

# 랜덤 위상변조가 가미된 이진 진폭 데이터 영상의

## 홀로그래픽 저장

오용석 · 신동학 · 장주석

부경대학교

### Holographic storage of random-phase-modulation-added

### binary amplitude data

Yong-seok Oh · Dong-hak Shin · Ju-seog Jang

Pukyong National University

E-mail : jsjang@pknu.ac.kr

#### 요 약

본 논문에서는 효율적인 홀로그래픽 데이터 저장을 위해, 세기변조를 통한 2차원 이진 데이터를 표현함에 있어서 가변적이고 이산적인 랜덤 위상마스크를 함께 사용하는 방법을 연구했다. 가변 위상 마스크는 twisted nematic LCD를 사용해 구현했다.

#### ABSTRACT

We studied a method to use a variable discrete random phase mask in 2-D binary data representation for efficient holographic data storage. The variable phase mask is realized by use of a twisted nematic liquid crystal display.

#### I. 서 론

디지털 데이터를 홀로그램으로 저장할 경우에 보통 Fourier면 홀로그램방식을 많이 사용한다. Fourier면 홀로그램방식은 기록저장밀도를 높일 수 있다는 장점이 있지만 강한 dc성분 때문에 다중화횟수가 적어진다는 단점이 있다. 그래서, dc 성분을 완화시켜 매질의 기록면적의 사용효율을 높이려는 많은 연구들이 있었다. 이들 중 하나의 방식이 이산적 랜덤위상마스크를 사용하는 방법이다[1]. 이 경우에 특정패턴에서 crosstalk이 많이 발생하게 되는데[2] 이를 제거하기 위해선 랜덤위상마스크의 위상을 가변할 수 있어야 한다. 하지만 일반적으로 마스크형태의 랜덤위상은 위상패턴이 고정되어 있어 위상코드를 바꿔줄 수 없다. 이에 본 논문에서는 twisted nematic 액정 디스플레이(TNLC)를 사용해 가변적으로 이산적 랜덤위상변조를 할 수 있는 방법을 제안하며 이를 실험적으로 구현하였다.

#### II. $0-\pi$ 위상변조 생성방법

TNLC의 광학 특성은 보통 Jones 행렬로 기술된다[3,4,5]. 본 실험에 사용된 Kopin 사의 LCD는 액정의 c 축이 LCD 패널에 평행하고 뒤틀림 각  $\phi$ 가  $-\pi/2$ 이다. 실험편이상 LCD 양쪽 표면에 붙어있는 편광판은 모두 제거되었다. 따라서 액정에 대한 Jones 행렬은

$$M_{\text{LCD}} = \begin{bmatrix} \frac{\pi}{2} \frac{\sin X}{X} & \cos X + i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} \\ -\cos X + i \frac{\Gamma}{2} \frac{\sin X}{X} & \frac{\pi}{2} \frac{\sin X}{X} \end{bmatrix} \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서  $X = \sqrt{(\pi/2)^2 + (\Gamma/2)^2}$  및  $\Gamma = 2\pi(n_e - n_o)d/\lambda$ 로 주어지며  $d$ 는 액정의 두께,  $\lambda$ 는 빛의 파장, 그리고  $n_e$ 와  $n_o$ 는 각각 액정의 이상(extraordinary) 및 정상(ordinary) 굴

절물이다. LCD의 셀에 가해지는 전압이 high(0, black, 또는 off) 상태일 때와 low(1, white, 또는 on) 상태일 경우에 LCD 셀의 Jones 행렬은 각각 다음과 같다.

$$M_{\text{high}} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_{\text{low}} \approx \begin{bmatrix} 0 & e^{i\Gamma/2} \\ -e^{-i\Gamma/2} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

만약, 액정에 입사되는 빔의 편광을

$$V_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이라 하면 off 화소와 on 화소를 통과한 각 빔의 Jones 벡터는 각각

$$V_{\text{high}} = M_{\text{high}} V_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.a)$$

와

$$V_{\text{low}} = M_{\text{low}} V_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{-i(\Gamma/2 \cdot \pi)} \quad (4.b)$$

로 표현될 수 있다.

그림 1과 같이  $\lambda/4$  지연기(quarter wave plate)와 편광판(analyzer)을 LCD 뒤에 놔둔다. 이때,  $\lambda/4$  지연기의 느린 축(slow axis)은  $x$ 축으로부터 각도  $\pi/4$ 만큼 회전되어 있고 편광판은 투과축이  $x$  축으로부터 임의의 각도  $\phi_a$ 만큼 회전되어 있다. 최종 출력은  $(x, y)$ 축에서 편광판이 돌아간 각도  $\phi_a$ 만큼 회전된  $(x', y')$ 축에서 관측한다.  $\lambda/4$  지연기와 편광판, 좌표변환(회전)의 Jones 행렬은 각각

$$M_w = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.a)$$

$$M_a(\phi_a) = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_a & \cos \phi_a \sin \phi_a \\ \cos \phi_a \sin \phi_a & \sin^2 \phi_a \end{bmatrix}, \quad (5.b)$$

$$R(\phi_a) = \begin{bmatrix} \cos \phi_a & \sin \phi_a \\ -\sin \phi_a & \cos \phi_a \end{bmatrix} \quad (5.c)$$

으로 나타내어 진다. 식 (5.b)과 (5.c)는

$$M_a'(\phi_a) \equiv R(\phi_a) M_a(\phi_a) = \begin{bmatrix} \cos \phi_a & \sin \phi_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

와 같이 간략하게 표현될 수 있다. 따라서, 편광판을 통과한 두 빔의 Jones 벡터는 다음과 같다.

$$V_{\text{out, high}} = M_a'(\phi_a) M_w V_{\text{high}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \exp(-i\phi_a) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.a)$$

$$V_{\text{out, low}} = M_a'(\phi_a) M_w V_{\text{low}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \exp[-i(\Gamma/2 - \pi/2 - \phi_a)] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.b)$$

식 (7.a)과 식 (7.b)에서 두 빔의 위상지연의 차  $\Delta\phi_{\text{del}}$ 를 구하면

$$\Delta\phi_{\text{del}} = \frac{\Gamma}{2} - \frac{\pi}{2} - 2\phi_a \quad (8)$$

가 된다. 그러므로, 편광판의 회전각  $\phi_a$ 를 적절히 조정하면 두 빔의 위상차가  $\pi$ 의 홀수배, 즉

$$\Delta\phi_{\text{del}} = (2k+1)\pi, \quad k \text{는 정수.} \quad (9)$$

가 되어  $0 - \pi$  위상변조를 할 수 있게 된다. 물론  $\phi_a$ 를 바꾸더라도 식 (7.a)과 (7.b)로 표현되는 두 빔의 세기는 바뀌지 않는다.

실제 실험에서는  $\phi_a \approx 86^\circ (0.478\pi \text{ rad})$ 일 때 dc 항이 최소가 되었다. 이 측정값을 식 (9)에 대입하면

$$\Gamma/2 = (2k+1)\pi + \pi/2 + 0.956\pi \quad (10)$$

이 구해지고 식 (10)을 식 (9)에 대입하면

$$\Delta\phi_{\text{del}} = (2k+1)\pi - 2(\phi_a - 0.478\pi) \quad (11)$$

이 된다. 이로부터  $\phi_a$ 에 따른 High와 Low 상태의 픽셀을 통과한 두 빔 사이의 위상지연을 알 수 있다.  $\phi_a = 0.478\pi$ 인 경우의  $0 - \pi$  위상 변조된 LCD의 패턴과 이 패턴의 Fourier 스펙트럼을 그림 2에 나타내었다.

### III. LCD 입력빔 세기에 따른 $0 - \pi$ 위상변조 특성변화

일반적으로  $0 - \pi$  위상변조를 특정한 광학시스템에 적용할 경우, 시스템 특성상 LCD에 입력되는 빔의 세기에 제한이 있거나 시스템별로 서로 다를 수 있다. 그런데, TNLCD를 사용한  $0 - \pi$  위상변조의 특성은 통과하는 빔의 세기에 관계없이 일정한가? 이것을 알아보기 위해, 그림 1과 같은 실험구성을 한 뒤에 그림 2와 같은 균일한 체크무늬패턴을 LCD에 입력시켰다. 그리고, LCD를 통과하는 빔의 세기를 1, 15, 30, 45, 60, 180 mW/cm<sup>2</sup>로 바꿔가면서 그 각각의 Fourier 면 영상을 비교해 보았다.

그림 3은 1 mW/cm<sup>2</sup>인 빔을 기준으로  $0 - \pi$  위상

변조를 한 상태에서 빔 세기만을 바꿔가면서 찍은 Fourier 스펙트럼이다. 이 때,  $\lambda/4$  지연기와 편광기의 회전각은 앞 장에서 언급한 값과 같다.

그림 4는 각각의 빔 세기 경우마다 dc 항이 최소가 되도록  $\lambda/4$  지연기와 편광기의 회전각을 조절했을 때의 Fourier 스펙트럼이다. 그림 3과 그림 4에서 빔 세기가 증가할수록 상대적으로 dc 항으로의 에너지 집중이 심해진다는 것을 알 수 있다. 따라서, 실제로 TNLCD를 이용한  $0-\pi$  위상변조를 광학시스템에 적용할 경우, 특히 높은 빔 세기가 필요한 시스템에서는 빔 세기와 dc 항 사이에 적절한 trade-off이 필요하며 또한 추가적인  $\lambda/4$  지연기와 편광기의 조절이 필요하다.

#### IV. 실험 및 결과

홀로그래픽 저장을 위한 실험 구성도는 그림 5와 같다. 실험에 사용된 광원은 514 nm 아르곤 이온 레이저이고, 기록매질은 DuPont사의 두께 100  $\mu\text{m}$ 인 포토폴리머이다. 가변 위상변조기로 사용하기 위한 LCD는 Kopin 320 $\times$ 240, 15  $\mu\text{m}$  이고 액정 앞뒤의 편광기는 제거된 상태이다. LCD에 입력되는 랜덤 위상코드패턴은 Hadamard 코드를 생성시킨 다음에 무작위적으로 뒤섞는 방법을 사용해 만들었다[6]. 그리고 매질에 저장되는 이진 정보는 glass mask의 랜덤 패턴을 사용하였고 mask의 하나의 화소 크기는 40  $\mu\text{m}$ 였다. 위상변조기인 LCD와 glass mask 패턴 사이에 픽셀 매칭이 되도록 해서 하나의 bit를 나타내는 블록의 크기는 glass mask의 3배인 120  $\mu\text{m}$ 가 되도록 하였다. 그러면 하나의 LCD 화소가 9개의 glass mask 화소에 대응된다.

랜덤위상마스크의 효과를 조사하기 위해 각 다중화방식을 사용한 다중홀로그램 기록실험을 수행하였다. 기준빔과 신호빔사이의 각은  $45^\circ$  이고, 8 개의 홀로그램을 기록했다. 이때 각 홀로그램사이의 기록각도는  $2.4^\circ$  이다. 그리고, 각각의 홀로그램은 8개의 서로 다른 랜덤위상코드패턴을 사용했고, 기록매질의 dynamic range를 균등하게 사용하기 위해 노출시간을 조절해 기록했다[7]. 회절효율은 약 0.0048~0.0075(%) 이다.

그림 6은 랜덤위상변조를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대한 Fourier 스펙트럼을 보여준다. 랜덤위상변조를 사용할 경우 Fourier면에서 dc 성분이 현저히 줄어들음을 알 수 있다.

그림 7은 랜덤위상변조를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 8개의 다중 홀로그램으로부터 재생된 영상 중 마지막 영상을 나타낸다. 두 경우에 대해 노출시간을 비롯한 모든 홀로그램기록조건은 정확히 동일하다. 랜덤위상변조를 사용하면 dc 성분의 세기가 많이 감소되어 기록면적전체를 비교적 효율적으로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 반면, 랜덤위상변조를 하지 않은 경우엔 높은 dc

성분으로 인해 기록매질의 dynamic range를 급격히 소모시킨다. 그러므로, 나중에 기록되는 영상일수록 edge-enhancement 효과가 크게 나타나서 재생되는 영상의 질이 떨어진다.

#### V. 결 론

이상의 실험에서 TNLCD를 사용함으로써 랜덤위상마스크를 대체할 수 있고, 또 가변적으로 위상코드패턴을 바꿀 수 있음을 보였다. 그리고 LCD의 입력빔세기에 따른  $0-\pi$  위상변조특성도 살펴보았다. 마지막으로, 랜덤위상변조를 할 경우에 dc 성분이 감소되고 다중화횟수가 높아져 단위면적당 기록밀도를 높일 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, R. K. Grygier, J. Al Hoffnagle, C. M. Jefferson, E. Oesterschulze, R. M. Shelby, G. T. Sincerbox, and M. Quintanilla, "Effects of multilevel phase masks on interpixel cross talk in digital holographic storage," *Appl. Opt.*, Vol. 36, No. 14, pp. 3107-3115, 1997.
- [2] J. Hong, I. McMichael, and J. Ma, "Influence of phase masks on cross talk in holographic memory," *Opt. Lett.*, Vol. 21, No. 20, pp. 1694-1696, 1996.
- [3] F. Mok, J. Diep, H. K. Liu, and D. Psaltis, "Real-time computer-generated hologram by means of liquid-crystal television spatial light modulator," *Opt. Lett.*, Vol. 11, No. 11, pp. 748-750, 1986.
- [4] A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*, Chap. 5, Wiley, New York, 1984.
- [5] P. Yeh and C. Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays*, Chap. 4, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1999.
- [6] X. Yang, Y. Xu, and Z. Wen, "Generation of hadamard matrices for phase-code-multiplexed holographic memories," *Opt. Lett.*, Vol. 21, No. 14, pp. 1067-1069
- [7] A. Pu, K. Curtis, and D. Psaltis, "Exposure schedule for multiplexing holograms in photopolymer films," *Opt. Eng.*, Vol. 35, No. 10, pp. 2824-2829, 1996.

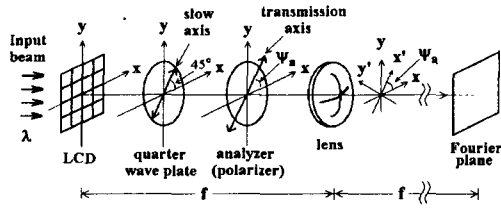


그림 1. 0- $\pi$  위상변조를 위한 광학적 구성도.

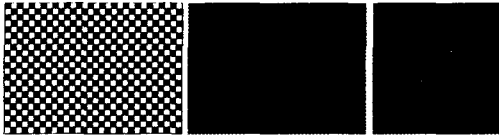


그림 2. 2진 위상변조를 위한 LCD 입력패턴(왼쪽). CCD로 감지한 실제 SLM의 영상(중간). Fourier 면에서의 스펙트럼 세기분포.

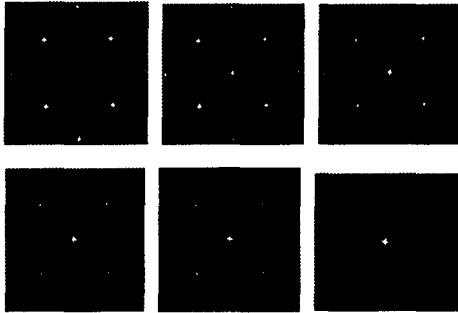


그림 3. 1  $\text{mW}/\text{cm}^2$  빔을 기준으로 0- $\pi$  위상변조를 한 상태에서 빔 세기만을 변화시키면서 본 Fourier 스펙트럼. 위, 왼쪽부터 1, 15, 30, 45, 60, 180  $\text{mW}/\text{cm}^2$  인 경우.

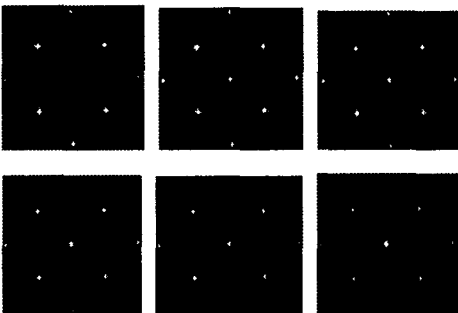


그림 4. 각 세기별로 dc항이 최소가 되도록 추가적으로 조절한 경우의 Fourier 스펙트럼. 위, 왼쪽부터 1, 15, 30, 45, 60, 180  $\text{mW}/\text{cm}^2$  인 경우.

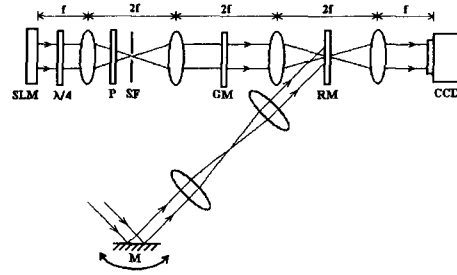


그림 5. 실험구성도.  $\lambda/4$ : quarter wave plate, P: polarizer, GM: glass mask, M: mirror, RM: recording material

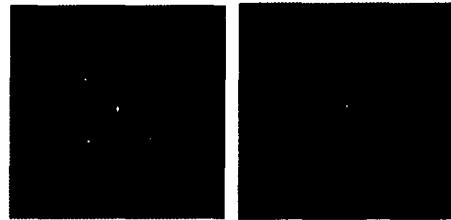


그림 6. Glass Mask의 균일한 체크무늬패턴의 Fourier 면 영상. 랜덤 위상변조를 사용하지 않은 경우(왼쪽). 랜덤 위상변조를 사용한 경우(오른쪽).

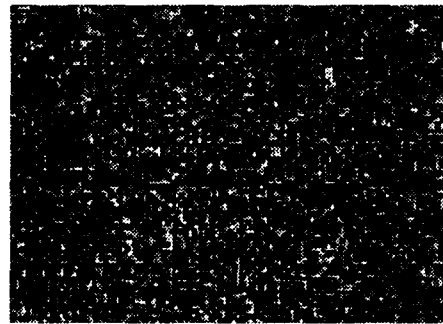


그림 7. 재생된 8번째 홀로그램 영상. 랜덤 위상변조를 사용하지 않은 경우(위). 랜덤 위상변조를 추가로 사용한 경우(아래).