

# Holography 기술

박재형  
충북대학교

## 요 약

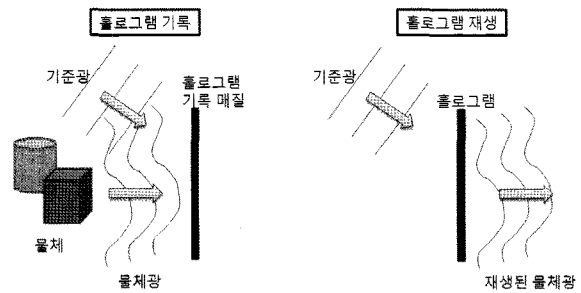
본고에서는 홀로그래피 기술을 알아본다. 홀로그래피 기술은 파동 광학에 기초하여 빛의 크기뿐만 아니라 위상까지 촬영하고 재생할 수 있는 기술이다. 특히 최근 촬상 소자와 광변조소자의 발달로 홀로그래피의 디지털 방식으로서의 촬영, 처리, 재생이 가능해지면서 이를 응용한 다양한 홀로그래피 기술들이 개발되고 있다. 본 고에서는 이 중에서 3차원 촬영 및 3차원 디스플레이에 응용되고 있는 홀로그래피 기술을 중심으로 알아본다.

같이, 불체광에 우리가 이미 크기/위상 분포를 알고 있는 기준광을 더한다. 불체광과 기준광은 수광 소자 평면에서 간섭무늬를 형성한다. 이 간섭무늬는 빛의 크기 분포이므로 수광 소자에 의하여 촬영될 수 있으며, 그 모양이 불체광과 기준광의 위상 및 크기 분포에 의하여 결정되므로 불체광의 위상 및 크기 분포의 정보를 포함하고 있다. 따라서 불체광과 기준광의 간섭 무늬를 촬영함으로써 불체광의 크기 및 위상분포의 획득이 가능하다.

## I. 서 론

전통적인 의미의 홀로그래피 기술은 빛의 간섭현상을 이용하여 물체로부터의 빛의 크기 및 위상 분포를 저장하고 이를 광학적으로 재생하는 기술을 의미한다 [1]. (그림 1)은 이러한 홀로그래피의 원리를 보여준다.

홀로그래피의 촬영은 물체로부터의 빛의 크기와 위상 분포를 기록하는 것이 목적이다. 만약 빛의 위상에 반응하는 수광 소자가 있다면 보다 편리하게 위상 정보를 획득하는 것이 가능할 것이다. 그러나 CCD, 필름등 모든 수광 소자는 빛의 크기에만 반응하므로 위상 정보를 직접적으로 획득하는 것은 불가능하다. 홀로그래피는 이러한 제한점을 극복하기 위하여 간섭 현상을 이용하여 간접적으로 위상 정보를 획득하는 방법을 사용한다. (그림 1)의 왼쪽에서 보는 바와



(그림 1) 홀로그래피의 원리

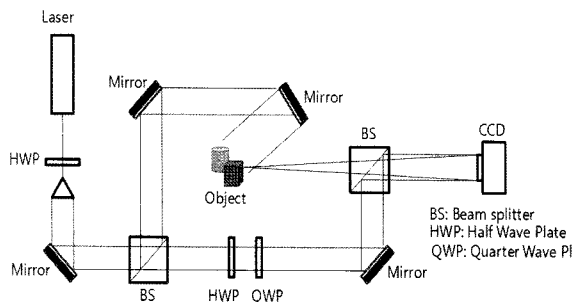
홀로그래피의 재생은 (그림 1)의 오른쪽에서와 같이 이루어진다. 불체광과 기준광의 간섭 무늬에 기준광을 다시 비추어주면, 기준광이 간섭 무늬에 의하여 회절되며, 그 일부가 원래의 불체광과 동일한 크기 분포와 위상 분포를 가지고 재생된다. 재생광은 본래의 불체광과 동일한 크기 및 위상 분포를 지니고 있으므로, 재생광을 관측할 경우 본래의 물체를 보는 것과 마찬가지로 생생한 3차원 영상의 관측이 가능하다.

전통적인 홀로그래피 기술에서는 이러한 홀로그램 기록 및 재생 매질로서 높은 해상도의 필름을 사용하였다. 따라서 동화상의 촬영 및 재생이 불가능 하였으며, 일단 촬영된 홀로그램 데이터의 다양한 변형 처리를 할 수 없었다. 최근에는 필름대신 CCD를 이용하여 촬영하고, 공간광변조기(SLM)을 이용하여 재생함으로써, 홀로그램 데이터를 디지털적인 방법으로 저장하고 처리하며 재생하는 것이 가능해졌다. 또, 일단 촬영된 간섭 무늬 패턴에서 물체광의 위상 및 크기 분포만을 추출한 다음, 이를 이용하여 보다 높은 효율로 물체광을 재생해 내거나, 실제 물체의 촬영 없이 3차원 컴퓨터 그래픽 물체에 대한 홀로그램을 디지털적으로 합성하여 이를 3차원 영상으로 재생하는 기술들도 활발히 개발되고 있다. 본 고에서는 이러한 디지털 홀로그래피 기술들을 3차원 정보 촬영과 3차원 디스플레이를 중심으로 알아본다.

## II. 홀로그램 촬영 기술

### 1. 가간섭성 광원을 이용한 홀로그램 촬영

물체광의 위상과 크기 분포를 촬영하기 위하여 일반적으로 간섭계를 이용한다. (그림 2)는 일반적인 홀로그램 촬영을 위한 간섭계를 보여준다.



(그림 2) 홀로그램 촬영 간섭계

광원으로는 가간섭성 광원인 레이저를 이용한다. (그림 2)에서 보여지는 바와 같이, 광원에서 출발한 빛은 평행광으로 필터링된 후 빔스플리터에 의하여 물체광과 기준광 두 개의 경로로 나누어 진다. 물체광과 기준광은 CCD면에서

다시 합쳐져서 간섭무늬를 형성하며, 이 간섭무늬가 CCD에 촬영된다.

이와 같은 구성을 통하여 촬영되는 것은 물체광과 기준광의 간섭무늬이다. 이 간섭무늬는 물체광의 크기와 위상 분포에 대한 정보를 포함하고 있으나 간접적으로만 갖고 있을 뿐이다. 보다 유용한 응용들을 위해서는 물체광의 크기와 위상 분포를 직접적으로 추출할 수 있어야 한다.

최근, 이와 같은 목적에서 위상 천이 디지털 홀로그래피 기술이 많이 활용되고 있다 [2]. 위상 천이 디지털 홀로그래피 기술에서는 일정한 간격으로 기준광에 위상 천이를 주며 여러 개의 홀로그램을 촬영한다. 촬영된 여러 개의 홀로그램을 이용하여 기준광의 영향을 제거하고 본래 물체광의 위상과 크기 분포만을 추출할 수 있다. 예를 들어, 90° 간격으로 기준광에 위상 천이를 주며 4번의 홀로그램을 촬영하는 경우를 보자. 기준광을  $R = |R|\exp(j\theta_R)$ , 물체광을  $O = |O|\exp(j\theta_O)$ 라고 표시하면, 기준광에 90° 씩 위상 천이를 주며 촬영된 4개의 홀로그램은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$I_{0^\circ} = |R + O|^2 = |R|^2 + |O|^2 + RO^* + R^*O$$

$$I_{90^\circ} = |\text{Re}^{j\pi/2} + O|^2 = |R|^2 + |O|^2 + \text{Re}^{j\pi/2} O^* + R^* e^{-j\pi} O$$

$$I_{180^\circ} = |\text{Re}^{j\pi} + O|^2 = |R|^2 + |O|^2 + \text{Re}^{j\pi} O^* + R^* e^{-j\pi} O$$

$$I_{270^\circ} = |\text{Re}^{j3\pi/2} + O|^2 = |R|^2 + |O|^2 + \text{Re}^{j3\pi/2} O^* + R^* e^{-j3\pi/2} O$$

따라서

$$\theta_O - \theta_R = \tan^{-1} \frac{I_{0^\circ} - I_{180^\circ}}{I_{90^\circ} - I_{270^\circ}}$$

$$|O||R| = \frac{I_{0^\circ} - I_{180^\circ}}{4 \cos(\theta_O - \theta_R)}$$

과 같은 식을 유도할 수 있다. 이 때, 기준광의 크기  $|R|$  및 위상  $\theta_R$ 은 알려진 값이므로, 위의 식에서 물체의 위상과 크기 분포를 구해낼 수 있다.

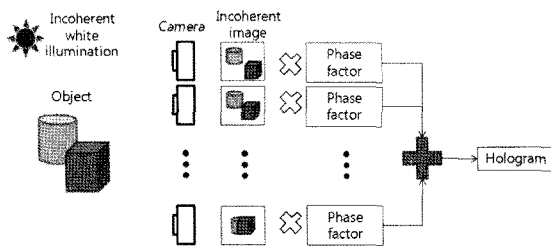
이러한 위상 천이 홀로그램의 구현을 위하여, 피에조 액추

에이터나 Quarter wave plate와 Half wave plate의 조합이 쓰인다. 또, 위상 천이의 값을  $90^\circ$ 가 아닌 다른 값을 사용하여 촬영하는 홀로그래프의 횟수를 3회나 2회로 줄이기도 하며, 최근에는 CCD의 픽셀을 공간적으로 분할하여 다양한 위상 천이 홀로그래프를 한 번의 촬영으로 얻는 기법도 보고되고 있다 [3,4].

## 2. 비간섭성 광원을 이용한 홀로그래프 촬영

위에서 살펴본 일반적인 홀로그래프 촬영 기법들은 공통적으로 가간섭성 광원인 레이저를 이용한 간섭계 구성을 기반으로 한다. 그러나 이러한 구성은 외부광이 차단된 암실에서 광학 테이블 위에서만 가능하다. 또, 레이저를 물체에 조사하여야 하므로, 촬영할 수 있는 물체의 크기에도 제한이 있다.

최근 이러한 기존 홀로그래프 촬영의 제한을 극복하기 위하여 가간섭성 광원을 사용하지 않는 기술들이 연구 개발되고 있다. 이러한 기술들은 레이저를 이용하여 간섭계를 구성하는 대신 (그림 3)에서 보는 바와 같이, 물체를 일반 비간섭성 조명하에서 다양한 각도에서 촬영한 다시점 영상들을 이용한다. 가간섭성 광원이 필요치 않고 간섭계 구성을 사용하지 않으므로 촬영 시스템이 매우 간단하며, 외부 환경에서 일반적인 물체에 대한 홀로그래프를 자유롭게 획득할 수 있는 장점을 지닌다.



(그림 3) 비간섭성 광원을 이용한 홀로그래프 촬영

이러한 방식의 원리는 다시점 영상에도 물체의 3차원 정보가 포함되어 있다는 데 있다. 물체의 홀로그래프를 생성하기 위하여는 물체 표면의 각 점(voxel)의 3차원 공간상에서의 위치와 밝기 및 위상 정보가 있어야 한다. 이 중, 위상 정보는 비간섭성 광원을 이용한 촬영에서는 얻어질 수 없다. 그러나, 대부분의 경우 3차원 물체의 홀로그래프를 촬영하거나

재생하고자 할 때, 관심 있는 것은 위치 및 밝기 정보 이므로 각 점의 위상 정보를 얻을 필요는 없다. 따라서 비간섭성 광원을 이용한 홀로그래프 촬영에서는 다시점 영상등을 이용하여 얻어진 물체 표면을 이루는 voxel들의 3차원 위치 및 밝기 정보에 적절한 위상 정보를 임의로 추가하여 홀로그래프를 합성한다.

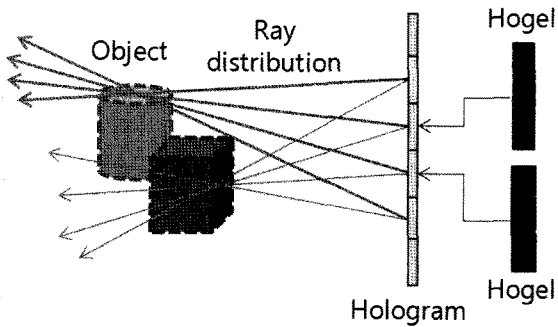
개념적으로 가장 단순하게 접근하는 방법은 카메라 배열이나 이동식 카메라를 사용하여 물체의 다시점 영상을 일반 비간섭성 조명하에서 촬영한 후, 이들 영상간의 대응점 분석을 통하여 깊이 지도를 만드는 것이다. 추출된 깊이 지도를 이용하여 물체를 이루는 voxel들의 3차원 위치 정보를 얻고 이를 이용하여 물체의 홀로그래프를 합성한다. 다시점 영상을 얻는 카메라의 간격을 충분히 좁히고 영상의 수를 매우 많은 숫자로 늘리면, 적극적인 영상 처리를 통한 정보 추출 과정 없이도 3차원 물체의 홀로그래프를 합성하는 것이 가능하며, 최근 많은 연구 개발이 진행되고 있다 [5]. 비슷한 원리로 집적 영상 기술을 응용하여 한 번의 촬영으로 많은 숫자의 다시점 영상들을 얻고 이들을 이용하여 홀로그래프를 합성하는 기법도 제안된 바 있다 [6].

## Ⅲ. 홀로그래프 합성 기술

실제 존재하는 물체의 홀로그래프를 촬영하는 것이 아니라 컴퓨터 그래픽을 통하여 만들어진 화상에 대한 홀로그래프를 계산적인 방법으로 합성하는 기술은 컴퓨터 합성 홀로그래프 (Computer Generated Holography) 기술로 불리며, 오랜 기간 연구 개발 되어 왔다. 보통 2차원 패턴을 높은 효율로 재생할 수 있는 홀로그래프를 합성하는 기술이 중점적으로 연구 개발 되었으나, 최근에는 3차원 화상에 대한 홀로그래프를 고속으로 합성할 수 있는 기술들의 연구 개발로 그 초점이 이동하고 있다.

디지털 데이터의 형태로 존재하는 3차원 화상에 대한 홀로그래프를 합성하는 기술로서 대표적인 것으로 호겔 벡터를 이용한 방법이 있다 [7]. (그림 4)는 이러한 방법의 개요를 보여준다.

호겔 벡터를 이용한 방법은 3차원 화상의 재생에 있어 3차원 화상을 이루는 하나 하나의 voxel에 대하여 구면파를



(그림 4) 호겔 벡터를 이용한 홀로그램 합성

형성시키는 순수한 의미의 홀로그램이 아닌, 3차원 화상을 이루는 광선들의 공간별 방향별 분포를 재생시키는 홀로그래픽 스테레오그램에 기반한다. 즉 주어진 3차원 화상을 이루는 광선들의 분포를 구하고 이들 광선의 분포를 홀로그램면에서 재생시킨다. 이 때, 홀로그램면은 해당 위치에서 각도별로의 광선 분포를 재생시킬 수 있는 단위들로 나뉘어야 하는데, 이 때의 단위가 하나의 호겔이다. 즉 각각의 호겔은 각도 별로 다른 광선을 만들어내는 특수한 픽셀로서 기능한다. 각 호겔에서 원하는 광선의 각도 분포를 만들기 위하여 호겔 벡터로 표현되는 중첩된 격자 구조에 의한 회절 현상을 이용한다. 이러한 방식은 비교적 적은 계산량으로도 3차원 화상의 홀로그램을 얻어낼 수 있고, 3차원 화상의 해상도와 각도별 광선의 재생 밀도를 조절할 수 있는 장점을 지닌다.

스테레오그램이 아닌 일반적인 의미에서의 3차원 홀로그램의 합성은 보통 3차원 화상을 이루는 각각의 voxel에 대하여 구면파를 대응시킴으로써 이루어진다. 즉, 프레넬 근사가 적용되는 조건에서  $A(x_o, y_o, z_o)$ 에 위치하는 하나의 점에 대한 홀로그램은

$$U(u, v) = A_o \exp \left[ -j \frac{k}{2z_o} \left\{ (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 \right\} \right]$$

의 구면파 형태로 나타나므로, 각각의 점에 대한 구면파들을 중첩하면 최종적인 3차원 화상에 대한 홀로그램을 얻을 수 있다.

그러나 이러한 방법은 3차원 화상을 이루는 각각의 voxel들에 대하여 위와 같은 패턴을 계산하고 중첩해야 하므로 계산량이 너무 많은 단점이 있다. 이의 해소를 위하여 여러

깊이면에 대한 구면파 홀로그램 패턴을 미리 계산하여 룩업 테이블(LUT)을 메모리에 구축하여 놓고, 이것을 읽어와서 홀로그램을 합성하는 기법이 대체로 많이 사용된다 [8]. 또, 본래의 구형파 패턴 대신 이를 직선형태로 근사하여 계산량을 더욱 줄이는 기법도 연구되고 있다.

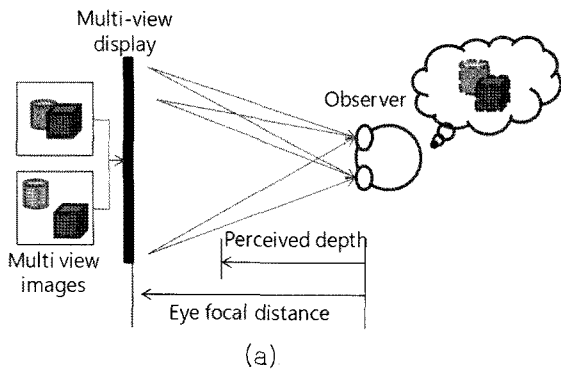
최근에는 홀로그램의 합성 속도를 동영상의 실시간 재생이 가능할 정도로 빠르게 가속하기 위하여 GPU(Graphic Processor Unit)를 이용하거나 FPGA를 이용한 전용 칩셋을 개발하는 연구도 활발히 진행되고 있다. 3차원 화상을 이루는 각각의 voxel들마다 구형파를 만들어 중첩하는 과정이 병렬적으로 이루어질 수 있으므로, 이러한 방법들은 프로세서내의 병렬 처리 성능을 최대한 이용하여 홀로그램의 합성 속도를 빠르게 하고 있다. 최근 발표된 Chiba대학의 Hom 6 시스템의 경우 1,000,000 개의 voxel로 이루어진 3차원 화상을 1s 만에 계산하는 정도의 성능을 보이고 있다 [9].

또한, 최근에는 이렇게 3차원 화상을 voxel들의 집합으로 나누어 계산하는 대신, 3차원 화상을 삼각형 메쉬 모델로 구현하고 메쉬를 이루는 각각의 삼각형에 대한 홀로그램을 계산하여 전체 3차원 화상에 대한 홀로그램을 얻는 기술도 연구되고 있다. 이와 같은 기법은 점단위로 홀로그램을 계산하는 것보다 실제적인 3차원 영상을 재생할 수 있으며, 특히 3차원 물체의 산란도(diffusiveness)를 조절할 수 있다는 점에서 장점을 지닌다 [10].

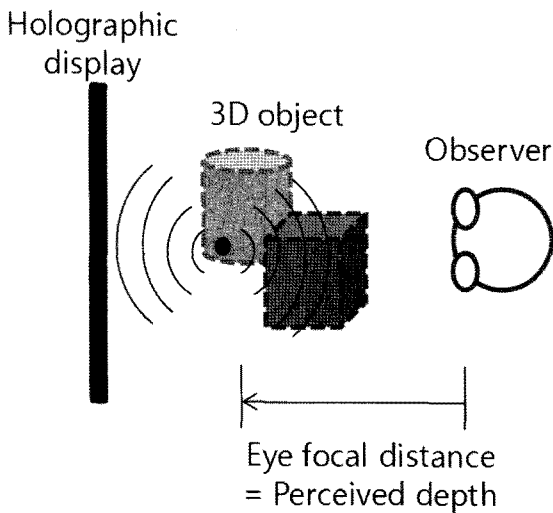
#### IV. 홀로그래픽 3D 디스플레이 기술

홀로그래피 기술의 응용 중 최근 가장 많은 관심을 받고 있는 것은 홀로그래픽 3차원 디스플레이이다. 현재 상용화된 안경 방식 3차원 디스플레이나, 연구 개발 단계인 렌티큘러 렌즈, 패럴랙스 배리어등을 이용한 무안경 방식 다시점 3차원 디스플레이들은 모두 실제로 공간상에 3차원 상을 형성하는 것이 아니라, 관측자의 좌우 눈에 서로 다른 화상을 주어 입체감을 느끼게 하는 방식이다. 따라서 자연스러운 시차를 느낄 수 없는 등 입체감에 제한이 있으며, 특히 관측자 눈의 수렴-조절 불일치(Accommodation-Vergence mismatch)를 일으켜, 장시간 관측시 눈의 피로나 어지럼증

을 유발하는 문제점을 지니고 있다. 이와는 근본적으로 달리 홀로그래픽 3D 디스플레이는 (그림 5)와 같이 빛의 회절 현상을 이용하여 공간상에 실제로 3차원 상을 만들게 되므로 매우 자연스럽게 눈의 피로가 없는 완전한 형태의 3차원 영상의 표시가 가능하다. 이와 같은 관점에서 홀로그래픽 3차원 디스플레이는 3차원 디스플레이의 궁극적인 형태로서 생각되고 있으며, 최근 많은 연구 개발이 집중되고 있다.



(a)

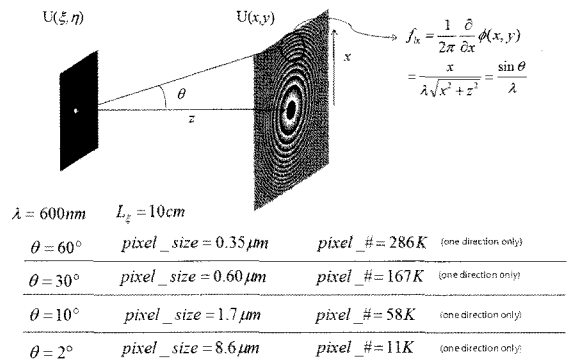


(그림 5) 홀로그래픽 디스플레이와 일반 무안경식 3차원 디스플레이의 차이 (a) 다시점 3차원 디스플레이 (b) 홀로그래픽 3차원 디스플레이

### 1. 홀로그래픽 3차원 디스플레이 기술적 난제

이와 같은 잠재적인 장점에도 불구하고 현재 홀로그래픽 3차원 디스플레이는 아직 극복해야 할 기술적인 난제를 많이 가지고 있다. 먼저 홀로그래픽 3차원 디스플레이를 구현하기 위하여 요구되는 SLM의 해상도가 현재의 기술 수준보다

높다. 홀로그래픽 3차원 디스플레이는 빛의 회절 현상을 이용하여 3차원 화상을 형성해내는데 빛의 회절 각도는 SLM의 픽셀 크기에 반비례하므로, 보다 넓은 시야각을 얻기 위하여는 보다 작은 크기의 픽셀이 요구된다. 보다 구체적으로 살펴보기 위하여 (그림 6)과 같이 SLM으로부터 z 만큼 거리에 떨어진 하나의 voxel을 재생하는 경우를 생각해 보자.



(그림 6) 홀로그래픽 3차원 디스플레이 픽셀 해상도

하나의 voxel에 대한 홀로그램 패턴은 (그림 6)에 나타난 바와 같이 voxel의 평면방향 위치를 중심으로 한 구면파 (quadratic phase function)의 형태로 나타나므로 중심에서 멀어질수록 점점 조밀해지는 패턴을 가진다. 홀로그램을 표현하는 SLM의 픽셀 크기는 유한하므로, 표현할 수 있는 홀로그램패턴의 넓이가 제한되며 이는 다시 (그림 6)에서 보듯이 홀로그램이 재생되는 시야각을 제한한다. 600nm파장의 빛을 사용한다고 가정할 때, 30°의 시야각을 가진 3차원 영상을 표현하기 위해 요구되는 SLM의 픽셀 크기는 0.52  $\mu m$ 로서 현재 구현 가능한 수준이 아니다. 현재 실험용으로 사용되는 SLM의 최소 픽셀 크기 8  $\mu m$ 에서 재생되는 영상의 시야각은 2° 정도로서 매우 작다. 또, 요구되는 픽셀의 개수는 표시하고자 하는 3차원 영상의 크기를 이러한 픽셀 크기로 나누어 준 것이므로, 예를 들어 10cm x 10cm 크기의 3차원 영상을 2°의 시야각으로 표현하기 위해서는 11.5K x 11.5K 개의 매우 많은 수의 픽셀이 필요하다. 따라서 이러한 매우 높은 수준의 SLM 해상도 요구량이 홀로그래픽 3차원 디스플레이의 구현을 가로막는 큰 요인 중의 하나이다.

홀로그래픽 3차원 디스플레이의 또 다른 기술적 난제 중의 하나는 빛의 크기와 위상을 동시에 독립적으로 변조해 줄

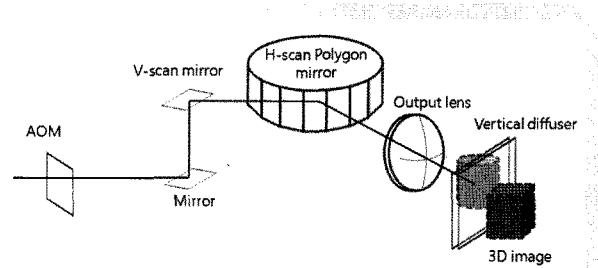
수 있는 SLM의 부재이다. 3차원 영상을 표현하기 위하여 가장 바람직한 것은 3차원 영상에 대응되는 빛의 분포(optical field)를 홀로그램면에서 SLM으로 그대로 구현하는 것이다. 일반적으로 3차원 영상에 대응되는 빛의 분포는 크기와 위상을 동시에 지닌 복소수 분포이다. 그러나 현재의 SLM은 빛의 크기나 위상 어느 하나만을 변조할 수 있으며 이들을 동시에 독립적으로 변조할 수는 없다. 따라서 복소수 분포의 위상 성분만을 이용하거나, 가상의 기준광과 수치적으로 간접 시켜 얻은 크기 분포를 이용하는 방법이 사용되고 있으며, 이는 홀로그래픽 3차원 디스플레이의 재생 효율을 떨어뜨리는 원인이 되고 있다.

## 2. 홀로그래픽 3차원 디스플레이의 구현 예

위에서 살펴본 기술적 난제에도 불구하고 홀로그래픽 3차원 디스플레이가 지나는 잠재적 장점으로 인하여 이의 구현을 위한 다양한 방법들이 연구 개발되고 있다. 홀로그래픽 3차원 디스플레이의 픽셀 해상도 요구량이 매우 높으므로 이를 극복하기 위하여 (1)홀로그램의 픽셀 해상도 요구량을 줄이거나 (2)시간적 혹은 공간적 다중화 기법을 이용하여 공간광변조기의 유효 픽셀 해상도를 높이거나 (3)특정한 위치로만 3차원 상을 재생하는 등의 접근 방법을 취한다. 첫 번째 홀로그램의 픽셀 해상도 요구량을 줄이는 것은 보통 수직 방향의 시차 정보를 포기하고 HPO(Horizontal parallax only)홀로그램을 이용함으로써 구현한다. 수평 방향의 1차원 홀로그램을 사용하므로 요구되는 픽셀 해상도가 1/2승배로 줄어드는 효과를 얻는다. 두 번째, SLM의 유효 픽셀 해상도를 높이는 것은 매우 빠른 속도의 SLM을 사용하거나 일반적인 SLM을 여러 개를 동시에 이용하여 구현한다. 마지막으로 3차원 상의 재생 방향을 제어하는 것은 여러 사용자에게 동시에 3차원 상을 보여주는 것을 포기하고 부족한 시스템 자원을 하나의 관측자에게만 집중하는 방법이다.

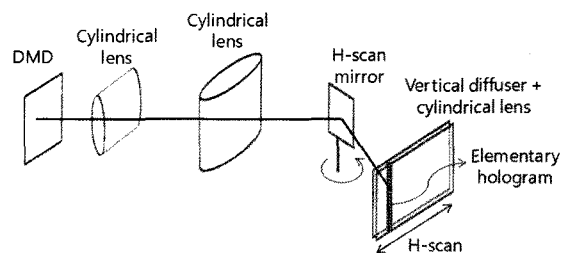
구체적으로 가장 초기의 홀로그래픽 3차원 디스플레이는 1990년대 후반 미국의 MIT Media lab에 의하여 개발되었다. 그림 7에서 보는 바와 당시로서 가장 높은 유효 광변조 속도를 가진 음향광변조기(AOM)를 사용하였으며, HPO 홀로그램을 재생하였다. 음향광변조기의 사용에 의한 영상의 흐림 현상을 막기 위하여 반대 방향의 회전 미러들을 이용하였다. 최근에는 AOM을 여러 채널로 만들고 시스템을 간소화

하는 연구가 진행되고 있다 [11].



(그림 7) 미국 MIT의 홀로그래픽 디스플레이 시스템

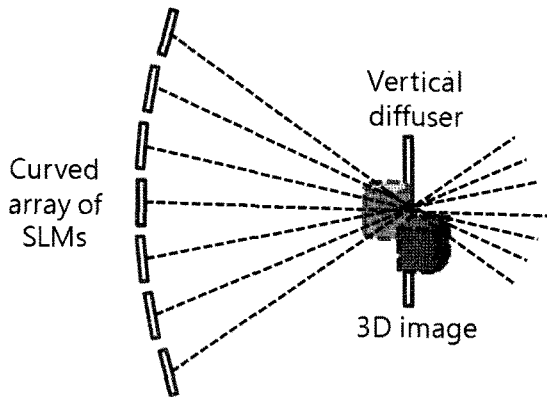
(그림 8)은 일본 도쿄농공대의 홀로그래픽 디스플레이의 구성도이다. 이 시스템에서는 DMD(Deformable Mirror Display) 형태의 초고속 SLM을 사용하였으며 시간 다중화 방식으로 유효 픽셀 해상도를 높였다 [12]. (그림 8)에서 보는 바와 같이 초고속 SLM의 픽셀들이 수평방향으로 압축되어 원통형 렌즈면으로 투사된다. 이때, 투사된 픽셀의 크기가 수평방향으로 작아지므로 수평방향으로 넓은 시야각으로 3차원 상을 표시할 수 있게 된다. 이와 같이 수평방향으로 압축된 픽셀들을 원통형 렌즈면 전체에 대하여 빠른 속도로 스캔함으로써 최종적으로 넓은 크기의 3차원 상을 표시할 수 있다.



(그림 8) 도쿄농공대의 홀로그래픽 3차원 디스플레이 시스템

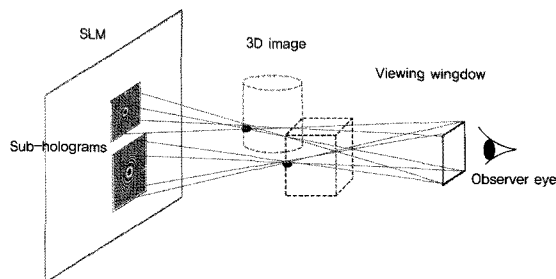
영국의 QinetiQ와 서울대학교는 일반적인 SLM 여러 개를 동시에 사용함으로써 유효 픽셀 해상도를 높인 홀로그래픽 3차원 디스플레이 시스템을 개발한 바 있다 [13,14]. QinetiQ는 전기적인 SLM 여러 개를 모아 물리적인 픽셀 구분이 없는 광학형 공간광변조기(optically addressable spatial light modulator)에 패턴 투사함으로써 매우 높은 픽셀 해상도를 구현하였다. 서울대학교에서도 (그림 9)에서 보는 바와 같이 12개의 SLM을 수평방향으로 구부러진 형태로 이어 붙여

넓은 수평 시야각의 홀로그래픽 3차원 디스플레이를 구현하였다.



(그림 9) 서울대학교의 홀로그래픽 디스플레이 시스템

최근 독일 SeeReal사는 이렇게 SLM의 유효 해상도를 높여 홀로그램을 구현하는 대신 관측자 눈의 위치를 추적하고 (그림 10)에서 보는 바와 같이 추적된 관측자 눈 위치로만 홀로그램을 재생하는 시스템을 발표하였다 [15]. 관측자의 눈 주위의 작은 창으로만 홀로그램을 재생하므로 시야각이 크지 않아도 되어 현재의 수십~수백 um의 SLM 픽셀 크기로도 구현이 가능한 장점이 있다. 관측자 눈의 위치의 이동에 따라 홀로그램 재생 창 위치를 광학적으로 움직여 주기 위한 마이크로 프리즘 어레이, 방향성 레이저 백라이트등의 개발이 진행되고 있다.



(그림 10) SeeReal 홀로그래픽 디스플레이

## V. 결론

본고에서는 다양한 홀로그래피 기술들을 3차원 영상의 촬영 및 디스플레이를 중심으로 살펴보았다. 홀로그래피는 물체로부터의 빛의 크기뿐만 아니라 위상 정보까지 저장하고 재생할 수 있는 특징을 지니고 있다. 최근의 디지털 수광 소자 및 광변조소자의 발전은 기존의 필름 기반 홀로그래피 기술에서 벗어나 다양한 유용한 응용 기술들의 개발을 가능하게 하고 있으며, 특히 가장 궁극적인 형태의 3차원 정보 촬영 및 3차원 디스플레이의 구현을 가능하게 하고 있다. 현재의 여러 기술적 난제들에 대한 적극적인 연구 개발이 필요할 것으로 생각된다.

## 참고 문헌

- [1] J.W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, 2nd ed, (McGraw-Hill, New York, 1996).
- [2] I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.* 22, pp. 1268-1270 (1997).
- [3] M. F. Meng, L. Z. Cai, X. F. Xu, X. L. Yang, X. X. Shen, G. Y. Dong, and Y. R. Wang, "Two-step phase-shifting interferometry and its application in image encryption," *Opt. Lett.* 31, pp. 1414-1416 (2006).
- [4] Y. Awatsuji, T. Tahara, A. Kaneko, T. Koyama, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Parallel two-step phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.* 47, pp. D183-D189 (2008)
- [5] N. T. Shaked, B. Katz, and J. Rosen, "Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-viewpoint-projection based methods," *Appl. Opt.* 48, H120-H136 (2009)
- [6] J.-H. Park, M.-S. Kim, G. Baasantseren, and N. Kim, "Fresnel and Fourier hologram generation using orthographic projection images," *Opt. Express* 17, pp. 6320-6334, (2009).

- [7] W. Plesniak, M. Halle, V. M. Bove, J. Barabas and R. Pappu, "Reconfigurable image projection holograms", Opt. Eng. 45, pp. 115801 (2006).
- [8] M. Lucente, "Interactive computation of holograms using a look-up table," J. Electron. Imag. 2, pp. 28-34 (1993).
- [9] Y. Ichihashi, H. Nakayama, T. Ito, N. Masuda, T. Shimobaba, A. Shiraki, and T. Sugie, "HORN-6 special-purpose clustered computing system for electroholography," Opt. Express 17, pp. 13895-13903 (2009).
- [10] H. Kim, J. Hahn, and B. Lee, "Mathematical modeling of triangle-mesh-modeled three-dimensional surface objects for digital holography," Appl. Opt. 47, pp. D117-D127 (2008)
- [11] Q. Y. J. Smithwick, J. Barabas, D. E. Smalley and V. M. Bove, Jr., "Interactive holographic stereograms with accommodation cues", Proc. SPIE 7619, pp. 761903 (2010).
- [12] Y. Takaki and N. Okada, "Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed spatial light modulator," Appl. Opt. 48, pp. 3255-3260 (2009).
- [13] C. W. Slinger, C. D. Cameron, S. D. Coomber, R. J. Miller, D. A. Payne, A. P. Smith, M. G. Smith, M. Stanley, and P. J. Watson, "Recent developments in computer-generated holography: toward a practical electroholography system for interactive 3D visualization," Proc. SPIE 5290, pp. 27-41 (2004).
- [14] 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," Opt. Express 16, pp. 12372-12386, (2008).
- [15] R. Haussler, S. Reichelt, N. Leister, E. Zschau, R. Missbach and A. Schwerdtner, "Large real-time holographic displays: from prototypes to a consumer product", Proc. SPIE 7237, pp. 72370 (2009).

약 력



박재형

2000년 서울대학교 공학사  
2002년 서울대학교 공학석사  
2005년 서울대학교 공학박사  
2005년 ~ 2007년 삼성전자 책임연구원  
2007년 9월 ~ 현재 충북대학교 정보통신공학부 조교수  
관심분야 : 3차원 디스플레이, 3차원 정보처리, 집적 영상 기술, 홀로그래피 기술