

FOURIER DÖNÜŞÜMÜ İLE SAYISAL FAZ HOLOGRAMININ ELDE EDİLMESİ

Gülhan USTABAŞ KAYA

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

ZONGULDAK

Aralık 2013

KABUL:

Gülhan USTABAŞ KAYA tarafından hazırlanan "FOURIER DÖNÜŞÜMÜ İLE SAYISAL FAZ HOLOGRAMININ ELDE EDİLMESİ" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir.
13/12/2013

Başkan: Doç. Dr. Zehra SARAÇ (BEÜ)



Üye : Doç. Dr. Ertan ÖZTÜRK (BEÜ)

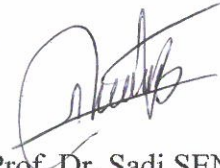


Üye : Yrd. Doç. Dr. Muhammet UZUNTARLA (BEÜ)



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. .../.../2013



Prof. Dr. Şadi ŞEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Gülhan USTABAŞ KAYA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FOURIER DÖNÜŞÜMÜ İLE SAYISAL FAZ HOLOGRAMININ ELDE EDİLMESİ

Gülhan USTABAŞ KAYA

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Zehra SARAÇ

Aralık 2013, 75 Sayfa

Fourier Dönüşümü ile sayısal faz hologramının elde edilmesi amaçlanan bu çalışmada, bulunan faz bilgisi kullanılarak cismin görüntüsü tekrar geri elde edilmiştir. Tek bir faz hologramı yaratmak için kullanılacak faz bilgisi, daha önce optik profilometri için kullanılan fakat bu çalışmada hologramdan faz bilgisini çıkartmak için kullanılması önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile bulunmuştur.

Çalışmada ilk olarak sayısal ortamda tek bir hologram oluşturulmuştur. Oluşturulan hologramın, bu çalışmada kullanılması önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile bulunan faz bilgisinden tek bir faz hologramı yaratılmıştır. Yaratılan faz hologramından sırasıyla ters Fourier dönüşümü ve Fresnel-Kirchhoff integrali kullanılarak görüntünün yeniden elde edilmesi (reconstruction) işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak faz kaydırma sayısal holografî tekniği kullanılarak 4 farklı hologram oluşturulmuştur. Fakat bu yöntemde faz bilgisi bulunurken sadece çalışmada önerilen Fourier dönüşüm algoritması kullanılmamış, faz kaydırma sayısal holografî tekniği ile de faz bilgisi elde edilmiştir. Faz kaydırma sayısal

ÖZET (devam ediyor)

holografi tekniği ile faz bulma yöntemi daha önceden gerçekleştirilmiş olup bu çalışmada önerilen Fourier dönüşüm algoritması yöntemi ile karşılaştırma yapabilmek için tekrar kullanılmıştır. Sırasıyla her iki yöntemle elde edilen faz bilgileri ile genliği bir olan bir faz hologramı yaratılmış ve bu hologram alanından görüntünün yeniden elde edilmesi işlemi Fresnel-Kirchhoff integrali kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında deneysel düzenekte hologram çekimi yapılmış cisimlerin, çalışmada önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile bulunan faz bilgisinden ters Fourier dönüşümü kullanılarak görüntüleri geri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Faz hologramı, 3B görüntü, algoritma, Fourier dönüşüm algoritması, Ters Fourier dönüşümü, Fresnel-Kirchhoff integrali

Bilim Kodu: 609.04.00.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE RECONSTRUCTION OF THE DIGITAL PHASE HOLOGRAM BY USING FOURIER TRANSFORM

Gülhan USTABAŞ KAYA

Bülent Ecevit University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Zehra SARAÇ

December 2013, 75 pages

The reconstruction of the digital phase hologram by using Fourier transform is purposed in this thesis, the reconstruction process is carried out with the phase information which is obtained from a hologram. The phase information which is used for creating the single phase hologram is obtained by using Fourier transform algorithm which has been previously used for optical profilometry but is proposed to use in this study for obtaining phase information from the hologram.

In this study the single hologram is firstly created digitally. The single phase hologram is created for phase information obtaining by Fourier transform algorithm which is proposed in this study. By using inverse Fourier Transform and Fresnel-Kirchhoff integral respectively, the reconstruction process is performed by the phase information obtaining from a single hologram. Secondly, 4 different holograms is obtained using by phase shifting digital holography technique. But in this method, while obtaining the phase information, not only

ABSTRACT (continued)

using Fourier transform algorithm proposing in this study, but also the phase information is obtained by using phase shifting digital holography technique. Obtaining phase information method by using phase shifting digital holography technique which has been previously performed, is used for making comparison with Fourier transform algorithm proposing in this study. The phase hologram having one amplitude is created by using phase information which is obtained from these two methods respectively and the reconstruction process is performed by using Fresnel-Kirchhoff integral.

In the last step of this study, the image of 3D object that we have taken a digital hologram experimentally, is reconstructed by inverse Fourier transform from phase information by obtaining Fourier transform algorithm which is proposed to use in this study.

Keywords: Phase hologram, 3D image, Algorithm, Fourier transform algorithm, Inverse Fourier transform, Fresnel-Kirchhoff integral

Science Code: 609.04.00.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında değerli bilgi ve görüşlerini benden esirgemeyen, çalışma ile ilgili olarak eksik noktaları görmemde ve bunları gidermemde bana çok büyük katkısı olan, çalışma azmimi kendisine borçlu olduğum, sonsuz sevgi ve saygı duyduğum çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Zehra SARAÇ'a teşekkürü borç bilirim.

Tezin deneysel kısmında yardımlarını esirgemeyen ve bilgilerinden yararlandığım Arş.Gör. Dr. Duygu Önal Tayyar'a teşekkür ederim.

Çalışmamda bana mali destek sağlayan Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (BAP Proje No: 2012-17-15-03) teşekkür ederim.

Tezin tüm aşamalarında manevi desteğini benden esirgemeyen, her an yanımda olan, yaptığım her işi sonuna kadar destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen eşim Sayın Hakan KAYA'ya ve ikinci ailem olan Sayın KAYA ailesine teşekkür ederim.

Tezin düzenlenmesinde yardımları olan Sayın Murat HAMARAT'a teşekkür ederim.

Başarılarımı her zaman destekleyen çok değerli abim Sayın Fatih USTABAŞ'a teşekkür ederim.

Son olarak beni bugünlere getiren, maddi ve manevi desteklerini üzerimden hiç eksik etmeyen, yaptığım her işi sonuna kadar destekleyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez 04.11.2012 tarihinde aramızdan ayrılan, can dostum Derya KAYABAŞI'nın anısına ithaf edilmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 GENEL BİLGİLER	5
2.1 DALGA EŞİTLİKLERİ	6
2.1.1 Düzlem Dalga Eşitliği	8
2.1.2 Küresel Dalga Eşitliği	9
2.2 ŞİDDET (INTENSITY)	9
2.3 GİRİŞİM (INTERFERENCE)	10
2.4 KIRINIM TEORİSİ VE FRESNEL YAKLAŞIMI	12
BÖLÜM 3 HOLOGRAFİ	15
3.1 SAYISAL HOLOGRAFİ	16
3.1.1 Sayısal Fresnel Hologram Düzenegi	17
3.1.2 Sayısal Fourier Dönüşüm Hologram Düzenegi	19
3.2 HOLOGRAM TÜRLERİ	21
3.2.1 Yansıma ve İletim Hologramları	22

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.2.2 İnce ve Kalın Hologramlar	22
3.2.3 Faz ve Genlik Hologramları	23
3.3 HOLOGRAMIN TEMEL AŞAMALARI	23
3.3.1 Hologram Kaydetme	23
3.3.1.1 Eksen Üstü ve Eksen Dışı Kayıt Düzenekleri	27
3.3.2 Hologramı Yeniden Yapılandırma	28
BÖLÜM 4 SAYISAL OLARAK DİJİTAL HOLOGRAM KAYDI YAPILMASI VE KULLANILAN GERİ DÖNÜŞÜM ALGORİTMALARI	 31
4.1 FDA İLE FAZ BİLGİSİ BULUNAN SAYISAL TEK HOLOGRAMDAN TFD İLE GÖRÜNTÜNÜN YENİDEN ELDE EDİLMESİ	 34
4.2 FDA İLE FAZ BİLGİSİ BULUNAN SAYISAL TEK HOLOGRAMDAN FKİ İLE GÖRÜNTÜNÜN YENİDEN ELDE EDİLMESİ	 38
4.3 FKSHT İLE OLUŞTURULAN 4 HOLOGRAMIN FDA İLE BULUNAN FAZ BİLGİSİNDEN FKİ İLE GÖRÜNTÜNÜN YENİDEN ELDE EDİLMESİ	 39
4.4 FKSHT İLE OLUŞTURULAN 4 HOLOGRAMIN FKSHT İLE BULUNAN FAZ BİLGİSİNDEN FKİ İLE GÖRÜNTÜNÜN YENİDEN ELDE EDİLMESİ	 42
BÖLÜM 5 DENEYSEL OLARAK CİSİMLERİN HOLOGRAM KAYDININ YAPILMASI VE FOURİER DÖNÜŞÜMÜ İLE SAYISAL FAZ HOLOGRAMININ ELDE EDİLMESİ	 45
5.1 SAYISAL HOLOGRAM KAYIT DÜZENEGİ	46
5.2 FDA İLE FAZ BİLGİSİ BULUNAN HOLOGRAMDAN TFD İLE GÖRÜNTÜNÜN GERİ ELDE EDİLMESİ	 53
BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE TARTIŞMA	65

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Fresnel yaklaşımının geometrik şekli.....	12
3.1 Sayısal holografi kayıt ve görüntünün yeniden elde edilme şeması	16
3.2 Sayısal Fresnel hologramın geometrik düzeneği	17
3.3 Sayısal merceksiz Fourier hologramın geometrik kayıt düzeneği	20
3.4 Temel hologram kurulumu, Dalga cephesi bölünmesi.....	24
3.5 Temel hologram kurulumu, genlik bölünmesi.....	24
3.6 Eksen dışı (Off-axis) hologram kayıt düzeneği	28
3.7 Eksen dışı (off-axis) hologramdan görüntünün yeniden elde edildiği düzenek.....	29
4.1 Sayısal olarak oluşturulan hologram kaydı ve görüntünün yeniden elde edilme akış diyagramı.	33
4.2 Bilgisayar ortamında oluşturulan B.E.Ü harflerinin sayısal olarak oluşturulmuş hologram deseni.	34
4.3 Tek bir hologramdan faz bilgisi (a) FDA ile bulunan (b)Hologramın kendisi (şekil 4.2.b) faz kabul edilerek bulunan, TFD ile geri elde edilmiş görüntüler.	37
4.4 FDA ile faz bilgisi bulunan tek hologramdan FKİ ile geri elde edilen cismin görüntüsü.	39
4.5 Faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile oluşturulan hologram.....	40
4.6 FKSHT ile oluşturulan 4 hologramın FDA ile bulunan faz bilgisinden FKİ ile geri elde edilen cismin görüntüsü.	42
4.7 FKSHT ile oluşturulan 4 hologramın FKSHT ile bulunan faz bilgisinden FKİ ile geri elde edilen cismin görüntüsü.....	43
5.1 Deneysel olarak oluşturulan hologram kaydı ve geri elde işlemi için yapılan akış diyagramı.	45
5.2 Eksen dışı (off-axis) hologram kayıt düzeneği.	46
5.3 Merceksiz sayısal Fourier holografi düzeneğinin önden görüntüsü.....	47
5.4 Merceksiz sayısal Fourier holografi düzeneğinin arkadan görüntüsü.	48

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
5.5 Cismın ve referans dalgasının aynı düzlemde olmadığı eksen dışı (off-axis) kayıt düzeneği	49
5.6 Cismın ve referans dalgasının aynı düzlemde olmadığı eksen dışı (off-axis) kayıt düzeneğinin arkadan görüntüsü.....	50
5.7 Hologram kaydı yapmak için kullanılan ve beyaza boyanmış örnek nesnelere (a) Zar, (b) Sol anahtarı, (c) Vida, (d) Yusufçuk, (e) Sinek.....	51
5.8 Hologram kaydı yapmak için kullanılan örnek nesnenin konumu.....	52
5.9 Şekil 5.7a da verilen zarın deneysel olarak çekilmiş hologramı.	53
5.10 Faz bilgisi FDA ile bulunan zar hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.	54
5.11 Hologramın kendisi faz olarak kabul edilip bulunan zar hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.....	54
5.12 Şekil 5.7b de verilen sol anahtarının deneysel olarak çekilmiş hologramı.....	55
5.13 Faz bilgisi FDA ile bulunan sol anahtarı hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.	56
5.14 Hologramın kendisi faz olarak kabul edilip bulunan sol anahtarı hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.....	56
5.15 Şekil 5.7c de verilen vidanın deneysel olarak çekilmiş hologramı.	57
5.16 Faz bilgisi FDA ile bulunan vida hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.....	58
5.17 Hologramın kendisi faz olarak kabul edilip bulunan vida hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.....	58
5.18 Şekil 5.7d de verilen yusufçuğun deneysel olarak çekilmiş hologramı.	59
5.19 Faz bilgisi FDA ile bulunan yusufçuk hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.	60
5.20 Hologramın kendisi faz olarak kabul edilip bulunan yusufçuk hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.....	60
5.21 Şekil 5.7e de verilen sineğin deneysel olarak çekilmiş hologramı.	61
5.23 Hologramın kendisi faz olarak kabul edilip bulunan sinek hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.....	62
5.22 Faz bilgisi FDA ile bulunan sinek hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü. ...	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
4.1	Sayısal ortamda oluşturulan hologramların geri elde edilmiş görüntülerinin NRMS değerleri.	44
5.1	Deneysel olarak oluşturulan hologramların geri elde edilmiş görüntülerinin NRMS değerleri.	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

w	: Açısal frekansı ($w = 2\pi f$)
E_0	: Cisim Dalgasının genliği
λ	: Dalga boyu
E	: Elektrik alanı
φ, ψ, ϕ	: Faz sabitleri
(ξ, η)	: Görüntü düzleminin koordinatları
(x, y)	: Hologram düzleminin koordinatları
h	: Hologram fonksiyonu
c_0	: Işığın boşluktaki yayılma hızı ($c_0 = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$)
I	: Işıma şiddeti, yoğunluk
$\Re e$: Karmaşık sayının gerçel kısmı
$\Im m$: Karmaşık sayının sanal kısmı
∇^2	: Laplasyen operatörü
H	: Manyetik alan
τ	: Pozlama süresi
h_0	: Pozlanmamış yüzeydeki genlik geçirgenliği
E_R	: Referans dalgasının genliği
k	: Dalga katsayısı ($k = 2\pi / \lambda$)

KISALTMALAR

3B	: 3 Boyut
3D	: 3 Dimension
BS	: Beam Splitter
CCD	: Charge- Coupled Device
CGH	: Computer Generated Hologram
cm	: santimetre

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

DC	: Direct Current (Doğru Akım)
FDA	: Fourier Dönüşüm Algoritması
FFT	: Fast Fourier Transform
FKİ	: Fresnel-Kirchhoff İntegrali
FKSHT	: Faz Kaydırma Sayısal Holografı Tekniği
He-Ne	: Helyum-Neon
IFFT	: Inverse Fast Fourier Transform
m	: metre
mm	: milimetre
mW	: miliWatt
NDF	: Neutral Density Filter
NDM	: Numerical Diffraction Methods
NRMS	: Normalized Root Mean Square
nm	: nanometre
off-axis	: Eksen dışı
on-axis	: Eksen üstü
PC	: Personal Computer
Reconstruction	: Görüntünün yeniden elde edilmesi
SLM	: Spatial Light Modulator
TFD	: Ters Fourier Dönüşümü

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İki boyutlu görüntüleme dalga'nın sadece şiddet bilgisi kaydedilirken, faz bilgisi kaybolmaktadır (Bayraktar ve Özcan 2008). Üç boyutlu görüntüleme ise dalga'nın genlik ve faz bilgisiyle birlikte derinlik bilgisi de kaydedilmektedir (Gabor 1948). Üç boyutlu görüntüleme tekniği temelde iki ana başlık altında toplanmaktadır (Okoshi 1976). Bu tekniklerden ilki binoküler (iki gözünde kullanılmasını gerektiren) stereoskopik (derinlik gösterici) görüntüleme tekniğidir. Merceksi levhalarla yapılan derinlik gösterimi (Lenticular stereoscopic imaging) bu tekniğe örnek olarak gösterilebilmektedir (Park et al 1994, Park et al 1995). İkinci teknik ise uzaysal görüntüleme tekniği olan autostereoskopidir (Çıplak gözle üç boyutlu görüntü izleme tekniği) (Okoshi 1976, Isono and Yasuda 1991). İntegral fotoğrafı tekniği (Lippmann 1891) ve holografik uygulamalar uzaysal görüntüleme tekniğinin örneklerindedir (Okoshi 1976). Günümüzde en çok kullanılan üç boyutlu görüntüleme tekniği holografidir. Holografide cisimlerin faz ve genlik bilgisini taşıyan alanların tamamı kaydedilir (Caulfield 1979, Hariharan 1984). Gelişen holografı teknikleri arasında yer alan dijital holografı ile son zamanlarda bu gelişme oldukça ilerlemiştir. Bu yöntemde kayıt bir CCD kamera üstüne yapılır. Aynı zamanda üç boyutlu (3D) nesnelerin hologramları matematiksel olarak bilgisayarda üretilebilir ve tekrar görüntüsü elde edilebilir (Computer Generated Holograms) (Ripoll et al. 2004, Abookasis and Rosen 2006, Schnars and Jüptner 2002). Holografının oldukça geniş uygulamaları vardır. Bunlara örnek olarak dijital holografik mikroskop, holografik neşter, 3D televizyon ve interferometri sayılabilir (Bouamama et al. 2004, Sinclair et al. 2004, Bitou 2003, Ahrenberg 2007). Genelde kullanılan iki farklı hologram vardır; faz ve genlik hologramı. Bu çalışmada faz hologramı kullanılmıştır. Bilgisayarda üretilen faz hologramı doğrudan doğruya sayısal olarak çeşitli yöntemlerle işlenebilmektedir. Optiksel olarak ise bu faz hologramı faz modüleli SLM'ye (uzaysal ışık modülatörüne) gönderilerek hologramı hesaplanılan 3D nesnenin görüntüsü elde edilebilir (Kreis 2005, Sutkowski and Kujawinska 2000, Huadong et al. 2009, Önal Tayyar et al. 2011). 3D nesnelerin sayısal olarak görüntüsünün elde edilmesinde Fresnel ve Fourier

domeninde alan bilgisi kullanılır.3D nesnenin kırınan karmaşık alanı faz kaydırma tekniği (phase-shifting techniques) kullanılarak hesaplanır (Yamaguchi and Zhang 1997). Burada elde edilen faz bilgisi doğrudan SLM'ye gönderilerek optik olarak tekrar görüntünün elde edilmesi sağlanmış olur. Fakat bu teknikte faz hesabı için birden fazla holograma ihtiyaç duyulur. Bu durumda gerçek zamanlı analiz yapılamaz (Matoba et al. 2002). Bu tezde gerçek zamanlı olarak faz hologramından görüntünün tekrar elde edilmesine olanak sağlayacak bir algoritmanın kullanılması amaçlanmış ve tek bir faz hologramından yola çıkılarak bu hologram alanından elde edilen faz bilgisi ile bu işlem gerçekleştirilmiştir.

Sayısal olarak üretilen hologramdan tek bir faz hologramı yaratmak için kullanılan birkaç teknik vardır. Bunlar Sürekli Wavelet dönüşümü (Liebling et al. 2003, Önal Tayyar et al. 2011), faz kaydırma sayısal holografi tekniğidir (Wizinowich et al. 1990, Yamaguchi et al. 1997, Yamaguchi et al. 2006). Tezde bu yöntemlere alternatif olarak Fourier dönüşüm algoritması kullanılması önerilmiştir.

Fourier dönüşüm algoritması ilk defa 1982 yılında Takeda ve arkadaşları tarafından optik profilometride kullanılmıştır (Takeda et al. 1983). Fourier tekniği optik girişim deseni analizinde en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu tezde farklı olarak sayısal faz hologramının elde edilmesinde kullanılan faz bilgisini bulmak için kullanılması önerilmiştir.

Çalışmada faz bilgisini bulmak için kullanılması önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile elde edilen faz bilgisi ve daha önce Yamaguchi ve arkadaşları tarafından uygulanan faz kaydırma sayısal holografi tekniği (Yamaguchi and Zhang 1997) kullanılarak tek bir hologramdan elde edilen faz bilgisi ile 3D nesnenin görüntüsünün elde edilmesi (reconstruction) işlemi yapılmıştır (Matoba et al. 2002a, 2002b).

Bu tez dört aşamada gelişme gösterecektir;

İlk aşamada, örnek olarak alınan nesnenin sayısal ortamda oluşturulan tek bir hologramından, faz hologramı yaratabilmek için çalışmada önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile faz bilgisi çıkartılacaktır (Takeda and Mutoh 1983, Takeda et al 1996, Kaya et al. 2010). Daha sonra elde edilen bu faz bilgisiyle bir faz hologramı yaratılacaktır. Hem çalışmada önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile elde edilen faz bilgisi, hem de hologramın kendisi faz olarak kabul edilerek (Önal Tayyar et al. 2011) alınan bilgi ile sırasıyla ters Fourier dönüşümü ve

Fresnel-Kirchhoff integrali kullanılarak görüntü yeniden elde edilecektir (Matoba et al. 2002, Ustabaş Kaya et al. 2013).

İkinci aşamada, tek hologram yerine sayısal olarak 4 farklı hologram üretilenektir. 4 farklı hologram yaratabilmek için faz kaydırma dijital holografi tekniği (Yamaguchi and Zhang 1997, Zhang and Yamaguchi 1998) kullanılarak referans dalğanın fazları sırasıyla $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ olacak şekilde artırılacak ve bu dört hologramdan kompleks genlikli tek bir hologram ifadesi çıkartılacaktır (Matoba et al. 2002, Kreis 2005, Kim 2010, Iwasa et al. 2012). Çıkartılan bu hologramın çalışmada önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile fazı bulunacak ve bu faz bilgisiyle bir faz hologramı üretilenektir. Hem çalışmada önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile elde edilen faz bilgisi, hem de hologramın kendisi faz olarak kabul edilerek alınan bilgi kullanılarak görüntünün geri elde etme işlemi daha önce kullanılmış olan Fresnel-Kirchhoff integrali ile gerçekleştirilecektir (Matoba et al. 2002).

Üçüncü aşamada, faz kaydırma sayısal holografi tekniği (Matoba et al. 2002) ile oluşturulan dört farklı hologramdan, çalışmada kullanılması önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile bulunan faz bilgisi yerine, faz kaydırma sayısal holografi tekniğine göre faz bilgisi elde edilecektir (Wizinowich 1990, Kreis 2005). Faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile elde edilen faz bilgisi ve hologramın kendisi faz olarak kabul edilerek alınan bilgi kullanılarak görüntünün geri elde etme işlemi Fresnel-Kirchhoff integrali ile gerçekleştirilecektir. Bu yöntem daha önce kullanılmış bir yöntem olup çalışmada kullanılması önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile karşılaştırma yapabilmek için tekrar gerçekleştirilmiştir (Wizinowich 1990, Kreis 2005).

Son aşamada ise, deneysel düzenekte hologram çekimi yapılmış cisimlerin, çalışmada önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile elde edilen faz bilgisinden ters Fourier dönüşümü kullanılarak görüntüleri geri elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda faz bilgisi kullanılarak görüntünün yeniden elde edilmesine ilave olarak her bir aşamada üretilen hologramın kendisi faz olarak kabul edilerek görüntü elde edilmiştir. Bunun amacı ise bulunan sonuçların parlaklığını karşılaştırabilmektir (Matoba et al. 2002).

Çalışmanın sonuç kısmında hem sayısal olarak oluşturulan, hem de deneysel olarak oluşturulan hologramların ters Fourier dönüşümü ve Fresnel-Kirchhoff integraline ile geri elde edilmesiyle bulunan görüntüleri karşılaştırılacak ve sonuçlar tartışılacaktır.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

Hologramı incelemeden önce ilk olarak ışığı elektromanyetik dalga açısından incelemek gerekmektedir. Çünkü hologram kaydı ve görüntünün yeniden elde edilmesi aşamalarında gerekli olan, cisim tarafından yayılan veya dağıtılan bir dalga ile referans ışın tarafından dağıtılan dalga ön plana çıkmaktadır (Kreis 2005). Dalga eşitlikleri tanımlandıktan sonra hologramın temeli olan girişim olayına açıklık getirmek gerekmektedir. Çünkü ışığın dalga özelliklerinden bir tanesi de girişim olayıdır (Hecht 2005, Kreis 2005).

Işık elektromanyetik dalga açısından incelendiğinde, uzayda zamanla değişen elektrik ve manyetik alanların toplamı olarak ele alınabilir (Hecht 2005, Kaya 2010). İki ışık dalgasının girişim yapabilmesi, ışık dalgasını oluşturan elektrik ve manyetik alan vektörlerinin toplanabilme özelliği ile olmaktadır (URL-1 2013). Üst üste gelme ilkesiyle açıklanan girişim olayında iki veya daha fazla sinüsel dalga, birlikte hareket ederek belirli bir zaman ve noktadaki elektrik alanı oluştururlar. Bu elektrik alan tek tek dalgaların oluşturduğu toplam alandır (Hecht 2005).

Girişim sonucu oluşan elektrik ve manyetik alan vektörlerine sahip dalga J. C. Maxwell'in dalga eşitliğine göre matematiksel olarak (Bateman 1995);

$$\nabla^2(\vec{E}, \vec{H}) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\vec{E}, \vec{H}) \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir.

Manyetik alan vektörleri optiksel kavramları ifade ederken genellikle ihmal edilir. Bu nedenle bir dalga basitçe ifade edildiğinde sinüzoidal dalga olarak (Wilson and Hawkes 2000, Hecht 2005);

$$E(x, y) = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi) \quad (2.2)$$

yazılabilir. Bu denklemde t anında x noktasındaki değerini gösteren E elektrik alan ifadesinde; φ faz sabitini, k dalğanın katsayısını, ω açısal frekansı ve E_0 dalğanın genliğini ifade etmektedir.

2.1 DALGA EŞİTLİKLERİ

Enine elektromanyetik dalgalar zamana göre değişen elektromanyetik alanlardır. Maxwell eşitliğine (Bateman 1995) göre elektromanyetik dalgalar, ışığın yayılımına göre tanımlanır. Boşlukta yayılan ışığın dalga eşitliği (Bateman 1995, Wilson and Hawkes 2000);

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (2.3)$$

olarak verilir.

Bu ifadede ∇^2 terimi Laplas operatörünü ifade etmektedir (Cooley et al 1969).

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.4)$$

(x,y,z) Kartezyen uzaysal koordinatları ifade etmektedir. t , zamanı gösterirken, c dalğanın yayılım hızını vermektedir. c_0 ise ışığın boşluktaki yayılma hızıdır.

$$c_0 = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \quad (2.5)$$

Enine dalgalar, dik açıyla yayılırlar ve vektör notasyonlarıyla gösterilirler. Dalgaların dikey, yatay ve herhangi bir yönde yayılması dalğanın kutuplaşma (polarizasyon) etkisini göstermektedir. Düzlemsel kutuplanmış tek bir dalga ele alındığında, z yönünde yayılmış kutuplanmış düzlem dalğanın skaler eşitliği (Cooley et al 1969);

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (2.6)$$

olarak verilir. Bu denklemden yola çıkılarak;

$$E(z,t) = f(z - ct) \quad (2.7)$$

ya da

$$E(z,t) = g(z + ct) \quad (2.8)$$

ifadelerine ulaşılabilir ve dalga alanının yayılım boyunca devam ettiği görülür. Lineer olarak tipik bir dalga eşitliği (Cooley et al 1969);

$$E(z,t) = af(z - ct) + bg(z + ct) \quad (2.9)$$

şeklinde yazılabilir.

Gerçek notasyonlarda harmonik bir dalganın eşitliği ise (Bateman 1995, Wilson and Hawkes 2000);

$$E(z,t) = E_0 \cos(kz - wt) \quad (2.10)$$

olarak verilmektedir. Bu ifadede E_0 dalganın gerçek genliğini gösterirken, $(kz - wt)$ terimi dalganın fazını vermektedir. k ; dalga sayısını, λ ise dalga boyunu vermektedir. $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right)$

Şayet $x=0$ noktasında ve $t=0$ anında maksimum genlik yoksa faz(ϕ) olarak verilir.

$$E(z,t) = \cos(kz - wt + \phi) \quad (2.11)$$

Euler formülüne göre (Nahin 2006);

$$e^{i\alpha} = \cos \alpha + i \sin \alpha \quad (2.12)$$

olarak verilir. $i = \sqrt{-1}$ imajiner birimdir. Bu denklem kullanılarak;

$$\cos \alpha = \frac{1}{2}(e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}) \quad (2.13)$$

yazılabilir.

Harmonik dalga tekrar yazılacak olursa;

$$E(z,t) = \frac{1}{2}E_0 e^{i(kz - \omega t + \phi)} + \frac{1}{2}E_0 e^{-i(kz - \omega t + \phi)} \quad (2.14)$$

Eşitliğin sağ tarafındaki ikinci terim, birinci terimin eşleniğidir ve ihmal edilebilir. Bu durumda harmonik dalga;

$$E(z,t) = \frac{1}{2}E_0 e^{i(kz - \omega t + \phi)} \quad (2.15)$$

olarak verilmektedir.

Bir dalganın uzaysal dağılımdaki dalga cephesi iki şekilde tanımlanır. Birincisi düzlem dalgadır. Diğeri ise küresel dalga olarak ifade edilir (Kreis 2005).

2.1.1 Düzlem Dalga Eşitliği

Bir düzlem dalga, verilen t zamanında yayılım yönüne dik yayılan tüm yüzeylerinde sabit faza sahiptir. Bir dalganın uzaysal dağılımını tanımlayabilmek için $t=0$ alınır ve $k.r$ =sabittir. Üç boyutlu yüzeylerdeki düzlem dalga vektörü $k = k_x, k_y, k_z$ ve uzaysal vektör $r = (x, y, z)$ 'dir. $t=0$ anında düzlem dalga;

$$E(r) = E_0 e^{i(kr + \phi)} \quad (2.16)$$

olarak tanımlanır (Kreis 2005).

2.1.2 Küresel Dalga Eşitliği

Dalga cephesi ifadelerinden bir diğeri küresel dalgalardır. Küresel dalgalarda yüzeyin her noktasında faz sabittir ve önemi Huygens prensibinden gelmektedir (Born and Wolf 1999). Dalga cephesinde yayılan her bir nokta küresel olarak yayılır. Matematiksel olarak ifade edilirse polar koordinatlardaki matematiksel ifadesi (r, θ, ψ) 'dir (Cooley et al 1969).

$$x = r \sin \theta \cos \psi \quad (2.17)$$

$$y = r \sin \theta \sin \psi \quad (2.18)$$

$$z = r \cos \theta \quad (2.19)$$

Küresel simetriden dolayı, küresel dalga θ ve ψ değerlerine bağlı değildir. Bu durumda skaler dalga eşitliği;

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rE) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (2.20)$$

Bu ifadeden yola çıkarak küresel dalga yazılırsa;

$$E(r, t) = \frac{E_0}{r} e^{i(kr - \omega t + \phi)} \quad (2.21)$$

olarak verilir.

Sonuç olarak görüldüğü gibi düzlem dalga ve küresel dalga arasında $\frac{1}{r}$ değeri kadar bir fark vardır. Küresel dalgada r mesafesi önemlidir.

2.2 ŞİDDET (INTENSITY)

Şiddet birim zamanda alandaki enerji yoğunluğu olarak tanımlanır. Maxwell eşitliğine göre şiddet (Bateman 1995);

$$I = \varepsilon_0 c E^2 \quad (2.22)$$

olarak verilmektedir. Görüldüğü gibi I, E^2 ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

$$I \approx E^2 \quad (2.23)$$

Bilindiği gibi şiddet, elektrik alan kuvvetinin karesiyle orantılıdır (Bateman 1995).

$$I = E_0 E_0^* = |E_0|^2 \quad (2.24)$$

2.3 GİRİŞİM (INTERFERENCE)

Işığın dalga özelliklerinden bir diğeri de girişim olayıdır. Girişim olayı Young deneyinden yola çıkarak kısaca anlatılabilir (James and Wolf 1991). Bu deneye göre; Akkor lambadan çıkan ışık paralelleştirilerek önce dar bir yarıktan geçirilir. Daha sonra ışık, dalgaların fazını eşit yapabilmek için birbirlerinden yaklaşık 1 mm mesafede bulunan iki dar yarıktan tekrar geçirilir. Yani iki yarık, aynı faza sahip iki kaynak haline gelmiş olur. İki dalganın üst üste geldiği ekranda (perdede) girişim saçığı olarak kabul edilen karanlık ve aydınlık şeritlerin oluştuğu görülür. Fakat oluşan girişim deseni Newton'un ışık hakkındaki düşüncesiyle açıklanamaz. Çünkü siyah görünen şeritler yok edici girişime sahiptir. Bunun nedeni ise iki kaynağın ışıklarına ait yol farkı, dalga boyunun tek katları şeklinde olmasıdır. Aydınlık şeritlerde ise kuvvetlendirici girişimin olduğu kabul edilir. Nedeni de iki kaynaktan çıkan dalgaların girişiminin yarattığı yol farkı, dalga boyunun tam katları olmasıdır (URL-2 2013). İki veya daha fazla sinüsel dalganın birlikte hareketi sonucu belirli bir zaman ve noktadaki oluşturdukları toplam elektrik alan (Bateman 1995, Wilson and Hawkes 2000);

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu ifadede yer alan E_1 ve E_2 eşit frekanslı, aynı yönde ilerleyen iki dalga olarak alınmıştır.

$$E_1 = E_{01} \sin(\omega t - kx + \varphi_1) \quad (2.26)$$

$$E_2 = E_{02} \sin(\omega t - kx + \varphi_2) \quad (2.27)$$

Bölüm 2.2'de $I \approx E^2$ olarak kabul edildiği için toplam elektrik alanını, ışığın şiddeti olarak tekrar yazdığımızda (Bateman 1995);

$$I = |E_1 + E_2|^2 = (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* \quad (2.28)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (2.29)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (2.30)$$

elde edilir. Işığın girişim (interference) ifadesi denklem (2.29) ile gösterilmektedir ve $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi$ girişim terimi olup dalgalar arasındaki faz farkına bağlıdır (Bateman 1995, Wilson and Hawkes 2000).

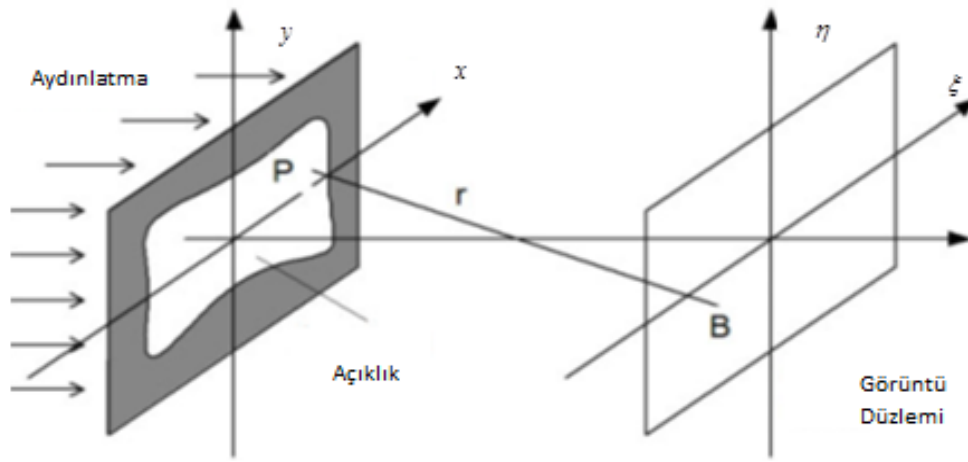
Işık kaynakları arasında bir başlangıç faz farkı varsa girişim deseni oluşturmak mümkündür. Yani girişim deseni oluşturmak için ışık kaynaklarının aynı fazda olması gerekmez (Bateman 1995). Kaynaklar arasındaki faz farkı sabit kaldığı sürece özdeş girişim deseni meydana getirmek mümkündür. Bu tür kaynaklar faz uyumlu kaynaklar olarak adlandırılır. Sabit faz ilişkisine sahip farklı kaynaklardan elde edilen dalgalar ahenkli (coherent) dalgalardır. Şayet bir alan ahenkli bir veya daha çok dalgayla aydınlatılırsa girişim deseni oluşturmak mümkündür. Fakat sabit faz ilişkisi sağlamayan farklı dalgalar tarafından bir alan aydınlatılırsa, o zaman girişim deseni elde etmek mümkün olmaz (Wilson and Hawkes 2000, Kaya 2010).

Dalga benzeri her olay, ışık ve radyo dalgaları da bir girişim deseni yaratabilir. Lazer ışını son derece saf, birbiriyle uyumlu bir ışık türü olduğu için girişim desenleri yaratma konusunda

çok başarılıdır. Sonuçta bugün bilinen hologramlar ancak lazerin buluşundan sonra oluşturulabilmiştir.

2.4 KIRINIM TEORİSİ VE FRESNEL YAKLAŞIMI

Huygens prensibine göre dikdörtgenel koordinatlarda çalışıldığında; $(\xi, \eta, z = 0)$ düzleminde yer alan kırınım aralığı belirtilmiştir ve pozitif z yönünde aydınlatılmıştır (Born and Wolf 1999).



Şekil 2.1 Fresnel yaklaşımının geometrik şekli (Kreis 2005).

Şekil 2.1'e göre (x, y) düzlemi, (ξ, η) görüntü düzlemine paralel ve z mesafesindedir. Kırınım aralığı sonlu boyuttadır. Yani sıfır değerleri sabit alanın dışındadır. Bu nedenle integral sonsuz aralıkta yazılabilir. Böylece Fresnel-Kirchhoff integrali (Klein and Furtak 1988, Schnars and Juptner 2002, 2005);

$$\begin{aligned}
 E(x, y, z) &= \frac{1}{i\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) \frac{e^{ikr}}{r} \cos(\theta) d\xi d\eta \\
 &= \frac{z}{i\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) \frac{e^{ikr}}{r^2} d\xi d\eta
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

şeklinde yazılabilir.

$\cos \theta = z/r$. Eğik mesafe olarak alınan r ;

$$r = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2} \quad (2.32)$$

olarak hesaplanır. (ξ, η) düzlemindeki kompleks alan genliği $U(\xi, \eta)$ olarak verilmiştir.

Fresnel yaklaşımında binom açılımı (Kachitvichyanukul and Schmeiser 1988) uygulandığında

$\sqrt{1+b} = 1 + \frac{1}{2}b - \frac{1}{8}b^2 + \dots$ olur ve tüm sabitler ihmal edilip, lineer terimler alındığında;

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{z^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2} \\ &= z \sqrt{1 + \left(\frac{\xi - x}{z}\right)^2 + \left(\frac{\eta - y}{z}\right)^2} \\ &\approx \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\xi - x}{z}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta - y}{z}\right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Denklem 2.33'e ulaşılabilmektedir. Denklem 2.33'ü kullanarak Fresnel-Kirchhoff integrali tekrar yazılırsa (Klein and Furtak 1988);

$$\begin{aligned} E(x, y, z) &= \frac{1}{i\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) \frac{1}{z} e^{ikz \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\xi - x}{z}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta - y}{z}\right)^2 \right]} d\xi d\eta \\ &= \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) e^{\frac{ik}{2z} [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]} d\xi d\eta \end{aligned} \quad (2.34)$$

olarak ifade edilir (Kreis 2005).

BÖLÜM 3

HOLOGRAFI

Hologram, bir cisim tarafından yayılan veya dağıtılan bir dalganın, ayrı bir referans dalgası ile üst üste gelerek oluşturdukları girişim desenlerini kaydeden bir yüzeydir (Caulfield 1979, Hariharan 1984). Hologramda bir cisimden gelen dalgaya ait toplam bilgi kaydedildiği gibi genlik ve faz değerleri de kaydedilir. İstendiğinde bu kayıt ortamından orijinal dalga yeniden elde edilebilir (Reconstruction) (Caulfield 1979, Hariharan 1984, Kreis 2005).

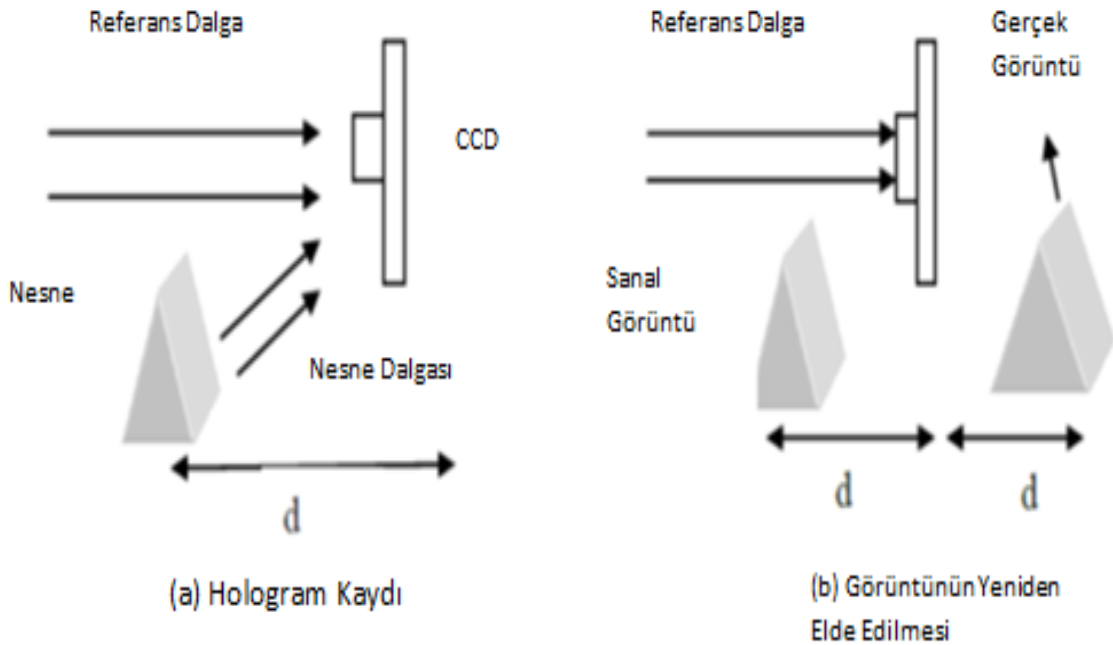
Hologram tekniğinde cismin optiksel olarak meydana getirilmiş görüntüsü değil, cisim dalgasının kendisi kaydedilir (Samui 2008). Bu kayıt uygun şekilde yeniden aydınlatıldığında orijinal cisim dalgasını tekrar meydana getirmek mümkündür. Hologram elde etmek için uygulanan yöntem ise holografi olarak adlandırılır (Caulfield 1979, Hariharan 1984).

Holografi tekniğinde, cisimlerden gelen dalgalarındaki bilgi kaydedilir ve bu bilgi kullanılmak istendiğinde içerisinde saklanan bilgi kayıpsız bir şekilde geri elde edilir. Holografi tekniğinde 3D görüntüleme yapılı ve aynı zamanda interferometrik bir teknik olarak hassas ölçüm yapılmasına da izin verir (Bayraktar ve Özcan 2008). Holografi tekniğini ilk kullanan ve bu konuda çalışmalar yapan ilk kişi Dennis Gabor'dur (Gabor 1948, Gabor 1949). Denis Gabor'un hologram adına yaptığı çalışmalarla hologramın ilerleme kaydetmesini sağlayacak matematiksel temeller atılmıştır. 1948 yılında yayınladığı ilk makalesiyle holografik kayıt esaslarını ortaya koymuştur (Gabor 1948). Denis Gabor'dan sonra 1960'da lazer kullanmayı başaran ilk isim Maiman olmuştur (Maiman 1960a, 1960b) ve hologram tekniğine yeni katkılar sağlamıştır. 1962 yılında ise Leith ve Upatnieks kayıt aşamasında kullandıkları cisim dalgasıyla birlikte, ikinci bir ışın dalgası kullanarak gerçek ve yapay görüntüleri birbirlerinden ayırmayı mümkün kılmışlardır (Leith and Upatnieks 1962, Leith and Upatnieks 1964, URL-3 2013). 1963 yılında da ilk defa lazerle hologram kaydederek 3D görüntü elde etmeyi başarmışlardır (Ecevit 2009).

Hologramı tanımlanırken kullanılmakta olan çok çeşitli hologram tipleri vardır. Ayrıca bu hologramları sınıflandırmak da mümkündür (Latta 1971, Nils 1981, Rastogi 1994, Samui 2008).

3.1 SAYISAL HOLOGRAFI

Sayısal holografi, holografi alanının diğer bir çalışma yöntemi olup, hologram kaydının yapılması ve görüntünün yeniden oluşturulması aşamalarının bilgisayar ortamında dijital olarak yapılması demektir (Frauel et al. 2006). CCD teknolojisi ve bilgisayar teknolojisindeki ilerleme, hologramdan görüntünün yeniden elde edilmesi için istenen zamanı oldukça kısaltmıştır (Kronrod et al. 1972, Qiang 2011). Sayısal holografinin amacı CCD kamera üzerinde kaydedilen görüntüyü yeniden elde etmektir. Yani amaç ilk olarak hologram kaydı yapmak ve bilgisayar hafızasında depolayıp sayısal olarak görüntüyü yeniden elde etmektir. Şekil 3.1 eksen dışı (off-axis) hologramdaki sayısal holografi kaydının şemasını göstermektedir (Schnars and Jueptner 2005, Qiang 2011).

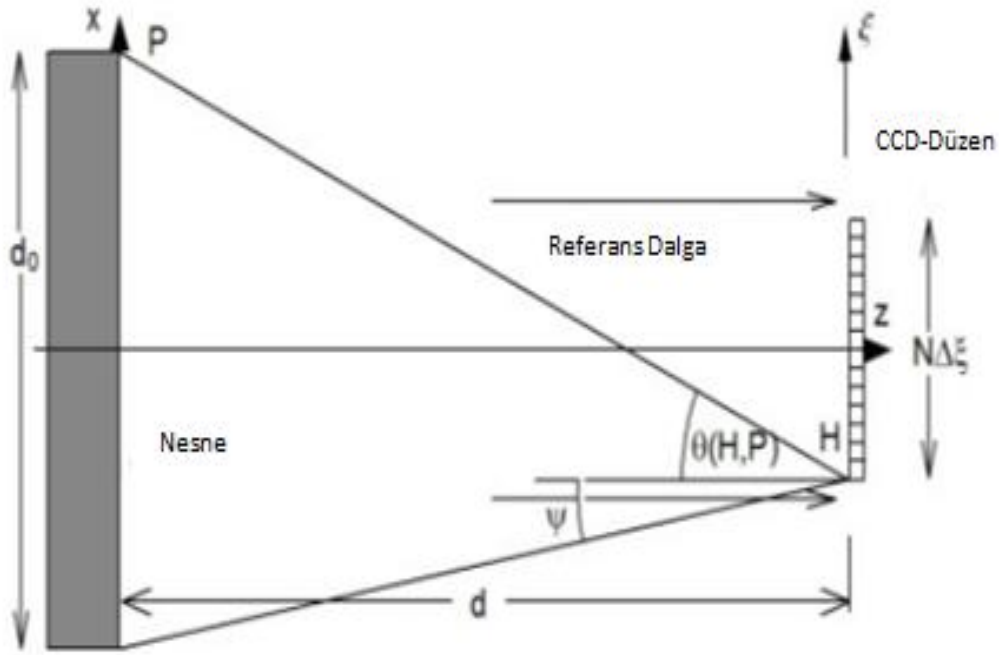


Şekil 3.1 Sayısal holografi kayıt ve görüntünün yeniden elde edilme şeması (Schnars and Jueptner 2005, Qiang 2011).

Bölüm 3.1.1'de sayısal holografi konfigürasyonlarından bahsedilmiştir. İlk olarak sayısal Fresnel hologram kayıt düzeneği, ardından sayısal Fourier dönüşüm hologramının kayıt düzeneği anlatılmıştır. Sayısal holografi için önemli parametreler belirtilmiştir.

3.1.1 Sayısal Fresnel Hologram Düzenegi

Sayısal Fresnel hologram kaydının tipik geometrik düzenegi şekil 3.1’ de gösterilmiştir (Kreis 2005). Fresnel holografisinde nesne hologram düzlemine belirli bir mesafe uzaklığında yerleştirilir. Referans dalgası ise düzlem dalga olarak tercih edilmektedir. Geri elde edilen görüntü kullanılan nesnenin ve aynanın hologramla olan pozisyonlarına göre oluşmaktadır. Bu düzenekte hologram için kullanılan büyütme faktörü önemlidir. Kullanılan mercek ile görüntü büyütülebilir ya da küçültülebilir (Kim 2010).



Şekil 3.2 Sayısal Fresnel hologramın geometrik düzenegi (Kreis 2005).

Düzeneye göre; sırasıyla, x ve y düzlemlerindeki piksel noktaları arasında $\Delta\xi$ ve $\Delta\eta$ kadar mesafe bulunan NxM piksel sayısına sahip CCD kamera kullanılmıştır. Hologram kaydında çeşitli kamera türleri kullanılabilir. CCD (Charge-Coupled Device) kamera ve CMOS (Complementary metal oxide semiconductor) sayısal sensörler bu tür kameralara örnek olarak verilebilir (Verrier and Atlan 2011). Girişim özelliği daha iyi olduğundan dolayı çalışmada CCD kamera kullanılmıştır. Özel durumlar hariç genellikle $N=M$ ve $\Delta\xi = \Delta\eta$ alınmaktadır. Sırasıyla alınan x ve y yönleri ξ ve η yönleriyle aynı ve eşittir. Bu nedenle x-z düzleminde analiz yapmak yeterlidir. Kayıt esnasında referans dalga olarak düzlem dalga seçilmiştir (Kreis 2005). Referans ve görüntünün üst üste gelmemesi için, referans dalga ve cisimden gelen dalga belirli bir açı ile yerleştirilmiştir (Kim 2010). Şekilde gösterilen θ açısı,

objenin bulunduğu P noktasından gönderilen nesne dalgası ve referans dalgasının gönderildiği H noktası arasındaki açıdır. H noktasında oluşan girişim deseninin ardışık iki ızgara çizgisi arasındaki p mesafesi (Ferraro et al. 2004, Kim 2010);

$$p = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3.1)$$

olarak verilmektedir ve örnekleme teoremine göre p, iki piksel noktası arasındaki mesafeden daha büyük olmalıdır.

$$p > 2\Delta\xi. \quad (3.2)$$

Pratikte CCD kamera parametrelerinin $N, M, \Delta\xi, \Delta\xi$ değerleri verilmektedir. Bu nedenle θ açısı kolaylıkla hesaplanabilir. θ açısı $\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\theta}{2}$ olarak alınabilir. Böylece ilk iki denklemden maksimum açıyı hesaplanabilir (Ferraro et al. 2004, Kim 2010).

$$\theta < \frac{\lambda}{2\Delta\xi} \quad (3.3)$$

Buradan açının nesnenin küçük yatay boyutlarıyla ya da objenin CCD kamera mesafesine olan uzaklığıyla bağlantılı olarak hesaplandığı görülmektedir. Şekilde gösterilen tipik geometrik düzene göre; optik eksene simetrik olarak yerleştirilen x düzlemindeki d_0 yanal uzunluğa sahip nesne ve optik eksene dik olarak gelen düzlem referans dalgasının hologram düzlemine olan d uzaklığı (Ferraro et al. 2004, Kim 2010);

$$\tan\theta = \frac{\frac{d_0}{2} + \frac{N\Delta\xi}{2}}{d} \quad (3.4)$$

formülünden elde edilebilir.

Maximum açıyla birlikte denklem yeniden düzenlenirse;

$$\frac{d_0 + \frac{N\Delta\xi}{2}}{d} < \frac{\lambda}{2\Delta\xi} \quad (3.5)$$

ve d_0 yanal uzunluğa bağlı olarak;

$$d_0(d) < \frac{\lambda d}{\Delta\xi} - N\Delta\xi \quad (3.6)$$

Diğer bir ifadeyle;

$$d(d_0) > \frac{(d_0 + N\Delta\xi)\Delta\xi}{\lambda} \quad (3.7)$$

gösterilir. Kısaca nesnenin CCD kameraya uzaklığını hesaplamak için mesafe;

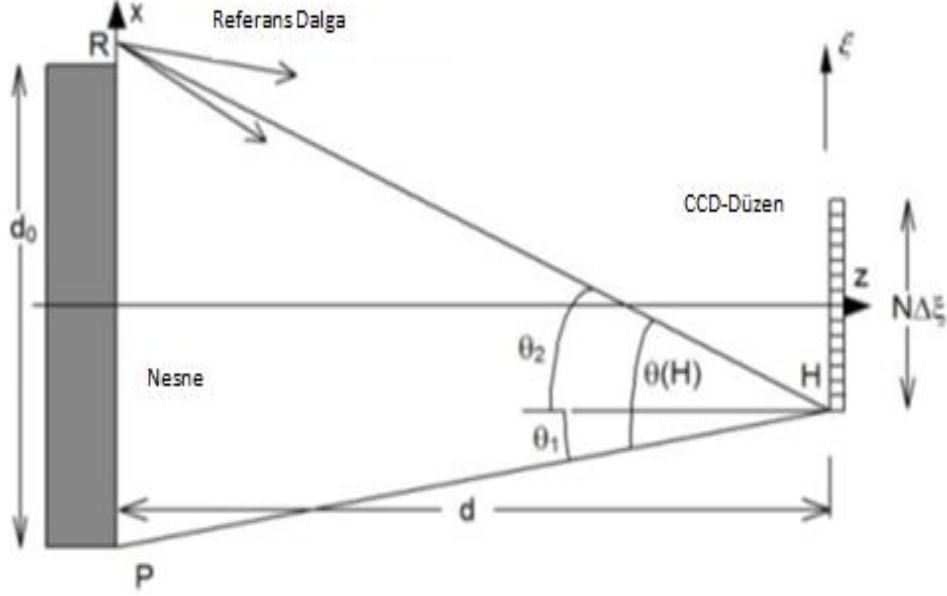
$$d > d_0 \frac{\Delta\xi}{\lambda} \quad (3.8)$$

formülüyle hesaplanır.

Görülüyor ki obje ve referans dalga arasındaki açının ve hologram düzlemine olan uzaklığın hesaplanmasında piksel sayısının önemi büyüktür (Kreis 2005, Frauel et al. 2006).

3.1.2 Sayısal Fourier Dönüşüm Hologram Düzenegi

Sayısal merceksiz Fourier hologramının kayıt düzenegi şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Sayısal merceksiz Fourier hologramın geometrik kayıt düzeneği (Kreis 2005).

Fresnel hologram kaydında anlatıldığı gibi bu düzende de, x ve y düzlemlerindeki piksel noktaları arasında $\Delta\xi$ ve $\Delta\eta$ kadar mesafe vardır ve $N \times M$ piksel sayısına sahip CCD kamera kullanılmakla birlikte $N=M$ ve $\Delta\xi = \Delta\eta$ alınmaktadır (Verrier and Atlan 2011). Sırasıyla alınan x ve y yönleri ξ ve η yönleriyle aynı ve eşittir. Bu x - z düzleminde analiz yapılmıştır.

Bu düzende obje dalgası P noktasından, referans dalgası R noktasından hologram üzerinde bulunan H noktasına doğru gelmektedir. Ve girişim desenini burada oluşturmaktadırlar. H noktası ve dalgaların geldiği noktalar arasındaki açılar şu şekilde ifade edebiliriz (Kreis 2005, Wagner et al. 1999);

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (3.9)$$

$$\theta_1 = \tan \theta_1 = \frac{\frac{d_0}{2} + \frac{N\Delta\xi}{2}}{d} \quad (3.10)$$

$$\theta_2 = \tan \theta_2 = \frac{\frac{d_0}{2} - \frac{N\Delta\xi}{2}}{d} \quad (3.11)$$

Sonuç olarak;

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = \frac{d_0}{d} \quad (3.12)$$

yazılabilir.

Örnekleme teoremine göre;

$$\frac{d_0}{d} < \frac{\lambda}{2\Delta\xi} \quad (3.13)$$

$$d(d_0) > \frac{2d_0\Delta\xi}{\lambda} \quad \text{ya da} \quad (3.14)$$

$$d_0(d) < \frac{d\lambda}{2\Delta\xi} \quad (3.15)$$

olarak ifade edilebilir (Kreis 2005).

Bu düzenekte CDD kamera ve nesne arasındaki minimum mesafe, düzlem referans dalga da hesaba katılarak yapılabilir. Şayet $d < N\Delta\xi$ ise; $2d_0\Delta\xi/\lambda$ ifadesindeki değer $(d_0\Delta\xi + N\Delta\xi^2)/\lambda$ değerinden daha az olmaktadır. Bunu anlamı nesnenin boyutu CCD kameranın piksel boyutlarından daha az olmalıdır. Bu da Lensless Fourier holografisinin temelini oluşturmaktadır (Wagner et al 1999, Kreis 2005).

Kısaca objenin boyutu ne kadar büyük olursa, kameranın görüntüyü alabilmesi için obje ve referans dalganın kameraya olan uzaklığı o kadar büyük olmalıdır.

3.2 HOLOGRAM TÜRLERİ

Hologram türleri arasında yaygın olarak yansıma ve iletim hologramları, ince ve kalın hologramlar ve genlik ve faz hologramları kullanılmaktadır (Latta 1971, Nils 1981, Rastogi 1994, Samui 2008).

3.2.1 Yansıma ve İletim Hologramları

Yansıma hologramı, hologram tipleri arasında yaygın bir kullanıma sahip olup, üç boyutlu görüntü yüzeyi çok yakındır. Ayrıca derinlik bilgisine ve hem yatay hem de dikey eksenlerde iz düşüme sahiptirler. Müthiş bir keskinlik ve yüksek kontrastadırlar. Bu hologramlarda fotokimyasal teknikler vasıtasıyla inanılmaz renkler elde edilebilir. Hologram, belirli bir açı ve mesafeyle beyaz ışık tarafından aydınlatılmaktadır ve aydınlatan bu ışık gözlemci tarafına yerleştirilir (Denisyuk 1962). Böylece, görüntü hologram tarafından yansıtılan ışıkla oluşturulur (Samui 2008). Son zamanlarda, bu hologramlarda gerçek görüntüsünden ayırt edilemeyen orijinal görüntüye çok yakın görüntüler oluşturulmuştur.

Tipik bir iletim hologramında ise hologramı kaydetmek için lazer ışık kaynağı kullanılır. Bu ışık hologram arkasından yönlendirilir ve görüntü gözlemcinin tarafına iletilir (Samui 2008). İletim hologramları genellikle filme kaydedilirler. Sonuçta ortaya çıkan holografik dünya maksimum derinlik ve iz düşüme sahip olur. Ancak bu holografik görüntü sadece yatay düzlemedir. Bu hologramlar dikey düzlemde yukarı aşağı hareket ettirildiklerinde gökkuşağına benzer renkler yayarlar. Bundan dolayı iletim hologramlarına sıklıkla gökkuşağı hologramları denir. Gökkuşağı hologramları çok güzel ve ilgi çekici kayma etkisi, üst üste binen renkler ve akıcı bir hareket görüntüsü içerebilirler (Wyant 1977, Goodman 2005).

3.2.2 İnce ve Kalın Hologramlar

Hologram kaydı yapılırken 3 boyutlu görüntüdeki derinliğin önemi Denisyuk tarafından vurgulanmıştır (Denisyuk 1962). Şayet hologramda optik kalınlık dalga boyundan daha az ise, kırınım yapının ince olduğu düşünülebilir. Buna rağmen pratikte, kalınlık hologramın karakteristik etkilerinden biri olan dalga boyuyla ilişkili değildir. Ama kalınlık ve hologramda kaydedilen kırınımın süresi birbirleriyle ilişkilidir. Şayet en iyi kırınımı kaydetme süresi kalınlıktan daha geniş ise hologram 2 boyutlu kırınım yapısı olarak davranır. Şayet değilse 3 boyutlu kırınım yapısı olarak davranır. Pratikte, hologram çok farklı saçak yapılarını içerir. Bazıları çok iyi, bazıları ise çok kötüdür. Bu nedenle hologram ince ve kalın olarak ayrılabilir (Goodman 1971).

3.2.3 Faz ve Genlik Hologramları

Holografi çalışmalarında genellikle hologramın genlik kaydından yola çıkılarak çalışmalar yapılır ve faz hologramı çok fazla ele alınmaz (Toal 2003). Fakat elektrik alan ifadesinde hem faz hem de genlik bilgisi mevcuttur. Holografının temel düşüncesi şiddet farklılığına neden olan faz bilgisin kodlamaktır. Genlik hologramında, faz bilgisi iletim esnasında kaydedilir. Faz hologramında ise faz bilgisi tüm dizilerde kaydedilmektedir. Faz hologramında genlik geçirgenliğinin değeri 1 alınır böylece hologram ifadesi kısaca;

$$U(x, y) = e^{-i\phi(x,y)} \quad (3.16)$$

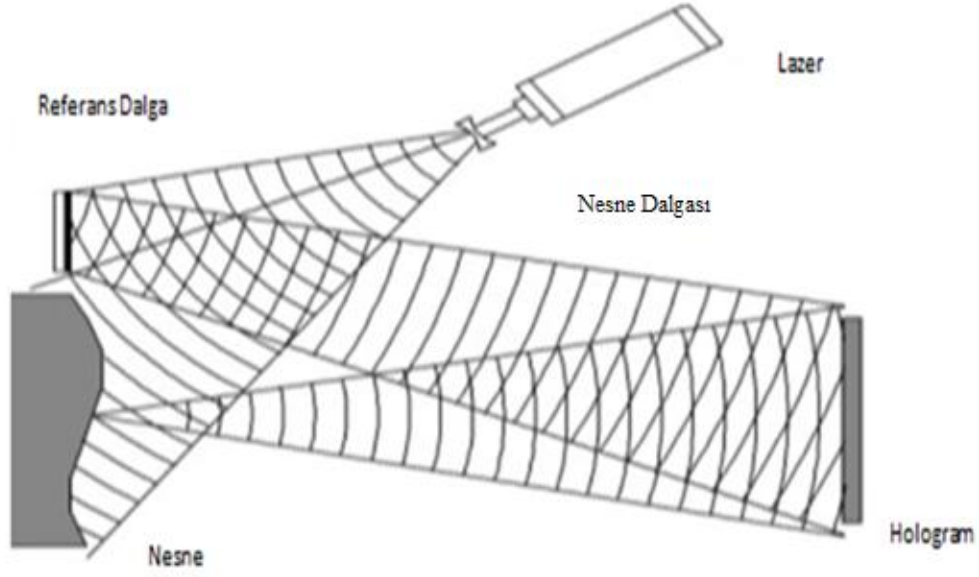
olarak kabul edilir (URL-4 2013, Goodman 1971).

3.3 HOLOGRAMIN TEMEL AŞAMALARI

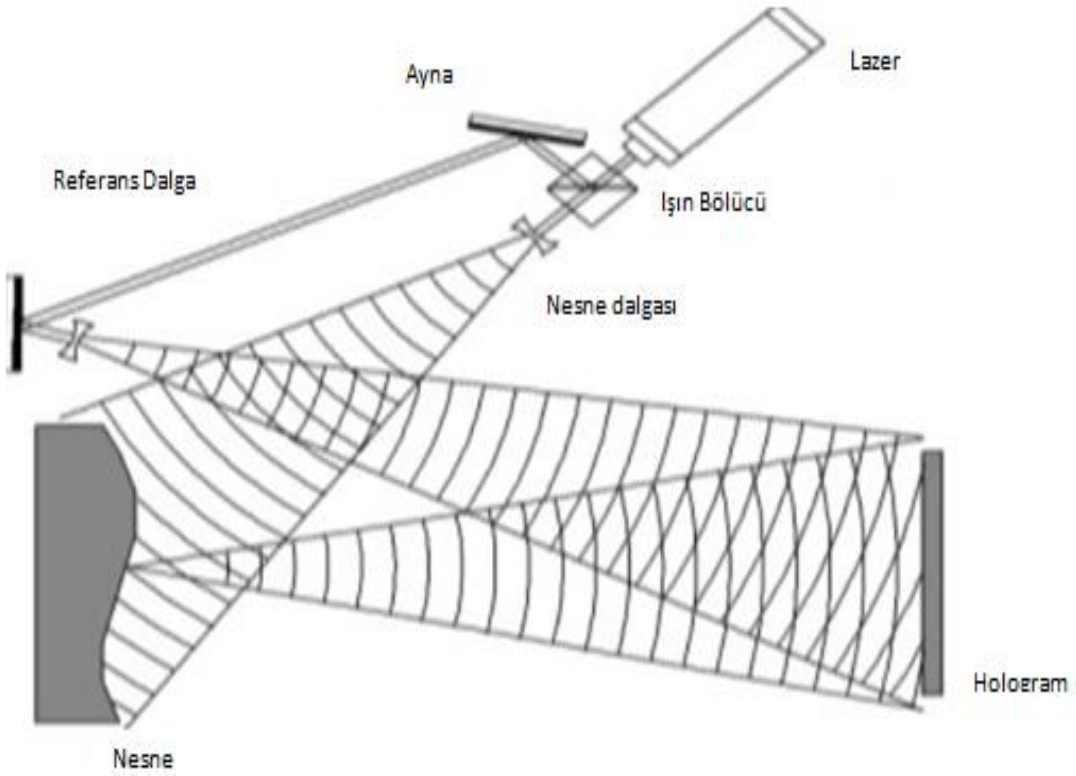
3.3.1 Hologram Kaydetme

Hologramın bilgisayara kaydedilmesi görüntüleme tekniklerindeki gürültünün azaltılmasını sağlamaktadır. Böylelikle kaydedilen nesnenin yeniden elde edilmiş hali daha düzgün olmaktadır (Matoba et al. 2002a, 2002b). Optik dalga alanları hem genlik dağılımını hem de faz dağılımını içermektedirken tüm kayıt malzemeleri sadece fotografik film gibi şiddeti kaydetmektedir. Kayıt aşamasında faz bilgisi kaybolmaktadır. Bu çalışmada aynı frekans bilgisine sahip iki dalganın, şiddet dağılımı sonucundaki faz farkları incelenmiştir. Faz bilgisinin kaydedildiği bu girişim deseni holografide kullanılmaktadır. Burada dalga alanı karşılıklı olarak tutarlı olmalıdır (Kreis 2005).

Denis Gabor, temel hologram kayıt düzeneğini vermiştir (Kreis 2005, Gabor 1948, 1949). (Şekil 3.4). Bu düzende iki dalga alanı tarafından kaydedilen girişim deseni aydınlatılır. Diğeriyse görüntüyü yeniden geri elde işlemi yapılabilir. Bu geri elde edilen dalga alanı sadece genlik ve faz dağılımını içermez, aynı zamanda şiddeti de içerir. Aşağıdaki şekil şematik olarak iki temel holografik kurulumu göstermektedir. Şekil 3.4 ve şekil 3.5 nesnenin yüzeyine yansıtılan dalga alanının kaydedilmesini göstermektedir (Kreis 2005).



Şekil 3.4 Temel hologram kurulumu, Dalga cephesi bölünmesi (Kreis 2005).



Şekil 3.5 Temel hologram kurulumu, genlik bölünmesi (Kreis 2005).

Bu alan nesne alanı ya da nesne dalgası olarak adlandırılır. Diğer alan girişimi oluşturmak için gereklidir ve referans dalgası ya da referans alanı olarak adlandırılır. Her iki dalgadaki eş uyum, aynı kaynaktaki eş uyumlu ışıktan gelmektedir. Bölünme referans ve nesne arasında olmaktadır. Şekil 3.4 dalga cephesi bölünmesini, şekil 3.5 ise genlik bölünmesini

göstermektedir. Dalga nesne yüzeyindeki 0 noktasına küresel olarak yansıtıldığında ki buna cisim dalgası denilir ve denklem 3.17' de verilmektedir.

$$E_C(x, y) = A_C(x, y)e^{i\theta_C(x, y)} \quad (3.17)$$

Denklem 3.17'de verilen $A_C(x, y)$ ve $\theta_C(x, y)$ sırası ile cisme ait genlik ve faz bilgisini ifade etmektedir (Kreis 2005).

$$E_R(x, y) = A_R(x, y)e^{i\theta_R(x, y)} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18'de verilen $A_R(x, y)$ ve $\theta_R(x, y)$ sırası ile referans dalgasına ait genlik ve faz bilgisini ifade etmektedir (Kreis 2005).

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |E_C(x, y) + E_R(x, y)|^2 \\ &= A_C^2 + A_R^2 + A_C A_R \exp(i\theta_C) \exp(i\theta_R) + A_C A_R \exp(i\theta_C) \exp(-i\theta_R) \\ &= A_C^2 + A_R^2 + 2A_C A_R \cos(kz + (\theta_R - \theta_C)) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Burada k terimi dalga sayısını ifade etmektedir ve $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ olarak verilmektedir. z ise cisim ve referans dalgasının bulunduğu düzlemin, hologram kaydı yapılan yüzeye olan uzaklığını ifade etmektedir.

Bu çalışmada genliği 1 olan bir hologram yani faz hologramı yaratılmak istendiği için denklemin 1. ve 2. ifadesi yok sayılarak ve 3. ifadenin başındaki terim 1 kabul edilmiştir.

Hologram kaydı yapılırken iki farklı metot kullanılmaktadır. Birinci metotta hologram kaydı özel kimyasal maddelerle kaplanmış olan küçük plakaların üzerine yapılmaktadır. Hologramı üretebilmek için, kaydı yapılacak cisim, lazer sisteminin bulunduğu masaya yerleştirilerek cismin önüne bir cam plaka koyulmaktadır ve fotoğraf çekiminde olduğu gibi bir film kullanılarak, bu film cam plakaya yapıştırılmaktadır. Ardından bir başka cam ile bu film iki cam arasına sabitlenmektedir. Cismi aydınlatacak olan lazer ışını ikiye ayrılarak birinci kolu cismi aydınlattıktan sonra sekerek nesnenin önüne yerleştirilmiş cam plakaya vurmaktadır.

Işının ikinci kolu ise referans ışın olarak adlandırılmaktadır ve ayna ve mercekler yardımıyla kayıt plakasının aydınlatılması için yönlendirilmektedir. Lazere maruz kalan cisim pozlanma süresini tamamladığında, görüntü kaydı plakaya yapılmış olmaktadır. Kayıt yapıldıktan sonra holografik film, siyah beyaz fotoğraflama tekniğindeki gibi çeşitli solüsyonlarla banyo edilmektedir. Banyo işlemi bittikten sonra holografik film kurutulmaktadır. Tüm bu işlemler lazer görüntülü master hologramı (ıslak hologram) olarak adlandırılmaktadır. Son olarak kaydın yapıldığı aynı açıdan yeni bir lazer ışını gönderildiği zaman, kaydedilen cismin görüntüsü yeniden ve üç boyutlu olarak görülebilmektedir. Bu üç boyutlu görüntünün her tarafı nettir. Ne yönden bakılırsa bakılsın görüntüyü görmek mümkündür. Ana ışın kaynağından gelen ışınla aydınlatıldığı (pozlandırıldığı) sürece de görülmeye devam etmektedir (URL-6 2013, URL-7 2013, URL-8 2013).

Hologram kaydı yapılırken ikinci metot olarak sayısal holografi tekniği kullanılmaktadır. Bu yöntemde 3D nesnelerin kayıt işlemi bir CCD kamera üstüne yapıldığı gibi, hologramlar matematiksel olarak bilgisayarda da üretilebilmektedir (Computer Generated Holograms) (Schnars and Jüptner 2002, Ripol et al. 2004, Aboakasis and Rosen 2006).

Lazer ışınının ikiye ayrılarak aydınlattığı, cisim ve referans dalgalarından gelen ışınların üst üste gelmesiyle bir girişim deseni meydana gelmektedir. Bu girişim deseninin holografik kaydı da CCD kamera üzerine yapılmaktadır. CCD üzerine kaydı yapılan ya da bilgisayarda sayısal olarak üretilen hologram, doğrudan doğruya sayısal olarak işlenebilmektedir. Sayısal olarak hologramı çekilen 3D nesnenin görüntüsü aynı anda bir ara yüz vasıtası ile bilgisayara aktarılmakta ve yine sayısal olarak çeşitli algoritmalarla görüntü geri elde edilebilmektedir. Ayrıca optiksel olarak kaydı yapılan hologram doğrudan faz ve genlik modüleli SLM'ye (uzaysal ışık modülatörüne) gönderilerek üç boyutlu nesnenin görüntüsü tekrar elde edilebilmektedir (Kreis 2005, Sutkowski and Kujawinska 2000, Huadond et al. 2009, Önal Tayyar et al. 2011).

Gerçek zamanlı bir hologram kayıt ve işleme sistemine sayısal holografi tekniği ile ulaşılmaktadır. Çünkü ıslak (master) hologram kaydında görüntünün kaydedilmesinden, tekrar elde edilmesine kadar fotoğraflama tekniğinde olduğu gibi çok çeşitli işlem yapılmaktadır. Hologram kaydı yapılan cisim direkt olarak elde edilememektedir. Yapılan işlemlerin çokluğu ve fazla zaman harcanması nedeniyle gerçek zamanlı hologram kayıt ve işleme sistemine ulaşamamaktadır. Oysa sayısal holografi tekniği ile elde edilen

hologramdan görüntü elde edilmesinde, üretilen hologramın bilgisayara aktarılması ile görüntü hemen elde edilebilmektedir.

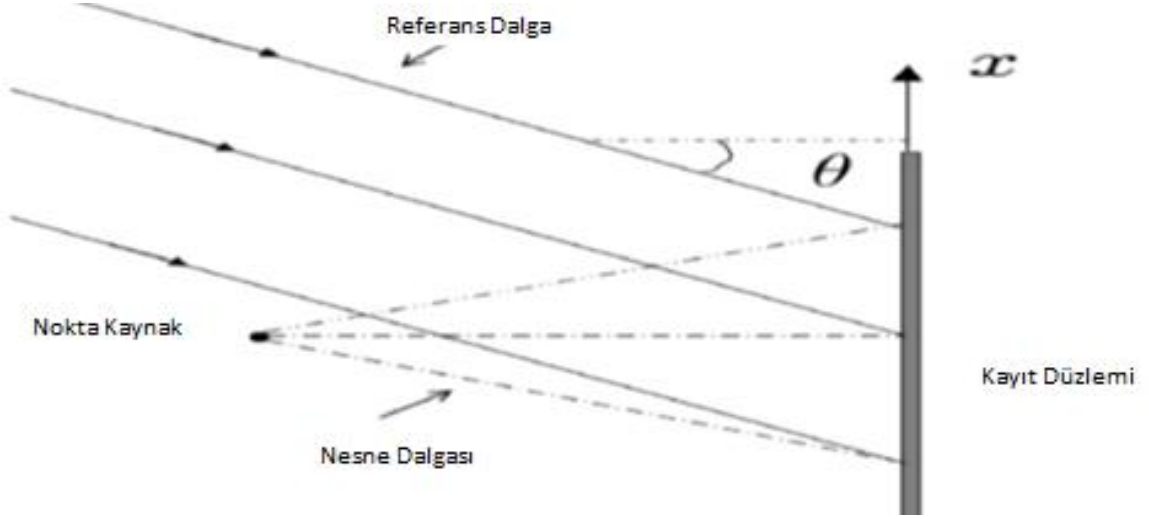
3.3.1.1 Eksen Üstü ve Eksen Dışı Kayıt Düzenekleri

Gabor tarafından gerçekleştirilen eksen üstü (on-axis) holografi düzeneğinde yarı saydam bir ortam kullanılmıştır (Gabor 1948, Gabor 1949). Cisim ve referans dalgaları bu ortamdan geçerek fotografik yüzey üzerinde belirli bir girişim şekli meydana getirmektedir. Fotografik yüzey paralelleştirilmiş bir monokromatik ışın demetiyle aydınlatıldığında optik eksen üzerinde gerçek ve sanal görüntülerin meydana geldiği görülmüştür (Hariharan 2004). Bu teknik nesnenin 3D görüntüsünü kaydederken kullanılmasına rağmen, görüntüyü yeniden elde ederken oluşan sanal görüntü yüzünden sıkıntı çıkartmaktadır (Poon 2007). Yani gerçek görüntü görüş yönü boyunca elde edildiği için, aydınlatan ışın demetinin yarı saydam ortamda kırınımına maruz kalmayan parçası, görüntüleri gölgelemiştir ve görüntüler birbirleri üzerinde çakışmıştır (URL-5 2013). Her iki görüntü de aynı eksen üzerinde bulunduğundan bu olay holografide ikiz görüntü problemi olarak karşımıza çıkmaktadır (Poon 2007).

Leith ve Upatnieks 1962 de yayınladıkları bir makalede Gabor'un holografisinde meydana gelen bu problemi çözeceklerini belirtmiştir (Leith and Upatnieks 1962, Leith and Upatnieks 1963, Leith and Upatnieks 1964). Leith ve Upatnieks yaptıkları çalışmada çok yüksek uyumluluğa sahip yüksek şiddetli lazer ışını kullanmışlardır (Leith and Upatnieks 1965) ve çalışmalarını iletişim teorisindeki esaslara dayandırmışlardır. Bu teoriye göre; İşarete ait toplam bilgiyi içeren cisimden yansıyan dalga taşıyıcı bir frekansla iletilebilmektedir. Taşıyıcı frekans ise aynı eksende olmayan referans dalgası olarak kabul edilmektedir. Böylece hologram tekrar aydınlatıldığında yeniden meydana gelen iki dalga modülasyon yan bantlarını oluşturmaktadır ve fiziksel olarak birbirlerinden ayrılabilir. Bu teknikle referans dalgasından gelen ışının büyük bir kısmını geçirmeyen cisimlerin görüntüleri kaydedilebilmiştir (URL-5 2013).

Gabor hologramında birinci dereceden daha büyük görüntülerin oluşma nedeni kayıt düzleminin lineer olmamasıdır (Gabor 1948, Gabor 1949). Bu nedenle oluşan görüntüler birinci derece görüntü ile aynı eksen üzerinde çakışmıştır ve görüntünün kalitesi bozulmuştur.

Leith ve Upatnieks tarafından kullanılan eksen-dışı (off-axis) kayıt düzeneğinde ise kullanılan ışın bölücü sayesinde referans dalganın kayıt düzlemi üzerine açıyla gelmesi sağlanmış ve böylece üst dereceli görüntüler açıyla geldiğinden esas görüntünün kalitesi bozulmamıştır (Leith and Upatnieks 1962, Leith and Upatnieks 1963, Leith and Upatnieks 1964).

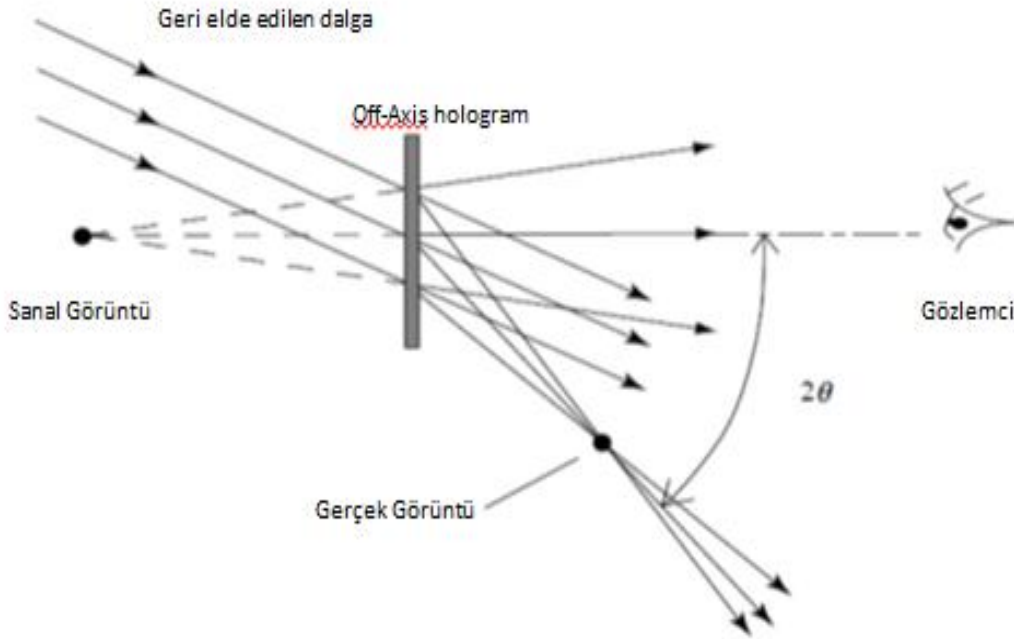


Şekil 3.6 Eksen dışı (Off-axis) hologram kayıt düzeneği (Poon 2007).

Sekil 3.6’da gösterilen eksen dışı (off-axis) hologram düzeneğinde referans dalgası x-ekseni ile θ açısı yapmaktadır (Poon 2007).

3.3.2 Hologramı Yeniden Yapılandırma

Görüntünün yeniden elde edilmesi işleminde, hologram bir ışın tarafından aydınlatılır. Bu ışın, hologramı elde ederken kullanılan referans ışını ile aynıdır. Hologram bir kırınım desenidir. Referans ışın, hologram düzlemine geçişi sırasında kırınıma maruz kalmaktadır. Hologramdan gerçek görüntüyü geri elde ederken aynı zamanda sanal görüntüsü de elde edilmektedir. Gözlemci tarafından görülen görüntü sanaldır fakat gerçek görüntüsünden ayırt edilemeyecek şekildedir. Tekrar elde edilen görüntü cismin tüm derinliğini ortaya koymaktadır. Şekil 3.7’de Eksen dışı (off-axis) hologramdan görüntünün yeniden elde edildiği düzenek görülmektedir (Poon 2007).



Şekil 3.7 Eksen dışı (off-axis) hologramdan görüntünün yeniden elde edildiği düzenek (Poon 2007).

Sayısal hologramın matematiksel olarak temel görüntünün yeniden elde edilmesi (reconstruction) ifadesi (Klein and Furtak 1988, Schnars and Juptner 2002, 2005);

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \frac{\exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} r\right)}{r} x \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta \right) dx dy \quad (3.20)$$

olarak verilmektedir.

$$r = \sqrt{z^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2} \quad (3.21)$$

$h(x, y)$, kayıt düzlemindeki genlik geçirgenliğidir ve $I(x, y)$ ile orantılıdır.

$$h(x, y) = h_0 + \beta I(x, y) \quad (3.22)$$

Şeklinde ifade edilir. β , sabit bir değerken, τ pozlama süresidir ve h_0 ise pozlanmamış yüzeydeki genlik geçirgenliğidir. $h(x, y)$ genellikle hologram fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır. $R(x, y)$ ifadesi referans dalgayı tanımlamaktadır.

Denklem 3.20'den de anlaşılacağı gibi görüntünün yeniden elde edilmesi (reconstruction) işlemini gerçekleştirebilmek için hologram ifadesini referans dalgasıyla çarpmak gerekmektedir. Yani hologramı referans dalgasıyla aydınlatmak gerekir. Denklem 3.21 Taylor serisine göre tekrar yazıldığında (Taylor and Brandt 1972);

$$r = d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - y)^2}{2d} - \frac{1}{8} \frac{[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]^2}{d^3} + \dots$$

$$\approx d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - y)^2}{2d} \quad (3.23)$$

Denklem 3.20, denklem 3.23 kullanılarak tekrar yazıldığında;

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) h(x, y) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} ((\xi - x)^2 + (\eta - y)^2)\right] dx dy \quad (3.24)$$

Fresnel Kirchhoff integraline ulaşılır. Bu ifade sayısal hologramın temel geri dönüşüm ifadesidir (Schnars and Juptner 2002, 2005).

Hologramdan çıkan kırınım demetlerinden birisi, hologramdan görüntü tekrar geri elde edildiğinde belirgin bir objeden farklılaşmış görünür. Bundan dolayı, sanal görüntü nesnenin orijinal tarafında hologramın arkasında oluşturulur ve gerçek görüntü hologramın önünde oluşturulur. Böylece gözlemci sanal görüntüden uzaklaşan ışık dalgaları görür ve oluşan görüntü nesne ile aynıdır. Eğer gözlemci sanal görüntünün etrafında hareket ederse, önceden fark edilmeyen objenin diğer tarafı gözlenecektir. Bu nedenle, sanal resim bütün gerçek üç boyutlu özellikleri sergiler. Gerçek görüntü fotografik plaka üzerinde kaydedilebilir.

BÖLÜM 4

SAYISAL OLARAK DİJİTAL HOLOGRAM KAYDI YAPILMASI VE KULLANILAN GERİ DÖNÜŞÜM ALGORİTMALARI

3D nesnelerin hologramları matematiksel olarak bilgisayarda üretilebilir ve tekrar görüntüsü geri elde edilebilir (Computer Generated Hologram (CGH)). CGH yöntemlerine örnek olarak Gerchberg–Saxton yöntemi, Fresnel ve Fourier algoritmaları ya da CCD kamera üzerinde yapılan kayıt yöntemi verilebilir (Ripoll et al. 2004, Abookasis and Rosen 2006, Schnars and Jüptner 2002). Bilgisayarda üretilen hologramlardan faz hologramı doğrudan doğruya sayısal olarak çeşitli yöntemlerle işlenebilmektedir. Optiksel olarak ise bu faz hologramı faz modüleli SLM'ye (uzaysal ışık modülatörüne) gönderilerek hologramı hesaplanılan üç boyutlu nesnenin görüntüsü elde edilebilir (Kreis 2005, Sutkowski and Kujawinska, 2000, Huadong et al. 2009). Tezin bu bölümünde ilk olarak referans dalgası nokta kaynak alınarak tek bir hologram oluşturulmuştur.

Bölüm 3.3.1'de verilen denklem 3.19 temel alınarak Fourier dönüşüm algoritması (Papoulis 1962, Bracewell 1965, Gray and Goodman 1995) ile referans dalga ve cisimden yansıyan dalgalar, girişimi yani hologramı (denklem 4.1) yaratacaktır (Kreis 2005, Önal Tayyar et al. 2011).

$$I(x, y) = |E_C(x, y) + E_R(x, y)|^2 = |A_C(x, y)|^2 + |A_R(x, y)|^2 + 2|A_C(x, y)||A_R(x, y)|\cos(kz + \varphi(x, y)) \quad (4.1)$$

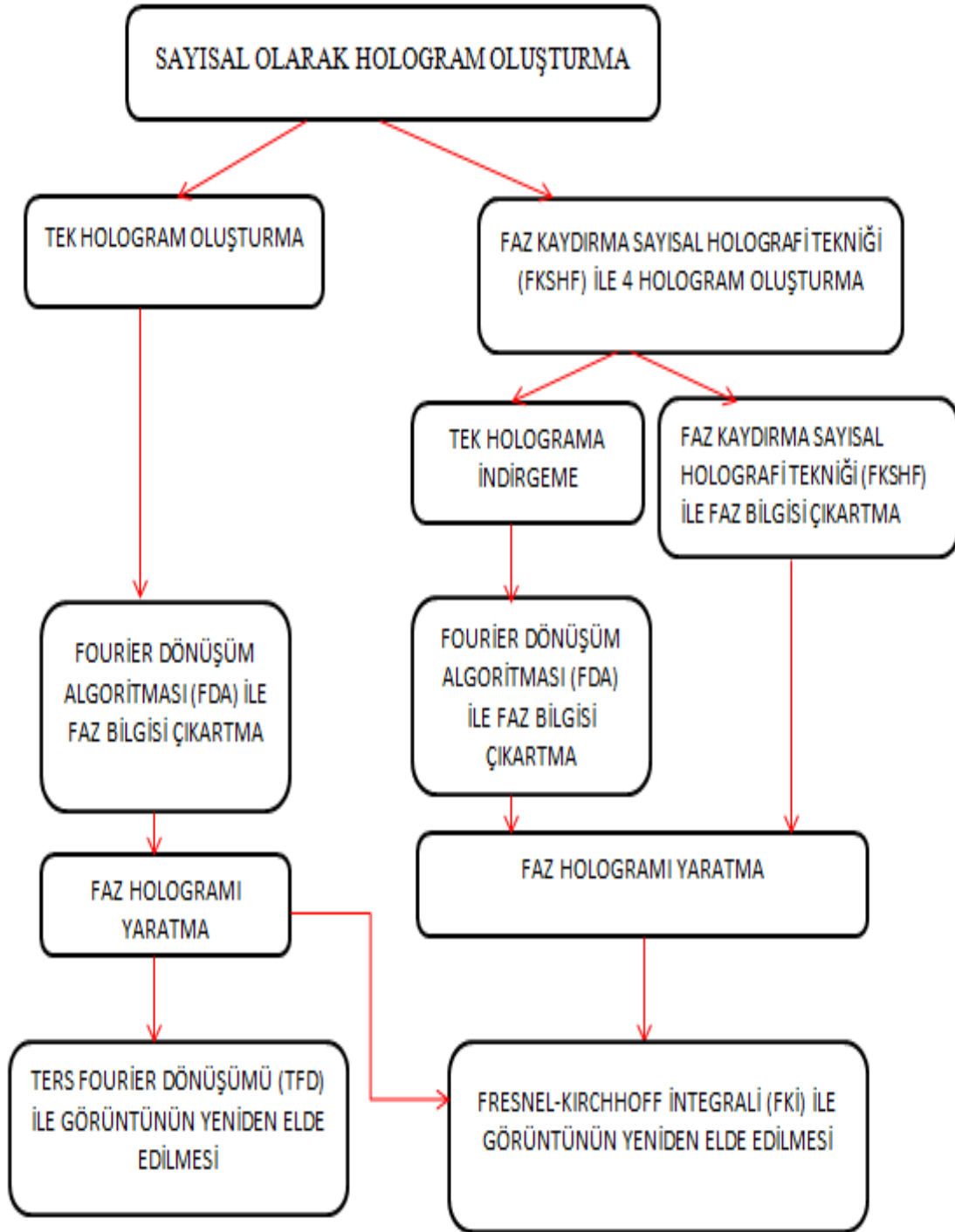
Bu denklemde $E_C(x, y)$ cisimden gelen dalganın elektriksel alanı ve $E_R(x, y)$ referans dalganın elektriksel alanıdır. (x, y) hologram düzleminin koordinatlarıdır. A_C, A_R sırası ile referans ve cisim elektriksel alanların genlikleridir. $\varphi(x, y) = \theta_C - \theta_R$; yani referans dalga ve cisim dalgasının fazları arasındaki farktır (Goodman 1968).

Bu bölümün ilk aşamasında Fourier dönüşüm algoritması (FDA) ile faz bilgisi bulunan sayısal tek hologramdan ters Fourier dönüşümü (TFD) ile görüntü yeniden elde edilmiştir. Sayısal olarak üretilen hologramın faz bilgisi bulunurken Fourier dönüşüm algoritması (FDA) kullanılmıştır. FDA ilk defa 1982 yılında Takeda tarafından optik profilometri için kullanılmıştır (Takeda and Mutoh1983). Bu çalışmada ise sayısal hologramın faz bilgisini bulmak için kullanılması önerilmiştir. Bulunan faz bilgisi ile tek bir faz hologramı yaratılmış ve bu hologram alanından ters Fourier dönüşümü (TFD) ile görüntü yeniden elde edilmiştir (Bölüm 4.1).

Çalışmanın ikinci aşamasında (Bölüm 4.2) daha önce Yamaguchi ve Zhang tarafından kullanılan faz kaydırma sayısal holografî tekniği (FKSHT) ile referans dalgasının fazları değiştirilerek dört farklı hologram oluşturulmuştur ve bu dört hologramdan kompleks genlikli tek bir hologram ifadesi çıkartılmıştır (Yamaguchi and Zhang 1997, Matoba et al. 2002). Hologramın faz bilgisi ise çalışmada kullanılması önerilen Fourier dönüşüm algoritması (FDA) ile elde edilmiştir. Bulunan faz bilgisi ile tek bir faz hologramı yaratılmıştır ve bu hologram alanından Fresnel-Kirchhoff integrali (FKİ) ile görüntü yeniden elde edilmiştir (Matoba et al. 2002a, 2002b).

Çalışmanın üçüncü aşamasında (Bölüm 4.3) ise faz kaydırma sayısal holografî tekniği (FKSHT) ile elde edilen hologramın faz bilgisi ikinci aşamada kullanılan FDA yönteminden farklı olarak FKSHT ile bulunmuştur. Faz hologramı yaratılarak bu hologram alanından Fresnel-Kirchhoff integrali (FKİ) ile görüntü yeniden elde edilmiştir.

Üç boyutlu cisimlerin sayısal olarak bilgisayar ortamında hologramlarının oluşturulmasından, görüntülerinin tekrar geri elde edilmesine kadar geçen algoritmaların akış diyagramı Şekil 4.1 deki şemada verilmektedir.



Şekil 4.1 Sayısal olarak oluşturulan hologram kaydı ve görüntünün yeniden elde edilme akış diyagramı.

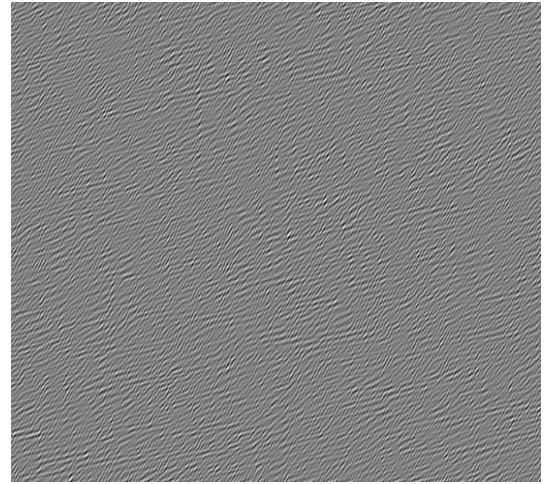
4.1 FDA İLE FAZ BİLGİSİ BULUNAN SAYISAL TEK HOLOGRAMDAN TFD İLE GÖRÜNTÜNÜN YENİDEN ELDE EDİLMESİ

Elektron mikroskobunu geliştirmek amacıyla yola çıkan Gabor, holografi konusundaki çalışmalarını 18. yüzyılda yaşamış olan Fransız bilim adamı Jean B.J. Fourier'in matematiksel hesaplama yöntemine dayandırmıştır (Gabor 1948, Gabor 1949, Goodman 2005). Fourier'in buluşu, her türlü (basit ya da karmaşık) yapıyı, kendi dalga boylarına indirgemek temeline dayanmaktadır. Ürettiği matematiksel formülleri sayesinde, cisimleri dalga boyu modellerine çevirmek, sonra da yine asıl şekillerine dönüştürmek mümkün olmaktadır (Gray and Goodman 1995). Fourier dönüşümleri Gabor'a, herhangi bir cismin görüntüsünü, karmaşık bir frekanslar demeti olarak hologram plakasının üzerine yansıtma imkânını sağlamıştır. Bu frekans kaydından oluşan görüntüyü, tekrar aynı cismin bilinen görüntüsüne dönüştürecek formüller de yine Fourier eşitliklerinde yer almaktadır (Gray and Goodman 1995, URL-6 2013).

Sayısal olarak görüntüyü tekrar geri elde etmek için B.E.Ü harfleri kullanılarak (Şekil 4.2a) oluşturulan hologram kullanılmıştır (Şekil 4.2b).



(a) Bilgisayar ortamında oluşturulan test objesi



(b) Test objenin hologram deseni

Şekil 4.2 Bilgisayar ortamında oluşturulan B.E.Ü harflerinin sayısal olarak oluşturulmuş hologram deseni.

Görüntüyü geri elde etmek için ilk olarak şekil 4.2b' de gösterilen hologramın faz bilgisi çıkartılmıştır. İlk defa Takeda (1983) tarafından optik profilometri için kullanılan ve bu çalışmada hologramın faz bilgisini çıkartmak için kullanılması önerilen FDA ile hologramın faz bilgisi elde edilmiştir (Takeda and Mutoh1983, Hariharan 2004).

Sayısal hologram üretmek için

$$I(x, y) = |A_C(x, y)|^2 + |A_R(x, y)|^2 + 2|A_C(x, y)||A_R(x, y)|\cos(kz + \varphi(x, y)) \quad (4.2)$$

denklemini kullanılmıştır.

$$I(x, y) = g(x, y) \quad (4.3)$$

olarak kabul edilip, faz ve genlik bilgisini içeren parametreler kısaca gösterilirse;

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \quad (4.4)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Burada $c(x, y)$ hologramın faz bilgisi, $a(x, y)$ ise genlik bilgisidir.

$$c(x, y) = 2|A_C(x, y)||A_R(x, y)|\cos(\varphi(x, y)) \quad (4.5)$$

$$a(x, y) = |A_C(x, y)|^2 + |A_R(x, y)|^2 \quad (4.6)$$

Fourier dönüşümüne dayalı algoritma ile optik profilometri için girişim deseni analizi yapan Takeda (1982), istenen faz bilgisini bulmak için öncelikle denklem 4.4'deki eşitliğin Fourier dönüşümünü almıştır (Takeda and Mutoh1983, Takeda et al. 1996).

$$G(k_x, y) = \mathfrak{F}\{g(x, y)\} \quad (4.7)$$

Fourier tekniği kullanılarak hologramın satır satır Fourier dönüşümü alınmıştır. Denklem 4.7 faz ve genlik bilgisini gösterecek şekilde tekrar yazıldığında;

$$G(k_x, y) = A(k_x) + C(k_x - k_0, y) + C^*(k_x - k_0, y) \quad (4.8)$$

ifadesine ulaşılmaktadır.

Burada $A(k_x)$ hologramın arka plan yoğunluğudur ve genliği ifade etmektedir. $C(k_x - k_0, y)$ ve $C^*(k_x - k_0, y)$ ifadeleri ise bozulma olan desen spektrumudur ve faz bilgisini içermektedir. Sırasıyla fazın reel ve sanal kısımlarını ifade etmektedirler.

Fazın toplandığı maksimum frekans noktasının bulunması için filtreleme işlemi yapılmıştır. Filtreleme işlemi yapabilmek için DC bileşen dizinin ilk elemanı olacağından hem genlikte hem de fazda sıfırlanmış ve genlik ve faz dizisinin yarısından sonrası imajiner bölge olacağı için filtrelenmiştir. Genlik dizisinin maksimum olduğu yerin soldan ve sağdan belli değerleri bulunarak DC bileşen haricinde geri kalan yerler sıfırlanmıştır. Böylece genlik dizisi filtrelenmesi gerçekleştirilmiştir. Son olarak satır satır ters Fourier dönüşümü (IFFT) alınarak hologramın fazı çıkartılmıştır (Denklem 4.9) (Takeda and Mutoh 1983).

$$c(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}\{G(k_x, y)\} \quad (4.9)$$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{c(x, y)\}}{\text{Re}\{c(x, y)\}} = \varphi(x, y) \quad (4.10)$$

Şekil 4.2b'de verilen hologramın, ilk defa Takeda (1982) tarafından kullanılan Fourier dönüşüm algoritması ile elde edilen faz bilgisinden genliği bir olan bir faz hologramı sayısal olarak denklem 4.12 kullanılarak yaratılmıştır (Önal Tayyar et al. 2011).

$$p(x, y) = \exp(i\phi(x, y)) \quad (4.11)$$

Denklem 4.11 kullanılarak yaratılan faz hologramından yola çıkılarak, görüntüyü yeniden elde etme işlemi denklem 4.12 kullanılarak gerçekleştirilmiştir

$$\Gamma_p(\xi, \eta) = \mathfrak{F}^{-1}\{p(x, y)\} \quad (4.12)$$

Sayısal olarak üretilen tek hologramın kendisi ($I(x, y) = g(x, y)$) faz bilgisi olarak kabul edilip denklem 4.11 de yerine konulduğunda;

$$p_1(x, y) = \exp(I(x, y)) \quad (4.13)$$

ifadesine ulaşılır. Denklem 4.13 kullanılarak görüntü yeniden elde edilmek istendiğinde;

$$\Gamma_{p_1}(\xi, \eta) = \mathfrak{F}^{-1}\{p_1(x, y)\} \quad (4.14)$$

ifadesi kullanılmaktadır.

Burada (ξ, η) düzlemi görüntü düzleminin koordinatlarıdır. Çıkarılan faz hologramının ters Fourier dönüşümü alınarak (denklem 4.12) sayısal hologramı elde edilen 3B cismin görüntüsü elde edilmiştir. Şekil 4.3'de FDA ile fazı bulunan hologramdan geri elde edilen cismin görüntüsü ve hologramın kendisi faz bilgisi kabul edilip oluşturulan faz hologramından geri elde edilen cismin görüntüsü verilmiştir.



(a) Faz bilgisi FDA ile bulunan hologramdan geri elde edilen görüntü



(b) Hologramın kendisi faz olarak kabul edilip alınan görüntü

Şekil 4.3 Tek bir hologramdan faz bilgisi (a) FDA ile bulunan (b)Hologramın kendisi (şekil 4.2.b) faz kabul edilerek bulunan, TFD ile geri elde edilmiş görüntüler.

Şekil 4.3'te de görüldüğü gibi tek hologramın faz bilgisi ve hologramın kendisi (Şekil 4.2b) faz olarak kabul edilip kullanılarak, TFD ile elde edilen görüntüde çift B.E.Ü çıkmaktadır.

4.2 FDA İLE FAZ BİLGİSİ BULUNAN SAYISAL TEK HOLOGRAMDAN FKİ İLE GÖRÜNTÜNÜN YENİDEN ELDE EDİLMESİ

Sayısal olarak görüntüyü tekrar geri elde etmek için uygulanan diğer bir metot, daha önce Matoba ve arkadaşları tarafından kullanılmış olan Fresnel-Kirchhoff integrali (FKİ) ile görüntüyü geri elde etme işlemidir (Klein and Furtak 1988, Schnars and Juptner 2002, Matoba et al. 2002). Görüntüyü geri elde işleminde daha önce uygulanmış olan Fresnel – Kirchhoff integrali bu çalışmada karşılaştırma yapabilmek için kullanılmıştır. Sayısal olarak oluşturulan hologramın Fourier dönüşüm algoritması ile bulunan faz bilgisi (denklem 4.11) Fresnel Kirchhoff integralinde yerine koyulduğunda, Fresnel-Kirchhoff integrali ile görüntünün tekrar elde edilmesi mümkün olmaktadır (Matoba et al. 2002).

$$P(\xi, \eta) = -\frac{1}{i\lambda} \iint \exp[i\varphi(x, y)] \frac{1}{z} \exp(-ikz) \exp\left\{-\frac{ik}{2z} [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]\right\} dx dy \quad (4.15)$$

Sayısal olarak oluşturulan tek faz hologramının kendisi faz bilgisi olarak kabul edilip (Denklem 4.13) Fresnel-Kirchhoff integralinde yerine koyulduğunda da görüntü tekrar geri elde edilebilmektedir.

$$R(\xi, \eta) = -\frac{1}{i\lambda} \iint p_1(x, y) \frac{1}{z} \exp(-ikz) \exp\left\{-\frac{ik}{2z} [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]\right\} dx dy \quad (4.16)$$

Kullanılan B.E.Ü hologramından (Şekil 4.2b) Fresnel-Kirchhoff integrali ile elde edilen görüntüsü şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 FDA ile faz bilgisi bulunan tek hologramdan FKİ ile geri elde edilen cismin görüntüsü.

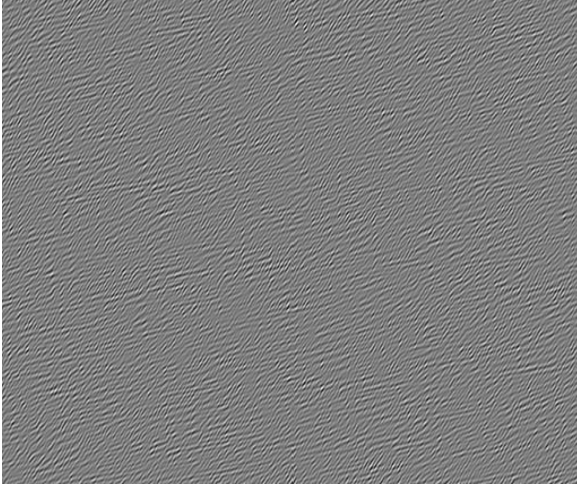
4.3 FKSHT İLE OLUŞTURULAN 4 HOLOGRAMIN FDA İLE BULUNAN FAZ BİLGİSİNDEN FKİ İLE GÖRÜNTÜNÜN YENİDEN ELDE EDİLMESİ

Eksen üstü holografide holografik görüntüyü oluşturan tüm pikseller kullanılır ama sıfır derece ve ikiz görüntü terimleri, görüntü üzerinde çakıştırılır (Gabor 1949). Bu terimleri yok etmenin en etkili methodu, Yamaguchi ve Zhang tarafından geliştirilmiştir (Yamaguchi and Zhang 1997, Zhang and Yamaguchi 1998). Geliştirilen hologramın kompleks alanı faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile elde edilmiştir (NDM) (Kim 2010).

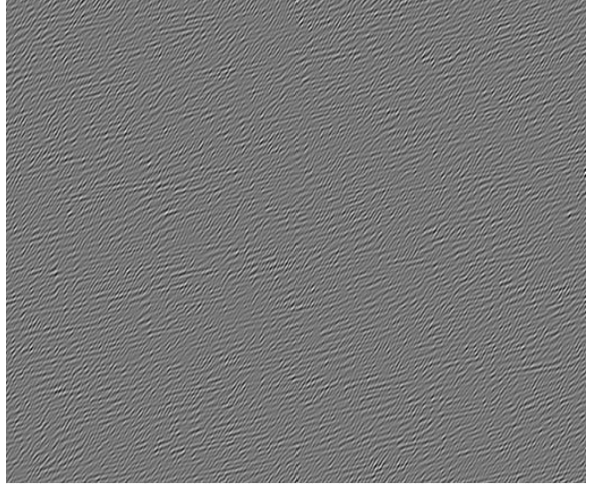
Faz kaydırma sayısal holografi tekniğinde (FKSHT) faz 4 adım kaydırılır. Denklem 4.1 de verilen hologram denkleminde yola çıkılarak referans dalgasının fazı sırasıyla; $\varphi = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ kadar kaydırılarak 4 farklı hologram elde edilir (denklem 4.16) (Kim 2010, Iwasa et al. 2012, Lai et al. 1999, Kreis 2005).

$$\begin{aligned} I_0 &= A_R^2 + A_C^2 + 2A_R A_C \cos \varphi \\ I_{\pi/2} &= A_R^2 + A_C^2 - 2A_R A_C \sin \varphi \\ I_{\pi} &= A_R^2 + A_C^2 - 2A_R A_C \cos \varphi \\ I_{3\pi/2} &= A_R^2 + A_C^2 + 2A_R A_C \sin \varphi \end{aligned} \quad (4.17)$$

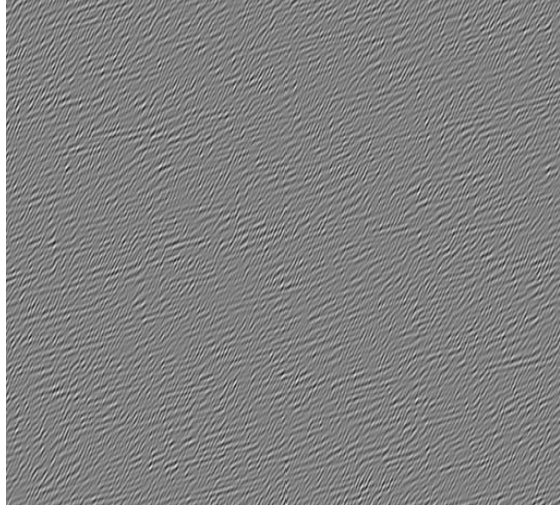
Sayısal olarak faz kaydırma tekniği ile referans dalgasının fazının değiştirilmesiyle elde edilen 4 farklı hologramın görüntüleri şekil 4.5'te verilmiştir.



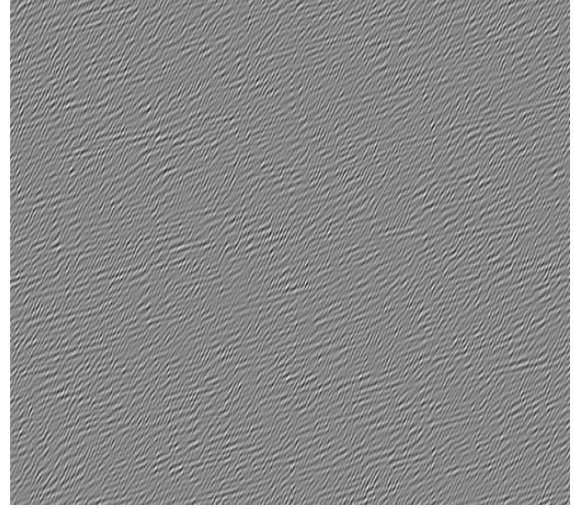
(a) Referans fazı $\varphi = 0$ alınarak oluşturulan hologram



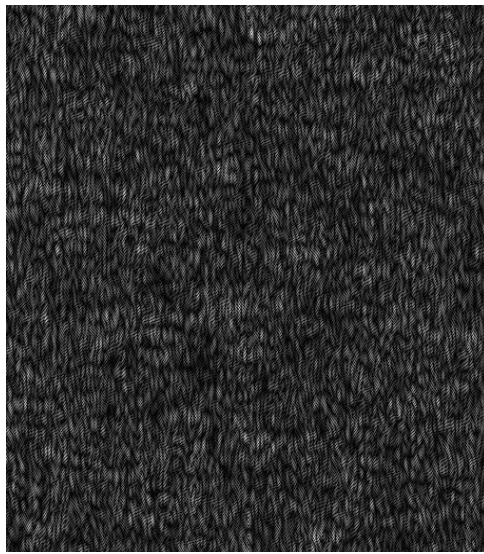
(b) Referans fazı $\pi/2$ kaydırılarak oluşturulan hologram



(c) Referans fazı π kaydırılarak oluşturulan hologram



(d) Referans fazı $3\pi/2$ kaydırılarak oluşturulan hologram



(e) 4 hologramdan oluşturulan kompleks alan

Şekil 4.5 Faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile oluşturulan hologram.

Faz kaydırma sayısal holografi tekniği kullanılarak oluşturulan hologramlardan tek bir genlik bilgisini gösteren denklem ifadesi denklem 4.18 'de verilmektedir (Kim 2010).

$$g_1(x, y) = \left[\{I(0) - I(\pi)\} + \{I(\pi/2) + I(3\pi/2)\} \right] / 4E_r \quad (4.18)$$

$g_1(x, y; 0)$ ifadesi tamamı ile hologram düzlemindeki cismin optik alanını ifade eder (Kim 2010, Iwasa et al. 2012). Holograma herhangi bir z mesafesinde bulunan $g_1(x, y; z)$ optik alanı, kırınım teorisi ile hesaplanabilir. Bu işlem de, sıfır derece terimi ve sanal görüntünün ortadan kaldırılmasıyla yapılır (Leith and Upatnieks 1962).

Verilen hologram ifadesinin tek faz bilgisi bölüm 4.1 de anlatılan FDA yöntemi ile çıkartılmıştır ve elde edilen faz hologramından görüntünün yeniden elde edilmesi daha önce Matoba ve arkadaşları tarafından kullanılmış olan Fresnel Kirchhoff integrali (FKİ) ile gerçekleştirilmiştir (Klein and Furtak 1988, Schnars and Juptner 2002, Matoba et al. 2002).

Bölüm 4.1'de verilen denklem 4.11 deki ifade, Fresnel-Kirchhoff integralinde yerine yazılırsa;

$$P(\xi, \eta) = -\frac{1}{i\lambda} \iint \exp[i\varphi(x, y)] \frac{1}{z} \exp(-ikz) \exp\left\{-\frac{ik}{2z} [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]\right\} dx dy \quad (4.19)$$

denkleminde ulaşılabilir (Klein and Furtak 1988, Schnars and Juptner 2002, Matoba et al. 2002, Yamaguchi et al. 2006).

Faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile bulunan kompleks alanlı hologram ifadesi faz bilgisi olarak kabul edilip Fresnel-Kirchhoff integralinde yerine koyulduğunda ise;

$$R(\xi, \eta) = -\frac{1}{i\lambda} \iint g_1(x, y) \frac{1}{z} \exp(-ikz) \exp\left\{-\frac{ik}{2z} [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]\right\} dx dy \quad (4.20)$$

denkleminde ulaşılabilir. Bu yöntem ilk defa Matoba ve arkadaşları tarafından kullanılmıştır ve bu çalışmada karşılaştırılma yapılması açısından tekrar gerçekleştirilmiştir (Matoba et al. 2002a, 2002b).



Şekil 4.6 FKSHT ile oluşturulan 4 hologramın FDA ile bulunan faz bilgisinden FKİ ile geri elde edilen cismin görüntüsü.

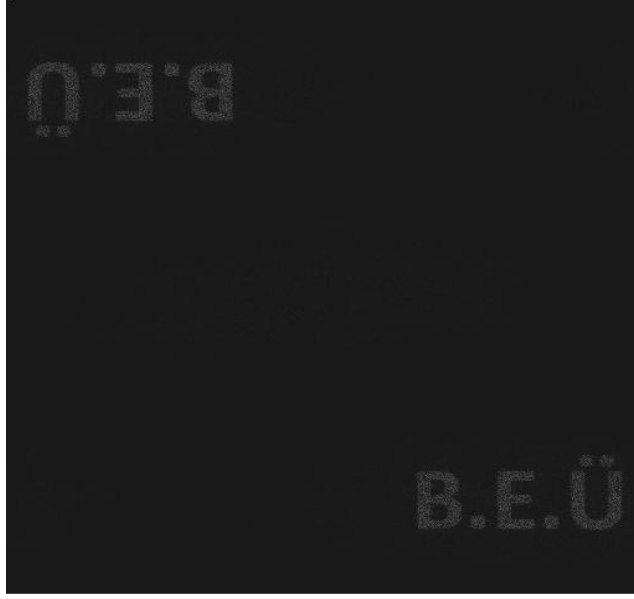
Şekil 4.6 da faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile oluşturulan 4 farklı hologramın (denklem 4.17), Fourier dönüşüm algoritması ile bulunan faz bilgisinden Fresnel-Kirchhoff integrali ile geri elde edilen görüntüsü verilmiştir (denklem 4.19).

4.4 FKSHT İLE OLUŞTURULAN 4 HOLOGRAMIN FKSHT İLE BULUNAN FAZ BİLGİSİNDEN FKİ İLE GÖRÜNTÜNÜN YENİDEN ELDE EDİLMESİ

Çalışmanın bu kısmında daha önce Matoba ve arkadaşları tarafından kullanılan faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile elde edilen 4 hologramın yine faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile bulunan faz bilgisi kullanılarak görüntü elde edilmiştir (Matoba et al 2002, Kreis 2005). Faz kaydırma sayısal holografi tekniğine göre, referans dalgasının fazı, 0° den başlamak üzere her seferinde 90° kaydırılarak 4 farklı hologram elde edilmesi denklem 4.17 de verilmiştir. Elde edilen bu hologramlardan yola çıkarak faz kaydırma sayısal holografi tekniğine göre hologramın tek faz bilgisi (Wizinowich 1990, Kreis 2005);

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{I_{3\pi/2} - I_{\pi/2}}{I_0 - I\pi} \quad (4.21)$$

denklem 4.21 ile ifade edilmektedir.



Şekil 4.7 FKSHT ile oluşturulan 4 hologramın FKSHT ile bulunan faz bilgisinden FKİ ile geri elde edilen cismin görüntüsü.

Şekil 4.7’de faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile oluşturulan 4 farklı hologramın (denklem 4.17), faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile bulunan faz bilgisinden Fresnel-Kirchhoff integrali ile geri elde edilen görüntüsü verilmiştir (denklem 4.19).

Elde edilen sonuçta çift B.E.Ü çıktığı gözlemlenmiştir.

Sayısal olarak bilgisayar ortamında üretilen hologramın faz bilgilerinden yola çıkılarak cisimlerin görüntüleri farklı metotlarla geri elde edilmiştir. Bu görüntülerin kalitesini karşılaştırabilmek için parlaklıkları sayısal olarak hesaplanmıştır ve karşılaştırma bu değerlere göre yapılmıştır. Genlik ve faz bilgilerinden elde edilen görüntülerin parlaklıklarını karşılaştırabilmek için aralarındaki hata payını hesaplamak gerekmektedir. Bunun için hologramın kendisi faz kabul edilerek veya hologramdan elde edilen faz bilgileri kullanılarak daha önce Matoba ve arkadaşları tarafından kullanılan yöntemle standartlaştırılmış ortalama karekök değerleri (Normalized Root Mean Square (NRMS)) bulunmuştur (Matoba et al. 2002).

$$NRMS = \frac{\sqrt{\iint \left(|R(\xi, \eta)|^2 - |P(\xi, \eta)|^2 \right)^2 dx dy}}{\sqrt{\iint \left(|R(\xi, \eta)|^2 \right)^2 dx dy}} \quad (4.22)$$

Çizelge 4.1’de görüntünün geri elde edilmesinde kullanılan yöntemler ve bu yöntemler ile bulunan görüntülerle hesaplanan NRMS değerleri verilmektedir.

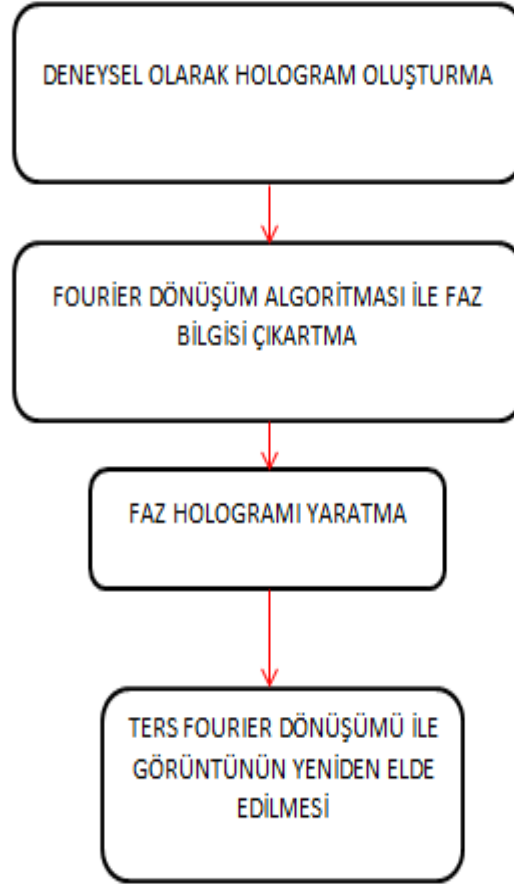
Çizelge 4.1 Sayısal ortamda oluşturulan hologramların geri elde edilmiş görüntülerinin NRMS değerleri.

Tek Hologram	4 Hologram
Faz Elde Etme Yöntemi	Faz Elde Etme Yöntemi
Fourier Dönüşüm Algoritması	Faz Kaydırmalı Sayısal Holografı
Görüntüyü Geri Elde Etme Yöntemi	Görüntüyü Geri Elde Etme Yöntemi
Fresnel-Kirchhooff İntegrali	Fresnel-Kirchhooff İntegrali
0.97	0.92

BÖLÜM 5

DENEYSEL OLARAK CİSİMLERİN HOLOGRAM KAYDININ YAPILMASI VE FOURIER DÖNÜŞÜMÜ İLE SAYISAL FAZ HOLOGRAMININ ELDE EDİLMESİ

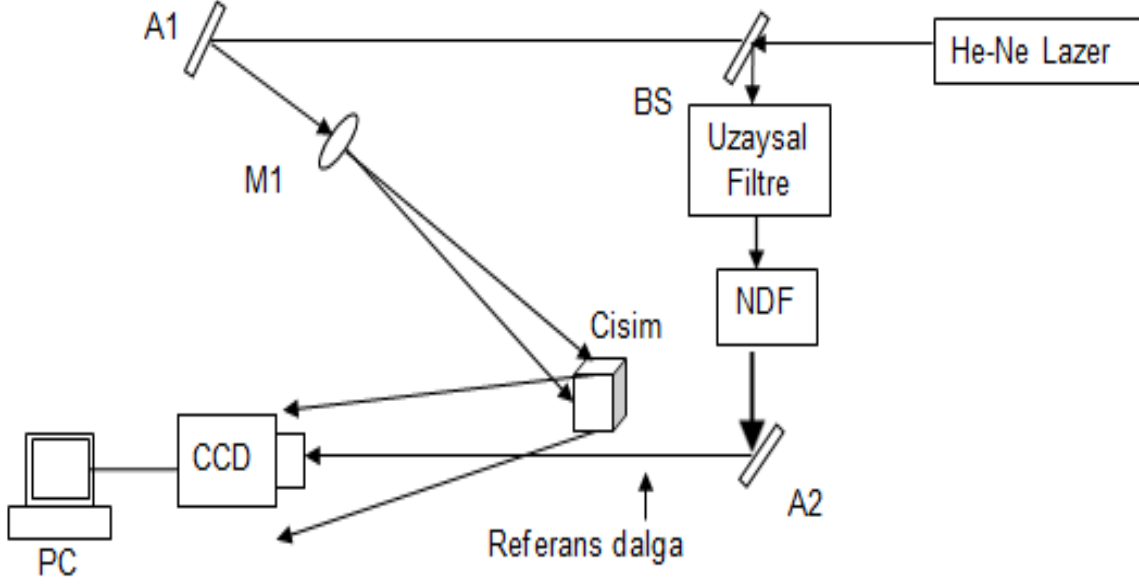
Deneyisel olarak cisimlerin hologram kaydının yapılmasından görüntünün yeniden elde edilmesine kadar geçen algoritmaların akış diyagramı şekil 5.1'deki şemada verilmektedir.



Şekil 5.1 Deneyisel olarak oluşturulan hologram kaydı ve geri elde işlemi için yapılan akış diyagramı.

5.1 SAYISAL HOLOGRAM KAYIT DÜZENEĞİ

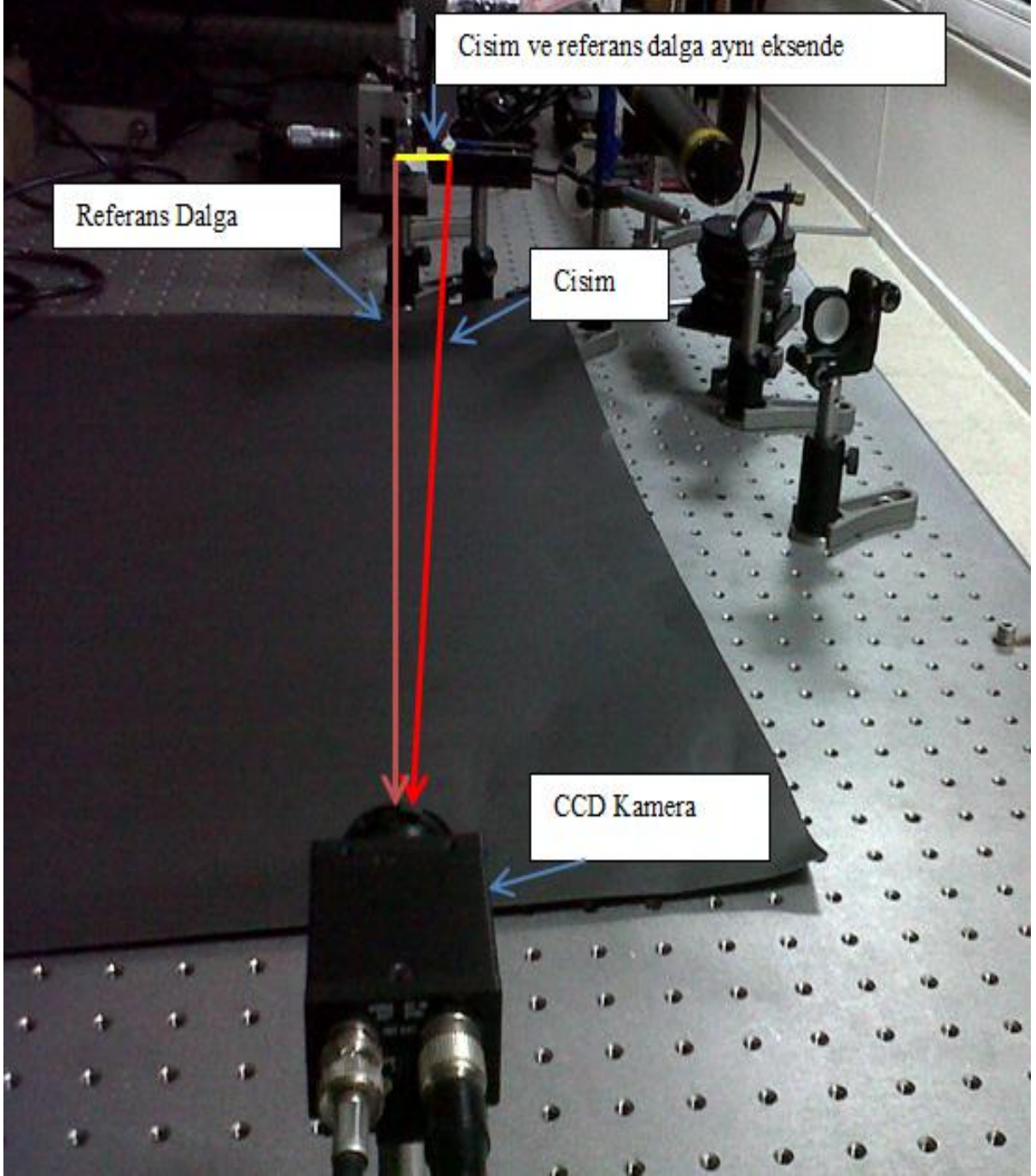
Tezin deneysel kısmında sayısal ortamda hologram kaydı için eksen dışı (off-axis) hologram kayıt düzeneği kullanılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Eksen dışı (off-axis) hologram kayıt düzeneği.

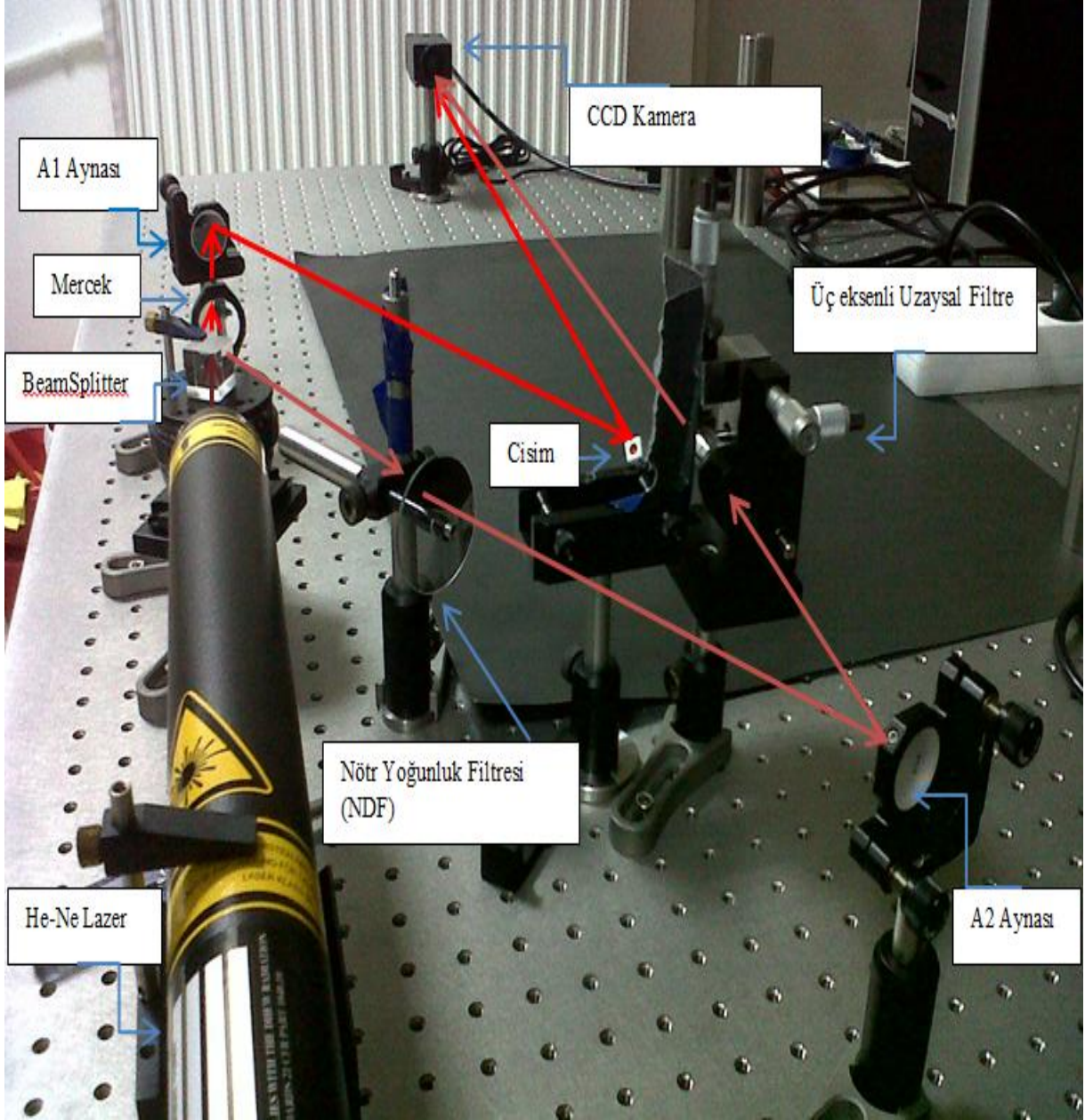
Sistemde 10mW güce sahip, dalga boyu 633nm olan He-Ne lazer kullanılmıştır. Lazerden çıkan ışığı ikiye bölmek için kübik ışın bölücü (beam splitter) kullanılmıştır. Sistemde kullanılan aynalar üzerlerine düşen ışığı yansıtma görevindedir. Öte yandan ışığın şiddetini ayarlamak için dairesel, değişken ve metalik doğal yoğunluk filtresi (Neutral Density Filter) (NDF) kullanılmaktadır. Işığı paralelleştirmek ve iyi bir gauss dağılımı yaratmak için ise üç eksenli uzaysal filtre görev almaktadır.

Deney düzeneği kurulurken ilk olarak referans dalga ve cisimden gelen dalga aynı düzleme konulmuştur. Bu düzenek merceksiz sayısal Fourier holografi düzeneği olarak adlandırılır (Şekil 5.3) (Wagner et al. 1999).



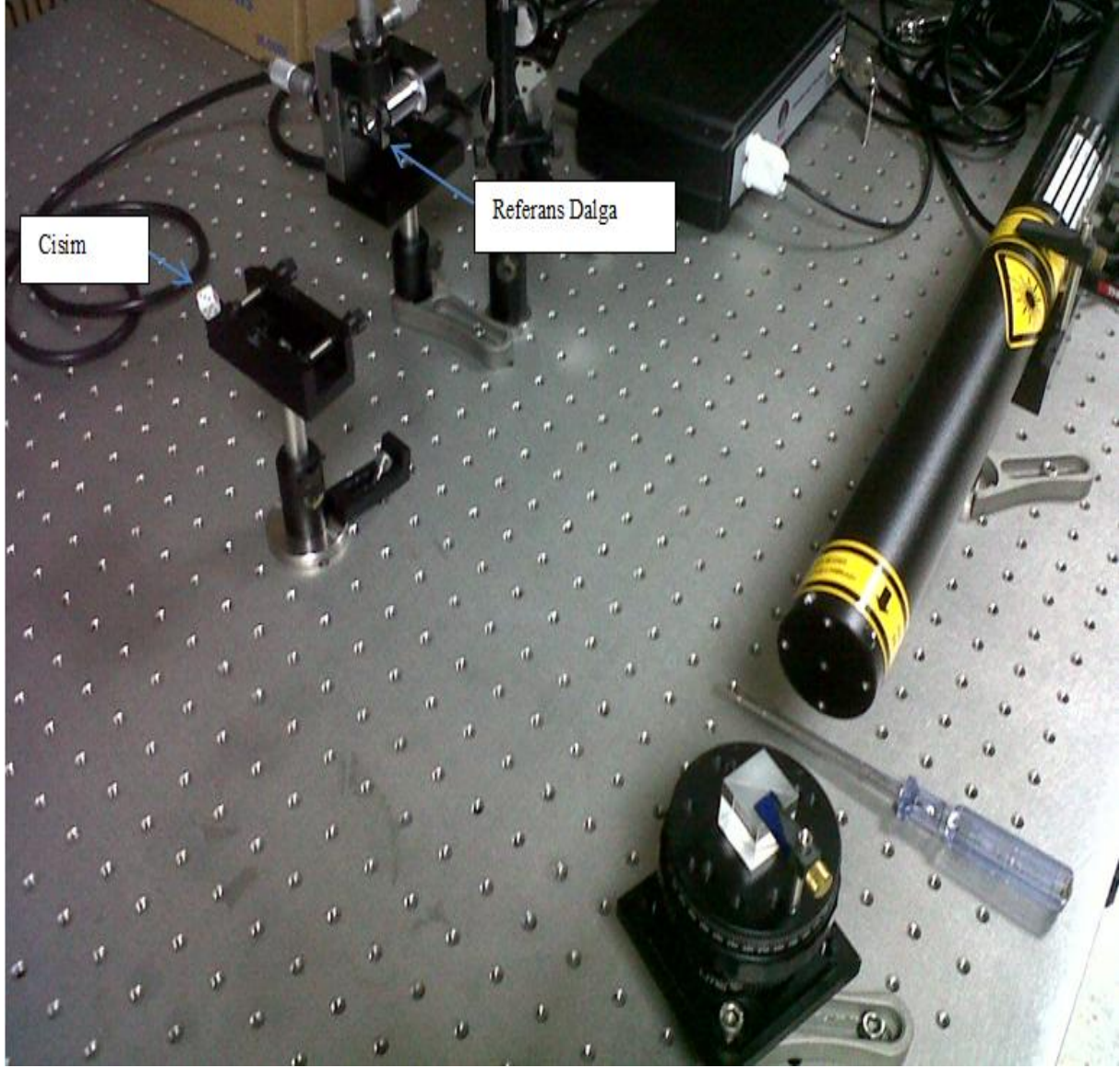
Şekil 5.3 Merceksiz sayısal Fourier holografi düzeneğinin önden görüntüsü.

Şekil 5.3'te de görüldüğü gibi oluşturulan düzenekte metal cisimlerden gelen yansımayı engellemek ve görüntülerin çift çıkmasını engellemek için optik masanın üzerine siyah karton serilmiştir.



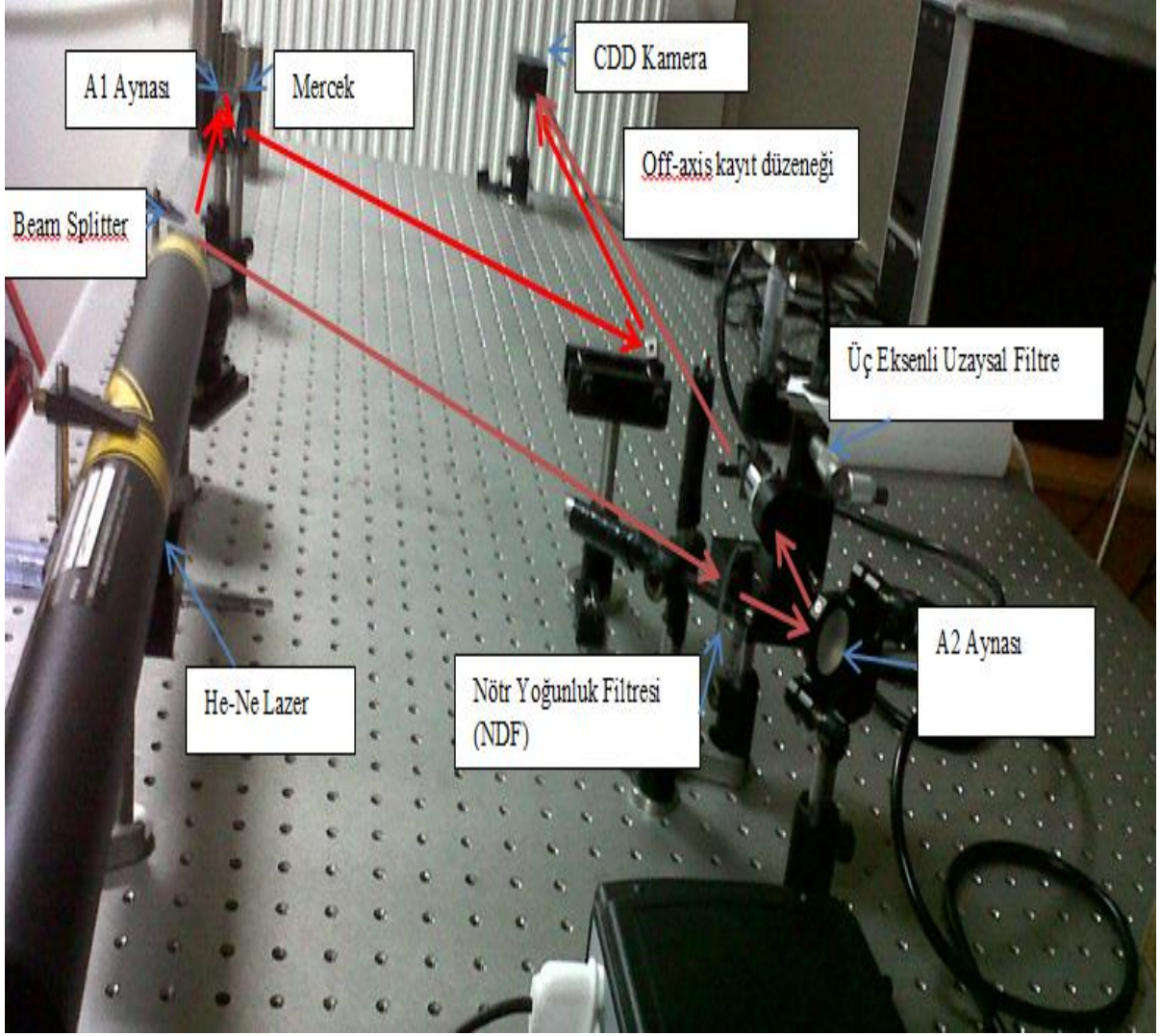
Şekil 5.4 Merceksiz sayısal Fourier holografı düzeneğinin arkadan görüntüsü.

Deney düzeneğinde ikinci olarak, referans dalga ve cisim aynı eksen üzerinde olmayacak şekilde yerleştirilmiştir (off-axis hologram kayıt düzeneği) (Leith and Upatnieks 1963). Cisim CCD kameraya daha yakın ve referans dalgayla arasında çok küçük açı yapacak şekilde koyulmuştur (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Cismin ve referans dalgasının aynı düzlemde olmadığı eksen dışı (off-axis) kayıt düzeneği.

Referans dalgası CCD kameraya dik açıyla gelirken cisimden gelen dalga daha büyük bir açıyla gelmektedir. Yani farklı eksenlerde bulunan cisim ve referans dalgası aynı zamanda farklı açılarla kayıt düzlemine (CCD) gelmektedir (Şekil 5.6). Daha önce de bahsedildiği gibi nesne ve referans dalganın kayıt düzlemi ile yaptığı açının ve bu dalgaların hologram düzlemine olan uzaklığının hologram kaydında çok büyük önemi vardır.



Şekil 5.6 Cismin ve referans dalgasının aynı düzlemde olmadığı eksen dışı (off-axis) kayıt düzeneğinin arkadan görüntüsü.

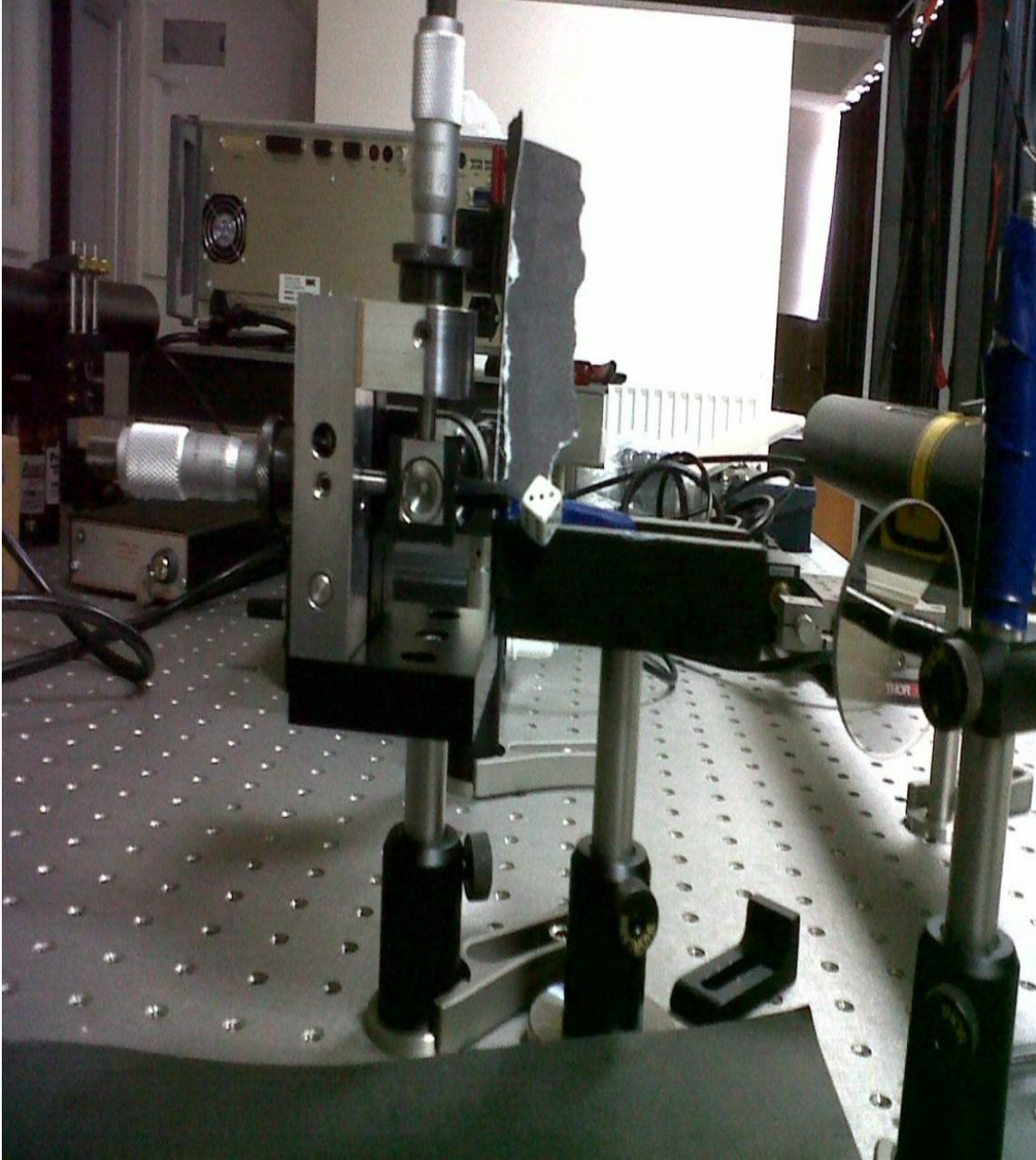
Her iki sistemde de lazerden çıkan ışın ilk olarak ışın bölücüye (beam splitter) gelmiştir ve ikiye ayrılmıştır. A1 aynasına giden birinci ışın bir M1 merceği ile hologramı elde edilecek 3B cisim üzerine düşürülmüştür ve cisimden yansıyan ışın CCD kamera üzerine düşürülmüştür. Öte yandan NDF filtresi ile şiddeti ayarlanan ikinci ışın A2 aynasına gönderilmiştir. Işığı paralelleştirmek ve iyi bir Gauss dağılımı yaratmak için A2 aynasından çıkan ışın uzaysal filtreye gönderilmiştir. Uzaysal filtreden çıkan ve referans dalgayı temsil edecek olan ışın, cisimden yansıyan ışın gibi CCD üstüne düşürülmüştür. Referans dalga CCD kamera üzerine dik gelmektedir. Cisimden gelen dalga ve referans dalgası CCD üzerine düşürüldüğünde bir girişim olayı meydana gelmiştir ve hologram elde edilmiştir. CCD kameraya kaydedilen hologram ara yüz vasıtasıyla bilgisayara aktarılmıştır. Hologram kaydı yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus cisim dalgasının ve referans dalgasının

sahip olduğu, ışık kaynağından hologram düzlemine kadar izleyeceği yolların birbirine eşit mesafede olması gerekmektedir. Şekil 5.6'da kırmızı ile gösterilen ışın cisim dalgasının izlediği yolu, pembe ile gösterilen ışın ise referans dalgasının izlediği yolu göstermektedir. Bu düzenek kurulurken her iki dalganın da izlediği yolların eşit olmasına dikkat edilmiştir. Yol hesabının nasıl yapılacağı ve yol hesabında nelerin önemli olduğu bölüm 3.1.1'de verilmiştir. Bu çalışmada cismin hologramın kayıt edileceği CCD kameraya uzaklığı yaklaşık olarak 0.85cm olarak alınmıştır.

Cismin CCD kameraya olan uzaklığını çok büyük almamak için düzenekte yaklaşık 0.5cm büyüklüğündeki cisimler seçilmiştir. Hologram kaydı yapabilmek için nesne olarak çeşitli nesnelere kullanılmıştır (Zar, yusufçuk, çiçek, sol anahtarı, dümen, vida ve sinek). Bu nesnelerin, üzerine düşen ışığı daha iyi yansıtılabilmeleri için her bir nesne beyaza boyanmıştır.



Şekil 5.7 Hologram kaydı yapmak için kullanılan ve beyaza boyanmış örnek nesnelere (a) Zar, (b) Sol anahtarı, (c) Vida, (d) Yusufçuk, (e) Sinek.



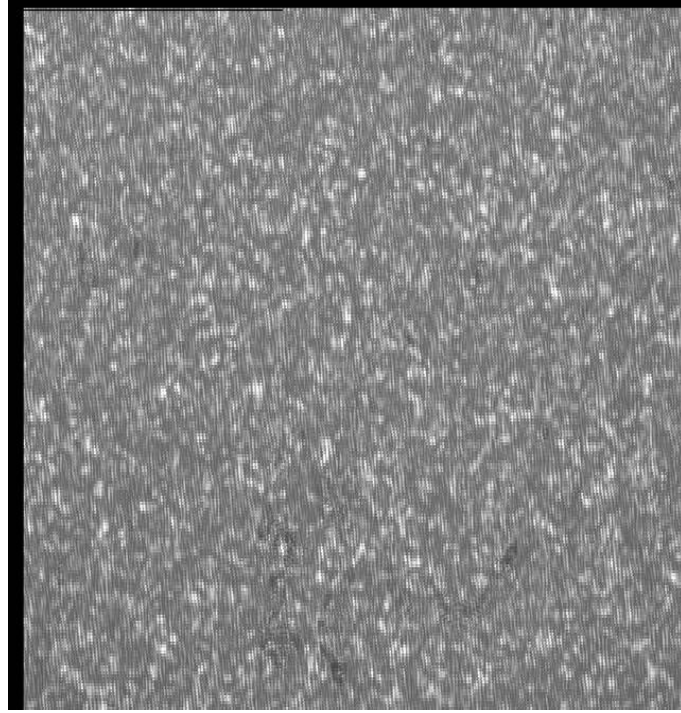
Şekil 5.8 Hologram kaydı yapmak için kullanılan örnek nesnenin konumu.

Şekil 5.8’de de gösterildiği gibi eksen dışı (off-axis) kayıt düzeneğinde örnek nesne olarak kullanılan zarın düzenekteki yeri gösterilmiştir. Zar yansıma hologramı olarak CCD kamera ile bilgisayara kaydedilmiş ve ara yüz vasıtası ile hemen işaret işlenerek sayısal olarak cismin görüntüsü bilgisayar ortamında elde edilmiştir.

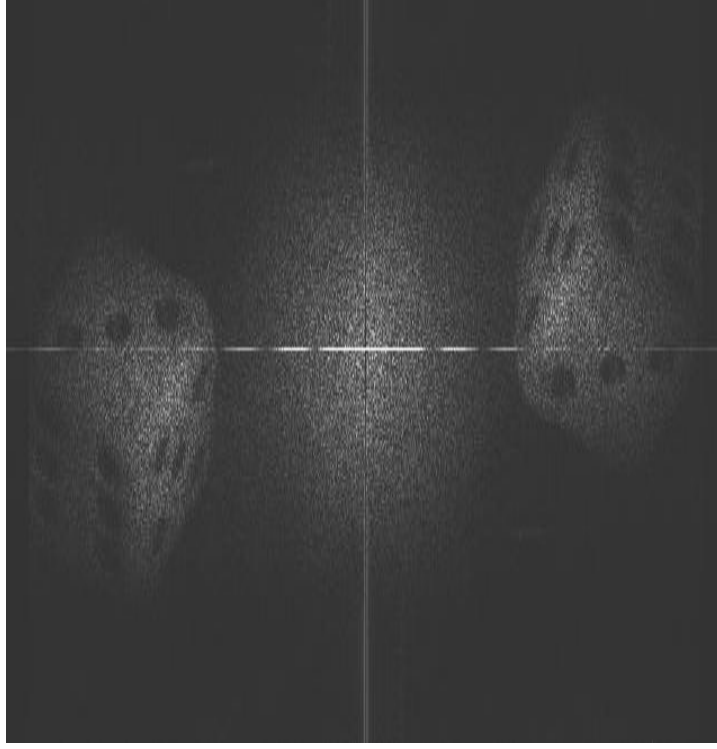
5.2 FDA İLE FAZ BİLGİSİ BULUNAN HOLOGRAMDAN TFD İLE GÖRÜNTÜNÜN GERİ ELDE EDİLMESİ

Bölüm 4.1’de sayısal olarak hologramı oluşturulan cismin faz bilgisi kullanılarak ters Fourier dönüşümü (TFD) ile tekrar geri elde edilmesi sağlanmıştı. Bu bölümde ise cisimlerin hologramı deneysel olarak oluşturulmuştur. Deneysel olarak çekilen hologramdan görüntünün geri elde edilme işlemi (reconstruction) sayısal olarak bilgisayarda yapılmıştır. Örnek olarak kullanılan cisimlerin çekilen hologramlarının faz bilgisi bulunurken, bölüm 4.1’de anlatılan Fourier dönüşüm algoritması (FDA) kullanılmıştır. Sayısal olarak elde edilen faz bilgisinden genliği 1 olan bir faz hologramı yaratılmış ve bu hologram alanından görüntü geri elde edilmiştir. Görüntü geri elde edilirken ise ters Fourier dönüşümü (TFD) kullanılmıştır.

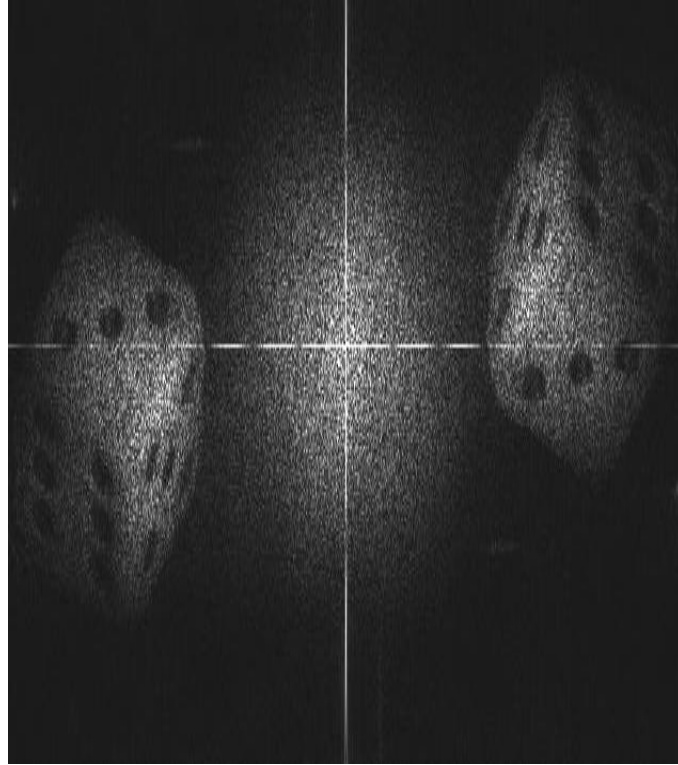
Deneysel olarak CCD kamera üzerinde hologram kaydı yapılan cisimlerin hologram resimleri ve yeniden elde edilen görüntüleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Şekil 5.7a da verilen zarın deneysel olarak çekilmiş hologramı.

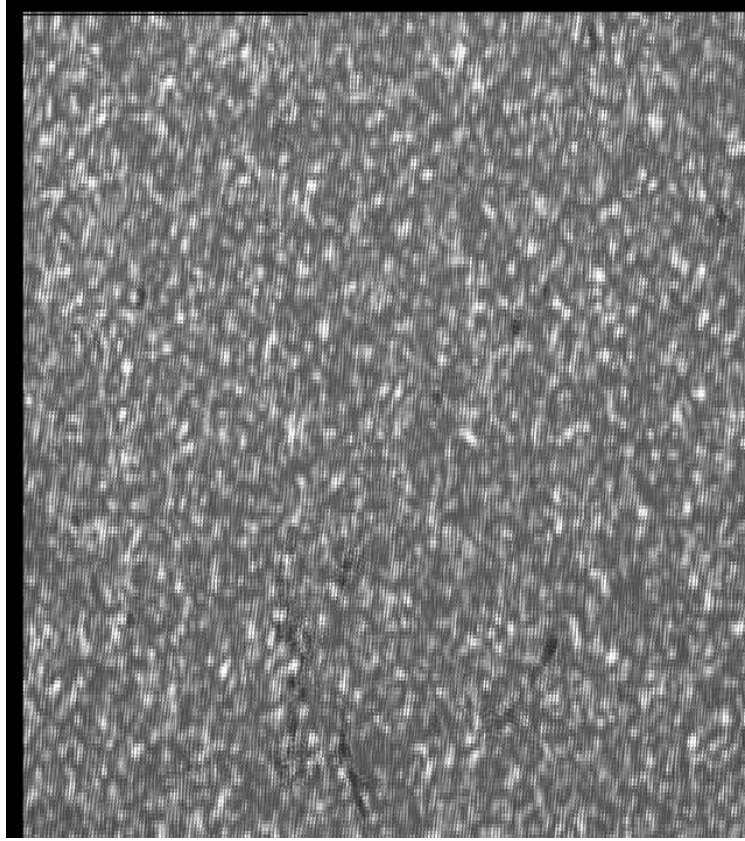


Şekil 5.10 Faz bilgisi FDA ile bulunan zar hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.

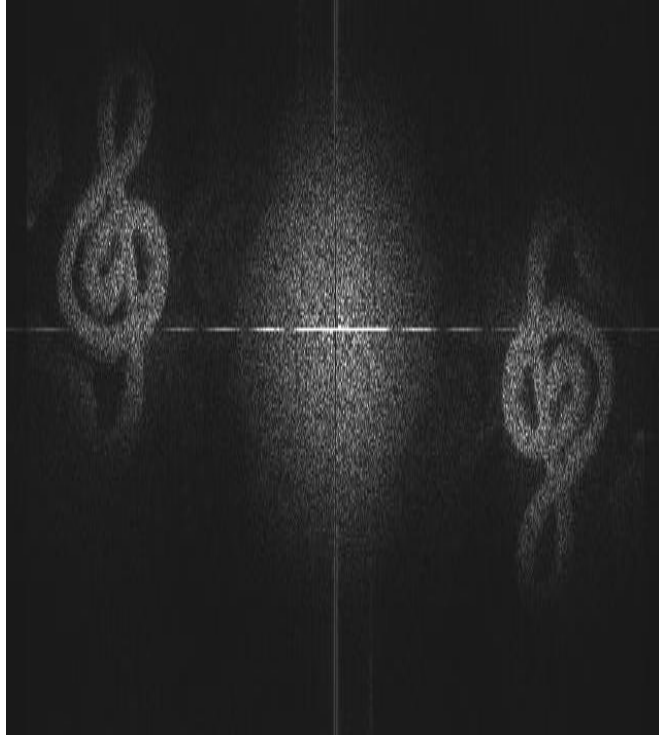


Şekil 5.11 Hologramın kendisi faz olarak kabul edilip bulunan zar hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.

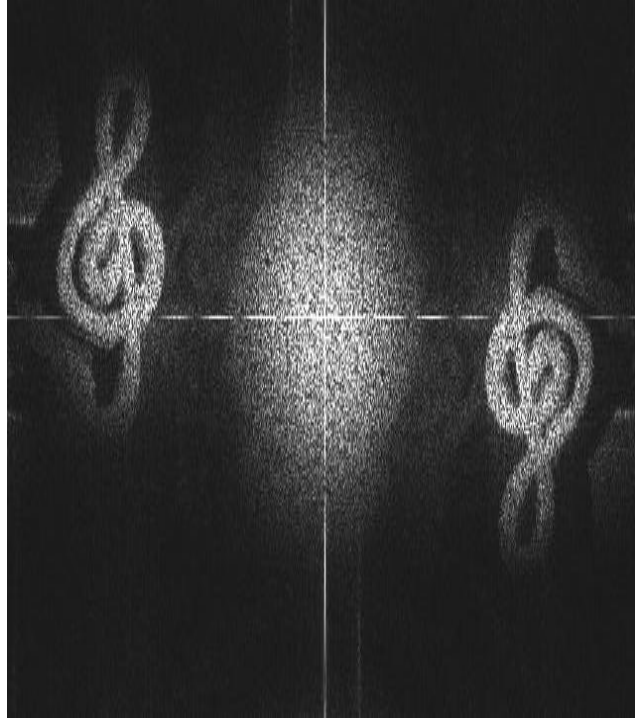
Şekil 5.7’de verilen cisimlerden zarın (Şekil 5.7a) deneysel olarak çekilmiş hologram görüntüsü şekil 5.9’da verilmiştir. Bu hologramın faz bilgisi bölüm 4.1’de anlatılan Fourier dönüşüm algoritması (FDA) ile bulunmuştur (Denklem 4.10). Hologram alanından çıkartılan faz bilgisi kullanılarak zarın geri elde edilmesi ise ters Fourier dönüşümü (TFD) ile gerçekleştirilmiştir (Denklem 4.12). Çıkan görüntü şekil 5.10’da verilmiştir. Hologramın kendisi faz bilgisi olarak kabul edilerek ters Fourier dönüşümü (TFD) ile bulunan görüntü şekil 5.11’de gösterilmektedir.



Şekil 5.12 Şekil 5.7b de verilen sol anahtarının deneysel olarak çekilmiş hologramı.

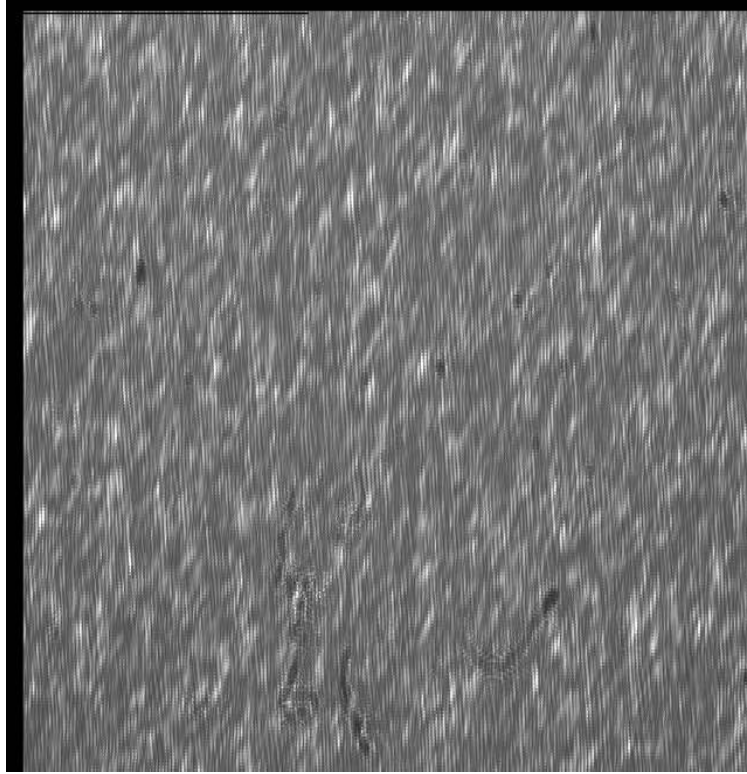


Şekil 5.13 Faz bilgisi FDA ile bulunan sol anahtarı hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.

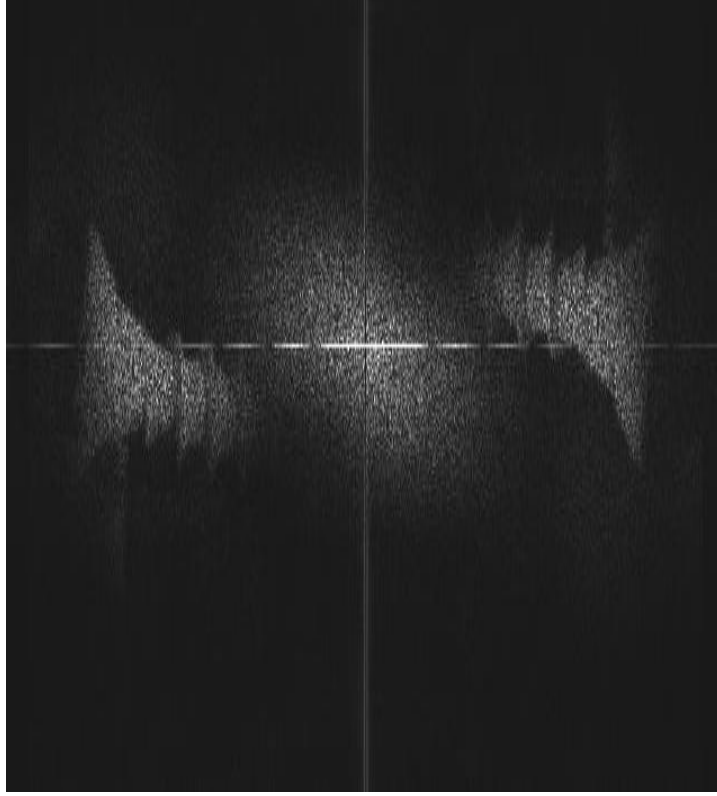


Şekil 5.14 Hologramın kendisi faz olarak kabul edilip bulunan sol anahtarı hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.

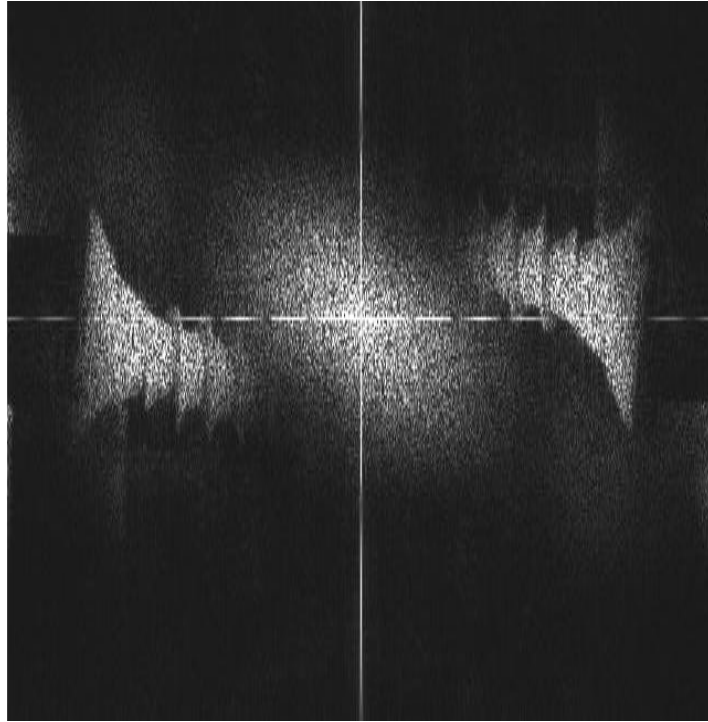
Şekil 5.7’de verilen cisimlerden sol anahtarının (Şekil 5.7b) deneysel olarak çekilmiş hologram görüntüsü şekil 5.12’de verilmiştir. Bu hologramın faz bilgisi bölüm 4.1’de anlatılan Fourier dönüşüm algoritması (FDA) ile bulunmuştur (Denklem 4.10). Hologram alanından çıkartılan faz bilgisi kullanılarak sol anahtarının geri elde edilmesi ise ters Fourier dönüşümü (TFD) ile gerçekleştirilmiştir (Denklem 4.12). Çıkan görüntü şekil 5.13’de verilmiştir. Hologramın kendisi faz bilgisi olarak kabul edilerek ters Fourier Dönüşümü (TFD) ile bulunan görüntü şekil 5.14’de gösterilmektedir.



Şekil 5.15 Şekil 5.7c de verilen vidanın deneysel olarak çekilmiş hologramı.

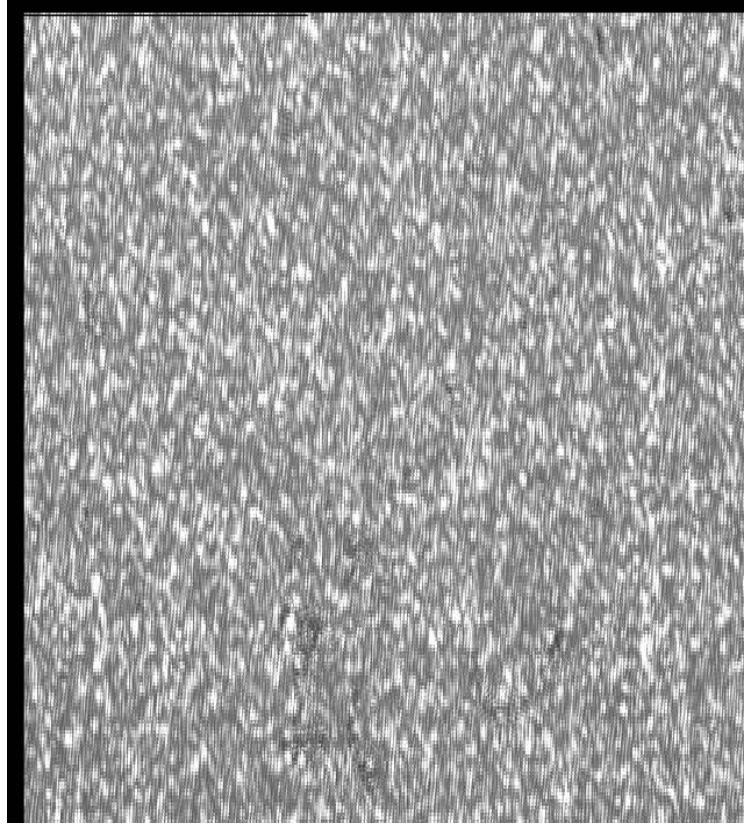


Şekil 5.16 Faz bilgisi FDA ile bulunan vida hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.

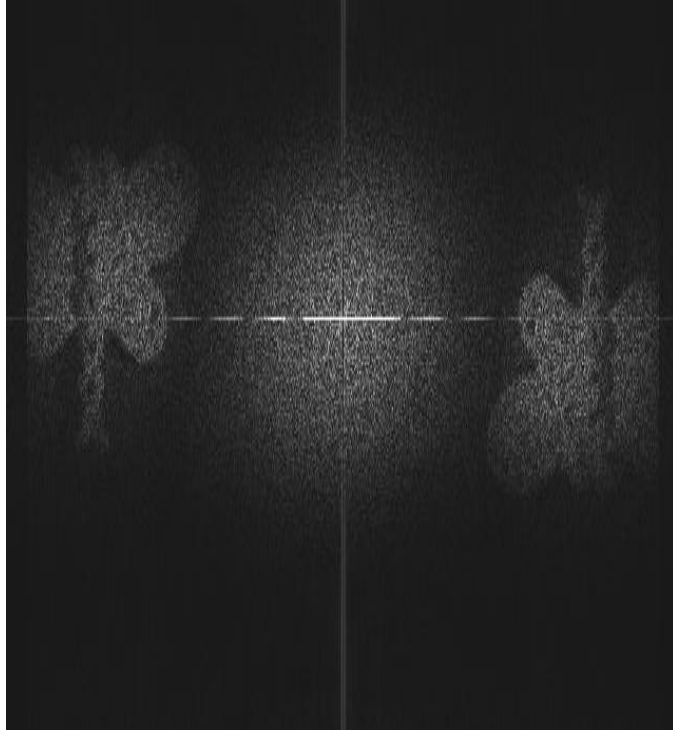


Şekil 5.17 Hologramın kendisi faz olarak kabul edilip bulunan vida hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.

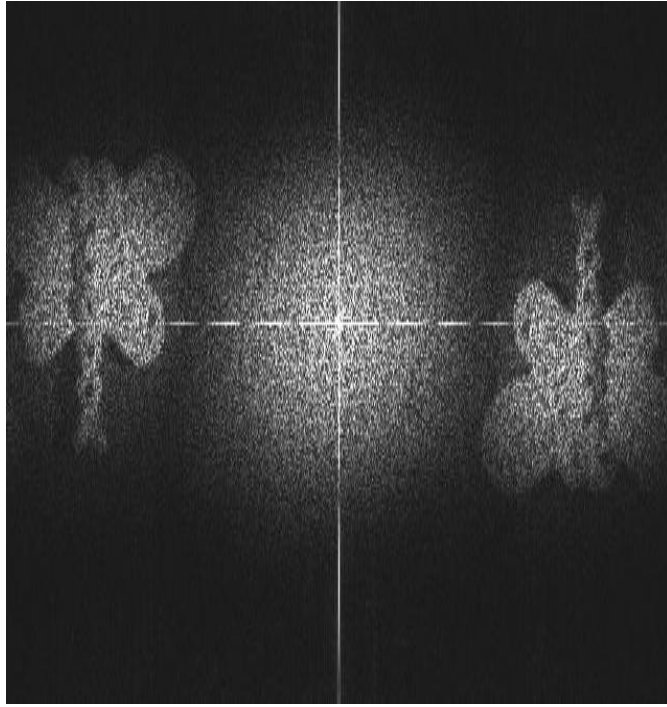
Şekil 5.7'de verilen cisimlerden vidanın (Şekil 5.7c) deneysel olarak çekilmiş hologram görüntüsü şekil 5.15 de verilmiştir. Bu hologramın faz bilgisi bölüm 4.1'de anlatılan Fourier dönüşüm algoritması (FDA) ile bulunmuştur (Denklem 4.10). Hologram alanından çıkartılan faz bilgisi kullanılarak vidanın geri elde edilmesi ise ters Fourier dönüşümü (TFD) ile gerçekleştirilmiştir (Denklem 4.12). Çıkan görüntü şekil 5.16'da verilmiştir. Hologramın kendisi faz bilgisi olarak kabul edilerek ters Fourier Dönüşümü (TFD) ile bulunan görüntü şekil 5.17'de gösterilmektedir.



Şekil 5.18 Şekil 5.7d de verilen yusufçuğun deneysel olarak çekilmiş hologramı.

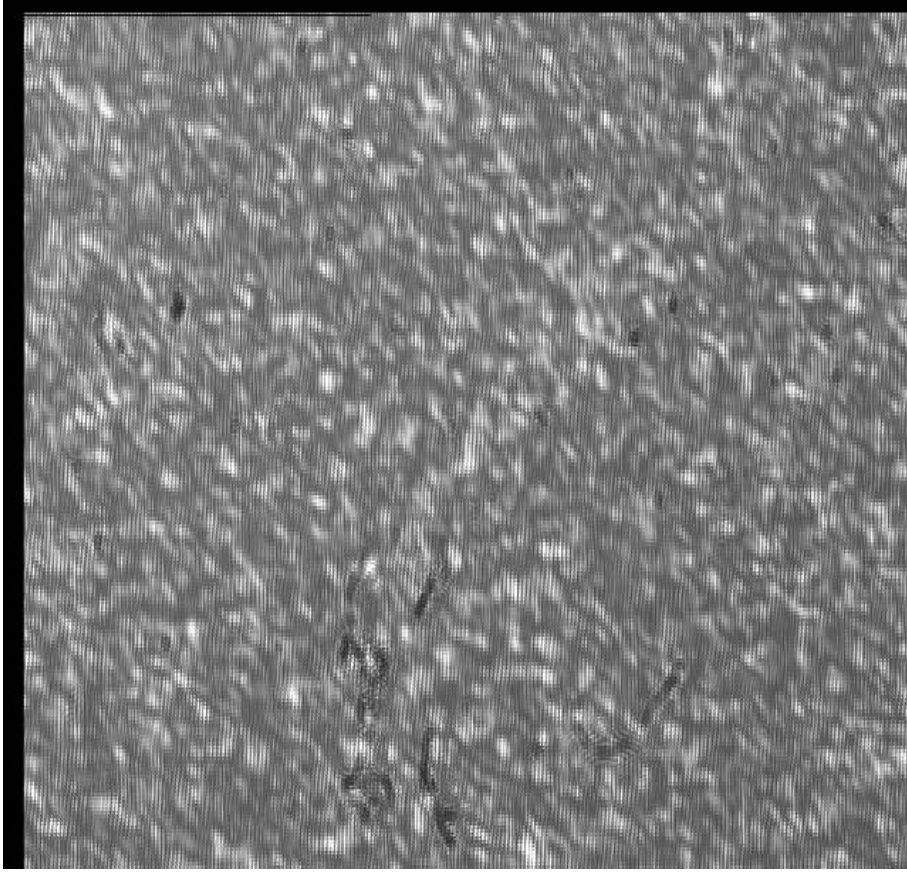


Şekil 5.19 Faz bilgisi FDA ile bulunan yusufçuk hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.

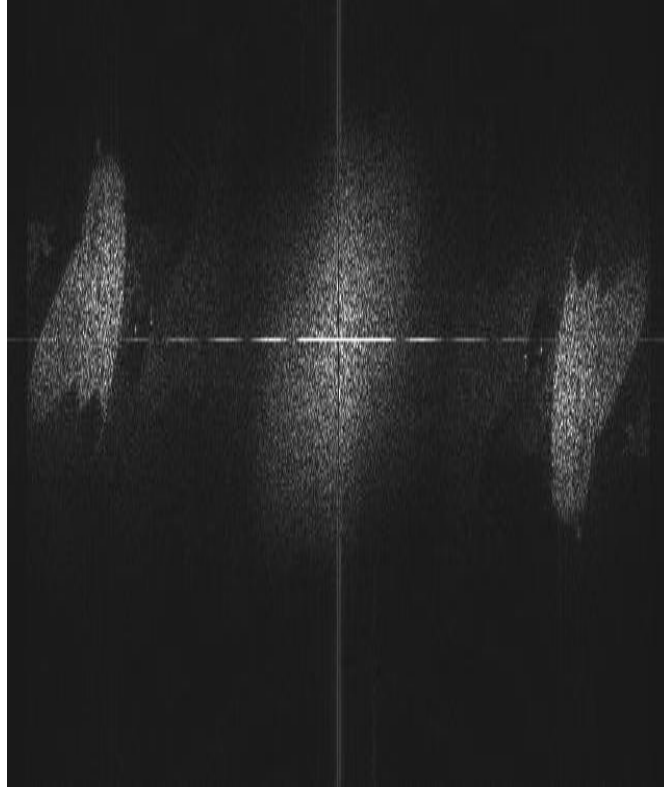


Şekil 5.20 Hologramın kendisi faz olarak kabul edilip bulunan yusufçuk hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.

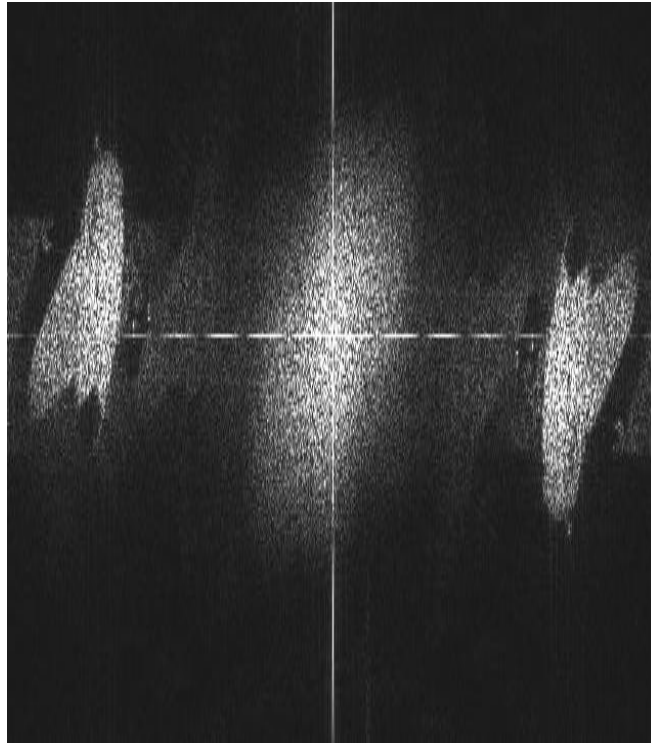
Şekil 5.7’de verilen cisimlerden yusufçuğun (Şekil 5.7d) deneysel olarak çekilmiş hologram görüntüsü şekil 5.18 de verilmiştir. Bu hologramın faz bilgisi bölüm 4.1’de anlatılan Fourier dönüşüm algoritması (FDA) ile bulunmuştur (Denklem 4.10). Hologram alanından çıkartılan faz bilgisi kullanılarak yusufçuğun geri elde edilmesi ise ters Fourier dönüşümü (TFD) ile gerçekleştirilmiştir (Denklem 4.12). Çıkan görüntü şekil 5.19’da verilmiştir. Hologramın kendisi faz bilgisi olarak kabul edilerek ters Fourier Dönüşümü (TFD) ile bulunan görüntü şekil 5.20’de gösterilmektedir.



Şekil 5.21 Şekil 5.7e de verilen sineğin deneysel olarak çekilmiş hologramı.



Şekil 5.22 Faz bilgisi FDA ile bulunan sinek hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.



Şekil 5.23 Hologramın kendisi faz olarak kabul edilip bulunan sinek hologramının TFD ile geri elde edilen görüntüsü.

Şekil 5.7’de verilen cisimlerden sineğin (Şekil 5.7e) deneysel olarak çekilmiş hologram görüntüsü şekil 5.21’de verilmiştir. Bu hologramın faz bilgisi bölüm 4.1’de anlatılan Fourier dönüşüm algoritması (FDA) ile bulunmuştur (Denklem 4.10). Hologram alanından çıkartılan faz bilgisi kullanılarak sineğin geri elde edilmesi ise ters Fourier dönüşümü (TFD) ile gerçekleştirilmiştir (Denklem 4.12). Çıkan görüntü şekil 5.22’de verilmiştir. Hologramın kendisi faz bilgisi olarak kabul edilerek ters Fourier Dönüşümü (TFD) ile bulunan görüntü şekil 5.23’te gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 Deneysel olarak oluşturulan hologramların geri elde edilmiş görüntülerinin NRMS değerleri.

		Hologram Tipi
		Tek Hologram
		Görüntüyü Geri Elde Etme Yöntemi
		Ters Fourier dönüşümü
Faz Elde Etme Yöntemi	Fourier Dönüşüm Algoritması	0.06

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Fourier Dönüşümü ile sayısal faz hologramının elde edilmesi amaçlanan bu çalışmada, bulunan faz bilgisi ile cismin görüntüsü tekrar geri elde edilmiştir. Sayısal olarak üretilen hologramdan tek bir faz hologramı yaratmak için kullanılacak faz bilgisi ise şimdiye kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada kullanılması önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile elde edilmiştir. Fourier dönüşüm algoritması daha önce optik profilometride girişim deseni analizi için kullanılmıştır. Fakat bu çalışmada hologramın faz bilgisini çıkartmak için kullanılması önerilmiştir. Görüntünün geri elde edilmesi işlemi ise daha önce çeşitli çalışmalarda kullanılmış olan sırasıyla ters Fourier dönüşümü ve Fresnel-Kirchhoff integrali ile gerçekleştirilmiştir.

Tezin ilk aşamasında örnek olarak kullanılan B.E.Ü harflerinin sayısal olarak hologramı oluşturulmuş ve görüntünün yeniden elde edilmesi için kullanılan tüm algoritmalar B.E.Ü harflerinin hologramına uygulanmıştır.

İlk olarak sayısal ortamda tek bir hologram oluşturulmuş ve çalışmada kullanılması önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile hologramın faz bilgisi elde edilmiştir. Bu faz bilgisinden yola çıkılarak tek bir faz hologramı yaratılmıştır. Hem çalışmada kullanılması önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile elde edilen faz bilgisi, hem de hologramın kendisi faz olarak kabul edilerek alınan bilgi ile ters Fourier dönüşümü kullanılarak B.E.Ü harflerinin görüntüsü elde edilmiştir (Bölüm 4.1). NRMS değerlerinin de hesaplandığı bu aşamada çıkan sonuçlarda çift görüntü elde edildiği görülmüştür. İkinci olarak Fourier dönüşüm algoritması ile faz bilgisi bulunan tek hologramdan görüntü geri elde edilirken Fresnel Kirchhoff integrali kullanılmıştır (Bölüm 4.2). NRMS değeri hesaplanmış ve çıkan sonuçlarda yine çift çıkan B.E.Ü harflerinin görüntüsüne ulaşılmıştır.

Çalışmanın üçüncü kısmında daha önce çeşitli çalışmalarda uygulanan faz kaydırma holografi tekniği kullanılmıştır. Faz kaydırma sayısal holografi tekniğinden yararlanarak referansın fazı 90° arttırılarak 4 farklı hologram oluşturulmuştur. Çalışmanın bu aşamasında ilk aşamadan farklı olarak 4 farklı hologram kullanılmıştır. Oluşturulan dört hologramdan faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile tek bir hologram ifadesi elde edilmiş ve bölüm 4.1 de olduğu gibi bu hologramın faz bilgisi çalışmada önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile bulunmuştur. Daha sonra da genliği bir olan bir faz hologramı yaratılmıştır. Hem çalışmada önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile elde edilen faz bilgisi, hem de hologramın kendisi faz olarak kabul edilerek alınan bilgi ile B.E.Ü harflerinin geri elde edilmesi işleminde ise yine daha önce çeşitli çalışmalarda uygulanan Fresnel- Kirchhoff integrali kullanılmıştır (Bölüm 4.3). Çıkan sonuçlara bakıldığında ise B.E.Ü harflerinin tek görüntüsüne ulaşılmıştır.

Çalışmanın dördüncü kısmında faz kaydırma sayısal holografi tekniği ile oluşturulan 4 hologramın faz bilgisi bulunurken Fourier dönüşüm algoritmasından farklı olarak faz kaydırma sayısal holografi tekniği kullanılmıştır. Bu tezde faz bilgisi bulmak için kullanılması önerilen Fourier dönüşüm algoritması ile faz bulunmuştur. Elde edilen faz bilgisi ile görüntü tekrar geri ele edilirken ise Fresnel-Kirchhoff integrali kullanılmıştır (Bölüm 4.4). NRMS değerlerinin de hesaplandığı görüntü işlemedeki bu aşamada çıkan sonuçlarda çift görüntü elde edildiği görülmüştür. Burada çeşitli filtreleme teknikleri kullanılarak görüntü teke indirilebilmektedir.

Ters Fourier dönüşümü ve Fresnel-Kirchhoff integrali ile cisimlerin geri elde edilmiş görüntülerinden yola çıkılarak bulunan NRMS değerlerinin, yaklaşık olarak birbirleriyle aynı olması gerekmektedir. Çünkü yapılan çalışmalarda ters Fourier dönüşümünün, Fresnel-Kirchhoff integralinden türetildiği belirtilmiştir. Bu nedenle çıkan sonuçların da aynı olması beklenmektedir (Matoba et al. 2002a, 2002b). Elde edilen görüntülerin NRMS değerleri karşılaştırırken bu özellik dikkate alınmalıdır.

Kullanılan algoritmalar ve çıkan sonuçlara bakıldığında en iyi sonuç veren yöntemin Faz kaydırma sayısal holografi tekniği (FKSHT) ile oluşturulan 4 hologramın Fourier dönüşüm algoritması (FDA) ile elde edilen faz bilgisi kullanılarak Fresnel Kirchhoff integrali (FKİ) ile görüntünün tekrar elde edildiği yöntem olduğu görülebilmektedir (Bölüm 4.3). Çünkü bu yöntemle tek görüntüye ulaşılrken, faz hologramından görüntünün yeniden elde edilmesi için kullanılan diğer yöntemlerde görüntü çift çıkmaktadır. Bölüm 4.3'te anlatılan yöntemde çıkan

sonuçlar tek görüntü verdiği için NRMS değeri hesaplanmamıştır. Çünkü filtreleme işlemine gerek kalmadan tek görüntüye direkt olarak ulaşılmıştır.

Çalışmanın son aşamasında ise deneysel olarak hologram kaydı yapılmıştır. Projede belirtilen hologram kayıt düzeneği kullanılarak sayısal olarak hologram kaydı gerçekleştirilmiştir. Hologram kaydı yapabilmek için çeşitli nesnelere kullanılmış (şekil 5.7) ve gelen ışığı daha iyi yansıtabilmeleri için beyaza boyanmışlardır. Hologram kaydı sayısal olarak CCD kamera üzerine yapılmıştır. Hem çalışmada nerilen Fourier dönüşüm algoritması ile elde edilen faz bilgisi hem de hologramın kendisi faz olarak kabul edilerek alınan bilgi ile kullanılan her bir cismin (şekil 5.7) görüntüsünü elde edebilmek için ters Fourier dönüşümü kullanılmıştır.

Burada dikkat edilmesi gereken husus deneysel olarak sadece tek bir hologramın ekildiğidir. 4 farklı hologram çekiminin ilerleyen çalışmalarda yapılması planlanmaktadır.

Sayısal olarak oluşturulan tek hologram ve CCD kamera üzerine kaydı yapılan tek hologramın NRMS değerlerine bakıldığında her ikisinin de aynı değerde çıktığı gözlemlenmiştir. Bu da çalışmada gerçekleşmesini istediğimiz amaçlardan bir tanesidir. ıkan sonuçlarla hedeflenen gerçek zamanlı bir sayısal hologram kaydı ve işleme sistemine ulaşıldığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abookasis D and Rosen J** (2006) Three types of computer-generated hologram synthesized from multiple angular viewpoints of three-dimensional scene, *Appl. Opt.*, 45: 6533-6538.
- Ahrenberg L, Benzie P, Magnor M and Watson J** (2006) Computer generated holography using parallel commodity graphics hardware, *Opt. Exp.*, 14(17): 7636-7641.
- Awatsuji Y, Tahara T, Kaneko A, Koyama T, Nishio K, Ura S, Kubota T and Matoba O** (2008) Improving image quality of parallel phase-shifting digital holography, *J. Phys.*, 139.
- Bayraktar M ve Özcan M** (2008) Holografik interferometri kullanarak yüzey sapmalarının ve titreşimlerinin incelenmesi, *Eleco*.
- Bateman H** (1995) The mathematical analysis of electrical and optical wave motion on the basis of Maxwell Ps equations, *Dover Pub.*, USA.
- Bitou Y** (2003) Digital phase-shifting interferometer with electrically adressed liquid-crystal spatial light modülator, *Opt. Lett.*, 28: 1576-1578.
- Born M and Wolf E** (1999) Principles of optics, *Cambridge University Press*, seventh ed.
- Bracewell R N** (1965) The Fourier transform and its applications, *McGraw-Hill Book Company, Inc.*, New York, 2th ed.
- Caulfield H J** (1979) *Handbook of Optical Holography*, Academic, New York.
- Cooley J W, Lewis P A W and Welch P D** (1969) The fast fourier transform algorithm: Programming considerations in the calculation of sine, cosine and laplace transforms, *J. Sound Vib.* 12: 315-337, Reprinted July 1970.
- Denisyuk Y N** (1962) Photographic recosntruction of the optical properties of an object in its own scattered radiation field, *1948 Sov. Phys., Doklady*, 7: 543-545.
- Ecevit N** (2009) *Holografi ve Uygulamaları*, Gebze Yüksek Teknoloji Entitüsü, 23-30 Haziran.
- Ferraro P, De Nicola S, Coppola G, Finizo A, Alfieri D and Pierattini G** (2004) Controlling image size as a function of distance and wavelenght in Fresnel-transform reconstruction of digital holograms, *Opt. Lett.*, 26: 854-856.
- Frauel Y, Naughton T J, Matoba O, Tajahuerce E and Javidi B** (2006) Three-dimensional imaging and processing using computational holographic imaging, *IEEE*, 94: 636-653.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Gabor D** (1948) A new microscopic principle, *Nature*, 161: 777-778.
- Gabor D** (1949) Microscopy by reconstructed wave-fronts, *Proc. R. Soc, London*, 197: 454-487.
- Goodman J W** (1971) An introduction to the principles and applications of holography, *Proc. of the IEEE*, 59:9 .
- Goodman J W** (2005) *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, New York, 297-393.
- Gray R M and Goodman J W** (1995) *Fourier transforms: An introduction for engineers*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- Hariharan P** (1996) *Optical Holography Principles, Techniques and Applications*, Cambridge University Press, Cambridge, 2th ed, 406pp.
- Hecth** (2005) *Optics*, Çeviri: Prof. Dr. Nizamettin Armağan, Doç. Dr. Nurdoğan Can, Akademi Yayın Hizmetleri.
- Huadong Z, Yu Y and Dai C** (2009) A novel three-dimensional holographic display system based on LC-R2500 spatial light modulator, *Opt.*, 120:431-436.
- Isono H and Yasuda M** (1991) Autostereoscopic 3-D television display, *NHK Lab. Note SN* 398.
- Iwasa T, Ohtani K and Baba M** (2012) Correcting phase unwrapping errors with color phase shifting method, *In SICE Ann. Conf.*, Akita University, Akita, Japan, 1248-1251.
- James D F V and Wolf E** (1991) Spectral changes produced in Youngs' interference experiment, *Opt. Commun.*, 81: 150-154.
- Kachitvichyanukul V and Schmeiser B W** (1988) Binomial random variate generation, *Commun. of the ACM*, 31(2): 216-222.
- Kaya H** (2010) *Optik faz eldesinde Hartley dönüşümünün kullanılması*, Yüksek Lisans Tezi.
- Kaya H, Saraç Z, Özer M and Taşkın H** (2010) Optical signal processing of interference fringes by Hartley transform method, *Proc SPIE 7746, 17th Slovak-Czech-Polish Opti. Conf. on Wave and Quantum Aspects of Contemp. Opt.*, 77461 W, December 14.
- Kim Myung K** (2010) *Principles and techniques of digital holographic microscopy*, SPIE Rewievs 1 st ed, 50.
- Klein M V and Furtak T E** (1988) *Optik German edn*, Springer, Berlin.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kreis T** (2005) *Handbook of Holographic Interferometry, Optical and Digital Methods*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 9-12,23-24,81-84,100-101.
- Kronrod M A, Merzlyakov N S and Yaroslavsky L P** (1972) Reconstruction of holograms with a computer, *Sov. Phys.-Tech. Phys*, 17: 419-420.
- Lai S, King B and Neifeld M A** (2000) Wave front reconstruction by means of phase-shifting digital in-line holography, *Opt. Commun.*, 173: 155-160.
- Latta J N** (1971) Computer-based analysis of hologram imagery and aberration. I. Hologram types and their nonchromatic aberrations, *Appl. Opt.*, 10(3): 599-608.
- Leith E N and Upatnieks J** (1962) Reconstructed wavefronts and communication theory, *J. Opt. Soc.Amer*, 52: 1123-1130.
- Leith E N and Upatnieks J** (1963) Wavefront reconstruction with continuous-tone objects, *J. Opt. Soc.Amer*, 53: 1377-1381.
- Leith E N and Upatnieks J** (1964) Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects, *J. Opt. Soc.Amer*, 54: 1295-1301.
- Leith E N and Upatnieks J** (1965) Photography by laser, *Scien. Amer.*, 212: 24-35.
- Liebling M, Blu T and Unser M** (2003) Fresnelet: New multiresolution wavelet bases for digital holography, *IEEE Trans. Image Proc.* 12: 29-43.
- Lippmann G** (1891) La photographie des couleurs, *Compt. rendues des Seances del Acad. des scien.*, Paris, 112: 274-275.
- Maiman T H** (1960a) Stimulated optical radiation in ruby, *Nature*, 187: 493.
- Maiman T H** (1960b) Optical maser action in ruby, *Br. Commun. Electron*, 7: 674.
- Matoba O, Naughton T J, Frauel Y, Bertaux N and Javidi B** (2002a) Three-dimensional object reconstruction using phase-only information from a digital hologram, *Phot.*, Boston.
- Matoba O, Naughton T J, Frauel Y, Bertaux N and Javidi B** (2002b) Real-time three-dimensional object reconstruction by use of a phase-encoded digital hologram, *Appl. Opt.*, 41: 29, 6187-6192.
- Nahin P J** (2006) Dr.Euler's formula. Cures many mathematical IIIs, *Princ. Univ. Press Princ. N J*.
- Nils A** (1981) The making and evaluation of holograms, *Acad. Press*, QC 449 A24.
- Okoshi T** (1976) *Three dimensional imaging techniques*, Academic Press.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Önal Tayyar D, Saraç Z and Ecevit F N** (2011) Real-time optical reconstruction of the diffused 3D object using phase information calculated by continuous wavelet transform, *Opt. Commun.*, 284: 5460-465.
- Park D, Kim K, Lee C, Son J and Lee Y** (1994) 3-D image processing and display Technologies, *Journ..of KICS*, 11(8): 672-688.
- Park D, Kim K, Lee C, Son J and Lee Y** (1995) Lenticular stereoscopic imaging and displaying techniques with no special glasses, *IEEE*.
- Poon T C** (2007) *Optical Scanning Holography With Matlab*, Springer US, 152.
- Papoulis A** (1962) *The Fourier Integral and its applications*, McGraw-Hill Book Company, Inc, New York.
- Qiang T H** (2011) *Numerical Reconstruction of Digital Hologram*, Final Year Project, Utar, 1: 64
- Rastogi P K** (1994) *Holographic interferometry: Principles and Methods*, Spring..
- Ripoll O, Kettunen V and Herzig H P** (2004) Review of iterative Fourier-transform algorithms for beam shaping applications, *Optic. Eng.*, 11: 2549.
- Samui A B** (2008) Holographic recording medium, *Recent Patents on Mat. Scien.*, 1: 74-94.
- Schnars U and Juptner W P O** (2002) Digital recording and numerical reconstruction of holograms, *Mess. Sci.Technol*, 13: 85-101.
- Schnars U and Jueptner W** (2005) *Digital holography: Digital hologram recording, numerical reconstruction and related techniques*, Springer, Berlin, Germany 1: 164.
- Sinclair G, Leach J, Jordan P, Gibson G and Yao E** (2004) Interactive application in holographic optical tweezers of a multi-plane Gerchberg- Saxton algorithm for three-dimensional light shaping, *Opt. Exp.*, 12: 1665-1670.
- Sutkowski M and Kujawinaka M** (2000) Application of liquid crystal devices for optoelectronic of digitally stored holograms, *Opt. Lasers Eng.* 33: 191-201.
- Takeda M and Mutoh K** (1983) Fourier transform profilometry fort he automatic of 3-D object shapes, *Appl. Opt.* 22 (24): 3977-3982.
- Takeda M, Taniguchi K, Hirayama T and Kohgo H** (1996) Single-transform Fourier/Hartley fringe analysis for holographic interferometry, *In Z. Füzessy, W. Jüeptner and W. Osten, edit., simul. and exp. laser met.*, 67-73.
- Taylor L H and Brandt G B** (1972) An error analysis of holographic strains determined by cubic splines, *Exp. Mech*, 12: 543-548.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Toal V** (2003) A simple approach to phase holography, *Am. J. Phys*, 71: 948-949.
- Ustabaş Kaya G, Dursun A and Saraç Z** (2013) A novel reconstruction method using the phase only information of the computer generated hologram, *Seek Digital Lib., Proc. Of teh Intl. Conf. on Advances in Comp. and Elec. Techno., ACET 2013, 3-4 August*.
- Verrier N and Atlan M** (2011) Off-axis digital hologram reconstruction: some practical considerations, *App. Opt.*, 50:34.
- Wagner C, Seebacher S, Osten W and Jüptner W** (1999) Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology, *Appl. Opt.*, 38: 4812-4820.
- Wilson J and Hawkes J** (2000) *Optoelectronics*, Çeviri: Dr. İbrahim Okur, Değişim Yayınları, 2: 518.
- Wizinowich P L** (1990) Phase shifting interferometry in the presence of vibration : A new algorithm and system, *Appl. Opt.*, 29 (22): 3271-3279.
- Wyant J C** (1977) Image blur for rainbow holograms, *Opt. Lett.*, 1: 130.
- Yamaguchi I and Zhang T** (1997) Phase-shifting digital holography, *Opt. Lett.* 22: 1268-1270.
- Ymaguchi I, Yamamoto K, Mills G A and Yokota M** (2006) Image reconstruction only by phase datain phase-shifting holography, *Appl. Opt.* 45: 975-983.
- Zhang T and Yamaguchi I** (1998) Three dimensional microscopy with phase-shifting digital holography, *Opt. Lett.*, 23: 1221-1123.
- URL-1** (2013) <http://80.251.40.59/science.ankara.edu.tr/aozansoy/girisim.pdf> (Erişim tarihi: 19.09.2013).
- URL-2** (2013) <http://optik.nedir.com/> (Erişim tarihi: 02.11.2013).
- URL-3** (2013) <http://www.gelecekteyim.com/yaziyiyazdir.asp?id=33> (Erişim tarihi: 09.11.2013).
- URL-4** (2013) <http://www.optics.unm.edu/sbahae/Optics%20Lab/Holography.pdf> (Erişim tarihi: 19.09.2013).
- URL-5** (2013) <http://www.frmtr.com/bilim-ve-teknoloji/1153229-holografi-nedir.html> (Erişim tarihi 08.11.2013).
- URL-6** (2013) <http://www.spiritualizm.com/kitap/kitaplikholistik2.html> (Erişim tarihi: 10.11.2013).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

URL-7 (2013) <http://www.bilgiustam.com/hologram-nedir-nasil-calisir/> (Erişim tarihi: 27.11.2013).

URL-8 (2013) <http://www.mthologram.com/uretimi.htm> (Erişim tarihi 27.11.2013).

ÖZGEÇMİŞ

Gülhan USTABAŞ KAYA 1986'da Eskişehir'de doğdu; lise öğrenimi Sinop Anadolu Lisesinde tamamladı. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden 2010 yılında mezun oldu. 2010-2011 (6 ay) yılları arasında Mina Elektrik Limited Şirketinde Proje mühendisi olarak görev yaptı. 2011 (Ocak) yılından itibaren Bülent Ecevit Üniversitesi (Zonguldak Karaelmas Üniversitesi) Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisansa başladı. Halen BEÜ Elektrik –Elektronik Mühendisliği Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : B.E.Ü. Elektrik-Elektronik Mühendisliği
İncivez-ZONGULDAK

Tel : 0372 257 4010-(1860)

E-posta : gulhan.ustabas@gmail.com