

변형된 삼각 및 마하젠더 간섭계 기반의 인코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이 시스템의 광학적 구현

정희원 김승철*, 구정식*, 김은수*

Optical Implementation of Incoherent Holographic 3D Display System using Modified Triangular and Mach-Zehnder Interferometer

Seung-Chul Kim*, Jung-Sik Koo*, Eun-Soo Kim* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 변형된 삼각 및 마하젠더 간섭계를 이용한 인코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이 시스템의 광 입출력 장치를 구현하고 실험하였다. 먼저, 변형된 삼각 간섭계 기반의 광 입력장치를 구성하여 3차원 물체에 대한 인코히어런트 복소 홀로그램을 생성하고, LCD 공간광변조기와 위상 지연기가 추가된 마하젠더 간섭계 기반의 광 출력장치 구성을 통해 홀로그램의 실시간적 복원을 수행하였다.

즉, 100 mm의 깊이감을 갖는 두 점광원에 대한 인코히어런트 홀로그램의 생성과 복원 실험을 통해 바이어스와 공액영상이 제거되고 초점에 따라 깊이감이 다른 두 영상의 복원이 가능함을 확인하였으며, 구현된 광 입출력 장치를 통해 서로 30 mm의 깊이감을 갖는 3차원 물체인 두개의 주사위에 대한 홀로그램을 실시간적으로 생성하고 복원시킴으로서 변형된 삼각 간섭계에 기반한 홀로그래픽 3차원 영상디스플레이 시스템의 광학적 구현 가능성을 제시하였다.

Key Words : 3D imaging and display, incoherent holography, modified triangular interferometer, Fresnel zone pattern

ABSTRACT

In this paper, an incoherent holographic 3D imaging and display system based on the modified triangular and Mach-Zehnder interferometers is optically implemented and some experiments are carried out. Incoherent hologram of a 3D object is generated by using the hologram input system of modified triangular interferometer. Then this complex hologram is reconstructed by using the hologram output system of modified Mach-Zehnder interferometer in which two LCD spatial light modulators and a waveplate are inserted. From the experiment with two point sources having a depth difference of 100 mm each other, it is revealed that each point source can be independently reconstructed at its own focal position from the complex hologram, while both of the bias and conjugate image are simultaneously eliminated at the same time. And in the experiment with the real 3D object of two dices having a depth difference of 30 mm each other, it is also conformed that the bias and conjugate image can be effectively eliminated from the hologram pattern and each 3D dice can be also successfully reconstructed at its own focal position from the complex hologram. These experiment results finally suggest a possibility of implementing a new incoherent holographic 3D imaging and display system using the modified triangular and Mach-Zehnder interferometers.

I. 서 론

1948년 Gabor에 의해 최초로 개발된 광 홀로그래피 기술^[1]은 축상(on-axis) 홀로그램으로 바이어스

* 광운대학교 전자공학과 국가지정 3차원 영상미디어 연구실(eskim@daisy.kwangwoon.ac.kr)

논문번호 : 040043-0202, 접수일자 : 2004년 2월 3일

※ 본 연구는 정보통신부 ITRC 사업과 과학기술부 국가지정연구실(NRL)사업의 지원아래 수행되었습니다.

및 허상 등의 문제점을 가지고 있었으나 1962년 Leith와 Upatniek^[2]에 의해 새로이 제안된 비축(off-axis) 홀로그램이 발표된 이후 다양한 분야에서 그 실질적인 그 응용이 시도되기 시작하였다.

특히, 홀로그래피 기술은 근본적으로 입체 사진술이기 때문에 개발 초부터 3차원 입체영상 디스플레이 기술로 활용하기 위한 많은 연구가 이루어졌으나 여러가지 문제점 등으로 그 응용이 크게 제한되었다^[3].

즉, 기존의 홀로그램은 가 간섭성 광인 레이저 광을 사용하여 만들어지기 때문에 실험공간이 암실로 제한되고, 더욱이 우리가 일상적으로 보는 야외풍경과 같이 부피가 큰 장면은 레이저광의 가 간섭거리의 한계 때문에 홀로그램 구성이 불가능하다. 또한, 현재의 레이저 광원은 비효율적이며 에너지 이용효율이 매우 낮은 에너지 다소비 광원임으로 이러한 단점을 극복하기 위해서는 가 간섭거리가 무한이라 할 수 있는 이상적인 광원을 만들고 이 광원의 이용 효율을 크게 높이면 되겠지만 현실적으로 기술적인 어려움이 많기 때문에 그 실현이 불가능하다.

따라서, 기존의 광 홀로그램과 가지고 있는 근본적인 문제점을 해결하기 위한 새로운 접근방법으로 자연광을 이용하는 인코히어런트 홀로그래피(incoherent holography)기술이 제시된 바 있다. 이는 물체의 각 점의 위치와 광의 세기를 인코딩하는 GZP(Gabor zone pattern)의 중첩을 이용하는 방법으로 그동안 코크란(Cochran) 삼각 간섭계^[4], 이중 초점을 갖는 복굴절 렌즈 기반의 신축분할 간섭계^[5] 그리고 코노스코픽 홀로그래피(conoscopic holography)^[6] 등이 제시되었다.

이중 코노스코픽 홀로그래피는 비등방성 결정에서 정상파(ordinary wave)와 이상파(extraordinary wave)의 위상속도의 불일치를 이용하는 방식이고, 삼각 간섭계는 한 쌍의 렌즈, 거울 그리고 광 분할기 등을 간단한 광학계를 이용하여 GZP를 만드는 인코히어런트 홀로그래피 기술이다.

그러나, 기존의 인코히어런트 홀로그래피 역시 축상(on-axis) 홀로그램이기 때문에 영상 복원시 바이어스 및 공액영상이 나타나는 근본적인 문제점을 가지고 있다. 따라서, 코노스코픽 홀로그래피에서는 복굴절 결정에서의 정상파와 이상파의 속도차, LCLV(liquid crystal light valve), 마스크 등을 사용하여 바이어스와 공액영상을 없애는 방법이 제시되었지만^[7], 이 방법은 고가의 광학소자를 사용할 뿐만 아니라 바이어스와 공액영상이 없는 복소 홀로

그램의 실수부는 기본시스템을 이용하고 허수부는 기본시스템에 마스크를 새로 추가하여 구하게 되므로 마스크의 유무에 따른 두가지 시스템을 사용해야 하는 등의 문제점을 가지고 있다.

최근, 이러한 축상 홀로그램의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 접근방법으로 기존의 삼각 간섭계를 변형한 새로운 인코히어런트 홀로그래피 기술이 제시되었다^[8-14]. 이 시스템은 LCLV나 복굴절 결정과 같은 고가의 광학소자를 사용하지 않고 선형 편광기, 편광 광분할기, 위상 지연기 등과 같은 간단한 광학소자를 이용하여 구성되며 또한, 시스템으로부터 복소 홀로그램의 실수부 및 허수부를 동시에 구할 수 있음으로 정지영상 뿐만 아니라 동영상의 복소 홀로그램 합성에도 응용될 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 먼저, 변형된 삼각 간섭계 기반의 인코히어런트 홀로그래피 광학계를 구성하고 이를 통해 3차원 물체에 대한 복소 홀로그램을 합성하고자 한다. 그리고, LCD 공간광변조기와 위상 지연기가 추가된 변형된 마하젠더(Mach-Zehender) 광 간섭계^[9]를 구성하고 이를 통해 복소 홀로그램의 실시간적 복원을 수행하고자 한다. 그리고, 깊이가 서로 다른 두개의 점광원 및 실제 3차원 물체인 두개의 주사위에 대한 복소 홀로그램의 실시간적 합성, 복원 및 디스플레이 실험을 통해 구현된 인코히어런트 홀로그램 시스템의 성능을 분석하고 새로운 3차원 영상 디스플레이 기술로서의 응용 가능성을 제시하고자 한다.

II. 제안된 인코히어런트 홀로그래피 특성분석

2.1 변형된 삼각 간섭계 기반의 홀로그램 합성부

그림 1은 최근 새로이 제안된 변형된 삼각 간섭계의 광학계를 나타낸 것으로 이를 통해 바이어스 및 공액영상이 제거된 인코히어런트한 복소 홀로그램의 실수부 및 허수부의 실시간적 합성이 가능하다^{[8][9]}. 이는 기존의 삼각 간섭계의 입, 출력면에 선형 편광기를 삽입하고 x, y 축에 각각 평행한 편광빔을 분리하기 위한 편광 광분할기, 위상 지연기를 새로이 추가함으로써 바이어스와 공액영상을 제거할 수 있는 새로운 형태의 변형된 삼각 간섭계가 구성된다.

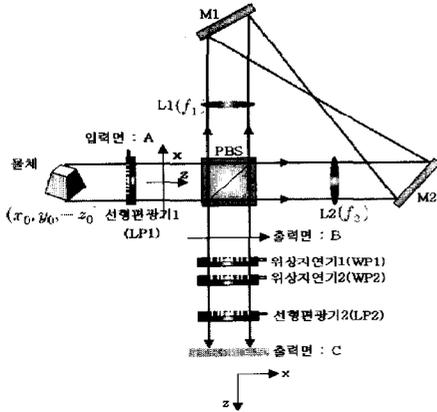


그림 1. 변형된 삼각 간섭계 시스템도

그림 1에서 LP_1 과 LP_2 는 선형편광기를, WP_1 과 WP_2 는 위상 지연기를, 그리고 PBS 는 편광 광분할기를 각각 나타내며, 그림에서 WP_1 의 slow axis는 x 축과 일치되고 WP_2 는 x 축에 대해 45° 회전되고 LP_1 은 x 축과 45° 기울어지도록 구성된다. 그리고 편광 광분할기는 LP_1 을 통과한 빛을 x, y 축 방향의 편광빔으로 분할하며 LP_2 는 x 축 편광기를 나타낸다. 또한, 입, 출력면 A, B는 렌즈 L_1 과 L_2 의 초점거리에 각각 해당하는 평면을 나타내며 f_1, f_2 는 렌즈 L_1, L_2 의 초점거리를 각각 나타낸다. F는 렌즈 L_1 과 L_2 의 초점거리에 있는 지점으로서 필터가 위치할 곳을 나타낸다.

백색광을 사용하는 경우, 점광원에서 나오는 빛에는 파장이 서로 다른 빛들이 혼재되어 있으나 필터 F에 의해 출력면(B면)에서는 특정한 파장의 빛만 도달하게 되며 다른 점광원 간에는 간섭무늬가 만들어지지 않는다. 따라서, 하나의 점광원에서 발산되는 빛은 출력면에서 특정한 파장에 의한 간섭무늬를 만들게 됨으로 단파장의 빛에 대하여 변형된 삼각 간섭계를 해석할 수 있다.

그림 1에서 $(x_0, y_0, -z_0)$ 에 위치한 물체에 파장이 λ 인 단색광을 조사되면 입력면에서의 복소진폭은 Fresnel 근사식을 이용하여 식 (1)과 같이 주어지게 되며 식 (1)에서 k 는 파동수로 $2\pi/\lambda$ 로 주어진다.

$$U(x, y) = \frac{ik}{2\pi z_0} \exp \left[-i \frac{k}{2z_0} \{ (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 \} \right] \quad (1)$$

그림 1에서 입력빔은 삼각 간섭계의 두개 경로를 따라 하나는 시계방향으로 다른 하나는 반시계 방향으로 진행하게 되며 출력평면인 B면에서 시계방향과 반시계방향으로 진행해온 빔의 세기는 식 (2), (3)과 같이 각각 주어진다.

$$U_{cw}(x, y) = \frac{ik}{2\sqrt{2}\pi z_0} \exp \left[-i \frac{k}{2z_0} \{ (\alpha x - x_0)^2 + (\alpha y - y_0)^2 \} \right] \quad (2)$$

$$U_{ccw}(x, y) = \frac{ik}{2\sqrt{2}\pi z_0} \exp \left[-i \frac{k}{2z_0} \{ (\beta x - x_0)^2 + (\beta y - y_0)^2 \} \right] \quad (3)$$

여기서, $\alpha = -\frac{f_1}{f_2}, \beta = -\frac{f_2}{f_1}$ 는 배율을 각각 나타낸다. 따라서 출력 평면에서의 전체 복소진폭은 식 (4)와 같이 식 (2)와 식 (3)의 합으로 주어진다.

$$U_B = U_{cw}(x, y) + U_{ccw}(x, y) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \alpha - \beta &= 1, & x_1 &= \frac{x_0}{\alpha + \beta}, \\ y_1 &= \frac{y_0}{\alpha + \beta}, & z_1 &= \frac{z_0}{\alpha + \beta}, \end{aligned}$$

$C = \frac{k}{2\sqrt{2}\pi z_0}$ 등의 파라미터를 사용하여 출력 평면에서의 빔의 전체 합을 정리하면 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} I_B(x, y) &= |U_B(x, y)|^2 \\ &= 2C^2 + 2C^2 \cos \left[\frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

따라서, 선형편광기 LP_2 앞에 나오는 빔의 세기는 Jones 벡터를 이용하면 식 (6)과 같으며,

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} & -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \\ -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} & \cos \frac{\Gamma_2}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{cw}(x, y) \\ U_{ccw}(x, y) \end{pmatrix} \\ &= e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_{cw}(x, y) - ie^{-i\Gamma_1} \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_{ccw}(x, y) \\ -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_{cw}(x, y) + e^{i\Gamma_1} \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_{ccw}(x, y) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

LP_2 를 통과한 빔의 복소 진폭은 식 (7)과 같이 주어진다.

$$U_b(x, y) = e^{-i\frac{kz}{2}} \left\{ \cos\frac{\Gamma_2}{2} U_{\omega}(x, y) - ie^{i\Gamma_1} \sin\frac{\Gamma_2}{2} U_{\omega}(x, y) \right\} \hat{x} \quad (7)$$

여기서,

$$\phi(x, y) = \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \}$$

라 두고 상수는 제거하고 계산하면 LP_2 를 통과한 빔의 세기는 위상지연기의 위상지연인 Γ_1 과 Γ_2 의 4개의 조합에 따라 계산할 수 있다.

첫 번째로, $\Gamma_1 = +\frac{\pi}{2}$, $\Gamma_2 = +\frac{\pi}{2}$ 인 경우 출력면에서의 빔의 세기는 식 (8)과 같이 주어지고,

$$I_{+C}(x, y) = \frac{1}{2} \{ 1 + \cos\phi(x, y) \} \quad (8)$$

두 번째로, $\Gamma_1 = +\frac{\pi}{2}$, $\Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$ 인 경우 출력면에서의 빔의 세기는 식 (9)와 같이 주어지며,

$$I_{-C}(x, y) = \frac{1}{2} \{ 1 - \cos\phi(x, y) \} \quad (9)$$

세 번째로, $\Gamma_1 = 0$, $\Gamma_2 = +\frac{\pi}{2}$ 의 경우에는 출력면에서의 빔의 세기는 식 (10)과 같이 주어지며,

$$I_{+S}(x, y) = \frac{1}{2} \{ 1 - \sin\phi(x, y) \} \quad (10)$$

네 번째로, $\Gamma_1 = 0$, $\Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$ 의 경우에는 출력면에서의 빔의 세기는 식 (11)과 같이 주어진다.

$$I_{-S}(x, y) = \frac{1}{2} \{ 1 + \sin\phi(x, y) \} \quad (11)$$

식 (8)의 I_{+C} 에서 식 (9)의 I_{-C} 를 빼면 식 (12)와 같은 복소 홀로그램의 실수부를 구할 수 있다.

$$I_C(x, y) = \cos\{\phi(x, y)\} \quad (12)$$

같은 방법으로 식 (10)의 I_{+S} 를 식 (11)의 I_{-S} 에서 빼면 식 (13)와 같은 복소 홀로그램의 허수부를 구할 수 있다.

$$I_S(x, y) = \sin\{\phi(x, y)\} \quad (13)$$

따라서, 식 (12)와 식 (13)을 전자적으로 결합함으로써 식 (14)와 같은 바이어스와 공액영상이 제거된 최종 복소 홀로그램을 얻을 수 있게 된다.

$$I(x, y) = \exp\{\pm i\phi(x, y)\} \quad (14)$$

식 (14)는 위상지연기의 위상지연 조합을 이용하여 실수부와 허수부를 구하고 이 두 항의 결합을 통해 얻게 된 복소 홀로그램을 나타내며 이것은 바이어스와 공액영상이 없는 복소 홀로그램이므로 식 (14)에서 양의 부호를 가진 홀로그램 복원시 실상음, 음의 부호를 가진 홀로그램 복원시 허상만을 관측할 수 있게 된다. 따라서, 변형된 삼각 간섭계에서는 기존의 삼각 간섭계의 근본적인 문제점인 바이어스 및 공액영상이 효과적으로 제거된 복소 홀로그램의 실시간적 합성이 가능함을 알 수 있다.

2.2 변형된 마하젠더 간섭계 기반의 복소 홀로그램의 복원부

변형된 코크란 삼각 간섭계에서 합성된 된 식 (14)의 복소 홀로그램은 수치적으로 또는 CGH (computer-generated hologram)^[15]등을 이용하여 복원될 수 있다. 또한, Ransom등^[16]은 홀로그램의 실수부와 허수부에 해당하는 transparency를 만든 후에 이를 마하젠더 간섭계의 두 경로에 각각 위치시키고 허수부를 표현하는 transparency 뒤쪽에 $\lambda/4$ 만큼 위상차가 지연되게 하는 매질을 사용함으로써 복소 홀로그램을 구현하는 방법을 제안한 바 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 Ransom 시스템을 변형하여 실시간적으로 복소 홀로그램을 복원하고 디스플레이 할 수 있는 새로운 광학계를 실험적으로 구현하였다^[11].

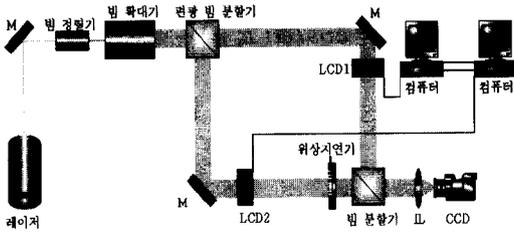


그림 2. 복소 홀로그래프의 실시간적 복원 시스템도

그림 2는 본 논문에서 광학적으로 구현된 복소 홀로그래프의 실시간적 복원 시스템을 나타낸 것이다. 즉, 마하젠더 간섭계를 구성한 다음, 간섭계의 두 광 경로에 공간광변조기인 LCD₁, LCD₂를 추가하고, LCD₂ 뒤쪽에는 λ/2 위상 지연기를 각각 추가하여 구성한다. 그리고, 편이상 LCD₁과 LCD₂가 위치한 광 경로를 각각 경로 1, 경로 2라 하자.

그림 2에서 LCD에 연결된 두 대의 컴퓨터는 동기화 되어있으며 이를 통해 변형된 삼각 간섭계로부터 합성된 복소 홀로그래프 중 LCD₁에는 실수부를 LCD₂에는 허수부를 띄우면 광 분할기 뒤쪽에서 식 (14)와 같은 결과를 얻을 수 있으며 적당한 거리를 진행하게 되면 Fresnel 회절 이론에 의해 원하는 복원 영상을 얻을 수 있게 된다.

이를 수식적으로 표현하면 입사되는 광원은 LP를 통과한 후에 x, y축 성분으로 나눌 수 있으므로 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U(x, y, z) \cong \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (15)$$

여기서, E_x, E_y는 각각 x, y 축 방향의 복소 진폭을 나타낸다. 편광 광 분할기를 경유한 복소 진폭은 경로 1인 경우 식 (15)의 y 축 성분만을, 경로 2인 경우는 x 축 성분만을 각각 나타낸다. 따라서, LCD₁ 및 LCD₂ 뒤쪽의 복소 진폭은 식 (16), (17)로 나타낼 수 있으며 실수부와 허수부를 각각 나타낸다.

$$U_{LCD_1}(x, y, z) = C^2 \cos\phi(x, y) \begin{pmatrix} 0 \\ E_y \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$U_{LCD_2}(x, y, z) = C^2 \cos\phi(x, y) \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

그리고, 경로 2에서 LCD₂ 뒤에 λ/2 위상 지연기를 통과한 빔의 복소 진폭은 식 (18)과 같이 주어진다.

$$U_w(x, y; z) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(-i\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(i\frac{\pi}{2}) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} U_{LCD_2}(x, y, z)$$

$$= \pm iC^2 \sin\phi(x, y) \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

여기서, +와 -는 λ/2 위상지연기의 slow axis가 x축에 대하여 각각 -45°와 +45° 회전되어 있을 경우(α = ± π/4)에 대응되고, 그림 2에서 광 분할기를 통해 합쳐진 빔은 식 (19)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} U_S(x, y; z) &= U_{LCD_1}(x, y, z) + U_w(x, y, z) \\ &= C^2 \cos\Phi(x, y) \begin{pmatrix} E_y \\ 0 \end{pmatrix} \pm iC^2 \sin\Phi(x, y) \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} C^2 \cos\Phi(x, y) E_y \pm iC^2 \sin\Phi(x, y) E_x \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)에서 E_x = E_y = E 인 경우를 가정하면 식 (20)으로 정리된다.

$$U_S(x, y, z) = \begin{pmatrix} C^2 E \exp\{\pm i\Phi(x, y)\} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

식 (20)은 복원하고자 하는 최종 복소 홀로그래프를 나타낸 것으로 식 (1)과 같은 형태이다. 따라서, 식 (20)의 Fresnel 회절식은 식 (21)과 같이 주어지게 되며,

$$\begin{aligned} U(x, y; z) &= \iint_{-\infty}^{\infty} U_S(x', y'; z') \\ &\exp\left[-i\frac{k}{2z_0} \{(x-x')^2 + (y-y')^2\}\right] dx' dy' \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)에 대한 빔의 세기는 최종적으로 식 (22)와 같이 나타낸다.

$$I(x, y) = |U(x, y, z)|^2 \quad (22)$$

결과적으로 관측면에서 식 (22)의 빔 세기를 사람의 눈으로 보게 되면 기록된 3차원 물체영상을 인식할 수 있게 된다.

III. 인코히어런트 3차원 홀로그램의 합성 및 복원 실험

3.1 깊이가 다른 두 점광원에 대한 광학실험

1) 광학실험 시스템 구성

서로 다른 깊이감을 갖는 두 점광원에 대한 인코히어런트 홀로그램 합성을 위한 광학계는 변형된 삼각 간섭계에 기반하여 그림 3과 같이 구현하였다. 즉, 구현된 광학 시스템에서 레이저 광원은 파장이 $\lambda = 532nm$ 이고, 출력이 200mW인 Nd-YAG 레이저(Crystal Laser, GCL-200-S)를 사용하였다.



그림 3. 인코히어런트 복소 홀로그램 합성을 위한 광학계 (두개의 점광원)

레이저에서 나온 빔은 빔 정렬기(Newport, LC-075) 및 빔 확대기(Newport, HB-4X)를 거친 뒤 회전형 디퓨저(diffuser)를 통해 인코히어런트한 빔이 생성되고, 생성된 인코히어런트한 빔은 100 mm의 깊이 차이를 갖는 두 개의 점광원에 입사된다. 점광원을 통과한 각각의 빔은 변형된 삼각 간섭계에서 시계방향 및 반시계 방향으로 진행하게 된다. 즉, 편광기 LP_1 을 45도로 맞추고 편광 광분할기인 PBS를 통과한 물체빔의 하나는 렌즈 L_1

($f_1 = 175mm$), $L_2(f_2 = 200mm)$ 를 통과하여 시계방향으로 진행하고, 또 하나의 빔은 렌즈 L_2 , L_1 를 통과하여 반시계 방향으로 진행된 다음 광 분할기에 의해 다시 만나 간섭 패턴을 형성하게 되는데 이 때 간섭 패턴에는 바이어스와 공액영상이 함께 나타나게 되는데 이를 제거하기 위하여 삼각 간섭계의 한쪽에 위상지연기인 WP_1 과 WP_2 을 삽입하게 된다.

그림 4는 마하젠더 간섭계에 기반한 복소 홀로그램을 복원하기 위한 광학 시스템을 나타낸 것이다. 즉, 컴퓨터를 이용하여 입력단에서 합성된 복소 홀로그램의 실수부는 마하젠더 간섭계의 한쪽에 있는 LCD_1 에, 허수부는 다른 한쪽에 있는 LCD_2 에 전송한 다음 레이저빔을 조사하게 되면, LCD_1 과 LCD_2 를 통과한 빔은 복소 홀로그램의 실수부 및 허수부의 정보를 각각 가지게 되며 이때, LCD_2 를 통과한 빔은 다시 $\lambda/2$ 위상 지연기를 통과되면서 $i\left(\exp\left(i\frac{\pi}{2}\right)\right)$ 값이 허수부에 곱해지게 한다. 따라서, 마하젠더 간섭계의 광분할기에 의해 다시 결합된 두 빔은 완전한 복소 홀로그램을 표현하게 되며 일정한 거리를 진행하게 되면 Fresnel 회절에 의해 복원된 3차원 입체영상을 관측할 수 있게 된다.

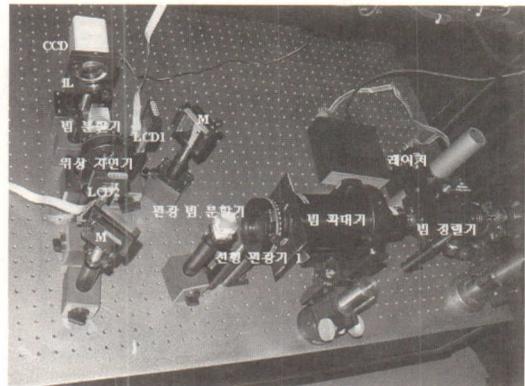


그림 4. 합성된 복소 홀로그램의 복원을 위한 광학 시스템도

2) 광학실험 결과

본 실험에서는 입력면으로부터 전방 50mm 와 후방 50mm에 위치한 두 개의 점광원을 사용하였다. 그림 5는 100 mm의 깊이감 차이를 갖는 이들 두 점광원에 대해 그림 3의 변형된 삼각 간섭계의 위상지연기인 WP_1 과 WP_2 의 조합으로 얻은 4쌍의

간섭패턴을 나타낸 것이고, 그림 6은 그림 5의 (b)에서 (a)를 빼서 구한 복소 홀로그램의 실수부와 (c)에서 (d)를 빼서 구한 복소 홀로그램의 허수부를 각각 나타낸 것이다.

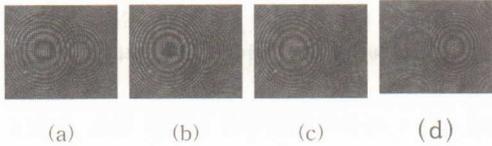


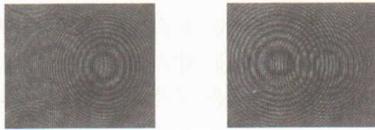
그림 5. 깊이가 다른 두 점광원에 대한 홀로그램 간섭패턴

(a) $\Gamma_1 = 0, \Gamma_2 = \frac{\pi}{2}$ (b)

$\Gamma_1 = 0, \Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$

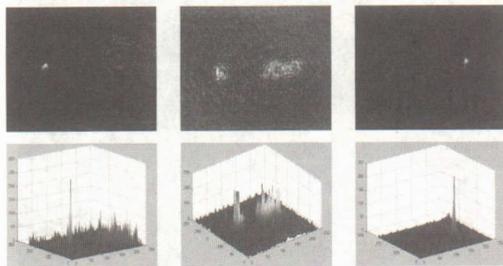
(c) $\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}, \Gamma_2 = \frac{\pi}{2}$ (d)

$\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}, \Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$



(a) 실수부 (b) 허수부

그림 6. 깊이가 다른 두 점광원에 대한 복소 홀로그램



(a) (b) (c)

그림 7. 초점에 따른 두 점광원의 복원 영상.

(a) 왼쪽 점광원 초점 (b) 두 점광원의 중간초점 (c) 오른쪽 점광원 초점

그리고, 그림 7은 그림 4의 마하젠더 간섭계에서 두개의 공간광변조기인 LCD₁과 LCD₂에 복소 홀로그램의 실수부와 허수부를 입력한 다음 각 점의 초점에 따라 복원한 결과를 나타낸 것이다. 즉, 그림 7(a)는 왼쪽 점광원의 초점(전방 50mm)에서 복원한 결과로 오른쪽의 점광원은 초점이 맞지 않아 거의

나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 7(b)는 두 점광원 초점면의 중간에서 복원된 영상 결과로 두 점이 동시에 나타나지만 두 점 모두 초점이 벗어난 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고, 그림 7(c)는 오른쪽 점광원의 초점면(후방 50mm)에서 복원한 영상을 나타낸 것으로 왼쪽 점광원은 초점이 맞지 않아 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다.

따라서, 본 논문에서 구현된 인코히어런트 홀로그램 입출력 광학계를 이용하여 100 mm의 서로 다른 깊이감을 갖는 두 점광원에 대한 홀로그램 합성과 복원 실험을 통해 바이어스와 공액영상이 제거되고 또한, 초점에 따라 깊이감이 서로 다른 두 영상의 실시간적 복원이 가능함을 확인할 수 있었다.

3.2 3차원 물체에 대한 광학실험

1) 광학실험 시스템 구성

실제 3차원 물체에 대한 인코히어런트 복소 홀로그램 합성을 위한 광학시스템은 그림 8과 같이 구현하였다. 깊이감이 있는 두 개의 점광원에 대한 이상의 실험은 투과형 물체를 이용한 것이었으나, 본 절에서는 실제의 3차원 물체에서 반사되는 빛을 변형된 삼각 간섭계를 통과시켜 간섭패턴을 만들게 된다. 반사형의 경우 투과형과는 달리 물체에서 반사되는 빛을 이용하기 때문에 신호 광량이 매우 적어 합성된 홀로그램은 잡음의 영향을 많이 받게 된다. 따라서, 이들 잡음을 보다 효과적으로 차단할 수 있는 세심한 광학계의 구성이 요구된다.

실험에서 사용된 물체는 각 변의 길이가 10mm인 정육면체 형과 피라미드 형 등 2개의 주사위를 사용하였다. 피라미드 형 주사위는 변형된 삼각 간섭계의 입력면에 위치하고 있고, 정육면체 형 주사위는 피라미드 형 주사위보다 30mm 전방에 위치시켰다. 그리고, 복소 홀로그램을 복원하기 위한 광학시스템은 그림 4와 동일하게 구성하였다.



그림 8. 인코히어런트 복소 홀로그램 합성을 위한 광학계

(2개의 3차원 물체)

2) 광학실험 결과

그림 9는 30 mm의 깊이감 차이를 갖는 두개의 주사위에 대해 그림 3의 변형된 삼각 간섭계의 위상지연기인 WP_1 과 WP_2 의 조합으로 얻은 4쌍의 간섭패턴을 나타낸 것이고, 그림 10은 그림 9의 (b)에서 (a)를 빼서 구한 복소 홀로그래ムの 실수부와 (c)에서 (d)를 빼서 구한 복소 홀로그래ムの 허수부를 각각 나타낸 것이다.

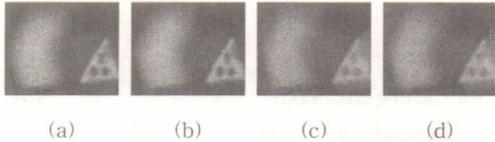


그림 9. 두 주사위에 대한 간섭패턴:

(a) $\Gamma_1 = 0, \Gamma_2 = \frac{\pi}{2}$ (b)

$\Gamma_1 = 0, \Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$

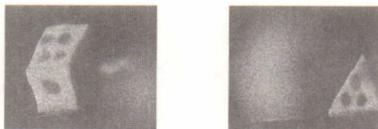
(c) $\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}, \Gamma_2 = \frac{\pi}{2}$ (d)

$\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}, \Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$



(a) 실수부 (b) 허수부

그림 10. 두개 주사위에 대한 복소 홀로그래ム



(a) 정육면체 형 주사위의 복원영상 (b) 피리미드 형 주사위의 복원영상

그림 11. 복소 홀로그래ムの 복원영상

(a) 정육면체 형 주사위의 복원영상 (b) 피리미드 형 주사위의 복원영상

그리고, 그림 11은 그림 4의 마하젠더 간섭계에 서 두개의 공간광변조기인 LCD_1 과 LCD_2 에 복소 홀로그래ムの 실수부와 허수부를 입력한 다음 각 점의 초점에 따라 복원한 결과를 나타낸 것이다. 즉,

그림 11(a)는 정육면체 형 주사위의 초점거리에서 복원한 결과이고, 그림 11(b)는 30mm 후방의 피라미드 형 주사위의 초점거리에서 복원한 영상을 각각 나타낸 것이다.

따라서, 깊이감이 서로 다른 두개의 실제 3차원 물체에 대한 이상의 홀로그래ムの 실시간적 합성 및 복원 실험을 통해 변형된 삼각 간섭계 및 마하젠더 간섭계에 기반한 새로운 인코히어런트 홀로그래픽 3차원 영상디스플레이 시스템의 구현 가능성을 제시하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 변형된 삼각 및 마하젠더 간섭계를 이용한 새로운 인코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이 시스템의 입출력 장치를 광학적으로 구현하였다. 그리고, 구현된 홀로그래ム 입출력 장치를 통한 실험을 통해 실제 3차원 물체인 두개의 주사위에 대한 복소 홀로그래ム을 실시간적으로 생성, 복원 시킴으로써 인코히어런트한 홀로그래픽 3D 디스플레이 시스템의 광학적 구현 가능성을 제시하였다. 본 논문에서 제안한 기법을 실제 비디오 카메라 앞단에 적용한다면 홀로그래ム 3D 입력 장치로서의 응용도 가능할 것으로 전망된다.

참고 문헌

[1] D. Gabor, "A new microscope principle," *Nature*, vol.161, pp.777-778, 1948.
 [2] E. N. Leith, J. Upatnieks, "Reconstructed wavefronts and communication theory," *J. Opt. Soc. Am*, vol.52, no.10, pp.1123-1130, 1962.
 [3] T. Okoshi, "Three-dimensional displays," *Proc. of IEEE*, vol.68, no.5, pp.548-564, 1980
 [4] G. Cochran, "New method of making Fresnel transforms with incoherent light," *J. Opt. Soc. Am*, vol.56, no.11, pp.1513-1517, 1966.
 [5] A. W. Lohmann, "Wavefront reconstruction for incoherent objects," *J. Opt. Soc. Am*, vol.55, no.11, pp.1555-1556, 1965.
 [6] G. Sirat, D. Psaltis, "Conoscopic holography," *Opt. Lett.*, vol.10, no.1, pp.4-6, 1985.
 [7] L. M. Mugnier, G. Y. Sirat, "On-axis conoscopic holography without a conjugate image," *Opt. Lett.*, vol.17, no.4, pp.294-296,

1992.

[8] 김수길, 김은수, 이혁, 이병호, “비이어스와 공액 영상이 제거된 인코히어런트 삼각 홀로그래피에 대한 이론적 연구,” *전자공학회논문지*, vol.33A, no.10, pp.144-151, 1996.

[9] Soo-Gil Kim, Byoung-ho Lee, Eun-Soo Kim, “Removal of bias and the conjugate image in incoherent on-axis triangular holography and real-time reconstruction of the complex hologram,” *Appl. Opt.*, vol.36, no.20, pp.4784-4791, 1997.

[10] 김수길, 이병호, 김은수, “인코히어런트 삼각 홀로그래피의 구현과 복소 홀로그램의 수치적 복원,” *한국광학회지*, vol.8, no.2, pp.99-106, 1997.

[11] 김수길, 김규태, 이병호, 김은수, “LCD를 이용한 복소 홀로그램의 실시간적 복원,” *전자공학회논문지*, vol.34D, no.8, pp.284-291, 1997.

[12] 김수길, 김은수, 이병호, “인코히어런트 삼각 홀로그래피의 해상도 분석에 관한 연구,” *한국광학회지*, vol.10, no.2, pp.128-136, 1999.

[13] S. G. Kim, B. Lee, E. S. Kim, C. W. Yi, “Resolution Analysis of Incoherent Triangular Holography,” *Appl. Opt.*, vol.40, no.26, pp.4672-4678, 2001.

[14] S. C. Kim, J. S. Koo, J. H. Ko, E. S. Kim, “Practical implementation of a 3D imaging and display system using a modified triangular interferometer,” *Proc. SPIE*, Vol.5202, pp.50-59, August 2003.

[15] R. G. Dorsch, A. W. Lohman, S. Sinzinger, “Fresnel ping-pong algorithm for two-plane computer-generated hologram display,” *Appl. Opt.*, vol.33, no.5, pp.869-875, 1994.

[16] P. L. Ransom, “Synthesis of complex optical wavefronts,” *Appl. Opt.*, vol.11, no.11, pp.2554-2561, 1972.

김 승 철 (Seung-Chul Kim)

정회원



2002년 2월 : 광운대학교
전자공학과 졸업

2004년 2월 : 광운대학교
전자공학과 석사

2004년 3월 ~ 현재 : 광운대학교
전자공학과 박사과정

<관심분야> 3차원 영상 디스플레이, 홀로그래픽 메모리, 광공학

구 정 식 (Jung-Sik Koo)

정회원



2000년 2월 : 광운대학교
전자공학과 졸업

2002년 2월 : 광운대학교
전자공학과 석사

2002년 3월 ~ 현재 : 광운대학교
전자공학과 박사과정

<관심분야> 3차원 영상 디스플레이, 홀로그래픽 메모리

김 은 수 (Eun-Soo Kim)

정회원

한국통신학회지 Vol.24, No. 9A 참조