

## 1. 서론

최근 3D 디스플레이는 디스플레이 산업을 선도해 나갈 차세대 디스플레이로서 세계적인 주목을 받고 있다. 3D 디스플레이 기술에 대한 각국의 경쟁적인 대규모 연구 개발 투자가 이루어지고 있고 많은 연관된 응용 분야들이 창출되고 있다. 영화 아바타의 성공으로 가속화되고 있는 3D 디스플레이 개발과 3D 영상제작 및 콘텐츠 개발, 3D 방송, 3D 통신등의 3D 디스플레이 연관 분야들의 산업화는 거대한 시대적 흐름을 형성하고 있다고 해도 과언이 아니다.

현재는 안경식 스테레오스코픽 3D 디스플레이가 상용화 단계에 있고 이와 관련된 연관 분야들이 산업화 단계에 있지만, 안경을 쓰지 않고 자연스러운 3D 이미지를 다수가 동시에 볼 수 있는 무안경식 3D 기술로 곧 3D 디

연색 홀로그래피 작품들을 선보이고 있다.[1] (그림 1(a)) MIT media lab[2] 출신들이 창업한 Zebra imaging 에서는 대면적 천연색 홀로그래픽 스테레오그램 (holographic stereogram) 인쇄 기술을 개발해 다양한 분야에 응용하고 있다. Zebra imaging 은 홀로그래픽 3D 디스플레이 분야도 오랫동안 개발하고 있지만 아직 연구 결과를 공개하지는 않았다.[3] (그림 1(b)) 홀로그래픽 3D 디스플레이의 연구 목표는 그림 1에서 보인것과 같은 홀로그래픽 이미지를 동영상으로 구현하는 것이라고 할 수 있다.

본 고에서는 필자의 연구결과를 중심으로 홀로그래픽 3D 디스플레이의 원리와 기술을 소개하고자 한다. 먼저 3D 물체로 부터 공간으로 방출되어 관측자에게 인지되는 3D 이미지 광파의 물리적 특성과 3D 이미지 광파의 위그너 분포 함수(Wigner distribution function;

# 특집 ┃ 3D Display

## 홀로그래픽 3D 디스플레이

김 휘\*

스플레이가 대체될 것으로 예상된다.

3D 디스플레이의 궁극적인 모습이라고 한다면 자연이 만들어 내는 홀로그래픽 3D 이미지 광파(3D light field)를 재생하는 홀로그래픽 3D 디스플레이라고 할 수 있다. 홀로그래픽 기록 매질에 기록된 아름다운 천연색 홀로그래픽 3D 이미지들을 보면 이와 같은 천연색 홀로그래픽 3D 이미지가 동영상으로 재현되는 궁극의 천연색 홀로그래픽 3D 디스플레이를 상상할 수 있고 이에 대한 기대감도 커지게 된다. Y. Gentet 은 자신의 홈페이지 (<http://www.ultimate-holography.com>)에서 직접 개발한 silver halide 홀로그래픽 물질에 기록한 다양한 천

WDF)를 사용한 수학적 성질에 대해 이론적으로 고찰하고, 여기서 얻은 이해를 기초로 홀로그래픽 3D 디스플레이 기술들과 현황 및 이슈들에 대해 이해하고 앞으로의 전망을 살펴본다.

## 2. 3D 이미지 광파의 물리적 특성

그림 1 에서의 홀로그래픽 3D 이미지의 예에서 보는 바와 같이, 3D 이미지 광파가 갖추어야 할 중요한 물리적 요소로는

\* 고려대학교 세종캠퍼스 전자및정보공학과

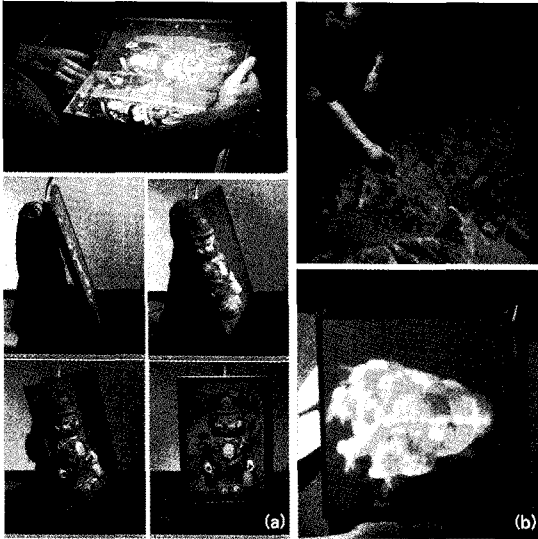


그림 1: (a) Y. Gonet의 천연색 3D 홀로그래픽 이미지 (ultimate-hologram), (b) Zebra imaging의 홀로그래픽 스테레오그램

첫째, 방향에 따라 다른 이미지가 두 눈에 보여야 하는 운동시차 (motion parallax)

둘째, 한 눈을 통해서 3D 이미지 광파의 공간적으로 다른 곳에 초점을 맞출 때 초점이 맞은 부분은 선명하게 보이고 그렇지 않은 부분은 흐리게 보이는 초점-비초점 효과 (monocular parallax) 를 들 수 있다.

그림 2에서 보인 것과 같이 삼각형 요소로 이루어진 3D 표면 물체(triangle-mesh-modeled 3D object)를 보도록 하자. 두 개의 손이 z-방향으로 거리를 두고 위치해 있다. 관찰자가 물체를 바라보는 각도를 관측 각도라고 하면 관측각도에 따라 관찰자가 보는 3D 표면 물체의 이미지는 변하게 된다. 3D 표면 물체로부터 방출되어

관찰자에게 인지되는 3D 이미지 광파가 운동시차를 갖는다는 것은, 다시 말해, 특정 방향의 관찰자에게 보이는 표면 물체의 삼각형 요소들의 집합이 달라진다는 것을 의미한다. 예를 들어, 10000 개의 삼각형 요소가 물체의 표면을 이루고 있다고 했을 때 A 라는 위치에서 관찰자는 총 10000 개의 삼각형 요소들 중 특정 2000 개의 삼각형 요소들만 볼 수 있다. 관찰자의 위치가 B 로 바뀌면 전 위치에서는 보이던 삼각형 요소 중 일부 물체의 앞부분에 가려져 관찰자에게 보이지 않게 되고 가려져 있던 삼각형 요소들, 예를 들어 새로운 600 개의 삼각형 요소들이 B 위치에서는 새롭게 보이게 되는 것이다. 이러한 효과를 occlusion 효과라고 한다. 이는 3D 디스플레이에서 필수적으로 구현해야하는 운동시차 요소이다.

한편으로 A 와 B 두 위치에서 모두 보이는 (상대적으로 물체의 앞부분에 위치한) 삼각형의 요소들도 있게 되는데 이러한 삼각형들도 관찰 위치가 변하게 되면 관찰자에게 인지되는 삼각형 요소들의 모양이나 삼각형 요소들 간의 상대적 위치도 달라지게 된다.

이렇게 삼각형 요소로 이루어진 3D 물체의 3D 이미지 광파가 갖는 필수적인 두 가지 운동시차 요소는

첫째, 보는 방향에 따라 요소가 보이거나 안보이거나하는 운동시차 효과(occlusion effect)

둘째, 두 방향에 대해서 공통적으로 보이는 삼각형 요소가 방향에 따라 보이긴 하되 위치에 따라 연속적으로 다르게 보이는 운동시차 효과이다.

첫 번째 효과와 관련해서는 요소의 크기에 따라 방향변화에 따른 연속적인 운동시차를 구현하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이는 요소의 해상도와 관련된 문제로 삼각형 요소의 밀도, 즉 해상도가 높아지면 사람에게 연속

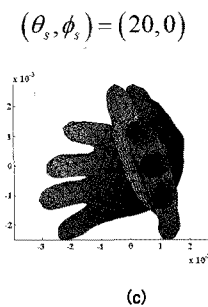
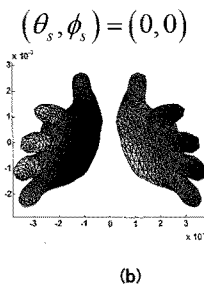
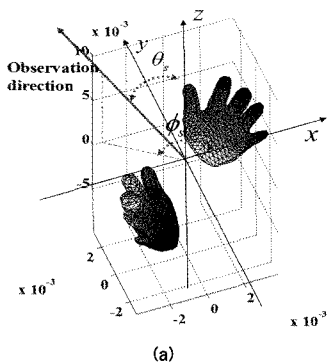


그림 2. 삼각형 메쉬로 이루어진 3D 표면 물체

적인 운동시차를 줄 수 있다.

두 번째 효과는 하나의 삼각형 요소를 사람이 볼 때, 방향에 따라 삼각형 모양이 연속적으로 달라지는 효과를 말하는데, 일정한 동공의 크기를 가지고 있는 사람의 눈이 이러한 구조를 갖는 광파를 인식할 때는 동공 크기의 유한성에 의해 삼각형에 초점을 일부러 잘 맞혔을 때는 삼각형이 선명하게 보이고 초점을 맞추지 않았을 때는 삼각형 요소가 흐리게 보이는 초점-비초점 효과가 나타나게 된다. (monocular parallax) 즉, monocular parallax는 연속적인 운동시차에 의해 발생하는 효과라고 할 수 있다. 이 두 번째 효과는 광파 회절(diffraction)에 의해서 나타난다. 그림 3은 관찰자로 부터 서로 다른 거리에 위치한 삼각형 요소들로서 삼각형 요소로부터 빛이 표면에 수직인 방향으로 나올때 삼각형의 모서리들에 의한 회절 효과를 관측 시뮬레이션(observation simulation)한 결과이다.[4] 먼저, 관측 방향에 따라 삼각형이 보이는 모양이 달라지는 현상을 눈여겨 볼 필요가 있는데, 그림 3의 시뮬레이션 결과에서 정면(관측각 = 0)에서 물체를 볼 때는 삼각형의 면이 밝게 보이고 다른 관측 각도에서 볼 때는 삼각형의 테두리만 밝게 보이는 회절 현상을 확인할 수 있다. 이러한 회절 효과는 관측자에게 삼각형 요소에 대한 연속시점을 제공한다. 관측자는 삼각형 요소를 바라보면서 관측각도를 연속적으로 달리할 때, 삼각형 요소의 모양이 연속적으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 이는 회절광파가 공간적으로 연속적인 분포를 갖기 때문이다. 이러한 회절 광파를 재생하는 홀로그래픽 3D 디스플레이는 자연스럽게 물체의 삼각형 요

소에 대한 연속시점을 제공하여 멀티뷰 3D 디스플레이에서 이슈가 되고 있는 accommodation-vergence conflict 효과를 갖지 않는 자연스러운 3D 이미지를 만들어 낼 수 있다. 한편, 그림 3에서 하얀색 동그라미는 관찰자의 눈이 초점을 맞추고 있는 삼각형을 나타낸다. 윗줄의 이미지는 왼쪽부분에 위치한 관찰자에게 가까운 삼각형에 초점을 맞춘 경우이고, 아랫줄의 이미지는 오른쪽에 위치한 관찰자에게 먼 삼각형에 초점을 맞춘 경우를 보여준다. 이를 통해 일정한 동공크기를 갖는 관찰자의 한 눈이 물체를 볼 때의 초점-비초점 현상, 즉 monocular parallax 효과가 광파 회절에 의해 표현됨을 알 수 있다. 결과적으로, occlusion 효과, 초점-비초점 효과등이 모두 연속적 운동시차 효과와 관련되어 있음을 알 수 있다.

### 3. 3D 이미지 광파의 Wigner Distribution Function

3D 이미지 광파의 구조는 광파가 표현하고자 하는 3D 물체의 표면의 구조에 의해 직접적으로 결정된다. 즉, 표면 텍스처의 구조에 의해 3D 이미지 광파의 물리적 구조가 결정이 된다는 것이다.[4,5] 한편으로 중요한 것이 광파의 코히어런트이다. 일반적으로 삼차원 표면 물체로부터 방출되어 관찰자에게 보이게 되는 광파는 부분 코히어런트(partially coherent) 광파이다. 이의 의미를 좀 더 깊이 이해하기 위해서는 부분 코히어런트 광파의

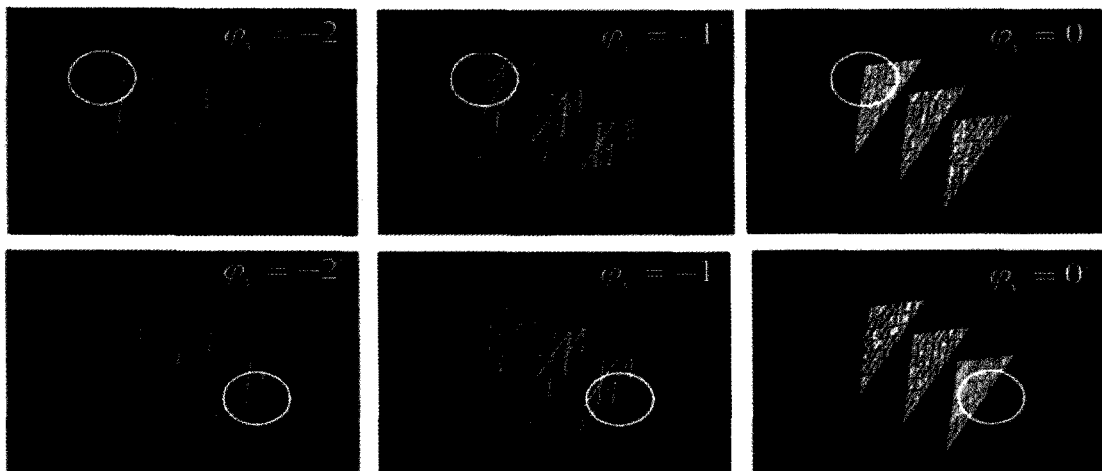


그림 3. 삼각형 요소부터 나오는 회절 광파의 관측 시뮬레이션

Wigner distribution function (WDF)을 통해 3D 이미 지 광파를 기술하는 것이 효과적이다.

일반적으로 부분 코히어런트 광의 분포는 cross-spectral density 를 통해 기술된다.[6] Cross-spectral density는 아래와 같이 정의된다.

$$\Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = E\varphi(\mathbf{r}_1, \omega)\varphi^*(\mathbf{r}_2, \omega), \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{r}_1 = (r_{x1}, r_{y1})$ ,  $\mathbf{r}_2 = (r_{x2}, r_{y2})$ ,  $\omega$  는 광파의 각주 파수 이다. 부분 코히어런트 광의 자유공간 전파나 근축 근사 일차광학계(paraxial first-order optical system) 를 통한 전달에서는 전파하는 물리량을 광파가 아닌 광 파의 통계량인 cross-spectral density의 전달을 통해 묘사하는 것이 일반적이다. 부분 코히어런트 광의 cross-spectral density  $\Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega)$ 에 대한 WDF  $W(\mathbf{r}, \mathbf{q})$ 는 다음과 같이 정의된다. [7, 8]

$$W(\mathbf{r}, \mathbf{q}) = \int \Gamma\left(\mathbf{r} + \frac{1}{2}\mathbf{r}', \mathbf{r} - \frac{1}{2}\mathbf{r}'\right) e^{-j2\pi\mathbf{q}\mathbf{r}'} d\mathbf{r}', \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{r} = \frac{\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2}{2}$ ,  $\mathbf{r}' = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$  이다. 공간적으로 완전히 인코히어런트 광의 cross-spectral density는 다음과 같다.

$$\Gamma\left(\mathbf{r} + \frac{1}{2}\mathbf{r}', \mathbf{r} - \frac{1}{2}\mathbf{r}'\right) = p(\mathbf{r})\delta(\mathbf{r}') \quad (3)$$

이에 대한 WDF는

$$W(\mathbf{r}, \mathbf{q}) = \int p(\mathbf{r})\delta(\mathbf{r}') e^{-j2\pi\mathbf{q}\mathbf{r}'} d\mathbf{r}' = p(\mathbf{r}), \quad (4)$$

즉 WDF는 공간 변수  $\mathbf{r}$ 에 대한 분포 함수가 된다. 이는 임의의 위치에서 방향변수(공간주파수)  $\mathbf{q}$ 에 대한 WDF 값이 동일함을 의미한다. 공간의 임의의 에서의 방향별 WDF 분포가 균일하다는 것이 인코히어런트 광파의 특 성이다.

한편, 완전 코히어런트 광파의 cross spectral density 를 구해보면

$$\Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega) = \varphi(\mathbf{r}_1, \omega)\varphi^*(\mathbf{r}_2, \omega) \quad (5a)$$

인데, 이러한 코히어런트 광파의 WDF 는

$$W(\mathbf{r}, \mathbf{q}) = \int \varphi\left(\mathbf{r} + \frac{1}{2}\mathbf{r}', \omega\right)\varphi^*\left(\mathbf{r} - \frac{1}{2}\mathbf{r}', \omega\right) e^{-j2\pi\mathbf{q}\mathbf{r}'} d\mathbf{r}' \quad (5b)$$

가 된다. WDF 의 물리적 의미를 이해하기 위해 역으로 광파를 WDF 로 표현할 수 있는데, 이때 코히어런트 광 파의 분포는

$$\varphi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\varphi(0,0)} \int W\left(\frac{\mathbf{r}}{2}, \mathbf{q}\right) e^{j2\pi\mathbf{q}\mathbf{r}} d\mathbf{q} \quad (6a)$$

와 같이 주어진다. 공간상의 임의의 지점  $\mathbf{r}$  에서 광파 분포  $\varphi(\mathbf{r})$  는 국소 진폭이  $w\left(\frac{\mathbf{r}}{2}, \mathbf{q}\right)$ 인 국소 평면파들의 코 히어런트한 선형결합으로 나타남을 볼 수 있다. 이는 한 지점  $\mathbf{r}$  에서 방향별 광파의 국소 진폭 분포가 임의로 주 어질 수 있고 방향별로 방사되는 광선은 위상을 갖는 complex ray 이고 각각의 전 공간에서의 광선들의 위상 관계가 코히어런트하게 되는 것을 의미한다.

WDF 와 관련된 또 다른 적분 표현으로서

$$I(\mathbf{r}) = |\varphi(\mathbf{r})|^2 = \varphi(\mathbf{r})\varphi^*(\mathbf{r}) = \int W(\mathbf{r}, \mathbf{q}) d\mathbf{q} \quad (6b)$$

이 있는데, 이 적분이 의미하는 것은 공간상의 임의의 지점  $\mathbf{r}$  에서 광파 세기 분포  $I(\mathbf{r})$  는 모든 방향별 WDF 의 총합으로 이루어 진다는 것이다. WDF 는 파동광학에서  $\mathbf{r}$  지점을 통과하는 국소 평면파의 radiant intensity를 의미한다고 볼 수 있다.[8]

Radiant intensity로서의 WDF 개념은 부분 코히어 러นต์ 광파에도 적용되어 [7], 임의의 공간  $\mathbf{r}$  지점 에서의 광파 세기  $I(\mathbf{r})$  은

$$I(\mathbf{r}) = \Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}) = \int W(\mathbf{r}, \mathbf{q}) d\mathbf{q} \quad (7)$$

와 같이 WDF 의 총합으로 나타난다. 부분 코히어런트 광파에서는 광파의 분포를 직접 구하지는 못하고, 광파 의 세기 분포만을 구할 수 있게 된다. 어떤 광파의 WDF 가 방향에 따라 함수적인 분포를 갖는다면 인코히어런트 광파의 WDF 식(4)와 비교했을때 반드시 그 광파는 부분 코히어런트 광파가 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 인코 히어런트 광원으로 3D 물체를 비추더라도 또는 삼차원 물체의 표면이 인코히어런트 광원을 발광하는 상황이라 고 하더라도 물체로부터 생성된 3D 이미지 광파는 관측 자에게 부분 코히어런트 광파로 보이게 된다.

만약, 관측자와 3D 물체 사이에 임의의 평면에서 3D 물체를 대신하여 인위적으로 3D 물체의 이미지 광파의 WDF 분포를 생성할 수 있다면 실제로 관측자는 WD 생 성 평면을 통해 (홀로그래픽하게) 3D 물체를 보는 것과 동일한 효과를 느끼게 될 것이다. 이러한 3D 물체의

WDF 생성 평면을 홀로그래픽 3D 디스플레이라고 할 수 있다.

#### 4. 부분 코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이

렌즈 어레이와 인코히어런트 2D 디스플레이를 사용한 집적영상기술(integral imaging)[12]은 이러한 부분 코히어런트 3D 이미지 광파의 공간 및 공간주파수 영역의 WDF 를 근사적으로 생성하는 기술이라고 할 수 있다. 공간적, 공간주파수적으로 샘플링된 부분 코히어런트 WDF 를 생성하는 기술적인 방법이라고 할 수 있다. 이론적으로, 집적영상기술에서 렌즈 어레이의 개개 (이상적인) 렌즈의 지름을 작게하고 렌즈가 덮는 2D pixel 영역을 더욱 세밀하게 하여 해상도를 높여서 렌즈와 2D 픽셀영역의 조합인 3D 픽셀이 3D 이미지 광파의 WDF 를 연속적으로 재생할 수 있다면, 이론적으로 집적영상기술을 사용해 3D 물체의 3D 이미지 광파를 완벽히 재생할 수 있을 것이다. 디스플레이 기술 관점에서 관측자의 시력의 한계 능력보다 WDF 분포가 세밀하게 표현될 필요는 없으므로 렌즈의 크기는 시력 분해능보다 작아질 필요는 없을 것이다. 또한 특정 시야각 범위안에서 3D 이미지 광파를 재생할 수 있으면 되기 때문에 3D 디스플레이는 실제 3D 물체 이미지 광파의 WDF 의 일부만을 샘플링하여 재생하면 된다. 집적영상기술 뿐만 아니라 렌티큘라/parallax barrier 디스플레이도 각각의 렌즈 평

면에서 3D 이미지 부분 코히어런트 광파의 WDF 를 재생하는 시스템으로 볼 수 있으나, 3D 물체의 WDF 데이터가 2D 이미지 패널 위에만 집적되어 있는 구조적인 제한 조건을 공유하고 있어 3D 이미지의 WDF 데이터가 충분히 세밀하게 표현되지 못하는 문제점을 안고 있다. 그러나 집적영상기술 및 렌티큘라 디스플레이는 3D 이미지의 부분 WDF 데이터 재생을 위한 간단하면서도 효과적인 방법이다.

부분 코히어런트 3D 이미지 광파의 WDF 를 생성하는 시스템의 알려진 예로는 도쿄농공대 Takaki 교수 그룹의 super-multi-view(SMV) 시스템[9-11](그림 4), 헝가리 Holografika사의 Holovizio 시스템[13-14](그림 5) 등이 있다. SMV 멀티뷰 프로젝션 3D 디스플레이와 Hologram-like 3D 디스플레이는 부분 코히어런트 3D 이미지 광파의 WDF를 screen lens와 Holographic screen 평면에서 각각 구현한 디스플레이 시스템으로 이해할 수 있다. 여기서 소개한 멀티 프로젝터 방식은 공간적으로 분산된 WDF 데이터를 광학적으로 중첩함으로써 부분 코히어런트 3D 이미지 광파를 합성하는 시스템 구조이다. Takaki 그룹의 시스템은 다수의 프로젝터 앞에 대형 프레넬 렌즈, 즉 스크린 렌즈를 사용하여 특정 시점의 이미지를 특정 방향에 있는 다수의 viewing zone 에 집중해 주는 기능을 구현하였다. 즉, 스크린 렌즈는 특정 하나의 프로젝터에 의해 렌즈 표면에 결상된 이미지를 동시에 특정 viewing zone 에서만 보이도록 하는 방향성 스크린이다. 개개의 프로젝터의 이미지가 각각의 viewing zone 에 보이는 영상을 담당하게 된다. 반면

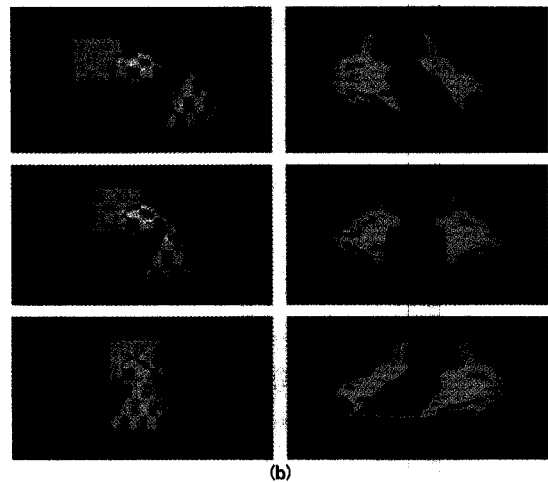
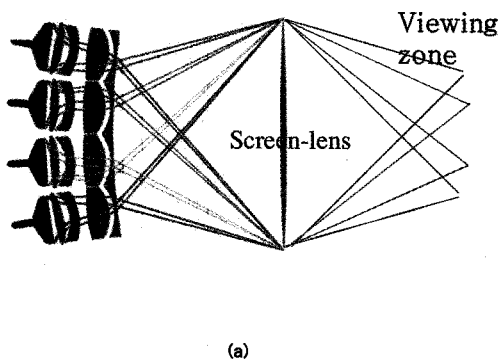
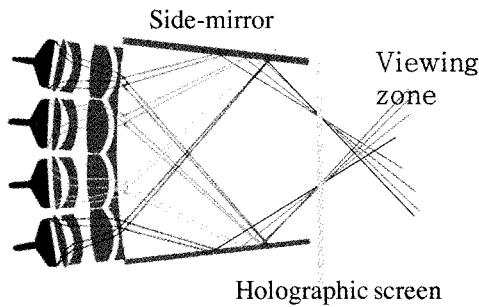


그림 4. Takaki 그룹의 256 뷰 super-multi-view 프로젝션 디스플레이 (a) 원리 (b) 3D 이미지

홀로그래픽 3D 디스플레이



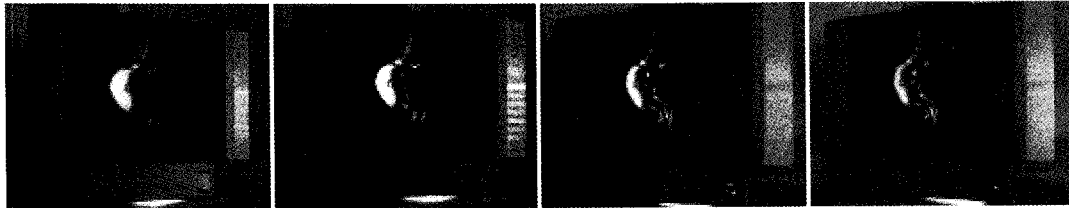
(a)

HoloVizio Displays

- HoloVizio Monitors
  - HoloVizio 128WD
    - 32", 10 Mpixel, 16:9
  - HoloVizio 96ND
    - 26", 7.4 Mpixel, 4:3
- 128 and 96 modules
- 50° FOV, 0.8° Φ
- 2D equiv. res: 512x320
- Up to 4 DVI inputs
  - 3 channels for 25 FPS



(b)



(c)

그림 5. Holografika의 128개의 프로젝션 모듈로 HoloVizio시스템 (a) 원리 (b) 시스템 사양 (c) 3D 이미지

Holografika 의 HoloVizio 는 개개의 프로젝터가 특정 시점의 영상을 담당하는 것이 아니라 스크린에서 재생되어야 할 WDF 데이터들을 정해 놓고 이를 역으로 프로젝터 방향으로 광선 추적하여 개개의 프로젝터에게 담당할 WDF 데이터를 할당하게 된다. 다수의 프로젝터가 스크린에 3D 이미지의 WDF 데이터를 집합적으로 생성하게 되는 구조이다. 관찰자는 특정 위치에서 다수의 프로젝터로부터 만들어진 광선들을 조합하여 3D 이미지를 보게 되는데, 이 점이 Takaki 그룹의 방식과 다른 점이다. 그림 5(a)에서 보듯이 측면 거울과 스크린 역할을 하는 narrow-angle 확산판(홀로그래픽 확산판)이 HoloVizio 시스템의 필수 소자이다.

Zebra imaging은 holographic stereogram 인쇄 기술을 바탕으로 홀로그래픽 3D 디스플레이를 연구 개발하고 있다.[3] 그림 6 은 Zebra imaging 의 홀로그래픽 스테레오 그램 인쇄기술을 설명하는데, STEP3 에서 나타내었듯이 홀로그래프 매질에 렌즈와 진폭 SLM 에 의해 만들어지는 수렴광파(converging optical wave)를 픽셀 단위로 순차적으로 기록하게 된다. 이는 집적영상기술에서 렌즈와 렌즈 뒤의 2D 픽셀 분포를 홀로그래프 매질에 직접기록하여 동일한 효과를 보는 것이라고도 이해할 수 있다. 홀로그래프 매질에 고밀도의 집적영상 디스플레이의

Digital Holo Technology Explanation

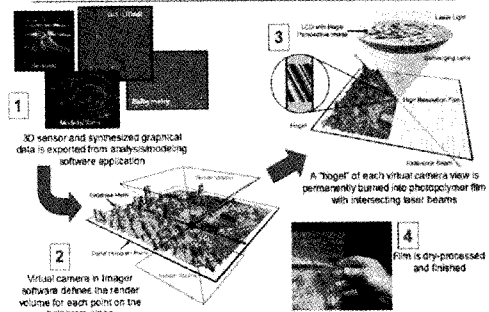
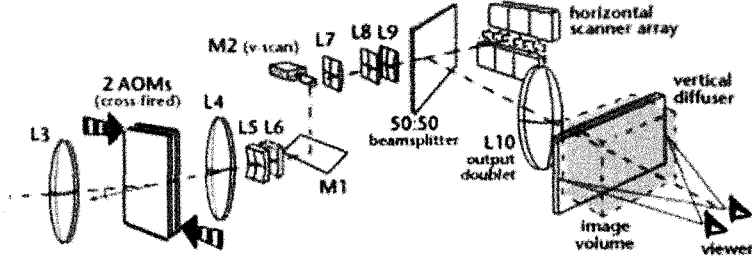


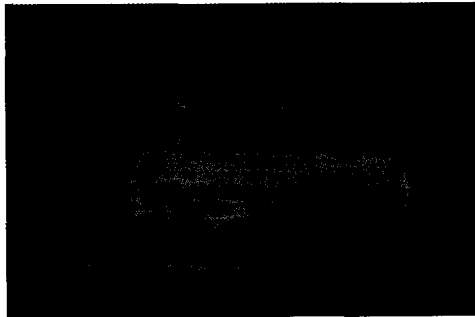
그림 6. Zebra imaging의 Holographic stereogram 프린팅 기술

3D 단위픽셀을 홀로그램 볼륨 격자 형태로 기록하는 과정이다. 홀로그래픽 영상 재생시 홀로그램 판의 각각의 픽셀에서는 STEP3 에서 기록된 WDF 광파 데이터가 공간으로 방출되면서 관찰자는 고해상도 광시야각의 홀로그래픽 3D 이미지를 보게 된다. 이와 같은 홀로그래픽 스테레오그램의 원리를 디스플레이로 구현하는 것이 남은 과제인데, 아직 발표되고 있지 않지만, MIT 미디어랩의 Mark II 시스템[15,16]을 보면 Zebra imaging 의 접근 방법을 대략 유추해 볼 수 있다. 그림 7(a)에서 AOM 은 하나의 홀로그래픽 스테레오그램의 픽셀을 만들어낸

mark-II display overview



(a)



(b)

그림 7. AOM을 사용한 동적인 홀로그래픽 스테레오그램 (MIT 미디어랩에서 개발한 Mark II)

다. AOM을 통해 빛의 공간상에 그 점에서 나타내어야 할 WDF 방향 분포 radiant intensity 를 만들어낸다. 이를 CRT 디스플레이에서 전자선을 래스터 스캐닝하는 방법과 동일하게 수직방향 확산판 스크린에 실시간으로 래스터 스캐닝한다. AOM 에 의해 만들어진 회절광파 픽셀은 그 자체로 해당 3D pixel의 WDF 분포를 갖고 있어, 관찰자는 스크린에서 조합적인 3D 이미지를 보게된다. 그림 7(b)는 이러한 실시간 AOM 홀로그래픽 스테레오그램 디스플레이의 3D 영상을 보여준다.

## 5. 코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이

일반적으로 홀로그래픽 3D 디스플레이라고 하면 코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이를 의미한다.[15, 20] 완전한 코히어런스를 갖는 3D 이미지 광파의 생성 기술은 앞에서 설명한 부분 코히어런트 3D 이미지 광파 합성과는 다른 맥락에서 중요성을 찾을 수 있다. 이론적으로 사람이 일상생활을 통해 보게되는 3D 이미지는 부분 코히어런트 광파이다. 자연스러운 3D 영상을 생성하기 위해서는 디스플레이의 공간해상도 및 공간 주파수 영역의

해상도가 모두 높아야 하는데, 현재 기술에서는 공간주파수 영역을 세밀하게 거의 연속적으로 표현할 수 있는 부분 코히어런트 3D 디스플레이 패널을 구현하는 것이 현실적으로 어렵다. 반면에, 코히어런트 3D 이미지 광파의 홀로그래픽한 합성은 기본적으로 공간 해상도는 작으나 공간 주파수 영역을 연속적으로 표현할 수 있는 특성이 있어, 부분 코히어런트 3D 디스플레이와는 차별화된다. 그림 4의 Takaki 그룹의 멀티뷰 디스플레이는 사람의 동공안에 다수의 뷰를 동시에 보일 수 있도록 공간주파수를 세밀하게 샘플링하여 이를 super-multi-view (SMV) 3D 디스플레이라고 명명 하였다. 이러한 SMV 효과는 홀로그램 격자에 의해 회절파가 생성되는 코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이의 자연스러운 특성이다. 다만, 코히어런트 홀로그래픽 디스플레이에서는 SMV 조건이 회절효과에 의해 자연스럽게 대신 이미지의 크기 및 시야각의 크기에 제한이 있게된다. 현재의 2D 디스플레이 패널의 해상도 수준에서 부분코히어런트 3D 디스플레이와 코히어런트 3D 디스플레이는 서로 다른 3D 요소를 표현해 내는 기술로 구분되어 있지만, 디스플레이의 해상도가 향상되면 동일한 원리로 작동하는 하나의 3D 디스플레이 기술로 통합될 것이다.

홀로그래픽 3D 디스플레이

부분 코히어런트 3D 디스플레이에서 SMV 효과를 만들어내는 것이 중요한 이슈라고 한다면 코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이에서는 이미지의 크기 및 시야각의 확대가 중요한 이슈로서 활발히 연구되고 있다.[17-21] 코히어런트 3D 이미지를 생성하기 위해서는 코히어런트 3D 광파 모델[4], computer generated hologram (CGH)의 합성 방법론 및 이를 홀로그래픽 하게 재생하기 위한 SLM[22-27]이 필요하다. 3D 이미지 광파 모델은 CGH의 합성에 있어 필수적인 요소로서 계산속도의 향상은 물론 다양한 3D 물체의 텍스처, 질감, 조명 효과 등의 시각적 표현과 관련된 이론적 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 식6(a)에서 보듯이, 코히어런트 3D 이미지 광파는 공간의 모든 점에서 국소 평면파가 코히어런트하게 중첩되어야 한다. 이같은 개념을 기반으로 3D 이미지 광파를 계산하는 방법으로는 3D 물체를 점구름(point cloud) 모델로 보고 각각의 점광원에서 발생된 구면파를 공간적으로 중첩하는 방법 (coherent ray tracing : CRT)과 3D 물체를 삼각형 요소의 집합으로 보고 각각의 삼각형 요소로부터 발생하는 회절파를 공간적으로 중첩하는 방법(angular spectrum representation) [4]등이 있다. 그림 8(a)는 3D 물체를 점구름 모델로 나타낸 것이고 그림 8(b)는 삼각형 요소 모델을 사용하여 3D 이미지 광파를 생성하는 개념을 보여준다.

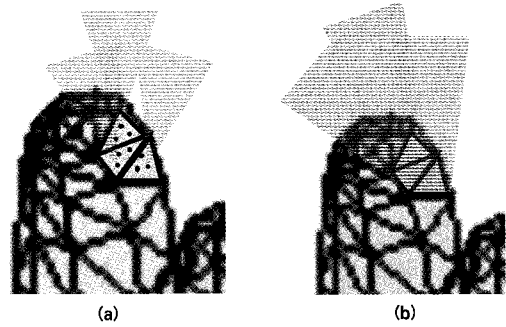


그림 8. (a) 표면 반사의 점구름(point cloud) 모델 (b) 표면 반사의 삼각형 요소 모델

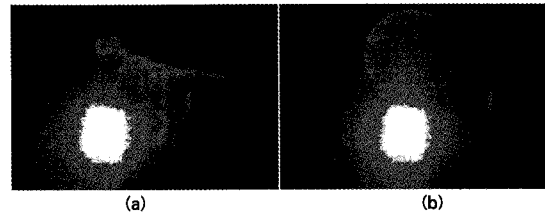


그림 9. 점구름 모델을 사용하여 생성한 홀로그래픽 3D 이미지 (2009년 Chiba 대학, 28)

점구름 모델을 사용해 물체로부터 일정 거리 떨어진 곳에 위치한 홀로그램 기록 평면상의 광파 분포를 구하는 경우, 광파 분포  $H(x', y')$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$H(x', y') = \sum_{m=1}^N \frac{A_m}{r_m} \exp[j(k_0 r_m + \phi_m)], \quad (8)$$

여기서,  $r_m = \sqrt{(x' - x_m)^2 + (y' - y_m)^2 + z_m^2}$  는 물체 표면에서의 m 번째 점  $(x_m, y_m, z_m)$  에서 홀로그램 평면  $(x', y', 0)$  까지의 거리이다. N 은  $(x', y', 0)$  에 광파의 보낼 수 있는 물체 표면 점들의 총 개수이다. Occlusion 효과를 내려면 홀로그램 평면의 한점에 실제로 광파를 보낼 수 있는 점들의 광파만을 기록해서 재생시에 occlusion 효과 및 운동시차를 동시에 갖는 홀로그램 이미지 광파의 합성이 가능하다. 그림 9 는 점구름 모델을 통해 합성한 CGH 로 재생한 홀로그래픽 3D 이미지를 보여준다.

점구름 모델에서는 물체의 표면을 점들의 공간적 집합(point cloud model)로 표현하는데 홀로그램 이미지를

재생했을 때 마치 안개가 낀 것과 같은 뿌연 효과를 나타내게 되고 3D 물체를 표현하기 위한 점들이 많아야 하기 때문에 표면이 매끄러운 물체들을 묘사하고 CGH 를 계산할 때 필요한 계산량이 크다. 이러한 점구름 모델을 보다 개선하여 물체 표현의 정확성을 높이고 물체 표면의 다양한 텍스처 효과 표현을 가능하도록 하는 방법으로서 3D 물체의 표면을 삼각형 요소 집합으로 모델링하고 발광 단위체를 점이 아닌 면으로 정의해서 삼각형 요소에서 빛이 발광하게 하여 물체의 홀로그램을 합성하는 방법이 최근 제안되었다.[4] 삼각형 요소의 집합체로 3D 물체를 모델링할 때, 점구름 모델에서 occlusion 효과를 고려하는 것과 마찬가지로 방식으로 홀로그램 평면의 한 점에 직접 빛을 보낼 수 있는 삼각형 요소들의 광파의 중첩을 고려하면서 occlusion 효과를 갖는 홀로그램을 합성할 수 있다. 삼각형 요소 모델과 점구름 모델은 occlusion 효과를 포함하여 3D 이미지 광파가 가져야 할 물리적 속성을 모두 나타낼 수 있게 한다. 그림 10 은 삼각형 요소 모델을 사용하여 합성한 CGH 로 재생한 홀로그래픽 3D 이미지를 보여준다. 실험 결과에서 왼쪽 편의 붉은색 이미지는 컴퓨터 시뮬레이션 결과이고, 오른쪽 편의 회색 이미지는 실제 실험에서 얻은 결과이다. 초점 위치에 따른 초점-비초점 효과가 재현되는 것은 물론 이론과 실험



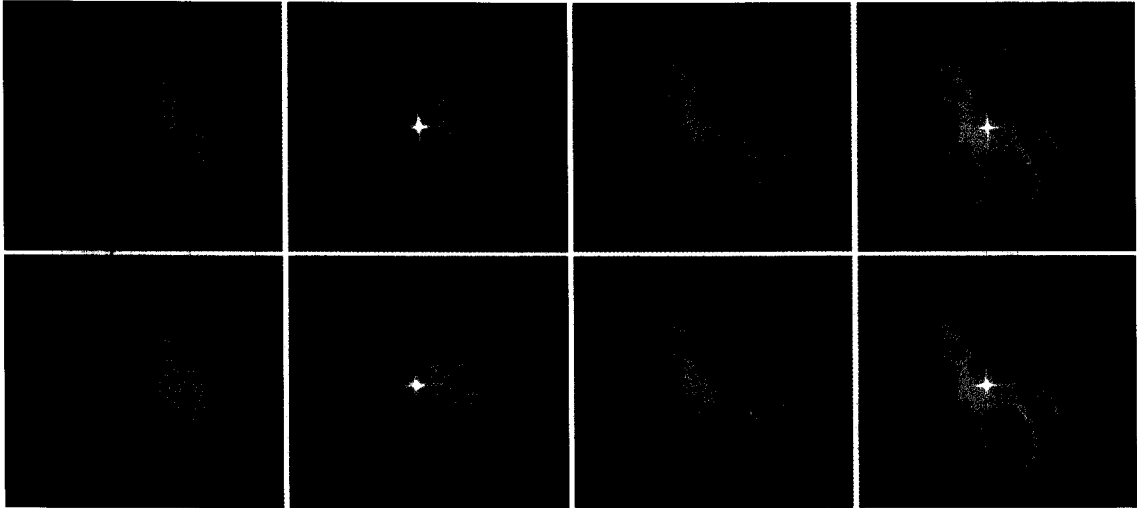


그림 10. 삼각형 요소 모델을 사용하여 생성한 홀로그래픽 3D 이미지 (4). 여기서 붉은 색 그림은 초점/비초점 효과를 보이는 광파의 관측 시뮬레이션 결과이고 회색 그림은 실제 실험 결과임.

의 결과가 거의 동일함을 확인할 수 있어, 앞에서 설명한 3D 이미지 광파 모델의 정확성을 확인할 수 있다.

## 6. 홀로그래픽 3D 디스플레이 기술의 중요 이슈들

코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이가 회절효과에 의해 SMV 조건을 갖는 3D 이미지를 생성하고 있지만, 이미지 크기와 시야각 확대 문제는 시급히 극복해야 할 기술적 난제이다. 현재의 SLM 기술은 넓은 시야각과 큰 사이즈의 이미지를 갖는 홀로그래픽 3D 디스플레이를 구현하는데는 한계가 있다. 무엇보다도 디바이스 영역에서의 기술적 혁신이 요구된다고 할 수 있다. 홀로그래픽 디스플레이용 초고해상도 SLM의 개발은 기초 연구 단계에 있다. 다양한 3D 물체에 대한 3D 광파 이미지의 모델에 대한 연구는 보다 다양한 표면과 시각적 효과를 담아내기 위한 3D 이미지 광파 모델에 대한 연구가 더불어 계속 발전되어야 한다.

홀로그래픽 3D 디스플레이에서 이미지 사이즈와 시야각은 서로 trade-off 관계를 가지고 있는데 이는 3D 디스플레이의 기본적인 정보관계이다. 비록 SLM 자체를 초고해상도로 구현하는 소자 영역의 연구 개발이 3D 디스플레이 기술의 근본적인 혁신을 만들어내겠지만, 제한된 SLM 자원을 효율적으로 이용하여 3D 홀로그래픽 이

미지의 크기와 시야각을 향상하는 기술들도 중요한 연구 분야이다. 이러한 연구들 중 SLM의 픽셀 분포를 광학적으로 재분포시켜 수직방향(vertical direction)의 해상도를 희생하고 수평방향(horizontal direction)의 SLM bandwidth를 늘려 시야각을 향상시키는 기술들이 있다.[17, 19] 광학적으로 수평방향으로 SLM 픽셀을 늘려 시야각을 향상하는 (홀로그램 bandwidth를 향상) 기술은 Takaki 그룹에서도 연구된 바 있다. [19] 이와 더불어 그림 11에서 보듯이 curved SLM array를 구성하여 CGH의 수평방향 bandwidth를 확대하는 기법도 제안된 바 있다.[17]

한편, 단일 관측자에 대해서 20인치급 크기와 헤드 트래킹 기술을 이용하여 어댑티브한 시야각을 갖는 홀로그래픽 디스플레이를 제안한 독일 SeeReal사의 Tracked Viewing Window (TVW) 기법도 주목할 만하다. 그림 12(a)에서 SeeReal 시스템의 TVW의 개념을 나타냈는데, 관측자의 두 눈에 SLM 패널 전면에서 지향성 백라이트가 두 눈, 두 눈의 각각의 viewing window를 향해 얇은 시야각의 홀로그래픽 3D 이미지 광파를 보낸다. 두 눈의 위치를 트래킹하면서 홀로그래픽 3D 이미지를 두 눈에만 보이게 만드는 기술이 TVW이다. SeeReal은 두 개의 수직인 방향의 렌티큘라 렌즈 어레이를 사용하여 양안시차와 TVW를 구현하는 방식을 쓰고 있는데, 왼쪽 눈과 오른쪽 눈에는 초점/비초점(monocular parallax) 효과를 갖는 양안 시차를 갖는 이미지를 보여주게 되어

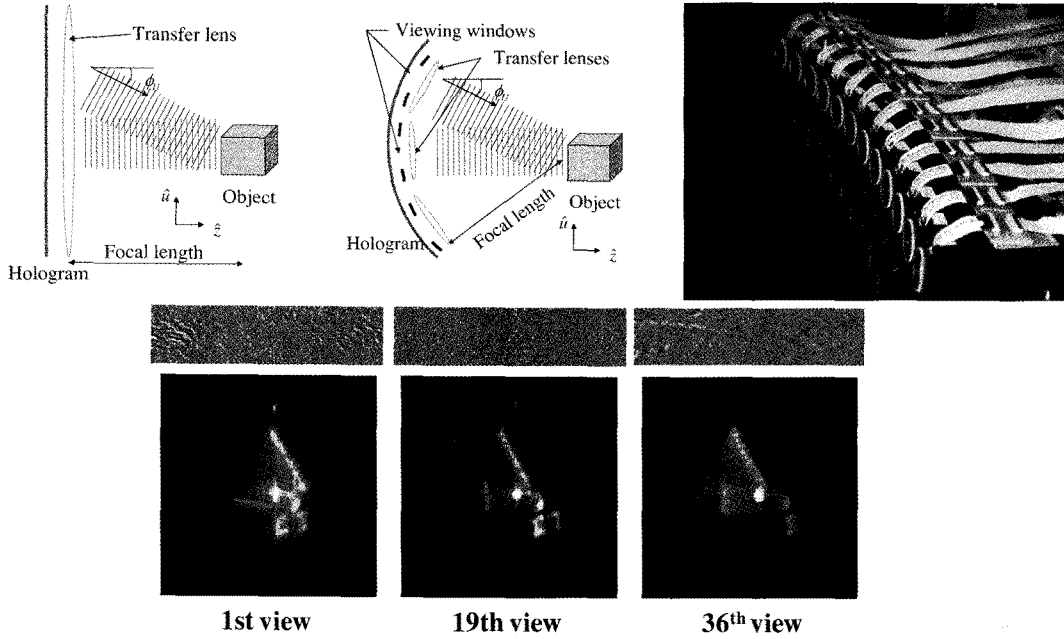


그림 11. 광학적 픽셀 재분배 장치가 되어 있는 다수 SLM을 원호를 따라 배치하여 22도의 홀로그래픽 이미지 시야각을 구현한 연구 (서울대 2008년, 17)

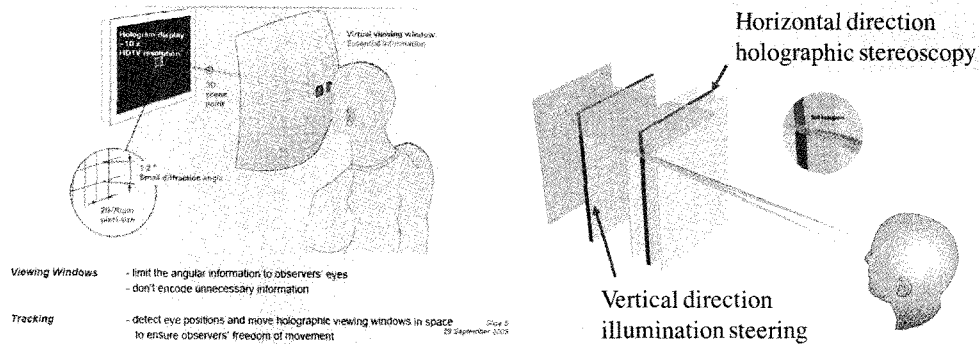


그림 12. (a) TWV 기술의 원리 및 (b) 양안시차 방식의 홀로그래픽 3D 디스플레이를 기본으로 하는 SeeReal 시스템의 광학 구조

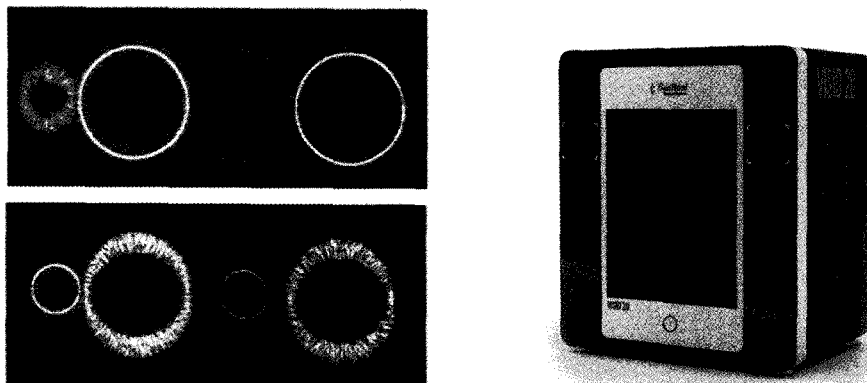


그림 13. (a) SeeReal의 Holographic 3D image가 갖는 monocular parallax (b) Vision20 시스템

있다.(그림 13(a)) 무안경식 양안 시차 3D 디스플레이 기술과 홀로그래픽 3D 기술을 결합한 흥미로운 시스템이라고 할 수 있다. 그림 13(b)는 20 인치 프로토타입인 Visio 20 의 모습을 보여준다.

## 7 결론

본 고에서는 홀로그래픽 3D 의 기본원리, 현황, 기술적 이슈들에 대해서 논의하였다. 부분 코히어런트 광파의 WDF 표현을 통한 3D 이미지 광파의 구조에 대한 논의로 출발하여 완전 코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이 및 인코히어런트 광원을 사용하면서 3D 이미지의 radiant intensity WDF 데이터를 구현하는 부분 코히어런트 디스플레이를 모두 홀로그래픽 3D 디스플레이의 범주로 이해해 보았다. 연속 시점의 구현이라는 관점에서 보았을때, 부분 코히어런트 3D 디스플레이는 패널 기술의 한계로 인하여 SMV 조건을 제한된 조건에서만 구현할 수 있는 반면, 코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이는 회절에 의한 자연스러운 SMV 조건을 가지고 있다는 점에 차이점을 갖는다고 할 수 있다. 그러나, 패널의 해상도가 충분히 향상되면 부분 코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이와 코히어런트 홀로그래픽 3D 디스플레이는 기술적으로 통합될 것으로 앞에서의 설명을 토대로 예상할 수 있다. 홀로그래픽 3D 의 근본적인 기술 혁신은 초고해상도의 2D 이미지 또는 SLM 패널을 만들어내는 기술에 있음을 강조하고자 한다. 아직까지 연구 단계에 있는 홀로그래픽 3D 디스플레이와 관련된 원천기술의 확보를 위해 연구 개발 노력을 계속해야 할 것이다.

최근 녹색성장 및 가상현실의 큰 문맥에서 3D 디스플레이가 핵심기술로 부각되고 있다. 가상현실은 에너지 소모가 큰 실제 실험적인 업무를 가상의 세계에서 구현함으로써 저에너지 녹색성장의 핵심 키워도로도 주목받고 있는데, 3D 디스플레이는 이러한 가상현실의 핵심적인 기술로서 그 기술적 잠재력과 파급력이 크다고 할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] Y. Gentet and P. Gentet, "Ultimate emulsion and its applications: a laboratory-made silver halide emulsion of optimized quality for monochromatic pulsed and full color holography," *Processings of SPIE* 4149, 56-62, 2000.
- [2] <http://www.media.mit.edu/spi>
- [3] <http://www.zebraimaging.com>
- [4] H. Kim, J. Hahn, and B. Lee, "Mathematical modeling of triangle-mesh-modeled three-dimensional surface objects for digital holography," *Applied Optics* 47, D117-D127, 2008.
- [5] K. Matsushima, "Computer-generated hologram for three-dimensional surface objects with shade and texture," *Applied Optics* 44, 4607-4614, 2005.
- [6] L. Mandel and E. Wolf, *Optical Coherence and Quantum Optics*, Cambridge University Press, New York, 1999.
- [7] M. J. Bastiaans, "The Wigner distribution function of partially coherent light," *Journal of Modern Optics* 28, 1215-1224, 1981.
- [8] Z. Zhang and M. Levoy, "Wigner distributions and how they relate to the light field," *Proceedings of the IEEE International Conference on Computational Photography*, 2009.
- [9] Y. Takaki, and Y. Hayashi, "Increased horizontal viewing zone angle of a hologram by resolution redistribution of a spatial light modulator," *Applied Optics* 47, D6-D11, 2008.
- [10] Y. Takaki and N. Nago, "Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display," *Optics Express* 18, 8824-8835, 2010.
- [11] Y. Takaki, Y. Urano, S. Kashiwada, H. Ando, and K. Nakamura, "Super multi-view windshield display for long-distance image information presentation," *Optics Express* (will be published).
- [12] J. Park, K. Hong, and B. Lee, "Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging," *Applied Optics* 48, H77-H94, 2009.

- [13] T. Balogh, T. Forgács, T. Agocs, O. Balet, E. Bouvier, F. Bettio, E. Gobetti, and G. Zanetti, "A scalable hardware and software system for the holographic display of interactive graphics applications," In EUROGRAPHICS 2005 Short Papers Proceedings, (Dublin, Ireland, 2005).
- [14] <http://www.holografika.com/>
- [15] S. A. Benton and V. M. Bove, Holographic Imaging, Wiley-Interscience, 2008.
- [16] Q. Y. J. Smithwick, D. E. Smalley, V. Micheal Bove, and J. Barabas, "Progress in holographic video displays based on guided-wave acousto-optic devices," Proceedings of SPIE 7233, 723302-723302-12 (2009).
- [17] J. Hahn, H. Kim, Y. Lim, G. Park, and B. Lee, "Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators," Optics Express 16, 12372-12386, 2008.
- [18] J. Kim, S.-W. Min, and B. Lee, "Viewing region maximization of an integral floating display through location adjustment of viewing window," Optics Express 15, 13023-13034, 2007.
- [19] Y. Takaki and Y. Hayashi, "Increased horizontal viewing zone angle of a hologram resolution redistribution of a spatial light modulator," Applied Optics, 47, D6-D11, 2008.
- [20] R. H-Y Chen and T. D. Wilkinson, "Field of view expansion for 3-D holographic display using a single spatial light modulator with scanning reconstruction light," 3DT-CON 2009.
- [21] H. I. Bjelkhagen, "Color holography: its history, state-of-the-art and future," Proceeding of SPIE 6252, 62521U, 2006.
- [22] J. Hahn, H. Kim, and B. Lee, "Optimization of the spatial light modulator with twisted nematic liquid crystals by a genetic algorithm," Applied Optics 14, D87-D95, 2008.
- [23] P. J. Roadrigo, I. R. Perch-Nielsen, and J. Gluckstad, "High-speed phase modulation using the RPC method with a digital micromirror-array device," Optics Express 14, 5588-5593, 2006.
- [24] <http://www.bostonmicromachines.com/deformable-mirrors.htm>
- [25] T. D. Wilkinson, X. Wang, K. B. K. Teo, W. I. Milne, "Sparse Multiwall Carbon Nanotube Electrode Arrays for Liquid-Crystal Photonic Devices," Advanced Materials 20, 363-366, 2008.
- [26] D. P. J. Roadrigo, I. R. Perch-Nielsen, and J. Gluckstad, "High-speed phase modulation using the RPC method with a digital micromirror-array device," Optics Express 14, 5588-5593, 2006.
- [27] T. D. Gerke and R. Piestum, "Aperiodic volume optics," Nature photonics 4, 188, 2010.
- [28] Y. Ichihashi, N. Masuda, M. Tsuge, H. Nakayama, A. Shiraki, T. Shimobaba, and T. Ito, "One-unit system to reconstruct a 3-D movie at a video-rate via electroholography," Optics Express 17, 19691-19697, 2009.

이력



김진

2010년 3월 - 현재 고려대학교 세종캠퍼스 과학기술대학 전자및정보공학과 조교수  
 2008년 3월 - 2010년 2월 삼성전자 LCD 책임연구원  
 2003년 3월 - 2007년 8월 서울대학교 전기컴퓨터공학부, 공학 박사  
 2001년 2월 - 2003년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학 석사  
 1996년 2월 - 2000년 8월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학 학사