세계 빛의 해

미래 통신 시스템을 위한 3D 영상의 기록과 재현 - 디지털 홀로그래피 기술

DOI: 10.3938/PhiT.24.018

김진웅·추현곤·문경애

Recording and Reconstruction of 3-dimensional Images for Future Telecommunication Systems – Digital Holographic Technology

Jinwoong KIM, Hyon-Gon CHOO and Kyeong-Ae MOON

Holography is the only technology known so far that is capable of recording all the characteristics of light and thus reproducing perfect 3-dimensional images at another time and another place. Since the basic principle was discovered in 1948, many advances have been made in the analog domain, enchanting many people with beautiful life-like 3-D hologram images. If holography is to be adopted for a telecommunication system, acquisition, processing and display of a moving-scene hologram must be possible in the digital domain. However, many technical huddles, including insufficient SBP of available SLM devices, hologram acquisition under natural light, and real-time processing and transmission of huge amounts of hologram data, remain to be solved in digital holography. The Giga Korea Project was launched recently and has a goal of providing tele-presence experience on a gigabit communications network beyond 2020. Digital holography has been chosen as one of the en-

abling technologies for achieving this goal. In this article, we introduce the basic principles of analog holography and the technical issues in digital holography, and we present our effort to implement a table-top holographic display terminal under the Giga Korea Project.

서론

인간이라는 존재는 경이적이다. 이 경이적인 존재인 인간은 오늘도 진화하고 발전하고 있다. 그 저변에는 개체간의 의사소통을 통하여 자연이 오랜 시간을 통해 터득한 원리를 매우 빠르게 이해하고, 자연과는 비교할 수 없이 빠른 속도로 진화를 이루어내는 집단 지성의 작용이 자리 잡고 있다. 의사소통은 정보의 전달(통신)이다. 정보를 전달하고 모음으로써 점점 더 복잡한 상황에 대한 이해와 대처, 나아가 이용이 가능하게 된다. 정보는 무엇인가? 인간을 포함한 이 세계에서 일어나고 있고, 존재하고 관찰할 수 있는 모든 것을 객관적으로 표현한 것이 정보이다. 밝다, 어둡다, 크다, 사람이다, 움직인다, 부딪친다, ... 인간은 이러한 정보를 감각 기관을 통하여 획득하고 그에 대해 뇌가 분석하고 반응함으로써 삶을 유지해나간다. 우리가 익숙히 들어온 시각, 청각, 후각, 미각, 촉각의 오감이라는 것이 바로 감각기관을 지칭한다. 이 감각기관이 받아들이는 것의 집합이 인간의 경험을 이루며, 인간에게는 이것이 곧 시간이라고 할 수 있다. 즉, 어느 순간에 일어난 사건에 대한 기록인 것이다. 따라서 이 정보를 모두 저장할 수 있고 그대로 다시 재현할 수 있다면, 우리는 시간을 기록하여 언제든지 그 시간을 다시 불러와 경험할 수 있다는 것을 의미한다. 우리가 타임머신을 공상과학 소설에 등장하는 가상의 이루어질 수 없는 어떤 것으로 생각하고 있지만, 우리가 어느 순간에 감각기관을 통하여 받아들인 정보를 그대로 다시 재현하면, 그것이 바로 타임머신이 아니고 무엇인가? 이 감각기관이 획득하는 정보 중에 가장 많은 정보를 담고 있는 것이 시각정보, 즉 영상 정보이다. 영상 정보란 빛을 매개체로 하여 우리가 외부 세계를 인지하는 방법이다. 이 빛을 기록함으로써 그 순간의 한 영상

저자약력

김진웅 소장은 Texas A&M 대학교 전기공학박사(1993년)로서 1983년부터 한국전자통신연구원에 재직 중이며, 현재 방송통신미디어연구소장을 맡고 있다. 주로 디지털 방송 및 실감미디어 분야의 연구를 하고 있으며, 현재 기가코리아 사업의 홀로그래픽 단말 기술개발 과제책임자이다. (jwkim@etri.re.kr)

추현곤 박사는 한양대학교 공학박사(2005년)로서 2005년부터 한국전자통신연구원에 재직 중이며 현재 기가코리아 홀로그래픽 단말 기술개발 과제에 참여하고 있다. (hyongonchoo@etri.re.kr)

문경애 박사는 충남대학교 이학박사(1997년)로서 1991년부터 한국전자통신연구원에 재직 중이며 현재 기가코리아 홀로그래픽 단말 기술개발 과제에 참여하고 있다. (kmoon@etri.re.kr)

단면을 반복 재현하는 것이 사진이다. 사진이 가지고 있는 한계는 3차원 세계의 2차원 투영이라는 데에 있다. 즉, 그 순간의 세상을 아주 작은 구멍(pin hole, 카메라의 렌즈)을 통해서 본 정보만을 기록하여 재현하는 것이다. 반면, 홀로그래피는 좀 더 많은 정보를 기록하고 재현할 수 있다. 즉, 작은 구멍이 아니고, 어느 정도 크기의 창문을 통해 바라보는 세상을 기록하고 재현할 수 있는 것이다. 이 역시 창문을 통해 본다는 한계는 있으나 사진보다는 훨씬 더 다양한 각도에서 사물을 관찰할 수 있으므로, 좀 더 현실과 같은 정보 전달이 가능하다. 본고에서는 3차원 영상을 완벽하게 기록하고 재현할 수 있는 기술로서의 홀로그래피 기술에 대해 살펴보고, 미래 ICT 환경 변화에 대응하기 위해 출범한 기가코리아 사업에서 연구하고 있는 디지털 홀로그래피 기술을 소개하고자 한다.

빛과 시간의 기록 - 사진, 홀로그래피

빛을 표현하는 방법은 광선(Ray)에 의한 방법과 광파(Light Wave)에 의한 두 가지의 방법이 있다. 광선에 의한 해석은 일상생활에서 관찰 가능한 빛의 직진, 반사, 굴절 등 빛의 성질에 대한 많은 것을 쉽게 이해할 수 있게 해준다. 그러나 빛을 직진하는 특성을 갖는 Ray로 해석하면 설명하지 못하는 회절 현상이 관찰되었으며, 이는 광파라는 표현 수단을 도입하면서 잘 설명될 수 있다. 회절 현상은 빛이 직진하는 경로에 불투명한 물체를 놓았을 때, 이 물체에 의해 가려진 부분에도 빛이 도달하는 현상을 말한다. 빛을 파동 현상으로 표현하면, 파동이 갖는 성질을 이용하여 빛이 만들어내는 많은 새로운 현상을 이해하고 이용할 수 있으며, 이에 기반한 기술의 하나가 홀로그래피 기술이다.^[1]

빛은 그 속성상 전자기파에 해당하며, 빛을 구성하는 요소는 빛의 밝기(세기), 빛의 색상(주파수), 그리고 빛의 방향이다. 사진과 홀로그래피를 구분한다면, 앞의 두 요소, 즉, 빛의 밝기와 색상만을 기록한 것이 사진인 것에 반해, 세 요소 모두를 기록한 것이 홀로그래피이다. 홀로그래피는 빛의 방향도 기록하고 재현함으로써, 이를 관찰하는 방향에 따라 실제 사물을 관찰하는 것처럼 다른 모습을 볼 수 있다. 홀로그래피(Hologram)의 어원적 의미도 빛의 모든 속성('모든 것'을 의미하는 Holos)을 기록(graphen)한다는 의미를 가지고 있다. 홀로그래피(Holography)는 빛의 간섭 및 회절 현상을 통해 3차원 입체영상(홀로그래피)을 획득, 기록, 재현하는 기술을 의미한다.^[2]

1. 홀로그래피의 기록 및 재현 원리

빛의 방향은 어떻게 기록할 수 있을까? 아직까지 발견된 모든 감광 물질은 빛의 에너지(광파의 세기)에만 반응하며, 빛의

Fig. 1. Principle of hologram generation and 3D image reconstruction.^[2]

방향을 기록할 수 있는 것은 없다. 그래서 빛의 방향은 빛의 간섭 현상을 이용한 간접적인 방법으로 기록하게 되며, 이 개념이 홀로그래피의 핵심이라고 할 수 있다. 즉, 이미 위상을 알고 있는 기준광과 기록하고자 하는 물체로부터 반사된 임의의 위상을 가지는 빛을 합치면 두 빛의 위상 차이에 의한 빛의 세기 변화를 나타내는 패턴(간섭무늬)이 형성되며, 이 간섭 무늬를 기록한 것이 바로 홀로그램이다. (그림 1 참조) 이 간섭 무늬를 정확히 표현하기 위해서는 기록 매질이 빛의 파장보다 훨씬 작은 해상도를 표현할 수 있어야 하며, 홀로그램을 기록하는 매질은 보통 사진에 사용되는 매질보다 약 1,000배 이상의 고해상도(grain 크기가 50 nm 수준)를 요구한다. 이 홀로그램에 원래 홀로그램을 만들 때 사용했던 기준광을 비추면 홀로그램에 의해 회절되어 원래 물체로부터 반사된 빛과 동일한 빛이 재생되며, 사람은 원래의 물체를 보는 것과 구분하지 못하고 동일하게 인식하게 된다. 또한, 이 홀로그램은 여러 방향에서 온 빛을 모두 기록하고 있으므로, 홀로그램을 다른 방향에서 바라보면 빛이 회절하는 범위 안에서는 보는 방향에 따라 현실에서 보는 것처럼 다른 면이 보이게 된다.

2. 홀로그래피 기술의 발전

홀로그램은 헝가리 출신의 영국 과학자인 데니스 가보(Dennis Gabor)에 의해 1948년에 발명되었으며, Gabor는 이 공로로 1971년에 노벨 물리학상을 수상하였다. 그러나 Gabor의 홀로그램은 기준광 경로상에 반투명한 물체를 놓고 이로부터 발생한 물체광과의 간섭무늬를 획득한 In-line(On-axis) 방식으로 인해 기준광과 회절광이 겹친 형태로 관찰되었으며, Gabor 자신조차도 당시에는 이 기술이 3차원 영상 재생에 사용될 수

REFERENCES

- [1] Goodman, J. W., *Introduction to Fourier Optics* (The McGraw-Hill Companies, 2005), Chap. 3.
- [2] Stephen A. Benton and V. Michael Bove Jr., *Holographic Imaging* (A John Wiley & Sons, Inc., 2008), Chap. 1.

Fig. 2. (a) On-axis set-up, (b) Gabor's first hologram, original image and reconstructed image, (c) Off-axis set-up, (d) off-axis hologram image by Leith.

있음을 미처 인지하지 못하였다. 실물과 동일하게 보이는 3차원 영상 재현이 가능하게 된 것은 미시간 대학의 Emmett Leith와 Juris Upatnieks가 레이저 광원을 이용한 Off-Axis 홀로그래프를 통해 Gabor의 홀로그래프를 실질적으로 재발견함으로써 비롯되었다.^[3] Off-axis 홀로그래프이란 기준광과 물체광이 어느 정도 각도를 이루고 간섭을 일으키게 만들어 발생된 여러 차수의 회절광을 공간상에서 분리함으로써 깨끗한 원래의 물체상을 얻는 방식을 말한다. (그림 1, 그림 2(c) 참조) 이후 MIT 대학의 Benton 교수는 수직방향의 시차를 포기하는 대신 일반광 하에서도 매우 밝은 홀로그래프 영상을 볼 수 있게 만든 레인보우 홀로그래프를 개발하였으며,^[4] 상업적 목적을 위해 대량 생산이 가능한 엠보싱 홀로그래프가 개발되었다. 엠보싱 홀로그래프는 투명한 플라스틱의 표면에 요철을 만듦으로써 간섭무늬의 역할을 하도록 한 홀로그래프이다. 홀로그래프의 역사가 오래되고 상용화를 위한 많은 노력이 있었으나, 다루기 어려운 고가의 레이저와 매우 감도가 낮은 필름 매질을 사용하며 진동이 차단된 암실에서 배경없는 사물에 한정되어 홀로그래프를 획득할 수 있으며, 사진과 같은 인화 과정이 필요한 등 일반인이 보편적으로 사용하기에는 한계가 있는 기술로 머물러 있다.

그러나 홀로그래피 기술은 (1) 3차원 영상을 기록하고 재현하고자 하는 'Display holography(3-dimensional Imaging)' 분야 외에도 경제적으로 소형의 광학 소자를 만들 수 있는 (2) Holographic Optical Element(HOE), 대용량의 정보를 효율적

으로 저장하고 액세스할 수 있는 (3) Optical Computing, 넓은 범위의 미세 형태나 구조를 정확히 탐지하거나 측정하는 (4) Optical metrology and microscopy, (5) Non-destructive Testing(NDT) 등 다양한 분야에 활용될 수 있는 기반기술이다. 디스플레이 홀로그래피 분야는 위에서 언급한 기술적인 한계나 제작상의 불편함 등으로 인하여 현재는 예술작품 활동 영역 정도로 축소되어있고,^[6] 실생활에 사용되는 것은 지폐, 신용카드 및 고급 포장지 등을 통해 익숙하게 접할 수 있는 엠보싱 홀로그램이 대부분을 차지하고 있다.^[5]

3차원 빛의 기록과 재현 기술들

홀로그램을 3차원 빛의 기록이라고 했는데, 이를 3차원 영상의 기록이라고 일단 생각하고 이야기를 전개해 나가기로 하자. 3차원 영상이란 사람이 관찰했을 때 3차원 입체로 느끼는 영상을 말한다. 그러면 사람은 영상이 주는 어떤 정보에 의해 3차원 입체를 느끼게 되는가? 영상으로부터 입체를 느끼는 요소(Cue)는 크게 생리적인 요소(Physiological cue)와 경험적인 요소(Experiential cue)로 나눌 수 있다. 전자는 우리의 시각 시스템이 대상을 볼 때 반응하는 기제(mechanism)를 기반으로 입체를 인식하게 되는 것을 의미하며, 주시하는 대상이 가까이 또는 멀리 있는가에 따라 두 눈이 이루는 각도(주시각, Vergence)가 달라지는 것과 초점을 맞추기 위해 수정체의 두께를 조절하는 근육이 움직이는 정도가 바로 그것이다. 후자는 우리가 살아오면서 자연스럽게 습득한 사물들의 형태와 원근에 따라 달리 보이는 현상들을 의미한다. 즉, 멀리 있는 물체는 가까이 있는 물체에 의해 가려진대거나, 같은 물체라도 멀리 있으면 작게 보이는 것 등이 그것이다. 2차원 사진은 후자에 해당하는 요소를 모두 표현함으로써, 비록 그것이 2차원 기록 이기는 하나 사진 속에 담긴 풍경을 3차원으로 인식할 수 있게 해준다. 그러나 영상을 볼 때 전자에 해당하는 생리적 요소까지 제공될 때에 비로소 사람은 실제와 같은 3차원 대상을 보고 있다고 느끼게 된다. 이를 위한 가장 기본적인 방법은 역시 우리 눈을 모사하는 방법으로써, 두 대의 카메라를 이용하여 우리 눈이 보는 바와 같은 2장의 영상을 획득하고 좌우 눈에 각각 제시하는 것이다. 이를 스테레오 3D 영상이라고 하며, 3D 영화관과 현재 시중에 판매되고 있는 3DTV 등에 구현되

REFERENCES

- [3] Leith, E. N. and J. Upatnieks, J. Opt. Soc. Amer. **52**, 1123 (1962).
- [4] S. A. Benton, J. Opt. Soc. Am. **59**, 1545A (1969).
- [5] Sean F. Johnston, *Holographic Visions* (Oxford University Press, 2006).
- [6] Juyong Lee, Physics and High Technology **9**(11), 7 (2000).

Fig. 3. Various 3D Imaging technologies.

어있다. 이 경우 두 장의 영상을 하나의 디스플레이(화면)를 통해 다중화하여 나타내고 이로부터 두 장의 각각 다른 영상을 보아야 하기 때문에 두 개의 영상을 분리하기 위한 특수 안경을 착용하여야 한다. 주파수 다중화의 경우 적청(Red-Blue) 안경을, 시간 다중화의 경우 셔터글래스를, 그리고 편광에 의한 다중화를 하는 경우 편광안경을 사용한다. 스테레오 영상의 경우 영상 획득시의 카메라 위치에서 관찰된 영상만을 제공하기 때문에 사람들이 아무리 좌우로 위치를 바꾼다고 해도 보이는 것은 항상 동일하여 현실과는 다르다는 한계가 있다. 이 때문에 스테레오 영상은 진정한 3차원(3D)이 아닌 2.5D 영상이라고 칭해지기도 한다.

특수 안경을 착용하지 않고 현실과 같은 3차원의 대상을 관찰할 수 있는 진정한 3차원 영상의 기록과 재현은 지난 오랜 동안 인간이 실현하고자 하는 꿈의 하나이기도 하다. 이를 위해서는 동일한 객체로부터 여러 방향으로 퍼져나간 모든 빛을 기록하고 이를 재현하는 것이 필요하며, 통상적인 사진술을 이용하는 방법은 결국 수없이 많은 방향에 모두 카메라를 배치하고, 이 카메라를 통해 획득한 영상을 다시 결합하여 원래 카메라가 있던 방향에서 그 영상이 보이도록 재현하는 것이다. 이러한 기능을 구현할 수 있는 방법이 다시점, 초다시점 또는 집적영상 기술으로써 꾸준히 연구되어오고 있으며, 최근 기술의 빠른 발전에 힘입어 상용화 가능성을 높이고 있다.^[7]

디지털 홀로그래피 기술 연구

홀로그램이 현실에서 보는 것과 동일한 지각을 가져다주는 궁극적인 3차원 영상 획득 및 재현 기술이기는 하나, 아날로그 방식의 홀로그램은 필름 기반의 사진과 동일한 기술로써 촬영, 인화 및 재생의 과정이 필요한 3차원 사진술의 범주에 머물러 있다. 더구나 홀로그램의 획득은 일체의 진동이 없는 암실에서 레이저를 이용해 촬영하는 단계를 필요로 하므로 불편적인 활용은 쉽지 않은 상황이다. 궁극적으로 현재의 텔레비전을 홀로그램으로 구현하기 위해서는, 동영상 홀로그램을 촬영하고 이

(a)

(b)

Fig. 4. (a) Concept of digital holography, (b) Analog vs. digital holography.

를 원거리로 전송하여 실시간으로 재현하는 기술이 모두 디지털 기술 기반으로 다시 연구개발되어야 한다. (그림 4 참조) 디지털 홀로그래피 기술이란 홀로그램 데이터가 디지털 방식으로 획득, 표현, 가공, 전달 및 재현되는 기술을 의미한다. (엄밀한 용어 사용에 의하면, 컴퓨터로 CGH(Computer Generated Hologram)를 생성하고 재현하는 기술을 ‘디지털 홀로그래피 기술’이라 하고, 전자 디바이스를 통한 홀로그램 재현 기술을 ‘전자 홀로그래피 기술’이라고 하나, 본고에서는 이 두 가지를 모두 통칭하여 ‘디지털 홀로그래피 기술’이라고 한다.)

디지털 홀로그램의 획득 방식은 크게 2가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 아날로그 홀로그램을 획득하는 방식과 동일한 환경을 만들고 감광판 대신 디지털 감광소자를 사용하여 감광소자면에 형성되는 간섭무늬 정보를 기록하는 것이다. 이는 암실 환경과 동영상 촬영을 위해서 극히 빠른 속도의 레이저 광원을 사용해야 한다는 점 등으로 인하여 실용화 가능성이 매우 낮다. 두 번째 방식은 기존의 카메라를 활용하여 획득한 3차원 장면 데이터로부터 물체의 각 위치에서 반사된 모든 빛을 파동식으로 표현하고, 이 파면들이 결합하여 만드는 간섭무늬를 이론적인 파동 중첩 공식을 통해 계산해내는 것이다. 이를

REFERENCES

- [7] Jinwoong Kim *et al*, How 3D Technology changes future, ETRI Easy IT series 19 (2010).

Table 1. Approaches and Implementations of digital holographic displays.

구분	내용
시간 다중화 방식	미국 MIT media Lab. Screen size: 150×75 mm ² Field of view: 55° Device: 18-channel AOM
	일본 동경농공대 Screen size: 96.9×52.5 mm ² Field of view: 14.6° Device: 1 DMD
공간 다중화 방식	폴란드 Warsaw 대 Screen size: 49.9×49.9 mm ² Field of view: 9.95° Device: 6 LCoS SLM
시공간 다중화 방식	영국 QinetiQ Screen size: 140×70 mm ² Field of view: 5.3° Device: 4-channels (1 EASLM-25 OASLMs)
시야각 이동 방식	독일 SeeReal Screen size: 423.4×346.5 mm ² Field of view: 0.13° (estimation) Device: LCD SLM

CGH라고 하며, CGH 기법을 이용하면 현실에 존재하지 않는 가상의 물체에 대해서도 홀로그래프를 만들어낼 수 있는 장점이 있으나, 필요한 계산량이 너무 많다는 점이 극복되어야 한다. 그간 CGH에 필요한 엄청난 연산량을 알고리즘 차원에서 간략화하기 위한 많은 연구가 진행되었으며,^[8] 연산 알고리즘의 효율화와 함께 CGH를 통해 동영상 홀로그래프를 실시간으로 처리하기 위한 홀로그래프 연산 전용의 하드웨어 개발도 발표된 바 있다.^[9]

디지털 홀로그래픽 시스템을 구현하는 데 있어 가장 많은 기술적인 진보가 요구되는 부분은 홀로그래프를 재현하는 디스플레이이다. 홀로그래픽 디스플레이의 핵심적인 소자는 아날로그 홀로그래프에서의 필름과 같은 역할을 하는 공간광변조기(SLM: Spatial Light Modulator)이다. SLM은 미세한 간섭무늬를 정교하게 표현할 수 있는 정도의 고해상도를 가져야 하며, 또한 그 크기가 재현하고자 하는 영상의 크기와 동일해야 한다. 이를 SBP(Space Bandwidth Product)라고 하며, 이때 Space는 디스플레이의 크기를, 그리고 Bandwidth는 소자의 해상도(픽셀 피치)를 각각 의미한다. 현재 상용품으로 구할 수 있는 SLM의 SBP 성능은 실제 우리가 원하는 홀로그래픽 디스플레이를 구현하기에 매우 부족하며, 이를 극복하기 위한 여러 가지 시공간 다중화 방법이 연구되고 있다. (표 1 참조) MIT 대학의 SPI 그룹에서는 AOM 소자를 사용한 Mark-I, II 시스템을 개발한 바 있다.^[10] AOM은 1차원 디스플레이 소자이며, 2차원 영상의 재현을 위해서 Galvano mirror를 이용한 수직 스캐닝 방식(시간적 다중화)을 사용하였다. 일본 동경농공대의 Takaki 교수는 DMD 소자와 Cylindrical 렌즈 및 Galvano mirror를 사용한 시간 다중화 방식의 홀로그래픽 디스플레이 개발하였으며,^[11] 일본 NICT에서는 8K UHDTV 프로젝터용으로 개발된 LCoS 소자를 사용한 Full color 디스플레이를 개발하여 시연한 바 있다.^[12] 이 시스템들을 통해서 시연해 보여준

홀로그래프 영상은 매우 작은 크기의 선명하지 않은 단색 홀로그래프 수준으로써 아직 많은 연구개발이 필요함을 시사하고 있다. 이 방식들에서는 우리 두 눈으로 자연스럽게 관찰할 수 있는 정도의 회절각을 제공하는 SLM을 사용하고자 했으며, 이에 따라 구현할 수 있는 SLM의 크기 즉, 관찰할 수 있는 홀로그래프 영상의 크기가 매우 작아서 비록 3D 입체 영상을 보여주더라도 이를 제대로 인식하기가 어려운 한계가 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위한 다른 접근 방식은 독일 SeeReal사에서 대화면(20인치) LCD 소자를 이용해 구현한 방식으로,^[14] Sub-hologram 방식이라고 부른다. 핵심 개념은 어느 한 순간에 관찰자의 눈이 있는 위치에만 홀로그래프 영상을 형성해도 충분히 홀로그래프를 볼 수 있다는 것이고, 이는 매우 작은 회절각을 갖는 SLM으로도 구현 가능하다는 것이다. 이로 인해 얻는 이득은 대형(20인치 이상) 홀로그래프 영상의 재현이 용이해진다는 것이다. 다만, 이 경우 SLM으로부터 회절된 빛은 관찰자의 눈이 위치하는 매우 작은 영역에서만 보이게 되므로, 관찰자의 움직임을 따라가는 정밀한 실시간 동공추적 기능과 이에 동기된 기준광 steering, 그리고 눈의 위치에 해당하는 sub-hologram의 실시간 생성 등이 함께 구현되어야 한다. 이로 인해 동시에 홀로그래프를 볼 수 있는 관찰자는 한 명으로 제한된다.

또한, 아날로그 홀로그래프의 화질에 근접한 영상 화질을 얻기 위해 필요한 1 μm 이하급의 픽셀 피치를 갖는 SLM에 대한 연구도 꾸준히 진행되고 있다. (표 2 참조)

여기서, 많은 영화에서 제시된 홀로그래프의 이미지에 의하여 형성된 홀로그래픽 디스플레이에 대한 한 가지 오해를 짚고 넘어가기로 하자. 스타워즈로 대표되는 많은 SF 영화에서 홀로그래프는 아무것도 없는 공간상에 3차원 영상을 형성시키는 기술로 소개된다. 그러나 앞서 설명했듯이 우리가 홀로그래프를 보는 것은 일상생활에서 물체를 보는 것과 다르지 않은 작용이다. 즉, 물체로부터 떠난 빛이 우리 눈에 들어와서 망막 세포를 자극함으로써 보게 되는 것이며, 빛은 그 중간에 방해물이 없는 한 직진하는 속성에 의해 시각을 제공한다. 따라서 홀

REFERENCES

- [8] H. Kang, *et al.*, "Comparison and acceleration for digital hologram generation method based on segmentation," Proc. 3DTV Conf. (2009).
- [9] Tomoyoshi Ito, *et al.*, Optics Express **13**(6), 1923 (2005).
- [10] P. St.-Hilaire, *et al.*, "Advances in Holographic Video," in SPIE Proc. Vol. #1914: Practical Holography VII (1993), pp. 188-196.
- [11] Y. Takaki and N. Okada, Appl. Opt. **48**, 3255 (2009).
- [12] Senoh T., *et al.*, Journal of Display Technology **7**, 382 (2011).
- [13] P.-A. Blanche, *et al.*, Nature **468**, 80 (2010).
- [14] R. Haussler, *et al.*, "Large real-time holographic displays: from prototypes to a consumer product," Proceedings of EI 2009.

Table 2. Spatial Light Modulators, commercial and under development.

구 분	내 용
기존 상용 SLM 소자	DMD (Digital Micro-mirror Device) TI 픽셀피치가 $7.5 \mu\text{m}$ 이고 화면크기가 1.38인치 micro-mirror 칩을 개발함 (시야각 2도)
	LCoS (Liquid Crystal on Silicon) Sony 픽셀피치가 $4 \mu\text{m}$ 이고 화면크기가 0.7인치 패넬을 개발함 (시야각 8도)
	LCD (Liquid Crystal on Silicon) LGD 픽셀피치가 $58 \mu\text{m}$ 이고 화면크기가 5인치 패넬을 개발함 (시야각 0.5도)
최근 SLM 기술 연구	AOM (Acoustic-Optic Modulator) MIT 표면 탄성파 소자에 광도파관을 사용하여 빛을 회절시켜 광시야각을 제공하는 소형 SLM을 연구 중 (시야각 25도)
	OASLM (Optically Addressed SLM) QinetiQ 빛을 전기신호로 변환해주는 광센서 배열을 사용하여 대용량 홀로그래프 데이터를 고속으로 처리할 수 있는 SLM을 연구 중 (시야각 5도)
	MOSLM (Magneto-Optical Light SLM) NHK 디스플레이 셀에서 자기장을 변화시켜 입사되는 파면의 위상을 제어함으로써 픽셀피치를 $1\mu\text{m}$ 이하로 줄이는 SLM을 연구 중 (시야각 30도)
	DND (Diffractive-Nano Device) IMEC MEMS(micro-electro mechanical systems)기술을 이용하여 픽셀피치 $1.5 \mu\text{m}$ 의 SLM 개발 (시야각 20도)

로그래를 관찰하기 위해서는 우리 눈과 홀로그램 영상을 있는 직선의 연장선상 어딘가에 디스플레이 장치가 있어야만 한다. 이는 빛의 회절 현상을 이용함에도 불구하고 홀로그래픽 디스플레이의 형태는 일반적인 TV와 같은 2D 디스플레이와 동일한 형태를 가져야 함을 의미한다. 이러한 조건을 만족하는 범위 안에서는, 영화에서 보는 것과 같은 홀로그램의 형태와 유사한 테이블탑 디스플레이는 구현할 수 있으며, 비슷한 개념의 체적형 디스플레이(Volumetric Display)로 불리는 디스플레이 기술이 많이 연구되었다.^[7,15]

테이블탑 홀로그래픽 디스플레이 기술 개발

기가코리아 사업에서 수행중인 홀로그래프 기술개발 과제에서는 ‘테이블탑’ 형태의 홀로그래픽 디스플레이와 ‘홀로그래픽 TV’를 목표로 하는 대화면 홀로그램 디스플레이용 SLM을 개발하는 것이 주요 목표이다.^[16] 테이블탑 홀로그래픽 디스플레이의 가능성은 미국의 Zebra Imaging 사에서 판매하고 있는 프라팅 디지털 홀로그램으로부터 이해할 수 있다.^[17] 즉, 여기서 사용된 필름과 동일한 회절 성능을 갖는 디지털 소자를 만들 수 있다면 테이블탑 디지털 홀로그래픽 디스플레이를 만드는 것이 가능하다는 것이다. 물론, 현재는 아직 이러한 소자가 없으므로, 사용가능한 소자의 한계를 극복하는 기술이 필요하며, 이 기술들이 본 과제의 주요 연구 내용이 된다. TI사의 DMD 소자를 SLM으로 사용하였으며, 22,000 Hz의 고속 동작 속도를 이용하여 테이블탑 디스플레이에서 요구되는 시공간 다중화 요구사항을 만족시키게 된다. 동영상 홀로그램을 관찰하기 위해서는 최소 30 fps의 속도로 홀로그램 영상을 재현해야 하며, 360도 방향에서 관찰할 수 있게 하기 위해서는 매우 많은 시점에 대한 홀로그램을 연속적으로 재현해야 한다. 예를 들어, 1도 간격으로 360개의 시점을 제공하기 위해서는 단색 홀로그램의 경우 초당 $30 \times 360 = 10,800$ 개의 홀로그램 영상을

테이블탑형 홀로그래픽 디스플레이 테스트베드

테스트베드 구축결과

홀로그램 재생 결과

(b)

(c)

Fig. 5. Table-top Digital holographic display: (a) configuration, (b) implementation, (c) hologram image.

재현할 수 있는 속도가 필요하며, DMD의 빠른 동작 속도는 이런 요구사항을 만족한다. 다만, 현재 사용할 수 있는 DMD 소자의 크기가 1인치 이하로 매우 작아서, 다수개의 DMD 소자의 공간 타일링과 4f 광학계를 이용한 영상 확대를 통해 약 4인치 크기의 홀로그램 영상을 얻게 된다. 사용된 SLM을 통해 얻을 수 있는 회절각은 약 0.5도로써, SLM으로부터 70 cm 거리의 관찰 위치에 형성되는 시야창은 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 정도로 매우 작다. 따라서 관찰자가 자유롭게 홀로그램을 볼 수 있게 하기 위해서 앞에서 설명한 동공추적 및 서브홀로그램 실시간 생성 기술이 함께 개발되고 있다. (그림 5 참조)

SLM은 크게 반도체 공정 기반 또는 디스플레이 공정 기반의 제작 방식으로 나눌 수 있다. 전자는 $4 \sim 8 \mu\text{m}$ 급의 미세 픽셀을 만들 수 있으나, 공정의 특성상 디바이스의 크기가 보

REFERENCES

- [15] Andrew Jones, *et al.*, "Rendering for an Interactive 360 Light Field Display," ACM SIGGRAPH conference proceedings, 2007.
- [16] Jinwoong Kim, *et al.*, "Technology Development of Table-top Digital Holographic Display in GIGA Korea Project", Proceedings of DHIP 2014, pp.26-27, Okinawa, Dec. 2014.
- [17] <http://www.zebraimaging.com/>.

통 수인치 이하로 매우 작고, 후자의 경우 수십 인치 이상의 큰 디스플레이를 만들 수 있으나 아직 픽셀 크기가 최소 40 μm 정도로써 홀로그래픽 디스플레이에 사용하기에는 너무 크다는 한계가 존재한다. 본 과제에서는 대형 홀로그래픽 디스플레이 개발에 목표를 두고, 후자의 기술을 기반으로 픽셀 크기 1 μm 이하의 대면적 SLM 구현에 대한 연구개발을 진행하고 있다.^[18]

기가비트 통신시대를 위한 준비 - 기가코리아 사업

마지막으로 홀로그래피 기술개발 과제가 소속된 기가코리아 사업^[19]을 간단히 소개한다. 디지털 기술이 성숙되는 과정에서 모바일 통신과 스마트폰으로 촉발된 정보통신 환경의 변화는 매우 빠른 속도로 진행되고 있으며, 다양한 모바일 기기와 나아가 모든 사물의 연결에 의한 새로운 IoT(Internet of Things) 패러다임의 도래를 앞두고 있다. 새로운 패러다임은 세상의 모든 사람, 사물 및 사건에 대한 정보가 네트워크를 통해 실시간으로 전송되고, 이에 기반하여 기존의 사회 활동 형태가 대부분 바뀌는 것을 의미한다. 예를 들면, 기존의 오프라인 매장에서 주로 이루어지던 금융, 거래 및 유통 등이 대부분 온라인으로 이동하는 것이 대표적이다. 이를 위해서는 폭발적으로 늘어나는 디지털 데이터 트래픽을 수용할 수 있는 네트워크 인프라가 필수적이며, 이런 데이터를 고속으로 처리 가공하는 빅데이터 기술, 초고속 플랫폼 기술 등이 필요하다. 또한, 네트워크가 발전함에 따라 사람들이 원하는 정보통신에 대한 요구 수준도 점점 높아지고 있으며, 초고품질 영상 통신을 넘어서 현실과 동일한 수준의 Tele-presence 서비스가 가까운 장래에 현실화될 전망이다. 이러한 ICT 환경의 변화를 배경으로 2020년 이후 도래할 스마트 사회에 대비하여, 언제 어디서나 각 개인의 기가비트급 통신이 가능하도록 CPND(Content-Platform-Network-Device, ICT 분야의 생태계 구성요소) 전 영역에 걸

친 핵심 기술 개발을 목적으로 출범한 것이 기가코리아 사업이다. 2013년에 시작하여 현재까지 밀티미터와 5G 이동통신 시스템 개발, 디지털 홀로그래픽 테이블탑형 단말 및 실시간 인터랙션을 제공하는 초다시점 단말 개발, Giga Media 기반 Tele-Experience 서비스 SW 플랫폼 개발, 그리고 기가급 대용량 양방향 실감콘텐츠 개발 과제가 진행되고 있다. 디지털 홀로그래피 기술 개발 과제는 아직 수없이 많은 난관이 기다리고 있는 도전적인 과제이지만, 기가급 네트워크를 통해 홀로그래픽 Tele-Presence 서비스를 만들어내는 꿈을 현실화시키기 위한 노력을 계속하고자 한다.

맺음말

빛은 생명의 근원이자 사람간 정보 전달의 핵심 매체이다. 빛이 제공하는 정보를 완벽하게 기록하고 전달하며, 원래와 동일하게 재현하고자 하는 것은 인간이 추구하는 꿈 중의 하나이며, 디지털 홀로그래피 기술의 발전은 언젠가 이 꿈을 현실화시켜 줄 것이다. 최근의 기술발전 속도는 그 가능성을 더욱 높이고 있으며, 앞으로 좀 더 많은 사람들이 관심을 가지고 이 도전적인 꿈의 실현에 동참하기를 기대한다.

감사의 글(Acknowledgement)

본 연구는 미래창조과학부 및 (재)기가코리아사업단의 '범부처 Giga KOREA 사업'의 일환으로 수행하였음. [GK15D0100, 디지털 홀로그래픽 테이블탑형 단말 기술 개발]

REFERENCES

- [18] Chi-Sun Hwang, *et al.*, "Technical Issues for high resolution and large area spatial light modulator," Proceedings of DHIP 2014, pp.38-41, Okinawa, Dec. 2014.
- [19] <http://gkf.kr/>.