

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNTERFEROMETRİK ÜÇ-BOYUTLU
TEMASIZ ÖLÜM SİSTEMLERİNDE
GİRİŞİM DESENİ ANALİZİ İÇİN YENİ
YÖNTEMLERİN ARAŞTIRILMASI

Ali DURSUN
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2009

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNTERFEROMETRİK ÜÇ-BOYUTLU
TEMASIZ ÖLÜM SİSTEMLERİNDE
GİRİŞİM DESENİ ANALİZİ İÇİN YENİ
YÖNTEMLERİN ARAŞTIRILMASI

Ali DURSUN
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. F. Necati ECEVİT

GEBZE

2009

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : İnterferometrik Üç Boyutlu Temassız Ölçüm Sistemlerinde Girişim Deseni Analizi için Yeni Yöntemlerin Araştırılması

YAZAR ADI : Ali DURSUN

Güvenilir, yüksek çözünürlüklü boyutsal bilginin elde edilmesi, bilimsel ve endüstriyel alanda önemli bir konudur. Son yıllarda temassız bir şekilde üç boyutlu profil ölçümü yapabilmek için çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar interferometrik boyutsal ölçüm sistemlerinin çevre şartlarına duyarlılık ve işlem süresinin uzunluğu gibi birkaç dezavantajının olduğunu göstermiştir.

Bu tezde, interferometrik üç boyutlu ölçüm sistemleri için yeni işaret işleme yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar, girişim desenini analiz ederek konumsal bilgi elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca bu işaret işleme yöntemleri, deneysel çalışmalarla da doğrulanmıştır. Bu deneysel çalışmalarda bu yeni yöntemlerin yaygın olarak bilinen girişim deseni analizi yöntemlerinden çok daha iyi performansa sahip oldukları gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER : Üç Boyutlu Ölçme,
İnterferometrik Yöntemler,
Faz Bilgisi Elde Etme,
Girişim Deseni Analizi.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS : Investigation of New Methods to Analyze Fringe Patterns in The Interferometric Three Dimensional Contactless Measurement Systems.

AUTHOR : Ali DURSUN

Obtaining of reliable dimensional information with high resolution is an important subject in scientific and industrial areas. In recent years a lot of works have been carried out for the noncontact measurement of three dimensional profiles. These works show that the interferometric measurement systems have a few disadvantages as sensitivity to environmental conditions and long processing time.

In this thesis, new signal processing approaches are developed for the interferometric three dimensional measurements systems. These approaches are used for the analysis of the fringe pattern to obtain dimensional information. Furthermore the signal processing methods are validated by experimental works. These experiments show that the new methods have better performance than well known fringe pattern techniques.

ANAHTAR KELİMELER : Three dimensional measurement,
Interferometric methods,
Obtain phase information
Analysis of interference pattern

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimime ve akademik hayata başladığımdan bu yana çalışmalarımda beni yönlendiren, hiçbir zaman yardımlarını ve bilgisini esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. F.Necati ECEVİT'e,

Bölümümüzde engin bir hoşgörü içerisinde çalışmalarına destek olan, bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Ali ALKUMRU'ya

Akademik hayatta birçok konuda desteğini aldığım, hiçbir zaman bilgisini ve zamanını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Zehra SARAÇ ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Serkan AKSOY'a

Tüm akedemik hayatım boyunca yanımda olan bana moral veren ve her zaman bilgi ve yorumlarıyla çalışmalarına katkılarını esirgemeyen arkadaşlarım Hüseyin Avni SERİM ve Erkul BAŞARAN'a,

Her zaman maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan ve büyük fedakarlıklarla beni yetiştiren aileme,

Yüksek lisans eğitimime başladığımdan beri bir an bile benden desteğini esirgemeyen, varlığından ve sevgisinden güç aldığım hayat arkadaşım sevgili eşim Elif DURSUN'a ve melek kızım Gülfem'e

Teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Ocak 2009

Ali DURSUN

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Konusu ve Önemi	3
1.2. Tezin Amacı	4
1.3. Tezin İçeriği	5
2. OPTİK GİRİŞİM	7
2.1. Faz Uyumlu Girişim	9
2.2. Çift Yarıktan girişim	12
3. FOURIER DÖNÜŞÜM PROFİLMETRESİ ile ÜÇ-BOYUTLU ÖLÇME	15
3.1. Fourier Dönüşüm Profilmetresi'nin Gerçekleme Adımları	16
3.2. Fourier Dönüşüm Profilmetresi için Deneysel Çalışma Sonuçları	23
4. SÜREKLİ DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ ile ÜÇ BOYUTLU ÖLÇME	32
4.1. Sürekli Dalgacık Dönüşümü	32
4.2. Dalgacık Faz Yöntemi	40
4.3. Sürekli Dalgacık Dönüşümü ile Yeni Bir Üç Boyutlu Ölçme Yöntemi: Morlet Dalgacık Eğimi Yöntemi	44
4.4. Sürekli Dalgacık Dönüşüm Profilmetresi için Deneysel Çalışmalar	47
5. STOCKWELL DÖNÜŞÜMÜ ile ÜÇ-BOYUTLU ÖLÇME	56

5.1. Yeni Bir Üç Boyutlu Ölçme Yöntemi: Stockwell Dönüşüm Profilmetresi	56
5.2. Stockwell Dönüşüm Profilmetresi için Deneysel Doğrulama Çalışmaları	57
6. SONUÇLAR	65
7. YORUMLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR	68
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	78

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
CWT	Continuous Wavelet Transform
CWTG	Continuous Wavelet Transform Gradient
CWTP	Continuous Wavelet Transform Phase
CCFP	Color Coded Fringe Projection
DFY	Dalgacık Faz Yöntemi
FDP	Fourier Dönüşüm Profilmetresi
FD	Faz Düzeltme
FFT	Fast Fourier Transform
FÖP	Faz Ölçme Profilmetresi
FTP	Fourier Transform Profilometry
KFA	Konumsal Faz Algılama
KSFD	Kısa Süreli Fourier Dönüşümü
LÜY	Lazer Üçgenleme Yöntemi
LTM	Laser Triangulation Method
MM	Moire Method
MMP	Modulation Measurement Profilometry
MÖP	Modülasyon Ölçüm Profilmetresi
MY	Moire Yöntemi
OPD	Optical Path Difference
OYF	Optik Yol Farkı
PMP	Phase Measurement Profilometry
PU	Phase Unwrap
RKSP	Renk Kodlu Saçak Projeksiyonu

SDD	Sürekli Dalgacık Dönüşümü
SD	Stockwell Dönüşümü
SDDE	Sürekli Dalgacık Dönüşüm Eğimi
SDDF	Sürekli Dalgacık Dönüşüm Fazı
SİD	Saçak İzdüşüm Düzenegi
SF	Stockwell Faz
SP	Stockwell Phase
SPD	Spatial Phase Detection
ST	Stockwell Transform
STFT	Short Time Fourier Transform
TM	Triangulation Method
ÜY	Üçgenleme Yöntemi
WP	Wavelet Phase Method

Simgeler	Açıklama
k	Dalga sayısı
ω	Zaman uzayı açısal frekans
f	Frekans
c	Işık hızı
\mathcal{F}	Fourier Dönüşümü
\mathcal{F}^{-1}	Ters Fourier dönüşümü
t	Zaman
φ	Faz farkı
m	x eksenine göre açısal konum frekans
n	y eksenine göre açısal konum frekans

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Optik ölçüm yöntemlerinin çözünürlükleri.	3
2.1 Monokromatik bir dalganın x eksenini boyunca uzaysal dağılımı.	8
2.2. Girişim deseni görünümü.	11
2.3 Çift yarıktan girişim deneyi.	13
2.4 Michelson .interferometresi.	14
3.1 Saçak projeksiyonu için örnek bir düzenek.	17
3.2 Yatay değişimli, sinüzoidal saçak deseni.	17
3.3 Dikey değişimli, sinüzoidal saçak deseni.	18
3.4 Yatay-dikey değişimli, sinüzoidal saçak deseni.	18
3.5 Cisim üzerinde oluşan girişim deseninin filtre edilmesinin gösterimi.	21
3.6 Test faz fonksiyonu.	23
3.7 Test faz fonksiyonu ile FDP sonucunun birlikte gösterimi.	24
3.8 FDP'nin hata dağılımı.	25
3.9 Test saçak dağılımının genlik-frekans spektrumu.	25
3.10 Filtre edilmiş saçak işaretinin genlik-frekans gösterimi.	26
3.11 Düzeltilmemiş faz işareti.	27
3.12 Test Atatürk kabartmasının görünümü.	28
3.13 Atatürk kabartması üzerinde yapay girişim deseni görüntüsü.	28
3.14 Atatürk kabartmasının FDP ile elde edilen üç-boyutlu profili.	29
3.15 Dokunma probu ile elde edilen yükselik değişimi.	30
3.16 FDP ve katı modelin $y=450$ piksel için profilleri.	30
3.17 FDP'nin katı modele göre hata dağılımı.	31
4.1 Çeşitli Dalgacık fonksiyonu örnekleri.a) Gaussian dalgacık (Gauss dağılımının birinci türevi), b) Meksikalı şapkası (mexican hat) dalgacık (Gauss dağılımının ikinci türevi), c) Haar dalgacık, d) Morlet dalgacık (reel kısmı).	33
4.2 Analiz edilen işaret ve Dalgacık dönüşümü ilişkisi.	35
4.3 İki frekanslı $s(t)$ sinüzoidal işaretin zamana göre değişimi.	37
4.4 Kompleks Morlet Dalgacık Fonksiyonunun a) Reel b)Sanal c) Genlik d) Faz değişimi.	38
4.5 Sinüzoidal dağılımlı sinyalin kompleks Dalgacık dönüşümü.(a)Reel kısım, b) Kompleks kısım, d) Genlik e) Faz değişimi)	38

4.6 İki boyutlu Meksikalı Dalgacık fonksiyonu	40
4.7 Örnek bir saçak deseni görüntüsü.	41
4.8 Test faz fonksiyonu dağılımı.	48
4.9 DFY ile elde edilen faz dağılımı.	49
4.10 DFY'nin faz hata dağılımı.	49
4.11 MDEY ile elde edilen faz dağılımı.	50
4.12 MDEY hata dağılımı.	51
4.13 MDEY ile bulunan faz türev dağılımı.	51
4.14 DFY ile elde edilen Atatürk kabartması profili.	52
4.15 DFY ve katı modelin $y=450$ piksel için profilleri.	53
4.16 DFY'nin katı modele göre hata dağılımı.	53
4.17 MDEY ile elde edilen Atatürk kabartması profili.	54
4.18 MDEY ve katı modelin $y=450$ piksel için profilleri	54
4.19 MDEY'nin katı modele göre hata dağılımı.	55
5.1 Deneysel düzenek. A1, A2: aynalar, IB: Işın bölücü, M1: Mercek, CCD: kamera ve UF: Uzaysal filtre	58
5.2 Çiçek kabartması üzerinde girişim deseni.	58
5.3 SDP ile elde edilen üç-boyutlu profil.	59
5.4 DFY ile elde edilen üç-boyutlu profil.	59
5.5 DFY ve SDP ile hesaplanan $y=250$.piksel kesitinin profili.	60
5.6 Girişim deseninin 250 satırının Stockwell dönüşümünün genlik dağılımının frekans konum gösterimi.	61
5.7 Girişim deseninin 250 satırının 100 ölçeklemeli CWT dönüşümünün genlik dağılımı.	61
5.8 Morlet dalgacığı ile DFY 250.satır profil kesiti.	62
5.9 Gaussian dalgacığı ile DFY 250.satır profil kesiti.	63
5.10 b-spline dalgacığı ile DFY 250.satır profil kesiti.	63
5.11 Shannon dalgacığı ile DFY 250.satır profil kesiti.	64
6.1 Test faz fonksiyonuna göre hata dağılımları.	65
6.2 SDD'nin konuma-ölçek dağılımı.	66
6.3 $y=250$ satır profil kesitlerinin karşılaştırılması.	67

1. GİRİŞ

Cisimlerin temassız bir şekilde üç boyutlu profilinin ölçülmesi her zaman önemli bir çalışma sahası olmuştur. Bu konuda bir çok çalışma yapılmış ve çok sayıda teknik ortaya konmuştur. Temassız ölçüm yöntemleri ölçülen cismin niteliklerinden bağımsız çalışabilmektedir. Optik, elektronik ve işaret işleme alanlarında ortaya çıkan yenilikler, bu ölçüm yöntemlerine başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir.

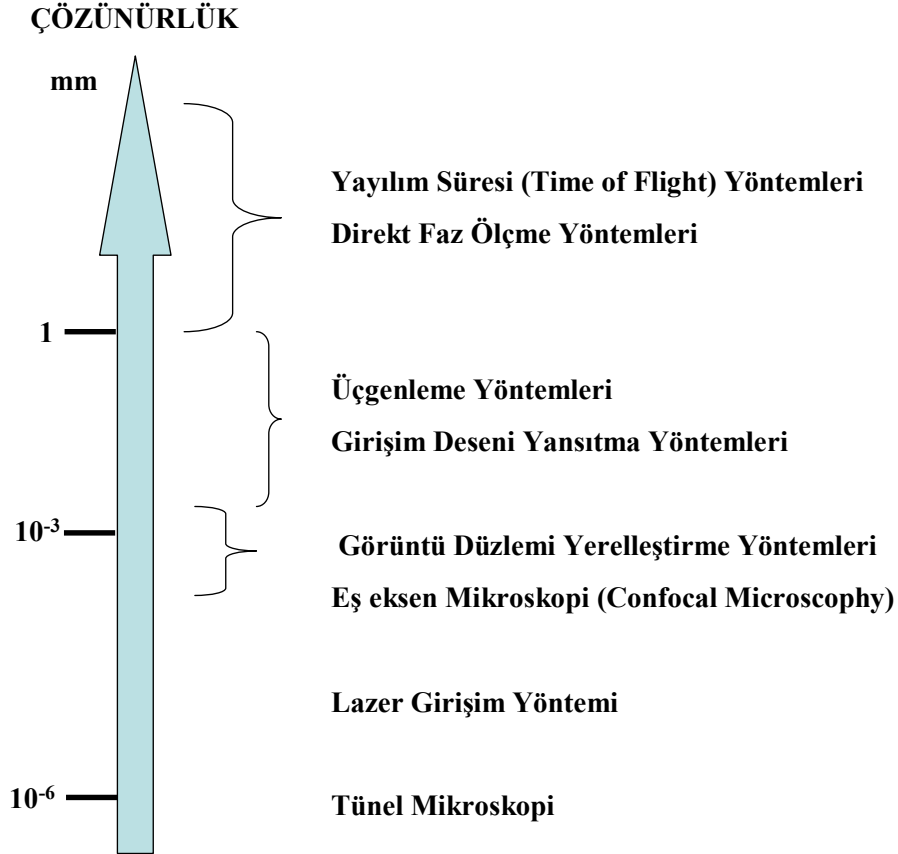
Günümüzde bilinen ve üzerinde hala çalışmalar yapılan bir çok temassız ölçüm yöntemi mevcuttur. Moire Yöntemi, MY (Moire Method, MM) [Takasaki, 1970; Yoshizawa, 1991], Faz Ölçme Profilmetresi, FÖP (Phase Measurement Profilometry, PMP) [Srinivasan, 1984; Su, 1992; Su, 1993; Zhou, 1994; Li, 1998; Lian, 1997; Li, 1997; Zang, 1999; Takeda, 1982], Fourier Dönüşümü Profilmetresi, FDP (Fourier Transform Profilometry, FTP) [Takeda, 1983; Su, 1998], Modülasyon Ölçüm Profilmetresi, MÖP (Modulation Measurement Profilometry, MMP) [Su, 1999; Toyooka, 1986], Konumsal Faz Algılama, KFA (Spatial Phase Detection, SPD) [Sajan, 1998a; Sajan, 1998b; Cheng, 1991], Lazer Üçgenleme Yöntemi, LÜY (Laser Triangulation Method, LTM) [Li, 1995; Asundi, 1999a; Asundi, 1999b; Hausler, 1993], Renk Kodlu Saçak Projeksiyonu, RKSP (Color Coded Fringe Projection, CCFP) [Besi, 1989], Gri Kodlu İkili Saçak Dizileri, GKİSD (Gray Coded Binary Fringe Sequences, GCBFS) [Chen, 1992] bunlara örnek olarak verilebilir.

Bunlardan Fourier Dönüşüm Profilmetresi en popüler olanıdır. Bunun sebepleri arasında, ölçüm yapabilmesi için bir suni olarak oluşturulmuş veya bir interferometreden elde edilmiş girişim deseninin yeterli olması, tüm alanı analiz edebilmesi ve yüksek hassasiyete sahip olması gibi sebepler gösterilebilir. Ayrıca üç boyutlu konumsal bilgiyi elde etmek için, cisim üzerine yansıtılan girişim deseni görüntüsünün birkez kaydedilmesi yeterlidir. FDP'de en genel anlamda girişim deseni görüntüsü, cisim üzerine yansıtılır [Takeda, 1983]. Girişim deseni görüntüsüne Fourier dönüşümü uygulandıktan sonra, uzaysal frekans bölgesinde filtreleme yapılır ve ters Fourier dönüşümü alınır. Böylece saçak deseni görüntüsü içerisinde mevcut olan yüzey şekli elde edilebilir. Moire tekniği ile

karşılaştırıldığında FDP'nin en önemli avantajı, tamamen otomatik çalışma yeteneğine sahip olmasıdır. Saçak düzeni ataması veya saçak merkezi belirleme gibi işlemlere gereksinim duymaz. FDP'nin FÖP ve MÖP ile karşılaştırıldığında ise, deforme olmuş saçak deseninin bir veya iki görüntüsü ile sonuca varabildiği için gerçek zamanlı ve dinamik veri işlemeye daha uygun yapıda olduğu görülür. Halbuki FÖP ve MÖP faz değişimini ve buradan da yükseklik bilgisini elde etmek çok fazla görüntüye ihtiyaç duyar. Buda çok fazla hesap zamanı aldığı için dinamik olarak veri işlemeye uygun değildir. Takeda'dan sonra FDP üzerine çok fazla çalışma yapılmıştır [Kujawinska, 1989; Kujawinska, 1991; Su, 1988; Lin, 1995; Su, 1996; Yi, 1997; Takeda, 1997; Hao, 1999; Burton, 1995; Fernandez, 1998; Pandit, 1999; Chen, 1999; Kozloshi, 1999; Rastogi, 1997]. Cisim yüzeyi noktasal kumlu yapılar içerdiğinde ve/veya saçak deseninde süreksizlikler olduğunda iki boyutlu Fourier dönüşümü ve iki boyutlu Hanning filtreleme ile yükseklik bilgisini gürültüden daha iyi ayırt etmek için kullanılmıştır [Takeda, 1997]. FDP tabanlı TDI kamera 360 derece şekil ölçmek için kullanılmıştır [Hao, 1999]. CCD kameraların çözünürlüğündeki artma ve daha hızlı veri toplayan veri kartları ve işlemcilerin gelişimiyle FDP de daha etkili bir teknik olma yolunda ilerlemektedir. Ancak FDP'nin frekans spektrumunda örtüşme (overlapping), faz düzeltme (phase unwrapping) gerekliliği, örneklemeden kaynaklanan boyutsal limitlerin mevcudiyeti bir takım problemleri de beraberinde getirmektedir.

Optik temassız ve üç boyutlu profil elde etme teknikleri, kendilerine üç-boyutlu algılama, makine, akıllı robot kontrol, endsütriyel izleme, estetik cerrahi, gibi birçok değişik uygulama alanı bulmuştur. Bir nesnenin üç boyutlu profilini belirleme bir çok alanda önemli bir ihtiyaçtır. Profilin doğru biçimde elde edilmesi bir çok endüstri kolunda verimliliğin ve ürün kalitesinin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Üç boyutlu ölçüm sadece kalite kontrol amaçlı uygulamalarda değil; robotik görme, mekanik görme, tıbbi tanı, bina, köprü ve yol gibi büyük üst yapıların kontrol edilmesi ve aşınma tespiti gibi örneklendirilebilecek bir çok alanda kullanılmaktadır [Li, 1990]. Gelişen teknoloji ile daha bir çok uygulama sahasının ortaya çıkacağıda muhakkaktır. Temaslı ölçüm teknikleri, yeterince hızlı olmamaları, yüksek çözünürlükte bilgi verememeleri, ve en önemlisi temasın mümkün olmadığı durumlarda kullanılamamaları yüzünden optik ölçüm sistemlerine yenik düşmektedir. Optik sistemler boyutsal bilginin yanında renk ve geçirgenlik gibi ek

bilgiler sağladığından gelişmeye son derece açık bir alandır. Genel olarak optik metroloji yöntemlerini, çözünürlüklerine göre Şekil 1.1’de gösterildiği gibi katagorize etmek mümkündür [Rastogi 1997]. Şekil incelendiğinde FDP yönteminin çözünürlük mertebesinin 1µm seviyelerine indirilebileceği görülür.



Şekil 1.1 Optik ölçüm yöntemlerinin çözünürlükleri.

1.1. Tez Konusu ve Önemi

Temassız ölçüm sistemleri kendi içerisinde bir takım sınıflara ayrılmaktadır. Bu çalışmada girişim deseni analizine dayalı olarak hesaplama gerçekleştiren algoritmalar üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda iki ana temel konuda literatüre katkı sağlanmıştır. Birincisi faz süreksizlikleri içermeyen ve herhangi bir faz düzeltme sürecine ihtiyaç duymayan bir analiz yöntem geliştirilmesi [Dursun, 2004], ikincisi ise mevcut yöntemlere göre daha detaylı üç-boyutlu profil bilgisi veren bir

yöntem sunulmasıdır [Dursun, 2008]. Geliştirilen bu yöntemler, konum ve frekans bölgesini eş zamanlı kullanma imkanı veren işaret işleme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar Dalgacık ve Stockwell dönüşümleridir. Bu tezde sunulan bütün yöntemler aslında dalga girişimi görüntüsünün analizi gerektiren her probleme uygulanabilir. Bu yüzden tezde boyutsal ölçüm amacıyla kullanılan bu yöntemler, kırılma katsayısı (Refraction Index) değişimi ölçümünden, manyetik özelliklerin tespitine kadar bir çok alana uygulanabilir [Chen, 2000; Saraç, 2005; Saraç, 2007a; Saraç, 2007b].

Bu çalışmada interferometrik yaklaşımla analiz edilebilecek üç boyutlu ve iki farklı deney düzeneğinin gerçekleştirilmesi ve ihtiyaç duyulan işaret işleme algoritmalarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu düzenekler, sayısal saçak izdüşümü ve Michelson lazer interferometrisi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar çeşitli işaret işleme yöntemleri ile analiz edilmiştir [Dursun, 2004; Dursun, 2005a; Dursun, 2005b; Dursun, 2006; Dursun, 2008].

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı interferometrik boyutsal ölçüm sistemlerini yeni işaret işleme yaklaşımları ile geliştirmek ve elde edilen yeni yöntemlerin genel bir girişim deseni analizi yöntemi olduğunu ortaya koymaktır. Bunun için öncelikle interferometrik konumsal ölçüm yöntemlerinde, Faz Düzeltme işleminin gerekliliğini ortadan kaldırmak için Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD)'nün kullanılabilirliği araştırılacaktır. Geliştirilen matematiksel yöntem suni saçak görüntüsü kullanan Saçak İzdüşüm Düzeneği, SİD kullanılarak doğrulanacaktır.

İkinci olarak Stockwell Dönüşümü ile girişim deseni analiz edilecektir. Stockwell dönüşümünün faz bilgisi elde edilmesinde sağladığı gelişim literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir [Stockwell, 1996]. Bu gelişimin girişim deseninden faz bilgisini elde etmede kullanılacak ve böylece üç boyutlu profil elde etmedeki performansı incelenecektir. Deneysel doğrulama için Michelson interferometresi kullanılarak üretilen girişim deseninin bir cisim üzerine izdüşümü analiz edilecektir. Elde edilen tüm gelişimler karşılaştırılarak performans analizi yapılacaktır.

1.3. Tezin İçeriği

Tez yedi bölümde oluşmaktadır. Birinci bölümde literatür bilgileri ve konunun önemi vurgulanmıştır. İkinci bölümde faz uyumlu ışık girişiminin temelleri anlatılmıştır. Bunun için öncelikle monokromatik dalga hareketi açıklanmıştır. Dalga boyu, dalga sayısı, faz hızı, frekans, düzlemsel dalga gibi kavramlar da yine bu bölümde açıklanmıştır. Daha sonra iki monokromatik dalganın girişimi vurgulanarak yapıcı ve yıkıcı girişimin hangi şartlarda oluşacağı gsterilmıştir. Yine aynı bölümde tezde çok fazla üzerinde durulan Michelson İnterferometresi rnek bir interferometre olarak tanıtılmıştır.

nc bölümde girişim deseni analizi ile çok bilinen üç-boyutlu profile elde etme yöntemlerinden biri olan Fourier Dnşim Profilmetrosi (FDP) açıklanmıştır. FDP, literatürde üzerinde çok fazla çalışma yapılmış bir yöntemdir. FDP'nin çalışma mantığı ve kullandığı örnek bir optik düzenek ayrıntılı üçüncü bölümde detaylı olarak gsterilmıştir. FDP için gerekli işaret analizi adımları ayrıntıları ile verilmiştir. Ayrıca benzetim ve deneysel doğrulama çalışmalarının sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır.

Dördüncü bölümde Sürekli Dalgacık Dnşim (SDD) kullanılarak girişim deseni analizinin yapılıp yapılamayacağı ve buradan da üç-boyutlu profilin elde edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Bunun için öncelikle SDD'nin temel özellikleri sunulmuştur. Daha sonra, işaret analizi bakımından FDP yöntemine çok benzeyen ve literatürde bilinen Dalgacık Faz Profilmetrosi (DFP) sunulmuştur. İkinci olarak yine SDD ile girişim deseni analiz ederek üç-boyutlu profil elde eden yeni bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem Morlet Dalgacık Eğimi Yöntemi (MDEY) olarak isimlendirilmiştir. Dördüncü bölümde SDD kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların sonuçları verilerek tartışılmıştır.

Beşinci bölümde Stockwell Dnşim, SD(Stockwell Transform, ST) incelenmiş ve girişim deseni analizinde kullanılarak üç-boyutlu profil elde edilmiştir. Bu yöntem yeni bir yöntemdir ve Stockwell Faz Profilmetrosi olarak

isimlendirilmiştir. Bu bölümde SD'nin temel özellikleri verilerek tanıtılmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçları verilerek tartışılmıştır.

Altıncı bölümde tezde incelenen bütün sonuçlar ve incelemeler karşılıklı olarak değerlendirilmiştir. Bilinen ve yeni sunulan yöntemlerin avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Laboratuvar ortamında yapılan deneysel ve benzetim çalışmalarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Yedinci bölümde yorumlar ve gelecekte yapılacak çalışmalar özetlenmiştir.

2. OPTİK GİRİŞİM

Bir kaynaktan ve ikiye ayrılarak ilerleyen ışık dalgalarının bir düzlem üzerinde üst üste bindirildiği düşünölsün. Bu durumda her iki ışık dalgasının şiddet dağılımları toplanır. Böylece en küçük değerdn en büyük değr arasında gidip gelen bir desen elde edilmiş olur. En basit hali ile ifade edilmeye çalışılan bu olaya *girişim*, oluşan dağılıma da *girişim deseni* denilir [Li, 1998]. Girişim genel olarak her türlü dalga hareketinde meydana gelir. Ayrıca bu dalgalar arasında eşfazlılık gibi herhangi bir uyum zorunluluğu da yoktur. Ancak optik metroloji çalışmalarında genellikle eşfazlı (coherent)veya kısmen eş fazlı (partially coherent)ışık dalgalarının girişimi kullanılır. Bunun sebebi ise görölebilir ve kullanışlı girişim desenleri elde ederek, böylece boyutsal bilginin daha kolay elde edilebiliyor olmasıdır.

Bu bölümde, daha sonraki bölümlere temel teşkil etmesi için ışık dalgalarının girişimi incelenecektir. Işık dalgalarının girişiminin anlaşılabilmesi ve doğru yorumlanabilmesi için elektromagnetik dalga özelliklerinin bilinmesinde fayda vardır. Bu yüzden öncelikle elektromagnetik dalgaların temel özelliklerinden bahsedilecektir.

En basit dalga formu, sinüs veya kosinüs gibi bir trigonometrik bir fonksiyonla aşağıdaki gibi tanımlanabilir [Young, 2000].

$$y = A \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right] \quad (2.1)$$

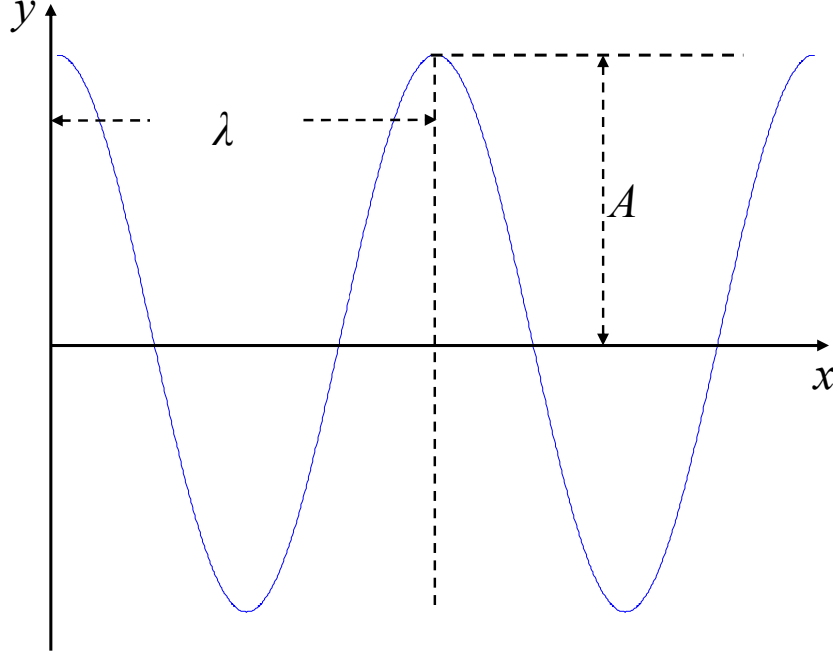
burada x ve y konumu, λ dalga boyunu, A genliği, v faz hızını ve t ise zamanı gösterir. Kosinüs fonksiyonun argümanı dalga fazı olarak ifade edilir. Örneğin belirli bir t anında faz terimi denklem (2.2) de olmak üzere aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) = \phi_0 \quad (2.2)$$

Ayrıca burada bilinmesi gereken diğer bir büyüklükte dalga sayısı (k) olup

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.3)$$

olarak verilir.



Şekil 2.1 Monokromatik bir dalganın x eksenine boyunca uzaysal dağılımı.

Tanımlanan dalga fonksiyonunun, bir tam dalga boyu kadar ilerlemesi için geçen süre T periyot olarak isimlendirilir. Buna bağlı olarak dalganın frekansı $f = 1/T$ ve açısal frekansı ise $\omega = 2\pi f$ olarak tanımlanırsa denklem (2.1),

$$y = a \cos(kz - \omega t) \quad (2.4)$$

halini alır. Bu denkleme $t = 0$ anında veya $x = 0$ konumundaki faz terimi de ilave edilirse,

$$y = a \cos(kx - \omega t + \phi) \quad (2.5)$$

olmak üzere bir ifade bulunur. Burada ϕ dalganın bağıl fazı olarak nitelendirilir.

Işık dalgaları yayılma doğrultusuna ve birbirine dik olan elektrik ve manyetik alanlar titreşim yaparak yayılırlar. Bu titreşim sinüzoidal bir titreşimdir. Işığın titreşiminden, daha ziyade elektrik alanının titreşimi anlaşılır. Çünkü elektrik alanı daha baskındır [Hecht, 2001]. Elektrik alan, genellikle madde ile daha fazla etkileşimi olduğundan, uzak alanda daha güçlü bir şekilde var olacaktır. Örneğin denklem (2.6)'da x eksenine dik bir düzlemde salınım yapan elektrik alan ifadesi verilmiştir. Bu şekilde sadece bir düzlem üzerinde salınım yapan dalgalar, düzlemsel polarizasyonlu dalgalar olarak nitelendirilir [Young, 2000].

$$\vec{E}(x,t) = A\cos(kx - \omega t + \phi)\vec{e} \quad (2.6)$$

Denklem (2.6)'ya bağlı olarak basitçe daha sonra çok sık karşılaşılan dalga düzlemi kavramı şu şekilde açıklanabilir. İlerleme yönüne dik bir düzlem üzerinde aynı faza sahip noktaların oluşturduğu yüzeye düzlemsel dalga cephesi (wavefront) denir. (wavefront) [Hecht, 2001]. Elektromanyetik teoride çözüm yöntemleri genellikle düzlemsel hareket eden dalga modeli kullanılarak gerçekleştirilir.

2.1. Faz Uyumlu Girişim

Çeşitli kaynakların uzayın her bir noktasında oluşturdukları $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots$ alanlarının toplamı olacak \vec{E} elektrik alan şiddeti, lineer ortamlarda üst üste binme ilkesi uyarınca,

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (2.7)$$

olarak toplanabilir [Young, 2000]. Aynı kaynaktan çıkan ve aralarında ϕ kadar faz farkı bulunan iki dalga göz önünde bulundursun. Bu iki dalga kompleks trigonometrik fonksiyonlar olarak

$$\vec{E}_1 = Ae^{-i(kx - \omega t)}\vec{e}_1 \quad (2.8)$$

$$\vec{E}_2 = Ae^{-i(kx - \omega t + \phi)}\vec{e}_2 \quad (2.9)$$

biçiminde gösterilebilir. Burada işlem kolaylığı açısından bu iki dalga aynı genliğe sahip olduğu varsayılmıştır. Bu iki dalga üst üste toplanırsa oluşan elektrik alan,

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = Ae^{-i(kx-\omega t)}\vec{e}_1 + Ae^{-i(kx-\omega t)}\vec{e}_1 e^{-i\phi} \quad (2.10)$$

$$\vec{E} = Ae^{-i(kx-\omega t)}(1 + e^{-i\phi})\vec{e}_1 \quad (2.11)$$

olarak bulunabilir. Burada $(1 + e^{-i\phi})$ ifadesi

$$1 + e^{-i\phi} = e^{-i\phi/2}(e^{i\phi/2} + e^{-i\phi/2}) = 2e^{-i\phi/2} \cos(\phi/2) \quad (2.12)$$

biçiminde yazılabilir. Denklem (2.12), denklem (2.11)'de yerine konulursa, girişim elektrik alan;

$$\vec{E} = 2A \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) e^{-\left(ikx-\omega t-\frac{\phi}{2}\right)} \quad (2.13)$$

olarak yazılabilir. Bu elektrik alanın şiddeti (intensity) ise genliğin karesi olarak;

$$I = \left(2A \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\right)^2 = 4A^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.14)$$

ifade edilebilir. Burada A^2 girişim yapan her bir dalganın genlik şiddetidir. Görüldüğü ortaya çıkan girişim alan dağılımında şiddet sinüzoidal bir fonksiyondur. Bu fonksiyonun minimum değeri 0, maksimum değeri ise $4A^2$ dir. Uzaysal olarak bir yerdeki şiddetin gerçek değeri ise o noktadaki girişim alan ifadesinin fazına bağlıdır. Genliğin maksimum olabilmesi ($I = 4A^2$) için $\cos(\phi/2) = \pm 1$ olması gerekir. Bunun da sağlanabilmesi için

$$\frac{\phi}{2} = p\pi \quad (2.15)$$

$$\phi = 2p\pi \quad (2.16)$$

olmalıdır.

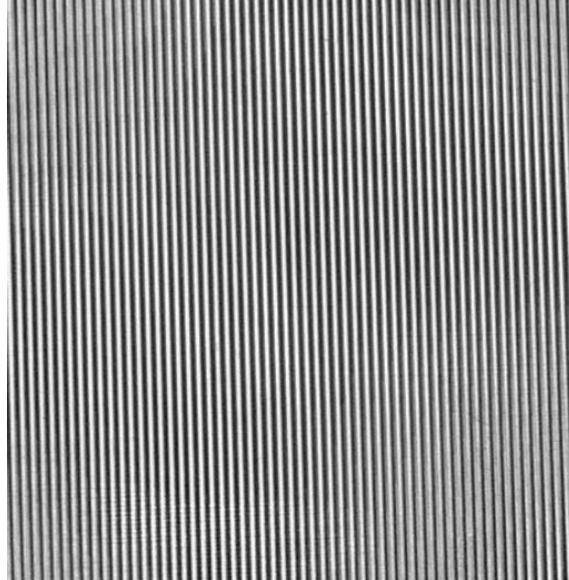
Genliğin minimum olabilmesi ($I = 0$) için $\cos(\phi/2) = 0$ olması gerekir. Bunun da sağlanabilmesi için p bir tamsayı olmak üzere

$$\frac{\phi}{2} = (2p+1)\frac{\pi}{2} \quad (2.17)$$

$$\phi = (2p+1)\pi \quad (2.18)$$

olmalıdır. Bu alan dağılımı bir düzlem üzerinde koyudan açık tonlara doğru renk değiştiren çizgiler gibi görülür. Genliğin maksimum olduğu noktalardaki girişim yapıcı girişim (constructive interference), minimum olduğu yerlerdeki girişim ise yıkıcı girişim (destructive interference) olarak adlandırılır.

Şekil 2.2'de bilgisayarla hesaplanmış bir girişim deseni görüntüsü verilmiştir. Bu girişim deseni yapıcı girişim yapan iki elektrik alan dağılımının bir düzlem üzerinde genlik değişimini gösterir.



Şekil 2.2. Girişim deseni görünümü.

2.2. Çift Yarıktan girişim

Tek renkli (monokromatik) düzlemsel dalganın Şekil 2.3'de görüldüğü gibi bir ışık geçirmeyen bir yüzeye çarptığı düşünülün ve yüzey üzerinde sonsuz küçük iki yarık birbirinden d kadar uzaklıkta oluşturulsun. Her bir yarığın birer noktasal kaynak gibi davranacağı ve her yöne yayılım yapacağı açıktır [Young 2000]. Yarıkların düzleminden yeterince büyük L kadar uzaklıkta bir düzlem üzerinde P noktasında gözlem yapıldığında bileşke alan dağılımı

$$E = A(e^{-ikr_1} + e^{-ikr_2})e^{i\omega t} \quad (2.19)$$

olarak elde edilir [Hecht, 2001]. Burada A genlik, r_1 ve r_2 ise yarıkların gözlem noktası P 'ye olan uzaklıklarıdır. L mesafesi yeterince büyük ise r_1 ve r_2 paralel kabul edilebilir (uzak alan yaklaşımı). Bu durumda iki noktasal kaynaktan çıkan dalgalar arasındaki yol farkı $d \sin \theta$ kadardır. $e^{i\omega t}$ dalga genliği üzerinde etkili olmadığından genlik bakımından ihmal edilebilir. Bu durumda elektrik alan

$$E = Ae^{-ikr_1} (1 + e^{-ikd \sin \theta}) \quad (2.20)$$

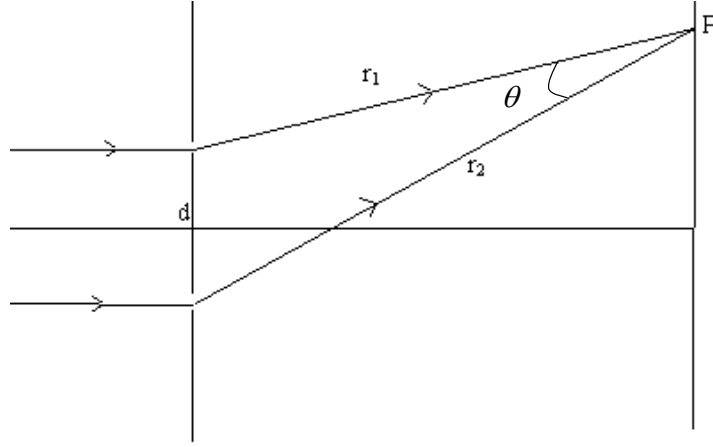
halini alır. Burada girişime sebebiyet veren iki dalga arasındaki faz farkı

$$\phi = kd \sin \theta \quad (2.21)$$

olarak verilir. Bu durumda şiddet daha önce verilen üst üste binme ilkesi gereği

$$I = 4A^2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right) \quad (2.22)$$

olarak yazılır.

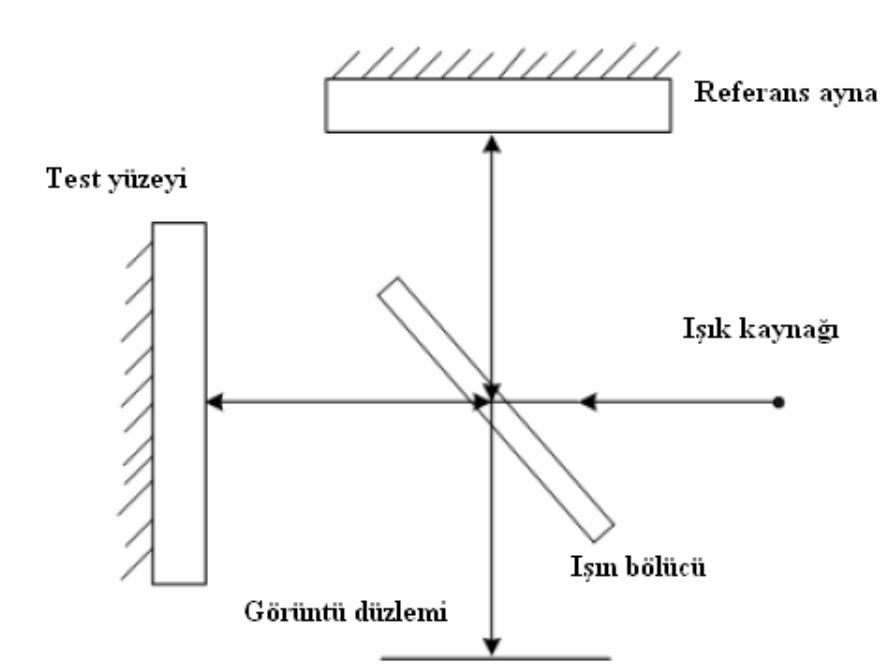


Şekil 2.3 Çift yarıkta girişim deneyi.

Şekil 2.3 tekrar ele alınırsa, $d \sin \theta$ Optik Yol Farkı (Optical Path Difference, OPD: optical path difference) olarak isimlendirilir. θ 'nın çok düşük olduğu durumlarda; $\sin \theta = x/L$ alınabileceği öngörülürse, bu durumda girişim deseninin OYF'ye göre değişim gösterdiği görülür. $OYF = m\lambda$ ise yapıcı, $OYF = (m + 1/2)\lambda$ olduğunda ise yıkıcı girişim oluşur.

Optik girişim olayı Şekil 2.4'te gösterildiği üzere en çok Michelson interferometresi üzerinden açıklanır. Çok fazla interferometre düzeneği geliştirilmiş ve kullanımda olmasına rağmen, Michelson interferometresi temel prensiplerin anlaşılması bakımından faydalıdır. Burada temel prensip ışın bölücü tarafından ikiye ayrılan ışığın ayna veya yansıtıcı bir cisimden yansyıp geri geldikten sonra ışın bölücü üzerinde girişim oluşturmasıdır. Oluşan girişim deseni bir düzlem üzerinde izlenebilir. Bu çalışmada girişim deseni oluşturmak için Michelson interferometresi yöntemi de kullanılacaktır.

Burada girişim desenindeki saçakların (girişim çizgileri) çok iyi görünür olabilmesi için ışın bölücü tarafından oluşturulan iki ışının aldıkları yolların eşit olması yani $OYF=0$ olması gerekir. Bunun sebebi iki dalga arasında faz farkının minimum olması ve yapıcı girişimin oluşmasıdır. OYF artıkça yapıcı girişim giderek yıkıcı girişime kayacak ve girişim desenindeki zıtlık azalacaktır.



Şekil 2.4 Michelson .interferometresi.

3. FOURIER DÖNÜŞÜM PROFİLMETRESİ ile ÜÇ-BOYUTLU ÖLÇME

Optik intereferometri (ışık girişimi), bir cismin boyutsal büyüklüklerini belirlemek için kullanılabilen optik bir yöntemdir. Ayrıca bu yöntem, yoğunluk, sıcaklık ve magnetik alan gibi fiziksel büyüklükleri de bunların cismin ışık kırıcılığı üzerinde meydana getirdiği değişimlerden faydalanarak bulunmasında kullanılır [Hipp, 2004].

Projeksiyon temelli üç boyutlu ölçüm teknikleri esasında Üçgenleme Yönteminin gelişmiş bir türüdür. Bu tekniklerde ölçülecek cisim üzerine yansıtılacak saçak deseni bir çok değişik yöntemle elde edilebilir. Izgara (grating) benzeri yapılardan ışığın geçirilmesi veya bir interferometre düzeneği buna örnek olarak verilebilir.

Saçak projeksiyon yöntemleri, esasen lazer interferometresi ve holografi yöntemleri kadar hassas olmamalarına rağmen çevre şartlarına bağımlılıklarının az olması ve daha az teçhizatla gerçekleştirilebiliyor olması sebebiyle çok daha kullanışlıdır [Rastogi, 1997]. Saçak projeksiyonu yönteminin Üçgenleme Yönteminden en önemli farkı ölçümün noktasal olarak değil, bir nokta bulutu şeklinde bir seferde yapabilmesidir. Bu teknikte öncelikle saçak deseni görüntüsü cisim üzerine düşürülerek, cisim yüzeyindeki yükseklik farklılıkları yüzünden değişime uğrayan saçak deseni kamera ile kaydedilerek bilgisayar ortamında işlenerek cismin profil elde edilir. Kameranın görüntüleyebildiği nokta (piksel) sayısı kadar yükseklik değeri hesaplanarak üç-boyutlu profil elde edilir. Saçak projeksiyonu aslında holografik bir yöntemdir. Yansıtılan saçak deseni, düzlemsel dalganın bir düzleme düşürülmüş görüntüsüdür. Bu yüzden saçak deseni lazer veya beyaz ışıkla elde edilebileceği gibi bilgisayar ile de hesaplanarak nesne üzerine bir projektör ile yansıtılabilir.

FDP ik kez Takeda ve arkadaşları tarafından ortaya konmuştur. Buna göre temel bir deney düzeneği olan çapraz optik eksenli geometri Şekil 3.1'te gösterilmiştir [Takeda, 1983]. Burada faz uyumlu iki noktasal kaynağın bir düzlem üzerinde

girişimini temsil eden ışık deseni, sayısal projektör yardımıyla cisim üzerine düşürülmüştür. Projektör optik eksenine, görüntüleme optik eksenine bir referans düzlemi üzerinde çapraz olarak kesilir. Cismin yükseklik ($h(x,y)$) değişimi bu referans düzleminde uzaklığa göre belirlenir.

3.1. Fourier Dönüşüm Profilmetresi'nin Gerçekleme Adımları

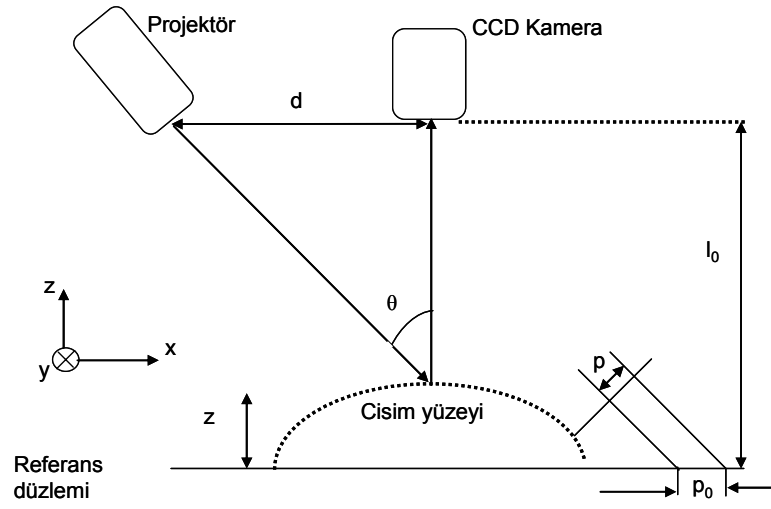
Sinüzoidal değişimli bir yapay saçak deseninin matematiksel en basit şekilde ifadesi aşağıdaki denklemlerle verilebilir [Takeda, 1983].

$$g(x,y) = I_0(x,y)[1 + V(x,y)\cos(mx + \varphi(x,y))] \quad (3.1)$$

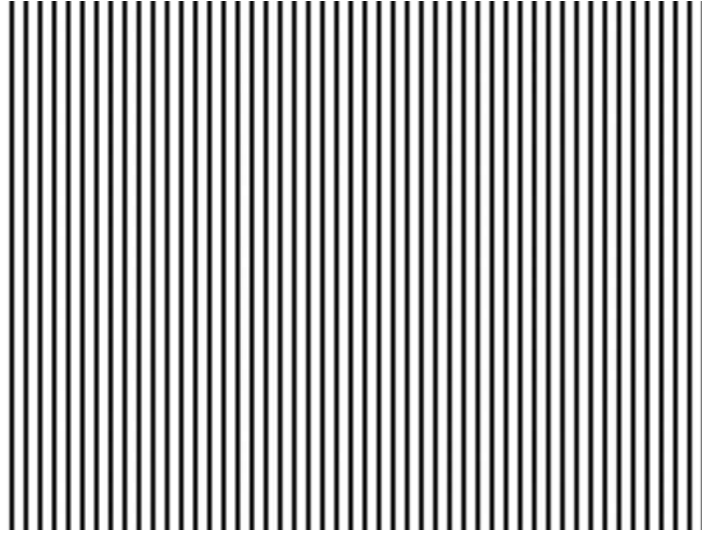
Burada $I_0(x,y)$ arka plan şiddet değişimi, $V(x,y)$ saçak deseninin görünürlük dağılımı, m , saçak deseninin x ekseninde taşıyıcı frekansını, $\varphi(x,y)$ ise referans düzlemine göre yükseklik değişimli faz modülasyonu terimini gösterir [Takeda, 1983]. Taşıyıcı frekans sadece x yönünde verildiği için saçak deseni yatay ekseninde sinüzoidal değişim gösterecek y ekseninde ise sabit kalacaktır. Şekil 3.2'de x ekseninde 0,1963 rad/piksel, Şekil 3.3'te y ekseninde 0,2618 rad/piksel ve son olarak Şekil 3.4'te ise x ekseninde 0,1963 rad/piksel, y ekseninde ise 0,2618 rad/piksel uzamsal taşıyıcı frekanslarına sahip saçak desenlerinin iki boyutlu gösterimi verilmiştir. Bu dağılımlarda $I_0(x,y)$ ve $V(x,y)$, her x ve y değeri için 1 alınmıştır. Şekil 3.4'te verilen saçak deseninin matematiksel ifadesi, denklem (3.1)'e benzer bir şekilde

$$g(x,y) = I_0(x,y)[1 + V(x,y)\cos(mx + ny + \varphi(x,y))] \quad (3.2)$$

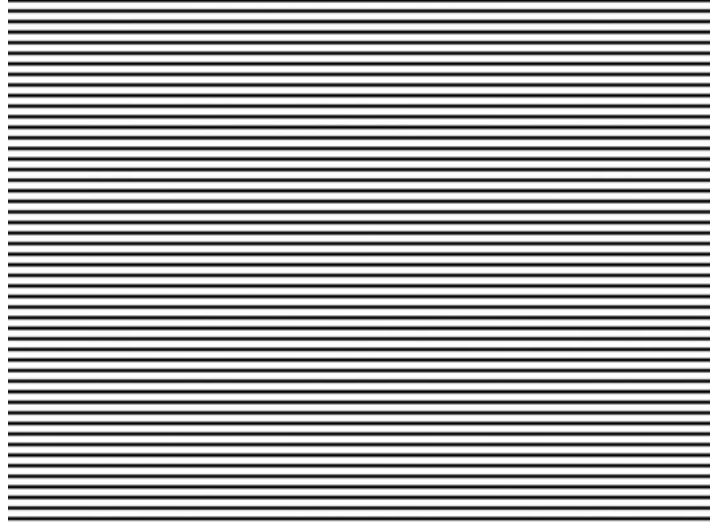
olarak verilmiştir.



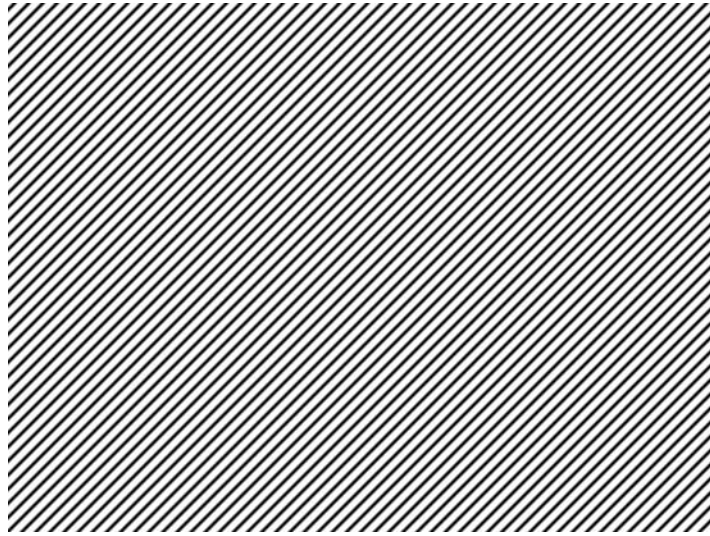
Şekil 3.1 Saçak projeksiyonu için örnek bir düzenek.



Şekil 3.2 Yatay değişimli, sinüzoidal saçak deseni.



Şekil 3.3 Dikey değişimli, sinüzoidal saçak deseni.



Şekil 3.4 Yatay-dikey değişimli, sinüzoidal saçak deseni.

Şekil 3.1’te verilen saçak projeksiyon düzeneği dikkate alınarak FDP’nin teorik alt yapısı ortaya konabilir. Şekilde görülebileceği gibi kamera ve projektörün optik eksenleri cisim yüzeyinde θ açısıyla kesişmektedir. Burada, d : projektör ile kamera arasındaki uzaklık, l_0 : kamera projektör düzlemi ile referans düzlemi arasındaki uzaklık, p : sinüzoidal saçak deseninin x eksenini yönündeki periyodu, p_0 ise $p_0 = p / \cos \theta = 2\pi / m$ denklemi ile ifade edilen ve saçak deseninin referans

düzlemine izdüşümünün periyodunu gösteren değişkendir. Cismin yükseklik değişimi ise z ile gösterilmiştir.

Referans düzlemi üzerinde herhangi bir cismin yerleştirilmediği durum göz önünde bulundurulsun. Bu durumda referans düzlemi üzerinde oluşacak görüntü Fourier serisine açılarak $f_0 = m/2\pi$ olmak üzere

$$g_r(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n e^{(2\pi n f_0 x)} \quad (3.3)$$

biçiminde gösterilebilir [Takeda, 1983]. Daha önce yukarıda ifade edildiği gibi f_0 , gözlenen saçak deseninin taşıyıcı frekansıdır. Şekil 3.1'te verilen optik düzenek incelendiğinde denklem (3.3)'ün kameranın görüntülemeyi sonsuzdan yapamamasından kaynaklanan (nontelecentric) noktasal kayma nedeni ile bir düzeltmeye ihtiyaç duyduğu açıktır. Bu durum referans düzlemi tamamen düz olsa dahi geçerlidir [Takeda 1983]. Bu kayma değişkenini dikkate alarak denklem (3.3) kaymadan kaynaklanan bir faz terimi ilave edilerek yeniden yazılmalıdır. Bu durumda üzerinde herhangi bir cisim yerleştirilmemiş referans düzlemi üzerine yansıtılmış yapay girişim deseninin yeni ifadesi

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n e^{\{2\pi n f_0 [x+s_0(x)]\}} \quad (3.4)$$

olarak verilir. Bu denklem, daha sonraki süreçlerde işlem kolaylığı sağlaması için uzaysal faz modülasyonlu işaret biçiminde

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n e^{\{i[2\pi n f_0 x + n\phi_0(x)]\}} \quad (3.5)$$

olarak yazılabilir [Takeda, 1983] Burada $\phi_0(x)$

$$\phi_0(x) = 2\pi f_0 s_0(x) \quad (3.6)$$

olmak üzere kısaltılmış ve görüntüleme kayıplarından kaynaklanan x ekseninde uzaysal kaymayı ifade eden faz terimidir. Aynı işlemler referans düzlemi üzerine bir cisim yerleştirildiği durum ($z(x, y) \neq 0$) için tekrarlanırsa

$$g(x, y) = r(x, y) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n e^{\{2\pi \text{inf}_0[x+s(x,y)]\}} \quad (3.7)$$

denklemeleri referans düzlemi üzerine yerleştirilmiş bir cismin üzerine yapay girişim deseni yansıtıldığında oluşan görüntünün matematiksel ifadesini vermek üzere elde edilir. Burada referans düzlemi ile cismin yansıtıcılığının farklı olabileceği göz önüne bulundurularak, denkleme $r(x, y)$ cisim yüzeyinin yansıtıcılık dağılımı değişkeni de eklenmiştir. Bu denklem faz modülasyonlu işaret biçiminde yeniden

$$g(x, y) = r(x, y) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n e^{\{i[2\pi n f_0 x + n\phi(x,y)]\}} \quad (3.8)$$

olmak üzere elde edilir. Burada $\phi(x)$

$$\phi(x) = 2\pi f_0 s(x) \quad (3.9)$$

olmak üzere cismin yükseklik değişimi ve görüntüleme kayıplarından kaynaklan toplam uzaysal kaymayı gösteren faz dağılımıdır. Bu faz değeri içinden görüntüleme kayıpları çıkartılabilirse direkt yükseklik değişimi ile orantılı bir faz dağılımı elde edilmiş olur. Bunun için gerekli işlem adımları aşağıda açıklanacaktır.

Bu ama için öncelikle denklem (3.8) aşağıdaki gibi yeniden tanımlansın:

$$g(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} q_n(x, y) e^{(2\pi \text{inf}_0 x)} \quad (3.10)$$

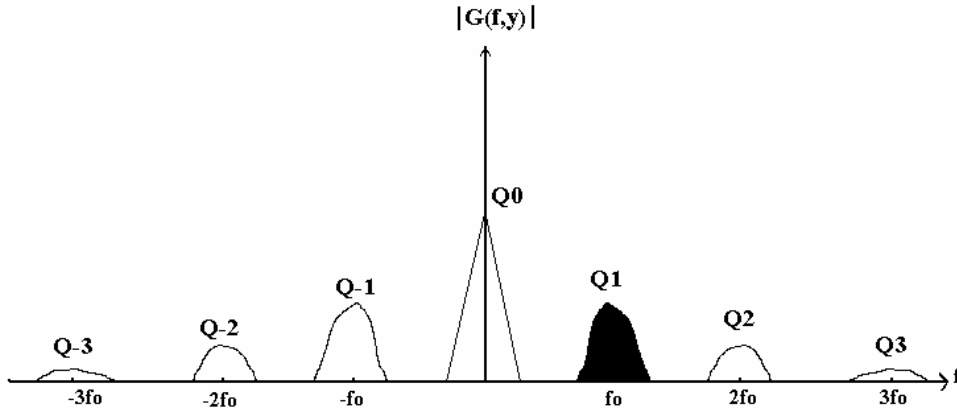
Burada $q_n(x, y)$:

$$q_n(x, y) = A_n r(x, y) e^{in\phi(x, y)} \quad (3.11)$$

olarak tanımlansın. FFT (Fast Fourier Transform) algoritması kullanılarak denklem (3.11)'nin x eksenine boyunca her y değeri için bir boyutlu Fourier dönüşümü

$$G(f, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) e^{-2\pi ifx} dx = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} Q_n(f - nf_0, y) \quad (3.12)$$

olarak verilir. Burada $G(f, y)$ ve $Q_n(f, y)$, sırası ile $g(x, y)$ ve $q_n(x, y)$ 'nin x eksenine göre bir boyutlu Fourier spektrumlarıdır. $r(x, y)$ ve $\phi(x, y)$, çoğunlukla f_0 saçak deseni frekansına göre çok yavaş değiştikleri için bütün $Q_n(f - nf_0, y)$ frekans spektrumunun bütün bileşenleri diğerlerinden f_0 taşıyıcı frekansıyla ayrılır.



Şekil 3.5 Cisim üzerinde oluşan girişim deseninin filtre edilmesinin gösterimi.

Frekans bölgesi işareti, Şekil 3.5'de görüldüğü gibi bütün frekans spektrumundan sadece $Q(f - f_0, y)$ bileşeni seçilecek şekilde filtre edildikten sonra ters Fourier dönüşümü alınacak olursa denklem (3.13) 'deki gibi kompleks bir fonksiyon elde edilir.

$$\hat{g}(x, y) = q_1(x, y)e^{(2\pi f_0 x)} = A_1 r(x, y)e^{\{i[2\pi f_0 x + \phi(x, y)]\}} \quad (3.13)$$

Aynı FFT ve filtreleme işlemleri yükseklik değişiminin olmadığı yani referans düzlemi üzerine düşürülmüş girişim deseni için de tekrarlanacak olursa

$$\hat{g}(x, y) = A_1 e^{\{i[2\pi f_0 x + \phi_0(x, y)]\}} \quad (3.14)$$

olmak üzere kompleks bir dağılım elde edilecektir. Denklem (3.13) ve (3.14)'ün fazları birbirlerinden çıkarılırsa

$$\Delta\phi(x, y) = \phi(x, y) - \phi_0(x, y) \quad (3.15)$$

olmak üzere yükseklik değişiminden kaynaklanan net faz dağılımı elde edilmiş olur. Bu faz dağılımı, görüntüleme kayıpları ve sistemde mevcut ortaya çıkabilecek kalıcı faz hatalarından arındırılmıştır. Sinüzoidal bir dağılımda uzaysal kaymanın faz ile ilişkisi

$$\Delta\phi(x, y) = 2\pi f_0 \delta(x, y) \quad (3.16)$$

olarak tanımlanabilir [Chen, 2000]. Burada $\delta(x, y)$ yüksekliğe bağlı uzaysal kayma miktarıdır. Elde edilen faz bilgisinin yükseklik bilgisine dönüştürülmesi için üçgen benzerliğinden faydalanmak mümkündür [Takeda, 1983]. Böylece her bir noktasının meydana getirdiği faz kayması bilgisi,

$$h(x, y) = \frac{l_0 \delta(x, y)}{(d - \delta(x, y))} \quad (3.17)$$

olarak yükseklik bilgisine çevrilmiş olur. Ayrıca $f_0 = 1/p_0$, denklem(3.16)'da yerine yazıldıktan sonra, $\delta(x, y)$ buradan türetilip denklem (3.17)'de yerine yazılırsa yükseklik değişiminin denklem (3.18)'daki gibi faz değişimi ve geometrik uzaklıklara bağlı bir ifadesi elde edilmiş olur.

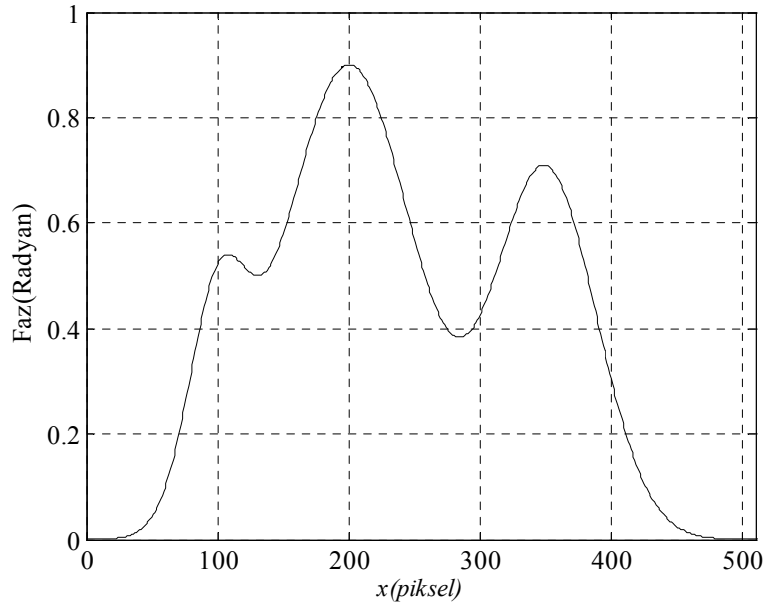
$$h(x, y) = \frac{I_0 P_0 \left[\frac{\Delta\phi(x, y)}{2\pi} \right]}{\left\{ P_0 \left[\frac{\Delta\phi(x, y)}{2\pi} \right] - d \right\}} \quad (3.18)$$

3.2. Fourier Dönüşüm Profilmetresi için Deneysel Çalışma Sonuçları

İşaret işleme alt yapısı ve optik geometrisi yukarıda verilen FDP'nin doğrulanması amacı ile öncelikle bir benzetim çalışması yapılmıştır. Analitik olarak,

$$\varphi(x) = c_1 e^{\left(\frac{-(x-100)^2}{s_1}\right)} + c_2 e^{\left(\frac{-(x-200)^2}{s_2}\right)} + c_3 e^{\left(\frac{-(x-350)^2}{s_3}\right)} \quad (3.19)$$

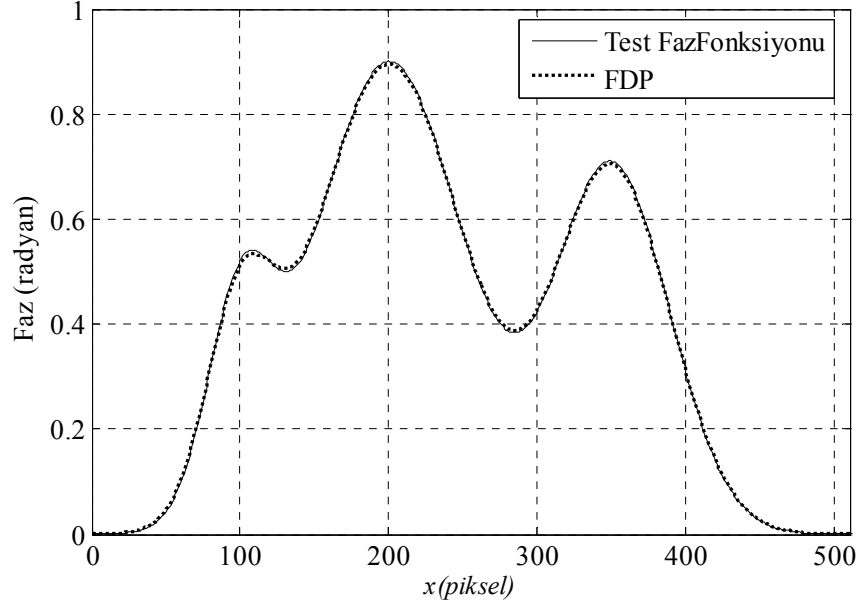
olarak ifade edilen bir test faz fonksiyonunun grafik gösterimi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.6 Test faz fonksiyonu.

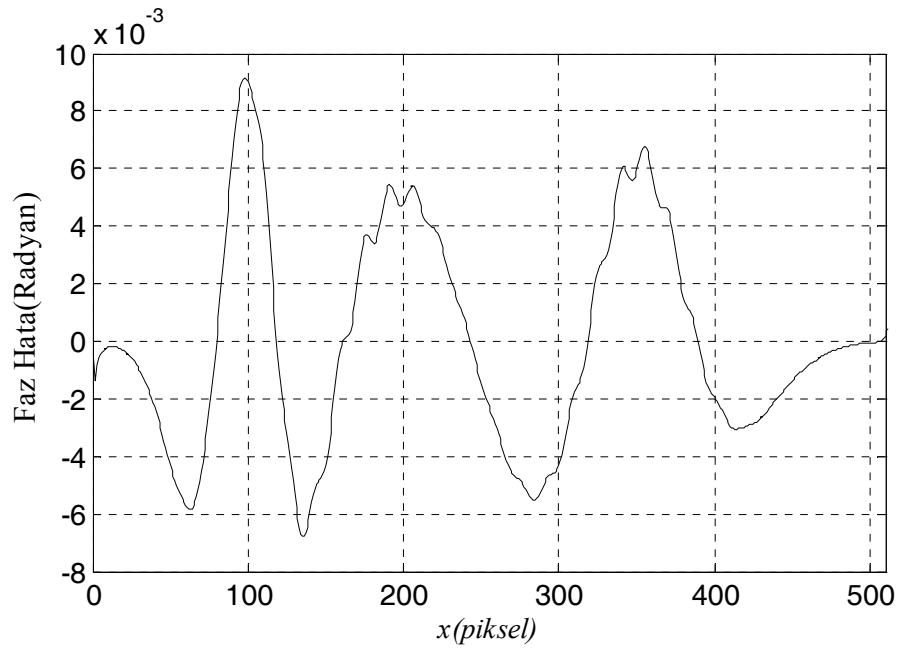
Burada $c_1=0.4$, $c_2=0.9$, $c_3=0.7$, $s_1=1000$, $s_2=5000$, $s_3=3000$ değerlerine göre bu faz dağılımı hesaplanmıştır. Eşitlik(3.1)'de $m=1$ rad/piksel, $V_0=1$, $I_0=1$ alınarak φ yerinde yukarıda verilen test fonksiyonu dağılımı konulursa bir boyutlu bir saç

deseni elde edilmiş olur. Bu saçak deseni, FDP yöntemine göre analiz edildiğinde, test faz fonksiyonunun düzgün bir şekilde yeniden elde edilebildiği görülmüştür.



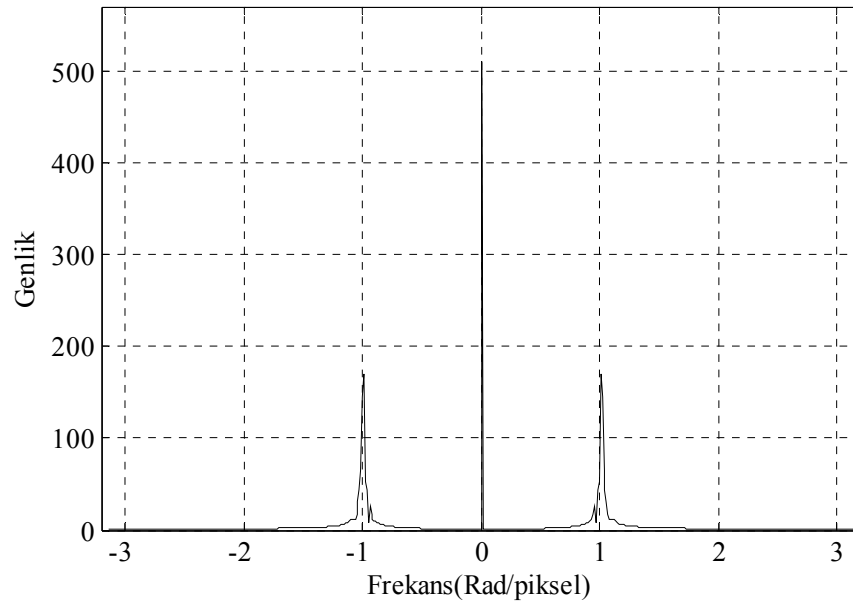
Şekil 3.7 Test faz fonksiyonu ile FDP sonucunun birlikte gösterimi.

Şekil 3.7'de görülebileceği gibi FDP yöntemi ile test faz fonksiyonu başarılı bir şekilde elde edilebilmiştir. Elde edilen bu faz işareti ile gerçek test faz işareti arasındaki hata dağılımı Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Buradan görülebileceği gibi benzetim çalışmasında FDP yönteminin hatası % 0,5 seyilerindedir.



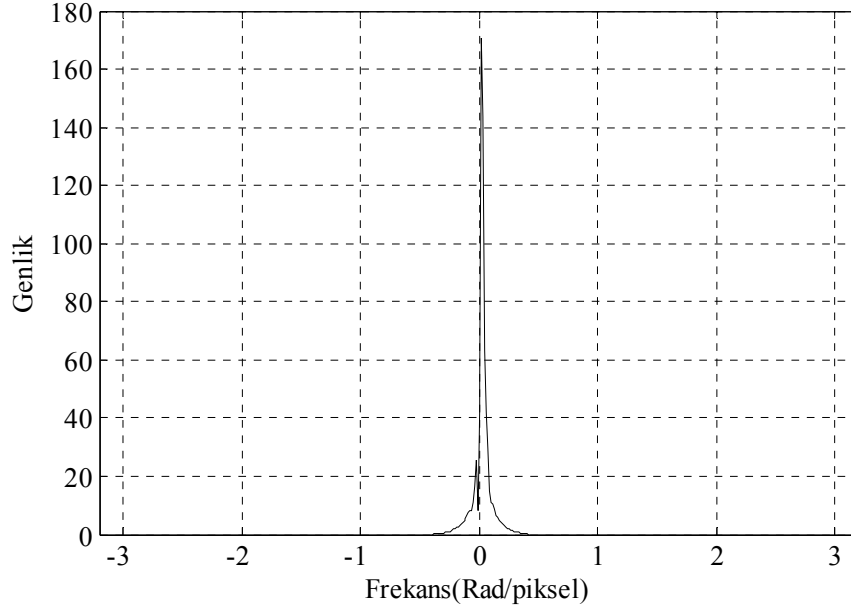
Şekil 3.8 FDP'nin hata dağılımı.

Tests faz fonksiyonu kodlanmış saçak dağılımının genlik-frekans spektrumu Şekil 3.9'da verilmiştir. Buradan görülebileceği gibi işaret bir taşıyıcı frekansa sahip frekans bandına sahiptir.



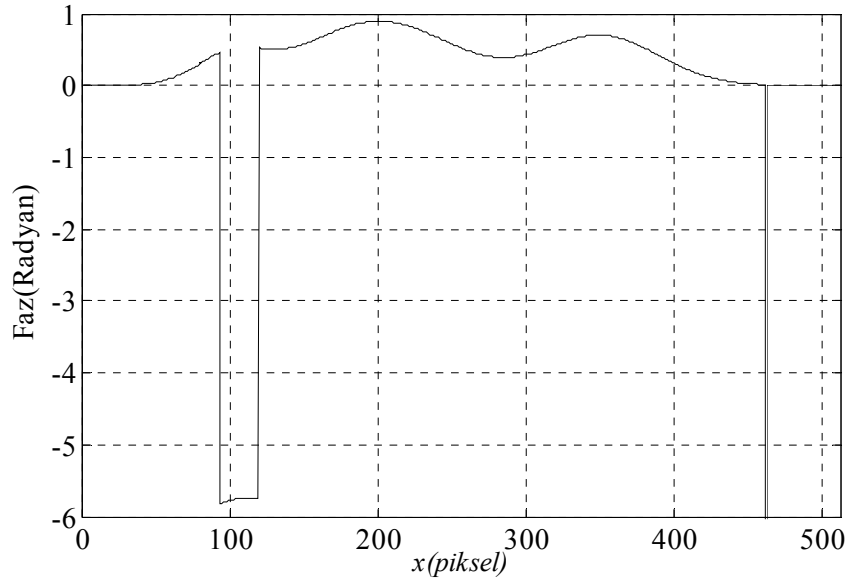
Şekil 3.9 Test saçak dağılımının genlik-frekans spektrumu.

Bu frekans bandı filtre ile seçilir ve taşıyıcı frekansı sıfıra çekildiğinde oluşan işaretin genlik-frekans spektrumu Şekil 3.10 'da verilmiştir.



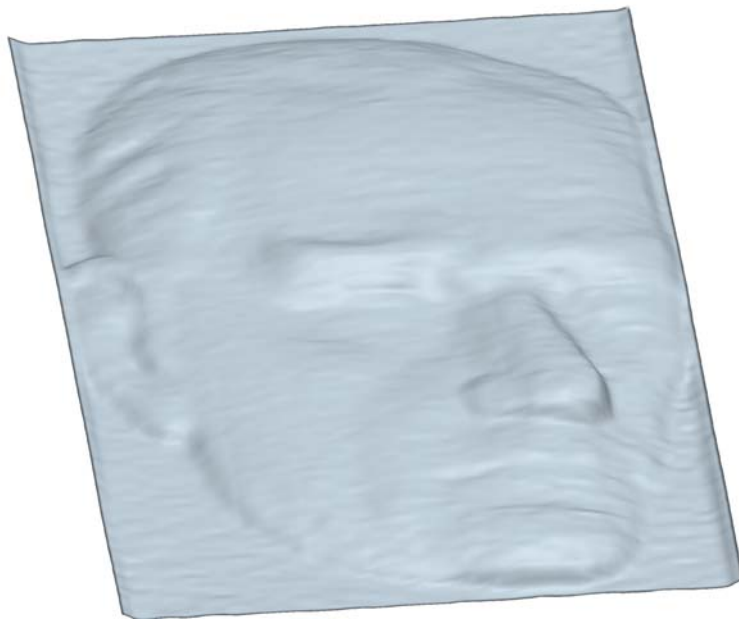
Şekil 3.10 Filtre edilmiş saçak işaretinin genlik-frekans gösterimi.

Şekil 3.10'da genlik-frekans spektrumu verilen işaretin ters Fourier dönüşümünden elde edilen faz dağılımı Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Bu işarete bir takım sıçrama noktaları dikkat çekmektedir. Bu noktalar, işaert faz düzeltme işlemine sokulduktan sonra Şekil 3.7'de görüleceği gibi test faz fonksiyonuna örtüşmektedir.



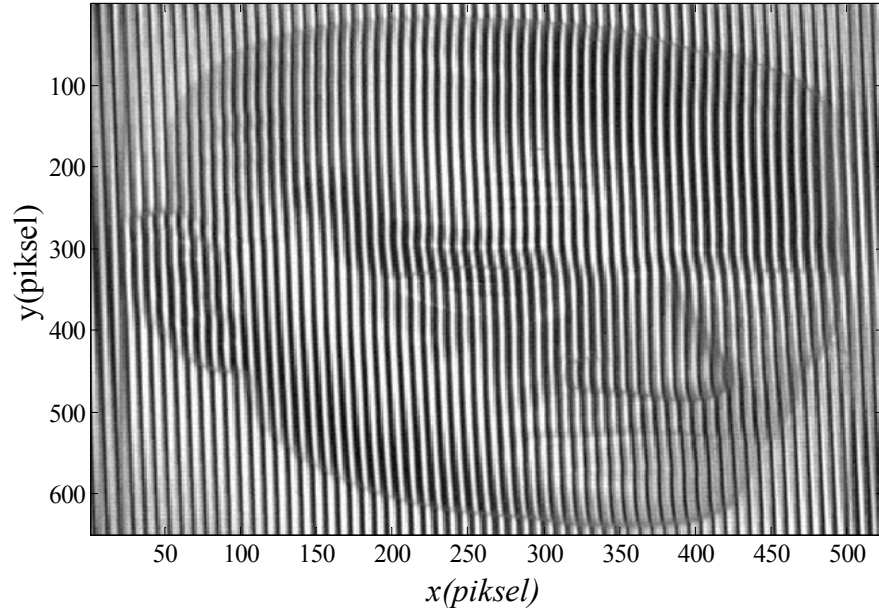
Şekil 3.11 Düzeltilmemiş faz işareti.

Benzetim çalışması ile doğrulanan FDP algoritmasının gerçek laboratuvar şartlarında performansının tespit edilmesi için Şekil 3.1’de verilen optik düzenek gerçekleştirilmiştir. Bu düzenekte yapay girişim deseni oluşturmak için 800x600 piksel çözünürlüğe sahip LCD sayısal projektör (Sony XGA VPL-CX5) kullanılmıştır. Kamera ile referans düzlemi, L , 174 cm, projektör ile sayısal kamera (Sony DSC-P2, 1600x1200 piksel) mesafe, d , 14 cm olarak ayarlanmıştır. Test nesnesi olarak Şekil 3.12’de fotoğrafı verilen bir Atatürk kabartması kullanılmıştır.



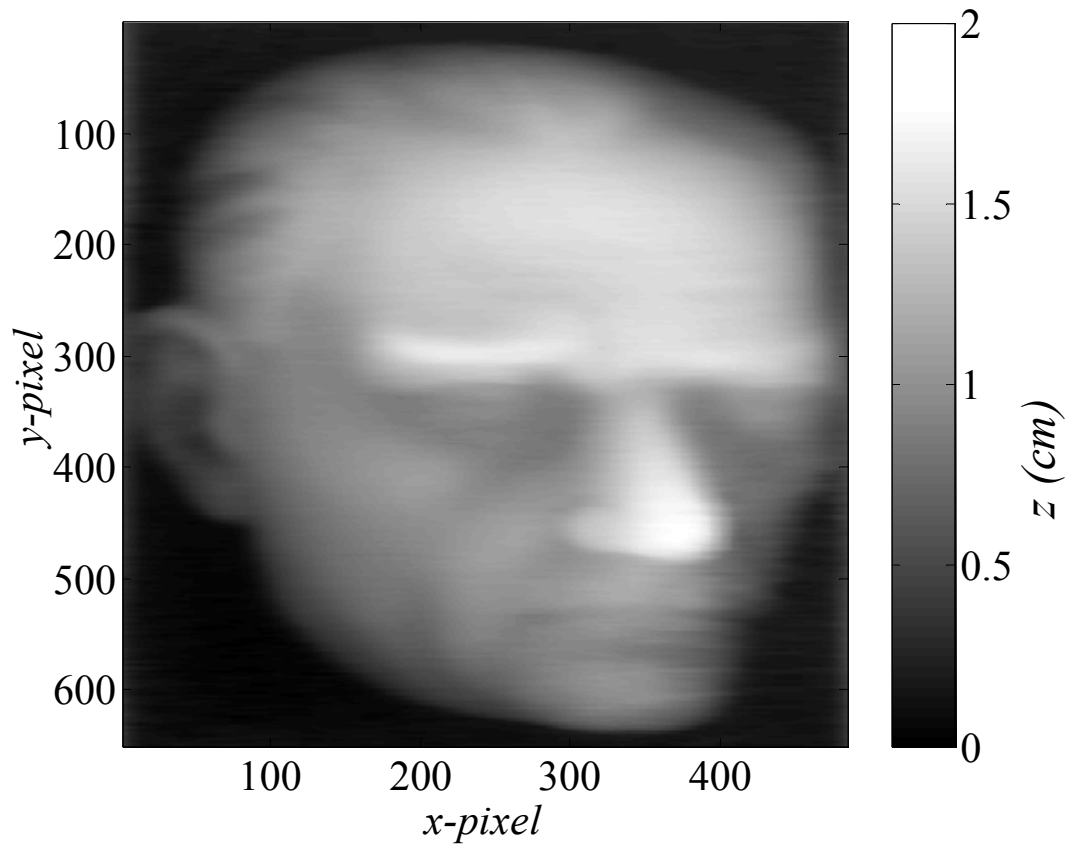
Şekil 3.12 Test Atatürk kabartmasının görünümü.

Labaratuar ortamında Şekil 3.1’de verilen düzenekte yapay saçak deseni referans düzlemine yerleştirilen Atatürk kabartması üzerine sayısal projektörle yapay girişim deseni yansıtılmış ve Şekil 3.13’de gösterilen görüntü sayısal kamera ile kaydedilmiştir.



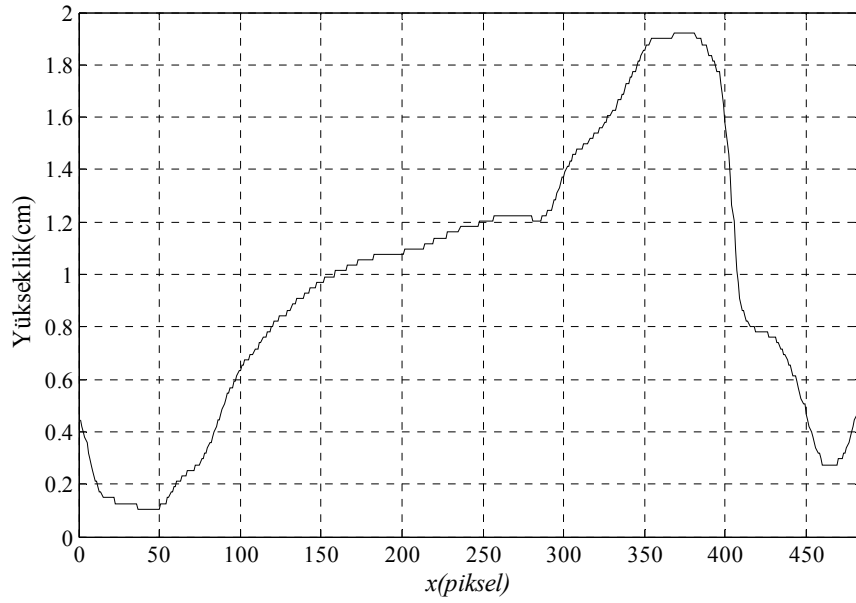
Şekil 3.13 Atatürk kabartması üzerinde yapay girişim deseni görüntüsü.

FDP yöntemine göre analiz edilen bu görüntüden Şekil 3.14’de gösterilen üç-boyutlu profili elde edilmiştir.

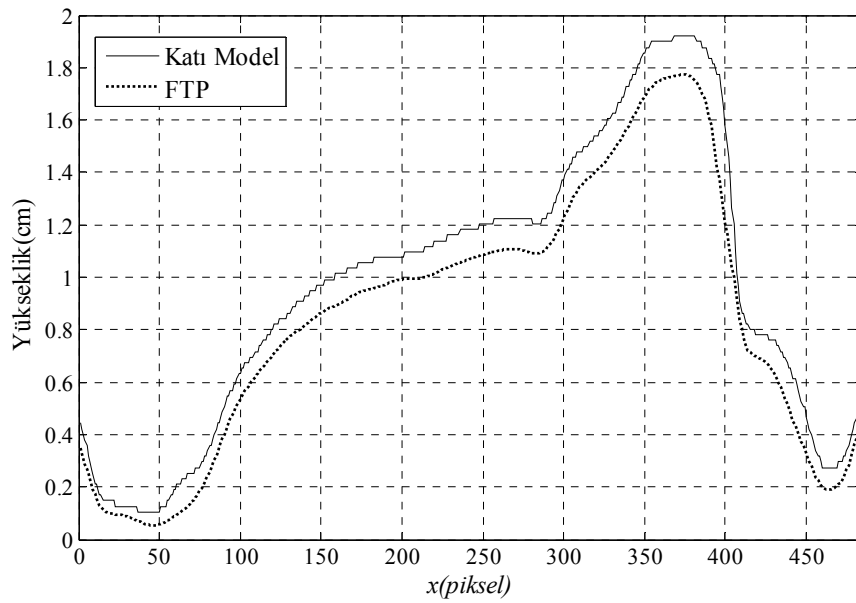


Şekil 3.14 Atatürk kabartmasının FDP ile elde edilen üç-boyutlu profili.

FDP ile elde edilen sprofil sonusunu karşılaştırmak amacı ile deney numunesi Atatürk kabartmasının Scirocco-nt marka scirocco 091007 modeli üç boyutlu katı model ölçme cihazı ile belirli bir kesitinin yükseklik değişimi ölçülmüştür. Bu cihaz cisim yüzeyine dokunarak ölçüm yapmaktadır. Atatürk kabartması profinin $y = 450$ pikselinden x eksenini boyunca kesiti FDP ve temaslı ölçüm cihazı ile elde edilerek yükseklik değişimi karşılaştırılmış, sonuçlar Şekil 3.15 ve Şekil 3.16 gösterilmiştir.



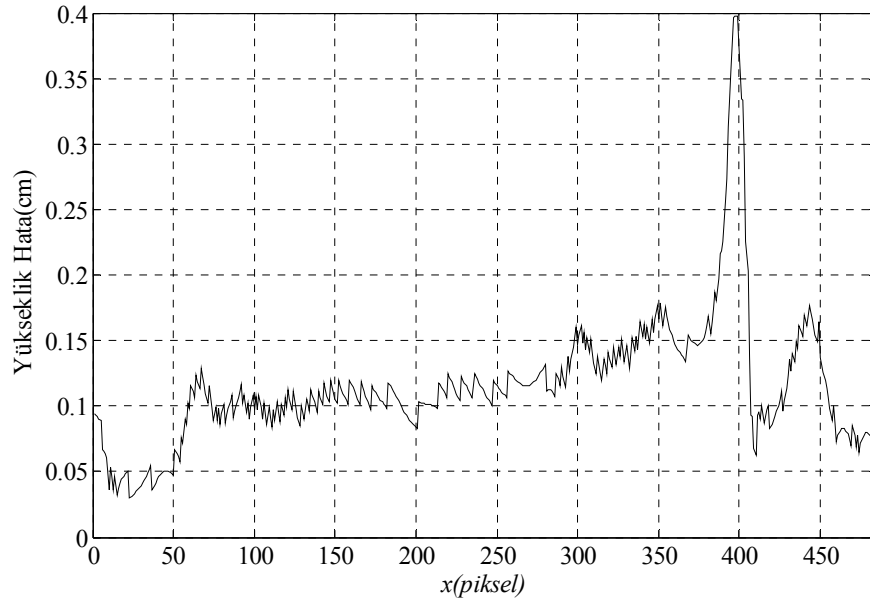
Şekil 3.15 Dokunma probu ile elde edilen yükseklik değişimi.



Şekil 3.16 FDP ve katı modelin $y=450$ piksel için profilleri.

Şekil 3.16'da verilen yükseklik değişimleri karşılaştırıldığında FDP'nin yükseklik değişiminin çok hızlı arttığı yerlerde daha fazla hata yaptığı, yükseklik değişiminin fazla olmadığı yerlerde ise bu hatanın azaldığı görülmektedir. Şekil 3.17'de FDP'nin gerçek katı modele göre hata dağılımı gösterilmiştir. Bu sonuçlar FDP'nin teorik yorumlarıyla örtüşmektedir. Yükseklik değişiminin ani olarak arttığı yani dz/dx 'in çok büyük olduğu noktadaki z (yükseklik) değeri diğer noktalara göre daha fazla hatalı bulunmuştur. Bu hatayı azaltmak için yapay saçak deseninin sıklığını (taşıyıcı

frekansı) artırmak gereklidir. Ancak taşıyıcı frekansı artırılması sayısal kamera çözünürlüğünün de artırılması gerekliliğine sebep olur. Eğer kamera çözünürlüğü doğru bir şekilde seçilmezse sinüzoidal yapıdaki yapay girişim deseni doğru bir şekilde örneklenemez ve üst üste binme (aliasing) problemleri ortaya çıkar. Sonuç olarak FDP'nin ölçülecek cismin yükseklik değişimine bağlı olarak yapay girişim deseninin sıklığını artırmayı gerektirdiği bunda kamera çözünürlüğüne, görüntü matris boyutuna ve işlem süresine etki ettiği görülebilir.



Şekil 3.17 FDP'nin katı modele göre hata dağılımı.

4. SÜREKLİ DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ ile ÜÇ BOYUTLU ÖLÇME

Bölüm 3’de Fourier dönüşümü gerçekleştirilen girişim deseni analiz etme ve profil hesaplama süreçlerini SDD ile de yapmak mümkündür. Bu bölümde Dalgacık Dönüşümü ile iki yöntem sunulacaktır. Birinci yöntemde frekans filtreleme işlemi Dalgacık dönüşümünün ölçekleme ekseninde gerçekleştirilecek ve bölüm 3’de olduğu gibi kompleks dağılımın direkt fazı hesaplanacaktır. İkinci yöntemde ise Dalgacık dönüşümünün şiddet dağılımından faz bilgisi hesaplanacaktır. Birinci yöntem FDP yönteminde olduğu gibi faz düzeltme işlemine ihtiyaç duyarken ikinci yöntem herhangi bir faz düzeltme işlemine gereksinim duymamaktadır.

4.1. Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Dalgacık (Wavelet) terimi, enerjisi yoğunlaştırılmış bir dalga parçacığını ifade eder. Bu dalgacık, dalga karakterli davranış göstermesine rağmen eş zamanlı olarak konum-frekans veya zaman-frekans analizi amacıyla kullanılabilir. Böylece durağan olmayan (non-stationary) ve geçici (transient) işaretlerin analizleri etkili bir şekilde yapılabilir [Mallat, 1999].

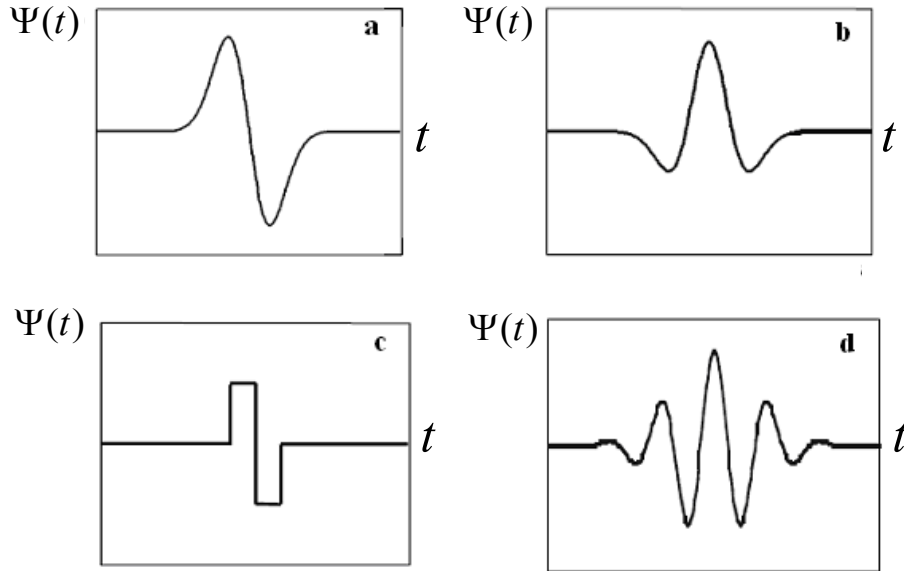
Bir durağan olmayan işaretlerin, zaman-frekans (veya konum-frekans) değişiminin eş zamanlı gösterimi ve yerelleştirilebilmesi ihtiyacına binaen Fourier dönüşümünden Dalgacık dönüşümü geliştirilmiştir. Aslında Dalgacık dönüşümünden öncede birtakım zaman frekans gösterim araçları mevcuttu. Bunlardan en çok bilineni, Kısa Süreli Fourier Dönüşümü, KSFD (Short Time Fourier Transform, STFT) dir. $h(x)$ ile verilen bir işareti x eksenine göre KSFD’si

$$STFT_h(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x)g^*(x-\tau)e^{-i2\pi fx} dx \quad (4.1)$$

olarak verilir [Cohen, 1989]. Burada , g bir pencereleme fonksiyonunu, $*$ sembolü ise g ’nin kompleks konjügesini gösterir. KSFD, sabit genişliğe sahip $g(x)$ gibi bir fonksiyonunun kaydırılarak herseferinde Fourier dönüşümünün alınmasından başka

birşey değildir. Böylece kaydırma ve frekans olmak üzere iki değişkenli bir dönüşüm elde edilmiş olur. Zaman-frekans (veya konum-frekans) analizini birlikte yapma imkanı vermekle birlikte, sabit pencereleme uzunluğu başta olmak üzere bir takım eksiklikleri yüzünden Dalgacık Dönüşümü kadar başarılı olamamıştır.

Dalgacık Dönüşümü, bir işareti katsayılar şeklinde ayrık enerji dağılımı olarak ifade eder. Esas işaret bu katsayılar ve Dalgacık fonksiyonu ile yeniden elde edilebilir. Dalgacık dönüşümü, Fourier dönüşümüne benzer ancak değişken dalgacık fonksiyonu formu ve değişken ölçek parametresine sahip olması ile Fourier dönüşümünden ayrılır. Ayrıca konum (veya zaman) bölgesi ile frekans bölgesine aynı anda bakma ve eş zamanlı değerlendirme şansı verir. Bu yüzden dinamik bir frekans bölgesi aracıdır. Dalgacık dönüşümünün, özellikle periyodik olmayan, gürültülü, kesikli, ani değişim olasılığı yüksek gibi bozukluklara sahip işaretlerin analizi için geliştirildiği söylenebilir. Durağan Olmayan (Non-Stationary) işaretlerde Fourier dönüşümü ve KSFD'den çok daha başarılı olduğu bir çok çalışmayla ortaya konmuştur [Meyers, 1993]. Dalgacık dönüşümü, küçük dalgacık çekirdek fonksiyonlarını kullanarak analiz gerçekleştirir. Bu yüzden dalgacık dönüşümü, kullandığı dalgacık formuna göre isimlendirilir. Şekil 4.1'da çeşitli ana dalgacık fonksiyonları (mother wavelet function) gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Çeşitli Dalgacık fonksiyonu örnekleri. a) Gaussian dalgacık (Gauss dağılımının birinci türevi), b) Meksikalı şapkası (mexican hat) dalgacık (Gauss dağılımının ikinci türevi), c) Haar dalgacık, d) Morlet dalgacık (reel kısmı).

Bir fonksiyonun, Dalgacık olarak kullanılabilmesi için gerekli olan üç şart aşağıda verilmiştir [Cohen, 2003].

1-) Dalgacığın sonlu enerjiye sahip olması gerekir. E Dalgacık fonksiyonunun enerjisi olmak üzere

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (4.2)$$

biçiminde sonlu olmalıdır.

2-) $\hat{\Psi}(f)$, $\Psi(t)$ 'nin Fourier dönüşümü olmak üzere

$$\hat{\Psi}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (4.3)$$

olarak verilir. C_g ,

$$C_g = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(f)|^2}{f} df < \infty \quad (4.4)$$

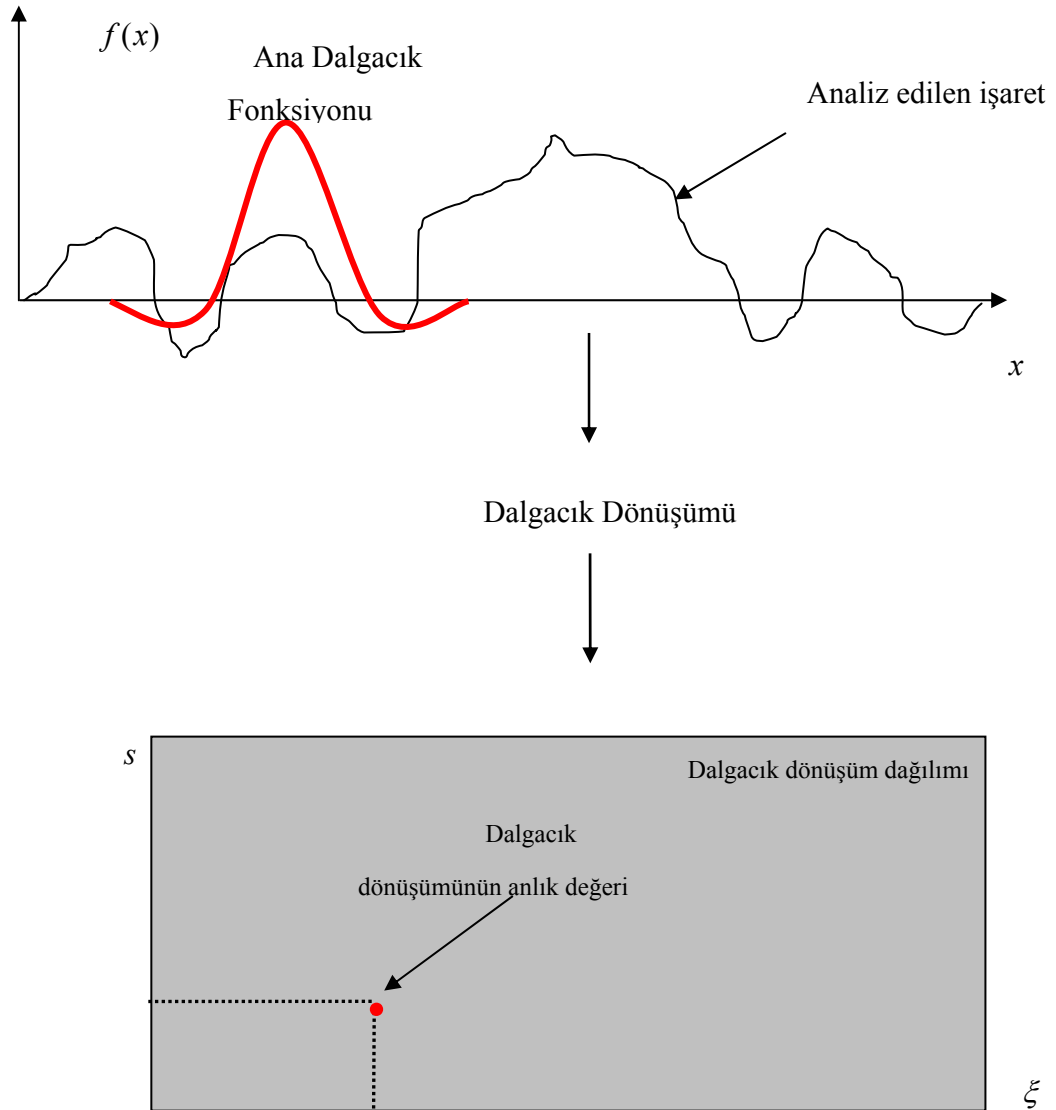
olarak tanımlanır ve Dalgacık dönüşümünün yönetilebilirlik katsayısı olarak isimlendirilir. Bu gereklilik şartı, Dalgacık fonksiyonunun 0 frekanslı bileşeninin olmamasının veya Dalgacığın 0 ortalama değerli olmasının bir ifadesidir. Bu şart;

$$\hat{\Psi}(0) = 0 \quad (4.5)$$

olarak da kısaltılabilir. Bu şart Dalgacık yönetilebilirlik şartı olarak bilinir ve böylece dalgacık fonksiyonu band geçiren filtre davranışı gösterir [Daubechies, 1990].

3-) Üçüncü şart kompleks Dalgacık fonksiyonları için geçerli olmak üzere, kompleks Dalgacık fonksiyonunun Fourier dönüşümünün negatif frekanslar için sonlu ve sıfır olmasıdır.

Dalgacık dönüşümü, basitçe dalgacık fonksiyonunun konvolüsyonu olarak ifade edilebilir. Bir işaretin dalgacık dönüşümünü almak için temel olarak iki süreç geçirilir. Birincisi dalgacık fonksiyonun analiz edilecek üzerinde kaydırılması (shifting) ve ikincisi ise ölçeklenmesi (açma-kısma). Bu yüzden Dalgacık dönüşümü, iki değişkenli bir fonksiyon olarak nitelendirilebilir. Şekil 4.2 'de Dalgacık, işaret ve Dalgacık dönüşümü ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Analiz edilen işaret ve Dalgacık dönüşümü ilişkisi.

Sürekli Dalgacık dönüşümü, iki değişkenli bir katsayı fonksiyonudur. Sürekli Dalgacık dönüşümünün; s (scale) ölçek ve ξ (shift) öteleme olmak üzere iki değişkeni vardır.

$$W(s, \xi) = \langle f, \Psi_{s, \xi} \rangle = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \left(\Psi \left(\frac{x - \xi}{s} \right) \right)^* dx \quad (4.6)$$

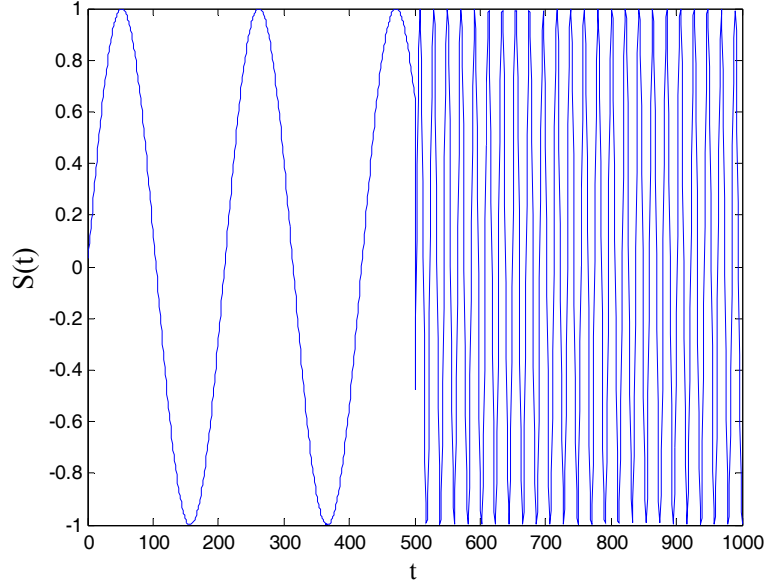
Burada * işareti kompleks eşleniği göstermektedir. $f(x)$, analiz edilecek işaret, $\Psi_{s, \xi}(x)$ ise analiz analiz Dalgacık fonksiyonudur. $W(s, \xi)$ katsayıları, $f(x)$ işareti ile $\Psi_{s, \xi}(x)$ arasındaki benzeşimi gösterir. Herhangi s bir ölçekli ve ξ kadar kaydırılmış Analiz Dalgacık fonksiyonu ile dönüşümü alınan işaretin benzeşimin genliği, $W(s, \xi)$ 'in genliği alınarak bulunur. Analiz dalgacı, ana Dalgacıktan ($\Psi(x)$) kaydırma ve ölçeklendirme işlemleriyle elde edilir.

$$\Psi_{s, \xi}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi \left(\frac{x - \xi}{s} \right) \quad (4.7)$$

Burada $1/\sqrt{s}$ normalizasyon parametresidir. Büyük ölçek işarete kaba bir bakışı daha doğrusu yavaş değişimleri algılamayı ve böylece düşük frekans bilgisini, küçük ölçekleme katsayısı ise işaretin daha detaylı davranışlarını yani yüksek frekans bilgisini verir. Kaydırma değişkeni Dalgacık'ın zaman veya konuma bağlı olarak ilerlemesini sağlar. Bir ekseninde sinusoidal değişim gösteren bir işaretin SDD'ü alınarak ölçekleme ve kaydırma işlemlerinin çalışma mantığı gösterilecektir. $s(t)$;

$$s(t) = \left\{ \begin{array}{ll} \sin(0,03t), & 1 \leq t \leq 500 \\ \sin(0,3t), & 501 \leq t \leq 1000 \end{array} \right\} \quad (4.8)$$

olarak tanımlanan bir işaretin Morlet Dalgacı kullanılarak SDD'ü alınacak alınsın. Öncelikle bu işaretin zamana bağlı değişimi Şekil 4.3'de verilmiştir.



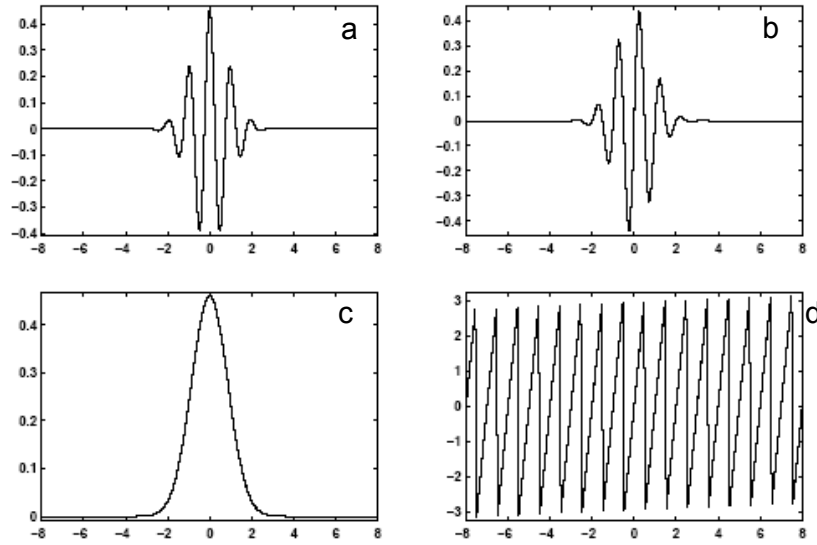
Şekil 4.3 İki frekanslı $s(t)$ sinüzoidal işaretin zamana göre değişimi.

Bir boyutlu kompleks Morlet Dalgacık fonksiyonu

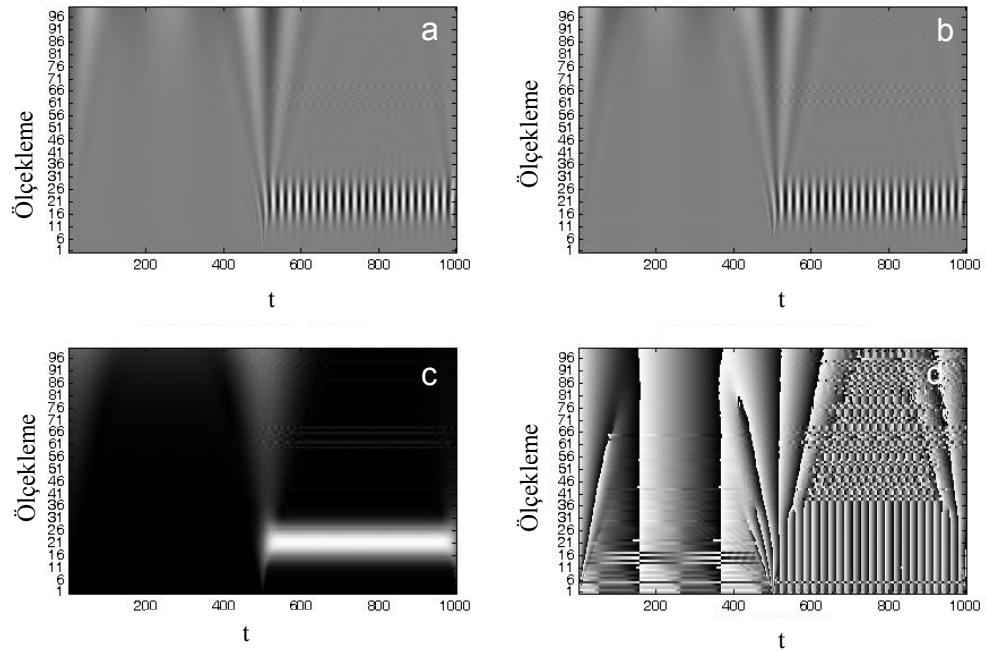
$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{2i\pi f_c t} e^{-\frac{t^2}{f_b}} \quad (4.9)$$

olarak gösterilir. Morlet kompleks bir fonksiyon olduğundan reel, sanal ve faz değişimlerine ayrı ayrı bakmak gerekir. Morlet Dalgacığının reel, sanal, genlik ve faz dağılımları Şekil 4.4'de verilmiştir.

Denklem (4.8)'de verilen $s(t)$ işaretinin, denklem (4.9)'de verilen Kompleks Morlet Dalgacık fonksiyonunda $f_b = f_a = 1$ alınarak denklem (4.6)' a göre bir boyutlu SDD'nin reel, sanal, genlik ve faz değişimleri Şekil 4.5'da gösterilmiştir. Analiz edilen işaretin zamana bağlı olarak frekans ilk bakışta kolaylıkla farkedilebilmektedir. Burada ölçekleme yüz adımıda gerçekleştirilmiş kaydırma parametresi ise zaman eksenini ile aynı örnekleme adımıyla örneklenmiştir.



Şekil 4.4 Kompleks Morlet Dalgacık Fonksiyonunun a) Reel b) Sanal c) Genlik d) Faz değişimi.



Şekil 4.5 Sinüzoidal dağılımlı sinyalin kompleks Dalgacık dönüşümü. (a) Reel kısım, b) Kompleks kısım, d) Genlik e) Faz değişimi)

Şekillerden görüleceği gibi üzere zaman uzayı ve frekans uzayı davranışlarına birlikte görmek mümkündür.

Dalgacık dönüşümü Parseval özdeşliği ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$W(s, \xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \langle \hat{f}, \hat{\Psi}_{s, \xi} \rangle = \frac{\sqrt{s}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(k) \left(\hat{\Psi}(sk) \right)^* e^{i\xi k} dk \quad (4.10)$$

Burada \hat{f} ve $\hat{\Psi}$, işaretin ve ana dalgacığın Fourier dönüşümü ve k ise x 'in eşleniğinin açısal frekansını gösterir. Eğer ters Dalgacık dönüşümü almak mümkün ise, gerçek işaretin Dalgacık dönüşümü kullanılarak yeni ifadesi elde edilmiş olur:

$$f(x) = \frac{1}{C_\Psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(s, \xi) \Psi_{s, \xi}(x) \frac{ds d\xi}{s^2} \quad (4.11)$$

burada C_Ψ :sonlu bir değerde olursa ters Dalgacık dönüşümüyle esas işareti ifade etmek mümkün olur. Seçilen ana Dalgacık fonksiyonu, Dalgacık dönüşümünün yapısını belirler. Geliştirilen işaret işleme tekniklerine bağlı olarak bir çok ana Dalgacık fonksiyonu ortaya çıkmıştır. bunlardan biri olan Morlet dönüşümü ele alınmış ve bununla FDP tekniğinin faz düzeltme gerektirmeyen bir yaklaşımı ortaya konmuştur.

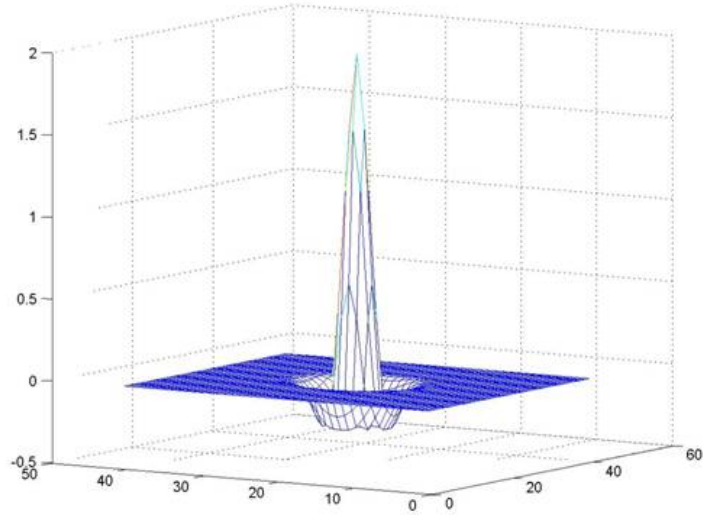
Yukarda tanımlanan Sürekli Dalgacık Dönüşümü iki boyutlu olarak da kullanılabilir. Bu durumda iki eksen de kaydırma ve ölçeklendirme yapmak gerekir. En genel iki boyutlu Sürekli Dalgacık Dönüşümü

$$W(s, \xi, \beta) = \langle f, \Psi_{s, \xi, \beta} \rangle = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \left(\Psi \left(\frac{x - \xi}{s}, \frac{y - \beta}{s} \right) \right)^* dx dy \quad (4.12)$$

olarak verilebilir [Torrence 1998]. Burada ξ ve β kaydırma değişkenleri, s ise ölçekleme değişkenidir. İki boyutlu Dalgacık Dönüşümü yapmak için Dalgacık fonksiyonunun da iki boyutlu tanımlanması gerekir. Örneğin iki boyutlu Makesikalı Şapka Dalgacık fonksiyonu

$$\Psi(x, y) = (x^2 + y^2 - 2) e^{-\frac{1}{2}(x^2 + y^2)} \quad (4.13)$$

olarak tanımlanabilir [Meyers 1998]. Bu iki boyutlu foksiyon grafik gösterimi



Şekil 4.6 İki boyutlu Meksikalı Dalgacık fonksiyonu

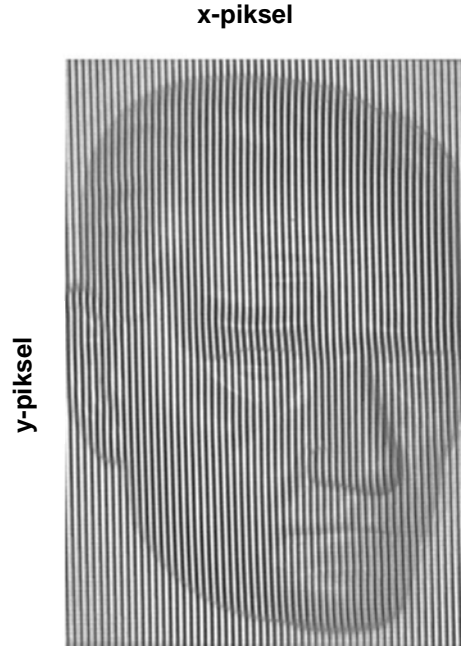
olarak gösterilebilir. Bu çalışmada işlem kolaylığı açısından bir boyutlu Dalgacık dönüşümü kullanılmıştır.

4.2. Dalgacık Faz Yöntemi

Dalgacık Faz Yöntemi, DFY (Wavelet Phase Method, WPM) esasen FDP ile son derece benzerdir. FDP yönteminde, frekans düzleminde saçak frekansı civarında ki bant filtre ediliyordu (bkz. Şekil 3.5). Profili elde edilmek istenen cismin, referans düzlemine göre yükseklik (z eksen) bilgisini taşıyan bu bant gürültüden arındırılmış olmalı ve başka bir frekans bandından izole edilerek seçilebilmelidir. Literatürde bu işlem için Hanning Pencereleme fonksiyonu gibi bir çok yöntem önerilmiştir. SDD ile analiz edilen işaretin frekans düzlemindeki en yüksek genliğe sahip bileşen kolaylıkla seçilebilmektedir. Ayrıca SDD'nün yapısından kaynaklanan doğal filtreleme özelliği sayesinde gürültü de elimine edilebilmektedir [Mallat, 1999].

DFY ile saçak deseni görüntüsünden yükseklik bilgisinin nasıl elde edildiğinin göstermek için Morlet Dalgacık fonksiyonu kullanarak adım adım yapılan işlemler özetlenecektir. Örnek bir cismin üzerine düşürülmüş saçak deseni Şekil 4.7'de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde x eksen boyunda saçak çizgilerinin belirli bir frekansta değişim gösterdiği ancak y ekseninde saçak çizgilerinin bir değişim frekansının olmadığı kolayca görülebilir. Bu çalışmada işlem kolaylığı açısından tek

eksende taşıyıcı frekansa sahip saçak desenleri kullanılmış ve bu eksene göre Dalgacık dönüşümü alınarak üç-boyutlu profil elde edilmiştir.



Şekil 4.7 Örnek bir saçak deseni görüntüsü.

Cisim üzerinde oluşturulan yapay girişim deseni (saçak) denklem (4.14)' de matematiksel olarak yeniden modellenmiştir. Burada desenin $I_0(x, y)$ arka plan şiddet dağılımı, $V(x, y)$ girişim saçaklarının görünürlüğü, $\varphi(x, y)$, cismin yükseklik değişimi sebebiyle girişim saçaklarında meydana gelen faz kayması, m , girişim saçak deseninin x ekseninde taşıyıcı frekansıdır. Bu bölümde sadece bir x ekseninde sinüzoidal olarak değişen suni girişim deseni kullanılacak, y eksenini sabit tutulacaktır.

$$g(x, y) = I_0(x, y) [1 + V(x, y) \cos(mx + \varphi(x, y))] \quad (4.14)$$

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi girişim deseninden yüksekli bilgisinin elde edilebilmesi için, cismin bir eksenindeki saçak taşıyıcı frekansının yükseklik değişim hızının mutlak değerinden çok çok büyük olması gerekir [Takeda 1983]. Eğer bu şart sağlanmazsa frekans düzleminde üst üste binme (aliasing) ortaya çıkacağı için girişim deseninden yükseklik bilgisinin elde edilmesi mümkün olamaz.

$$m \gg \left| \frac{d\varphi}{dx} \right|_{\max} \quad (4.15)$$

$$W(y, a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} c^* \left(\frac{x-b}{a} \right) g(x, y) dx \quad (4.16)$$

$$c \left(\frac{x-b}{a} \right) \quad (4.17)$$

Burada a ölçek, b öteleme parametrelerini, c ana Dalgacık fonksiyonunu ve y ise satırın yerini göstermektedir. c^* ise Dalgacık fonksiyonun kompleks konjügesini gösterir. Bu çalışmada, kompleks Morlet (4.18), Gaussian (4.19), b-spline (4.20) ve Shannon (4.21) dalgacıkları ana dalgacık olarak kullanılmıştır. Bunların matematiksel ifadesi aşağıda sırası ile verilmiştir [Torrence, 1998].

$$c(x) = \sqrt{\pi f_b} e^{(2\pi i f_c x)} e^{\left(\frac{x^2}{f_b} \right)} \quad (4.18)$$

$$c(x) = C_p e^{(-ix)} e^{(-x^2)} \quad (4.19)$$

$$c(x) = \sqrt{f_b} e^{(2\pi i f_c x)} \left(\text{sinc} \left(\frac{f_b x}{m} \right) \right)^m \quad (4.20)$$

$$c(x) = \sqrt{f_b} \left(\text{sinc}(f_b x) \right) e^{(2\pi i f_c x)} \quad (4.21)$$

Burada, f_b is bant genişliği, f_c is ana Dalgacık merkez frekansı, m mertebeyi gösteren bir tamsayı ($m \geq 1$) ve C_p ise kompleks Gaussian Dalgacık'ın türetilirken kullanılan bir katsayısıdır. $c(x)$ a ölçek ve b öteleme parametreleri göz önüne alınarak sırası ile kompleks Morlet, Gaussian, b-spline ve Shannon Dalgacıkları yeniden ifade edilirse:

$$c \left(\frac{x-b}{a} \right) = \sqrt{\pi f_b} e^{\left(2\pi i f_c \left(\frac{x-b}{a} \right) \right)} e^{\left(\frac{1}{f_b} \left(\frac{x-b}{a} \right)^2 \right)} \quad (4.22)$$

$$c\left(\frac{x-b}{a}\right) = C_p e^{\left(-i\left(\frac{x-b}{a}\right)\right)} e^{\left(-\left(\frac{x-b}{a}\right)^2\right)} \quad (4.23)$$

$$c\left(\frac{x-b}{a}\right) = \sqrt{f_b} e^{\left(2\pi i f_c \left(\frac{x-b}{a}\right)\right)} \left(\text{sinc} \left(\frac{f_b (x-b)}{ma} \right) \right)^m \quad (4.24)$$

$$c\left(\frac{x-b}{a}\right) = \sqrt{f_b} e^{\left(2\pi i f_c \left(\frac{x-b}{a}\right)\right)} \left(\text{sinc} \left(f_b \left(\frac{x-b}{a}\right) \right) \right) \quad (4.25)$$

Morlet Dalgacık fonksiyonu esas alınarak bir boyutlu SDD eşitlik(4.16)' e göre,

$$W(y, a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\sqrt{\pi f_b} e^{\left(2\pi i f_c \left(\frac{x-b}{a}\right)\right)} e^{\left(-\frac{1}{f_b} \left(\frac{x-b}{a}\right)^2\right)} \right)^* g(x, y) dx \quad (4.26)$$

olarak verilebilir. Burada anlatımı kolaylaştırmak için f_b ve $f_c = 1$ kabul edilir ve integralin içindeki sabitlerde integralin dışında gösterilirse, eşitlik (4.26);

$$W(y, a, b) = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i \left(\frac{x-b}{a}\right)} e^{-\left(\frac{x-b}{a}\right)^2} g(x, y) dx \quad (4.27)$$

haline gelir. Burada verilen bu SDD integralinde her b öteleme değeri için a ölçekleme değişkeni seçilen aralıkta değiştirilerek $W(a, b)$ değerleri bulunur. Bu değerlerden en yüksek genliğe sahip olanı seçilir. Bu işlem b değiştirilerek görüntünün her satırının (her y bir satır) sonuna kadar tekrar edilir. Bu tepe (ridge) değerler analiz edilen işaret ile dalgacık fonksiyonunun en iyi benzeştiği ölçekteki SDD değeridir. Burada analiz Dalgacığı üssel kompleks bir fonksiyon olduğundan elde edilen işaretin fazı saçak deseni içerisinde kodlanmış yükseklik bilgisini verir. \hat{W} en yüksek genliği veren ölçekteki SDD olmak üzere, faz değişimi $\phi(x, b)$,

$$\Phi(y,b) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Sanal}(\hat{W}(x,a,b))}{\text{Reel}(\hat{W}(x,a,b))} \right) = mb + \varphi(y,b) \quad (4.28)$$

burada $\text{Sanal}(W(a,b))$ ve $\text{Reel}(W(a,b))$, SDD'nin sanal ve gerçel kısımlarıdır. Hesaplanan $\Phi(x,b)$ 'nin her değeri, kullanılan bilgisayar alt yapısına göre $[-\pi/2, +\pi/2]$ gibi bir aralığa kaydırılmakta ve bu yüzden de bulunan faz dağılımında sıçrama ve süreksizlikler oluşmaktadır. Bu yüzden hesaplanan bu faz dağılımı uygun bir faz düzeltme sürecinden geçirilmelidir. Hem referans düzleminden hemde cisim üzerinden alınan saçak deseni kullanarak hesaplan ve düzeltilen faz dağılımları birbirinden çıkarılırsa cismin yükseklik değişimine bağlı bir faz dağılımı elde edilmiş olur.

$$\Delta\varphi(y,b) = \phi(y,b) - \phi_0(y,b) \quad (4.29)$$

Burada $\phi(y,b)$ cisim referans düzlemine yerleştirildiğinde elde edilen düzeltilmiş faz dağılımı, $\phi_0(y,b)$ ise referans düzleminden elde edilen faz dağılımını gösterir. Bulunan fark dağılımı denklem (3.18) kullanılarak yükseklik bilgisine dönüştürülebilir.

4.3. Sürekli Dalgacık Dönüşümü ile Yeni Bir Üç Boyutlu Ölçme Yöntemi: Morlet Dalgacık Eğimi Yöntemi

Yukarıda belirtildiği gibi FDP ve DFY yöntemlerinde cismin yükseklik değişim bilgisini veren faz dağılımı, bir düzeltme sürecinden geçirilerek süreksizlikler giderilir. Daha sonra bu faz bilgisi boyutsal bilgiye çevrilir. Faz düzeltme süreci, gürültüye karşı çok duyarlıdır ayrıca faz düzeltmenin mümkün olmadığı durumlar ortaya çıkabilmektedir. Literatürde faz düzeltme problemini çözmek için bir çok algoritma önerilmiştir [Judge, 1994]. Bu tez çalışması kapsamında saçak deseninden faz dağılımını elde etmek için faz düzeltme işlemi gerektirmeyen kompleks morlet dalgacığı kullanan bir CWT (sürekli Dalgacık dönüşümü) yöntemi sunulmuştur [Dursun, 2004]. Bu yöntemde saçak deseninin Dalgacık dönüşümünden fazın eğimi elde edilmekte ve bu eğimin türevinden de faz

dağılımı herhangi bir faz düzeltme işlemine gerek kalmaksızın elde edilmekte ve buradan da üç-boyutlu profil elde edilmektedir. Ana dalgacık fonksiyonu olarak Morlet kullanılmıştır [Meyers, 1993]. Önerilen bu yeni yöntem Morlet Dalgacık Eğimi Yöntemi, MDEY olarak isimlendirilmiştir.

Saçak deseninin herhangi bir y pikseline karşılık gelen bir satırını denklem (4.14)'de gösterildiği gibi düşünülün. Bu durumda yükseklik değişimini elde edebilebilmesi için denklem (4.15)'deki şartın sağlanması gerekir. Saçak deseninin bir boyutlu Dalgacık dönüşümü:

$$\begin{aligned} W(s, b) &= \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} h^* \left(\frac{x-b}{s} \right) g(x) dx = \sqrt{s} \int_{-\infty}^{+\infty} H^*(sk) G(k) e^{(ibk)} dk \\ &= \sqrt{s} \int_{-\infty}^{+\infty} H^*(sk) G(k) e^{(ibk)} dk \end{aligned} \quad (4.30)$$

Her dalgacık $h(x)$ ana dalgacık fonksiyonunun ölçeklenmesi ($s > 0$) ve ötelenmesi ile elde edilir. Denklem (4.30)'de verilen ikinci biçimde ise Dalgacık dönüşümünü hesaplamak için Fourier dönüşümünden faydalanmak mümkün olur.

Böylece daha hızlı ve pratik hesap yapmak mümkün olur. Burada $\sqrt{s}H(sk)$ ve $G(k)$ sırasıyla $\frac{1}{\sqrt{s}}h\left(\frac{x}{s}\right)$ ve $g(x)$ 'in Fourier dönüşümleridir [Meyers, 1993].

Burada ana Dalgacık fonksiyonu olarak Hem uzay hem de frekans bölgesinde daha iyi yerelleştirilebilir olduğu için Morlet seçilmiştir. Morlet dalgacık fonksiyonu, düzlemsel dalga modülasyonlu Gaussian dağılımı ile tanımlanır [Torrence, 1998]:

$$h(x) = \pi^{1/4} \exp(icx) e^{(-x^2/2)} \quad (4.31)$$

bunun Fourier dönüşümü ise:

$$H(k) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi}} e^{-\left[\frac{(k-c)^2}{2}\right]} \quad (4.32)$$

burada c Morlet'in sabit uzaysal frekansdır ve 5-6 civarında seçilirse Dalgacığın yönetilebilirlik (admissibility condition) şartı sağlanmış olur. Morlet Dalgacığının yerelleştirilebilirlik özelliğinden [Köysal, 2003] saçak fazı $\varphi(x) \cong \varphi(b) + (x-b)\varphi'(b)$ olarak alınabilir. Ayrıca I_0 ve V 'nin değiştiğini de varsayılırsa, girişim deseni dağılımının Fourier dönüşümü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$G(k) = I_0(b)\pi \left\{ 2\delta(k) + V(b) \left[\delta(k - m - \varphi'(b)) e^{i[\varphi(b) - b\varphi'(b)]} + \delta(k + m + \varphi'(b)) e^{-i[\varphi(b) - b\varphi'(b)]} \right] \right\} \quad (4.33)$$

Denklem (4.33) ve (4.32), denklem(4.30)'te yerine yazılacak olursa denklem (4.34) 'daki gibi girişimi deseninin sürekli Dalgacık dönüşümünün yeni bir ifadesi bulunur.

$$W(s, b) = I_0(b)V(b)\pi^{5/4}\sqrt{2s} e^{-\left[\frac{[s(m+\varphi'(b))-c]^2}{2}\right]} e^{i[\varphi(b)+bm]} \quad (4.34)$$

W 'nin genliğinin bir b öteleme noktasında tepe (ridge) değerine sahip olması yani ekstremumunun olması için genliğin türevi o noktada sıfır olmalıdır. Böylece bu tepe noktasındaki ölçekleme katsayısının ifadesi,

$$s_{\max}(b) = \frac{c + \sqrt{c^2 + 2}}{2(m + \varphi'(b))} \quad (4.35)$$

olarak verilebilir [Dursun 2004].

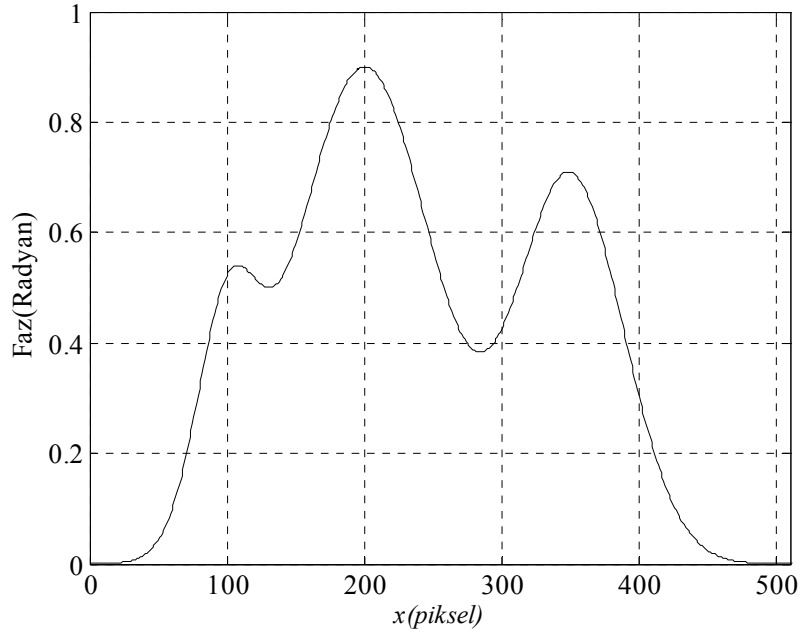
Böylece faz dağılımının türevi elde edilmiş oldu. Bununda sayısal integrasyonla faz bilgisine rahatlık dönüştürülebilirdiği deneysel ve benzetim çalışmalarıyla görülmüştür. Böylece saçak deseni, satır satır işlendiğinde faz dağılımını herhangi bir faz düzletme işlemine ihtiyaç duymadan elde eden bir yöntem elde edilmiş olur.

4.4. Sürekli Dalgacık Dönüşüm Profilmeteri için Deneysel Çalışmalar

Öncelikle bir benzetim çalışması ile Dalgacık Faz (DF) ve Morlet Dalgacık Eğim (MDEY) yöntemleri test edilip karşılaştırılacaktır. x eksenine göre tanımlanan bir test faz fonksiyonu,

$$\varphi(x) = c_1 \exp\left(-\frac{(x-100)^2}{s_1}\right) + c_2 \exp\left(-\frac{(x-200)^2}{s_2}\right) + c_3 \exp\left(-\frac{(x-350)^2}{s_3}\right) \quad (4.36)$$

olarak tanımlanabilir. Burada $c_1=0.4$, $c_2=0.9$, $c_3=0.7$, $s_1=1000$, $s_2=5000$, $s_3=3000$ değerlerine göre bu faz dağılımı hesaplanır ve $m=1$ rad/piksel, $V_0=1$, $I_0=1$ alınarak örnek bir test faz fonksiyonu elde edilmiştir. Bu test fonksiyonunun grafik gösterimi



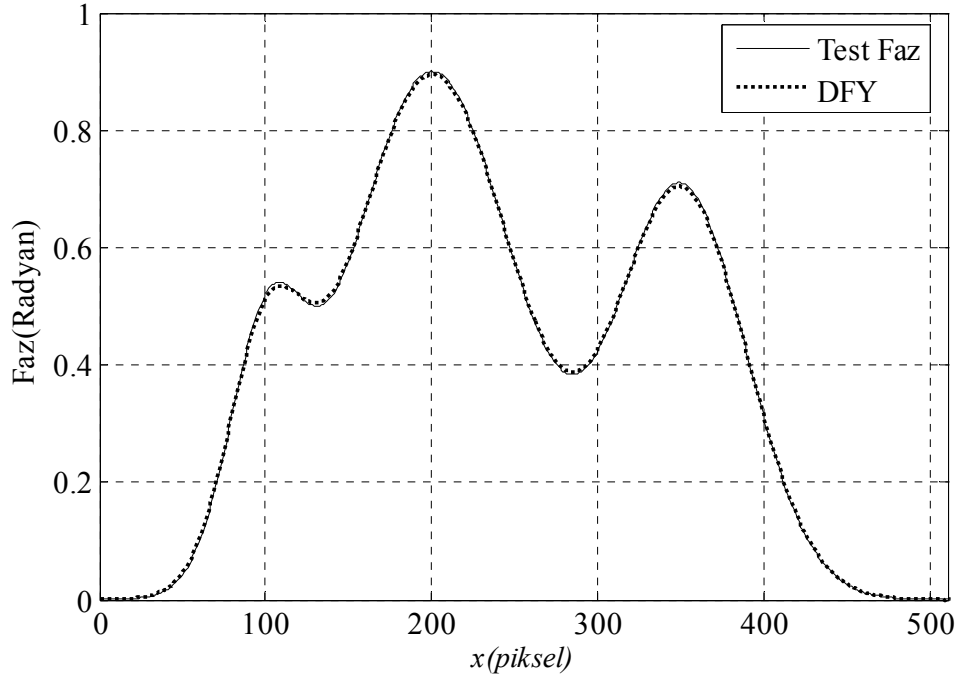
Şekil 4.8 Test faz fonksiyonu dağılımı.

x eksenine göre değişim gösteren sinüzoidal saçak dağılımı;

$$g(x, y) = I_0(x, y) [1 + V(x, y) \cos(mx + \varphi(x, y))] \quad (4.37)$$

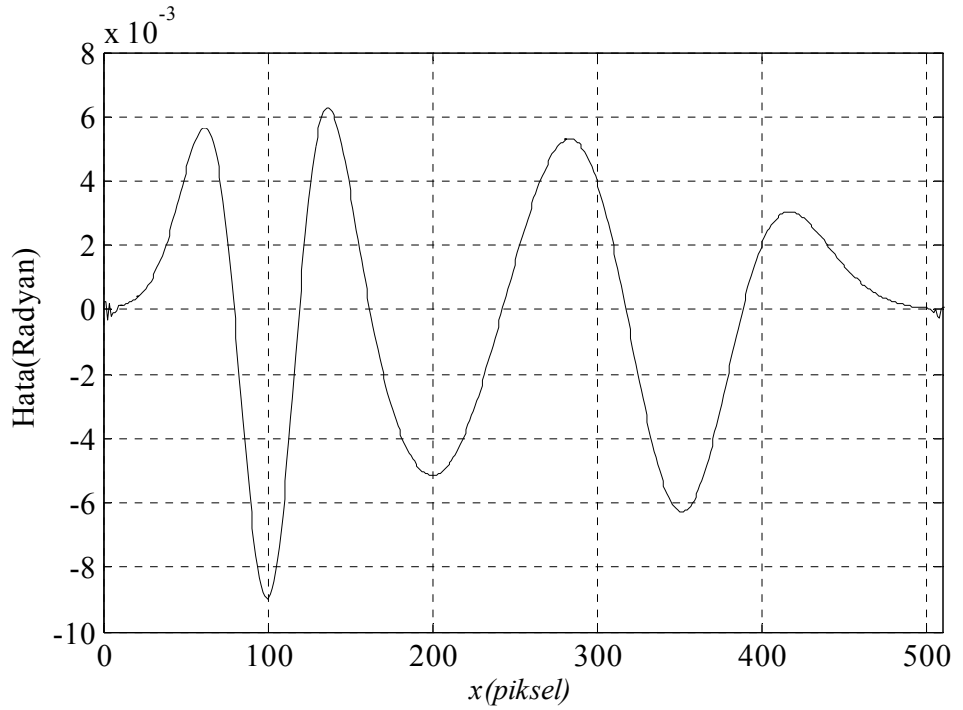
denklemleri ile ifade edilebilir. Bu denklemde $y=1$ kabul edilip $\varphi(x, y)$ yerine denklem (4.36) ,de verilen test fonksiyonu yerine konursa test faz fonksiyonu, saçak dağılımına içine yerleştirilmiş olur.

Öncelikle Dalgacık Faz Yöntemi (DFY) ile saçak deseninden test faz fonksiyonu yeniden elde edilmiştir. Şekil 4.9’da DFY ile bulunan faz ile test fazı karşılaştırıldığında sonucun uyumlu olduğu görülmektedir.



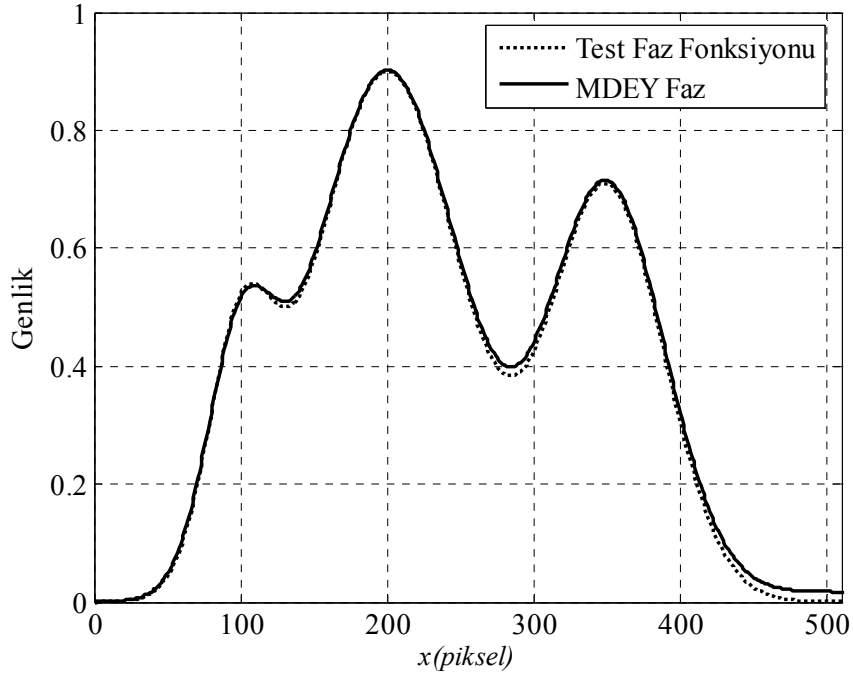
Şekil 4.9 DFY ile elde edilen faz dağılımı.

DFY ile bulunan faz dağılımının, test fazına göre hata dağılımı Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Burada en büyük hata % 0,5 seviyelerindedir.



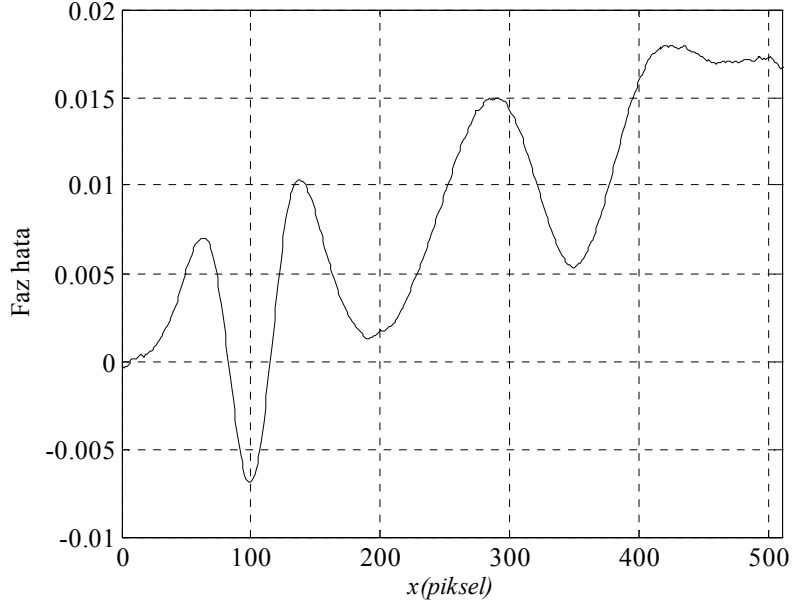
Şekil 4.10 DFY'nin faz hata dağılımı.

Aynı test faz fonksiyonu ile elde edilen saçak dağılımı MDEY ile analiz edildiğinde elde edilen faz dağılımı Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi sonuç test faz dağılımı ile uyumludur.



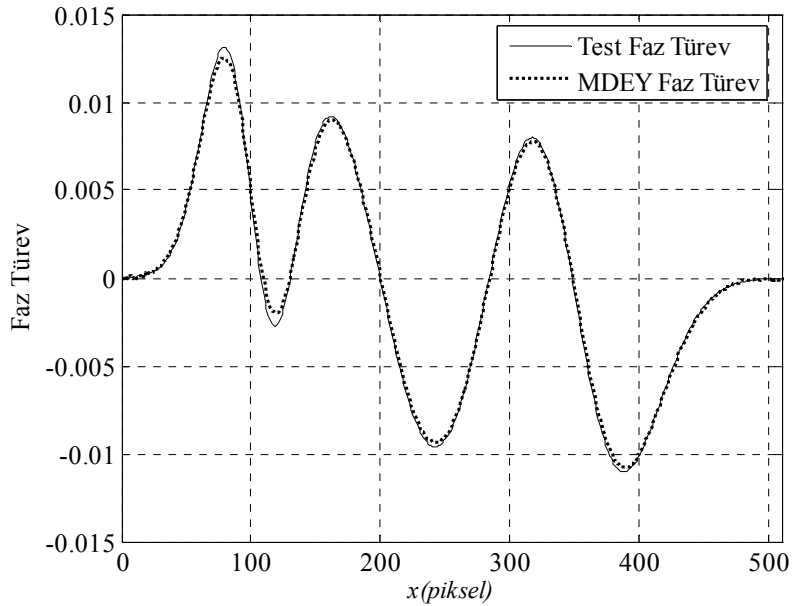
Şekil 4.11 MDEY ile elde edilen faz dağılımı.

MDEY ile bulunan faz dağılımının test faz fonksiyonuna göre hata dağılımı Şekil 4.12’de verilmiştir. Bu hata dağılımı incelendiğinde hatanın işaretin sonuna doğru artış eğiliminde olduğu görülecektir. Bu artışın sebebi integral işlemidir. Sonuç kısmında bu hata irdelenecektir.



Şekil 4.12 MDEY hata dağılımı.

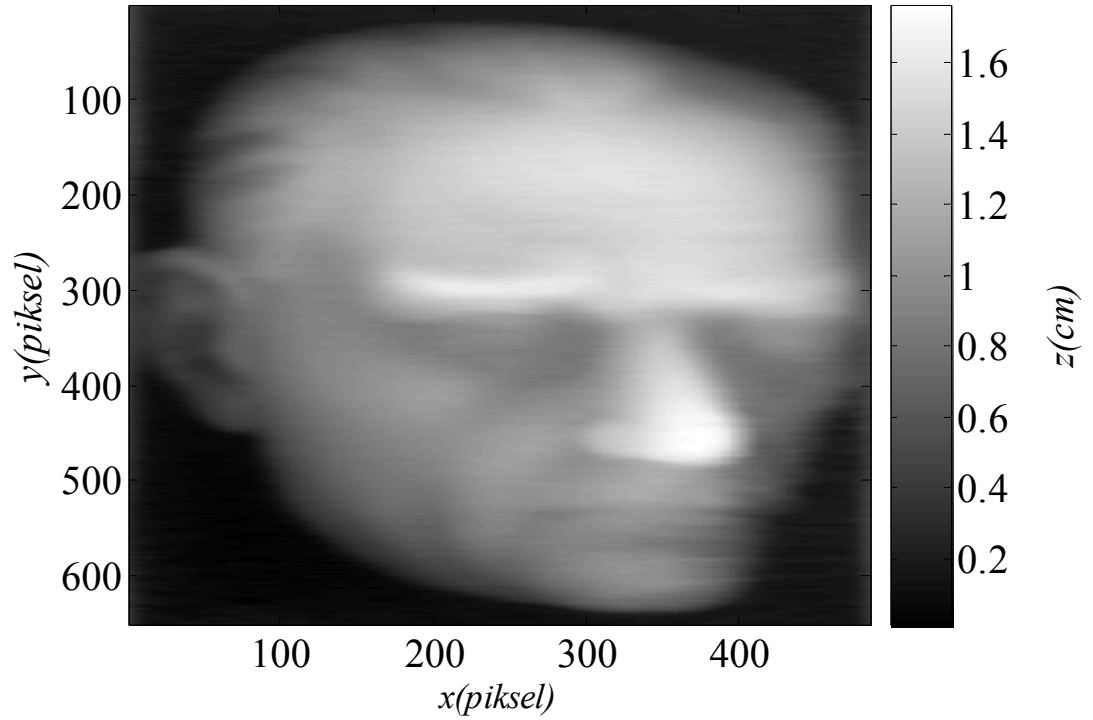
Daha önce belirtildiği gibi MDEY üç-botulu profile hesaplarken öncelikle fazın türevini hesaplamakta buradanda integral işlemi ile faz elde edilmektedir. Test faz fonksiyonunun türevi ile MDEY ile bulunan faz türevi karşılaştırıldığında çok iyi bir uyum görülmektedir. Şekil 4.13’de bu uyum görülmektedir.



Şekil 4.13 MDEY ile bulunan faz türev dağılımı.

3.bölümde kullanılan deneysel doğrulama çalışması DFY ve MDEY için bu bölümde tekrarlanmıştır. Atatürk kabartması üzerinde Şekil 3.1’te verilen optik düzenek ile oluşturulan yapay girişim deseni DFY ve MDEY ile analiz edilerek (3.18) denkleminde göre profil hesaplanmıştır. Kamera ile referans düzlemi, L , 174 cm, projektör ile sayısal kamera (Sony DSC-P2, 1600x1200 piksel) mesafe, d , 14 cm olarak ayarlanmıştır.

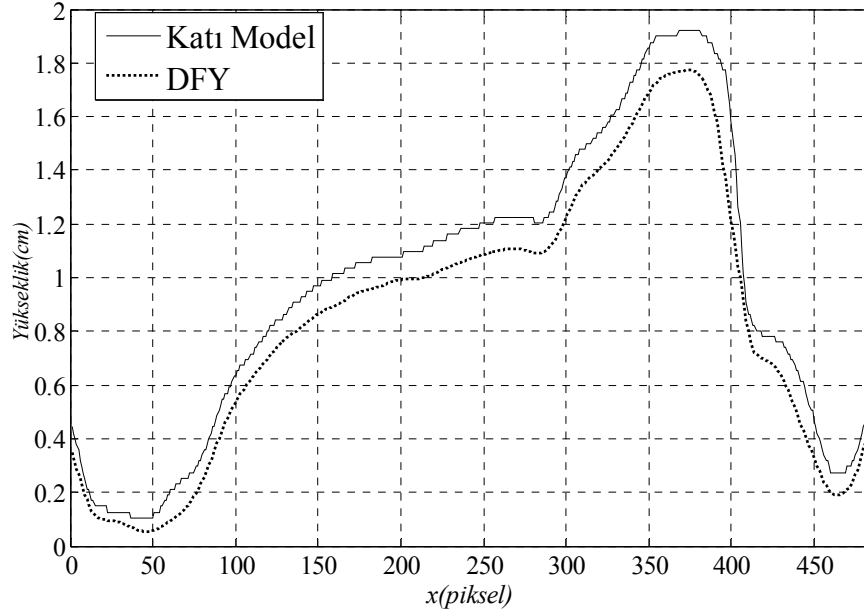
Atatürk kabartmasının DFY ile elde edilen üç-boyutlu profili Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



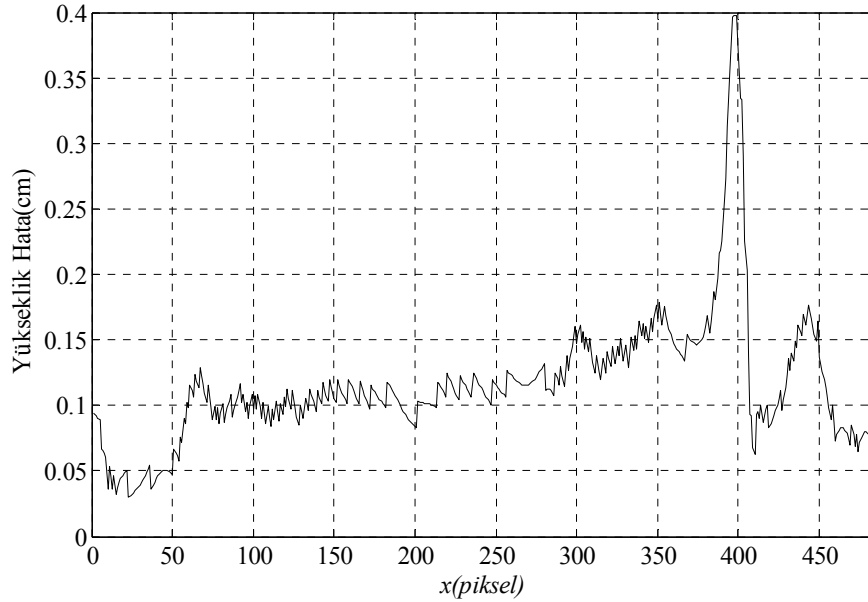
Şekil 4.14 DFY ile elde edilen Atatürk kabartması profili.

3. bölümde Atatürk kabartmasının Scirocco-nt marka scirocco 091007 modeli üç boyutlu katı model ölçme cihazı ile elde edilen belirli bir kesitinin yükseklik değişimi ölçümü ile DFY ve MDEY ile bulunan profillerde karşılık gelen kesiti ($y = 450$.piksel kesiti) karşılaştırılmıştır. Şekil 4.15’de DFY, Şekil 4.18’de ise MDEY ile bulunan kesitlerin katı model ile karşılaştırılmaları gösterilmiştir.Şekil 4.16 ise DFY’nin katı modele göre yükseklik hata dağılımı verilmiştir. Sonuçlar FDP

ile benzerlik göstermektedir. Yüksekli değişiminin büyük olduğu yerlerde hatanında arttığı görölmektedir.

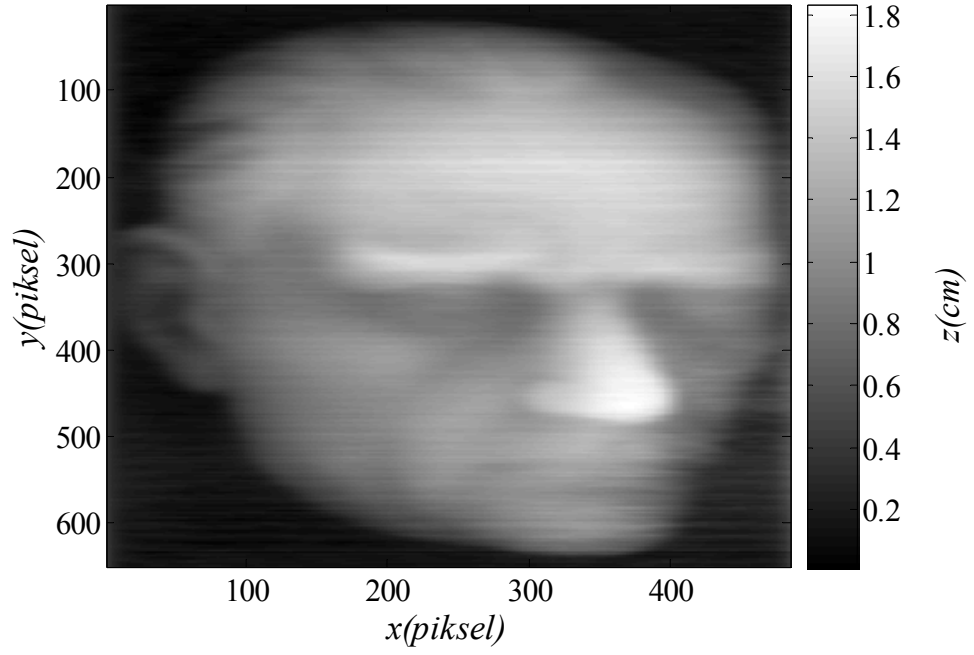


Şekil 4.15 DFY ve katı modelin $y=450$ piksel için profilleri.

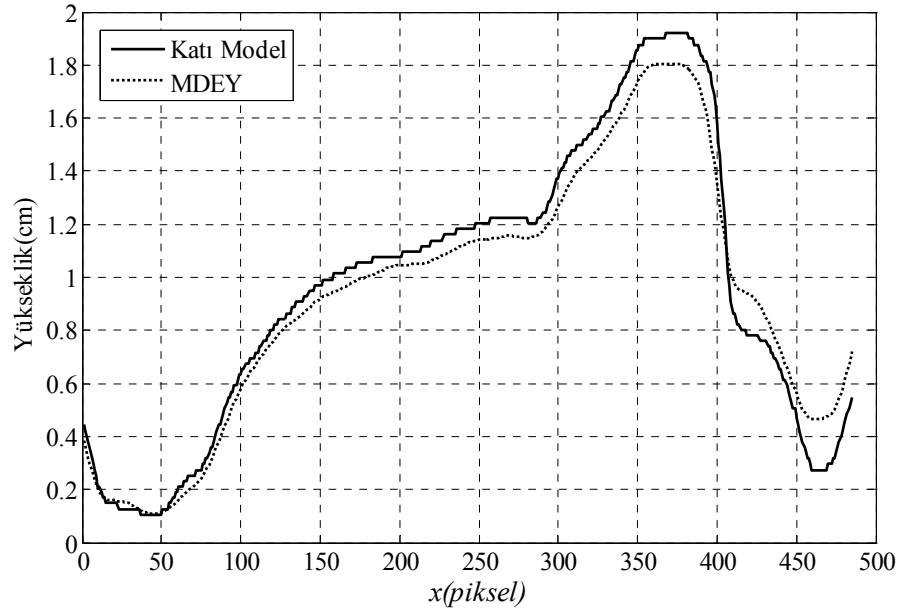


Şekil 4.16 DFY'nin katı modele göre hata dağılımı.

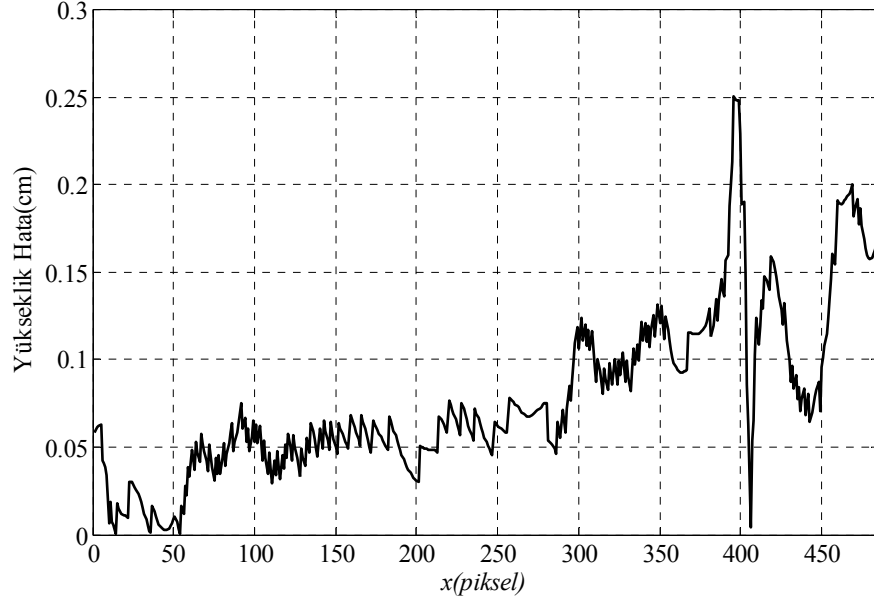
MDEY ile elde edilen Atatürk kabartmasının profili Şekil 4.17'de verilmiştir. Şekil 4.19'da ise $y=450$.pikseldeki profil kesitinin katı modele göre hata dağılımı gösterilmiştir. Sonuçlar benzetim çalışmasındaki hata dağılımlarına benzemektedir. Hata integral işlemi yüzünden kesitin sonuna doğru artmaktadır.



Şekil 4.17 MDEY ile elde edilen Atatürk kabartması profili.



Şekil 4.18 MDEY ve kıta modelin $y=450$ piksel için profilleri



Şekil 4.19 MDEY'nin katı modele göre hata dağılımı.

5. STOCKWELL DÖNÜŞÜMÜ ile ÜÇ-BOYUTLU ÖLÇME

Stockwell dönüşümü, Dalgacık dönüşümünün belirli bir amaca göre değiştirilmiş bir biçimidir. Daha önce de belirtildiği gibi Fourier ve Dalgacık dönüşümü, ışık girişimi esasına göre çalışan üç-boyutlu ölçüm sistemlerinde kullanılmaktadır [Takeda, 1983; Dursun, 2004]. Dalgacık dönüşümünde, hem girişim deseni fazı kullanılarak (DFY) hemde şiddet dağılımı kullanılarak (MDEY) yükseklik değişimi elde edilebiliyordu. Ancak bazen boyutları tespit edilcek cismin, profil değişimi çok ayrıntılı veya hem yavaş hemde hızlı eğimlere sahip olabilmektedir. Dalgacık dönüşümünün ileri bir türü olan Stockwell dönüşümü frekans bölgesi dinamik aralığı artırarak frekans bileşenlerini birbirinden çok başarılı bir şekilde ayırabilmektedir [Stockwell, 1996].

5.1. Yeni Bir Üç Boyutlu Ölçme Yöntemi: Stockwell Dönüşüm Profilmetri

Saçak deseninin bir boyutlu Stockwell dönüşümü, bir ana dalgacık fonksiyonu belirlenerek hesaplanmış sürekli Dalgacık dönüşümü (SDD) ile bir faz düzeltme faktörünün çarpılması ile elde edilir [Stockwell, 1996].

$$S(x, f, b) = e^{2\pi i f \cdot b} \cdot W(x, a, b) \quad (5.1)$$

S dönüşümü için özel olarak tanımlanmış Dalgacık dağılımı:

$$c(y, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-2\pi i f \cdot y} \cdot e^{-\frac{y^2 f^2}{2}} \quad (5.2)$$

ile verilir. Bu dağılım frekans f ve öteleme b parametresine bağlı olarak yeniden ifade edilirse:

$$c(b-y, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-2\pi i f \cdot (b-y)} \cdot e^{-\frac{(b-y)^2 f^2}{2}} \quad (5.3)$$

Yapay girişim deseni $g(x, y)$, denklem (4.14)'de verildiği gibi faz modülasyonlu sinüzoidal işaret dağılımı şeklinde ifade edilebilir. Daha önce de belirtildiği gibi denklem (4.15) 'de verilen yükseklik değişimi ile girişim deseni frekansı arasındaki ilişki sağlanmalıdır. Saçak deseni her bir satırına S-dönüşümü uygulanırsa aşağıdaki gibi bir ifade oluşur.

$$S(x, f, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \cdot \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(b-y)^2 f^2}{2}} \cdot e^{-2\pi i f \cdot y} \cdot dy \quad (5.4)$$

S-dönüşümünün her bir öteleme değerindeki tepe noktasının fazı hesaplanırsa cismin yükseklik değişimi ile modüleli düzeltilmemiş bir faz dağılımı elde edilir:

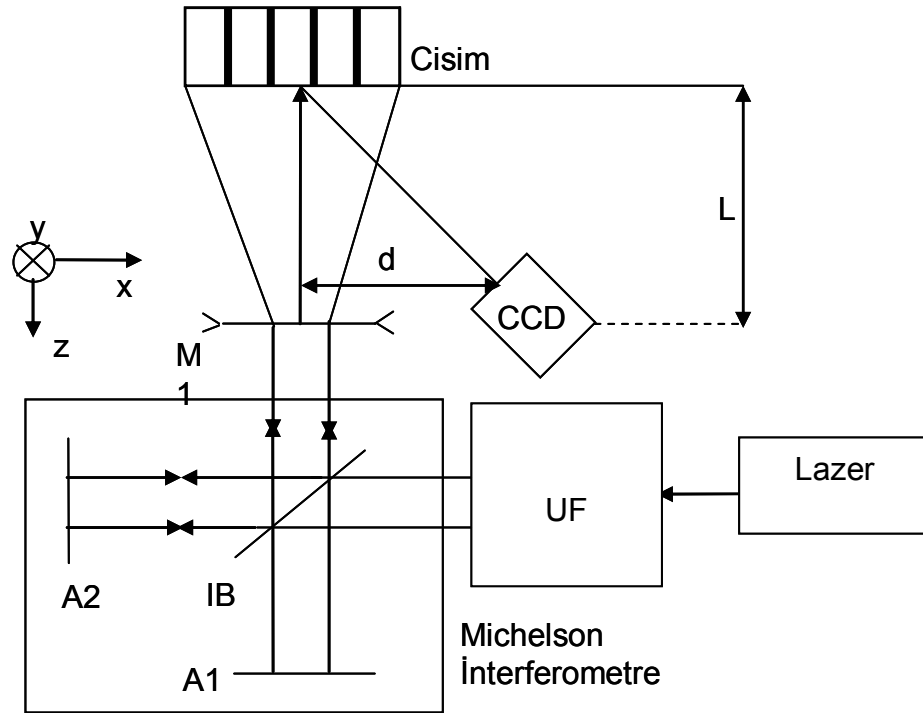
$$\Phi(x, b) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Sanal}(S(x, f, b))}{\text{Reel}(S(x, f, b))} \right) = mb + \varphi(x, b) \quad (5.5)$$

Burada $\text{Sanal}(S(x, f, b))$ ve $\text{Reel}(S(x, f, b))$, S-dönüşümünün sanal ve gerçel kısımlarıdır. Bu düzeltilmemiş faz dağılımına denklem 3.16 ve 3.18'deki işlemler uygulanarak S-dönüşümü ile üç boyutu profil elde edilmiş olur. Bu yöntem Stockwell Dönüşüm Profilmetri, SDP, olarak isimlendirilecektir.

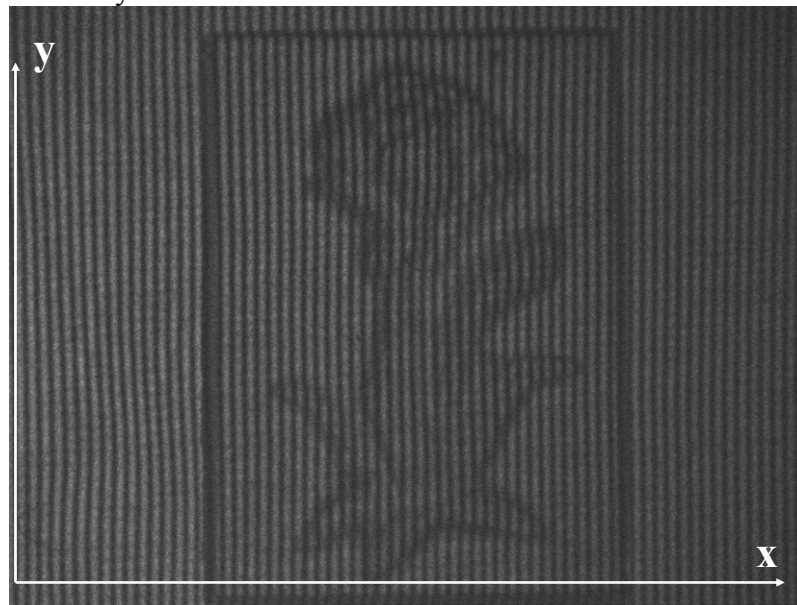
5.2. Stockwell Dönüşüm Profilmetri için Deneysel Doğrulama Çalışmaları

Stockwell dönüşüm profilmetriyi doğrulamak için, saçak için Michelson interferometresi ile girişim deseni oluşturan bir optik düzenek önerilmiştir (Şekil 5.1). Bu düzenek Şekil 3.1'de verilen sayısal projeksiyonun ürettiği yapay girişim desenini kullanan düzeneğe benzerdir. Burada farklı olarak girişim deseni ışın bölücü tarafından iki kola ayrılan lazer ışığının optik yol farkı yüzünden oluşan girişim deseni kullanılmıştır. Burada kullanılan ışık kaynağı, $\lambda=623$ nm dalga boyuna sahip 2mW gücünde bir He-Ne lazerdir. Test cismi olarak en yüksek noktası referans düzlemine göre 1,72 cm olan çiçek kabartması kullanılmıştır. Cisim üzerine

yansıtılan girişim deseni 576x768 piksel çözünürlüğe sahip CDD sensörlü bir sayısal kamera ile kaydedilerek SDP ile analiz edilerek üç-boyutlu profil elde edilmiştir.

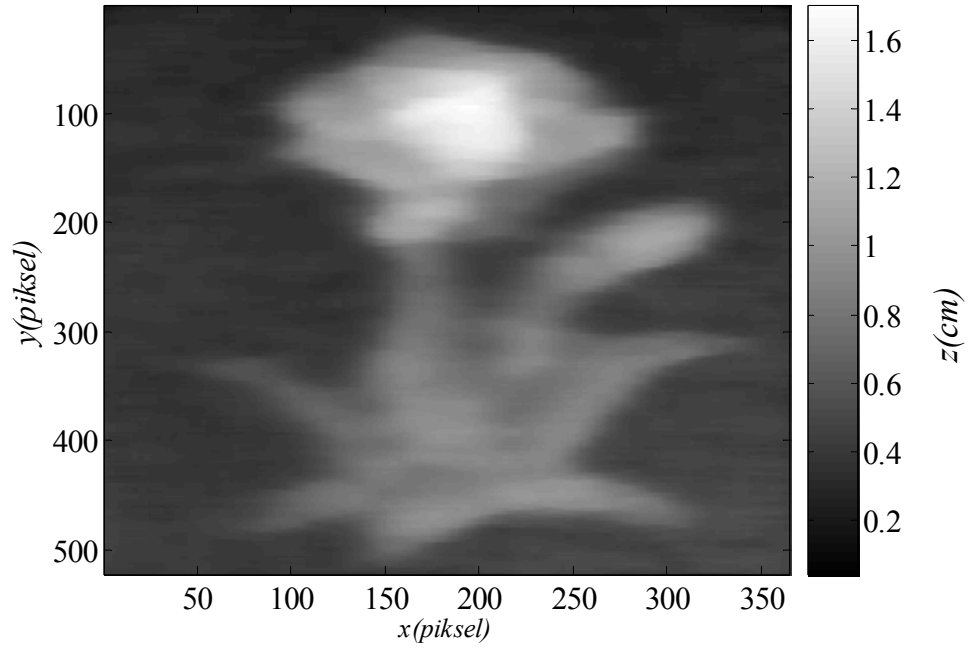


Şekil 5.1 Deneyel düzenek. A1, A2: aynalar, IB: Işın bölücü, M1: Mercek, CCD: kamera ve UF: Uzaysal filtre

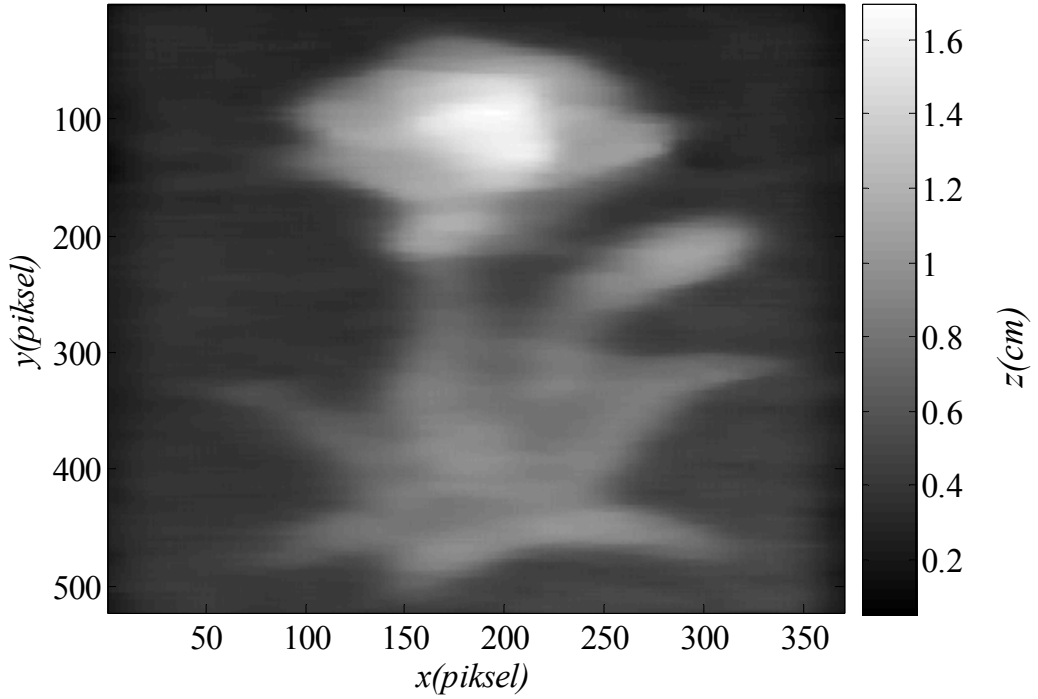


Şekil 5.2 Çiçek kabartması üzerinde girişim deseni.

Şekil 5.2’de deney cismi üzerinde oluşturulan girişim deseni görülmektedir. Bu desen SDP ve DFY ile analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 5.3’te SDP ve Şekil 5.4’te ise DFY ile elde edilen üç-boyutlu-profil sonuçları verilmiştir.



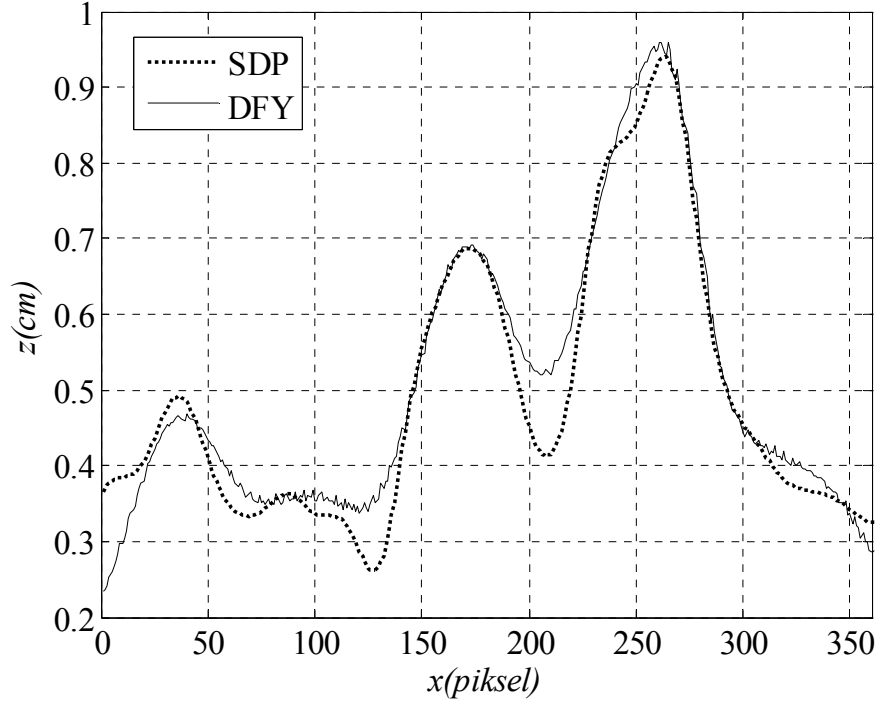
Şekil 5.3 SDP ile elde edilen üç-boyutlu profil.



Şekil 5.4 DFY ile elde edilen üç-boyutlu profil.

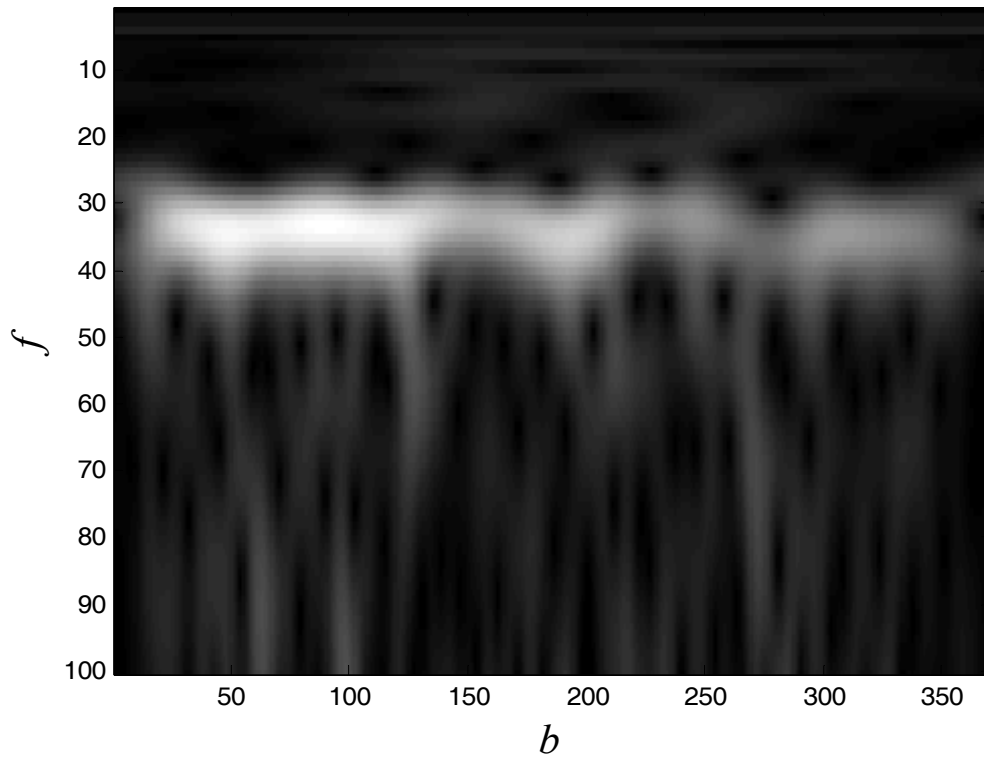
SDP ve DFY ile elde edilen üç-boyutlu profillerin kesitleri karşılaştırıldığında karşılaştırıldığında SDP'nin çok daha az gürültülü ve cismin ince ayrıntılarını ortaya

koyacak sonuçlar verdiği görülmüştür. Şekil 5.5'te $y = 250$. piksel için SDP ve DFY yöntemleri ile hesaplanan profil kesitleri görülmektedir.

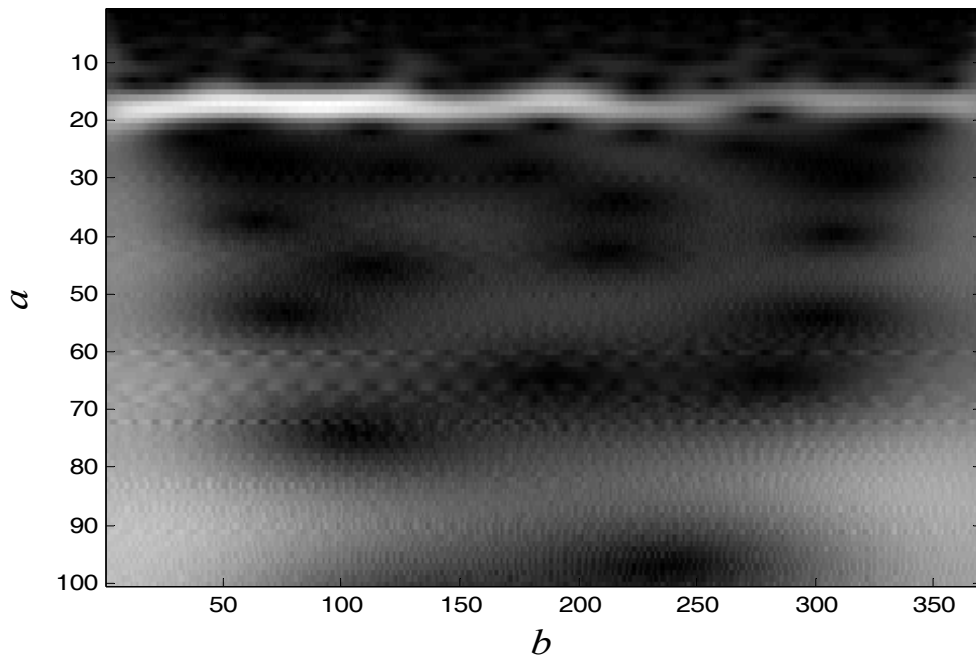


Şekil 5.5 DFY ve SDP ile hesaplanan $y=250$.piksel kesitinin profili.

4.bölümde gösterildiği gibi Dalgacık dönüşümü işareti konuma veya zaman göre her noktada ölçekleyerek, işaretin içeriğindeki frekans bileşenlerini tespit etmektedir. Dalgacık dönüşümünde ölçekleme değişkeni frekans uzayını temsil ederken Stockwell dönüşümünde ise frekans uzayı konumla birlikte doğrudan gösterilebilmektedir. Şekil 5.2'de verilen girşim deseninin $y = 250$.piksel için bir satırının hem Morlet Dalgacık dönüşüm hemde Stockwell dönüşümü karşılatırmak için Şekil 5.6ve Şekil 5.7 gösterilmiştir. Morlet Dalgacık dönüşümü her ne kadar Fourier dönüşümüne göre daha iyi bir frekans bileşenlerini birbirinden ayırma şansı versede şekillerden de örülebileceği gibi Stockwell dönüşümünde konuma göre frekans uzayında daha geniş bir band içerisinde bileşenler birbirinden kolaylıkla ayrılabilir. Bu yüzden konuma göre Stockwell dönüşümü alınan bir işaretin, frekans bileşenlerinin birbirinden kolaylıkla ayrılabilirliği söylenebilir.

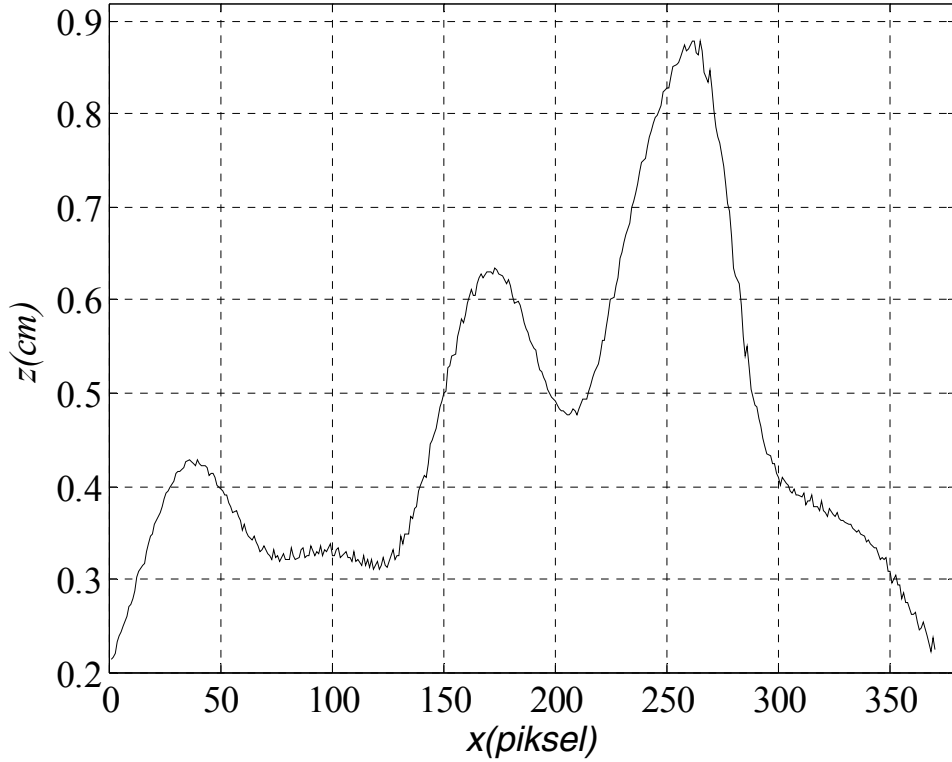


Şekil 5.6 Girişim deseninin 250 satırının Stockwell dönüşümünün genlik dağılımının frekans konum gösterimi.

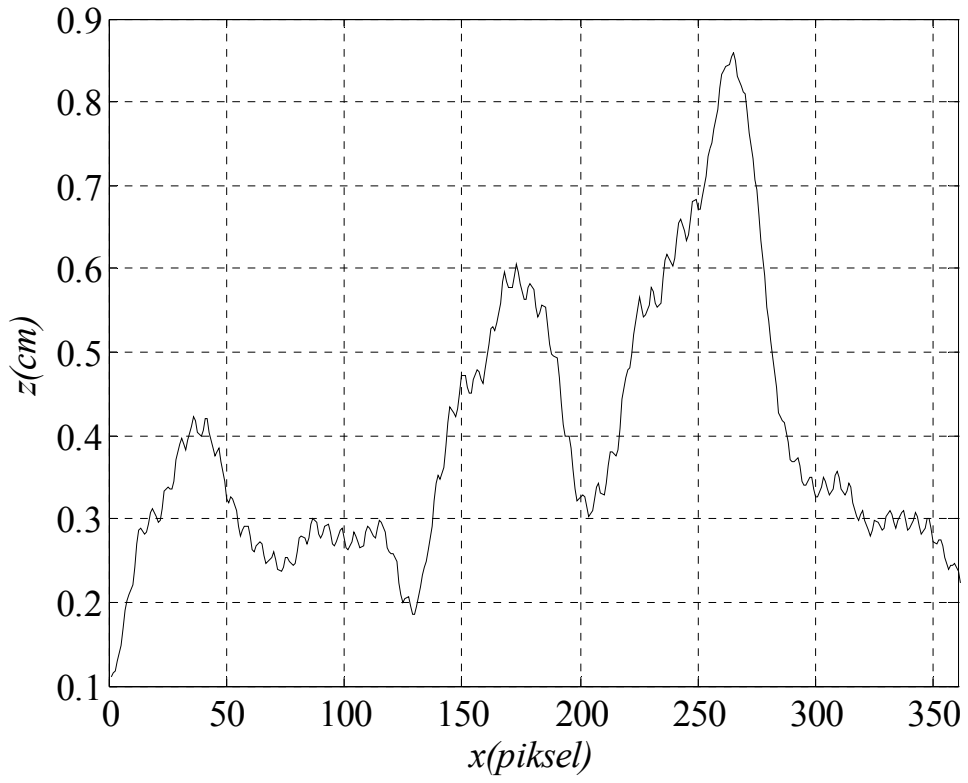


Şekil 5.7 Girişim deseninin 250 satırının 100 ölçeklemeli CWT dönüşümünün genlik dağılımı.

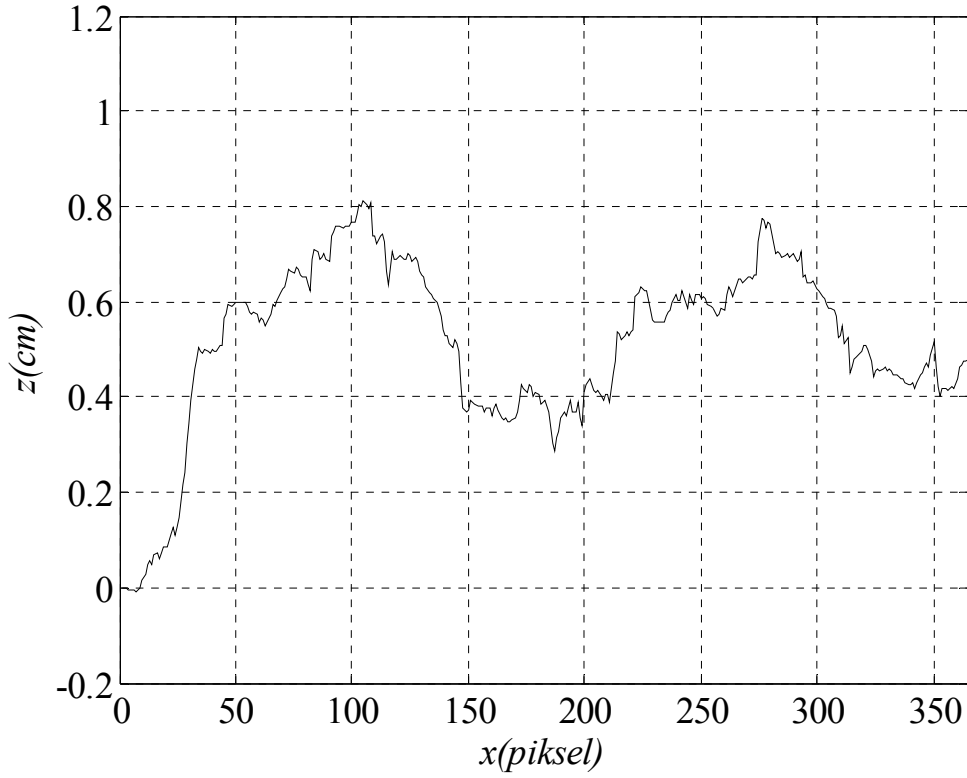
Bu tezde ana Dalgacık fonksiyonu olarak Morlet dalgacığı kullanılmıştır [Meyers, 1993]. Morlet dalgacığı kullanılarak gerçekleştirilen DFY profil hesaplama sonuçları SDP'nin daha başarılı olduğunu göstermiştir Ancak burada ana dalgacık fonksiyonları değiştirilerek karşılaştırma yapılmamıştır. Morlet, Gaussian, b-spline ve Shannon ana dalgacık fonksiyonları sırası ile (4.18), (4.19), (4.20) ve (4.21) denklemlerinde verilmiştir. Bu ana dalgacık fonksiyonları kullanılarak Şekil 5.2'de verilen girişim deseni DFY'ne göre analiz edilerek $y = 250$. piksel satırının profil kesiti hesaplandığında Morlet dalgacık fonksiyonun en başarılı sonuçları verdiği grlmektedir.



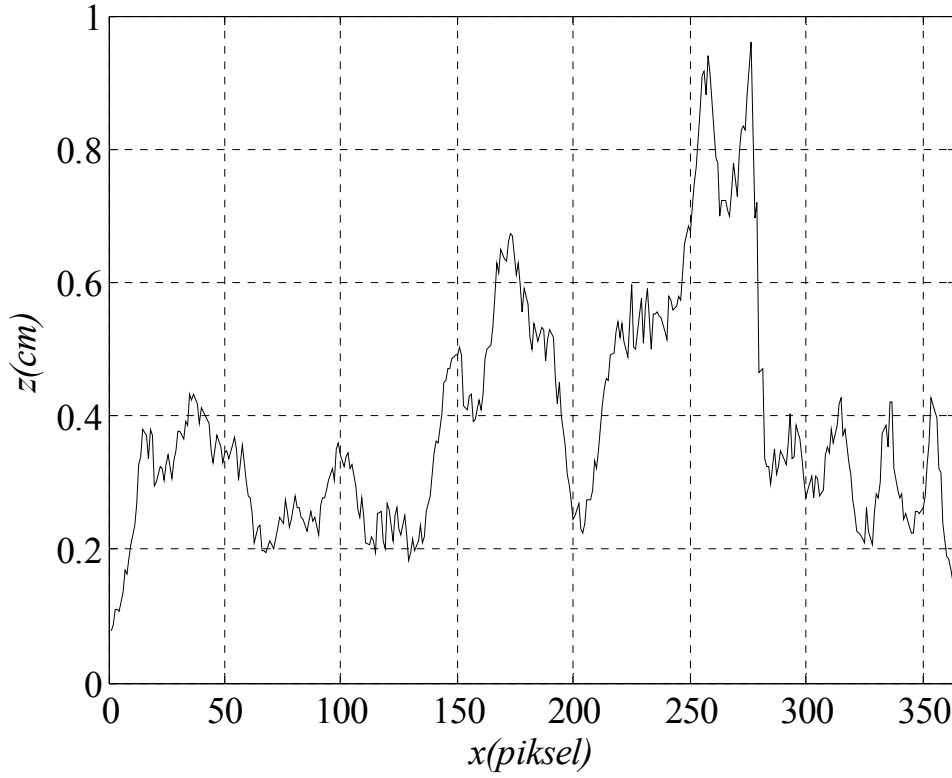
Şekil 5.8 Morlet dalgacığı ile DFY 250.satır profil kesiti.



Şekil 5.9 Gaussian dalgacı ile DFY 250.satır profil kesiti.



Şekil 5.10 b-spline dalgacı ile DFY 250.satır profil kesiti.

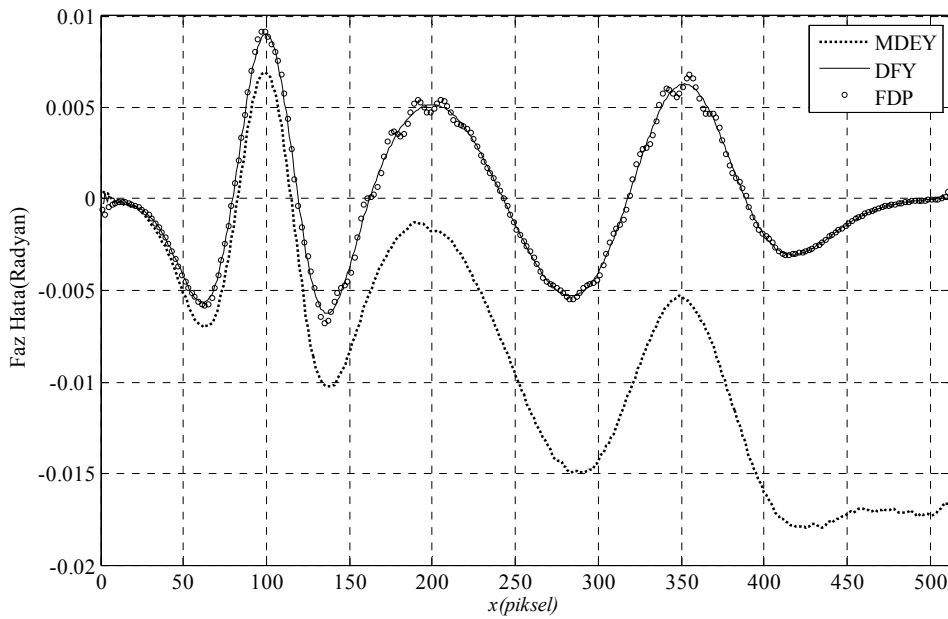


Şekil 5.11 Shannon dalgacığı ile DFY 250.satır profil kesiti.

SDP'nin faz düzeltme işlemine ihtiyaç duyan faz belirleme ve profil hesaplama yöntemleri içerisinde en başarılı yöntem olduğu görülmüştür [Dursun, 2008]. Ayrıca gürültüyü ve istenmeyen faz geçişlerini ana profil fazından başarılı bir şekilde ayırdığından faz düzeltme işleminin bozucu etkilerine karşı da daha az duyarlıdır.

6. SONUÇLAR

Öncelikle FDP, DFY ve MDEY yöntemlerinin daha önce yapılan benzetim çalışmalarında elde edilen faz işaretlerinin hata dağılımları Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

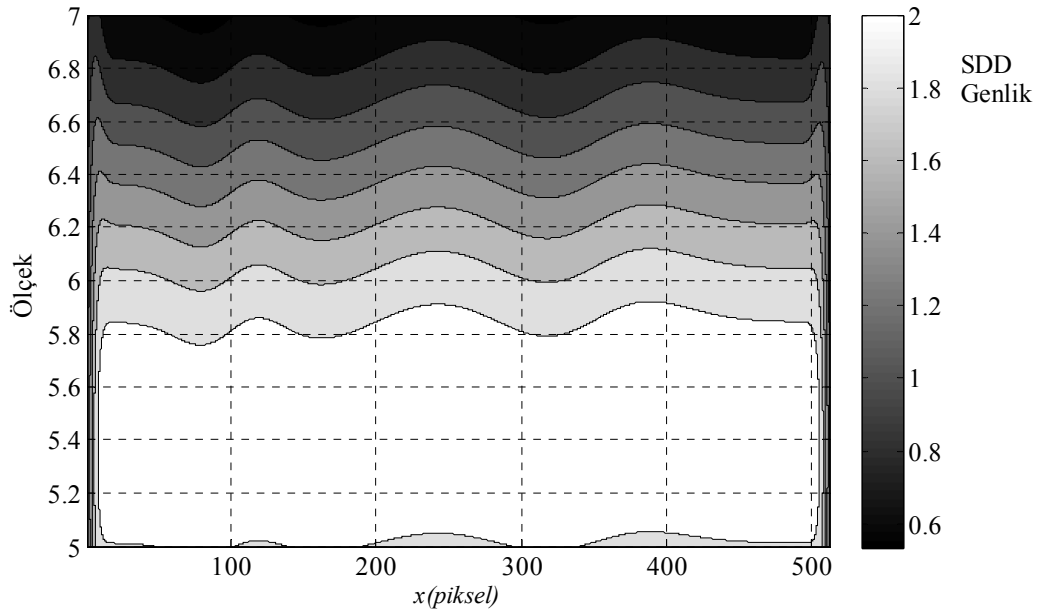


Şekil 6.1 Test faz fonksiyonuna göre hata dağılımları.

MDEY yönteminin faz düzeltme gerektirmemesine rağmen, faz dağılımını hesaplamak için görüntünün şiddet dağılımından faydalandığı için çevresel gürültülere açıktır. Ayrıca öncelikle faz dağılımının türevi hesaplanmakta ve buradan da integral işlemi ile gerçek faz bilgisi hesaplanmaktadır. Bu yüzden integral işleminden kaynaklan hatada işin işine girmektedir. Ancak gerçek ölçüm sistemlerinde faz düzeltme işlemlerinin yol açacağı sorunlardan kaçınmak için önemli bir alternatif yöntemdir.

DFY, faz düzeltme işlemine gerek duyması ve doğrudan faz bilgisini elde etmesi bakımından FDP ile benzer yapıdadır. Benzetim çalışmalarında elde edilen sonuçlar incelendiğinde DFY'nin FDP'ye göre daha az hata verdiği görülmektedir. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi ölçüleme değişkeni artırılıp azaltılarak Dagacık

dönüşümü ile işaretin frekans davranışı çok hassas bir şekilde tespit edilebilir. Bu yüzden Dalgacık dönüşümü yapısı gereği doğal bir gürültü filtresi olarak çalışır. Sonuçolarak benzetim çalışmalarına göre üç yöntemin performansları $DFY > FDP > MDEY$ olarak sıralanabilir.

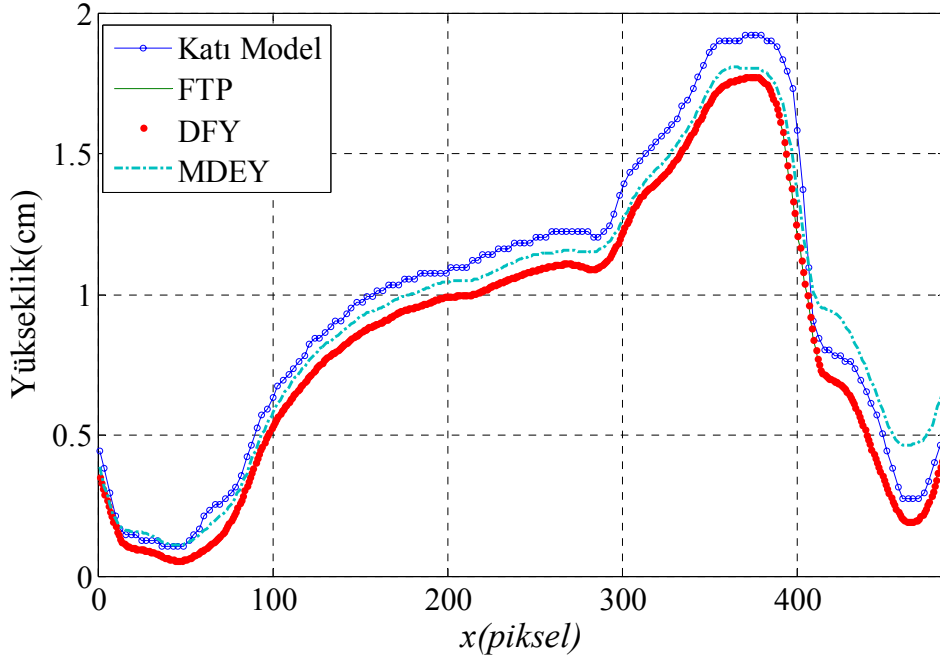


Şekil 6.2 SDD'nin konuma-ölçek dağılımı.

Deneyisel olarak bu üç yöntemin karşılaştırılması ve önerile eğim MDEY'nin başarılı bir şekilde çalıştığının ortaya koyabilmek için laboratuvar ortamında Şekil 3.1 de verilen ölçüm düzeneği kurulmuştur. Referans suni girişim deseni bilgisayar ortamında hesaplanıp görüntü biçiminde kaydedilerek LCD projektör üzerinden cisim üzerine yansıtılmış ve faz modülasyonlu girişim görüntüsü sayısal CCD kamera vasıtası ile kaydedilmiştir.

DFY ve FDP ile elde edilen faz dağılımları, faz düzeltme işleminden geçirilmiş, MDEY'den elde edilene ise herhangi bir faz düzeltme işlemi uygulanmamıştır. Bu faz dağılımları denklem (3.18)'a göre yükseklik dağılım bilgisine çevrilmiştir. Sonuçlar birbirine çok yakın çıkmakla birlikte, MDEY'de, üç boyutlu profil dağılımını hesaplamada kullanılan faz dağılımı direkt işaretin genliğinden hesaplandığı için ortam gürültülerine karşı daha hassas olduğu görüldü. Ancak faz düzeltme gereksinimini ortadan kaldırıyor olması göz önünde bulundurulduğunda son derece sağlıklı çalışan bir algoritma olduğu da tespit edildi.

Ayrıca seçilen test cisminde en hızlı yükseklik değişimi satırı seçilmesine rağmen sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir. Bu üç yöntemin $y = 250$ pikseldeki profil kesitleri ile dokunma problu ölçüm cihazından elde edilen aynı kesit profili karşılaştırmış ve Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 $y=250$ satır profil kesitlerinin karşılaştırılması.

Sonuçlar uyumludur ve en yüksek hata MDEY olmasına rağmen profil hesaplama işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda da DFY e iyi performansı gösterdiği için tezde ikinci yeni yöntem olarak önerilen SDP ile karşılaştırılmıştır. SDP yöntemi DFY’ne göre hem filtreleme hemde profili ayrıntılı olarak elde bakımından çok daha başarılı çıkmıştır. Sonuçlardan açıkça görülebileceği gibi bu tezde incelenen yöntemler içerisinde en başarılı olanı SDP ancak faz düzeltme gibi her zaman gerçekleşmesi mümkün olmayacak bir işleme ihtiyaç duymaması bakımından ise en gerçekçi olanı MDY’dir.

7. YORUMLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada iki değişik düzenekle girişim deseni oluşturulmuş ve görüntüler önerilen işaret işleme algoritmaları ile analiz edilmiştir.

Birinci düzenekte sayısal olarak hesaplanarak bilgisayar ortamında görüntüye dönüştürüldükten sonra LCD projektör ile cisim üzerine düşürülen girişim deseni FDP, DFY ve MDEY yöntemleri ile analiz edilmiştir. FDP ve WP'nin neredeyse aynı üç boyutlu profili hesapladığı, MDEY'nin ise biraz daha gürültülü sonuç verdiği gösterilmiştir. Bunun sebebini MDEY'nin dalgacık dönüşümünün direkt genliğini kullanmasıdır. Genliğin ise gürültüye karşı daha duyarlıdır. Dalgacık fonksiyonu olarak kompleks Morlet kullanılarak tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. MDEY'de, ölçekleme artırılınca hatanın azaldığı görülmüş ancak bu da hesaplama süresini artırmıştır. Ancak sonuç olarak faz düzeltme işlemine girmeden üç boyutlu profil hesaplayan bir yöntem ortaya konmuştur.

İkinci düzenekten elde edilen görüntüler DFY ve SDP yöntemleri ile analiz edilmiş ve SP'nin son derece başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Dalgacık ve Stockwell dönüşümlerinin genlik dağılımı incelendiğinde görülmüştür ki Stockwell dönüşümünün analiz edilen işaretin frekans bileşenlerini ayırmada çok daha başarılıdır. Daha önce de ifade edildiği gibi bu bilgi literatürde buna paraleldir. Böylece önerilen üç boyutlu profil elde etme yöntemleri içerisinde en başarılısının SDP olduğu gösterildi. Ancak SDP'nin de FDP ve DFY gibi faz düzeltmeye ihtiyacı olduğu unutulmamalıdır.

Gelecek çalışmalarda

1) Burada elde edilen yöntemlerin holografik düzeneklere uygulanması ve yüksek performanslı holografik üç boyutlu ölçme ve görüntüleme sistemlerinin gerçekleştirilebilir.

2) Önerilen ölçüm yöntemleri otomatik hale getirilerek ölçüm cihazı olarak sunulabilir.

3-) Saçak desenini cismin yükseklik değişimine göre adaptif ayarlayabilen bir ölçüm sistemi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Afifi M., Fassi-Fihri A., Nassim K., Sidki M. and Rachafi S., "Paul Wavelet-Based Algorithm for Optical Phase Distribution Evaluation", *Optics Communications*, 211, pp. 47-51, 2002.
- [2] Assous S., Humeau A., Leger P., Boccalon H., L'huillier J. P., "Time-frequency analysis of laser Doppler flowmetry signals computed thanks to the S-transform on healthy subjects and on patients suffering from peripheral arterial occlusive diseases", *Control, Communications and Signal Processing, First International Symposium* pp. 41- 44, Cedex, France, 2004
- [3] Asundi A., Zhou W. S., "Unified calibration technique and its applications in optical triangular profilometry", *Appl Opt*, vol. 38(16), pp. 3556–3561, 1999a.
- [4] Asundi A, Zhou W. S., "Mapping algorithm for 360-deg profilometry with time delayed integration imaging", *Opt Eng* vol. 38-2, pp. 339–344,1999b.
- [5] Besi P. J., et al. *Active optical image sensors. In: Sanz JLC, editor. Advances in machine vision*, Berlin:Springer, 1989.
- [6] Bone D. J., "Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase unwrapping problem." *Appl Opt*, vol. 30-25, pp. 3627–3632, 1991.
- [7] Born M., Wolf E., *Principles of optics*, U.K., Cambridge University Press, 1999.
- [8] Burton D. R., Goodall A. J., Atkinson J. T., "The use of carrier frequency-shifting for the elimination of phase discontinuities in fourier-transform profilometry", *Opt Laser Eng*, vol. 23(4), pp.245–257, 1995.

- [9] Chen Y., Schenk A. F., “A rigorous calibration method for digital cameras”, *Int Arch Photogrammetry Remote Sensing*, vol. 27, pp. 199–205, 1992.
- [10] Chen W., Yang H., Su X., “Error caused by sampling in Fourier transform profilometry”, *Opt Eng*, vol. 38-6 pp.927–931, 1999.
- [11] Chen G. M., Song M., “Overview of threedimensional shape measurement using optical method”, *Optical Engineering*, 39(1):10–22, January 2000.
- [12] Cheng X. X., Su X. Y., Gou L. R., “Automatic measurement method profilometry of 3-D diffuse objects”, *Appl Opt*, vol. 30(10), pp. 1274–1278, 1991.
- [13] Cohen A., *Numerical Analysis of Wavelet Method.*, Elsevier Press, Amsterdam, Holland, 2003.
- [14] Cohen L., “Time-Frequency Distributions- A Review”, *Proc. Of IEEE*, 77(7), 941-981, 1989.
- [15] Daubechies I. “The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis”, *IEEE Transaction on Information Theory*, vol. 36, no. 5, pp. 961-1004, 1990.
- [16] Dursun A., Özder S., Ecevit F. N., “Continuous wavelet transform analysis of fringe patterns obtained by projection technique” *Measurement Science and Technology*, vol. 15-9, pp. 1768-1772, 2004.
- [17] Dursun A., Saraç Z., Ecevit F N.,”Wavelet Processing Algorithms in Optical 3-D Surface Profile Measurements”, International Workshop On Applications Of Wavelet To Real World Problems, Istanbul Commerce University, pp. 97-108 July 17-18, 2005a.

- [18] Dursun A., Saraç Z., Ecevit F. N., "Signal Processing Algorithms In 3-D Profile Measurement With Fringe Projection Technique" Fourth International Conference on Electrical and Electronics Engineering 7-11 December 2005b.
- [19] Dursun A., Saraç Z., Ecevit F. N.. "An Application of the S-Transform to Optical 3-D Surface Profile Measurement", IEEE 14th Conference on Signal Processing and Communications Applications, 17-19 April 2006.
- [20] Dursun A., Saraç, Z Topkara H. S., Özder S, Ecevit F. N., "Phase recovery from interference fringes by using s-transform", *Measurement*, vol. 41, I. 4, pp. 403-411, 2008.
- [21] Fernandez A., Kaufmann G. H., Doval A. F., et al. "Comparison of carrier removal methods in the analysis of TV holography fringes by the Fourier transform method" *Opt Eng*, vol. 37-11, pp. 2899–2905, 1998.
- [22] Hao Y. D., Zhao Y., Li D. C., "Multifrequency grating projection profilometry based on the nonlinear excess fraction method", *Appl Opt*, vol. 38(19), pp. 4106–4110, 1999.
- [23] Hausler G, Ritter D., "Parallel three-dimension sensing by color-coded triangulation", *Appl Opt* vol. 32-35, pp.7164–7169, 1993.
- [24] Hecht E., *Optics*, U. K. Addison Wesley, 2001
- [25] Hipp M., Woisetschlager J., Reiterer P., Neger T., Digital Evaluation of Interferograms, *Measurement*, vol. 36, pp. 53-66, 2004.
- [26] Judge T.R., Bryanston-Cross P.J., "A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis", *Opt. Lasers. Eng.*, vol. 21-4 pp. 199-239, 1994.

- [27] Kozłowski J., Sera G., “Analysis of the complex phase error introduced by the application of Fourier transform method”, *Journal of Modern Optics*, vol. 46-6, pp. 957–9571, 1999.
- [28] Köysal O., San E. S., Özder S. and Ecevit F. N., “A novel approach for the determination of birefringence dispersion in nematic liquid crystals by using the continuous wavelet transform”, *Measurement Science and Technology* vol. 14 pp. 790-795, 2003.
- [29] Kujawinska M., Spik A., Wojciak J., “Fringe pattern analysis using Fourier transform techniques in Interferometry” ‘89: 100 Years after Michelson. Proc SPIE 1121, 1130, 1989.
- [30] Kujawinska M, Wojciak J. High accuracy, “Fourier transform fringe pattern analysis”, *Opt Lasers Eng*, vol. 14, pp.325–39, 1991.
- [31] Lin J. F., Su X. Y., “Two-dimensional Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional object shapes”, *Opt Eng* vol. 34(11), pp. 3297–302, 1995.
- [32] Li J. L., Su X., Su H. J., “Removal of carrier frequency in phase-shifting techniques” *Opt Lasers Eng*, vol. 30, pp. 107–115, 1998.
- [33] Lian X., Su X., “Computer simulation of a 3-D sensing system with structured illumination” *Opt Laser Eng*, vol. 27, pp. 379–393, 1997.
- [34] Li J., H. Su, X. Su, “Two-frequency grating used in phase-measuring profilometry” *Appl Opt*, vol. 36(1), pp. 277–278, 1997.
- [35] Li J. L. , Su X. Y., Zhou W. S., “The 3-D sensing using laser sheet projection: influence of speckle”, *Opt Rev*, vol. 2-2, pp.144–149, 1995.

- [36] Livanos G., and Ranganathan J. J., “Heart Sound Analysis Using the S transform”, *Computers in Cardiology*, vol. 27, pp. 587-590, 2000.
- [37] Mallat Stephane, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 2/ed, Academic Press, 1999.
- [38] Meyers S. D., Kelly B. G. and O’Brien J. J. “An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: with application to the dispersion of Yanai waves Mon.” *WeatherRev.* vol. 121, pp. 2858–2866, 1993.
- [39] Pandit S. M., Chan D. P., “Comparison of Fourier transform and data-dependent system profilometry by use of interferometric regeneration”, *Appl. Opt.*, vol. 38-19, pp. 4095-4102, 1999.
- [40] Rastogi P. K., *Optical Measurement Techniques and Applications*. Norwood, Artech House, 1997.
- [41] Sajan M. R., Tay C. J., Shang H. M., “TDI imaging tool for profilometry and automated visual inspection” *Opt Lasers Eng*, vol. 29(6), pp. 403–411, 1998a.
- [42] Sajan M. R., Tay C. J., Shang H. M., Asundi A., “Improved spatial phase detection for profilometry using a TDI imager” *Opt Commun*, vol. 150(1-6), pp. 66–70, 1998b.
- [43] Saraç Z., Dursun A., Yerdelen S., Ecevit F. N., “Wavelet phase evaluation of white light interferograms”, *Measurement Science and Technology*, vol. 16, pp. 1878–1882, 2005.
- [44] Saraç Z., Dursun A., Yerdelen S., Ecevit F. N., “Calculation of Refractive Index Changes from Thermal Lens Fringes using Continuous Wavelet Algorithm”, *Optics & Laser Technology*, vol. 39, I. 4, 769-773 June 2007a.

- [45] Saraç Z., Yerdelen S., Dursun A., Saraç H., Ecevit F. N., “Processing of thermal lens fringes by S-transform”, *Optics Communications*, vol. 271-2, pp.349-352, 2007b.
- [46] Srinivasan V., Liu H. C., Halioua M., “Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse object”, *Appl. Opt.*, vol. 23-18, pp.3105–3108, 1984.
- [47] Stockwell R. G., Mansinha L. and Lowe R. P., “ Localization of the Complex Spectrum: The S Transform”, *IEEE Trans. on Signal Proc.*, vol. 44-4, pp. 998-1001, 1996.
- [48] Su X. Y., W. Zhou S., Bally V. V., D. Vukicevic, “Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating” *Opt. Commun.*, vol. 94-6, pp. 561–573, 1992.
- [49] Su X. Y., Bally G. Vukicevic D., “Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation”, *Opt. Commun.*, vol. 98-1, pp.141–150, 1993.
- [50] Su X., Su L., “New 3D profilometry based on modulation measurement”, *Proc SPIE*, 3558, ,pp. 1–7, 1998.
- [51] Su L., Su X., Li W., “Application of modulation measurement profilometry to objects with surface holes”, *Appl. Opt.*, vol. 38(7), pp. 1153–1158, 1999.
- [52] Su X. Y., Li J., Gou L. R., “An improved Fourier transform profilometry” *Proc SPIE* 954, ,pp. 32–35,1988.
- [53] Su X., Sajan M. R., Asundi A., “Fourier transform profilometry for 360-degree shape using TDI camera”, *International Conference on Experimental Mechanics Advances and Applications* Singapore, pp.4–6 ebruary 1996.

- [54] Takasaki, H. "Generation of surface contours by moire pattern" *Appl. Opt.*, vol. 9-4, pp. 942–947, 1970.
- [55] Takeda M. , Ina H., Koboyashi S., "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computerbased topography and interferometry", *J Opt Soc Am*, vol. 72-1, pp. 156–60,1982.
- [56] Takeda M., Mutoh K., "Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes", *Appl.Opt*, vol. 22-24, pp. 3977–82, 1983.
- [57] Takeda M., Gu Q., Kinoshita M., "Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: A singleshot three-dimensionalshape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations" *Appl Opt.*, ,vol. 36(22), pp.5347–54, 1997.
- [58] Torrence C. and CompoG. P., "A practical guide to wavelet analysis" *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 79, pp. 61–78,1998.
- [59] Toyooka S., Iwasa Y., "Automatic profilometry of 3-D diffuse objects by spatial phase detection" *Appl Opt*, vol. 25(10), pp.3008–3012, 1986.
- [60] Windecker R., Franz S., Tiziani H. J., "Optical Roughness Measurement with Fringe projection", *Applied optics*; Vol. 38 (13), pp. 2837-2842, 1999.
- [61] Yi J., Huang S., "Modified Fourier transform profilometry for the measurement of 3-D steep shapes", *Opt Lasers Eng.*, vol. 27(5), pp. 493–505, 1997.
- [62] Yoshizawa T., "The recent trend of moire metrology", *J Robustic Mech.*, vol. 3-3, pp. 80–85, 1991.

- [63] Young M., *Optics and Lasers*, Berlin, Springer-Verlag, 2000.
- [64] Zang H., Lalor M. J., Burton D. R., “Spatio temporal phase unwrapping for the measurement of discontinuous object in dynamic fringe-projection phase shifting profilometry” *Appl. Opt.*, vol. 38-16, pp. 3534-3541, 1999.
- [65] Zhou W. S., Su X. Y., “A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry” *J Mod. Opt.*, vol. 41-1, pp. 89–93, 1994.

ÖZGEÇMİŞ

Ali DURSUN, 1977 yılında Erzurum'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum'da tamamladıktan sonra 1995 yılında Uludağ Üniversitesi, Mühendislik&Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans eğitimini 1999 yılında tamamladı. 1999 yılının aralık ayında Gebze Yüksek Teknoloji Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Aynı yıl İngilizce hazırlık sınıfı ile başladığı yüksek lisans eğitimini 2003 yılında tamamladı. 2003 yılı eylül ayında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümünde doktora eğitimine başladı. Halen aynı bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmakta ve çeşitli projelerde görevler almaktadır.