

디지털 홀로그래피 현미경에서의 스캐닝 방법을 이용한 영자회절광 제거

조형준 · 김두철 · 유영훈[†]

제주대학교 물리학과

⑧ 690-756 제주시 아라1동 1번지

신상훈

AP & Tec.

⑧ 462-727 성남시 중원구 상대원동 442-5

(2006년 6월 19일 받음, 2006년 8월 9일 수정본 받음)

디지털 홀로그램에서 영상 재현 시 영자 회절광에 의한 잡음으로 신호대 잡음비가 좋은 영상을 구현하기 어렵다. 이와 같은 이유로 디지털 홀로그램이 여러 분야에 응용되는 것이 어렵다. 영자회절광 제거를 위하여 많은 노력이 이루어져 왔다. 본 연구에서는 영자 회절광의 영향을 줄이기 위한 홀로그램 데이터를 스캐닝 방법으로 획득하여 수치적 처리를 통하여 영상을 재현하는 실험 연구를 하였다. 그 결과 본 연구에 사용된 방법이 영자 회절광의 효과를 줄이면서 해상도도 유지 할 수 있는 방법임을 알았다.

주제어 : Holography, Computer holography, Image reconstruction techniques.

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 장점이 있다. 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 생략할 수 있어 간편하며, 컴퓨터의 연산 속도의 발전으로 디지털 홀로그래피는 3차원 상을 필요로 하는 다수의 응용 분야에서 관심을 가지게 되었다.^[6-9]

그러나 CCD를 통해 얻어진 홀로그램을 이용하여 수치적으로 영상을 재생할 때 영자 회절광을 포함한 DC 항과 허상(Twin image) 이 잡음으로 작용하여 신호대 잡음비가 좋은 영상을 구현하기 어렵다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 영

자 회절광과 허상 제거법에 대한 연구가 많이 진행되었다.^[10-15]

본 연구에서는 디지털 홀로그래피 현미경에서 신호 대 잡음비가 높은 재생상을 구현하기 위하여 스캐닝 방법을 이용한 영자 회절광 제거 방법에 대하여 연구하였다. 지금까지 연구 결과 수치적인 방식으로 참조광의 세기와 물체광 만에 의한 세기를 찾아내기가 어렵기 때문에 근본적으로 영자 회절광을 제거하기 위하여 참조광의 세기와 물체광의 세기를 각각 따로 측정함으로써 완벽하게 영자 회절광을 제거할 수 있었다. 하지만 측정 할 때마다 참조광과 물체광의 세기를 측정해야하는 번거로움이 있으며 측정 대상체의 크기가 큰 경우에 측정 장치의 스캔이 불가피한 요소이다. 스캔의 속도를 높이기 위해서는 물체광과 참조광의 세기를 따로 측정할 필요 없이 일정한 거리로 스캔하면서 계속하여 측정하고 기록된 홀로그램들을 수치적으로 분석하여 영자 회절광을 제거함으로써 측정 대상체에 대한 측정의 속도를 높일 수 있다.

II. 이론적 배경

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 식 (1)과 같다.^[16,17]

$$\begin{aligned} I_h(x_h, y_h) &= |R(x_h, y_h) + O(x_h, y_h)|^2 \\ &= |R|^2 + |O|^2 + R^* O + RO^* \end{aligned} \quad (1)$$

[†]E-mail yyhyoung@cheju.ac.kr

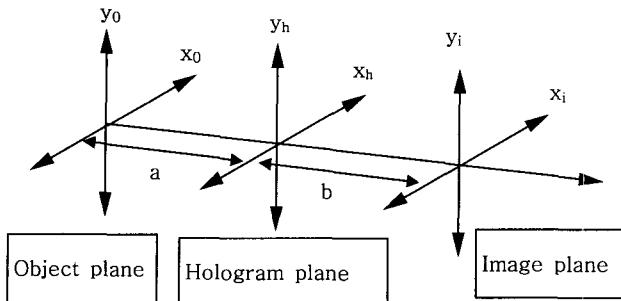


그림 1. 디지털 홀로그래피. a: 물체와 hologram 까지 거리, b; CCD 와 영상 재생 면 까지 거리.

R^*, O^* 은 참조광과 물체광의 공액복소수이이며, 참조광과 물체광의 각도는 θ 이다. 식 (1)에서 $|R|^2$ 은 참조광만의 간섭에 의한 영차 회절광이고(DC 항), $|O|^2$ 은 물체광 간섭의 간섭에 의한 항이며, 세번째와 네번째 항은 실상과 허상이다. 디지털 홀로그래피에서 영차 회절광과 물체광간섭이 영상 및 위상 재생 시 잡음과 같은 역할을 하여 신호 대 잡음비가 좋은 명암대비 영상 및 위상영상을 구현하기 어렵다. 신호 대 잡음비가 좋은 영상을 얻기 위해서는 이 두 항을 제거해야 한다. 디지털 홀로그래피와 디지털 홀로그래피 현미경의 차이는 물체광의 렌즈에 의한 확대 유무만 다르다.

투과형 홀로그램 현미경에서 영상 재생면에서의 전기장은 Kirchoff-Fresnel 적분에 의해 식 (2)와 같이 주어진다.

$$E(x_i, y_i, z) = \frac{iE_0}{\lambda z} \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda z}(x_i^2 + y_i^2)\right] \times \int \int I(x_h, y_h) \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda z}(x_h^2 + y_h^2)\right] \cdot \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda z}(x_h x_i + y_h y_i)\right] dx_h dy_h \quad (2)$$

E_0 는 참조광의 진폭이고 λ 는 사용한 빛의 파장이다. 식 (2)를 구하는 것이 디지털 홀로그램의 영상 재생 시 가장 중요한 과정이며 이 과정에 대한 연구는 매우 많이 되었다. 그리고 일반적으로 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. 그리고 고전적인 홀로그램과는 달리 CCD에 저장된 홀로그램 데이터는 연속적이지 않고 이산 적이다. 그러므로 식 (2)는 식 (3)과 표현할 수 있다.

$$E(m, n, z) = \frac{iE_0}{\lambda z} \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda z}\left(\frac{m^2}{N_x^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N_y^2 \Delta y^2}\right)\right] \times \sum_{k=0}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} I(k, l) \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda z}(k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \exp[i2\pi(\frac{km}{N_x} + \frac{ln}{N_y})] \quad (3)$$

식 (3)에서 $I(k, l)$ 은 CCD((k, l)) 픽셀 데이터이고, (m, n) 은 영상면에서의 위치이다. 이미지 면에서의 위치 차이 $\Delta x_i, \Delta y_i$ 와

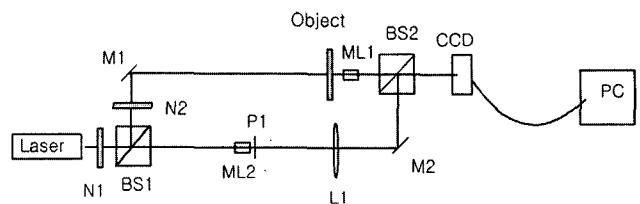


그림 2. 투과형 홀로그래피 현미경 개략도 M1,M2 : mirrors, N1,N2; Neutral density filters, ML1, ML2; micro lenses, L1; lens, P1; Pin hole, BS1,BS2; Beam Splitters.

홀로그램면에서의 위치 차이 $\Delta x_h, \Delta y_h$ 는 식 (4)와 같다.^[16]

$$\Delta x_i = \frac{\lambda z}{N_x \Delta x_h}, \Delta y_i = \frac{\lambda z}{N_y \Delta y_h} \quad (4)$$

식 (3)은 $I(k, l) \exp[-\frac{i\pi}{\lambda z}(k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)]$ 을 공간 주파수 공간으로 이산 Fourier Transform 한 것과 같다. 일반적으로 식 (4)를 계산하기 위하여 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용한다. 식 (3)은 복소수이기 때문에 재생 영상은 식 (5)와 같이 얻어진다.^[17]

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

식 (5)는 4가지 필드, 영차광 필드, 물체광에서 나온 필드, 실상 필드, 허상필드가 섞여 있다. 그리고 위상 영상은 식 (6)과 같이 주어진다.

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

식 (5)와 식 (6)을 이용하여 명암 대비 영상과 위상 영상을 구현할 수 있다.

III. 실험장치

그림 2는 off-axis 투과형 홀로그래피 현미경의 개략도이다. 기본적인 구조는 마흐젠더 간섭계와 같다. 사용한 광원은 10 mW He-Ne 레이저이고, 시료를 투과한 영상을 확대하기 위하여 현미경 대물렌즈 ML1(Mitutoyo LWD 10X, NA=0.28)을 사용하였다. 필터 N1과 N2는 간섭 분양의 명암대비가 최대인 홀로그램을 얻기 위하여 사용하였다. 렌즈 L1과 ML2 그리고 핀홀 P1은 TEM00 모드의 참조광 빛을 얻기 위하여 사용하였으며, 홀로그램을 저장하기 위하여 CCD(Sony IPX1M48)를 사용하였다. CCD의 픽셀크기는 $7.4\mu\text{m} \times 7.4\mu\text{m}$ 이고 픽셀 개수는 1024 x 1024이다. 본 연구에서는 CCD의 위치를 ML1에서 9 cm 떨어진 지점에 위치하였고 참조광과 물체광이 겹치는 각도는 2.46° 이내로 고정하였다.

IV. 실험결과

그림 3은 시료의 홀로그램인 CCD에서 20 cm 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. 특히 그림 3은 홀로그램 데이터로부터 고주파수 통과 필터를 이용하여 DC 항을 제거한 후 재생한 것이다. 즉 사용된 고주파수 통과 필터 역할은 측정된 홀로그램(그림 3(a))을 Fourier Transformation 한 후 중심에서 일정거리에 있는 픽셀값을 영으로 하고 다시 역 Fourier Transformation 함으로써 고주파수 항만이 남은 홀로그램을 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 홀로그램을 재생하여 그림 3(b)와 같은 결과를 얻었다.

그림 3(b)로부터 영차광과 물체광 간섭의 영향으로 물체의 상이 올바르게 재생되지 않았음을 알 수 있다. 영차광에 가려서 재생되지 않는 물체의 상은 그림 3(b)의 사각형 내에 있는 모양과 같다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여, 즉 영차 회절광 제거를 위하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 가장 간단한 방법 중 하나는 재생상까지의 거리를 매우 크게 하여 영차 회절광이 차지하는 면적을 매우 작게 하는 방법이 있으

나, 이러한 방법은 홀로그램 현미경의 결상면에서의 측정 대상체의 해상도(분해능)를 저하시키기 때문에 해상도를 최대로 유지하면서 영차 회절광 효과를 줄이는 방법으로는 적당하지 않다. 다른 방법으로는 위상 이동을 이용하여 여러번의 홀로그램을 측정한 후 이를 계산하여 영차광과 허상을 제거하여 재생상의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법이 있다. 이외에 다수의 방법들이 연구되고 있다.^[10-15]

본 연구에서는 스캐닝 방법을 이용한 영차광과 물체광 간섭 제거에 대하여 연구하였다. 스캐닝 방법에 의한 영차광과 물체광 간섭 제거는 다음과 같다.

물체를 이동시키지 않고 얻을 수 있는 홀로그램은 그림 4(o)와 같다. 물체를 조금씩 이동 시켜 (a)(b)(c)(d)의 사선 쳐진 부분의 홀로그램을 각각 얻는다. 각각의 홀로그램의 재생상에서 재생상의 전체 면적을 9등분 했을 때 가운데를 포함한 십자가 모양의 영역은 영차회절광에 의한 영향이 큰 부분으로 이 부분을 뺀 나머지 모서리 부분의 4지역만이 의미있는 데이터이다. 이렇게 얻어진 홀로그램을 이용하면 각각의 홀로그램으로부터 그림 5와 같이 부분적인 정보를 얻을 수 있다.

즉, 최대의 해상도를 얻기 위한 조건으로 CCD로부터 재생상 까지의 거리가 20 cm일 경우이며, 이 경우에 그림 3(b)에

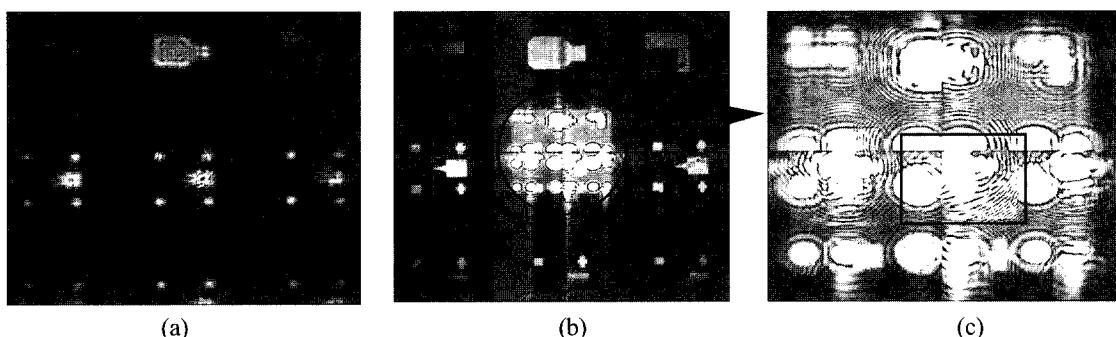


그림 3. 홀로그램과 DC 항을 제거한 후 재생한 영상 (a) 홀로그램, (b) CCD에서 20 cm 떨어진 지점에 재생한 영상, (c) (b)의 확대한 영상, 사각형 내에 영차광에 가려 재생되지 않은 영상이 있다.

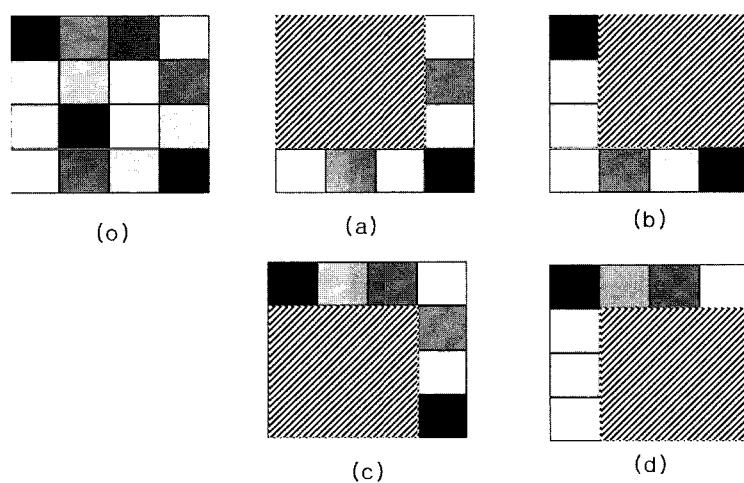


그림 4. 스캐닝 방법에 의한 홀로그램. (o); 물체광에 의한 홀로그램, (a)(b)(c)(d)의 빛 금친 영역; 물체를 이동시켜 얻은 홀로그램.

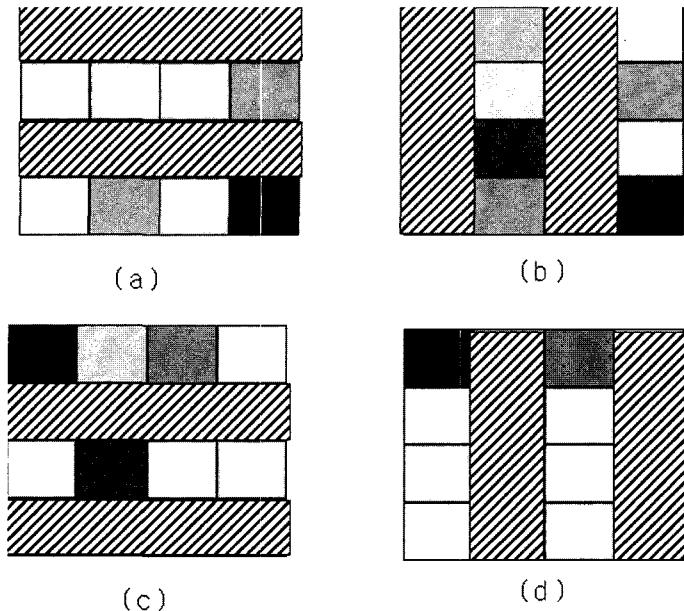


그림 5. 부분적 홀로그램으로부터 얻을 수 있는 정보. (a) 그림 4의 (a)(b) 홀로그램으로 얻을 수 있는 정보, (b) 그림 4의 (a)(c) 홀로그램으로 얻을 수 있는 정보, c) 그림45의 (c)(d) 홀로그램으로 얻을 수 있는 정보, d)그림 4의 (b)(d) 홀로그램으로 얻을 수 있는 정보.

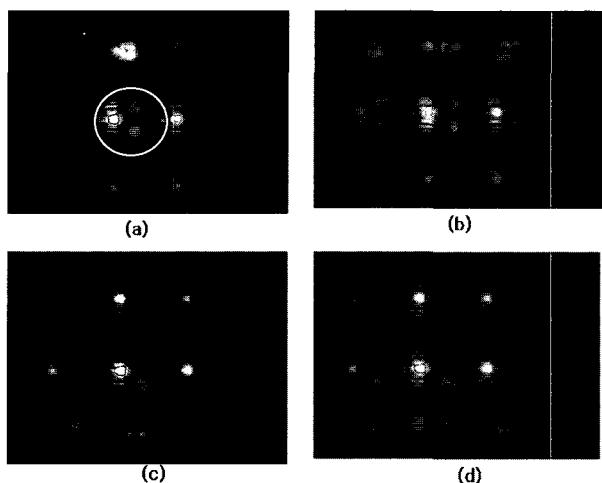


그림 6. 물체를 이동시키면 얻은 홀로그램. 그림 4의 (a)(b)(c)(d) 에 해당하는 전체 홀로그램 중 중심부분만 확대한 홀로그램.

있는 것 같이 재생상의 중심부분과 중심부분을 포함하는 십자가 형태의 지역에서 재생된 상은 잡음이 있고 제거하기 힘들기 때문에 이 부분을 제외한 나머지 부분만이 유용한 데이터이다. 그러므로 잡음이 있는 부분은 제외시키고 잡음이 없는 부분만을 취하면 신호 대 잡음비가 높은 영상을 재생할 수 있다. 따라서 측정 대상체를 움직일 때에 움직이는 거리는 기록되는 홀로그램이 CCD 가로길이의 1/3에 해당하는 만큼 이동하도록 측정 대상 체를 이동한다. 즉 우측(그림 4(b)), 아래(그림 4(c)), 다시 좌측(그림 4(d))으로 동일한 거리만큼 이동하여 얻은 데이터에서 중심부분을 포함하는 십자가 형태의 지역의 홀로그램을 제거한 후 나머지 홀로그램을 조합하여 모든 정보를 얻을 수 있다. 그림 6은 그림 4의 방법으로 측정한 홀로그램이다.

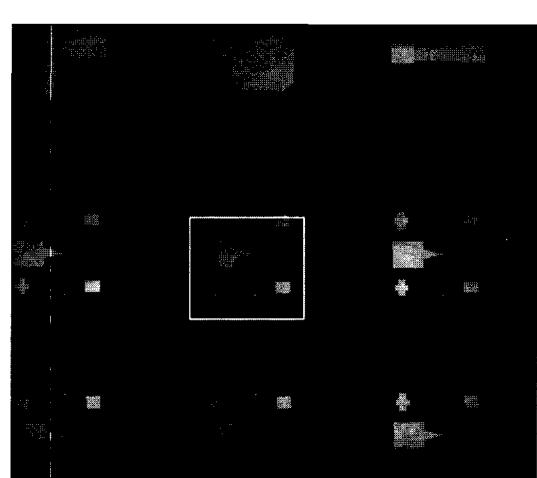


그림 7. 스캐닝 방법으로 얻어진 홀로그램을 이용해 재생한 영상.

그림 6의 중심부분(원내)을 보면, 그림 6 (a),(b),(c),(d) 각각에서 물체의 이동으로 다른 홀로그램이 형성되었음을 알 수 있다. 그림 7은 그림 6의 홀로그램과 그림 5의 방법으로 홀로그램을 구성한 후 재생한 영상이다. 그림 7의 스캐닝 방법에 의한 재생 영상을 보면 영차 회절광의 효과와 물체광 간섭효과가 거의 제거되어 영차광에 가려졌던 부분(사각형 부분)이 잘 재생되었음을 알 수 있다. 이와 같이 스캐닝 방법을 이용하는 것은 실험적으로 반복적인 홀로그램 저장과 그에 따른 반복계산이 필요하여 일반적인 디지털 홀로그램에 비하여 불편하나, 스캐닝 방법을 사용하면 해상도를 유지하면서 영차 회절광과 물체광 간의 간섭에 의한 잡음을 제거할 수 있다.

V. 결 론

디지털 홀로그래피에서 영차 회절광과 물체광간의 간섭이 존재한다. 이러한 영차 회절광과 물체광 끼리의 간섭은 잡음과 같은 역할을 하기 때문에 수치적으로 영상을 재생할 때 신호 대 잡음 비를 저해하는 역할을 한다. 디지털 홀로그래피가 2차원 뿐만 아니라 3차원 측정이 동시에 가능한 측정 장치이고, 이러한 장점을 살린 측정 장비가 되기 위해서는 영차 회절광과 물체광간 간섭에 의한 잡음의 제거가 필수적이다. 본 연구에서는 해상도를 유지하면서 영차 회절광을 제거하기 위하여 물체를 이동시켜 홀로그램을 얻는 스캐닝 방법으로 홀로그램을 얻고, 이를 이용하여 영차 회절광과 물체광 간섭항의 영향이 감소한 홀로그램을 구성 함으로서 신호 대 잡음비가 좋은 영상을 재생하였다.

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 jplogram 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. A11, 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] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-Transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 72, pp. 156-160, 1982.
- [11] W. W. Macy, "Two-dimensional fringe-pattern analysis," *Appl. Opt.*, vol. 22, pp. 3898-3901, 1983.
- [12] K. A. Nugent, "Interferogram analysis using an accurate fully automatic algorithm," *Appl. Opt.*, vol. 24, pp. 3101-3105, 1985.
- [13] D. Malacara, *Optical Shop Testing*(Wiley, New York, 1992) pp. 501-508.
- [14] M. Servin and F. J. Cuevas, "A novel technique for spatial phase-shifting interferometry," *J. Mod. Opt.*, vol. 42, pp. 1853-1862, 1995.
- [15] M. Liebling, T. Blu, and M. Unser, "Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. A21, pp. 367-377, 2004.
- [16] 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.
- [17] U. Schnars and W. Juepther, *Digital Holography* (Springer, Heidelberg, Germany, 2005) pp. 21-26.

Zero-Order Suppression by Scanning Method in Digital Holographic Microscope

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

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

Sanghoon Shin

AP & Tec, Sungnam 462-727, Korea

[†]*E-mail: yyhyoung@cheju.ac.kr*

(Received June 19, 2006, Revised manuscript August 9, 2006)

A fundamental problem in digital holography is the presence of zero-order noise in the reconstruction process, which decreases the signal to noise ratio(SNR). For many applications, that reduction of SNR makes digital holography impractical, so a great number of approaches have been tested in order to overcome such a problem. In this paper we use the scanning method to suppress the zero-order diffraction noise and the interference noise between object beams. We demonstrate that it is possible to increase the image quality with the scanning method.

OCIS code : 090.0090. 090.1760. 100.3010.