

Supermultiview and Electro-Holographic 3-D Imaging Display

Jung-Young Son^{1†}, Hyung Lee^{2,3}, Chang-Kyung Sung¹, and Jung Kim¹

¹Biomedical Engineering Department, Konyang University, Nonsan 320-711, Korea

²Department Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

³Imaging Media Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

(Received September 16, 2013; Revised manuscript October 8, 2013; Accepted October 11 2013)

Supermultiview and electro-holographic displays are promising displays for the future because they provide continuous parallaxes as their depth cue. But they are still in the early development stage due to the lack of supporting technologies. Achieving the continuous parallax in the supermultiview relies more on the number and size of pixels in the pixel cell/elemental image rather than the number of different view images. For the electro-holographic display, it also relies on the number and size of pixels in the panel. So these two methods share the same requirements for achieving the parallax. But the image displayed on the holographic display provides more impressive visual appeal than that on the supermultiview because the image can be floated on the front space of the display.

Keywords: Supermultiview, Electro-holographic display, 3-D imaging display

OCIS codes: (090.1760) Computer holography; (050.6875) Three-dimensional fabrication; (090.2870) Holographic display; (090.4220) Multiplex holography

전자 홀로그래피 및 초 다시점 3차원 영상 디스플레이

손정영^{1†} · 이형^{2,3} · 성창경¹ · 김정¹

¹건양대학교 의공학과

☎ 320-711 충남 논산시 대학로 121

²연세대학교 전기전자공학과

☎ 120-749 서울특별시 서대문구 연세로 50

³한국과학기술연구원 영상미디어연구센터

☎ 136-791 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

(2013년 9월 16일 받음, 2013년 10월 8일 수정본 받음, 2013년 10월 11일 게재 확정)

초 다시점 및 전자 홀로그래피 디스플레이는 향후 기대가 되는 연속시차를 주는 3차원 디스플레이 방식이나, 아직 가용한 디스플레이의 부재로 초기 개발 단계에 있다. 초 다시점의 구현은 다시점 영상의 수 보다는 화소셀/요소 영상내의 화소 수와 화소 사이즈에 의존하며, 전자 홀로그래피도 전체 패널내의 화소 수와 화소 사이즈에 의존하므로 이들의 구현을 위한 요구 사항에는 차이가 없다. 그러나 구현 영상자체는 전자 홀로그래피의 경우는 공간 부양 영상이므로 초 다시점의 패널을 앞뒤로 한 깊이감의 표시보다 시각적인 효과가 더 클 것으로 예상된다.

Keywords: 초 다시점, 전자 홀로그래피, 3차원 영상 디스플레이

OCIS codes: (090.1760) Computer holography; (050.6875) Three-dimensional fabrication; (090.2870) Holographic display; (090.4220) Multiplex holography

[†]E-mail: jyson@konyang.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

3차원 디스플레이의 궁극적인 목표는 우리가 살고 있는 3차원 세계를 왜곡 없이 단지 디스플레이의 사이즈에 맞게 축소 또는 확대만 하여 표시하고자 하는 것이다. 왜곡이 없다는 것은 현상계(Real World)에서 실물(Object and Scenes)을 보는 것과 같은 특성(Characteristics)과 감각(Sense)을 영상을 통해 동시에 구현해야 한다는 것을 의미한다. 우리가 살고 있는 현상계에서 실물은 공간에 체적(Spatial Position and Volume)을 가지고 연속시차(Continuous Parallax)를 주며, 만질 수 있고 그리고 우리의 오감(Five Senses)을 자극시키며 육감(Six Sense)을 반응하게 한다. 그러나 현재까지는 여러 가지의 기술적인 장벽에 의해 3차원 영상 디스플레이가 구현 가능한 것은 단지 깊이감(Depth Sense)을 주는 3차원 영상에 그치고 있다. 그러나 이 깊이감도 인간 시각인식 기능의 크기 항상성(Size Constancy)¹⁾, 구현 수단의 기술적인 한계와 아직은 알지 못하고 있는 요인들에 의해 많은 왜곡을 포함하고 있다. 또한 이 깊이감의 표현은 단속된 깊이가 아닌 연속적인 깊이감이어야 하므로, 평면 영상의 해상도와 같이 깊이 해상도^{2) 3)}에 대한 정의를 요구하고 있다. 이 깊이 해상도는 3차원 영상의 화질을 평가하는 중요한 파라메타의 하나가 되어야 한다. 그리고 깊이감 표현에 따른 반대급부 영상 표시 가능한 위치를 정의하는 시역각(Viewing Zone Angle)이 제한되어 보는 위치가 제한되는 문제점도 있다. 그리고 3차원 영상은 평면 영상과 달리 시청자의 신체적 특징인 눈간 거리(Interocular Distance), 두 눈 광축(Optical Axis)의 평행성 그리고 안력(Optical Power)에 따라 깊이감의 정도를 달리하는데 이러한 문제점들의 완화 내지는 제거가 향후 3차원 영상이 해야 할 과제이다.

현재 3차원 영상은 상용적으로는 편광기반과 고속셔터(High Speed Shutter) 안경식⁴⁾이 주류를 이루고 있으며, 연구개발적으로는 다시점(Multiview) 영상을 기반으로 한 초다시점(Super-Multiview) 영상의 개발과 공간부양(Spatially Floating)이 가능한 전자 홀로그램(Electro-Hologram) 기반 영상의 개발이 진행 중이다. 이들 초다시점과 홀로그램 기반 영상은 궁극적으로 연속시차를 구현하는 것이 목표이다. 연속시차의 의미는 우리가 현실에서 물체나 광경을 보는 것과 같이 시선의 이동에 따른 물체나 광경의 변화가 연속적으로 이루어진다는 것이다. 연속시차의 구현은 단안에 의해서도 깊이감을 얻을 수 있게 하므로, 입체시가 결여된 시청자도 깊이감을 느끼게 할 수 있다.

그러나 초다시점 영상에서 연속시차의 구현에 의해, 홀로그램 재생상과 같은 두 눈의 수렴(Convergence) 과 초점(Accommodation)을 가능하게 하는 공간 체적영상의 생성 가능성은 아직 연구를 필요로 하는 부분이다. 초다시점 영상과 홀로그램 재생상의 차이는 구현되는 상의 공간위치에 있어 상대적인 차이에 있다. 초다시점 영상의 경우는 재생상의 중심평면은 점 영상(Point Image)의 배열이 형성되는 평면, 즉 시역형성용 광학판(Viewing Zone Forming Optics)이

중심이 되어, 이 평면의 앞뒤로 깊이감이 주어진다. 즉 이 평면을 깊이감이 0인 기저면(Base Plane)으로 하여 앞뒤에 걸쳐 연속된 한 재생상이 생성된다. 그러나 이 재생상은 원칙적으로 시차에 기반한 영상이므로 실제체적을 가지는지의 여부는 아직 알려져 있지 않다. 홀로그램의 경우는 재생상이 실상(Real Image)과 허상(Virtual Image)으로 구분되는데 모두 실제 체적을 가지고 있다. 실상의 경우는 재생상이 홀로그램 전면 공간의 특정위치에 특정 체적을 가지고 나타나며, 허상의 경우는 홀로그램 후면 공간의 특정위치에 특정체적을 가지고 나타나는데, 이들 실상과 허상은 서로 독립된 상으로 기저면(0 Depth Plane)으로 작용하는 홀로그램 자체 평면에 의해 깊이 방향으로 연속된 하나의 상으로 묶어질 수가 없다. 그러나 원판(Master) 홀로그램의 재생상을 물체로 하여 제작한 복제(Copy) 홀로그램의 경우는 홀로그램 앞뒤로 분포되는 재생상을 얻을 수 있다⁵⁾.

이 논문에서는 지금까지 3차원 영상기술 발전 흐름의 분석을 통하여, 향후 초다시점 및 전자 홀로그래피의 전망을 기술했다.

II. 3차원 영상기술의 발전^{6, 7)}

본격적인 3차원 영상기술의 개발은 입체경(Stereoscope)이 처음 개발된 1838년부터 시작되었다고 볼 수 있다. 이후 컬러 필터를 이용하는 아나글립(Anaglyph)이 개발되어, 20세기에 전반에 개발된 편광필터(Polarization Filter)와 더불어 안경식 입체 영화의 효시가 되었다. 이에 더하여 1950년대에는 CRT(Cathode Ray Tube) 모니터를 이용한 아나글립 방식의 입체영상이 구현되었고⁸⁾, 1980년 이후에 개발된 액정 셔터(Liquid Crystal Shutter)는 CRT모니터를 이용한 천연색 입체영상의 보편화를 가능케 했고, 또한 1930년대에 개발된 편광필터와 더불어 현재 상용화된 3차원 TV의 기반기술로 사용중이다. 그리고 20세기 초에 개발된 시차장벽판(Parallax Barrier)과 렌티큘라(Lenticular)는 안경을 대신하여 표시장치의 전면 공간에 시역(Viewing Zone)을 형성시켜 주는 시역형성용 광학판(Viewing Zone Forming Optics)으로 무안경식 입체영상 및 다시점 영상기술을 탄생시켰다. 다시점 영상은 좌우 눈에 대응하는 두 개의 영상, 즉 입체영상 쌍(Pair)만 표시하여 양안시차(Binocular Parallax)만 발생시키는 입체영상과 달리 표시 영상의 수를 두 개 이상으로 늘림에 의해 운동시차(Motion Parallax)도 동시에 주는 방식이다. 이렇게 함에 의해 입체영상에서 주어지는 시청자의 시청위치 이동에 따른 인식영상에 있어 왜곡을 최소화 시킬 수 있다. 특히 1928년에 개발된 렌티큘라는 1908년 Lipmann에 의해 제안된 다시점 영상의 하나인 집적영상(IP: Integral Photography)의 가능성을 데모하는 계기가 되었고 1941년 러시아에서 개발된 방사형 렌티큘라(Radial Type Lenticular)에 의해 이미1970년대에 극장용 다시점 영상이 개발되어 많은 사람이 동시시청 가능한 무안경식 3차원 영상의 효시가 되었다. 1990년 이후에는 시차장벽(Parallax Barrier)판과 렌티큘라(Lenticular)판은

물론 홀로그래픽 2차원 회절격자 배열판(Holographic 2 dimensional Diffraction Grating Array), 홀로그래픽 스크린(Holographic Screen) 등의 새로운 시역형성용 광학판이 소개되어 이들을 이용한 또 다른 다시점 영상기술인 다시점 영상(MV: Multiview Imaging)이란 이름의 3차원 영상기술이 개발되어 집적영상과 더불어 현재 초 다시점 영상으로 개발이 진행 중이다. IP는 지금까지 개발된 모든 다시점 영상기술, 즉 MV, FLA, 다중 영상(Multiple Image) 그리고 제브라(Zebra) 홀로그램의 모태가 되며, 이들 다시점 영상 기술과 관련한 광학적인 구조가 평행 또는 방사형이라는 차이는 있으나, IP의 그것과 동일하다^[9].

그리고 1990년대에 상용화가 이루어진 액정 표시판(LCD: Liquid Crystal Display)은 전자적인 방법으로 시차장벽판과 렌티큘라판^[10]의 제작을 가능케 하여 평면 및 3차원 영상의 동시 또는 교체 시청이 가능한 표시장치의 제작을 가능케 하고 있다. 또한 고속 LCD의 개발로 영상의 떨림(Flickering)현상이 전혀 없는 입체영상을 가능케 하고 있다. 그러나 아직 LCD는 고 화질의 다시점 영상을 표시하기에는 그 해상도가 부족하다. 이에 더하여 이들 판의 사용은 표시패널과의 중첩에 의한 모아레(Moire)의 생성을 야기시키는 것은 물론 영상의 밝기 저하, 이들 판의 구조 투영 등 여러 가지의 화질 저하 요인을 발생시켜, 이것이 다시점 영상의 상용화를 지연시키는 가장 큰 이유이다. 이 문제점을 해결하기 위해 시역형성용 광학판을 사용하지 않는 새로운 다시점 3차원 영상방식으로 점 광원배열(Point Light Source Array)을 LCD 백라이트(Back Light) 대신에 사용한 점 광원 기반 3차원 영상방식이 개발되었으나^[11], 이 방식은 이상적인 점 광원에 근접하는 점 광원배열의 부재로 또한 개발이 지연되고 있다. 이들 입체 및 다시점 영상방식들은 근본적으로 평면 영상과의 호환성(Compatibility)이 뛰어나나, 시차를 통한 깊이감(Depth Sense)의 인식만을 가능케 하므로 시청자 눈의 조절작용을 과도하게 하여 피로감을 가중시킬 여지가 있다. 또한 인식되는 깊이감의 정도가 개인에 따라 달라지며, 표시영상이 디스플레이 패널과 스크린에 초점되어 있고, 이들을 중심으로 앞뒤로 영상이 분포되어 있는 것과 같이 인식만 되므로, 향후에 요구되는 표시영상과 상호작용이 가능한 3차원 디스플레이에는 적용이 쉽지 않다. 이러한 문제점의 해결을 위해 제안된 방법이 체적영상이다^[12]. 그러나 체적영상의 생성을 위해서는 다양한 형태를 가진 기구적인 메커니즘이 요구가 되어, 실제 생성되는 체적영상에 비해 이들 메커니즘의 크기가 너무 커져 효과적인 방법이라고 보기 힘들다^[7]. 한편 홀로그래피는 1948년에 개발되어 1960년대 레이저의 개발과 더불어 급속히 발전되어 왔으나, 주로 3차원사진으로 하여 소개되어 왔다. 그러나 1980년도 후반부터는 전자 영상화를 위한 노력도 진행되고 있다^[13]. 홀로그래피 기술은 입체 및 다시점 영상방식과 달리 표시되는 영상자체가 체적을 가지고 있어, 시차는 물론 우리 눈의 초점 및 수렴기능 모두의 사용을 가능케 하고, 상 자체가 공간에 부양되어 있는 것과 같이 입체시(Stereo Vision)가 결여된 사람도 3차원 영상인식이 가능하

며 또한 다 시간 시청에 따른 피로 외에는 눈의 피로감을 가중시키는 요인을 가지고 있지 않다. 그리고 상 자체의 공간 위치도 디스플레이 표면에서부터 특히 상호작용을 가능케 하는 인터랙티브(Interactive) 디스플레이로서의 특성도 가지는 장점을 가지고 있다. 그러나 아직 고화질 영상의 전자적인 구현을 위한 가용 표시매질의 부재 그리고 외부광경과 물체를 홀로그램화 하기 위한 레이저 소스 및 전자적인 기록매질의 부재로, 컴퓨터 생성 홀로그램(CGH: Computer Generated Hologram)을 이용하는 홀로그래픽 비디오(Holographic Video) 형태의 영상만 표시 가능하다. 스테레오 홀로그램은 실험실의 제어된 공간내의 물체가 아닌 외부광경/물체를 홀로그램화 하기 위해서 개발된 것으로, 물체의 여러 시점 영상, 즉 다시점영상을 카메라로 촬영하고, 이 다시점 영상을 촬영 순서에 따라, 한 시점 영상씩 수직 슬릿(Slit)을 이용 수직 띠(Strip) 형태의 홀로그램을 기록하고, 다시 슬릿 또는 홀로그램 감광판을 슬릿 간격만큼 수평 이동시켜, 다음 시점 영상을 기록함에 의해, 다시점 영상의 각각이 띠 형태의 홀로그램으로 되어 한 개의 홀로그램 감광판에 배열되어 있는 홀로그램이다. 이 홀로그램에 재생빔이 조명되면, 이들 각각의 띠형 홀로그램에서 대응 시점의 영상이 재생되어 나타난다. 그러므로 이 재생상은 광학적으로 일차원 IP와 동일하며, 그 재생상은 수평시차만을 가진 다시점 영상이 된다. 만약 홀로그램 감광판(Photographic Plate) 자체가 Rewritable이면, 감광판 자체가 기록 및 표시장치가 된다^[14]. 영상을 수평만이 아니고 수직으로도 시점을 달리하여 촬영한 이차원배열 다시점 영상을 이용하는 경우는, 각 시점 영상을 한 개의 점 영상화시켜 기록을 하여야 한다. 이것이 제브라(Zebra) 홀로그램^[15]이다. 제브라 홀로그램은 재생시 각 점 영상 홀로그램으로부터 대응되는 시점 영상이 재생되므로 수평 및 수직방향 모두 시차를 가지는, IP에서와 같은 완전시차(Full Parallax) 다시점 영상을 재생한다. 그러므로 제브라 홀로그램의 재생시 각 점 영상은 한 개의 영상투사기의 투사 영상과 동일한 역할을 하며, 또한 일반적인 IP의 각 요소 영상(Elemental Image)과 동일한 역할을 한다. 그림 1에 1차원 스

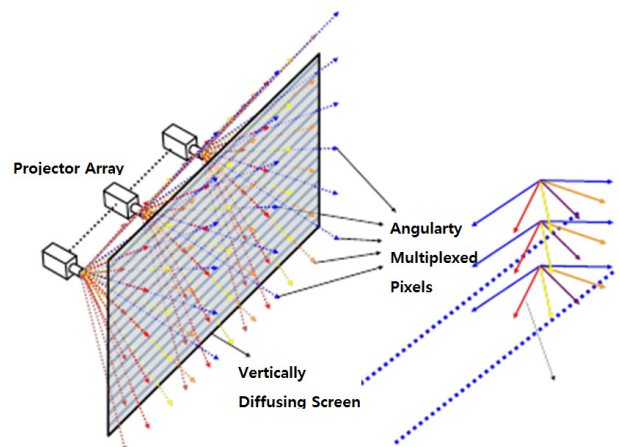


FIG. 1. Principle of reconstruction image in stereo hologram.

TABLE 1. Milestones of 3 dimensional imaging

Year	Event	Remark
<18C	Perspective and Stereo image Drawing	
1838	Invented Stereoscope (Wheatstone)	First 3-D Device
1853	Anaglyph → 1930 th Movie	Color Filter
1903	Parallax barrier(F. E. Ive) based stereoscopic image display:	Non Byeglass
1908	IP plate (microlens array plate: Gabriel Lippman)	
1928	Introducing Lenticular Plate	
1935	Stereoscopic movie by the Polarizing method → 1950 th Movie	(Edwin Land)
1941	Introducing Radial Lenticular(Ivanov)	Theater
1948	Invented Holography(Dennis Gabor)	Novel Prize.
1968	Introducing Stereo-hologram(Cross)	Natural Scene
1988	First Electro-Holographic Display (MIT)	AOM Based
1992	Active Parallax Barrier (H. Isono)	LCD
1995	Introducing Supermultiview Concept (Kajiki et. Al), Time Mux Multiview Display (Travis)	
2000	3-D Imaging System by Point Light Source Array(J. Y. Son et. Al)	No VZFO
2004	First Electronic Lenticular	Liquid Crystal

테레오 홀로그램의 상 재생 원리를 영상투사기 배열에 의한 요소 영상화하여 도시하였다. 그 재생원리는 1차원 IP와 동일하다. 지금까지 입체경에서 시작하여 전자 홀로그래피/초다시점까지 3차원 영상기술의 발전과정을 보면, 대략 3가지의 동기를 가지고 시작했음을 알 수 있다. 이것들은 1) 개인에서 여러 시청자의 동시 시청 가능, 2) 깊이감의 인식 단서를 양안시차에서 시청자의 깊이감 인식 기능 전부에 대응하는 단서, 즉 운동시차, 초점 및 수렴 단서 동시 제공을 통한 눈의 피로감 최소화, 그리고 3) 수평시차만에서 수평+수직시차 동시 제공이다. 이 3가지 동기는 영상 디스플레이를 통해 시청자가 현실에서 인식하는 상과 같은 특성을 가진 영상을 제공하려는 데 있다. 아직 이러한 동기에는 부합은 주변기술의 부재로 잘 이루어지지 않고 있지만, 향후 주변기술의 성숙과 더불어 부합이 급속도로 이루어 질 것으로 예상된다. 표 1에 지금까지의 3차원 영상과 관련된 마일스톤(Milestone)이 종합 정리되어 있다.

III. 초 다시점 영상

이미 언급한 것과 같이 초 다시점 영상은 연속시차를 얻기 위한 것으로, 시청자의 동공(Pupil)에 둘 이상의 인접시점 영상들을 동시에 입사하도록 하는 것이다. 이를 위해서는 다시점 영상의 수를 일반적인 다시점 영상의 수보다는 더 많이 증대시켜야 한다는 가정하에 초 다시점이라는 용어가 탄생되었다¹¹⁶⁾. 그러나 이 초 다시점의 조건이 다시점 영상의 수의 증대에 의존하는 것이라기 보다는 각 시점 영상을 구성하는 화소 수, 즉 해상도(Resolution)와 화소의 사이즈에 의해서 얻어진다고 볼 수 있다. 이것의 이유를 설명하기 위해서는 먼저 IP와 MV의 시역형성 원리와 시역의 각 위치에서 시청자의 눈에 투사되는 영상의 구성 성분(Composition)에 대한 분석이 필요하다.

MV와 IP는 광학적으로는 영상 패널과 그 앞쪽의 시역형성용 광학판으로 구성된 동일한 구조를 가지고 있다. 그리고 영상패널은 화소셀(Pixel Cell) 또는 요소영상으로 명명된 단

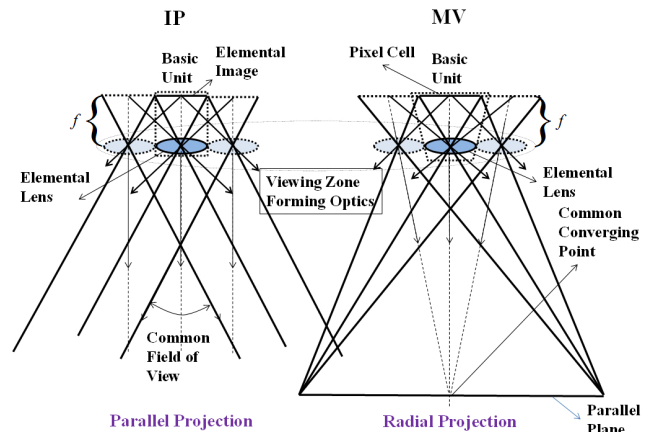


FIG. 2. Comparison of optical structures between IP and MV.

위 영상(Unit Image)의 1차원 또는 2차원 배열로 이루어져 있고, 시역형성용 광학판에는 요소 광소자(Elemental Optic)로 명명되는 광소자가 화소셀/요소영상의 배열과 동일하게 배열되어 있다. 그러므로 중앙시역의 형성만을 고려하는 경우는, 이 시역형성용 광학판과 시역형성용 광학판의 각 요소 광소자를 투사 광학계로 하고, 이 렌즈에 대응하는 영상패널 상의 단위 영상인 화소셀(Pixel Cell) 또는 요소 영상을 투사 영상으로 하는 영상투사기가 서로 인접되어 2차원 또는 수평배열로 이루어진 구조를 가지고 있다고 할 수 있다. MV는 각기 배열 내 각 영상투사기의 광축(Optical Axis)이 공간의 한 점으로 수렴되는 방사형(Radial-Type)이며, IP는 광축이 서로 평행인 평행형(Parallel Type)이다¹⁹⁾. 그림 2에 MV와 IP의 기본 광학구조가 도시되어 있다. 이것이 두 방식의 광학적인 구조에 있어 차이이다. 그러나 MV는 방사형이라고 해서 그 배열이 어떤 곡률반경(Radius of Curvature)을 가진다는 것이 아니고, 각 화소셀의 상하 및 좌우 폭이 구성렌즈의 그것보다는 조금 더 길다는 것을 의미한다. IP의 경우는 평행형이 되기 위해서는 요소 영상과 각 광소자의 대응 면 사이즈는 서로 동일해야 한다. MV와 IP에 있어 또 하나의 차이는 화소셀과 요소영상의 영상 성분에 있어 차이이다. 화소셀의 영상은 각 시점 영상에서 동일 위치의 화소를 선택하여 각 화소가 속한 시점 영상을 제공하는 다시점 카메라 배열내의 대응 카메라 위치에 배열해 놓은 것이다. 그리고 화소셀내의 화소 수는 다시점 카메라 배열내의 카메라 수와 동일하며, 동일한 배열을 가지고 있다. 그리고 요소 영상은 자신의 패널 내 위치에서 찍은 한 대의 카메라 영상이다. MV와 IP의 시역은 일차적으로 화소셀/요소 영상 내의 화소 수의 제곱에 비례한 수만개의 구역으로 나뉘어지고 이들 각 구역은 또한 패널 내의 화소셀/요소 영상의 수에 의해 다시 이차적으로 더 작은 구역으로 세분된다. 그리고 이들 각 구역에서 시청되는 영상은 각 화소셀/요소 영상으로부터 한 개의 화소가 참여하여 만들어지므로, 이 영상을 구성하는 총 화소 수는 패널내의 총 화소셀/요소 영상의 수와 같고 또한 각 구역의 영상 조성은 서로 다르게 된다. 그러므로 IP와 MV방식에

서 시청자의 눈에 투사되는 영상은 각 화소셀/요소 영상에서 한 화소씩 참여하여 조성되는 영상이므로, 각 시점 영상의 일부가 서로 혼합하여 만들어지는 혼합영상이다^[17]. MV의 경우는 시역단면(Viewing Zone Cross Section)으로 알려진 MV내의 모든 화소셀의 확대 영상이 중첩되는 평면, 즉 MV의 모든 영상투사기 광축이 수렴하는 수렴점이 위치하는 평면을 따른 일차 분할 구역에서는 이들 동일한 시점 영상들의 화소만 혼합되어 만들어지는 각 시점 영상들이 분리되어 나타나기도 한다.

여기서 유의해야 할 점은 시역을 구역으로의 분할을 야기시키는 일차적인 책임이 화소셀/요소 영상 내의 화소 수에 있다는 것이다. 이것의 의미는 이 화소 수가 많을수록 그리고 화소의 사이즈가 작을수록 시역이 더 잘게 분할이 된다는 의미이다. 그리고 이들 각 구역에서 시청자의 눈에 투사되는 영상은 서로간에 한 화소의 시차를 가지고 있다. 그리고 화소셀/요소 영상의 수에 의해 이들 일차 분할 구역이 다시 더 적은 구역으로 이차 분할이 되는데 이들 이차 분할 구역은 그들 각각에서 투사되는 영상의 조성이 국부적으로는 차이(Disparity)를 가지고 있으나, 전체적인 차원에서는 차이가 없다. 그러므로 이들 이차분할 구역의 영상 사이에는 시차의 존재가 전체가 아닌 국부적인 부분에서 생길 수가 있으나, 이들 국부적인 차이에 의한 영상 사이의 시차 존재 유무에 대해서는 알려진 바가 없다. 그러므로 이차 분할 구역 사이에는 영상의 시차가 존재하지 않는다고 가정하면, 전체 영상 사이에 시차가 존재하는 일차분할 구역이 인접하는 구역과 최소 시차, 즉 화소 하나에 대응하는 광경 공간(Scene Space)의 차이를 가진 한 개의 단위 구역이 된다^[18]. 그러므로 이들 일차분할 구역의 폭이 시청자의 동공사이즈보다 더 작아지게 되면, 서로 최소 시차를 가진 두 개 이상의 영상이 동공에 입사하게 된다. 이렇게 되면 초 다시점 영상의 기본 조건이 충족되게 된다. 지금까지 알려진 IP나 MV방식^[19]의 어떤 것도 이 조건의 충족여부가 알려져 있지 않다.

초 다시점 영상의 기본 조건 충족은 MV가 IP보다 더 쉽게 이룰 수 있다는 것이다. MV수렴형이므로 화소셀/요소 영상의 전체가 교차하므로, 반만 교차하는 평행형인 IP에 비해 생성되는 구역의 사이즈가 더 작아지며, 또한 구역의 수도 2배 이상이 된다. 그리고 IP의 시역은 MV시역의 시작점에서 시역단면까지의 전반부 시역에 해당하는 시역을 가지며, 동일한 배열의 화소셀과 요소 영상의 경우, 그 구역의 분할패턴이 MV의 전반부 시역과 동일하다. 그러므로 IP와 MV는 화소셀과 요소 영상의 화소 구성에 의한 차이를 제외하면, IP는 MV의 일부에 해당한다. 화소셀의 영상을 요소 영상과 같이 하면, IP는 MV의 부분에 해당한다. 그러므로 MV의 각종 특징은 IP에 그대로 적용이 가능하다.

초 다시점 영상은 아직 제브라 홀로그램 외에는 구현의 예를 찾기 어렵지만, 현재로써는 다시점에 의한 연속시차를 얻는 유일한 영상방식으로 알려져 있으므로, 향후 기대가 되는 3차원 영상방식이다. 초 다시점의 구현은 화소 사이즈의 최소화화 화소 수의 극대화, 즉 패널이 고밀도화가 되면, 쉽게

이루어질 것 같다. 물론 영상투사기의 초 소형화도 초 다시점 영상 구현에 큰 도움이 될 것이다. 그리고 초 다시점에서 제공 가능한 시역각은 이미 제브라 홀로그램에서 보여주는 것과 같이 100°이상이 가능하며, 화소셀/요소 영상의 화소 수가 많아질수록 이 값은 더 커질 것으로 예상된다.

IV. 전자 홀로그래피

이미 언급한 것과 같이 초 다시점 영상에 의한 표시영상보다는 시각적인 효과가 훨씬 뛰어난 공간 부양영상을 홀로그램에 의해 표시 가능하므로, 홀로그램을 표시화면에 표시하는 전자적인 표시장치의 하나인 홀로그래픽 디스플레이를 구현하자는 것이다. 홀로그램의 전자적인 표시를 위해서는 이차원 간섭무늬로 주어지는 홀로그램에 포함된 대량의 데이터 양을 표시할 수 있는 표시매질이 필요하다. 홀로그래픽 비디오라고 명명된 초기 홀로그래픽 디스플레이는 TeO₂ 결정으로 만들어진 AOM(Acousto-Optic Modulator)을 표시매질로 사용하여 선 홀로그램의 시공간 다중화(Spatiotemporal Multiplexing)에 의해 홀로그램을 표시하는 수평시차만을 가진 재생상만 표시 가능했다. 이 AOM에 홀로그램의 입력은 먼저 홀로그램 면을 일정 간격의 행(Row)으로 나누고 각 행의 간섭무늬 분포를 신호화 하여 AOM의 표면에 Transducer로 부착된 피에조 소자를 진동시키면, 이 진동이 AOM내부에 전달되어 이 진동에 비례하는 음향파가 발생된다. 이 음향파는 진행하면서 그 강도에 비례해 AOM내의 굴절률(Refractive Index)을 변화시키므로, 위상 홀로그램의 표시를 가능하게 한다. 이 AOM은 대역폭이 50 MHz이며, 매질내 음향파의 속도가 617 m/sec으로 대략 12 μm의 주기를 가진 음향파의 발생이 가능하다. 이 주기는 일반적인 표시장치의 화소 사이즈 6 μm에 대응하므로 시역각은 3° 정도에 불과하여, 시역각의 확대를 위한 축소 광학계의 사용을 필요로 한다. AOM에서 0차 회절빔은 푸리에(Fourier) 렌즈의 사용에 의해 제거가 가능하며 하나의 상만 재생하므로 재생상의 분리가 간단하여, 수직 및 수평으로 다중화가 쉬우나, 대역폭의 제한에 따른 다중화 회수에 제한을 받는다. 상의 크기는 AOM의 크기에 비례하나, AOM의 제작크기 제한으로 표시 가능 상의 크기에도 제한이 있다. 그리고 AOM 내부는 음향파가 지속적으로 흐르므로, 재생상도 결과적으로 흐르게 된다. 이 재생상의 동결을 위해 다면경(Polygon Mirror)^[20] 또는 펄스 레이저^[21]를 사용하며, 이것에 의해 정지된 재생상을 얻을 수 있다. 이 AOM의 단점은 대역폭 및 주기가 제한되어 있고, 평면 영상과의 호환성이 결여, 시스템 전체가 부피가 크다는 것이다. 이중에서 가장 문제인 것은 평면 영상과의 호환성 결여이다. 최근 MIT에서 개발한 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)를 이용한 Guided Optics형 AOM의 공간 배열은^[22] 표시가능 대역폭을 50GHz/sec으로 증대시켜 시간 다중화를 통해 재생상의 수직 해상도와 홀로그램 사이즈의 증대를 가능하게 하나, 주기가 여전히 12 μm으로 시역각의 확대를 위해서는 축소 광학계(Demagnification

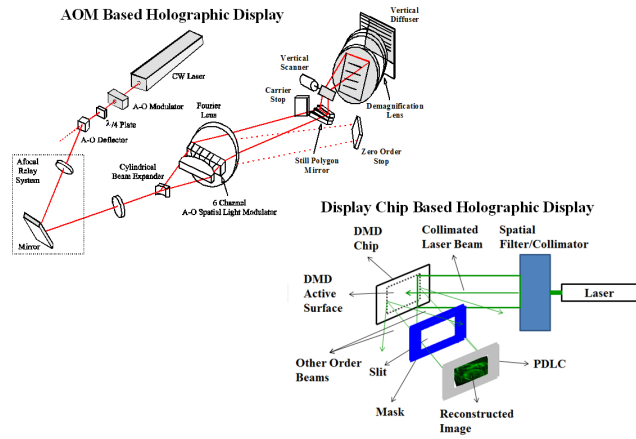


FIG. 3. Comparison of optical structures of AOM and display chip based holographic display.

Optics)를 필요로 한다.

AOM의 호환성 결여와 구성의 어려움 때문에 최근의 전자 홀로그래피는 표시 매질로 공간 광변조기(SLM: Spatial Light Modulator)나 LCoS(Liquid Crystal on Silicon), DMD(Digital Micromirror Device)와 같은 디스플레이 칩을 많이 사용한다. 그림 3에 전자 홀로그래피 디스플레이로서의 역할을 위한 AOM과 디스플레이 칩의 광학 구조를 도시해 놓았다. AOM의 구조가 칩에 비해 훨씬 복잡한 것을 알 수 있다. 이들 칩들의 특징은 위상 홀로그래피의 표시가 가능한 SLM은 아니지만 진폭 홀로그래피를 표시하는 디스플레이 칩들은 평면 영상과의 호환성을 가지고 있고, 재생에 평행화된(Collimated) 레이저 빔만 필요로 하므로 구성이 아주 간단하여 향후 기대되는 디스플레이 매질이다. 그러나 SLM과 디스플레이 칩은 아직 해상도의 제한과 화소 배열의 주기성에 의한 회절 현상에 의해 AOM에 필적하는 화질의 재생상 구현은 아직 하지 못하고 있다. 이렇게 하지 못하는 가장 큰 이유 중의 하나가 회절 현상이다. SLM과 디스플레이 칩의 화소 배열 주기성은 이들을 2차원 선 격자(Line Grating) 또는 Blazed 격자의 역할을 하도록 하여 이에 따른 일차 회절 패턴이 발생하며, 또한 표시되는 홀로그래피의 간섭무늬 주기성에 의해서도 이차 회절 패턴이 발생된다. 일반적으로 재생상은 일차 회절 패턴의 회절 빔 사이의 공간에 각 회절빔에 수반하여 형성되나, 이차 회절패턴은 간섭무늬의 주기가 화소 사이의 간격보다도 크므로, 이차 회절 패턴은 일차 회절 패턴 사이의 공간에 주로 나타나며, 일차 회절 빔과 중첩되어 나타나기도 한다. 그러므로 이차 회절빔과 재생상의 중첩이 불가피해진다. 그러나 이차 회절빔은 간섭무늬의 주기성에 의한 것이지만, 이들 주기성이 국부적으로 나타나므로, 일차 회절빔에 회절 효율을 곱한 것보다 더 적은 빔 강도를 가지며, 재생상의 강도보다도 적다고 볼 수 있다. 이런 이유로, 이차 회절빔의 존재는 재생상을 보이지 않게 하지는 않지만, 재생상의 대비비(Contrast)를 줄이는 역할을 하며, 재생상 사이 공간에도 퍼져 있으므로, 잡음으로 작용하게 된다. 이차 회절빔은 홀로

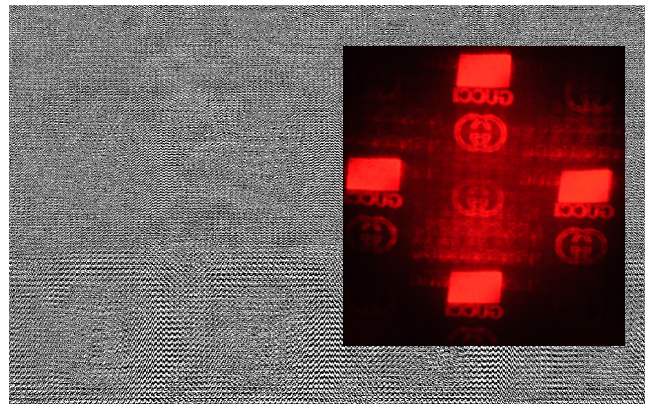


FIG. 4. Light intensity distribution in reconstructing image space and an hologram of GUCCI symbol.

그램에 수반된 것이므로, 근본적인 제거가 불가능한 내재된 잡음이다. 그림 4에 DMD에 의한 홀로그램 상공간의 광 분포를 나타내는 한 예가 도시되어 있다. 그림 4는 GUCCI 심볼의 재생상과 이 심볼 홀로그램을 보여주는 것으로, 재생상이 잡음에 의해 그 선명성이 좋지 못한 것을 알 수 있다. 그 이유는 홀로그램 간섭무늬의 주기성에 있다. 홀로그램에는 간섭무늬 패턴의 많은 부분이 주기성을 띄고 있음을 보여준다. 그리고 직사각형 광 패턴은 회절빔을 표시하며, 재생상이 각 회절빔에 수반되어 나타남을 보여주고 있다. 재생상과 더불어 나타나는 잡음에 의해 상의 선명성과 대비비가 줄어들 수 있다. 디스플레이 칩이 가진 또 다른 문제점은 재생상의 직시가 어렵다는 것이다. 홀로그램에서 재생상은 홀로그램자체가 표시된 칩의 활성표면(Active Surface)에서 발생되어 나오므로 재생상은 이 활성표면과 함께 보여진다. 그러나 이 활성표면의 밝기가 재생상의 밝기보다 훨씬 더 밝을 경우에는 재생상의 시청이 불가능해진다^[23].

회절패턴의 존재는 이들 칩들의 다중화에도 영향을 미친다. 현재 가용한 SLM과 칩들은 해상도가 UHD(Ultra High Definition)인 7680×4320에 이어서 표시할 수 있는 간섭무늬의 수가 3840×2160에 이르며, 화소 사이즈도 4.8 μm으로 시역각은 대략 4° 정도로 증가되었다^[24]. 그러나 화소 사이즈만 보는 경우는 AOM보다 낮다고 할 수 있지만, 홀로그램의 테이터 양을 정의하는 파라미터인 공간대역폭적(Space Bandwidth Product)이 AOM의 경우는 공간 다중화를 하지 않은 경우는 대략 1.6 GHz·cm에 해당하나, 상기 UHD의 경우는 248.832 MHz·cm로 AOM에 비해 여전히 못하다. 상기 공간대역폭적의 계산은 MIT에서 사용한 AOM은 길이가 8 cm이며, 대역폭이 50 MHz인 것으로, 이것을 수직방향으로 4개의 채널로 하여 사용한 것을 기준으로 하였다. 그리고 UHD의 경우는 수직방향 길이를 고려하지 않았다. 그러므로 칩의 경우는 다중화가 필요하다. 그러나 일차 회절패턴에 의해 수평 방향으로 다중화의 수가 이론적으로는 제한이 없지만 수직방향으로 2개 이상의 다중화가 불가능하여, 재생상의 종횡비(Aspect Ratio)가 너무 커서 재생상의 불균형이 크게 생긴다^[25]. 수직방향으로 다중화를 증가시키기 위해서는 각 수직방향

칩별로 여분의 광학계를 사용하여, 수직방향으로 각 칩의 재생상이 서로 인접하도록 이 광학계를 사용하여, 각 재생상의 방향을 바꾸어야 한다. 재생상의 방향은 조사빔의 입사각과 광학계 모두를 써서 조정해야 하므로 상의 정렬이 아주 어려워진다²⁶⁾. 지금까지의 SLM과 칩들에 수반하는 모든 문제점들은 화소 배열의 디지털화에 의한 것이나, 칩 사이즈의 대형화와 화소 사이즈의 최소화, 즉 화소 사이즈를 1 μm 보다 작게 함에 의해 이런 문제점들이 완화될 것이 분명하나, 이 문제를 극복하는 방법 중의 하나는 홀로그램의 재생상을 광학계를 통해 부양화시키는 것²⁷⁾과 회절 패턴이 발생하지 않도록 홀로그램 표시용 칩을 아날로그화시키는 것일 것이다. 그리고 시역각은 물체파와 기준파의 교차각(Crossing Angle)에 의해 정해지므로, 초 다시점 영상의 화소 수보다는 화소 사이즈에 의존한다. 이 값은 초 다시점에 비해서 더 작을 것으로 예상된다.

V. 결 론

전자 홀로그래피와 초 다시점 3차원 영상은 그 구현 가능한 영상이 부양되는 공간 위치에 차이가 있으나, 그 구현목표는 공히 연속시차 구현에 의해 단안으로도 깊이감을 얻을 수 있도록 하자는 것으로 동일한 목표를 가지고 있다. 이들 방식의 구현을 위해서는 우선 화소 사이즈가 줄어들고, 단위 길이당 화소 수는 증대되는 고 밀도 패널의 개발이 필요하다. 두 방식 공히 요구하는 화소의 집적도는 유사하리라 예상되나, 전자 홀로그래피의 구현 영상의 시역각은 초 다시점에 비해 더 적을 것이다.

감사의 글

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 산업원천기술개발사업 [2011년도, R2011050107, 디지털 홀로그래피 콘텐츠 기반 기술 개발]과 미래창조과학부, 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업 (정보통신) [10039169, 디지털 홀로그래픽 3D 디스플레이 및 기록 시스템 원천 기술 개발] 의 일환으로 수행하였음.

References

1. *Fundamental of 3-D Imaging Techniques (Japanese Edition)*, T. Izumi (Supervisor), (NHK Science and Technology Lab., Ohmsa, Tokyo, Japan, 1995).
2. J.-Y. Son, V. I. Bobrinev, and K.-T. Kim, "Depth resolution and displayable depth of a scene in 3 dimensional images," *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 1739-1745 (2005).
3. J.-Y. Son, O. Chernyshov, C.-H. Lee, and S. Yano, "Depth resolution in 3-D images," *JOSA A* **30**, 1030-1038 (2013).
4. J.-Y. Son, B. Javidi, S. Yano, and K.-H. Choi, "Recent developments in 3-d imaging technologies," *IEEE/OSA Journal of Display Technology* **V6**, 394-403 (2010).

5. J.-Y. Son, *Principle and Application of Holography* (Bong-myung Publishing Company, Seoul, Korea, 2004).
6. J. Y. Son and B. Javidi, "3-dimensional imaging systems based on multiview images," *IEEE/OSA J. of Display Technology* **V1**, 125-140 (2005).
7. J.-Y. Son, B. Javidi, and K.-D. Kwack, "Methods for displaying 3 dimensional images," *Proc. IEEE, Special Issue on: 3-D Technologies for Imaging & Display* **94**, 502-523 (2006).
8. E. Parker and P. R. Wallis, "Three-dimensional cathod-ray tube displays," *J. of IEE* **95**, Part III, 371-390 (1948).
9. J.-Y. Son, W.-H. Son, S.-K. Kim, K.-H. Lee, and B. Javidi, "3-D imaging for creating real world like environments," *Proc. IEEE* **101**, 190-205 (2013)
10. J. Harrold, D. J. Wilkes, and G. J. Woodgate, "Switchable 2D/3D display-solid phase liquid crystal microlens array," in *Proc. IDW'04, the 11th International Display Workshops* (Japan, 2004), pp. 1495-1496.
11. J. D. Lewis, C. M. Verber, and R. B. McGhee, "A true three-dimensional display," *IEEE Transaction on Electron Devices* **ED-18**, 724-732 (1971).
12. J. S. Kollin, S. A. Benton, and M. I. Jepsen, "Real-time display of 3-D computed hologram by scanning the image of acousto-optic modulator," *Proc. SPIE* **1136** (G. M. Morris ed.), 1136-60 (1989).
13. N. Peyghambarian, S. Tay, P.-A. Blanche, R. Norwood, and M. Yamamoto, "Rewritable holographic 3D display," *Optics and Photonics News* **19 (7/8)**, July/August (2008).
14. Zebra Imaging Inc., M. A. Klug, C. Newawanger, Q. Huang, and M.e. Holzbach, "Active digital hologram displays," U.S. Patent 7,227,674, June (2007).
15. Y. Kajiki, H. Yoshikawa, and T. Honda, "Ocular accommodation by super multi-view stereogram and 45-view stereoscopic display," in *Proc. IDW'96, the 11th International Display Workshops* (1996), pp. 489-492.
16. B.-R. Lee and J.-Y. Son, "Characteristics of composite images in MV and IP," *Appl. Opt.* **51**, 5236-5243 (2012).
17. W.-H. Son, J. Kim, J.-Y. Son, B.-R. Lee, and M.-C. Park, "The basic image cell in contact-type multiview 3-D imaging systems," will be published in October issue of *Optical Engineering*.
18. B. Javidi and F. Okano eds, *Three-Dimensional Television, Video, and Display Technology* (Springer, New York, USA, 2002).
19. P. St-Hilaire, M. Lucente, J. D. Sutter, R. Pappu. C. D. Sparrell, and S. A. Benton, "Scaling up the MIT holographic video system," *Proc. SPIE* **2333**, 374-380 (1994).
20. J. Y. Son, S. Shestak, S. K. Kim, and V. Epikhan, "A multichannel AOM for real time electroholography," *Appl. Opt.* **38**, 3101-3104 (1999).
21. D. E. Smalley, Q. Y. J. Smithwick, V. M. Bove Jr, J. Barabas, and S. Jolly, "Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays," *Nature* **498**, 313-317 (2013).
22. J.-Y. Son, H. Lee, M.-C. Park, and B.-R. Lee, "Perspective of holographic display based on display chips," *Korea*

- Society Broadcast Engineers Magazine **18**, 27-39 (2013).
23. T. Senoh, T. Mishina, K. Yamamoto, O. Ryutaro, and T. Kurita, "Viewing-zone-angle-expanded color electronic holography system using ultra-high-definition liquid-crystal displays with undesirable light elimination," *Journal of Display Technology* **V7**, 382-390 (2011).
 24. J.-Y. Son, B.-R. Lee, O. O. Chernyshov, K.-A. Moon, and H. Lee, "Holographic display based on a spatial DMD array," *Opt. Lett.* **38**, 3173-3176 (2013).
 25. K. Yamamoto, Y. Ichihashi, T. Senoh, R. Oi, and T. Kurita, "3D objects enlargement technique using an optical system and multiple SLMs for electronic holography," *Opt. Express* **20**, 21137-21144 (2012).
 26. J.-Y. Son, C.-H. Lee, O. Chernyshov, and B.-R. Lee, "A floating type holographic display," *Opt. Express* **21**, 20441-20451 (2013).