

회전, 각, 그리고 공간 다중화 방법을 결합사용한 홀로그램 기록 시스템

신동학 · 장주석

부경대학교 정보통신공학과, 부산시 남구 대연3동 599-1

(1998년 3월 7일 받음, 1998년 5월 25일 수정본 받음)

홀로그램 기록에 있어서 기록저장밀도를 높이기 위해 각다중, 회전다중, 그리고 공간다중을 동시에 실현할 수 있는 매우 간단한 방식을 제안하고 실험하였다. 각다중과 회전다중은 두 개의 쐐기 프리즘을 이용하여 기준빔을 직접 제어함으로써 얻고, 공간다중은 기록매질을 기록평면에서 이동시킴으로써 얻었다. 기준빔과 물체빔의 사이각도가 예각인 예각기록구조와 이것이 90° 인 90° 기록구조가 모두 구현될 수 있다. 실험에서는 광폴리머를 기록매질로 사용한 예각기록구조로 180개의 홀로그램을 다중기록하였고, 철함유 LiNbO_3 광굴절결정을 사용한 90° 기록구조로 147개의 홀로그램을 다중기록하였다. 우리의 방식은 3가지 다중화를 위한 복잡한 기계적 움직임의 제어를 단순화함으로써 실질적 홀로그래피 메모리 시스템의 실현을 쉽게 한다.

I. 서 론

홀로그래피 메모리는 3차원으로 정보를 기록할 수 있는 고밀도의 용량과 빠른 재생시간 때문에 차세대 메모리로 유망하다. 홀로그래피 메모리의 저장밀도를 높이기 위해 여러 가지의 다중 기록방법 즉, 각다중, 회전다중, 공간다중(이동다중), 위상다중 그리고 파장다중 방법 등이 제안되었다.^[1-5] 빔의 파장을 바꾸어 주는 파장다중화와^[4] 기준빔의 위상요소를 코딩하는 위상다중화는^[5] 빔 자체를 움직이지 않으므로 기계적인 운동이 필요없으나, 값 비싼 광원이 필요하거나 빔코딩이 복잡하다. 그리고 이들은 필요하면 언제나 다른 다중화 방식에 함께 사용될 수 있으므로 여기서의 논의에서는 제외한다. 가장 쉽게 얻을 수 있는 다중화 방식은 각다중, 회전다중 및 공간다중 방식이다. 이들은 서로 다른 기계적 운동을 필요로 한다. 기록매질의 한곳에 많은 홀로그램을 기록하기 위해서 각다중과 공간다중, 그렇지 않으면 회전다중과 각다중을 결합하여 사용하여 왔다.^[6,7] 특히 회전다중 방식은 얇은 기록매질에 많은 홀로그램을 저장할때 매우 유용하다.^[2] 그러나 지금까지 회전다중은 기록매질을 직접 회전시킴으로써 얻었다. 따라서 회전, 각, 공간다중을 동시에 구현하기 위해서는 기록매질의 회전 및 이동운동이 모두 수행되어야 한다. 그러나 이 경우 기록매질이 먼저 회전축 위에 놓여야 하고 이것이 다시 이동축 위에 놓여야 하므로 실질적 시스템 구현이 어렵다. 그러므로 아직까지 이 3가지 다중화 방법을 동시에 복합적으로 사용한 연구는 우리가 아는 한 없었다.^[8]

본 논문에서는 이런 문제점을 극복할 수 있도록 한쌍의 쐐기 프리즘을 이용한 시스템을 제안한다. 이 시스템에서는 2개의 쐐기 프리즘의 상대적인 회전속도와 회전각에 따라 기준빔을 임의의 방향으로 제어할 수 있어서, 각다중 및 회전다중

의 복합 구조를 쉽게 얻을 수 있다. 또한 기록매질을 단순히 독립적으로 평면적으로 이동시켜 기록지점을 바꾸어 줌으로써 공간다중화 방법을 얻을 수 있다. 제안한 방식을 예각 기록구조와 90° 기록구조의 시스템에 모두 적용할 수 있음을 보이고, 각각의 경우에 대해 광폴리머와 광굴절결정을 기록매질로 사용하여 다중기록 실험을 수행하였다.

II. 회전, 각, 그리고 공간다중을 결합구현한 시스템

2.1. 쐐기 프리즘을 이용한 기준빔 제어

쐐기 프리즘을 사용하여 빔의 진행방향을 바꿀 수 있다. 이 원리를 그림 1(a)에 나타내었다. 쐐기 프리즘의 한면이 z축에 수직으로 위치하고 있다고 하자. 여기서 쐐기 프리즘의 굴절률을 n_{in} , 이 프리즘의 다른 뒷면의 기울기 각을 θ_w 라 가정한다. z 축과의 각도가 θ_w 이 되는 빔이 이 쐐기 프리즘에 입사될 때, 프리즘 내부에서의 굴절각 θ_1' 은 Snell의 법칙, 즉 $n_{in}\sin\theta_1'=\sin\theta_w$ 으로부터 구할 수 있다. 이때 공기의 굴절률을 1이라고 가정하였다. 특히 θ_w 이 90° 보다 매우 작은 각에서는 $\theta_1' \approx \theta_w/n_{in}$ 이 된다. 이 굴절빔은 다시 θ_w 만큼 기울어진 두 번째 면의 점 O에 도달하게 된다. 이 지점을 통과하며 z축에 평행인 선은 aa'라 하고, 또 두 번째 면에 수직인 선을 bb'라 하자. 각 bOa(=각 b'Ob')을 θ_d 이라 하면 $\theta_d = \theta_w$ 이고, O 점에서의 입사각은 $\theta_1 + \theta_1'$ 이다. 이때 공기중으로의 굴절각은 θ_d 가 된다고 하자. 출력되는 빔이 z축(혹은 aa')과 이루는 각을 θ_d 라 하면, $\theta_d = \theta_1 + \theta_1'$ 이다. 따라서 Snell의 법칙으로부터 $n_{in}\sin(\theta_1 + \theta_1') = \sin(\theta_1 + \theta_d)$, 즉 $n_{in}\sin(\theta_w + \theta_w/n_{in}) = \sin(\theta_w + \theta_d)$ 이고, θ_w 가 90° 보다 충분히 작으면, $n_{in}\theta_w + \theta_w \approx \theta_w + \theta_d$ 가 된다. 따라서

$$\theta_d \approx (n_{in} - 1)\theta_w + \theta_w \quad (1)$$

이다. 식 (1)로부터 출력빔의 각 θ_d 는 입사빔의 각 θ_w 과 쐐기 프리즘에 의한 굴절각 $(n_{in}-1)\theta_w$ 의 단순합으로 얻어짐을 알 수 있다.

*본 연구는 한국과학재단 핵심전문 연구비(961-0922-119-2)지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

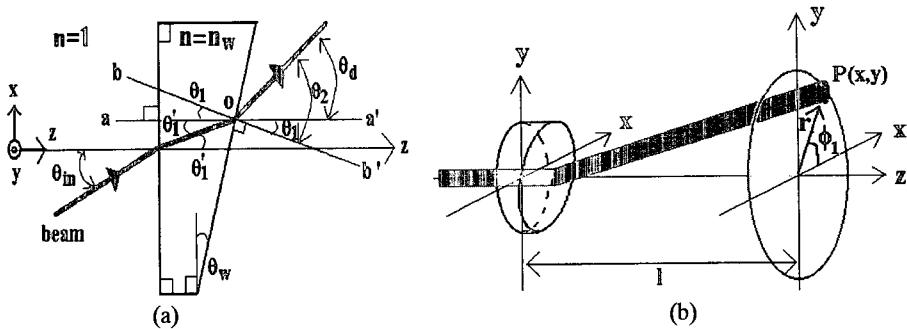


그림 1. 쇄기 프리즘에서의 빔 굴절. (a) 쇄기 프리즘 단면과 빔 굴절 구조. (b) 스크린, 즉 \$(x, y)\$ 평면에서의 빔위치.

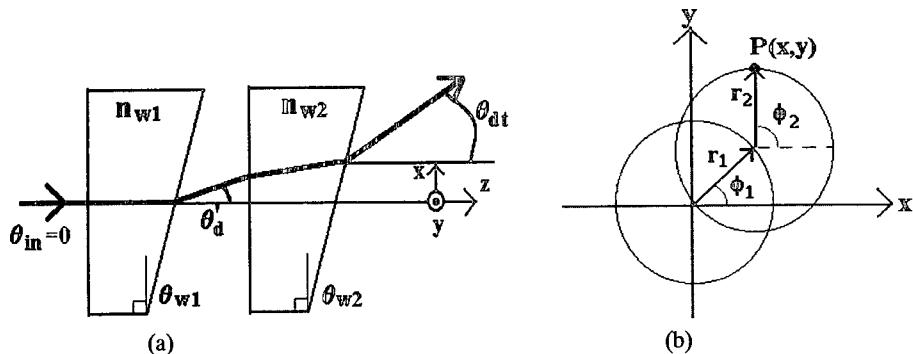


그림 2. 두 개의 쇄기 프리즘에 의한 빔 굴절. (a) 두 개의 쇄기 프리즘의 빔 굴절 구조. (b) 각 프리즘의 회전각 \$\phi_1\$과 \$\phi_2\$에 따른 출력빔의 위치.

θ_{in} 이 0일 때, 쇄기프리즘을 z축을 회전축으로 하여 회전시키는 경우를 생각하자. 이 프리즘 뒤에, 프리즘으로부터 거리 \$l\$ 만큼 떨어진 \$x\$-\$y\$ 평면에 스크린을 두어 그림 1(b)처럼 입력빔이 도달하는 지점 \$P\$를 관측한다면, \$P\$점의 \$x\$, \$y\$좌표값은

$$x + jy = r \exp(j\phi_1) \quad (2)$$

로부터 얻을 수 있다. 단, \$j\$는 \$\sqrt{-1}\$을 의미하고, \$r=l \tan \theta_d \approx l\theta_d\$, \$\phi\$는 쇄기 프리즘이 z축으로부터 회전된 각을 나타낸다.

만약 그림 2(a)와 같이 2개의 쇄기 프리즘을 가깝게 직렬로 위치시키는 경우를 생각하자. 두 프리즘 사이의 거리는 \$l_p\$라 한다. 두 번째 프리즘에 입사하는 빔의 각도는 첫 번째 프리즘에 의해 굴절된 각 \$\theta_d\$'이므로 최종 굴절각 \$\theta_{dt}\$는 식 (1)로부터, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_{dt} \approx \theta_{d1} + \theta_{d2} = (n_{w2}-1)\theta_{w2} + (n_{w1}-1)\theta_{w1} \quad (3)$$

여기서 \$\theta_{dt}\$은 첫 번째 쇄기 프리즘만에 의한 굴절각이고, \$\theta_{d2}\$는 두 번째 쇄기 프리즘만에 의한 굴절각이다. 이때 두 개의 프리즘을 z축을 회전축으로 하여 각각 \$\phi_1\$과 \$\phi_2\$ 만큼씩 회전시킨다면 두 프리즘으로부터 충분히 멀리 떨어진 거리 \$l\$에(즉, \$l > l_p\$인 곳에) 위치한 스크린에서의 빔의 좌표값 \$x\$, \$y\$는

$$x + jy = r_1 \exp(j\phi_1) + r_2 \exp(j\phi_2) \quad (4)$$

로부터 얻을 수 있다. 이를 그림 2(b)에 나타내었다. 여기서, \$r_1 = l \tan \theta_{d1} \approx l\theta_{d1}\$, \$r_2 = l \tan \theta_{d2} \approx l\theta_{d2}\$이다. 두 개의 쇄기 프리즘이 동일한 것이라면 \$\theta_{d1} = \theta_{d2} = \theta_d\$, \$r_1 = r_2 = r\$이고, \$\theta_1\$과 \$\theta_2\$를 적절히

제어하면 \$x\$-\$y\$평면에 반경이 \$2r\$인 원내부의 임의의 지점으로 빔을 보낼 수 있다. 일반적으로 두 쇄기 프리즘을 각각 각속도 \$\omega_1\$과 \$\omega_2\$로 회전시키면 \$x=x(t)\$, \$y=y(t)\$의 좌표 궤적은

$$x(t) + jy(t) = r \exp[j(\omega_1 t + \phi_1)] + r \exp[j(\omega_2 t + \phi_2)] \quad (5)$$

로 표현된다. 예를 들어 \$\theta_1 \neq \theta_2\$이고, \$\omega_1 = \omega_2 = \omega\$면 반경 \$2r \cos[(\theta_1 - \theta_2)/2]\$, 각속도 \$\omega\$로 빔을 회전시킬 수 있다. 또 \$\theta_1 = \theta_2 = 0\$이고, \$\omega_1 = -\omega_2\$라면 (즉 같은 각속도로 서로 반대로 회전시키면) 식 (5)에서 \$x(t) = 2r \cos(\omega t)\$, \$y(t) = 0\$ 이므로 \$-2r \leq x \leq 2r\$ 범위에서 직선운동을 얻을 수 있다. 이는 두 쇄기프리즘의 \$y\$ 축 굴절 성분이 서로 반대가 되어 상쇄되므로 \$x\$축만으로 빔을 꺾어 보내기 때문이다. 결국 스크린 대신에 초점거리가 \$l\$보다 작은 렌즈를 두면 쇄기 프리즘에 의해 굴절된 빔을 다시 \$z\$축의 한점에 수렴시킬 수 있다. 이 렌즈의 초점거리를 \$f\$라 하고, 이 렌즈에서 \$z\$축상의 수렴되는 점까지의 거리를 \$z_f\$라 하면, Gauss의 렌즈법칙 \$1/l + 1/z_f = 1/f\$로부터 \$z_f = lf/(l-f)\$이다. \$f\$가 \$l\$과 비슷하면 \$z_f\$는 매우 길어진다. 그러나 몇 개의 렌즈를 조합하면 \$z_f\$를 짧게 할 수 있다.

2.2. 허로그램 기록 구조

앞 절에서 설명한 방법을 이용하여 그림 3과 같은 두가지 구조의 허로그램 기록 시스템을 설계하였다. 그림 3(a)는 예각기록구조를, 그림 3(b)는 \$90^\circ\$ 기록구조를 나타낸다.

그림 3(a)의 예각 기록구조의 경우, 쇄기 프리즘을 통과한 기준빔 \$R\$과 정보를 담고 있는 신호빔 \$S\$의 각도가 예각으로

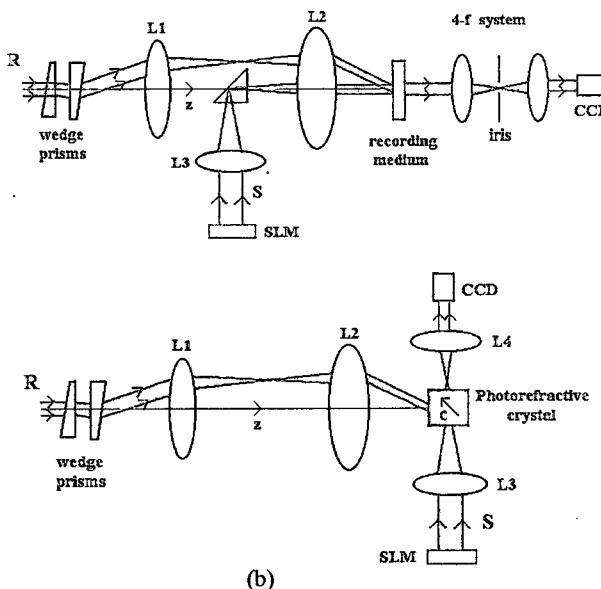


그림 3. 두 개의 쪼개기 프리즘을 이용한 홀로그램 기록 시스템의 구조. (a) 예각 기록구조. (b) 90°기록구조.

이루어져 있으며, 기준빔은 두 개의 렌즈(L_1, L_2)에 의해 항상 한곳의 위치에 도달되도록 하였다. 신호빔은 직각프리즘(혹은 거울)을 이용하여 렌즈(L_2)를 통해 기록매질에 입사된다. 이때, 공간광변조기(SLM)에서 표현된 영상은 렌즈 L_3 및 L_2 에 의해 이미지면에서 기록된다. 다중기록을 위해서는 두 쪼개기 프리즘의 상대적 회전각을 이용하여 각다중 및 회전다중을 수행하고, 기록매질을 z 축에 수직되는 방향으로 이동시켜 공간다중화를 추가할 수 있다. (공간다중화를 충분히 많이 하기 위해서는 기록매질을 상용화된 compact disk처럼 나선으로 회전시키는 것이 바람직할 것이다.) 그리고 홀로그램 재생에서는 조리개를 이용하여 올바른 각도로 기록된 것만 선택하고, 이를 CCD 센서에서 읽는다. 물론 이 구조에서 L_3 를 사용하지 않으면 Fourier 면에서 기록할 수 있다.

그림 3(b)의 90° 기록구조에서는, 기준빔과 신호빔이 거의 90°로 교차하는 경우이다. 여기서도 기준빔을 쪼개기 프리즘을 이용하여 제어함으로써 각다중 및 회전다중을 얻고 기록매질을 z 축과 수직인 평면에서 이동시킴으로써 공간다중을 얻는다. 렌즈 L_3 를 이용하여 신호빔을 Fourier 변환하여 Fourier면 근처에서 기록한다.

III. 실험

제안한 두 기록구조에 대해 각각 실험하였다. 광원으로는 파장 $\lambda=514 \text{ nm}$ 인 Ar^+ 레이저를 사용하였다. 두 쪼개기 프리즘의 빔굴절각은 모두 $4^\circ(\theta_s=7^\circ40')$ 이며, 두개의 회전마운트를 이용하여 이들을 각각 회전시켰다. 그리고 기록매질을 x-y 트랜슬레이터에 얹어 공간다중화를 얻었다. 기록하고자 하는 영상은 공간광변조기(SLM) 대신에 $100 \mu\text{m}$ 간격의 균일한 이진 정보로 표현되어 있는 check 패턴의 glass mask를 사용하였다.

3.1. 예각 기록 구조의 실험 결과

그림 3(a)의 예각기록구조의 시스템에 사용한 기록매질은 $38 \mu\text{m}$ 두께의 DuPont사의 광폴리머이고, 영상면에서 기록하는 형태로서 기록할 신호빔의 크기는 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 정도이다. (약 400 픽셀이 기록된다.) 이를 CCD를 통해 직접 얻은 결과를 그림 4(a)에 나타내었다. 기록을 위해 사용되어진 기준빔의 세기는 50 mW/cm^2 이고 신호빔의 세기는 25 mW/cm^2 이였다. 신호빔 세기가 약한 것은 신호빔이 기준빔에 소신호처럼 실려 기록매질에서 쉽게 포화되는 것을 막아 줌으로써 저장되는 영상의 왜곡을 줄이기 위해서이다.^[9]

이 시스템에서 각선택도 $\Delta\theta_A$ 및 이미지면에서 기록할 경우 회전선택도 $\Delta\theta_R$ 은 각각

$$\Delta\theta_A = \frac{\lambda}{nL} \frac{\cos\theta_s}{\sin(\theta_R + \theta_s)} \text{ (radian)} \quad (6)$$

$$\Delta\theta_R = \frac{2\lambda}{\delta(\sin\theta_s + \sin\theta_R)} \text{ (radian)} \quad (7)$$

이다.^[2,3] 여기서 L 은 기록매질의 두께이고, n 는 굴절률, δ 는 기록하고자 하는 정보의 픽셀 크기, θ_s 는 신호빔의 입사각도, θ_R 은 기준빔의 입사각도이다. 우리의 시스템에서는 $L=38 \mu\text{m}$, $\theta_s=0^\circ$, $\theta_R=30^\circ$, $n=1.514$, $\delta=100 \mu\text{m}$ 이므로 $\Delta\theta_A=1.0^\circ$ 이었고, $\Delta\theta_R=1.2^\circ$ 이었다.

실제로 홀로그램 다중기록할 때에는 위에서 계산된 각보다 더 큰, 약 3도 간격으로 각다중화를 3 곳에서 수행하였고, 또 15도 간격으로 총 20회의 회전다중 기록을 수행하였다. 그리고 광폴리머를 2 mm 씩 이동시키며 총 3 곳에 홀로그램을 반복기록함으로써 공간다중화를 추가적으로 실현하였다. 따라서 다중 기록한 홀로그램은 총 180개이다. 기록 후 홀로그램을 fixing하기 위해 균일한 자외선을 1분간 노출시켜 폴리머에 더 이상의 광반응이 없도록 하였다.

한곳에 기록된 총 60개의 홀로그램이 균일한 회절효율을 갖도록 하기 위해 참고논문[10]의 방법을 사용하였다. 이 방법으로부터 얻어진 노출시간표는 그림 4(d)에 나타내었다. 광폴리머의 홀로그램 기록특성이 S자 형태의 비선형적이므로 동일한 홀로그램 회절효율을 얻기위해서는 이 비선형적인 특성을 고려하여 기록시간을 정해 주어야 한다. 이들 기록된 전체 180개의 홀로그램의 회절효율을 그림 4(e)에 나타내었다. 그리고 재생된 영상을 중에서 50 번째 영상을 그림 4(b)에 보였다. 이들 재생된 영상에 대해 문턱화 작업을 수행한다면 흑백이 분명히 분간될 것으로 판단되었다.

특히 기록된 영상이 균일한 이진정보로 동일한 형태이므로 기록매질에 신호빔을 입사하게 되면 다중기록을 위한 여러 각도의 기준빔을 모두 읽어 낼 수 있다.^[11,12] 이 결과를 그림 4(c)에 나타내었다. 실제 한곳에 기록매질에 총 60개 기록되어 있으므로 총 60개의 기준빔에 대응되는 회절빔을 얻을 수 있다. 그럼에서 이들 회절빔이 완전한 원형으로 나타나 보이지 않는 것은 빔이 원뿔모양으로 회절되어 나오지만 스크린을 비스듬히 두어 옆에서 사진을 찍었기 때문이다.

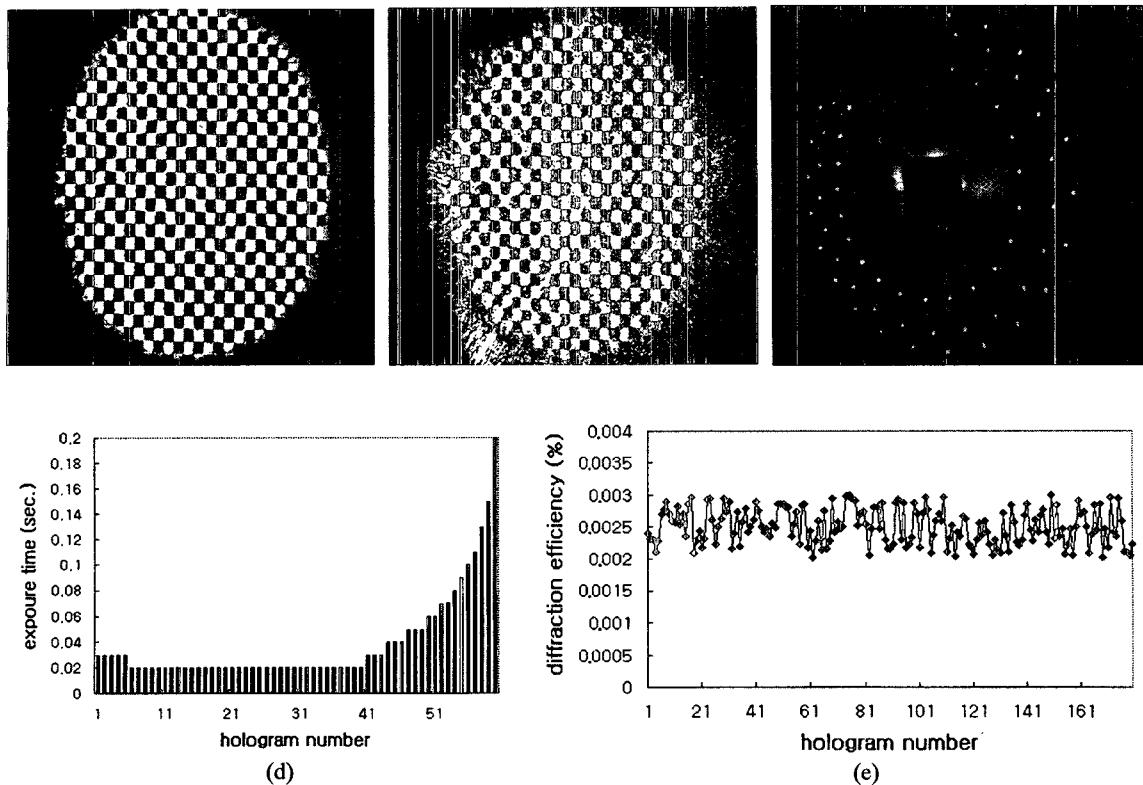


그림 4. 예각 기록구조의 시스템에 대한 실험결과. (a) 기록하고자 하는 원래 영상. (b) 기록된 180개의 홀로그램 중 50 번째 재생된 홀로그램. (c) 한곳에 기록된 총 60개의 기준빔에 대응되는 회절빔들. (d) 균일한 회절효율을 얻기 위한 노출시간표. (e) 재생된 180개의 홀로그램의 회절효율.

3.2. 90도 기록 구조의 실험 결과

그림 3(b)의 90°기록 구조의 시스템으로는 기록매질로 0.01%의 철 불순물이 함유된 45°-cut LiNbO₃, 단결정을 사용하였으며, 그 크기는 1 cm × 2 cm × 1 cm 이다. 기록을 위해 사용되어진 기준빔의 세기는 3 W/cm²이고 신호빔의 세기는 60 mW/cm² 이였다.

사용한 광굴절 결정의 각선택도는 식 (6)으로부터 $\Delta\theta_A \approx 0.0013^\circ$ 이다. 그러나 회전선택도는, 제안한 시스템이 Fourier 면에서 기록되므로, 참고논문 [2]와 같이 두께가 고려된 회전선택도를 사용하였다. 기록매질의 두께 $L=10$ mm이고, $\theta_s=0^\circ$, $\theta_R=90^\circ$ 이므로

$$\Delta\theta_A = \left\{ \frac{2\lambda}{L} \left[\frac{\cos\theta_s}{\sin\theta_R(\theta_s + \theta_R)} \right] \right\}^{1/2} \text{(radian)} \quad (8)$$

에 의해 $\Delta\theta_A \approx 0.58^\circ$ 이다. 여기서 L 은 기록매질의 두께이고, 10 mm이다.

실제 기록 실험에서는 0.8°씩 9번의 각다중을 실현하였다. 광굴절 결정에서 회전다중으로 기록할 경우, 기준빔 R 이 회전하므로 신호빔 S 와 기준빔 R 이 이루어 평면($R-S$ 면)에 결정의 c 축이 놓이지 않는 경우가 생긴다. c축이 $R-S$ 면에서 크게 벗어나면 홀로그램 기록이 되지 않으므로, 넓은 범위의 회전다중은 수행할 수 없다.^[7] 그러므로 본 논문에서는 약 2도 간격으로 상하로 많게는 7개씩, 적게는 1개를 회전다중으로 기

록하였다. 한곳에 각다중과 회전다중을 결합하여 기록한 홀로그램의 개수는 총 49개이었다. 그림 5는 49개의 회전 및 각다중을 위해 기준빔이 2개의 쪼개 프리즘에 의해 어떻게 제어되었는지를 보여주고 있다. 즉, 두 쪼개 프리즘으로부터 단위거리 1 만큼 떨어진 곳에 스크린을 두었을 때 기준빔이 도달하는 위치를 작은 원으로 표시한 것이다. 회전다중을 뜻하는 세로축과 각다중을 뜻하는 가로축의 스케일이 서로 다름에 유의하라.

광굴절 결정에 균일한 회절효율의 홀로그램을 얻기 위한 노출시간표를 작성하였다.^[13] 먼저 실험에 사용한 매질에 대한 특성을 조사하였는데, 사용된 빔의 세기에 대해 기록 시상수 τ_r 는 약 8초이고 지워짐 시상수 τ_w 는 약 80초 정도였다. 이를 사용하여 총 49개의 홀로그램에 대한 노출시간표를 계산하였다. 광굴절 결정에서는 광풀리와는 달리, 홀로그램을 기록하면 이전에 기록된 홀로그램이 지워지므로 먼저 기록하는 홀로그램에 많은 노출시간이 주어지게 된다. 이를 그림 6에 나타내었다. c 축이 $R-S$ 평면에서 벗어나는 효과는 그 정도가 작아서 고려하지 않았다.

기록하고자 하는 영상은 5 mm × 5 mm 정도의 크기이며 이를 Fourier 면에서 기록하였다. 기준빔 R 의 직경은 대략 2 mm 이었다. 공간다중은 결정을 2 mm씩 이동시킴으로써 3 곳에 수행되었고, 총 147개의 홀로그램을 기록하였다. 홀로그램의 fixing은 하지 않았고, 기록된 홀로그램을 기록할때와 같은 파장의 약한 빔으로 재생함으로써 천천히 지워지도록 하여

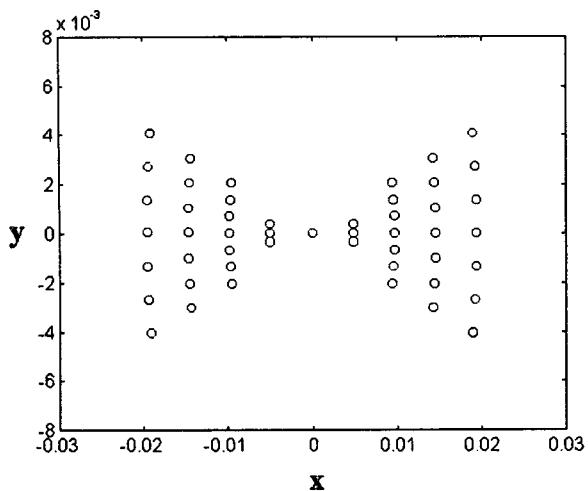


그림 5. 90°기록구조에서 각다중과 회전다중을 위한 기준빔 R 의 위치.

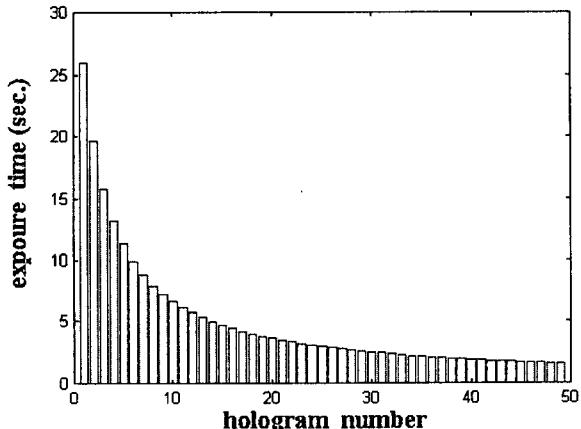


그림 6. 균일한 회절효율을 얻기 위한 노출시간표.

각각의 회절효율을 측정하였다. 기록된 홀로그램들 가운데 임의로 10 번째 재생된 영상을 그림 7(a)에 나타내었으며, 147개의 홀로그램 회절효율을 그림 7(b)에 나타내었다. 회절효율 측정과정에서 홀로그램이 다소 지워져서, 홀로그램 번호가 증가할수록 49개 단위로 회절효율이 다소 감소함을 볼 수 있다. 여기서도 흑백 픽셀을 문턱화한다고 가정할 때 오류는 없어 보였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 한 쌍의 끼기 프리즘을 사용하여 기준빔을 직접 제어함으로써 회전다중과 각다중을 수행하고, 기록매질을 이동함으로써 공간다중을 수행할 수 있는 복합구조 홀로그램 기록방법을 제안하였다. 기록매질을 평면에서 이동시켜 공간다중화 할 수 있다는 것은, 상용화된 compact disk처럼 기록매체를 회전시켜가며 (엄밀히 말해 나선으로 회전시켜가며) 충분히 많은 정보를 저장할 수 있음을 뜻한다. 제안한 방식의 가능성을 실험적으로 보이기 위해 예각 기록구조의

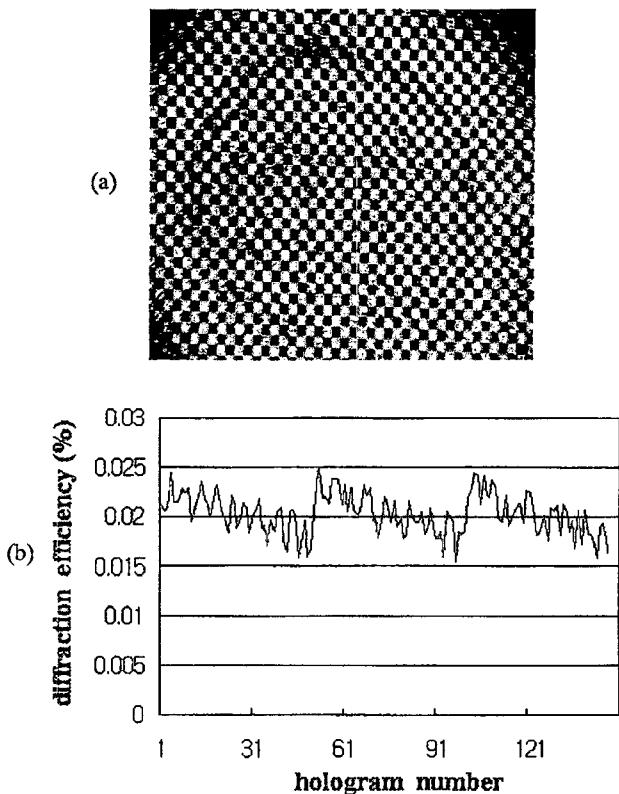


그림 7. 90도 기록구조의 실험결과. (a) 10번째 재생된 홀로그램. (b) 147개의 홀로그램에 대한 회절효율.

시스템과 90°기록구조의 시스템을 구현하였다. 예각기록구조에서는 광폴리머에 총 180개의 다중홀로그램을 기록하였고, 90°기록구조에서는 광굴절 결정을 이용하여 총 147개의 홀로그램을 기록하는 실험을 수행하였다. 앞으로 충분히 많은 수의 홀로그램을 기록하고 재생하며, 오류율을 측정하는 실험이 수행될 것이다. 그리고 이 방식은 홀로그래피메모리 뿐만 아니라 광학적 특징추출 방법과 같은 응용에 유용하게 사용되어질 수 있다.^[11,12]

참고논문

- [1] J. F. Haneue, M. C. Bashaw and L. Hesselink, "Volume holographic storage and retrieval of digital data", *Science*, **265**, 749(1994).
- [2] K. Cultis, A. Pu and D. Psaltis, "Method for holographic storage using peristrophic multiplexing", *Opt. Lett.*, **19**, 993(1994).
- [3] J. H. Hong, L. McMichael, T. Y. Chang, W. Christian and E. G. Paek, "Volume holographic memory system: techniques and architectures", *Opt. Eng.*, **34**, 2193(1995).
- [4] H. S. Li and D. Psaltis, "Three-dimensional holographic disks", *Appl. Opt.*, **33**, 3764(1994).
- [5] J. F. Haneue, M. C. Bashaw and L. Hesselink, "Encrypted holographic data storage based on orthogonal-phase-code multiplexing", *Appl. Opt.*, **34**, 6012(1995).
- [6] D. Psaltis and A. Pu, "Holographic 3-D disks", *Op-*

- toelectronics, **10**, 333(1995).
- [7] E. Chuang and D. Psaltis, "Storage of 1000 holograms with use of a dual-wavelength method", Appl. Opt., **36**, 8445(1997).
- [8] J.-S. Jang and D.-H. Shin, "Implementation of holographic storage system by combined use of rotational, angle, and shift multiplexing methods", SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, 19-24 July 1998, San Diego, California, USA, accepted for presentation.
- [9] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, New York, 1996), chap. 9.
- [10] A. Pu, K. Cultis and D. Psaltis, "Exposure schedule for multiplexing holograms in photopolymer films", Opt. Eng., **35**, 2824(1996).
- [11] J.-S. Jang and D.-H. Shin, "Parallel optical-feature extraction by use of rotationally multiplexed holograms", Opt. Lett., **21**, 1612(1996).
- [12] D.-H. Shin and J.-S. Jang, "Optical implementation of the Hough transform by use of rotationally multiplexed holograms", Appl. Opt., **37**, 329(1998).
- [13] D. Psaltis, D. Brady and K. Wagner "Adaptive optical networks using photorefractive crystal", Appl. Opt., **27**, 1752(1988).

Holographic recording system by combined use of rotational, angular, and spatial multiplexing method

Dong-Hak Shin and Ju-Seog Jang
Telematics Engineering, Pukyong National University

(Received March 7, 1998, Revised manuscript received May 25, 1998)

To increase the storage density in hologram recording, a simple scheme to obtain rotational, angular and spatial multiplexing efficiently at the same time is proposed and experimented. Both rotational multiplexing and angular multiplexing are obtained by controlling the reference beam directly by use of a pair of wedge prisms, while spatial multiplexing is obtained by shifting the recording medium in the recording plane. It is possible to get both an acute-angle geometry, in which the angle between the signal and reference beams is less than 90°, and a 90° geometry, in which the angle is approximately 90°. In experiment, 180 holograms were multiplexed with an acute-angle geometry where a photopolymer was used for the recording medium, and 147 holograms with 90° geometry where a Fe-doped LiNbO₃ crystal was used. The proposed scheme makes it easy to realize a practical holographic memory system by simplifying the control of three complex mechanical motions that are necessary for the three multiplexing techniques.