

디지털 홀로그래피 현미경과 위상 편리를 이용한 3차원 측정

조형준 · 김두철 · 유영훈[†]

제주대학교 물리학과

⑨ 690-756 제주시 아라1동 1번지

정원기

전주대학교 전기전자정보통신 공학부

⑨ 560-759 전라북도 전주시 완산구 효자동 1200

신상호

AP & Tec.

⑨ 462-727 성남시 중원구 상대원동 442-5 쌍용IT트윈타워 2차 202호

(2006년 6월 14일 받음, 2006년 8월 9일 수정본 받음)

マイクロミテ イハ ムチの 2차원 및 영상과 3차원 영상을 동시에 측정하기 위하여 off-axis 투과형 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하였다. 그리고 3차원 영상을 얻기 위하여 Mask-Cut 위상 편리를 알고리즘을 사용하였다. 측정 결과 2차원 상에는 $0.8 \mu\text{m}$ 이하의 문양도 측정할 수 있음을 확인하였다. 그리고 마이크로미터 이하 물체의 2차원 영상과 3차원 영상을 동시에 측정 할 수 있음을 확인하였다.

주제어 : Holography, Computer holography, Phase retrieval.

I. 서 론

디지털 홀로그래피 기술은 30 여년전부터 개발되어 온 기술이고 비파괴 검사, 암호화 기술, 3차원 인식(3D Vision) 그리고 홀로그램 현미경 분야에 그 응용을 위하여 실용화 기술에 근접하는 연구가 진행되어 오고 있다^[1-5]. 이러한 디지털 홀로그래피 기술은 CCD(Charged Coupled Device)를 홀로그램 입력 장치로 사용하여 실시간으로 대상체의 홀로그램 데이터를 입력받을 수 있다. 이러한 장점은 고전 홀로그래피에서는 할 수 없었던 실시간 기록이 가능하다는 큰 장점이다. 이렇게 입력받은 디지털 홀로그램 데이터를 수치적 회절 계산 방법을 통하여 3차원 데이터를 추출한다. 홀로그램의 수치적 재생 방법은 Goodman 과 Laurence 에 의해서 30년 전에 제안된 것이며, 이러한 수치적 재생은 Kronrod등에 의하여 실현 되었다^[1,2]. 홀로그래피 플레이트(Holography Plate)를 사용하는 고전적인 홀로그래피와 비교하면 디지털 홀로그래피(Digital Holography)는 화학적 홀로그램 생성 과정을 생략 할 수 있어 간편하며, 컴퓨터의 연산 속도의 발전으로 디지털 홀로그래피는 3차원 상을 필요로 하는 다수의 응용분야에서 관심을 가지게 되었다^[6-9].

디지털 홀로그래피에서 수치적으로 얻은 위상 정보를 이용

하여 3차원 이미지를 생성할 때 위상 접힘(Phase wrapping) 문제를 해결하여야 한다. 즉 측정 대상 체의 실제 위상차이는 $\pm \pi$ 라디안 이상 일 수 있으나, 디지털 홀로그래피에서 측정되는 위상차는 항상 $\pm \pi$ 라디안 이하이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Goldstein은 편친 알고리즘(unwrapping algorithm)을 개발하여 측정된 접힌 위상을 이용하여 실제 위상차를 구할 수 있었다^[10]. 최근에는 이러한 편친 위상 알고리즘을 좀 더 정확하고, 실시간 적으로 3차원 영상을 얻을 수 있는 알고리즘을 개발하는 연구들이 진행 중이다^[11,12].

일반적으로 마이크로미터 이하의 문양은 고배율 현미경을 이용하여 측정할 수 있다. 그러나 일반적인 현미경으로는 3 차원 측정이 가능하지 않기 때문에 이를 극복하기 위하여 공초점 현미경을 사용하고 있다. 공초점 현미경은 평면 해상도가 매우 좋고 3차원 측정도 가능하기 때문에 많이 사용되나, 측정 시간이 길다는 단점이 있다.

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하면서 마이크로미터 이하 구조체의 2차원 및 3차원 상을 동시에 얻기 위하여 off-axis 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하고, 실험적으로 마이크로미터 이하의 물체의 홀로그램 데이터를 생성한 후 수치적 영상 재생과, 위상 편리(unwrapping) 알고리즘을 이용한 3차원 상 구현에 대하여 연구하였다.

[†]E-mail: yyhyoung@cheju.ac.kr

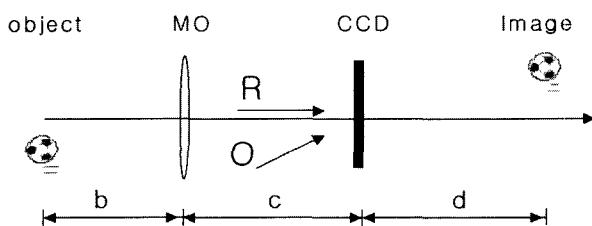


그림 1. 디지털 홀로그래피 현미경 구성과 영상 재생. MO: 확대렌즈, R: 참조광, O: 물체광, b: 물체와 렌즈간의 거리, c: 렌즈와 CCD간의 거리, d: CCD와 영상 재생 면까지 거리.

II. 이론적 배경

2.1 디지털 홀로그래피 현미경의 기록과 재생

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

CCD에 형성되는 2차원 홀로그램의 빛 세기는 (1)식과 같다.

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

R^* , O^* 은 참조광과 물체광의 공액복소수이며, 참조광과 물체광의 각도는 θ 이다. 디지털 홀로그래피와 디지털 홀로그래피 현미경의 차이는 물체광이 렌즈(MO)에 의한 확대 유무만 다르다. 일반적으로 디지털 홀로그래피에서 홀로그램을 저장하는 장치로 CCD를 사용한다. CCD의 사양은 픽셀 수 $N_x \times N_y$, 픽셀크기($\Delta x \times \Delta y$)와 센서 크기($L_x \times L_y$)로 주어진다. CCD의 (k, l) 픽셀에 저장되는 간섭세기 정보는 (2)식과 같다^[13,14].

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

(2)식과 같이 참조광과 물체광에 의한 홀로그램 데이터는 수치적 영상 재생에 이용된다. 수치적 재생 파동은 참조광과 홀로그램데이터(I_h)를 이용하여 (3)식과 같이 표현된다.

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

첫 번째 항과 두 번째 항은 참조광 및 물체광만에 의한 0차 회절이고, 세 번째 항은 혀상, 네 번째 항은 실상이다. off-axis 홀로그램은 in-line 홀로그램과는 달리 (3)식의 각 항에 해당되는 영상이 다른 위치에 생성된다. Fresnel 공식을 이용하여 영상이 맺히는 지점에서의 파동분포는 (4)식과 같다^[13,14].

$$\begin{aligned} \Psi(\xi, \eta) &= A \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \\ &\times \iint I_h(x, y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)\right] dx dy \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 λ 는 사용된 빛의 파장이고 d 는 CCD에서 영상이 재생되는 곳까지의 거리, A 는 상수이다. (4)식은 $I_h(x, y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right]$ 을 공간 주파수 공간 $(\xi/\lambda d, \eta/\lambda d)$ 으로 Fourier 전환 한 것이다. 일반적으로 (4)식을 계산하기 위하여 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용한다. (4)식은 복소수이기 때문에 재생 영상은 (5)식과 같이 얻어진다.

$$I(m, n) = \operatorname{Re}[\Psi(m, n)]^2 + \operatorname{Im}[\Psi(m, n)]^2 \quad (5)$$

그리고 위상 영상은 (6)식과 같이 주어진다.

$$\phi(m, n) = \arctan\left\{\frac{\operatorname{Im}[\Psi(m, n)]}{\operatorname{Re}[\Psi(m, n)]}\right\} \quad (6)$$

(5)식과 (6)식을 이용하여 2차원 영상과 3차원 영상을 구현 할 수 있다.

2.2 위상 편침 이론

간섭을 이용한 측정이 정밀 측정에 매우 유용하다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 간섭 문양을 이용하여 측정할 수 있는 위상(ϕ) 범위는 $-\pi < \phi < \pi$ 이다. 실제의 위상차가 이 범위를 벗어나면 간섭을 이용하여 실제 데이터를 얻는 것은 매우 어렵다. 즉 위상차 ϕ 에 의한 간섭세기와 $\psi = \phi + 2\pi n$ (n=정수)에 위한 간섭세기가 같기 때문이다. π 이상의 위상차를 측정하기 위한 방법으로는 주로 수치적 해석을 통한 위상 편침(phase unwrapping) 알고리즘에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 1차원 위상 편침은 Itoh^[15]의 이론이 많이 사용되고 있다. 접힌 위상과 실제위상의 관계는 다음과 같다.

$$W\{\phi(n)\} = \psi(n) = \phi(n) + 2\pi k \quad (7)$$

여기서 W 는 접힘 작용자(wrapping operator)이고 $\psi(n), \phi(n)$ 은 각각 접힌 위상과 실제위상이고, k 는 정수이다. W 는 항상 $\psi(n)$ 이 $-\pi < \psi(n) < \pi$ 이 되도록 한다. Itoh의 계산에 의하면 접힌 위상의 차이와 실제위상의 차이는 다음과 같다.

$$\Delta\{\phi(n)\} W\{\Delta\{\psi(n)\}\} \quad (8)$$

그러므로 실제 위상은 다음과 같이 구할 수 있다.

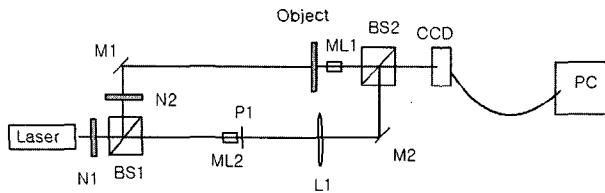


그림 2. 투과형 홀로그래피 현미경 개략도. M1,M2 : mirrors, N1,N2 : - Neutral density filters, ML1, ML2 : micro lenses, L1 : lens, P1 : Pin hole, BS1, BS2 : Beam Splitters.

$$\phi(m) = \phi(0) + \sum_{n=0}^{m-1} W\{\Delta\psi(n)\} \quad (9)$$

(9)식은 위상 필터에 의한 위상은 접힌 위상차를 이용하여 구할 수 있음을 보여 주고 있다.

III. 실험장치

그림 2는 off-axis 투과형 홀로그래피 현미경의 개략도이다. 참조광 여기서 참조광의 방향을 M2 미러로 바꿀 수 있으며 기본적인 구성은 마흐젠더 간섭계와 같다. 사용한 광원은 10mW He-Ne 레이저이고, 시료를 투과한 영상을 확대하기 위하여 현미경 대물렌즈 ML1 (Mitutoyo LWD 100X, NA=0.9)을 사용하였다. 필터 N1과 N2는 간섭 문양의 명암 대비가 최대인 홀로그램을 얻기 위하여 사용하였다. 렌즈 L1과 ML2 그리고 핀홀 P1은 TEM00 모드의 참조광 빛을 얻기 위하여 사용하였으며 홀로그램을 저장하기 위하여 CCD(KODAK Megaplus II)를 사용하였고, CCD의 픽셀크기는 $7.4\mu\text{m} \times 7.4\mu\text{m}$ 이고 픽셀 개수는 2048×2048 이다. 본 연구에서는 CCD의 위치를 ML1의 초점거리에서 20cm 떨어진 지점에 위치하였고 참조광과 물체광이 겹치는 각도는 2.46도 이내로 고정하였다. 이는 CCD가 갖는 픽셀사이즈의 한계로 2.46도 이상인 경우에 간섭무늬의 기록이 가능하지 않기 때 문이며 같은 이유로 사용된 대물렌즈의 발산각도를 고려하여 CCD의 위치를 20cm 만큼 떨어뜨렸다.

시료는 다음 그림과 같이 반도체 제작에서 많이 사용되는 line/space 문양과 홀 문양을 제작하여 사용하였다.

2차원 영상을 얻기 위해 그림 3 (a)와 같이 빛이 투과하는 부분과 빛이 투과하지 않는 부분이 있는 일반 포토마스크 형태의 시료를 제작하였고, 3차원 영상을 얻기 위해서 두께 차이가 있는 그림 3 (b),(c)와 같은 시료를 제작하였다. 그림 3에서 p는 문양의 주기이고, z는 위상차를 주기 위해서 식각 작업으로 만든 깊이이다. 시료 A와 B의 주기 p는 $0.8\mu\text{m}$ 에서 $3.6\mu\text{m}$ 까지 여러 주기로 제작하였고, 시료 C의 주기 p는 $1.6\mu\text{m}$ 에서 $4\mu\text{m}$ 까지 여러 주기로 제작하였으며, 시료 B와 C의 깊이 z는 200 nm 에서 800 nm 까지 다양하게 제작하였다. 제작된 시료를 in-line SEM 과 AFM 으로 측정한 결과 주기 오차는 $\pm 10\text{ nm}$ 이었으며, 깊이 오차는 $\pm 18\text{ nm}$ 였다.

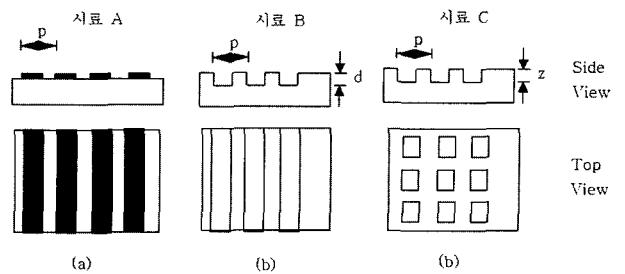


그림 3. 시료 A; Chrome이 있는 Line and Space 문양, 시료 B; Chrome이 없고 깊이 차이가 있는 Line and Space 문양. 시료 C; Chrome이 없고 깊이 차이가 있는 홀 문양, p; 주기, z; 깊이.

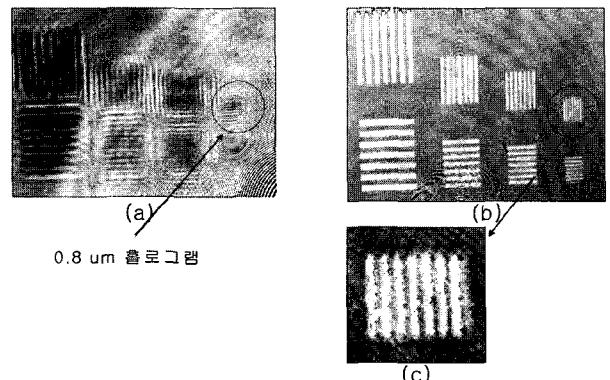


그림 4. 홀로그램과 재생영상. (a) 시료 A의 홀로그램, (b) CCD에서 60cm 떨어진 지점에 재생한 영상. (c) 재생된 영상 중 $0.8\mu\text{m}$ 주기 문양의 확대 모양.

IV. 실험결과

그림 4는 그림 3의 시료A의 홀로그램과 CCD에서 60cm 떨어진 지점에 수치적으로 재생한 영상이다. 수치적으로 계산한 홀로그램 데이터는 실험장치에 의한 위상 왜곡을 제거한 데이터를 사용하였다. 즉 시료를 삽입한 후 얻은 홀로그램 데이터와 시료 없이 얻은 홀로그램 데이터의 차이를 사용하였다.

시료A는 다양한 주기로 만들어져 있어 실험 결과도 여러 주기의 홀로그램과 문양이 재생된 것을 그림 4 (a), (b)에서 알 수 있다. 그림 4(a)에서 보면 0차 회절광의 영향으로 줄무늬 모양의 간섭 모양이 있음을 알 수 있다. 문양 중 주기가 가장 작은 $0.8\mu\text{m}$ 주기의 문양이 잘 재생되었음을 그림 4(c)로부터 알 수 있고, $1.28\mu\text{m}$, $1.6\mu\text{m}$ 주기 문양도 잘 재생되었음을 그림 4로부터 알 수 있다. 재생 영상 그림 4(c)를 보면 0차 회절광의 영향으로 줄무늬 모양의 간섭 모양이 있고, 이로 인해 물체의 경계부분 모양이 선명하지 않음을 알 수 있다. 문양의 경계부분이 보다 선명한 영상을 얻기 위해서는 0차 회절광을 완벽하게 제거 할 수 있는 방법이 요구된다. 재생된 영상으로부터 측정된 주기는 각각 $0.81 \pm 0.07\mu\text{m}$, $1.22 \pm 0.02\mu\text{m}$, $1.6 \pm 0.02\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 상대적으로 작은

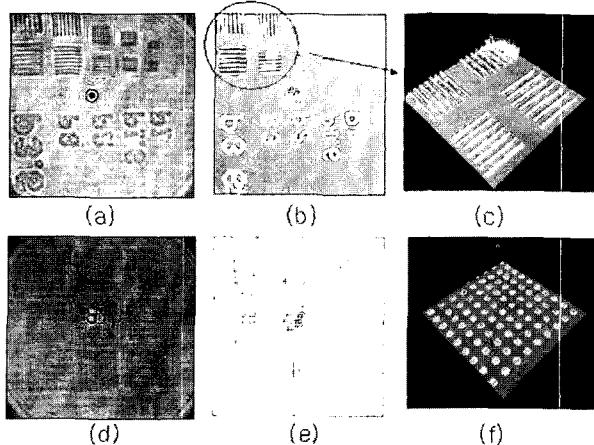


그림 5. 깊이 $d=400 \text{ nm}$ 인 시료의 홀로그램, 위상 영상 및 3차원 영상. (a) 시료 B의 홀로그램, (b) (a)의 위상 영상, (c) 시료 B의 3차원 영상, (d) 시료 C의 홀로그램, (e) (d)의 위상 영상, (f) 시료 C의 3차원 영상.

$0.8 \mu\text{m}$ 주기 문양의 오차가 큰 것은 0차 회절광의 영향을 완벽하게 제거하지 못하여 문양의 경계부분이 상대적으로 불분명해서 생긴 것으로 생각된다. 그림 4의 데이터로부터 본 연구에 사용된 디지털 홀로그래피 현미경이 μm 이하 영역까지 측정 할 수 있음을 알 수 있었다.

3차원 측정을 위하여 시료 B와 C를 사용하였다. 사용한 시료 B의 주기 p 는 $0.8 - 3.6 \mu\text{m}$ 이고 깊이 d 는 $200 \text{ nm}, 400 \text{ nm}$ 이고, 시료 C의 주기는 $1.6 \mu\text{m} - 4 \mu\text{m}$ 이고 깊이 z 는 $200 \text{ nm}, 400 \text{ nm}$ 이다.

깊이 $z=400 \text{ nm}$ 시료 B, 시료 C의 홀로그램과 위상 재생 영상과 3차원 영상이 그림 5와 같다.

여기서 위상 재생은 식(6)을 사용하였다. 위상 재생을 위한 홀로그램 데이터는 실험장치에 의한 위상 왜곡을 제거한 데이터를 사용하였다. 즉 시료를 삽입한 후 얻은 홀로그램 데이터에서 얻은 위상과 시료 없이 얻은 홀로그램 데이터에서 얻은 위상의 차이를 사용하였다. 그림 5 (a)와 (d)는 시료 B와 C의 홀로그램, (b),(e)는 거리 150cm 에서 재생된 시료 B와 C의 위상 영상이고, (c),(f)는 위상 편침 알고리즘을 이용하여 구성한 3차원 영상이다. 위상 재생 영상으로부터 3차원 영상을 구하기 위하여 Mask-Cut 알고리즘을 이용하였다^[16]. 그리고 정확한 3차원 영상을 얻기 위해서는 신호 대 잡음비가 좋은 2차원 위상 영상이 필요하다. 신호 대 잡음비가 좋은 2차원 위상 영상을 얻기 위하여 측정기 노이지를 줄이기 위하여 CCD 데이터를 다음과 같이 처리하였다.

$$\Psi(i,j) = \sum_{k,l=-1,0,1} \phi(i+k, j+l) a_{kl}, a_{kl} = \begin{pmatrix} 0.075 & 0.125 & 0.075 \\ 0.125 & 0.2 & 0.125 \\ 0.075 & 0.125 & 0.075 \end{pmatrix}$$

$\phi(a,b)$ 는 CCD 데이터이고, $\Psi(a,b)$ 는 영상 처리를 위하여 가공된 데이터이다. 이와 같이 데이터를 가공하는 것은 인접

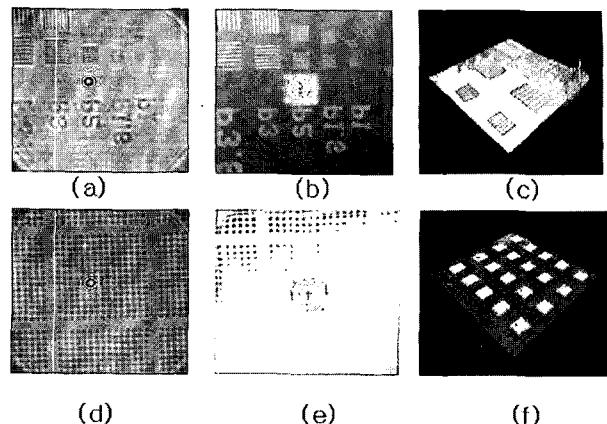


그림 6. 깊이 $d=200 \text{ nm}$ 인 시료의 홀로그램, 위상 영상 및 3차원 영상. (a) 시료 B의 홀로그램, (b) (a)의 위상 영상, (c) 시료 B의 3차원 영상, (d) 시료 C의 홀로그램, (e) (d)의 위상 영상, (f) 시료 C의 3차원 영상.

한 CCD 픽셀간의 간섭노이즈를 줄이기 위하여 많이 사용되는 방법이다^[17]. 그림 5의 (c)와 (f)로부터 얻어진 깊이는 각각 $385 \pm 35 \text{ nm}, 376 \pm 28 \text{ nm}$ 였다. 이 결과는 시료 깊이 400 nm 와 매우 유사한 값이다.

깊이 200 nm 시료 B와 C의 결과는 그림 6과 같고 그림 6의 (d)와 (f)로부터 얻어진 깊이는 각각 $182 \pm 35 \text{ nm}, 190 \pm 28 \text{ nm}$ 였다. 이 결과는 시료 깊이 200 nm 와 매우 유사한 값이다.

그림 5와 6의 결과로부터 본 연구에 사용된 디지털 홀로그래피 현미경이 3차원 측정도 가능함을 알 수 있었다. 그러나 3차원 측정 정밀도, 즉, 광축 방향의 정밀도는 확인하지 못하였는데 이는 추후 연구에서 시도할 것이다. 그리고 현재의 실험은 단순한 구조의 시료에 대하여 3차원 측정을 하였고, 위상 편침에 위한 3차원 측정이 가능함을 확인하였으나, 높낮이가 복잡한 3차원 구조에 대해서는 추후 연구에서 수행할 것이다. 그리고 광축방향의 정밀도를 높일 수 있으면, 현재 많은 연구가 진행되고 있는 생물공학분야에서 요구하는 정밀 3차원 영상 획득이 가능하게 된다. 즉 현재 생물학 분야에서 3차원 영상을 얻기 위하여 많이 사용되고 있는 공초점 현미경은 평면 해상도가 매우 높아 2차원 영상을 얻는데 매우 유용하나, 초점깊이(DOF: Depth of Focus)의 한계로 초점심도 보다 작은 광축 방향의 해상도를 갖는 정밀한 3차원 영상을 구현하기가 어렵다. 디지털 홀로그래피 현미경과 현재 많이 연구 되고 있는 영상처리 방법을 이용하여 광축 해상도가 확대렌즈의 DOF 보다 좋으면 더욱 정밀한 3차원 영상을 구현할 수 있어 생물학 분야에서 보다 많은 정보를 획득 할 수 있다.

V. 결 론

마이크로미터에서 마이크로미터 이하 문양의 2차원 및 3

차원 영상을 동시에 얻기 위하여 투과형 off-axis 디지털 현미경을 구성하였고, 3차원 영상을 구현하기 위하여 Mask-Cut 알고리즘을 사용하였다. 디지털 홀로그래피 현미경이 마이크로 영역부터 마이크로 영역 이하의 2차원 영상 및 3차원 영상을 동시에 정밀하게 측정할 수 있음을 확인하였다. 본 연구 결과 디지털 홀로그래피 현미경은 실시간의 3차원 측정이 필요한 바이오테크놀로지 분야에 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부 차세대신기술개발사업 지원으로 수행되었으며, 이 연구에 참여한 연구자의 일부는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았음.

참고문헌

- [1] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 11, pp. 77-79, 1967.
- [2] M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavski, "Reconstruction of hologram with a computer," *Sov. Phys. Tech.*, vol. 17, pp. 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," *SPIE*, vol. 3396, pp. 238-243, 1998.
- [4] L. Xu, X. Peng, J. Miao, and K. Asundi, "Studies of digital microscopic with application to microstructure testing," *Appl. Opt.*, vol. 40, pp. 5046-5051, 2001.
- [5] S. Kim, H. Lee, and J. Son, "Recording of larger object by using two confocal lenses in digital holography," *한국광학회지*, vol. 14, pp. 244-248, 2003.
- [6] U. Schnars, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. A 11, pp. 2011-2015, 1994.
- [7] C. Wagener, S. Seebacher, W. Osten, and W. Juptner, "Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 4812-4820, 1999.
- [8] Y. Takaki and H. Ohzu, "Fast numerical reconstruction technique for high resolution hybrid holographic microscopy," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 2204-2055, 1999.
- [9] L. Xu, J. Miao, and A. Asundi, "Properties of digital holography based on in-line configuration," *Opt. Eng.*, vol. 39, pp. 3214-3219, 1999.
- [10] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner, "Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping," *Radio Science*, vol. 23, pp. 713-720, 1988.
- [11] J. M. Huntley, "Noise-immune phase unwrapping algorithm," *Appl. Opt.*, vol. 28, pp. 3268-3270, 1989.
- [12] T. J. Flynn, "Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. A14, pp. 2692-2701, 1997.
- [13] E. Cuche, P. Marquet and C. Depeursinge, "Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms", *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 6994-7001, 1999.
- [14] U. Schnars and W. Jueptner, *Digital Holography* (Springer, Heidelberg, Germany, 2005) pp. 21-26
- [15] K. Itoh, "Analysis of the phase unwrapping problem," *Appl. Opt.*, vol. 21, pp. 2470-2474, 1982.
- [16] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, *Two-Dimensional Phase Unwrapping* (John Wiley & Sons, New York, USA, 1998) pp. 136-151
- [17] J. C. Russ, *The Image Processing Handbook* (CRC Press, London, 1992)

3-Dimensional Measurement using Digital Holographic Microscope and Phase Unwrapping

HyungJun Cho, DooChul Kim, and YoungHun Yu[†]

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

Wongi Jung

Department of Information and Communication, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

Sanghoon Shin

AP & Tec, Sungnam 462-727, Korea

[†] E-mail : yyhyoung@cheju.ac.kr

(Received June 14, 2006, Revised manuscript August 9, 2006)

We have reconstructed 3-dimensional images by using the digital holographic microscope and the Mask-cut phase unwrapping algorithm. Off-axis holograms recorded with a magnified image of the microscopic object lens and reference beam are numerically reconstructed in amplitude and phase image by the Fresnel diffraction approximation. We have simultaneously reconstructed 2-dimensional and 3-dimensional images of the sub-micrometer objects.

OCIS code : 090.0090, 090.1760, 100.5070.