

인코히어런트 삼각 홀로그래피의 구현과 복소홀로그램의 수치적 복원*

김수길* · 이병호* · 김은수** · 손정영***

*서울대학교 전기공학부, **광운대학교 전자공학과, ***한국과학기술연구원

(1996년 11월 27일 받음)

본 논문에서는 변형된 삼각 간섭계를 이용하여 인코히어런트(incoherent) 홀로그래피의 근본적인 문제인 바이어스와 공액영상을 제거할 수 있다는 것을 실험과 수치복원을 통해 입증하였다. 기존의 삼각 간섭계에 간단한 수동소자를 추가하여 구성된 변형된 삼각 간섭계의 출력면쪽에 위치한 wave plates를 이용하여, 변형된 삼각 간섭계내에서 시계방향과 반시계방향으로 진행하는 두 빛의 상대적인 위상차를 조절함으로써 4가지의 빛의 세기를 얻고, 이를 이용하여 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 얻었다. 또한 이를 수치적으로 복원한 결과와 기존의 삼각 간섭계를 이용하여 얻은 홀로그램을 수치적으로 복원한 결과를 비교분석함으로써, 변형된 삼각 간섭계를 이용하여 바이어스와 공액영상이 제거되는 것을 실험적으로 증명하였다.

I. 서 론

1948년 Gabor^[1]에 의해 최초로 제안된 홀로그래피(holography)는 1962년 Leith와 Upatnick^[2]에 의해 두 개의 빔을 이용한 off-axis 홀로그램이 발표된 이후 3차원 영상 디스플레이를 위한 잠재력을 인정받기 시작하였다. 그러나, 기존의 홀로그래피는 레이저를 사용하기 때문에 우리가 일상적으로 보는 야외경이나 실내의 방과 같이 부피가 큰 장면은 레이저광의 가간섭거리의 한계 때문에 홀로그램구성이 불가능하여 그 응용범위가 제한될 수 밖에 없다.

따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 물체에서 직접 반사되거나 발산되는 백색광을 이용하여 홀로그램을 만들 수 있으며 가간섭거리에 제한을 받지 않는 인코히어런트(incoherent) 홀로그래피 방법이 유망한 것으로 생각된다. 인코히어런트 홀로그램의 기록을 위해서 여러 가지 방법들이 제안되었다.^[3,8]

1966년 Cochran^[4]에 의해 제안된 인코히어런트 삼각 홀로그래피는 자연광을 이용하여 홀로그램을 만들 수 있다는 장점이 있지만 근본적으로 두가지 주요한 단점을 가지고 있다. 먼저 물체가 복잡해질 때 홀로그램이 구성되는 평면에서 SNR(signal to noise ratio)이 급격히 감소한다는 것이고 두 번째는 동축홀로그램이 복원될 때 실상과 허상이 동축상에 존재하게 되어 복원영상에 잡음이 많이 존재하게 된다는 것이다.

인코히어런트 홀로그램에 존재하는 바이어스(bias)와 공액영상(conjugate image)을 제거하기 위해 여러가지 방법이 제안되었다. Kozma와 Massey^[9]는 바이어스와 공간적으로 변화하는 신호를 분리하기 위해 홀로그램신호에 반송주파수를 도입하여 변조시키고 변조된 신호를 복조시킬 때 bandpass filt-

er에 통과시킴으로써 바이어스와 공간적으로 변화하는 성분을 분리하여 바이어스를 제거하는 방법을 제안하였다. 1977년에 Rhodes^[10]는 거울을 일정한 속도로 움직여 정보를 포함하고 있는 신호에 반송주파수를 도입하고 이 신호를 lowpass filter와 bandpass filter로 구성된 전자회로에 전송하여 바이어스와 신호를 분리하는 방법을 제안하였다. Poon과 Korpel^[11]은 acousto-optic 소자를 이용하여 반송주파수를 도입하는 방법을 사용하여 바이어스와 신호를 분리하는 방법을 제안하였다. Poon은 제안된 방법을 홀로그램의 실시간 복원,^[12] 현미경^[13] 등 폭넓은 분야에 응용하였다. 앞에서 언급한 방법은 모두 시간반송자와 공간반송자를 이용하여 바이어스와 신호를 분리하는 방법이므로 시간과 공간적인 변수를 도입할 수 없는 시스템에는 적용할 수가 없었다. 또한, 시간적인 반송자를 이용하는 시스템에서는 스캐닝하는 시간이 많이 걸리므로 실시간으로 바이어스와 신호를 분리하기 어려운 단점이 있다. 그리고 앞에 언급된 방법들은 원하는 신호만 따로 분리해내기 위한 것에 초점이 맞추어져 있었는데, Sirat^[8]은 이러한 방법을 인코히어런트 홀로그래피 시스템에 적용시켜 바이어스와 원하는 신호를 따로 뽑아낼 뿐만 아니라 얻은 신호를 결합시켜 실상과 허상을 얻을 수 있는 방법을 제안하였다. 1992년에 Mugnier와 Sirat^[14]는 코노스코픽(conoscopic) 시스템에 LCLV(liquid crystal light valve)와 회전하는 마스크를 이용하여 출력면에서 4가지 간섭패턴을 얻고 이들의 조합에 의해 바이어스와 신호를 분리하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 전자회로가 필요없고 스캐닝을 할 필요가 없다는 점에서 이전의 방법과 비교하여 장점을 가지고 있다. 그러나 LCLV와 회전하는 마스크와 같은 능동소자를 이용하므로 가격이 비싸고 동작에 따른 신뢰도에 있어서 문제를 가지는 단점이 있다. 이러한 단점을 없애기 위하여, 기존의 삼각 간섭계에 간단한 수동소자를 추가하여 구성된 변형된 삼각 간섭계를 만들고, 그 출력면쪽에 위치한 wave plates를 이용하여 변형된 삼각 간섭계내에서 시계방향과 반시계방향으로 진행하

*본 연구는 정보통신부 및 한국과학재단 연구비의 지원으로 이루어짐.

는 두 빛의 상대적인 위상차를 조절함으로써 4가지의 빛의 세기를 얻고, 이를 전자적으로(electronically) 조작함으로써 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 얻는 방법이 최근에 제안되었다.^[15,16]

본 논문에서는 이론적으로 제시되었던^[15] 변형된 삼각 간섭계를 이용하여 실험적으로 홀로그램을 구성하고 제안된 방법을 이용하면 이 홀로그램에서 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 얻을 수 있다는 것을 실험적으로 입증하고자 한다.

II. 변형된 삼각 간섭계의 PSF(point-spread function)

2.1. 변형된 삼각 간섭계^[15]

변형된 삼각 간섭계는 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 얻을 수 있는 수동소자로 구성된 시스템이며 이를 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 LP1-2와 WP1-2는 각각 선형편광기와 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.

그림 1에서 좌표가 $(x_0, y_0, -z_0)$ 인 점광원의 파장을 λ 라고 하자. 그러면 출력면에서의 점광원에 의한 PSF는 wave plate의 위상지연(phase retardation)의 4가지 조합과 Fresnel 근사식을 이용하면 표 1과 같이 주어진다.

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

$$x_1 = \frac{x_0}{\alpha + \beta}, \quad y_1 = \frac{y_0}{\alpha + \beta}, \quad z_1 = \frac{z_0}{\alpha + \beta}, \quad \alpha \equiv -\frac{f_1}{f_2}, \quad \beta \equiv -\frac{f_2}{f_1}$$

그리고 $\alpha - \beta = 1$ 이며 일정한 값을 가지는 상수는 생략되었다. 식 I_c 에서 식 I_s 를 빼면 복소홀로그램의 실수부가 얻어지며 식 (1)과 같다.

$$I_c(x, y) = \cos \{ \phi(x, y) \} \tag{1}$$

식 I_s 에서 식 I_c 를 빼면 복소홀로그램의 허수부가 구해지며 식 (2)와 같다.

$$I_s(x, y) = \sin \{ \phi(x, y) \} \tag{2}$$

따라서, 식 (1)과 (2)를 전자적으로(electronically) 결합함으로써 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램 $I(x, y)$ 를 얻을 수 있으며 이는 식 (3)과 같다.

$$I(x, y) = \exp \{ \pm i \phi(x, y) \} \tag{3}$$

식 (3)은 wave plate를 이용하여 시계방향과 반시계방향으로 진행하는 빛의 상대적인 위상을 조절하여 구한 출력면에서의 4가지의 빛의 세기를 이용하여 cosine과 sine함수를 구

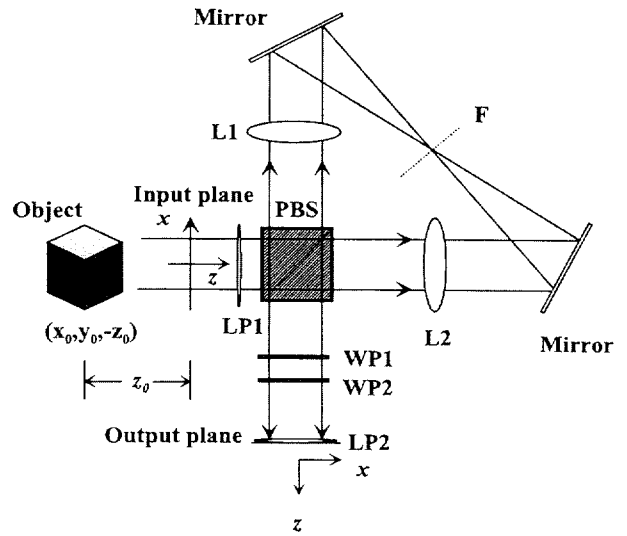


그림 1. 변형된 삼각 간섭계

표 1. Wave plate의 4가지 조합에 의한 출력면에서의 PSF

wave plate	PSF
$\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}$ 와 $\Gamma_2 = +\frac{\pi}{2}$	$I_{+c}(x, y) = \frac{1}{2} \{ 1 + \cos \phi(x, y) \}$
$\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}$ 와 $\Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$	$I_{-c}(x, y) = \frac{1}{2} \{ 1 - \cos \phi(x, y) \}$
$\Gamma_1 = 0$ 와 $\Gamma_2 = +\frac{\pi}{2}$	$I_{+s}(x, y) = \frac{1}{2} \{ 1 - \sin \phi(x, y) \}$
$\Gamma_1 = 0$ 와 $\Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$	$I_{-s}(x, y) = \frac{1}{2} \{ 1 + \sin \phi(x, y) \}$

하고 이 두 항의 결합을 통해 얻게 된 복소홀로그램을 나타내며, 이것은 바이어스와 공액영상이 없는 복소홀로그램이므로 식 (3)에서 양의 부호를 가진 복소홀로그램을 복원시 실상음, 음의 부호를 가진 복소홀로그램을 복원시 허상만을 따로 관측할 수 있다. 따라서, 수동소자로 구성된 변형된 삼각 간섭계에서는 wave plate의 위상지연 Γ_1 과 Γ_2 의 4가지 조합과 CCD 카메라를 이용하여 검출된 빛의 세기를 전자적으로 조작함으로써 기존의 인코히어런트 홀로그래피의 근본적인 문제점인 바이어스와 공액영상을 제거할 수 있다는 것을 알 수 있다.

2.2. 인코히어런트 삼각 홀로그래피의 해상도 및 공간주파수

식 (1)과 (2)는 Fresnel zone plates(FZP)를 표현하는 것이며 FZP는 렌즈와 같은 역할을 한다. 따라서, 식 (1)과 (2)의 FZP는 식 (4)와 같은 초점거리를 가지며,

$$f = z_1 = \left| \frac{z_0}{\alpha^2 - \beta^2} \right|, \tag{4}$$

FZP에서의 fringe의 개수^[17]는 식 (5)와 같이 주어진다.

$$F = \frac{R^2}{\lambda f} = \frac{R^2}{\lambda z_0} \left| \alpha^2 - \beta^2 \right| = \frac{R^2}{\lambda z_0} \left| \frac{f_1^4 - f_2^4}{f_1^2 f_2^2} \right| \tag{5}$$

여기서 R 은 FZP가 기록되어 있는 홀로그램의 반경을 나타낸다. 식 (4)와 Rayleigh조건을 이용하면 변형된 삼각 간섭계의 횡축방향의 분해가능한 최소한의 거리는 식 (6)과 같이 주어진다.

$$(x_0)_{\min} \simeq 1.22\lambda \left| \frac{z_0}{2R(\alpha^2 - \beta^2)} \right| \quad (6)$$

식 (5)를 이용하여 식 (6)을 더 간단히 표현하면 식 (7)과 같이 된다.

$$(x_0)_{\min} \simeq 0.61 \frac{R}{F} \quad (7)$$

종축방향의 분해가능한 최소한의 거리를 유도하는 과정은 다음과 같다. 식 (3)으로부터 직교좌표계의 원점 $(x_1, y_1) = (0, 0)$ 에 위치한 한 점광원의 실상(real image)에 대한 복소홀로그램은 식 (8)과 같이 주어진다.

$$I_r(x, y) = \exp \left\{ i \frac{k}{2z_1} (x^2 + y^2) \right\} \quad (8)$$

식 (8)의 복소홀로그램을 복원하기 위해 복소홀로그램에 평면파(평면파의 파장은 복소홀로그램을 기록할 때의 파장과 같다고 가정한다.)를 비추어주면 Fresnel회절에 의해 복소홀로그램으로부터 거리 z 만큼 떨어진 곳에서의 복소진폭은 식 (9)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} U(x, y, z) &= \frac{i}{\lambda z} \exp(-ikz) \iint_{\xi^2 + \eta^2 \leq R^2} I_r(\xi, \eta) \\ &\quad \exp \left[-i \frac{k}{2z} \left\{ (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \right\} \right] d\xi d\eta \\ &= \frac{i}{\lambda z} \exp(-ikz) \iint_{\xi^2 + \eta^2 \leq R^2} \exp \left\{ i \frac{k}{2z_1} (\xi^2 + \eta^2) \right\} \\ &\quad \times \exp \left[-i \frac{k}{2z} \left\{ (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \right\} \right] d\xi d\eta \quad (9) \end{aligned}$$

식 (9)를 간단히 하기 위해 z 축방향의 성분에 대해서만 수식을 전개하면 식 (9)는 식 (10)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} U(0, 0, z) &= \frac{i}{\lambda z} \exp(-ikz) \iint_{\xi^2 + \eta^2 \leq R^2} \\ &\quad \exp \left\{ i \frac{k}{2z_1} (\xi^2 + \eta^2) \right\} \exp \left[-i \frac{k}{2z} (\xi^2 + \eta^2) \right] d\xi d\eta \quad (10) \end{aligned}$$

식 (10)은 극좌표계로 변환시키면 적분이 간단하게 되며 극좌표계로 변환시키기 위해서는 식 (11)과 같은 극좌표를 도입해야 한다.

$$\xi = r_0 \cos \theta, \quad \eta = r_0 \sin \theta \quad (11)$$

여기서 $r_0 = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ 이다. 식 (10)을 식 (11)의 극좌표를 이용하여 극좌표계로 변환시키면 식 (12)와 같이 되며,

$$\begin{aligned} U(0, 0, z) &= \frac{i}{\lambda z} \exp(-ikz) \int_0^{R/2} \int_0^{2\pi} \exp \left\{ i \frac{k}{2} \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z} \right) r_0^2 \right\} r_0 dr_0 d\theta \\ &= \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z} \right)^{-1} \frac{2i}{z} \exp(-ikz) \exp \left\{ i \frac{k}{4} \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z} \right) R^2 \right\} \\ &\quad \times \sin \left\{ \frac{k}{4} \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z} \right) R^2 \right\}, \quad (12) \end{aligned}$$

식 (12)에 대한 빛의 세기는 식 (13)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} I(0, 0, z) &= \frac{k^2 R^4}{4z^2} \frac{\left[\sin \left\{ \frac{k}{4} \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z} \right) R^2 \right\} \right]^2}{\left[\frac{k}{4} \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z} \right) R^2 \right]^2} \\ &= \frac{k^2 R^4}{4z^2} \left[\frac{\sin \frac{W}{4}}{\frac{W}{4}} \right]^2 \quad (13) \end{aligned}$$

여기서 $W = \frac{z - z_1}{z_1 z} k R^2$ 이다. 복소홀로그램의 복원영상이 맺히는 평면부근에서의 z 축방향의 빛의 세기만을 고려하기 때문에 $z - z_1 \ll z_1$ 이다. 따라서, W 는 식 (14)와 같이 근사화시킬 수 있다.

$$W = \frac{z - z_1}{z_1 z} k R^2 = \frac{z'}{z_1 z} k R^2 \simeq \frac{z'}{z_1^2} k R^2 \quad (14)$$

식 (13)에서 빛의 세기가 최대인 경우는 $z' = 0$ 인 경우이며, 첫 번째 최소값은 $W = 4\pi$ 일때 발생하며 이때 z' 은 식 (15)와 같이 주어진다.

$$z' = \frac{4\pi z_1^2}{k R^2} \quad (15)$$

Rayleigh 조건에 따라 식 (15)의 z' 은 z 축방향의 분해가능한 최소한의 거리가 된다. 따라서, 식 (5)와 식 (15)를 이용하여 인코히어런트 삼각 홀로그래피의 종축방향의 분해가능한 최소한의 거리를 구할 수 있으며 식 (16)과 같이 주어진다.

$$(z_0)_{\min} = \frac{4\pi z_1^2}{k R^2} = \frac{2R^2}{\lambda F^2} \quad (16)$$

따라서, 식 (7)과 식 (16)의 역수를 각각 횡축방향과 종축방향의 Rayleigh 해상도라고 생각할 수 있다. 식 (7)과 (16)에서 인코히어런트 삼각 홀로그래피의 종축방향의 분해능은 홀로그램의 크기에 비례하며 횡축방향의 분해능보다 상당히 떨어진다는 것을 알 수 있다. 그리고 인코히어런트 홀로그램에 의해 분해될 수 있는 3차원 물체의 분해가능한 최소한의 거리는 홀로그램의 크기에 반비례한다는 것도 알 수 있다.

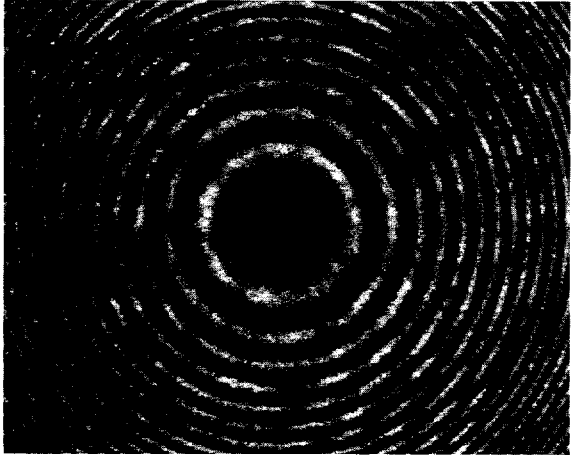


그림 2. 기존의 삼각 간섭계에서 얻은 한 점광원의 간섭패턴

원점에서 임의의 반경방향의 공간주파수는 식 (1)의 위상항으로부터 구할 수 있다. 간단히 하기 위해 한 점에 대한 홀로그램을 생각하며 한 점의 좌표는 (0, 0)로 주어진다고 가정한다. 그러면 공간주파수는 식 (17)과 같이 주어진다.¹¹⁾

$$\rho = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{r}{\lambda z_1} \tag{17}$$

그러므로 기록된 홀로그램의 반경이 증가함에 따라 fringe의 공간주파수도 함께 증가한다. 따라서, 어떤 물체에 대해 기록되는 홀로그램의 정보량은 기록소자의 해상도에 따라 최우된다는 것을 알 수 있으며 기록소자의 해상도가 좋을수록 이 소자로 기록된 홀로그램의 복원영상의 질도 좋아질 것이다.

III. 실험 및 결과 분석

변형된 삼각 간섭계의 이론적 분석결과를 실험적으로 검증하기 위하여 단파장 점광원에 대한 인코히어런트 홀로그램의 합성 및 복원에 대한 실험을 기존의 삼각 간섭계와 변형된 삼각 간섭계에 대해 각각 수행하고 그 결과를 비교분석하였다. 점광원에서 입력면까지의 거리는 1,000 mm였다. 또한 같은 평면에 존재하며 약 3 mm 떨어진 두 점광원에 대한 인코히어런트 홀로그램의 합성 및 복원에 대한 실험도 수행되었다. 두

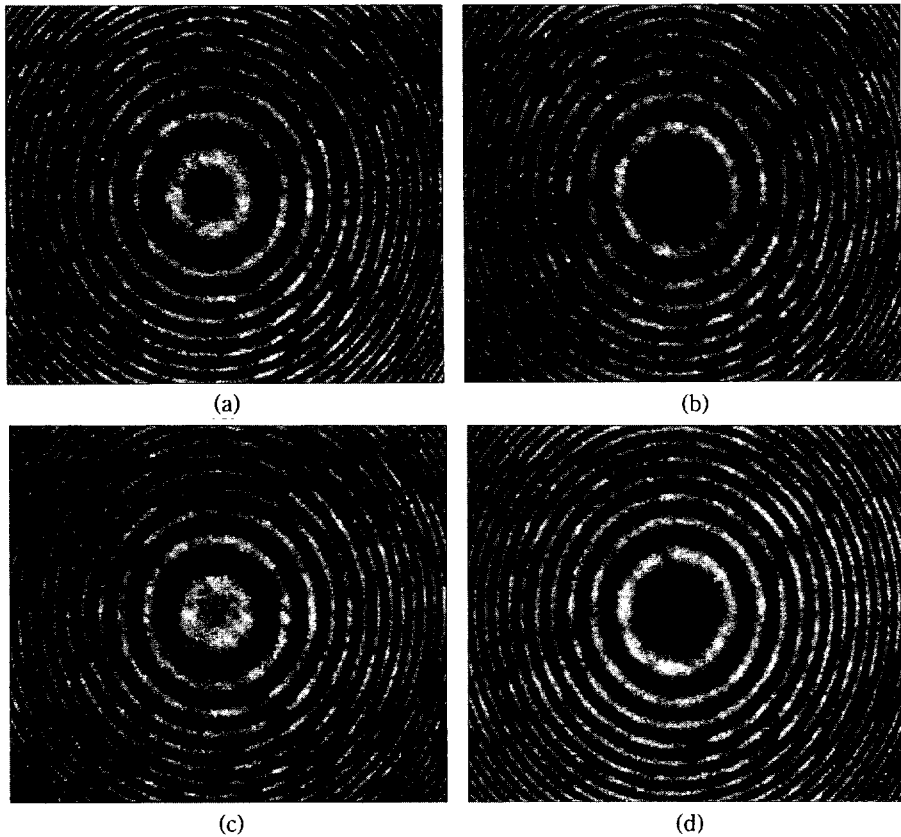


그림 3. 변형된 삼각 간섭계에서 얻은 한 점광원의 간섭패턴

(a) $\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}, \Gamma_2 = \frac{\pi}{2}$ 의 경우, (b) $\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}, \Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$ 의 경우, (c) $\Gamma_1 = 0, \Gamma_2 = \frac{\pi}{2}$ 의 경우 (d) $\Gamma_1 = 0, \Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$ 의 경우

점광원이 있는 평면에서 입력면까지의 거리는 1,500 mm였다. 두 점광원에 대한 홀로그램의 기록시 레이저광원과 물체 사이에 회전하는 ground glass를 설치하여 레이저광원의 가간섭길이를 짧게 하여 출력면에서 다른 점광원간에는 간섭패턴이 생기지 않도록 하였다.

실험에 사용된 레이저광원(Model 127, Spectra-Physics, U. S.A.)의 파장은 632.8 nm이고, 입력면에 위치한 편광기(03FPG007, Melles Griot)는 입사광을 x축에 대하여 45°회전되어 있는 편광성분을 통과시키고 출력면의 편광기는 x축성분만을 통과시키는 역할을 한다. 편광 광분할기(10FC16, Newport)는 입력면의 편광기를 통과한 입사광을 p파와 s파로 분리시켜 p파는 변형된 삼각 간섭계내에서 반시계방향으로 그리고 s파는 시계방향으로 진행하도록 하는 역할을 한다.

삼각 간섭계에 사용된 렌즈 L1, L2의 초점거리는 각각 $f_1=150$ mm(KBX070, Newport), $f_2=250$ mm(KBX079, Newport)이며, 변형된 삼각 간섭계에 사용된 wave plates(10RP14, Newport)는 $\lambda/4$ wave plate 2개이다. 그리고 변형된 삼각 간섭계의 출력면에서 홀로그램을 찍기 위해 설치된 CCD 카메라(Model GC-103E, Goldstar-Honeywell)의 화소수는 510(H)×492(V)개이다.

먼저 기존의 삼각 간섭계의 입력면에서 1,000 mm만큼 떨

어진 점광원의 간섭패턴을 출력면에서 구하였다. 그림 2는 실험을 통해 출력면에서 구한 점광원의 간섭패턴이다.

삼각 간섭계에서 구한 점광원의 간섭패턴은 최대값과 최소값이 위상이 2π 의 정수배가 되는 위치에서 주기적으로 발생하는 것을 그림 2를 통해 알 수 있으며, 이 간섭패턴은 Fresnel Zone Plate(FZP)와 같은 형태의 패턴임을 알 수 있다.

두 번째는 변형된 삼각 간섭계의 입력면에서 1,000 mm만큼 떨어진 점광원에 대하여 wave plate의 위상지연 Γ_1 과 Γ_2 의 4가지 조합에 따라 출력면에서의 CCD카메라로 찍은 간섭패턴을 나타낸 것이다. 그림 3의 (a), (b), (c), (d)는 각각 표 1의 PSF $I_{+0}, I_{-0}, I_{+s}, I_{-s}$ 에 대응하는 점광원의 간섭패턴들이다.

변형된 삼각 간섭계에서 wave plate의 위상지연 Γ_1 과 Γ_2 의 4가지 조합에 따른 점광원의 출력면에서의 간섭패턴들도 최대값과 최소값이 위상이 2π 의 정수배가 되는 위치에서 주기적으로 발생하는 것을 그림 3을 통해 알 수 있으며, 이 간섭패턴들도 FZP와 비슷한 형태의 패턴임을 알 수 있다. 그림 3의 간섭패턴 (a)에서 간섭패턴 (b)를 뺀 다음에 2로 나누면 복소홀로그램의 실수부에 해당하는 결과를, 그림 3의 간섭패턴 (d)에서 간섭패턴 (c)를 뺀 다음에 2로 나누게 되면 복소홀로그램의 허수부를 얻을 수 있으며 이를 나타낸 것이 그림 4의 (a)와 (b)이다.

그림 4의 (a)와 (b)는 식 (3)에 대응하는 복소홀로그램의 실수부와 허수부인 데, 실제 복소홀로그램의 실수부와 허수부

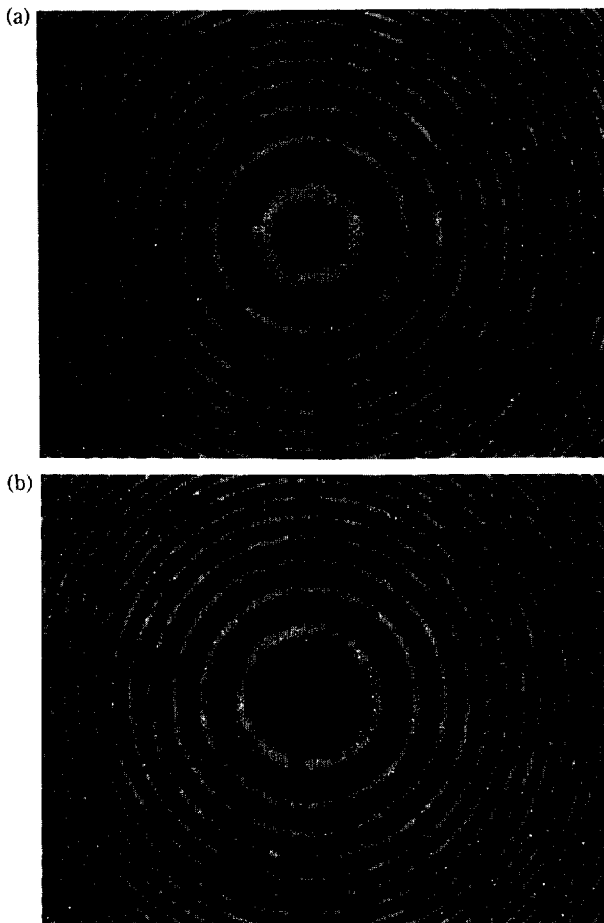


그림 4. 변형된 삼각 간섭계로부터 얻은 한 점광원의 복소홀로그램 (a) 실수부 (b) 허수부

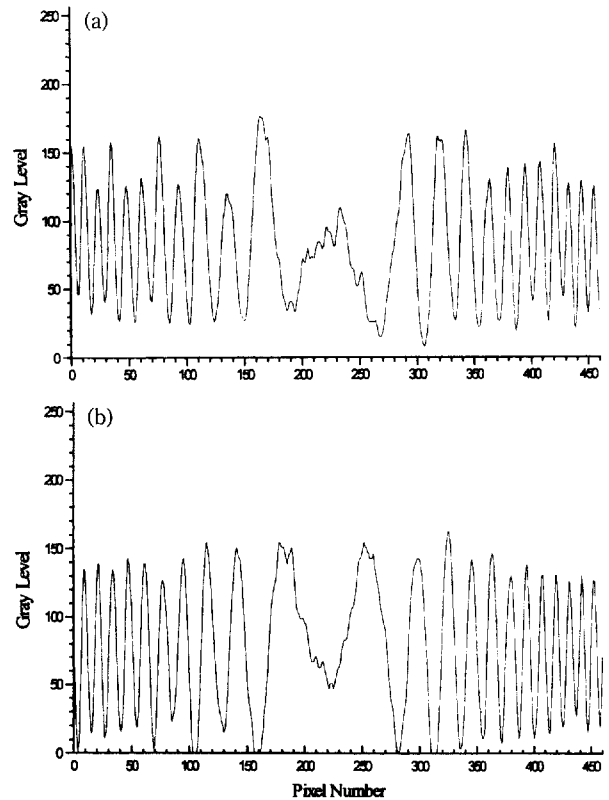


그림 5. 홀로그램의 단면도 (a) 기존의 삼각 간섭계에서 얻은 홀로그램의 단면도 (b) 변형된 삼각 간섭계에서 얻은 복소홀로그램의 실수부의 단면도

는 음수값을 포함하고 있으나 그림에서는 음수의 절대값이 가장 큰 부분이 256 gray level에서 0 레벨이 되도록 양자화시켜서 표현한 그림이다.

그림 5의 (a)는 바이어스와 공액영상이 존재하는 그림 2의 단면에 대한 profile을 나타낸 것이며, 그림 5의 (b)는 그림 3의 (b)에서 (a)를 뺀 복소홀로그래ムの 실수부의 단면도를 나타낸 것이다. 그림 5의 (a)에서 알 수 있듯이 기존의 삼각 간섭계에서 얻은 홀로그래ם은 바이어스 위에 영상복원신호가 존재하는 반면에 그림 5의 (b)에 나타낸 복소홀로그래ムの 실수부의 단면도에서는 바이어스가 제거되어서 영상복원신호만이 존재함을 알 수 있다. 그림 5의 (b)의 복소홀로그래ムの 실수부는 양수와 음수값을 다 포함하고 있으나 그림에서는 음수값이 존재하지 않도록 음수의 최대값과 동일한 크기를 갖는 양수값을 더하여 표현한 것이다. 이 결과로부터 변형된 삼각 간섭

계에서 얻은 간섭패턴들을 전자적으로 조작함으로써 바이어스가 제거됨을 알 수 있다. 또한, 바이어스가 제거된 영상에서는 원래의 간섭패턴에 존재했던 결함들이 제거된다는 것을 그림 3과 그림 4의 비교를 통해 알 수 있다.

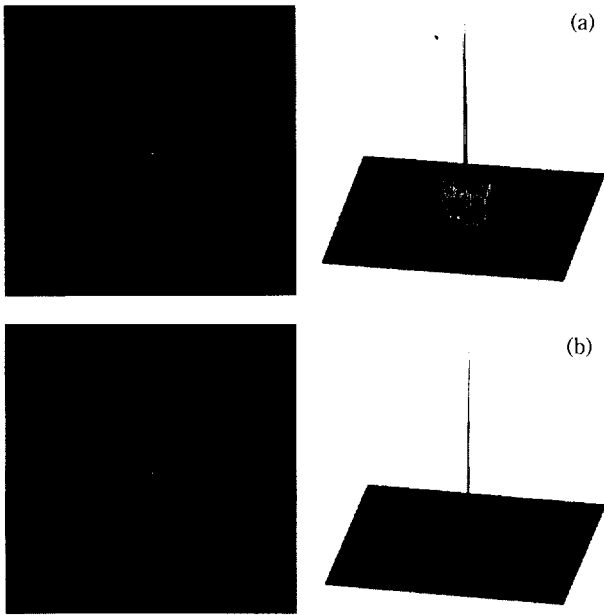


그림 6. 한 점광원의 복원영상 (a) 기존의 삼각 간섭계의 간섭패턴의 복원영상 (b) 변형된 삼각 간섭계의 복소홀로그래ם을 복원한 영상

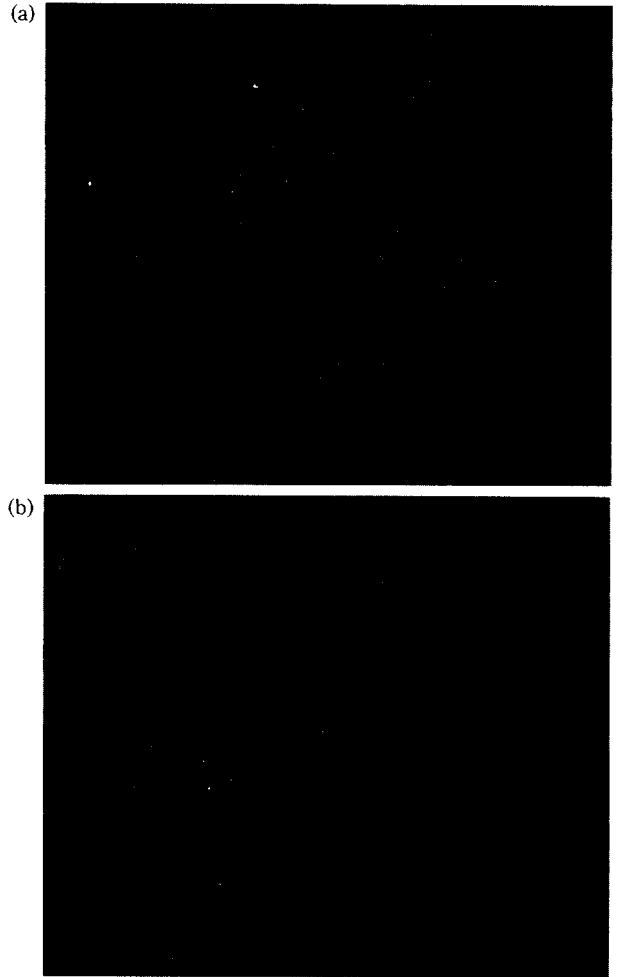


그림 7. 변형된 삼각 간섭계로부터 얻은 두 점광원의 복소홀로그래ם (a) 실수부 (b) 허수부

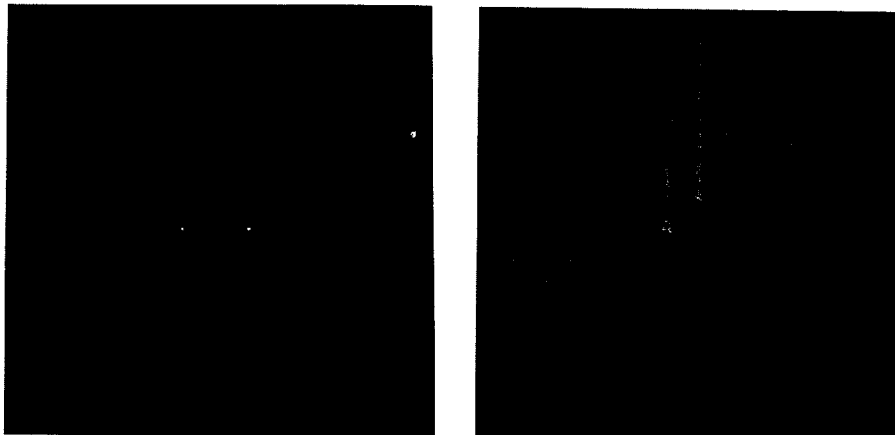


그림 8. 변형된 삼각 간섭계의 두 점광원의 복소홀로그래ם에 대한 복원영상

그림 6의 (a)는 기존의 삼각 간섭계를 이용하여 얻은 그림 2의 홀로그래프를 Fresnel-Kirchhoff 적분⁽¹⁹⁾을 이용하여 복원한 영상이고, 그림 6의 (b)는 변형된 삼각 간섭계를 이용하여 얻은, 바이어스와 허상이 제거된 그림 4의 복소홀로그래프를 이용하여 복원한 실상을 나타낸 것이다. 그림 6의 (a)에서는 배경에 바이어스와 허상이 존재하고, (b)의 복원영상에는 바이어스와 허상이 존재하지 않으므로 S/N이 기존의 삼각 간섭계의 홀로그래프를 복원한 것보다 변형된 삼각 간섭계의 복소홀로그래프를 이용하여 복원한 영상이 월등히 좋다는 것을 알 수 있다.

그림 7의 (a)와 (b)는 두 점광원에 대한 복소홀로그래프의 실수부와 허수부이다. 그리고 그림 8은 그림 7의 복소홀로그래프의 실수부와 허수부를 Fresnel-Kirchhoff적분을 이용하여 복원한 영상으로서, 왼쪽그림은 복원영상을 나타내며 오른쪽그림은 복원영상의 빛의 세기를 나타낸다.

그림 8의 두 점광원에 대한 복소홀로그래프의 복원결과도 예측했던 바와 같이 바이어스와 공액영상이 제거되고 두 점만이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다.

따라서, 기존의 삼각 간섭계에서 얻은 홀로그래프의 복원시 바이어스와 공액영상들이 동축상에 함께 존재하므로 영상의 질이 크게 떨어지는 반면에, 변형된 삼각 간섭계에서 얻은 복소홀로그래프의 복원시에는 바이어스와 공액영상이 제거되어 S/N이 향상되는 것을 실험과 수치복원을 통해 검증하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 인코히어런트 홀로그래피인 기존의 삼각 간섭계의 근본적인 문제인 바이어스와 공액영상의 문제를 해결할 수 있는 방법으로 제안된 변형된 삼각 간섭계에 대한 실험결과와 실험을 통해 얻은 홀로그래프의 수치복원결과를 제시하였다.

즉, 기존의 삼각 간섭계에 간단한 수동소자를 추가하여 구성된 변형된 삼각 간섭계에서 그 출력면쪽에 위치한 파장판(wave plates)을 이용하여 변형된 삼각 간섭계내에서 시계방향과 반시계방향으로 진행하는 두 빛의 상대적인 위상차를 조절함으로써 4가지의 빛의 세기를 얻고, 이를 이용하여 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그래프를 얻었다. 또한, 이를 수치적으로 복원한 결과와 기존의 삼각 간섭계를 이용하여 얻은 홀로그래프를 수치적으로 복원한 결과를 비교분석함으로써 변형된 삼각 간섭계를 이용하여 바이어스와 공액영상이

제거되는 것을 실험적으로 증명하였다. 그리고 변형된 삼각 간섭계에서 얻은 복원영상의 이론적인 해상도에 대한 해석을 통해 인코히어런트 삼각 홀로그래피의 종축방향의 분해능은 홀로그래프의 크기에 비례하며 횡축방향의 분해능보다 상당히 떨어진다는 것을 알 수 있다.

따라서, 변형된 삼각 간섭계는 광원의 종류에 관계없이 임의의 3차원 물체에 대한 정보를 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그래프로 기록할 수 있으며, 차세대 홀로그래픽 3차원 입체 영상통신 시스템에 있어서 영상의 기록을 위한 입력부로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. Gabor, *Nature*, **161**, 777 (1948).
- [2] E. N. Leith and J. Upatnieks, *J. Opt. Soc. Am.*, **52**, 1123 (1962).
- [3] A. W. Lohmann, *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 1555 (1965).
- [4] G. Cochran, *J. Opt. Soc. Am.*, **56**, 1513 (1966).
- [5] P. J. Peters, *Appl. Phys. Lett.*, **8**, 209 (1966).
- [6] F. T. S. Yu, *Introduction to Diffraction, Information Processing, and Holography* (MIT press, Boston, 1973).
- [7] G. W. Stroke and R. C. Restrict III, *Appl. Phys. Lett.*, **7**, 229 (1965).
- [8] G. Sirat and D. Psaltis, *Opt. Lett.*, **10**, 4 (1985).
- [9] A. Kozma and N. Massey, *Appl. Opt.*, **8**, 393 (1969).
- [10] W. T. Rhodes, *Appl. Opt.*, **16**, 265 (1977).
- [11] T.-C. Poon and A. Korpel, *Opt. Lett.*, **4**, 317 (1979).
- [12] B. D. Duncan, T.-C. Poon, M. H. Wu, K. Shinoda, and Y. Suzuki, *J. Mod. Opt.*, **39**, 63 (1992).
- [13] T.-C. Poon, K. B. Doh, B. W. Schilling, M. H. Wu, K. Shinoda, and Y. Suzuki, *Opt. Eng.*, **34**, 1338 (1995).
- [14] L. M. Mugnier and G. Y. Sirat, *Opt. Lett.*, **17**, 294 (1992).
- [15] 김수길, 김은수, 이 혁, 이병호, *전자공학회논문지 A*, **33**, 144 (1996).
- [16] Soo-Gil Kim, Eun-Soo Kim, and ByoungHo Lee, *OSA Annual Meeting(Optical Society of America, Rochester, New York, 1996) Thpp5*.
- [17] G. Y. Sirat, *J. Opt. Soc. Am. A*, **9**, 70 (1992).
- [18] A. Ghatak and K. Thyagarajan, *Optical Electronics* (Cambridge university press, New York, 1989) Ch. 7.
- [19] U. Schnars and W. Jüptner, *Appl. Opt.*, **33**, 179 (1994).

Implementation of incoherent triangular holography and numerical reconstruction of the complex hologram

Soo-Gil Kim*, Byoung-ho Lee*, Eun-Soo Kim** and Jung-Young Son***

**School of Electrical Eng., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea*

***Dept. of Electronic Eng., Kwangwoon Univ., Seoul 139-701, Korea*

****Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea*

(Received : November 27, 1996)

In this paper, we demonstrated, through experiment and numerical reconstruction, that the bias and the conjugate image, which are main drawbacks in incoherent holography, can be removed. By using wave plates of the modified triangular interferometer, which was made by adding simple passive devices to the conventional triangular interferometer, we adjusted the relative phase differences of two optical waves traveling in clockwise and counterclockwise. In this way, we obtained four intensity patterns, and then by manipulating the four intensity patterns electronically we obtained the complex hologram without bias and the conjugate image. Comparing numerical reconstruction results of the complex hologram with numerical reconstruction results of the hologram obtained from the conventional triangular interferometer, we demonstrated that bias and the conjugate image can be removed using the modified triangular interferometer.