

탈 축 홀로그램 합성을 이용한 쌍 영상 잡음 제거와 3차원 홀로그램 디스플레이

김유석 · 김태근[†]

세종대학교 광전자공학과
Ⓞ 143-747 서울특별시 광진구 군자동 98

김진태

조선대학교 광기술공학과
Ⓞ 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

(2009년 9월 21일 받음, 2009년 11월 6일 수정본 받음, 2009년 12월 2일 게재 확정)

본 논문에서는 복소수 홀로그램을 탈 축 홀로그램으로 변환해 쌍 영상 잡음 없이 3차원 홀로그램 디스플레이를 구현하는 방법을 제안하고 실연하였다. 이러한 기술을 구현하기 위해, 서로 다른 깊이에 위치하는 슬라이드 패턴으로 구성된 3차원 물체의 복소수 홀로그램을 광 스캐닝 홀로그램 시스템을 이용해 추출한 후, 추출된 복소수 홀로그램에 공간 캐리어를 수치적인 방법으로 인가하고 실수 부분만을 추출해 복소수 홀로그램을 탈 축 홀로그램으로 변환한다. 변환된 탈 축 홀로그램을 진폭만을 변조하는 공간 광 변조기에 인가하고, 시준된 레이저 빔을 공간 광 변조기에 투사하여 탈 축 홀로그램을 복원하는 방식으로 3차원 디스플레이를 구현한다.

Three-dimensional Holographic Display with Twin Image Noise Rejection Using Off-axis Hologram Converting

You Seok Kim and Taegeun Kim[†]

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

[†]E-mail: takim@sejong.ac.kr

Jin-Tae Kim

Department of Photonic Engineering, Chosun University, 375 Seosuk-dong, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea

(Received September 21, 2009; Revised manuscript November 6, 2009; Accepted December 2, 2009)

We proposed a three-dimensional holographic display technique without twin image noise by converting a complex hologram to an off-axis hologram. To implement the proposed technique we record the complex hologram of a three dimensional object that is composed of two slides located with different depth locations. We added spatial carrier to the complex hologram and after that, extract the real part of the spatial-carrier-added hologram. This converts the complex hologram to an off-axis hologram. We also reconstruct the off-axis hologram using a spatial light modulator for three dimensional display.

Keywords: Hologram, Three-dimensional display, Spatial light modulator, Optical scanning holography

OCIS codes: (090.1995) Digital holography; (090.2870) Holographic display; (090.1760) Computer holography

I. 서 론

홀로그램은 실제로 빛의 파면을 공간상에 복원하여 인간에게 가장 친숙한 형태의 3차원 디스플레이를 구현 할 수 있는 유력한 방식으로 지금까지 많은 연구가 실시되었다.^[1] 디지털 합성 기술을 이용해 3차원 물체의 홀로그램을 수치적 방

법으로 합성하고 광학적으로 복원하는 방식을 이용한 3차원 디스플레이 방법이 제안되고 시연되었다.^[2-5] 위의 홀로그램 3차원 디스플레이 방식에서는 수치적으로 합성된 전기 신호를 공간 광 변조기(spatial light modulator, SLM)를 이용해 광 신호로 변조하여 디스플레이 한다. 이때, 일반적인 공간 광 변조기는 빛의 진폭만을 변조함으로 진폭만이 변조된 홀로그램을 쌍 영상 잡음과 배경 잡음 없이 복원하기 위해 Leith와 Uptnieks에 의해서 제안된 탈 축 홀로그램을 합성한

[†]E-mail: takim@sejong.ac.kr

다.^[6] 홀로그램 합성을 위해서는 막대한 디지털 연산이 필요하다. 이에 따라 홀로그램 합성 시 연산량을 줄이는 다양한 알고리즘들이 개발되었다.^[7,8]

그러나 위의 실연은 실제 물체의 3차원 영상 정보를 추출하고 이를 디스플레이 한 것이 아니라 가상공간의 3차원 그래픽 데이터를 컴퓨터 생성 홀로그램으로 합성해 디스플레이 한 것이다. 이 방법은 실제 물체로부터 영상을 얻어 디스플레이 하는 실사 영화나 CCTV 같은 것이 아니라 애니메이션 같이 가상의 3차원 영상을 합성해 표현한 것이다. 최근에는 실제 물체의 홀로그램 정보를 추출하고 추출된 홀로그램의 위상 정보만을 이용하여 복원하는 방식의 3차원 홀로그램 디스플레이가 시연되기도 했다.^[9,10] 본 연구에서는 광 스캐닝 홀로그램 기법을 이용해 실제 3차원 물체의 홀로그램 정보를 추출하고 이를 탈 축 홀로그램으로 변환하여 광 변조기를 이용해 복원하는 3차원 디스플레이 기술을 제안한다. 제안하는 기술은 실제물체의 복소수 홀로그램을 수치적 연산 없이 광학적인 방법으로 직접 추출하고, 추출된 홀로그램 정보를 공간 광 변조기에서 쌍 영상 잡음 및 배경 잡음 없이 복원할 수 있는 탈 축 홀로그램으로 변환하는 디지털 후 처리 방법으로 저자들이 이 한 본 논문에서 최초로 제안되는 것이다. 이를 통해, 실제 물체의 3차원 영상을 막대한 디지털 연산 없이 탈 축 홀로그램으로 변환해 3차원 디스플레이가 가능함을 보인다. 실제 물체의 3차원 영상정보를 스테레오 카메라나 멀티뷰 카메라를 이용해 추출하고 이를 컴퓨터 생성 홀로그램으로 합성하는 방식의 3차원 디스플레이 또한 가능하나, 3차원 영상을 추출해 컴퓨터 생성 홀로그램을 합성하는데에는 막대한 디지털 연산량이 요구된다.^[11] 반면 제안하는 방식은 물체의 홀로그램 정보를 디지털 연산 없이 광학적인 방법으로 직접 추출하고 간단한 디지털 후 처리를 실시해 복원함으로써 막대한 디지털 연산 없이 홀로그램 3차원 디스플레이가 가능하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 서로 다른 깊이에 위치하는 두 개의 슬라이드로 구성된 3차원 물체를 광 스캐닝 홀로그램 시스템을 이용하여 주사 방식을 적용하여 물체의 복소수 홀로그램을 추출한다. 이때 추출된 홀로그램은 디지털 신호 형태로 디지털 신호처리를 통한 변환이 가능하다. 추출된 홀로그램에 공간 캐리어를 수치적으로 곱해 홀로그램의 광축을 편향시키고 실수 부분만을 추출하는 디지털 연산을 실시해, 복소수 홀로그램을 탈 축 홀로그램으로 변환한다. 여기서 탈 축 홀로그램은 크기만으로 구성된 홀로그램이나 복원 시 복원된 3차원 영상의 광축이 쌍 영상 잡음과 배경 잡음의 광축에 대해 편향되어 있어 복원된 3차원 영상과 잡음의 영상이 공간적으로 분리되어 쌍 영상 잡음이나 배경 잡음 없이 물체의 3차원 영상을 디스플레이 할 수 있다. 디스플레이를 위하여 빛을 변조하는 공간 광 변조기에 탈 축 홀로그램을 인가하고 확장된 빔을 투사한다. 이에 따라, 탈 축 홀로그램의 패턴으로 공간적으로 변조된 빛의 파면은 공간상에 복원된다. 이때, 복원된 빛은 물체의 3차원 영상, 쌍 영상 잡음 그리고 배경 잡음으로 구성되었다. 그러나 탈 축 홀로그램 변환 과정에서

인가된 공간 캐리어에 의해 3차원 영상과 잡음의 공간적 위치가 편향되어 3차원 영상과 잡음이 공간적으로 분리됨으로 쌍 영상 잡음과 배경 잡음 없이 3차원 영상을 디스플레이 하는 것이 가능하다.

II. 광 스캐닝 홀로그램을 이용한 3차원 영상 촬영과 탈 축 홀로그램 변환

본 연구에서는 광 스캐닝 홀로그램을 이용해 3차원 물체의 홀로그램을 추출한다. 그림 1은 광 스캐닝 홀로그램 장치를 나타낸다.^[12] 광 스캐닝 홀로그램 장치는 마하젠더 간섭계부와 전기 신호처리부로 구성된다. 마하젠더 간섭계부는 빔 분할기(BS1,2)와 거울 (M1,2)로 구성되며, 음향 광 변조기(AOM1,2), 빔 확대기(BE1,2) 그리고 렌즈(L1)를 포함한다. 레이저에서 출력된 빛은 빔 분할기(BS1)에 의해서 두 개의 경로로 분할된다. 위쪽 경로를 진행하는 레이저 빔의 주파수는 음향 광 변조기1(AOM1)에 의해 편위된다. 이때, 음향 광 변조기는 ΩHz 로 구동되어 음향 광 변조기1(AOM1)을 통과한 빔의 주파수는 ΩHz 편위된다. 음향 광 변조기를 통과한 빔은 빔 확대기1(BE1)에 의해 평행광으로 변환되어 빔 분할기2(BS2)에 전달된다. 한편, 아래 경로를 진행하는 레이저 빔의 주파수는 $\Omega + \Delta\Omega Hz$ 로 구동되는 음향 광 변조기2(AOM2)에 의해 $\Omega + \Delta\Omega Hz$ 편위된다. $\Omega + \Delta\Omega Hz$ 로 편위된 빔은 빔 확대기2(BE2)에 의해 확대되어 렌즈(L1)에 전달된다. 렌즈(L1)를 통과해 구면파가 된 빔은 빔 분할기2(BS2)에 전달된다. 위쪽 경로를 통과한 빔과 아래 경로를 통과한 빔은 빔 분할기2(BS2)에서 서로 중첩된다. 중첩된 빔의 세기는 각각 빔의 세기 부분과 간섭된 부분으로 구성된다. 이때, 간섭된 부분은 위 경로와 아래 경로를 투과한 빔의 주파수 차이 즉, $\Delta\Omega Hz$ 로 변조되어 있다. 간섭된 빛의 세기의 공간적 분포는 평행광과 구면파의 간섭 패턴인 프레넬 윤대판의 패턴을 갖는다. 시간적으로 변조된 위의 간섭 패턴을 시간 종속 프레넬 윤대판이라 한다. 시간 종속 프레넬 윤대판은 빔 분할기2(BS2)에 의해 분할돼 스캐닝 거울과 광 검출기1(PD1)에 전달된다. 이때, 스캐닝 거울에 의해 반사된 시간 종속 프레넬 판은 물체

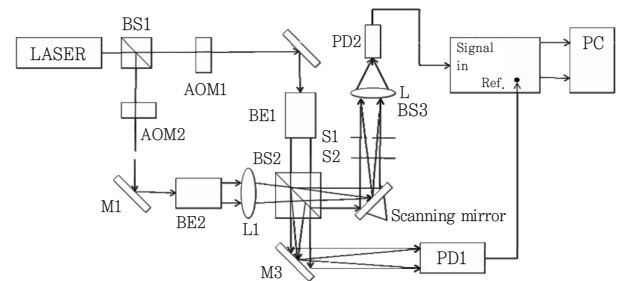


FIG. 1. Optical Scanning Holography (M's, mirrors; AOM1,2, acousto-optic modulators; BS1,2, beam splitters; BE1,2, beam expanders; L1, focusing lens; L2, collecting lens; PD1,2, Photo-detectors; PC, personal computer).

를 스캐닝 하고 각각의 스캔 지점에서 물체를 투과한 빛은 집광 렌즈(L2)에 의해 집광되어 광검출기2(PD2)에 전달된다. 광검출기2(PD2)는 집광된 광 신호의 크기에 따라 전류 신호를 생성한다. 이때, 물체를 투과한 시간 종속 프레넬 운대판 부분은 시간에 따라 ΩHz 로 변조된 전류신호를 생성한다. 이 전류 신호는 각 스캔지점에서 물체의 3차원 분포와 프레넬 운대 패턴이 인코딩된 패턴, 즉 물체의 홀로그램 신호가 시간에 따라 ΩHz 로 변조된 전기 신호이다. 한편 광 검출기(PD1)에서 검출된 전기 신호는 시간에 따라 ΩHz 로 변조되어 있다. 이에, 광 검출기2(PD2)에서 검출된 홀로그램 신호를 선택적으로 추출하기 위해 Lock-in 증폭기의 기준신호로 광 검출기1(PD1)의 신호를 인가하고 Lock-in 증폭기의 입력으로 광 검출기2(PD2)의 신호를 인가한다. Lock-in 증폭기는 입력 신호에서 기준 신호와 같은 위상의 신호와 위상이 사분면으로 편위된 사분 위상 신호를 동시에 출력한다. 출력된 동 위상 신호($i_{In-phase}(x,y)$)와 사분 위상 신호($i_{Q-phase}(x,y)$)는 각각 물체의 홀로그램의 실수 부분과 허수 부분을 나타낸다. 이 신호를 샘플링과 양자화를 거쳐 디지털 신호로 변환해 컴퓨터에 인가한다. 컴퓨터에서는 각각 홀로그램의 실수 부분과 허수 부분을 나타내는 디지털 신호를 아래의 방법으로 합성하여 복소수 홀로그램을 생성한다.^[13]

$$H(x,y) = |H| \exp(j\angle H) = i_{In-phase}(x,y,z) + j i_{Q-phase}(x,y,z) \quad (1)$$

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

위에서 $I_o(x,y,z)$ 는 물체의 투과율 세기 분포, 그리고 λ 는 레이저 빛의 파장이다. 여기서 합성된 복소수 홀로그램은 빛의 크기와 위상 정보를 모두 포함하여, 수치적 방법으로 복원하면 쌍 영상 잡음이나 배경 잡음 없이 물체의 3차원 영상을 복원할 수 있다. 그러나 빛의 크기와 위상을 동시에 변조하는 공간 광 변조기를 구현하는 것이 쉽지 않아 광학적 방법으로 복원하여 3차원 디스플레이를 구현하는 것은 용이치 않다. 빛의 진폭을 변조하는 공간 광 변조기(SLM)를 이용해 복소수 홀로그램을 쌍 영상 잡음과 배경 잡음 없이 복원해 3 차원 디스플레이를 구현하기 위해, 복소수 홀로그램에 공간 캐리어를 다음과 같이 인가하여 복소수 홀로그램의 기준광의 광축과 물체광의 광축 사이에 가상의 각을 형성해 두 광축이 서로 탈 축 되도록 한다.

$$H_{off-axis}^{complex}(x,y) = |H| \exp(j\angle H) \times \exp\left(j \frac{2\pi \sin \theta}{\lambda} x\right) \quad (2)$$

$$= |H| \exp\left[j\left(\angle H + \frac{2\pi \sin \theta}{\lambda} x\right)\right]$$

위에서 θ 는 기준광의 광축과 물체광의 광축의 사이 각을 나타낸다. 따라서 광학적인 방법으로 홀로그램을 복원하면 위의 공간 캐리어에 따라 복원된 영상의 광축은 홀로그램에 입사되는 빛의 광축에 대해 θ 만큼 편위 됨을 알 수 있다.

복원되는 영상의 광축과 입사되는 광축이 서로 각을 가지고 편위 됨으로 위의 홀로그램에서 실수 부분만을 추출한 영상을 복원하더라도 쌍 영상 잡음과 배경 잡음은 공간적으로 분리됨을 알 수 있다. 이에, 공간 캐리어가 인가된 홀로그램의 실수 부분을 추출하고 DC 바이어스를 인가하는 연산을 실시하여 다음과 같은 탈 축 홀로그램을 합성한다.

$$H_{off-axis}(x,y) = \text{Re}\left[H_{off-axis}^{complex}(x,y)\right] + \frac{1}{2} \quad (3)$$

$$= |H| \cos\left(\angle H + \frac{2\pi \sin \theta}{\lambda} x\right) + \frac{1}{2}$$

탈 축 홀로그램은 크기 만을 가지고 있어 빛의 크기만을 변조하는 공간 광 변조기를 이용해 표현 할 수 있다.

III. 크기 유일 공간 광 변조기를 이용한 홀로그램 영상의 복원

그림 2는 빛의 크기를 공간적으로 변조하는 공간 광 변조기로 구성된 탈 축 홀로그램을 복원하는 광학계를 나타낸다. 홀로그램 영상 복원 광학계는 레이저, 빔 확대기3(BE3), 편광기(PL), 빔 분할기3(BS3), 공간 광 변조기(SLM) 그리고 분석기(AL)로 구성되어 있다. 광 스캐닝 홀로그램을 이용해 추출된 홀로그램은 위에서 기술한 방법으로 탈 축 홀로그램으로 변환된다. 탈 축 홀로그램은 공간 광 변조기에 인가되고 공간 광 변조기는 탈 축 홀로그램의 패턴에 따라 빛의 세기의 공간적 분포를 변조한다. 구체적으로 레이저에서 출사된 빛은 빔 확대기3(BE3)에 의해서 시준되고 편광기(PL)를 통과해 선 편광되어 빔 분할기3에 전달된다. 빔 분할기3를 투과한 빔은 공간 광 변조기(SLM)에 의해서 변조된다. 공간적으로 변조된 빔은 빔 분할기3(BS3)에서 반사되어 분석기(AL)를 통과해 3차원 공간상에 물체광의 공간 분포에 따른 빛의 세기 패턴을 복원한다. 이때, 탈 축 홀로그램으로 변환 과정에서 인가된 공간 캐리어에 의해 배경 잡음은 공간 광 변조기에 입사된 빛의 광축 방향에 형성되며 쌍 영상 잡음은 입사된 빛의 광축에서 $-\theta$ 방향으로 편위된 위치에 복원되고 촬영 물체의 3차원 영상은 입사된 빛의 광축에서 θ 방향으로

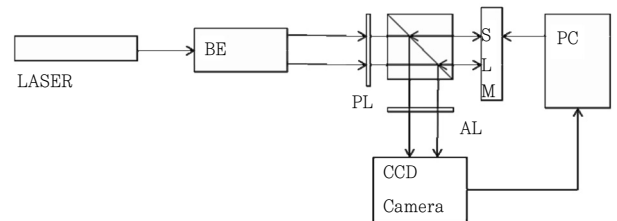


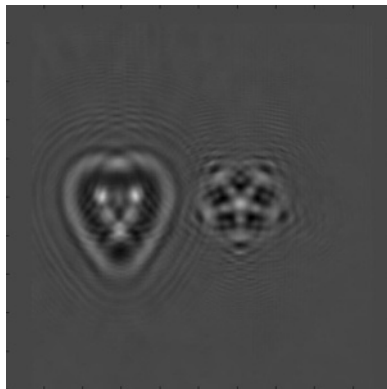
FIG. 2. Optical system for reconstructing off-axis hologram (BE3, beam expander BS3, beam splitter, PL, polarizer; AL, analyzer; SLM, spatial light modulator; PC, personal computer).

편위된 위치에 복원된다. 이에 따라 복원된 물체의 3차원 영상과 쌍 영상 잡음과 배경 잡음은 공간상에서 분리되어 관찰자는 쌍 영상 잡음과 배경 잡음 없이 물체의 3차원 영상을 관찰할 수 있다. 이는 광학적으로 촬영된 탈 축 홀로그램과 동일하다. 복원된 영상은 CCD 카메라를 이용해 검출한다.

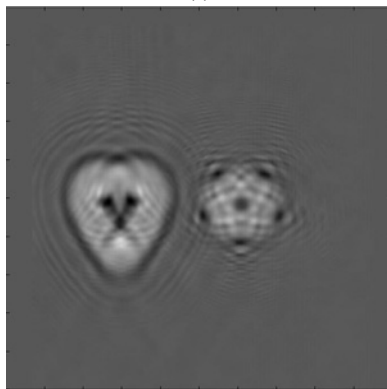
IV. 실험결과

제한한 탈 축 홀로그램 변환과 3차원 디스플레이를 광학적 실험을 통해 실현 하였다. 본 실험에서는 크기가 약 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 이며 선의 두께가 $200\text{ }\mu\text{m}$ 인 별과 하트 모양을 갖는 슬라이드 필름을 그림 1의 렌즈1에서 147 cm 그리고 167 cm 떨어진 깊이 위치에 위치시킨 후 그림 1의 광학계를 이용하여 홀로그램을 추출하였다. 파장이 633 nm 인 He-Ne 레이저를 광원으로 사용하였고 두 개의 음향 광 변조기의 변조 주파수는 각각 40 MHz 와 40.01 MHz 로 설정하였다. 빔 확대기를 이용해 빔의 지름은 15 mm 로 확대하였고 초점 거리 500 mm 인 렌즈1를 이용하여 사용하여 아래 경로의 빔을 구면파로 변환하였다. 그림 3(a)와 그림 3(b)는 광 스캐닝 홀로그램을 이용하여 얻은 별과 하트 모양을 갖는 슬라이드의 복소수 홀로그램이다. 그림 3(a)는 복소수 홀로그램의 실수 부분,

그림 3(b)는 복소 홀로그램의 허수 부분을 나타낸다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 그림 3(a)와 그림 3(b)의 복소 홀로그램을 수치적으로 복원한 그림이다. 그림 3(a) 그리고 그림 3(b)의 복소수 홀로그램은 제안한 수치적 방법으로 탈 축 홀로그램으로 변환하여 그림 2의 홀로그램 디스플레이 광학계의 공간 광 변조기에 인가한다. 수치적 변환 시 가상의 탈 축각은 $\theta=1.03^\circ$ 로 하였다. 실험에 사용한 공간 광 변조기는 'HoloEye'의 'LC-R 2500'으로 크기는 $19.5 \times 14.6\text{ mm}^2$, 픽셀 수는 1024×768 , 픽셀 간격은 $19\text{ }\mu\text{m}$ 이다. 그림 2의 디스플레이 광학계로 물체의 3차원 영상을 공간 중에 복원하고 서로 다른 깊이 위치에서 복원된 슬라이드 영상을 CCD 카메라를 이용하여 촬영하였다. 그림 5와 그림 6은 각각의 깊이 위치에서 CCD 카메라를 이용해 촬영한 물체의 영상이다. CCD 카메라를 이용해 하트 모양의 슬라이드를 초점 맺는 경우 별 모양은 탈 초점 되고, 별 모양의 슬라이드를 초점 맺는 경우 하트 모양은 탈 초점 되는 것으로부터, 그림 2의 홀로그램 디스플레이 광학계를 이용하여 공간상의 서로 다른 깊이 위치에 물체의 영상을 복원함을 확인할 수 있다. 복소수 홀로그램을 탈 축 홀로그램으로 변환하여 디스플레이 하는 방식을 이용하여 쌍 영상 잡음과 배경 잡음 없이 3차원 영상을 복원했음을 보이기 위해 복소수 홀로그램의 실수 부분만으로 구성된 홀로그램을 그림 2의 디스플레이 광학계를 이용해 복원하였다. 그림

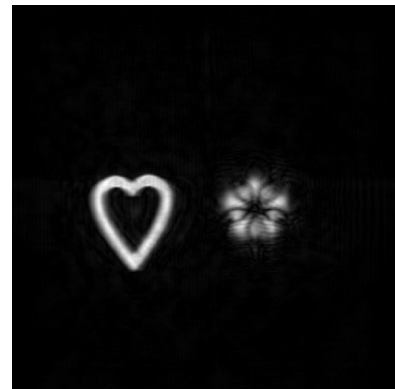


(a)

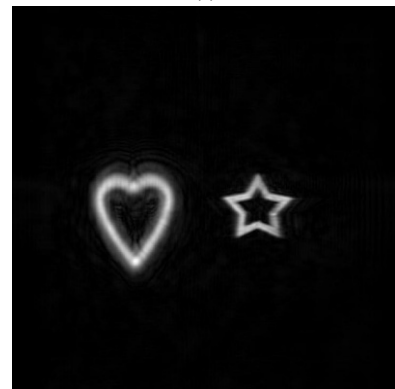


(b)

FIG. 3. (a) Real part of the complex hologram ($3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$).
(b) Imaginary part of the complex hologram ($3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$).

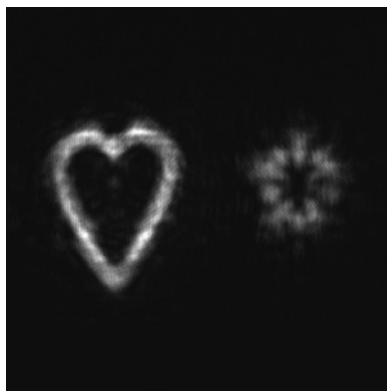


(a)

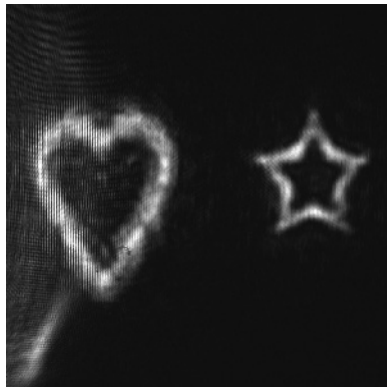


(b)

FIG. 4. (a) Numerical Reconstruction at the location of heart shape.
(b) Numerical Reconstruction at the location of star shape.



(a)



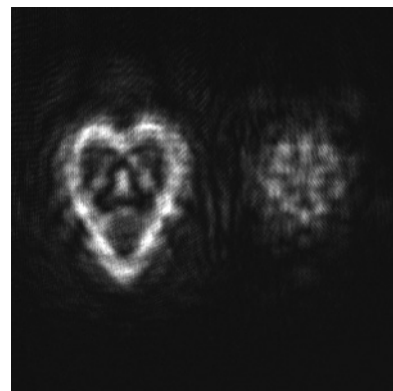
(b)

FIG. 5. (a) Reconstructed image without twin image noise at the location of heart shape. (b) Reconstructed image without twin image noise at the location of star shape.

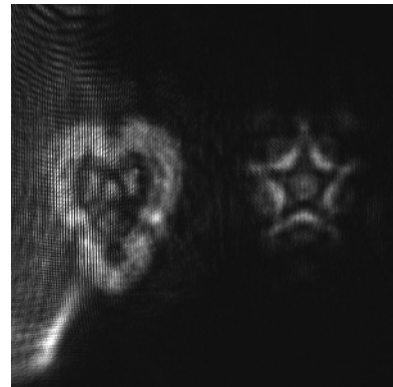
6(a)와 그림 6(b)는 쌍 영상 잡음과 함께 광학적으로 복원된 하트와 별의 모습이다. 그림 5(a)(b)의 복원된 영상과 그림 6(a)(b)의 복원된 영상을 비교해보면 제안한 탈 축 홀로그램 변환 방식을 적용하여 복원 하는 방식을 통해 쌍 영상 잡음과 배경 잡음을 제거할 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 저자들이 아는 한 최초로 물체의 복소수 홀로그램을 광 스캐닝 홀로그램 방식을 이용해 추출하고 공간 광 변조기를 이용해 쌍 영상 잡음과 배경잡음 없이 복원하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 실제 물체의 홀로그램 정보를 전기 신호 형태로 추출하고 수치적인 방법으로 탈 축 홀로그램으로 변환하여 빛의 크기만을 변조하는 공간 광 변조기를 이용해 쌍 영상 잡음 및 배경 잡음 없이 복원하는 방식의 3차원 영상 정보 추출 및 복원 기술을 제안하고 실험적으로 검증하였다. 광 스캐닝 홀로그래피를 이용해 투과형 물체의 복소수 홀로그램을 추출하고 이에 공간 캐리어를 인가한 후 실수 부분만을 추출하는 방식으로 탈 축 홀로그램으로 변환하였다. 수치적 방법으로 변환된 탈 축 홀로그램은 광학적 방법으로 촬영



(a)



(b)

FIG. 6. (a). Reconstructed image with twin image noise at the location of heart shape. (b) Reconstructed image with twin image noise at the location of star shape.

된 탈 축 홀로그램과 마찬가지로 광학적인 방법으로 복원 시, 쌍 영상 잡음 및 배경 잡음 없이 3차원 물체의 영상을 복원한다. 본 논문에서는 복소수 홀로그램에 공간 캐리어를 곱해 탈축각을 형성하고 DC 바이어를 인가한 후, 실수부분만을 추출하는 방식으로 복소수 홀로그램을 탈 축 홀로그램으로 변환했다. 이는 광학적인 방법으로 탈 축 홀로그램을 레코딩하는 과정 중 탈축된 기준빔광이 간섭시 공간 캐리어를 형성해 탈축각을 형성하는 과정을 수치적으로 모델링하여 구현한 것으로, 매우 단순한 연산으로 무시할 정도의 연산량이 요구된다는 장점이 있다. 광학 실험에서 공간 광 변조기의 픽셀 수는 1024 X 768, 픽셀 간격은 19 μm 으로 최근 에 가용한 공간 광 변조기의 픽셀 수와 픽셀 간격에 비해 비교적 낮은 수준이다. 최고 수준의 공간 광 변조기를 이용하면, 큰 탈 축 각의 구현이 가능하므로 비교적 큰 물체의 3차원 디스플레이가 고해상도로 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2009-0087476).

References

1. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, New York, USA, 2005).
2. P. S. Hilaire, S. A. Benton, and M. Lucente, "Synthetic aperture holography: a novel approach to three-dimensional displays," *J. Opt. Soc. Am. A* **9**, 1969-1977 (1992).
3. T. Yamaguchi, G. Okabe, and H. Yoshikawa, "Real-time image plane full-color and full-parallax holographic video display system," *Opt. Eng.* **46**, 125801-1~125801-8 (2007).
4. T. Ito, T. Shimobaba, H. Godo, and M. Horiuchi, "Holographic reconstruction with a 10- μ m pixel-pitch reflective liquid-crystal display by use of a light-emitting diode reference light," *Opt. Lett.* **27**, 1406-1408 (2002).
5. M. Stanley, M. A. Smith, A. P. Smith, P. J. Watson, S. D. Coomber, C. D. Cameron, C. W. Slinger, and A. D. Wood, "3D electronic holography display system using a 100-megapixel spatial light modulator," *Proc. SPIE* **5249**, 297-308 (2004).
6. E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront reconstruction and communication theory," *J. Opt. Soc. Am.* **52**, 1123-1128 (1962).
7. M. Lucente, "Diffraction-specific fringe computation for electro-holography," Ph. D. Thesis, Program in Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology (1994).
8. S.-C. Kim and E.-S. Kim, "Fast generation and reconstruction of digital holograms using a novel look-up table," *The Journal of Korea Information and Communications Society* **33**, 255-261 (2008).
9. I. Yamaguchi, K. Yamamoto, G. A. Mills, and M. Yokoda, "Image reconstruction only by phase data in phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.* **45**, 975-983 (2006).
10. O. Matoba, T. J. Naughton, Y. Frauel, N. Bertauz, and B. Javidi, "Real-time three-dimensional object reconstruction by use of a phase-encoded digital hologram," *Appl. Opt.* **41**, 6187-6192 (2002).
11. S.-C. Kim, "Implementation of computer-generated holograms of 3D objects using depth information," Ph. D. Dissertation, Kwang-woon University (2006).
12. T.-C. Poon, "Scanning holography and two-dimensional image processing by acousto-optic two-pupil synthesis," *J. Opt. Soc. Am. A* **2**, 521-527 (1985).
13. T.-C. Poon, T. Kim, G. Indebetouw, B. W. Schilling, M. H. Wu, K. Shinoda, and Y. Suzuki, "Twin-image elimination experiments for three-dimensional images in optical scanning holography," *Opt. Lett.* **25**, 215-217 (2000).