

## 3차원 좌표변환에 의한 입체 컴퓨터 형성 홀로그램에 관한 연구

류원현<sup>†</sup> · 정만호

청주대학교 레이저광정보공학과  
Ⓣ 360-764 충북 청주시 상당구 내덕동 36번지

(2006년 8월 29일 받음, 2006년 12월 7일 수정본 받음)

3차원 물체의 합성된 컴퓨터 형성 홀로그램(CGH)을 새로운 형태의 3차원 좌표변환 기술을 사용하여 제작하였다. 제작된 3차원 물체는 CCD 카메라를 사용하여 시야각도(viewing angle)를 변화 시키면서 여러개의 영상으로 기록하였다. 이렇게 얻어진 영상 데이터는 2차원 복소 매트릭스를 사용하여 수학적 방법으로 계산되고, 최종적으로 합성된 3차원 CGH로 부호화하였다.

주제어 : 3-D, 3-D coordinates transformation, CGH, Viewing angle

### I 서 론

3차원 이미지를 표현하는 방법은 여러 가지로 분류된다. Stereoscopic display<sup>[1]</sup>, volumetric system<sup>[2]</sup>, integral photography<sup>[3]</sup>, holography<sup>[4]</sup> 등이 있다. 각각의 기술들은 개개의 장점과 단점이 있다. 단일 홀로그램은 육안으로 체적 물체를 관찰하기 때문에 홀로그래피는 다른 방법들보다 3차원 이미지를 디스플레이하는 가장 좋은 방법이라고 할 수 있다. 홀로그래피 기술은 특별한 관찰 장치 없이 인간의 눈으로 관찰하는데 고효율 이미지와 정확한 깊이를 준다. 그러나 3차원 물체의 홀로그램 기록은 결맞음 광인 레이저 빔 사이의 간섭이 필요하다<sup>[5]</sup>. 약간의 움직임에도 세기와 위상 정보를 포함하는 간섭 무늬가 없어질 수 있기 때문에 광학계는 매우 안정적이어야 한다. 이 조건은 긴 필름 노출<sup>[6]</sup>과 현상 과정과 함께 일반적인 홀로그램 기록을 방해한다. 이 제한을 부분적으로 해결하는 것은 컴퓨터 형성 홀로그램(CGH)<sup>[7,8]</sup>을 사용하는 것이다. CGH로 만들어진 물체는 수학적 계산 혹은 그림 묘사(graphical descriptions), 공간적인 샘플로 나타낼 수 있다. 두 광파의 물리적인 간섭은 수학적 계산으로 대신할 수 있다. 그러나 3차원 물체의 CGH는 어려운 계산 과정이 필요하다. 모든 정보가 홀로그램 면으로부터 동일한 거리에 놓이기 때문에 물체의 모든 점으로부터 시작하는 모든 파의 수학적 중첩이 필요하며 이렇게 하기 위해서는 3차원 좌표변환 기술이 요구된다.

본 논문에서는 3차원 물체의 CGH를 재생하기 위해 컴퓨터로 제작된 3차원 물체의 각도 투영법(angular projection)과 CCD 카메라로 찍은 물체의 경사 투시도법(angular perspective)을 이용해서 수평과 수직 방향의 두 관점으로 움직였다. 3차원 물체 전체를 경사 투시도법으로 개별적인 영상을 계산하여 2차원 복소 함수를 얻는다. 이 함수는 동일한 물체로부터 회전된 광 파면의 복소 진폭과 동일하다. 이 복소 함수는 실

수와 양의 투명도를 가지는 CGH로 부호화 된다. 이 CGH에 평면파를 비추어 원래 물체를 재생하고 체적 효과를 만든다.

본 논문에서는 3차원 물체의 CGH를 구현하기 위해 새로운 형태의 3차원 좌표변환법을 사용하여 3차원 물체를 수평과 수직 방향의 두 관점에서 정확하게 분석하고, CCD를 이용해 경사투시도법으로 얻어진 각각의 영상들을 2-f 시스템의 광학적 홀로그램과 동일한 단일 후리에 홀로그램을 수학적 방법으로 유도하였으며, 이때 얻어진 각각의 영상들을 합성하여 체적 효과를 가지는 CGH를 만들었다. 본 논문에서는 IFTA(Iterative Fourier Transform Algorithm)를 사용하여 CGH를 구현하였다. 제작된 CGH의 결과를 분석하기 위하여 각도 및 깊이에 따른 재생 영상을 분석하였다.

### II. 3차원 물체의 CGH

CGH 합성을 위한 첫 번째 단계는 재생될 CGH의 3차원 물체를 컴퓨터에 기록하는 것이다. 다음으로 물체의 경사 투시도법을 계산한다. 수학적 연산은 각각의 영상에 따라 계산하게 된다. 마지막으로 단일 2차원 복소 매트릭스로 만든 CGH를 홀로그래피 투과도를 사용해서 실수와 양의 값을 가지는 매트릭스로 코딩한다.

#### 2.1 CGH의 합성 방법

$t(x_s, y_s, z_s)$ 로 표시하는 물체는 그림 1에 보여진 것처럼 좌표계  $(x_s, y_s, z_s)$ 로 정의한다.

여기서  $z_s$ 는 가상의 광축으로 세로축이다(가상의 광축). CCD는 원점으로부터 거리 L의 위치에 있는 이미지 렌즈를 지나 영상을 얻는다. CCD는 원점에 대해 수평, 수직 방향으로 호를 따라 일정한 각도로 이동하며, 항상 원점을 향한다.  $x_s$ 축 회전에 생기는 각도  $\phi_m$ 과  $y_s$ 축 회전에 생기는 각도  $\theta_n$ 은 물체의  $m, n$ 번째 투시도법으로 계산된다. 각각  $\phi_m, \theta_n$ , 투사된 이미지(projected image)  $P_{mn}(x_p, y_p)$ 는 2차원 매트릭스로 컴

<sup>†</sup> E-mail: thewillow@nate.com

퓨터에 기록된다. 여기서  $(x_p, y_p)$ 는 각각 투사된 좌표계이다. 그림 2와 같이 기하학적인 중요성을 사용해서,  $(x_p, y_p)$ 와  $(x_s, y_s, z_s)$ 의 관계는 다음과 같이 주어진다<sup>[9-11]</sup>.

$$\begin{aligned} x_p &= x_s \cos \phi_m - z_s \sin \phi_m, \\ y_p &= y_s \cos \theta_n - z_s \sin \theta_n \cos \phi_m - x_s \sin \phi_m \sin \theta_n \end{aligned} \quad (1)$$

각도  $(\phi_m, \theta_n)$ 로부터 각각 투사된 이미지는  $f_{m,n} = \exp[-j2\pi b(x_p \sin \phi_m + y_p \sin \theta_n)]$ 을 곱한다. 이 결과는 단일 복소 함수들을 합한 것이다.

$$s(m,n) = \iint P_{m,n}(x_p, y_p) \exp[-j2\pi b(x_p \sin \phi_m + y_p \sin \theta_n)] dx_p dy_p \quad (2)$$

여기서  $b$ 는 실수 상수이다. 투사된 이미지는 인접한 점으로부터 관찰된 약간 증가하여 변하는 각을 가지고 계산되어 새로운 값을 가지는  $s(m+1, n)$ 을 얻는다. 식 (2)로부터 얻은 값은 복소 매트릭스로 정리된다. 이 매트릭스의 모든 값은 다른 관점을 가지게 되고 매트릭스는 투사된 이미지로 알 수 있는 것처럼 동일하게 배열된다. 홀로그램 점과 경사 투사도법 사이 결합은 합성 단계에서 만 이루어진다. 이미지 재생 단계에서 결과 홀로그램은 홀로그램의 각 점이 전체 체적 이

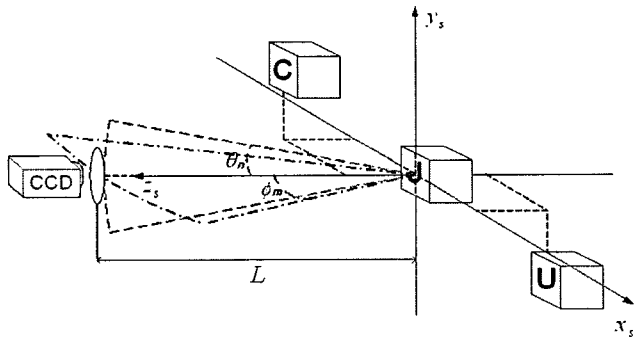


그림 1. 물체의 좌표와 CCD 카메라의 기록 방법.

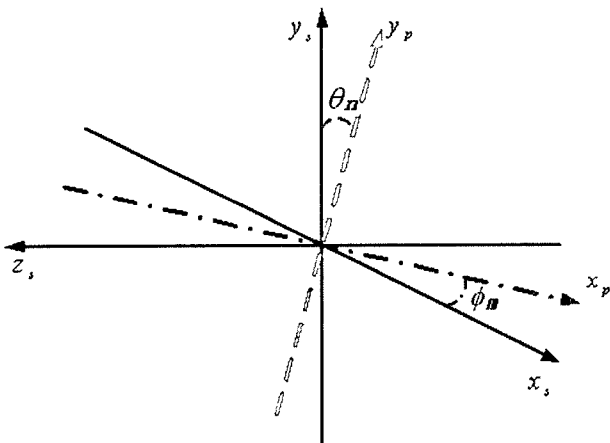


그림 2. 경사 투사도법 계산 좌표.

미지로 발산한다.

매트릭스 값은 복소수이기 때문에 홀로그램은 실수와 홀로그램 투과도의 음이 아닌 값으로 부호화해야한다. 부호화된 매트릭스에 결맞은 광을 이용해서 물체의 홀로그래픽 재생을 얻을 수 있다. 모든 계산 과정은 그림 3에 설명된다.

### 2.2 합성 CGH와 광학적 홀로그램 비교

합성 CGH가 홀로그래픽 결맞은 광학계의 재생과 비슷한 모양을 이루는지에 대해서 알아본다.

전체 3차원 물체로부터 크기  $(\Delta x_s, \Delta y_s, \Delta z_s)$ 의 단일 무한소 성분(infinitesimal element)을 그림 1에서 보자. 값  $t(x_s, y_s, z_s)$ 을 가지는 점  $(x_s, y_s, z_s)$ 에서 성분은 모든 투사면  $(x_p, y_p)$ 에서 단일 성분을 나타낸다. 그러나 다른 하나의 성분은 다른 위치를 나타내는데, 식 (2)를 기본으로 모든  $(\phi_m, \theta_n)$ 값의 홀로그램면에서 분포와 단일 성분점은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s'(m,n) &= \iint t(x_s, y_s, z_s) (\Delta x_s \Delta y_s \Delta z_s) \delta(\bar{x}_p - x_p, \bar{y}_p - y_p) \\ &\quad \times \exp[-j2\pi b(\bar{x}_p \sin \phi_m + \bar{y}_p \sin \theta_n)] d\bar{x}_p d\bar{y}_p \\ &= t(x_s, y_s, z_s) \exp[-j2\pi b(x_p \sin \phi_m + y_p \sin \theta_n)] (\Delta x_s \Delta y_s \Delta z_s) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\delta$ 는 Dirac 델타 함수이다. 식 (3)에 식 (1)을 대입하면

$$\begin{aligned} s'(m,n) &= t(x_s, y_s, z_s) \exp\{-j2\pi b \times [\sin \phi_m (x_s \cos \phi_m - z_s \sin \phi_m) \\ &\quad + \sin \theta_n (y_s \cos \theta_n - z_s \sin \theta_n \cos \phi_m \\ &\quad - x_s \sin \phi_m \sin \theta_n)]\} \Delta x_s \Delta y_s \Delta z_s \end{aligned} \quad (4)$$

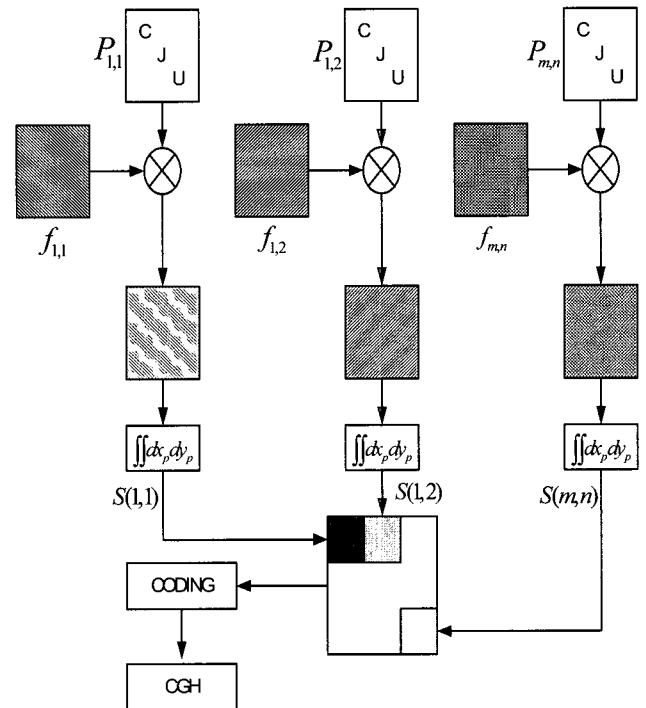


그림 3. CGH의 계산 과정 블록도.

입력 영상이 3차원이면, 전체 영상의 점들로부터 결과  $s(m,n)$ 의 전체 분포는 입력 영상으로부터 전체 점들의 체적 적분으로 얻어진다.

$$s(m,n) = \int \int \int s'(m,n) dx_s dy_s dz_s$$

$$= \int \int \int t(x_s, y_s, z_s) \exp\{-j2\pi b[\sin\phi_m(x_s \cos\theta_n - z_s \sin\phi_m) + \sin\theta_n(y_s \cos\theta_n - z_s \sin\theta_n \cos\phi_m - x_s \sin\theta_n \sin\phi_m)]\} dx_s dy_s dz_s \quad (5)$$

최대 관찰 각도( $\phi_{max}, \theta_{max}$ )는 작게 선택된다. 각도의 근사  $\cos\phi_m \approx 1$ 과  $\cos\theta_n \approx 1$ 을 식 (5)에 대입하면 식 (6)과 같이 정리된다.

$$s(m,n) \approx \int \int \int t(x_s, y_s, z_s) \exp\{-j2\pi b[x_s \sin\phi_m + y_s \sin\theta_n - z_s(\sin^2\phi_m + \sin^2\theta_n) - x_s \sin^2\theta_n \sin\phi_m]\} dx_s dy_s dz_s \quad (6)$$

식 (6)에서  $x_s \sin^2\theta_n \sin\phi_m$ 항은 변수의 전체 범위가 1radian보다 매우 작으므로 이 항은 무시할 수 있다. 매트릭스  $s(m,n)$ 는 어떤 광학 투명도를 나타내고, 하나의 영상에서 다른 영상까지 각도의 증가가 매우 작다고 가정할 때 하나의 증가는  $(m,n)$ 에서 연속적인 변수( $u,v$ )으로 함수  $s$ 의 변수는 바뀔 수 있다.

$$s(u,v) = \int \int \int t(x_s, y_s, z_s) \exp\left\{-j4\pi b \frac{\sin\phi_{max}}{\Delta u} \left[ux_s + vy_s - z_s \frac{2\sin\phi_{max}}{\Delta u} (u^2 + v^2)\right]\right\} dx_s dy_s dz_s \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)으로부터 얻을때, 어떤 두 개의 연속하는 영상이 동일한 각도의 간격을 가진다고 가정한다. 다시말해,  $\sin\phi_m = m \sin\phi_{max}/M$ 과  $\sin\theta_n = n \sin\theta_{max}/N$ 의 관계를 이용한다. 여기서  $M$ 과  $N$ 은 각각 수평과 수직 방향에서 영상의 총 수이다. 식 (7)을 가정하면, 홀로그램은 동등한  $\sin\phi_{max}/\Delta u = \sin\theta_{max}/\Delta v$ 를 만족하는 공간 광변조기(Spatial Light Modulator, SLM)로 표현할 수 있다. 여기서  $\Delta u$ 과  $\Delta v$ 는 각각 투과도 물질의 폭과 높이이다.

식 (7)의  $s(u,v)$ 는 그림 4에서 보여주는 결맞음 광학계의 출력면에서 복소 진폭과 같은 함수의 형태를 가진다. 3차원 물체  $t(x_s, y_s, z_s)$ 는 파장  $\lambda$ 의 평면파를 입사시키고, 초점 거리  $f$ 를 가지는 구면 렌즈를 통과해 전파되는 물체로부터 반사된 파면이다. 후초점면에서 얻어진 복소 진폭은 다음과 같다<sup>9,12</sup>.

$$g(u,v) = C \int \int \int t(x_s, y_s, z_s) \times \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda f} \left[ux_s + vy_s - z_s \frac{u^2 + v^2}{2f}\right]\right\} dx_s dy_s dz_s \quad (8)$$

여기서  $C$ 는 상수이고  $g(u,v)$ 는 푸리에 홀로그램처럼 기록된 참조파를 가지는 간섭으로 복소 파면을 나타낸다. 파의 간섭에 대해서 말하면, 간섭 패턴의 세기는 4개로 분리된 항

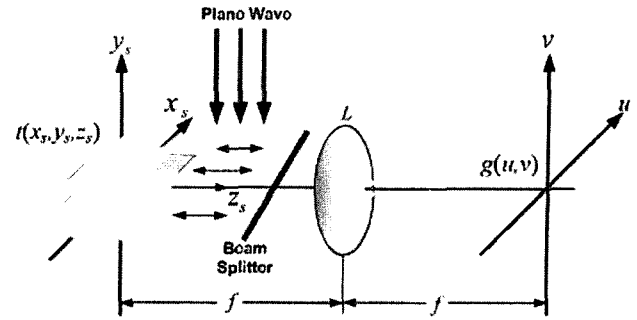


그림 4. CGH 계산을 위한 광학적 시스템.

중에 하나가 원래 복소 파면을 가진다<sup>13</sup>.  $s(u,v)$ 는 2차원 광학적 홀로그램이 기록된 물체의 3차원 정보를 포함하는데 비슷한 방법으로 물체의 3차원 정보를 포함하는 2차원 함수이다. 함수  $s(u,v)$ 와  $g(u,v)$ 사이에서, 물체의 3차원 구조는 홀로그래픽 방법으로 기록된다.

### III. CGH의 구현 및 결과

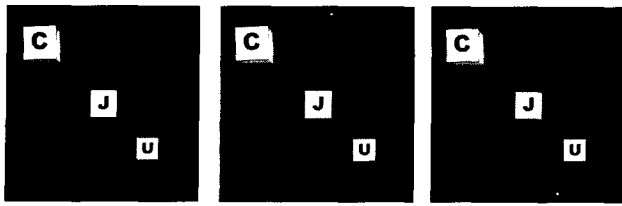
#### 3.1 입력 영상

입력 영상은 CCD를 이용하여 컴퓨터에 기록하였다. 3차원 이미지를 위해 사용된 물체는 각각 글자 C, J, U를 정육면체로 만들어 서로 다른 위치에 놓이게 하였다. 글자 C는  $(x,y,z) = (-100mm, 100mm, 100mm)$ 인 원점의 앞에 위치하고, 글자 J는  $(x,y,z) = (0mm, 0mm, 0mm)$ 인 원점, 글자 U는  $(x,y,z) = (100mm, -100mm, -100mm)$ 인 원점의 뒤에 위치한다. 정육면체의 크기는  $50mm \times 50mm \times 50mm$ 이다. CCD앞의 이미지 렌즈와 원점인 글자 J까지의 거리  $L$ 은  $500mm$ 로 하였다. 각도에 따른 각각의 영상은  $200 \times 200$ pixel로 투사된 이미지를 기록한다. 각도의 범위는  $\Delta\phi, \Delta\theta = 1^\circ$ 의 균일한 각도 이동을 가지고, 모든 방향에서  $\pm 3^\circ$ 까지 영상을 기록한다. 그림 5는 최소 각도  $\pm 1^\circ$ 로 기록한 9개의 영상이다. 그림 6과 7은  $\pm 2^\circ, \pm 3^\circ$ 로 기록한 영상이다.

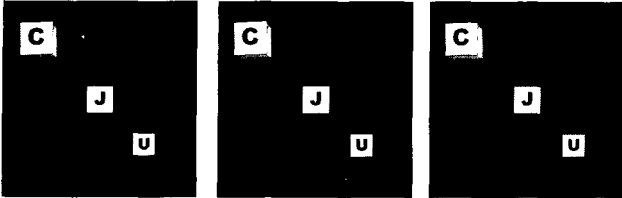
#### 3.2 CGH

그림 1, 2, 3의 절차에 따라 9개의 영상을 경사 투시도법으로 계산하고, 계산된 각각의 영상들을 2차원 푸리에 변환한다. 푸리에 변환시 위상을 가지는 random phase를 곱하게 되는데, 광학적으로 물체 앞에 확산판을 놓는 것과 유사한 결과를 가지며 이것은 푸리에 계수의 크기를 골고루 일정하게 만들어준다. 이런 방법은 빛의 세기는 늘려 재생상이 밝아질 수 있지만 얼룩덜룩한 재생 무늬를 만들기도 한다. 그림 8은 그림 5의 영상들을 2차원 푸리에 변환한 CGH 패턴들이다.

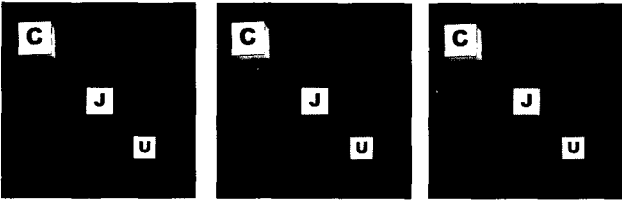
그림 8의 CGH 패턴들을 그림 3의 아래부분과 같이 합성하여 코딩하는데, 복소 함수  $s(u,v)$ 를 실수와 홀로그래픽 투과도가 양수가 되도록 코딩을 하게된다. 입력을 렌즈앞의 거리  $f$ 에 위치하고 수직으로 입사하는 평면파를 조사한다. 입



(a)  $(\phi, \theta) = (-1^\circ, 1^\circ)$  (b)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, 1^\circ)$  (c)  $(\phi, \theta) = (1^\circ, 1^\circ)$

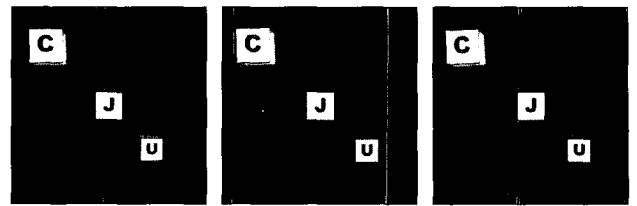


(d)  $(\phi, \theta) = (-1^\circ, 0^\circ)$  (e)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, 0^\circ)$  (f)  $(\phi, \theta) = (1^\circ, 0^\circ)$

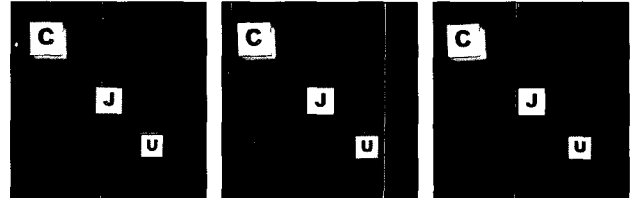


(g)  $(\phi, \theta) = (-1^\circ, -1^\circ)$  (h)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, -1^\circ)$  (i)  $(\phi, \theta) = (1^\circ, -1^\circ)$

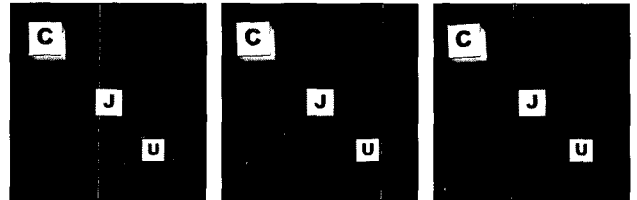
그림 5.  $\pm 1^\circ$ 로 기록된 3D 물체의 9개 영상.



(a)  $(\phi, \theta) = (-2^\circ, 2^\circ)$  (b)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, 2^\circ)$  (c)  $(\phi, \theta) = (2^\circ, 2^\circ)$

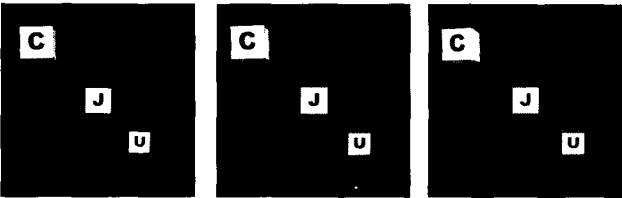


(d)  $(\phi, \theta) = (-2^\circ, 0^\circ)$  (e)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, 0^\circ)$  (f)  $(\phi, \theta) = (2^\circ, 0^\circ)$

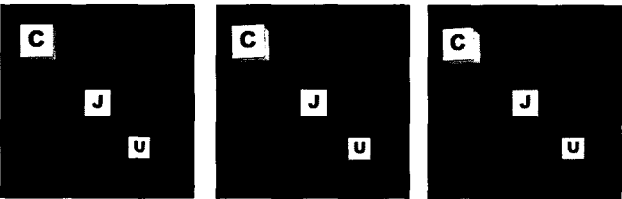


(g)  $(\phi, \theta) = (-2^\circ, -2^\circ)$  (h)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, -2^\circ)$  (i)  $(\phi, \theta) = (2^\circ, -2^\circ)$

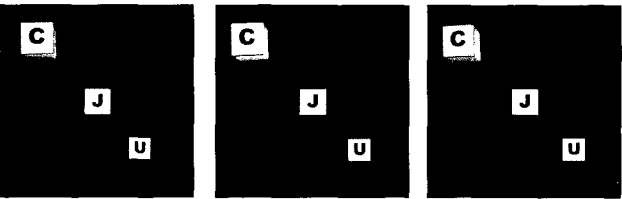
그림 6.  $\pm 2^\circ$ 로 기록된 3D 물체의 9개 영상.



(a)  $(\phi, \theta) = (-3^\circ, 3^\circ)$  (b)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, 3^\circ)$  (c)  $(\phi, \theta) = (3^\circ, 3^\circ)$

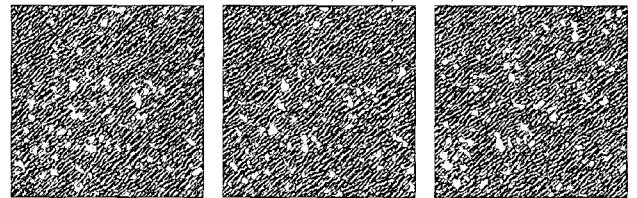


(d)  $(\phi, \theta) = (-3^\circ, 0^\circ)$  (e)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, 0^\circ)$  (f)  $(\phi, \theta) = (3^\circ, 0^\circ)$

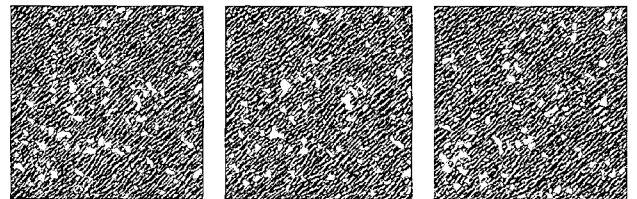


(g)  $(\phi, \theta) = (-3^\circ, -3^\circ)$  (h)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, -3^\circ)$  (i)  $(\phi, \theta) = (3^\circ, -3^\circ)$

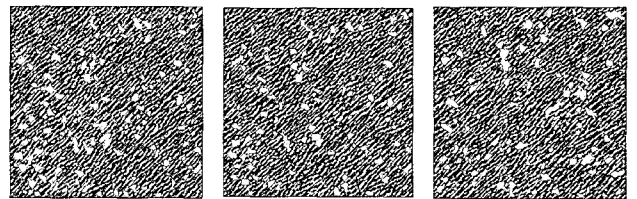
그림 7.  $\pm 3^\circ$ 로 기록된 3D 물체의 9개 영상.



(a)  $(\phi, \theta) = (-1^\circ, 1^\circ)$  (b)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, 1^\circ)$  (c)  $(\phi, \theta) = (1^\circ, 1^\circ)$



(d)  $(\phi, \theta) = (-1^\circ, 0^\circ)$  (e)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, 0^\circ)$  (f)  $(\phi, \theta) = (1^\circ, 0^\circ)$



(g)  $(\phi, \theta) = (-1^\circ, -1^\circ)$  (h)  $(\phi, \theta) = (0^\circ, -1^\circ)$  (i)  $(\phi, \theta) = (1^\circ, -1^\circ)$

그림 8. 그림 5의 영상을 변환한 CGH pattern.

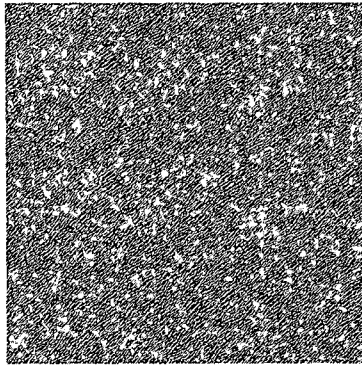


그림 9. CGH pattern의 코딩 결과.

력은 복소 함수  $s(u,v)$  이고, 입력에 전달된 파의 푸리에 스펙트럼을  $S_o(u',v')$  으로 렌즈에 전달된 파의 푸리에 스펙트럼을  $S_l(u',v')$  으로 놓는다<sup>[12]</sup>.

$$S_o(u',v') = \mathcal{F}\{s(u,v)\} \quad S_l(u',v') = \mathcal{F}\{U_f\} \quad (9)$$

프레넬 또는 근축 근사가 거리  $f$  동안의 전파에 대해 유효하다고 가정하면,  $S_o$ 와  $S_l$ 은 얇은 렌즈 효과의 기본 식인  $\exp\left[-j\frac{k}{2f}(f_x^2+f_y^2)\right]$  식에 의해 다음과 같이 된다.

$$S_l(u',v') = S_o(u',v') \exp\left[-j\frac{k}{2f}(f_x^2+f_y^2)\right] \quad (10)$$

여기서 일정 위상 지연은 생략하였다. 그림 9는 식(10)을 사용해서 코딩한 결과이다. 코딩한 결과는  $600 \times 600$  픽셀의 크기이다.

그림 10은 물체의 깊이에 따른 입체감 효과를 살펴보기 위하여 그림 9의 CGH를 초점거리에 따라 재생한 결과이다.

그림 10(a)는 글자 C, 그림 10(b)는 글자 J, 그림 10(c)는 글자 U가 다른 글자들에 비해서 선명한 것을 볼 수 있다. 그림 11~13는  $\pm 1^\circ, \pm 2^\circ, \pm 3^\circ$ 로 기록된 영상을 재생한 것이다.

재생 결과를 비교해보면 초점에 따라 조금씩 틀린 것을 볼 수 있다. 글자 C, U는 각도가 커짐에 따라 초점에 맞지 않아 흐려진 것을 볼 수 있다. 입력 영상인 그림 5~7을 보면 각도에 따라 글자 C와 글자 U, 특히 글자 C의 위치와 크기가 변경된 것을 볼 수 있는데 이는 위상 정보에 차이가 있음을 나타낸다고 할 수 있다. 여기서 물체의 위치는 각도에 따라 다르게 기록됨으로 생기는 것이고, 경사투시도법으로 위상값을 계산하기 때문에 재생 결과에 큰 영향을 주지 않을 것이다. 그러나 각도에 따라 물체의 크기가 변경됨으로 인해 재생시 9개의 입력 영상의 물체들이 합성이 되면서 크기 차이로 선명하게 재생되지 못하게 된다.

재생된 영상의 질을 정량적으로 비교하기 위한 척도로서 다음과 같이 정의된 Mean Squared Error(MSE)와 Signal to Noise Ratio(SNR)<sup>[14]</sup>을 사용하였다.

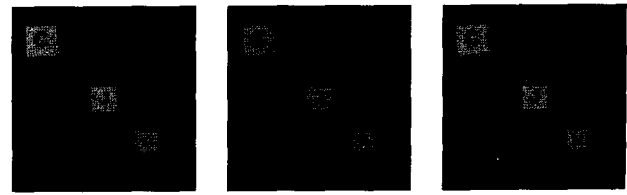


그림 10. 초점거리에 따른 재생 결과 (a) 글자 C, (b) 글자 J, (c).

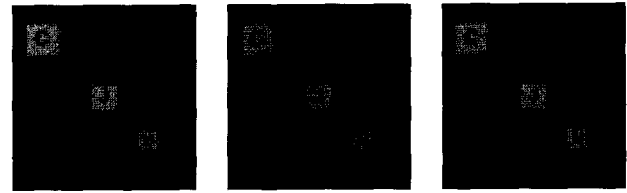


그림 11. CCD 카메라의 이동각도  $\pm 2^\circ$ 의 재생 결과.

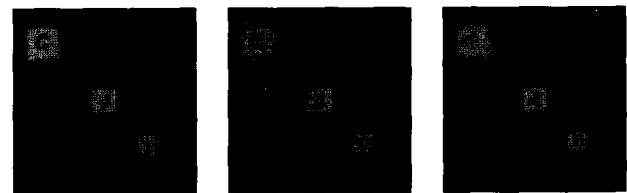


그림 12. CCD 카메라의 이동각도  $\pm 3^\circ$ 의 재생 결과.



그림 13. CCD 카메라의 이동각도  $\pm 3^\circ$ 의 재생 결과.

$$MSE = \frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} [f(x,y) - f_r(x,y)]^2 \quad (11)$$

$$SNR = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y)]^2}{\sum_{x,y} [f(x,y) - f_r(x,y)]^2} \quad (12)$$

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{\sigma_u^2}{MSE} \quad (13)$$

여기서,  $N \times M$ 은 영상의 픽셀 수를 나타내고,  $f(x,y)$ 와  $f_r(x,y)$ 는 각각 초기 입력 영상과 재생된 영상을 나타낸다.

표 1. 각도에 따른 재생 결과의 MSE와 SNR 값

	MSE	SNR(단위 : dB)
$\pm 1^\circ$	825.223	8.425
$\pm 2^\circ$	829.571	8.374
$\pm 3^\circ$	852.966	8.349

여기서,  $\sigma_u^2$ 은 원 영상의 분산 값이고 MSE는 식 (11)의 정의를 이용한다. 재생된 영상이 원래 영상과 비슷할수록 MSE는 0으로 향하고, SNR은 무한대로 향하게 된다. 표 1은 각도에 따른 재생 결과의 MSE와 SNR값을 정리한 것이다.

각도에 따른 큰 차이는 없지만 표 1에서 각도가 작은 입력 영상을 이용해서 재생한 결과가 입력 영상과 비슷하게 재생되었다. 각도가 커짐에 따라 물체의 크기 변화로 인해 재생 결과가 나빠지는 것을 확인 할 수 있다.

#### IV. 결 론

3차원 물체의 합성된 CGH를 새로운 형태의 3차원 좌표 변환 기술을 사용하여 제작하였다. 컴퓨터 모의실험을 위하여 각도에 따른 9개의 2차원 영상을 기록하였고, 기록된 영상에 경사 투시도법을 이용해서 각각의 영상에 3차원 위상정보를 수학적으로 계산하였다. 계산된 각각의 영상들은 고속 푸리에 변환을 사용하여 계산 시간을 줄였다. 코딩방법에서 일반적인 얇은 렌즈 효과의 기본 식을 사용하였는데 이 코딩방법에 의해 각각의 2차원 영상들을 부호화하고 최종적으로 3차원 CGH로 합성하였다.

각도에 따라 기록된 영상들을 재생한 결과 각도가 증가함에 따라 초점 거리에서 재생영상이 흐려지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 증가된 각도에 의해 얻어진 영상의 크기가 변하여 위상 정보의 차이가 발생하기 때문이다. 이를 해결하기 위해서는 입력 영상의 각도를 조절하거나, 물체 사이의 거리를 줄여 크기의 변화가 작게 발생하도록 해야하며, 입력 영상과 비슷한 재생 영상을 얻기 위해서는 각도에 따라 생기는 물체의 크기 변화를 줄이기 위해 이미지 렌즈와 물체사이 거리를 증가시켜 물체의 크기 변화를 줄이는 방법을 사용해야 한다.

#### 참고문헌

- [1] T. Inoue and H. Ohzu, "Accommodative responses to stereoscopic three-dimensional display," *Appl. Opt.*, vol. 36, pp. 4509-4515, 1997.
- [2] K. Langhans, D. Bezecny, D. Homann, C. Vogt, C. Blohm, and K. -H. Schar Schmidt, "New portable FELIX 3D display," in *Projection Displays*, M. H. Wu, ed., Proc. SPIE, vol. 3296, pp. 204-216, 1998.
- [3] S. -W. Min, S. Jung, J. -H. Park, and B. Lee, "Three-dimensional display system based on computer-generated integral photography," in *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VIII*, A. J. Woods, M. T. Bolas, J. O. Merritt, and S. A. Benton, eds., Proc. SPIE, vol. 4297, pp. 187-195, 2001.
- [4] S. A. Benton, "Holographic displays: 1975-1980," *Opt. Eng.*, vol. 19, pp. 686-696, 1980.
- [5] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 54, pp. 1295-1301, 1964.
- [6] R. J. Collier, C. B. Burckhardt, and L. H. Lin, *Optical Holography*, 2nd ed. (Academic, New York, 1971), Chap. 10, pp. 266-289.
- [7] A. W. Lohmann and D. P. Paris, "Binary Fraunhofer holograms generated by computer," *Appl. Opt.*, vol. 6, pp. 1739-1748, 1967.
- [8] O. Bryngdahl and F. Wyrowski, "Digital holography-computer generated holograms" in *Progress in Optics*, Vol. XXVIII, E. Wolf, ed. (North-Holland, Amsterdam, 1990), pp. 1-86.
- [9] Y. Li, D. Abookasis, and J. Rosen, "Computer-generated holograms of three-dimensional realistic objects recorded without wave interference," *Appl. Opt.*, vol. 40, pp. 2864-2870, 2001.
- [10] D. Abookasis, and J. Rosen, "Computer-generated holograms of three-dimensional objects synthesized from their multiple angular viewpoints," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 20, no. 8, pp. 1537-1545, 2003.
- [11] S. Savchenko, *3D Graphics Programming: Games and Beyond* (SAMS Publishing, Indianapolis, Ind., 2000), Chap. 2, pp. 46-53.
- [12] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed. (McGraw-Hill, New York, 1996), Chap. 5, pp. 104.
- [13] A. VanderLugt, "Signal detection by complex spatial filtering," *IEEE Trans. Inf. Theory*, IT-10, pp. 139-145, 1964.
- [14] B. V. K. Vijaya Kumar and L. Hassebrook, "Performance measure for correlation filters," *Appl. Opt.*, Vol 29, no. 20, pp. 2997-3006, 1990.

## **A Study on Three-Dimensional Computer Generated Holograms by 3-D Coordinates Transformation**

Won Hyeon Ryu and Man Ho Jeong

*Department of Laser and Optical Information Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: thewillow@nate.com*

(Received August 29, 2006, Revised manuscript December 7, 2006)

Synthesized 3-D CGH of a general three dimensional object is obtained by using a new 3-D coordinates transformation technique. A CCD camera is used to record several projected images of the 3-D object from different viewing angles. The recorded data are numerically calculated and processed to yield two-dimensional complex functions, which are then encoded for the final synthesized 3-D CGH.

OCIS code : 090.0090, 090.1760, 100.6890.