《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 10, Number 4, August 1999
(Journal of the Optical Society of Korea-Korean Edition)

이진 위상 홀로그램을 이용한 칼라 영상의 구현

서호형

한국전자통신연구원 원천기술연구본부

(1999년 3월 7일 받음, 1999년 6월 2일 수정본 받음)

이진 위상 홀로그램과 *R, G, B*색을 내는 세 종류의 레이저를 이용하여 칼라 영상을 재생 시키는 원리를 제안하고 실험으로 그 결과를 확인하였다. 사용된 세 개의 레이저의 파장은 각각 632.8 nm(*R*), 543.5 nm(*G*), 488 nm(*B*) 이다. 또한 세 개의 홀로그램의 주기를 파장에 비례하게 설계 제작하여 각 홀로그램에 특정한 파장의 레이저 빛만 통과하도록 하였다. 각 홀로그램으로부터 회절 되어 나온 영상은 출력면에서 한곳으로 합해져 칼라 영상이 구현된다.

I. 서 론

이진 위상 홀로그램(binary phase hologram: BPH)은 균일한 또는 임의의 세기를 갖는 원하는 영상을 퓨리에 프라운호퍼(Fourier-Fraunhofer) 회절패턴으로 출력면에서 얻게 해주는 컴퓨터 생성 홀로그램의 일종이다.[1-3] 제작된 이진위상 홀로그램은 레이저 평면광과 퓨리에 변환 렌즈를 이용하여 광학적으로 퓨리에 변환을 시키면 렌즈의 초평면(focal plane)에서 원하는 영상이 재생된다.

위와 같은 BPH는 설계 및 제작이 용이하고 그 응용분야가 다양해 자유공간 광 연결이나, 광 정보처리 분야에서 많이 연구되어 왔다.[4-6] 하지만 BPH의 재생에는 단색광 레이저를 이용해야만 하기 때문에 칼라 영상의 재생이 불가능하였다. 이진 위상 홀로그램을 이용하여 칼라영상을 재생할 수 있다면 영상의 디스플레이에 시각적효과 뿐만 아니라 광 정보처리 분야에 그 응용성 및 유용성을 증가 시켜준다고 할 수 있다.

본 논문에서는 *R, G, B* 세 개의 레이저와 이진위상 홀로그램을 이용하여 칼라 영상의 재생을 가능하게 하는 방식을 처음으로 제안하였고 또한 이를 실험적으로 구현하였다.

II. 칼라영상구현의 원리

홀로그램이나 회절격자의 파장분산 특성에 의하여 입력광의 파장에 따라 그 회절각도가 달라지게 된다. 예를 들어 파장이 λ인 입력광이 공간 주기가 *d*인 회절격자에 입사할 때 다음과 같은 회절식을 만족한다.[7]

$$\sin\alpha - \sin\beta = \frac{m\lambda}{d}, \ (m = 0, \pm 1, \pm 2, \ ...) \tag{1}$$

여기서 α와 β는 각각 입사각과 회절각을 나타내고, *m*를 회절 차수를 나타낸다. 또한 이 격자에서 회절되는 빔을 렌즈를 통하여 집광을 시키면 같은 각도로 회절 되는 빛들은 한점에서 모이게 된다. 이진 위상 홀로그램은 이와 같은 성질을 이용하여 초평면에서 원하는 회절차수가 일정한 빛의 세기를 갖는 집점광(spot)들로 이루어진 출력영상을 얻도록 컴퓨터로 설계 제작된 홀로그램이다. 레이저의 파장이 λ이고, 렌즈의 초점이 *f*, 홀로그램의 한 주기가 *P*일 때 출력면에서 영상을 구성하는 인접한 집점광들 사이의 간격 *S*는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$S = \frac{\lambda f}{P} \tag{2}$$

수식 (2)는 수식(1)에서 쉽게 유도가 가능하며, 또한 렌즈의 초점 *f*가 고정된 값이라고 가정하면 집점광의 간격 *S*는 파장 λ과 홀로그램의 주기 *P*에 따라 달라지게 된다. 따라서 파장이 다른 여러 개의 입력빔을 입사할 경우 파장에 따라 서로 다른 크기의 영상들이 겹쳐져 선명한 영상을 얻을 수 없게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하여 선명한 칼라영상을 얻기 위해서는 홀로그램을 세 부분으로 나누어 설계하고 주기가 다르게 제작하여 각 홀로그램에 특정한 파장의 레이저 빛만을 통과하도록 하면 된다.

그림 1은 BPH를 이용하여 칼라영상을 얻는 구체적인 원리를 나타낸다. 첫번째 과정에서는 얻고자 하는 칼라 영상(objective color image)을 파장이 각각 *P*(*R*), *P*(*G*), *P*(*B*)인 세 개의 영상으로 분리한다. 그 다음은 분리된 영상을 목표영상으로 하여 주기가 각각 *P*(*R*), *P*(*G*), *P*(*B*)인 세 개의 *R*, *G*, *B*홀로그램을 설계한다. 그 다음은 세 홀로그램을 한 평면에 인접하게 제작하고, 마지막으로 *R*, *G*, *B* 세 개의 레이저를 이용해 칼라영상을 재생시킨다.

이때 홀로그램은 공간적으로 분리되어 있기 때문에 특정 파장의 레이저만 특정 홀로그램을 통과하게 할 수 있다. 파장이 λ(*R*)은 레이저는 주기가 *P*(*R*)인 홀로그램을 통과하게 하고, 파장이 λ(*G*)은 레이저는 주기가 *P*(*G*)인 홀로그램을 통과하게 하고, 파장이 λ(*B*)은 주기가 *P*(*B*)인 홀로그램을 통과하게 한다. 홀로그램을 설계할 때는 원하는 영상의 적색 부분에 해당하는 영상은 *R* 홀로그램에서 재생되도록 설계하고, 녹색 부분에 해당하는 영상은 *G* 홀로그램에서 재생되도록 설계하고, 청색 부분에 해당하는 영상은 *B* 홀로그램에서 재생되도록 설계한다. 이 때 각 홀로그램의 주기 *P*(*R*), *P*(*G*), *P*(*B*)는 출력면에서 영상의 크기가 파장에 관계없이 항상 일정하게 하려면

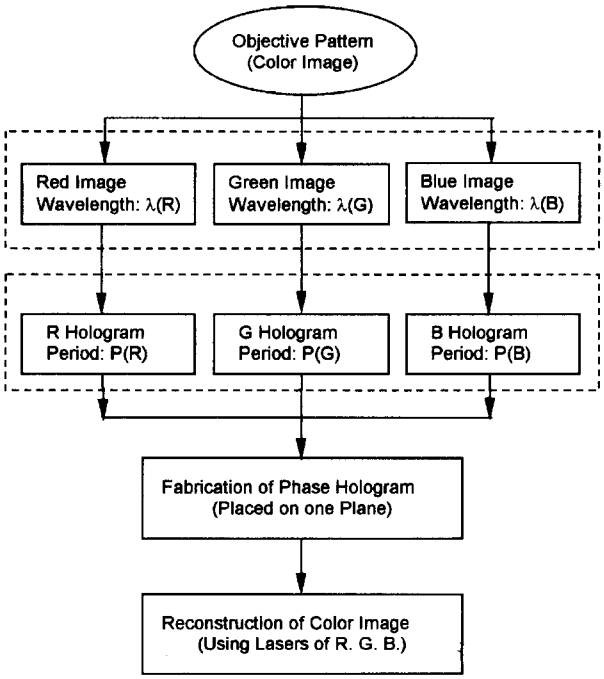

그림 1. 이진 위상 홀로그램을 이용하여 칼라영상을 구현하는 과정의 흐름도이다.

다음과 같은 식을 만족해야 한다.

$$S = \frac{\lambda(R)f}{P(R)} = \frac{\lambda(G)f}{P(G)} = \frac{\lambda(B)f}{P(B)} \tag{3}$$

또한 세 개의 홀로그램이 한 평면상에서 적당한 간격으로 떨어져 위치하지만 뒤에 놓인 렌즈 때문에 출력 영상은 각 홀로그램으로부터 나온 영상은 출력면에서 한곳으로 합해져 칼라 영상이 구현된다. 위와 같은 현상은 볼록 렌즈가 수식 (4)와 같은 이동 불변(Shift-invariant)의 성질을 가지고 있는 퓨리에 변환을 광학적으로 수행하기 때문이다.[8]

$$|F\{g(x - x_0)\}|^2 = |F\{g(x)\}|^2 \tag{4}$$

여기서 F{ }는 퓨리에 변환을 나타낸다. 이 때 렌즈는 단일 렌즈 대신에 구면수차와 색수차 등이 제거된 이중렌즈나 다중 렌즈를 사용한다.

III. 칼라 영상용 이진 위상 홀로그램의 설계

이차원 위상 홀로그램의 위상 투과 함수를 $g(x, y)$라 하고 이것의 퓨리에 변환을 $G(m, n)$이라 하면 스칼라 회절이론에 의하여 이 홀로그램이 파장이 λ인 레이저 빔과 초점거리가 f인 퓨리에 변환렌즈에 의한 초 평면에서 회절 된 영상은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} I(\alpha,\beta) &= \left(\frac{1}{\lambda f}\right)^2 \left| \iint g(x,y)\exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda f}(\alpha x + \beta y)\right]dxdy \right|^2 \\ &= \left(\frac{1}{\lambda f}\right)^2 \left| G\left(\frac{\alpha}{\lambda f}, \frac{\beta}{\lambda f}\right) \right|^2 \end{aligned} \tag{5}$$

만약 세 개의 이진 위상 홀로그램이 한 평면에 적당한 간격으로 인접해 있고 각 홀로그램을 특정한 파장의 레이저만을 통과 시킨다면 홀로그램의 위상 투과 함수는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$g(x, y) = \sum_{k=1}^{3} \delta(\lambda - \lambda(k)) g_k(x - x_k, y - y_k) \tag{6}$$

여기서 $\lambda(k)$는 k=1, 2, 3의 경우 각각 $\lambda(R)$, $\lambda(G)$, $\lambda(B)$를 나타내고 (x_k, y_k)는 각 홀로그램이 위치한 좌표를 나타낸다.

위와 같이 세 개의 홀로그램을 이용하는 방법은 한 홀로그램만을 사용했을 때 얻어지는 영상이 파장에 따라서 크기가 달라지는 문제점을 해결할 수 있으며, 또한 렌즈를 통해서 출력이 한곳에서 재생되기 때문에 색의 합성이 가능해 R, G, B 이외의 색을 갖는 영상도 쉽게 얻을 수가 있다.

홀로그램을 설계 할 때는 한 주기 내의 모든 정보가 $N \times N$ 개의 셀(cell)에 0 또는 π 위상 값으로 저장된다. 이때 위상 투과함수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$g_k(x, y) = \sum_{m,n}^{N} exp(i\psi_{n,n}) rect\left[\left(\frac{x - (m/N)}{1/N} + \frac{y - (n/N)}{1/N}\right)\right] \tag{7}$$

원하는 목표영상이 나오도록 하기 위해서는 모든 (m, n)에 대하여 홀로그램이 적절한 위상 값 을 갖도록 하여야 한다. 이러한 과정은 반복적인 알고리듬을 사용하여 코스트 함수(cost function)의 최적화를 통하여 이루어진다. 코스트 함수는 회절효율과 출력영상의 균일도에 대한 정보를 가지고 있으며, 초기에 홀로그램의 모든 셀들의 위상을 0 또는 $\psi_{m,n}$의 값의 무작위로 갖게 한 다음 코스트 함수를 감소시키는 방향으로 각 위상을 0에서 π 또는 π에서 0으로 변환시킨다. 이러한 최적화 과정은 코스트 함수 값이 적절한 값에 이를 때까지 계속되며 회절효율과 균일도가 특정한 값에 도달되면 홀로그램의 설계가 완료된다.

한편 홀로그램의 위상 셀의 크기가 모두 일정하기 때문에 홀로그램의 주기 P는 셀의 수인 N에 비례하게 된다. 또한 R, G, B 세 개의 홀로그램을 설계할 때 셀의 수는 수식 (3)에서 보는 바와 같이 파장에 비례하게 정해야 한다.

따라서 홀로그램의 셀의 수(주기에 비례)는 다음과 같은 비로 구해진다.

$$x : y : z = \lambda(R) : \lambda(G) : \lambda(B) \tag{8}$$

예를 들어 현재 상용화된 레이저의 파장으로 가능한 것은 He-Ne 레이저의 $\lambda(R) = 632.8$ nm 및 $\lambda(G) = 543.5$ nm, 그리고 Ar 이온 레이저의 $\lambda(B) = 488$ nm이 있다. 수식 (8)의 비율로 구해지는 셀 수의 정수 값이 적절한 범위 내에서 구할 수 없다 할지라도 다음과 같이 정의된 C의 값을 최소화 시킴으로 수식 (8)에 가장 근접한 정수의 비를 구할 수 있다.

$$C = |x - N(R)| + |y - N(G)| + |z - N(B)| \tag{9}$$

예를 들어 각 파장별로 셀의 수가 100에서 300 사이의 값으로 수식 (9)을 최소화 시키는 $N(R) : N(G) : N(B)$의 정수비는 262 : 225 : 202가 된다. 따라서 R, G, B 홀로그램의 주기의

비를 262 : 225 : 202가 되게 하면 된다.

IV. 실험결과 및 토의

실험으로 재생하고자 하는 영상으로는 *R, G, B*칼라로 구성된 ETRI 로고를 택하였다. ETRI 로고는 적색의 T자, 청색의 E, R, I자, 그리고 녹색의 부분 원형 모양으로 구성되어있다.

그림 2(a)는 적색의 T자에 대한 목표 영상이고, 그림 2(b)는 한 주기가 262×262개의 셀로 설계된 *R* 홀로그램의 한 주기 패턴을 나타낸다. 그림 3(a)는 부분 원형에 해당되는 녹색의 목표 영상이고, 그림 3(b)는 한 주기가 225×225개의 셀로 설계된 *G* 홀로그램의 한 주기패턴을 나타낸다. 그리고 그림 4(a)는 청색의 E, R, I에 대한 목표 영상이고, 그림 4(b)는 한 주기가 202×202개의 셀로 설계된 B 홀로그램의 한 주기패턴을 나타낸다. 여기서 각 홀로그램 패턴의 흰 부분과 검정부분의 위상차는 π이다.

이진 위상 홀로그램은 광리소그라피방식을 이용하여 제작하였다.[9] 우선 설계된 홀로그램의 패턴은 전자빔 리소그라피에 의해 크롬이 입혀진 쿼츠 마스크에 진폭형으로 홀로그램 패턴을 새긴다. 그 다음 이 진폭형 홀로그램이 새겨진 포토 마스크를 이용해 포토레지스터 박막이 입혀진 기판에 밀착시킨 후 노광 및 현상과정을 통해 위상형 홀로그램이 얻어진다. 홀로그램 제작시 위상 셀의 크기를 2 μm로 하였기 때문에 R홀로

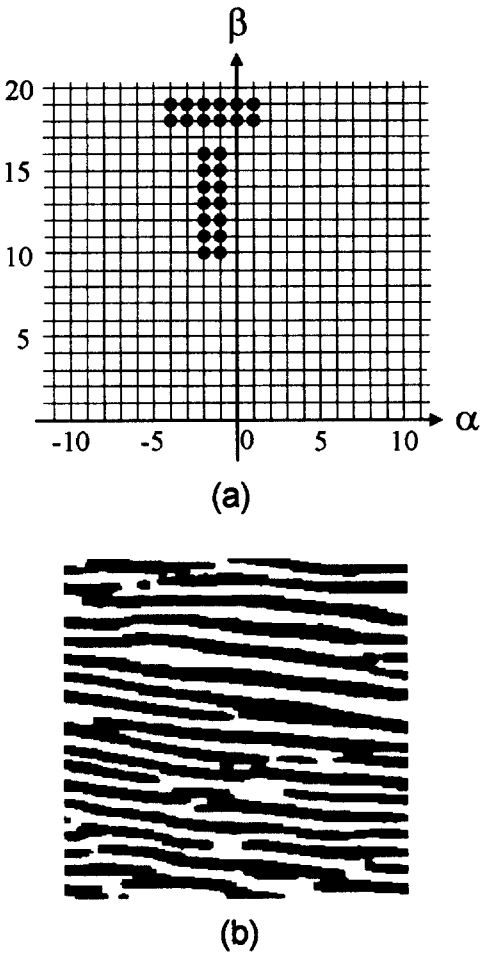

그림 2. (a) 적색의 T자에 대한 목표영상, (b) 한 주기가 262×262개의 셀로 설계된 *R* 홀로그램의 패턴.

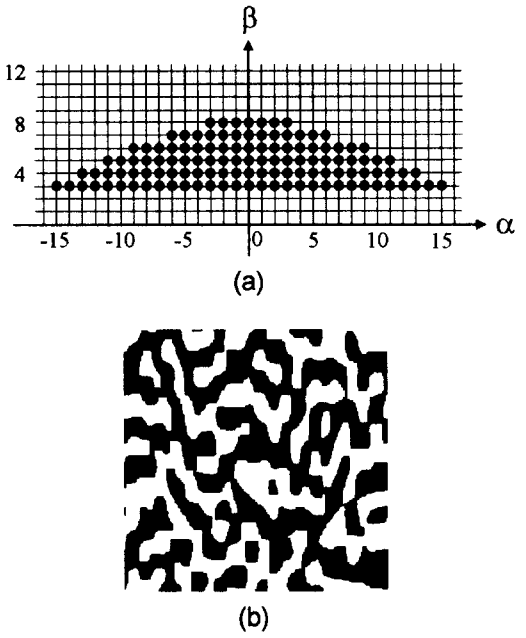

그림 3. (a) 부분 원형에 해당되는 녹색의 목표영상, (b)한 주기가 225×225개의 셀로 설계된 *G* 홀로그램의 패턴.

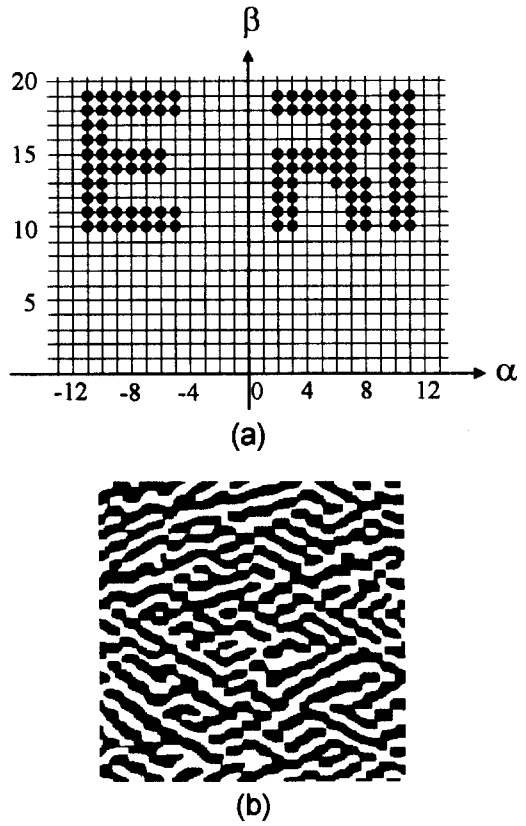

그림 4. (a) 청색의 E, R, I에 대한 목표영상, (b) 한 주기가 202×202개의 셀로 설계된 *B* 홀로그램의 패턴.

그램의 한 주기는 524 μm×524 μm, *G* 홀로그램의 한 주기는 450 μm×450 μm, 그리고 *B* 홀로그램의 한 주기는 404 μm×404 μm이다. 각 홀로그램은 직경 18 mm의 원을 삼 등분하여 각 부분에 300~500개의 주기를 복사하여 만들었다.

그림 5는 제작된 이진 위상 홀로그램을 이용해 칼라 영상을 재생하는 실험 장치도를 나타낸다. *R, G, B* 세 개의 레이저로부터 나온 빔들은 두 개의 프리즘 빔 분리기를 이용해 홀로그램의 각기 서로 다른 부분으로 입사 된다. 홀로그램을 지나 회절 된 광은 렌즈를 지난 후 렌즈의 초평면에 칼라 영상을 재생한다. 이 영상은 CCD 카메라와 PC에 장착된 프레임 그레버에 의해 모니터에 출력되며 PC에 저장된다.

그림 6는 실제로 재생된 칼라영상을 나타낸다. 예상대로 파장에 관계없이 동일한 간격의 집점광으로 구성된 칼라 영상을 얻을 수 있었다. 사용된 렌즈의 초점거리는 30 cm이며 인접한 집점광 사이의 간격은 약 360 μm 이다. 또한 출력영상의 중앙에 있는 흰색 빔은 *R, G, B* 세 빔이 합쳐져 생긴 것이고, 이는 홀로그램 제작 시 위상에 관여하는 포토레지스터의 두께가 일정하여 세가지 파장에 대하여 동시에 π의 위상차를 줄 수 없었기 때문에 나타나지만 전체적인 영상의 균일도 에는 영향을 주지 않는다. 하지만 홀로그램의 세 부분의 두께를 파장에 따라 다르게 만들 수 있다면 중앙 빔을 제거할 수 있을 것이다. 출력 영상이 원점을 중심으로 대칭된 상이 얻어진 이유는 홀로그램의 위상이 이진으로 구성되었기 때문이다. 홀로그램의 위상을 4개(0, π/2, π, 3π/2) 이상의 다중 위상 이나 결합형 이진위상 홀로그램으로 제작한다면 대칭 영상을 없앨 수 있다.[10] 또한 본 논문에서 사용된 이진 위상 홀로그램은 약 70%의 회절효율을 가지므로 나머지 부분은 원하는 영상이외의 노이즈로 나타난다. 하지만 이러한 노이즈는 신호영상에 비하여 상대적으로 매우 작은 값을 갖기 때문에 문턱화 작용을 통하여 쉽게 제거할 수 있다.

한편 본 논문에서 제안된 방식을 이용하여 *R, G, B* 이외의 임의의 색을 갖는 영상의 구현이 가능함을 보이기 위하여 그림 7과 같이 목표 영상을 선택하여 홀로그램의 설계하였다.

그림 7을 보면 원 띠 모양의 영상으로 되어있고 세 개의 홀로그램으로부터 얻어지는 *R, G, B* 영상이 출력면에서 서로 이웃하는 영상끼리 중첩이 되게 하고 중첩이 되는 부분에서는 서로 다른 색을 갖는 영상이 얻어지게 된다. 예를 들면 *R* 부

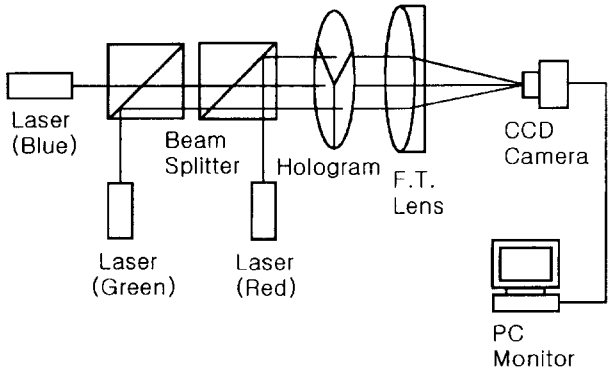

그림 5. 세 개의 레이저와 이진위상홀로그램을 이용해 칼라 영상을 구현 하는 실험 장치도.

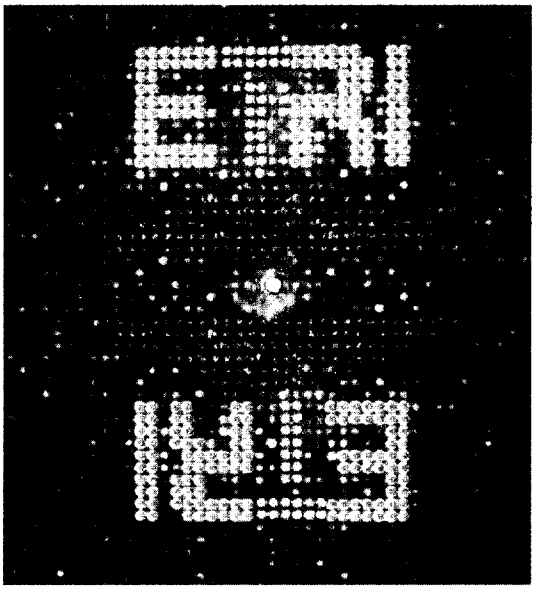

그림 6. 실험으로 얻어진 3색 ETRI로고 재생결과.

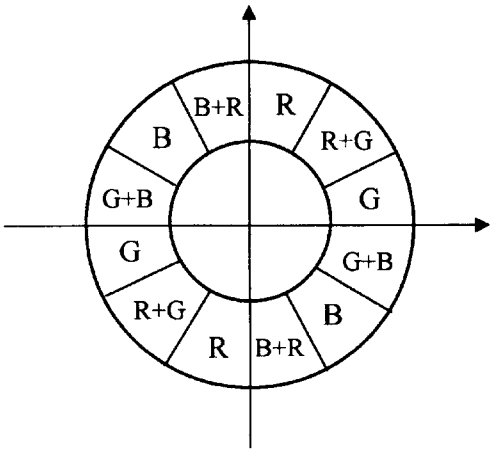

그림 7. 홀로그램 설계를 위한 6가지 칼라로 구성된 목표영상.

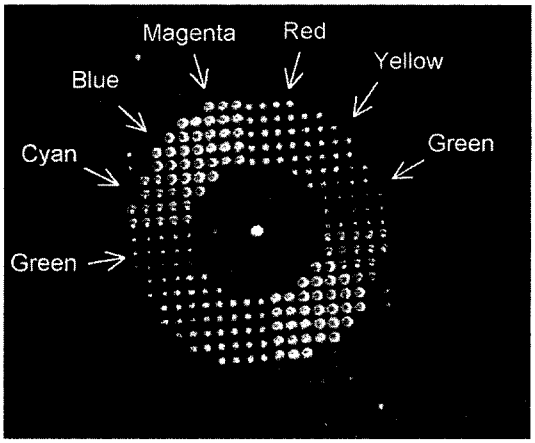

그림 8. 실험으로 얻어진 6가지 칼라영상의 재생 결과.

분과 B 부분이 합쳐져서 심홍색(Magenta) 영상이 되고, G 부분과 B 부분이 합쳐져서 청녹색(Cyan) 영상이 되고, R 부분과 G 부분이 합쳐져서 노란색(Yellow) 영상이 되어 R, G, B를 포함해 모두 6가지 색으로 구성된 영상이 얻어진다.

그림 8은 설계 제작된 이진위상 홀로그램을 이용해 얻어진 실험결과를 나타낸다. 예상하는 바와 같이 서로 다른 파장의 빛이 혼합에 의해 원하는 임의의 색을 갖는 칼라영상의 구현이 가능함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 이진 위상 홀로그램을 이용하여 칼라 영상을 재생 시키는 원리를 제안하고 실험으로 그 결과를 확인하였다. 사용된 세 개의 레이저의 파장은 현재 상용화 되고 있는 632.8 nm(R), 543.5 nm(G), 488 nm(B)이며, 또한 세 개의 홀로그램의 주기를 파장에 비례하게 설계 제작하여 하여 각 홀로그램에 특정한 파장의 레이저 빛만 통과하도록 하였다. 각 홀로그램으로부터 회절 되어 나온 영상은 출력면에서 한곳으로 합해져 칼라 영상이 구현된다. 실험으로 색이 R, G, B 만으로 구성된 ETRI 로고와, 또한 각각이 합쳐져 6가지 색을 갖는 영상을 재생하였다. 출력면에서 합쳐지는 각각의 색의 비율을 다양하게 되도록 목표 영상을 선택하면 홀로그램이나 레이저의 수의 증가 없이 임의의 색을 가진 천연색 영상도 재생시킬 수 있다.

참고문헌

[1] H. Dammann and K. Gortler, Opt. Commun. **3**, 312 (1971).
[2] J. N. Mait, J. Opt. Soc. Am. A, **7**, 1514 (1990).
[3] M. R. Feldman and C. C. Guest, Opt. Lett. **14**, 479 (1989).
[4] M. C. Nuss and R. L. Morrison, Opt. Lett. **20**, 740 (1995).
[5] H. H. Suh, C. H. Kwak, and E.-H. Lee, Opt. Lett. **20**, 2131 (1995).
[6] S. H. Song, H. H. Suh, and E.-H. Lee, IEEE Photon. Technol. Lett. **9**, 58 (1997).
[7] M. Born and E Wolf, Principle of Optics, New York: Pergamon, (1959).
[8] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill, New York (1968).
[9] 강봉균, 서호형, 이덕희, 김 남, 광리소그라피를 이용한 다중 위상 홀로그램의 제작, 한국통신학회논문지, 제23권, 제4호, pp1059-1065 (1998).
[10] 서호형, 이일항, 자유공간 광 연결을 위한 결합형 이진 위상 홀로그램, 한국광학회지 제7권, 제4호, pp328-332 (1996).

Full Color image generation using binary phase holograms

Ho Hyung Suh

Telecommunication Basic Research Laboratory, ETRI, Taejon 305-600, Korea

(Received March 17, 1999, Revised manuscript received June 2, 1999)

In this paper, the novel and simple scheme of producing full color image bye use of binary phase holograms and three lasers of red (632.8 nm), green (543.5 nm), and blue (488 nm) is presented. Three holograms are designed and fabricated separately so that different laser beams can pass through the different holograms. The diffracted beams from the holograms constitute the wanted color image at the focal plane. The theory and experimental results of the system are also presented.