

자체 홀로그램을 기준홀로그램으로 이용한 디지털 홀로그래피 연구

신상훈¹ · 조형준² · 정원기³ · 김두철² · 유영훈^{2†}

¹AP & Tec

☎ 135-539 서울시 성동구 행당동

²제주대학교 물리학과

☎ 690-756 제주시 아라1동 1번지

³전주대학교 전기전자정보통신공학부

☎ 560-759 전주시 완산구 효자동 3가 1200

(2011년 9월 1일 받음, 2011년 10월 12일 수정본 받음, 2011년 10월 17일 게재 확정)

디지털 홀로그래피에서 자체 홀로그램을 기준 홀로그램으로 이용하여 왜곡이 제거된 3차원 영상을 얻는 방법에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 반사형 off-axis 홀로그래피 현미경을 구성하여 복수 공액 홀로그램을 얻었고, 복수공액 홀로그램 중 공간 주파수가 작은 부분을 추출하여 기준 홀로그램으로 사용하여 3차원 재생을 하였다. 그리고 이 기준 홀로그램을 이용하여 기울어짐 왜곡현상을 제거하였다.

Study on Digital Holography with Self-Reference Hologram

Sanghoon Shin¹, Hyungjun Cho², Wonki Jung³, Doocheol Kim², and Younghun Yu^{2†}

¹AP & Tec, Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 135-539, Korea

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

³School of Electrical Engineering, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

(Received September 1, 2011; Revised manuscript October 12, 2011; Accepted October 17, 2011)

In this paper we have applied self-reference hologram to DHM (digital holography microscopy) to remove phase aberration. We have constructed an off-axis reflection-type digital holography microscope. We have extracted a low spatial frequency hologram from the conjugated hologram and used it as a reference hologram. Experimentally we show that distortion of image and aberration of phase in a measurement system are removed using the self-reference 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 30여

년 전 개념적 방법론이 제안되어, CCD의 발전과 컴퓨터 연산 속도의 발전으로 수치적 3차원 영상 재생의 방법이 발전하여 현재 실용적 용도에 적용하기 위한 다수의 연구들이 세계적으로 활발히 진행되고 있다¹⁻⁶⁾. 이와 같이 측정 대상체의 3차원 데이터는 홀로그램 방법으로 기록함으로써 1회 촬영으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 획득하고, 수치적 재생으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 재구성하여 표시할 수 있으므로 3차원 데이터 획득, 처리, 표시 면에 있어서 앞서 개발되어온 첨단 현미경들에 비하여 비교할 수 없을 정도

†E-mail: yyhyoung@cheju.ac.kr

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

의 성능 향상을 기대할 수 있다^[7-10].

디지털 홀로그래피에서 상을 재생할 때 일반적으로 기준 홀로그래프와 측정홀로그래프의 차이를 이용한다. 즉 기준 홀로그래프는 시료가 없을 때의 홀로그래프이고 측정홀로그래프는 시료가 있을 때의 홀로그래프로 이 둘 간의 차이를 이용하여 시료의 3차원 정보를 얻을 수 있다. 그리고 디지털 홀로그래피에서 일반적으로 참조광은 평면파이고, 물체광은 구면파로 가정하고 상을 재생한다. 그러나 참조광이 완벽한 평면파가 되기는 매우 어렵다. 이러한 이유로 재생상에 위상왜곡과 잡음이 생긴다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근 비축(off-axis) 디지털 홀로그래피에서 수치적 렌즈(NPL: numerical parametric lens)^[11, 12], 복소수공액 홀로그래프^[13] 등이 제안되었으나 이들 방법은 모두 기준홀로그래프를 필요로 한다. 3차원 정보를 얻기 위해 측정 시 기준홀로그래프를 측정해야하는 불편함이 있다. 특히, 불투명한 시료의 3차원 정보를 얻기 위해 반사형 디지털 홀로그래피 현미경을 사용하는 경우에 기준홀로그래프를 측정하기가 매우 어렵고, 수치적 방법으로 위상 왜곡을 없애는 것 또한 실제 왜곡된 요인을 모두 고려하기 어렵다. 즉 수치적 렌즈를 사용하는 것 보다 기준홀로그래프를 사용하는 것이 이론적으로 적용할 수 없는 렌즈의 수차등을 보정하기에 적합하다.

기준홀로그래프는 시료가 없는 홀로그래프로 시료의 정보가 없기 때문에 일반적으로 공간 주파수가 매우 작고, 측정 홀로그래프는 시료의 정보를 갖고 있기 때문에 공간 주파수의 범위가 작은 것부터 큰 것 까지 포함하고 있다. 그러므로 측정 홀로그래프에는 기준 홀로그래프의 정보(공간 주파수가 작은 것)와 시료의 정보를 모두 가지고 있을 수 있다. 그러므로 측정 홀로그래프에서 공간주파수가 작은 부분만 추출하여 사용할 수 있으면 이것을 기준 홀로그래프로 사용할 수 있어 따로 기준 홀로그래프를 측정하는 불편을 덜 수 있다.

본 연구에서는 디지털 홀로그래피에서 측정 홀로그래프에서 공간 주파수가 작은 부분을 추출하여 기준 홀로그래프로 사용하여 3차원 정보를 얻는 방법에 대하여 연구 하였으며, 또한 이를 이용한 왜곡현상 감소에 대하여 연구하였다.

II. 이론적배경

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

물체광은 $R = a \exp(i2\pi * x_h \sin(\theta) / \lambda)$ 와 같이 표현된다. a 는 물체광의 진폭, x_h 는 홀로그래프면의 좌표, 참조광과 물체광의 각도는 θ 이고 λ 는 사용한 광의 파장이다. $\theta = 0$ 이면 축상(in-line) 홀로그래피이고, $\theta \neq 0$ 이면 비축(off-axis) 홀로그래프이다. CCD에 형성되는 2차원 홀로그래프의 빛 세기는 식 (1)과 같다.

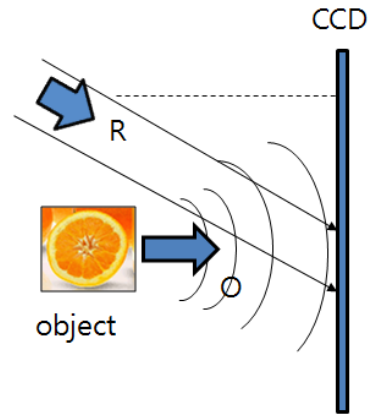


FIG. 1. Off-axis digital holography O ;object wave, R; reference wave.

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

R^*, O^* 은 참조광과 물체광의 공액복소수이며, 식 (1)에서 $|R|^2$ 은 영차 회절 광이고(DC 항), $|O|^2$ 은 물체광 거리의 간섭에 의한 항이며, 세 번째 와 네 번째 항은 실상과 허상이다. 영상 재생면에서의 전기장은 Kirchhoff-Fresnel 적분에 의해 주어지며, 디지털 홀로그래피에서 홀로그래프를 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)과 같다.

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

식 (2)과 같이 참조광과 물체광에 의한 홀로그래프 데이터는 수치적 영상 재생에 이용된다. 수치적 재생 파동은 참조광(R)과 홀로그래프데이터(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 수식적 계산이기 때문에 R 값을 완전한 평면파로 가정하고 계산하거나, 실험상에서 R 값을 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)과 같다^[13].

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

여기서 λ 는 사용된 빛의 파장이고 d 는 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, Γ_H^F 는 필터된 홀로그램이다. 일반적으로 $\Gamma^H = R$ 을 일반적으로 사용된다. 즉 참조광 (R)을 완벽한 평면파로 가정하거나 혹은 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 복수공액 홀로그램이 제안되었다. 복수공액 홀로그램을 위하여 식 (5)과 같이 참조광(R), 물체광(O), 시료없는 물체광(O_0)을 정의하자^{13, 14}.

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

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

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

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 시료 없이 얻은 홀로그램이다.

식 (6)의 I_H^F 에서 시료의 위상정보와 왜곡정보의 공간 주파수가 분리 될 수 있다면 $I_H^{R,F}$ 대신 I_H^F 에서 추출한 정보를 이용하여 기준 홀로그램으로 사용할 수 있다. 또한 이러한 기준 홀로그램은 위상 왜곡정보 ($\exp[i(W_0 - W_R)]$)를 포함하고 있으므로 이를 보정 할 수 있다.

III. 실험결과

Fig. 2는 반사형 디지털 홀로그래피 현미경의 개략도이다. 기본적인 구성은 마흐젠더 간섭계와 같다. 사용한 광원은 10 mW He-Ne 레이저이고, 시료를 투과한 영상을 확대하기 위하여 현미경 대물렌즈(Mitutoyo M PLAN APO 50X, 초점거리=4 mm, NA=0.55)을 사용하였다. 홀로그램을 저장하기 위하여 CCD(KODAK Megaplas II)를 사용하였고, CCD의 픽셀크기는 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ 이고 픽셀 개수는 1024x1024 이다. 물체광과 참조광의 각도가 1° 가 되게 하였으며, 시료는 TFT(Thin Film Transistor)를 사용하였다.

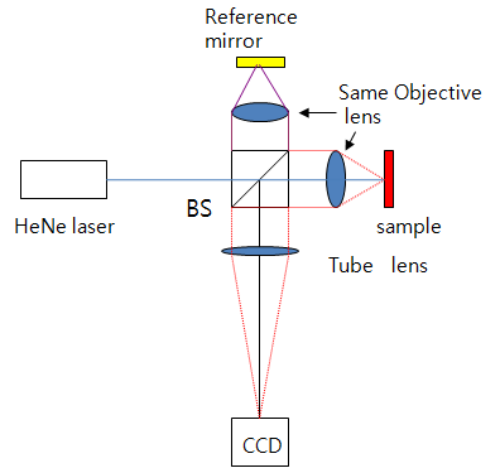


FIG. 2. Schematic diagram of reflection digital holography microscope. BS: beam splitter.

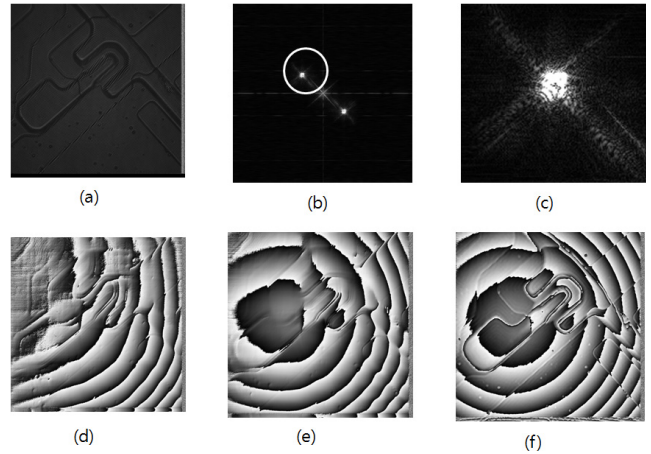


FIG. 3. Hologram and self-reference hologram. (a) hologram, (b) Fourier transform of hologram, (c) fourier transform signal of virtual image, (d),(e) inverse fourier transform with 2×2 pixels and 7×7 pixels respectively, (f) filtered hologram(I_H^F).

Fig. 3는 off-axis 디지털 홀로그래피에서 측정된 홀로그램을 이용하여 기준 홀로그램을 실험적으로 얻는 과정을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 off-axis 홀로그래피로 얻은 홀로그램으로, 여기에는 식 (1)과 같이 허상, 실상, DC 항이 모두 포함되어있다. Fig. 3(b)는 Fig. 3 (a)를 푸리에변환 한 것이다. 그리고 Fig. 3(c)는 Fig. 3(b)중 허상부분(Fig. 3(b)의 원 안)만 확대한 것이다. Fig. 3(c) 중 가운데 밝은 부분의 픽셀수는 대략 32×32 이다. Fig. 3(c)에서 중앙부분이 공간 주파수가 작은 부분이고 외곽 부분이 공간 주파수가 큰 부분이다. Fig. 3(c)중에서 중앙의 2×2 픽셀만을 추출하여 역 푸리에 변환한 것이 Fig. 3(d), 7×7 만을 추출하여 역 푸리에 변환한 것이 Fig. 3(e)이다. 이 과정에서 기준 홀로그램의 크기는 동일하다. 즉 푸리에 변환 후 원하는 주파수 범위의 데이터만 취하고 그 외의 데이터 부분은 "0"으로 변환한다. Fig. 3(d)는 기준 홀로그램으로 사용하기 부적절할 정도로 파면이 왜곡

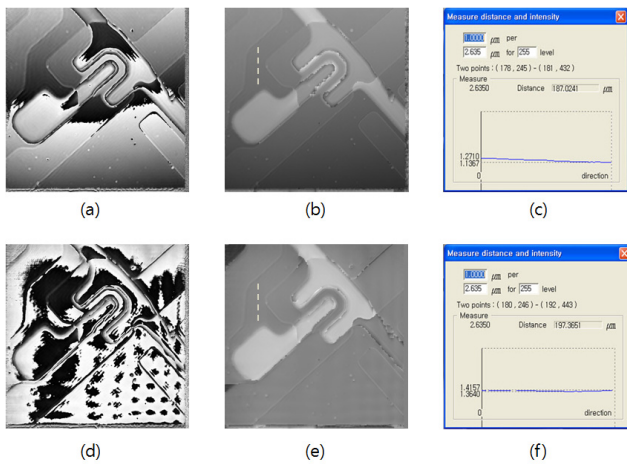


FIG. 4. Unwrapped gray level image with and without reference hologram. (a), (c) reconstructed phase image without and with reference hologram respectively, (b),(e) unwrapped gray level image with (a) and (d) respectively, (c),(f) height measurement along dotted line in (b) and (e) respectively.

되어 있는 것을 볼 수 있으나, Fig. 3(e)는 기준 홀로그래프로 사용 할 수 있을 정도로 파면이 잘 재생되어 있음을 볼 수 있다. 그러므로 측정 홀로그래프 중 공간 주파수가 작은 부분만 추출하여 기준 홀로그래프로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 즉 시료 없이 기준 홀로그래프를 측정하지 않고 자체 홀로그래프에서 기준 홀로그래프를 만들 수 있음을 알 수 있다. Fig. 3(f)는 Fig. 3(c) 중에서 중앙의 50x50 픽셀을 추출하여 역 푸리에 변환 한 것으로 Fig. 3(e)와 비교하면 시료의 위상 정보와 기준 홀로그래프의 위상 정보를 모두 갖고 있음을 볼 수 있다(식 (6)의 I_H^R). 그러나 기준홀로그래프의 모양은 존플레이트 형태와 유사하게 나와야 하나 단차가 있는 샘플에서(높은 공간 주파수를 가지고 있는 시료) 단차 부분에서 존플레이트 모양이 다소 벗어나게 된다. 그러므로 자체 홀로그래프를 기준 홀로그래프로 완벽하게 사용하기 위해서는 공간 주파수가 작은 시료, 즉 형상이 부드러운 시료가 보다 더 적합하다.

그리고 왜곡 현상을 보정하기 위하여 최근에 연구된 방법은 수치적 렌즈를 도입하고 기준 홀로그래프 없이 수치적으로 위상 왜곡을 보정하는 방법이 있다^[13]. 수치적 렌즈를 이용하여 수치적으로 보정하는 방법은 기준 홀로그래프를 고려할 필요가 없으므로 매우 편리하나 수치적으로 매우 복잡하다. Fig. 4(a),(b),(c) 는 수치적 렌즈를 도입하고 수치적으로 왜곡을 보정 한 결과이고, Fig. 4(d),(e),(f)는 자체 홀로그래프를 기준홀로그래프로 이용하여 왜곡을 보정 한 결과이다. Fig. 4(a),(d)는 위상이미지이고, Fig. 4(b),(e) 위상 이미지와 위상 펼침을 이용하여 얻은 그레이레벨의 3차원 이미지이다. 위상 펼침은 FLYN 방식을 이용하였다[15]. 그리고 Fig. 4(c),(f)는 위상 왜곡이 잘 보정 되었는지를 확인하기 위하여 Fig. 4(b),(e)의 점선부분의 높이를 측정한 결과이다. TFT 제작 시 이 부분의 높이는 같은 부분이다. 자체홀로그래프를 기준 홀로그래프로 이용한 경우 높이차가 약 0.5 μm 이고(Fig. 4(f)), 수

치적렌즈를 이용하여 수치적으로 보정한 경우는 약 1.5 μm 이다(Fig. 4(c)). 이결과는 수치적렌즈를 이용한 수치적 보정보다는 자체 홀로그래프를 기준 홀로그래프로 이용한 경우가 기울어짐에 위한 위상 왜곡을 더 잘 보정하였음을 알 수 있다. 물론 수치적렌즈를 이용하여 수치보정을 좀 더 정밀히 하면 기울어짐에 의한 위상 왜곡을 좀 더 잘 보정 할 수 있으나 이 작업은 많은 시간과 반복 작업을 요구한다. 그러므로 자체홀로그래프를 이용하여 기준 홀로그래프를 만들어 이용하면 좀 더 정확하게 위상 보정을 할 수 있다.

IV. 결 론

디지털 홀로그래피에서 상을 재생할 때 일반적으로 참조광은 평면파이고, 물체광은 구면파로 가정하고 상을 재생한다. 그러나 참조광이 완벽한 평면파가 되기는 매우 어렵고, 홀로그래프 측정 시 여러 위상 왜곡 현상으로 재생상에 위상왜곡과 잡음이 생긴다. 그래서 일반적으로 시료의 정확한 위상 정보를 얻기 위해서는 기준 홀로그래프를 이용한다. 이러한 기준 홀로그래프는 홀로그래프 시스템에서 시료가 없는 상태에서 측정 하여 사용한다. 그리고 불투명한 시료인 경우에 기준홀로그래프를 측정하기가 매우 어렵고, 수치적 방법으로 위상왜곡을 없애는 것 또한 실제 왜곡된 요인을 모두 고려하기 어렵다. 본 연구에서는 측정된 홀로그래프에서 공간 주파수가 작은 부분만을 추출하여 기준 홀로그래프로 사용하여 시료의 위상 정보를 얻는 방법에 대하여 연구하였고, 그 결과 측정된 홀로그래프에서 공간 주파수가 작은 부분만을 추출하여 사용한 홀로그래프가 기준 홀로그래프로 적절히 사용할 수 있음을 확인 하였고, 이를 이용하여 기울어짐에 의해 발생 하는 위상 왜곡을 감소시킬 수 있음을 실험적으로 확인 하였다. 이러한 결과는 디지털 홀로그래피에서 위상 왜곡을 효과적으로 줄여 정확한 3차원 데이터를 얻는데 유리하며, 기준 홀로그래프가 필요 없으므로 보다 쉽게 3차원 측정에 홀로그래피를 이용할 수 있다.

References

1. J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77-79 (1967).
2. 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).
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. Asundidlau, "Studies of digital microscopic holography with application to microstructure testing," *Appl. 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. A* **11**, 2011-2015 (1994).
8. E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, "Spatial filtering for zero-order and twin image elimination in digital off-axis holography," *Appl. Opt.* **39**, 4070-4075 (2000).
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, and 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. Charriere, and C. Depeursinge, "Total aberrations compensation in digital holographic microscopy with a reference conjugated hologram," *Opt. Express* **14**, 4300-4304 (2006).
14. S. Shin, D. Kim, and Y. Yu, "Study on digital holography with conjugated hologram," *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **21**, 146-150 (2010).
15. D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, *Two-dimensional Phase Unwrapping* (John Wiley & Sons, New York, USA, 1998), Chapter 4.