

論文97-34D-4-8

# LCD를 이용한 복소홀로그램의 실시간적 복원

## (Real-time Reconstruction of Complex Holograms using LCDs)

金秀吉\*, 金奎兌\*\*, 李竝浩\*, 金恩洙\*\*, 孫廷榮\*\*\*

(Soo-Gil Kim, Kyu-Tae Kim, ByoungHo Lee, Eun-Soo Kim, and Jung-Young Son)

### 요 약

본 논문에서는 변형된 삼각간섭계에서 얻은 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 실시간적으로 복원할 수 있는 새로운 홀로그래픽 디스플레이 시스템을 제시하였다. 제안된 시스템은 기존의 Mach-Zehnder 간섭계에 liquid crystal displays(LCDs)와  $\lambda/2$  wave plate 그리고 편광 광분할기를 추가하여 구성되었으며, 이 시스템을 이용한 복소홀로그램의 실시간적 영상복원의 가능성을 이론적인 해석과 실험을 통해 입증하였다.

### Abstract

In this paper, a new holographic display system that can in real-time reconstruct the complex hologram without the bias and the conjugate image, which is obtained from the modified triangular interferometer, is presented. The proposed system is made of adding liquid crystal displays(LCDs), a  $\lambda/2$  wave plate, and a polarizing beam splitter to the conventional Mach-Zehnder interferometric configuration. We demonstrate through theoretical analysis and experiment that real-time image reconstruction from the complex hologram is possible using the proposed system.

### I. 서 론

홀로그래피는 1948년 Gabor<sup>[1]</sup>에 의해 최초로 제안된 이래 3차원 정보를 기록할 수 있다는 특징 때문에 많은 연구자들의 관심을 끌어왔다. 기존의 홀로그래피는 홀로그램 필름에 3차원 정보를 기록한 다음에 현상된 필름을 사용하여 3차원 물체를 복원하게 되므로 실시간적 3차원 영상 디스플레이를 위한 목적으로 사용

하고자할 때에 그 응용이 크게 제한되었다. 따라서, 이러한 단점을 극복하여 실시간으로 동영상을 디스플레이하기 위한 새로운 접근방법으로 1966년 이후 많은 연구자들이 전자홀로그래피(electro-holography)를 연구해오고 있다. 이러한 전자홀로그래피의 연구가 가능한 것은 광학소자에 버금가는 고해상도 및 고속의 공간 광변조기(SLM; spatial light modulator)와 CCD(charge coupled device)소자 기술의 발전에 기인한다.

Sato가 제안한 홀로그래픽 3차원 TV 시스템<sup>[2,3]</sup>은 CCD카메라에 잡힌 물체파와 기준파의 간섭패턴을 LCD(liquid crystal display)패널에 전송한 후에 LCD에 레이저광을 조사함으로써 3차원 영상을 복원하는 것이며, 복원된 영상의 SNR(signal to noise ratio)을 향상시키기 위하여 공간필터를 사용하여 0차

\* 正會員, 서울大學校 電氣工學部

(School of Electrical Eng., Seoul National Univ.)

\*\* 正會員, 光云大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Kwangwoon Univ.)

\*\*\* 正會員, 韓國科學技術研究院(KIST)

(Korea Institute of Science and Technology)

接受日字:1996年12月28日, 수정원료일:1997年3月21日

회절과 고주파 성분을 제거하였다. 또한, Sato는 RGB의 세 개의 레이저를 사용하여 흑백이 아닌 컬러로 동영상을 복원하는 실험도 수행하였다.<sup>[4]</sup> 비슷한 시기에 Hashimoto<sup>[5,6]</sup>도 Sato와 비슷한 방식으로 물체의 홀로그램을 구성하여 복원하였지만, Sato가 사용한 LCD보다 해상도가 2배 우수한 LCD를 사용함으로써 보다 나은 복원영상을 얻을 수 있었으며, 1991년에는 움직이는 물체의 간섭패턴을 LCD에 실시간으로 전송하고 복원함으로써 LCD를 이용한 동영상의 복원이 가능하다는 것을 실험적으로 입증하였다. 그러나, Sato와 Hashimoto가 제안한 홀로그래픽 TV 시스템은 레이저를 이용하여 홀로그램을 만들기 때문에 자연환경과 같이 레이저의 가간섭거리의 한계를 넘는 3차원 장면은 홀로그램으로 만드는 것이 근본적으로 불가능하였다.

따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 자연광에 의해 물체에서 반사되는 백색광을 이용하여 홀로그램을 만드는 인코히어런트 홀로그래피 방법이 유망하며 여러 가지 기록방법들이 제안되고있다.<sup>[7-12]</sup>

본 논문에서는 변형된 삼각 간섭계<sup>[13-15]</sup>를 사용하여 인코히어런트 홀로그램을 만들고 이를 이용하여 홀로그램영상을 실시간으로 복원할 수 있는 새로운 디스플레이 방법을 제시하고자 한다. 일반적으로 변형된 삼각 간섭계에서 얻어진 홀로그램은 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램이므로 이것을 광학적으로 표현할 수 있는 수단은 매우 제한되어 있다.

Ransom<sup>[16]</sup>은 홀로그램의 실수부와 허수부에 해당하는 transparency를 만든 후에 이를 Mach Zehnder 간섭계의 두 경로에 각각 배치하고, 허수부를 표현하는 transparency 뒤쪽에 다른 경로에 대해  $\lambda/4$  만큼 위상차가 생기게 하는 매질을 사용하여 광분할기로 두 경로를 진행해 온 빛을 결합시킴으로써 복소홀로그램을 구현하는 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 transparency를 사용함으로써 복소합수를 실시간으로 합성할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 1992년에 Gregory<sup>[17]</sup>는 LCTV(liquid crystal television)를 이용하여 복소합수를 합성하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 크게 두가지로 분류될 수 있으며, 첫번째는 Mach-Zehnder 간섭계의 두 경로중 한쪽 경로에는 편광기가 부착된 LCTV를 배치하고 다른 경로에는 편광기를 제거한 LCTV를 배치함으로써 광분할기에 의해 결합된 두 빛이 복소합수가 되도록 하는 방법이 있

다. 두번째는 편광기가 부착된 LCTV와 편광기가 제거된 LCTV를 직렬로 배열함으로써 두개의 LCTV를 통과한 빛이 복소합수로 표현되도록 하는 방법이 있다. 이 방법들은 실시간으로 복소합수를 합성할 수 있으나 복소합수의 위상값을 미리 알고 있어야 한다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 Ransom과 Gregory의 단점을 보완하여 실시간으로 복소홀로그램을 합성하여 영상을 복원할 수 있는 시스템을 제안하고 이론적 해석과 실험을 통해서 그 가능성을 입증하고자 한다.

본 논문에서 제안된 시스템은 기존의 Mach-Zehnder 간섭계에 있는 두 개의 광경로에 각각 하나의 LCD를 배치하고, 광경로 중의 하나에  $\lambda/2$  wave plate를 설치하여 두 개의 LCD를 통과한 빛이 각각 복소홀로그램의 실수부와 허수부를 표현하도록 하였다. 이 두 빛이 광분할기에 의해 결합되어 일정한 거리를 진행하게 되면 빛의 회절에 의해 영상이 복원될 수 있도록 한 시스템이다. 제안된 시스템은 변형된 삼각 간섭계를 인코히어런트 홀로그램의 기록을 위한 입력부로 사용할 경우에 이의 복원을 위한 출력부로 활용될 수 있다. 따라서, 이러한 두 시스템을 결합시키면 3차원 영상을 기록하고 복원할 수 있는 홀로그래픽 3차원 영상통신 시스템의 구축이 가능하다.

## II. 이론적 해석

### 1. 변형된 삼각 간섭계<sup>[13]</sup>

그림 1은 최근에 제시된 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 얻을 수 있는, 수동소자로 구성된 변형된 삼각 간섭계<sup>[13,14]</sup>를 나타낸 것이다. 그림 1에서 LP1,2와 WP1,2는 각각 선형 편광기와 wave plate를 나타내며, L1과 L2는 초점거리가 각각  $f_1$ 과  $f_2$ 인 렌즈들이다. PBS는 편광 광분할기이며, LP1과 WP2는  $x$ 축에 대하여 45도 회전되어있고 WP1의 slow axis는  $x$ 축과 일치되어 있다. 그리고 LP2는 편광축이  $x$ 축 방향이며 F는 간섭필터이다.

변형된 삼각 간섭계에서 시계방향과 반시계방향으로 진행하는 빛이 출력면에서 더해지게 되는데, 출력면쪽에 위치한 wave plate를 이용하여 두 빛의 상대적인 위상차를 조절함으로써 출력면에서 4가지의 빛의 세기를 얻을 수 있다. 이렇게 구한 4가지 빛의 세기를 전자적으로 조작함으로써 식 (1)과 같은 복소홀로그램

$H(x, y)$ 를 얻을 수가 있다.

$$H(x, y) = C^2 \exp \left[ \pm i \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] \quad (1)$$

여기서,  $C$ 는 상수이며,  $x_1 = \frac{x_0}{\alpha + \beta}$ ,  $y_1 = \frac{y_0}{\alpha + \beta}$ ,  $z_1 = \frac{z_0}{\alpha + \beta}$ ,  $\alpha = -\frac{f_1}{f_2}$ ,  $\beta = -\frac{f_2}{f_1}$ ,  $\alpha - \beta = 1$ 이며, 그림 1에서 입력면(input plane)의 원점에 대한 점 S의 좌표가  $(x_0, y_0, -z_0)$ 이다. 식 (1)은 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 나타내며, 이 복소홀로그램은 본 논문에서 제안된 복소홀로그램 복원시스템의 입력으로 사용된다.

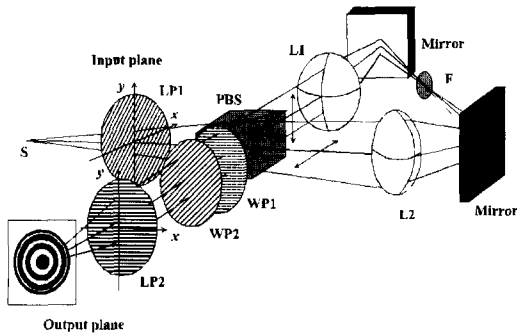


그림 1. 변형된 삼각 간섭계  
Fig. 1. Modified triangular interferometer.

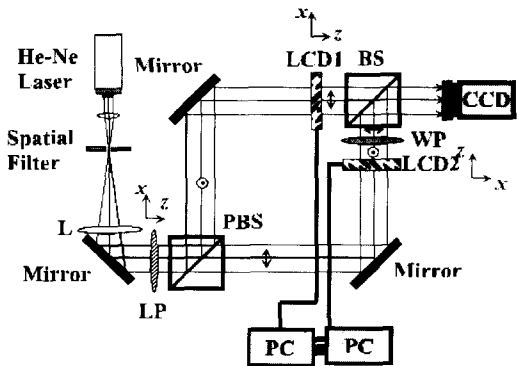


그림 2. 3차원 복소홀로그램 복원 시스템  
Fig. 2. The system for reconstruction of 3-D complex hologram.

2. 복소홀로그램 복원시스템의 원리

그림 2는 본 논문에서 제안된 복소홀로그램을 복원하기 위한 시스템이며, 이 시스템은 Mach-Zehnder 간섭계의 각 경로에 공간광변조기인 LCD를 배치하고 LCD2 뒤쪽에  $\lambda/2$  wave plate를 추가하여 구성된다.

그림 2에서 PBS와 BS는 각각 편광 광분할기와 광분할기이며, 선형편광기인 LP는  $x$ 축에 대하여 45도 회전되어 있다. 그리고, 편의상 LCD1과 LCD2가 위치한 경로를 각각 경로 1, 경로 2라 한다.

그림 2에서 LCD에 연결된 두대의 PC는 동기화되어 있으며, 이를 이용하여 메모리에 저장되어 있는 복소홀로그램의 실수부는 LCD1에, 그리고 허수부는 LCD2에 전송한 후에 레이저광을 각 LCD에 조사하게 되면, LCD1과 LCD2를 통과한 빛은 각각 복소홀로그램의 실수부와 허수부의 정보를 가지게 되고, 또한, LCD2를 통과한 빛은  $\lambda/2$  wave plate를 경유하므로 wave plate 뒤쪽에서  $i(\exp(i\frac{\pi}{2}))$ 값이 허수부에 곱해지게 된다. 따라서, 광분할기에 의해 결합된 두 빛은 복소홀로그램을 표현하게 되며, 일정한 거리를 진행하게 되면 Fresnel 회절에 의해 복원된 영상을 관측할 수 있게 된다.

앞에서 언급한 내용을 수식으로 표현하면 다음과 같다. 즉, 입사되는 레이저광원은 LP를 통과한 후에  $x$ 축 및  $y$ 축 성분으로 나눌 수 있으므로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\vec{U}(x, y; z) = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $E_x, E_y$ 는 각각  $x$ 축 및  $y$ 축 방향의 복소진폭이며, 진행거리에 의한 위상성분은 빛의 세기에 영향을 미치지 않으므로 이후에 생략하기로 한다. PBS를 경유한 복소진폭은 경로 1의 경우 식 (3)과 같이 쓸 수 있으며,

$$\vec{U}_1(x, y; z) = \begin{pmatrix} 0 \\ E_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

경로 2의 복소진폭은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\vec{U}_2(x, y; z) = \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

경로 1과 2를 진행하는 빛은 변형된 삼각 간섭계에서 얻은 복소홀로그램의 실수부와 허수부를 표현하는 LCD1과 LCD2를 경유하게 되면, 편광기와 해석기가 부착되어 있는 LCD는 진폭변조기 역할을 하므로 LCD1(편광기와 해석기의 편광축은 각각  $y$ 축과  $x$ 축에 일치)과 LCD2(편광기와 해석기의 편광축은 각각  $x$ 축

과  $y$ 축에 일치) 뒤쪽의 복소진폭은 각각 식 (5)와 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$\vec{U}_{LCD1}(x, y; z) = C^2 \cos \phi(x, y) \begin{pmatrix} E_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\vec{U}_{LCD2}(x, y; z) = C^2 \sin \phi(x, y) \begin{pmatrix} 0 \\ E_x \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서, 식 (5)와 (6)의 계수는 각각 식 (1)의 실수부와 허수부이다. 즉,  $C$ 는 상수이며,  $\phi(x, y) = \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \}$ ,  $x_1 = \frac{x_0}{\alpha + \beta}$ ,  $y_1 = \frac{y_0}{\alpha + \beta}$ ,  $z_1 = \frac{z_0}{\alpha + \beta}$ ,  $\alpha \equiv -\frac{f_1}{f_2}$ ,  $\beta \equiv -\frac{f_2}{f_1}$  그리고  $\alpha - \beta = 1$ 이다. 경로 2에서 LCD2 뒤에  $\lambda/2$  wave plate를 설치해 두면 wave plate 뒤쪽의 복소진폭은 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\vec{U}_w(x, y; z) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(-i\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(i\frac{\pi}{2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \vec{U}_{LCD2}(x, y; z) \\ = \pm iC^2 \sin \phi(x, y) \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서, +와 -는  $\lambda/2$  wave plate의 slow axis가  $x$ 축에 대하여 각각  $-45$ 도와  $+45$ 도 회전되어 있을 경우 ( $\alpha = \mp \frac{\pi}{4}$ )에 대응한다. 그림에서 광분할기를 통과한 빛은 결합이 되어 식 (8)과 같이 된다.

$$\vec{U}_s(x, y; z) = \vec{U}_{LCD1}(x, y; z) + \vec{U}_w(x, y; z) \\ = C^2 \cos \phi(x, y) \begin{pmatrix} E_y \\ 0 \end{pmatrix} \pm iC^2 \sin \phi(x, y) \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8) \\ = \begin{pmatrix} C^2 \cos \phi(x, y) E_y \pm iC^2 \sin \phi(x, y) E_x \\ 0 \end{pmatrix}$$

$E_x = E_y = E$  이라면 식 (8)은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{U}_s(x, y; z) = \begin{pmatrix} C^2 E \exp\{ \pm i\phi(x, y) \} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

식 (9)는 복원하고자 하는 복소홀로그램이다. 즉, 식

(1)과 같은 형태이다. 식 (9)의 Fresnel 회절식은 식 (10)과 같이 되며,

$$\vec{U}(x, y; z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} \vec{U}(x', y'; z') \exp \left[ -i \frac{k}{2z} \{ (x-x')^2 + (y-y')^2 \} \right] dx' dy' \quad (10)$$

식 (10)에 대한 빛의 세기는 식 (11)과 같다.

$$I(x, y) = |\vec{U}(x, y; z)|^2 \quad (11)$$

결과적으로 관측면에서 식 (11)의 빛의 세기를 광검출기나 사람의 눈으로 보게 되면 원하는 영상을 인식할 수 있으므로 본 논문에서 제안된 방법에 의한 복소홀로그램의 복원가능성을 이론적으로 입증하였다.

### 3. 전자홀로그래피의 해상도에 관한 고찰

3차원 정보를 기록하기 위해 입력부에서 CCD (charge coupled device)나 CID(charge injection device)를 사용하고 3차원 정보를 복원하기 위해 SLM을 이용하는 전자홀로그래피에 있어서, 사용되는 소자의 특성 및 CCD나 SLM의 화소의 갯수와 크기에 따라서 복원영상의 해상도가 달라지므로 이에 대한 연구는 많은 연구자들의 관심사였다. 특히, Kuo<sup>[18]</sup>는 기록소자와 디스플레이소자의 aperture의 크기, 화소의 갯수, 화소의 크기 등과 같은 요소들의 조합에 따른 복원영상의 해상도를 구하였으며, 또한, 기록소자에서의 양자화 오차, 정보를 전송할 때 발생하는 오차 등이 복원영상의 해상도에 미치는 영향도 연구하였다. 본 논문에서 제안된 시스템도 기본적으로 LCD를 이용하는 전자홀로그래피이므로 기록소자와 디스플레이소자의 aperture의 크기, 화소의 갯수, 화소의 크기 등과 같은 요소들의 조합에 따른 복원영상의 해상도를 고찰해볼 필요가 있다. Kuo는 공간주파수의 샘플링, aperture의 크기 및 기록소자와 SLM의 dynamic range에 따른 성능을 비교분석하였다. Kuo의 결과를 종합해보면 화소의 갯수가 많고 홀로그램의 aperture가 커야 복원영상의 해상도가 좋아지며, 빛의 회절효율을 높이기 위해서 기록소자나 SLM자체의 해상도도 좋아야 한다. 기존의 홀로그래픽 필름의 경우 적어도 해상도는 1000 line/mm 이상이어야 하는데, 전자홀로그래피에서 기존의 홀로그래피에 필적하는 복원영상을 만들어 내기 위해서는 화소의 크기가  $1 \mu m^2$  이하여야 한다. 복원영상의 해상도에 영향을 미치는 요소는 이외에도 기록할 때 존재하는 외부의 빛, 기록소자의 A/D변환기에서의

양자화 오차, 3차원 정보를 전송시 존재하는 오차 등이 있다.

기록된 3차원 정보의 복원시에 해상도에 영향을 미치는 요소외에도 기록된 정보의 양이 방대하므로 이를 전송하기 위해서는 정보량을 압축할 필요가 있으며 이에 대한 연구도 앞으로 진행되어야 할 것이다.

### III. 광학적 복원 실험

본 논문에서 제시된 복원 시스템의 이론적 분석결과를 검증하기 위하여 변형된 삼각 간섭계에서 얻은 복소홀로그래ムの 광학적 복원 실험을 수행하였다. 변형된 삼각 간섭계를 이용하여 하나의 점광원, 같은 평면에 있는 두개의 점광원, 그리고 깊이감(depth)이 있는 두개의 점광원에 대한 복소홀로그래ム을 얻었으며, 이 복소홀로그래ム들이 광학적 복원을 위해 사용되었다. 그리고 비교를 위해 기존의 삼각 간섭계를 이용하여 바이어스와 공액영상이 제거되지 않은 홀로그래ム을 구하였으며 이에 대한 광학적 복원도 수행되었다. 본 논문에서 제안된 시스템에 사용된 LCD의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 실험에 사용된 LCD의 사양

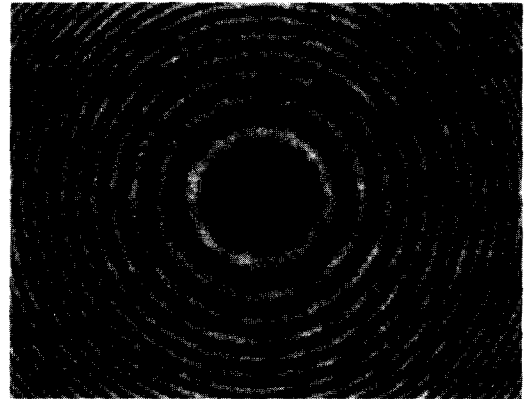
Table 1. Spec. of LCD used in experiment.

패널의 크기	대각선의 길이: 1.3 inch (3.4cm)
	26.9 mm(H) × 20.2 mm(V)
화소의 수	640(H) × 480(V)(307,200)
화소의 크기	42 μm(H) × 42 μm(V)
Contrast	200:1

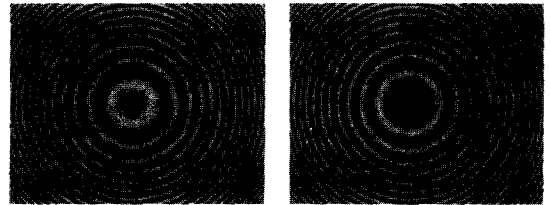
실험에 사용된 세가지 물체의 경우에 대하여 물체가 있는 위치에서 입력면까지의 거리는 다음과 같다. 한 점광원에서 입력면까지의 거리는 1,000mm, 같은 평면에 있는 두 점광원에서 입력면까지의 거리는 1,500mm이며 두 점광원간의 거리는 3mm였다. 깊이감이 있는 두 점광원의 경우에 왼쪽 점광원에서 입력면까지의 거리가 1,275mm, 두 점광원간의 깊이감은 450mm였으며, 두 점광원간의 수평거리 간격은 3mm였다. 이 세가지 물체에 대해 변형된 삼각 간섭계를 이용하여 얻은 복소홀로그래ム은 그림 3과 같다.

그림 3의 (a)는 기존의 삼각 간섭계에서 얻은 한 점광원에 대한 홀로그래ム이며, 그림 3의 (b)는 변형된 삼각 간섭계에서 얻어진 한 점광원에 대한 복소홀로그래ムの

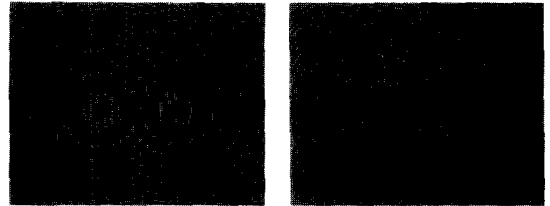
실수부와 허수부이다.



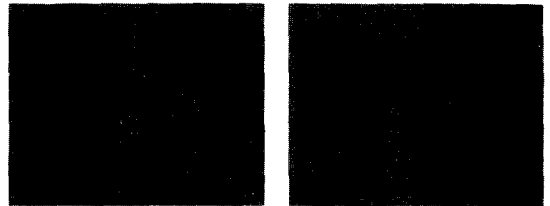
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. 세가지 물체에 대한 복소홀로그래ム((a)는 기존의 삼각 간섭계에서 얻은 한 점광원에 대한 홀로그래ム이며 (b), (c), (d)는 세가지 물체의 복소홀로그래ム을 나타내며, 왼쪽과 오른쪽 그림은 각각 복소홀로그래ムの 실수부와 허수부이다.)

Fig. 3. Complex hologram of three objects((a) is the hologram of a point source obtained from the conventional triangular interferometer, and (b), (c), (d) are complex holograms of three objects, in which left and right figures are the real and imaginary parts of complex holograms, respectively.)

그림 3의 (c)와 (d)는 각각 같은 평면에 존재하는 두 개의 점광원과 깊이감이 있는 두 개의 점광원에 대한 복소홀로그램의 실수부와 허수부이다. 실제 복소홀로그램의 실수부와 허수부는 음수값을 포함하고 있으나 그림에서는 음수의 절대값이 가장 큰 부분이 256 gray level에서 0 레벨이 되도록 양자화시켜서 표현한 그림이다.

세가지 경우의 물체에 대한 복소홀로그램을 본 논문에서 제안된 시스템을 이용하여 광학적으로 복원한 결과는 그림 4와 같으며, 이 그림들은 복원영상에 대한 빛의 세기의 profile을 나타낸 것이다.

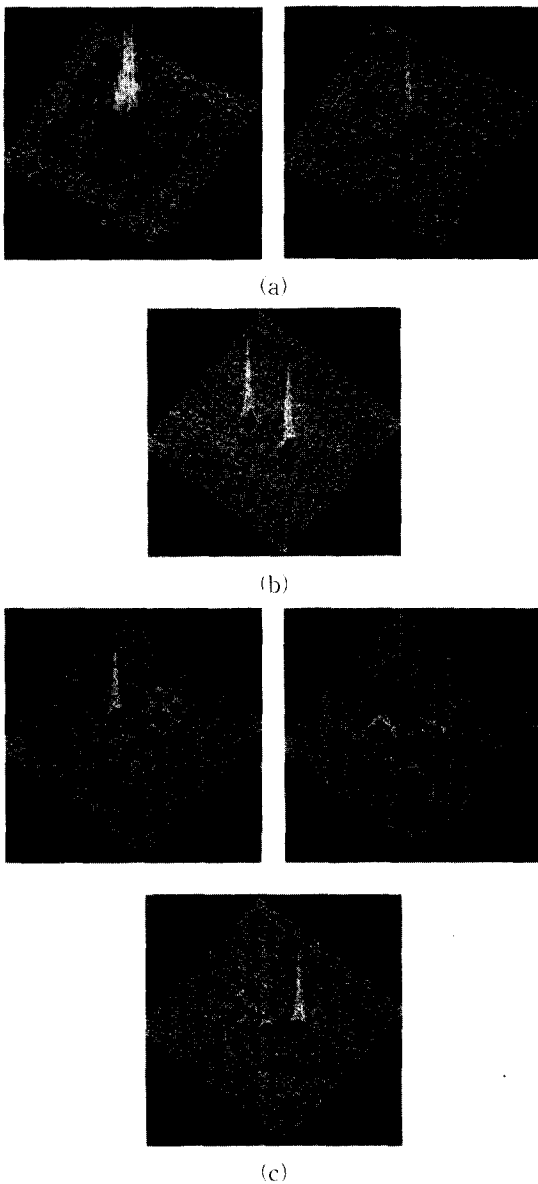


그림 4. 광학적으로 복원된 영상의 빛의 세기 profile (a) 왼쪽 그림은 기존의 삼각 간섭계에서 얻은 홀로그램의 복원영상이고, 오른쪽 그림은 변형된 삼각 간섭계를 이용하여 얻은 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램의 복원영상이다. (b) 같은 평면에 존재하는 두 점광원을 광학적으로 복원한 영상 (c) 깊이감이 있는 두 점광원에 대한 복소홀로그램을 초점거리에 따라 광학적으로 복원한 영상

Fig. 4. Intensity profile of optically reconstructed images (a) left figure is a reconstructed image from hologram obtained from the conventional triangular interferometer and right one is a reconstructed image from the complex hologram obtained from the modified triangular interferometer. (b) optically reconstructed image from the complex hologram of two point sources on a common plane (c) optically reconstructed image from the complex hologram of two point sources with depth by varying the focal length

그림 4의 (a)에서 왼쪽 그림은 기존의 삼각 간섭계를 이용하여 얻은, 바이어스와 공액영상이 제거되지 않은 홀로그램을 이용하여 복원한 영상이고, 오른쪽 그림은 변형된 삼각 간섭계를 이용하여 얻은 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램인 그림 3의 (b)를 이용하여 복원한 영상을 나타낸 것이다. 그림 4의 (a)에서 왼쪽 그림을 보면 배경에 바이어스와 공액영상이 존재하므로 SNR이 낮다는 것을 알 수 있다. 반면에, 오른쪽 그림의 복원영상은 바이어스와 허상이 제거된 상태이므로 점광원이 기존의 삼각 간섭계에서 얻은 홀로그램을 이용하여 복원한 영상보다 선명함을 알 수가 있다. 그림 4의 (b)는 같은 평면에 존재하는 두 개의 점광원에 대한 복소홀로그램을 광학적으로 복원한 것이며, 복원영상주위에 바이어스와 공액영상이 존재하지 않는 것을 알 수가 있다. 그림 4의 (c)는 깊이감이 있는 두 개의 점광원을 거리에 따라 복원한 것이며, 첫 번째 그림은 왼쪽 점광원의 초점 평면에서의 복원영상을 찍은 결과인데, 이 그림에서 오른쪽 점광원은 왼쪽 점광원과 깊이감때문에 거의 인식할 수 없다는 것을 알 수 있다. 두 번째 그림은 왼쪽과 오른쪽 점광원의 초점 평면의 중간지점에서 찍은 복원영상을 나타낸다. 세 번째 그림은 오른쪽 점광원의 초점 평면에서 복원한 영상을 찍은 결과이며, 여기서도 깊이감에 의한 효과때문에 왼쪽 점광원을 거의 인식할 수 없었다. 이러한 결과를 통

해 변형된 삼각 간섭계와 본 논문에서 제안된 복소홀로그래프 복원시스템을 이용하여 3차원 영상의 기록과 복원이 가능하다는 것을 알 수가 있으며, 또한, 이 경우에도 복원영상 주위에 바이어스와 공액영상이 존재하지 않는 것을 알 수 있었다. 실험에서 그림 4의 복원영상들은 그림 5와 같은 렌즈 배치를 이용하여 찍었다.

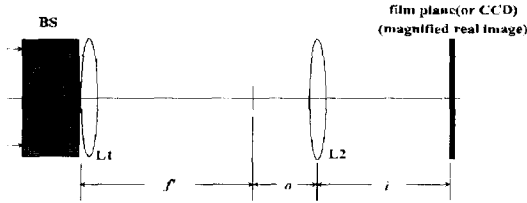


그림 5. 실상을 확대하기 위한 렌즈의 배치도  
Fig. 5. Lens configuration to magnify the real image.

그림 5에서 긴 초점 거리의 렌즈 L1이 그림 2의 복소홀로그래프 복원시스템에서 두 경로의 빛을 결합시키는 광분할기 BS 바로 뒤쪽에 배치되어 있으며, 이 렌즈는 광분할기에 의해 결합된 빛의 곡률반경을 축소시키는 역할을 하며 복원영상이 광분할기로부터의 거리  $f$ 에서 생성되도록 한다. L1보다 짧은 초점 거리를 가진 L2는 복원영상을 측정할 수 있는 크기로 확대하기 위해 사용되며, 확대된 복원영상은 필름이나 CCD 카메라 또는 비디오 카메라로 기록될 수 있다.

이러한 방법으로 찍은 실험결과를 통해, 변형된 삼각 간섭계에서 얻어진 복소홀로그래프가 본 논문에서 제안된 시스템을 이용하여 복원될 수 있다는 사실을 검증하였다. 이는 차세대 홀로그래픽 3차원 입체영상통신 시스템의 출력부로서의 응용이 가능하다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 변형된 삼각간섭계에서 얻은 복소홀로그래프를 실시간적으로 복원할 수 있는 새로운 홀로그래픽 디스플레이 시스템을 제시하였다. 제안된 시스템은 기존의 Mach-Zehnder 간섭계에 LCD와  $\lambda/2$  wave plate를 추가하여 구성하였으며, 이 시스템을 이용한 복소홀로그래프의 실시간적 영상복원의 가능성은 이론적인 전개와 실험을 통해 입증하였다.

실험결과를 분석해 보면, 기존의 삼각 간섭계에서 얻은 홀로그래프보다 변형된 삼각 간섭계를 이용하여 얻은,

바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그래프를 이용하여 영상을 복원하는 것이 보다 선명한 영상을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 차후에, 3차원 정보를 기록할 수 있는 변형된 삼각 간섭계를 입력부로 사용하고 본 논문에서 제안된 영상복원시스템을 출력부로 하는 3차원 영상 통신 시스템을 구성할 예정이며, 현재 변형된 삼각 간섭계를 기존의 TV카메라나 CCD카메라 등에 바로 장착할 수 있도록 하는 연구도 진행중이다.

#### 감사의 글

※ 본 연구는 한국과학재단과 정보통신부의 지원에 의하여 이루어진 것임.

#### 참 고 문 헌

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature* vol. **161**, pp. 777-778, 1948.
- [2] K. Sato, K. Higuchi, and H. Katsuma, "Holographic television by liquid crystal device," *Proc. SPIE* vol. **1667**, Practical Holography VI, pp. 19-31, 1992.
- [3] H. Katsuma and K. Sato, "Electronic display system using LCD, laser diode, and holography camera," *Proc. SPIE* vol. **1914**, Practical Holography VII, pp. 212-218, 1993.
- [4] K. Sato, "Characteristics of kinoform by LCD and its application to display the animated color 3D image," *Proc. SPIE* vol. **2176**, Practical Holography VIII, pp. 42-49, 1994.
- [5] N. Hashimoto, S. Morokawa, and K. Kitamura, "Real-time holography using the high-resolution LCTV-SLM," *Proc. SPIE* vol. **1461**, Practical Holography V, pp. 291-302, 1991.
- [6] N. Hashimoto, K. Hoshino, and S. Morokawa, "Improved real-time holography system with LCDs," *Proc. SPIE* vol. **1667**, Practical Holography VI, pp. 2-7, 1992.
- [7] A. W. Lohmann, "Wavefront reconstruction for incoherent objects," *J. Opt. Soc. Am.* vol. **55**, pp. 1555-1556, 1965.

- [8] G. Cochran, "New method of making Fresnel transforms with incoherent light," J. Opt. Soc. Am. vol. **56**, pp. 1513-1517, 1966.
- [9] P. J. Peters, "Incoherent holograms with mercury light source," Appl. Phys. Lett. vol. **8**, pp. 209-210, 1966.
- [10] F. T. S. Yu, *Introduction to Diffraction, Information Processing, and Holography* (MIT press, Boston, 1973).
- [11] G. W. Stroke and R. C. Restrick III, "Holography with spatially noncoherent light," Appl. Phys. Lett. vol. **7**, pp. 229-231, 1965.
- [12] G. Sirat and D. Psaltis, "Conoscopic holography," Opt. Lett. vol. **10**, pp. 4-6, 1985.
- [13] 김수길, 김은수, 이혁, 이병호, "바이어스와 공액영상이 제거된 인코히어런트 삼각 홀로그래피에 대한 이론적 연구," 전자공학회논문지A vol. **33**, pp. 144-151, 1996
- [14] Soo-Gil Kim, Eun-Soo Kim, and Byoung-ho Lee, OSA Annual Meeting(Optical Society of America, Rochester, New York, 1996) Thpp5.
- [15] Soo-Gil Kim, Byoung-ho Lee, and Eun-Soo Kim, "Holographic three-dimensional imaging system based on the modified triangular interferometer," SPIE Proc., Practical Holography XI, (San Jose, California, U.S.A., 1997) (to be published).
- [16] P. L. Ransom, "Synthesis of complex optical wavefronts," Appl. Opt. vol. **11**, no. 11, pp. 2554-2561, 1972.
- [17] D. A. Gregory, J. C. Kirsch, and E. C. Tam, "Full complex modulation using liquid-crystal televisions," Appl. Opt. vol. **31**, no. 2, pp. 163-165, 1992.
- [18] C. J. Kuo and H. T. Chang, "Resolution studies for electronic holography," Opt. Eng. vol. **34**, no. 5, pp. 1352-1357, 1995.

## — 저 자 소 개 —

金秀吉(正會員) 第33卷 A編 第10號 參照

현재 호서대학교, 서울산업대학교 강사



金奎兌(正會員)

1972年 4월 18일생. 1996년 광운대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1996년 ~ 현재 광운대학교 전자공학과 대학원 석사과정. 주관심분야는 인코히어런트 홀로그래피, 광정보처리, 3차원 디스플레이등

李竝浩(正會員) 第33卷 A編 第1號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 조교수

金恩洙(正會員) 第33卷 A編 第10號 參照

현재 광운대학교 전자공학과 교수

孫廷榮(正會員)

1950년 2월 11일생. 1980년 ~ 1985년 미국 Tennessee 대학 졸업(Ph. D). 1977년 ~ 현재 KIST 3차원 영상매체 센터장, 책임연구원. 주관심분야 : 3차원 영상매체, 광컴퓨팅, 광계측등