

---

# 랜덤 위상변조가 가미된 이진 진폭 데이터 영상의 홀로그래픽 저장 특성

오용석\*, 신동학\*, 장주석\*

Characteristics of holographic storage of random - phase - modulation - added  
binary amplitude data

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

## 요 약

본 논문에서는 뒤틀린 니매틱 액정디스플레이를 가변적인 위상마스크로 사용하여 기존의 2진 데이터 영상에 위상변조를 추가하는 방법을 제안한다. 이를 위해 액정디스플레이의 위상변조특성을 이론 및 실험적으로 조사하였고, 입사빔 세기가 매우 커지면 위상변조 특성이 변하는 현상이 존재함을 실험적으로 보였다. 위상변조가 가미된 2진 데이터 영상의 저장특성을 실험적으로 조사하기 위해 여덟 장의 홀로그램을 각다증을 사용해서 DuPont 사의 광폴리머의 한 지점에 기록하였다. 위상변조를 사용하여 Fourier 면 홀로그램을 기록할 경우, 기존의 진폭변조방식만 사용하는 경우에 비해 빔세기 균일도를 높일 수 있어서, 같은 조건에서 더 많은 홀로그램을 기록할 수 있음을 보였다.

## ABSTRACT

We propose a method to add phase - modulation to binary amplitude data pages using a twisted-nematic liquid crystal display as a dynamic phase mask. For this, the phase modulation characteristics of the display were examined both theoretically and experimentally, and an unexpected abnormal phenomenon was found experimentally in which the modulation property changed as the incident beam intensity increased. To investigate the characteristics of holographically storing the binary data images, eight pages of holograms were stored at one spot of 100  $\mu\text{m}$  - thick DuPont's photopolymer with angle multiplexing. When phase - modulation - added pages were stored at the Fourier plane, the uniformity of the signal beam at the plane was improved, and thus more holograms can be recorded with our method, compared with the conventional case of using only binary amplitude modulation under the same condition.

## 키워드

홀로그램, 이진데이터 저장, 이진위상변조, 액정디스플레이

---

\*부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부

접수일자

### 1. 서 론

기존 하드디스크나 콤팩트 디스크는 2차원 평면에 한 비트씩 정보를 저장하고 읽어낸다. 홀로그래피 메모리 시스템은 부피를 가진 기록매질의 한 지점에 여러 개의 이진 데이터 페이지를 중첩해서, 즉 다중화 시켜서 기록하고 페이지 단위로 읽어내기 때문에 궁극적으로 저장용량 및 기록과 재생속도를 훨씬 높일 수 있다 [1-9].

홀로그래프는 원 영상의 이미지 면이나 푸리에 면에 기록할 수 있다. 기록매질이 비교적 얇은 디스크형 홀로그래피 메모리 시스템에서는 신호 빔을 집속하여 작은 공간에 홀로그래프를 저장하는 것이, 즉 정확한 Fourier 면 홀로그래프를 기록하는 것이 면적 저장밀도 측면에서 매우 유리하다 [9]. 그러나, 이 경우에는 강한 dc성분 때문에 기록 면에서 빔 세기분포가 매우 불균일해지고, 따라서 저장매질을 효율적으로 사용할 수가 없으므로 다중화횟수를 충분히 높일 수 없는 단점이 있다. 그래서, 신호빔의 dc 성분을 감소시켜 매질을 효율적으로 사용하려는 많은 연구들이 있었다. 이들 중 하나의 방식이 이산적인 랜덤 위상마스크를 사용하는 방법이다 [10]. 하지만 이 방법을 쓰면 특정한 패턴에서 crosstalk이 많이 발생한다 [11]. 이를 개선하기 위해선 랜덤 위상마스크의 특정위상패턴을 바꿔줄 수 있어야 한다.

본 논문에서는 뒤틀린 니매틱 액정디스플레이(twisted-nematic liquid crystal display: TNLCD)를 사용해서 가변적으로 이산적인 랜덤 위상변조를 할 수 있는 방법을 제안하며 이를 실험적으로 구현하였다. 그리고, LCD에 입력되는 빔 세기에 따른 이산적인 위상변조 특성과 랜덤 위상변조를 통한 이진 진폭 데이터의 기록 특성을 조사하였다.

### II. 0- $\pi$ 위상변조 생성방법

TNLCD의 광학 특성은 보통 Jones 행렬로 기술된다 [12-14]. 본 실험에 사용된 Kopin사의

LCD는 액정의 c 축이 LCD 판넬에 평행하고 뒤틀림각  $\phi$ 가  $-\pi/2$ 이다. 실험편의상 LCD 양쪽 표면에 붙어있는 편광판은 모두 제거되었다. 따라서 액정에 대한 Jones 행렬은

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

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) 굴절률이다. LCD 픽셀에 교류 전압을 걸면, 전기장 때문에 LCD 판넬에 평행하게 있던 액정 분자들이 판넬에 수직 방향으로 회전한다. 회전되는 각도  $\theta$ 는 LCD 픽셀에 인가되는 교류전압의 rms 값, 즉  $v_{rms}$ 의 함수이다. 즉,  $v_{rms}$ 가 어떤 임계 전압  $v_c$ 보다 작으면 (Low 상태)  $\theta = 0$ 이 되고,  $v_{rms}$ 가  $v_c$  이상으로 점점 커지면  $\theta$ 도 증가하여 마침내  $\pi/2$ 에 수렴한다.  $v_{rms} \gg v_c$ 이면 [high (0, black, 또는 off) 상태]  $\theta \approx \pi/2$ 이고,  $\Gamma = 0$ 이 되므로 입사되는 평면파 빔에 대해 복굴절 효과는 없다. 따라서, 식 (1)은

$$M_{high} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

로 근사화된다. 반면에 LCD의 셀에 전압이 가해 지지 않으면 [low (1, white, 또는 on) 상태] 보통  $\Gamma \gg |\phi| = \pi/2$ 이므로 [12-14] 식(1)은 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$M_{low} \approx \begin{bmatrix} 0 & e^{i\Gamma/2} \\ -e^{-i\Gamma/2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

만약, 액정에 입사되는 빔의 편광을

$$V_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4) \quad M_a'(\phi_a) \equiv R(\phi_a) M_a(\phi_a) = \begin{bmatrix} \cos \phi_a & \sin \phi_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이러 하면, off 화소와 on 화소를 통과한 각 빔의 Jones 벡터는 각각

$$V_{high} = M_{high} V_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5.a)$$

$$V_{low} = M_{low} V_{in} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{-i(\Gamma/2 - \pi)} \quad (5.b)$$

가 된다.

위상변조를 위해서, 그림 1과 같이 1/4 파장 지연기(quarter wave plate)와 편광판(analyzer)을 LCD 뒤에 놔둔다. 이 때, 1/4 파장 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  $(x, y)$ 좌표에서 편광판이 돌아간 각도  $\phi_a$ 만큼 회전된  $(x', y')$ 좌표에서 관측한다. 1/4 파장 지연기, 편광판, 그리고 좌표회전의 Jones 행렬은 각각

$$M_w = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.a)$$

$$M_a(\phi_a) = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_a & \cos \phi_a \sin \phi_a \\ \cos \phi_a \sin \phi_a & \sin^2 \phi_a \end{bmatrix}, \quad (6.b)$$

$$R(\phi_a) = \begin{bmatrix} \cos \phi_a & \sin \phi_a \\ -\sin \phi_a & \cos \phi_a \end{bmatrix} \quad (6.c)$$

으로 나타내어진다. 식 (6.b)와 (6.c)는

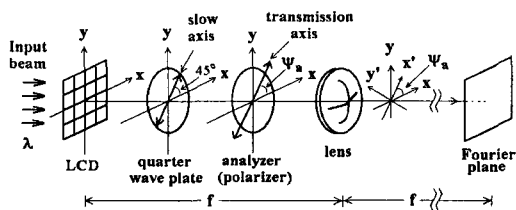


그림 1.  $0 - \pi$  위상변조를 위한 광학적 구성도.

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

$$V_{out, high} = M_a'(\phi_a) M_w V_{high} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{-i\phi_a} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.a)$$

$$V_{out, low} = M_a'(\phi_a) M_w V_{low} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{-i(\Gamma/2 - \pi/2 - \phi_a)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.b)$$

식 (8.a)와 식 (8.b)에서 두 빔의 위상지연의 차  $\Delta\phi_{del}$ 를 구하면

$$\Delta\phi_{del} = \frac{\Gamma}{2} - \frac{\pi}{2} - 2\phi_a \quad (9)$$

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

$$\Delta\phi_{del} = (2k+1)\pi, \quad k \text{는 정수} \quad (10)$$

가 되어  $0 - \pi$  위상변조를 할 수 있게 된다. 물론  $\phi_a$ 를 바꾸더라도 식 (8.a)과 (8.b)로 표현되는 두 빔의 세기는 바뀌지 않는다

실제 실험에서는  $\phi_a \approx 86^\circ$  ( $0.478\pi$  radian) 일 때 dc 항이 최소가 되었다. 이 측정값을 식 (10)에 대입하면

$$\Gamma/2 = (2k+1)\pi + \pi/2 + 0.956\pi \quad (11)$$

가 구해지고 식 (11)을 식 (9)에 대입하면

$$\Delta\phi_{del} = (2k+1)\pi - 2(\phi_a - 0.478\pi) \quad (12)$$

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

### III. LCD 입력빔 세기에 따른 $0-\pi$ 위상변조의 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  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 로 바뀌가면서 그 각각의 Fourier 면 영상을 비교해 보았다.

그림 3은 1  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 인 빔을 기준으로  $0-\pi$  위상변조를 한 상태에서 빔 세기만을 바꿔갈 때의 Fourier 스펙트럼의 세기분포이다. 이 때, 1/4 파장 지연기와 편광기의 회전각은 앞 장에서 언급한 값과 같다.

그림 4는 각각의 빔 세기 경우마다 dc 항이 최소가 되도록 1/4 파장 지연기와 편광기의 회전각을 조절했을 때의 Fourier 스펙트럼이다. 그림



그림 2.  $\psi_a=0.478\pi$ 인 경우의  $0-\pi$  위상변조 특성. LCD 입력전압, 흑 = high상태, 백=low상태(왼쪽). CCD로 감지한 실제SLM의 영상(가운데). Fourier 면에서의 스펙트럼 세기 분포(오른쪽).

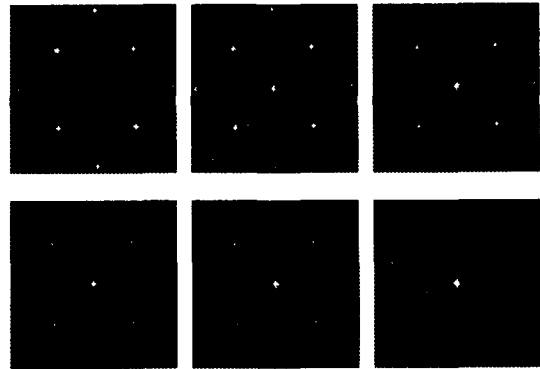


그림 3. 1  $\text{mW}/\text{cm}^2$  빔을 기준으로  $0-\pi$  위상변조를 한 상태에서 빔 세기만을 변화시키면서 본 Fourier 스펙트럼. 입력빔의 세기는 위, 왼쪽부터 1, 15, 30, 45, 60, 180  $\text{mW}/\text{cm}^2$  이다.

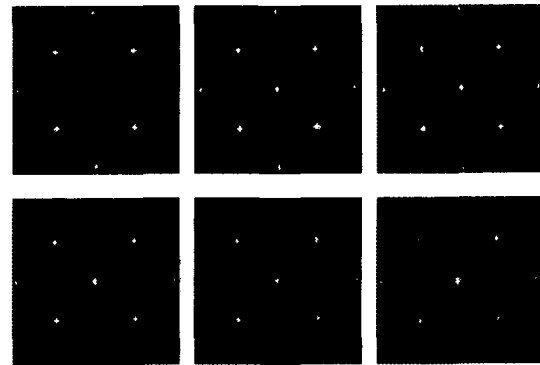


그림 4. 각 세기별로 dc항이 최소가 되도록 추가적으로 조절한 경우의 Fourier 스펙트럼. 입력빔의 세기는 위, 왼쪽부터 1, 15, 30, 45, 60, 180  $\text{mW}/\text{cm}^2$  이다.

3과 그림 4에서 빔 세기가 증가할수록 상대적으로 dc항으로의 에너지 집중이 심해진다는 것을 알 수 있다. 따라서, 실제로 TNLCD를 이용한  $0-\pi$  위상변조를 광학시스템에 적용할 경우, 특히 높은 세기의 빔이 필요한 시스템에서는 빔 세기와 dc항 사이에 적절한 타협이 필요하며 또한 추가적인 1/4 파장지연기와 편광기의 조절이 필요하다. 본 연구에서는 입사빔 세기를 충분히 낮추어 이러한 특이 현상이 발생되지 않도록 하였다.

#### IV. 실험 및 결과

홀로그래픽 저장을 위한 실험 구성도는 그림 5와 같다. 실험에 사용된 광원은 514.5 nm 파장의 빛을 출력하는 아르곤 이온 레이저이고, 기록 매질은 DuPont사의 두께 100  $\mu\text{m}$ 인 광폴리머이다. 가변 위상변조기로 사용하기 위한 LCD는 화소수가  $320 \times 240$ 이고 화소 1개의 크기가  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$  인 Kopin사 제품이다. 액정 앞뒤의 편광기는 제거하였다. LCD에 입력되는 랜덤 위상코드 패턴은 Hadamard 코드를 생성시킨 다음에 [15] 무작위적으로 뒤섞는 방법을 사용해 만들었다. 그리고 매질에 저장되는 이진정보는 크롬 마스크의 랜덤 패턴을 사용하였고 마스크의 1개 화소 크기는  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$  이다. 위상변조기인 LCD와 마스크 패턴 사이에 픽셀 정합이 되도록 해서 하나의 bit를 나타내는 블록의 크기는 마스크의 3배인  $120 \mu\text{m}$ 가 되도록 하였다. 그러면 하나의 LCD 화소가 9개의 마스크 화소에 대응된다.

랜덤 위상마스크의 효과를 조사하기 위해 각 다중화 방식을 사용한 다중홀로그램 기록실험을 수행하였다. 기준빔과 신호빔 사이의 각은  $45^\circ$  이고, 광폴리머의 한 지점에 8 개의 홀로그램을 기록하였다. 이 때, 각 홀로그램 사이의 기록각도는  $2.4^\circ$  이다. 그리고, 각각의 홀로그램은 8개의 서로 다른 랜덤 위상코드 패턴을 사용했고,

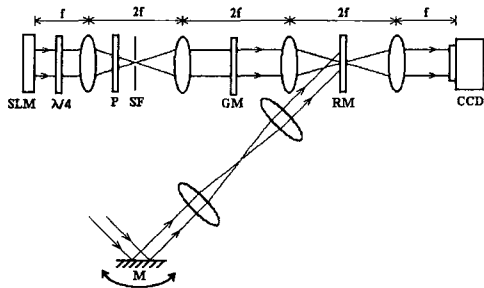


그림 5. 실험구성도.  $\lambda/4$ : 1/4 파장 지연기, P: 편광기, GM: 크롬 마스크, M: 거울, RM: 기록매질.

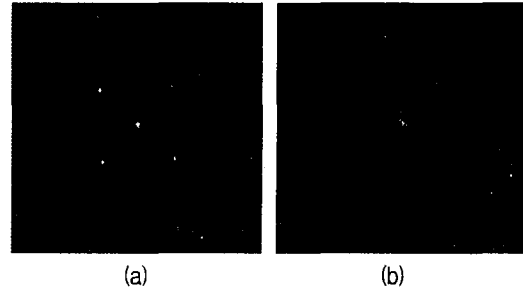


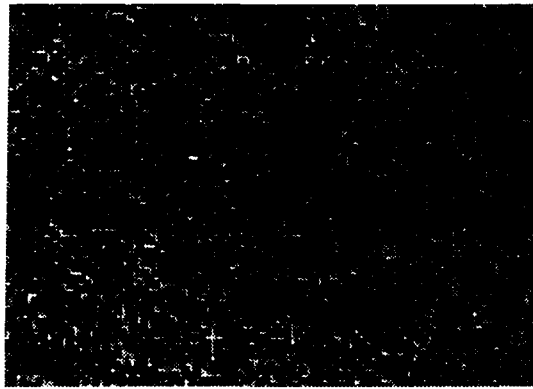
그림 6. 크롬 마스크의 균일한 체크무늬 패턴의 Fourier 스펙트럼 세기분포. (a)랜덤 위상변조를 사용하지 않은 경우. (b)랜덤 위상변조를 사용한 경우.

기록매질의 동적 범위를 균등하게 사용하기 위해 노출시간을 조절해 기록하였다 [16]. 회절효율은 약 0.0048~0.0075(%) 이다.

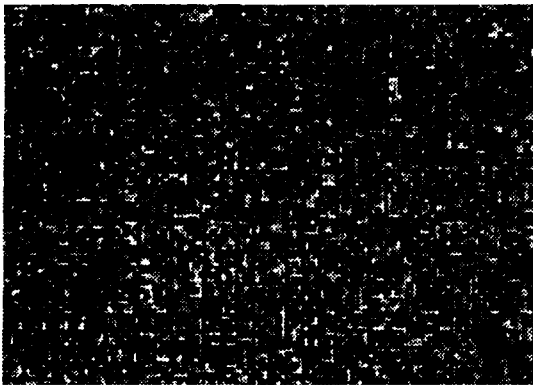
그림 6은 랜덤 위상변조를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대한 Fourier 스펙트럼을 보여 준다. 랜덤 위상변조를 사용할 경우 Fourier 면에서 dc성분이 현저히 줄어들음을 볼 수 있다.

그림 7은 랜덤 위상변조를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 8개의 다중 홀로그램으로부터 재생된 영상 중 마지막 영상을 나타낸다. 두 경우에 대해 노출시간을 비롯한 모든 홀로그램 기록조건은 정확히 동일하다. 랜덤 위상변조를 사용하면 dc 성분의 세기가 많이 감소되어 기록면적 전체를 비교적 효율적으로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 랜덤 위상변조를 하지 않은 경우엔 높은 dc 성분으로 인해 기록매질의 동적 범위를 급격히 소모시킨다. 그러므로, 나중에 기록되는 영상일수록 경계선 강화효과(edge-enhancement effect)가 크게 나타나서 재생되는 영상의 질이 떨어진다.

그림 8은 그림 7의 두 영상에 대한 히스토그램을 나타낸다. 여기서 x축(수평축)은 256 그레이 레벨을 의미하는데 '1'은 검정색 그리고 '256'은 하얀색을 나타낸다. y축(수직축)은 각 레벨값들을 가지는 픽셀수를 의미한다. '1'에 가까운 레벨값들은 '0' bit를 의미하고 '256'에 가까운 레벨값들은 '1' bit를 의미한다. 따라서, 히스토그램에서 '0' bit 그룹과 '1' bit 그룹 사이에 0의 빈도



(a)



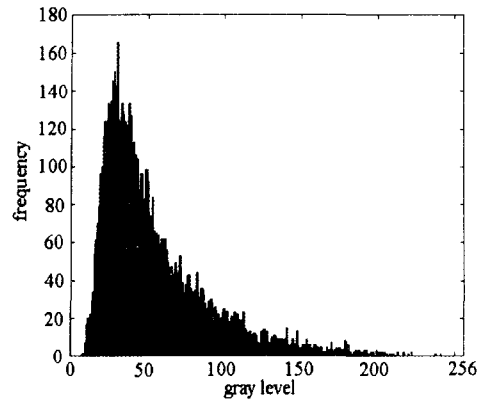
(b)

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

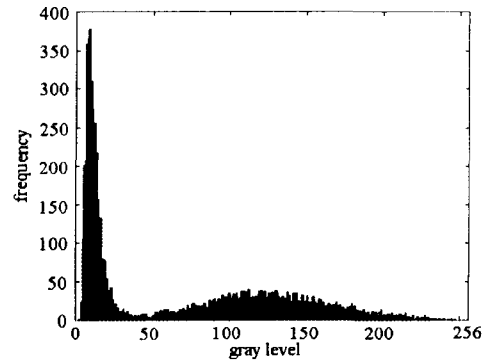
수를 가지는 구간이 존재하고 이 구간이 넓으면 데이터 복원시에 오차없이 0과 1을 복원할 수 있다. 여기서는 랜덤 위상변조를 사용한 경우가 그렇지 않은 경우보다 상대적으로 0과 1의 그룹이 보다 훨씬 더 잘 구분되고 오차도 작다는 것을 알 수 있다.

### V. 결 론

이상의 실험에서 TNLCD를 사용해 2진 위상변조를 생성시키는 방법을 이론 및 실험적으로



(a)



(b)

그림 8. 재생된 8번째 홀로그램의 히스토그램. (a)랜덤 위상변조를 사용하지 않은 경우. (b)랜덤 위상변조를 추가로 사용한 경우

보였다. 그리고, 이 방법을 사용해서 TNLCD를 이산적인 랜덤 위상마스크로 사용함으로써 가변적으로 위상코드패턴을 바꿀 수 있음을 보였다.

데이터 표현에 있어서 기존의 진폭변조만 사용할 경우, 신호빔의 강한 dc 성분 때문에 기록매질이 비효율적으로 사용되었다. 하지만, 랜덤 위상변조를 추가적으로 사용함으로써 dc 성분을 세기를 감소시켜 기록매질을 골고루, 보다 효율적으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

LCD에 입사되는 빔 세기에 따른  $0 - \pi$  위상변조 특성도 살펴보았다. 빔 세기가 달라지면 편광기와 1/4 파장 지연기에 대한 약간의 추가적인

수정이 필요하지만 어느 정도 만족되는  $0 - \pi$  위상변조를 만들 수 있었다. 입사빔의 세기에 따라 위상변조 특성이 변하는 이유는 아직 분명하지 않다. 다만, 입사빔의 세기에 따라 LCD의 투과 특성이나 위상 지연 특성이 달라지는 것으로 추측된다. 앞으로, 이 부분에 대한 연구도 수행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 산업자원부의 차세대 대용량 정보저장장치 기술개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D. Psaltis and F. Mok, "Holographic memories," *Sci. Am.*, Vol. 275, No. 11, pp. 52-58, 1995.
- [2] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, and L. Hesselink, "Volume holographic storage and retrieval of digital data," *Science*, Vol. 265, No. 5, pp. 749-752, 1994.
- [3] K. Curtis, A. Pu, and D. Psaltis, "Method for holographic storage using peristrophic multiplexing," *Opt. Lett.*, Vol. 19, No. 13, pp. 993-994, 1994.
- [4] J. H. Hong, L. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, "Volume holographic memory system: techniques and architectures," *Opt. Eng.*, Vol. 34, No. 8, pp. 2193-2203, 1995.
- [5] H. S. Li and D. Psaltis, "Three-dimensional holographic disks," *Appl. Opt.*, Vol. 33, No. 17, pp. 3764-3774, 1994.
- [6] G. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, "Optical data storage by using wave-length multiplexed volume holograms," *Opt. Lett.*, Vol. 17, pp. 1473-1475, 1992.
- [7] C. Denz, G. Pauliat, G. Rogen, and T. Tschudi, "Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method," *Opt. Commun.*, Vol. 85, pp. 171-176, 1991.
- [8] X. Yang and Z. H. Gu, "Three-dimensional optical data storage and retrieval system based on phase-code and space multiplexing," *Opt. Eng.*, Vol. 35, No. 2, pp. 452-456, 1996.
- [9] J.-S. Jang, D.-H. Shin, and Y.-S. Park, "Holographic data storage by combined use of peristrophic, angular, and spatial multiplexing," *Opt. Eng.*, Vol. 39, No. 11, pp. 2975-2981, 2000.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*, Chap. 5, Wiley, New York, 1984.
- [14] P. Yeh and C. Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays*, Chap. 4, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
- [15] 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, 1996.
- [16] 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.



오용석 (Yong-Seok Oh)

1998년 8월 부경대학교 정보통신공학과 공학사.

1998년 9월~현재 부경대학교 정보통신공학과 석사과정 재학중.

※ 관심분야 : 홀로그래픽 메모리, 광상관기, 광정보처리.



신동학 (Dong-Hak Shin)

1996년 2월 부산수산대학교 정보통신공학과 공학사.

1998년 2월 부경대학교 전자공학과 공학석사.

1998년 3월~현재 부경대학교 정보통신공학과 박사과정 재학중.

※ 관심분야 : 홀로그래픽 메모리, 광상관기, 광정보처리.



장주석 (Ju-Seog Jang)

1984년 2월 부산대학교 전기 기계공학과 공학사.

1986년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사.

1989년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사.

1989년~1991년 University of Colorado, JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics), 연구원.

1991년~1993년 한국전자통신연구원, 기초기술연구부, 선임연구원.

1994년~1995년 Caltech (California Institute of Technology), Computation and Neural Systems, 방문교수.

1993년 3월~현재 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 부교수.

※ 관심분야 : 홀로그래픽 메모리, 광상관기, 광정보처리.