu iki problemi çözmek için yeni metotlar önerir. Her birinin yaklaşımı farklı olmasına rağmen amaçları aynıdır. Yöntemler arasındaki en büyük farklılık görüntülerin hizalanması sırasında izlenen yaklaşımdan kaynaklanır.

3. FREKANS BÖLGESİ YAKLAŞIMIYLA SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ GÖRÜNTÜ OLUŞTURMA

Bu kısımda örtüşme etkisi olan bant sınırlı görüntülerin hizalanması işlemi üzerinde durulacaktır. Sayısal bir kameranın optik sistemi tıpkı alçak geçiren bir süzgeç gibi davranır ve bütün yüksek frekans bileşenlerini bloklar. Bu nedenle, alınan görüntü aslında bant sınırlı bir sinyaldir.

Bu çalışmada önerilen metot iki görüntü arasındaki düzlemsel kayma ve dönme miktarını hesaplar.

3.1 Düzlemsel Hareket Kestirimi

Fourier temelli görüntü hizalama tekniklerinde hareket miktarının kestirimi görüntü düzlemine paralel bir düzlemde yapılır. Bu durumda, iki görüntü arasındaki hareket miktarı üç sürekli parametre ile ifade edilir. Bunlar: yatay ve dikey yöndeki $x_{0,h}$ ve $x_{0,v}$ hareketi ile düzlemsel dönme miktarını ifade eden θ_0 saçısıdır.

Frekans bölgesi yaklaşımı yatay ve dikey kayma miktarı ile dönme açısını ayrı ayrı hesaplama imkanı sunar. Örneğin, iki boyutlu $f_1(\mathbf{x})$ referans sinyali ve onun ötelenmiş ve döndürülmüş hali olan $f_2(\mathbf{x})$ sinyali olsun;

$$f_2(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{R}(\mathbf{x}+\mathbf{x}_0)) \quad (3.1)$$

Bu denklemde, f_1 iki boyutlu referans işaretini f_2 ise f_1 'in ötelenmiş ve döndürülmüş formunu ifade etmektedir. Yine bu denklemdeki düzlemsel hareket parametreleri \mathbf{x} , \mathbf{x}_0 ve \mathbf{R} matris formda aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_h \\ x_v \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}_0 = \begin{pmatrix} x_{0,h} \\ x_{0,v} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos\theta_0 & -\sin\theta_0 \\ \sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{pmatrix}$$

Bu ifade Fourier dönüşümü alınarak frekans bölgesine taşınırsa;

$$\begin{aligned}
F_2(\mathbf{u}) &= \iint_{\mathbf{x}} f_2(\mathbf{x}) e^{-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}} d\mathbf{x} \\
&= \iint_{\mathbf{x}} f_1(\mathbf{R}(\mathbf{x}+\mathbf{x}_0)) e^{-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}} d\mathbf{x} \\
&= \iint_{\mathbf{x}} f_1(\mathbf{R}\mathbf{x}') e^{-j2\pi\mathbf{u}^T(\mathbf{x}'-\mathbf{x}_0)} d\mathbf{x} \\
&= e^{j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}_0} \iint_{\mathbf{x}'} f_1(\mathbf{R}\mathbf{x}') e^{-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}'} d\mathbf{x}'
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Denklemlerdeki $F_1(\mathbf{u})$, $f_1(\mathbf{x})$ 'in iki boyutlu fourier dönüşümüdür. Bu ifadede, $\mathbf{x}' = \mathbf{x} + \mathbf{x}_0$ değişken dönüşümü yapılarak öteleme işlemi ifadede görünmez hale getirilmiştir. Ardından, $\mathbf{x}'' = \mathbf{R}\mathbf{x}'$ gibi bir dönüşüm daha yapılırsa ve Fourier dönüşümlerinin genlikleri incelenirse (öteleme işlemi genlikleri değiştirmez, yapılan dönüşümlerin genlikleri eşit olmalı);

$$\begin{aligned}
|F_2(\mathbf{u})| &= \left| e^{j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}_0} \iint_{\mathbf{x}'} f_1(\mathbf{R}\mathbf{x}') e^{-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}'} d\mathbf{x}' \right| \\
&= \left| e^{j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}_0} \left| \iint_{\mathbf{x}'} f_1(\mathbf{R}\mathbf{x}') e^{-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}'} d\mathbf{x}' \right| \right| \\
&= \left| \iint_{\mathbf{x}'} f_1(\mathbf{R}\mathbf{x}') e^{-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}'} d\mathbf{x}' \right|
\end{aligned}$$

$\mathbf{x}'' = \mathbf{R}\mathbf{x}' \rightarrow \mathbf{x}' = \mathbf{R}^T\mathbf{x}''$ olarak yazılır ve yerine koyulursa;

$$\begin{aligned}
|F_2(\mathbf{u})| &= \left| \iint_{\mathbf{x}''} f_1(\mathbf{x}'') e^{-j2\pi\mathbf{u}^T(\mathbf{R}^T\mathbf{x}'')} d\mathbf{x}'' \right| \\
&= \left| \iint_{\mathbf{x}''} f_1(\mathbf{x}'') e^{-j2\pi(\mathbf{R}\mathbf{u})^T\mathbf{x}''} d\mathbf{x}'' \right| \\
&= |F_1(\mathbf{R}\mathbf{u})| \text{ gibi olur.}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Görülüyor ki, $|F_2(\mathbf{u})|$, $|F_1(\mathbf{u})|$ 'nin θ_0 açısı kadar döndürülmüş halidir. Yani $f_1(\mathbf{x})$ işaretinin bulunduğu uzay düzlemi θ_0 kadar döndürülürse, $f_1(\mathbf{x})$ 'in fourier dönüşümü de θ_0 kadar dönecektir. Ayrıca, $|F_1(\mathbf{u})|$ ve $|F_2(\mathbf{u})|$ \mathbf{x}_0 kayma miktarına bağlı değildir. Çünkü, uzay bölgesindeki kayma miktarı frekans bölgesinde faz değişimlerine neden olur. İşaretin genliği üzerinde bir etkisi yoktur.

Bu nedenle;

- Önce, $f_1(\mathbf{x})$ ve $f_2(\mathbf{x})$ sinyallerinin fourier dönüşümleri olan $F_1(\mathbf{u})$ ve $F_2(\mathbf{u})$ bulunur.
- Sonra, bunların genlikleri olan $|F_1(\mathbf{u})|$ ve $|F_2(\mathbf{u})|$ karşılaştırılarak θ_0 dönme miktarı bulunur.
- $f_2(\mathbf{x})$, θ_0 kadar eski durumuna gelecek şekilde ters yönde döndürülür ve ardından \mathbf{x}_0 öteleme miktarının hesabına geçilir

$|F_1(\mathbf{u})|$ ve $|F_2(\mathbf{u})|$ 'nin faz farkı kullanılarak \mathbf{x}_0 öteleme miktarı hesaplanır. Bu kısımda ana hatlarıyla bahsedilen kayma ve dönme miktarlarının hesabı bir sonraki konularda detaylı olarak incelenmiştir. Daha sonra dönme açısının kestirimine bu çalışma çerçevesinde farklı bir yaklaşım önerilmiştir.

3.1.1 Kayma Miktarının Kestirimi

Öteleme, kayma, döndürme ve ölçekleme gibi işlemlerin hepsinin frekans bölgesinde bir karşılığı vardır. Frekans bölgesinin sunduğu bu özellikler kullanılarak görüntüler arasındaki öteleme, kayma ve döndürme miktarlarının hesaplanması için Fourier'in Öteleme Teoremine dayanan Faz Korelasyonu tekniği kullanılabilir [29, 27, 22, 23, 26, 25].

Bu kısımda iki görüntü işareti arasındaki kayma miktarının faz korelasyonu yöntemiyle hesaplama tekniği anlatılacaktır. Fourier'in öteleme teoremi, birbirinden (x_0, y_0) kadar kaymış iki görüntü arasındaki ilişkiyi şöyle ifade etmektedir:

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (3.4)$$

$$F_1(u, v) = \iint f_1(x, y) e^{-j2\pi(ux + vy)} dx dy \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}
F_2(u,v) &= \iint f_2(x,y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \\
&= \iint f_1(x-x_0, y-y_0) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Bu aşamada x ve y değişkenlerine sırasıyla $x' = x - x_0$ ve $y' = y - y_0$ dönüşümleri yapılırsa:

$$\begin{aligned}
F_2(u,v) &= \iint f_1(x',y') e^{-j2\pi(u(x'+x_0)+v(y'+y_0))} dx' dy' \\
&= e^{-j2\pi(ux_0+vy_0)} \iint f_1(x',y') e^{-j2\pi(ux'+vy')} dx' dy' \\
F_2(u,v) &= e^{-j2\pi(ux_0+vy_0)} F_1(u,v)
\end{aligned} \tag{3.7}$$

olarak yazılabilir.

$f_1(x,y)$ ve $f_2(x,y)$ gibi iki görüntü işareti arasındaki çapraz güç spektrumu $F_1(u,v)$ ve $F_2(u,v)$ gibi fourier dönüşümleri cinsinden şöyle tanımlanmıştır:

$$Q(u,v) = \frac{F_1(u,v) F_2^*(u,v)}{|F_1(u,v) F_2(u,v)|} = e^{j2\pi(ux_0+vy_0)} \tag{3.8}$$

Buradaki $Q(u,v)$ çapraz güç spektrum fonksiyonunu, F_2^* ise, F_2 'nin kompleks eşleniğini göstermektedir. Fourier'in öteleme teoremi, çapraz güç spektrumunun fazının görüntüler arasındaki faz farkına eşit olduğunu söylemektedir. Bu ifadenin ters fourier dönüşümü alınır, zaman bölgesinde sadece (x_0, y_0) noktasında bileşeni olan, bunun dışında diğer tüm yerlerde sıfır değeri alan $\delta(x-x_0, y-y_0)$ fonksiyonu elde edilir. Bu fonksiyonun sıçrama yaptığı nokta x ve y doğrultularındaki kayma miktarını verecektir.

$$F^{-1}\{Q(u,v)\} = F^{-1}\{e^{j2\pi(ux_0+vy_0)}\} \tag{3.9}$$

$$Q(x,y) = \delta(x-x_0, y-y_0) \tag{3.10}$$

(x_0, y_0) noktası görüntüler arasındaki kayma miktarıdır.

3.1.2 Dönme Miktarının Kestirimi

Bu kısımda Fourier'in dönüşüm özellikleri kullanılarak görüntüler arasındaki dönme farkı bulunur. Bir önceki probleme ek olarak görüntüler birbirlerine göre döndürülmüş de olabilir. Yani, $f_2(x,y)$ görüntü işareti $f_1(x,y)$ 'den (x_0,y_0) kadar ötelenmiş θ_0 kadar döndürülmüş olsun. O halde;

$$f_2(x,y) = f_1(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0 - x_0, -x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0 - y_0) \quad (3.11)$$

Fourier dönüşümünün öteleme ve döndürme özellikleri birlikte kullanılarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

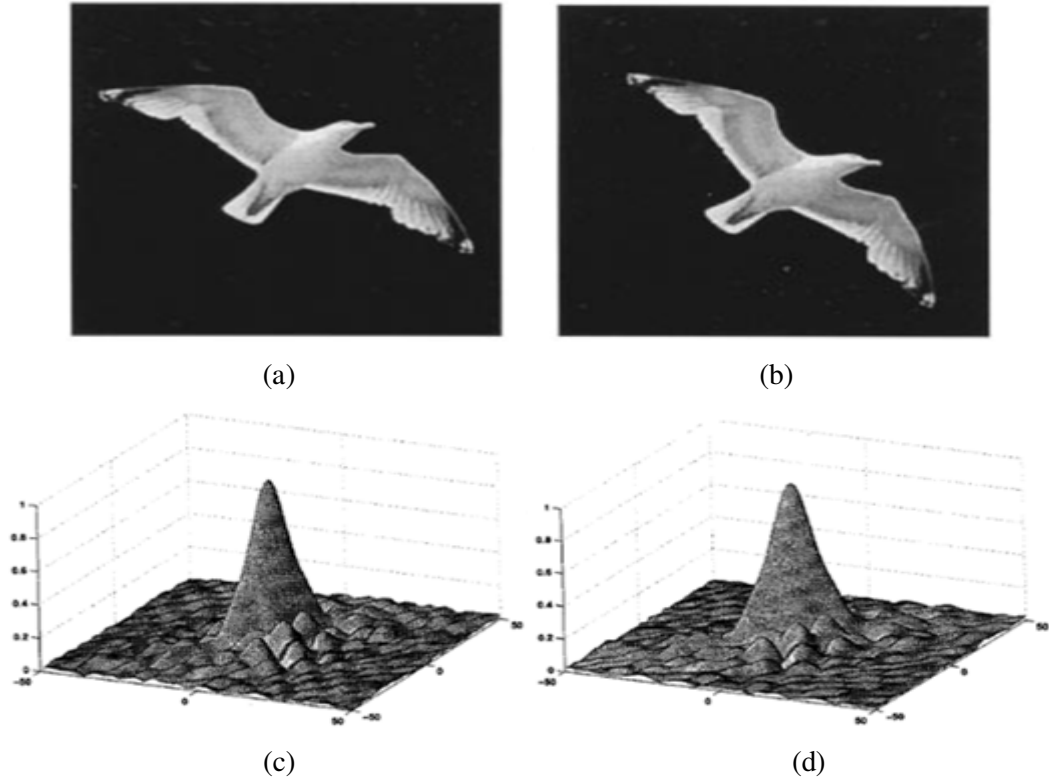
$$F_2(u,v) = e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)} F_1(u \cos \theta_0 + v \sin \theta_0, -u \sin \theta_0 + v \cos \theta_0) \quad (3.12)$$

M_1 ve M_2 sırasıyla $F_1(u,v)$ ve $F_2(u,v)$ 'nin genliklerini gösterebilir. Bu durumda:

$$M_1 = |F_1(u,v)|, \quad M_2 = |F_2(u,v)| \quad (3.13)$$

(3.14)

Görüldüğü gibi, F_1 ve F_2 'nin genlikleri incelenirse bu değerlerin birbirleriyle aynı olduğu fark edilebilir. Diğer bir anlatımla, M_2 , M_1 'in döndürülmüş bir kopyasından başka bir şey değildir. Görüleceği üzere, işaretin ötelenmesi işaretin genliği üzerinde hiçbir etki yapmaz. Bu durum Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Dönme İşleminin Görüntüler Üzerindeki Etkisi. (a) $f_1(x,y)$ görüntü işareti, (b) $f_1(x,y)$ 'nin $\theta_0 = -15,82^\circ$ derece döndürülmesiyle elde edilen $f_2(x,y)$ görüntü işareti, (c) ve (d) $f_1(x,y)$ ve $f_2(x,y)$ işaretlerinin genlik spektrumları olan $|F_1(u,v)|$ ve $|F_2(u,v)|$ dönme işleminden etkilenmez

Bu iki işaret arasındaki dönme miktarı yine faz korelasyonu yöntemiyle kolayca hesaplanabilir [27]. M_2 işareti M_1 'in θ_0 kadar döndürülmüş halinden başka bir şey olmadığı için ve zaman bölgesindeki dönme polar koordinat düzleminde öteleme işlemine eşdeğer olduğu için bu işaretlerin polar düzlemde analizini yapmak işlemleri daha da kolaylaştırılacaktır.

$$M_1(u,v) \rightarrow M_1(r,\theta) \text{ ile gösterilirse,} \quad (3.15)$$

(3.14) eşitliği (3.16)'deki gibi yazılabilir:

$$\rightarrow M_2(r,\theta) = M_1(r,\theta - \theta_0) \text{ veya } M_2(r,\theta) = M_1(r,\theta + \theta_0) \quad (3.16)$$

olarak yazılabilir. 3.1.1'de detaylı olarak anlatılan Faz Korelasyonu Yöntemiyle θ_0 açısı benzer şekilde hesaplanabilir.

3.2 Dönme Miktarının Kestirimine Farklı Bir Yaklaşım

$|F_1(u,v)|$ ve $|F_2(u,v)|$ arasındaki θ_0 dönme açısı referans görüntü olan $|F_1(u,v)|$ ile hizalanmaya çalışılan görüntü olan $|F_2(u,v)|$ arasındaki maksimum korelasyona eşittir. Bu yöntem her dönme açısının hesaplanması için iki boyutta korelasyon hesabı gerektirdiğinden işlem karmaşıklığı açısından çok yük getirir.

$|F_1(u,v)|$ ve $|F_2(u,v)|$ polar koordinatlara taşınırsa θ_0 kadar döndürme işlemi θ_0 kadar öteleme işlemine (dairesel) indirgenmiş olur. 3.1.2’de anlatılan $|F_1(u,v)|$ ve $|F_2(u,v)|$ polar koordinat değerleri hesaplanıp oradan da iki dönüşüm arasındaki faz farkı kullanılarak θ_0 açısı bulunabilir. Ancak, bu işlemde de spektrumun polar düzleme taşınmasına ihtiyaç vardır. (u,v) ’deki verilerin (r, θ) düzlemine düzgün olarak taşınabilmesi için interpolasyon işlemi uygulanmalıdır. Enerjinin çoğunluğu düşük frekanslarda toplandığı için ve alçak frekans bileşenlerindeki interpolasyon işlemleri çok fazla hatalı sonuçlar ürettiği için bu yaklaşım da hatalı sonuçlar üretebilir. Yine bu teknik de işlem karmaşıklığı açısından çok yük getirir.

Bu çalışmada önerilen teknik ise işlem karmaşıklığı açısından bahsedilen bu iki yöntemden daha verimlidir. İlk önce, radyal çizgiler üzerinden integral alınarak H (ortalama frekans içeriği) α ’nın bir fonksiyonu olarak bulunur.

$$H(\alpha) = \int_{\alpha-\Delta\alpha/2}^{\alpha+\Delta\alpha/2} \int_0^{\infty} |F(r,\theta)| dr d\theta \quad (3.17)$$

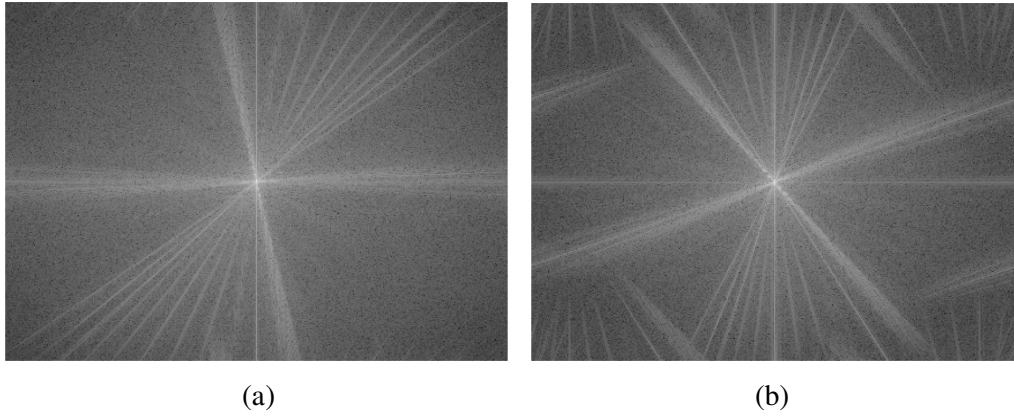
Pratikte $|F(r, \theta)|$ ayrık zamanlı bir sinyaldir. Literatürde ayrık yönleri sürekli yönlerle ilişkilendiren teknikler bulunmaktadır [57]. Burada ayrık zamanlı $H(\alpha)$ fonksiyonu, dikdörtgen bir gridin üzerinde bulunan ve $\alpha-\Delta\alpha/2 < \theta < \alpha+\Delta\alpha/2$ açısına sahip değerlerin ortalaması olarak hesaplanır. Dönme açısı 0,1 dereceye duyarlı olarak hesaplanmak istenirse, $H(\alpha)$ her 0,1 derecede bir hesaplanır. Her açı değeri için benzer $|F(r, \theta)|$ sinyal değerleri elde etmek için, ortalama hesabı sadece $r < \rho$ gibi dairesel bir disk üzerindeki frekans bileşenleri için hesaplanır. Buradaki ρ görüntünün yarıçapı olarak ya da görüntü boyunun yarısı olarak adlandırılır. Son olarak, alçak frekans bileşenleri için hesaplanan değerler diğer değerlere oranla çok büyükse, $\varepsilon = 0.1$ için $r < \varepsilon\rho$ şartını sağlayan değerler göz ardı edilir. Çünkü, bir görüntü işaretinin genlik spektrumu incelenirse enerjinin alçak frekans bileşenlerinde

toplandığı kolayca görülebilir. Bu nedenle, $H(\alpha)$, $\alpha - \Delta\alpha/2 < \theta < \alpha + \Delta\alpha/2$ ve $\epsilon\rho < r < \rho$ ayrık grid üzerindeki frekans bileşenlerinin ortalaması olarak hesaplanmış olur. Burada aslında iki boyutlu görüntü işaretine bir çeşit izdüşürme işlemi uygulanmıştır ve bir boyutlu $H(\alpha)$ fonksiyonu elde edilmiştir. Böylece görüntü işareti bir boyutlu bir fonksiyonla ifade edilmiş olur.

$|F_1(u,v)|$ ve $|F_2(u,v)|$ 'nin her biri için $H(\alpha)$ hesaplanabilir. Bunlar arasındaki θ_0 dönme açısı bu iki fonksiyon arasındaki korelasyonun maksimum olduğu nokta olarak ölçülebilir. [27]'daki gibi iki boyutlu korelasyon hesabı yerine burada tek boyutlu korelasyon hesabı yapılmıştır. Bu durum Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'deki analizlerde gösterilmiştir.

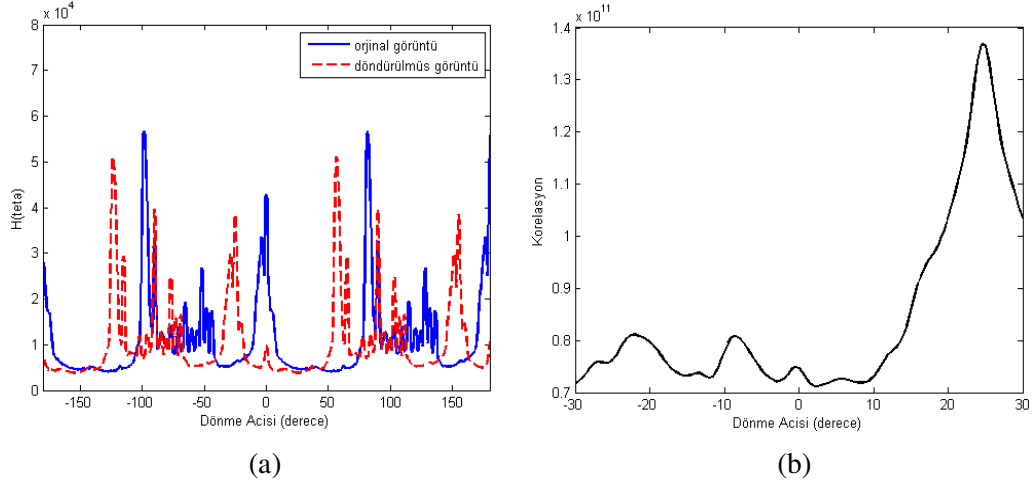


Şekil 3.2: Dönme İşleminin Uzay Domeninde İncelenmesi ($\theta_0 = 25^\circ$). (a) Orijinal Görüntü, (b) Döndürülmüş görüntü



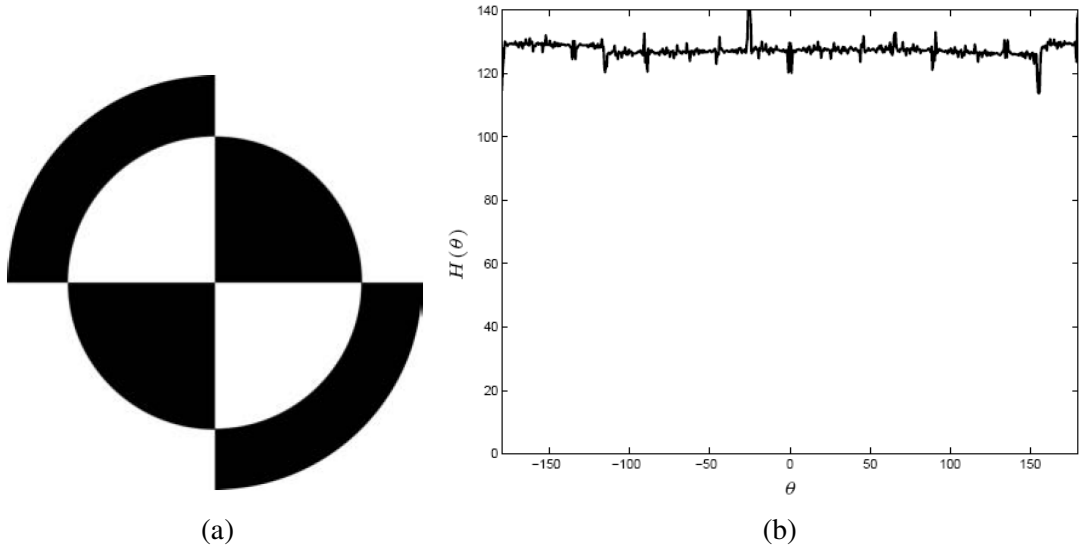
Şekil 3.3: Dönme İşleminin Frekans Domeninde İncelenmesi. Uzay bölgesindeki bir görüntü döndürülürse görüntünün fourier dönüşümünün genliği de aynı oranda döner ($\theta_0 = 25^\circ$). (a) Şekil 3.2 (a)'daki orijinal görüntünün, (b) Şekil 3.2 (b)'deki döndürülmüş görüntünün fourier dönüşümünün genliği

Şekil 3.3'deki orijinal ve döndürülmüş görüntülere ait $|F_1(u,v)|$ ve $|F_2(u,v)|$ için hesaplanan $H(\alpha)$ fonksiyonları ya α 'ya bağlı olarak Şekil 3.4'deki gibi çizilmiştir. Şekilde görülen $H_1(\alpha)$ ve $H_2(\alpha)$ arasındaki maksimum korelasyonun olduğu nokta aslında dönme açısını verir. Şekil 3.2'de belirtildiği gibi döndürme miktarı $\theta_0 = 25^\circ$ olarak bulunmuştur.



Şekil 3.4: Dönme Açısının Kestirimi. (a) Şekil 3.2'deki görüntülerin Fourier dönüşümlerinin genliklerinin $H(\alpha)$ 'nın fonksiyonu olarak grafikleri(mavi orijinal, kırmızı döndürülmüş görüntü), (b) $H_1(\alpha)$ ve $H_2(\alpha)$ arasındaki korelasyon eğrisi $\theta_0 = 25^\circ$ noktasında maksimuma ulaşmıştır

Bu teknikteki radyal izdüşüm mevcut bilgilerin azalması anlamına gelir ve hareket miktarının kestirimi sırasında karışıklılara neden olabilir. Örneğin, Şekil 3.5'te bir görüntüye ait fourier dönüşümü ve $H(\alpha)$ ortalama frekans içeriği görülmektedir. Burada $H(\alpha)$ sabittir ve herhangi bir döndürme miktarı için yine sabit kalmaktadır. Bunun nedeni, görüntü işaretinin frekans bileşenlerinin tüm dairesel yönlere eşit dağılmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada önerilen algoritma iki boyutlu görüntüleri tek boyuta izdüşürdüğü için bu tip görüntüler için dönme miktarının kestirimi yapılamaz. Bu tip görüntüler için iki boyuttaki tüm bilgiye ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, algoritmanın başarımı spektrumu dairesel özellik gösteren görüntüler üzerinde azdır. Bu durum Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Şekil 3.5(a)'da görüldüğü gibi, fourier spektrumu dairesel özellik gösteren görüntülerin dönme miktarı bu çalışmada önerilen yöntemle göre doğru bir şekilde hesaplanamaz. $H(\alpha)$ bu tip görüntüler için sabit kalır.



Şekil 3.5: İzdüşürme İşleminin Dolaylı Dönme Açısının Kestiriminde Ortaya Çıkan Karışıklık. (a) Fourier Spektrumu Dairesel Özellik Gösteren Bir Görüntülerin dönme miktarı bu çalışmada önerilen yönteme göre doğru bir şekilde hesaplanamaz. (b) $H(\alpha)$ ortalama frekans içeriği bu tip görüntüler için sabit kalır

3.3 Kısmen Örtülmüş Görüntü İşaretleri İçin Düzlemsel Hareket Kestirimi

Düşük çözünürlüklü görüntüler örtüşmeye maruz kalmışsa, anlatılan teknikler hizalama işlemi için doğru sonuçlar vermeyecektir. Örtüşme nedeniyle (3.1) - (3.3) bağıntıları artık geçersiz olur. Örtüşmenin etkisi frekans spektrumunun farklı bölgelerinin üst üste binmesidir. Bu nedenle, $|F_1(u,v)|$ ve $|F_2(u,v)|$ arasında doğrusal faz kaymasından çok daha fazla farklılıklar olacaktır.

Sinyallerin üzerindeki örtüşme etkisi önce tek boyutlu, periyodik ve band sınırlı $f(t)$ sinyali üzerinde incelenecektir. $f(t)$, maksimum frekansı K ve periyodu $T = 1$ olan bir işaret olsun. $f(t)$ 'nin fourier serisi katsayıları α_k ile gösterilsin ($-K \leq k \leq K$). $f(t)$ işaretinden ve onun t_0 kadar ötelenmiş versiyonundan N tane örnek alınsın;

$$y_1(n) = f\left(\frac{n}{N}\right) \quad (3.18)$$

$$y_2(n) = f\left(\frac{n+t_0}{N}\right) \quad (3.19)$$

Burada $N > 2K$ ise örneklenmiş işaretlerde örtüşme etkisi görülmez ve bu işaretlere ait ayrık fourier dönüşümü (3.20) ve (3.21) denklemlerinde olduğu gibi yazılabilir:

$$Y_1(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_1(n) W^{-kn} = \alpha_k \quad (3.20)$$

$$Y_2(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_2(n) W^{-kn} = \alpha_k Z_2^k \quad (3.21)$$

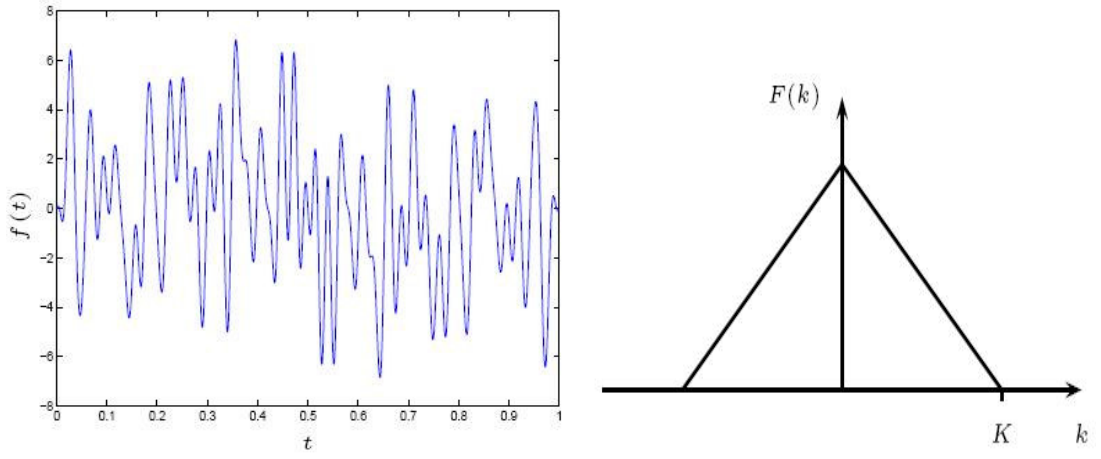
Daha önce anlatılan tekniklere göre, t_0 kayma miktarı doğrudan Y_2/Y_1 oranından elde edilebilir. Ancak, eğer $N < 2K$ ise, yani örneklenmiş işaretler örtüşüyorsa, bu basit ifade artık geçerli olmayacaktır. Bunun yerine aşağıdaki ifadeler yazılabilir:

$$Y_1(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_1(n) W^{-kn} = \sum_i \alpha_{k+iN} \quad (3.22)$$

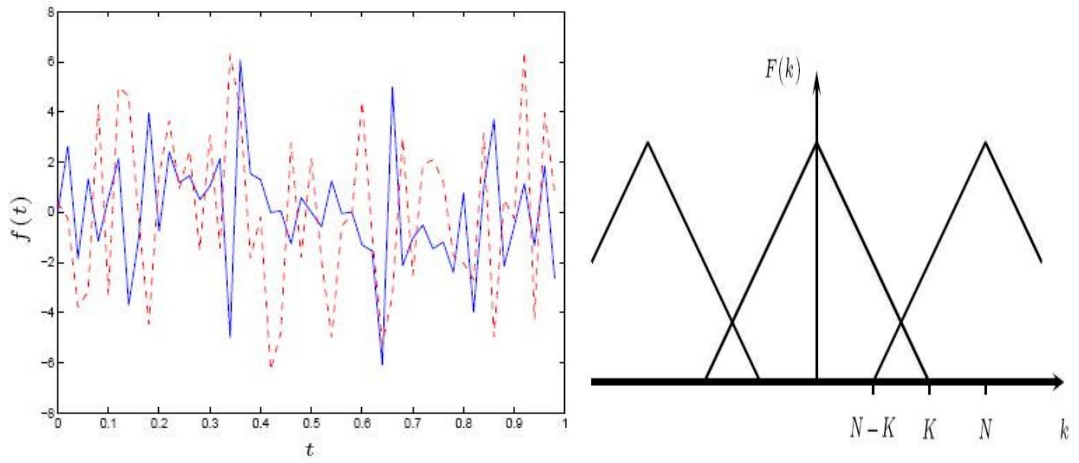
$$Y_2(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_2(n) W^{-kn} = \sum_i \alpha_{k+iN} Z_2^{k+iN} \quad (3.23)$$

Örtüşen bileşenler Y_2 ve Y_1 arasındaki lineer faz ilişkisini değiştirir. Eğer $N \leq K$ ise, tüm frekans bileşenlerinde örtüşme etkisi görünecektir. İşareti bu şekilde örtüşmüş örneklerden geri elde etme teknikleri bulunmaktadır, ancak bu çalışmada bunlar incelenmeyecektir. Bu çalışmada $N > K$ olduğu yani bütün frekans bileşenlerinin değil de bir kısmının örtüşme etkisine maruz kaldığı durum incelenecektir.

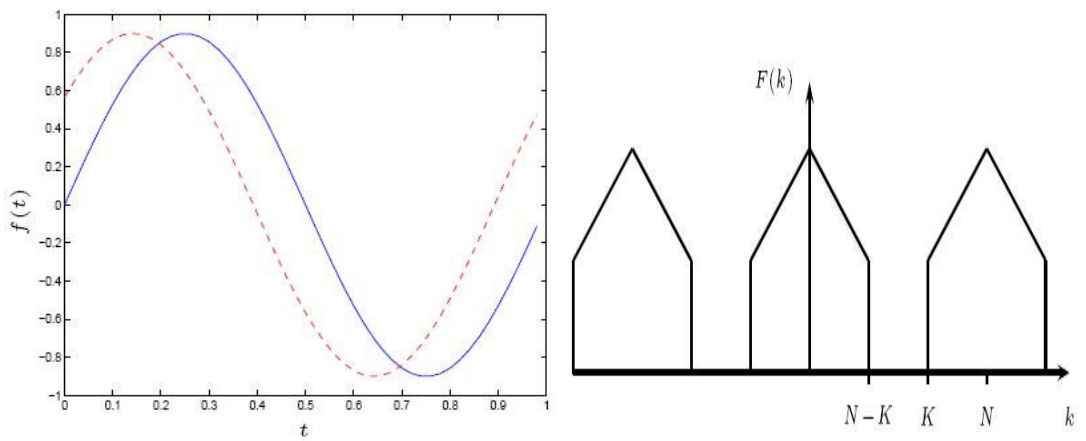
(3.23) denklemindeki k değerleri $|k| < N - K$ için alçak frekans bileşenlerinin sadece bir terimi sıfırdan farklıdır. Dolayısıyla, $Y_2(k)/Y_1(k)$ hala lineerdir. O halde, öteleme miktarı alçak frekans bölgesinde örtüşmenin olmadığı alanlardan hesaplanabilir. Ayrıca, alçak geçiren bir süzgeç kullanılarak örtüşen kısımlar sinyalden atılabilir. Bu işlemlerden sonra öteleme miktarı korelasyon işlemi gibi teknikler kullanılarak hesaplanabilir. Bu işlem Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'den daha detaylı görülebilir:



Şekil 3.6: Orijinal Sürekli Zamanlı Bir İşaret ve Onun Frekans Spektrumu



Şekil 3.7: Örneklenmiş İşaretin Zaman ve Frekans Bölgesi Gösterilimi (örtüşme)



Şekil 3.8: Alçak Geçiren Süzgeçten Geçirilmiş İşaretin Zaman ve Frekans Bölgesi Gösterilimi (örtüşen bileşenler temizlenmiş)

Tek boyutta incelenen problem tamamen aynı mantıkla iki boyuta taşınabilir. $y_1(n)$ ve $y_2(n)$ gibi örneklenmiş sinyaller kesim frekansı $N-K$ olan alçak geçiren süzgeçten geçirilir (N_h-K_h ve N_v-K_v ayrı ayrı süzgecin yatay ve dikey yöndeki kesim frekanslarını göstermektedir). Böylece, süzgeçten geçirilmiş görüntülerin hizalanması için daha önce örtüşmesiz durumda kullanılan (3.1) - (3.3) denklemleri kullanılabilir. Süzgeçleme işleminin sonunda kullanılabilir frekans aralıkları bilindiği için bu işlem atlanarak doğrudan hizalama işlemi yapılabilir. Çünkü, süzgecin kesim noktaları bilinmektedir. Bu nedenle, algortmada kullanılan frekans bileşenleri kesim frekansını aşmayacak şekilde seçilirse bu süzgeçleme işlemiyle eşdeğer olacaktır. Böylece algoritmanın işlemsel karmaşıklığı da azaltılmış olur. Bu durumda, döndürme miktarı $\epsilon\rho < r < \rho_{\max}$ aralığındaki frekans bileşenleri kullanılarak hesaplanır. Buradaki ρ_{\max} ifadesi aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$\rho_{\max} = \min_{h,v}((N-K)/N) \quad (3.24)$$

Yatay ve dikey yöndeki ötelemeler ise, $|kl| < N - K$ için faz farkından hesaplanır.

Bir işaretin yüksek frekans bileşenleri hizalama işlemi esnasında alçak frekans bileşenlerine göre daha yüksek doğruluk sağlarlar. Bu nedenle, görüntü hizalama işleminde yüksek frekans bileşenlerinin önemi artar. [27]'da önerilen teknik bu konu üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak, bir sinyalin yüksek frekans bileşen bölgesi genellikle daha düşük sinyal gürültü oranına (SNR) sahiptir. Yine örtüşmenin olduğu durumlarda yüksek frekans bileşenleri örtüşme etkilerinden çok daha fazla etkilenir. Bu nedenle, bu çalışmada yüksek frekans bileşenleri göz ardı edilerek görüntü hizalama işleminde alçak frekans bileşenleri kullanıldı. Literatürde örtüşmüş görüntülerin öteleme miktarının hesaplanmasında benzer teknikler kullanılmıştır [22, 23].

3.4 Görüntünün Yeniden Oluşturulması Tekniği

Düşük çözünürlüklü görüntüler doğru olarak hizalandıktan sonra farklı görüntülerden alınan örnekler bir araya getirilerek yüksek çözünürlüklü tek bir görüntü oluşturulur. Bu çalışmada incelenen görüntü oluşturma algoritmasında farklı düşük çözünürlüklü görüntülerden alınan örnekler hesaplanan hareket kestirim parametrelerine göre öncelikle referans görüntünün koordinat düzlemi üzerinde ifade edilirler

(yerleştirilirler). Ardından, Qhull algoritması [40, 41] kullanılarak eldeki veri üzerinde Delaunay Üçgenlere Bölme işlemi gerçekleştirilir. Bu üçgenlere bölme işleminden sonra görüntü pikselleri interpolasyon teknikleriyle yüksek çözünürlüklü grid üzerine düzgün olarak yerleştirilir. Bu çalışmada, daha az işlem karmaşıklığı ve daha iyi sonuçlar vermesi nedeniyle çift kübik interpolasyon tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte aranan noktanın piksel değeri bu noktaya en yakın 4x4'lük karesel bir alanda bulunan 16 pikselin ağırlıklı ortalamasının alınmasıyla bulunur. Bu piksellerin her birinin uzaklığı farklı olduğu için hesaplamada yakındaki piksellerin ağırlığı daha fazladır. Çift kübik interpolasyon tekniği diğer tekniklere oranla daha keskin görüntüler üretir. Mevcut interpolasyon metodları arasında işlem zamanı ve çıktı kalitesi açısından en iyi sonuçlar veren tekniktir. Bunun dışında literatürde farklı teknikler de bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır: dışbükey kümeye izdüşürme tekniği, deterministik ve stokastik yaklaşımlar, yinelemeli geriye izdüşüm tekniği, uyarlamalı süzgeç yaklaşımı vs. [4]. Bu aşamalardan sonra süper-çözünürlük algoritması tamamlanmış olur.

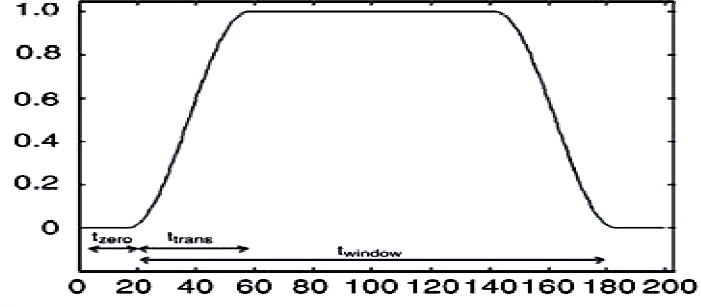
4. UYGULAMALAR VE ANALİZ

4.1 Algoritmanın Analizi

$f_{LR,m}(m=0,1,\dots,M-1)$ gibi M tane kısmen örtüşmüş düşük çözünürlüklü görüntü kümesinden f_{HR} yüksek çözünürlüklü görüntü aşağıdaki algoritmaya göre oluşturulabilir.

1. $f_{LR,m}$ görüntüleri Şekil 4.1’de gösterilen Tukey Penceresi ile çarpılarak görüntüler dairesel olarak simetrik yapılar (Şekil 4.2). Pencereden geçirilmiş görüntüler $f_{LR,w,m}$ ile gösterilmiştir.
2. Bütün düşük çözünürlüklü görüntülerin $F_{LR,w,m}$ fourier dönüşümleri hesaplanır.
3. Dönme Miktarının Hesaplanması : $f_{LR,w,0}$ referans görüntüsüyle $f_{LR,w,m}(m=0,1,\dots,M-1)$ bütün görüntüler arasındaki dönme miktarı hesaplanır. Bunun için aşağıdaki adımlar izlenmelidir:
 - a. Fourier dönüşümlerindeki örneklerin (r, θ) polar koordinatları hesaplanır.
 - b. Her α açısı için, $\alpha - d < \theta < \alpha + d$ ve $0.1\rho < r < \rho_{max}$ aralığında fourier katsayılarının $H_m(\alpha)$ ortalama frekans içeriği bulunur (dönme açısının hesaplanacağı açı hassasiyeti).
 - c. $(-30^\circ, 30^\circ)$ açı aralığında $H_1(\alpha)$ ile $H_m(\alpha)$ arasındaki maksimum korelasyon açısı bulunur. Bu açı aranan θ_m kestirim açısıdır (algoritmada şimdilik 30° ’lik dönmeye izin veriliyor).
 - d. $f_{LR,w,m}$ görüntüsünü $-\theta_m$ kadar ters yönde döndürerek dönme etkisi giderilir.
4. Kayma Miktarının Hesaplanması : $f_{LR,w,0}$ referans görüntüsüyle $f_{LR,w,m}(m=0,1,\dots,M-1)$ bütün görüntüler arasındaki yatay ve dikey yöndeki kayma miktarı hesaplanır. Bunun için aşağıdaki adımlar izlenmelidir:
 - a. Referans görüntüyle $m.görüntü$ arasındaki faz farkı $\angle (f_{LR,w,m} / f_{LR,w,0})$ bağıntısından bulunur.

- b. $|k| < N - K$ aralığındaki tüm frekans bileşenleri için, bilinmeyen x_m değeri ile hesaplanan faz farkı arasında bir doğrusal denklem yazılır (bir düzlem tanımlar).
 - c. Bu aralıktaki frekans bileşenleri için oluşturulan denklem takımlarının en küçük kareler yöntemine göre çözümü x_m kayma miktarıdır.
5. Süper Çözünürlüklü Görüntüyü Oluşturma: yüksek çözünürlüklü f_{HR} görüntüsü düşük çözünürlüklü $f_{LR,m}(m=0,1,\dots,M-1)$ görüntülerinden elde edilir.
 - a. Hesaplanan hizalama parametreleri kullanılarak düşük çözünürlüklü her $f_{LR,m}$ görüntüsü için piksellerin koordinat değerleri $f_{LR,0}$ referans görüntüsünün koordinat düzlemi üzerinde hesaplanır.
 - b. Çift kübik interpolasyon kullanılarak bu piksel değerleri düzgün aralıklı yüksek çözünürlüklü grid üzerine eklenir.



Şekil 4.1: Tukey(Keskinleştirilmiş Kosinüs) Penceresi

Şekil 4.1’de zaman bölgesi gösterimi verilen keskinleştirilmiş kosinüs penceresinin ayrık zamanlı matematiksel ifadesi Denklem (4.1)’deki gibidir.

$$\omega[k]= \left(\begin{array}{ll} \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} \frac{k-1}{N-1} - \pi \right) \right] & ; \quad k < \frac{r}{2}(N-1)+1 \\ 1 & ; \quad \frac{r}{2}(N-1)+1 \leq k \leq N - \frac{r}{2}(N-1) \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} - \frac{2\pi}{r} \frac{k-1}{N-1} - \pi \right) \right] & ; \quad N - \frac{r}{2}(N-1) < k \end{array} \right) \quad (4.1)$$



Şekil 4.2: Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma Algoritmasında Kullanılan Pencereleler. (a) Orijinal görüntü Tukey Penceresi ile çarpılarak dairesel olarak simetrik hale getiriliyor, (b) Görüntü alçak geçiren süzgeçten geçirilerek yeniden oluşturma şartları sağlanır (örtüşen kısımlar ayrılır)

Bu algoritmada parametreler $\varepsilon = 0.1$ ve $\rho_{\max} = 0.6$ olarak seçilmiştir. Parametrelerin bu şekilde seçilmesindeki amaç çok seyrek örneklenmiş işaretin en düşük frekans bileşenlerini göz önüne almamaktır. Algoritmada kullanılacak olan kısmen

örtüşmeye uğramış işaretler için dönme hesabındaki doğruluk ve mümkün olan döndürme aralığı uygulamadan uygulamaya farklılık gösterebilir. Bu çalışmada dönme hareketi 0.1 dereceye duyarlı olarak hesaplanabilmektedir ve -30° ve 30° arasındaki dönme aralığı üzerinde çalışılmıştır.

4.2 Algoritmanın Test Görüntüleri Üzerindeki Sonuçları ve Analizi

Belirli bir sahneden alınmış bir adet yüksek çözünürlüklü referans görüntüsü (512x512) mevcut olsun. Yüksek çözünürlüklü bu referans görüntüsünden dört adet ötelenmiş ve döndürülmüş düşük çözünürlüklü görüntüler oluşturulur. Bu aşamada referans görüntü keskinleştirilmiş kosinüs penceresi ile çarpılarak dönme işleminden kaynaklanan sınır etkileri giderilir. Yine dönme işleminden kaynaklanan kenarlardaki piksellerin kaybını önlemek için görüntünün çevresine şiddeti sıfır olan pikseller doldurulur. Piksellerdeki öteleme ve döndürme işlemleri için sıfır ortalamalı gauss raslantı değişkeni kullanılabilir. Ötelemeler için standart sapması beş olan gauss seçilirken, döndürme işlemleri için 0,5 standart sapmalı gauss kullanılabilir. Daha sonra, bu farklı görüntüler kesim frekansı $0.12N_{HR}$ olan ideal alçak geçiren süzgeçten geçirilerek görüntülerdeki örtüşen kısımlar ortadan kaldırılır. Buradaki N_{HR} yüksek çözünürlüklü görüntünün örnekleme frekansıdır. Bu çalışmada örnekleme hızının Nyquist hızından az olduğu ancak tam örtüşmenin de olmadığı kabul edilmiştir ($K < N_{HR} < 2K$). Tam örtüşmenin olduğu durumlarda da görüntüyü elde etme teknikleri vardır. Bu çalışmada bu incelenmeyecektir. Başlangıçta seçilen referans görüntü algoritma sonunda ulaşılmak istenen görüntü olacaktır. Bu işlemlerden sonra son olarak, referans görüntü dört faktörle alt örneklenecek dört tane ötelenmiş, döndürülmüş düşük çözünürlüklü görüntü (128x128) elde edilir. Bu görüntüler süper çözünürlüklü görüntü elde etme algoritmasında giriş görüntüleri olarak kullanılacak ve orijinal yüksek çözünürlüklü görüntü (referans görüntü) elde edilmeye çalışılacaktır. Bu durum Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



(a)

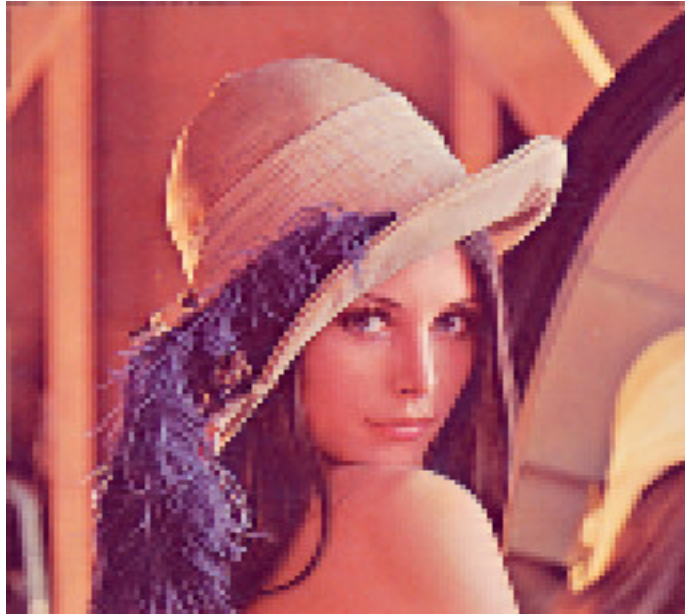


(b)

Şekil 4.3: Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma Algoritmasının Bir Test Görüntüsü Üzerinde İncelenmesi. (a) Referans Görüntü (512x512), (b) Referans Görüntüden Oluşturulan Düşük Çözünürlüklü Test Görüntüleri (görüntü kısmı 128x128 olan 144x144'lük görüntüler)



(a)



(b)

Şekil 4.4: Şekil 4.3'teki Görüntüler Kullanılarak (a) Bu Çalışmada Önerilen Algoritma Sonucu Elde Edilen Süper Çözünürlü Görüntü (görüntü kısmı 256x256 olan 288x288'lik görüntü), (b) Test Görüntülerinden Birinin EnYakın Komşuluklu İnterpolasyon Yöntemiyle Büyütülmesi Sonucu Elde Edilen Görüntü (256x256)

Bazı durumlarda da aynı sahneye ait birden fazla görüntü mevcut olabilir. Bu görüntüler birbirlerine göre belirli miktarlarda ötelenmiş veya dönmüş olabilirler. Bu durumda düşük çözünürlüklü görüntü oluşturma işlemi uygulanmaz. Mevcut bulunan görüntüler düşük çözünürlüklü görüntü olarak kabul edilir ve bunlara süper

özünürlüklü görüntü oluşturma algoritması uygulanarak daha yüksek çözünürlüklü bir görüntü elde edilir. Algoritmanın işleyişi tamamen aynıdır. Bu denemede görüntüler arasındaki hareket bilgisinin bilinmediği kabul edilmiştir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'de 400x528 boyutlarında dört adet düşük çözünürlüklü görüntünün kullanılmasıyla süper çözünürlüklü görüntünün oluşturulması gösterilmiştir. Bu denemede görüntülerdeki sınır etkilerinin giderilmesi için keskinleştirilmiş kosinüs penceresi kullanılmıştır. Algoritma sonucunda görüntüler arasındaki hareket kestirim parametreleri kestirilmiş ve bunlar Tablo 4.1'deki gibi gösterilmiştir. Görüntüler arasındaki gerçek hareket parametreleri ise Tablo 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Aynı Sahneye Ait 400x528 Boyutlarında Düşük özünürlüklü Görüntüler



Şekil 4.6: Aynı Sahneye Ait Birden Fazla Düşük Çözünürlüklü Görüntü Kullanılarak Oluşturulan 800x1056 Boyutlarındaki Süper Çözünürlüklü Görüntü

Tablo 4.1: Algoritma Sonucu Hesaplanan Görüntüler Arasındaki Hareket Kestirim Parametreleri

Görüntüler	Dönme Açısı	Kayma (x)	Kayma (y)
1.görüntü (referans)	0	0	0
2.görüntü	4.9	0.109889	0.37428
3.görüntü	-7.1	0.111871	-0.243581
4.görüntü	4	-0.316778	0.234408

Tablo 4.2: Görüntüler Arasındaki Gerçek Hareket Parametreleri

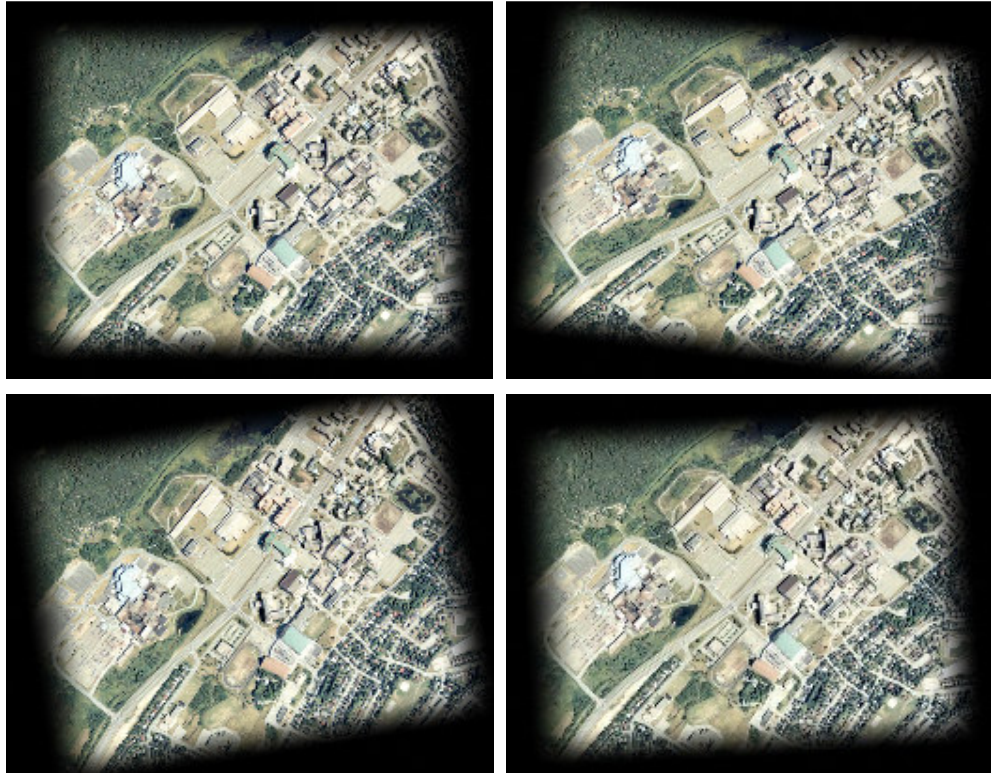
Görüntüler	Dönme Açısı	Kayma (x)	Kayma (y)
1.görüntü (referans)	0	0	0
2.görüntü	5	0.2	0.4
3.görüntü	-7	0.1	-0.1
4.görüntü	4	-0.3	0.2

Bu algoritma Uzaktan Algılama teknolojileri ile elde edilmiş görüntülere de kolaylıkla uygulanabilir. Bilinen görüntü büyütme ve iyileştirme algoritmalarına oranla çok daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de herhangi bir uydudan alınmış bir görüntüye süper çözünürlüklü algoritmanın uygulanması gösterilmiştir. Elde edilen süper çözünürlüklü görüntü referans görüntüye doğrudan büyütme işleminin uygulanmasıyla elde edilen görüntü ile karşılaştırılmıştır. Bu

çalışmada uygulanan algoritma ile orijinal referans görüntüye çok yakın süper çözünürlüklü bir görüntü elde edilmiştir. Ancak, doğrudan büyütme işlemi sonucunda elde edilen görüntüdeki bozulmalar gözle görünür derecededir.



(a)



(b)

Şekil 4.7: Algoritmanın Uydu Görüntüleri Üzerinde Uygulanması (a) Uydudan elde edilmiş referans görüntü, (b) Bu referans görüntüden elde edilen gözlem görüntüleri



(a)



(b)

Şekil 4.8: Algoritmanın Uydu Görüntüleri Üzerinde Uygulanması. (a) Algoritma sonucu elde edilen görüntü, (b) Şekil 4.7'deki gözlem görüntülerinden birinin Çift Doğrusal interpolasyon tekniği kullanılarak gerçekleştirilen görüntü büyütme işlemi sonucu elde edilen görüntü

Bu çalışmada önerilen dönme miktarının kestirimi algoritması diğer bazı algoritmalara [28, 29, 62, 63] göre kötü sonuçlar vermekte, ancak öteleme miktarının kestiriminde daha iyi sonuçlar vermektedir. Büyük dönme açılarında algoritmanın performansı diğer yöntemlerle aynı davranışı gösterir. Tablo 4.3'te bazı teknikler için 150 deneme sonucunda öteleme (piksel) ve dönme (derece) miktarının hesabında yapılan hatanın ortalaması ve varyansı verilmiştir. Tablo 4.4'te ise, sadece öteleme miktarının hesaplanmasında algoritmalar karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.3: Algoritmaların Performanslarının Karşılaştırılması

Parametre	Önerilen Yöntem		Marcel		Lucchese		Keren	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Öteleme(piksel)	0.030	0.041	0.565	0.801	0.318	0.402	0.011	0.016
Dönme(derece)	0.139	0.216	0.378	0.462	0.081	0.110	0.024	0.033

Tablo 4.4: Bu Çalışmada Önerilen Algoritma Öteleme Miktarının Hesaplanmasında Diğer Algoritmalarından Daha Başarılıdır

Parametre	Önerilen Yöntem		Marcel		Bergen		Keren	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Öteleme(piksel)	3.1e-5	2.0e-4	0.314	0.377	5.5e-3	7.9e-3	4.1e-3	5.9e-3

4.3 Algoritmanın Performansını Arttırıcı Yeni Bir Yaklaşım

İki boyutlu görüntü işareti farklı bir izdüşürme yaklaşımı ile tek boyulu $H(\alpha)$ fonksiyonu ile ifade edilerek işlemsel karmaşıklık önemli oranda azaltılmıştı (görüntüler arasındaki iki boyutlu korelasyon işlemi yerine, $H(\alpha)$ 'lar arasındaki bir boyutlu korelasyon). Bununla birlikte, $H(\alpha)$ 'nın hesaplanmasında da iyileştirmeler yapılabilir. Bir görüntü işareti belirli bir oranda döndürüldüğünde tüm piksel bileşenleri de aynı oranda dönecektir. Bu nedenle, dönme miktarının hesaplanmasında $H(\alpha)$ 'nın 360° boyunca hesaplanmasına gerek olmayacağı akla gelebilir. Bu fikirle, dönme miktarının hesaplanması için incelenen açı aralığı daraltılabilir. Bu durum (180° 'lik bir açı aralığı), Şekil 4.9'da 300×229 boyutlarındaki renkli test görüntüleri üzerinde gösterilmeye çalışılmıştır. $H(\alpha)$ 'nın 360° boyunca hesaplanması sonucu elde edilen süper çözünürlüklü görüntü ile 180° boyunca hesaplanmasıyla elde edilen görüntülerin kaliteleri birbirleriyle neredeyse

aynı olup, hesaplanan hareket kestirim değerleri de neredeyse aynı gibidir (Tablo 4.6 ve Tablo 4.7). Bununla birlikte, dönme miktarı kestiriminde $H(\alpha)$ 'nın hesaplanması için gereken işlemsel karmaşıklık N görüntü sayısını göstermek üzere $0.5N$ kadar azalmıştır. Büyük görüntü işaretleri için yavaş olan bu işlem bu yaklaşımla hızlandırılmış olur. Diğer bir anlatımla, görüntü kalitesi ve işlemlerin başarımı hemen hemen korunmuş olup işlemsel karmaşıklık azaltılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.9: Süper Çözünürlüklü Görüntü Oluşturma Algoritmasının İşlemsel Karmaşıklığının Azaltılması. (a) 300x229 boyutlarında düşük çözünürlüklü görüntüler, (b) $H(\alpha)$ 'nın 360°, (c) $H(\alpha)$ 'nın 180° boyunca hesaplanması sonucu elde edilen 600x458 boyutlarındaki süper çözünürlüklü görüntü

Tablo 4.5: Gerçek Hareket Kestirim Parametreleri

Görüntüler	Dönme Açısı	Kayma (x)	Kayma (y)
1.görüntü (referans)	0	0	0
2.görüntü	8	0.7	-0.3
3.görüntü	-5	-0.3	0.2
4.görüntü	6	0.4	0.5

Tablo 4.6: 360° Derece Boyunca Hesaplanmış Hareket Kestirim Parametreleri

Görüntüler	Dönme Açısı	Kayma (x)	Kayma (y)
1.görüntü (referans)	0	0	0
2.görüntü	8	0.630747	-0.295895
3.görüntü	-5	-0.252815	0.176819
4.görüntü	5.9	0.343759	0.474204

Tablo 4.7: 180° Boyunca Hesaplanmış Hareket Kestirim Parametreleri

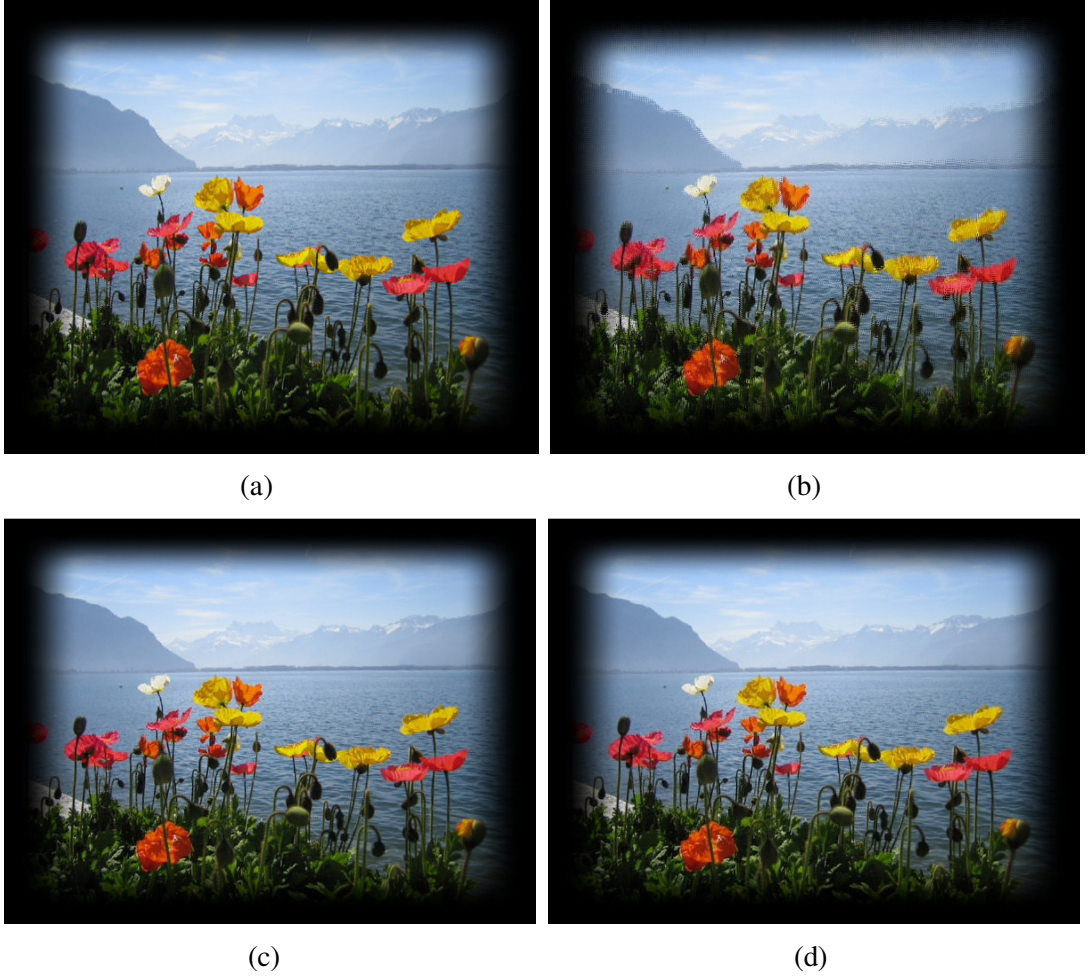
Görüntüler	Dönme Açısı	Kayma (x)	Kayma (y)
1.görüntü (referans)	0	0	0
2.görüntü	8	0.630747	-0.295895
3.görüntü	-5	-0.252815	0.176819
4.görüntü	6.1	0.397294	0.594892

Tablo 4.5, Tablo 4.6 ve Tablo 4.7’den de görüldüğü gibi, her iki algoritmada da dördüncü görüntünün dönme miktarı referans görüntüye göre 0.1° kadar hatalı hesaplanmıştır. Bu nedenle, kayma miktarlarında küçük farklılıklar vardır. Bunlar elde edilen süper çözünürlüklü görüntüde gözle görülemeyecek kadar küçük etkilere neden olurlar. Hemen hemen aynı sonuçların elde edilmesine rağmen, işlemsel karmaşıklık ve harcanan süre açısından yarı yarıya kazanç sağlanmıştır. Tablo 4.8’de algoritmaların zaman performansı karşılaştırılmıştır. 360° ve 180° boyunca süper çözünürlüklü görüntüler oluşturulmuş ve bu işlem sırasında ortalama frekans içeriği olan $H(\alpha)$ fonksiyonlarının hesaplanması için geçen süre belirlenmiştir. Pentium IV 2400MHz işlemci, 1000MB RAM’e sahip olan ve üzerinde Microsoft Windows Vista Ultimate işletim sistemi bulunan bir bilgisayar üzerinde MATLAB 7.1.0.246 programıyla yapılan denemeler sonucu algoritmaların sistemi meşgul etme süreleri incelenmiş ve Tablo 4.8’deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.8: $H(\alpha)$ 'nın 360° ve 180° Boyunca Hesaplanması İçin Geçen Süre

360° Boyunca Geçen Süre (sn)	180° Boyunca Geçen Süre(sn)
2.6723	1.3148

Dönme miktarının hesaplanması sırasında incelenen açı aralığı azaltıldıkça yapılan hata miktarı artar ve görüntüdeki bozulmalar gözle görünür bir hal alır. Şekil 4.9 (a)'daki dört tane gözlem görüntüsü kullanılarak Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, 90° , 180° , 270° derecelik açı aralıklarında algoritma denenmiş elde edilen görüntüler referans görüntüyle karşılaştırılmıştır. Tablo 4.9'da görüntüler arasındaki ortalama karesel hata değerleri verilmiştir. Bu değerler incelenirse, 90° derecede yapılan hata miktarı 180° derecede yapılan hata miktarına göre önemli oranda fazladır ve görüntüdeki bozukluklar gözle görünür derecede fazladır. 270° derecede yapılan hata ise, 180° derecede yapılan hata yanında marjinal kalmaktadır ve görüntülerin kaliteleri arasındaki fark gözle görülemeyecek kadar az olmaktadır.

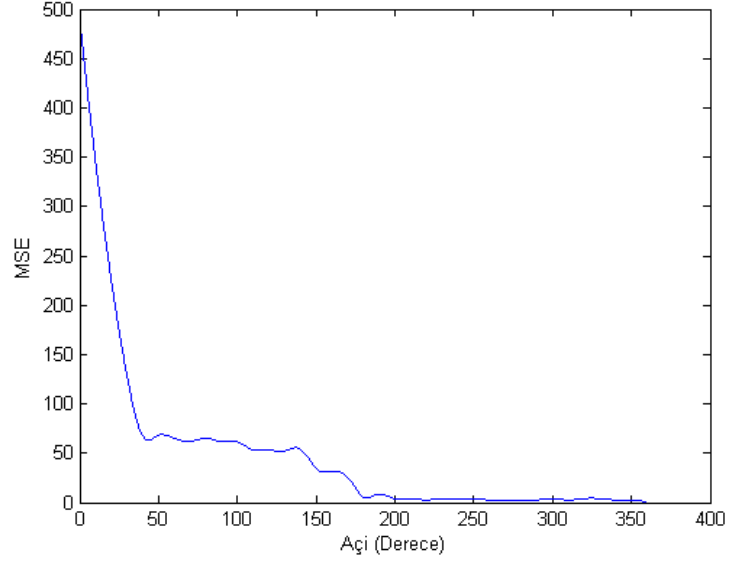


Şekil 4.10: Farklı Açı Aralıklarında Elde Edilen Süper Çözünürlüklü Görüntülerin Karşılaştırılması. $H(\alpha)$ 'nın (a) 360° , (b) 90° , (c) 180° , (d) 270° boyunca hesaplanması sonucu elde edilen görüntü.

Tablo 4.9: Şekil 4.10'daki 360° ile 90° , 180° , 270° Boyunca Oluşturulan Görüntüler Arasındaki Ortalama Kareysel Hata

Açı	MSE
90°	62.0502
180°	5.9663
270°	2.6810

Yapılan denemeler sonucu, ortalama karesel hatanın açığa göre değişimi Şekil 4.11'deki gibi gösterilmiştir. 180° 'ye kadar hata oranı fazla olup bu açı değerinden sonraki hata payı marjinal kalmaktadır. Bu nedenle, görüntüler arasındaki dönme miktarının belirlenmesinde kullanılan $H(\alpha)$ hesabının 180° boyunca yapılması önerilen algoritmanın hızını yarı yarıya arttıracaktır.



Şekil 4.11: Seçilen Her Açı Aralığında Oluşturulan Süper Çözünürlüklü Görüntü ile 360° Boyunca Oluşturulan Süper Çözünürlüklü Görüntü Arasındaki Ortalama Karesel Hatanın Değişimi

Başarılı bir süper çözünürlüklü görüntü oluşturma işlemi için görüntülerin hizalanması aşaması çok önemlidir. Hatalı bir görüntü hizalama işlemi yüksek çözünürlüklü görüntü elde etme işleminde çok kötü sonuçlara neden olur. Bu nedenle, böyle durumlarda herhangi bir süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritması yerine herhangi bir düşük çözünürlüklü görüntüye interpolasyon işleminin uygulanması daha iyi sonuçlar verecektir. Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de görüntü hizalama işleminin başarısız olduğu durumda algoritmanın analizi yapılmıştır. Bu durumda, görüntünün çözünürlüğü arttırılmayacaktır. Ayrıca, örtüşmeden dolayı görüntüdeki bozukluklar gözle görünür derecede belli olacaktır.



Şekil 4.12: Doğru bir hizalama işlemi sonrasında oluşturulan süper çözünürlüklü görüntü



Şekil 4.13: Hatalı bir hizalama işlemi sonucu elde edilen görüntü

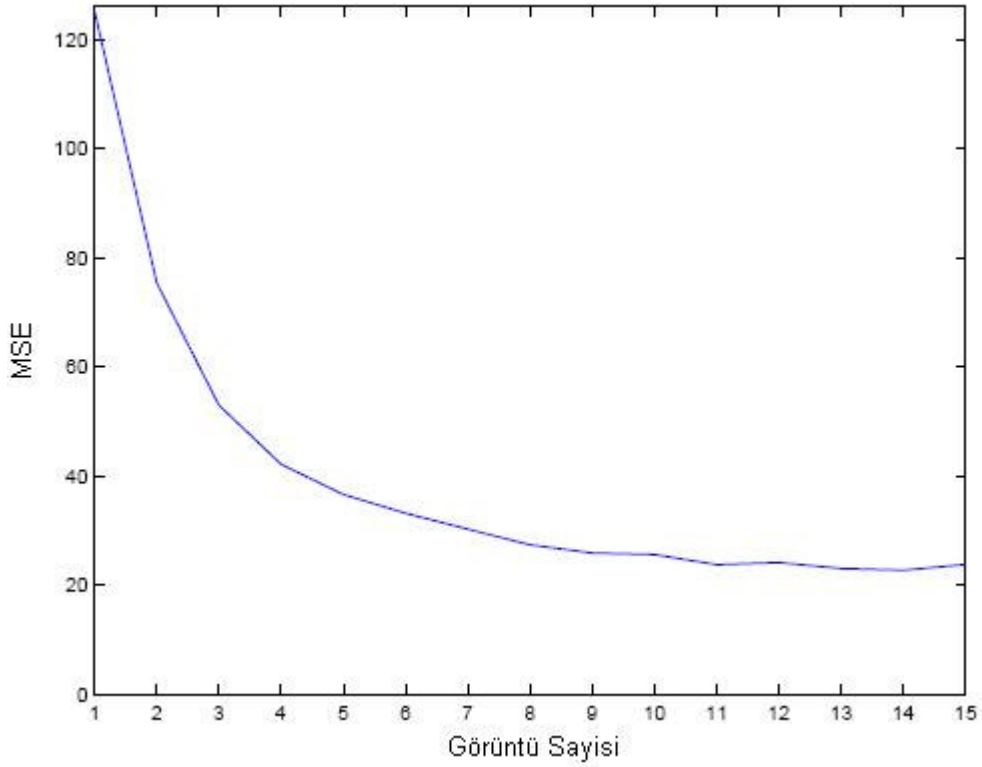


Şekil 4.14: Düşük çözünürlüklü görüntülerden birine uygulanan çift kübik interpolasyon sonucu elde edilen görüntü

4.4 Görüntü Sayısının Algoritmaya Etkileri

Yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturmada kullanılacak en uygun düşük çözünürlüklü görüntü sayısı birçok parametreye bağlıdır. Bunlar; görüntünün hizalanmasındaki doğruluk (başarım), görüntüleme modeli, toplam frekans içeriği vs. Bir taraftan görüntü sayısı fazla oldukça daha iyi yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturulabilirken, diğer taraftan ne kadar fazla görüntü kullanılırsa kullanılsın elde edilen kalitenin bir sınırı vardır. Bulanıklık, gürültü ve işaret modelindeki hatalar yeniden oluşturulacak görüntünün kalitesini etkiler. Bu çalışmada, bu gibi bozucu etkilerin yanında görüntülerin yatay ve dikey yönde alt örneklemlerine izin verilmiştir. Ancak, ikiden daha fazla bir alt örnekleme işlemine izin verilmez. Çünkü, alt örnekleme işlemi görüntülerde bozucu bir etki olan örtüşme etkisine neden olur. Başarılı bir hareket kestirim hesabının gerçekleştirilmesi için frekans spektrumunda örtüşmenin olmadığı belirli bir kısma ihtiyaç vardır. Tekrar tekrar alt örneklenen bir işarette örtüşmesiz bir frekans bölgesi bulunamayabilir. Bu da algoritmanın başarımında önemli bir etkendir. Alt örnekleme katsayısının iki ile sınırlı olması nedeniyle, çözünürlük toplamda dört kat artırılabilir (yatay ve dikey yönlerde iki katına çıkarılır).

Algoritmada kullanılan görüntü sayısına göre, algoritmanın performansı altı görüntüye kadar çok iyidir ancak altı görüntüden sonra elde edilen kalite marjinal boyutlarda kalır. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritması sonucunda oluşturulan görüntünün ortalama karesel hatası (MSE) algoritmada kullanılan görüntü sayısının bir fonksiyonu olarak Şekil 4.15'deki gibi gösterilmiştir. Altı görüntü iyi bir performans ve makul bir işlemsel karmaşıklık için uygundur.



Şekil 4.15: Görüntü Sayısına Bağlı Olarak Hesaplanan Ortalama Karesel Hata

Bu çalışmada süper çözünürlüklü görüntü oluşturmak için gerçekleştirilen denemelerde dört adet düşük çözünürlüklü görüntü kullanılmıştır. Algoritmanın sınırı olan iki alt örnekleme oranı ile örneklenmiş düşük çözünürlüklü görüntülerden iki kat daha fazla çözünürlüğe sahip süper çözünürlüklü tek bir görüntü oluşturulmuştur.

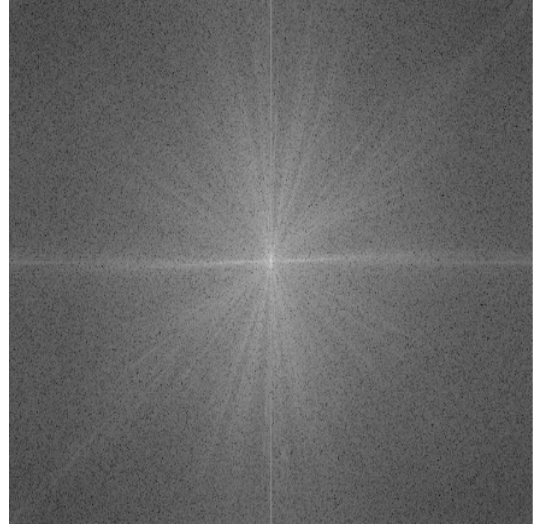
4.5 Görüntülerdeki Yönlülüğün Algoritmaya Etkileri

Bu çalışmada incelenen ve dönme miktarının kestiriminde kullanılan algoritma Şekil 4.16(b)'de de görüldüğü gibi belli bir yönde yoğun frekans bileşenleri içeren görüntülerde çok iyi performans gösterir. Algoritmadaki öteleme miktarının ve döndürme açısının kestiriminin doğruluğu görüntünün frekans spektrumunun yönlülüğünün belirgin olmasıyla orantılıdır. Şekil 4.16(d)'den de görüldüğü gibi,

görüntünün frekans spektrumundaki yönlülük belirgin değilse, hizalama işleminin performansı düşecektir. Enerjinin hemen hemen tüm yönlerde eşit olarak dağıldığı böyle görüntülerde, hareket kestirim algoritmasındaki başarımların tek boyuta izdüşürme işlemlerinden dolayı azalmaktadır. Bu tip görüntüler için dönme açısının kestirimi uzay bölgesi algoritmalarından daha kötü sonuçlar verir [53]. Ancak, yine de frekans bölgesi analizini kullanan diğer tekniklerle karşılaştırılırsa yine de daha iyi sonuçlar verir.



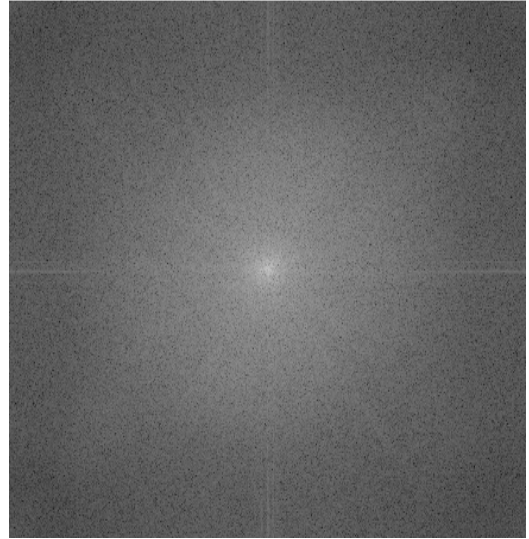
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.16: Görüntülerin Frekans Spektrumunun Algoritma Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Frekans bileşenlerinin yönlü olmasına olan bağımlılık algoritmadaki radyal çizgiler boyunca alınan izdüşüm işlemiyle ilgilidir. Bu yaklaşımla algoritmanın karmaşıklığı çok ciddi oranda düşmektedir (iki boyutlu korelasyon hesabı yerine tek boyutlu korelasyon yeterli olmaktadır). Diğer bir anlatımla, iki boyutlu görüntüler üzerinde uygulanan izdüşüm işlemi bu görüntüleri tek boyutlu işaretlere dönüştürür ve yön bilgilerinin kaybolmasına neden olur. Bu nedenle, algoritmada yönsüz görüntüler üzerinde yapılan işlemlerde yapılan hata miktarı fazla olabilmektedir.

4.6 Görüntü Boyutlarının Algoritmaya Etkileri

Frekans bileşenlerinin yönlü olması kısıtlamasının yanında, düşük çözünürlüklü görüntülerin boyutları da döndürme miktarının kestirimi üzerinde bir kısıtlama getirir. Algoritmada her küçük açı için frekans bileşenlerinin ortalaması alındığı için görüntü küçükse ortalaması alınacak frekans bileşenlerinin sayısı da kısıtlı olmaktadır. Bu nedenle, daha büyük boyutlu görüntülerle çalışmak algoritmanın başarımını arttıracaktır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada örtüşmüş düşük çözünürlüklü görüntülerden süper çözünürlüklü görüntü oluşturmak için frekans bölgesi yaklaşımı incelenmiştir. Çalışmada, öncelikle süper çözünürlüklü görüntü oluşturma işlemlerinde kullanılan temel kavramlar anlatılmıştır. Daha sonra, ana hatlarıyla süper çözünürlüklü görüntü oluşturma probleminden bahsedilmiştir. Bunun için, önce problemin tanımı yapılmıştır. Ardından, süper çözünürlüklü görüntü oluşturma işleminde kullanılacak giriş görüntülerinin elde edilmesi (gözlem modeli) incelenmiştir. Daha sonra, görüntülerin hizalanması işlemi basit bir şekilde tanıtılmıştır. Son olarak, süper çözünürlüklü görüntünün yeniden oluşturulması anlatılmıştır. Temel kavramlar tanıtıldıktan sonra, bu çalışmada detaylı olarak incelenen frekans bölgesi tekniği ile görüntülerin kaydedilmesi üzerinde durulmuş ve bu teknikle süper çözünürlüklü görüntünün oluşturulması adım adım anlatılmıştır. Son olarak, algoritmanın detaylı olarak analizi yapılmış ve sonuçları üzerinde tartışılmıştır.

Bu çalışmada düzlemsel olarak ötelenmiş ve döndürülmüş görüntülerin hizalanmasında frekans bölgesi yaklaşımı incelenmiştir. Bu teknikte, görüntülerin doğru bir şekilde hizalanması kaliteli bir süper çözünürlüklü görüntü oluşturmak için ön şarttır. Hizalama işlemi düzlemsel hareket parametrelerinin (öteleme ve dönme) kestirimidir. Dönme açısının kestirimi görüntülerin fourier dönüşümlerinin radyal olarak izdüşümlerinin kullanılmasıyla bulunmuştur. Dönme açısı izdüşümü alınmış iki görüntünün (referans ve ilgilenilen görüntü) bir boyutlu olarak hesaplanan korelasyonunun maksimum değeri olarak hesaplanır. Ötelemeler ise yine iki görüntünün fourier dönüşümleri arasındaki faz farkından bulunur. Çalışmamızda bu teknikler önce örtüşme etkisine maruz kalmamış görüntüler için incelenmiştir ardından kısmen örtüşmüş görüntü işaretlerine genişletilmiştir. Kısmen örtüşmenin olduğu görüntülerde algoritma örtüşmenin olmadığı frekans bölgesini hesaplar ve bu bölge üzerinde kestirimleri yapar. Bu çalışmada frekans bölgesi tekniğine göre hizalama yaklaşımını içeren süper çözünürlüklü görüntü elde etme tekniği anlatılmış ve tekniğin performansı örnek görüntüler üzerinde test edilmeye çalışılmıştır.

Algoritmanın performansı diğer hizalama algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Algoritma dönme miktarının kestiriminde bazı diğer algoritmalara göre kötü sonuçlar vermekte ancak öteleme miktarının kestiriminde diğer algoritmalarından daha başarılıdır. Algoritmanın dönme miktarının hesaplanmasındaki performansı büyük dönme açılarının hesabında diğer algoritmalarla benzer davranışı gösterir. Özellikle algoritmada kullanılan giriş görüntüleri boyut olarak yeteri kadar büyükse ve frekans bileşenleri belirgin oranda yönlü dağılmışsa çok daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Görüntünün boyutlarına ve frekans bileşenlerinin yönlü dağılımına olan bu bağımlılık tamamen dönme açısı kestiriminde kullanılan görüntülerin izdüşümlerinin alınıp bunlar üzerinden işlem yapılmasıyla ilgilidir.

Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma teknikleri birçok farklı alana uygulanabilir. Örneğin, günümüzde yaygın olarak kullanılan sayısal kameralar. Sayısal kameralar ile bir seferde tek görüntü yerine bir dizi görüntü elde edilseydi, bu görüntülerden süper çözünürlüklü görüntü oluşturulabilirdi (görüntüler arasında kamera sahibinin el titremesinden kaynaklanan küçük farklılıklar olduğu kabul edilmiştir). Benzer şeyler uydu görüntüleri için de söylenebilir. Bir dizi uydu görüntüsü birleştirilerek bu görüntülerde belli olmayan, daha yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturulabilir [64]. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma teknikleri bir video dizisinden yüksek çözünürlüklü bir video veya görüntü işareti elde etmek için de kullanılabilir. Güvenlik kameralarında, birçok video çerçevesi birleştirilerek ekstra detay bilgisi elde edilir ve bu bilgilerle daha yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturulur. Aynı teknik bugünkü televizyonlarda kullanılır. Düşük çözünürlüklü video işaretlerinin çözünürlükleri artırılarak yüksek çözünürlüklü televizyon (HDTV) işaretleri oluşturulur. Yüksek hızlı analog sayısal dönüştürücülerde (A/D) kullanılan bir boyutlu işaretler için de benzer bir yaklaşım kullanılır. Analog işaretin örneklenmesi gereken hız çok büyükse, bunu sağlayan dönüştürücülerin fiziksel olarak gerçekleşmesi çok zordur. Çok hızlı örnekleme kapasitesine sahip bir dönüştürücü yerine, düşük çözünürlüklü birden fazla dönüştürücü paralel olarak kullanılır [65]. Düşük hızdaki her bir dönüştürücünün birbirine göre küçük gecikmeleri olduğu için, düşük hızdaki işaretler birleştirilerek yüksek hızda örneklenmiş bir işaret elde edilebilir. İdeal durumda (iki düşük hızlı dönüştürücü ile), ikinci dönüştürücünün örnekleri birinci dönüştürücünün örneklerinin tam ortasında alınır. Böylece, bu iki işaretten örnekleme hızı iki katına çıkarılmış bir işaret elde edilir. Ancak, paralel

dönüştürücülerin kesin olarak senkronizasyonu çok zordur [66]. Bu problem, süper çözünürlüklü görüntü oluşturma tekniklerinde, görüntülerin doğru olarak hizalanması problemiyle tamamen aynıdır. Sadece burada kullanılan işaretler bir boyutludur.

Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritmaları gelecekte birçok yeni uygulamayla kendinden daha da söz ettirecektir. Örneğin, süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritmaları genellikle sayısal kameralardan elde edilen görüntüler üzerinde uygulanmıştır. Bu algoritmaların farklı görüntüleme sistemlerinden elde edilen görüntüler üzerinde uygulanması yeni bir çalışma alanı yaratabilir. Uzaysal veya uydu görüntüleme sistemleri buna örnek olarak verilebilir. Bu sistemlerden elde edilen görüntülerdeki hareket düzlemsel olarak düşünülebilir [64, 67]. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritmalarının uydu görüntülerine uygulanması çok dikkat çekici olabilir. Çünkü, böyle sistemlerde mevcut sensörü daha yüksek çözünürlüklü bir sensörle değiştirmek imkansızdır. Ama, böyle sistemler ile bir bölgenin üzerinden defalarca geçildiği için birçok görüntü elde edilebilir. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritmaları küçük nesnelerin daha yüksek duyarlılıkla belirlenmesi gereken alanlarda da kullanılabilir. Buna örnek olarak mikroskop uygulamaları [68] ve görsel denetleme teknikleri [69, 70] verilebilir. Daha kaliteli görüntüler elde etmek için süper çözünürlüklü görüntüleme teknikleri diğer görüntü işleme teknikleriyle birleştirilebilir. Sayısal kameralarla çekilen görüntülerin büyük çoğunluğunda görüntü mozaiği etkisi ortaya çıkar. Süper çözünürlüklü görüntü oluşturma algoritmaları mozaik etkisinin giderilmesi için mozaik giderici algoritmalarla birlikte uygulanabilir [71]. Mozaik giderici algoritmalarından önce uygulanması halinde interpolasyondan kaynaklanan bozulmalar görülebilir. Benzer şekilde, süper çözünürlüklü ve yüksek menzilli görüntüleme teknikleri birleştirilerek hem çözünürlük hem de menzil artırılabilir [72]. Son olarak, eğer görüntüler farklı açılardan çekilmiş ise, bunlar *plenoptic* fonksiyonunun [73] oluşturulmasında kullanılabilir. Bu fonksiyon yedi boyutlu bir fonksiyondur ve farklı açılardan alınmış bütün görüntüleri temsil eder. Süper çözünürlüklü görüntüleme çalışmalarından kazanılan birikimlerle *plenoptic* fonksiyonunun örneklenmesinin ve interpolasyonunun incelenmesi dikkat çekici sonuçlar verebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Papoulis, A.**, 1968. *Systems and Transforms with Applications in Optics*, McGraw-Hill Book Company.
- [2] **Tsai R. Y. and Huang T. S.**, 1984. Multiframe image restoration and registration, in *Advances in Computer Vision and Image Processing*, T. S. Huang, Ed. JAI Press, **1**, 317–339.
- [3] **Borman S. and Stevenson R.**, 1998. Spatial resolution enhancement of lowresolution image sequences - a comprehensive review with directions for future research, *University of Notre Dame, Tech. Rep.*
- [4] **Park, S.C., Park, M.K. and Kang, M.G.**, 2003. Super-resolution image reconstruction: A technical overview, *IEEE Signal Processing Magazine*, **20**, 21-36.
- [5] **Kang M. G. and Chaudhuri S.**, 2003. *IEEE Signal Processing Magazine, special issue on super-resolution*, **20**, 317–339.
- [6] **Ng M., Chan T., Kang M. G., and Milanfar P.**, 2006. *EURASIP journal on applied signal processing, special issue on super-resolution.*
- [7] **Chaudhuri S.**, 2001. *Super-resolution Imaging*, Kluwer Academic Publishers.
- [8] **Chaudhuri S. and Manjunath J.**, 2005. *Motion-Free Super-Resolution*, Springer.
- [9] **Farsiu S., Robinson D., and Milanfar P.**, 2004. MDSP resolution enhancement software [Online], Available: <http://www.soe.ucsc.edu/~milanfar/SR-Software.htm>
- [10] **Vandewalle P., Zbinden P., Süsstrunk S., and Vetterli M.**, 2005. Super-resolution software [Online], Available: <http://lcavwww.epfl.ch/software/superresolution>
- [11] **Brown L. G.**, 1992. A survey of image registration techniques, *ACM Comput. Surv.*, **24**, 325-376.
- [12] **Zitova B. and Flusser J.**, 2003. Image registration methods: a survey, *Image and Vision Computing*, **21**, 977–1000.

- [13] **Capel D.**, 2004. Image Mosaicing and Super-resolution, *Springer*.
- [14] **Capel D. and Zisserman A.**, 2003. Computer vision applied to super resolution, *IEEE Signal Processing Magazine*, **20**, 75–86.
- [15] **Fischler M. A. and Bolles R. C.**, 1981. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM*, **24**, 381–395.
- [16] **Irani M. and Peleg S.**, 1991. Improving resolution by image registration, *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, **53**, 231–239.
- [17] **Keren D., Peleg S., and Brada R.**, 1988. Image sequence enhancement using sub-pixel displacement, in *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 742–746.
- [18] **Irani M., Rousso B., and Peleg S.**, 1994. Computing occluding and transparent motions, *International Journal of Computer Vision*, **12**, 5–16.
- [19] **Galvin B., McCane B., Novins K., Mason D., and Mills S.**, 1998. Recovering motion fields: An evaluation of eight optical flow algorithms, in *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, 454–460.
- [20] **Anuta, P.E.**, 1970. Spatial registration of multispectral and multitemporal digital imagery using fast fourier transform techniques, *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, **8**, 353-368.
- [21] **Zokai S. and Wolberg G.**, 2005. Image registration using log-polar mappings for recovery of large-scale similarity and projective transformations, *IEEE Transactions on Image Processing*, **14**, 1422–1434.
- [22] **Kim, S.P. and Su, W.Y.**, 1993. Subpixel accuracy image registration by spectrum cancellation, in *Proceedings IEEE International Conference on Acousitics, Speech and Signal Processing*, **5**, 153-156.
- [23] **Stone, H.S., Orchard, M.T., Chang, E.C. and Martucci, S.A.**, 2001. A fast direct Fourier-based algorithm for subpixel registration of images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 2235-2243.
- [24] **Vandewalle P., Süssstrunk S., and Vetterli M.**, 2004. Double resolution from a set of aliased images, in *Proc. SPIE/IS&T Electronic Imaging 2004: Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications V*, **5301**, 374–382.

- [25] **Hoge, W.S.**, 2003. A subspace identification extension to the phase correlation method, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **22**, 277-280.
- [26] **Foroosh, H., Zerubia, J.B. and Berthod, M.**, 2002. Extension of Phase Correlation to Subpixel Registration, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **11**, 188-200.
- [27] **Reddy, B.S. and Chatterji, B.N.**, 1996. An FFT-based technique for translation, rotation and scale-invariant image registration, *IEEE Transactions on Image Processing*, **5**, 1266-1271.
- [28] **Marcel, B., Briot, M. and Murrieta, R.**, 1997. Calcul de translation et rotation par la transformation de Fourier, *Traitement du Signal*, **14**, 135-149.
- [29] **Lucchese, L. and Cortelazzo, G.M.**, 2000. A noise-robust frequency domain technique for estimating planar roto-translations, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **48**, 1769-1786.
- [30] **Vandewalle, P., Susstrunk, S. and Vetterli, M.**, 2006. A Frequency Domain Approach to Registration of Aliased Images with Application to Super-Resolution, *EURASIP Journal on Applied Signal Processing (special issue on Super-resolution)*, **vol. 2006**, article ID 71459, p. 14.
- [31] **Robinson D. and Milanfar P.**, 2003. Fast Local and Global Projection-Based Methods for Affine Motion Estimation, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, **18**, 35–54.
- [32] **Alliney S.**, 1993. Digital Analysis of Rotated Images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **15**, 499–504.
- [3] **Cain S. C., Hayat M. M., and Armstrong E. E.**, 2001. Projection-Based Image Registration in the Presence of Fixed-Pattern Noise, *IEEE Transactions on Image Processing*, **10**, 1860–1872.
- [34] **Kim S. P., Bose N. K., and Valenzuela H. M.**, 1990. Recursive reconstruction of high resolution image from noisy undersampled multiframe, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **38**, 1013–1027.
- [35] **Early D. S. and Long D. G.**, 2001. Image reconstruction and enhanced resolution imaging from irregular samples, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 291–302.

- [36] **Nguyen N. and Milanfar P.**, 2000. A Wavelet-Based Interpolation-Restoration Method for Superresolution, *Circuits, Systems, and Signal Processing, Special Issue on Advanced Signal and Image Reconstruction*, **19**, 321–338.
- [37] **Papoulis A.**, 1977. Generalized sampling expansion, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, **24**, 652–654.
- [38] **Pham T. Q., van Vliet L. J., and Schutte K.**, 2006. Robust Fusion of Irregularly Sampled Data Using Adaptive Normalized Convolution, *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol **2006**.
- [39] **Strohmer T.**, 1997. Computationally attractive reconstruction of bandlimited images from irregular samples, *IEEE Transactions on Image Processing*, **6**, 540–548.
- [40] **Barber, C.B., Dobkin, D.P. and Huhdanpaa, H.**, 1996. The Quickhull algorithm for convex hulls, *ACM Transactions on Mathematical Software(TOMS)*, **22**, 469-483.
- [41] **Mathworks (The)**, 2006. Matlab function reference: griddata.
- [42] **Patti A. J., Sezan M. I., and Tekalp A. M.**, 1997. Superresolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time, *IEEE Transactions on Image Processing*, **6**, 1064–1076.
- [43] **Tom B. C. and Katsaggelos A. K.**, 2001. Resolution enhancement of monochrome and color video using motion compensation, *IEEE Transactions on Image Processing*, **10**, 278–287.
- [44] **Zomet A., Rav-Acha A., and Peleg S.**, 2001. Robust super-resolution, in *Proceedings International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- [45] **Farsiu S., Robinson M. D., Elad M., and Milanfar P.**, 2004. Fast and robust multiframe super resolution, *IEEE Transactions on Image Processing*, **13**, 1327–1344.
- [46] **Goldberg N., Feuer A., and Goodwin G. C.**, 2003. Super-resolution reconstruction using spatio-temporal filtering, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, **14**, 508–525.
- [47] **Elad M. and Feuer A.**, 1999. Superresolution Restoration of an Image Sequence: Adaptive Filtering Approach, *IEEE Transactions on Image Processing*, **8**, 387–395.

- [48] **Elad M. and Hel-Or Y.**, 2001. A Fast Super-Resolution Reconstruction Algorithm for Pure Translational Motion and Common Space-Invariant Blur, *IEEE Transactions on Image Processing*, **10**, 1187–1193.
- [49] **Schultz R. R., Meng L., and Stevenson R. L.**, 1998. Subpixel motion estimation for super-resolution image sequence enhancement, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, **9**, 38–50.
- [50] **Elad M. and Feuer A.**, 1997. Restoration of a single superresolution image from several blurred, noisy, and undersampled measured images, *IEEE Transactions on Image Processing*, **6**, 1646–1658.
- [51] **ISO 12233:2000**, 2000. Photography - Electronic still picture cameras - Resolution measurements, *International Organization for Standardization*.
- [52] **Clark, J.J., Palmer, M.R. and Laurence, P.D.**, 1985. A transformation method for the reconstruction of functions from nonuniformly spaced samples, *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, **ASSP-33**, 1151-1165.
- [53] **Kim, S.P. and Bose, N.K.**, 1990. Reconstruction of 2-D bandlimited discrete signals from nonuniform samples, *Proc. Inst. Elec. Eng.*, **137**, 197-207.
- [54] **Papoulis, A.**, 1997. Generalized sampling theorem, *IEEE Transactions on Circuit Systems*, **24**, 652-654.
- [55] **Brown, J.L.**, 1981. Multi-channel sampling of low pass signals, *IEEE Transactions on Circuit Systems*, **CAS-28**, 101-106.
- [56] **Tsai, R.Y. and Huang, T.S.**, 1984. Multipleframe image restoration and registration., in *Advances in Computer Vision and Image Processing*, Greenwich, JAI Press Inc., 317-339.
- [57] **Velisavljevic, V.**, 2005. Directionlets, *PhD thesis*, School of Computer and Communication Sciences, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne(EPFL), Lausanne, Switzerland.
- [58] **Vandewalle, P., Sbaiz, L., Vandewalle, J. and Vetterli, M.**, 2007. Super-Resolution from Unregistered and Totally Aliased Signals using Subspace Methods, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **55**, 3687-3703.

- [59] **Vandewalle, P., Sbaiz, L., Vetterli, M. and Susstrunk, S.,** 2005. Super-Resolution from Highly Undersampled Images, *IEEE International Conference on Image Processing*, **1**, 889-892.
- [60] **Vandewalle, P., Sbaiz, L., Vandewalle, J. and Vetterli, M.,** 2004. How to take advantage of aliasing in bandlimited signals, *in IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, **3**, 948-951.
- [61] **Vandewalle, P.,** 2006. Super-Resolution from Unregistered Aliased Images, *PhD thesis*, School of Computer and Communication Sciences, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne(EPFL), Lausanne, Switzerland.
- [62] **Keren, D., Peleg, S. ve Brada, R.,** 1998. Image sequence enhancement using sub-pixel displacement, *in Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 742-746.
- [63] **Bergen, J.R., Anandan, P., Hanna, K.J. and Hingorani, R.,** 1992. Hierarchical model-based motion estimation, *Proc. Second European Conference on Computer Vision, Lecture Notes in Computer Science*, 237-252.
- [64] **Almansa A.,** 2002. Echantillonnage, interpolation et d'etection. Applications en imagerie satellitaire, *PhD dissertation*, Ecole Normale Sup'erieure de Cachan.
- [65] **Hofner T. C.,** 2001. Boost your sampling rate with time-interleaved data converters, *Sensors Magazine*.
- [66] **Divi V. and Wornell G.,** 2004. Signal recovery in time-interleaved analog-to-digital converters, *in Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 593-596.
- [67] **Shekarforoush H., Berthod M., Zerubia J., and Werman M.,** 1996. Sub-pixel Bayesian Estimation of Albedo and Height, *International Journal of Computer Vision*, **19**, 289-330.
- [68] **Zhai X.-Y., Christensen E. I., and Andreasen A.,** 2006. Low Noise Electron Microscopy by Merging Multiple Images Digitized from Conventional Films with Reference to the Mouse Kidney, *Microscopy and Microanalysis*, **12**, 255-261.
- [69] **Gao J., Picciotto C., Wu W., Park I., and Tong W. M.,** 2006. nDSE Based Overlay Alignment: Enabling Technology for Nano Metrology and

Fabrication, in *Proc. SPIE Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XX*, vol. **6152**, no. 615223.

- [70] **Picciotto C., Gao J., Hoarau E., and Wu W.**, 2005. Image Displacement Sensing (NDSE) for Achieving Overlay Alignment, *Appl. Phys. A*, **80**, 1287–1299.
- [71] **Farsiu S., Elad M., and Milanfar P.**, 2006. Multi-Frame Demosaicing and Super-Resolution of Color Images, *IEEE Transactions on Image Processing*, **15**, 141–159.
- [72] **Narasimhan S. G. and Nayar S. K.**, 2005. Enhancing resolution along multiple imaging dimensions using assorted pixels, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **27**, 518–530.
- [73] **Adelson E. H., and Bergen J. R.**, 1991. The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision, *MIT Press*, 3–20.

ÖZGEÇMİŞ

Metin Toyran, 16.06.1983 tarihinde Tokat'ta doğdu. İlk ve orta eğitimini İstanbul'da tamamlamıştır. İstanbul Orhan Cemal Fersoy Lisesi'nden 2001 yılında mezun olmuş ve aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Telekomünikasyon Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başlamıştır. 2005 yılında lisans eğitimini bölüm birincisi olarak tamamlamıştır. Lisans eğitimi sonunda Siemens Mükemmellik Ödülü'nü kazanmıştır. Aynı yıl içerisinde İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Telekomünikasyon Mühendisliği programında lisansüstü eğitime başlamıştır. Yüksek Lisans eğitimi boyunca TÜBİTAK Yurtiçi Yüksek Lisans Bursu almıştır. 2005 yılından itibaren lisansüstü eğitimiyle eş zamanlı olarak Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu (TÜBİTAK) - Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü (UEKAE)'de araştırmacı olarak görev yapmaktadır.