

복소공액 홀로그램을 이용한 디지털 홀로그래피 연구

신상훈¹ · 김두철² · 유영훈^{2†}

¹AP & Tec

Ⓞ 135-539 AP & Tec, 서울 강남구 수서동

²제주대학교 물리학과

Ⓞ 690-756 제주시 아라1동 1번지

(2010년 5월 4일 받음, 2010년 7월 5일 수정본 받음, 2010년 7월 27일 게재 확정)

디지털 홀로그래피에서 재생상을 재생할때 복소공액 홀로그램을 도입하여 위상 왜곡과 잡음이 제거된 재생 영상을 얻는 방법에 대하여 연구하였다. 일반적으로 디지털 홀로그램은 시료의 위상 정보 외에 위상 정보에 겹쳐져 있어 잡음으로 작용하는 허상, DC항 뿐만 아니라 측정 시스템의 위상 왜곡 현상도 모두 포함되어 기록된다. 기록된 홀로그램에서 시료의 위상 정보만을 분리하여 이를 재생하면 질 좋은 위상 재생상을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 복소공액 홀로그램을 이용하면 off-axis 및 in-line 홀로그래피에서 위상왜곡과 측정시스템이 가지고 있는 잡음을 제거 할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

Study on Digital Holography with Conjugated Hologram

Sanghoon Shin¹, Doocheol Kim², and Younghun Yu^{2†}

¹AP & Tec, Suseo-dong, Gangnam-gu, Seoul 135-539, Korea

²Department of Physics, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

(Received May 4, 2010; Revised manuscript July 5, 2010; Accepted July 27, 2010)

In this paper we have applied phase conjugated holography to DHM (digital holography microscopy) to remove phase aberration and noise. Generally, digital holography includes the phase information of the object, phase aberration terms introduced by the measurement system and noise terms (DC term and twin images). These aberrations and noise terms decrease the quality of the reconstructed phase image. We could obtain a conjugated hologram which includes only phase information of object. Experimentally we show that distortion of image and aberration of phase in a measurement system are removed using the conjugation hologram.

Keywords: Holography, Digital holography, Image reconstruction

OCIS codes: (090.0090) Holography; (090.1760) Computer holography; (100.3010) Image reconstruction techniques

I. 서 론

디지털 홀로그램 기술은 기존의 홀로그램 기술(홀로그램 건판을 사용하여 사진 촬영과 같은 방식의 물체광과 참조광 제공에 의한 3차원 영상을 재생하는 방법)로부터 출발하여 CCD(Charge Coupled Device)와 같은 동영상 기록 장치를 이용하여 실시간으로 측정 대상체의 홀로그램 데이터를 획득하고, 수치적 3차원 영상 재생의 방법으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 획득하는 방법이다. 이러한 방법은 약 30 여 년 전 개념적 방법론이 제안되어, CCD의 발전과 컴퓨터 연

산 속도의 발전으로 수치적 3차원 영상 재생의 방법이 발전하여 현재 실용적 용도에 적용하기 위한 다수의 연구들이 체계적으로 활발히 진행되고 있다^[1-6]. 이와 같이 측정 대상체의 3차원 데이터는 홀로그램 방법으로 기록함으로써 1회 촬영으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 획득하고, 수치적 재생으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 재구성하여 표시 할 수 있으므로 3차원 데이터 획득, 처리, 표시 면에 있어서 앞서 개발되어온 첨단 현미경들에 비하여 비교할 수 없을 정도의 성능 향상을 기대할 수 있다^[7-10].

디지털 홀로그래피에서 상을 재생할 때 일반적으로 참조광

†E-mail: yyhyoung@cheju.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

은 평면파이고, 물체광은 구면파로 가정하고 상을 재생한다. 그러나 참조광이 완벽한 평면파가 되기는 매우 어렵다. 이러한 이유로 재생상에 위상왜곡과 잡음이 생긴다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근 off-axis 디지털 홀로그래피에서 수치적렌즈(NPL: numerical parametric lens)^[11,12], 복소공액 홀로그램^[13] 등이 제안되었다.

본 연구에서는 off-axis 디지털 홀로그래피와 in-line 디지털 홀로그래피에 복소공액 홀로그램을 도입하여 왜곡현상의 감소에 대하여 연구하였다.

II. 이론적배경

디지털 홀로그래피 현미경에서 홀로그램 데이터는 CCD로 입력되는 물체광(O)과 참조광(R)의 간섭에 의하여 주어진다. 그림 1과 같은 off-axis 투과형 디지털 홀로그래피에 대하여 고려하자.

CCD에 형성되는 2차원 홀로그램의 빛 세기는 (1)식과 같다.

$$I_h(x_h, y_h) = |R(x_h, y_h) + O(x_h, y_h)|^2 = |R|^2 + |O|^2 + R^*O + RO^* \quad (1)$$

R^*, O^* 은 참조광과 물체광의 공액복소수이며, 참조광과 물체광의 각도는 θ 이다. $\theta = 0$ 이면 in-line 홀로그래피이고, $\theta \neq 0$ 이면 off-axis 홀로그램이다. 식 (1)에서 $|R|^2$ 은 영차 회절광이고(DC 항), $|O|^2$ 은 물체광 끼리의 간섭에 의한 항이며, 세번째와 네번째 항은 실상과 허상이다. 영상 재생면에서의 전기장은 Kirchoff-Fresnel 적분에 의해 주어지면, 디지털 홀로그래피에서 홀로그램을 저장하는 장치로 CCD를 사용한다. CCD의 사양은 픽셀 수 $N_x \times N_y$ 픽셀크기($\Delta x \times \Delta y$)와 센서크기($L_x \times L_y$)로 주어진다. CCD의 (k, l) 픽셀에 저장되는 간섭세기 정보는 식 (2)와 같다.

$$I_h(k, l) = I_h(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \sum_{k=-N_x/2}^{N_x/2} \sum_{l=-N_y/2}^{N_y/2} \delta(x - k\Delta x, y - l\Delta y) \quad (2)$$

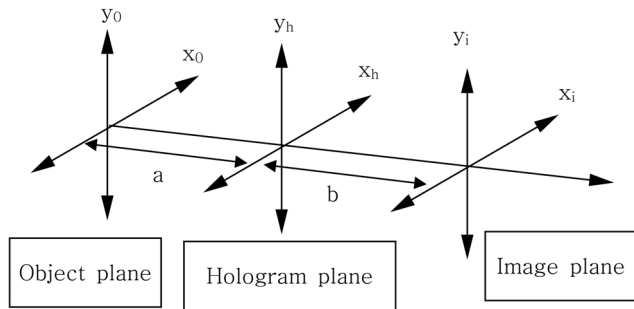


FIG. 1. Digital holography. a; distance between object and hologram, b; distance between CCD and reconstructed image plan.

식 (2)와 같이 참조광과 물체광에 의한 홀로그램 데이터는 수치적 영상 재생에 이용된다. 수치적 재생 파동은 참조광(R)과 홀로그램데이터(I_h)를 이용하여 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\Psi = RI_h = R|R|^2 + R|O|^2 + RR^*O + RRO \quad (3)$$

식 (3)은 수치적 계산이기 때문에 R값을 완전한 평면파로 가정하고 계산하거나, 실험상에서 R값을 측정하여 계산에 사용한다. 프레넬(Fresnel) 공식과 CCD의 픽셀 개수가 $N \times N$, 픽셀 간격이 $\Delta x, \Delta y$ 를 이용하면 영상이 맺히는 지점에서의 파동분포는 식 (4)와 같다^[13].

$$\Psi(m, n) = \frac{\exp(i2\pi b/\lambda)}{i\lambda b} \times FFT^{-1}[FFT(\Gamma^H I_H^F) \cdot \exp(-i\pi\lambda d(\nu_k^2 + \nu_l^2))] \quad (4)$$

여기서 λ 는 사용된 빛의 파장이고 b는 CCD에서 영상이 재생되는 곳까지의 거리, $\nu_k = k/(N\Delta x), \nu_l = l/(N\Delta y)$ 이다. 식 (4)에서 Γ 는 수치적 렌즈로, Γ^H 는 홀로그램면에서의 수치적 렌즈, I_H^F 는 필터된 홀로그램이다. 일반적으로 $\Gamma^H = R$ 을 일반적으로 사용된다. 즉 참조광 (R)을 완벽한 평면파로 가정하거나, 실험적으로 측정하여 사용한다. 그러나 실제에서는 참조광이 완벽한 평면파가 될 수 없고, 또한 실험적으로 측정하여 사용하는 경우는 매번 이 작업을 하는 것이 매우 불편하다. 이를 해결하기 위해 복소공액 홀로그램이 제안되었다. 복소공액 홀로그램을 위하여 식 (5)와 같이 참조광 (R), 물체광(O), 시료없는 물체광(O_0)을 정의하자^[13].

$$\begin{aligned} R(x, y) &= |R| \exp(i(k_x x + k_y y)) \exp(iW_R(x, y)) \\ O(x, y) &= |O(x, y)| \exp(i\phi(x, y)) \exp(iW_O(x, y)) \\ O_0(x, y) &= |O_0(x, y)| \exp(iW_0(x, y)) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 k_x, k_y 는 빛 파수이고, W_R, W_0 는 참조광과 물체광의 위상왜곡, $\phi(x, y)$ 는 시료의 위상정보이다. 복소공액 홀로그램의 목표는 W_R, W_0 와 같은 위상 왜곡이 제거된 홀로그램을 얻는 것이다. 식 (5)를 이용하여 식 (1)의 허상을 표현하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} I_H^F &= R^*O = |R||O| \exp[-(k_x x + k_y y)] \exp[i(\phi + W_O - W_R)] \\ I_H^{R,F} &= R^*O_0 = |R||O_0| \exp[-(k_x x + k_y y)] \exp[i(W_0 - W_R)] \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 I_H^F 는 시료의 위상정보(ϕ)와 왜곡정보($W_O - W_R$)를 모두 포함하고 있으나, $I_H^{R,F}$ 는 위상 왜곡정보만을 포함하고 있다. 실험적으로 $I_H^{R,F}$ 는 시료없는 얻은 홀로그램이다. 그러므로 식 (4)에서 수치렌즈 Γ^H 를 왜곡정보를 상쇄할 수 있게 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Gamma_C^H &= \exp[i \arg(I_H^{R,F})] \\ &= \exp[i(k_x x + k_y y)] \exp[-i(W_O - W_R)] \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 식 (4)의 $\Gamma^H I_H^F$ 를 바꾸어 쓰면 식 (8)과 같이 왜곡이 제거된 홀로그램을 얻을 수 있다.

$$\Gamma_C^H(m,n) I_H^F = |R| O \exp[i\phi(x,y)] \quad (8)$$

식 (8)은 복소공액 홀로그램으로 위상 왜곡이 모두 제거되었고, 또한 실상 과 DC 항이 모두 제거된 홀로그램이다.

III. 실험결과

그림 2는 투과형 디지털 홀로그래피 현미경의 개략도이다. 기본적인 구성은 마흐젠더 간섭계와 같다. 사용한 광원은 10 mW He-Ne 레이저이고, 시료를 투과한 영상을 확대하기 위하여 현미경 대물렌즈 ML1 (Mitutoyo M PLAN APO 50X, NA=0.55)을 사용하였다. 필터 N1과 N2는 간섭 문양의 명암대비가 최대인 홀로그램을 얻기 위하여 사용하였다. 렌즈 L1과 ML2 그리고 핀홀 P1은 TEM₀₀ 모드의 참조광 빛을 얻기 위하여 사용하였으며 홀로그램을 저장하기 위하여 CCD

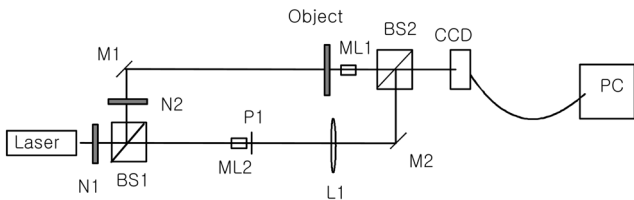


FIG. 2. Schematic diagram of transmission digital holography microscope. M1,M2 : mirrors, N1,N2; Neutral density filters, ML1, ML2; micro lenses, L1; lens, P1; Pin hole, BS1,BS2; Beam Splitters.

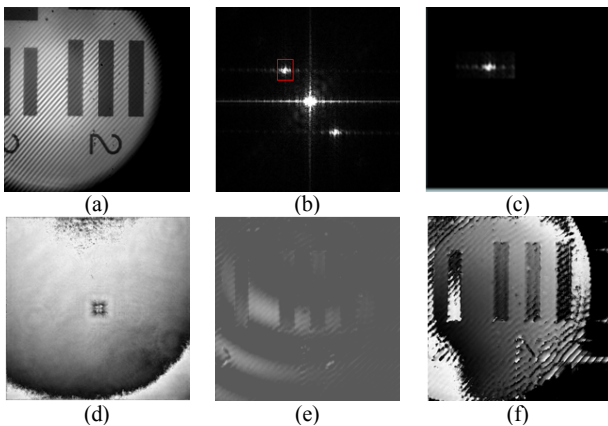


FIG. 3. Complex conjugate hologram and reconstructed image. (a) hologram(I_H), (b) hologram in spatial frequencies, (c) filtered hologram(I_H^F), (d) reconstructed phase image without object(R^*O_O), (e) complex conjugated hologram($\Gamma_C^H I_H^F$), (f) reconstructed phase image with complex conjugated hologram.

(KODAK Megaplu II)를 사용하였고, CCD의 픽셀크기는 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ 이고 픽셀 개수는 2048×2048 이다. off-axis 실험을 하는 경우는 물체광과 참조광의 각도가 1° 가 되게 하였고, in-line 실험 시는 물체광과 참조광의 각도가 0° 가 되게 하였다.

그림 3은 off-axis 디지털 홀로그래피에서 복소공액 홀로그램을 실험적으로 얻는 과정을 나타낸 것이다. 시료는 USAF의 그룹 6중 주기가 13.9 마이크로미터인 문양을 사용하였다. 그림 3(a)는 off-axis 홀로그래피로 얻은 홀로그램으로, 여기에는 식 (1)과 같이 허상, 실상, DC 항이 모두 포함되어 있다. 그림 3(b)는 그림 3 (a)를 푸리에변환 한 것이다. 그리고 그림 3(c)는 그림 3(b)중 허상부분만 남기고, 즉 그림 3(b)의 사각형 부분만 남기고 나머지는 모두 “0”으로 처리한 것으로, 이렇게 해서 필터 된 홀로그램(I_H^F)을 구할 수 있다. 그리고 그림 3(d)는 시료없이 얻은 홀로그램을 위상 재생한 것이고(R^*O_O), 그림 3(e)는 그림 3(c),(d)를 이용하여 얻은 복소공액 홀로그램이다($\Gamma_C^H I_H^F$). 그림 3(f)는 복소공액 홀로그램을 재생한 위상 이미지이다.

그림 3과 같이 복소공액 홀로그램을 이용하면 DC 항, 실상 및 위상 왜곡이 제거된 이미지를 얻을 수 있다.

그림 4는 off-axis 홀로그래피에서 복소공액 홀로그램을 이용한 것과 일반 홀로그램을 이용해서 얻은 재생상이다. 그림 4 (a)-(d)는 그림3과 같이 USAF의 그룹 6중 주기가 13.9 마이크로미터인 문양을 시료로 이용한 것이고 그림 4의 (e)(f)

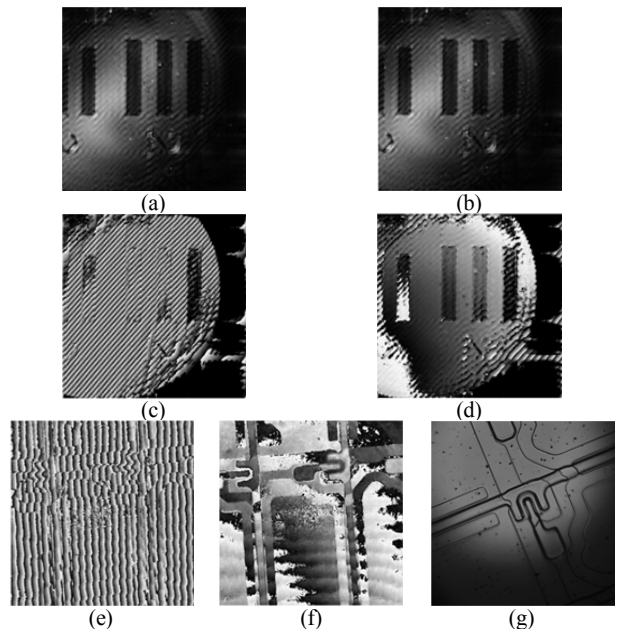


FIG. 4. Reconstructed image in off-axis digital holography. (a) reconstructed contrast image with hologram, (b) reconstructed contrast image with complex conjugated hologram, (c)reconstructed phase image with hologram, (d)reconstructed phase image with complex conjugated hologram, (e) reconstructed phase image with TFT hologram, (f)reconstructed phase image with TFT complex conjugated hologram, (g) photography of TFT.

는 그림4의 (g)와 같은 TFT(Thin Film Transistor)를 시료로 이용한 결과이다.

그림 4의 결과는 시료를 조금 기울여서 실험한 결과이다. 그림 4에서 보듯이 명암 재생상인 경우에 (그림 4 (a),(b)) 일반홀로그램과 복소공액 홀로그램의 재생상이 동일한 것을 볼 수 있다. 명암 재생상은 위상 정보를 가지고 있지 않기 때문에 시료가 약간 기울어져 있어도 재생상에는 영향을 주지 않는다. 그러나 그림 4(c) 와 (d)는 위상 재생상이다. 그림 4(c)는 일반 홀로그램으로 재생한 위상 재생상으로 시료가 기울어져 있어 즉, 위상 왜곡을 포함하고 있어 명확한 위상 재생상을 얻을 수 없으나, 그림 4(d)는 복소공액 홀로그램을 이용한 경우로 위상 왜곡이 제거되어 명확한 위상 재생상을 얻을 수 있다. 그림 4 (e),(f)의 결과는 TFT 시료에서 얻은 위상 재생상 결과인데, 그림 4 (c),(d)와 동일한 결과를 보여 주고 있다. 즉 그림 4(e)의 경우 시료가 기울어져 있어 위상 왜곡이 생겨 노이즈와 같이 작용하여 정확한 위상 이미지를 얻을 수 없으나 그림 4(f)는 위상 왜곡이 제거되어 위상 재생상을 얻을 수 있다. 그림 4 (g)는 TFT의 2차원 영상이다. 그림 4(f)와 (g)를 비교해 보면 대체적으로 같은 영상을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그림 4(f)에서 보이는 줄무늬는 시료가 빛 진행 방향에 대해 완벽하게 수직으로 되어있지 않기 때문에, 즉 빛 진행 방향에 대해 조금 기울어져 있기 때문에 생긴 위상차 결과이다.

그림 5는 in-line 홀로그래피의 결과이다. in-line홀로그래피의 경우에는 off-axis 홀로그래피와는 달리 필터 된 홀로그램을 구하는 것이 보다 어렵다. off-axis의 경우에는 그림 3(b)와 같이 공간 주파수 상에서 허상, 실상, DC항이 분리가 됨으로 필터 된 홀로그램을 쉽게 얻을 수 있으나, in-line 홀로그래피에서는 허상, 실상, DC항이 겹쳐져 있어 분리가 쉽지 않다. 필터 된 홀로그램을 얻기 위해 본 연구에서는 허상 실

상을 구분하기 위하여 4등분 분할방법^[14]과 DC 항을 제거하기 위해 평균 제거법^[15]을 이용하였다. 그림 5의 시료는 프리즘 시트이다. in-line의 경우는 시료를 기울이지 않고 참조광의 효과만을 조사하였다.

그림 5의 (a)(b)는 각각 시료가 있는 경우(R^*O)와 시료가 없는 경우(R^*O_0)의 홀로그램이다. 그림 5 (c)는 그림 5(a)를 이용하여 얻은 위상 재생상이고, (d)는 복소공액 홀로그램을 이용하여 얻은 위상 재생상이다. 그림 5(c)와 (d)의 원 부분을 보면 복소공액 홀로그램을 이용한 경우가 잡음이 적은 것을 볼 수 있다. 즉 복소공액 홀로그램을 이용하면 DC 잡음도 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그림4와 그림 5의 결과로부터 복소공액 홀로그램을 이용하면 위상 왜곡과 DC 항 잡음을 모두 줄일 수 있어 보다 질 좋은 영상을 재생 할 수 있음을 알 수 있다. 이는 디지털 홀로그램의 장점을 잘 보여주는 결과이다. 즉 디지털 홀로그램의 장점은 수치적 재생인데, 이 수치적 재생 과정에서 광학계나 측정 시스템의 잡음을 수치적으로 잘 제거 할 수 있음을 보여주고 있다.

IV. 결 론

디지털 홀로그래피에서 상을 재생할 때 일반적으로 참조광은 평면파이고, 물체광은 구면파로 가정하고 상을 재생한다. 그러나 참조광이 완벽한 평면파가 되기는 매우 어렵고, 홀로그램 측정 시 여러 위상 왜곡 현상으로 재생상에 위상왜곡과 잡음이 생긴다. 본 연구에서는 복소공액 홀로그램을 도입하여 off-axis 홀로그래피와 in-line 홀로그래피에서 재생상의 왜곡을 감소시킬 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 이러한 결과는 디지털 홀로그래피에서 노이즈를 효과적으로 줄여 명확한 위상 재생상을 얻는데 유리하며, 홀로그래피를 이용한 3차원 측정에 유용하게 이용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부 차세대신기술개발사업 지원으로 수행되었습니다.

References

1. J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," Appl. Phys. Lett. **11**, 77-79 (1967).
2. M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavski, "Reconstruction of hologram with a computer," Sov. Phys. Tech. **17**, 434-444 (1972).
3. G. K. Wernicke, O. Kruschke, N. Demoli, and H. Gruber, "Investigation of micro-opto-electro-mechanical components with a holographic microscopic interferometer," Proc. SPIE **3396**, 238-243 (1998).
4. L. Xu, X. Peng, J. Miao, and K. Asundi, "Studies of digital microscopic with application to microstructure testing," Appl.

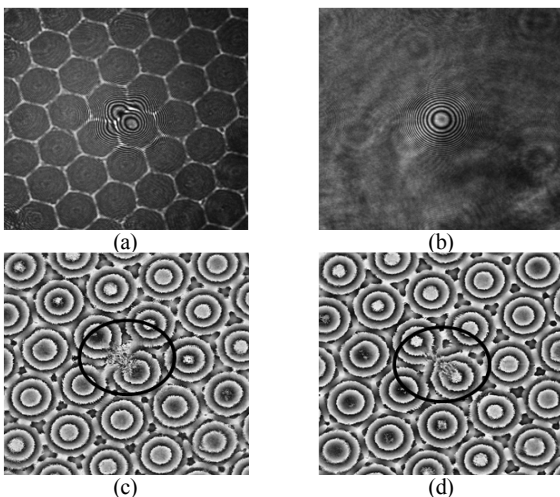


FIG. 5. Reconstructed image with hologram and complex conjugated hologram in in-line digital holography. (a) hologram, (b) hologram without object, (c) reconstructed phase image with hologram, (d)reconstructed phase image with complex conjugated hologram.

- Opt. **40**, 5046-5051 (2001).
5. H. Cho, D. Kim, Y. Yu, W. Jung, and S. Shin, "3-dimensional measurement using digital holographic microscope and phase unwrapping," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **17**, 329-334 (2006).
 6. S. Kim, H. Lee, and J. Son, "Recording of larger object by using two confocal lenses in digital holography," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **14**, 244-248 (2003).
 7. U. Schnars, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms," *J. Opt. Soc. Am.* **A11**, 2011-2015 (1994).
 8. C. Wagner, S. Seebacher, W. Osten, and W. Juptner, "Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology," *Appl. Opt.* **38**, 4812-4820 (1999).
 9. Y. Takaki and H. Ohzu, "Fast numerical reconstruction technique for high resolution hybrid holographic microscopy," *Appl. Opt.* **38**, 2204-2055 (1999).
 10. L. Xu, J. Miao, and A. Asundi, "Properties of digital holography based on in-line configuration," *Opt. Eng.* **39**, 3214-3219 (1999).
 11. T. Colomb, E. Cuche, F. Charrière, J. Kühn, N. Aspert, F. Montfort, P. Marquet, and C. Depeursinge, "Automatic procedure for aberration compensation in digital holographic microscopy and applications to specimen shape compensation," *Appl. Opt.* **45**, 851-863 (2006).
 12. E. Cuche, P. Marquet, C. Depeursinge, "Simultaneous amplitude and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms," *Appl. Opt.* **38**, 6994-7001 (1999).
 13. T. Colomb, J. Kühn, F. Charrière, and C. Depeursinge, "Total aberrations compensation in digital holographic microscopy with a reference conjugated hologram," *Opt. Exp.* **14**, 4300-4304 (2006).
 14. H. Cho, W. Jang, J. Shon, D. Kim, S. Shin, and Y. Yu, "Twin-image elimination in an in-line digital holographic microscope," *J. Korean Phys. Soc.* **52**, 1031-1035 (2008).
 15. H. Cho, J. Woo, D. Kim, S. Shin, and Y. Yu, "DC suppression in in-line digital holographic microscopes on the basis of an intensity-averaging method using variable pixel numbers," *Opt. & Laser Technology* **41**, 741-745 (2009).