

디지털 데이터의 Fourier 홀로그램 저장에서 기록면의 빔세기 균일도 향상을 위한 2진 데이터의 새로운 광학적 표현

장주석[†] · 신동학 · 오용석

부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부

Ⓣ 608-737 부산시 남구 대연3동 599-1

(2001년 4월 13일 받음, 2001년 6월 21일 수정본 받음)

특히 디스크형 기록 매질에 홀로그래픽 데이터를 저장함에 있어서, 뒤틀린 니매틱 액정디스플레이를 사용하여 세기와 위상을 동시에 변조하는 이진 데이터 표현 방법을 제안한다. 세기 변조만을 생각하면, 제안한 방법은 이진 비트 값 0과 1이 액정 디스플레이 픽셀의 어두고(off) 밝은(on) 상태로 (또는 그 반대로) 각각 표현되기 때문에 기존의 방법과는 다르지 않다. 그러나 제안한 방법에서는 on 픽셀을 통과하는 빔들이 두 가지의 서로 다른 위상 지연을 가지도록 제어된다. 만약 이 두 종류의 빔들 간의 위상지연 차이가 180도에 가까우면, Fourier 면 홀로그램 기록 시 기록 면에서, 데이터 영상의 dc 성분을 감소시킬 수 있으며 따라서 빔 세기분포를 향상시킬 수 있다. 그리고 제안한 방법의 유용성을 실험적으로도 입증하였다.

분류코드 : IP010.

I. 서 론

뒤틀린 니매틱 액정디스플레이(twisted-nematic liquid crystal display: TNLCD)는 세기변조나 위상변조를 수행할 수 있고, 가격이 저렴하므로 광학적으로 정보를 표현하는 공간광변조기(spatial light modulator)로 널리 사용되고 있다.^[1-4] 특히 홀로그래픽 메모리 시스템에서 2진 정보를 광학적으로 표현할 때에는 세기 변조기로 사용해 왔다.^[5-8] 그런데 디스크형 기록 매질을 갖는 홀로그래픽 메모리에서 빔 세기가 변조된 2진 데이터 영상을 저장할 때에는, 이 데이터 영상을 렌즈로 Fourier 변환하여 저장하는, 즉 Fourier면 홀로그램을 기록하는 것이 보통이다.^[8-10] 그 이유는 기록 면에 신호 빔을 강하게 집속할 수 있어서 홀로그램 당 면적저장밀도를 쉽게 높일 수 있기 때문이다.^[10] 그러나 Fourier면 홀로그램을 기록할 때에는 신호 빔의 전파 축을 따라 모든 화소들이 보강간섭을 일으켜 매우 강한 dc 성분이 존재하게 된다. 이러한 빔 세기의 불균일성은 기록매질에 많은 수의 홀로그램을 다중화하여 기록하기 어렵게 한다.^[11] 이 문제를 극복하기 위해서, 저장밀도를 크게 떨어뜨리지 않으면서 기록 면에서의 빔 세기 균일도를 높이기 위해 랜덤 위상 마스크를 추가로 도입하는 방법이 제안되고 연구된 바 있다.^[12-15] 그러나 이 방법은 랜덤 위상 마스크와 세기변조를 위한 LCD의 픽셀간의 정확한 정렬이 요구되며, 고정된 랜덤 위상 마스크를 사용할 경우 특정한 데이터 패턴에 대해 심한 픽셀간 누화(interpixel crosstalk)가 발생할 수 있다.^[12]

본 논문에서는 Fourier면 홀로그램 기록구조에서 강한 dc 성분을 줄일 수 있는 방법으로 빔의 위상 및 세기를 TNLCD로 함께 변조하여 2진 데이터를 표현하는 방식을 제안한다. 이 방

식은 랜덤 위상 마스크와 세기변조를 위한 TNLCD의 역할을 하나의 TNLCD로 구현한 방식이라고 볼 수 있다. 그리고 Kopin 사의 320×240 흑백 LCD를 사용하여 제안한 방식의 유용성을 실험적으로 입증하였다.

II. 평면파의 세기 및 위상 변조에 의한 2진 데이터 표현

TNLCD의 광학 특성은 보통 Jones 행렬로 기술된다.^[3,16,17] 본 논문에서 사용하는 Kopin사의 LCD는 액정의 c축이 LCD 판넬에 평행하고 뒤틀림각 ϕ 가 $-\pi/2$ 이다. LCD 양쪽 표면에 붙어있는 편광판은 모두 제거되었다. 따라서 액정에 대한 Jones matrix는

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

로 기술되며 실제 실험과도 잘 부합하였다. 식 (1)의 행렬에서의 각 파라미터는 $X = \sqrt{(\pi/2)^2 + (\Gamma/2)^2}$ 및 $\Gamma = 2\pi(n_e - n_o)d/\lambda$ 로 주어지며 d 는 액정의 두께, λ 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 θ 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 θ 도 증가하여 마침내 $\pi/2$ 에 수렴한다. $v_{rms} \gg v_c$ 이면

[†]E-mail: jsjang@pknu.ac.kr

(High 상태) $\theta \approx \pi/2^\circ$ 이고, $\Gamma=0$ 이 되므로 입사되는 평면파 빔에 대해 복굴절 효과는 없다. 따라서 이때의 Jones 행렬을 M_{high} 로 표기하면, 식 (1)에서

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

로 쓸 수 있다. 반면에 $v_{rms} < v_c$ 일 때 LCD의 Jones 행렬을 M_{low} 로 표기하면 보통 $\Gamma \gg \pi/2$ 가 만족되므로,^[16,17] 식 (1)에서

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

로 쓸 수 있다.

액정에 인가되는 입사 빔의 편광이

$$V_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이라 하자. 그러면 LCD 픽셀이 High 상태가 되었을 때 이 LCD 픽셀을 빠져나가는 빔의 Jones 벡터 $V_{high} = M_{high} V_{in}$ 과 LCD 픽셀이 Low 상태가 되었을 때, 이 LCD 픽셀을 빠져나가는 빔의 Jones 벡터 $V_{low} = M_{low} V_{in}$ 은 각각

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

가 된다.

이제 그림 1처럼, 1/4 파장 지연기(quarter wave plate)와 편광판(analyzer)을 LCD 뒤에 둔다고 하자. 1/4 파장 지연기의 느린 축(slow axis)은 x 축으로부터 각도 $\pi/4$ 만큼 회전되어 있고 편광판은 x 축으로부터 임의의 각도 ψ_a 만큼 회전되어 있다. 최종 출력은 (x, y) 좌표축이 아니라 회전된 (x', y') 축에서 관측한다. (x', y') 축은 (x, y) 축에서 편광판이 돌아간 각만큼, 즉 ψ_a 만큼 회전된 축이다. 주의할 것은 편광판을 회전시키면 (x', y) 축도 그에 따라 회전된다는 점이다. 그러면 1/4 파장 지연기에 대한 Jones 행렬은

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

이고, 투과축이 ψ_a 만큼 회전된 편광판에 대한 Jones 행렬은

$$M_a(\psi_a) = \begin{bmatrix} \cos^2 \psi_a & \cos \psi_a \sin \psi_a \\ \cos \psi_a \sin \psi_a & \sin^2 \psi_a \end{bmatrix} \quad (7)$$

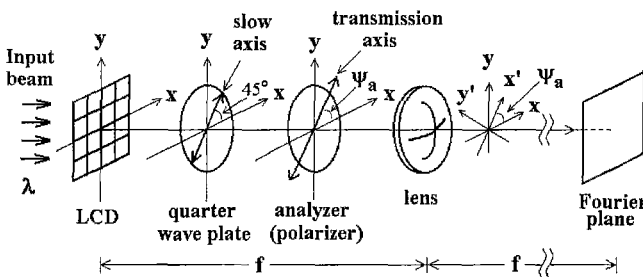


그림 1. 세가지 상태변조를 위한 광학적 구성도.

이 된다. 그런데 최종 출력을 (x', y) 축에서 관측하므로 좌표 회전을 의미하는 행렬

$$R(\psi_a) = \begin{bmatrix} \cos \psi_a & \sin \psi_a \\ -\sin \psi_a & \cos \psi_a \end{bmatrix} \quad (8)$$

를 고려하면

$$M'_a(\psi_a) \equiv R(\psi_a)M_a(\psi_a) = \begin{bmatrix} \cos \psi_a & \sin \psi_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

로 쓸 수 있다. LCD 픽셀이 High 상태이나 Low 상태이나에 따라 두 가지 최종 출력을 얻게 된다. 즉,

$$V_{out, high} = M'_a(\psi_a)M_w V_{high} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \exp(-i\psi_a) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

및

$$V_{out, low} = M'_a(\psi_a)M_w V_{low} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \exp[-i(\Gamma/2 - \pi/2 - \psi_a)] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

이 된다. 두 픽셀을 통과한 빔의 위상지연의 차 $\Delta\phi_{del}$ 는 식 (10)과 식 (11)로부터

$$\Delta\phi_{del} = \frac{\Gamma}{2} - \frac{\pi}{2} - 2\psi_a \quad (12)$$

가 된다. 여기서 $\Delta\phi_{del} = (2k+1)\pi$ 가 되도록 편광판의 회전각 ψ_a 를 적절히 조정하면(k 는 정수임) High 및 Low로 2진 데이터를 표현함으로써 2진 위상변조를 할 수 있다. 물론 ψ_a 를 바꾸더라도 식 (10)과 (11)로 표현되는 두 빔의 세기는 바뀌지 않는다.

Kopin LCD를 사용한 실험에서, 거의 순수한 위상 변조가 얻어지는(dc 항이 최소가 되는) 각 ψ_a 는 약 86도(0.478π radian)이었다. 이는 그림 1에서 LCD에 High와 Low 상태로 구성된 체크(check) 패턴을 입력하였을 때 렌즈의 Fourier 면에서 dc 항을 관측함으로써 알 수 있다. 이 결과로부터 식 (12)에서 $\Gamma/2 = (2k+1)\pi + \pi/2 + 0.956\pi$ 를 얻을 수 있다. k 는 미지의 어떤 정수다. 이를 식 (12)에 대입하면

$$\Delta\phi_{del} = (2k+1)\pi - 2(\psi_a - 0.478\pi) \quad (13)$$

이 되고 이로부터 본 논문에서 사용하는 LCD에서 ψ_a 에 따른 High와 Low 상태의 픽셀을 통과한 두 빔 사이의 위상지연을 알 수 있다. 한 예로 $\psi_a = 0.478\pi$ 인 경우, 즉 순수한 2진 위상 변조된 LCD의 패턴과 이 패턴의 Fourier 면에서의 빛 세기분포를 그림 2에 나타내었다.

본 논문에서는 위상과 세기를 동시에 변조하기 위해, 즉 세 가지 상태로 변조하기 위해서, High와 Low 전압 외에 LCD 픽셀에 다른 전압을 걸어 준다. 즉, v_{rms} 를 LCD 픽셀의 상태가 High도 아니고 Low도 아닌 그 중간 값이 되도록 전압을 인가하는 것이다. 사실 Γ 는 v_{rms} 의 함수이고, 일반적으로 v_{rms} 값이 증가하면 Γ 값은 감소하게 된다. Jones 벡터가 $V_{in} = [1 \ 0]^T$ 인(위 첨자 T 는 행렬의 전치를 의미) 입사 빔이

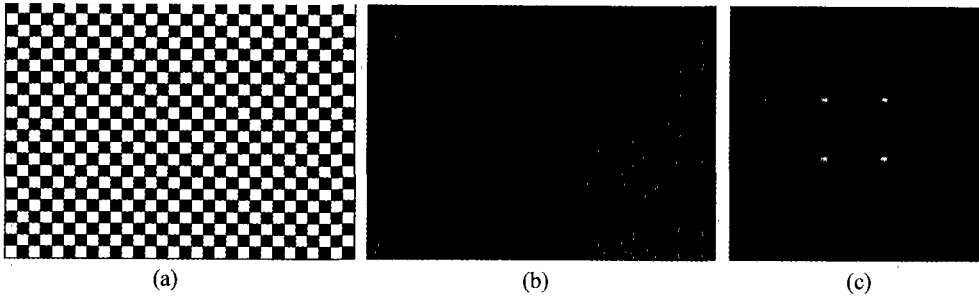


그림 2. 2진 위상변조를 위한 (a) LCD 입력패턴; black = High state, white = Low state. (b) CCD로 감지한 실제 SLM의 영상. 위상변조되어 세기변화가 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. (c) Fourier 면에서의 스펙트럼 세기 분포.

이 중간 전압이 걸린 LCD 픽셀을 통과하면 그 Jones 벡터는 식 (1)에서 부터

$$V_{mid} = \begin{bmatrix} \frac{\pi \sin X}{2} \frac{1}{X} \\ -\cos X + i \frac{\Gamma \sin X}{2} \frac{1}{X} \end{bmatrix} \quad (14)$$

으로 타원편광이 된다. 그리고 적절한 전압을 걸어, 식 (14)로 기술되는 빔이, 편광 다이어그램으로 볼 때, 장축이 x축에서 45도 회전된 타원편광이 되도록 하였다. 이 조건을 만족하기 위해서는 식 (14)에서 V_{mid} 의 x축 성분값의 크기와 y축 성분값의 크기가 같아져야 하므로 $\Gamma \approx 0.8 \pi$ 임을 알 수 있다. 이 경우 식 (14)는

$$V_{mid} = \begin{bmatrix} 0.706 \\ 0.427 + i0.565 \end{bmatrix} = \frac{e^{i0.147\pi}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0.895 - i0.446 \\ 0.895 + i0.446 \end{bmatrix} \quad (15)$$

이 된다. 실제로 우리가 사용하는 LCD의 경우 High 전압 값의 약 1/2을 걸었을 때 이 상태가 얻어졌다. 이를 Mid 상태라 부르겠다.

장축(또는 단축)이 x축에 대해 45도 회전된 타원편광 빔이, 느린 축이 x축에 대해 45도 회전된 1/4 파장 지연기를 통과하면 선형편광이 된다. 이는 다음과 같이 간단히 보일 수 있다. 즉

$$M_w V_{mid} = \frac{e^{i0.147\pi}}{2} \begin{bmatrix} 1.341 - i1.341 \\ 0.449 - i0.449 \end{bmatrix} = \frac{e^{-i0.103\pi}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1.341 \\ 0.449 \end{bmatrix} \quad (16)$$

이므로 선형 편광이 됨을 알 수 있다. 그러므로 이 선형 편광의 빔이 편광판에 의해 완전히 차단되도록, 즉 $V_{out, mid} = M_a'(\psi_a) M_w V_{mid} = \mathbf{0}$ 가 되도록 ψ_a 를 설정한다. (여기서 $\mathbf{0}$ 는 2×1 크기의 null vector이다.) 이때의 편광판의 각 ψ_a 는 식 (16)로부터 이론적으로 $108.4^\circ (0.602\pi \text{ radian})$ 가 됨을 예측할 수 있다. 실제 실험에서 $V_{out, mid} = \mathbf{0}$ 가 되는 ψ_a 의 값은 약 $110^\circ (0.611\pi)$ 로 측정되었으며, 이론과 잘 일치하였다. 이 각은 일반적으로 앞에서 2진 위상변조에서 High와 Low 상태의 픽셀을 통과한 두 빔간의 위상차가 180° 가 되는 각과 일반적으로 다르다. $V_{out, mid} = \mathbf{0}$ 가 되는 ψ_a 의 값을 식 (13)에 대입하면, $\Delta\phi_{del} = 0.734\pi (132^\circ)$ 가 됨을 알 수 있다(단, $k=0$ 으로 두었다.).

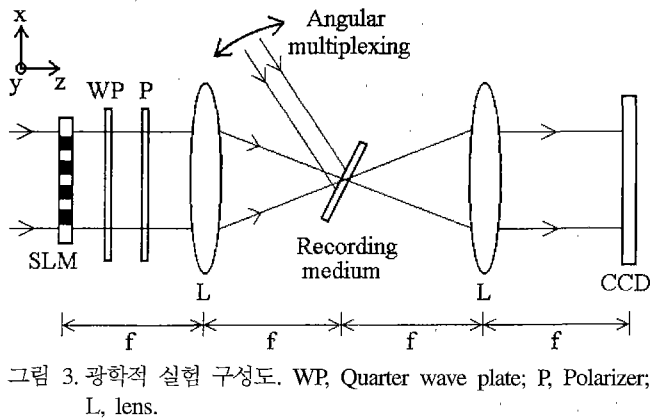


그림 3. 광학적 실험 구성도. WP, Quarter wave plate; P, Polarizer; L, lens.

본 논문에서는 편광판을 $\psi_a = 0.611\pi$ 가 되도록 고정해 둔 상태에서, 세 가지 상태로 LCD를 변조한다. 이 때, 2진 값 1은 LCD 픽셀의 High 또는 Low 상태로, 2진 값 0은 LCD 픽셀의 Mid 상태로 표현하는 것이다. 즉,

- 1 \Rightarrow High 또는 Low;
- 0 \Rightarrow Mid.

이 경우 Mid는 출력 빛의 세기가 0이므로 만약 그림 3과 같은 $4f$ 시스템에서 CCD와 같은 빛 세기 검출기로 감지한다면 어둡고(off 픽셀에 해당) High와 Low는 모두 동일한 세기의 빛이 감지되므로 밝아진다(on 픽셀에 해당). 이는 빛의 세기로 1과 0을 표현하는 것, 즉 보편적인 세기변조 방법을 사용하여 LCD로 2진 정보를 표현하는 것과 다를 것이 없다. 그러나 1을 위상이 서로 다른 High와 Low의 두 가지로 표현함으로써 전체적으로 dc 성분을 제거하거나 최소한 줄일 수 있는 것이다. 이때 서로간의 위상차가 완벽한 180° 가 아니어서 dc 항을 완전하게 제거할 수 없지만, 132° 가 되므로 High와 Low의 개수를 반반씩 사용하면 상당히 제거할 수 있다. 물론 $\psi_a = 0.478\pi$ 로 두면 High와 Low 사이의 위상차를 180° 로 만들 수 있지만, 이 경우 Mid 상태가 완전히 어두워지지 않는다. 홀로그래픽 데이터 저장의 입장에서는 신호대잡음비(SNR)를 높이기 위해서는 Mid 상태가 완전히 어두워지는 조건을 사용해야 할 것이다. 1의 값을 같은 수의 High와 Low 상태로 적절히 표현함으로써 상당한 dc 성분을 제거할 수 있음을 그림 4에 나타내었다. 그림 4(a)은 세 가지 상태 변조된

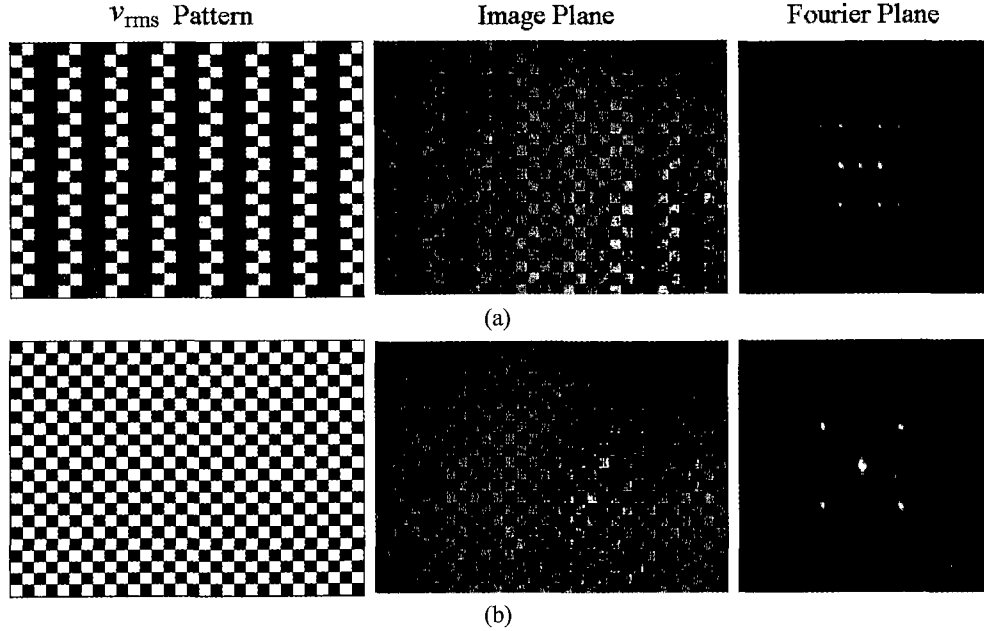


그림 4. (a) 제안하는 위상 및 세기 변조 방식에 의한 실험결과. 왼쪽 LCD 입력영상에서 black = High state, white = Low state, gray = Mid state를 의미한다. (b) 종래의 단순 세기 변조 방식을 사용하여 동일한 실험을 수행하였을때의 결과.

패턴에 대한 실험 결과이다. 이때 출력으로 얻고자 하는 영상은 단순한 체크 패턴이다. 이를 위해 LCD에 인가하는 입력 전압 패턴은 High, Mid, Low 세 가지이고, 이를 컴퓨터 모니터로 볼 때 세 가지 밝기 {1, 128, 256} 레벨이 되도록 코딩하였다. 이 코딩 패턴과 CCD로 얻어진 영상, 그리고 LCD 패턴의 Fourier 면에서 얻어진 Fourier 스펙트럼의 세기 패턴을 그림 4(a)에 차례대로 나열하였다. 비교를 위해 종래의 세기 변조만을 이용할 경우의 것들을 그림 4(b)에 나타내었다. 그림 4(a)로부터 위상 및 세기 변조(High, Mid, Low의 세 가지 상태 변조)방식을 사용할 경우 dc 성분이 단순 세기 변조 방식보다 많이 감소되었다는 것을 알 수 있다. 그러나 완전히 dc 성분이 제거되지 않은 것은 본 실험에서 사용한 LCD의 High와 Low 상태로 변조한 빔들 사이의 위상차가 132도이기 때문이다.

제안한 방식에서 어두운(Mid 상태인) 픽셀에서의 빔 투과도는 Mid 상태인 픽셀의 출력 편광이 1/4 파장 지연기 뒤에서 얼마나 정확히 선형 편광이 되는가와 직결되어 있다. 그래야 편광판으로 선형 편광 빔을 완전히 제거할 수 있기 때문이다. 제안한 방식을 사용할 경우와 종래의 세기변조 방식을 사용했을 때 off 픽셀에서 얻는 빛 투과도는 다르지 않았다. 반면에 밝은 (High와 Low 상태인) 픽셀의 빔 세기 투과도는, 식 (10)과 (11)에서 예측할 수 있는 것처럼, 종래의 세기변조 방식을 사용했을 때 on 픽셀에서 얻는 투과도의 1/2이 된다. 따라서 출력 CCD 면에서 on과 off 픽셀의 빔 세기 대비가 종래의 경우 약 225인데 반해 본 논문에서의 경우 약 112이었다.

식 (15)에서 알 수 있듯이, $V_{out,mid}=0$ 가 되는 ψ_a 의 값은 액정이 단일 추종(adiabatic following) 조건^[16]을 만족하는 한 LCD 두께 d 와 파장 λ 에는 무관하다. 따라서, 만약 적절한 d

의 LCD를 제작하거나, 적절한 λ 의 빔을(그리고 그 파장에 맞는 1/4 파장 지연기를) 사용함으로써 High와 Low 사이의 위상지연이 180도가 되는 조건과 Mid가 완전히 어두워지는 조건이 서로 일치하도록 해 줄 수 있다면 Fourier 면에서 dc 항을 최대도로 제거할 수 있을 것이다.

III. 홀로그래픽 디지털 데이터 저장실험

앞에서 설명한 위상 및 세기 변조 방식을 디스크형 기록 매질을 갖는 홀로그래픽 메모리에 적용하여, 실제로 데이터를 저장하는 기초 실험을 수행하였다. 그림 3은 실험 구성도를 나타낸다. 간단히 기준빔의 각을 바꾸어가면서 여러 개의 영상을 중첩 기록하는 각 다중화 방식을 사용하였다. 광원으로 514.5 nm의 Ar 이온 레이저를 사용하였고, 기록매질은 두께 100 μm Dupont 광폴리머이며, Fourier 변환 렌즈의 초점거리에 두었다. 입력되는 빔은 x축 방향의 선형편광 빔이고, LCD 뒤에 1/4 파장 지연기와 편광판을 두었다. 이때 위상 및 세기 변조 방식이 얻어질 수 있도록 편광판의 방향은 110도에 위치시켰다. 8개의 홀로그램이 균일하게 기록되도록 노출시간을 조절하였다.^[18,19] 이때 사용한 8개의 페이지 정보는 랜덤 데이터들이고, 1 비트를 표현하기 위한 픽셀 하나의 크기는 150 \times 150 μm 로 하였다. 비교를 위해, 동일한 빔 세기 및 노출시간으로 랜덤한 데이터를 종래의 세기 변조 방식으로 LCD에 표현하여 폴리머 매질에 저장하는 실험을 반복하였다. 각각의 경우에 대해 8개의 기록된 홀로그램들로부터 영상들을 재생시키고, 마지막에 기록된 8번째 재생 영상을 각각 그림 5와 6에 보였다. 그리고 재생된 홀로그램에서 각각의 픽셀들의 값들을 히스토그램(histogram)으로 표현하여 데이터를 분석하였다.^[20] 제안하는 방식으로 기록할 경우 dc 성분이 작아서 8개의 홀로

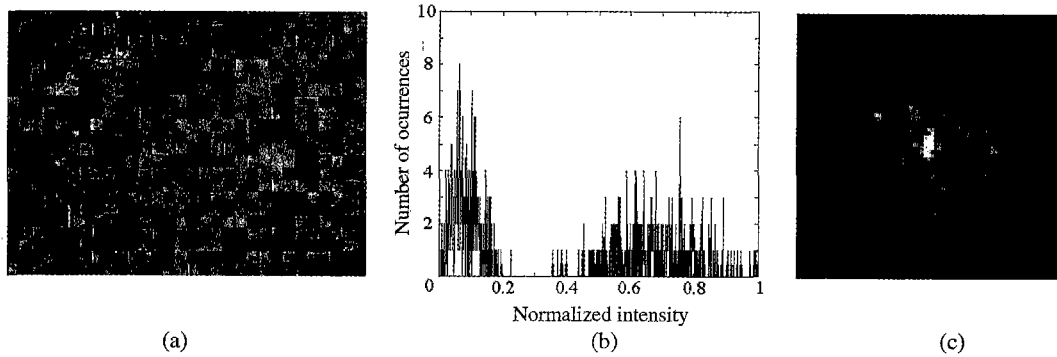


그림 5. (a) 위상 및 세기 변조 방식을 이용하여 기록된 8개의 홀로그램으로부터 재생된 8번째 영상. (b) 이 영상의 픽셀세기에 대한 히스토그램. (c) 원영상의 Fourier 스펙트럼의 빔세기 분포.

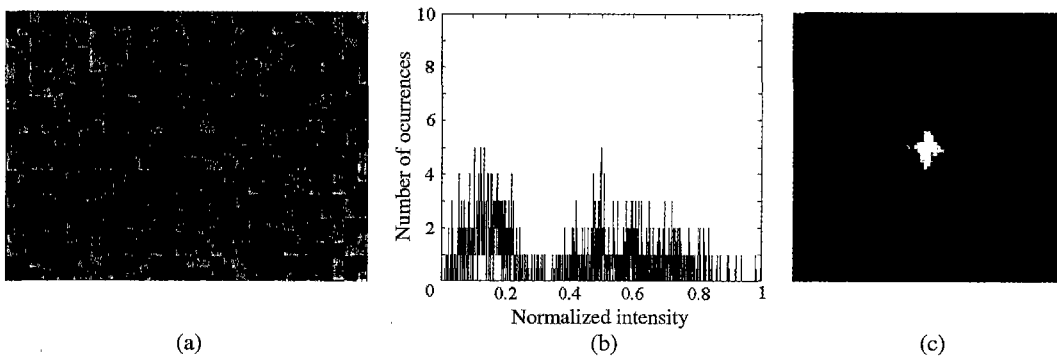


그림 6. (a) 종래의 세기 변조 방식을 이용하여 기록된 8개의 홀로그램으로부터 재생된 8번째 영상. (b) 이 영상의 픽셀세기에 대한 히스토그램. (c) 원영상의 Fourier 스펙트럼의 빔세기 분포.

그림이 모두 매질의 선형영역에 잘 기록되었지만 기존의 방식으로는 5번째 홀로그램부터는 매질의 선형영역에 기록되지 못하여 재생영상에 왜곡이 발생하기 시작하였다. 그림 5(b)와 6(b)는 재생 영상의 2진 정보를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 제안한 방식으로 기록하고 재생한 경우 오류가 없었지만, 기존의 세기변조 방법을 이용할 경우에는 0.3을 역치 기준으로 했을 때 5개의 오류를 발견할 수 있었다. 결국, 종래의 세기 변조방식을 사용하여 Fourier 면 홀로그램을 기록할 경우 강한 세기의 dc 성분에 의해 기록매질의 선형기록범위를 초과하여 사용될 수 있어서 나중에 기록되는 영상은 제대로 기록되지 않을 수 있다. 제안한 방식을 사용하면 이러한 위험을 크게 낮출 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

결론적으로, 2차원 공간에서 빔을 변조하여 2진 정보를 표현하는 LCD에 세 가지 종류의 전압을 인가하여 위상 및 세기를 모두 변조할 경우 그의 dc 성분을 크게 줄일 수 있음을 보였다. 그리고 이를 홀로그래픽 메모리의 데이터 표현을 위해 사용할 경우 dc 성분이 작기 때문에 두께가 얇은 디스크형 기록매질을 효율적으로 사용할 수 있어서 다중화 횟수를 높일 수 있음을 확인하였다. 제안한 방식을 이동 다중화나, 파장 다중화 등과 같은 여러 가지 다른 다중화 방법을 사용할 때에도 동일한 목적으로 마찬가지로 적용될 수 있고, 나아가 다른 광

정보처리 분야에도 응용될 수 있을 것이다.^[21,22]

감사의 글

본 연구는 2000년도 산업자원부의 차세대 대용량 정보저장 장치 개발 사업 가운데 홀로그래픽 디지털 데이터 저장 분야의 연구지원으로 수행되었으며, 지원에 감사 드린다.

참고문헌

- [1] H. K. Liu, J. A. Davis, and R. A. Lilly, "Optical-data-processing properties of a liquid-crystal television spatial light modulator," *Opt. Lett.*, vol. 10, no. 12, pp. 635-637, 1985.
- [2] D. A. Gregory, "Real-time pattern recognition using a modified liquid crystal television in a coherent optical correlator," *Appl. Opt.*, vol. 25, pp. 467-469, 1986.
- [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] K. Lu and B. E. A. Saleh, "Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator," *Opt. Eng.*, vol. 29, no. 3, pp. 240-246, 1990.
- [5] 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.

- [6] D. Psaltis and F. Mok, "Holographic memories," *Sci. Am.*, vol. 275, no. 11, pp. 52-58, 1995.
- [7] J. H. Hong, I. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian, and E. G. Paek, "Volume holographic memory systems: techniques and architectures," *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 8, pp. 2193-2203, 1995.
- [8] G. Zhou, D. Psaltis, and F. Mok, "Holographic read-only memory," *Optics and Quantum Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 405-417, 2000.
- [9] A. Pu and D. Psaltis, "High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 14, pp. 2389-2398, 1996.
- [10] J.-S. Jang, D.-H. Shin, and Y.-S. Park, "Holographic data storage by combined use of rotational, angular, and spatial multiplexing," *Opt. Eng.*, vol. 39, no. 11, pp. 2975-2981, 2000.
- [11] J.-S. Jang, D.-H. Shin, J. Kim, and H.-S. Lee, "Effects of storing defocused Fourier plane holograms in three-dimensional holographic disk memories," *Optics in Computing*, Jan. 9-11, 2001, Lake, Tahoe, Nevada, Technical Digest, pp. 82-84.
- [12] C. B. Burkhardt, "Use of a random phase mask for the recording of Fourier transform holograms of data masks," *Appl. Opt.*, vol. 9, pp. 695-700, 1969.
- [13] 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.
- [14] M. Bernal, G. W. Burr, H. H. Coufal, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, and M. Quintanilla, "Experimental study of the effects of a six-level phase mask on a digital holographic storage system," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 14, pp. 2094-2101, 1998.
- [15] J. Yang, L. M. Bernardo, and Y.-S. Bae, "Improving holographic data storage by use of an optimized phase mask," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 26, pp. 5641-5645, 1999.
- [16] A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals* (John Wiley & Sons, Inc, New York, 1984), Chap. 5.
- [17] P. Yeh and C. Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays* (John Wiley & Sons, Inc, New York, 1999), Chap. 4.
- [18] K. Curtis, A. Pu, and D. Psaltis, "Method for holographic storage using peristrophic multiplexing," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 13, pp. 993-994, 1994.
- [19] A. Pu, K. Curtis, and D. Psaltis, "Exposure schedule for multiplexing holograms in photopolymer films," *Opt. Eng.*, vol. 35, no. 10, pp. 2824-2828, 1996.
- [20] M. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, and M. Quintanilla, "Balancing interpixel cross talk and detector noise to optimize areal density in holographic storage systems," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 23, pp. 5377-5385, 1998.
- [21] P. Refregier and B. Javidi, "Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 7, pp. 767-769, 1995.
- [22] D.-H. Shin and J.-S. Jang "Optical implementation of the generalized Hough transform by use of multiplexed holograms," *Opt. Eng.*, vol. 39, no. 9, pp. 2431-2438, 2000.

Novel optical representation of binary data to improve the beam intensity uniformity at the recording plane in the storage of Fourier holograms of digital data

Ju-Seog Jang[†], Dong-Hak Shin, and Young-Seok Oh

Division of Electronics, Computers, and Telecommunications, Pukyong National University, Pusan 608-737, KOREA

(Received April 13, 2001 ; Revised manuscript received June 21, 2001)

We propose a method to represent binary data by modulating both the intensity and the phase of uniform plane waves with a twisted-nematic liquid crystal display for holographic digital data storage especially in a disk-shaped recording medium. As far as intensity modulation is concerned, our method is not different from the conventional method, because binary bit values 0 and 1 are represented by the dark (off) and lit (on) states of the liquid crystal display pixels, respectively (or vice versa). With our method, however, the on pixels are also controlled so that the beams passing through them can have one of two different phase delays. If the difference of the two phase delays is close to 180 degrees, we can reduce the dc component of the data image and thus improve the beam intensity uniformity at the holographic recording plane when Fourier plane holograms are recorded. The feasibility of our method is experimentally demonstrated.

Classification code : IP.010.