

시간에 따라 변화하는 CGH의 공간 재구현

김상혁 · 정성락 · 조재칠 · 최상삼

한국과학기술연구원 정보전자연구부

조 규 만

서강대학교 물리학과

고 성 재

고려대학교 전기전자전파공학부

(1996년 9월 23일 받음)

본 연구는 움직이는 물체의 컴퓨터 합성 홀로그래피(CGH)의 동영상 디스플레이를 액정형 공간광변조기(OASLM)에 의하여 시도하였다. CGH는 계산하는 시간을 줄이기 위해서 horizontal parallel 방법을 사용하였고, 또한 계산하는데 시간이 오래 걸리는 삼각함수 계산과 자승근 계산부분을 미리 lookup table로 만들어 놓음으로서 계산속도를 향상시키고 저해상도 SLM에 맞춰 lookup table을 적용시키는 방법을 개발하였다. 그리고 이미 성공한 정지영상을 연속 디스플레이하여 동영상으로 표현하였고 스캐너를 이용하여 3개의 동영상을 분리하여 동시에 디스플레이하는 데 성공하였다.

I. 서 론

본 연구는 홀로그램을 이용하여 삼차원 영상 디스플레이 구현을 시도하였다. 이것을 홀로그래피 비디오라고 하며, 홀로그래피 비디오 기술은 기존의 입체영상을 보여주는 홀로그램의 기능을 그대로 활용하여 실시간으로 공간에 이의 삼차원 영상을 재구현함으로써 실지의 입체감을 줄 수 있는 반면에, 홀로그램 데이터의 정보량이 엄청나게 많아서 이를 대규모 스크린에 구현하기란 대단히 곤란한 문제점이 있다. 이로 인해 최근에는 홀로그램 데이터를 축소할 수 있는 방법들이 보고된 바 있고, 실시간으로 입체영상을 구현하는데 필요한 여러 가지 공간광변조기(spatial light modulator : SLM)들의 제조기술과 면적이 작은 공간광변조기들을 이용하여 더 큰 면적에서 입체영상을 볼 수 있는 기술 등에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 시간에 따라 형태가 변화하는 움직이는 가상물체에 대한 컴퓨터 합성 홀로그램을 연산하고 이를 광주사기(optical scanner)를 이용한 광주사법에 의해 공간상에 재생면적을 세배 확대하여 재구현하는 기술과 lookup table을 이용한 고속연산용 알고리즘에 대하여 연구를 수행하였다.

II. 시간에 따라 변화하는 CGH 연산

컴퓨터 합성 홀로그램(CGH)은 기준파와 물체에서 반사된 빛인 물체파(object source)가 서로 간섭하여 생성된 간섭패턴을 이용하여 만들어내게 된다. 두 빛 E_O 와 E_R 가 간섭하여 만들어내는 간섭광의 세기는 다음의 식에 의해 주어지게 된다.

$$I_{TOTAL} = |E_O|^2 + |E_R|^2 + 2\text{Re}\{E_O E_R^*\} \quad (1)$$

$|E_O|^2$ 과 $|E_R|^2$ 은 상수 부분으로서 dc bias에 해당하므로 연산 속도면을 고려하여 실제 계산에 포함시키지 않는다. Horizontal parallel 방법을 사용하면 연산 속도를 기존의 방법보다 수백배 빠르게 할 수 있다.^[1-5]

위의 조건에 의해 (1)식은 다음과 같이 된다.

$$I_B(x) = \sum_{p=1}^{N_y} A \cos[kr_p(x) + \phi_p - \Phi_R(x)] \quad (2)$$

$I_B(x)$ 는 보통 bipolar intensity라 부르고

$$r_p(x) = [(x - x_p)^2 + (z_p)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad \phi_p = \text{초기 위상} \\ \Phi_R(x) = kx \sin \theta_R, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{이다.}$$

점광원의 초기 위상을 0으로 놓으면 (2)식은 다음과 같다.

$$I_B(x) = \sum_{p=1}^{N_y} A \cos[kr_p(x) - \Phi_R(x)] \quad (3)$$

홀로그램 면의 한 점을 계산하기 위해서는 물체면의 같은 y축상의 모든 점이 (3)식과 같이 계산되는데 이식에서 $r_p(x)$ 는 x 와 x_p 의 함수이고, 또 $\Phi_R(x)$ 는 x 와 x_p 의 함수이므로 모두 3개의 변수가 계산에 사용된다. 컴퓨터에서 위식을 계산할 때 삼각함수연산과 평방근연산은 다른 연산에 비하여 매우 많은 시간이 소비되므로 미리 3차원 배열을 만들어서 그 안에 해당되는 좌표들과 (3)식을 계산한 결과를 lookup table에 넣어놓는다면 구태여 홀로그램을 연산할 때마다 삼각함수

연산과 평방근 연산을 하지 않아도 된다. 이런 식으로 연산하게 되면 약 2-3 배 정도의 속도 향상을 가져올 수 있다.^[6,7]

이러한 알고리즘을 저해상도 SLM에 어떻게 적용시킬 수 있는가 하는 문제에 대하여 알아보자. 가로 512, 세로 400정도의 이미지를 가지고 홀로그램 면과 오브젝트와의 거리는 1000-2000 mm로 하였을 때 lookup table은 512*400*500(z를 500정도의 Deviation을 둔다)으로 102×10^6 개의 cell이 필요하고 각셀마다 4 byte의 데이터가 들어가니 전체 필요한 메모리의 양은 약 400 Mbyte 정도가 된다. 이 정도의 메모리를 갖는 모델을 PC로 계산하면 약 40시간 정도가 소모되는데 (3)식 안에 있는 $x - x_p$ 라는 항목을(이 부분은 홀로그램면의 x좌표와 오브젝트면의 x좌표의 차이이다.) Δ_x 라 표현을 하고, $\Phi_R(x)$ 안의 $kx \sin \theta_R$ 에서 x가 $\frac{2\pi}{k \sin \theta_R}$ 의 간격으로 샘플링된다면 $\Phi_R(x)$ 는 2π 의 정수배가 되고 이것은 (3)식에 영향을 미치지 못하게 된다. 따라서 우리는 이 부분을 조정하여, 이식의 연산에서 변수를 하나 줄임으로서 2차원 테이블을 만들 수 있고 500배 정도의 메모리 절감을 얻을 수 있었다.

현재 가지고 있는 SLM은 분해능이 15 line/mm으로서 픽셀 개념으로는 0.03 mm의 픽셀크기를 가지며 오브젝트와 홀로그램 또한 0.03 mm로 샘플링 하였다. 실험에서 k는 9970정도이고 0.03으로 샘플링 한다고 할 때 θ_R 은 약 0.02 radian정도 되지만 0.02 radian으로 각도를 정하면 공간 주파수가 매우 커져서 우리가 가지고 있는 SLM으로는 홀로그램이 생성되지 않는다. SLM의 분해능 실험결과 각도는 약 0.006 radian보다 작은 각도에서 계산하여야 하며 이보다 작은 각도는 임의로 정해주어도 홀로그램을 볼 수 있다. 각도를 0.004 radian으로 하여 샘플링 간격을 계산한 결과는 0.157 mm정도가 되는데 이 값으로 샘플링하면 이 정도 두께의 격자에서는 빛이 회절하지 않는다. 따라서, 먼저 샘플링간격을 0.15 mm로 하고 각 θ_R 을 계산하면 θ_R 은 0.0042 radian 이 되고, 이 경우 충분히 홀로그램을 볼 수 있는 공간 주파수가 나오게 된다. 0.15 mm로 샘플링한다는 것은 가지고 있는 device 분해능의 5배이다. 일단 먼저 $x_0, x_1, x_{10} \dots$ 과 같이 디바이스의 해상도의 5배되는 점들부터 계산하면 $\Phi_R(x)$ 은 다음과 같은 식이 된다.

$$\Phi_R(x) = (0.15 * x) * \frac{2\pi}{k \sin \theta} \quad x \text{는 } 0, 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

$$\frac{1}{k \sin \theta} = \frac{1}{0.15}$$

결국 $\Phi_R(x)$ 는 2π 의 정수배가 되며 (3)식은 Δ_x 와 z_p 의 값을 고려하여 홀로그래프를 연산할 수 있다. 메모리 요구량은 위에 제시한 방법을 쓰지 않았을 경우 500 픽셀정도의 z변화치에 대하여 계산하여야 하지만 여기서 제시한 방법을 쓰게 되면 단지 5개의 변화치만 고려하면 되므로 약 100배 정도의 메모리를 절약할 수 있고 약 8분 정도의 최소 시간만에 PC에서도 시뮬레이션 할 수 있었다. A, B, C 를 A : 8 line horizontal hologram (one line hologram에 의한 이미지 손상을 줄임), B : one line horizontal hologram, C : lookup table 을 이용한 one line hologram과 같이 정했을 때 그 연산속도를 다음 표에

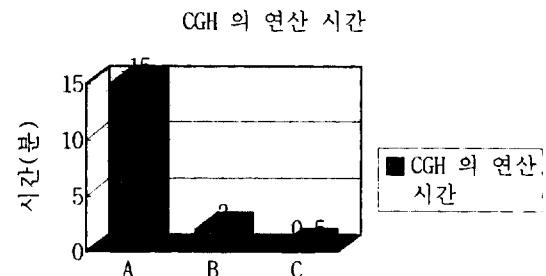


표 1. CGH의 연산 시간

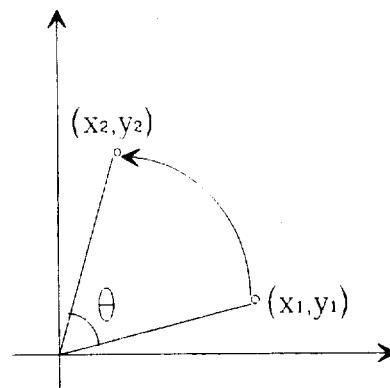


그림 1. 영상회전 좌표



그림 2. 물체를 회전시킨 결과

나타내었다.

여태까지는 CGH연산의 알고리즘을 설명한 것이고 동영상의 디스프레이 부분은 영상의 회전 알고리즘을 이용하였다.

먼저 가상물체는 “KI”와 “ST” 그리고 그 사이에 “○” 형태를 그린 후에 “KI”와 “ST”는 시계방향으로 회전시키고 “○”는 그 크기가 변하도록 하였다. 물론 “KI”와 “ST” 그리고 “○”의 가상 거리는 각각 1000, 1500, 2000 mm로 정하여 계산하였다.

영상은 회전 시킬 때는 일단 각 프레임에서 글자 안에 들어가는 점은 모두 영상회전 변환공식을 사용하여 글자의 중심을 기준으로 회전시킨다. 한 점 (x_1, y_1) 을 (x_2, y_2) 로 회전시키는 공식은 다음과 같다.

$$(x_2, y_2) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$$

각 point source 마다 이와 같은 회전변환을 사용하여 가상물체를 회전시켜 간접패턴을 계산하였다. 다음은 회전을 이용한 결과의 한 예이다.

또한 동영상은 정지영상을 빠르게 디스프레이 하는 것이므로 되도록 화면에서 각 프레임들이 빠르게 갱신될 때, 보다 생생한 느낌의 동영상을 느끼게 된다. 만약 하드디스크에 전체 프레임들을 넣어 놓고 차례로 읽어들여서 화면에 뿐려준

다면 하드디스크의 속도 등에 많은 영향을 받고 실제로 동영상에서 요구하는 정도의 화면 간선속도를 내지 못하게 된다. 그래서 전체 프레임을 PC의 RAM에 넣어 놓고 하드보다 상대적으로 빠른 RAM의 속도를 이용하여 한프레임씩 화면에 뿌려줌으로서 보다 부드러운 화면 상태를 얻을 수 있도록 하였다.

또한 회전 각도는 될 수 있으면 적은 각도로 변하게 하면 보다 부드러운 화면을 볼 수 있으므로 한 부분마다 10도씩 회전하도록 하였고 따라서 전체 108개의 간섭패턴을 만들었다. 각 간섭패턴이 약 0.26 mega byte정도를 차지하므로 전체 프레임을 모두 RAM에 넣어 놓으려면 약 30 mega byte정도의 RAM을 요구하게 된다. 그러나 현재 가지고 있는 컴퓨터는 16 mega byte의 RAM을 보유하고 있고 그 중에 상당수는 OS등에서 사용하고 있으므로 디스플레이 되는 물체의 회전 각도에 제한을 두어 각 물체마다 약 90도 정도만 회전하도록 함으로서 가지고 있는 RAM의 용량을 최대한 활용할 수 있도록 하였다.

III. 시간에 따른 CGH의 공간 재구현

본 연구의 홀로그램 재생용 광학계의 장치도가 아래 그림 3과 같다(이 장치도의 실제 모습은 사진 1에서 볼 수 있다.). 이 장치도에서 홀로그램 reading용 광원으로 사용한 He-Ne레이저($\lambda=633$ nm)는 Jordan사의 제품으로 최대 40 mW의 수직

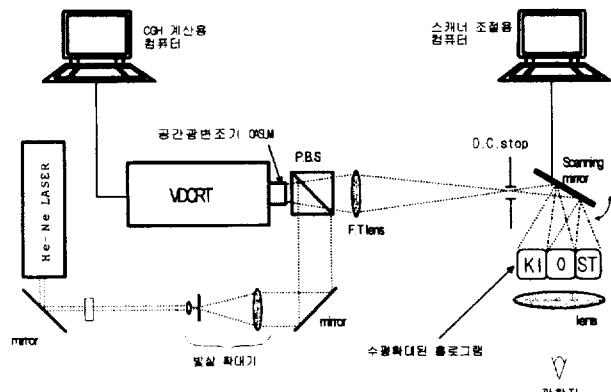


그림 3. CGH의 실시간 동영상 재생 광학계



사진 1. 재생 광학계의 실지 모습

으로 편광된 출력을 내보내는데, 이 것의 편광방향을 공간광변조기인 액정형 공간광변조기의 광축에 맞추기 위해 polarization rotator를 사용하였다. 이 레이저광을 빛살확대기를 이용하여 빛의 크기를 확대하여 평행광을 만들고 이 빛을 편광빛살가르개를 통하여 액정형 공간광변조기에 입사시킬 때 polarization rotator를 둘려 액정형 공간광변조기에 입사시키는 레이저광의 출력을 최대로 하였다. 액정형 공간광변조기는 Micro-optics사 제품으로써 그림 4와 같은 구조를 갖고 있어 반사형 공간광변조기의 형태를 갖고 있으며, 사용가능 범위는 직경 20 mm였으며 이로 인해 CGH연산시에 형성되는 홀로그램의 크기를 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 가 되도록 설정하였다. 사용된 액정형 공간광변조기는 진폭모드로 사용할 경우 최대 21V의 square pulse(이 때 평균 인가전압은 0이 됨.)를 가면서 사용하도록 되어있는데 실험결과 회절효율은 5 kHz부근에서 최대가 된다. 여기에서 컴퓨터에 미리 저장되어 있는 CGH데이터가 VDCRT내의 작은 VGA급 CRT에 보내어지면, 이 작은 CRT 화면상에는 연산하여 구한 홀로그램 패턴이 디스플레이되어 진다. 이 CRT상의 홀로그램패턴은 다시 렌즈에 의해 정확히 액정판상에 결상되어 지며 이로인해 액정판위로 레이저 평면파를 입사시키면 이 홀로그램 패턴에 비례하는 진폭분포를 갖는 반사파가 발생된다. 이 반사파는 광축을 따라 진행하면서 점점 회절되어, 홀로그램에 기준파를 입사시켜 본래의상을 재생하는 과정과 동일한 현상이 일어나게 되어 결국 실시간으로 CGH데이터로부터 그내부에 내

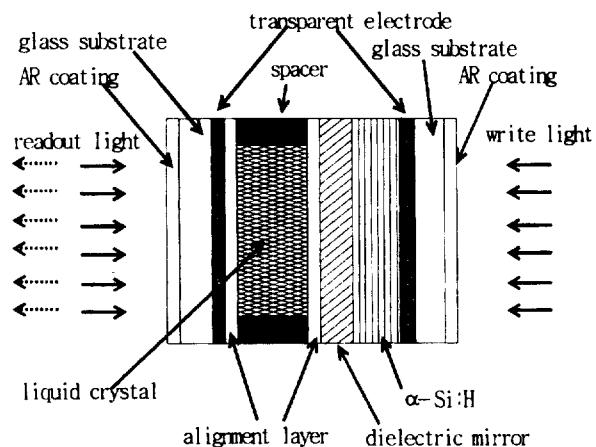


그림 4. 액정반사형 공간광변조기의 구조.

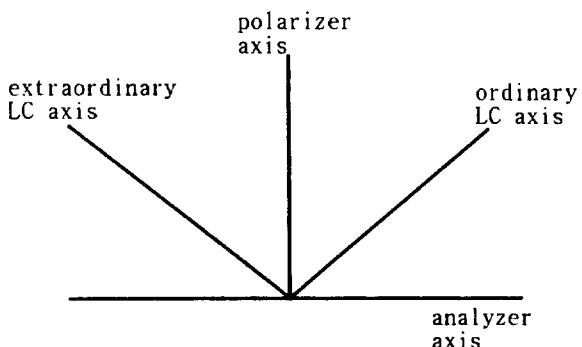


그림 5. 액정판의 복굴절 주축과 입사파의 선편광 방향과의 관

장된 본래의 가상 삼차원 물체에 대한 재생상을 공간에 다시 구현할 수가 있게 되는 것이다.

실제 재생과정에서는 VDCRT내의 작은 CRT상의 CGH패턴을 액정판위에 정확히 결상하기 위해서 재생되는 재생상의 세기가 최대가 되도록 VDCRT에 부착되어 있는 거리 조절장치를 조금씩 이동시켜 가면서 재생상을 관찰하였고 CRT의 밝기도 같은 방법으로 최적조건에서 설정되어졌다.

이 액정판은 그의 복굴절에 대한 주축이 그림 5처럼 수직방향에서 45도 회전되어 있으며, 이 때문에 액정판으로 입사되는 상재생용 레이저 평면과의 편광방향은 수직하게 놓여지도록 하였다. 이렇게 하여 본 연구에서는 빛의 진폭분포를 액정판에 의해 변조시켜 실시간으로 상을 재생하는 모드를 사용하였다. 액정 공간광변조기에 선편광된 reading light가 입사되면, 액정총을 통과해나갈 때, 액정총내의 복굴절에 의해, reading light는 액정총을 통과한 후에 타원편광으로 된다. 이후, 거울에서 반사되어 액정총을 재 투과한 출사광의 편광방향은 입사광의 그것과 다르게된다. 따라서 입사광의 편광방향에 수직인 검광판을 통과하는 광량은 증가된다. 그러므로 writing light의 광량과 구동전압을 제어하면, reading light의 투과율을 조절하는 것이 가능하게 된다. 즉 optically addressed spatial light modulator의 동작이 가능해진다.

앞에서 기술된 바와 같이 CGH연산시에 가정한 가상물체는 "KI"와 "O" 그리고 "ST"의 이차원 글자판 형태를 선정하였다. 이 CGH들을 시간에 따라 변화를 주어 즉, "KI"와 "ST"는 시간에 따라 글자가 시계방향으로 돌아가게 하였고, "O"는 시간에 따라 그 크기가 변화되도록 하는 방법으로 홀로그램의 동영상화를 시도하였다. 이러한 CGH들의 일례가 아래 사진 2와 같다.

홀로그램 화면의 확대와 동영상 디스플레이를 하기위해 스캐너(General Scanning 사의 CX-660)를 사용하였다. 스캐너의 구동은 공간광변조기의 응답시간에 의해 제한되는데, 사용한 액정 공간광변조기는 1초당 7프레임 이상의 홀로그램 데이터를 보내면 재생이 되지않았다. 따라서 본 연구에서는 초당 6프레임에 해당하는 속도인 150 msec의 주기를 갖는 계단파 파형으로 스캐너를 구동하였다. 스캐너 구동 파형이 그림 6과 같다. 처음에는 일련의 정지영상들을 30프레임 까지

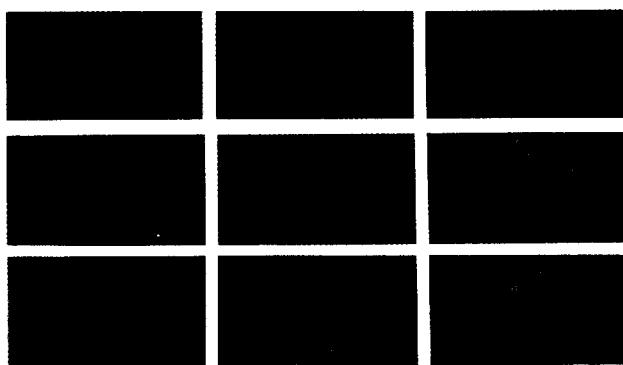


사진 2. 시간에 따라 변화하는 'KI', 'O', 'ST' 형태의 세 개의 가상물체에 대한 CGH 연산 결과(컴퓨터 모니터 상).

저장하여 동영상화시킬 수 있는 animation board를 사용하여 PC에 의해 연산된 CGH들을 VDCRT에 연속적으로 띄워주고 이 동화상들과 스캐너의 동기를 맞추어 주려하였으나 제대로 동기가 되지않았고, 이 경우에 홀로그램계산용 컴퓨터에 GPIB 인터페이스 카드를 장착하기에는 공간이 부족하여 스캐너 구동용으로 또 하나의 컴퓨터가 필요로 하는 단점이 드러났다. 그래서 PC에 의해 연산된 CGH들을 계산기의 RAM에 저장하였다가 연속적으로 VDCRT에 보내어 주는 방법을 선택하였다. 이 방법에 의해 CGH의 동화상을 VDCRT에 보내주면 액정 공간광변조기에는 "KI"와 "O" 그리고 "ST"의 홀로그램 간섭무늬가 시간에 따라 맷혀지게되고 이 홀로그램 데이터와 스캐너를 시간적으로 일치시켜 구동하면 홀로그램 화면 확대의 효과를 얻게된다. 홀로그램 데이터와 스캐너의 동기 방법으로는 홀로그램계산용 컴퓨터에서 홀로그램을 디스플레이시키는 프로그램에서 홀로그램과 홀로그램 사이의 빈 루프동안에 함수발생기를 구동시키는 구동펄스를 내보내게 하고 함수발생기도 회로를 구성하여 제작하였다. 제작한 함수발생기의 회로도는 아래 그림 7과 같다. 이 경우 제작한 함수발생기를 너무 간단하게 만들어 발생된 구동함수에 다소 jitter가 발생하였으나 스캐너 구동속도가 느리기 때문에 별문제가 되지 않았다.

재생상을 관찰할 때 허상과 실상이 서로 중첩되어 보이는 문제를 해결하기 위해 재생되는 허상을 다시 볼록렌즈로 결상시키고 이를 다시 볼록렌즈로 확대하여 관찰하는 방법을 선택하였다.^[8] 또한, 홀로그램에 의해 회절되지 않고 그대로 투과한 빛은 홀로그램 바로 뒤에 위치한 볼록렌즈에 의해 그의 후초점상으로 집속되는 데 이로인해 재생상을 관찰할 때, 이 빛이 주요 노이즈가 된다. 따라서, 이 빛을 차단한 상태에

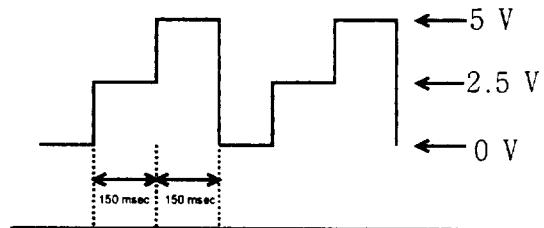


그림 6. 스캐너 구동 파형

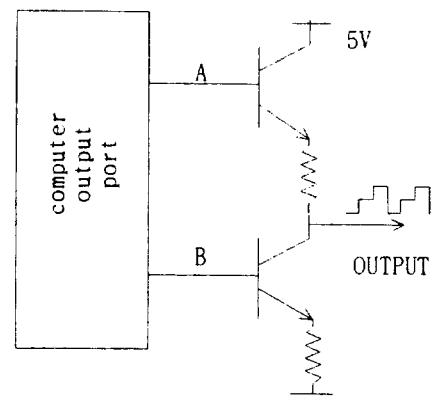


그림 7. 제작한 함수발생기의 회로도.

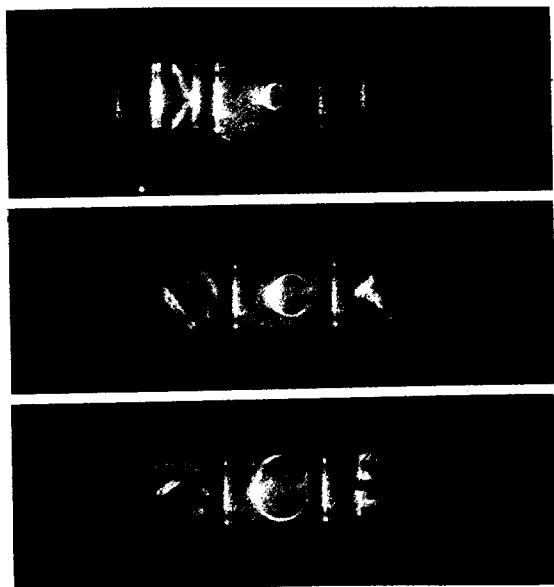


사진 3. 시간에 따른 CGH 재생상의 변화.

서 재생상들을 관찰하기 위해 볼록렌즈의 후총점면상에 회절 안된 빛을 모두 차단하도록 적절한 크기의 원형 stop을 위치 시켰다.

이 휠로그램 재생용 광학계에 의해 재생된 휠로그램의 일례가 아래 사진 3과 같이 보인다. 이것은 본 연구에서 관찰된 가상의 세 글자판 “KI”와 “O” 그리고 “ST”에 대한 재생상들인데, CGH를 컴퓨터 모니터에서 관찰한 [사진 2]와 비교하여 볼 때 물체 주위에 노이즈가 조금 나타나 있고 ‘ST’의 상이 잘 나타나지 않았으나 이것은 사진 촬영에서 비롯된 것으로 눈으로 관찰할 때에는 설명하게 보였다. 전체적으로는 “KI”, “O”, “ST”의 세 물체의 휠로그램면 까지의 거리가 다르기 때문에 세 물체의 이미지가 관찰용 카메라 렌즈의 총점위치에 따라

달라지는 것으로부터 본 실험을 통해 본래 가정했던 서로 얼마간 떨어져 있는 세개의 글자판 “KI”와 “O” 그리고 “ST”가 삼차원적으로 제대로 공간에 재생되었음을 알 수 있다.

IV. 결론 및 토의

CGH의 3차원 입체영상의 실시간 동영상 디스플레이를 시도하였으며 스캐너를 이용하여 디스플레이 화면을 3개로 할 수 있었고 다음에는 이것을 이용하여 3개의 화면을 합쳐 하나의 화면을 만들어 화면확대의 효과를 이룰 수 있는 연구를 할 것이며, 본 연구의 결과는 디스플레이 장치의 저해상도 때문에 입체감이 많이 삭감되었으나 디스플레이 장치의 해상도를 높이면 이러한 문제점은 해결될 수 있다. 따라서, 앞으로의 연구는 고해상도 SLM의 개발에 중점이 모아져야 한다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] C.B.Burckhardt, J. of Opt. Soc. of Am., **58**(2), 241 (1968).
- [2] L.H.Lin, Appl. Optics, **7**(3), 545 (1968).
- [3] T.Yatagai, Appl. Opt. **15**(11), 2722 (1976).
- [4] Ch.Frere, D.Leseberg, and O. Bryngdahl, J. of Opt. Soc. of Am.A **3**(5), 726 (1986).
- [5] O.Nishikawa, T.Okada, K.Matsumoto, H.Yoshikawa, K. Sato, and T.Honda, 3D Image Conference '94, 171 (1994).
- [6] M. Lucente, J. of Elec. Imaging **2**(1), 28 (1993).
- [7] M. Lucente, SPIE **1667**, Practical Holography VI, 32 (1992).
- [8] K2000, 3차원 영상매체 기술개발 연차보고서, **1**, 305 (1995).

Spatial realization of a time-varying CGH

Kim Sang Hyuck, Jung Sung Rak, Jo Jae Cheol and Choi Sang Sam
Division of Information & Electronics, KIST, Seoul 130-650, Korea

Cho Kyu Man
Department of Physics, Sogang Univ., Seoul 121-742, Korea

Ko Sung Jae
Department of Electronics Engineering, Korea Univ. Seoul 136-701, Korea

(Received : September 23, 1996)

We realized CGH display of moving objects with an optical addressed spatial light modulator. CGH was calculated by the horizontal parallel method for saving a calculating time, and calculation speed was improved by making a lookup table of trigonometric function and root calculation. This lookup table was applied to a low resolution SLM, and succeeded in a simultaneous display of the three hologram images by the scanning method.