

## In-line 디지털 홀로그래피 현미경에서 쌍둥이 상 제거연구

조형준 · 유영훈<sup>†</sup>

제주대학교 물리학과

☎ 690-756 제주시 아라 1동 1번지

신상훈

AP & Tec

☎ 135-539 AP & Tec., 서울 강남구 수서동

(2007년 3월 13일 받음, 2007년 4월 9일 수정본 받음)

In-line 디지털 홀로그래피가 가지고 있는 가장 근본적인 단점은 실상과 허상 그리고 영차 회절광이 공간적으로 분리 되지 않는 것이다. 본 연구에서는 영차 회절광은 소프트웨어를 이용하여 제거하고, 실상과 허상의 구분은 in-line 홀로그래피 현미경의 기하학적 배치를 이용하여 구분하였다. in-line 홀로그래피 현미경에서 허상의 크기는 대물렌즈와 홀로그램간의 거리에 의존한다. 본 연구에서는 허상의 크기가 대물렌즈의 후방 초점거리와 대물렌즈와 홀로그램 면까지의 거리가 일치할 때 최소가 되는 것을 알았으며, 이를 이용하여 실상과 허상을 구분하였다.

주제어 : Holography, Digital holography, Twin images

### I 서 론

디지털 홀로그램 기술은 기존의 홀로그램 기술(홀로그램 건판을 사용하여 사진 촬영과 같은 방식의 기록과 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 30여년 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 있다.<sup>[1-6]</sup> 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. 이러한 3차원 데이터 관련 능력으로 보다 다양한 측정 대상체의 데이터 표시 욕구를 충족시킬 수 있어서 다양한 응용이 예상되어진다.<sup>[7-10]</sup>

디지털 홀로그램은 홀로그램 필름 대신에 CCD를 이용함으로써 CCD에 입력된 정보는 홀로그래픽용 필름에 감광된 현상과 일치하며 홀로그램의 일반 원리와 이론적으로 동일하다.

디지털 홀로그래피와 같이 필름 대신에 CCD 소자를 사용하는 경우에 CCD 소자가 가진 픽셀 사이즈의 한계에 의하여 참조광과 물체광의 겹치는 각도가 수도 이내로 제한된 off-axis 홀로그램과 참조광과 물체광이 평행인 in-line 홀로그램(Gabor 홀로그램)이 있다. off-axis 홀로그램인 경우에 영차회절광, 실상과 허상이 공간적으로 모두 분리되어 재생 가능하지만 재생 시 CCD 전체면적의 1/4만이 유용하다는 단점이 있고, in-line 홀로그램인 경우에 CCD 전체 면적을 이용하여 재생상을 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에 재생 시에 영차회절광 실상 허상이 구별되지 않고 섞여서 재생되게 된다.<sup>[11-14]</sup> 따라서 in-line 홀로그램을 이용한 홀로그래피에서는 영차회절광과 실상 및 허상 중에 하나를 제거해야만 신호 대 잡음비가 높은 물체의 정보를 얻을 수 있다. 이러한 이중상 및 영차 회절광을 제거하기 위한 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적인 방법이 많이 연구 되었다.

본 논문에서는 이중상 중 허상을 제거하기 위한 시스템 인자에 대하여 조사하고, 이를 통하여 허상이 제거된 재생상을 구현 할 수 있는 in-line 디지털 홀로그램 현미경 시스템을 구성하였다.

### II 이론적 배경

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

CCD에 형성되는 2차원 홀로그램의 빛 세기는 (I)식과 같다.

<sup>†</sup> E-mail: yyhyoung@cheju.ac.kr

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

일반적인 디지털 홀로그래피와는 달리 대물렌즈를 사용하는 디지털 홀로그래피 현미경의 물체파는 (2)식과 같이 표현된다.<sup>[14]</sup>

$$O(\xi_i, \eta_i) = \iint \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda D}(\xi_i^2 + \eta_i^2)\right] \delta(\xi_i - M\xi_o) \delta(\eta_i - M\eta_o) O_o(\xi_o, \eta_o) d\xi_o d\eta_o \quad (2)$$

(2)식에서  $D = f \frac{S+S'}{b}$  이고,  $O_o(\xi_o, \eta_o)$ 는 대물렌즈(MO)에 입사하는 물체파, M은 확대배율이다. (2)식은 렌즈의 변환함수(Transfer Function)와 물체파 ( $O_o(\xi_o, \eta_o)$ )의 콘볼루션(Convolution)이다. 그리고 (1)식에서  $R^*$ ,  $O^*$ 은 참조광과 물체광의 공액복소수이며, in-line 홀로그래피에서 참조광과 물체광의 각도는  $0^\circ$ 이다. 여기서 R은 참조파, O는 물체파를 나타내고  $R^*$ ,  $O^*$ 는 각각 참조파와 물체파의 공액복소수이다. 식(1)의 첫째항은 참조광만의 세기이고, 둘째항은 물체광만의 세기이며 셋째항과 넷째항이 각각 허상항과 실상항을 나타낸다. 따라서 첫째항과 둘째항은 영차회절광에 해당되며 셋째항과 넷째항이 임의의 각도로 회절하는 회절차수에 해당되는 항이다

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 (3)식과 같다<sup>[11,15]</sup>.

$$I_h(k, l) = I_h(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \sum_{k=-N_x/2}^{N_x/2} \sum_{l=-N_y/2}^{N_y/2} \delta(x - k\Delta x, y - l\Delta y) \quad (3)$$

(3)식과 같이 참조광과 물체광에 의한 홀로그램 데이터는 수치적 영상 재생에 이용된다. 수치적 재생 파동은 참조광과 홀로그램데이터( $I_h$ )를 이용하여 (4)식과 같이 표현된다.

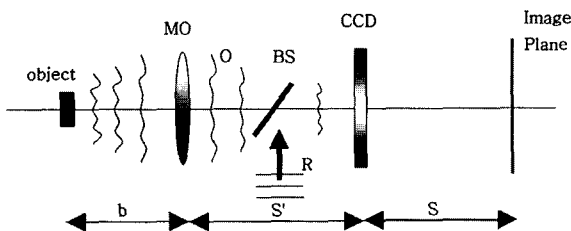


그림 1. 디지털 홀로그래피 현미경 구성과 영상 재생. MO: 확대 렌즈, R: 참조광, O: 물체광, BS: 광 분할기, b: 물체와 렌즈간의 거리, S': 렌즈와 CCD간의 거리, S: CCD와 영상 재생 면까지 거리.

$$\Psi = RI_h = R|R|^2 + R|O|^2 + RR^*O + RRO^* \quad (4)$$

첫 번째 항과 두 번째 항은 0차 회절이고, 세 번째 항은 허상, 네 번째 항은 실상이다. in-line 홀로그램은 (4)식의 각 항에 해당되는 영상이 같은 위치에 생성된다. 프레넬(Fresnel) 공식을 이용하여 영상이 맺히는 지점에서의 파동분포는 (5)식과 같다.<sup>[11,15]</sup>

$$\Psi(\xi, \eta) = A \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(\xi^2 + \eta^2)\right] \times \iint I_h(x, y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda S}(x\xi + y\eta)\right] dx dy \quad (5)$$

여기서  $\lambda$ 는 사용된 빛의 파장이고 S는 CCD에서 영상이 재생되는 곳까지의 거리, A는 상수이다. (5)식은  $I_h(x, y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(x^2 + y^2)\right]$ 을 공간 주파수 공간  $(\xi/\lambda S, \eta/\lambda S)$ 으로 푸리에변환(Fourier Transformation) 한 것이다. 일반적으로 (5)식을 계산하기 위하여 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용한다. (5)식은 복소수이기 때문에 재생 영상은 (6)식과 같이 얻어진다.

$$I(m, n) = \text{Re}[\Psi(m, n)]^2 + \text{Im}[\Psi(m, n)]^2 \quad (6)$$

### III. 실험장치

그림 2는 in-line 투과형 홀로그래피 현미경의 개략도이다. 기본적인 구성은 마흐젠더 간섭계와 같다. 사용한 광원은 10 mW He-Ne 레이저이고, 시료를 투과한 영상을 확대하기 위하여 현미경 대물렌즈 ML1(Mitutoyo LWD 100X, NA=0.9)을 사용하였다. 필터 N1과 N2는 간섭 문양의 명암대비가 최대한인 홀로그램을 얻기 위하여 사용하였다. 렌즈 L1과 ML2 그리고 핀홀 P1은 TEM00 모드의 참조광 빛을 얻기 위하여 사용하였으며 홀로그램을 저장하기 위하여 CCD(KODAK Megaplu II)를 사용하였고, CCD의 픽셀크기는  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ 이고 픽셀 개수는  $2048 \times 2048$ 이다.

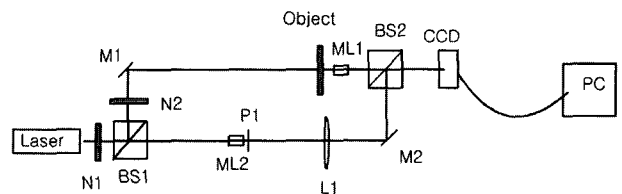


그림 2. 투과형 홀로그래피 현미경 개략도. M1, M2: mirrors, N1, N2: neutral density filters, ML1, ML2: microscope objective lens, L1: lens, P1: pin hole, BS1, BS2: beam splitters.

IV. 실험결과

In-line 홀로그래피 현미경을 이용하여 쌍둥이 영상 중 허상을 제거하기 위하여 그림 1과 같이 렌즈로부터 CCD까지 거리  $S'$ 와 CCD에서 재생면까지의 거리  $S$ 의 관계를 고려하였다. 홀로그래피 기록시 물체파가 (2)식에서 보는 것과 같이  $S$ 와  $S'$ 의 함수가 되고 재생시 (5)식과 같이  $S$ 만의 함수임으로  $S$ 와  $S'$ 에 따라 실상과 허상의 크기가 변화 될 것이라는 것을 예상 할 수 있다. 그리고 기하학적으로는 (4)식과 같이 허상과 실상이 공액 복소수 관계에 있으므로 그림 3과 같은 관계를 고려하였다.

CCD에 기록된 홀로그래피의 재생시 기록한 참조광과 동일한 광으로 조명하는 경우에 CCD면의 한점에서 참조광선(reference beam)은 1차 회절차수, -1차 회절차수 그리고 투과 광선으로 분리되게 된다. 물론 2차이상의 회절 오더도 있지만 이는 세기가 상대적으로 약하기 때문에 무시할 수 있다. 그림 3에 실선은 실상(1차 회절차수)의 파면 진행이고 점선은 허상(-1차 회절차수)의 파면 진행이다. 그림 3에서 보듯이 CCD 모든 점에서 재생된 -1차 회절차수 광선은 한점에

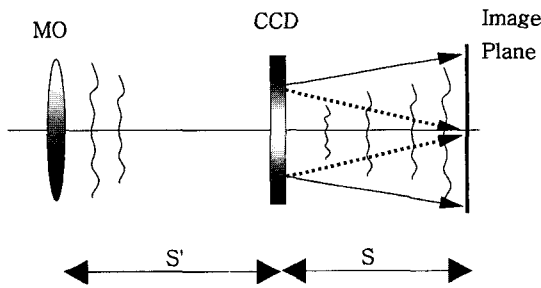


그림 3. 실상과 허상의 파면 진행. 실선: 실상파면, 점선: 허상파면.

모이게 된다. 그러므로 대물 렌즈의 후방 초점 거리를 고려하여, CCD면과 재생면까지의 거리를 적당히 조절하면 허상이 크기가 최소가 되게 할 수 있다. 그림 4는 대물렌즈와 이미지 재생면까지의 거리( $S+S'$ )를 57 cm로 고정하고 렌즈로부터 CCD까지 거리  $S'$ 와 CCD에서 재생면까지의 거리  $S$ 를 변화시키면서 얻은 실험 결과이다.

그림 4(a)는 실험에 사용된 마스크 패턴이고, (b)는 (a)의 실선부분의 정보를 대물렌즈와 CCD간의 거리  $S'$ 와 CCD와 재생면까지 거리  $S$ 에 따른 재생상의 변화이다. 그림 4(b)에서 보면 그림 3에서 예상했던 것과 같이  $S'$ ,  $S$ 에 따라 허상과 실상의 크기가 변화되고  $S \approx S'$ 인 지점에서 허상의 크기가 최소가 되는 것을 확인 할 수 있다. 그림 4의  $S \approx S'$ 인 지점은 본 실험에서 사용된 대물렌즈의 후방 초점거리와 일치한다. 이는 렌즈를 사용하는 디지털 홀로그래피의 특수한 성질이다.<sup>[16]</sup>

그림 5는 그림 4(a)의 시료 마스크의 일부분을  $S'=S(30\text{ cm})$  조건을 만족시켰을 때 영차회절광을 제거한 경우와 제거되지 않는 경우의 결과이다.

그림 5의 (a)는 홀로그래피이고, (b)는 영차회절광을 제거한 경우이고, (c)는 영차회절광을 제거하지 않는 경우이다. 그림 5(c)를 보면 가운데 사각형 형태가 있고 그 안쪽에 밝은 부분의 패턴 모양이 나타나는데 이는 영차회절광에 의한 저생상이다. 사각형 형태가 재생되는 이유는 홀로그래피 기록된 전체 면의 모양이 투영된 것이다. 그 안쪽에 밝은 패턴 모양은 시료 마스크가 투과형으로 패턴 부분만 빛이 통과하기 때문이다. 그림 5(c)에서 보듯이 영차회절광의 영향으로 시료 마스크의 상을 얻기가 어렵다. 영차회절광을 제거하기 위하여 여러가지 방법을 사용할 수 있다<sup>[17-19]</sup>. 본 논문에서는 평균값을 이용하여, 즉 CCD에 기록된 홀로그래피의 각각의 픽셀값에서 하나의 픽셀을 중심으로 7 X 7의 픽셀값들의 평균값

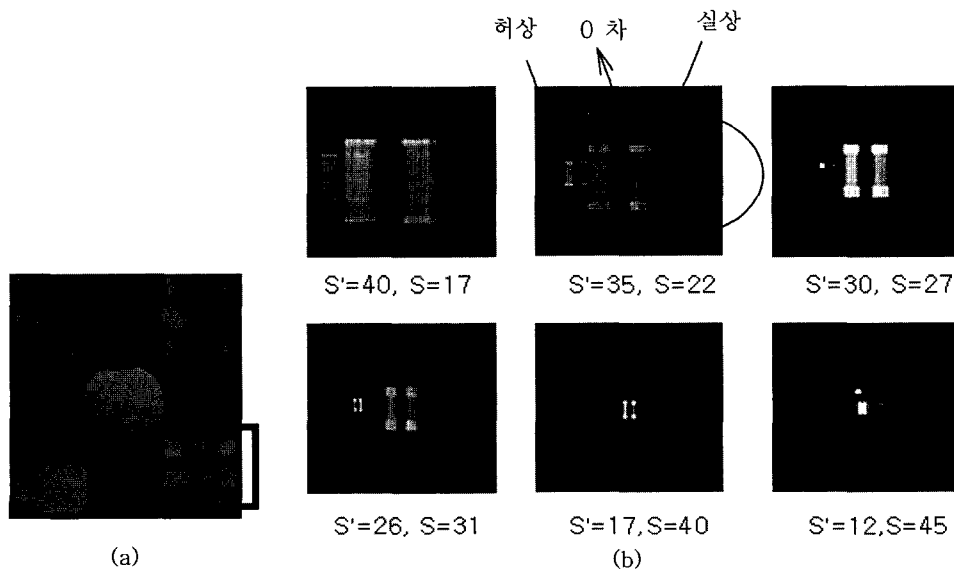


그림 4.  $S$ (CCD와 재생면까지의 거리),  $S'$ (대물렌즈와 CCD까지 거리)에 따른 실상과 허상(단위: cm).

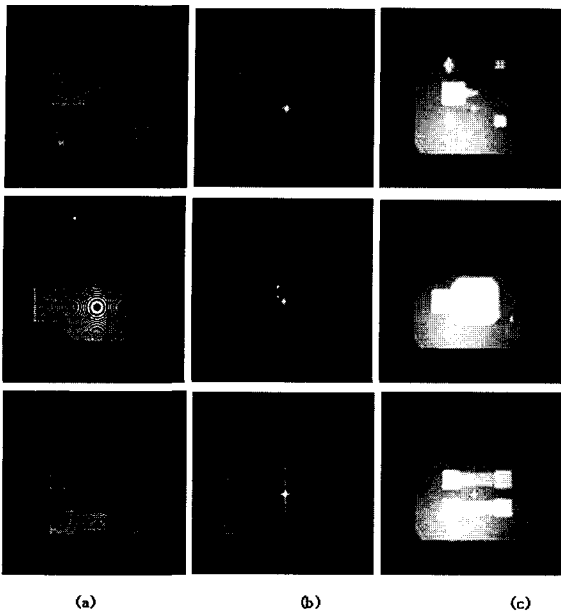


그림 5.  $S=S'$ 인 경우 홀로그램과 재생상. (a) 홀로그램, (b) 영차회절광을 제거한 재생상, (c) 영차회절광을 제거하지 않은 재생상.

을 취하여 얻어진 각각의 픽셀 값을 원래의 홀로그램에 대응되는 픽셀 값에서 빼고 재생하였다.<sup>[17,18]</sup> 그 결과를 그림 5(b)에 나타내었다. 그림 5(b)에서 보듯이 렌즈에서 CCD까지 거리와 CCD에서 재생면까지 거리를 같게 조절하여 재생한 경우에는 실상과 허상이 분리 될 뿐 아니라 허상이 점과 같이 중앙에 모여 있게 된다. 이와 같은 허상은 DC-필터를 이용하여 제거 할 수 있다. 그림 5의 결과는 in-line 홀로그래피의 최대 장점인 홀로그램을 기록하는 CCD 면 전체를 사용하면 in-line 홀로그래피의 문제점 중 하나인 실상과 허상이 겹치는 현상을 제거 할 수 있는 방법을 제시한 것이다. 이 방법은 기존의 허상을 제거하는 방법, 즉 최소한 2장 이상의 홀로그램이 필요한 방법<sup>[20-22]</sup>과는 달리 한 장의 홀로그램을 이용함으로 실시간으로 3차원 관찰이 가능하고, 이것은 생물 분야의 살아 있는 세포 관찰에 매우 유익하다.

## V. 결 론

홀로그램을 이용하여 상을 재생 할 때 CCD 기록면의 일부만 사용 할 수 있는 off-axis 홀로그래피의 단점을 보완하기 위하여 in-line 홀로그램 현미경을 구성하였다. 그러나 in-line 홀로그래피는 영차회절광, 허상 및 실상이 공간적으로 구분이 되지 않는 단점이 있다. 본 논문에서 영차회절광 제거는 문헌에 보고된 방식을 사용하여 소프트웨어적으로 제거하였고 허상 제거는 하드웨어적인 방법을 제시하였다. 렌즈를 사용하는 디지털 홀로그램 현미경의 경우 실상과 허상의 크기가 홀로그램을 기록하는 거리와 재생상을 구성하는 거리의 함수임으로 이를 이용하여 허상의 크기가 최소가 되는 위치

를 정하여 허상을 제거하였다. 허상의 크기가 최소가 되는 위치는 대물렌즈의 후방 초점에서 CCD면까지 거리와 CCD면에서 재생면까지 거리가 같은 경우에 최소가 됨을 알 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 산업자원부 차세대신기술개발사업 지원으로 수행되었으며, 연구에 참여한 연구자의 일부는 '2단계 BK21 사업'의 지원비를 받았다.

## 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 jprologram 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] H. Cho, D. Kim, Y. Yu, W. Jung, and S. Shin, "3-Dimensional Measurement using Digital Holographic Microscope and Phase Unwrapping," *한국광학회지*, vol. 17, pp. 329-334, 2006.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] C. Wagneer, 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.
- [9] Y. Takaki and H. Ohzu, "Fast numerical reconstruction technique for high resolution hybrid holographic microscopy," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 2204-2055, 1999.
- [10] L. Xu, J. Miao, and A. Asundi, "Properties of digital holography based on in-line configuration," *Opt. Eng.*, vol. 39, pp. 3214-3219, 1999.
- [11] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (Roberts & Company Publishers, USA, 2005)
- [12] U. Schnars and W. Juepther, *Digital Holography* (Springer, Heidelberg, Germany, 2005),

- [13] L. Denis, F. Corinne, F. Thierry, and D. Christophe, "Twin-image noise reduction by phase retrieval in in-line digital holography", *SPIE*, vol. 5914, pp. 148-161, 2005.
- [14] C. Depeursinge, *Digital Holography Applied to Microscopy* (Springer, USA, 2006), pp.95-143.
- [15] E. Cucho, 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.
- [16] M. Liebling, *On Fresnelets, interference fringes, and digital holography* (Ph. D Thesis, Switzerland, 2040), pp. 101-122
- [17] E. Cucho, P. Marquet, and C. Depeursinge, "Spatial filtering for zero-order and twin image elimination in digital off-axis holography," *Appl. Opt.*, vol. 39, pp. 4070-4075, 2000.
- [18] Th. M. Kreis and W. P. O. Juptner, "Suppression of the DC term in digital holography," *Opt. Eng.*, vol. 36, pp. 2357-2360, 1997.
- [19] C. Liu, Y. Li, X. Cheng, Z. Liu, F. Bo, and J. Zhu, "Elimination of zero-order diffraction in digital holography," *Opt. Eng.*, vol. 41, pp. 2434-2437, 2002.
- [20] B. Skarman, J. Becker, and K. Wozniak, "Simultaneous 3D-PIV and Temperature Measurements Using a New CCD-Based Holographic Interferometer," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 7, pp. 1-6, 1996.
- [21] I. Yamaguchi and T. Zang, "Phase-Shifting Digital Holography," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 1268-1270, 1997.
- [22] T. Zang and I. Yamaguchi, "Three Dimensional Microscopy with Phase-Shifting Digital Holography," *Opt. Lett.*, vol. 23, pp. 1221-1223, 1998.

## Twin-Image Elimination in In-line Digital Holography Microscope

Hyungjun Cho and Younghun Yu<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup>*E-mail: yyhyoung@cheju.ac.kr*

Sanghoon Shin

*AP & Tec, Suseo Dong, Kangnam Gu, Seoul 135-539, Korea*

(Received March 13, 2007, Revised manuscript April 9, 2007)

A fundamental problem in the in-line digital holography microscope is that the real image and virtual image and zero-order image are not separated spatially. In this paper, we have eliminated the zero-order noise by an averaging method and the twin image is divided using a geometrical set-up in an in-line digital holographic microscope. The size of the virtual image depends on the distance between the objective lens and the hologram plane and on the distance between the hologram plane and the image plane. We found that the virtual image size is smallest when the distance between the objective lens and the hologram plane is equal to the back focal length of the objective lens. We could divide the virtual image and real image by controlling the distance between the hologram plane and the objective lens.

OCIS code : 090.0090, 090.1760, 100.5070.