

Speckle-Free Digital Hologram with Conversion to Off-Axis Horizontal-Parallax-Only Hologram

You Seok Kim and Taegeun Kim[†]

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

(Received February 28, 2014; Revised manuscript March 24, 2014; Accepted March 24, 2014)

In this paper, we present a speckle-free digital hologram with conversion to an off-axis horizontal-parallax-only (HPO) hologram. First, we record the speckle-free hologram using optical scanning holography. Second, we digitally convert the full-parallax hologram to a horizontal-parallax-only hologram. Third, we convert the horizontal-parallax-only hologram to an off-axis hologram. Finally, we show that the off-axis HPO hologram can be numerically reconstructed in space.

Keywords: Holography, Speckle noise, Horizontal-parallax-only hologram
OCIS codes: (090.1995) Digital holography; (090.2870) Holographic display

탈축 수평 시차 홀로그램 변환과 스펙클 잡음 없는 디지털 홀로그램

김유석 · 김태근[†]

세종대학교 광전자공학과
☎ 143-747 서울시 광진구 군자동

(2014년 2월 28일 받음, 2014년 3월 24일 수정본 받음, 2014년 3월 24일 게재 확정)

본 논문에서는 광 스캐닝 홀로그래피 기술을 이용하여 실제 반사형 물체의 복소 홀로그램을 스펙클 잡음 없이 촬영하고 데이터를 줄이면서 동시에 일반적인 진폭 유일 공간 광 변조기를 이용해 광학적인 방법으로 복원할 수 있도록 탈축 수평 시차 홀로그램으로 변환하였다. 변환된 탈축 수평 시차 홀로그램이 공간상에 복원되어 디스플레이가 될 수 있음을 보이기 위하여 수치적인 방법을 이용하여 홀로그램을 복원하였다.

Keywords: 홀로그래피, 스펙클 잡음, 수평시차 홀로그램
OCIS codes: (090.1995) Digital holography; (090.2870) Holographic display

I. 서 론

홀로그램을 이용한 3차원 디스플레이는 오랜 역사를 갖고 있다.^[1-4] 최근 컴퓨터 기술의 발전으로 디지털 홀로그램을 이용한 3차원 영상 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^[5, 6]

디지털 홀로그램을 이용한 3차원 영상 시스템은 3가지 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째 부분은 실제 물체로부터 홀로그램을 추출하는 홀로그램 촬영 부분이다. 홀로그램 촬영부의 경우 기존에 잘 알려진 방법이 있다.^[7] 하지만 기존에 제안된 방법의 경우 레이저의 결맞음 특성으로 인하여 스펙클 잡음에 심각하게 오염되어 있다.^[7, 8] 최근 이 단점을 극복하고 실제 물체의 홀로그램을 스펙클 잡음 없이 촬영한 연구

결과가 보고되었다.^[9]

디지털 홀로그램을 이용한 3차원 영상 시스템의 두 번째 부분은 홀로그램 정보를 전송 및 복원에 적합한 형태로 변환하는 디지털 신호처리부분이다. 디지털 홀로그램을 이용한 3차원 영상 시스템의 실용화에 있어 걸림돌 중 하나는 홀로그램을 이용한 3차원 영상 시스템에 요구되는 데이터 양이 방대하다는 것이다. 이 문제점을 극복하기 위해서는 요구되는 데이터 양을 줄이는 신호처리가 필요하다.

디지털 홀로그램을 이용한 3차원 영상 시스템의 세 번째 부분은 홀로그램 복원 부분이다. 이 부분은 홀로그램 데이터를 광학적인 방법으로 공간상에 복원하여 3차원 디스플레이를 수행하는 영역이다. 일반적으로 복원 부분에서는 공간 광 변조기를 이용하여 빛의 분포를 홀로그램과 같이 변조하여

[†]E-mail: takim@sejong.ac.kr

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

물체의 3차원 영상을 공간상에 복원하여 디스플레이를 실행한다. 여기서, 일반적인 공간 광 변조기는 빛의 진폭 또는 위상만을 변조한다. 이 때문에 공간 광 변조기를 이용한 광학적인 복원의 경우 복소 홀로그램을 완벽하게 변조하지 못한다는 문제점이 있다. 이 문제점을 해결하기 위한 방법 중 하나로 복소 홀로그램을 진폭 유일의 탈축 홀로그램으로 변환하는 방법이 제안되었다.^[10]

본 연구에서는 광 스캐닝 홀로그램을 이용하여 실제 물체의 홀로그램 정보를 배경 잡음, 쌍 영상 잡음, 스펙클 잡음 없이 촬영하고 이를 수치적으로 처리하여 요구되는 데이터 양을 줄이면서 동시에 진폭 유일 공간 광 변조기를 이용해 변조 가능한 형태인 탈축 수평 시차 홀로그램으로 변환하고, 이를 수치적 방법으로 복원하여 공간상에 3차원 복원이 가능함을 보였다.

II. 광 스캐닝 홀로그래피

그림 1은 실제 물체의 홀로그램을 스펙클 잡음 없이 촬영할 수 있는 광 스캐닝 홀로그래피의 구성도이다. 광 스캐닝 홀로그래피는 스캐닝 거울을 이용한 2차원 스캔으로 실제 물체의 홀로그램 정보를 촬영할 수 있는 시스템으로 기존 연구에서 제안되었다.^[9] 본 논문에서는 광 스캐닝 홀로그래피에 대하여 간단하게 소개하고자 한다. 광 스캐닝 홀로그래피는 두 개의 빔 분할기(BS1, 2)와 두 개의 거울(M1, 2)로 구성된 간섭계 부분과 빛의 세기 형태의 신호를 전기 신호형태로 변환한 뒤 신호처리를 진행하는 전기 신호처리 부분으로 나눌 수 있다. 레이저에서 나온 빛은 빔 분할기(BS1)에서 두 개의 경로로 나뉘어진다. 나뉘어진 빛은 음향 광 변조기(AOM1, 2)를 통과하면서 특정 주파수로 변조된다. 이 때 음향 광 변조기의 변조 주파수는 각각 Ω 와 $\Omega + \Delta\Omega$ 로 설정해준다. 음향 광 변조기를 통과한 빛은 빔 확대기(BE1, 2)를 통과하면서 크기가 확장되고 두 번째 빔 분할기(BS2)에서 서로 합쳐서 간섭을 일으키게 된다. 이 때 한 쪽 경로에만 렌즈(L1)를 두어 구면파와 평면파가 간섭되도록 해준다. 구면파와 평면파가 간섭되면 특이한 간섭무늬가 나타나게 되는데 이를 프레넬 운대판이라고 부른다. 프레넬 운대판 형태의 빛을 스캐닝 거울을 이용하여 실제 물체를 스캔하고 반사된 빛

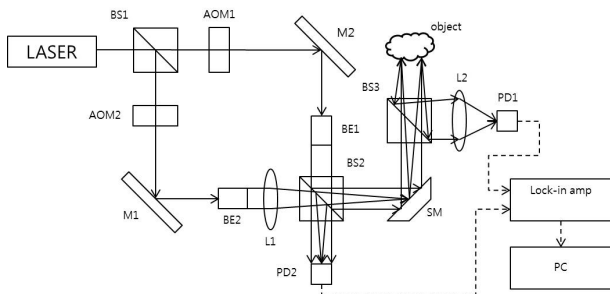


FIG. 1. Optical scanning holography (BS: beam splitter, AOM: Acousto optic modulator, M: mirror, BE: beam expander, SM: Scanning mirror, PD: photo detector, L: lens, PC: personal computer).

을 렌즈(L2)로 집광한다. 집광된 빛은 광 검출기(PD1)를 이용하여 전기 신호 형태로 변환된 후 lock-in 증폭기를 통과하여 컴퓨터(PC)에 저장되게 된다. 수치적인 방법을 이용하여 저장된 신호를 합성하면 복소 홀로그램을 얻을 수 있다. 홀로그램을 얻는 과정을 수식으로 표현하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.^[10]

$$H(x, y) = |H| \exp(j\angle H) = \int I_o(x, y, z) \otimes \frac{j}{\lambda z} \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2)\right\} dz \quad (1)$$

식 (1)에서 $I_o(x, y, z)$ 는 실제 물체의 세기를 나타내고 z 는 물체의 깊이를 나타낸다. λ 는 레이저의 파장을 나타낸다. 이렇게 얻은 복소 홀로그램의 경우 수평 방향에 대한 시차 정보와 수직 방향에 대한 시차 정보를 모두 가지고 있는 전 시차(full parallax) 홀로그램이다. 전 시차 홀로그램의 경우 데이터 양이 많다는 문제점을 가지고 있다. 다음 장에서 이를 극복하기 위해 전 시차 홀로그램을 수평 시차 홀로그램으로 변환한다.

III. 수평 시차 홀로그램 변환

홀로그램을 이용한 3차원 영상 시스템의 실용화에 있어 난제 중 하나는 요구되는 데이터 양이 방대하다는 것이다. 사람의 시각인지가 수직 방향보다 수평 방향에 좀 더 민감하다는 점에 착안하여 홀로그램의 데이터 양을 줄일 수 있는 방법 중 하나로 수평 시차(horizontal-parallax-only) 홀로그램이 제안되었다.^[11] 수평 시차 홀로그램은 수평 방향에 대한 시차 정보만을 가지고 있어 요구되는 데이터 양을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 2장에서 획득한 실제 반사형 물체의 전 시차 홀로그램을 수치적인 방법으로 수평 시차 홀로그램으로 변환한다.^[11]

그림 2는 전 시차 홀로그램을 수평 시차 홀로그램으로 변환하는 수치적인 방법의 흐름도를 나타내고 있다. 먼저 수직 방향에 대하여 주파수 축에서 가우시안 저역 통과 필터를 적용해준다. 가우시안 저역 통과 필터는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)에서 NA_y 는 가우시안 저역 통과 필터의 컷오프 주파수를 나타낸다. k_x 와 k_y 는 각각 수평 방향의 주파수 축과 수직 방향의 주파수 축을 나타낸다. 가우시안 저역 통과 필터를 적용하였을 경우 수평 시차 홀로그램을 얻을 수 있지만 수직 방향으로 곡률이 존재하게 된다.

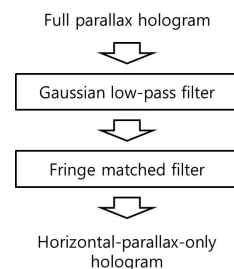


FIG. 2. Flow chart of conversion to a horizontal-parallax-only hologram.

$$G_{low-loss}(k_x, k_y) = \exp\left[-\frac{1}{4\pi}\left(\frac{\lambda}{NA_g}\right)^2 k_y^2\right] \quad (2)$$

이 곡률의 경우 홀로그램을 복원할 때 왜곡으로 작용할 수 있어 보상이 필요하다. 곡률을 보상하기 위하여 프린지 매치 필터를 가우시안 저역 통과 필터와 마찬가지로 주파수 축에서 수직 방향으로 적용한다. 프린지 매치 필터는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)의 z_0 는 물체의 깊이 위치를 나타낸다.

$$F_{fm}(k_x, k_y) = \exp\left[-j\frac{\lambda z_0}{4\pi} k_y^2\right] \quad (3)$$

전 시차 홀로그램을 수평 시차 홀로그램으로 변환하기 위하여 가우시안 저역 통과 필터뿐 아니라 위상 변화가 없는 모든 종류의 저역 통과 필터를 사용할 수 있다. 하지만 사각 필터와 같이 커팅-엣지가 급격한 필터를 사용할 경우 리플과 같은 수치적 결합이 발생할 수 있다. 또한 광 스캐닝 홀로그래피 스캔 빔이 가우시안 프로파일을 가지고 있어 그에 부합하는 가우시안 프로파일을 형성하기 위해 가우시안 저역 통과 필터를 사용하였다.

이렇게 변환 된 수평 시차 홀로그램은 복소 홀로그램으로 수치적인 방법으로 복원할 경우 배경 잡음과 쌍 영상 잡음 없이 홀로그램을 복원할 수 있다. 하지만 공간 광 변조기를 이용하여 광학적인 방법으로 홀로그램을 복원할 경우 공간 광 변조기가 복소 데이터를 표현할 수 없기 때문에 쌍 영상 잡음과 배경 잡음 없이 홀로그램을 복원할 수 없다. 쌍 영상 잡음과 배경 잡음 때문에 복원된 홀로그램이 깨끗하지 않다. 이 문제점을 해결하기 위하여 복소 홀로그램에 수치적인 방법을 이용하여 공간 캐리어를 인가해 배경 잡음과 쌍 영상 잡음의 영향을 받지 않는 탈축 홀로그램으로 변환하는 방법이 제안되었다.^[10] 다음 장에서 탈축 홀로그램으로 변환하는 방법에 대하여 소개하고자 한다.

IV. 탈축 홀로그램 변환

홀로그램을 광학적인 방법으로 공간상에 복원하여 디스플레이 하기 위해서는 빛의 공간적 분포를 공간 광 변조기를

이용하여 홀로그램 패턴으로 변조해 주어야 한다. 그러나, 일반적인 공간 광 변조기는 빛의 진폭 또는 위상만을 변조할 수 있다. 본 장에서는, 빛의 진폭만을 변조할 수 있는 진폭 유일 공간 광 변조기를 이용하여 홀로그램을 광학적으로 복원하기 위하여, 수치적인 방법으로 2장에서 얻은 수평 시차 홀로그램에 공간 캐리어를 인가하는 방식으로 탈축 홀로그램으로 변환한다. 다음은 탈축 홀로그램으로 변환하는 과정에 대한 설명이다.

$$\begin{aligned} H_{off-axis}^{complex}(x, y) &= |H| \exp(j\angle H) \times \exp\left(j\frac{2\pi \sin \theta}{\lambda} x\right) \\ &= |H| \exp\left[j\left(\angle H + \frac{2\pi \sin \theta}{\lambda} x\right)\right] \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)는 복소 홀로그램에 공간 캐리어를 인가하여 탈축 홀로그램으로 변환하는 과정을 나타낸 수식이다. $\exp\left(j\frac{2\pi \sin \theta}{\lambda} x\right)$ 는 인가된 공간 주파수를 나타내며 θ 는 기준광의 광 축과 물체광의 광 축의 사이각을 나타낸다. 공간 광 변조기를 이용하여 변환된 탈축 홀로그램을 광학적인 방법으로 복원할 경우 입사시켜준 참조광의 광 축과 θ 만큼 공간적으로 분리되어, 배경 잡음, 쌍 영상 잡음이 공간적으로 분리되어 잡음 없이 홀로그램이 공간 상에 복원된다. 식 (4)와 같이 수치적으로 변환된 탈축 홀로그램의 실수 부분을 추출한 뒤 DC 바이어스를 인가하여 최종적으로 진폭 유일 공간 광 변조기에서 표현할 수 있는 탈축 홀로그램으로 변환한다.

V. 실험결과

본 연구에서는 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 3 mm×3 mm×3 mm의 주사위의 홀로그램을 촬영하였다. 실험에 사용한 레이저는 파장이 532 nm인 Nd-YAG 레이저를 사용하였고 두 개의 음향 광 변조기의 변조 주파수는 각각 40 MHz와 40.01 MHz로 설정하였다. 구면파를 만들어주는 렌즈(L1)는 초점거리가 500 mm인 렌즈를 사용하였다. 탈축 홀로그램 변환을 위한 공간 주파수의 θ 는 1.74°로 해주었다.

그림 3(a)와 그림 3(b)는 광 스캐닝 홀로그래피로 촬영한 복소 홀로그램의 세기 이미지와 위상 이미지를 보여준다. 광 스캐닝 홀로그래피의 경우 반사된 빛을 렌즈로 집광하는 공

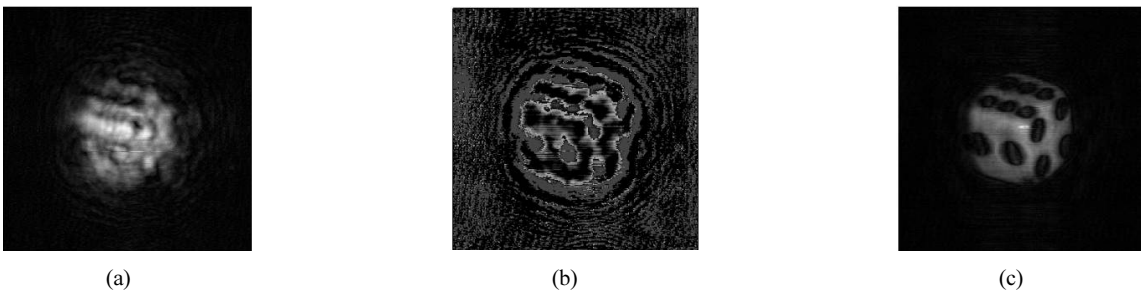


FIG. 3. (a) Amplitude of the complex hologram (b) Phase of the complex hologram (c) Numerical reconstruction of the complex hologram.

간 통합 처리과정을 이용하여 스펙클 잡음 없이 홀로그램을 촬영할 수 있다. 그림 3(b)를 보면 스펙클 잡음 없이 홀로그램을 촬영하였기 때문에 프린지 패턴을 관찰할 수 있다. 그림 3(b)를 보면 수평 방향과 수직 방향 모두 프린지 패턴이 존재한다는 것을 알 수 있다. 즉 수평 방향과 수직 방향의 시차 정보를 모두 가지고 있는 전 시차 홀로그램임을 알 수 있다. 그림 3(c)는 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 촬영한 홀로그램을 수치적으로 복원한 결과이다. 그림 3(c)를 보면 스펙클 잡음 없이 홀로그램이 깨끗하게 복원되는 것을 확인할 수 있다.

그림 4(a)는 앞서 소개한 디지털 연산 방법을 이용하여 탈축 수평 시차 홀로그램으로 변환한 복소 홀로그램의 실수 부분을 나타낸다. 그림4(b)는 그림4(a)의 일부 영역을 확대한 그림이다. 그림4(b)를 보면 세로 방향으로 격자 무늬가 보이는 것을 확인할 수 있다. 이 격자 무늬가 복원된 홀로그램을 배경 잡음과 쌍 영상 잡음으로부터 공간적으로 분리하는 역할을 한다.

그림 5는 그림 4의 변환 된 탈축 수평 시차 홀로그램의 실수 부분만을 추출하여 DC 바이어스를 인가한 후 수치적으로 복원한 결과이다. 그림 5를 보면 세 영역에서 이미지가 존재하는 것을 알 수 있다. 그림 5의 중앙은 배경 잡음을 나타내고 배경 잡음을 기준으로 왼쪽은 복원된 홀로그램, 오른쪽은 쌍 영상 잡음을 나타낸다. 이 결과를 통해서 변환된 탈축 수평 시차 홀로그램이 배경 잡음과 쌍 영상 잡음의 영향을 받지 않고 공간적으로 분리되어 복원된다는 것을 알 수 있다. 또한 복원된 홀로그램을 보면 수평 시차 홀로그램으로 변환

되었기 때문에 수직 방향으로 시차정보를 가지고 있지 않아 초점을 맺지 못하고 뿌옇게 흐려지는 것을 확인할 수 있다. 수직 방향으로 뿌옇게 흐려지는 것은 그림 3(c)과 비교하면 좀 더 뚜렷하게 확인할 수 있다. 이를 통하여 본 연구에서 목표로 하였던 수평 시차 탈축 홀로그램으로 변환이 잘 되었다는 것을 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

본 연구에서는 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 반사형 물체의 복소 홀로그램을 스펙클 잡음 없이 추출하는데 성공하였고 추출한 복소 홀로그램을 탈축 수평 시차 홀로그램으로 변환하는데 성공하였다. 또한 변환된 탈축 수평 시차 홀로그램을 수치적인 복원 방법을 이용하여 배경 잡음과 쌍 영상 잡음의 영향을 받지 않고 공간적으로 분리되어 복원됨을 확인하였다. 본 연구를 통하여 광 스캐닝 홀로그래피 기반의 디지털 홀로그램을 이용한 3차원 영상 시스템의 구현 가능성을 보였다.

본 연구에서는 최초로 실제 반사형 물체의 복소 홀로그램을 추출하고 탈축 수평 시차 홀로그램으로 변환하는 홀로그램 3차원 영상 시스템을 시연하였고, 공간상에 복원됨을 수치적 방법으로 검증하였다. 향후 홀로그램을 광학적으로 복원하여 광 스캐닝 홀로그래피 기반의 디지털 홀로그램을 이용한 3차원 영상 시스템을 구성할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 Giga Korea 사업의 디지털 홀로그래픽 테이블탑형 단말 기술 개발 사업[GK13D0100]의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. C. Burckhardt and L. Enloe, "Television transmission of holograms with reduced resolution requirements on the camera tube," *Bell Syst. Tech. Jour* **45**, 1529-1535 (1969).
2. J. Berrang, "Television transmission of holograms using a narrow-band video signal," *Bell Syst. Tech. J.* **49**, 879-887 (1970).
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**, 63-65 (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**,

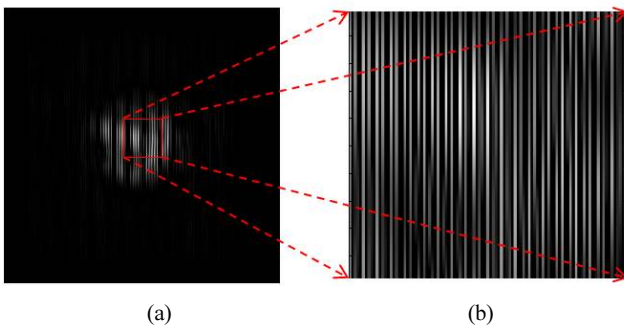


FIG. 4. (a) Real part of the horizontal-parallax only (HPO) off-axis hologram (b) Enlarged image within the red box of (a).

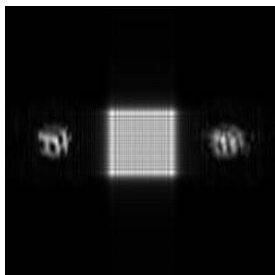


FIG. 5. Numerical reconstruction of the HPO off-axis hologram.

- 297-308 (2004).
7. I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.* **22**, 1268 (1997).
 8. 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).
 9. Y. Kim, T. Kim, S. Woo, and H. Kang, "Speckle-free digital holographic recording of a diffusely reflecting object," *Opt. Express* **21**, 8183-8189 (2013).
 10. 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. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **20**, 328-333 (2009).
 11. T. Kim, Y. S. Kim, W. S. Kim, and T. Poon, "Algorithm for converting full-parallax holograms to horizontal-parallax-only holograms," *Opt. Lett.* **34**, 1231-1233 (2009).