

인코히어런트 홀로그래피를 이용한 거리계측과 3차원 영상 디스플레이

(Distance Measurement and Three-Dimensional Image Display
using Incoherent Holography)

김수길* · 황보승

(Soo-Gil Kim · Seung Hwangbo)

요 약

변형 삼각간섭계의 공간적인 해상도와 거리계측의 가능성을 이론적으로 유도하였으며 또한, 거리계측의 가능성을 입증하기 위하여 공간적으로 다른 깊이감을 가진 점광원들에 대한 인코히어런트 홀로그래피를 생성하고 이를 수치적으로 복원한 결과를 제시하였다. 그리고 제안된 방법을 이용하여 3차원 영상에 대한 홀로그래피를 기록하고 여러 가지 각도에서 영상을 재현함으로써 3차원 영상 디스플레이로서의 가능성도 입증하였다.

Abstract

We derived the resolution of the modified triangular interferometer and described the analysis about distance measurement using the one. Also, to demonstrate the feasibility of distance measurement using the modified triangular interferometer, the incoherent hologram of a two-point source with depth and its numerical reconstruction were presented. We demonstrated the possibility of the modified triangular interferometer as a three-dimensional display by recording and reconstructing the incoherent hologram of three-dimensional image.

Key Words : modified triangular interferometer, distance measurement, three-dimensional display

1. 서 론

1948년 Cabor[1]에 의해 제안된 홀로그래피(holography)는 3차원 영상 디스플레이에 가장 적합한 방법으로 생각되었으나, 3차원 영상을 기록하고 복원하는 과정이 복잡하여 실용성이 떨어지는 문제가 있으며, 기존

의 홀로그래피는 레이저를 이용함으로써 사용되는 레이저에 따른 고유한 가간섭거리의 한계를 벗어나는 거리에 있는 장면은 홀로그래피구성이 불가능하다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 자연계에 존재하는 물체에서 직접 나오거나 반사되는 백색광을 이용하여 홀로그래피를 만드는 인코히어런트 홀로그래피 방법이 가장 유망한 것으로 생각된다. 일반적으로 인코히어런트 홀로그래피는 물체의 각 점의 위치와 빛의 세기에 대한 정보를 암호화하는 Fresnel zone plates(FZP)의 중첩을 이용하는데, 지금까지 인코히어런트 홀로그래피의 기록을 위해서 여러 가지 방

* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 조교수

Tel : 041-540-5676, Fax : 041-540-5693

E-mail : sakim@office.hoseo.ac.kr

접수일자 : 2001년 10월 26일

1차심사 : 2001년 11월 3일

심사완료 : 2001년 12월 12일

법들이 제안되었다[2-7].

1966년 Cochran[5]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 구성이 되는 평면에서 신호대 잡음비가 급격히 증가한다는 것이고 두 번째는 동축홀로그램이 복원될 때 실상과 허상이 동축상에 존재하게 되어 복원영상에 잡음이 많이 존재하게 된다는 것이다.

인코히어런트 홀로그램에 존재하는 바이어스를 제거하기 위해 여러가지 방법이 제안되었으며, 가장 최근인 1992년에는 Mugnier와 Sirat[8]이 코노스코픽 시스템에 LCLV와 회전하는 마스크를 이용하여 출력면에서 4가지 간섭패턴을 얻고 이들의 조합에 의해 바이어스와 신호를 분리하는 방법을 제안하였다. 그러나 LCLV와 회전하는 마스크와 같은 능동소자를 이용하므로 가격이 비싸고 동작에 따른 신뢰도에 있어서 문제를 가지는 단점이 있다. 이러한 단점을 없애기 위하여 기존의 삼각간섭계에 간단한 수동소자를 추가함으로써 물체의 홀로그램에서 바이어스와 공액영상을 제거할 수 있는 방법이 제안되었다[9,10].

본 논문에서는 변형 삼각간섭계에 대한 공간적인 해상도를 이론적으로 유도하였으며 또한, 변형 삼각간섭계의 특성상 물체의 각 점광원에 대한 위치와 깊이감에 대한 정보가 변형 삼각간섭계를 이용하여 생성한 홀로그램에 저장되는데, 이러한 현상을 이용하여 홀로그램을 복원할 때 각각의 점광원에 대한 위치와 거리를 계측할 수 있다는 것을 이론적으로 제시하고 홀로그램을 수치복원한 결과를 통해 입증하였다. 또한, 변형 삼각간섭계가 깊이감에 대한 정보를 기록하고 이를 복원할 수 있다는 것을 입증하기 위해서 3차원 영상을 홀로그램으로 저장하고 이를 여러 각도에서 복원하는 실험도 수행하였다. 변형 삼각간섭계의 이러한 특징을 이용하면, 변형 삼각간섭계를 거리 계측이나 물체의 표면윤곽을 얻는데 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 변형 삼각 간섭계의 해상도

2.1. 변형 삼각간섭계

변형 삼각간섭계[9,10]를 그림 1에 나타내었다. 그

림 1에서 LP1,2와 WP1,2는 각각 선형편광기와 파장판(wave plate)을 나타내며, L1과 L2는 초점거리가 각각 f_1 과 f_2 인 렌즈들이다. PBS는 편광 광분할기이며, LP1과 WP2는 x축에 대하여 45도 회전되어 있고 WP1의 slow axis는 x축과 일치되어 있다. 그리고 LP2는 편광축이 x축 방향이며 F는 간섭필터를 나타낸다.

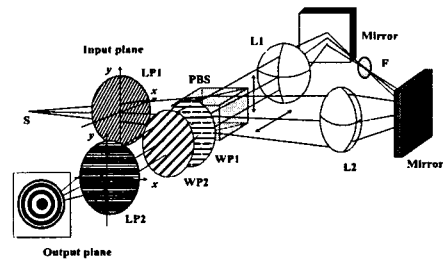


그림 1. 변형 삼각 간섭계
Fig. 1. Modified triangular interferometer

변형 삼각간섭계에서는 시계방향과 반시계방향으로 진행하는 빛이 출력면에서 더해지게 되는데, 출력면쪽에 위치한 파장판들의 4가지 조합에 따라 출력면에서 얻어지는 빛의 세기도 4가지가 얻어진다.

그림 1에서 좌표가 $(x_0, y_0, -z_0)$ 인 점광원의 파장을 λ 라고 하자. 그러면 출력면에서의 점광원에 의한 PSF(point-spread function)는 파장판의 위상지연(phase retardation)의 4가지 조합에 의해 표 1과 같이 4개의 PSF가 주어진다[9,10].

표 1. 위상지연에 따른 PSF
Table 1. PSF by combination of phase retardation

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

여기서, $\phi(x, y) = k/[2z_1\{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2)\}]$,
 $C = k/(2\sqrt{2}\pi z_0)$, $x_1 = x_0/(\alpha + \beta)$, $y_1 = y_0/(\alpha + \beta)$,

$z_1 = z_0/(\alpha^2 - \beta^2)$, $\alpha \equiv -f_1/f_2$, 그리고 $\beta \equiv -f_2/f_1$ 이다. 또한, 점광원의 위치에 따른 빛의 진폭성분은 생략하였다.

표 1에서의 PSF들을 전자적으로(electronically) 또는 광학적으로 결합함으로써 식 (1)과 같은 바이어스와 공액영상이 제거된 최종 복소홀로그램을 얻을 수 있게 된다.

$$H(x, y) = C^2 \exp[\pm i\phi(x, y)] \quad (1)$$

2.2. 기록과 복원시스템을 고려한 변형 삼각간섭계의 PSF

인코히어런트 홀로그램을 기록하고 복원하는, 전체 홀로그래픽 기록/복원 시스템에 대한 인코히어런트 PSF(point spread function)을 전개하기 위해서 한 점에 대한 동축 홀로그램이 기록되는 것을 생각하자. 변형 삼각간섭계를 이용하여 기록된 점광원 홀로그램은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} I(x, y, z_1) &= C^2 + C^2 \cos \phi(x, y) \\ &= C^2 + \frac{1}{2} C^2 \exp[i\phi(x, y)] \\ &\quad + \frac{1}{2} C^2 \exp[-i\phi(x, y)] \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 첫 번째 항은 초점거리가 무한대인 평면 렌즈를 나타내고, 두 번째와 세 번째 항은 각각 초점거리가 $f = z_1$ 인 음과 양의 렌즈에 대응한다. 음과 양의 렌즈는 복원시 점 물체의 허상과 실상을 만들어낸다.

그러므로 배율이 1인 경우에 식 (2)를 인코히어런트 홀로그래픽 이미징 시스템에 대한 인코히어런트 PSF로 간주할 수 있다. 일반적으로 홀로그램을 기록하고 복원하는 과정에서 홀로그램의 크기는 임의적으로 변하게 되므로 PSF를 구할 때, 이를 고려하여야 한다. 배율을 고려하여 실상에 대한 PSF를 구하면, 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} I(x, y, z_1) &= C^2 + C^2 \cos \left\{ \frac{k}{2z_1} \left[\left(\frac{x}{M} - x_1 \right)^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(\frac{y}{M} - y_1 \right)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, M은 기록과 디스플레이 과정에서 발생하는 FZP의 임의의 배율을 설명하기 위해 포함되었다.

2.3. 변형 삼각간섭계의 횡축과 종축방향의 해상도

이 절에서 유도되는 변형 삼각 간섭계의 이론적인 해상도는 홀로그램의 기록과 디스플레이 과정에서 발생하는 FZP의 배율이 1이라고 가정하고 구한 결과들이다.

Rayleigh의 조건(criterion)[11]은 어떤 한점의 회절패턴의 중심의 최대치가 다른 점의 회절패턴의 첫 번째의 최소값과 일치한다면 두 점은 식별가능하다는 것이다. Rayleigh 조건으로부터 식 (4)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$(x_0)_{\min} \approx 1.22\lambda \left(\frac{f}{d} \right) \quad (4)$$

여기서 $(x_0)_{\min}$ 은 두 점이 분해될 수 있는 최소한의 거리이며, f와 d는 각각 렌즈(또는 aperture)의 초점거리와 직경을 나타낸다. 식 (1)의 실수부와 허수부는 FZP를 표현하는 것이며, FZP는 렌즈와 같은 역할을 한다. 따라서, 식 (1)의 FZP는 식 (5)와 같은 초점거리를 가진다.

$$f = z_1 = \left| \frac{z_0}{\alpha^2 - \beta^2} \right| \quad (5)$$

그리고 FZP에서의 fringe의 개수[12]는 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} F &= \frac{R^2}{\lambda f} = \frac{R^2}{\lambda z_0} |\alpha^2 - \beta^2| \\ &= \frac{R^2}{\lambda z_0} \left| \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right| \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, R은 FZP가 기록되어 있는 홀로그램의 반경을 나타낸다. 식 (5)를 식 (4)에 대입하면 변형 삼각간섭계의 횡축방향의 분해가능한 최소한의 거리는 식 (7)과 같이 주어진다.

$$(x_0)_{\min} \approx 1.22\lambda \left| \frac{z_0}{2R(\alpha^2 - \beta^2)} \right| \quad (7)$$

식 (6)을 이용하여 식 (7)을 더 간단히 표현하면

식 (8)과 같이 된다.

$$(x_0)_{\min} \approx 0.61 \frac{R}{F} \quad (8)$$

비슷한 방법으로 종축방향의 해상도를 구하면 다음 식과 같이 유도된다.

$$(z_0)_{\min} \approx \frac{2R^2}{\lambda F^2} \quad (9)$$

따라서, 식 (8)과 (9)의 역수는 변형 삼각간섭계에 있어서 각각 횡축방향과 종축방향의 Rayleigh해상도이다.

식 (8)과 식 (9)에 따르면, 변형 삼각간섭계의 횡축방향과 종축방향의 해상도는 배율($\alpha = -f_1/f_2$)과 홀로그램의 크기가 증가함에 따라 증가하는 반면에, 파장이 증가하면 감소하며, 종축방향의 해상도는 횡축방향의 해상도에 비해서 훨씬 나쁘다는 것을 알 수 있다. 또한, 인코히어런트 삼각간섭계에 의해서 분해될 수 있는 3차원 물체의 분해가능한 최소한의 거리는 홀로그램의 크기에 반비례한다는 것을 알 수 있다.

3. 변형 삼각 간섭계를 이용한 거리계측

변형 삼각간섭계를 이용하여 홀로그램을 기록한 후 동일한 파장으로 홀로그램을 복원할 경우에 있어서 복원된 영상의 복원평면은 식 (5)에 의해서 결정된다.

식 (5)에서 z_0 는 그림 1에서 점광원에서 입력면까지의 거리이며 f 는 복원된 점광원의 초점거리를 나타내게 된다. 복원된 영상의 초점거리는 수치해석에 의해 또는 광학적인 복원에 의해 결정될 수 있다. 따라서, 식 (5)에서 알 수 있는 바와 같이 복원된 영상의 초점거리가 결정되면 입력면에서 점광원까지의 거리가 역으로 계산될 수 있다는 것을 알 수 있다. 복원영상의 초점거리는 Fresnel-Kirchhoff적분[13]을 이용하여 얻을 수 있다. 물체의 점광원에서 입력면까지의 거리 z_0 는 다음식과 같이 표현될 수 있다.

$$z_0 = z_1 | \alpha^2 - \beta^2 | \quad (10)$$

복원되는 점광원의 초점거리는 변형 삼각간섭계를 구성하는 데 이용되는 두 렌즈의 초점거리의 비 즉, $\alpha = -f_1/f_2 = 1/\beta$ 의 비에 따라서 커지거나 작아질 수 있으며, 이것은 홀로그램에서 복원된 영상을 확대하거나 축소시키는 역할을 하므로 현미경에도 활용될 소지를 가지고 있다.

4. 실험 및 결과 분석

4.1. 거리계측 실험

변형 삼각간섭계를 이용한 거리계측의 가능성을 입증하기 위해서 깊이감이 있는 두 점광원에 대한 홀로그램을 기록하고 이를 복원하였다. 사용된 점광원의 경우에 왼쪽 점광원에서 입력면까지의 거리가 1,275[mm], 두 점광원간의 깊이감은 450[mm]였으며, 두 점광원간의 수평거리 간격은 3[mm]였다. 이 물체에 대해 변형 삼각간섭계를 이용하여 얻은 복소홀로그램은 그림 2와 같다.

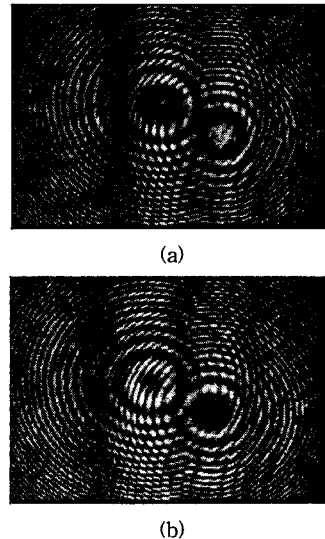
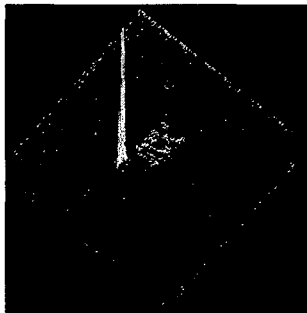
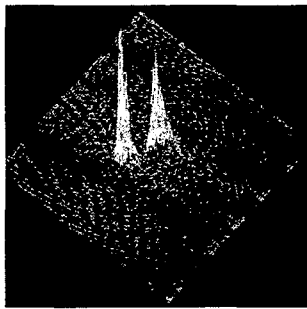


그림 2. 깊이감이 있는 두 점광원에 대한 복소홀로그램 (a) 복소홀로그램의 실수부 (b) 허수부
Fig. 2. Complex hologram of three-dimensional objects (a) real part and (b) imaginary parts of complex holograms

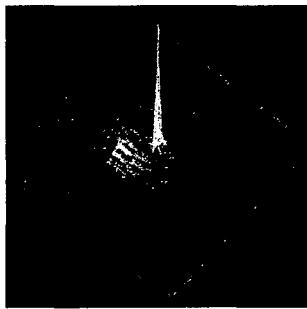
두 점광원을 기록한 후 복소홀로그램을 얻고 이를 수치적으로 복원한 결과는 그림 3과 같다. 그림 3은 깊이감이 있는 두 개의 점광원을 Fresnel-Kirchhoff 적분을 이용하여 거리에 따라 복원한 것이며, 그림 3 (a)는 왼쪽 점광원의 초점 평면에서의 복원영상을 보



(a)



(b)



(c)

그림 3. 깊이감이 45 [cm]인 두 점광원의 복소홀로그램에서 수치적으로 복원된 영상들. (a) 왼쪽 점광원의 초점면, (b) 두 점광원의 중간면, 그리고 (c) 오른쪽 점광원의 초점면에서 복원된 영상.

Fig. 3. Intensity profile of numerically reconstructed images from the complex hologram of two point sources with depth by varying the focal length

여주는 결과인데, 이 그림에서 오른쪽 점광원은 왼쪽 점광원과 거의 인접할 수 없다는 것을 알 수 있다. 그림 3 (b)는 왼쪽과 오른쪽 점광원의 초점 평면의 중간지점에서의 복원영상을 나타낸다. 그림 3 (c)는 오른쪽 점광원의 초점 평면에서 복원한 영상에 대한 결과이며, 여기서도 깊이감에 의한 효과 때문에 왼쪽 점광원을 거의 인식할 수 없었다. 이러한 결과를 통해 변형 삼각간섭계를 이용하여 3차원 영상이나 거리가 다른 점광원을 홀로그램으로 기록한 후 이를 수치적으로 또는 광학적으로 복원함으로써 거리계측을 할 수 있다는 것을 알 수가 있다.

4.2. 3차원 영상의 기록과 복원결과

변형 삼각간섭계의 이론적 분석결과를 실험적으로 검증하기 위하여 3차원 영상에 대한 인코더러턴트 홀로그램의 합성 및 복원에 대한 실험을 변형 삼각간섭계에 대해 수행하고 그 결과를 분석하였다. 실험에서 사용된 광원의 파장은 532.8[nm]이고, 점광원에서 입력면까지의 거리는 1,000[mm], 삼각간섭계에 사용된 렌즈 L1, L2의 초점거리는 각각 $f_1 = 150[mm]$, $f_2 = 250[mm]$ 이며, 변형 삼각간섭계에 사용된 파장판은 $\lambda/4$ plate이다.

변형 삼각간섭계를 이용하여 3차원 영상에 대한 홀로그램을 생성하기 위해 사용된 광원은 Coherent (모델명 OPSS532)사의 제품으로 $\lambda=532.8[nm]$ 인 Nd-YAG 레이저를 사용하였으며 출력은 100[mW]이다. 코히어런트 광원인 레이저를 회전하는 확산판을 통과시켜 인코더러턴트 광원으로 변환시켰다. 그림 4는 기록을 위해서 사용된 3차원 영상이며, 거리가 다른 두 원 모양의 영상을 입력 영상으로 만들었다. 왼쪽 영상은 오른쪽 영상보다 50[mm] 뒤에 놓여졌다.

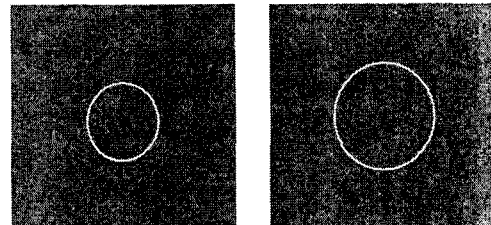


그림 4. 입력영상
Fig. 4. Input images

그리고, 그림 5는 변형 삼각간섭계를 이용하여 기록된 인코히어런트 홀로그래프의 실수부 및 허수부를 나타낸다.

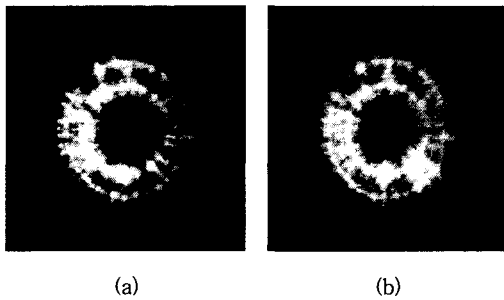
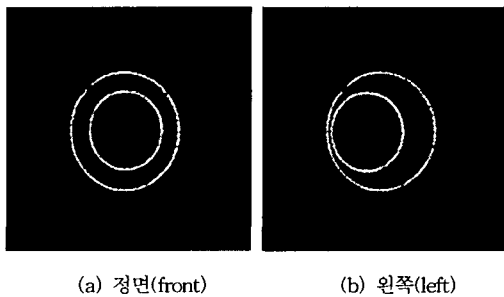


그림 5. 인코히어런트 복소 홀로그래프
(a) 실수부 (b) 허수부
Fig. 5. Incoherent complex hologram
(a) real part (b) imaginary part

그림 6은 Fresnel-Kirchhoff적분에 의해 여러 가지 각도에서 복원된 그림을 보여주는데, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 보는 각도에 따라서 형태가 달라지는 것을 알 수 있다. 이는 원래의 영상이 가지고 있는 위치와 깊이감에 대한 정보가 인코히어런트 홀로그래프에 저장되고 영상의 복원시에 위치와 깊이감에 대한 정보도 동시에 복원되므로 보는 각도에 따라서 다른 영상을 보여주는 것이다. 이를 통해 변형 삼각간섭계가 위치와 깊이감에 대한 정보를 저장하고 복원하는 역할을 한다는 것을 알 수 있으며, 이런 특징을 이용하여 거리계측이나 3차원 영상 디스플레이에 응용이 가능하리라고 생각한다.



(a) 정면(front) (b) 왼쪽(left)

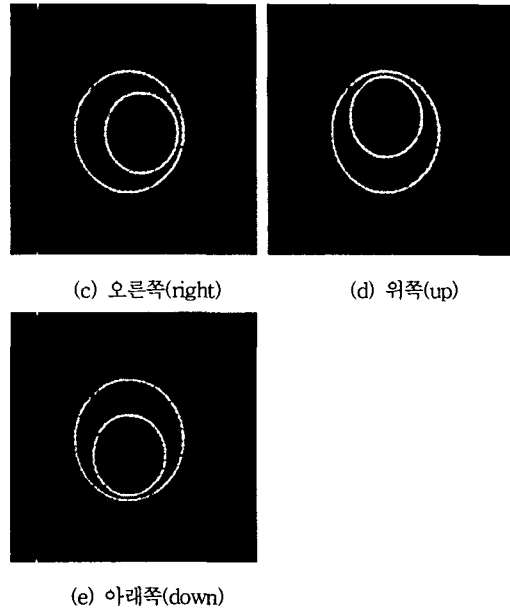


그림 6. 복원 영상
Fig. 6. Reconstructed images

5. 결 론

변형 삼각간섭계의 공간적인 해상도와 거리계측의 가능성을 이론적으로 유도하였으며 또한, 변형 삼각간섭계를 이용하여 거리계측을 할 수 있음을 입증하기 위하여 공간적으로 다른 깊이감을 가진 점광원들에 대한 인코히어런트 홀로그래프를 생성하고 이를 수치적으로 복원한 결과를 제시하였다. 그리고 제안된 방법을 이용하여 3차원 영상에 대한 홀로그래프를 기록하고 여러 가지 각도에서 영상을 재현함으로써 3차원 영상 디스플레이로서의 가능성도 입증하였다.

이 연구는 과기부·과학재단지정 2001년도 조선대학교 레이저응용 신기술 개발 연구센터 지원 연구비에 의해 지원되었으며 이에 감사 드립니다.

References

- (1) D. Gabor, "A new microscopic principle," Nature, Vol. 161, pp. 777-778, 1948.
- (2) A. W. Lohmann, "Wavefront reconstruction for incoherent objects," J. Opt. Soc. Am. Vol. 55, pp. 1555-1556, 1965.
- (3) G. W. Stroke and R. C. Restrick III, "Holography with spatially noncoherent light," Appl. Phys. Lett. Vol. 7, pp. 229-231, 1965.

- [4] H. R. Worthington, "Production of holograms with incoherent illumination," J. Opt. Soc. Am. Vol. 56, pp. 1397-1398, 1966.
- [5] G. Cochran, "New method of making Fresnel transforms with incoherent light," J. Opt. Soc. Am. Vol. 56, pp. 1513-1517, 1966.
- [6] P. J. Peters, "Incoherent holograms with mercury light source," Appl. Phys. Lett. Vol. 8, pp. 209-210, 1966.
- [7] G. Sirat and D. Psaltis, "Conoscopic holography," Opt. Lett. Vol. 10, pp. 4-6, 1985.
- [8] L. M. Mugnier and G. Y. Sirat, "On-axis conoscopic holography without a conjugate image," Opt. Lett. Vol. 17, No. 4, pp. 294-296, 1992.
- [9] 김수길, 김은수, 이혁, 이병호, "바이어스와 공액영상이 제거된 인코히어런트 삼각 홀로그래피에 대한 이론적 연구," 대한전자공학회논문지, 제33권 A편, 제10호, pp. 144-151, 1996.
- [10] S.-G. Kim, B. Lee, and E.-S. 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.
- [11] P. P. Banerjee and T.-C. Poon, Principles of Applied Optics, R. D. Irwin, Boston, 1991.
- [12] G. Y. Sirat, "Conoscopic holography. I. Basic principles and physical basis," J. Opt. Soc. Am. A Vol. 9, no. 1, pp. 70-83, 1992.
- [13] U. Schnars and W. Jüptner, "Direct recording of holograms by CCD target and numerical reconstruction," Appl. Opt. Vol. 33, no. 2, pp. 179-181, 1994.

◇ 저자소개 ◇

김수길 (金秀吉)

1965년 8월 2일생. 1988년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997~1997년 서울대 공학연구소 특별연구원. 현재 호서대 전기정보통신공학부 조교수.

황보승 (皇甫勝)

1964년 5월 28일생. 1983.3~1987.2 서울대학교 전기공학과(학사). 1987.3~1989.2 서울대학교 전기공학과(석사). 1989.1~1991.6 LG산전(주) 연구원. 1993.3~1998.2 서울대학교 전기공학부(박사). 1996.11~1998.2 기초 전력 공학 공동 연구소 전임 연구원. 1998.3~현재 호남대학교 조교수.