

## 수정된 화인 맵을 이용한 2-파장 홀로그래피와 잡음 제거 연구

유영훈<sup>†</sup>

제주대학교 물리학과  
☎ 690-756 제주시 아라1동 1번지

(2011년 3월 2일 받음, 2011년 4월 21일 수정본 받음, 2011년 4월 22일 게재 확정)

2-파장 홀로그래피에서 수정된 화인 맵을 이용하여 2-파장 홀로그래피에서 발생하는 잡음 증폭현상을 줄이는 연구를 수행하였다. 일반 적인 화인 맵은 측정체의 단차가 2-파장 홀로그래피에 사용되는 광원의 파장보다 작은 경우에는 잡음을 잘 줄일 수 있으나, 단차가 파장 보다 큰 경우에는 측정 결과에 영향을 주어 잘못된 측정 결과를 보인다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 수정된 화인 맵을 이용하였으며, 그 결과 측정체의 단차가 파장 보다 큰 경우에도 측정에 영향을 주지 않고 잡음을 줄일 수 있음을 확인 하였다.

## Study on Error Reduction in Dual Wavelength Digital Holography Using Modified Fine Map

Younghun Yu<sup>†</sup>

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

(Received March 2, 2011; Revised manuscript April 21, 2011; Accepted April 22, 2011)

Dual-wavelength holography has better axial range than single-wavelength holography, allowing unambiguous phase imaging but at the expense of increased noise. We have studied error reduction in dual wavelength holography using a modified fine map. The fine map is successful in measurement and has shown error reduction when the height of the object is less than the applied wavelength, but is unstable when the step height is larger than that wavelength. We have modified the fine map and we have found that the modified fine map was successful in measurement and error reduction even though the height of object was larger than the wavelength.

Keywords: Digital holography, Dual-wavelength holography, Error reduction

OCIS codes: (090.0090) Holography; (090.1995) Digital Holography; (090.4220) Multiplex holography

### I. 서 론

디지털 홀로그램 기술은 기존의 홀로그램 기술로부터 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 표시할 수 있으므로 3차원 데이터 획득, 처리, 표시 면에 있어서 성능 향상을 기대할 수 있다<sup>[7-10]</sup>.

그러나 디지털 홀로그래피 현미경 역시 빛의 간섭을 이용하여 측정하는 방식이어서 단차가 파장보다 큰 경우 측정에 어려움이 있다. 보다 높은 단차를 측정하기 위해서는 파장이 긴 광원을 이용하여야 하나 이러한 광원에 대한 측정기와 광학계 구성이 쉽지 않다. 파장이 긴 광원을 이용하는 대신 2개의 파장을 이용하여 각각 위상 정보를 얻고 이를 수학적으로 계산하여 마치 긴 파장을 이용하여 위상 정보를 획득하는 효과를 볼 수 있는 2-파장 홀로그래피가 제안 되었다<sup>[11-14]</sup>.

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

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

실제 2-파장 홀로그래피를 이용하면 단파장에서 측정 하지 못했던 큰 단차를 측정 할 수 있다. 현재는 이러한 2-파장 홀로그래피에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 2-파장 홀로그래피를 이용하여 위상 정보를 얻는 경우 일반적으로 단파장으로 위상 정보를 얻는 경우에 비해 잡음이 매우 커지는 현상이 있다. 그래서 이러한 단점을 해결하기 위하여 2-파장 홀로그래피의 잡음을 단파장 홀로그래피에서 얻은 잡음만큼 줄이는 연구가, 즉 코스 맵 (coarse map)과 화인 맵 (fine map) 연구가 진행 되었다<sup>[13, 14]</sup>. 그러나 이 방법은 단파장에서 얻은 높이 정보를 이용하기 때문에, 단차가 2-파장 홀로그래피에 이용된 광원의 파장 보다 작은 경우에는 성공적으로 잡음을 제거 할 수 있으나 단차가 파장보다 큰 경우에는 잡음 제거에 불안정 하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 앞서 연구된 잡음 제거 방법을 개선하여 단차가 2-파장 홀로그래피에 사용된 파장보다 큰 경우에도 적용 할 수 있는 잡음 제거 방법에 대하여 전산기 시뮬을 통하여 연구하였다.

## II. 이론적배경

### 2.1. 디지털 홀로그래피

디지털 홀로그래피 현미경에서 홀로그램 데이터는 CCD로 입력되는 물체광(O)과 참조광(R)의 간섭에 의하여 주어진다. 그림 1과 같은 투과형 디지털 홀로그래피에 대하여 고려하자. CCD에 형성되는 2차원 홀로그램의 빛 세기는 식 (1)과 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  $\theta$ 이다.  $\theta = 0$ 이면 in-line 홀로그래피이고,  $\theta \neq 0$  이면 off-axis 홀로그래피이다. 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 홀

로그래피에서 홀로그램을 저장하는 장치로 CCD를 사용한다. 수직적 재생 파동은 참조광(R)과 홀로그램데이터( $I_h$ )를 이용하여 식 (2)와 같이 표현된다.

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

식 (2)는 복소수이므로, 재생되어지는 상은

$$I(m, n) = Re[\Psi(m, n)]^2 + Im[\Psi(m, n)]^2 \quad (3)$$

과 같이 얻어지며, 진폭 대비 상을 의미한다. 위상 대비 상은 다음과 같이 주어진다.

$$\psi(m, n) = \arctan \left\{ \frac{Im[\Psi(m, n)]}{Re[\Psi(m, n)]} \right\} \quad (4)$$

### 2.2. 2-파장 디지털 홀로그래피

2-파장 홀로그래피에서 각각의 파장으로부터 얻은 위상은 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \phi_1(x, y; \lambda_1) &= \frac{2\pi h}{\lambda_1}, \phi_2(x, y; \lambda_2) = \frac{2\pi h}{\lambda_2} \\ \phi_{12}(x, y; \lambda_{12}) &= \frac{2\pi h}{\lambda_{12}} = \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi h}{\lambda_1} - \frac{2\pi h}{\lambda_2}, \\ \frac{1}{\lambda_{12}} &= \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)와 같이 각각의 파장( $\lambda_1, \lambda_2$ )으로부터 얻은 위상으로부터 보다 긴 파장( $\lambda_{12}$ )의 위상 정보를 얻을 수 있다. 이러한 방법을 이용하여 보다 큰 단차를 측정 할 수 있다. 그러나 각각의 파장( $\lambda_1, \lambda_2$ )의 위상 정보에 포함되어 있는 잡음의 크기가 증폭된다. 증폭되는 배율은 약  $\sim \lambda_{12}/\lambda_1$  정도이다. 이러한 잡음은 측정 데이터의 신뢰성에 문제가 됨으로 반드시 줄이거나 제거 되어야 한다. 이러한 목적을 위하여 코스 맵 (coarse map) 과 화인 맵(fine map) 방법이 제안 되었다<sup>[13, 14]</sup>.

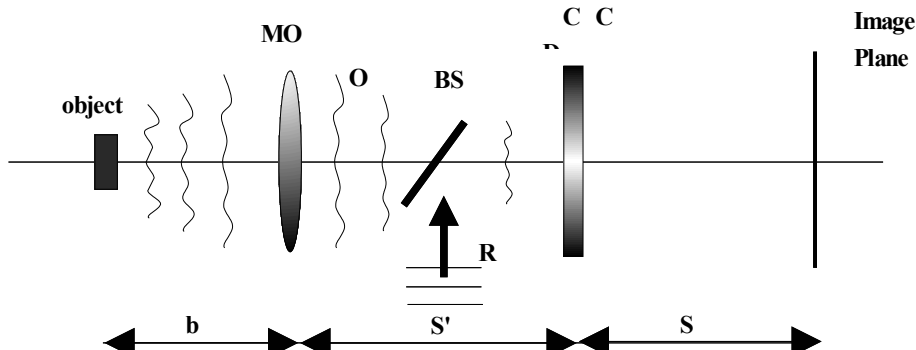


FIG. 1. Digital holography. b; distance between object and objective lens, S'; distance between hologram and objective lens(MO), S; distance between CCD and reconstructed image plan, R; reference beam, O; objective beam, BS; beam splitter.

### III. 전산기 시능 및 결과

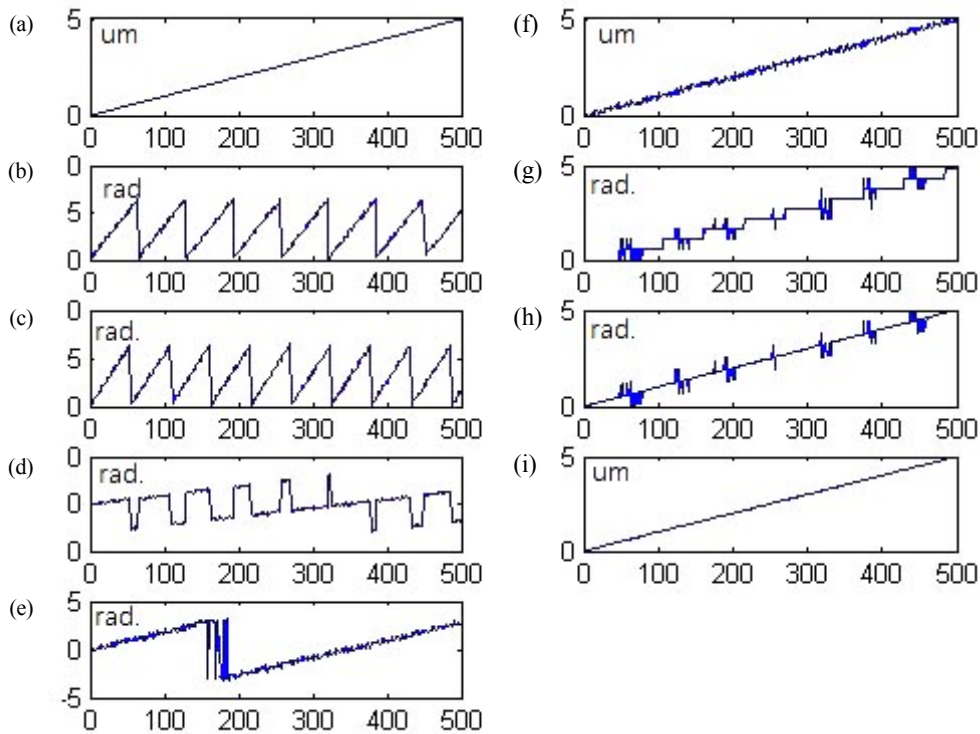
2-파장 홀로그래피의 잡음을 줄이기 위하여 코스 맵(coarse map) 과 화인 맵(fine map) 방법이 제안 되었다. 그 과정은 Fig. 2 와 같다. 전산기 시능에서 2-파장 홀로그래피에 사용 된 광원의 파장은 630 nm 와 530 nm 이다. 그리고 각각의 파장을 이용하여 위상 측정 시 잡음은 10% 로 하였다.

Fig. 2의 (a)는 측정 대상체이고, (b)와 (c)는 2-파장 홀로그래피에 사용된 광원 파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 를 사용하여 얻은 위상  $\phi_1, \phi_2$  이고, (d)는  $\phi_1, \phi_2$ 의 차이이다. (d)의 결과 위상 값이  $\pm 2\pi$ 보다 큰 값은  $\pm 2\pi$  이내로 조정하여야 한다. 그 결과가 (e)이다. (f)는 (e)의 위상 값을 이용하여 얻은 높이이다. (f)의 결과 잡음이 많이 증가하였음을 알 수 있다. 이러한 잡음을 제거하기 위하여 전에 제시되었던 방법<sup>[13, 14]</sup>, 즉 2-파장 홀로그래피에 사용된 파장을 이용하여 얻은 높이 정보를 이용하여 잡음을 제거한다. 이 방법은  $\lambda_{12}$ 를 이용하여 얻은 높이를 2-파장 홀로그래피에 사용되었던 파장 중 하나로 나누어 (g)를 구한 후, 2-파장 홀로그래피에 사용되었던 파장 중 하나 ( $\lambda_1$ )에서 얻은 높이 정보를 덧붙이는 방식을 이용하여 (h)를 구한다. (f) 와 (h)를 비교하면 스파이크를 제외하면 잡음이 많이 감소되었음을 알 수 있다. 이러한 스파이크와 잡음을 제거하기 위하여 그림 (h)에서 이용한 방법을 다른 파장( $\lambda_2$ )에 대해서 반복하면 잡음과 스파이크가 줄어든 (i)를 얻을 수

있다. Fig. 2 (h)와 (i)를 화인 맵이라 한다. 그림 2(i) 결과와 2-파장 홀로그래피에서 얻은 결과 (f)를 비교하면 잡음이 현저하게 줄었음을 알 수 있다. 이러한 방법을 실제 단차가 파장 보다 크거나 근접하는 경우에 적용시켜 보았다.

Fig. 3 (a),(g)는 각각 단차가 파장보다 작은 경우, (b),(j)는 단차가 파장보다 큰 경우의 측정 대상체이고, Fig. 3 (b), (e), (h),(k)는 2-파장 홀로그래피에 의해 측정된 높이이다. 단차가 파장보다 크거나 작은 경우에 상관없이 모두 잘 측정됨을 확인 할 수 있다. 단 잡음이 많이 생김을 알 수 있다. Fig. 3 (c),(f),(i),(l)는 fine map이다. 단차가 파장보다 작은 경우에는 (c), (i)와 같이 측정 및 잡음 제거가 모두 잘 되나, 단차가 파장보다 큰 경우는 잡음제거는 잘 되나 측정에 문제가 있음을 Fig. 3 (f),(l)의 결과로부터 알 수 있다. 이는 화인 맵을 작성 할 때 파장의 정수배의 높이를 이용하기 때문이다. 즉 파장보다 큰 단차는 단파장 홀로그래피로 측정이 어렵기 때문에 이를 이용한 잡음제거 방법에도 영향을 주어 측정에 오차를 가져오는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 fine map을 작성 할 때 파장의 정수배( $n\lambda; n = \text{정수}$ )를 이용하지 않고 파장보다 작은 높이의 정수배 ( $n^*(\lambda/m); n, m = \text{정수}$ )를 이용한 결과가 Fig. 4 와 같다.

Fig. 4(a),(d),(g)는 측정 대상체이고, Fig. 4(b),(e),(h)는 2-파장 홀로그래피에 의해 측정된 높이이고, 그림 4(c),(f),(i)는 본 연구에서 제안한 화인 맵 결과이다. Fig. 4(c),(f),(i) 결과



**FIG. 2.** Simulation of two-wavelength phase imaging digital holography, (a) object height (b)phase of  $\lambda_1; \phi_1$  (c)phase of  $\lambda_2; \phi_2$  (d) coarse map;  $\phi_1 - \phi_2$  (e) modified coarse map (f) reconstructed height using modified coarse map (g) height is divided into integer multiples  $\lambda_1$  (h) pasted on height by  $\lambda_1$  (i) repeated process (g)(h) with  $\lambda_2$  (fine map).

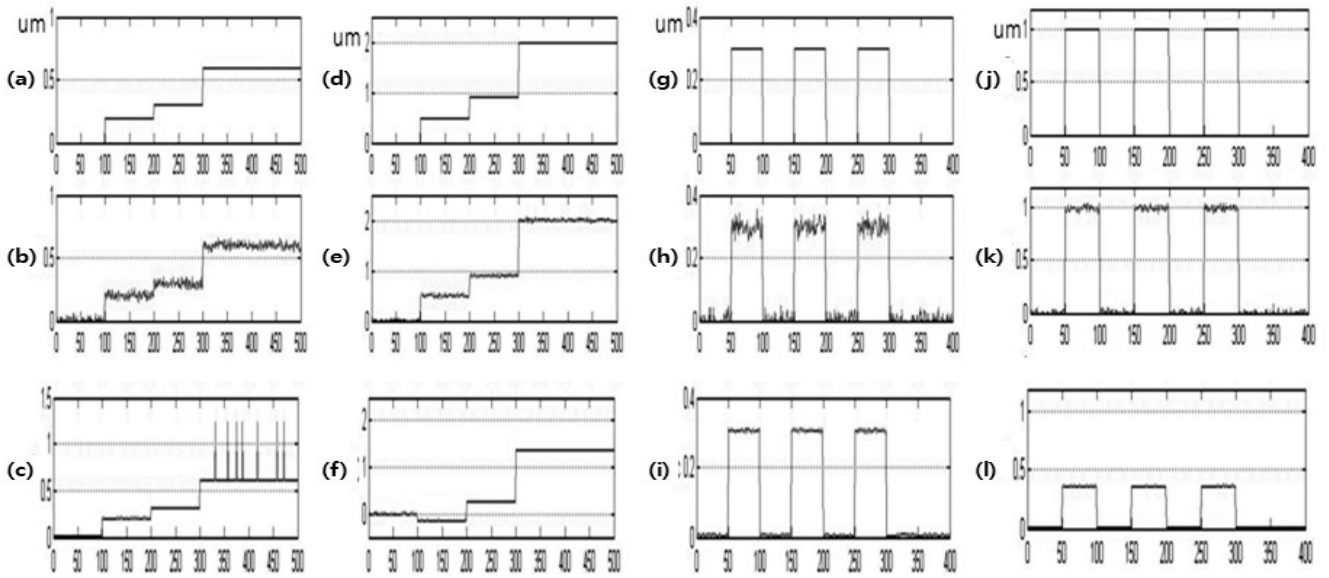


FIG. 3. Simulation of two-wavelength phase imaging digital holography and fine map. (a)(d)(g)(j): object height, (b)(e)(h)(k); reconstructed height by coarse map, (c)(f)(i)(l); reconstructed height by fine map.

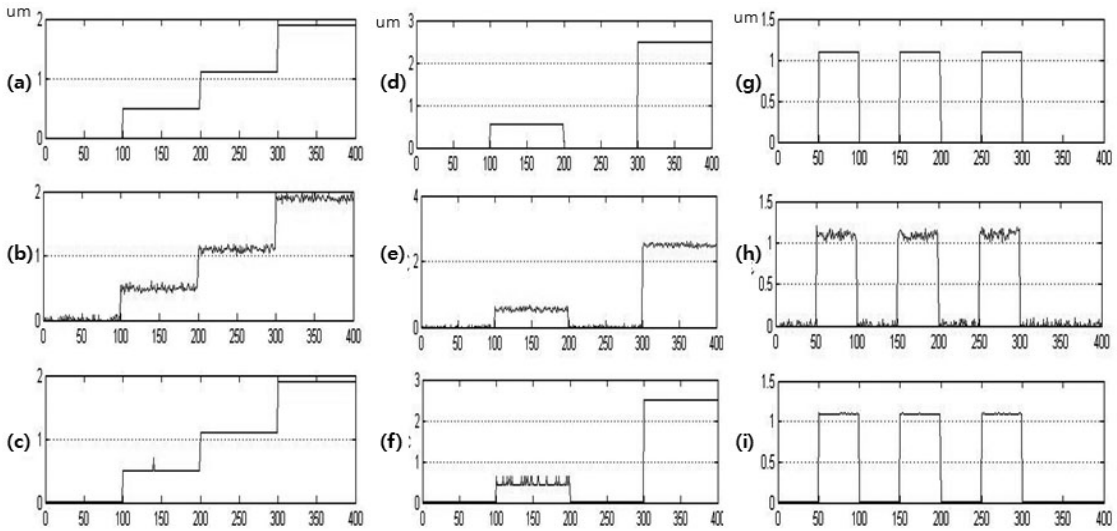


FIG. 4. Simulation of two-wavelength phase imaging digital holography and modified fine map. (a)(d)(g): object height, (b)(e)(h); reconstructed height by coarse map, (c)(f)(i); reconstructed height by fine map.

로부터 단차가 2-파장 홀로그래피에 사용된 파장보다 큰 경우에도, 비록 약간의 스파이크가 존재하나, 측정과 잡음제거가 잘 되고 있음을 알 수 있다. 위의 결과로부터 본 연구에서 수정한 화인 맵이 단차가 2-파장 홀로그래피에 사용된 파장보다 큰 경우와 작은 경우에 모두 잘 적용될 수 있음을 확인 할 수 있다.

#### IV. 결 론

간섭을 이용한 단차를 측정 하는 방법이 많이 연구 되었으나 단차가 파장보다 큰 경우에는 한 번의 간섭측정에 의한

단차 측정은 매우 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 두 개의 단일 파장( $\lambda_1, \lambda_2$ )에서 얻은 위상정보를 이용하여 보다 큰 파장( $\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$ )의 위상 정보를 얻을 수 있는 2-파장 홀로그래피가 제안되었으나, 2-파장 홀로그래피의 위상정보에는 단일 파장에서 얻은 위상정보에 포함되어 있는 잡음이 증폭되어 신호의 질을 저하시킨다. 잡음의 증폭비율은 약  $\sim \lambda_{12}/\lambda_1$  정도로 알려져 있다. 이러한 잡음을 줄이기 위해서 코스 맵 및 화인 맵 방법이 제안되었다. 그러나 이 방법은 단차가 2-파장 홀로그래피에 사용되는 파장보다 작은 경우에는 매우 성공적이나, 단차가 파장보다 커지는 경우에는 매우

불안하다. 즉 잡음제거는 잘되나 측정 결과에 영향을 준다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 화인 맵을 구성 할 때, 파장 정수배를 이용하지 않고, 파장보다 작은 높이의 정수배 ( $n*(\lambda/m); n, m = \text{정수}$ )를 이용하였고. 즉 수정된 화인 맵을 작성 하였으며, 그 결과 단차가 2-파장 홀로그래피에 사용된 파장 보다 큰 경우와 작은 경우에 측정 및 잡음제거에 모두 성공적임을 확인하였다. 이러한 잡음 제거 방식을 이용함으로써 2-파장 홀로그래피를 사용하여 보다 큰 단차를 측정 할 수 있을 것으로 생각되며, 이에 대한 실험 연구는 추후 진행 할 것이다.

### 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. Opt.* **40**, 5046-5051 (2001).
5. 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).
6. 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).
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. C. Wagneer, 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. 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).
11. C. Polhemus, "Two-wavelength interferometry," *Appl. Opt.* **12**, 2071-2074 (1973).
12. K. Creath, Y. Cheng, and J. C. Wyant, "Contouring aspheric surfaces using two-wavelength phase-shifting interferometry," *Opt. Acta* **32**, 1455-1464 (1985).
13. J. Gass, A. Dakoff, and M. K. Kim, "Phase imaging without 2-pi ambiguity by multi-wavelength digital holography," *Opt. Lett.* **28**, 1141-1143 (2003).
14. S. Ryszard Choras, *Image Processing & Communications Challenges 2* (Springer Publishing Co., 2010), Chapter 2.