

## Binocular Holographic Three-Dimensional Imaging System Using Optical Scanning Holography

You Seok Kim<sup>1</sup> and Taegeun Kim<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Department of Optical Engineering, Sejong University, 98 Kunja-dong, Kwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Sejong University, 98 Kunja-dong, Kwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea

(Received August 11, 2015; Revised manuscript August 28, 2015; Accepted September 1, 2015)

In this paper we propose a binocular holographic three-dimensional (3D) imaging system using optical scanning holography. To realize a binocular 3D holographic imaging system, we could acquire the complex holograms of a real object after designing a holographic display system based on interpupillary distance and pupil size, and these holograms could be optically reconstructed following numerical signal processing with an amplitude spatial light modulator. The proposed binocular 3D holographic imaging system using optical scanning holography was verified experimentally.

Keywords: Holography, Optical scanning holography

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

## 광 스캐닝 홀로그래피를 이용한 양안식 3차원 홀로그래픽 영상 시스템

김유석<sup>1</sup> · 김태근<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 광전자공학과

☎ 143-747 서울시 광진구 군자동 98번지

<sup>2</sup>세종대학교 전자정보통신공학과

☎ 143-747 서울시 광진구 군자동 98번지

(2015년 8월 11일 받음, 2015년 8월 28일 수정본 받음, 2015년 9월 1일 게재 확정)

본 논문에서는 광 스캐닝 홀로그래피를 이용한 양안식 3차원 홀로그래픽 영상 시스템을 제안하였다. 양안식 3차원 홀로그래픽 영상 시스템을 구현하기 위하여 사람의 두 눈 사이의 거리와 동공의 크기를 고려하여 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이 시스템을 설계한 뒤 실제 물체의 홀로그램 정보를 획득하였고 수치적인 신호 처리 후 세기 형태의 공간 광 변조기를 이용하여 광학적인 방법으로 복원하였다. 이를 통하여 광 스캐닝 홀로그래피를 이용한 양안식 3차원 홀로그래픽 영상 시스템의 구현 가능성을 실험적으로 확인하였다.

Keywords: 홀로그래피, 광 스캐닝 홀로그래피

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

### I. 서 론

양안식 3차원 디스플레이 기술은 사람의 두 눈의 좌안에 해당하는 영상과 우안에 해당하는 영상을 서로 구분되도록 디스플레이하여 사람이 3차원 깊이감을 인지하는 디스플레이 기술이다 [1-4]. 여러 종류의 양안식 3차원 디스플레이 기술 중 안경식 스테레오스코픽(stereoscopic) 디스플레이 기술이 가장 먼저 상용화되었지만, 안경식 스테레오스코픽 디스

플레이 기술은 수렴-조절 불일치(accommodation-convergence mismatch)의 문제로 장시간 시청할 경우 관찰자가 어지러움을 느끼는 한계점을 가지고 있다 [5, 7]. 하지만 홀로그램 기술은 공간 상에 빛의 분포를 재현하는 기술이기 때문에 이런 문제가 발생하지 않으며 광원의 결맞음 특성을 이용한 기술로 실제 물체의 깊이 정보를 획득할 수 있는 기술이다 [8, 9]. 이러한 특징 때문에 3차원 디스플레이를 구현하기 위한 방법 중 하나로 많은 관심을 받고 있다. 홀로그램을 이용한 3

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

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

차원 디스플레이를 구현하기 위해서는 극복해야 하는 몇가지 기술적인 어려움이 있다. 첫 번째 어려움은 광원의 결맞음 특성에 의한 스펙클 잡음을 제거해야 한다는 것이다 [10]. 일반적으로 실제 물체의 홀로그램을 획득하기 위하여 레이저와 같이 결맞음 특성이 강한 광원을 사용한다. 따라서 실제 물체의 홀로그램 정보를 획득하는 과정에서 임의의 세기 패턴인 스펙클 잡음도 함께 획득된다. 이렇게 획득된 실제 물체의 홀로그램은 스펙클 잡음에 오염되어 복원된 영상이 깨끗하지 않다. 홀로그램 정보 획득 과정에서 스펙클 잡음에 오염되는 것을 방지하거나 획득된 홀로그램 정보의 스펙클 잡음을 제거하는 방법에 대한 연구가 진행되었다 [11-15]. 하지만 이러한 접근 방법은 스펙클 잡음 제거와 함께 물체의 홀로그램 정보도 훼손되는 한계가 있으며, 스펙클 잡음의 제거 정도가 크지 않다. 최근 레이저를 사용한 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 실제 물체의 홀로그램 정보를 스펙클 잡음 없이 획득한 연구 결과가 보고 되었다 [16, 18]. 광 스캐닝 홀로그래피 기술은 결맞음 특성이 강한 레이저를 사용하지만 비결맞음 영상 처리 방법과 공간 집광 처리 방법을 이용하여 실제 물체의 홀로그램 정보를 스펙클 잡음 없이 획득할 수 있는 장점을 가지고 있다. 홀로그램을 이용한 3차원 디스플레이를 구현하기 위하여 극복해야 하는 두 번째 어려움은 3차원 디스플레이를 위한 홀로그램 정보의 양이 너무 많다는 것이다. 홀로그램은 기존의 2차원 영상과 달리 물체의 세기 정보와 위상 정보를 모두 가지고 있어 3차원 디스플레이를 위해 요구되는 정보의 양이 많다. 최근 이러한 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 새로운 방법이 제안되었다 [19, 21]. 새롭게 제안된 방법은 기존의 평판형 디스플레이와 달리 사람이 가지고 있는 두 눈의 동공 크기에 해당하는 영역에만 홀로그램을 디스플레이하여 요구되는 홀로그램 정보의 양과 공간 광 변조기(SLM: Spatial light modulator)의 기술적 한계를 극복하는 방법을 제안한 것이다.

본 논문에서는 실제 물체의 홀로그램 정보를 스펙클 잡음 없이 획득할 수 있는 광 스캐닝 홀로그래피를 이용한 양안식 3차원 홀로그래픽 영상 시스템을 새롭게 제안하였고 실험을 통하여 구현 가능성을 검증하였다.

## II. 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이

본 절에서는 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이의 기본적인 구성과 요구 사항에 대해 설명한다.

Figure 1은 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이 시스템의 기본적인 구성을 나타낸 그림이다. Figure 1의 왼쪽에 있는 두 개의 공간 광 변조기(SLM for Left eye, SLM for Right Eye)는 실제 물체의 홀로그램 정보를 업로드하여 공간 상에 물체의 영상을 복원하는 용도로 사용되며 Fig. 1의 중앙에 위치한 주사위는 공간 상에 복원된 홀로그램 영상을 나타낸다. 두 개의 공간 광 변조기 중 위쪽에 위치한 공간 광 변조기(SLM for Left eye)는 좌안에서 관찰되는 영상의 홀로그램 정보를 업로드하여 공간 상에 복원하고 아래쪽에 위치한 공

간 광 변조기(SLM for Right eye)는 우안에서 관찰되는 영상의 홀로그램 정보를 업로드하여 공간 상에 복원한다. Figure 1의 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이 시스템을 구성하기 위해서는 아래의 세 가지 조건을 충족해야 한다.

첫 번째 조건은 두 개의 공간 광 변조기에서 공간 상에 복원된 영상의 빛이 각각 두 눈의 조망영역(Viewing zone)을 충족시켜야 한다는 것이다. 다시 말하면 Fig. 1의 아래쪽 공간 광 변조기에서 공간 상에 복원된 영상은 우안의 조망영역(Viewing zone of Right eye)을 충족시켜야 하며 Fig. 1의 위쪽 공간 광 변조기에서 공간 상에 복원된 영상은 좌안의 조망영역(Viewing zone of Left eye)을 충족시켜야 한다. 두 개의 공간 광 변조기에서 공간 상에 복원된 영상이 두 눈의 조망영역(Viewing zone)을 충족시키지 못할 경우 양안을 위치시킬 수 있는 영역이 제한되어 편안한 3차원 영상 향유에 제한이 있고 초점조절 자극 정도가 줄어든다.

두 번째 조건은 두 개의 공간 광 변조기에서 공간 상에 복원된 영상이 각각 같은 위치에서 복원되어야 한다는 것이다. 즉, Fig. 1의  $d_l$ 과  $d_r$ 이 동일해야 한다.  $d_l$ 은 좌안에 해당하는 홀로그램 영상을 복원하는 공간 광 변조기에서 복원된 홀로그램 영상까지의 거리를 나타내며  $d_r$ 은 우안에 해당하는 홀로그램 영상을 복원하는 공간 광 변조기에서 복원된 홀로그램 영상까지의 거리를 나타낸다. 만약  $d_l$ 과  $d_r$ 이 다를 경우 사람의 두 눈이 초점을 맺는 위치가 서로 달라 양안의 초점 조절 불일치에 의해 복원된 홀로그램 영상을 장시간 관찰할 경우 관찰자의 어지러움을 유발 할 수 있다.

세 번째 조건은 두 개의 공간 광 변조기에서 공간 상에 복원된 영상이 공간적으로 분리되어 해당 눈에서만 관찰되어야 한다는 것이다. 다시 말하면 Fig. 1의 위쪽 공간 광 변조기에서 공간 상에 복원된 영상은 Fig. 1의 좌안에서만 관찰되고 Fig. 1의 아래쪽 공간 광 변조기에서 공간 상에 복원된 영상은 Fig. 1의 우안에서만 관찰되어야 한다. 만약 두 개의 공간 광 변조기에서 공간 상에 복원된 영상이 공간적으로 서로 분리되지 않을 경우 좌안에서 우안의 영상이 관찰되거나 우안에서 좌안의 영상이 관찰되는 문제점이 발생한다. 따라서 두 개의 공간 광 변조기에서 복원되는 홀로그램 영상이 공간적으로 분리되도록 공간 상에 복원된 홀로그램 영상에서 두 눈

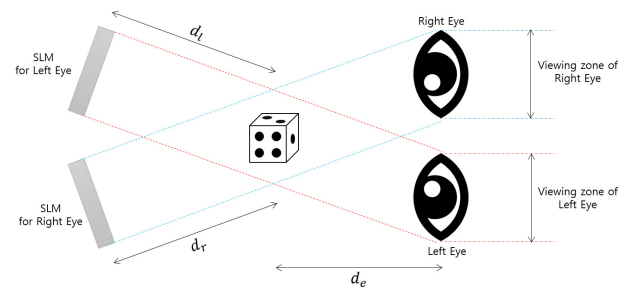


FIG. 1. Schematics of the binocular holographic 3D imaging system ( $d_l$  : distance between SLM for Left Eye and object,  $d_r$  : distance between SLM for Right Eye and object,  $d_e$  : distance between object and eyes, SLM : spatial light modulator).

까지의 거리인  $d_e$ 를 충분히 확보하거나 두 개의 공간 광 변조기의 각도를 적절하게 설정해야 한다.

### III. 광 스캐닝 홀로그래피

광 스캐닝 홀로그래피는 광 헤테로다인 검출 방법과 2차원 스캐닝 방식을 이용하여 실제 물체의 홀로그램 정보를 전기 신호 형태로 획득하는 기술이다 [22]. Figure 2는 광 스캐닝 홀로그래피를 나타낸 그림으로 투과형 물체의 홀로그램 정보를 획득하는 시스템을 나타내고 있다.

광 스캐닝 홀로그래피는 일반적인 마하젠더 간섭계 구조에 음향 광 변조기(AOM1, 2)와 빔 확대기(BE1, 2), 렌즈(L1)를 추가한 간섭계 부분과 스캐닝 거울을 이용하여 실제 물체를 스캐닝하는 스캐닝 부분, 광 검출기를 이용하여 빛의 세기 형태인 신호를 전기 신호 형태로 변환 후 신호 처리하여 컴퓨터에 실제 물체의 홀로그램 정보를 저장하는 전기 신호 처리 부분으로 구성되어 있다. 간섭계 부분에서는 두 개의 음향 광 변조기(AOM1, 2)를 이용하여 시간적으로 변조된 시간 종속 프레넬 존 플레이트(Time-dependent fresnel zone plate)형태를 가진 빛의 패턴을 생성한다.

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

식 (1)은 광 스캐닝 홀로그래피의 간섭계 부분에서 생성된 시간 종속 프레넬 존 플레이트 형태의 빛을 나타낸 식이다 [16]. 식 (1)의  $\Omega + \Delta\Omega$ 는 첫 번째 음향 광 변조기(AOM1)의 변조 주파수를 나타내고  $\Omega$ 는 두 번째의 음향 광 변조기(AOM2)의 변조 주파수를 나타낸다.  $\lambda$ 는 레이저의 파장을 나타내고  $z$ 는 렌즈 1의 초점 위치에서부터 물체(object)까지의 거리를 나타낸다. 스캐닝 부분에서는 간섭계 부분에서 생성된 시간 종속 프레넬 존 플레이트 형태의 빛을 스캐닝 거울을 이용하

여 실제 물체를 스캔한다. 스캐닝 거울을 이용하여 실제 물체를 스캐닝하는 과정은 식 (2)와 같이 공간적인 2차원 콘볼루션(convolution)으로 나타낼 수 있다.

$$I_h(x, y, z) \propto \iiint I_{FZP}(x', y', z'; t) I_o(x + x', y + y'; z) dx' dy' dz \quad (2)$$

식 (2)의  $I_{FZP}$ 는 광 스캐닝 홀로그래피의 간섭계 부분에서 생성한 프레넬 존 플레이트 형태의 빛을 나타내며  $I_o$ 는 물체에서 반사 혹은 투과된 빛의 패턴을 나타낸다. 스캐닝을 통해 물체를 투과한 빛은 렌즈(L2)에 의하여 집광된 후 광 검출기(PD1)에 의하여 전기 신호 형태의 신호로 변환된다. 전기 신호 처리 부분의 lock-in amp는 변환된 전기 신호 형태의 신호를 입력으로 받아 신호 처리 후 두 개의 출력 신호를 내보낸다. 이 두 신호는 각각 in-phase 신호와 quadrature phase 신호로 컴퓨터 저장된다. 컴퓨터에 저장된 두 신호를 수치적인 방법으로 합성하여 최종적으로 실제 물체의 복소 홀로그램 정보를 얻는다. 컴퓨터에 저장된 두 신호를 수치적인 방법으로 합성하는 과정은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다 [16].

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

식 (3)의  $i_{in-phase}(x, y, z)$ 와  $i_{Q-phase}(x, y, z)$ 는 각각 lock-in amp의 출력 신호인 in-phase 신호와 quadrature phase 신호를 나타내며  $\lambda$ 는 광원의 파장,  $z$ 는 물체의 깊이 위치를 나타낸다.

### IV. 광 스캐닝 홀로그래피를 이용한 양안식 3차원 홀로그래픽 영상 시스템 설계 및 실험 결과

광 스캐닝 홀로그래피를 이용한 양안식 3차원 홀로그래픽 영상 시스템을 구성하기 위해서는 먼저 2절에서 설명하였던 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이 시스템의 세 가지 요구조건을 충족시키는 시스템 조건을 설정해야 한다. 이후 설정된 조건을 충족시키도록 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 실제 물체의 홀로그램 정보를 획득한다. 광 스캐닝 홀로그래피를 이용한 양안식 3차원 홀로그래픽 영상 시스템을 구성하기 위하여 Fig. 3과 같이 양안식 3차원 디스플레이 시스템의 조건을 설정하였다.

공간 광 변조기에서 물체가 복원되는 거리인  $d_l$ 과  $d_r$ 은 약 160 cm로 설정하였고 물체가 복원되는 위치에서 관찰자 눈까지의 거리는 약 30 cm로 설정하였다. 두 눈의 조망영역에 해당하는 동공의 크기는 약 8 mm이며 두 눈 사이의 거리는 약 6.5 cm이다 [23, 24]. 위의 양안식 3차원 디스플레이 시스템의 조건을 통해 양쪽 눈에 보이는 영상의 각도를 계산해보면 물체의 정면 위치를  $0^\circ$ 라고 하였을 때 좌안과 우안에서

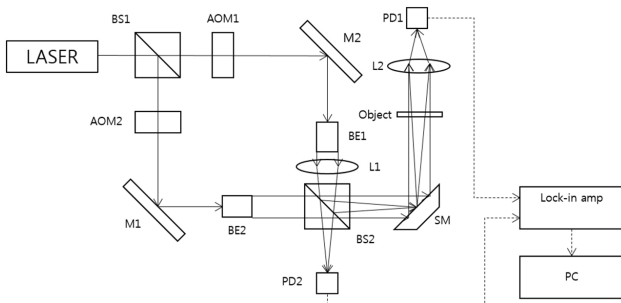
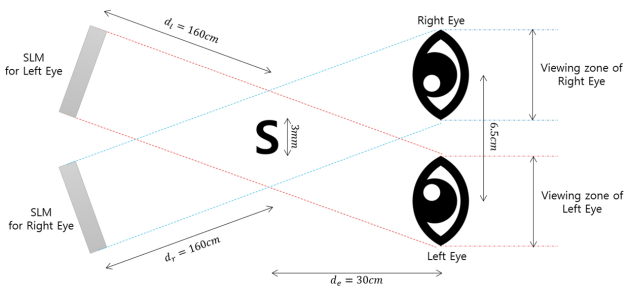
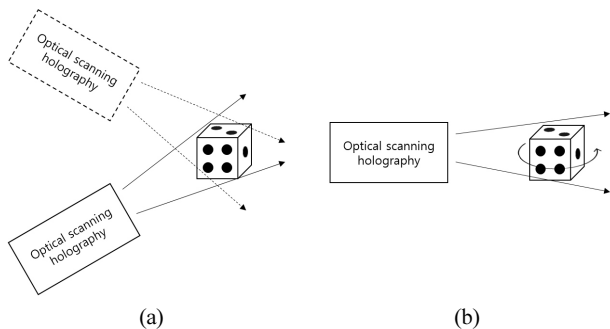


FIG. 2. Schematics of the optical scanning holography (BS's : beam splitter, AOM's : acousto-optic modulator, M's : mirror, BE's : beam expander, L : lens, SM : scanning mirror, PD's : photo detector, PC : personal computer).

관찰되는 영상은 각각  $-6^\circ$ 와  $+6^\circ$ 임을 알 수 있다. 또한 복원되는 물체의 크기를  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 로 설정하여 두 눈의 조망영역을 충족시킬 수 있도록 실험 조건을 설정하였다. 본 연구에서는 크기가  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 인 ‘S’ 슬라이드 필름을 제작하여 실제 물체로 사용하였으며 파장이  $532\text{ nm}$ 인 Nd-Yag 레이저를 사용하였다. 두 개의 음향 광 변조기(AOM1, 2)의 변조 주파수는 각각  $40\text{ MHz}$ 와  $40.01\text{ MHz}$ 로 설정해 주었다. 구면파를 만드는 렌즈(L1)는 초점 거리가  $500\text{ mm}$ 인 렌즈를 사용하였으며 빔 확대기(BE1, 2)에서 확대된 빛의 크기는 약  $25.4\text{ mm}$ 로 측정되었다. 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이 시스템의 설정 조건에 맞춰 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 실제 물체의 홀로그램 정보를  $-6^\circ$ 의 시점과  $+6^\circ$ 의 시점에서 촬영하였다. 실제 물체인 ‘S’ 슬라이드 필름은 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이 시스템에서 홀로그램을 복원하였을 때 Fig. 3에서 설정한 위치에서 복원될 수 있도록 위치시켰다. 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 두 시점( $-6^\circ$ 의 시점과  $+6^\circ$ 의 시점)에서 실제 물체의 홀로그램 정보를 획득하기 위해서는 Fig. 4의 (a)와 같이 광 스캐닝 홀로그래피 시스템의 위치를 변경해야 하지만 실험의 편의상 Fig. 4의 (b)와 같이 물체를 회전하는 실험 셋업을 구성하여 수평 방향으로의 두 시점에서 실제 물체의 홀로그램 정보를 획득하였다. 사람의 두 눈이 양쪽으로 벌어져 있기 때문에 수직 방향에 대한 시점 변화는 동일한 것으로 가정하였다.



**FIG. 3.** Experiment condition of the binocular holographic 3D imaging system using optical scanning holography ( $d_l$ : distance between SLM for Left Eye and object,  $d_r$ : distance between SLM for Right Eye and object,  $d_e$ : distance between object and eyes).



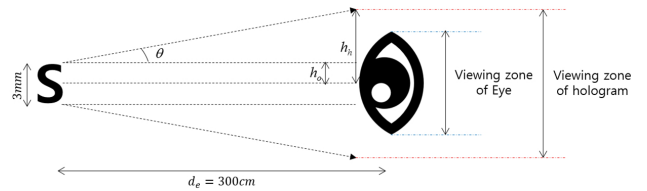
**FIG. 4.** Method of the record hologram with two view using optical scanning holography.

Figure 5는 관찰자의 눈이 위치한 지점에서 복원된 홀로그램의 조망영역을 나타낸다. Figure 5의 왼쪽에 위치한 ‘S’는 실제 공간상에 복원된 물체를 나타내고  $\theta$ 는 복원된 홀로그램으로부터 회절되어 도파되는 회절각을 나타낸다.  $h_o$ 와  $h_h$ 는 각각 물체 크기의 절반과 복원된 홀로그램 조망영역 값의 절반을 나타낸다. 따라서, 조망영역의 크기는 식 (4)와 같이 주어진다.

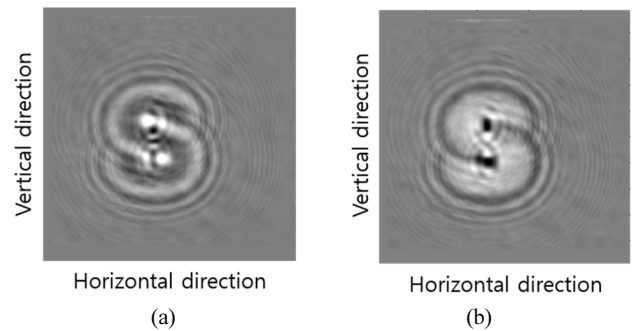
$$\text{viewing zone of hologram} = 2h_h = 2(d_e \tan(\theta) + h_o) \quad (4)$$

복원된 홀로그램의 빛이 회절되는 각도  $\theta$ 는 광 스캐닝 홀로그래피 시스템에서 구면파를 만드는 렌즈의 초점거리( $f$ )와 렌즈에 입사되는 빛의 크기( $D$ )에 따라서 결정된다. 위의 실험 설정 값에 의하여 복원된 홀로그램의 회절 각도( $\theta$ )는  $1.455^\circ$  ( $\theta = \tan^{-1}(12.7/500) = 1.455^\circ$ )이며 복원된 홀로그램의 조망영역 값은 식 (4)에 따라  $18.24\text{ mm}$ 이다. 이를 통하여 본 연구에서 구성한 실험 셋업을 이용하여 획득한 실제 물체의 홀로그램을 복원하면 단안의 조망영역을 충족하는 것을 확인하였다.

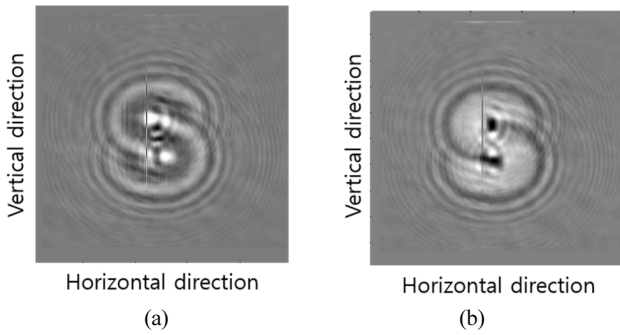
Figure 6과 Fig. 7은 각각  $+6^\circ$ 의 시점에서 촬영한 실제 물체의 복소 홀로그램 정보와  $-6^\circ$ 의 시점에서 촬영한 실제 물체의 복소 홀로그램 정보를 나타낸 실험 결과이다. Fig. 6의 (a)와 Fig. 7의 (a)는 복소 홀로그램 정보 중 실수 부분을 나타내며 Fig. 6의 (b)와 Fig. 7의 (b)는 복소 홀로그램 정보 중 허수 부분을 나타낸다.



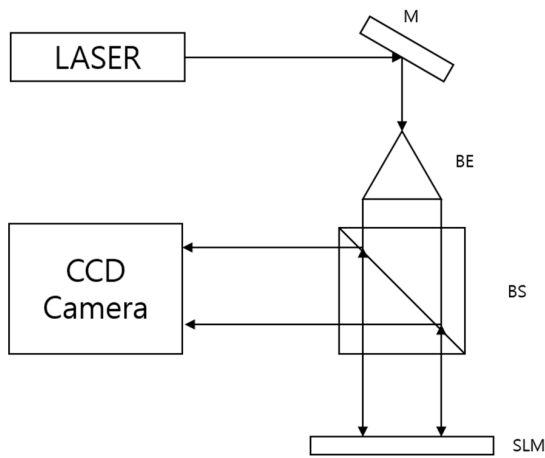
**FIG. 5.** Viewing zone of hologram ( $\theta$ : angle of the diffraction light,  $h_o$ : half of the object height,  $h_h$ : half of the viewing zone of hologram,  $d_e$ : distance between object and eye).



**FIG. 6.** Complex hologram recorded at  $6^\circ$  view point ((a): real part of the complex hologram, (b): imaginary part of the complex hologram).



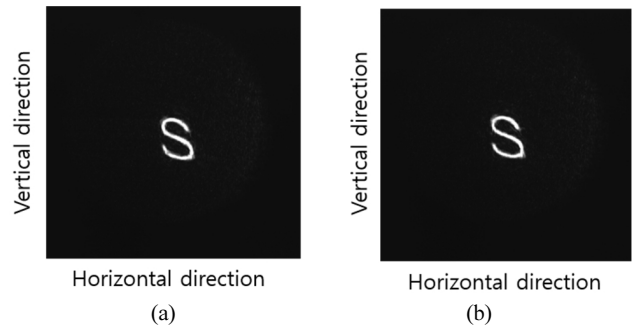
**FIG. 7.** Complex hologram recorded at  $-6^\circ$  view point ((a) : real part of the complex hologram, (b) : imaginary part of the complex hologram).



**FIG. 8.** Hologram optical reconstruction system (M : mirror, BE : beam expander, BS : beam splitter, SLM : spatial light modulator).

Figure 8은 Fig. 6과 Fig. 7의 실제 물체의 홀로그램 정보를 광학적인 방법으로 복원하기 위한 홀로그램 광학 복원 시스템을 나타낸 그림이다. Figure 8의 홀로그램 광학 복원 시스템은 공간 광 변조기를 한 개만 사용하여 구성한 것으로 실제 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이를 구현하기에 앞서 Fig. 6과 Fig. 7의 복소 홀로그램 정보를 광학적으로 복원하기 위하여 사용하였다. 실험에 사용한 공간 광 변조기는 LCos 타입의 공간 광 변조기로 크기가  $15.5 \text{ mm} \times 15.5 \text{ mm}$  이고 픽셀 간격이  $7 \mu\text{m}$ , 픽셀 수가  $1920 \times 1080$ 인 세기 형태의 공간 광 변조기를 사용하였다. Figure 6과 Fig. 7의 복소 홀로그램 정보를 배경 잡음과 쌍 영상 잡음 없이 세기 형태의 정보만 표현할 수 있는 공간 광 변조기를 사용하여 광학적인 방법으로 복원하기 위하여 실수 형태의 탈축 홀로그램 정보로 변환하였다. 복소 홀로그램 정보를 실수 형태의 탈축 홀로그램 정보로 변환하는 과정은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다 [25].

$$H_{\text{off-axis}}(x, y) = \text{Re} \left[ H_o(x, y) \exp \left( \frac{-j2\pi \sin \theta}{\lambda} \right) \right] + dc \quad (5)$$



**FIG. 9.** Optically reconstructed hologram ((a) : optically reconstructed hologram of the recorded at  $-6^\circ$  view point (b) : optically reconstructed hologram of the recorded at  $6^\circ$  view point).

식 (5)의  $H_o(x, y)$ 는 복소 홀로그램 정보를 나타내고  $l$ 는 광원의 파장,  $dc$ 는 직류성분,  $\theta$ 는 탈축 각도를 나타낸다. 식 (5)의 탈축 각도에 의하여 복원되는 홀로그램과 배경 잡음, 쌍 영상 잡음이 공간적으로 분리된다. 본 연구에서는 탈축 각도를  $0.87^\circ$ 로 설정하였고  $\lambda$ 는 홀로그램 획득 시 사용하였던 레이저와 동일한  $532 \text{ nm}$ 로 설정하였다.

Figure 9는 Fig. 6과 Fig. 7의 복소 홀로그램 정보를 식 (5)와 같이 수치적으로 신호 처리하여 실수 형태의 탈축 홀로그램 정보로 변환 후 Fig. 8의 홀로그램 광학 복원 시스템을 이용하여 광학적으로 복원한 결과이다. Figure 9의 (a)는  $-6^\circ$ 의 시점에서 획득한 홀로그램 정보(Fig. 6)를 복원한 결과이고 Fig. 9의 (b)는  $+6^\circ$ 의 시점에서 획득한 홀로그램 정보(Fig. 7)를 복원한 결과이다. Figure 9를 보면  $-6^\circ$ 의 시점에서 획득한 홀로그램 정보와  $+6^\circ$ 의 시점에서 획득한 홀로그램 정보가 배경 잡음과 쌍 영상 잡음 없이 깨끗하게 복원된 것을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이의 기본 구성과 요구 사항에 대하여 설명하였다. 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이는 두 개의 공간 광 변조기를 이용하여 양안에 해당하는 홀로그램 영상을 각각 공간 상에 복원하는 구조로 사람의 두 눈 사이의 거리와 동공의 크기, 복원된 홀로그램 영상의 회절 각도, 복원된 홀로그램 영상에서 관찰자까지의 거리 등을 고려하여 시스템을 설계해야 한다. 특히 공간 상에 복원된 홀로그램 영상의 회절된 빛은 동공의 크기에 해당하는 조망영역을 충족시켜야 하며 두 개의 공간 광 변조기에서 각각 공간 상에 복원된 홀로그램 영상은 공간적으로 분리되어 해당 눈(좌안과 우안)에서만 관찰되어야 한다. 이와 같은 요구 사항을 고려하여 양안식 3차원 홀로그래픽 영상 시스템 설계하였고 설계된 조건에 맞춰 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 실제 물체의 홀로그램 정보를 획득하였다. 획득한 실제 물체의 홀로그램 정보를 수치적인 신호 처리 후 세기 형태의 공간 광 변조기를 이용하여 광학적인 방

법으로 공간 상에 복원하였다. 본 연구에서는 최초로 광 스캐닝 홀로그래피를 이용한 양안식 3차원 홀로그래픽 디스플레이 시스템을 새롭게 제안하였고 실험을 통하여 구현 가능성을 검증하였다.

### 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기본연구지원사업임 (NRF-2010-0022798). 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2015-R0992-15-1008)

### References

1. S. Herman, "Principles of binocular 3D displays with applications to television," SMPTE Motion Imaging J. **80**, 539-544 (1971).
2. S. Pastoor and M. Wöpking, "3-D displays: A review of current technologies," Displays **17**, 100-110 (1997).
3. F. L. Kooi and A. Toet, "Visual comfort of binocular and 3D displays," Displays **25**, 99-108 (2004).
4. H. Urey, K. V. Chellappan, E. Erden, and P. Surman, "State of the art in stereoscopic and autostereoscopic displays," Proc. IEEE **99**, 540-555 (2011).
5. D. M. Hoffman, A. R. Girshick, and M. S. Banks, "Vergence - accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue," J. Vis. **8**, 1-30 (2008).
6. M. T. M. Lambooi, W. A. IJsselstein, and I. Heynderickx, "Visual discomfort in stereoscopic displays: a review," Proc. SPIE **6490**, 11-13 (2007).
7. J. P. Wann, S. Rushton, and M. Mon-Williams, "Natural problems for stereoscopic depth perception in virtual environments," Vision Res. **35**, 2731-2736 (1995).
8. D. Gabor, "Holography, 1948-1971," Proc. IEEE **60**, 665-668 (1972).
9. D. Gabor, "A new microscopic principle," Nature **161**, 777-778 (1948).
10. J. W. Goodman, *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* (Roberts and Company Publishers, Colorado, USA, 2007).
11. 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).
12. C. Quan, X. Kang, and C. J. Tay, "Speckle noise reduction in digital holography by multiple holograms," Opt. Eng. **46**, 115801 (2007).
13. A. Uzan, Y. Rivenson, and A. Stern, "Speckle denoising in digital holography by nonlocal means filtering," Appl. Opt. **52**, A195-200 (2013).
14. 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).
15. 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).
16. Y. S. Kim, T. Kim, S. 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).
17. J. Liu, C. Guo, W. Hsiao, T. Poon, and P. Tsang, "Coherence experiments in single-pixel digital holography," Opt. Lett. **40**, 2366-2369 (2015).
18. J. Liu, "Spatial coherence analysis for optical scanning holography," Appl. Opt. **54**, A59-A66 (2015).
19. S. Reichelt and N. Leister, "Computational hologram synthesis and representation on spatial light modulators for real-time 3D holographic imaging," J. Phys. Conf. Ser. **415**, 012038 (2013).
20. S. Reichelt, R. Häussler, G. Fütterer, N. Leister, H. Kato, N. Usukura, and Y. Kanbayashi, "Full-range, complex spatial light modulator for real-time holography," Opt. Lett. **37**, 1955 (2012).
21. S. Reichelt, R. Häussler, G. Fütterer, and N. Leister, "Depth cues in human visual perception and their realization in 3D displays," Three Dimens. Imaging, Vis. Disp. **2010**, 76900B-1~76900B-12 (2010).
22. T.-C. Poon, "Scanning holography and two-dimensional image processing by acousto-optic two-pupil synthesis," J. Opt. Soc. Am. A **2**, 521 (1985).
23. P. G. Gobbi, *Optical Visual Performance Human Eye* (SPIE Press Book, Washington D.C., USA, 2013).
24. L. Rossi, L. Zegna, P. Iacomussi, and G. Rossi, "Pupil size under different lighting sources," in Proc. CIE 2012' Lighting Quality & Energy Efficiency Conference (Hangzhou, China, 2012), pp. 199-200.
25. Y. S. Kim, T. Kim, T. C. Poon, and J. T. Kim, "Three-dimensional display of a horizontal-parallax-only hologram," Appl. Opt. **50**, B81-B87 (2011).