

## Evaluation of the Speckle Noise in Optical Scanning Holography

You Seok Kim and Taegeun Kim<sup>†</sup>

Department of Optical Engineering, Sejong University, 98 Kunja-dong, Kwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea

(Received April 28, 2014; Revised manuscript May 22, 2014; Accepted May 26, 2014)

In this paper we record the complex hologram of a real object with optical scanning holography (OSH). We reconstruct the complex hologram using a numerical process, and then we evaluate the degree of contamination by speckle noise between the reconstruction of the complex hologram and the image captured by a CCD camera. We use the contrast of the speckle pattern for quantitative evaluation.

Keywords: Holography, Speckle noise, Optical Scanning Holography

OCIS codes: (090.1995) Digital holography; (090.2870) Holographic display

## 광 스캐닝 홀로그래피와 스펙클 잡음에 의한 오염도 평가

김유석 · 김태근<sup>†</sup>

세종대학교 광전자공학과

☎ 143-747 서울시 광진구 군자동

(2014년 4월 28일 받음, 2014년 5월 22일 수정본 받음, 2014년 5월 26일 게재 확정)

본 논문에서는 광 스캐닝 홀로그래피 기술을 이용하여 실제 물체의 복소 홀로그램 정보를 스펙클 잡음 없이 촬영하였다. 촬영된 복소 홀로그램 정보를 수치적인 방법으로 복원한 뒤 결맞음 광원과 CCD 카메라를 이용하여 촬영한 실제 물체의 영상과 비교하여 스펙클 잡음에 의한 오염도를 평가하였다. 스펙클 잡음에 의한 오염도를 정량적으로 평가하기 위하여 두 영상의 스펙클 패턴의 대비 수치를 이용하였다.

Keywords: 홀로그래피, 스펙클 잡음, 광 스캐닝 홀로그래피

OCIS codes: (090.1995) Digital holography; (090.2870) Holographic display

### I. 서 론

3차원 디스플레이를 구현하기 위한 방법 중 홀로그램을 이용하는 것에 대한 연구는 오래 전부터 진행되어왔다.<sup>[1, 4]</sup> 최근 디지털 기술의 발전으로 아날로그 홀로그램이 아닌 디지털 홀로그램을 이용하여 3차원 디스플레이를 구현하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>[5, 6]</sup> 홀로그램 기술은 Gabor에 의해서 처음 제안된 기술로 광원의 결맞음 특성을 이용하여 물체의 간섭 패턴을 촬영하는 것이 특징이다.<sup>[7]</sup> 하지만 실제 물체의 홀로그램을 촬영하게 되면 물체의 홀로그램 정보만 촬영되는 것이 아니라 광원의 결맞음 특성 때문에 공간적으로 불규칙적인 세기 패턴도 함께 촬영된다. 이 세기 패턴은 스펙클 잡음이라고 하며 촬영된 홀로그램을 복원하였을 때 실제 물체와 함께 복원된다.<sup>[8]</sup> 이 때문에 복원된 홀로그램이

깨끗하지 않다는 문제점이 있다.<sup>[9, 10]</sup> 스펙클 잡음은 디지털 홀로그램을 이용한 3차원 디스플레이에서 영상을 오염시키는 주요한 잡음으로 스펙클 잡음을 제거하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다.<sup>[11-19]</sup>

스펙클 잡음을 제거하기 위하여 기존에 연구되었던 방법은 크게 3가지 유형으로 나눌 수 있다. 첫 번째 유형은 기존에 제안되었던 홀로그램 촬영 시스템은 그대로 이용하고 촬영된 홀로그램 데이터를 수치적인 방법을 이용하여 스펙클 잡음을 줄이는 방법이다.<sup>[11-13]</sup> 하지만 수치적인 방법의 경우 스펙클 잡음을 제거하기 위하여 추가적인 처리과정이 필요하며 수치적인 처리 과정에서 스펙클 잡음뿐 아니라 실제 물체의 정보를 잃을 수 있다. 그리고 스펙클 잡음을 완전히 제거할 수 없다. 수치적인 방법으로 스펙클 잡음을 줄이는 방법의 경우 수치적인 방법으로 복원된 홀로그램 영상의 스펙클

<sup>†</sup>E-mail: [takim@sejong.ac.kr](mailto:takim@sejong.ac.kr)

잡음을 제거하는 방법으로 광학적인 방법으로 홀로그램을 복원할 때에는 적용이 힘들다는 단점이 있다. 두 번째 유형은 발광 다이오드나 초발광 다이오드를 사용하여 광원의 공간적인 결맞음 특성을 줄이는 방법이다.<sup>[14, 15]</sup> 하지만 광원의 공간적인 결맞음 특성을 줄이는 방법의 경우 홀로그램 촬영 시스템의 분해능을 감소시키는 한계점을 지니고 있다.<sup>[20, 21]</sup> 세 번째 유형은 기존에 제안된 홀로그램 촬영 시스템을 이용하여 동일한 홀로그램을 여러 장 촬영한 후 수치적인 방법으로 합성하여 스펙클 잡음을 줄이는 방법으로 광원의 파장을 여러 개 이용하여 촬영하거나 입사 각도를 변경하여 다수의 홀로그램을 촬영하는 방법 등이 있다.<sup>[16-18, 19]</sup> 세 번째 방법의 경우 다수의 홀로그램을 촬영하여 합성해야 하는 번거로움이 있으며 수치적인 방법으로 홀로그램 복원과 합성을 진행하기 때문에 광학적인 방법으로 홀로그램을 공간상에 복원하기 어렵다. 기존에 연구되었던 방법은 광학적인 방법으로 공간상에 홀로그램을 복원하는 것이 아닌 수치적인 복원 방법을 이용하여 컴퓨터에서 복원하는 것을 주된 목적으로 하고 있다.<sup>[11, 15, 20, 21]</sup> 이 때문에 홀로그램을 이용한 3차원 디스플레이를 구현을 위해서는 적합하지 않다.

기존에 제안되었던 홀로그램 촬영 시스템과 달리 광 스캐닝 홀로그래피 기술은 공간 집광 검출 방법을 이용하여 실제 물체의 복소 홀로그램 정보를 스펙클 잡음 없이 촬영할 수 있는 특징이 있다. 광 스캐닝 홀로그래피 기술을 이용하면 추가적인 처리과정 없이 스펙클 잡음 없는 복소 홀로그램을 촬영할 수 있다. 최근 광 스캐닝 홀로그래피 기술을 이용하여 실제 물체의 복소 홀로그램을 스펙클 잡음 없이 촬영하여 광학적인 방법으로 복원한 연구 결과가 발표되었다.<sup>[22]</sup>

물체 표면의 거친 정도에 스펙클 잡음 양이 종속되어있어 스펙클 잡음 제거율은 물체 표면의 거친 정도에 따라 달라진다.<sup>[23]</sup> 본 논문에서는 거칠기가 있어 일반적인 가 간섭적인 영상법에 의하면 스펙클 노이즈를 생성하는 산란적 반사 물체(diffusely reflective object)의 홀로그램 영상을 광 스캐닝 홀로그램 기술을 이용하여 스펙클 잡음 없이 촬영하였다. 촬영된 홀로그램을 수치적인 방법으로 복원한 뒤 레이저 광원을 이용하여 촬영한 영상과 비교하여 정량적 저감율을 측정하였다.<sup>[23, 24]</sup>

## II. 광 스캐닝 홀로그래피

그림 1은 실제 물체의 복소 홀로그램을 촬영할 수 있는 광 스캐닝 홀로그래피의 구성도를 나타낸 그림이다. 광 스캐닝 홀로그래피는 기존에 제안된 홀로그램 촬영 시스템과 달리 두 개의 빔 분할기(BS1, 2)와 거울(M1, 2), 빔 확대기(BE1, 2), 음향 광 변조기(AOM1, 2) 그리고 한 개의 렌즈(L1)로 구성된 간섭계와 빛의 세기 패턴 형태의 신호를 전기 신호 형태로 변환하여 처리하는 전기 신호 처리 부분으로 구성되어 있다. 광 스캐닝 홀로그래피 시스템은 실제 물체의 복소 홀로그램을 스펙클 잡음 없이 촬영할 수 있는 시스템으로 기존 연구에서 제안되었다.<sup>[22]</sup>

첫 번째 빔 분할기(BS1)에서 위쪽 경로의 빛과 아래쪽 경로의 빛으로 나뉘어진다. 위쪽 경로의 빛은 빔 확대기(BE1)와 렌즈(L1)를 통과하면서 구면파를 만든다. 아래쪽 경로의 빛은 빔 확대기(BE2)를 통과하면서 평면파를 만든다. 이 때 두 경로의 빛은 각각 음향 광 변조기(AOM1, 2)를 통과하면서 특정 주파수로 변조된다. 두 개의 음향 광 변조기(AOM1, 2)는 각각  $\Omega$ 와  $\Omega + \Delta\Omega$ 의 변조 주파수로 작동될 수 있도록 설정하여 준다. 각각  $\Omega$ 와  $\Omega + \Delta\Omega$ 만큼 변조된 구면파와 평면파는 두 번째 빔 분할기(BS2)에서 합쳐지고 광원의 결맞음 특성에 따라 간섭을 일으키게 된다. 이 때 생기는 특이한 간섭 무늬를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며 이를 프레넬 운대판이라고 한다.<sup>[22]</sup>

$$I_s(x, y, z, t) = \left| \exp\{j[(\omega_0 + \Omega)t]\} + \frac{j}{\lambda z} \exp\left\{j\left[\frac{-\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2) + (\omega_0 + \Omega + \Delta\Omega)t\right]\right\} \right|^2 \quad (1)$$

$$= 1 + \frac{1}{(\lambda z)^2} + \frac{2}{\lambda z} \sin\left[\frac{\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2) - \Delta\Omega t\right].$$

식 (1)에서  $\lambda$ 는 광원의 파장을 나타내고  $z$ 는 물체의 깊이를 나타낸다. 식 (1)과 같이 표현된 프레넬 운대판 형태의 빛은 두 개의 음향 광 변조기(AOM1, 2)의 주파수 차이만큼( $\Delta\Omega$ ) 시간적으로 변조되어 있다.<sup>[4, 25]</sup> 시간적으로 변조된 프레넬 운대판 형태의 빛은 스캐닝 거울을 이용하여 실제 물체를 스캔한다. 실제 물체에서 반사된 빛은 렌즈를 이용하여 집광한 후 광 검출기(PD1)을 이용하여 전기 신호 형태로 변환된다. 반사된 빛을 렌즈로 집광하는 과정은 공간 집광 처리 과정으로 기존에 제안된 홀로그램 촬영 시스템과는 다른 광 스캐닝 홀로그래피 시스템의 특징이다. 식 (1)과 같은 형태의 스캔 빛을 이용하여 물체를 스캔하는 것은 공간적인 콘볼루션으로 설명할 수 있으며 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I(x, y) \propto \iiint I_s(x', y', z; t) I_o(x + x', y + y'; z) dx' dy' dz \quad (2)$$

$I_o(x, y, z)$ 는 실제 물체의 세기를 나타낸다. 광 검출기(PD1)을 이용하여 전기 신호 형태로 변환된 신호는 두 개의 출력을 내보내는 lock-in 증폭기를 통과하면서 복조된 후 컴퓨터

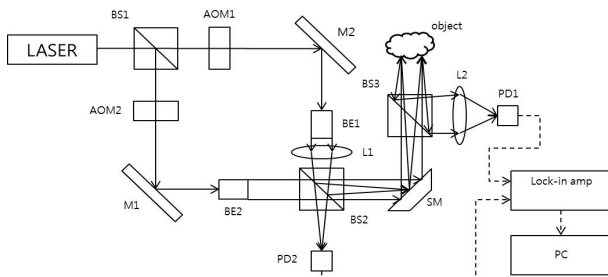


FIG. 1. Optical scanning holography (BS: beam splitter, AOM: Acousto optic modulator, M: mirror, BE: beam expander, SM: Scanning mirror, PD: photo detector, L: lens, PC: personal computer).

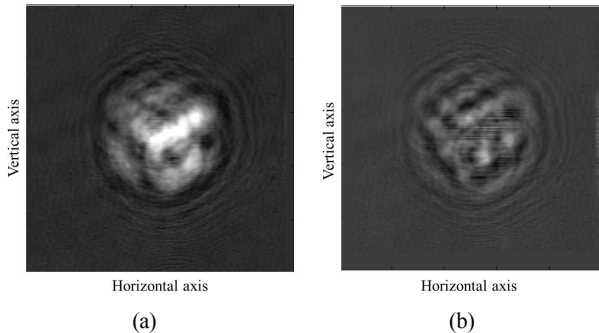
에 저장된다. 컴퓨터에 저장된 두 신호는 in-phase 신호와 quadrature phase 신호로 식 (3)과 같이 수치적인 합성 과정을 통하여 복소 홀로그램으로 합성된다.<sup>[26]</sup>

$$H(x, y) = |H| \exp(j\angle H) = i_{in-phase}(x, y, z) + j i_{Q-phase}(x, y, z) \\ = \int I_o(x, y, z) \otimes \frac{j}{\lambda z} \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2)\right\} dz \quad (3)$$

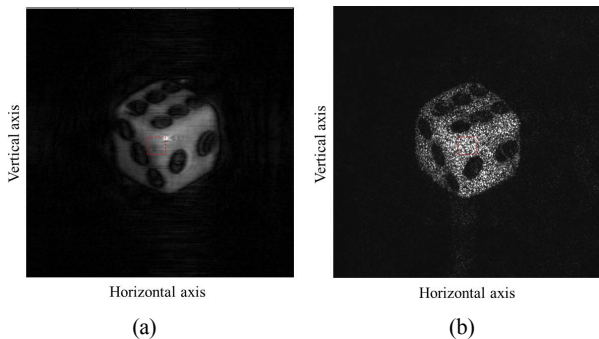
식 (3)에서  $\otimes$  는 콘볼루션을 나타내며  $i_{in-phase}(x, y, z)$  과  $i_{Q-phase}(x, y, z)$  는 각각 in-phase 신호와 quadrature phase 신호를 나타낸다.

그림 2는 그림 1의 광 스캐닝 홀로그래피 시스템을 이용하여 촬영한 실제 물체의 복소 홀로그램을 나타낸 그림이다.<sup>[22]</sup> 그림 2의 (a)와 (b)는 각각 홀로그램의 실수 부분과 허수 부분을 나타낸 그림이다.

실험에 사용한 실제 물체는 3 mm by 3 mm 주사위를 사용하였고 스캔 영역은 약 13.5 mm by 13.5 mm를 설정하였다. 빔 확대기에서 나오는 빛의 크기는 25.4 mm로 설정하였



**FIG. 2.** (a) Real part of the complex hologram (b) Imaginary part of the complex hologram [Y. Km, T. Kim, S. Woo, H. Kang, T.-C. Poon and C. Zhou, “Speckle-free digital holographic recording of a diffusely reflecting object,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 7, pp. 8183-8189, 2013].



**FIG. 3.** (a) Numerical reconstruction of the complex hologram (Fig. 2) (b) CCD imaging of a coherently illuminated dice [Y. Km, T. Kim, S. Woo, H. Kang, T.-C. Poon and C. Zhou, “Speckle-free digital holographic recording of a diffusely reflecting object,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 7, pp. 8183-8189, 2013].

고 구면파를 만들기 위하여 초점거리가 500 mm인 렌즈를 하였다. 그림 2를 보면 스펙클 잡음 없이 홀로그램을 촬영하였기 때문에 프린지 패턴을 관찰할 수 있다.

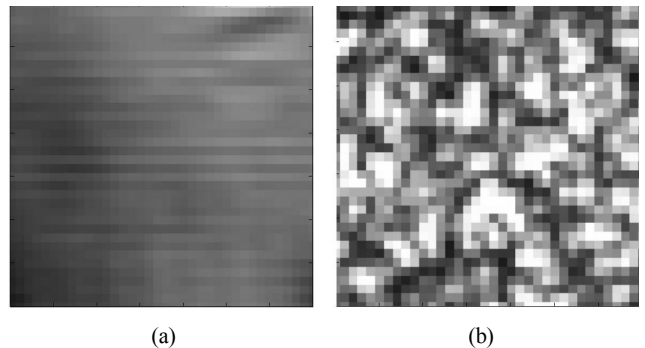
그림 3의 (a)는 그림 2의 복소 홀로그램 데이터를 수치적인 방법을 이용하여 복원한 결과 영상이고 그림 3의 (b)는 동일 물체를 레이저 광원을 이용하여 CCD 카메라로 촬영한 실제 물체 영상이다. 그림 3의 (a) 영상의 경우 스펙클 잡음에 오염되지 않아 깨끗하게 복원되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 그림 3의 (b)의 경우 스펙클 잡음에 오염되어 영상이 깨끗하지 않은 것을 확인할 수 있다.

### III. 스펙클 잡음에 의한 오염도 비교

디지털 홀로그램을 이용한 영상 시스템에서 스펙클 잡음으로 인한 오염도를 정량적으로 평가하는 방법 중 하나로 스펙클 패턴의 대비 수치를 이용한다.<sup>[23, 24]</sup> 스펙클 패턴의 대비 수치가 높으면 스펙클 잡음으로 인한 오염의 정도가 심한 것을 나타낸다. 스펙클 패턴의 대비 수치(C)는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>[24]</sup>

$$C = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} = \frac{\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}}{\langle I \rangle} \quad (4)$$

$I$ 는 스펙클 패턴의 세기를 나타내고  $\langle I \rangle$ 와  $\sigma_I$ 는 각각  $I$ 의 평균과 표준편차를 나타낸다. 그림 4의 (a)와 (b)는 각각 그림 3의 (a)와 (b)의 빨간색 상자에 해당하는 영역을 확대하여 나타낸 그림이다. 식 (4)에 의하여 계산된 그림 4(a)와 그림 4(b) 스펙클 패턴의 대비 수치는 각각 0.0240과 0.0476이다. 스펙클 패턴의 대비 수치를 통하여 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 얻은 홀로그램을 복원한 결과(그림 4(a))가 레이저 광원을 이용하여 촬영한 영상(그림 4(b))보다 스펙클 패턴에 의한 오염도가 약 50.42%정도 향상되었다는 것을 알 수 있다.



**FIG. 4.** (a) Enlarged image within the red box in Fig. 3(a) (b) Enlarged image within the red box in Fig. 3(b).

## VI. 결 론

본 연구에서는 광 스캐닝 홀로그래피 기술을 이용해 촬영한 홀로그램 영상과 일반적인 가간섭형 영상 시스템을 이용해 촬영한 영상의 스펙클 대비 수치를 측정하여 비교하였다. 광 스캐닝 홀로그래피 기술을 이용하여 반사형 물체의 홀로그램을 촬영하고, 촬영된 홀로그램을 수치적인 방법으로 복원 후, 복원된 영상과 레이저 광원을 이용하여 촬영한 동일 물체의 영상이 스펙클 잡음에 얼마나 오염되었는지를 스펙클 패턴의 대비 수치를 이용하여 정량적으로 비교한 결과 약 50.42% 정도 향상됨을 확인하였다.

본 연구에서는 최초로 광 스캐닝 홀로그래피 기술을 이용하여 스펙클 잡음 없이 촬영한 홀로그램과 레이저 광원을 이용하여 촬영한 동일 물체 영상의 스펙클 오염 정도를 정량적인 값으로 비교하여 광 스캐닝 홀로그래피 기술의 우수성을 검증하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기본연구지원사업임 (2010-0022798).

## References

1. J. Berrang, "Television transmission of holograms using a narrow-band video signal," *Bell Syst. Tech. J.* **49**, 879-887 (1970).
2. C. Burckhardt and L. Enloe, "Television transmission of holograms with reduced resolution requirements on the camera tube," *Bell Syst. Tech. J.* **45**, 1529-1535 (1969).
3. T. C. Poon, B. W. Schilling, M. H. Wu, K. Shinoda, and Y. Suzuki, "Real-time two-dimensional holographic imaging by using an electron-beam-addressed spatial light modulator," *Opt. Lett.* **18**, 63-5 (1993).
4. T.-C. Poon, "Optical scanning holography - A review of recent progress," *J. Opt. Soc. Korea* **13**, 406-415 (2009).
5. P. St. Hilaire, S. A. Benton, and M. Lucente, "Synthetic aperture holography: A novel approach to three-dimensional displays," *J. Opt. Soc. Am. A* **9**, 1969 (1992).
6. M. Stanley, "3D electronic holography display system using a 100-megapixel spatial light modulator," *Proc. SPIE* **5249**, 297-308 (2004).
7. D. Gabor, "Holography," *Proc. IEEE* **60**, 1948-1971 (1972).
8. D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature* **161**, 777 (1948).
9. I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.* **22**, 1268 (1997).
10. O. Matoba, T. J. Naughton, Y. Frauel, N. Bertaux, and B. Javidi, "Real-time three-dimensional object reconstruction by use of a phase-encoded digital hologram," *Appl. Opt.* **41**, 6187-6192 (2002).
11. A. Uzan, Y. Rivenson, and A. Stern, "Speckle denoising in digital holography by nonlocal means filtering," *Appl. Opt.* **52**, A195-200 (2013).
12. J. Maycock, B. M. Hennelly, J. B. McDonald, Y. Frauel, A. Castro, B. Javidi, and T. J. Naughton, "Reduction of speckle in digital holography by discrete Fourier filtering," *J. Opt. Soc. Am. A. Opt. Image Sci. Vis.* **24**, 1617-1622 (2007).
13. V. Bianco, M. Paturzo, P. Memmolo, A. Finizio, P. Ferraro, and B. Javidi, "Random resampling masks: A non-Bayesian one-shot strategy for noise reduction in digital holography," *Opt. Lett.* **38**, 619-621 (2013).
14. C. Remmersmann, S. Stürwald, B. Kemper, P. Langehanenberg, and G. von Bally, "Phase noise optimization in temporal phase-shifting digital holography with partial coherence light sources and its application in quantitative cell imaging," *Appl. Opt.* **48**, 1463-1472 (2009).
15. P. Langehanenberg, G. von Bally, and B. Kemper, "Application of partially coherent light in live cell imaging with digital holographic microscopy," *J. Mod. Opt.* **57**, 709-717 (2010).
16. T. Nomura, M. Okamura, E. Nitani, and T. Numata, "Image quality improvement of digital holography by superposition of reconstructed images obtained by multiple wavelengths," *Appl. Opt.* **47**, D38-D43 (2008).
17. M. K. Kim, "Tomographic three-dimensional imaging of a biological specimen using wavelength-scanning digital interference holography," *Opt. Express* **7**, 305-10 (2000).
18. C. Quan, X. Kang, and C. J. Tay, "Speckle noise reduction in digital holography by multiple holograms," *Opt. Eng.* **46**, 115801 (2007).
19. Y. Park, W. Choi, Z. Yaqoob, R. Dasari, K. Badizadegan, and M. S. Feld, "Speckle-field digital holographic microscopy," *Opt. Express* **17**, 12285-12292 (2009).
20. F. Pan, W. Xiao, S. Liu, and L. Rong, "Coherent noise reduction in digital holographic microscopy by laterally shifting camera," *Opt. Commun.* **292**, 68-72 (2013).
21. T. Kozacki and R. Józwicki, "Digital reconstruction of a hologram recorded using partially coherent illumination," *Opt. Commun.* **252**, 188-201 (2005).
22. Y. Kim, T. Kim, S. Woo, H. Kang, T.-C. Poon, and C. Zhou, "Speckle-free digital holographic recording of a diffusely reflecting object," *Opt. Express* **21**, 8183-8189 (2013).
23. J. W. Goodman, *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* (2007), p. 387.
24. Y. Wang, P. Meng, D. Wang, L. Rong, and S. Panzai, "Speckle noise suppression in digital holography by angular diversity with phase-only spatial light modulator," *Opt. Express* **21**, 1463-1472 (2013).
25. T.-C. Poon, *Optical Scanning Holography with MATLAB* (2007), p. 139.
26. Y.-S. Kim, T.-G. Kim, and J.-T. Kim, "Three-dimensional holographic display with twin image noise rejection using off-axis hologram converting," *Korean J. Opt. Photon.* **20**, 328-333 (2009).