

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PROJEKSİYON YÖNTEMİYLE CİSİMLERİN
PROFİLLERİNİN BELİRLENMESİ

134324

Ali DURSUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

Doç.Dr. F. Necati ECEVİT

GEBZE

2003

TE. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
BİLİMLER VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI

Ali DURSUN' un tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun **16 Haziran 2003** tarih ve **2003/18** sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından **Elektronik** Anabilim Dalında **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

Prof. Dr. Ali ALKUMRU



Doç. Dr. F. Necati ECEVİT
(Tez Danışmanı)



Yrd. Doç. Dr. A. Arif ERGİN



ONAY

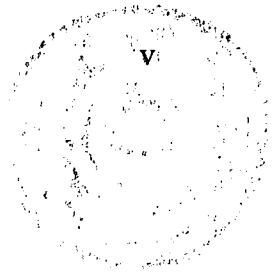
G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..22..07..2003..... tarih ve ..2003/18..... sayılı kararı.

İmza / Mühür


ÖZET

Bu tez çalışmasında, üç boyutlu optik ölçüm sistemlerinde kullanılabilecek yöntemler incelendi. Moire projeksiyon yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları ortaya kondu. Moire projeksiyon yöntemlerinde, ızgara desenini yansıtmaya ve karşılaştırma işlemlerinde iki adet ızgaraya ihtiyaç duyulur. Fourier dönüşümü ile profil belileme (FTP) yöntemlerinde ise sadece bir ızgaraya ihtiyaç vardır. FTP noktasal ölçüm yaptığı için sayısal sistemlere, moire projeksiyon yöntemlerinden daha başarılı bir şekilde uyum sağlar.

FTP algoritmasının bilgisayar ortamında sayısal olarak benzetimi yapıldı. Test fonksiyonlarına uygulanan bu benzetim sonucunda FTP'nin üç boyutlu ölçüm kapasitesi ortaya konuldu. Laboratuvar ortamında gerçek, üç boyutlu cisimler üzerinde FTP çapraz eksen geometrisine uygun deneyler yapıldı. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçların, gerçek cisim boyutlarına çok yakın olduğu görüldü. FTP algoritmasının gerçek şartlarda uygulanabilirliği gösterilmiş oldu.



SUMMARY

In this thesis, the methods that may be employed in optical three-dimensional measurement systems are researched. The advantages and disadvantages of the Moiré Projection Methods are evaluated. In the Moiré Projection Methods, two gratings are used. However, the Fourier Transform Profilometry (FTP) needs only one grating that is installed in projection unit. Since it performs discrete, point-by-point measurement, the FTP can be implemented digital systems easily.

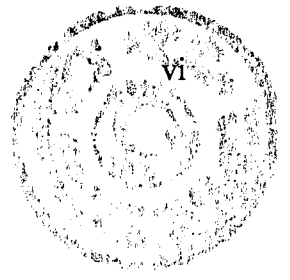
In order to prove the FTP algorithm, the simulation of the algorithm was realized. The results obtained by running this simulation on test functions verified the three-dimensional measurement capability of FTP. The test environment conforming to crossed-optical axis geometry was established and a number of 3-D measurements were performed on real world substances. The consistencies of the measurements with the real dimensions of the substances were obtained.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim sırasında bilim adamı kişiliğiyle yardımını ve hoşgörüsünü esirgemeyen danışmanın Doç Dr. F. Necati ECEVİT'e, değerli yardımları ve görüşleri için Doç. Dr. Serhat ÖZDER'e, kıymetli yorumları ve desteği için Yrd. Doç. Dr Arif ERGİN'e, beni yetiştirip eğitim hayatım boyunca bana desteklerini esirgemeyen aileme ve beni her zaman teşvik eden hayat arkadaşım eşim Elif DURSUN'a teşekkürü bir borç bilirim.





İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
1.GİRİŞ	1
2.SAYISAL GÖRÜNTÜ ALMA	3
3.PROJEKSİYON TEKNİKLERİ	5
3.1 Moire Yöntemleri	5
3.2 Noktasal Yöntemler	12
4.FOURİER DÖNÜŞÜM PROFİL BELİRLEME TEKNİĞİ	18
4.1 Optik Geometri	18
4.2 Fourier Dönüşüm Yöntemi	22
5.DENEYSEL ÇALIŞMA	29
5.1 Fourier Dönüşümü ile Profil Belirleme Benzetimi	29
5.2 Dalgacık Dönüşümü ile Faz Dağılımının Elde Edilmesi	41
5.3 FTP Yönteminin Cisimler Üzerinde Denenmesi	64
6. DEĞERLENDİRME ve SONUÇ	82
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	86



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 16 gri seviyesi ile değişik çözünürlükte örnekleme	3
2.2. Değişik gri seviyelerinde örnekleme	4
3.1.a,b,c,d Moire Girişi Saçakları	5
3.2. Moire görüntüleme	9
3.3 a Küçük görüntüleme açısı	10
3.3 b Büyük görüntüleme açısı	10
3.4: Sonlu aralıklı moire gölge geometrisi	11
3.5. Işığın Pürüzlü bir yüzeyden saçınımı	13
3.6. Pürüzlü yüzey üzerindeki girişim	13
3.7 Noktasal görüntüleme	14
3.8 Odaklı noktasal görüntüleme	15
3.9. Pürüzlü bir yüzeyin Frekans Spektrumu	16
3.10. Filtreleme işleminin genlik spektrumunda gösterimi	17
4.1. Çapraz optik eksenli geometri	19
4.2. Paralel optik eksen geometrisi	21
4.3. Değişime uğramış ızgara görüntüsünün filtre edilmesi	23
4.4. $h(x,y)=0$ durumunda ızgara görüntüsünün filtre edilmesi	24
4.5. Üçgenlerin benzerliğinden yükseklik bilgisinin elde edilmesi	26
4.6 Q_1 bileşeninin tüm spektrumdan ayrılması	27
5.1. Izgara görüntüsünün üç boyutlu değişimi	30
5.2. Faz fonksiyonunun değişiminin üç boyutlu döndürülmüş görüntüsü	30
5.3 Faz kaymasına uğramış sinüzoidal ızgara görüntüsü	31
5.4. Sinüzoidal ızgaranın bir satırının frekans genlik spektrumu	32
5.5. Frekans spektrumunun birinci temel bileşenin genlik spektrumu	33
5.5. Birinci temel bileşenin, sıfır temel frekansına kaydırılması	33
5.6. Düzeltilmemiş faz değişimi	34
5.7. Bir eksende düzeltilmiş faz değişimi	35
5.8. İki eksende de düzeltilmiş faz fonksiyonu	35
5.9 %2 gürültülü durumda elde edilen faz değişimi	36
5.10. %10 gürültü eklendikten sonra elde edilen faz değişimi	37



5.11 %10 gürültü eklenmiş sinüzoidal ızgara görüntüsü	37
5.12. %25 gürültü eklendikten sonra elde edilen faz değişimi	38
5.13 %25 gürültü eklenmiş sinüzoidal ızgara görüntüsü	38
5.14. %50 gürültü eklendikten sonra elde edilen faz değişimi	39
5.15 %50 gürültü eklenmiş sinüzoidal ızgara görüntüsü	39
5.16. %75 gürültü eklendikten sonra elde edilen faz değişimi	40
5.17. %100 gürültü eklendikten sonra elde edilen faz değişimi	40
5.18 %100 gürültü eklenmiş sinüzoidal ızgara görüntüsü	41
5.19. Birinci temel bileşenin, sıfır temel frekansına kaydırılması	45
5.20 x değişimli ızgara deseni	48
5.21 Deneme faz fonksiyonu	49
5.22 x eksenindeki faz değişimi	50
5.23 y değişimli ızgara deseni	51
5.24 y eksenindeki faz değişimi	52
5.25 Birleştirilmiş faz değişimi	53
5.26 x ve y değişimli ızgara deseni	54
5.27 x eksenindeki faz değişimi	55
5.28 y eksenindeki faz değişimi	55
5.29 Birleştirilmiş faz değişimi	56
5.30 x yönündeki ızgara değişimi	57
5.31 y yönündeki faz değişimi	57
5.32 Birleştirilmiş faz değişimi	58
5.33 x yönündeki ızgara değişimi	59
5.34 y yönündeki faz değişimi	59
5.35 birleştirilmiş faz değişimi	60
5.36 x yönündeki faz değişimi	61
5.37 y yönündeki faz değişimi	61
5.38 Birleştirilmiş faz değişimi	62
5.40 x yönündeki faz değişimi	62
5.41 y yönündeki faz değişimi	63
5.42 Birleştirilmiş faz değişimi	63
5.43 Deney düzeneğinin şeması	65
5.44 Referans düzleminin bir satırının genlik frekans spektrumu	69
5.45 Yükseklik değişimli görüntünün genlik frekans spektrumu	69

5.46 Referans düzlemi frekans spektrumundan seçilen bileşen	70
5.23 Numunenin frekans genlik frekans spektrumundan seçilen bileşen	70
5.24 Yüzey yükseklik değişimlerinden kaynaklanan üç boyutlu faz haritası	71
5.25 Deney numunesi Atatürk büstünün profili	71
5.26 Hanning Penceresi	72
5.27 Referans düzleminin bir boyutlu genlik frekans spektrumu	73
5.28 Numune görüntüsünün bir boyutlu frekans genlik spektrumu	73
5.29 Referans düzleminin frekans spektrumundan seçilen bileşen	74
5.30 Numunenin filtre edilen spektrum bileşeni	74
5.31 Referans düzleminin ters fourier dönüşümü alındıktan sonra elde edilen faz değişimi	75
5.32 Numune görüntüsünün faz değişimi	75
5.33 Pencereleme yapılmadan elde edilen faz farkının iki boyutlu düzeltilmiş değişimi.	76
5.33 Pencereleme yapılmadan elde edilen profil	76
5.34 Pencereleme yapılarak elde edilen faz değişimi	77
5.35 Pencereleme yapılarak elde edilen numune profili	77
5.36 Referans düzlemin bir boyutlu genlik frekans spektrumu	78
5.37 Numune görüntüsünün bir boyutlu genlik frekans spektrumu	79
5.38 Referans düzlemi frekans spektrumundan filtre edilen bileşen	80
5.39 Numune frekans spektrumundan filtre edilen bileşen	80
5.40 Düzeltilmiş faz değişimi	81
5.41 Faz değişiminin bir sütunu	81

1. GİRİŞ

Genel olarak bir cisim hakkında boyutsal bilgiye ihtiyaç duyulduğunda bir metre yada referans olabilecek bir başka bir cisimle ölçüm yapmaya çalışılır. Fakat bu yöntemin, yüzey değişikliklerindeki karmaşıklık arttıkça geçerliliği kalmayabilir. Dokunarak örnek alma prensibine dayanan iğne sensörlü (stylus probe) ölçüm sistemleri de karmaşıklık arttıkça çalışamaz hale gelmektedir. Üç boyutlu profil belirleme yöntemlerine, çeşitli örnek parçaların boyutlarını belirlemek ve karakterize etmek için ihtiyaç duyulur. Bu yüzden günümüzde bu konuda bir çok araştırma yapılmaktadır. Günümüzün değişen şartları optik ölçüm sistemlerinin güvenilir ve hassas olmasının yanında, bilgisayar mimarisine kolayca uygulanabilirlik ve çabuk sonuç verme gibi özelliklerini de ön plana çıkarmıştır. Fourier dönüşümünü, klasik Moire projeksiyon yöntemine uygulayarak bu ihtiyaçlara cevap verebilecek bir ölçüm sistemi tasarlamak mümkündür [1].

En genel manada Moire tabanlı yöntemler, ölçümü yapılacak cisim üzerine düşürülen ızgara görüntüsündeki aralıkların değişiminden hareket ederek yükseklik değişimini elde etmeye dayanır. Fakat bu yöntemlerde ölçüm sonucu, kullanılan referans ızgarasının aralıklarına bağlıdır. Fourier dönüşümü ile profil belirleme yöntemi ızgara geometrisine bağımlılığı ortadan kaldırdığı gibi, noktasal sonuç verebilir. Noktasal sonuç verme özelliği günümüzde sayısal görüntüleme sistemlerinin piksel yapısına çok başarılı bir şekilde uyum sağlar. Günümüzde tasarım ve üretim sistemleri, sayısal bilgi tabanlı olduğu için Fourier dönüşüm tabanlı profil belirleme yöntemi başarıyla kullanılabilir.

1.2. Tezin Yapısı

Tez altı ana bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde bilinen Moire projeksiyon yöntemleri genel olarak tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde Fourier dönüşümüyle profil belirleme yöntemi, teorik olarak açıklanmış ve matematiksel gereklilikleri ortaya konmuştur. Dördüncü bölümde ayrıca bu yöntemin ölçüm düzeneklerinde meydana getirebileceği kısıtlamalardan da bahsedilmiştir.

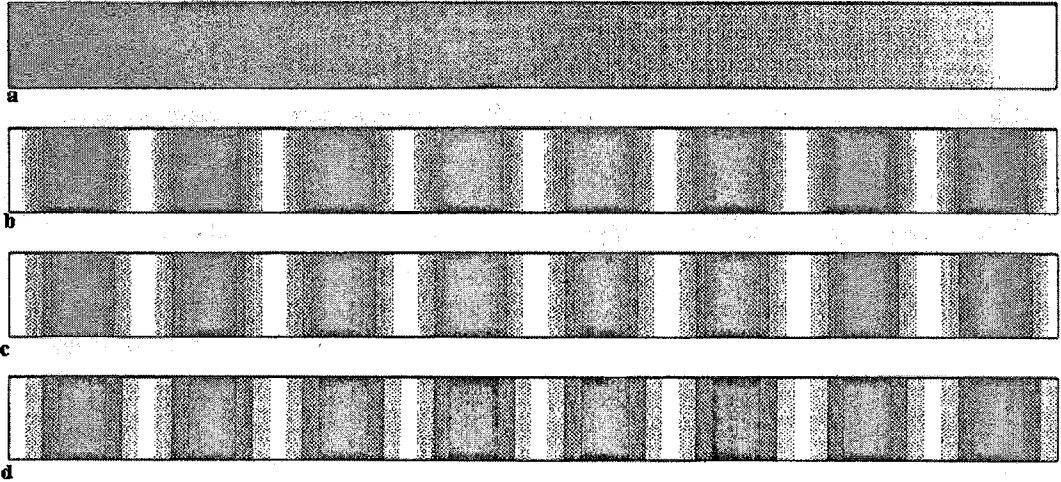
Tezin beşinci bölümünde, dördüncü bölümde ortaya konan yöntemin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle bir test fonksiyonu üzerinde analiz yapılmış daha sonra laboratuvar ortamında çapraz eksenli optik geometri esasına göre kurulan ölçüm düzeneğinden alınan gerçek veriler üzerinde analiz yapılmıştır. Altıncı bölümde sonuçlar yorumlanmıştır.



2. SAYISAL GÖRÜNTÜ ALMA

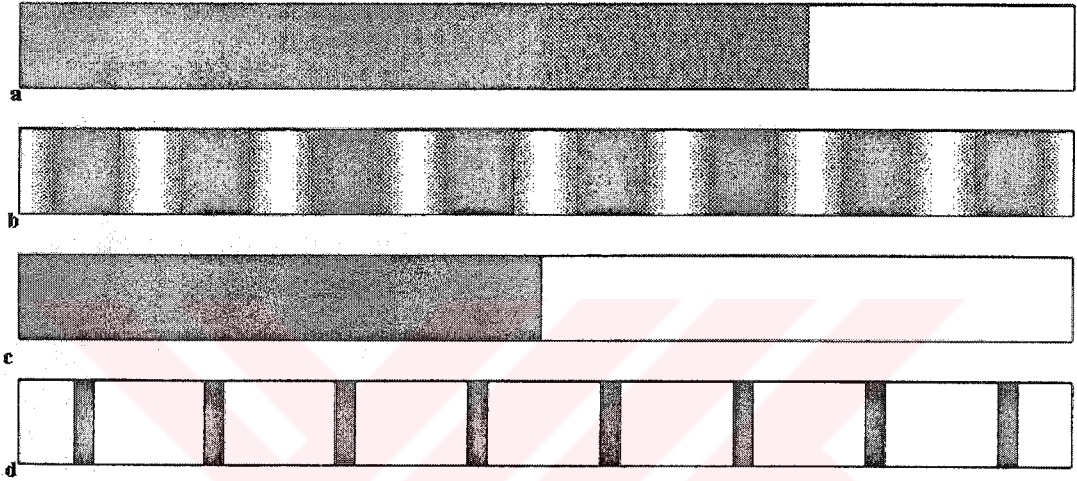
Gerçek bir görüntünün, bilgisayar ortamında analiz edilebilmesi için sayısallaştırılması gerekir. Sayısallaştırmayı gerçekleştirmek için, görüntü küçük parçacıklara ayrılır ve her bir parçacık için bir sayısal değer atanır. Bu sayı, bilgisayarlar iki tabanlı aritmetiğine göre çalıştıkları için, iki tabanlı olmalıdır. Yani her bir görüntü parçacığı iki tabanlı bir ışık şiddeti olarak ifade edilir. Sayısal görüntünün en küçük birimi pikseldir. Görüntü iki boyutlu bir veya kullanılan sayısal görüntü biçimine göre birkaç matrisle ifade edilir. Sayısal görüntülemenin gerçeğe en yakın olması için, çok sayıda piksele bölünmeli ve her bir pikseli ifade eden iki tabanlı sayı yüksek basamaklı olmalıdır. Örneğin 1200x1600 piksel ve 24 bit ile sayısallaştırılan görüntü, 1,92 milyon parçacığa ayrılmış ve her bir parçacık 24 bitlik bir ikili sayı ile gösterilmiştir. Çözünürlük; görüntü matrisinin bir sütunundaki piksel sayısı ile, bir satırındaki piksel sayısının çarpımı ile ifade edilir. Çözünürlük arttıkça görüntülemenin de kalitesi artmış olur.

Çözünürlük ve bit basamak sayısı yeteri kadar büyük değilse, görüntü bulanıklaşır ve ayrıntılar kaybolmaya başlar. Bu durumda görüntü sayısallaştırma başarılı olmamıştır. Bir görüntü sayısallaştırılırken Nyquist kriterine uyulmalıdır [2]. Şekil 2.1'de 16 gri seviyesi ile (4 bit) örneklenen bir saçak (fringe) görüntüsünün değişik çözünürlükteki sayısal görüntüleri verilmiştir [2].



Şekil 2.1 16 gri seviyesi ile değişik çözünürlükte örnekleme.

Şekil 2.1'de, çözünürlüğün görüntüye konumsal olarak nasıl etki ettiği görülmektedir. Gri örneklemede, en küçük ışık şiddetinin tam siyah, en büyük ışık şiddetinin tam beyaz olacak şekilde örneklendirildiği söylenebilir. Şekil 2.1.a'da 16 gri seviye, b'de 256x64, c'de 128x32, d'de ise 64x16 piksel çözünürlüğünde örneklenmiş sayısal görüntüler görülmektedir. Bu görüntü 8 çizgili sinüzoidal değişimli bir saçaktır. Görüntü kalitesindeki düşmesi ve ayrıntıların kaybolması açıkça görülmektedir [2].



Şekil 2.2. Değişik gri seviyelerinde örnekleme.

Şekil 2.2.a'da 4 seviyeli (2 bit) gri örnekleme siyahtan beyaza değişimi görülmektedir. Şekil 2.2.b, şekil 2.1.'de 16 seviye ile örneklenen görüntünün 4 gri seviye ile örneklenmesini göstermektedir. Aynı görüntü iki seviyeli gri tonlamayla elde edilen sayısal görüntü görülmektedir. Buradan görülebileceği gibi örnekleme derinliği ayrıntıların görüntülenmesi üzerinde doğrudan etkilidir. Sinüzoidal değişimli saçak görüntüsü derinlik azaldıkça çizgilerden oluşan bir sayısal görüntüye dönüşmüştür.

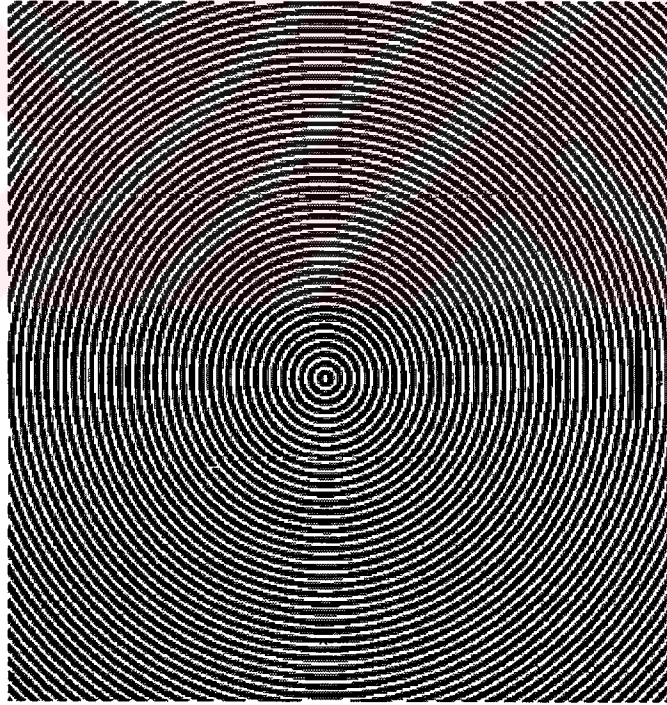


3. PROJEKSİYON TEKNİKLERİ

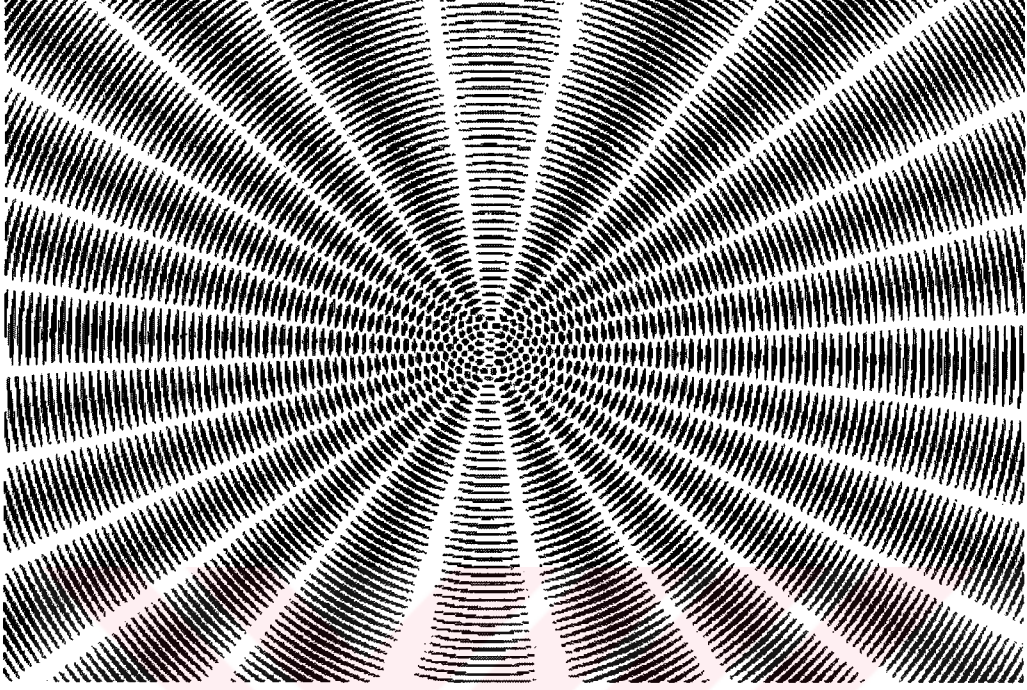
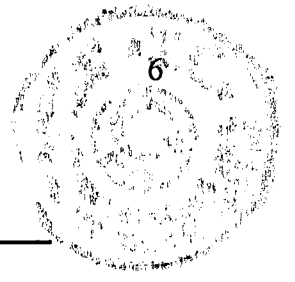
Üç boyutlu ölçüm sistemlerinde kullanılan projeksiyon tekniklerinin genel prensibi; numunenin üzerine düşürülen girişim saçığı veya ızgara görüntüsünü kullanarak cismin yükseklik değişim bilgisinin elde edilmesidir.

3.1. Moire Yöntemleri

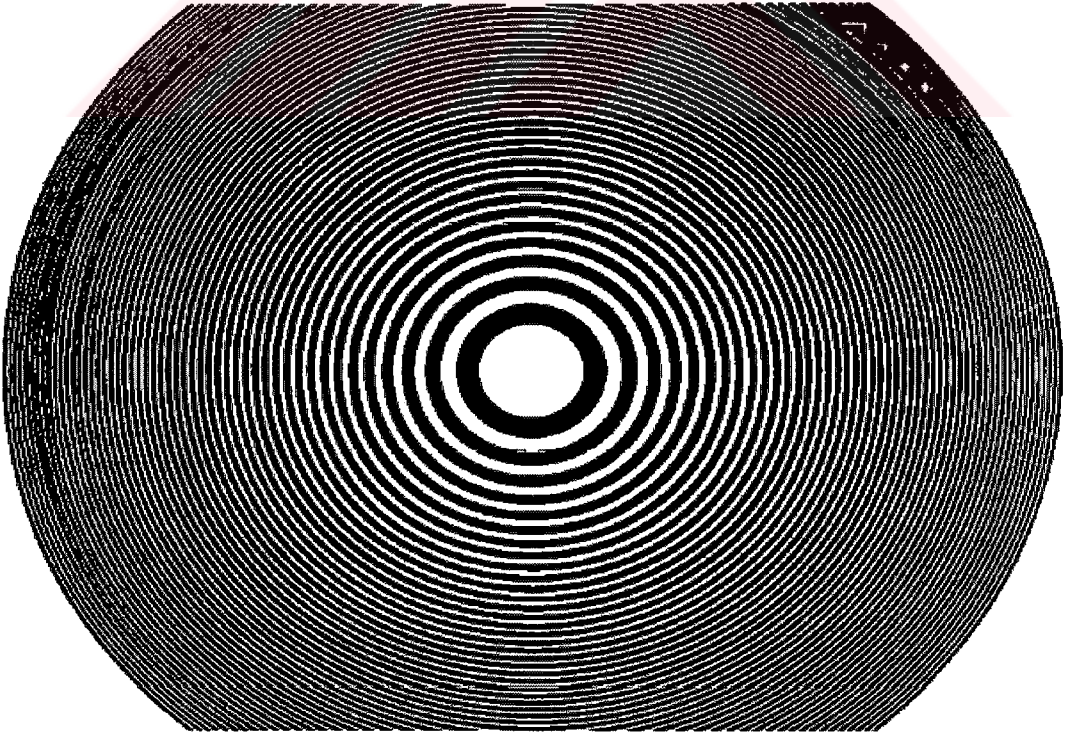
Moire görüntülerini oluşturmak için çeşitli ızgaralar kullanılabildiği gibi, bu görüntüler sayısal tekniklerle oluşturulup, analizi yapılacak numunenin üzerine yansıtılabilir. Aşağıda Moire saçakları veya deseni olarak isimlendirilen görüntülere örnekler verilmiştir [3].



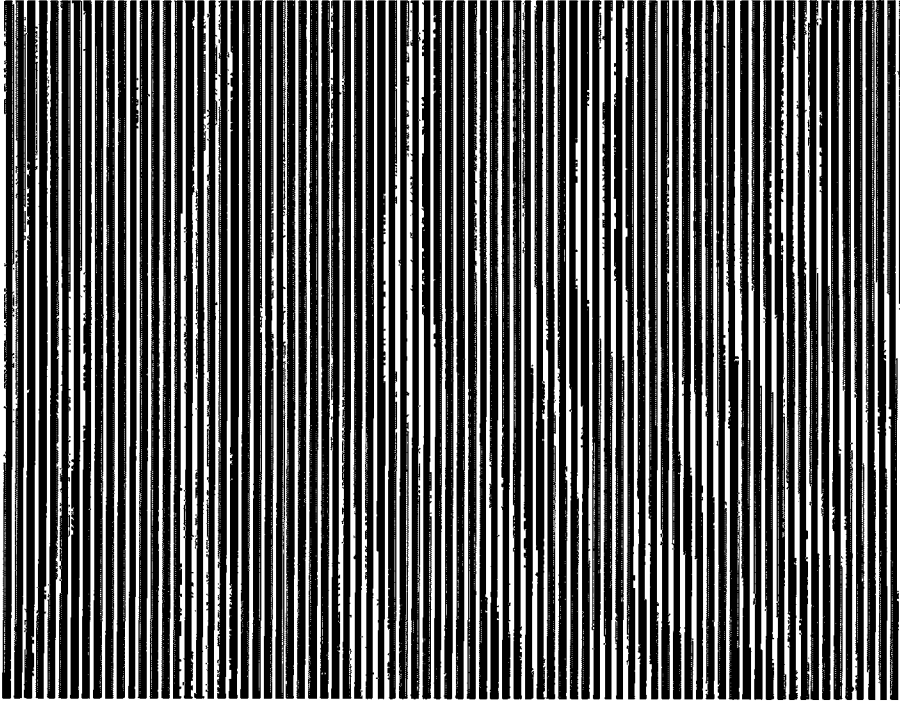
Şekil 3.1.a



Şekil 3.1.b Girişim saçığı.



Şekil 3.1.c Girişim saçığı.



Şekil 3.1.d Girişim saçığı.

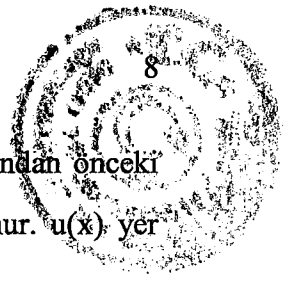
Şekil 3.1.a'da çember çizgilerden oluşan bir ızgaranın küresel bir cisim üzerindeki görüntüsü verilmiştir. 3.1.b'de iki çembersel ızgaranın aynı küresel cisim üzerindeki Moire görüntüsü verilmiştir. 3.1.c'de girişim yapan bu iki ızgaranın A düzleminden, 3.1.d'de ise B düzleminden görüntüsü verilmiştir.

Bütün lineer ızgaralar sinüzoidal değişimli geçirgenlik fonksiyonu şeklinde ifade edilebilir. Bu genel bir yaklaşımdır ve bütün Moire ızgaralarına uygulanabilir. Sabit frekanslı sinüzoidal ızgara [4]:

$$t_1(x, y) = a + \cos\left(\frac{2\pi}{p} x\right) \quad (3.1)$$

Eşitlikteki p ızgara periyodu, a ise $0 < a < 1/2$ şeklinde bir sayıdır. Moire ızgaralarını kullanarak ölçüm yapma yöntemlerinin dayandığı genel prensip bir takım sebeplerden modülasyona uğrayan fazın tespit edilmesidir. Eşitlik (3.1)'deki geçirgenlik fonksiyonuyla ifade edilen ızgara deseninde bir faz kayması oluştursa bunu eşitlik (3.2)'deki gibi ifade edebiliriz.

$$t_2(x, y) = a + a \cos 2\pi\left(\frac{x}{p} + \psi(x)\right) \quad (3.2)$$



$\psi(x)$ modülasyon fonksiyonudur ve ızgara çizgilerinin modülasyondan önceki durumuna göre yer değişiminin ızgara periyoduna bölünmesiyle bulunur. $u(x)$ yer değiştirmeyi göstermektedir.

$$\psi(x) = \frac{u(x)}{p} \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.1) ve (3.2) deki geçirgenlik fonksiyonlarıyla tanımlanan ızgara desenlerini aynı noktada karşılaştırırsak; oluşan deseni tek bir geçirgenlik fonksiyonuyla tanımlayabiliriz.

$$t(x, y) = t_1 \times t_2 \\ = a^2 \left\{ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{p}x\right) + \cos 2\pi\left(\frac{x}{p} + \psi(x)\right) + \frac{1}{2} \cos 2\pi\left(\frac{2x}{p} + \psi(x)\right) + \frac{1}{2} \cos 2\pi\psi(x) \right\} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikteki ilk üç terim girişimden önceki ızgaraları gösterir. Dördüncü terim, ikinci ızgaranın frekansının ikiyle çarpılmış halidir. Beşinci terim ise yalnızca modülasyon fonksiyonuna bağlı bir terimdir. Moire desenini belirleyen terim de budur. Moire tabanlı üç boyutlu görüntüleme ve ölçme yöntemlerinde amaç bu faz modülasyonu terimini elde etmek ve bunu yükseklik derinlik gibi değişkenlere çevirmektir.

Izgara desenlerini birleştirmenin başka bir yolu da toplama (veya çıkarma) işlemine tabi tutmaktır. Bu iki ızgaranın aynı negatif film üzerinde birleştirilmesiyle gerçekleştirilebilir.

$$t(x, y) = t_1 + t_2 = 2a \left\{ 1 + \cos \pi\psi(x) \cos \left[\frac{x}{p} + \frac{1}{2}\psi(x) \right] \right\} \quad (3.5)$$

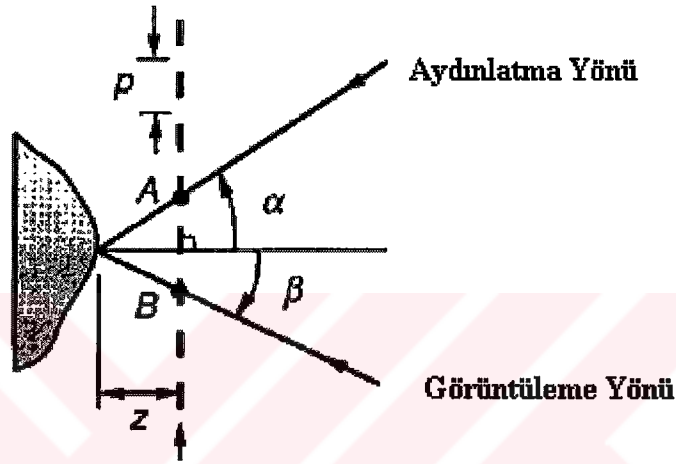
Burada toplama işlemiyle birinci ızgaranın üzerinde genlik modülasyonu gerçekleştirmiş oluruz. Izgara desenleri çarpma veya toplama işlemine tabi tutulduğunda ızgara saçaklarının en parlak görünümlü olması için; $n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ olmak üzere $\psi(x)=n$ olmalıdır. En koyu görünümlü durumda ise; $\psi(x)=n+1/2$ olmalıdır. t_1 ve t_2 ızgaramalarının $\psi_1(x)$ ve $\psi_2(x)$ gibi iki ayrı faz tarafından modüle edildiği varsayılırsa:

$$\psi(x) = \psi_1(x) - \psi_2(x) \quad (3.6)$$



3.1.1. Moire Gölge yöntemi

Bir nesnenin dış hatlarını belirlemede kullanılan en basit Moire tekniği, Moire gölge tekniğidir. Bu tekniğin genel prensibi şekil 3.2 üzerinde gösterilmiştir. Nesnenin önüne yerleştirilen bir ızgara, aydınlatma yönüne göre farklı bir yönden görüntülenene nesne üzerinde bir gölge oluşturur. Böylece düşük frekanslı bir Moire deseni gözlenir [3].



Şekil 3.2 Moire görüntüleme.

Cisim üzerindeki aydınlatmanın doğrusallaştırılmış bir ışın tarafından meydana getirildiği ve görüntülemenin sonsuzdan yapıldığı kabul edilirse; Şekil 3.2’de gösterilen nesne üzerindeki bir noktayla ızgara arasındaki uzaklık:

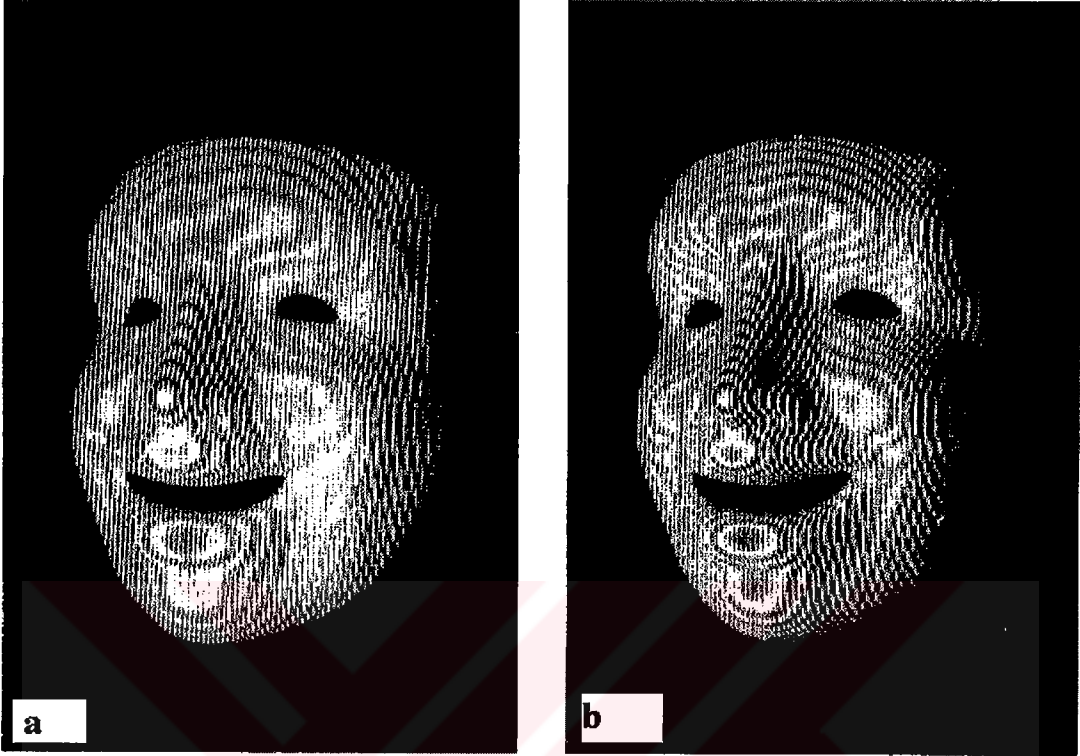
$$z = \frac{Np}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (3.7)$$

olarak tanımlanır. Burada verilen α aydınlatma açısı, β görüntüleme açısı, p ızgaranın çizgileri arasındaki uzaklık, N ise şekilden görülebileceği gibi A ve B noktaları arasındaki ızgara çizgisi sayısıdır. Cismin ızgaraya dik dış hat aralığı basit olarak:

$$C = \frac{p}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (3.8)$$

olarak verilebilir. Büyük açı, küçük ızgara açıklığı durumunda; ızgara gölgesinin cisim üzerine düşürülebilmesi için ızgara eğikleştirilir. Temel olarak Moire gölge

yöntemi, referans düzlemi'nin (ızgara) eğikleştirilmesinden kaynaklanan değişimin düzeltilmesine ve yeniden konumlandırılmasına imkan verir.

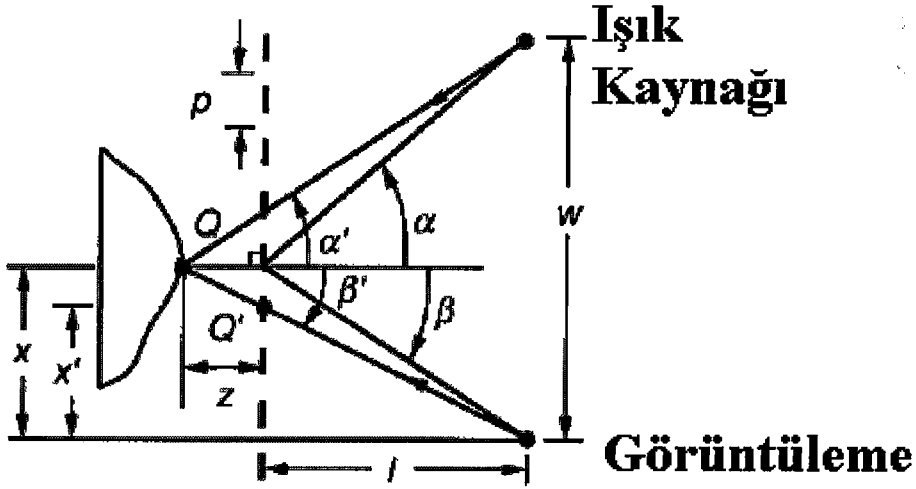


Şekil 3.3 (a) Küçük görüntüleme açısı, (b) Büyük görüntüleme açısı. [2]

Cismi tamamıyla paralelleştirilmiş ışın demetiyle aydınlatmak mümkün olmaz. Bu yüzden ızgara üzerinden bir cismi sonlu bir aralıktan aydınlatma ve görüntüleme durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 3.4'te sonlu aralıklı yapı gösterilmiştir. Bu durumda ızgarayla cisim arasındaki yükseklik:

$$z = \frac{Np}{\tan \alpha' + \tan \beta'} \quad (3.9)$$

Burada α' ve β' nesne üzerindeki aydınlatma ve görüntüleme açılarıdır. Bu açılar α , β 'dan farklıdır ve cismin üzerindeki her noktada değişirler.



Şekil 3.4: Sonlu aralıklı Moire gölge geometrisi.

Yüzey yüksekliği:

$$z = NC(z) = \frac{Np(1+z)}{w} = \frac{Npl}{w - Np'} \quad (3.10)$$

Bu eşitlik yüzey üzerindeki her noktanın yerine bağımlı olarak kompleks bir fonksiyonu gösterir. Bu ifade $l \gg z$ durumunda:

$$z = \frac{Npl}{w} = \frac{Np}{\tan \alpha' + \tan \beta'} \quad (3.11)$$

şeklinde yazılabilir. α' , β' yüzeyin her noktasında değişmesine rağmen $l \gg z$ durumu geçerli olduğu sürece tanjantlarının toplamı $\frac{w}{l}$ kabul edilebilir.

Aydınlatma ve görüntüleme aralıkları sonlu olduğu için; cismin görüntüsünde kayıplar meydana gelir. Cismin yüzeyi üzerindeki Q noktası ızgara arkasından görüntüleme yapıldığı için Q' noktasında görülür. Üçgen benzerliğinden:

$$\frac{x}{z+l} = \frac{x'}{l'} \quad (3.11)$$

buradaki x ve x' şekil 3.4'de gösterilmiştir. Görüntülemeadaki kayıp x'in x' olarak algılanmasına sebep olur.

$$x = x' \left(1 + \frac{z}{l}\right) \quad (3.12)$$

Aynı düzeltme y ekseninde de yapılırsa:

$$y = y' \left(1 + \frac{z}{l}\right) \quad (3.14)$$

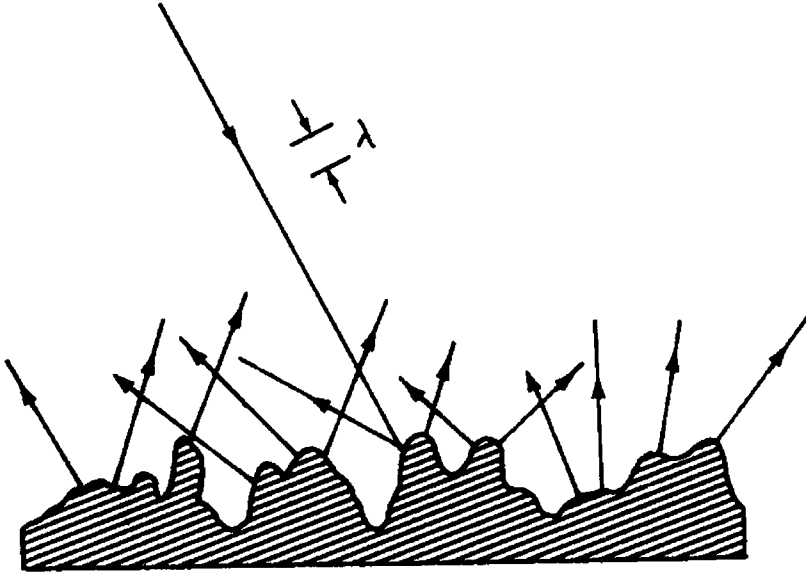
Bu işlemlerle yüzeyin görüntüsünden, gerçek yüzey yükseklik haritasını elde edebiliriz.

3.1.2. Moire Projeksiyon Yöntemi

Moire projeksiyon yöntemlerinde, önüne bir ızgara yerleştirilmiş görüntüleme sistemiyle, üzerine ızgara gölgesi düşürülmüş bir cismin görüntülenmesi ve böylece yükseklik haritasının çıkarılması mümkündür. Bu yöntemin Moire gölge yönteminden farklı yanı iki ızgara kullanılmasıdır. Görüntüleme ve yansıtma ızgaraları farklı olduğu için daha esnek uygulamalar yapmak mümkündür. Bunun dışında Moire gölge yönteminden farklı değildir. Aynı yaklaşımlar burada da geçerlidir.

3.2. Noktasal Yöntemler

Moire tabanlı yöntemlerde; cisim üzerindeki ızgara aralıklarının değişiminden yükseklik bilgisi elde edilmesi incelendi. Bu bölüm ise görüntülenen yüzeydeki noktasal etkiler incelemektedir. Şekil 3.5'te pürüzlü bir yüzeye çarpan λ dalga boylu bir ışık yüzeyin pürüzlerinden her yönde saçılmaya uğrayacaktır. Bu saçılan dalgalar birbirleriyle girişim meydana getirerek parlak ve koyu görünümlü noktalara oluşmasına sebep olacaktır. (speckle effect:Şekil 3.6)



Şekil 3.5. Işığın Pürüzlü bir yüzeyden saçınımı.

3.2.1. Noktasal Boyut

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi ışığın girişimiyle oluşan parlak ve koyu noktaların boyutları değişkendir. Şekil 3.7'de ise bu noktasal şekillerin büyüklüğünü tespit etmek için, yüzey lazer ışığıyla aydınlatılmıştır [5].



Şekil 3.6. Pürüzlü yüzey üzerindeki girişim.

Şekil 3.7'de kesiti gösterilen pürüzlü bir yüzey, z uzaklığındaki bir ekran üzerinde görüntülenmiştir. Ekran üzerinde keyfi olarak seçilen bir P noktasına tüm

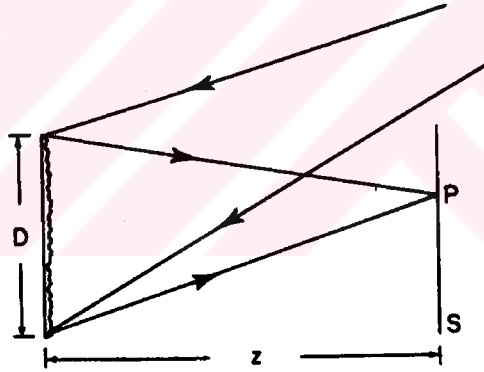
yüzeydeki saçınımın etki ettiği varsayılınsın. Bu durumda P noktasındaki noktasal desen, yüzey üzerindeki bütün nokta çiftlerindeki ışık saçınımının süperpozisyon ilkesine göre birleşmesiyle oluşur [5]. Her iki nokta arasındaki uzaklık, girişim saçığının frekansı ile birlikte ifade edilmiştir. $f = l/(\lambda z)$ Girişim saçığının en büyük uzaysal frekansı:

$$f_{\max} = D/(\lambda z) \quad (3.15)$$

olur. Bu girişim deseninin periyodunu, girişim desenindeki en küçük nokta boyutu (σ_0) belirler.

$$\sigma_0 = \lambda z / D \quad (3.16)$$

l uzaklığıyla birbirinden ayrılan nokta çiftlerinin sayısı, $(D-l)$ ile orantılıdır. Her bir frekansın toplam şiddete katkısı, bu frekansa karşılık gelen nokta çiftlerinin sayısı ile orantılıdır.



Şekil 3.7. Noktasal görüntüleme.

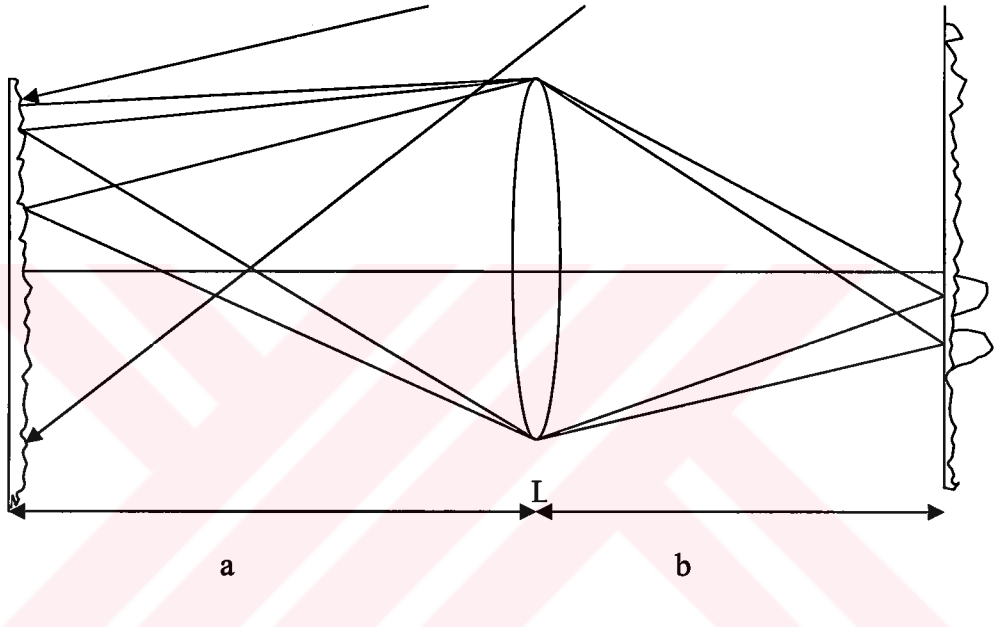
Şekil 3.8’de, Şekil 3.7’deki gibi geometri oluşturulmuş fakat görüntüleme bir mercek üzerinden yapılmıştır. Burada da en küçük noktanın boyutunu hesaplamak mümkündür. Fakat burada mercek görüntüyü büyüttüğü için sanal noktasal boyuttan bahsedilebilir. Görüntülenen yüzeyle mercek arasındaki mesafe, merceğin yarıçapı kadar olmalıdır. Sanal noktasal boyut:

$$\sigma_s = \lambda b / D \quad (3.17)$$

verilebilir. Burada b , görüntü düzlemiyle mercek arasındaki mesafedir. Aralık katsayısı, f merceğin odak uzaklığı olmak üzere $F=f/D$ dir. Sanal noktasal boyut yeniden ifade edilirse:

$$\sigma_s = (1+m)\lambda f \quad (3.18)$$

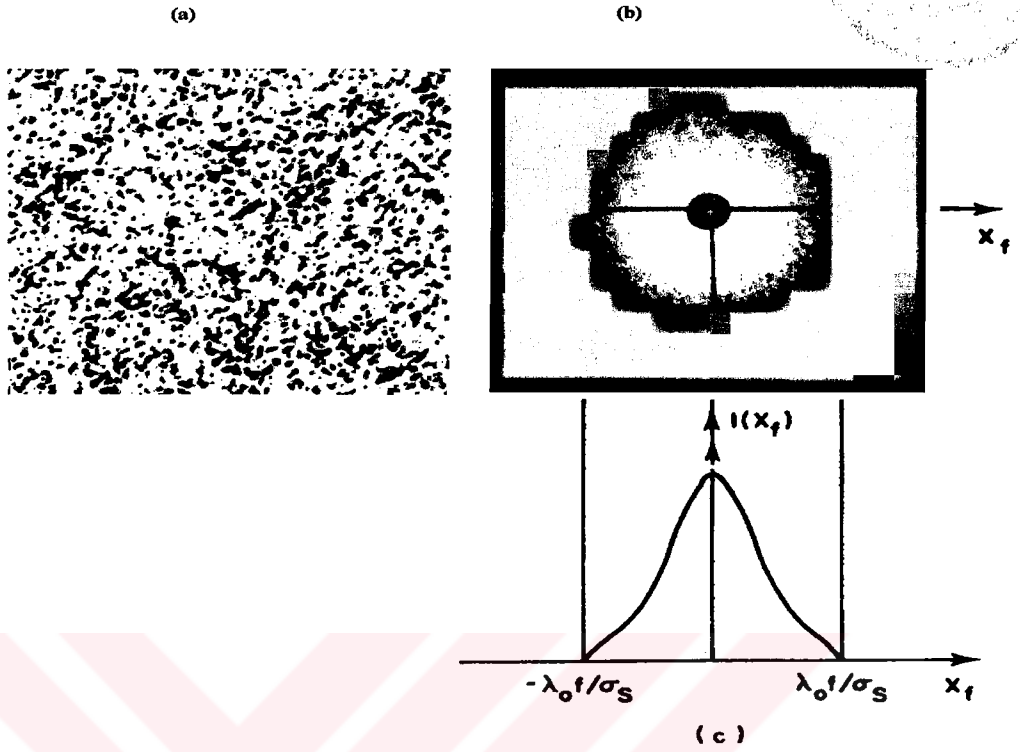
bulunur. Burada $m=(b-f)/f$ sistemin büyütme katsayısıdır. Buradan da anlaşılacağı gibi açıklık katsayısı F arttıkça noktasal boyutta artmaktadır.



Şekil 3.8 Odaklı noktasal görüntüleme.

3.2.2. Fourier Girişim Saçağı Yöntemi

Şekil 3.9'da pürüzlü bir yüzeyin görüntüsünün, optik tekniklerle elde edilen frekans spektrumu gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Pürüzlü bir yüzeyin Frekans Spektrumu

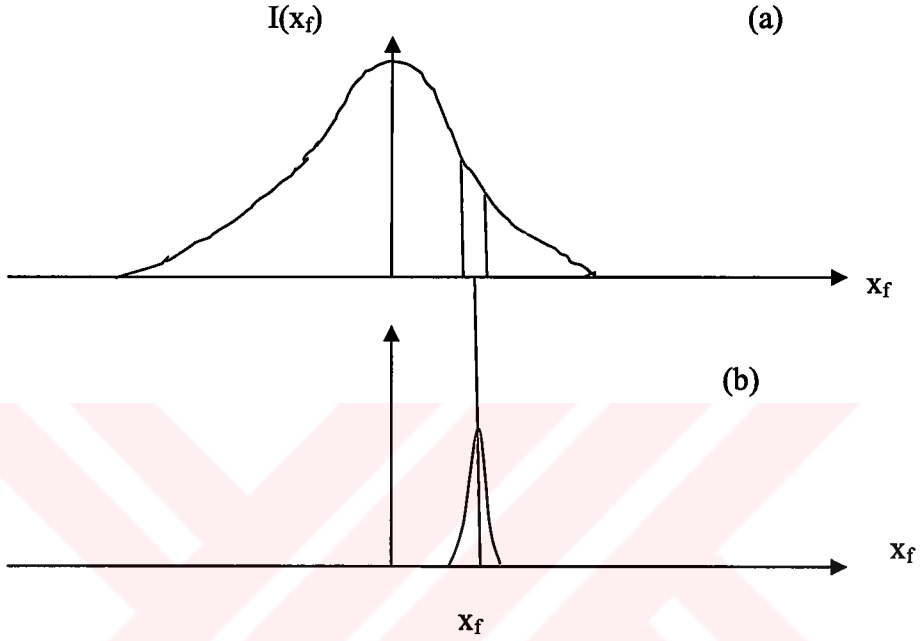
Şekil 3.9'da; (a)'da film üzerine görüntülenen pürüzlü bir yüzey, (b)'de saçınımın uzaysal genlik frekans spektrumu (x_f , y_f düzleminde), (c)'de ise x_f eksenindeki genlik frekans spektrumunun düzeltilmiş şekli görülmektedir. (b)'de ortadaki siyah nokta sıfır frekanslı (DC) bileşenin bastırılmasından kaynaklanmaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi; $f_{\max} = \pm 1/\sigma_s$ dir. Burada σ_s , en küçük noktanın (benek) boyutudur [2].

Optik filtre düzleminde, dairesel bir ekranın optik eksenden x_f kadar uzağa yerleştirildiği kabul edilsin. Bu durumda tüm frekans spektrumunda belirli bir bölge tüm spektrumdan ayrılmış olur. Bu durum şekil 3.10'da gösterilmiştir. Aynı filtreleme işlemi $f_x = x_f / \lambda_0 f$ frekanslı bir sinüzoidal ızgara ile de gerçekleştirilebilir. Sonuç olarak görüntüleme sistemine sinüzoidal bir ızgara eklendiğinde, görüntünün x eksenindeki formu:

$$t_1 = a(1 + \cos 2\pi f_x x) \quad (3.19)$$

olarak ifade edilebilir. Cismin yüzeyinde bozukluklar meydana geldiğinde, noktasal desen cismin yüzeyindeki noktaların yer değişikliklerini takip eder. Böylece sinüzoidal ızgara faz modülasyonuna uğramış olur.

$$t_2 = a[1 + \cos 2\pi(f_x x + \psi_x(x))] \quad (3.20)$$



Şekil 3.10. Filtreleme işleminin genlik spektrumunda gösterimi

Sonuç olarak cismin yüzeyindeki yükseklik değişiklerinin sebep olduğu faz kaymaları, sinüzoidal değişimli bir ızgarayla filtrelendiğinde tespit edilebildiği görülür.

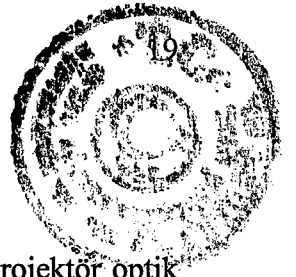
4. FOURIER DÖNÜŞÜM PROFİL BELİRLEME TEKNIĞİ

Bu tekniğin genel prensibi; bir yüzey üzerine projektör vasıtasıyla yansıtılan ızgara görüntüsünde, yükseklik farklılıklarının meydana getirdiği değişiklikleri algılayıp, Fourier dönüşüm tabanlı bir algoritmayla bunları yükseklik bilgisine çevirmektir. Yüzey üzerindeki her noktanın yüksekliği tespit edildikten sonra bir araya getirildiğinde cismin profili elde edilmiş olur. [1]

4.1. Optik Geometri

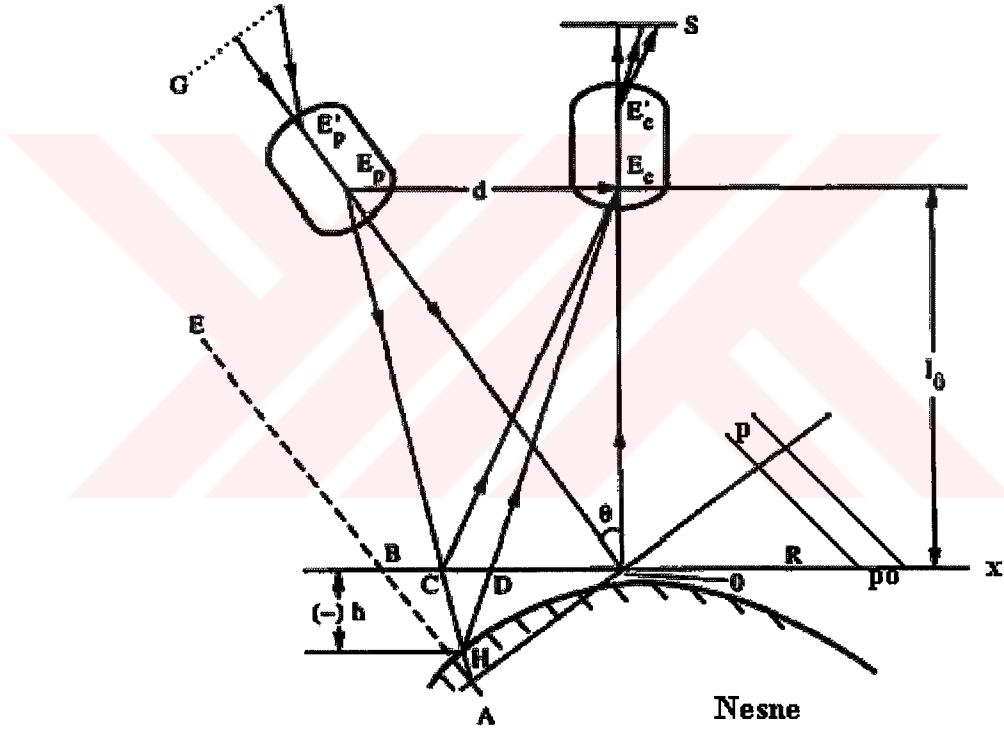
Fourier dönüşümü ile profil belirleme tekniklerinde (FTP) kullanılan optik geometriler, Moire yöntemlerindeki geometrilere benzerdir. Buradaki en önemli fark; ızgara yansıtma (projeksiyon) sisteminde kullanılan fiziksel ızgara dışında ikinci bir ızgaraya ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu aynı zamanda çok önemli bir avantajdır. İkinci bir ızgaranın kullanılması, yerleştirme ve ayarlama gibi problemler ortaya çıkaracağı için sistemi hantallaştırır. Ölçüm sisteminde, cismin üzerindeki ızgara görüntüsü sayısal olarak da oluşturulup yansıtılabilir. Burada optik geometriler açılırken, ışık kaynağının önüne yerleştirilen bir fiziksel ızgara yardımıyla ızgara görüntüsünün oluşturulduğu kabul edilecektir.

Genel olarak FTP tabanlı yöntemlerde iki farklı optik geometriden söz edilebilir. Çapraz eksenli optik geometri ve paralel optik eksenli geometri. Çapraz eksenli geometride; projektör ve kamera aynı düzlemde ve optik eksenleri nesnenin orta noktasına yakın bir yerde kesişirler. Bu yapı, kamera ve projektör aynı eksenle olduğu için kolay elde edilebilir. Fakat optik sistem uzak alan merkezli olmalıdır. Aksi halde ızgara görüntüsü bozulacağı için ölçüm yapmak mümkün olmaz. Paralel eksenli optik geometride; projektör, kamera aynı düzlemde ve optik eksenler paraleldir. Bu yapıda kullanışlı görüntüler elde edilebilir. Fakat görüntünün kameranın görüş açısına girmesi için ızgaranın projektörün optik ekseninden çok uzağa yerleştirilmesi gerekir. Sonuç olarak çapraz eksenli geometrinin daha kullanışlı olduğu söylenebilir [6].



4.1.1. Çapraz Optik Eksenli Geometri

Şekil 4.1’de çapraz optik eksenli geometri gösterilmiştir. $E_p'E_p$ projektör optik eksenliyle, $E_c'E_c$ görüntüleme optik eksenli bir referans düzlemi üzerinde çapraz olarak kesişir. Cismin yükseklik $h(x,y)$ değişimi bu referans düzleminden uzaklığa göre belirlenir. Izgara projektörün ışık kaynağının hemen önünde olduğu için, ızgaranın gölgesi cismin üzerine düşer. Izgara gölgelerinin meydana getirdiği desen, ızgara deseni olarak isimlendirilir. Izgara deseninin merkezi ile görüntüleme sisteminin (kamera) odağı aynı noktada çakışır [1].



Şekil 4.1. Çapraz optik eksenli geometri.

Nesne, referans düzlemine göre tamamen düz olduğu yani yükseklik değişiminin her noktada sıfır olduğu kabul edilirse; ızgara desenini bir Fourier serisiyle ifade edebiliriz.

$$g_r(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp(2\pi i n f_0 x) \quad (4.1.)$$

Burada $f_0=1/p_0$ izlenen ızgara görüntüsünün temel frekansıdır. Görüntüdeki ızgara çizgileri y eksenine paralel olduğu için, sadece x ekseninde değişim olduğu kabul edilir

$h(x,y)=0$ olduğu durumda dahi ızgara görüntüsünde, x ekseninde bir kayma görülür. Buna projeksiyon sisteminden kaynaklanmaktadır. Bu kayıp da dikkate alınırsa $h(x,y)=0$ için ızgara deseni:

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp \{ 2\pi i n f_0 [x + s_0(x, y)] \} \quad (4.2)$$

burada $s_0(x)=\overline{BC}$, x'e bağımlı bir fonksiyondur ve C B'nin sağında olursa pozitif işaretlidir. Eşitlik 4.2'yi faz modülasyonlu işaret olarak ifade edersek:

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp \{ i [2\pi n f_0 x + n \phi_0(x, y)] \} \quad (4.3)$$

$$\phi_0(x) = 2\pi f_0 s_0(x) = 2\pi f_0 \overline{BC} \quad (4.4)$$

olur. Buradaki ϕ_0 terimi çapraz optik eksen geometrisi sebebiyle meydana gelen faz kaymasıdır. Projektör sonsuza yerleştirilebilseydi bu şekilde bir kayıp söz konusu olmayacaktı. Fakat pratikte bunu gerçekleştirmek olanaksızdır. Bu kayıpların nasıl giderileceği sonraki bölümlerde açıklanacaktır.

Cismin yükseklik değişiminin sıfırdan farklı olduğu durum göz önünde bulundurulduğunda; EpA ışını yüzeyin H noktasına çarptığında, Ec'den izlenince ışın prensibinden referans düzleminde D noktasında görülecektir. Yeniden şekillenen ızgara deseni Fourier serisiyle ifade edilirse:

$$g(x, y) = r(x, y) \bullet \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp \{ 2\pi i n f_0 [x + s(x, y)] \} \quad (4.5)$$

veya

$$g(x, y) = r(x, y) \bullet \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp \{ i [2\pi n f_0 x + n \phi(x, y)] \} \quad (4.6)$$

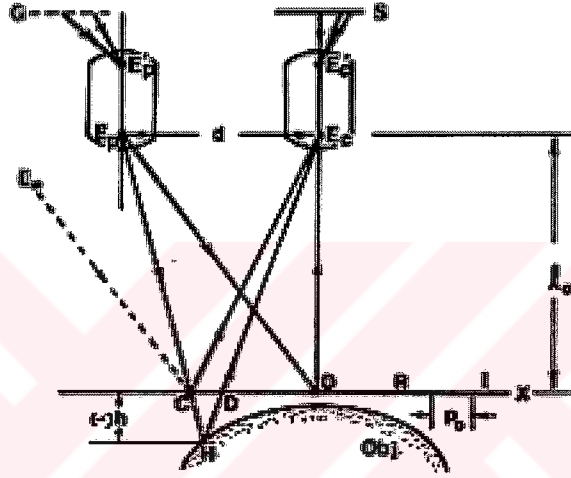
olur. Burada :

$$\phi(x, y) = 2\pi f_0 s(x, y) = 2\pi f_0 \overline{BD} \quad (4.7)$$

şeklinde bir fonksiyondur. $r(x, y)$ ise yüzey üzerindeki yansıma dağılımıdır.

4.1.2. Paralel Optik eksenli Geometri

Şekil 4.2’de paralel optik eksen geometrisi gösterilmiştir. Kamera ve projektör referans düzleminden eşit uzaklıkta, optik eksenleri ise paraleldir [4].



Şekil 4.2. Paralel optik eksen geometrisi.

Burada da şekil 4.2’de verilen optik geometride ızgaranın gölgesi cisim üzerine düşer. Bu yapıda, 4.1’den farklı olarak A, B, C noktalarının aynı doğru üzerinde olduğu söylenebilir. Bu durumda 4.4. ve 4.7. eşitlikleri:

$$\begin{aligned} \phi_0(x) &= 2\pi f_0 s_0(x) = 2\pi f_0 \overline{BC} = 0 \\ \phi(x) &= 2\pi f_0 s_0(x, y) = 2\pi f_0 \overline{CD} \end{aligned} \quad (4.8)$$

olur. Bu geometrini en büyük dezavantajı; düzgün ızgara çizgileri üretilemeyeşidir. Bu yüzden bu geometri pratikte çok az kullanılır. 4.8 eşitliği dışında aynı matematiksel yaklaşımlar burada da geçerlidir.

4.2. Fourier Dönüşüm Yöntemi

Eşitlik (4.6)'da verilen, cismin yükseklik değişimleri nedeni ile değişime uğramış ızgara deseni, nf_0 taşıyıcı uzamsal frekansının modüle ettiği $\phi(x,y)$ fazlı ve $r(x,y)$ genlikli çoklu işaret şeklinde yorumlanabilir [1]. Fazın yükseklik bilgisi taşıdığı bilindiği için [1] buradaki ilk problem fazın yansıma genliğinden nasıl ayrılacağıdır. Eşitlik (4.6) yeniden ifade edilecek olursa:

$$g(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} q_n(x, y) \exp(2\pi i n f_0 x) \quad (4.9)$$

olur. Burada q_n

$$q_n(x, y) = A_n r(x, y) \exp[i n \phi(x, y)] \quad (4.10)$$

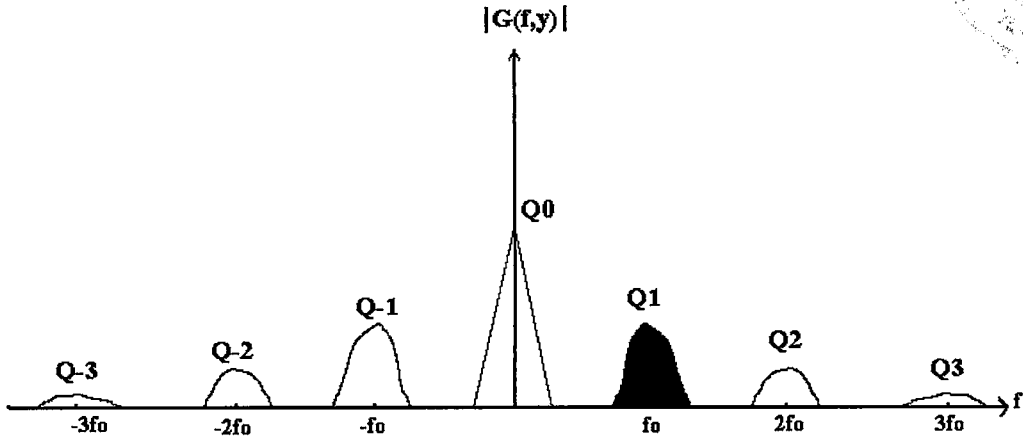
şeklinde bir değişkendir. Eşitlik 4.9'un x eksenine göre bir boyutlu Fourier dönüşümü alınır:

$$G(f, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \exp(-2\pi i f x) dx = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} Q_n(f - n f_0, y) \quad (4.11)$$

bulunur. Burada $G(f,y)$ ve $Q_n(f,y)$, $g(x,y)$ ve $q_n(x,y)$ 'nin x 'e göre bir boyutlu Fourier dönüşümleridir. $r(x,y)$ ve $\phi(x,y)$, f_0 ızgara frekansına göre çok yavaş değiştikleri için bütün $Q_n(f-nf_0,y)$ spektrumunun bütün bileşenleri diğerlerinden f_0 ızgara taşıyıcı frekansıyla ayrılır [7]. Şekil (4.3)'te görüldüğü gibi bütün frekans spektrumundan sadece $Q_1(f-f_0,y)$ bileşeni seçilecek şekilde filtre edildikten sonra ters Fourier dönüşümü alınır:

$$\hat{g}(x, y) = q_1(x, y) \exp(2\pi i f_0 x) = A_1 r(x, y) \exp\{i[2\pi f_0 x + \phi(x, y)]\} \quad (4.12)$$

şeklinde bir kompleks fonksiyon elde edilir.



Şekil 4.3. Değişime uğramış ızgara görüntüsünün filtre edilmesinin genlik frekans spektrumunda gösterilişi

Aynı işlemler yüksekliğin sıfır olduğu durum için uygulansın. Eşitlik (4.3) yeniden ifade edilirse:

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} q_n(x, y) \exp(2\pi i n f_0 x) \quad (4.13)$$

Burada q_n

$$q_n(x, y) = A_n r(x, y) \exp[i n \phi_0(x, y)] \quad (4.14)$$

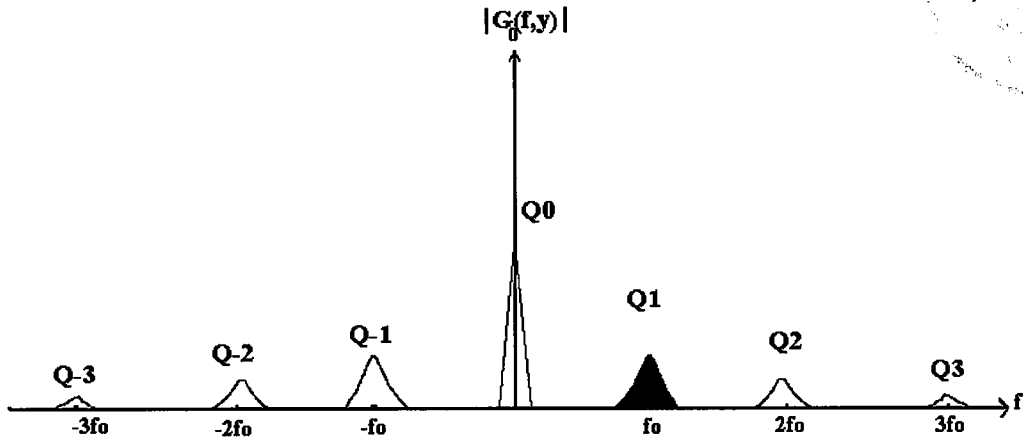
Eşitlik (4.14)'ün x eksenine göre bir boyutlu Fourier dönüşümü alınırsa:

$$G_0(f, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) \exp(-2\pi i f x) dx = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} Q_n(f - n f_0, y) \quad (4.15)$$

bulunur. Burada $G_0(f, y)$ ve $Q_n(f, y)$, $g_0(x, y)$ ve $q_n(x, y)$ 'nin x'e göre bir boyutlu Fourier dönüşümleridir. Şekil 4.4'de görüldüğü gibi bütün frekans spektrumundan sadece $Q_1(f - f_0, y)$ bileşeni seçilecek şekilde filtre edildikten sonra ters Fourier dönüşümü alınırsa:

$$\hat{g}_0(x, y) = q_1(x, y) \exp(2\pi i f_0 x) = A_1 r(x, y) \exp\{i [2\pi f_0 x + \phi_0(x, y)]\} \quad (4.16)$$

şeklinde bir kompleks fonksiyon elde edilir.



Şekil 4.4. $h(x,y)=0$ durumunda ızgara görüntüsünün filtre edilmesinin genlik frekans spektrumunda gösterilişi.

Eşitlik (4.12) ve (4.16)'dan yeni bir işaret tanımlanırsa:

$$\hat{g}(x,y)\hat{g}_0(x,y) = |A_1|^2 r(x,y) \exp\{i[\Delta\phi(x,y)]\} \quad (4.17)$$

şeklinde yeni bir fonksiyon elde edilir. Burada:

$$\Delta\phi(x,y) = \phi(x,y) - \phi_0(x,y) = 2\pi f_0(\overline{BD} - \overline{BC}) = 2\pi f_0 \overline{CD} \quad (4.18)$$

şeklinde faz farkı fonksiyonudur. Sonuç olarak eşitlik (4.17) ve eşitlik (4.18) yükseklik değişiminden kaynaklanan faz modülasyonu ifade eder. Faz farkı:

$$\Delta\phi(x,y) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(\hat{g}(x,y)\hat{g}_0(x,y))}{\text{Re}(\hat{g}(x,y)\hat{g}_0(x,y))} \right) \quad (4.19)$$

şeklinde hesaplanabilir. Bu şekilde fazları birbirinden çıkararak, hizalama hataları veya lens kayıpları gibi kayıpları sıfırlamış oluruz. Faz çıkarma işlemini kullanarak başka hatalar da engellenebilir. Örneğin projektör ızgarası tam olarak hizalanamazsa yani y eksenine bir açı oluşturursa sıfırdan farklı ilave bir faz terimi ortaya çıkar.

$$\phi_0(y) = 2\pi f_0 y \tan(\delta\alpha) \quad (4.20)$$

Bu durumda da eşitlik (4.18) ve (4.19) kullanılarak hata sıfırlanmış olur.

4.2.1. Faz Düzeltme

Yüzeyin her noktası için hesaplanan faz farkı teriminde gürültü dışında süreksizlik oluşturacak farklı bir etken daha vardır. Faz farkı $-\pi$ ile $+\pi$ arasında değiştiği için birbirini takip eden iki faz bilgisi arasında 2π den daha büyük bir değişim görülebilir. Bu değişim beklenmeyen bir durumdur. Trigonometrik olarak $\alpha = \alpha + 2\pi$ olduğundan, takip eden faz değerine 2π eklenerek veya çıkarılarak bu süreksizlik ortadan kaldırılmış olur. Bu işleme faz düzeltme (**unwrap**) denir [1].

Bu algoritma basitçe şu şekilde özetlenebilir [8]:

- 1-) Birbirini takip eden iki faz bilgisi arasındaki fark $+\pi$ ’den büyük olursa, sondaki faz bilgisinden 2π çıkarılır.
- 2-) Birbirini takip eden iki faz bilgisi arasındaki fark $-\pi$ ’den küçük olursa, sondaki faz değerine 2π ilave edilir.

Bu işlem hem x, hem de y eksenini için tekrarlanırsa bütün yüzeyin iki boyutlu yükseklik faz farkı haritası çıkarılmış olur.

4.2.2. Fazın Yüksekliğe Çevrilmesi

Bu bölümde yüzey üzerindeki her nokta için ayrı hesaplanan faz bilgisinin yükseklik değişimine çevrilmesi incelenecektir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilen geometrilerin her ikisinde de E_pHE_c üçgeniyle CHD üçgeninin benzerliğinden [1]:

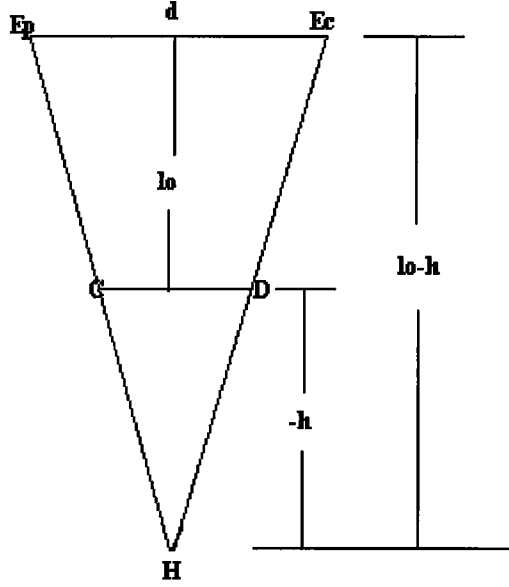
$$\frac{\overline{CD}}{d} = \frac{-h(x, y)}{l_0 - h(x, y)} \quad (4.21)$$

$$\overline{CD} = \frac{-dh(x, y)}{l_0 - h(x, y)} \quad (4.22)$$

bulunur. Eşitlik 4.18’i Eşitlik 4.22’de yerine yazılıp, $h(x, y)$ çekilirse:

$$h(x, y) = \frac{l_0 \Delta\phi(x, y)}{[\Delta\phi(x, y) - 2\pi f_0 d]} \quad (4.23)$$

olarak elde edilir.



Şekil 4.5. Üçgenlerin benzerliğinden yükseklik bilgisinin elde edilmesi.

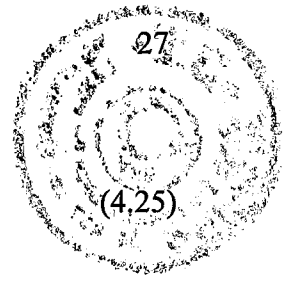
$f_0=1/p_0=\cos\theta/p$ olduğundan:

$$h(x, y) = \frac{l_0 p_0 \left[\frac{\Delta\phi(x, y)}{2\pi} \right]}{\left\{ p_0 \left[\frac{\Delta\phi(x, y)}{2\pi} \right] - d \right\}} \quad (4.24)$$

şeklinde $h(x, y)$ dağılımı gösterilmiş olur. Buradaki sonuç Moire yöntemlerin yükseklik dağılımına oldukça bezerdir. [1] Fakat Moire yöntemlerinde her bir yükseklik elemanı komşu iki ızgara aralığı için tanımlanmıştır. Buradaki sonuç ise yüzeyin her noktası için bir yükseklik değeri tanımlar. Bu yüzden Fourier dönüşümüyle profil belirleme tekniği, Moire yöntemlerine göre çok daha kullanışlıdır.

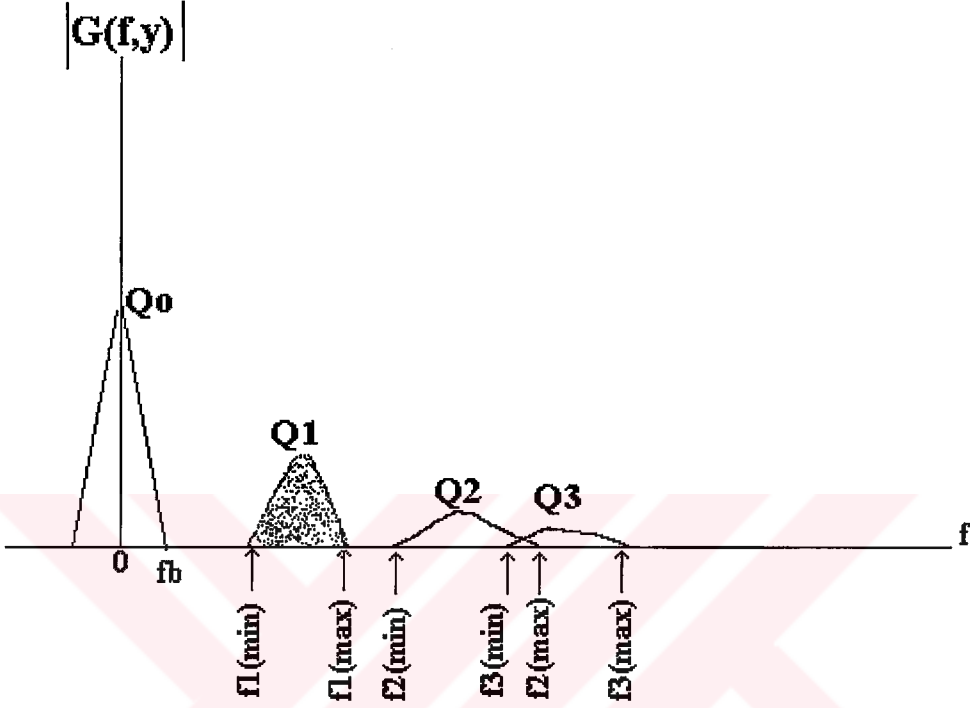
4.2.3. Ölçülebilir En Büyük Yükseklik Değişimi

Fourier dönüşüm profil belirleme metodunda, işaretin frekans spektrumundan f_0 temel frekanslı bileşen seçilmektedir. Bu yüzden bu bileşenin diğerlerinden net bir biçimde ayrılabilir olması gerekmektedir. Bu durum ölçülebilecek maksimum değişimi etkileyen bir etkidir. Daha önceki bölümlerde $r(x, y)$ 'nin değişiminin f_0 'dan çok küçük olduğu belirtilmişti. Spektrum bileşenleri genel durum için ifade edilecek olursa [9]:



$$f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} [2\pi f_0 n x + n\phi(x, y)]$$

$$= n f_0 + \frac{n}{2\pi} \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x}$$



Şekil 4.6 Q_1 bileşeninin tüm spektrumdan ayrılması.

Birinci spektrum bileşeninin diğerlerinden kolaylıkla ayrılabilmesi için:

$$(f_1)_{\max} < (f_n)_{\min} \quad (n=2,3,4,\dots) \quad (4.26)$$

$$f_b < (f_1)_{\min} \quad (4.27)$$

olmalıdır. Eşitlik (4.25), (4.26) ve (4.27)'de yerine yazılırsa:

$$f_0 + \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{\max} < n f_0 + \frac{n}{2\pi} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{\min} \quad (n=2,3,4,\dots) \quad (4.28)$$

$$f_b < f_0 + \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{\min} \quad (4.29)$$

olur. Daha kullanışlı bir yapıda ifade edilirse:

$$f_0 + \frac{1}{2\pi} \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\max} < n f_0 - \frac{n}{2\pi} \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\max} \quad (4.30)$$



$$f_b < f_0 - \frac{1}{2\pi} \left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\max} \quad (4.31)$$

bulunabilir. Burada $\left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\max}$, mutlak değerler $\left| \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right]_{\max} \right|$ ve $\left| \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right]_{\min} \right|$ en büyük değeridir. Eşitlik (4.30) ve (4.31) tekrar ifade edilirse:

$$\left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\max} < \left(\frac{n-1}{m+1} \right) 2\pi f_0 \quad (n=2,3,4,\dots) \quad (4.32)$$

$$\left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\max} < 2\pi (f_0 - f_b) \quad (4.33)$$

şeklinde daha sade bir yapı elde edilmiş olur. Genel durumda f_b $f_0/2$ 'den çok küçük olduğu için $n=2$ için:

$$\left| \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\max} < \frac{2\pi f_0}{3} \quad (4.34)$$

elde edilir. En büyük yükseklik değişimi durumunda $\phi(x,y)$ 'nin $\phi_0(x,y)$ 'den çok büyük olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bu durumda eşitlik (4.23) yeniden yazılırsa:

$$\phi(x,y) \approx \Delta(x,y) \approx -\left(\frac{2\pi f_0 d}{l_0} \right) \cdot h(x,y) \quad (4.35)$$

olur. $l_0 \gg h(x,y)$ olduğu göz önünde bulunursa eşitlik (4.34) ve eşitlik (4.35)'den:

$$\left| \frac{\partial h(x,y)}{\partial x} \right|_{\max} < \frac{1}{3} \left(\frac{l_0}{d} \right) \quad (4.36)$$

elde edilir. Sonuç olarak yükseklik değişiminin x eksenine göre (ızgara değişimi yönünde) türevi, referans düzleminin görüntüleme düzlemine uzaklığının, kamera ile projektör arasındaki mesafeye bölümünün üçte birinden küçük olması gerektiği sonucu bulundu.



5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, 4. Bölümde teorik olarak açıklanan Fourier Dönüşümü ile Profil Belirleme Tekniği'nin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla, gerçek veriler ve bilgisayar ortamında üretilen bir deneme faz fonksiyonu üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bilgisayar ortamındaki bütün işlemler MATLAB[®] paket programında gerçekleştirilmiştir.

5.1. Fourier Dönüşümüyle Profil Belirleme Tekniğinin Bilgisayar Ortamında Benzetimi

Eşitlik 5.1'de bir deneme faz fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu fonksiyonun, bir yüzeyin yükseklik değişimini gösterdiği kabul edilsin. Bu durumda bu yüzeyin ızgara projeksiyonuna tabi tutularak elde edilen yüzey görüntüsünden yükseklik değişiminin elde edilebilmesi gerekir.

$$\phi(x, y) = 0.0005 \left[(x - 256)^2 + (y - 256)^2 \right] \quad (5.1)$$

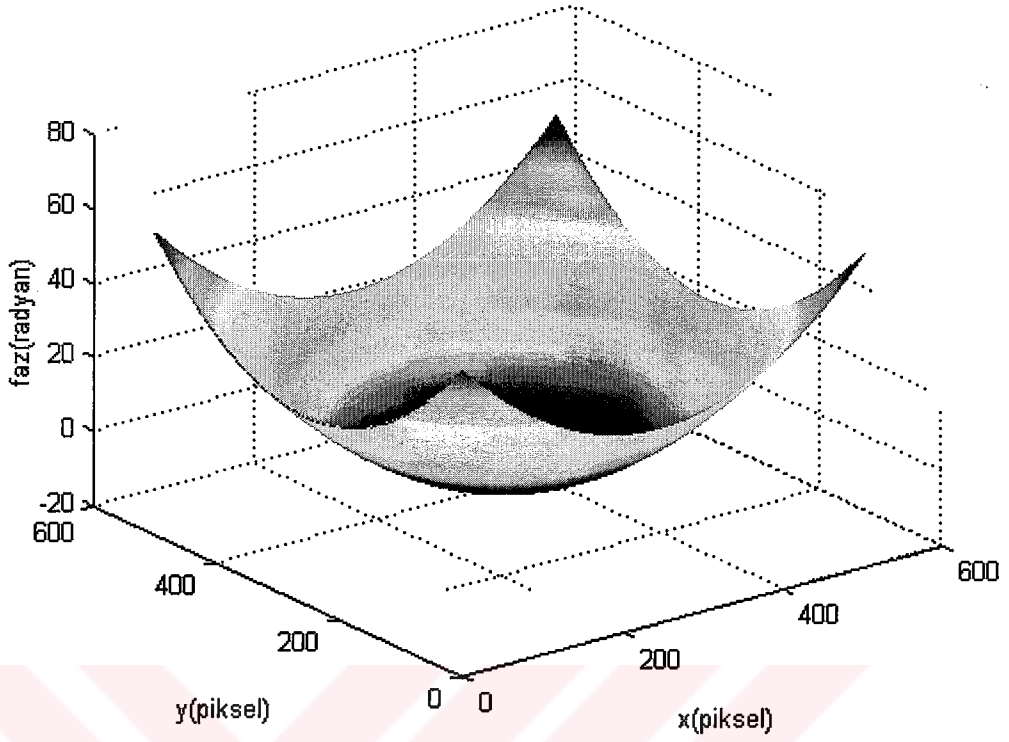
Bu deneme faz fonksiyonunu sinüzoidal olarak değişen bir ızgara görüntüsünün fazına eklenirse; sinüzoidal ızgara görüntüsünün fazında kayma meydana getirilmiş olur. Bu durum Bölüm 4'te açıklandığı gibi, yükseklik değişimlerinden kaynaklanan faz kayması durumunun eşdeğeridir. Şekil 5.1 ve 5.2'de, eşitlik (5.1)'de ifade edilen deneme faz fonksiyonunun üç boyutlu değişimi görülmektedir. Eşitlik (4.2)'deki gibi sinüzoidal değişimli bir ızgara görüntüsü tanımlansın.

$$I(x, y) = 1 + 0.5 \cos(mx) \quad (5.2)$$

Bu ızgara x ekseninde $m=1,28$ rad/piksel büyüklüğünde bir frekansa sahip sinüzoidal fonksiyondur. Eşitlik (5.1)'de gösterildiği gibi değişime sahip yüzey üzerine eşitlik (5.2)'de gösterilen sinüzoidal ızgara yansıtıldığında elde edilen görüntünün değişimi eşitlik (5.3)'te verilmiştir.

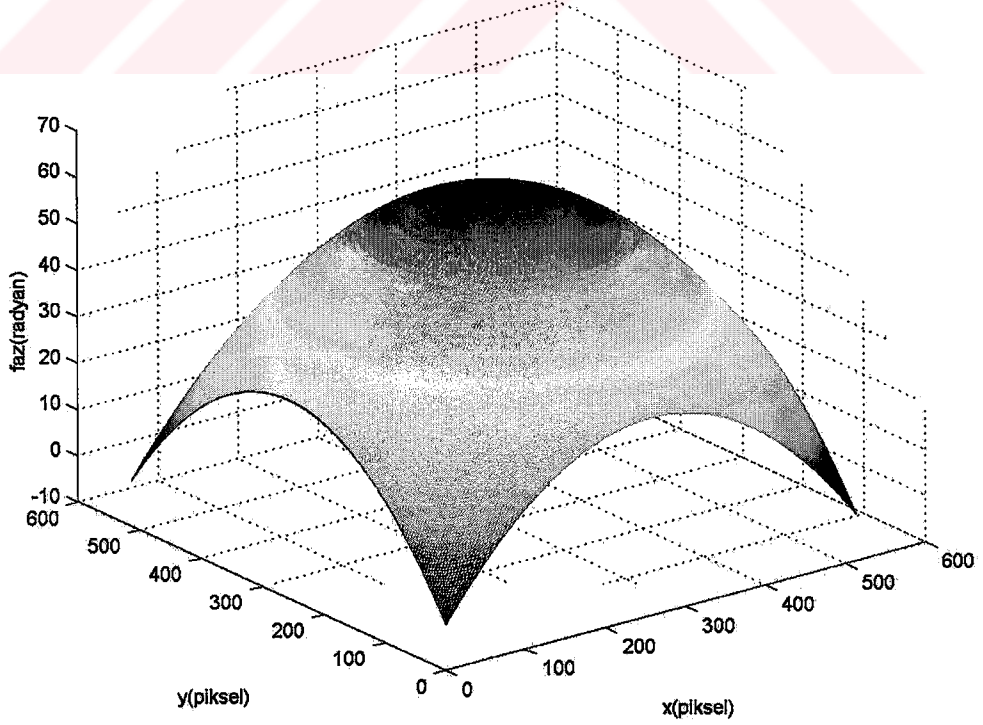
$$I(x, y) = 1 + 0,5 \cos[\phi(x, y) + mx] \quad (5.3)$$

Faz Fonksiyonunun Değişiminin Üç Boyutlu Görünümü



Şekil 5.1. Izgara görüntüsünün üç boyutlu değişimi.

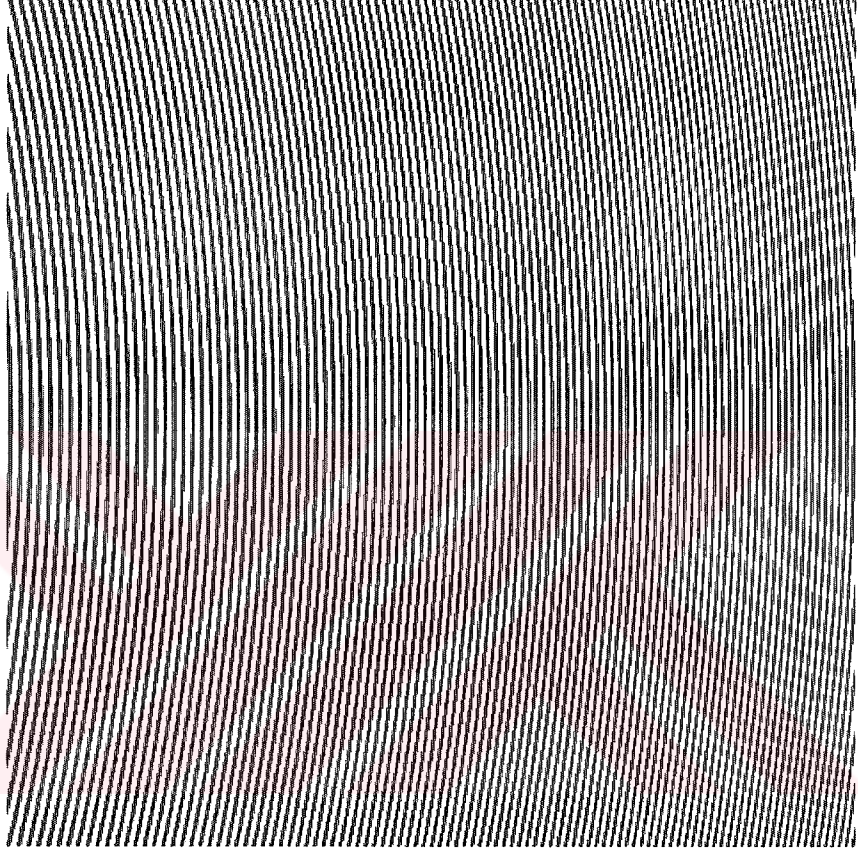
Faz Fonksiyonu Değişiminin Döndürülmüş Görüntüsü



Şekil 5.2. Faz fonksiyonunun değişiminin üç boyutlu döndürülmüş görüntüsü.

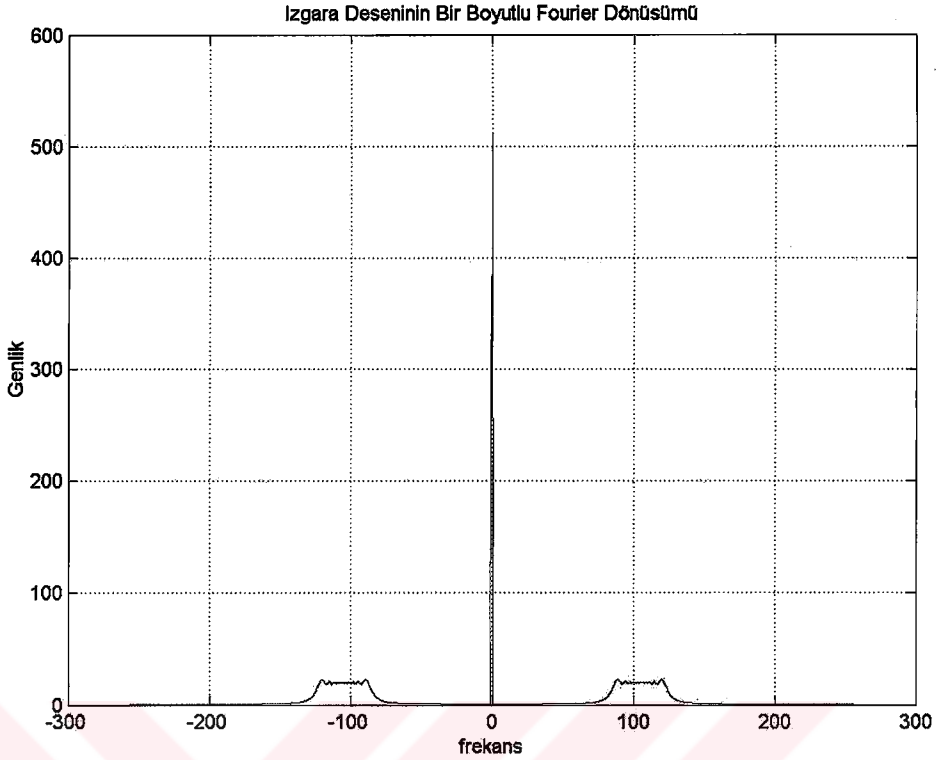
Eşitlik (5.3), x ekseninde $m=1,28$ rad/piksel kadar taşıyıcı frekansa sahip, x ve y eksenlerinde faz kaymasına uğramış bir sinüzoidal değişimi göstermektedir. Değişim gösteren görüntü Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

Deneme Fonksiyonunun Görüntüsü



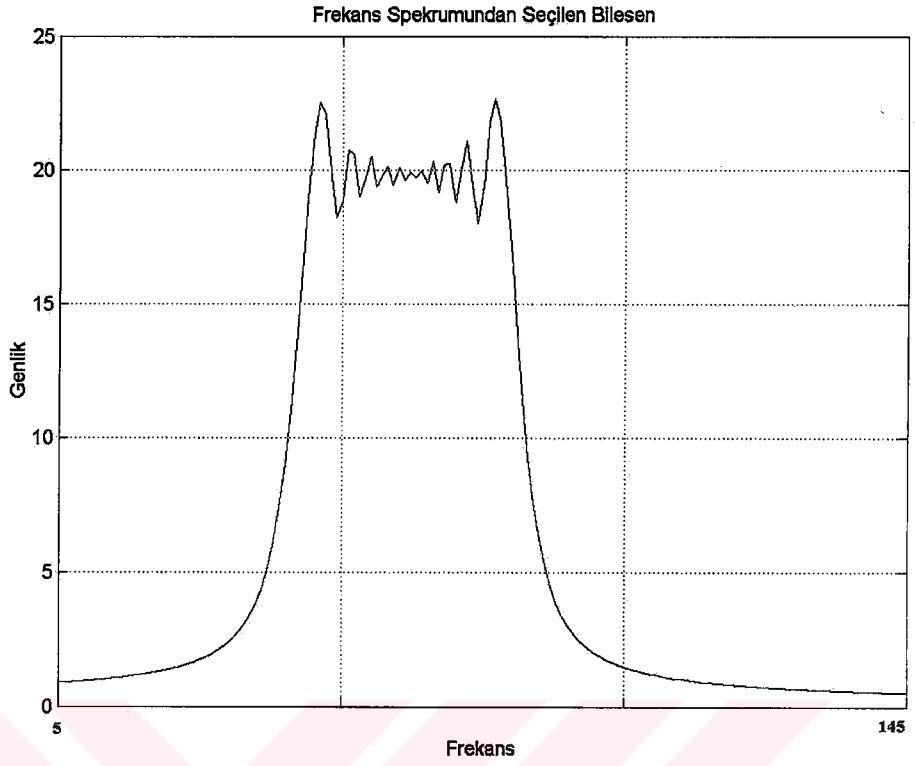
Şekil 5.3 Faz kaymasına uğramış sinüzoidal ızgara görüntüsü.

Şekil 5.3'teki görüntünün taşıyıcı frekansı x ekseninde olduğu için bütün satırların bir boyutlu Fourier dönüşümü alınırsa, bu değişimin bir satırının genlik spektrumu Şekil 5.4'deki gibi olur.

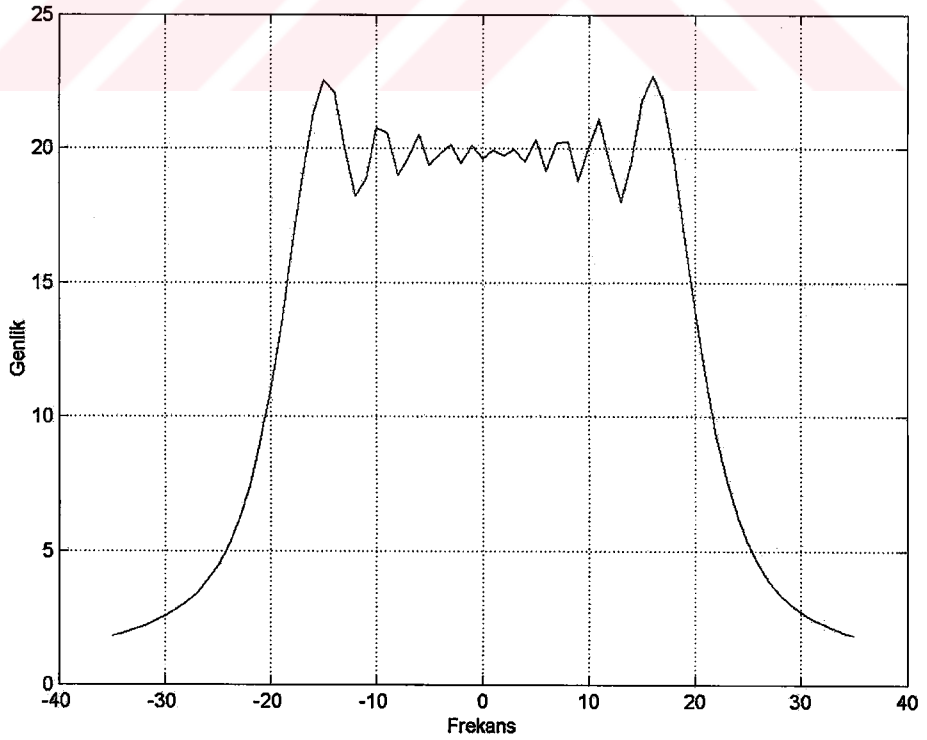


Şekil 5.4. Sinüzoidal ızgaranın bir satırının frekans genlik spektrumu.

Şekil 5.4 aynı zamanda faz modülasyonuna uğramış bir işaretin genlik spektrumu ile aynıdır. Frekans spektrumundan Bölüm 4'te ifade edildiği gibi w_0 temel frekanslı bileşen ayrılmalıdır. Fourier dönüşüm yöntemine göre, bütün görüntünün frekans spektrumunda bu bileşen seçilip temel frekansı 0 olacak şekilde kaydırıldıktan sonra bir boyutlu ters Fourier dönüşümü alınırsa, elde edilen kompleks fonksiyonun faz değişimi test faz fonksiyonunu vermelidir.

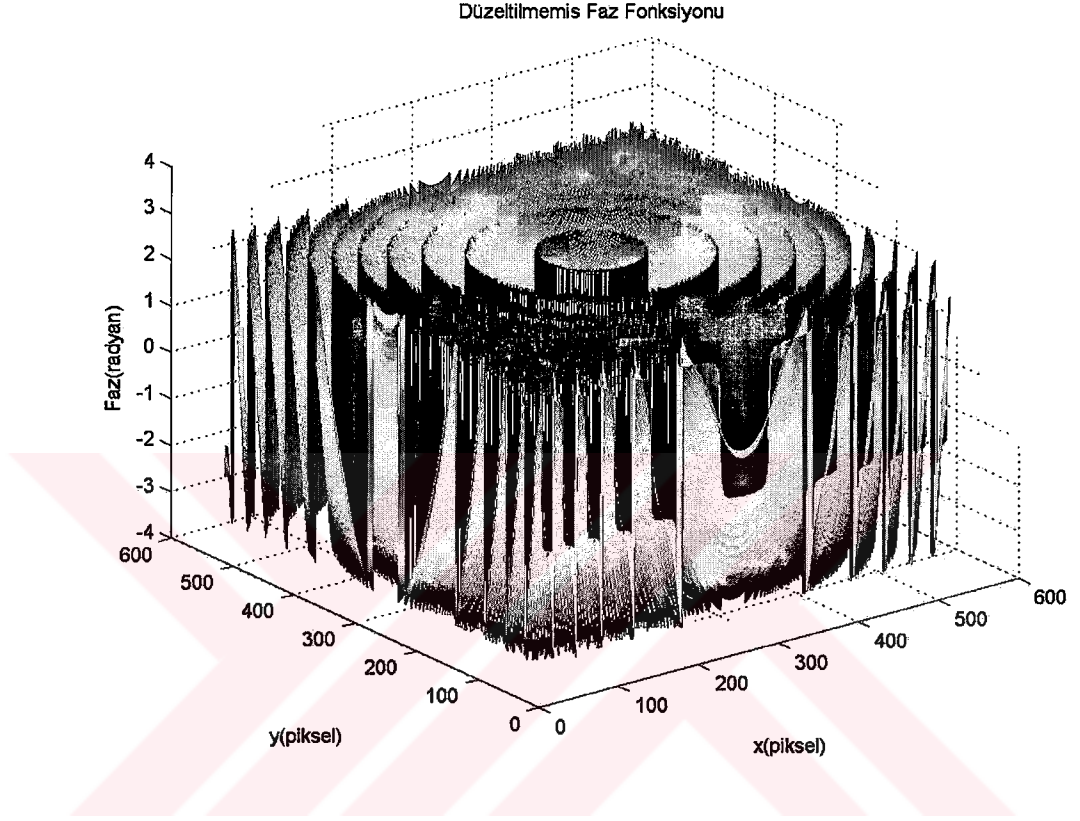


Şekil 5.5. Frekans spektrumunun birinci temel bileşenin genlik spektrumu.

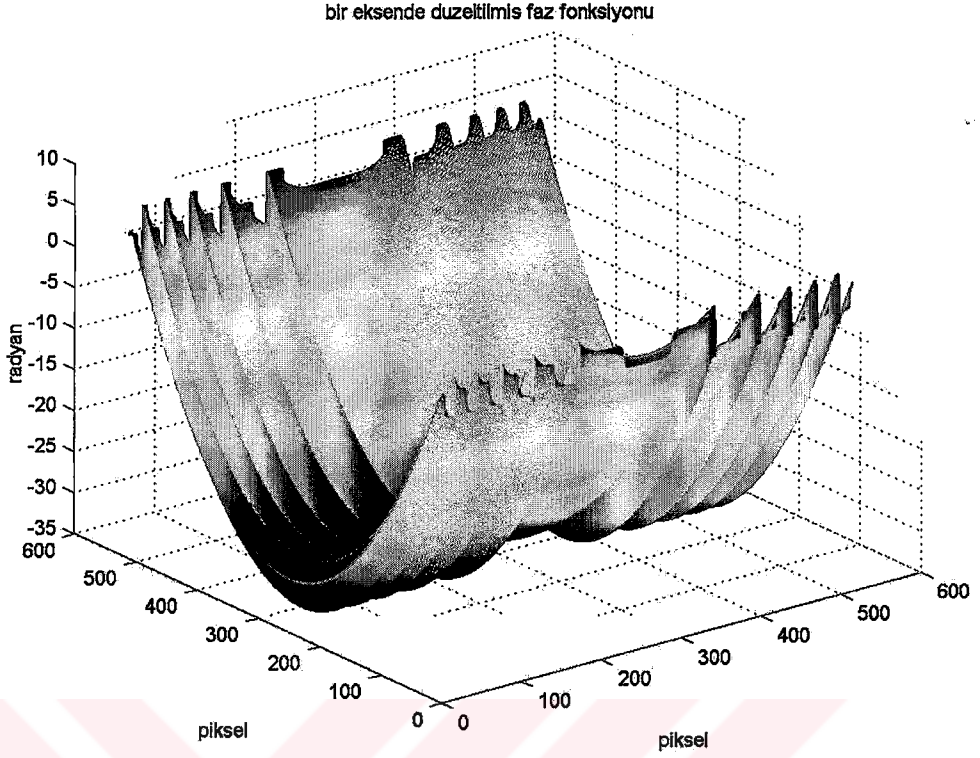


Şekil5.5. Birinci temel bileşenin, sıfır temel frekansına kaydırılması.

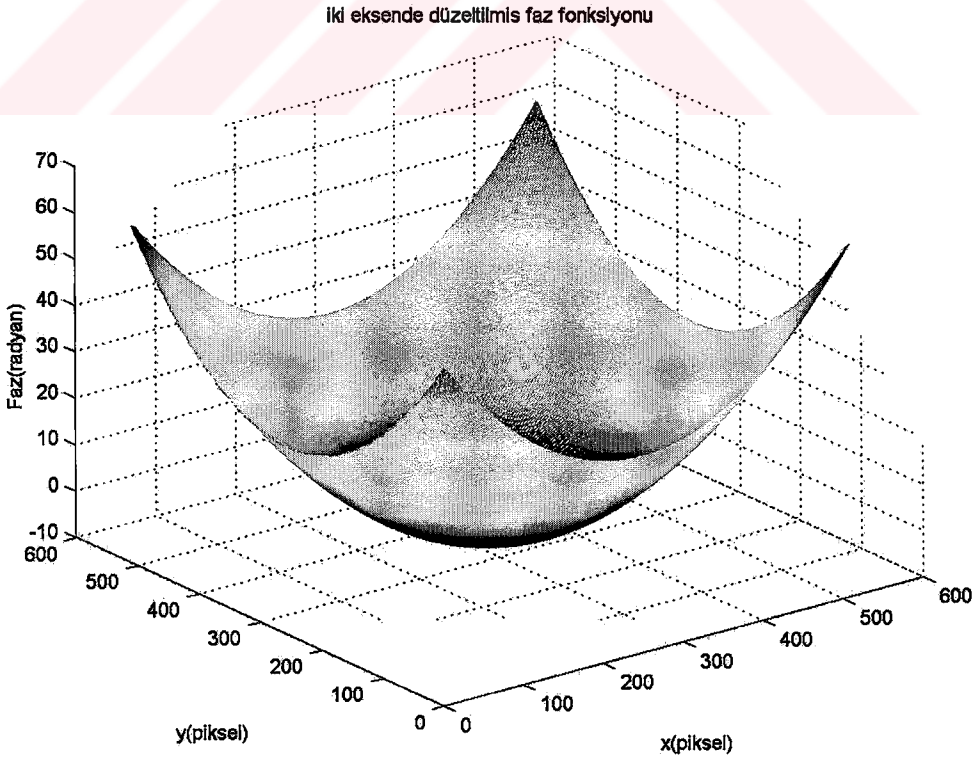
Ters Fourier dönüşümü alındıktan sonra elde edilen kompleks fonksiyonun faz değişimi faz düzeltme işlemine tabi tutulmalıdır. Faz düzeltme işlemi hem x hem de y eksenlerinde uygulanmalıdır. Şekil 5.6, 5.7, 5.8’de faz düzeltme yapılmadan önceki ve sonraki faz değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Düzeltilmemiş faz değişimi.

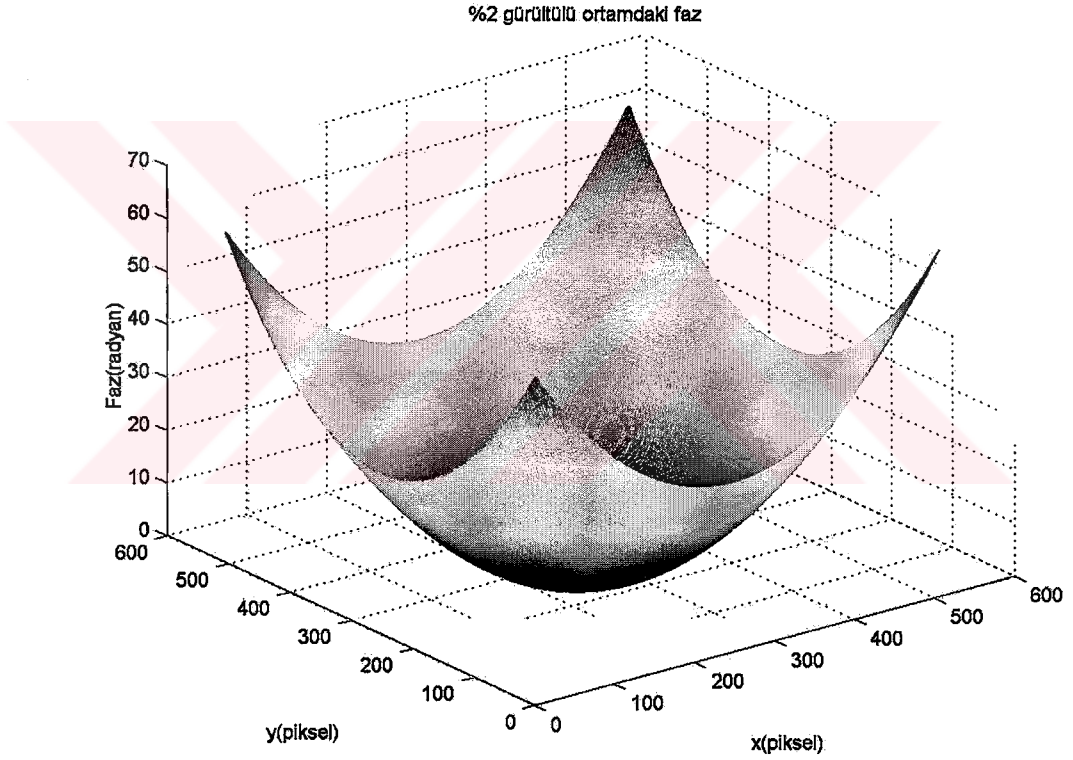


Şekil 5.7. Bir ekseninde düzeltilmiş faz değişimi.



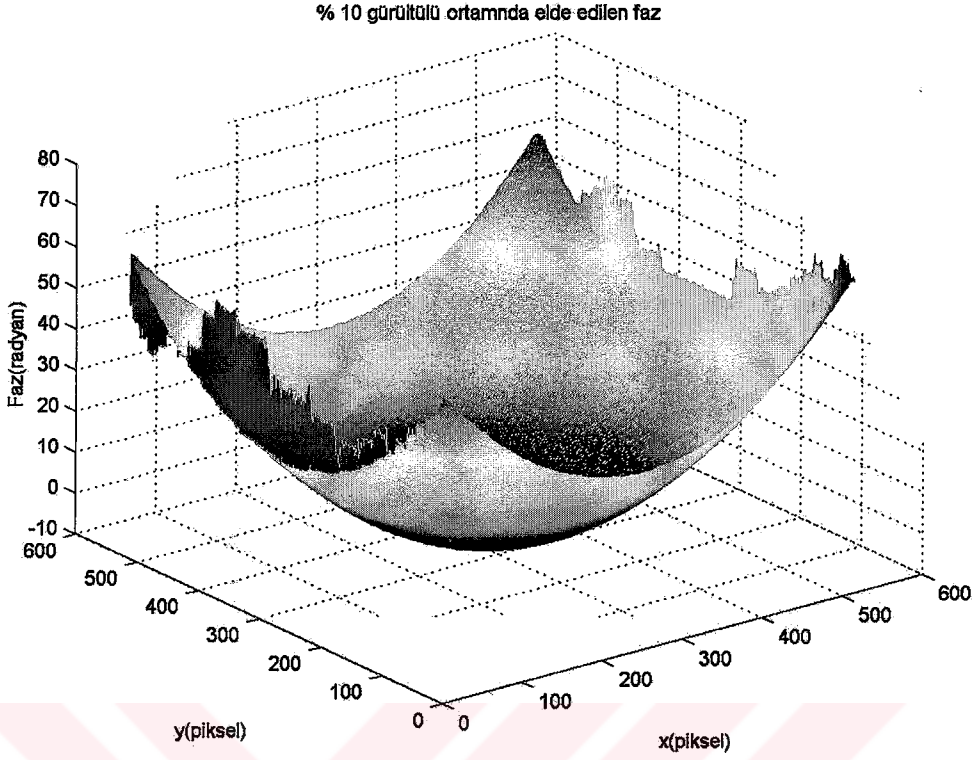
Şekil 5.8. İki ekseninde de düzeltilmiş faz fonksiyonu.

Şekil 5.8'in Şekil 5.1 ile aynı olduğu görülür. Böylece Fourier dönüşümüyle profil belirleme tekniğinin bilgisayar ortamında doğrulanmış oldu. Gerçek şartlarda, ölçüm yaparken gürültü etkisi her zaman göz önünde bulundurulmalıdır. Bütün sistemlerin beyaz gürültü diye isimlendirilen, eşdağılımlı (uniform) bir gürültüsü vardır. Beyaz gürültü; gürültünün en büyük değişim aralığının, gürültüsüz işaretin en büyük değişim aralığına bölünmesiyle yüzde şeklinde ifade edilebilir. Örneğin %2, %5, %10 gibi. Sinüzoidal değişimli faz kaymasına uğramış ızgara görüntüsüne beyaz gürültü eklendikten sonra yukarıda açıklanan işlemler tekrarlanırsa, FTP üzerinde gürültü etkisi gözlenmiş olur. Aşağıda bilgisayar ortamında beyaz gürültü eklendikten sonra yapılan FTP analiz sonuçları görülmektedir.

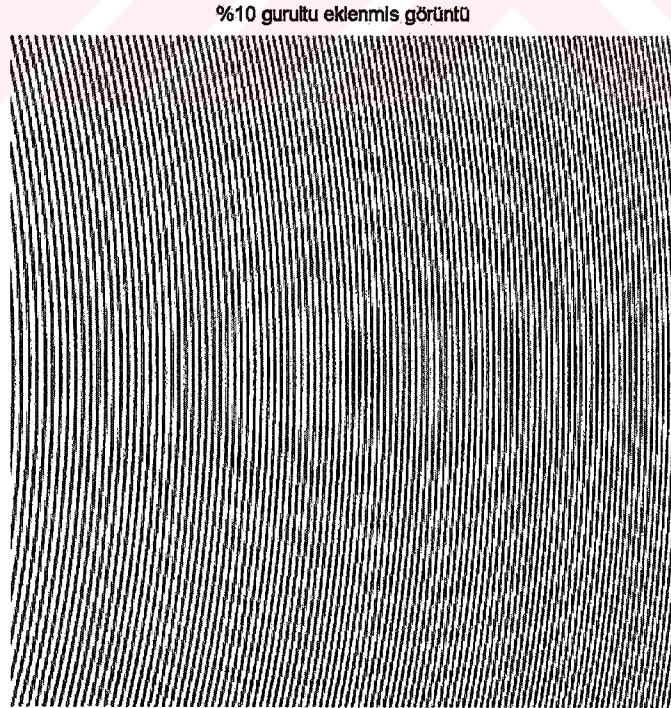


Şekil 5.9 %2 gürültülü durumda elde edilen faz değişimi.

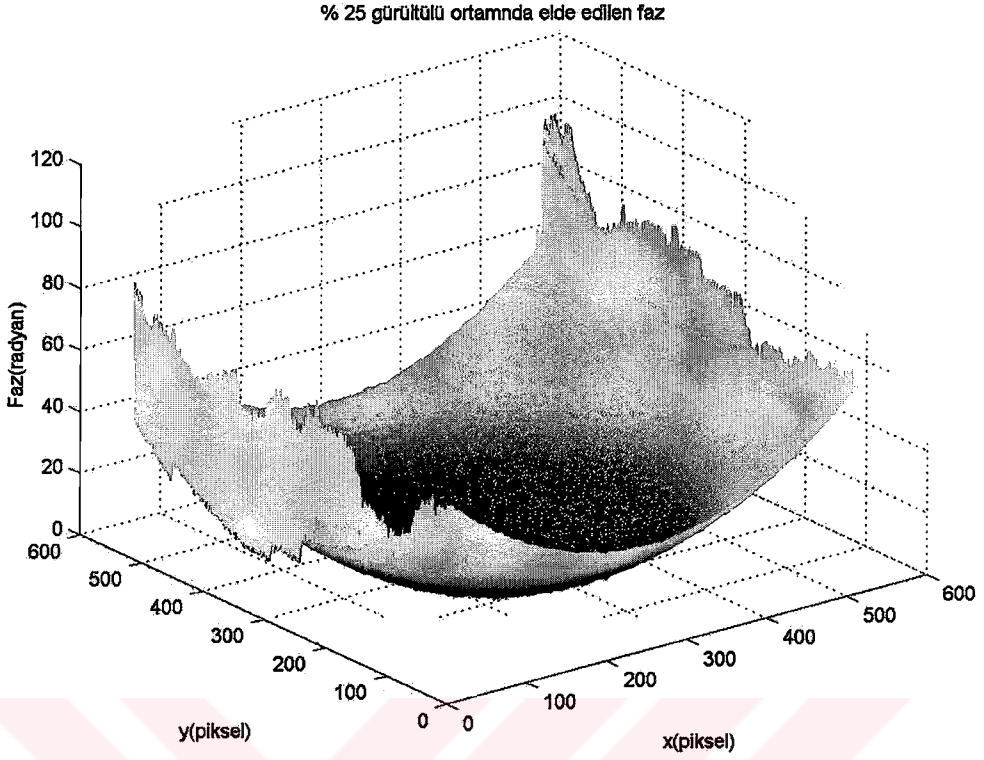
Şekil 5.9'dan görülebileceği gibi %2 gürültülü ortamda FTP sağlıklı bir şekilde sonuç vermiştir.



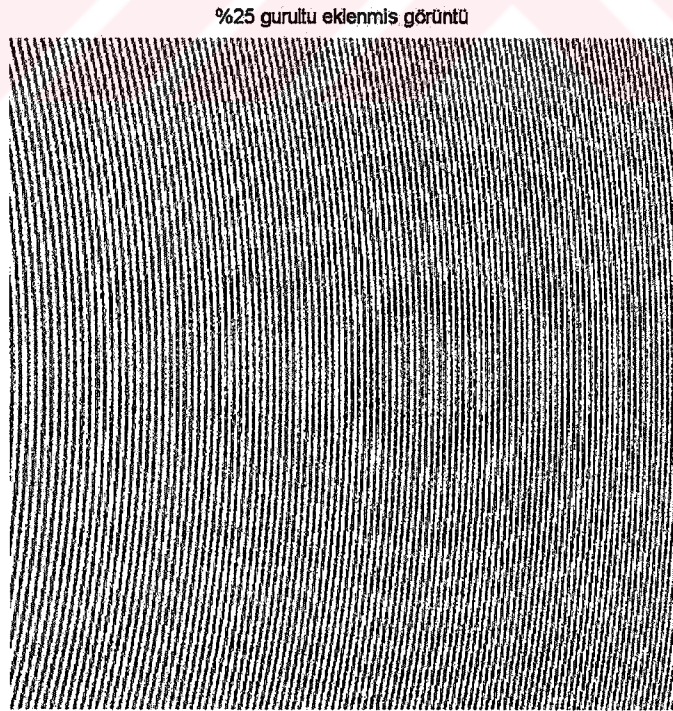
Şekil 5.10. %10 gürültü eklendikten sonra elde edilen faz değişimi.



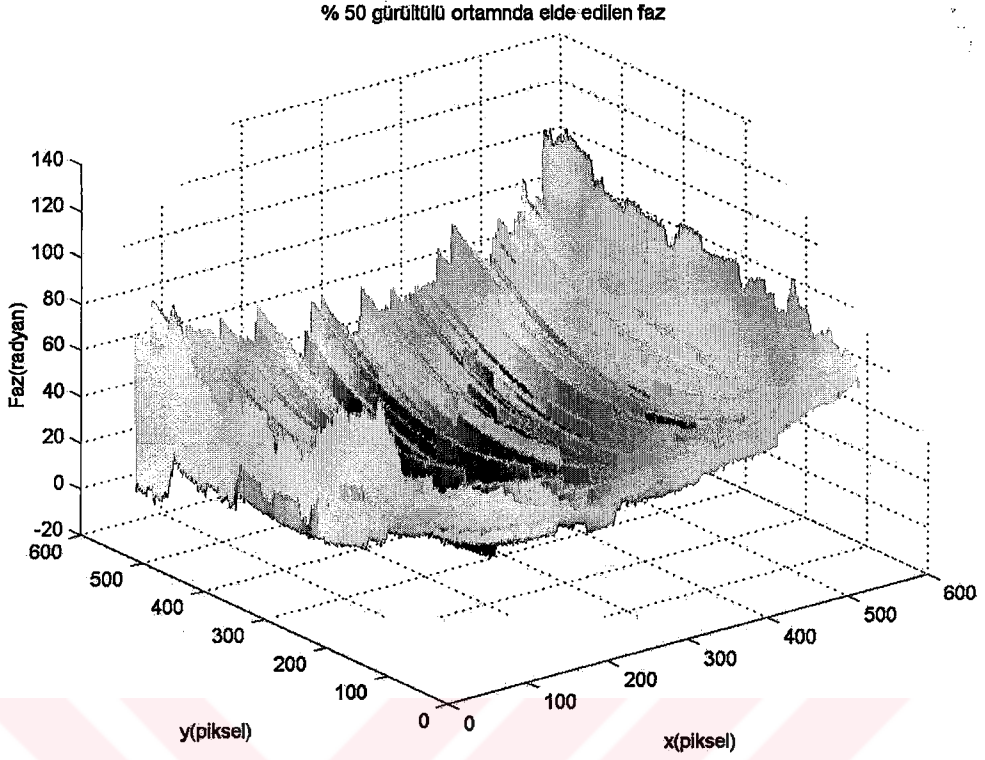
Şekil 5.11 %10 gürültü eklenmiş sinüzoidal ızgara görüntüsü.



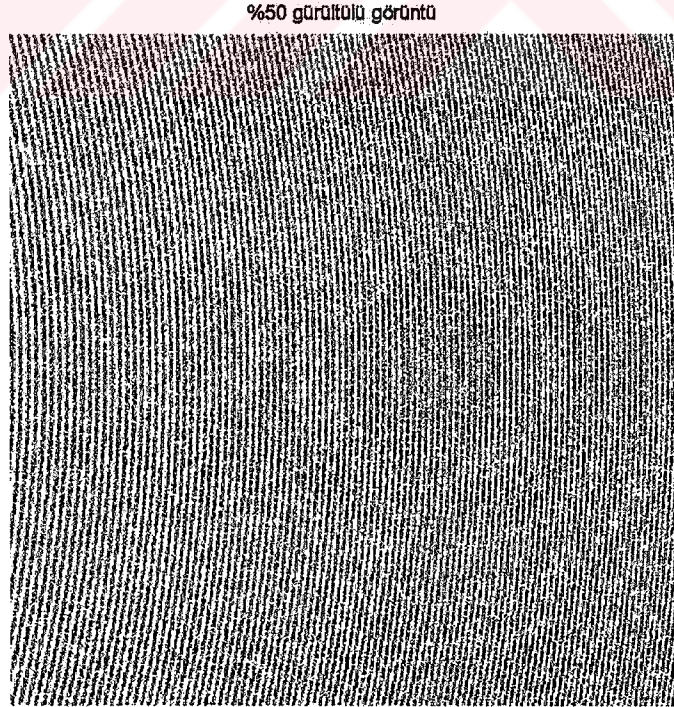
5.12. %25 gürültü eklendikten sonra elde edilen faz değışimi.



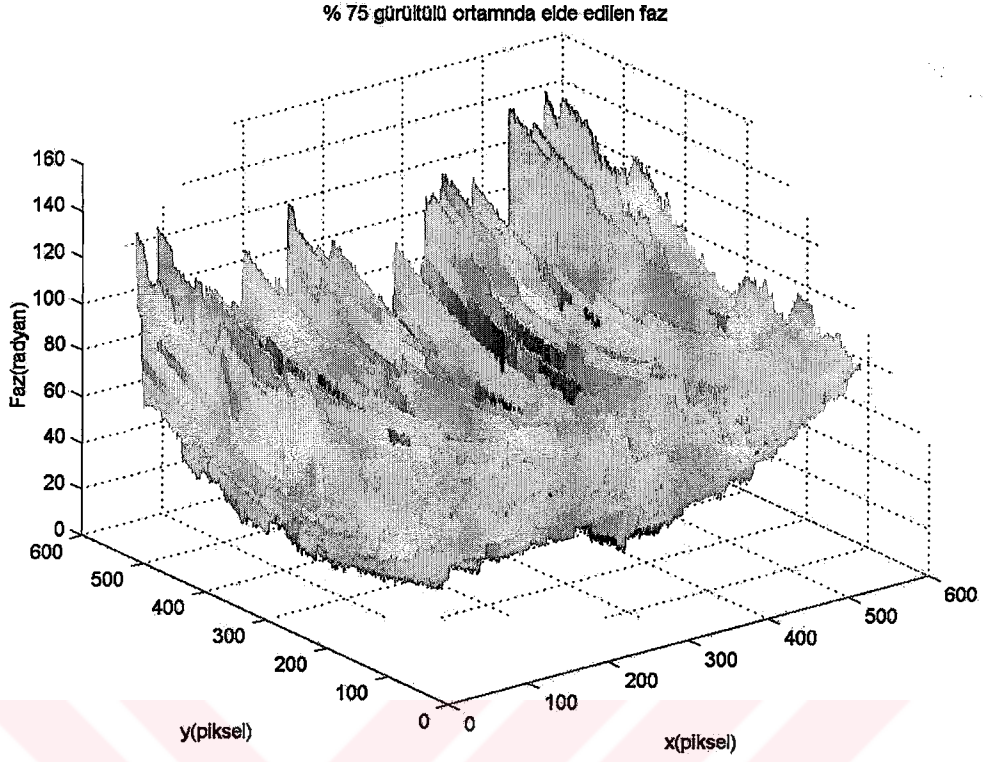
Şekil 5.13 %25 gürültü eklenmiş sinüzoidal ızgara görüntüsü.



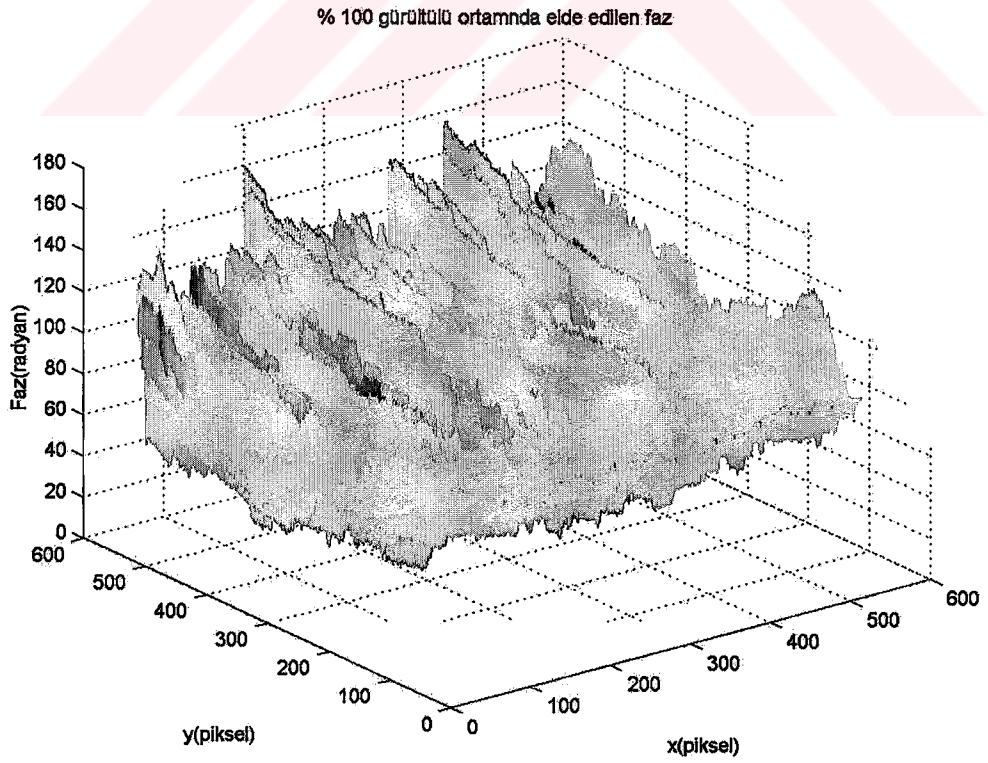
Şekil 5.14. %50 gürültü eklendikten sonra elde edilen faz değişimi.



Şekil 5.15 %50 gürültü eklenmiş sinüzoidal ızgara görüntüsü.

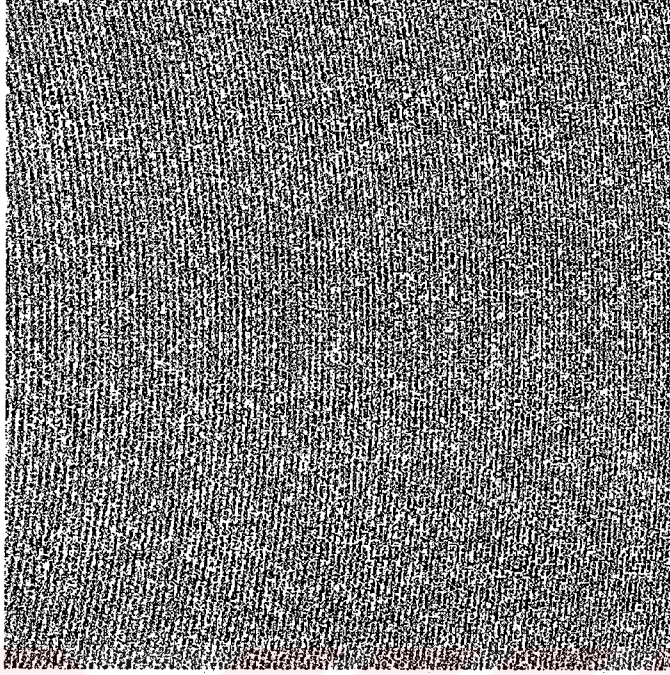


Şekil 5.16. %75 gürültü eklendikten sonra elde edilen faz değişimi.



Şekil 5.17. %100 gürültü eklendikten sonra elde edilen faz değişimi.

%100 gürültülü görüntü



Şekil 5.18 %100 gürültü eklenmiş sinüzoidal ızgara görüntüsü.

Sonuç olarak FTP'nin gürültüsüz ortamda sağlıklı bir şekilde sonuç verdiği, fakat belirli bir gürültü seviyesinden sonra artık geçerliliğini kaybettiği görüldü. Burada gerçek ölçüm sistemlerinde asla olmaması gereken gürültü seviyelerinde de analiz yapıldığı göz önünde bulundurulmalıdır.

5.2. Dalgacık Dönüşümü ile Faz Dağılımının Elde Edilmesi

Dalgacık dönüşümü (Wavelet transform), bir işareti kasayılar şeklinde ayrık enerji dağılımı olarak ifade eder. Esas işaret bu katsayılar ve analiz Dalgacık dönüşümüyle yeniden elde edilebilir. Dalgacık dönüşümü, Fourier dönüşümüne benzer bir şekilde çalışır. Fakat Dalgacık dönüşümü durağan dağılıma sahip olmayan işaretler üzerinde Fourier dönüşümünden daha başarılı sonuç verir.

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

$$W(s, \xi) = \langle f, \Psi_{s, \xi} \rangle = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \left(\Psi \left(\frac{x - \xi}{s} \right) \right)^* dx \quad (5.4)$$

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 bir ölçekte ve ξ noktasındaki benzeşimin genliği, $W(s, \xi)$ 'in genliği alınarak bulunur. Analiz dalgacığı, ana Dalgacıktan ($\Psi(x)$) kaydırma ve ölçeklendirme işlemleriyle elde edilir.

$$\Psi_{s, \xi}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi \left(\frac{x - \xi}{s} \right) \quad (5.5)$$

Dalgacık dönüşümü Parseval özdeşliği ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$W(s, \xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \langle \hat{f}, \hat{\Psi}_{s, \xi} \rangle = \frac{\sqrt{s}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(k) \left(\hat{\Psi}(sk) \right)^* e^{i\xi k} dk \quad (5.6)$$

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.

$$f(x) = \frac{1}{C_\Psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(s, \xi) \Psi_{s, \xi}(x) \frac{ds d\xi}{s^2} \quad (5.7)$$

burada C_Ψ :

$$C_\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(k)|^2}{k} dk \quad (5.8)$$

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. Aşağıda bunlardan biri olan Paul Dalgacık dönüşümü ele alınmış ve

bunun faz değişiminin elde edilmesinde nasıl kullanılacağı ele alınmıştır. Daha sonra başka bir Dalgacık dönüşümü çeşidi olan Morlet dönüşümüyle aynı işlemler gerçekleştirildi.

5.2.1. Paul Dalgacık Dönüşümü

Uygun ana Dalgacık seçiminin özel uygulamalar açısından önemi büyüktür. Paul Dalgacık dönüşümünün ana fonksiyonu:

$$\Psi(x) = \frac{2^n n! (1 - ix)^{-(n+1)}}{2\pi \sqrt{(2n)!} / 2} \quad (5.9)$$

Burada n Paul Dalgacık dönüşümünün derecesini gösterir. Yukarda verilen ana dalgacığın Fourier dönüşümü alınır:

$$\widehat{\Psi}(k) = \frac{2^n}{\sqrt{n(2n-1)!}} k^n \exp(-k) H(k) \quad (5.10)$$

burada H ağırlık dağılımıdır. Analiz Dalgacık dönüşümü, ana Dalgacık fonksiyonunun ötelenmesi ve ölçeklenmesi ile elde edilir.

$$\Psi_{s,\xi}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{x-\xi}{s}\right) = \frac{1}{\sqrt{s}} \frac{2^n n! (1 - i \frac{x-\xi}{s})^{-(n+1)}}{2\pi \sqrt{(2n)!} / 2} \quad (5.11)$$

Konumsal düzlemde analiz Dalgacığın merkezi:

$$x_c = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x |\Psi_{s,\xi}(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi_{s,\xi}(x)|^2 dx} = \xi \quad (5.12)$$

olarak ifade edilir. Analiz Dalgacığın variansı ise:

$$(\Delta x)^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - x_c)^2 |\Psi_{s,\xi}(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi_{s,\xi}(x)|^2 dx} = \frac{s^2}{2n-1} \quad (5.13)$$

$$\Delta x = \frac{s}{\sqrt{2n-1}} \quad (5.14)$$

Konumsal çözünürlüğü gösteren Δx , kullanılan Dalgacık dönüşümünün derecesine ve ölçeğine bağlıdır. Sinyalin yapısı hakkındaki bilgi $[x_c - \Delta x, x_c + \Delta x]$ penceresinde yoğunlaşmıştır.

Aynı işlemler frekans düzleminde de yapılırsa:

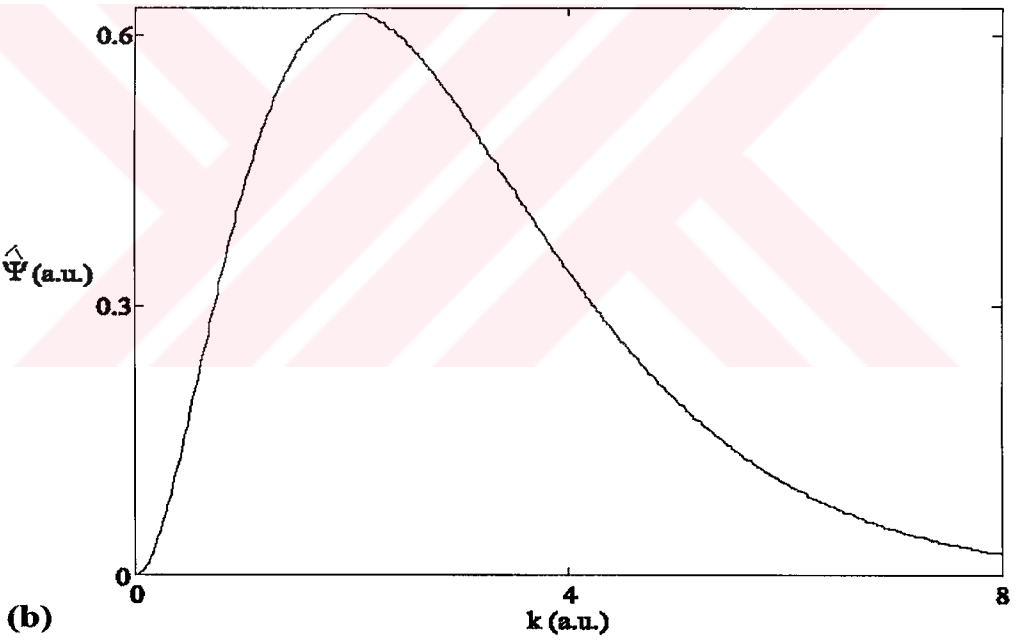
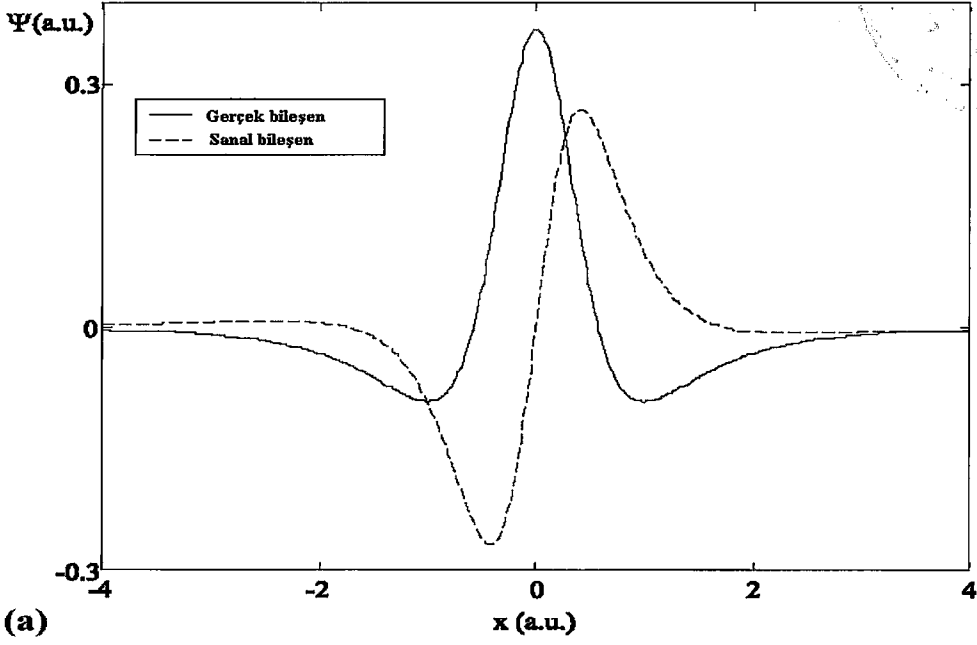
$$k_c = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} k |\widehat{\Psi}_{s,\xi}(k)|^2 dk}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\widehat{\Psi}_{s,\xi}(k)|^2 dk} = \frac{2n+1}{2s} \quad (5.15)$$

varians:

$$(\Delta k)^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (k - k_c)^2 |\widehat{\Psi}_{s,\xi}(k)|^2 dk}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\widehat{\Psi}_{s,\xi}(k)|^2 dk} \quad (5.16)$$

$$\Delta k = \frac{\sqrt{2n+1}}{2s} \quad (5.17)$$

Δk ise frekans düzlemindeki çözünürlüğü gösterir. Aşağıda Paul Dalgacık dönüşümünün gerçek ve sanal bileşenleri ve Fourier dönüşümü gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Birinci temel bileşenin, sıfır temel frekansına kaydırılması.

FTP tekniğinin benzetimi amacıyla kullanılan deneme fonksiyonları burada da kullanılacak olursa:

$$I(x, y) = I_0(x, y) [1 + V(x, y) \cos(mx + \phi(x, y))] \quad (5.18)$$

$$I(x, y) = 1 + 0,5 \cos[\phi(x, y) + mx] \quad (5.19)$$

$$\phi(x, y) = 0.0005 \left[(x - 256)^2 + (y - 256)^2 \right] \quad (5.20)$$

Burada $m=1,28$ radyan/piksel olmak üzere x ekseninde taşıyıcı frekanstır. Bu faz modülasyonunun gerçekleştirilmesi için:

$$m > \left| \frac{d\phi}{dx} \right|_{\max} \quad (5.21)$$

olmalıdır. Saçak deseninin şiddet dağılımına x yönünde bir boyutlu Dalgacık dönüşümü uygulanırsa:

$$W(y, s, \xi) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} I_0(x, y) [1 + V(x, y) \cos(mx + \phi(x, y))] \left(\Psi\left(\frac{x - \xi}{s}\right) \right)^* dx \quad (5.22)$$

ϕ fazı, ξ merkezinde Taylor serisine açılırsa:

$$\phi(x, y) = \phi(y, \xi) + (x - \xi) \frac{d\phi}{dx}(y, \xi) + \dots \quad (5.23)$$

elde edilir. Bu açılımın ilk iki terimi alınarak Dalgacık dönüşümü tekrar ifade edilirse:

$$W(y, s, \xi) = \frac{I_0(y, \xi) V(y, \xi)}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} \cos \left[mx + \phi(y, \xi) + (x - \xi) \frac{d\phi}{dx}(y, \xi) \right] \left(\Psi\left(\frac{x - \xi}{s}\right) \right)^* dx \quad (5.24)$$

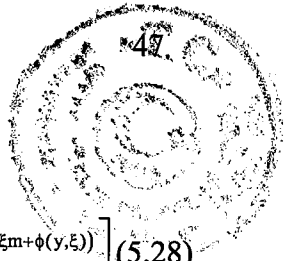
Parseval özdeşliğine göre:

$$W(y, s, \xi) = \frac{\sqrt{s}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{I}_a(y, k) \left(\hat{\Psi}(sk) \right)^* e^{i\xi k} dk \quad (5.25)$$

burada:

$$\hat{I}_a(y, k) = I_0(y, \xi) V(y, \xi) \pi h(y, \xi) \quad (5.26)$$

$$h(y, k) = \delta(k - m_1) \exp \left[i \left(\phi(y, \xi) - \xi \frac{d\phi}{dx}(y, \xi) \right) \right] + \delta(k - m_1) \exp \left[-i \left(\phi(y, \xi) - \xi \frac{d\phi}{dx}(y, \xi) \right) \right] \\ m_1 = m + \frac{d\phi}{dx}(y, \xi) \quad (5.27)$$



Sonuç olarak Dalgacık dönüşümü:

$$W(y, s, \xi) = \frac{I_0(y, \xi)V(y, \xi)\sqrt{s}}{2} \left[\left(\widehat{\Psi}(sm_1) \right)^* e^{i(\xi m + \phi(y, \xi))} + \left(\widehat{\Psi}(-sm_1) \right)^* e^{-i(\xi m + \phi(y, \xi))} \right] \quad (5.28)$$

şekline gelir. Bu ifade Paul Dalgacık dönüşümü ile yeniden ifade edilirse:

$$w(y, s, \xi) = \frac{I_0(y, \xi)V(y, \xi)s^{n+1/2}m_1^n \exp(-sm_1)}{(2n)!} e^{i(\xi m + \phi(y, \xi))} \quad (5.29)$$

olur. Bunun kompleks fonksiyonun genliği alınır:

$$|W(y, s, \xi)| = \left(\frac{I_0(y, \xi)V(y, \xi)m_1^n}{(2n)!} \right) s^{(n+1)/2} \exp(-sm_1) \quad (5.30)$$

bulunur. En büyük ölçek:

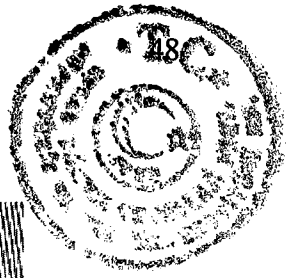
$$S(y, \xi) = \frac{2n+1}{2m_1} \quad (5.31)$$

eşitlik (27) ve (31)'den fazın eğimi:

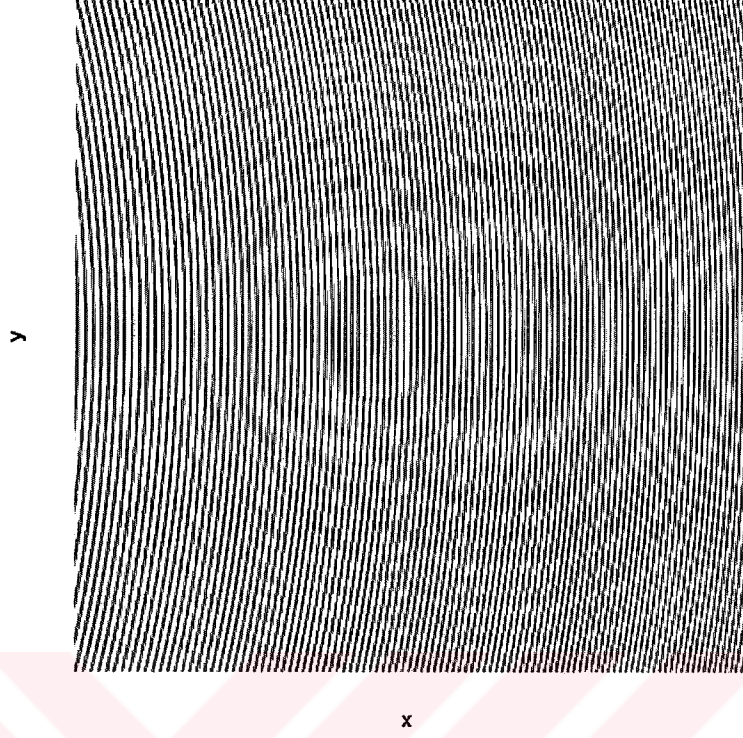
$$\frac{d\phi}{dy}(y, \xi) = \frac{2n+1}{2S(y, \xi)} - m \quad (5.32)$$

olarak bulunur. Bu eşitliğin entegrali alınarak faz elde edilmiş olur.

Aşağıda x yönünde 1,28 radyan/piksel taşıyıcı frekansına sahip deneme faz fonksiyonun değişimi görülmektedir.



x ekseninde deęisimli sacak deseni

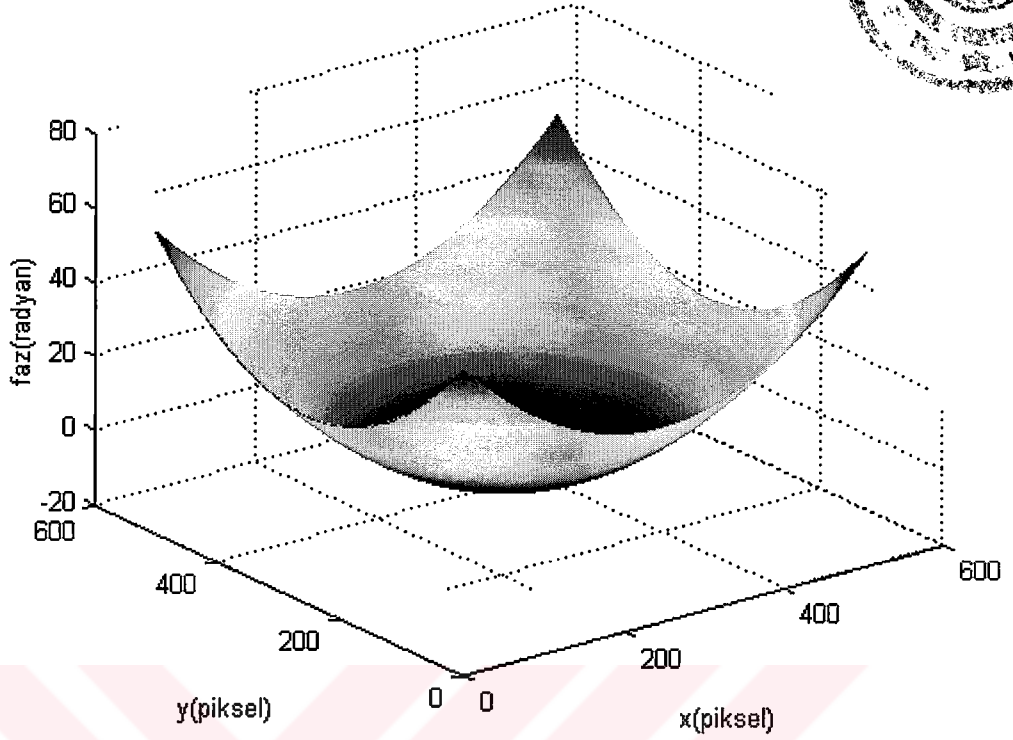


Şekil 5.20 x değişimli ızgara deseni

Elde edilmek istenen faz dağılımını aşıağıda üç boyutlu olarak gösterilmiştir.



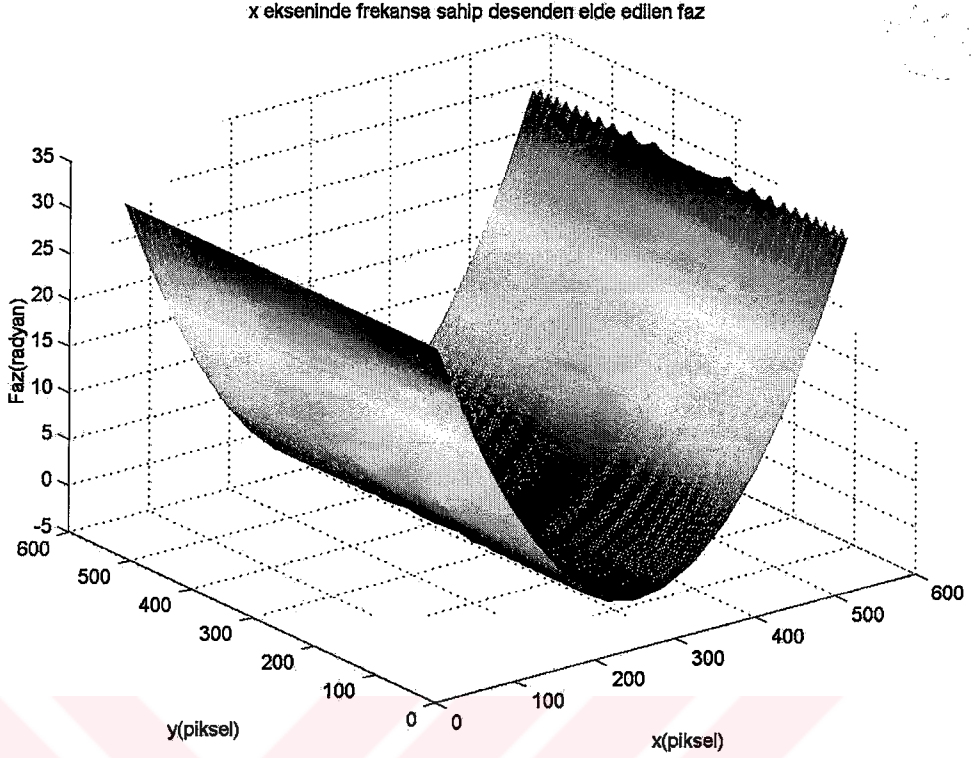
Faz Fonksiyonunun Değişiminin Üç Boyutlu Görünümü



Şekil 5.21 Deneme faz fonksiyonu.

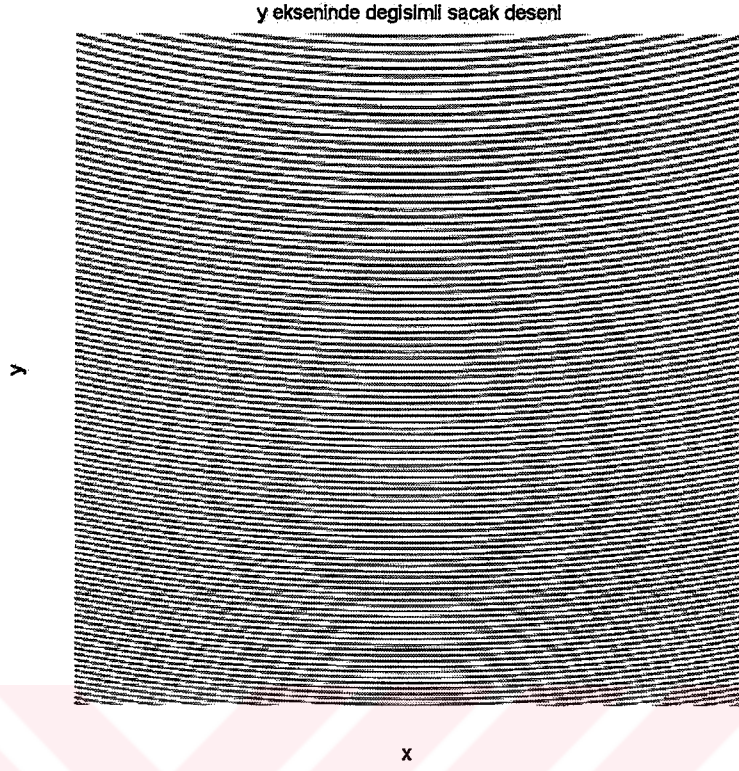
Bu saçak desenine yukarda açıklanan Dalgacık dönüşüm tabanlı faz elde etme işlemleri uygulanırsa şekil 5.22'deki faz değişimi elde edilir.

T.C. YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK BÖLÜMÜ



Şekil 5.22 x eksenindeki faz değişimi.

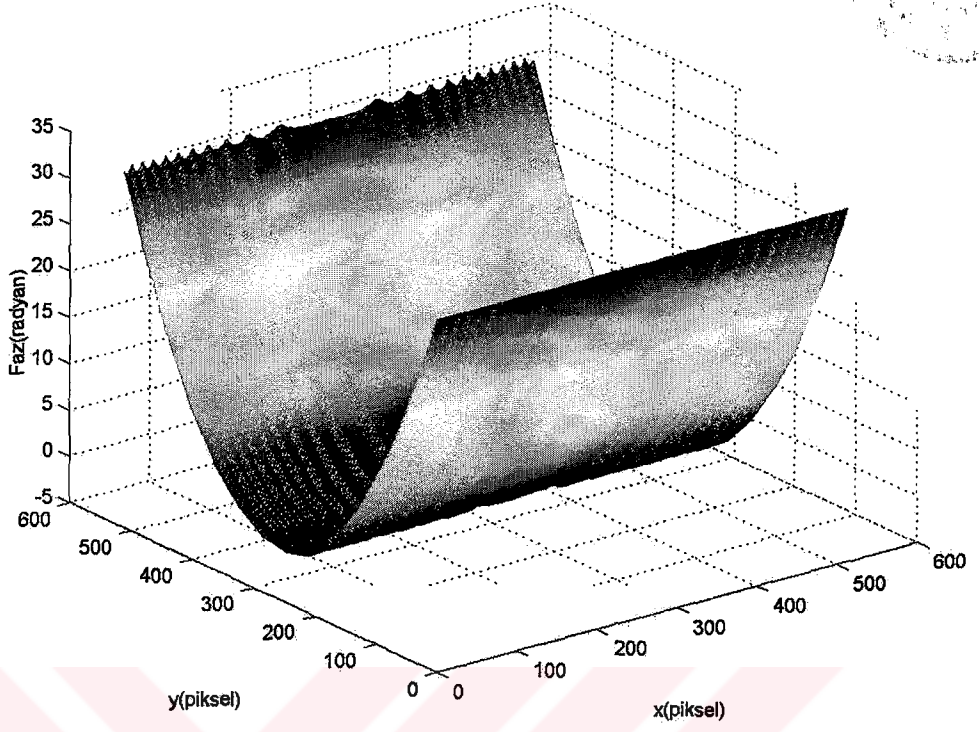
Görüldüğü gibi yalnızca x eksenindeki değişim görülebilmektedir. y ekseninde değişim sıfır görülmektedir. Bunun sebebi saçak(ızgara) deseninin sadece x ekseninde taşıyıcı frekansa sahip olmasıdır. y eksenindeki faz değişimini görülebilmesi için y ekseninde taşıyıcı frekansa sahip ızgara deneme faz fonksiyonuna uygulanmalıdır. Bu durumda elde edilen ızgara saçak deseni aşağıdaki gibi olur.



Şekil 5.23 y değişimli ızgara deseni.

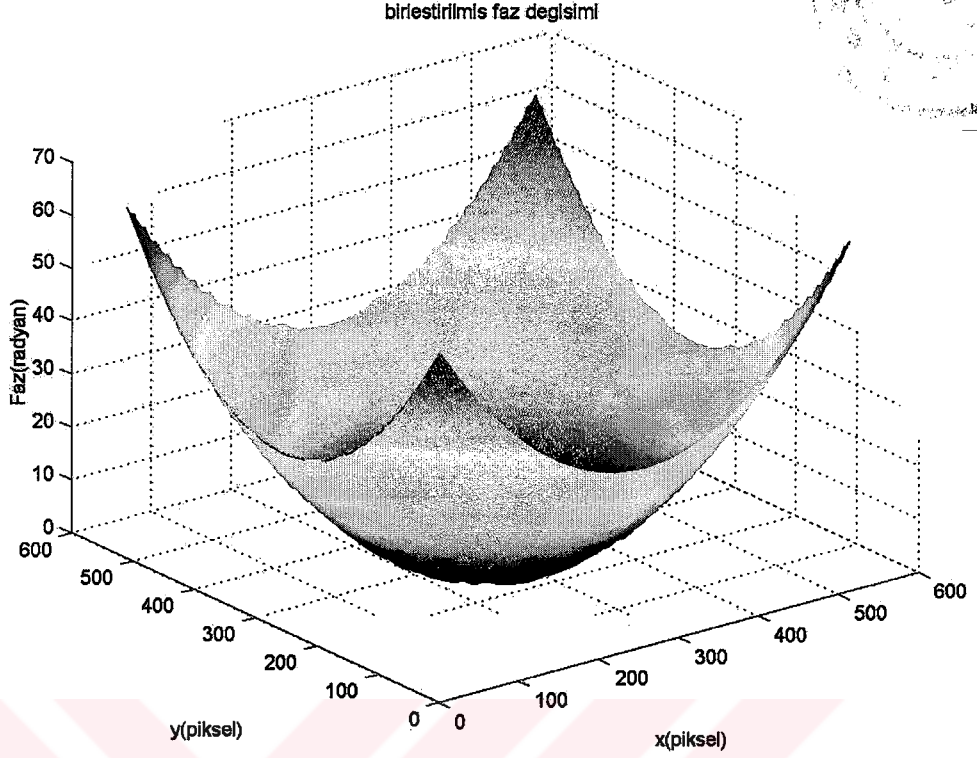
Yukarda verilen desene aynı işlemle uygulanırsa aşağıdaki faz değişimi elde edilir.

y ekseninde frekansa sahip desenden elde edilen faz



Şekil 5.24 y eksenindeki faz değişimi.

Yukarıdaki şekilden görülebileceği burada da sadece y eksenindeki faz değişimi görülebilmektedir. x ve y ekseninde ayrı elde edilen faz değişimleri birleştirilerek faz fonksiyonu elde edilir.

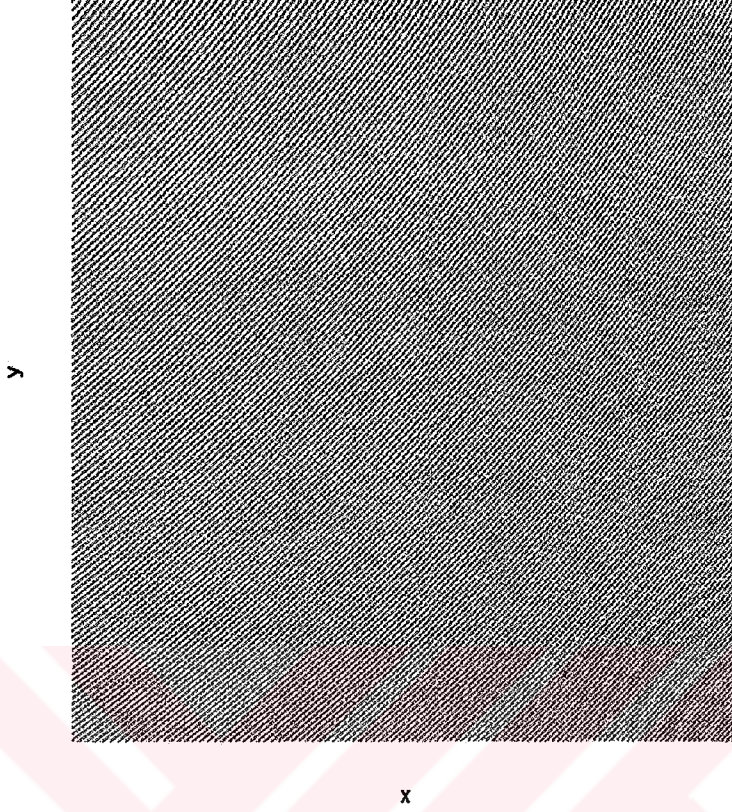


Şekil 5.25 Birleştirilmiş faz değisimi.

Elde edilenin fazın deneme faz fonksiyonuyla aynı olduğu görülür. böylece faz değisimi iki ayrı ızgara deseninden elde edilmiş oldu. Yukarda açıklanan benzetim işlemleri gerçek şartlarda iki kere projeksiyona ihtiyaç duyar. x ve y eksenlerinde değişim gösteren bir ızgara tanımlanırsa faz değişimi bir ızgara projeksiyonuyla tespit edilmiş olur.

$$I(x, y) = 1 + 0,5 \cos[\phi(x, y) + mx + my] \quad (5.33)$$

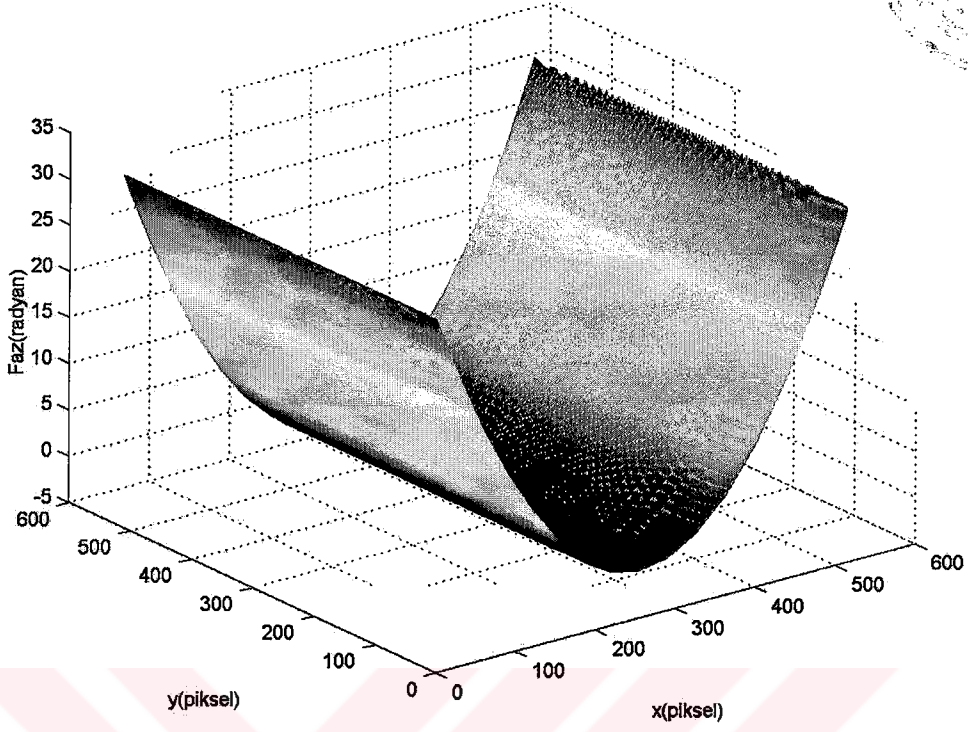
x ve y eksenlerinde değişim gösteren desen



Şekil 5.26 x ve y değişimli ızgara deseni.

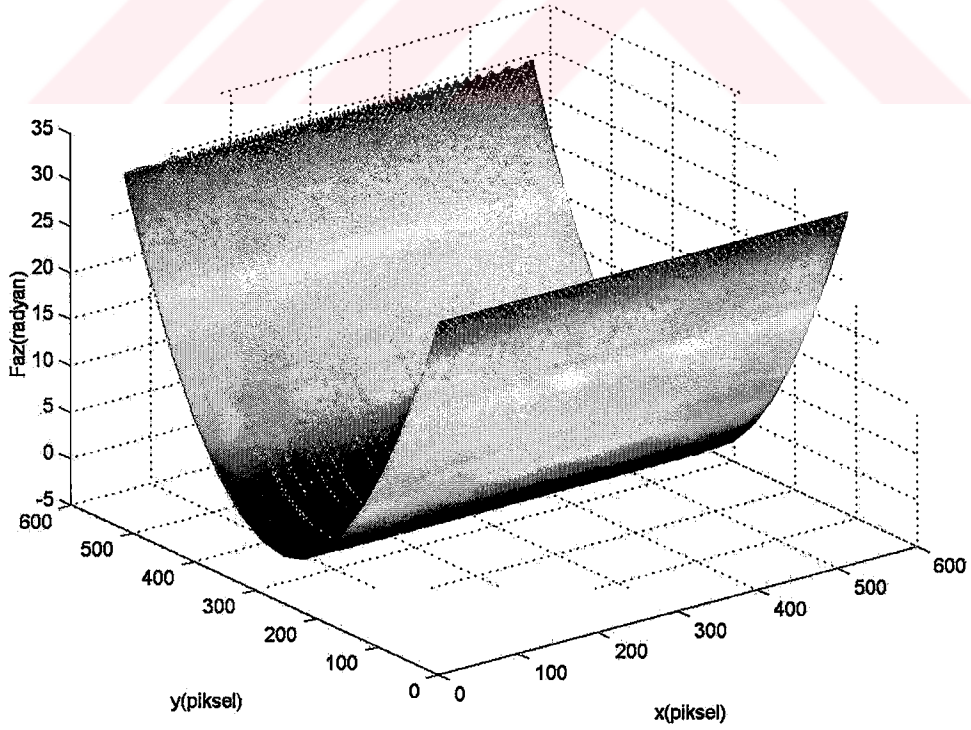
Bu durumda elde edilen faz değişimleri:

x ekseninde frekansa sahip desenden elde edilen faz

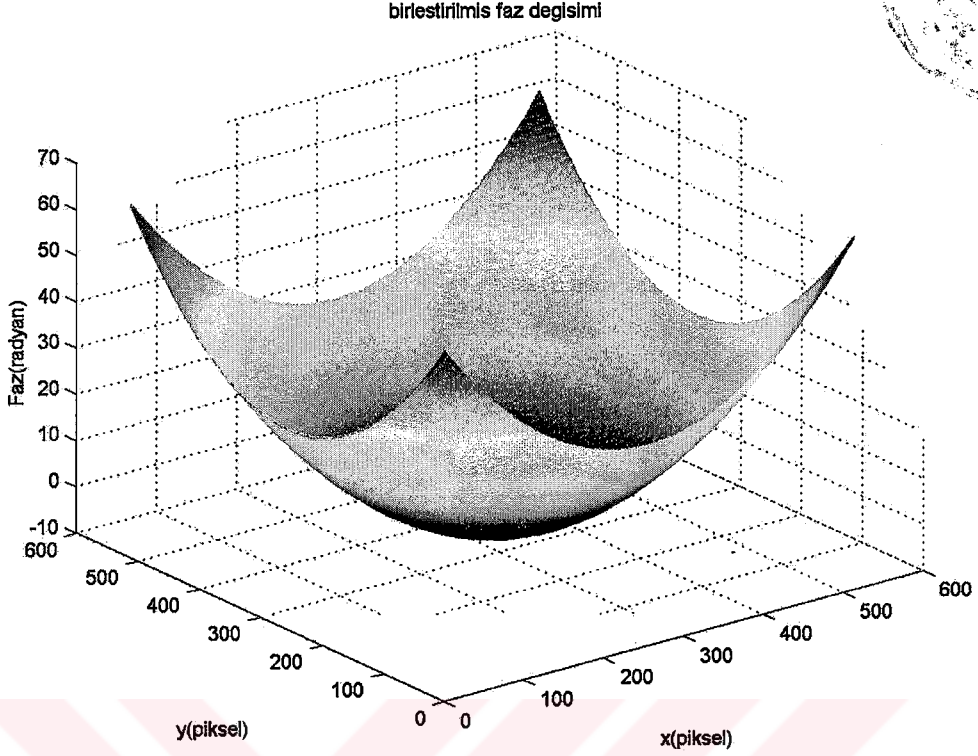


Şekil 5.27 x eksenindeki faz değişimi.

y ekseninde frekansa sahip desenden elde edilen faz



Şekil 5.28 y eksenindeki faz değişimi.



Şekil 5.29 Birleştirilmiş faz değışimi.

Ana dalgacık fonksiyonu değıştirilerek yeni bir Dalgacık dönüşümü elde etmek mümkündür. Morlet de bunlardan biridir. Yukarda Paul Dalgacık dönüşümü için yapılan benzetimleri Morlet dalgacık dönüşümüyle aşağıda tekrar edilmiştir. Aşağıda Morlet Dalgacık dönüşümünün ana fonksiyonu verilmiştir.

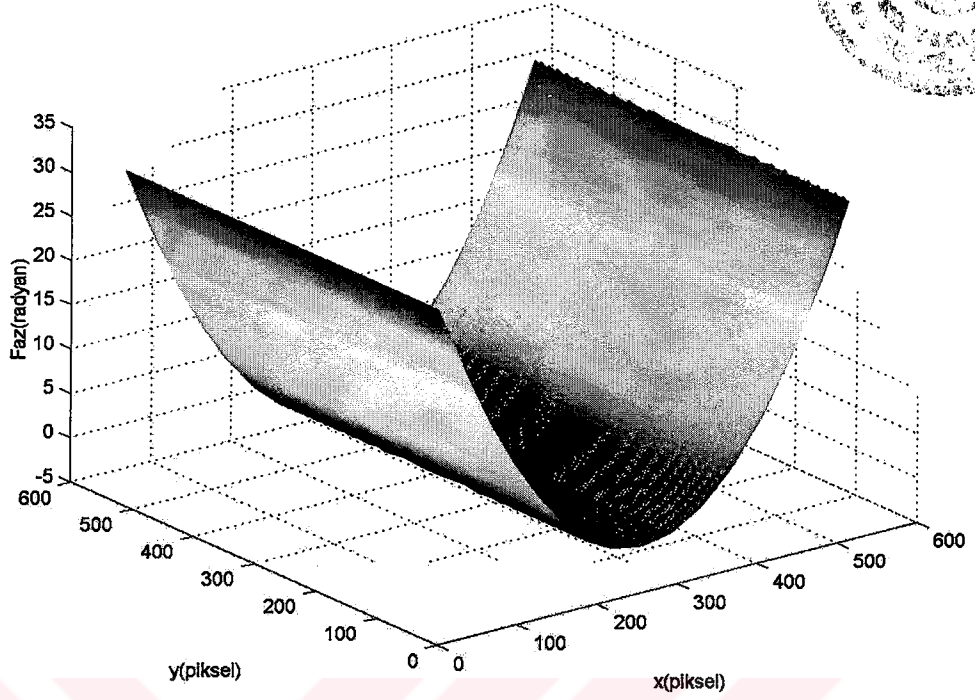
$$\Psi(x) = \pi^{-1/4} \left(e^{j2\pi f_0 x} - e^{-(2\pi f_0)^2/2} \right) e^{-x^2/2} \quad (5.34)$$

Burada f_0 Morlet'in merkez frekansıdır.

Yukarda açıklandığı gibi öncelikle, yalnızca x ekseninde değışim gösteren ızgara deseninden faz değışimi elde edilecek daha sonra y ekseninde değışim gösteren ızgara deseninden elde edilen faz değışimi ile birleştirilerek deneme faz fonksiyonu elde edilmeye çalışılacaktır.

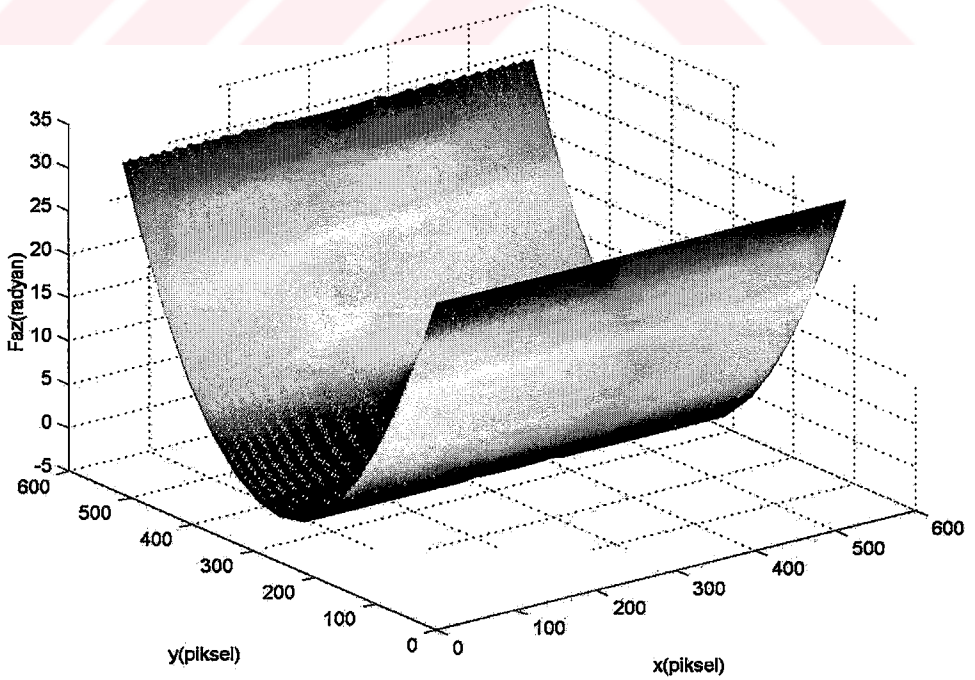


x ekseninde frekansa sahip desenden elde edilen faz

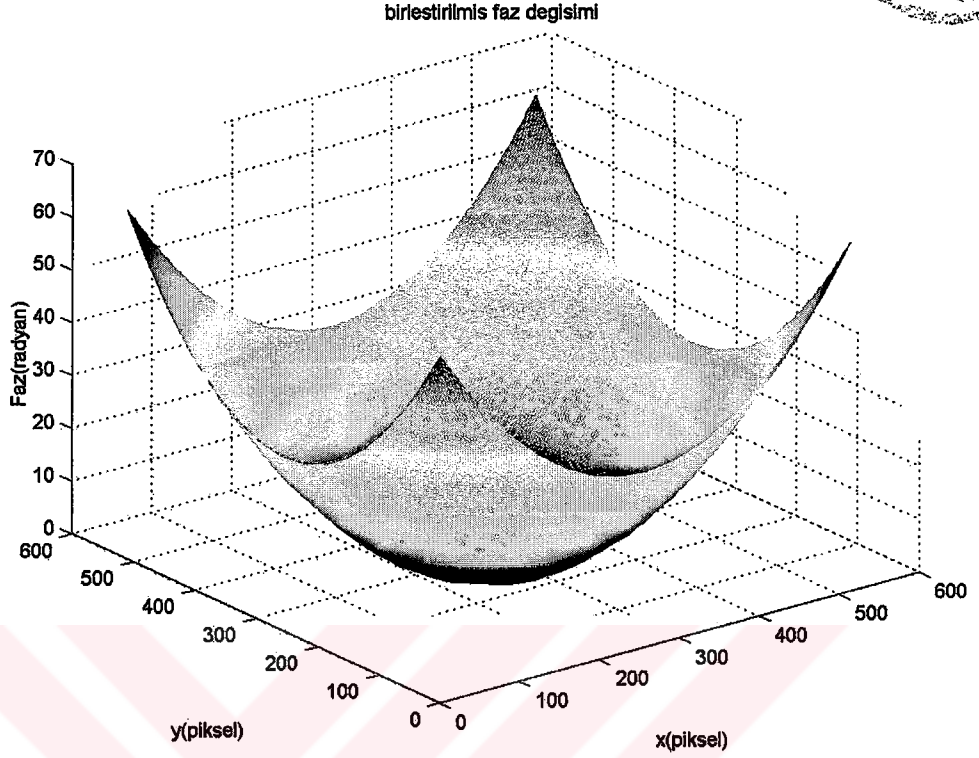


Şekil 5.30 x yönündeki ızgara değişimi.

y ekseninde frekansa sahip desenden elde edilen faz



Şekil 5.31 y yönündeki faz değişimi.

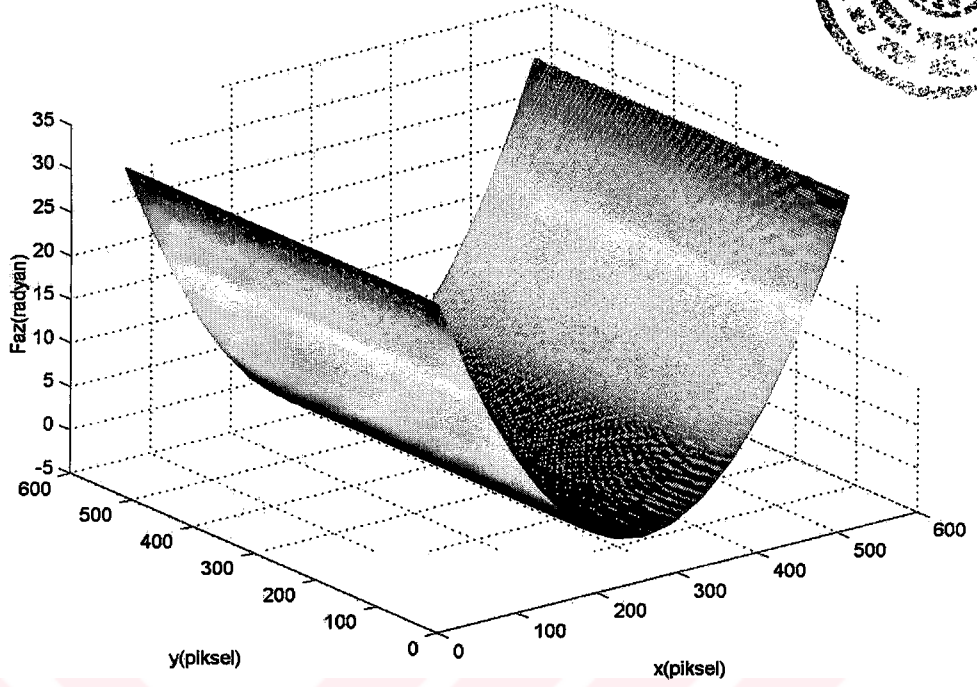


Şekil 5.32 Birleştirilmiş faz değışimi.

x ve y eksenlerinin her ikisinde de değışim gösteren ızgara deseniyle elde edilen faz değışimleri aşağıda verilmiştir. Ana Dalgacık fonksiyonu olarak Morlet kullanılmıştır.

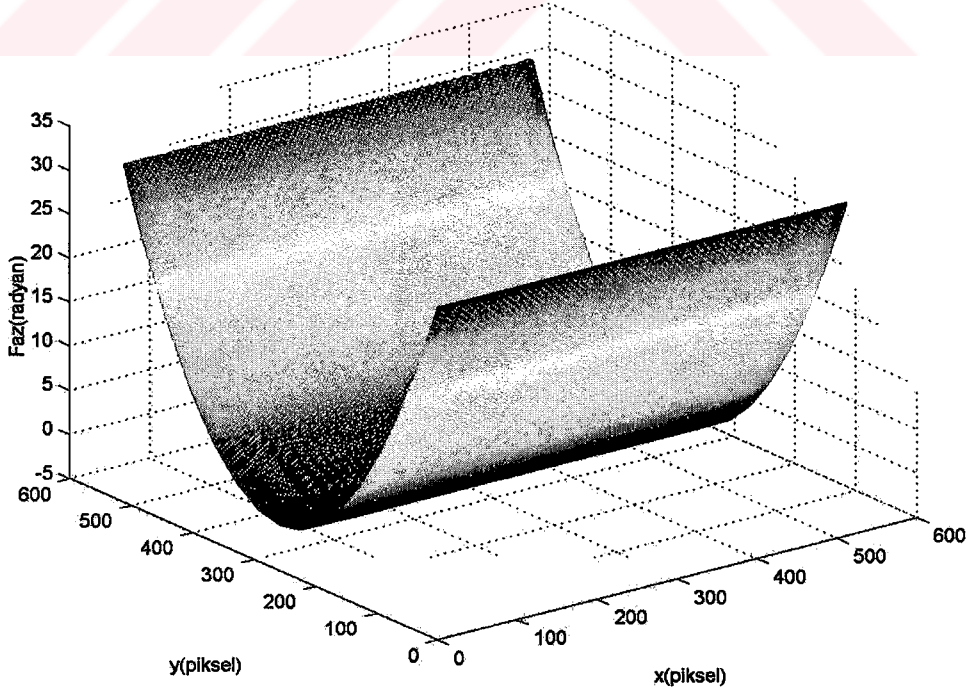


x ekseninden elde edilen elde edilen faz

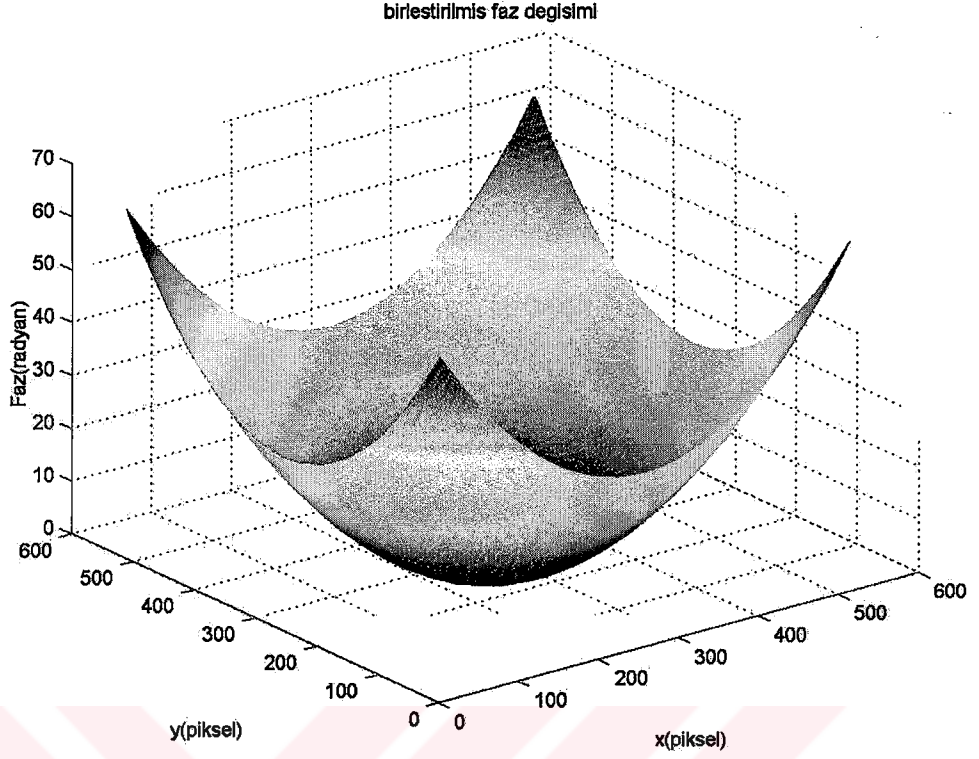


Şekil 5.33 x yönündeki ızgara değişimi.

y ekseninden elde edilen elde edilen faz



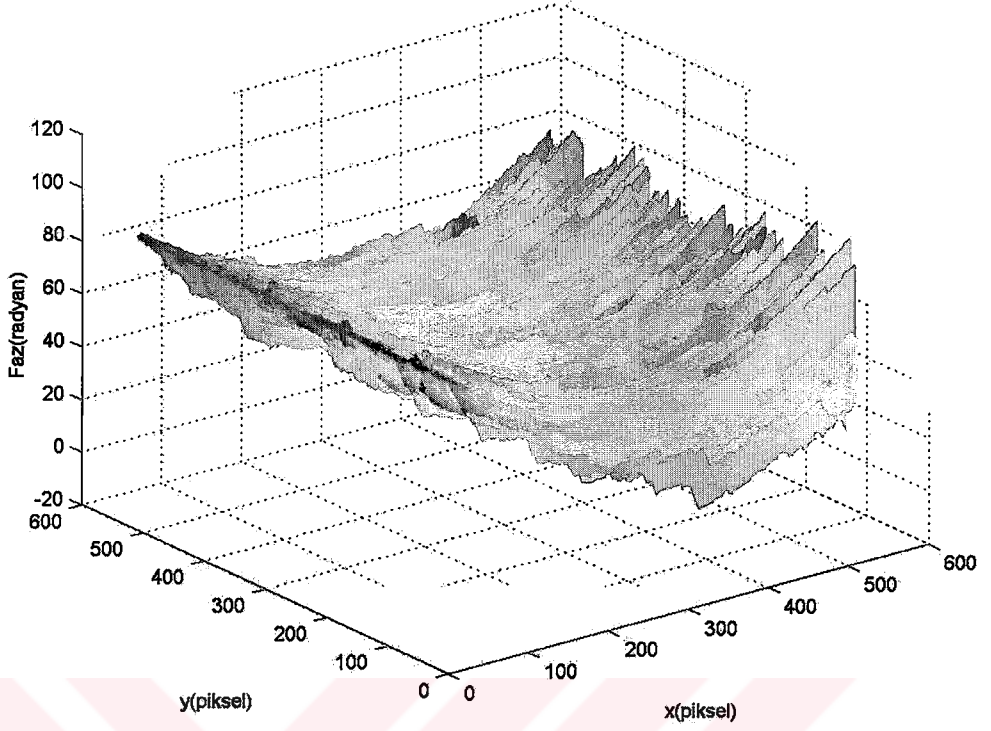
Şekil 5.34 y yönündeki faz değişimi.



Şekil 5.35 birleştirilmiş faz değisimi.

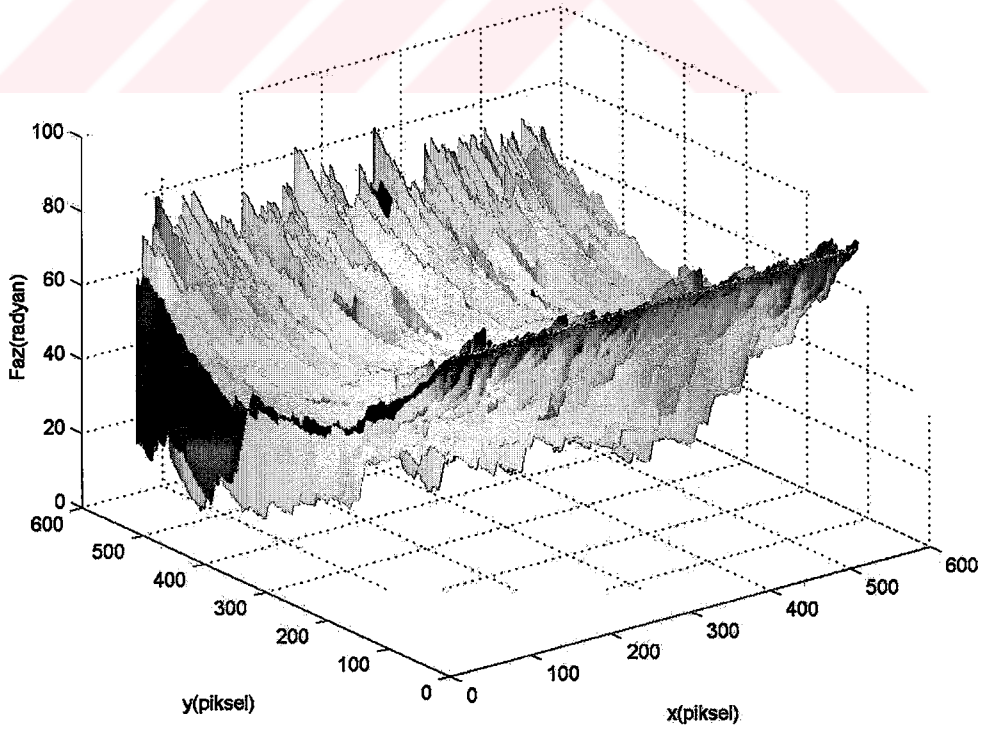
Dalgacık dönüşümü ile faz elde etme tekniğinin gürültülü ortamlarda etkisinin görülmesi amacıyla %50 beyaz gürültülü ortamda Paul ve Morlet Dalgacık dönüşümüyle elde edilen faz değisimleri aşağıda verilmiştir.

x ekseninde frekansa sahip desenden elde edilen faz

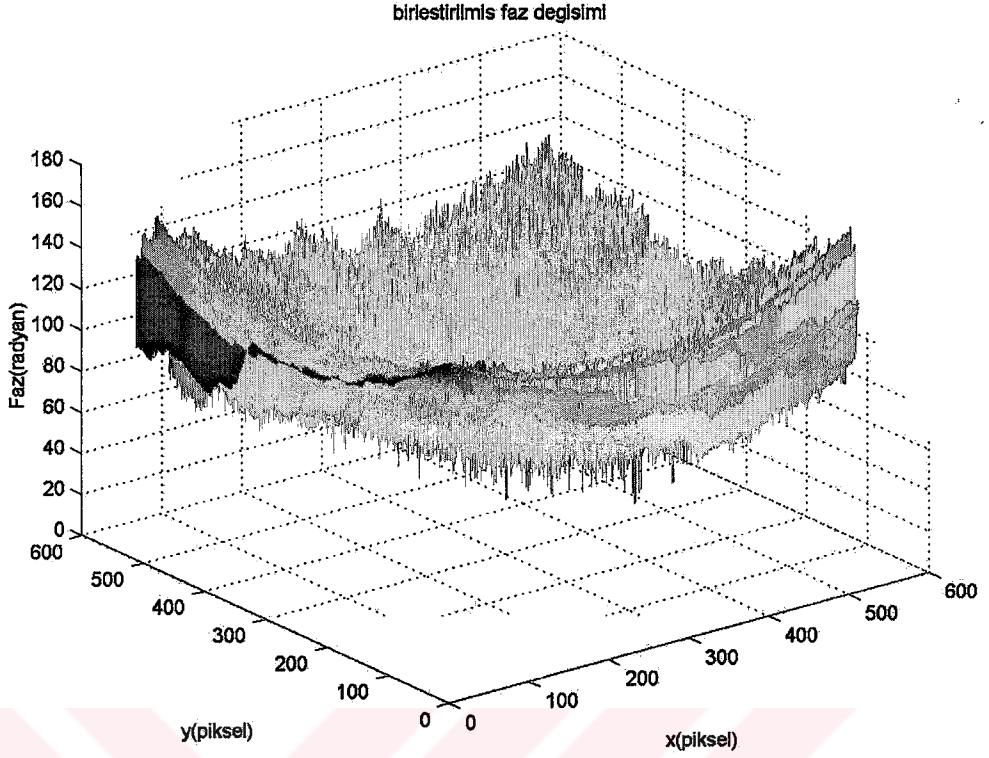


Şekil 5.36 x yönündeki faz değişimi.

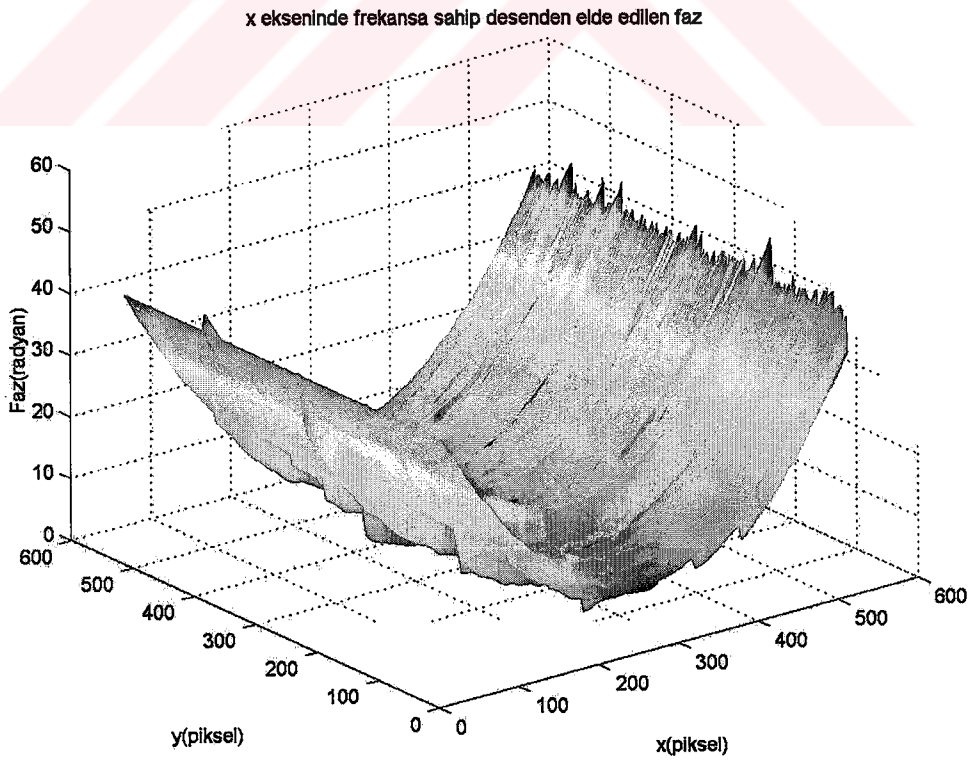
y ekseninde frekansa sahip desenden elde edilen faz



Şekil 5.37 y yönündeki faz değişimi

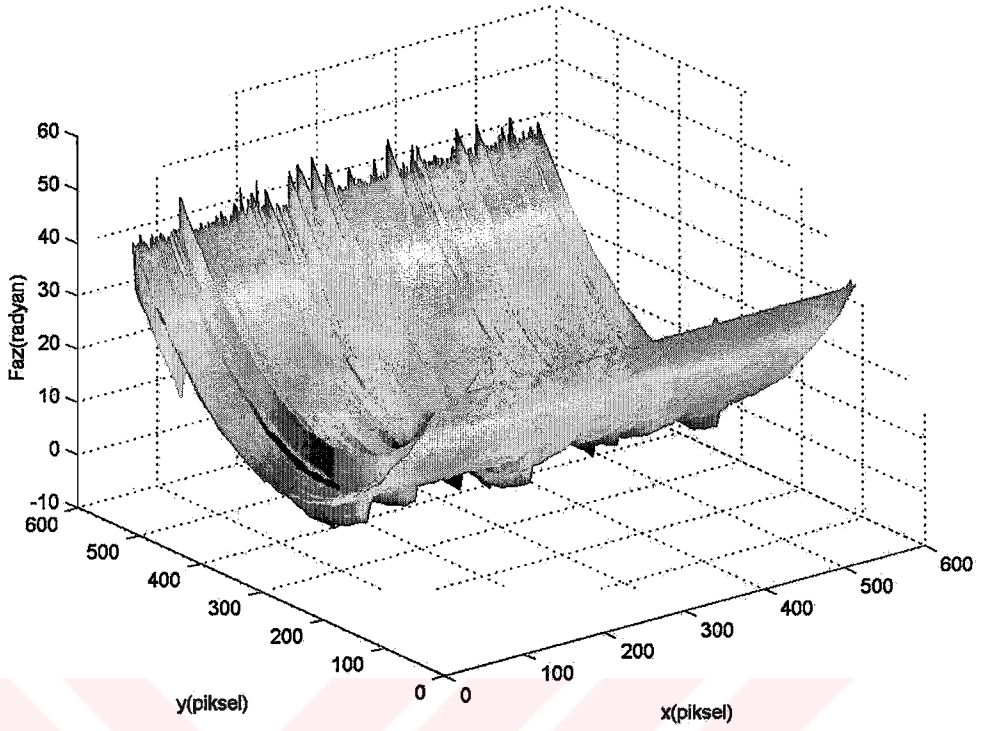


Şekil 5.38 Birleştirilmiş faz değisimi.



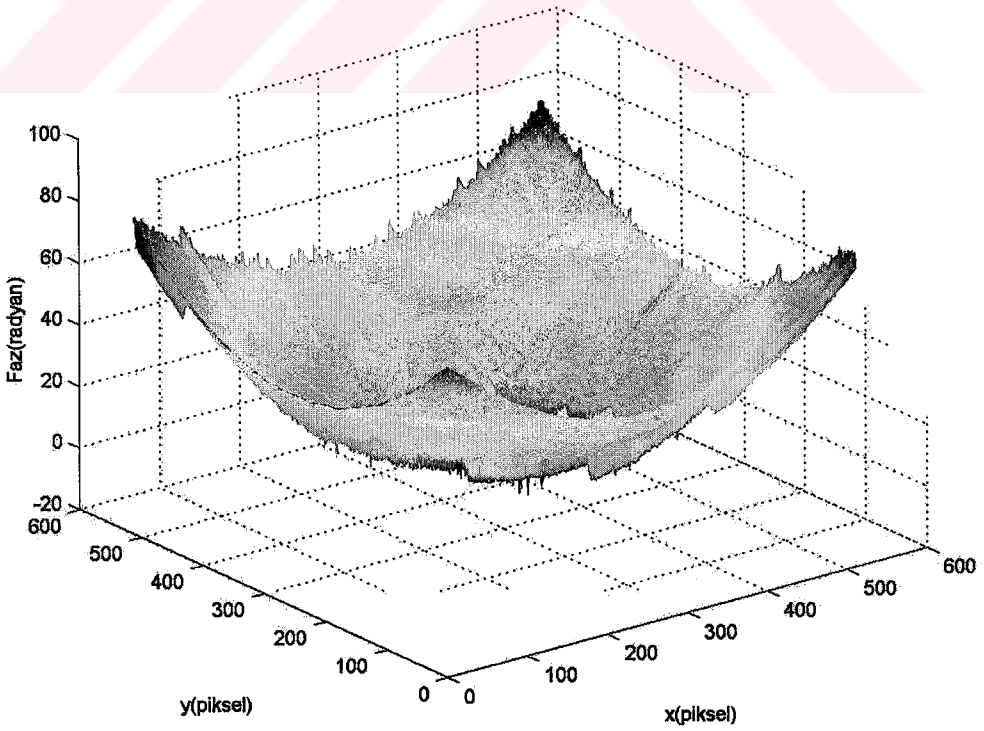
Şekil 5.40 x yönündeki faz değisimi.

y ekseninde frekansa sahip desenden elde edilen faz



Şekil 5.41 y yönündeki faz değişimi.

birleştirilmiş faz değişimi



Şekil 5.42 Birleştirilmiş faz değişimi.

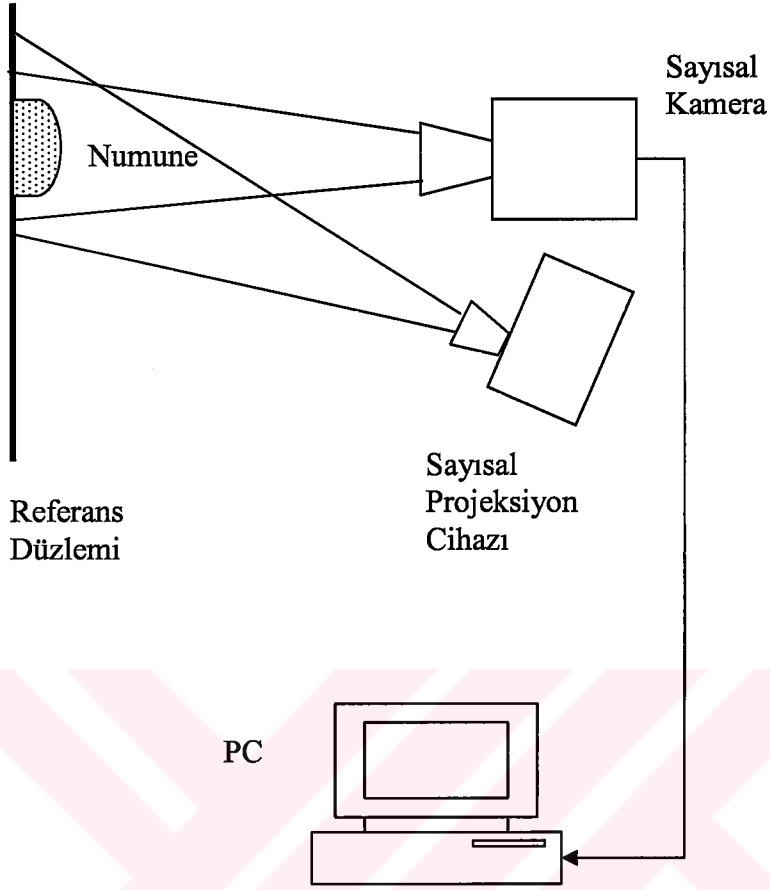
Dalgacık dönüşümü ile yapılan benzetim sonuçları; Dalgacık dönüşümünün faz düzeltme işlemine gerek duyulmadan da faz dağılımının elde ettiğini ve gürültülü ortamlarda FTP' ye göre daha başarılı olduğunu gösterdi.

5.3. Fourier Dönüşümüyle Profil Belirleme Yönteminin Üç Boyutlu Cisimler Üzerinde Denenmesi

Bu bölümde gerçek şartlarda bir ölçüm düzeneği kurulup ve buradan alınan veriler bilgisayar ortamında FTP tekniğine göre analiz edildikten sonra sonuçlar verildi.

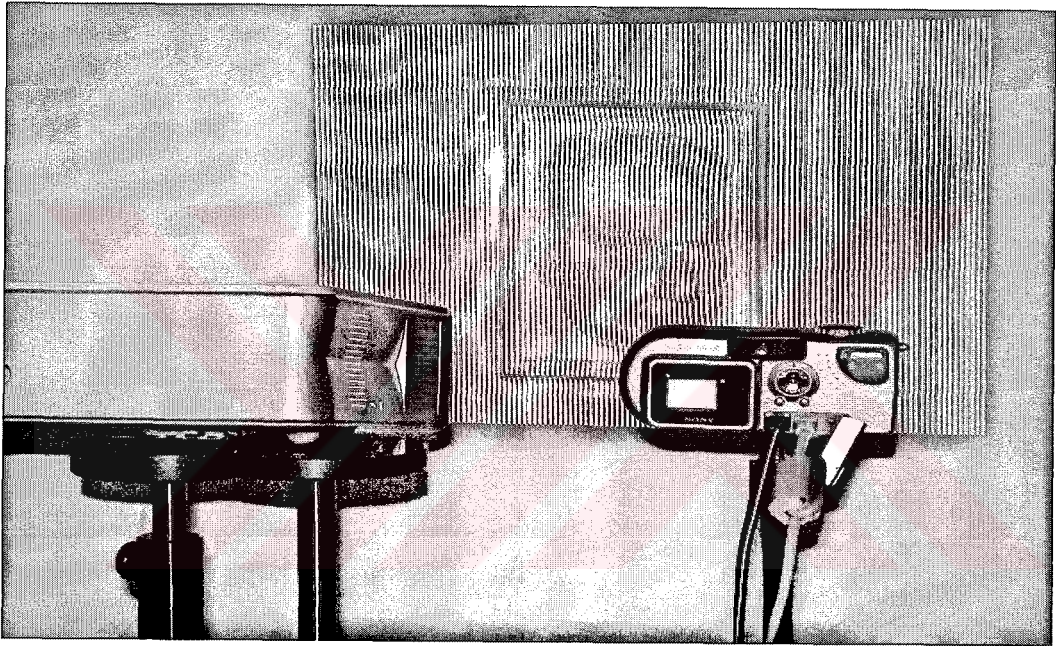
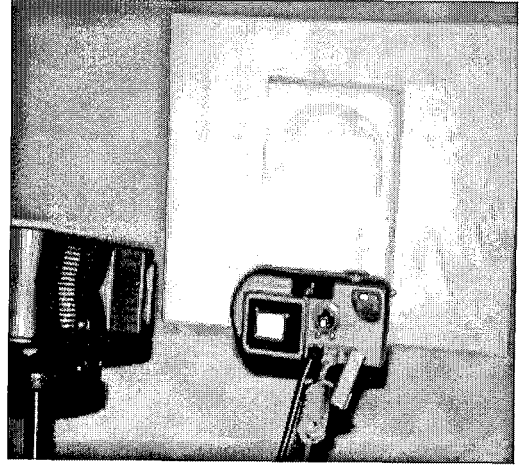
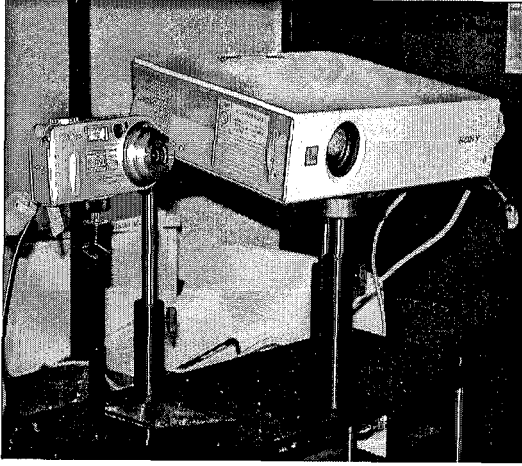
5.3.1 Deney Düzeneği

Deney düzeneğinde 4. Bölümde açıklanan çapraz eksen optik geometrisi kullanıldı. Şekil 5.19'da kurulan deney düzeneğinin şeması gösterilmektedir.



Şekil 5.43 Deney düzeneğinin şeması.

Deney düzeneğinde görülen projeksiyon cihazı, bilgisayar ortamında sayısal olarak oluşturulan suni ızgara görüntüsünü numune ve referans düzlemi üzerine yansıtmak amacıyla kullanılmıştır. Projeksiyon cihazının hafıza kartı üzerine değişik özelliklerde (çizgi frekansı, çizgi kalınlığı vb.) çok sayıda ızgara yüklenebilmekte ve ölçüm sırasında seçilebilmektedir. Kullanılan kameranın en büyük çözünürlüğü 1200x1600 pikseldir ve sayısal JPEG biçiminde kayıt yapılmasına ve kişisel bilgisayara aktarılmasına imkan vermektedir. Aşağıda deney düzeneğinden alınan fotoğraflar görülmektedir.

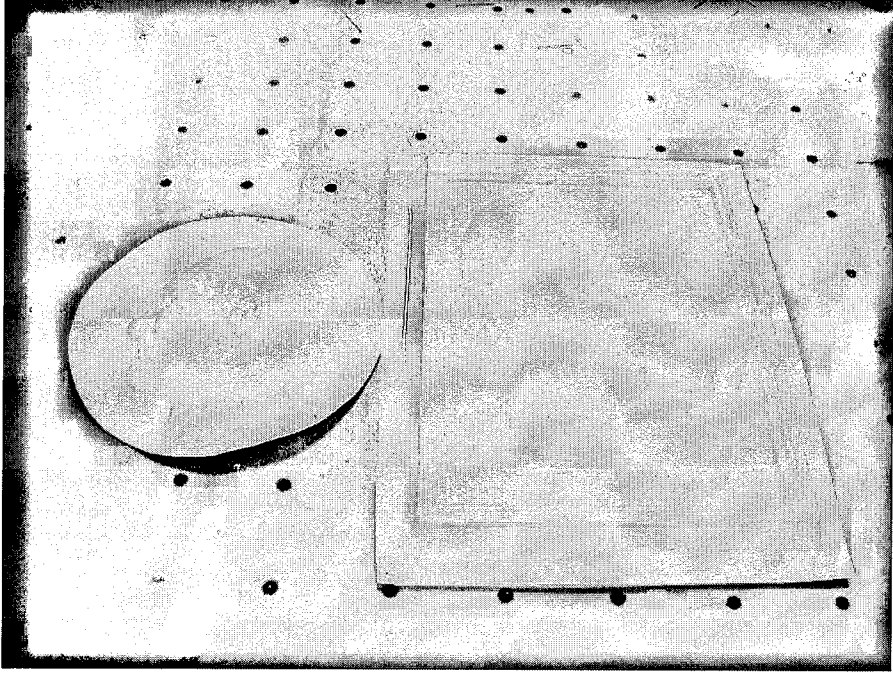


Şekil 5.20, 5.21, 5.22: Deney düzeneğinin çeşitli fotoğrafları.

5.2.3. Deney ve Analiz

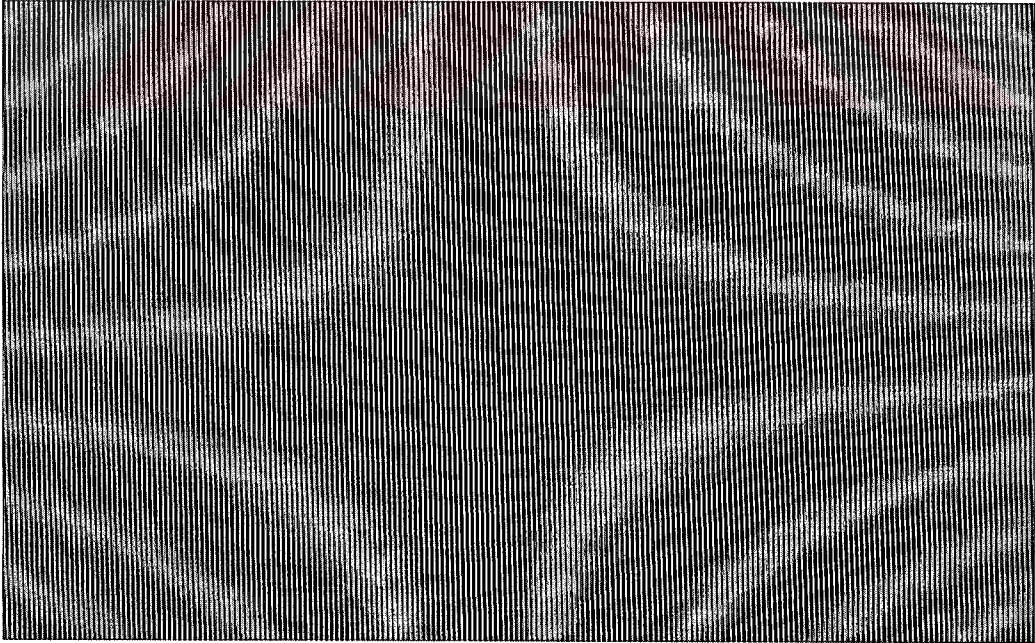
Yukarda gösterilen deney düzeneğinde, ızgara görüntüsü referans düzlemine ve referans düzlemi üzerine yerleştirilmiş bir numune üzerine yansıtılarak sayısal kamera ile iki farklı görüntü kaydedilmiştir. Bölüm 4'te açıklandığı gibi bu iki görüntü FTP yöntemine göre analiz edildi.

Deney numunesi olarak yüksekliği 0-2 cm aralığında değişen Atatürk büstleri kullanıldı. Şekil 5.44'te kullanılan numunelerin fotoğrafı görülmektedir.

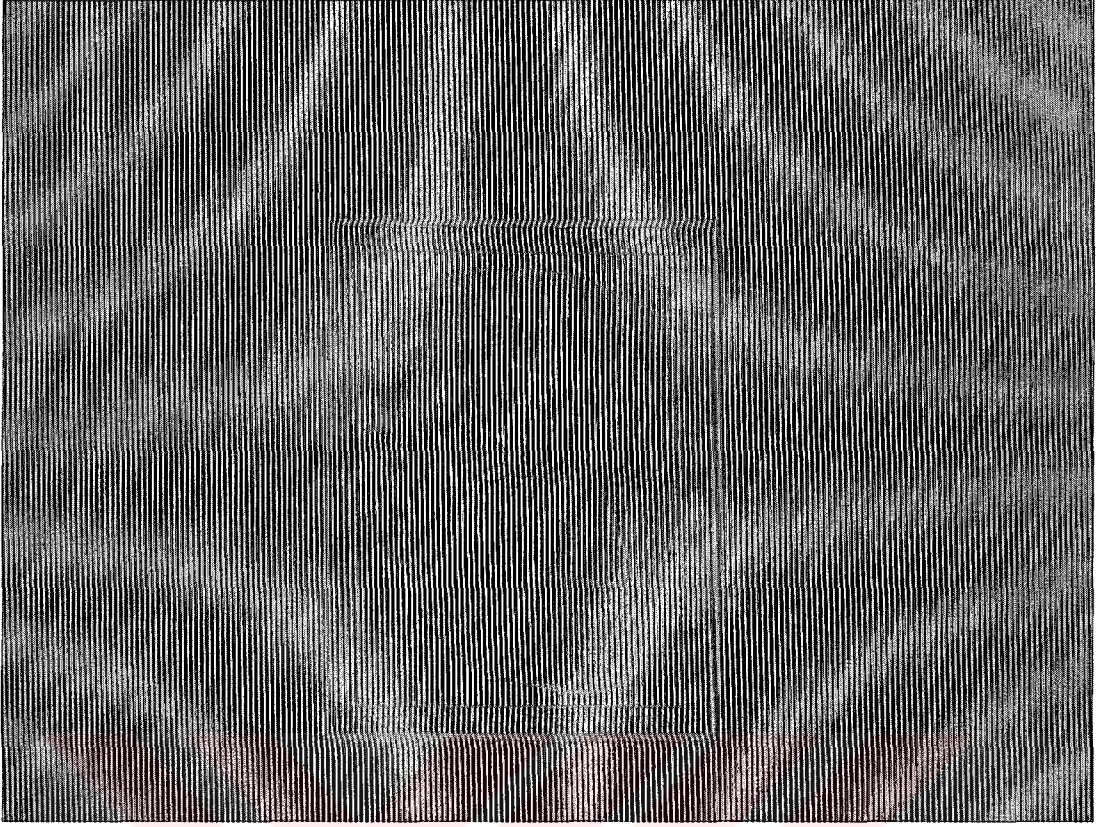


Şekil 5.44. Deneyde kullanılan Atatürk büstleri.

Şekil 5.45 ve 5.46'da referans düzleminin ve numunenin ızgara projeksiyonu altındaki görüntüleri sayısal kamerayla çapraz optik eksen geometrisinde alınmış görüntüleri görülmektedir.



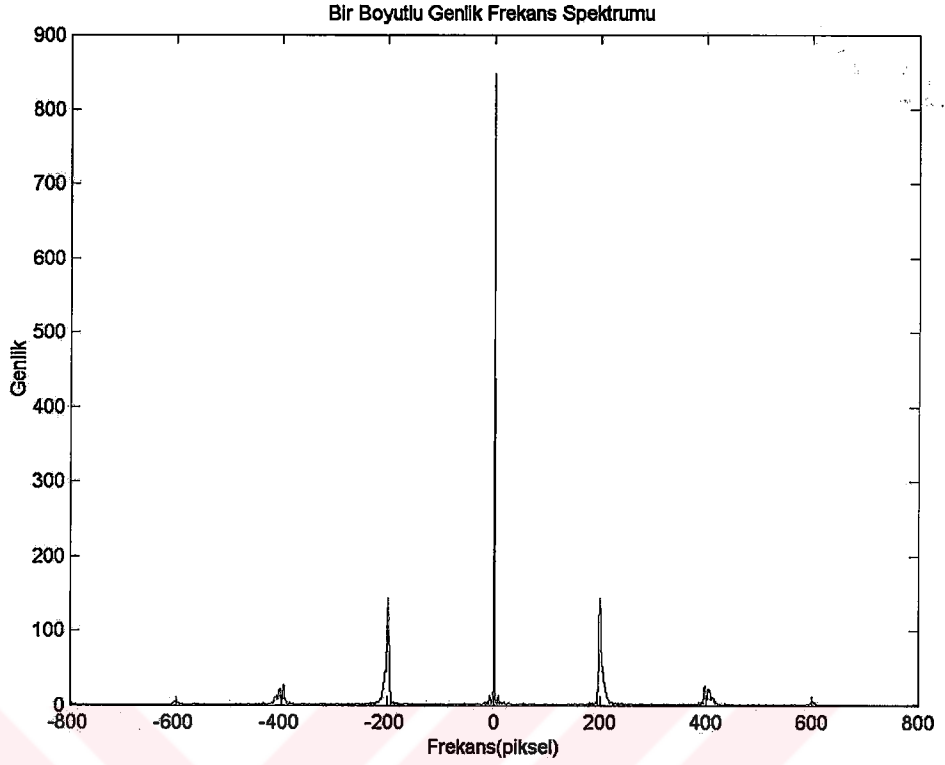
Şekil 5.45 Referans düzleminin ızgara projeksiyonu altındaki görüntüsü.



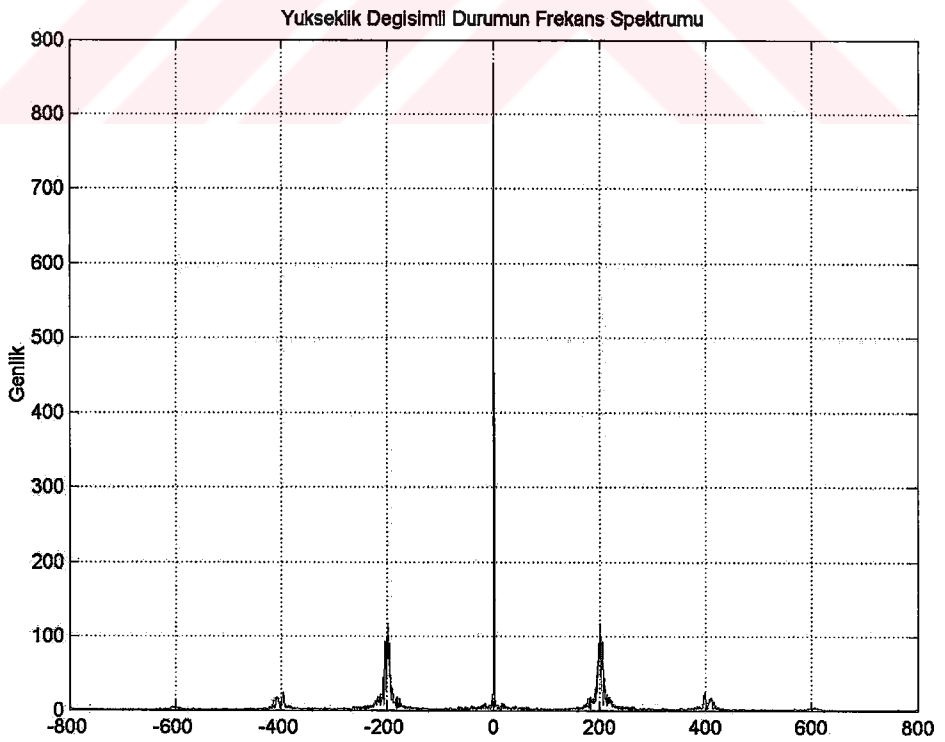
Şekil 5.46 Atatürk büstünün ızgara projeksiyonu altındaki görünümü.

Bu iki görüntünün her satırının x eksenine göre konumsal Fourier dönüşümü alınırsa, bir satırın frekans genlik spektrumu Şekil 5.47 ve 5.48'deki gibi olur. Frekans spektrumundan birinci temel frekansa sahip bileşen seçildikten sonra ters Fourier dönüşümü alınmalıdır. Böylece elde edilen iki kompleks fonksiyonunun faz değişimlerinin farkı alınıp iki boyutlu faz düzeltme işlemi uygulanırsa, numunenin yükseklik değişiminden kaynaklanan faz haritası elde edilmiş olur. Şekil 5.49 ve 5.50'de referans ve numune ızgara desenlerinin frekans spektrumundan seçilen bileşenleri görülmektedir. Şekil 5.51, cismin yükseklik değişiminden kaynaklanan faz değişimini üç boyutlu olarak göstermektedir.

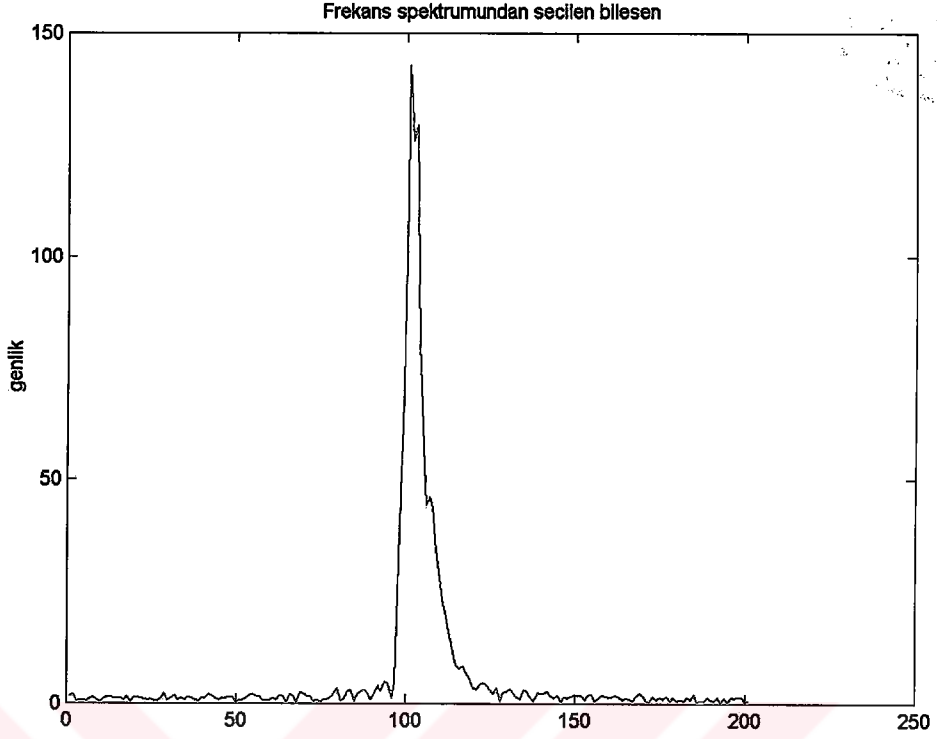
Eşitlik (4.23)'e göre, elde edilen faz değişimi değerleri ve deney düzeneğindeki uzaklık değerleri $l_0=174$ cm, $d=14$ cm ve ızgara genişliği $p_0=1$ mm değerleriyle birlikte yerine yazılırsa cismin profili belirlenmiş olur. Şekil 5.52, numunenin profilini gösteren üç boyutlu yükseklik değişimini göstermektedir.



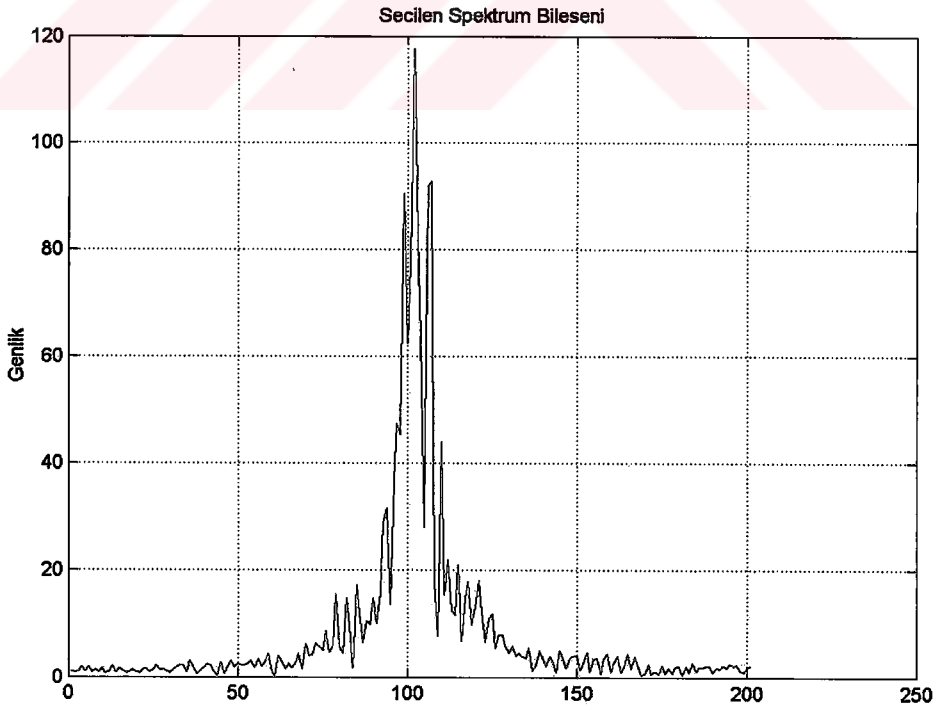
Şekil 5.47 Referans düzleminin bir satırının genlik frekans spektrumu.



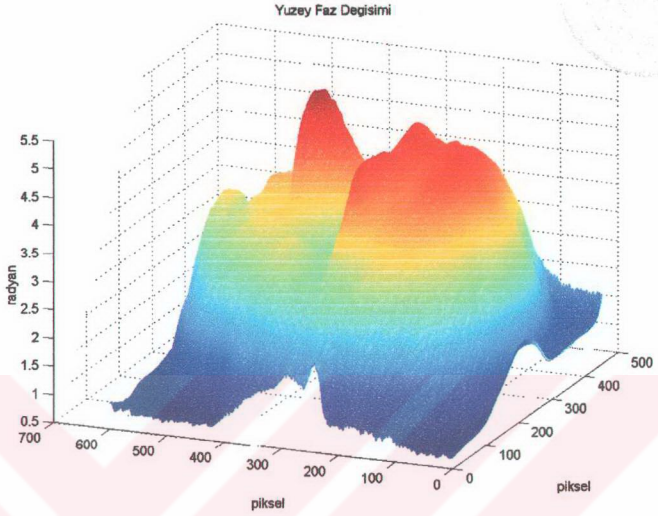
Şekil 5.48 Yükseklik değişimli görüntünün genlik frekans spektrumu.



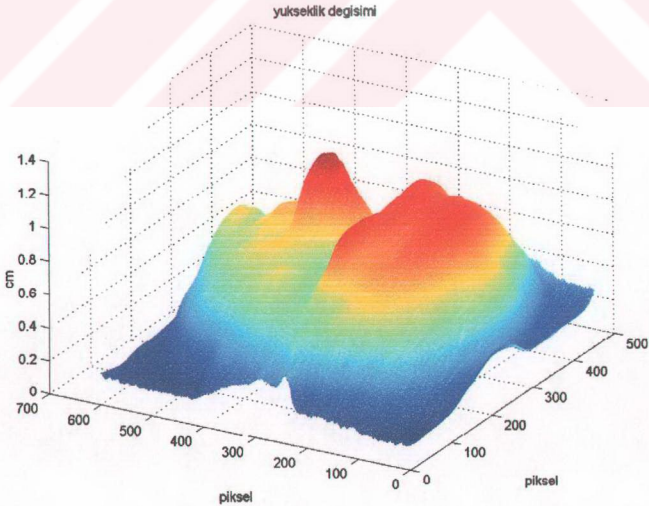
Şekil 5.49 Referans düzlemi frekans spektrumundan seçilen bileşenin genlik frekans spektrumu



Şekil 5.50 Numunenin frekans genlik frekans spektrumundan seçilen bileşen.

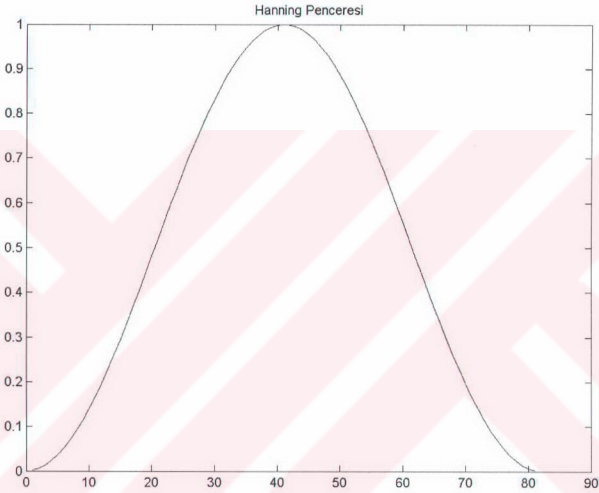


Şekil 5.51 Yüzey yükseklik değişimlerinden kaynaklanan üç boyutlu faz haritası.

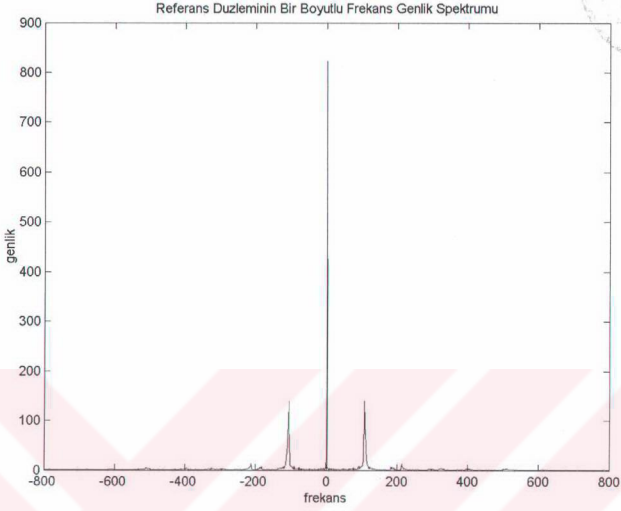


Şekil 5.52 Deney numunesi Atatürk büstünün profili.

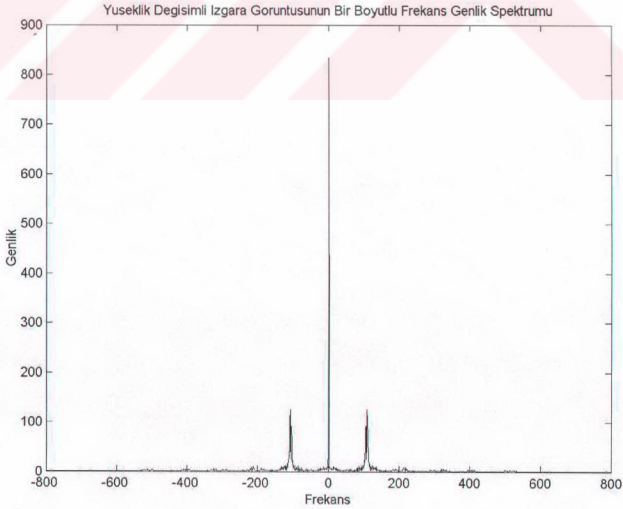
Aşağıda yukarıda sonuçları verilen deneyin farklı bir ızgarayla tekrarlanması gösterilmiştir. Bazı durumlarda frekans spektrumundan filtre edilen bileşen pencereleme diye isimlendirilen bir işleme tabi tutulması gerekebilir.[5] Bu işlem seçilen spektrum bileşenini düzgünleştirmek için yapılır. Seçilen her bir bileşenin pencere katsayılarıyla eleman elamana çarpılmasıyla gerçekleştirilir. Şekil 5.53'de 80 katsayılı bir Hanning penceresi gösterilmiştir.



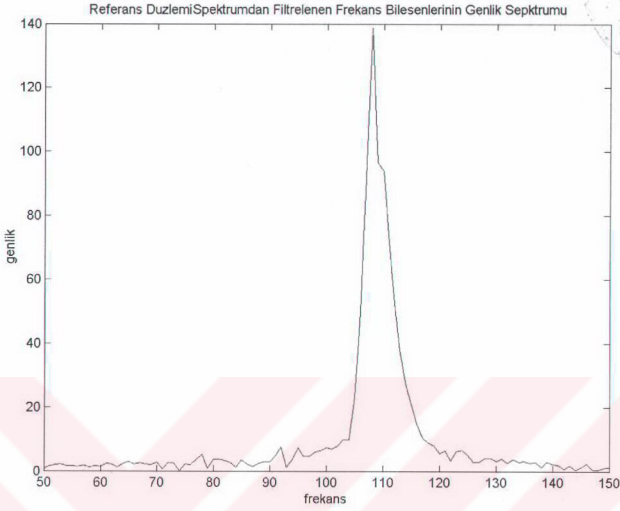
Şekil 5.53 Hanning Penceresi.



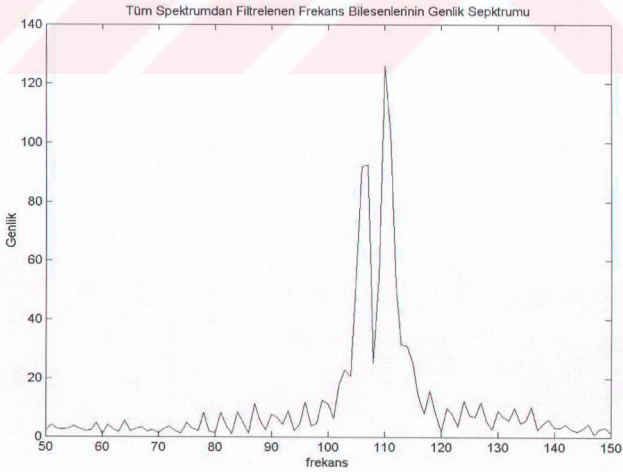
Şekil 5.54 Referans düzleminin bir boyutlu genlik frekans spektrumu



Şekil 5.55 Numune görüntüsünün bir boyutlu frekans genlik spektrumu.

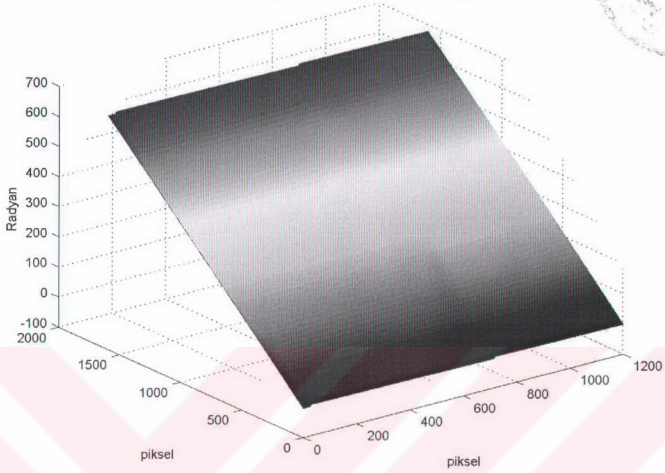


Şekil 5.56 Referans düzleminin frekans spektrumundan seçilen bileşenin genlik spektrumu



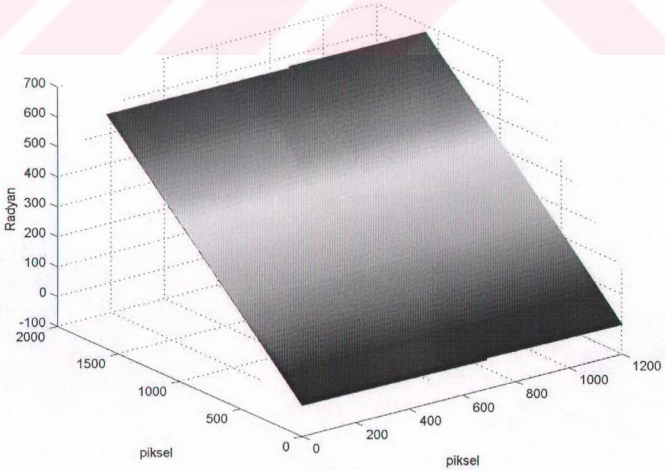
Şekil 5.57 Numunenin filtre edilen spektrum bileşeni.

Referans düzlemi görüntüsünün filtre edilmiş faz Değişimi

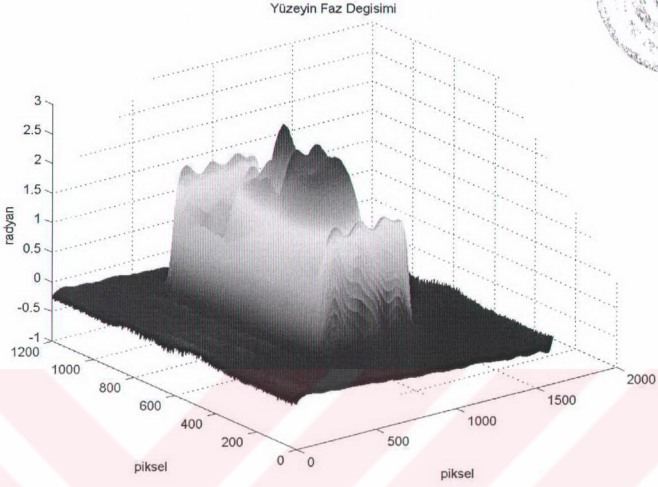
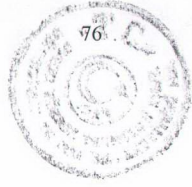


Şekil 5.58 Referans düzleminin ters Fourier dönüşümü alındıktan sonra elde edilen faz değişimi.

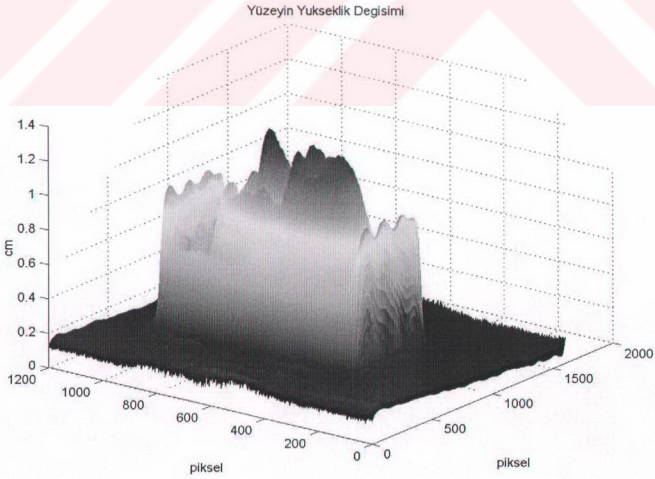
Yükseklik değişimli görüntünün filtre edilmiş faz Değişimi



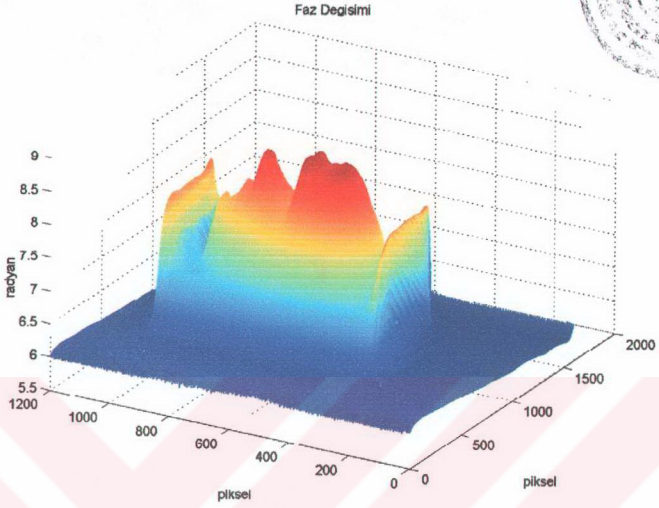
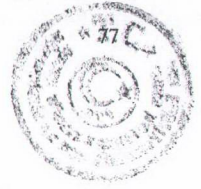
Şekil 5.59 Numune görüntüsünün faz değişimi.



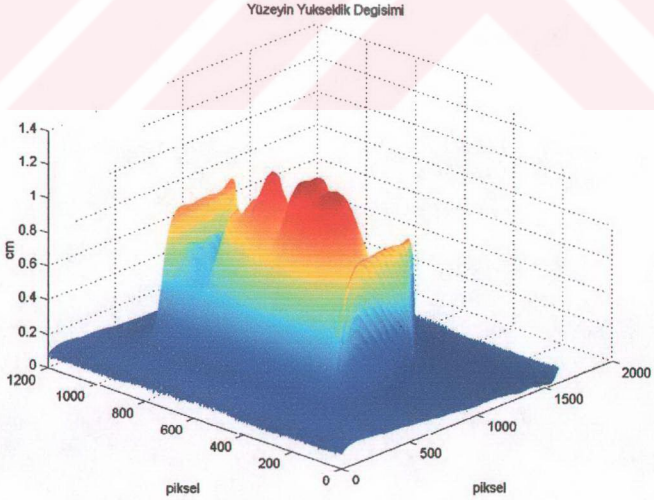
Şekil 5.60 Pencereleme yapılmadan elde edilen faz farkının iki boyutlu düzeltilmiş değişimi.



Şekil 5.61 Pencereleme yapılmadan elde edilen profil.



Şekil 5.62 Pencereleme yapılarak elde edilen faz değişimi.



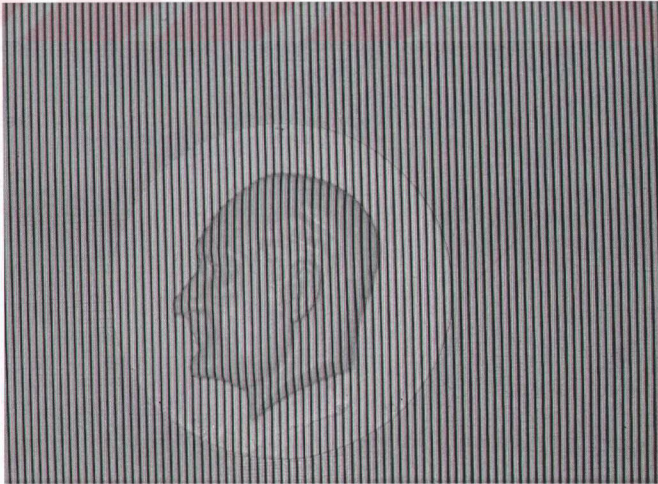
Şekil 5.63 Pencereleme yapılarak elde edilen numune profili.



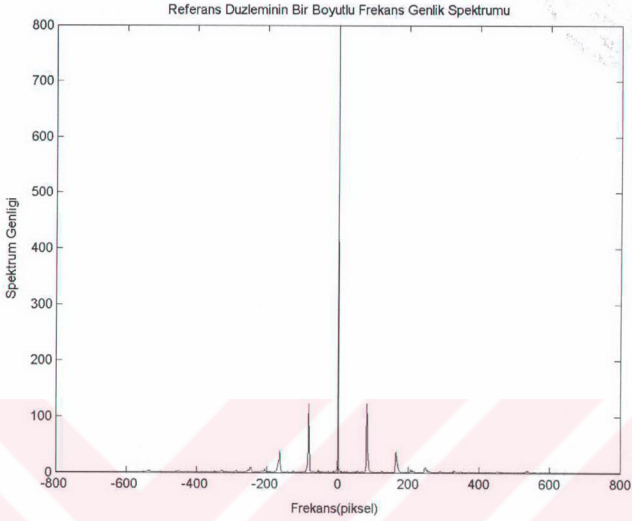
Yukarıda şekillerde pencereleme yapmanın sonuç üzerinde olumlu etki meydana getirdiği görülmektedir. Düzlem üzerine yansıtılan ızgara çizgilerinin sayısı azaltıldığında; yüzey profilinin bir çok detayının kaybolduğu görülür. Aşağıda çok seyrek ızgara projeksiyonu ile yapılan deney sonuçları verilmiştir. Görüldüğü gibi birim aralıktaki ızgara çizgi sayısı azaldıkça profilin ayrıntıları kaybolmaktadır.



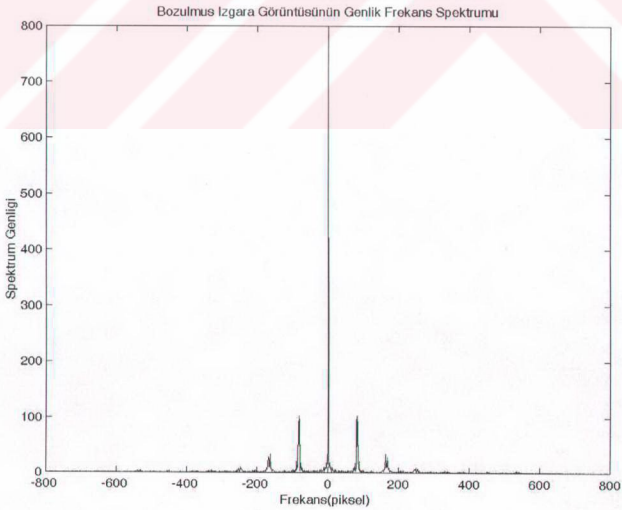
Şekil 5.64 Seyrek ızgara projeksiyonu altında referans düzleminin görünümü.



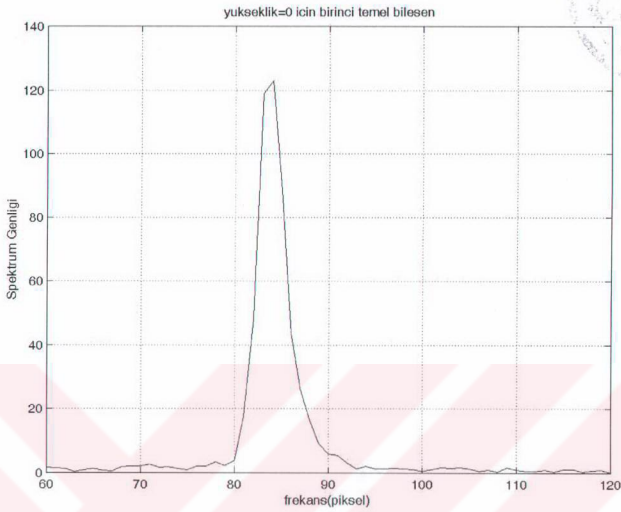
Şekil 5.65 Seyrek ızgara projeksiyonu altında numune görünümü.



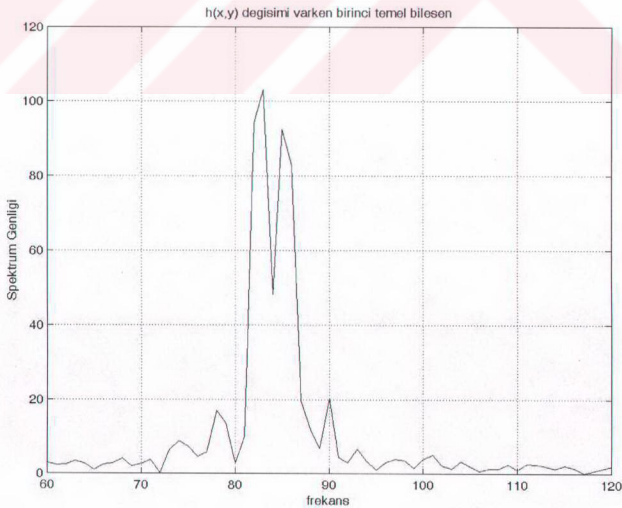
Şekil 5.66 Referans düzlemin bir boyutlu genlik frekans spektrumu.



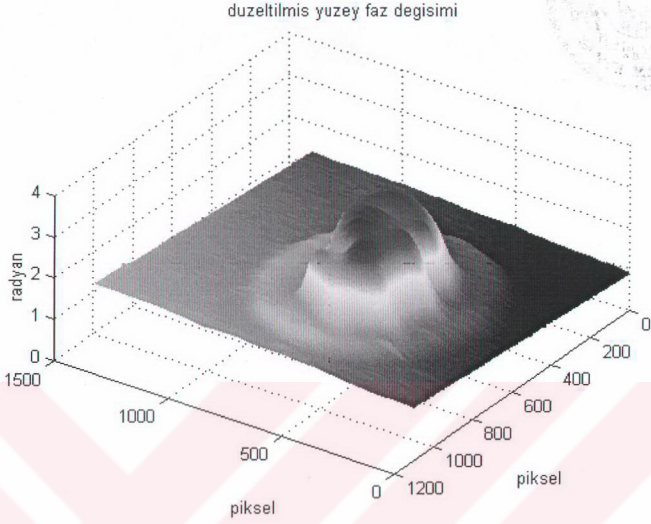
Şekil 5.67 Numune görüntüsünün bir boyutlu genlik frekans spektrumu.



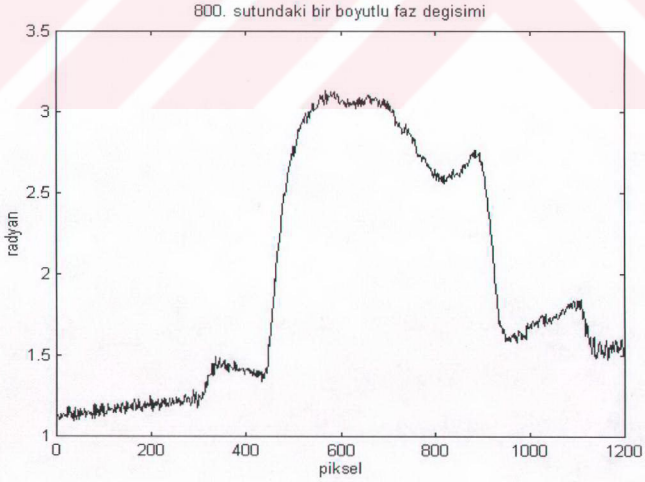
Şekil 5.68 Referans düzlemi frekans spektrumundan filtre edilen bileşen.



Şekil 5.69 Numune frekans spektrumundan filtre edilen bileşen.



Şekil 5.70 Düzeltilmiş faz değışimi.



Şekil 5.71 Faz değışiminin bir sütunu.

Deneyisel çalışma kısmında 4. Bölümde teorik olarak açıklanan Fourier Dönüşümü ile Profil Belirleme Tekniğinin bir deneme faz fonksiyonu üzerine uygulandığında doğru sonuç verdiği görüldü. Gürültü ortamlarda bu yöntemin sağlıklı çalışabilmesi için, gürültü filtre edilmelidir. Bunun için gürültünün çeşidi ve özellikleri doğru tespit edilmelidir. Gerçek numuneler üzerinde yapılan deney çalışmalarda, deney sistemini oluşturan elemanların hassasiyetinin ölçüm sonuçlarına etki ettiği görüldü. Pencereleme yönteminin, ölçüm sonuçları üzerinde olumlu etki yaptığı görüldü.



6. DEĞERLENDİRME ve SONUÇ

Beşinci bölümde, Fourier dönüşümü ile profil belirleme (FTP) yöntemi deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Çevresel şartların etkilerinden kurtulmak amacıyla, FTP bir test fonksiyonuyla denendi. Bu test fonksiyonunun, sinüzoidal ızgara projeksiyonu altındaki iki boyutlu görüntüsü bilgisayarda suni olarak oluşturuldu. Bu görüntüye FTP algoritması uygulanarak üç boyutlu test fonksiyonu yeniden elde edildi. Bu gösterdi ki tamamıyla ideal ortamda FTP algoritması hatasız çalışmaktadır.

Gerçek ölçüm sistemlerinde gürültü, örneklemeden kaynaklanan hatalar, yerleştirme bozuklukları gibi bir takım bozucu etken vardır. Bir ölçüm sistemi gerçek şartlarda çalışacağı için, ölçüm düzeneği buna uygun tasarlanmalıdır. Örneğin, beyaz gürültü diye isimlendirilen eş dağılımlı (uniform) sıfır ortalama değerli bir gürültü hemen hemen bütün fiziksel sistemlerde mevcuttur.

FTP üzerinde beyaz gürültü etkisini incelemek amacıyla; benzetimde kullanılan görüntüye rasgele üretilen gürültü genlikleri ilave edildi. Beyaz gürültünün belirli bir değere kadar ölçüm sonuçlarına etki yapamadığı, fakat gürültünün değişim aralığı artırılmaya devam edildiğinde sonuçlarda bozulmalar görüldü. Fakat bozulmanın görüldüğü sonuçlardaki gürültü seviyesi gerçek bir ölçüm sisteminde asla olmaması gerektiği kadar büyük genlikli gürültülerdir. Sonuç olarak gürültü ve bunun gibi bozucu etkilerin her zaman göz önünde bulundurulması gerektiği görüldü. Bozucu etkiler sinyal işleme teknikleriyle ortadan kaldırılamıyorsa, ölçüm sistemi ve ortamında değişikliğe ihtiyaç vardır.

Dalgacık dönüşümü ile yapılan benzetimler, Dalgacık dönüşümünün faz düzeltme işlemlerine ihtiyaç duymadan faz değişimini elde ettiğini gösterdi. Dalgacık dönüşümünün gürültülü ortamlarda Fourier dönüşümünden daha başarılı olduğu görüldü.

Gerçek dünyada üç boyutlu bir parçanın veya yüzeyin FTP ile rahatlıkla ölçülebileceği görüldü. FTP mantığına göre kurulan bir ölçüm sistemi karanlık odaya ihtiyaç duymamaktadır. Bu yüzden üretim, tasarım sektörlerinde rahatlıkla

kullanılabilir. Göz önünde bulundurulması gereken önemli bir nokta FTP'nin mat veya yarı mat parçalara uygulanabileceğidir. Bu özellikle olmayan parçalarda kısa bir süre için kalıcı olmayan bir şekilde matlaştırılabilir.

Bu çalışmada, yansıtılacak ızgara görüntüsü bilgisayar ortamında oluşturulup projektörün hafıza elamanı üzerinden cismin üzerine düşürülmüştür. Bu yüzden kamera, projektör ve bir referans düzleminden oluşan sade bir ölçüm sistemi sunulmuştur.

FTP yöntemi faz değişimini tespit etme ve bu faz değişimi bilgilerini yükseklik bilgisine yükseklik bilgisine dönüştürme mantığına dayanır. Faz bilgisi her nokta için ayrı hesaplandığı için süreksizlikler meydana gelebilir. Bu süreksizlikler bilgisayar yapısında açısal değerlerin $-\pi$ ile $+\pi$ arasında gösterilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu süreksizlikleri ortadan kaldırmak için ortadan kaldırmak için yapılan işleme faz düzeltme (unwrap) işlemi denir.

Profili belirlenecek cisim üzerine düşürülen ızgara görüntüsündeki çizgi sayısının azalması veya artması sonuçlar üzerinde etkili olur. Çok seyrek çizgili ızgara görüntüsün yeterli yükseklik bilgisini veremediği gibi frekans spektrumunda üst üste binmelere ve bozulmalara sebep olduğu görüldü. Fakat çizgi sayısı çok fazla artırılırsa kullanılan kamerada örnekleme kayıpları ortaya çıkabilir. Bu yüzden birim alana düşen çizgi sayısı uygun seçilmelidir.

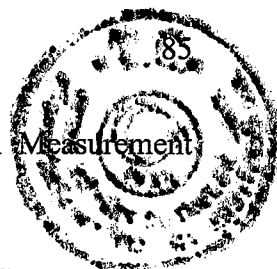
Sonuç olarak bu çalışmada; üç boyutlu ölçüm yapabilecek ve profil belirleyecek bir algoritma incelendi ve deneysel çalışmalarla kullanılabilir olduğu gösterildi. Bu algoritmaya göre kurulacak ölçüm sistemlerinin sayısal sistemlerle çok kolay bütünleşebileceği gösterildi.

Bu çalışma çeşitli endüstriyel uygulamalarda üç boyutlu ölçüm amacıyla kullanılacak bir alt yapıya hizmet etmektedir. Bu çalışmanın daha ileri aşamalarında çift görüntüleme ve çift projeksiyonlu ölçüm sistemlerinin tasarımı amaçlanmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] **TAKEDA, M., MUTOH, K.:** "Fourier Transform Profilometry for the Automatic of 3-D Object Shapes", Applied Optics, Vol. 22, No:24, 1983
- [2] **ROBINSON, D.W., REID, G.T.:** ' *Interferogram Analysis* ', IOP Publishing Bristol and Philadelphia, 1983 ISBN 0-7503-0197-X
- [3] **MALACARA, D.:** ' *Optical Shop Testing* ', John Wiley & Sons Inc., New York, 1992, ISBN 0-471-52232-5
- [4] **SU, X., CHEN, W.:** "Fourier Transform Profilometry: a Review", Optics and Lasers in Engineering Vol. 35, 2001, pp 263-284
- [5] **GASWIK, K.J.:** ' *Optical Metrology* ', John Wiley & Sons Ltd., England, 1996, ISBN 0471 954748
- [6] **YI, J., HUANG, S.:** "Modified Fourier Transform Profilometry for the Measurement of 3-D Steep Shapes", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 27, 1997, pp 493-505
- [7] **NICOLA S.D., FERRARO, P.:** "Fourier Transform Method of Fringe Analysis for Moire Interferometry", J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2 2000 pp 228-233
- [8] **ASUNDI, A., WENSEN, Z.:** "Fast Phase-Unwrapping Algorithm Based on a Gray-Scale Mask and Flood Fill", Applied Optics Vol. 37, No.23 1998
- [9] **ACQUISTO, L.D., FRANTINI, L., SIDDIOLO, A.M.:** "A Modified Moire Technique for Three-Dimensional Surface Topography", Measurement Science and Technology, Vol. 13 2002 pp 613-622
- [10] **BERRYMAN, F., PYNSENT, P., CUBILLO, J.:** "A Theoretical Comparison of Three Fringe Analysis Methods for Determining the Three-Dimensional Shape of An Object in the Presence of Noise", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 39, 2003 pp 35-50
- [11] **LU, C., YAMAGUCHI, A., INOKUCHI, S.:** "Electronics and Communications in Japan, Part 3, Vol. 85, No.1, 2002



- [12] **WINDECKER, R., FRANZ, S., TIZIANI, H.J.:** "Optical Measurement with Fringe Projection", Applied Optics Vol. 38, No.13 1999
- [13] **FURUHASHI, H., ZHOU, L., LIU, J., MATSUO, A.:**"Influences of the Inclination of Gratings on the Alignment Accuracies in Moire Alignment Systems", Electrical Engineering in Japan, Vol. 139 No.2, 2002
- [14] **ASUNDI, A., SAJAN, M.R.:**"Digital Moire for Measurement on Cylindrical Object", J. Opt. Vol. 29 1998
- [15] **WU, J.J.:**"Simulation Rough Surfaces with FFT", Tribology International Vol. 33, 2000 pp 47-58
- [16] **SPAGNOLO, G.S., AMROSINI, D.:** "Diffraction Optical Element Based Sensor for Roughness Measurement", Sensors and Actuators A 100 2002 pp 180-186
- [17] **ASUNDI, A., WENSEN, Z.:** " United Calibration Technique and its Applications in Triangular Profilometry", Applied Optics Vol. 38, No. 16 1999
- [18] **WYANT, J.C., KOLIOPOULOS, C.L., BHUSHAN, B. :**"Development of a Three-Dimensional Noncontact Digital Optical Profiler", Journal of Tribology Vol. 108 1986
- [19] **MOCHIZUKI, J., ASONO, T.:** "Study on Reduction Methods of Moire Noise in Image Acquisition of Periodic Gray-Scale Patterns", Systems and Computers in Japan, Vol. 33, No. 1 2002
- [20] **GOLDBERG, A.K., BOKOR, J.:**"Fourier-Transform Method of Phase Shift Determination", Applied Optics Vol. 40, No. 117 2001

ÖZGEÇMİŞ



Ali DURSUN 1977 yılında Erzurum'da dünyaya geldi. İlk, orta ve lise eğitimini Erzurum'da tamamladı. 1999 yılında Uludağ Üniversitesi'nden elektronik Mühendis olarak mezun oldu. 2000 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans eğitime başladı. Halen aynı bölümde Elektronik anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

