

Holografik İnterferometri Kullanarak Yüzey Sapmalarının ve Titreşimlerin İncelenmesi

Surface Deflection and Vibration Analysis Using Holographic Interferometry

Muharrem Bayraktar, Meriç Özcan

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

Sabancı Üniversitesi

bayraktar@su.sabanciuniv.edu

meric@sabanciuniv.edu

Özet

Holografi üç boyutlu görüntüleme imkânı sağlamanın yanında interferometrik bir teknik olarak hassas ölçüm yapmayı da sağlar. Bu makale hologram kaydetme ve yeniden yapılandırma süreci ile başlamaktadır. Holografide filtreleme kavramının açıklanmasının ardından iki farklı filtreleme yöntemi anlatılmış ve deney sonuçları verilmiştir. Durağan yüzey sapmalarının incelenmesi için 632,8 nm dalga boyundaki lazerle yapılan deneylerde 3 µm ve 5 µm değişimler doğru şekilde ölçülmüştür. Bu yöntemde yarım dalga boyundaki değişimleri (0,3 µm) tespit etmek mümkündür. Holografik interferometri yöntemi titreşim analizi için de kullanılabilir. Pozlama süresinin titreşim periyodundan büyük olduğu durumlarda, zaman ortalamalı titreşim analizi yöntemiyle yapılan deneylerle yüzeyin mod şekilleri tek bir hologramla yüzeye temas olmadan kolayca çıkarılabilmiştir. Bir diğer yöntem olan stroboskopik titreşim analizi yönteminde ise bir pervane yardımıyla sürekli lazer ışığı titreşim periyodunun onda biri kadar sürelerle kesik kesik gönderilerek mod şekilleri kolayca belirlenmiştir.

Abstract

Beside holography gives the capability of three dimensional imaging, it is possible to make precise measurements because of its interferometric feature. This paper starts with the description of hologram recording and reconstruction processes. After explaining filtering concept in holography two different filtering methods are explained and experimental results are given. In case of static surface deflection analysis, 3 µm and 5 µm surface deflections are correctly measured using a laser source with wavelength of 632.8 nm. Using this method it is possible to determine surface displacements of half wavelength (0.3 µm). Holographic interferometry method can also be used in vibration analysis. In case where exposure time is longer than vibration period, surface mode shapes are easily measured using time averaged vibration analysis method with a single hologram without any contact to the surface. Surface mode shapes are determined easily using another method called stroboscopic vibration analysis where a continuous laser beam is chopped into pulse sequences with a period of one tenth of the vibration period.

1. Giriş

İki boyutlu görüntüleme dalga şiddeti kaydedilmekte ve görüntünün derinlik bilgisini içeren fazı kaybolmaktadır. 1947 yılında Dennis Gabor tarafından keşfedilen holografi yöntemi ile dalga bilgisinin şiddeti ve fazı yeniden yapılandırılabilir (reconstruction). Holografi üç boyutlu görüntüleme, holografik mikroskop, yüzey eşdüzeltimi (contouring), yüzey sapmalarının ve titreşimlerin incelenmesi gibi birçok uygulamaya alanı bulmuştur. Dijital elektronikte gerçekleşen hızlı ilerlemeyle birlikte CCD kameralar fotoğraf filmi yerine holografide kullanılabilmeye başlanmış ve hologramların bilgisayarda kolayca yeniden yapılandırılabilme imkânı doğmuştur. Bu makalede hologram kaydetme, yeniden yapılandırma, filtreleme ve holografik interferometrinin durağan yüzey sapmaları ve titreşimlerin incelenmesinde kullanımı anlatılmıştır.

Hologram kaydetme süreci ikinci bölümde, yeniden yapılandırma ise üçüncü bölümde anlatılmıştır. Dördüncü bölümde holografide filtreleme yöntemlerine geçilmiştir. Bu bölümde verilen iki farklı filtreleme yönteminin ardından beşinci bölümde durağan yüzey sapmalarının incelenmesinde holografik interferometrinin kullanımı anlatılmıştır. Altıncı bölümde verilen zaman ortalamalı titreşim analizinin ardından yedinci bölümde stroboskopik titreşim analizi anlatılmıştır. Bu yöntemlerin akustik mikrofon dizisiyle birleştirilmesiyle daha önce yapılmamış bir sistemin geliştirilme çalışmaları devam etmektedir.

2. Hologram Kaydetme

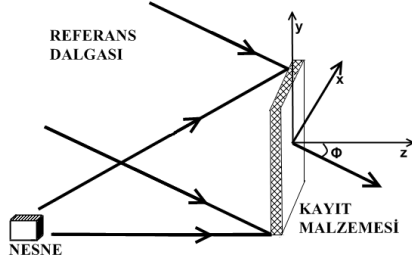
Hologram kaydetme sürecinde nesne dalgası (1) Şekil 1'deki gibi bir referans dalgasıyla (2) girişime uğratıldığı zaman kaydedilen hologram (3) olur.

$$U_o = |U_o| \cdot e^{j2\pi z / \lambda} \quad (1)$$

$$U_r = |U_r| \cdot e^{j2\pi(\sin(\Phi)y + \cos(\Phi)x) / \lambda} \quad (2)$$

$$I_h = |U_r + U_o|^2 = |U_r|^2 + |U_o|^2 + U_r^* U_o + U_r U_o^* \quad (3)$$

Burada I_h ek terimlerle birlikte nesne dalgasının büyüklüğünü ve fazını içermektedir.



Şekil 1: Hologram kaydetme

Şekil 1’de referans dalgası z-ekseni ile Φ açısı yapmaktadır ve bu düzenek eksen-dışı (off-axis) holografı olarak adlandırılır. Φ açısının sıfır olduğu durumlara ise eksen-üstü (in-line) holografı denir.

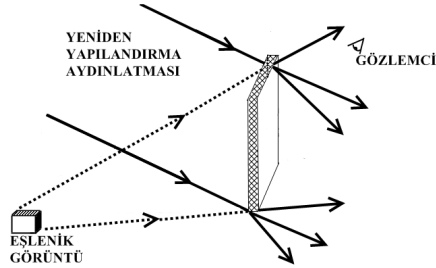
3. Hologram Yeniden Yapılandırma

Yeniden yapılandırma sürecinde kaydedilen hologram (I_h) Şekil 2’deki gibi bir referans dalgasıyla (U_r) aydınlatıldığı zaman elde edilen dalga (4)’teki gibi olur [1].

$$U_c = U_r \cdot I_h = U_r |U_r|^2 + U_r |U_o|^2 + |U_r|^2 U_o + U_r^2 U_o^* \quad (4)$$

Bu denklemde (4) ilk iki terim sıfır derece terimi (zero order term), üçüncü terim gerçek görüntü (real image) ve dördüncü terim de eşlenik/ikiz görüntü (conjugate/twin image) olarak adlandırılır.

Yeniden yapılandırılma sırasında kullanılan (4) hologramın boş uzay birim fonksiyonu (free space impulse function) ile konvolüsyonu olarak hesaplanabileceği gibi Fresnel yaklaşımı (approximation) kullanılabilecek durumlarda FFT yöntemleriyle de hesaplanabilir [2],[3].



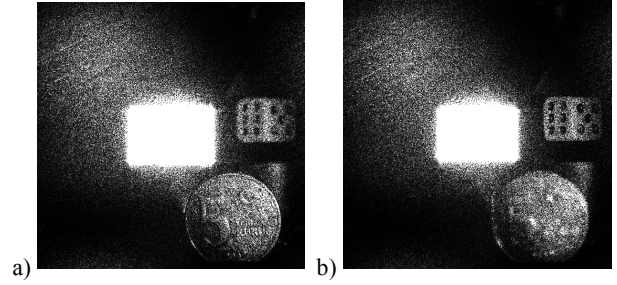
Şekil 2: Yeniden yapılandırma

35 mW gücünde 632,8 nm dalga boyunda lazerle ve piksel boyutu 9 μm olan kamerayla kaydedilen hologramın 60 cm’de yeniden yapılandırılmış hali Şekil 3’te görülmektedir. Bu şekilde gerçek nesne görüntüsünün yanında ortada sıfır derece görüntüsü ve cismin simetrik pozisyonunda eşlenik görüntü bulanık olarak görülmektedir.

Kaydedilen herhangi bir hologram farklı derinliklerde yeniden yapılandırılabilir. Şekil 3. a)’da 60 cm ve Şekil 3. b)’de 67 cm uzaklıktaki yeniden yapılandırmalarla madeni paraya ve zara odaklanıldığı görülmektedir.

4. Filtreleme

Holografide filtreleme sıfır derece terimini ve eşlenik görüntüyü temizlemek anlamına gelmektedir. Bu bölümde iki farklı filtreleme yöntemi anlatılmıştır.



Şekil 3: a) 60 cm’deki yeniden yapılandırma b) 67cm’deki yeniden yapılandırma

4.1. Çoklu Çekimle Filtreleme

4.1.1. Sıfır Derece Teriminin Filtrelenmesi

Hologram, nesne dalgasına θ kadar faz eklenerek kaydedildiği zaman [4]:

$$I_{hp}(\theta) = I_r + I_o + \exp(i\theta) \cdot U_r^* \cdot U_o + \exp(-i\theta) \cdot U_r \cdot U_o^* \quad (7)$$

Bu hologramı ilk hologramdan çıkarırsak:

$$I_h(\text{filt}) = I_h - I_{hp}(\theta) = [1 - \exp(i\theta)] \cdot U_r^* \cdot U_o + [1 - \exp(-i\theta)] \cdot U_r \cdot U_o^* \quad (8)$$

Sıfır derece görüntüsünü $\theta \neq 0$ durumlarda temizleyebiliriz ve nesne için yüksek değerini $\theta = \pi$ olduğu zaman alır. Bu yöntem için iki tane çekim (U_r ve I_h) gerekmektedir. Filtrelenmemiş hologram Şekil 4. a)’da, sıfır derece teriminin temizlenmiş hali Şekil 4. b)’te gösterilmiştir.

4.1.2. Eşlenik Görüntünün Filtrelenmesi

Bu yöntemde fazı 0, θ_1 ve θ_2 olan dalgalar kullanılarak kaydedilen I_h , $I_{hp}(\theta_1)$ ve $I_{hp}(\theta_2)$ hologramları kullanılarak sıfır derece terimi ve eşlenik görüntü temizlenmektedir [4].

$$I_h(\text{filt}) = [\exp(i\theta_1) + \exp(-i\theta_2)] I_h - \exp(i\theta_1) I_{hp}(\theta_1) - \exp(-i\theta_2) I_{hp}(\theta_2) \quad (9)$$

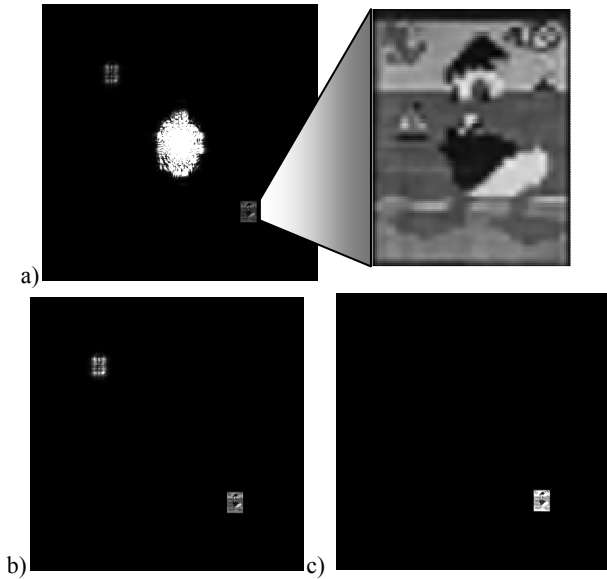
$$I_h(\text{filt}) = \left\{ \frac{[\exp(i\theta_1) - 1]}{[\exp(-i\theta_1) - 1]} - \frac{[\exp(i\theta_2) - 1]}{[\exp(-i\theta_2) - 1]} \right\} U_r^* U_o$$

$\theta_1 = 2\pi/3$ ve $\theta_2 = -2\pi/3$ olduğu zaman nesne en yüksek dalga büyüklüğüne ulaştığımız bu yöntemde üç çekim I_h , $I_{hp}(\theta_1)$ ve $I_{hp}(\theta_2)$ gerekmektedir. Bu yöntemin sonucu Şekil 4. c)’de gösterilmiştir.

4.2. Frekans Uzaklığında Filtreleme

Eş eksenli holografide yeniden yapılandırılan hologram görüntüsündeki dört terim de eş-eksenlidir fakat -d derinliğinde yer alan bir nesneyi düşündüğümüz zaman yeniden yapılandırma sonunda gerçek görüntü -d derinliğinde, eşlenik görüntü ise +d derinliğinde oluşur. Eksen-dışı holografide ise x-ekseniyle ϕ açısını yapan bir referans dalgasını ($U_r = |U_r| \cdot \exp(jk \sin(\phi)x)$) düşündüğümüz zaman elde edilen hologram şöyledir:

$$I_h(x,y) = I_r + I_o(x,y) + |U_r| \cdot \exp(-jk \sin(\phi)x) \cdot U_o + |U_r| \cdot \exp(+jk \sin(\phi)x) \cdot U_o^* \quad (10)$$

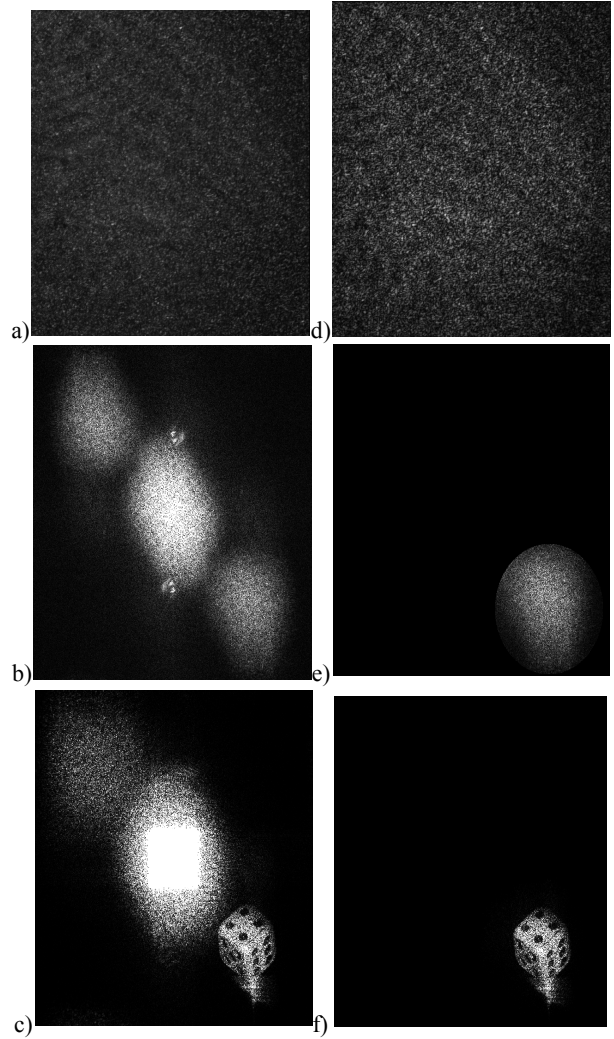


Şekil 4: a) Filtrelenmeden yeniden yapılandırılmış hologram (büyütülen kısım yanda gösterilmiştir.) b) Sıfır derece terimi filtrelenmiş hologram. c) Eşlenik görüntü temizlenmiş hologram.

Burada üçüncü terimdeki faz bize eşlenik görüntü dalgasının aydınlatma dalgasından $-\phi$ kadar bir açıyla saptığını, benzer şekilde dördüncü terimin de $+\phi$ kadar saptığını gösterir [5]. Buradan yola çıkarak kaydedilen hologramın frekans tayfına baktığımız zaman eşlenik görüntüsünün frekans bileşenlerinin $-k \sin(\phi) / 2\pi$ frekansı etrafında, sıfır derece görüntüsüne ait frekans bileşenlerinin merkezde ve gerçek görüntüye ait frekans bileşenlerinin de $+k \sin(\phi) / 2\pi$ etrafında yer aldığını görürüz. Bu bilgiyi kullanarak frekans uzayında bir kuşak-geçirgen (bandpass) filtrelemeyle gerçek görüntüyü temizleyebiliriz.

Bu yöntem kullanılarak yapılan filtreleme Şekil 5.'te verilmiştir. Şekil 5. a)'da kaydedilmiş hologram ve Şekil 5. b)'de bu hologramın frekans tayfı verilmiştir. Frekans tayfında eşlenik görüntü ve sıfır derece görüntüsüne ait frekans bileşenleriyle gerçek görüntü bileşenlerinin ayrıldığını görebiliriz. Şekil 5. e)'deki gibi basit bir pencere kullanılarak filtrelenen hologramın geri Fourier dönüşümü alınmış hali Şekil 5. d)'de verilmiştir. Şekil 5. c) ve Şekil 5. f)'te ise filtrelenmeyen ve filtrelenen yeniden yapılandırmalar görülmektedir.

Bu yöntemlerin dışında holografide filtrelemede iki önemli yöntemden daha bahsedilebilir. Bu yöntemlerden ilki için M. Liebling, T. Blu ve M. Unser [6]'da ışığın dağılma sürecini modellemek için B-spline temelli yeni bir wavelet tabanı olan Fresnelet'leri tasarlamışlardır. Aynı yazarlar tarafından yazılan [7]'de ise Fresnelet tabanı sıfır derece görüntüsü ve eşlenik görüntüsünün temizlenmesinde kullanılmıştır. Bir diğer yöntem ise L. Onural tarafından eş-eksenli holografide kullanılmak için tasarlanmıştır [8]. Geliştirilen tekrarlı algoritma ile farklı derinliklerde yapılan filtreleme sonuçlarının toplamı gerçek görüntüye yakınsamaktadır. Kaynak [9]'da ise T. Kim ve T-C. Poon tarafından, yineleme sayısı büyüdüğü zaman Nyquist oranı nedeniyle ortaya çıkan filtrenin bant genişliği sorununa bir düzeltme önerilmiştir.



Şekil 5: a) Kaydedilen hologram b) Kaydedilen hologramın frekans tayfı c) Filtreleme olmadan yeniden yapılandırma d) Frekans uzayında filtrelenen hologramın geri Fourier dönüşümü ile elde edilen hologram e) Frekans uzayında filtreleme f) Filtrelenerek yeniden yapılandırma

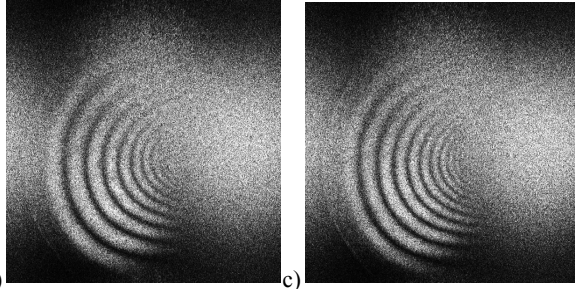
5. Durağan Yüzey Sapması

Deneyel çalışmalarda kullanılan deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 6'da verilmiştir. Bu düzende nesne dalgasıyla referans dalgası arasında yatayda 0,8 derece açı vardır.



Şekil 6: Deney düzeneği

Deneylerde 5,8 cm çapındaki hoparlöre gerilen 70 μm kalınlığındaki plastik bir membran kullanılmıştır. (Aynı hoparlör ve membran daha sonra titreşim ölçümleri için de kullanılacaktır.) Şekil 7. a)'da gösterilen yüzeyin yaklaşık olarak ortasından hoparlörün içine doğru 3 μm ve 5 μm olmak üzere iki farklı sapma uygulanmıştır. Sapma olmadan önceki ve sapma olduktan sonra kaydedilen hologramların farkları yeniden yapılandırılmıştır. Elde edilen sonuçlardaki saçak desenleri sayılarak sapma miktarları bulunmuştur. Şekil 7. b)'da yaklaşık 10 saçak ($10 \times 632.8\text{nm} / 2 \cong 3\mu\text{m}$), Şekil 7. c)'de ise yaklaşık olarak 16 saçak ($16 \times 632.8\text{nm} / 2 \cong 5\mu\text{m}$) gözlenmiştir.



Şekil 7: Dalga boyu= 632.8 nm a) Deney düzeneği b) 3 μm yüzey sapması c) 5 μm yüzey sapması

6. Zaman Ortalamalı Titreşim Çözümlemesi

Titreşen yüzeyler için pozlama süresinin titreşim periyodundan çok büyük olduğu durumlarda hologram düzlemindeki nesne dalgası [11]'de verilen denklem olan (14) olarak yazılabilir. (Pozlama süresinin titreşim periyoduna yakın olduğu durumlar için [12] incelenebilir.)

$$U_0(x, y, t) = \left[U_0(x, y) \exp \left\{ -i \left[\phi_0(x, y) + \frac{2\pi}{\lambda} a_0(x, y) (\cos \theta_e + \cos \theta_0) \sin(2\pi ft) \right] \right\} \right] \quad (11)$$

Bu denklemde titreşim frekansı f , büyüklüğü $a_0(x, y)$, ilk fazı $\phi_0(x, y)$, aydınlatma açısı θ_e ve kaydetme açısı θ_0 'dır. Yeniden yapılandırılan dalga ise (11)'in zamana göre ortalamasının alınmasıyla şöyle çıkar:

$$U(x, y) = U_0(x, y) \frac{1}{T} \int_0^T \exp \left[-\frac{2\pi}{\lambda} a_0(x, y) (\cos \theta_e + \cos \theta_0) \sin(2\pi ft) \right] dt \\ = U_0(x, y) M_T(x, y) \quad (12)$$

Burada $M_T(x, y)$ sıfırıncı dereceden birinci tür Bessel fonksiyonu olarak yazılabilir.

$$M_T(x, y) = J_0 \left[\frac{2\pi}{\lambda} a_0(x, y) (\cos \theta_e + \cos \theta_0) \right] \quad (13)$$

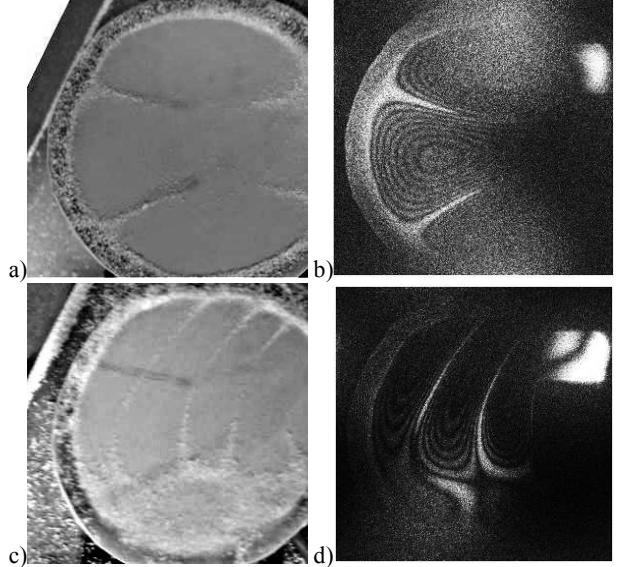
Kaydedilen ışık şiddeti (14) olarak bulunur.

$$I(x, y) = I_0(x, y) J_0^2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} a_0(x, y) (\cos \theta_e + \cos \theta_0) \right] \quad (14)$$

Bessel fonksiyonun davranışından dolayı yüzeyde oynamayan yerlerde ışık şiddetinin yüksek olmasını, Bessel fonksiyonunun sıfır olduğu yerlerde ise ışık şiddetinin az olması gerekmektedir.

Durağan yüzey sapmalarında kullandığımız hoparlör – membran düzeneğini hoparlöre değişik frekanslarda işaretler uygulayarak titreşim görüntülemesi gerçekleştirilmiştir. Holografik kayıttan önce membranın mod şekilleri başka bir metotla belirlenmiştir. Membranın üzerine çok küçük parçacıklar koyulduğunda bu parçacıklar membranın durağan noktalarına birikerek mod şeklini kabaca belirtir. Örnek olarak tuz koyarak belirlediğimiz mod şekilleri 647 Hz'de Şekil 8. a)'daki ve 1290 Hz'de Şekil 8. c)'deki gibi gözlenmiştir.

Daha sonra 100 mV işaretle çalıştırılan hoparlör 150 ms pozlama ile holografik interferometri yöntemiyle iki kere kaydedilmiş ve farkları yeniden yapılandırılmıştır. Aynı frekanslardaki mod şekilleri (647 Hz - Şekil 8. b), 1290 Hz - Şekil 8. d)) görülmektedir.



Şekil 8: Pozlama süresi= 150 ms a) 647 Hz'de tuzla gözlenen mod şekli b) 647 Hz'de holografik olarak gözlenen mod şekli c) 1290 Hz'de tuzla gözlenen mod şekli d) 1290 Hz'de holografik olarak gözlenen mod şekli

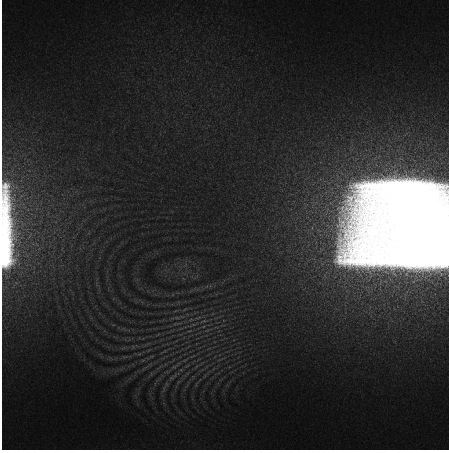
7. Stroboskopik Titreşim Çözümlemesi

Bir önceki yöntemde titreşimin zamana göre ortalaması alınarak kaydediliyordu. Stroboskopik titreşim çözümlemesi yönteminde titreşimin periyodunun sadece küçük bir kısmı üst üste kaydedilmiştir. Bunun için sürekli bir lazer ışığı titreşim periyoduyla aynı periyotta çalışan ve açık kısımları kapalı kısımlarının onda biri olan bir pervane yardımıyla kesik kesik gönderilmiştir. Bu durumda kaydedilen hologram şöyle olur:

$$I_S(x, y) \propto I_0(x, y) \cos^2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} a_0(x, y) (\cos \theta_e + \cos \theta_0) \right] \quad (15)$$

(15)'ten görüldüğü gibi bu durumda elimizde olan dağılım azalan bir fonksiyon olan Bessel fonksiyonu değil kosinüs fonksiyonudur.

Aynı deney düzeneği kullanılarak yapılan deney sonucunu Şekil 10'da görebiliriz. 430 Hz'de 100 mV işaretli titretilen membran 1,5 saniye pozlama ile holografik olarak kaydedilmiş ve bundan durağan yüzey çıkarılmıştır. Yeniden yapılandırma sırasında referans dalgası açıyla gönderilerek sıfır derece terimi kenara kaydırılmış ve saçak desene görünürlüğü artırılmıştır. Bu yöntemde titreten yüzeyin hologramında durağan yüzeyin hologramı çıkarıldığı için zaman ortalamalı titreşim çözümlemesinden farklı olarak sıfır derece görüntüsü görülmektedir.



Şekil 9: Stroboskopik olarak kaydedilen titreşim. (Pozlama süresi= 1,5 sn, $f=430$ Hz, görünürlüğü artırmak için sıfır derece terimi kenara kaydırılmıştır.)

8. Sonuçlar

Holografî gerçek anlamda üç boyutlu görüntüleme imkânı sağlaması ile önemli olmasının yanında interferometrik bir yöntem olması ile de önemlidir.

Bu makalede hologram kaydetme ve yeniden yapılandırma süreçleri anlatılmıştır. Daha sonra yeniden yapılandırma sırasında kaçınılmaz olarak ortaya çıkan sıfır derece teriminin ve eşlenik görüntünün temizlenmesi için filtreleme yöntemlerine geçilmiştir. Çoklu çekimle filtreleme ve frekans uzayında filtreleme yöntemleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Wavelet kullanarak filtreleme ve eş-eksenli holografide filtreleme yöntemleri ise kısaca tanıtılmıştır.

Durağan yüzey sapması analizi ve titreşim analizi holografinin interferometrik bir yöntem olması özelliğini kullanan önemli alanlardır. Holografik interferometri yöntemiyle durağan yüzey sapmalarında dalga boyunun yarısı olan yaklaşık 0,3 μm gibi çok küçük değişimler rahatlıkla tespit edilebilmektedir. Titreşim analizinde ise ilk önce titreşimin zamana ortalamasını alan yöntem daha sonra da titreşimin belirli bir zaman dilimi üst üste kaydeden stroboskopik yöntem anlatılmıştır.

Titreşim analizinde kullanılan iki yöntem ileride mikrofön dizisiyle birleştirilerek titreşim veya gürültü kaynağının tespitini ve incelenmesini gerektiren sanayi uygulamalarında kullanılabilir.

Bu çalışma TÜBİTAK 1001 programı altında 106T727 numaralı proje desteği ile yapılmaktadır.

9. Kaynaklar

- [1] Goodman, J. W. "An introduction to the principles and applications of holography", *Proc. of the IEEE*, vol. 59, no. 9, pp. 1292-1304, Eylül 1971.
- [2] Schnars, U. ve Jüptner, W. P. O. "Digital recording and numerical reconstruction of holograms", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 13, pp. R85-R101, 2002.
- [3] Kreis, T. M., Adams, M. ve Jüptner, W. P. O. "Methods of Digital Holography: A Comparison", *SPIE*, vol. 3098, pp. 224-233, 17 Eylül 1997.
- [4] Takaki, Y., Kawai, H. ve Ohzu, H. "Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images", *App. Opt.*, vol. 38, no. 23, pp. 4990-4996, 10 Ağustos 1999.
- [5] Cuche, E., Marquet, P., ve Depeursinge, C. "Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography", *App. Opt.*, vol. 39, no. 23, pp. 4070-4075, 10 Ağustos 2000.
- [6] Liebling, M., Blu, T. ve Unser, M. "Fresnelets: New multiresolution wavelet bases for digital holography," *IEEE Trans. Image Proc.* 12, pp. 29-43, Ocak 2003.
- [7] Liebling, M., Blu, T. ve Unser, M. "Non-linear Fresnelet approximation for interference term suppression in digital holography," *Proc. of the SPIE Conf. on Math. Imaging: Wavelet App. in Signal and Image Proc. X*, San Diego CA, USA, Ağustos 3-8, 2003, vol. 5207, pp. 553-559.
- [8] Onural L. ve Scott, P. D. "Digital decoding of in-line holograms", *Opt. Eng.*, vol. 26, no. 11, pp. 1124-1132, 1987.
- [9] Kim, T., Poon, T.-C. ve Indebetouw, G. "Twin-image removal by digital filtering and optical scanning holography", *IEEE*, pp. 191-195, 1998.
- [10] Macovski, A., Ramsey, S. D. ve Shaefer, L. F. "Time-Lapse Interferometry and Contouring Using Television Systems", *App. Opt.*, vol. 10, no. 12, pp. 2722-2727, Aralık 1971.
- [11] Rastogi, P. K., *Optical Measurement Techniques and Applications*, Artech House Inc., 1997.
- [12] Lokberg, O. J. "Use of chopped laser light in electronic speckle pattern interferometry," *App. Opt.*, vol. 18, no. 14, pp. 2377-2384, 15 Haziran 1979.