

홀로그래픽 TV 방송 시스템 구현을 위한 기술적 고려 요소

김재한, 문경애, 추현곤, 최진수, 김진웅

한국전자통신연구원 방송통신미디어연구소 실감방송미디어연구부 디지털홀로그래피연구실

kimjhan@etri.re.kr

Technical Considerations for Design and Implementation of the Digital Holographic TV Broadcasting System

Jae-Han Kim, Kyung-Ae Moon, Hyun-Gon Choo, Jin-Soo Choi, Jin-woong Kim

ETRI, Realistic Broadcasting Research Sector

요약

디지털 홀로그래픽 TV 시스템을 구현하려면 홀로그래픽 정보 획득 장치가 필요한데, 해상도 한계 때문에 홀로그램의 프린지 패턴을 상용 촬상 소자로는 직접 기록할 수 없다. 이를 극복하는 방법으로는 컬러 영상과 거리영상 정보를 얻은 후에 압축을 거쳐 수신 디스플레이단에 전송하고 이 정보로부터 3차원 모델을 형성한 후에 컴퓨터 생성 홀로그램을 생성하고 이를 회절 소자를 이용하여 디스플레이하는 방법이 현재로서는 현실적인 방법이 될 것이다. 홀로그래픽 디스플레이에서는 회절소자인 공간광변조기 성능의 한계 때문에 기존 2DTV와 같은 수준의 디스플레이 구현은 매우 어렵다. 기존 공간광변조기는 픽셀피치가 커서 시야각이 매우 좁으나, 픽셀 크기를 작게 하는 동시에 공간광변조기 면적을 크게 하기에는 기술적인 어려움이 많다. 본 논문에서는 홀로그래픽 TV를 구현하는데 있어서 기술적으로 극복하고 고려해야 할 주요 요소에 대하여 분석한다.

1. 서론

더욱 선명하고 완벽한 영상에 대한 시청자의 요구와 기술적 진보에 따라, 디스플레이는 최근에 HD에서 UHD급으로 발전되고 있으며, 이와 동시에 실제와 같은 영상을 재현하기 위한 노력으로 3D 입체 영상의 구현을 위한 많은 연구가 대학과 연구소 및 산업계에서 진행되고 있다. 2DTV에서는 가림(occlusion)과 원근 소실(perspective) 및 그림자, 화면 내 물체의 상대 이동 등에 의하여 발생하는 입체감을 시청자는 경험적으로 느끼게 된다. 양안식 3DTV에서는 시청자가 양안시차(binocular disparity)와 양안의 주시각(convergence)에 의하여 입체감을 인지하게 된다. 양안식 3DTV는 최근 국내 대기업에서 개발되어 상용화 판매되고 있으나 기대보다 보급률이 높지 않다. 그 이유로는 3차원 입체 영상 콘텐츠의 양이 많지 않고 다양하지도 못하며, 아울러 2차원 패널 상에서 양안 시차를 이용한 방식으로 구현되었으므로, 물체가 스크린의 앞 또는 뒤에 위치하더라도 초점은 항상 스크린 상에 맞추어야 하므로, 주시각과 초점조절의 불일치라고 하는 근본적으로 해결이 불가능한 요소로 인하여 시각 피로감이 발생하며, 이러한 이유로 인하여 시청자의 구매가 활발하게 이루어지지 않는 것으로 보여 진다. 홀로그래피(holography)는 3차원 깊이감(depth)을 제공하며 영상 관찰 시에 양안의 주시각(vergence) 제어와 일치하여 수정체 초점(accommodation)조절이 가능하므로 시각적 모순(accommodation vergence mismatch)이 없게 된다. 이에 따라 홀로그래픽 디스플레이

방식은 시각 피로감(visual fatigue)이 없이 자연스러운 3차원 입체 영상을 보여주는 이상적인 디스플레이 방법인 것이다.

한편, 플로팅 홀로그램이라는 명칭으로 최근에 소개되는 유사 홀로그램은 아주 오래전인 19세기에 pepper's ghost라는 이름으로 연극에 사용되던 고전적 방법으로써, 2차원 영상을 45도 각도로 설치된 투명 반사막에 반사시켜 공간상에 영상을 보여줌에 따라 사람들에게 마치 홀로그램 같이 느끼게 하고 있으나, 이는 2D영상을 공간상에 프로젝션한 것으로 홀로그램이 아니고, 기술적으로도 홀로그램과 무관한 것이다. 홀로그래픽 디스플레이에 주로 사용되는 공간광변조기(Spatial Light Modulator)로는 LCD와 LCoS(Liquid crystal on Silicon)방식의 변조 소자들과 미세 반사 거울을 회절시키는 DMD(Digital Micro-mirror Device) 및 AOM(acousto-optic modulator) 소자 등이 있다.

홀로그래픽 디스플레이는 이러한 공간광변조기의 성능 한계 때문에 실제로 기존 2DTV와 같은 디스플레이의 구현이 매우 어렵다. 구체적으로는 공간광변조기의 픽셀피치(pixel pitch)가 커서 시야각(viewing angle)이 매우 좁다는 점과, 공간광변조기의 크기가 크지 않은 점이다. 그러므로, 큰 화면으로 시야각이 충분히 큰 디스플레이 시스템을 구현하려면 비용이 너무 많이 소요되는 문제점이 있다.

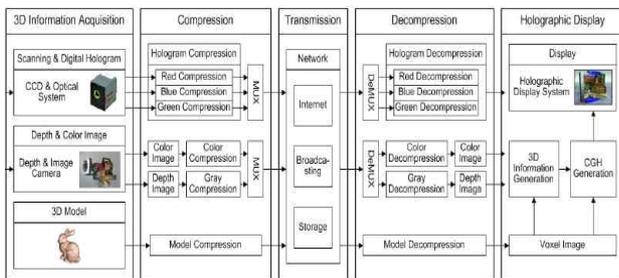
상용화 제품 중에서 활용이 가장 용이한 LCoS 방식의 공간광변조 소자의 픽셀 피치가 8 μ m정도이며 시야각이 2도를 넘지 못하는 수준이고, 최대 frame rate도 120Hz이하인 경우가 대부분이며 대당 가격도 수백만원 수준으로 고가이다.

2. 홀로그래픽 TV 방송 시스템 구조

홀로그래픽 TV를 구현하기 위한 홀로그래픽 정보의 획득과 압축, 전송 및 수신, 복원과 홀로그래픽 디스플레이까지의 전체 전송 채널의 구성에는 여러 가지가 방법이 있겠으나 참고문헌[1]에서는 이를 체계적으로 잘 정리하고 있다. 제시된 내용은 그림 1과 같으며 “디지털 홀로그램 비디오 시스템” 구성도 내의 모듈을 선택적으로 연결하는 방식으로 시스템을 구현할 수 있다.

홀로그램의 획득 방식으로는 3가지가 제시되고 있는데, 첫째는 홀로그램을 직접 획득하는 것과 둘째로는 2D의 컬러 영상과 depth 영상을 얻는 방법이고, 셋째로는 3차원 모델을 획득하는 것이다.

홀로그래픽 디스플레이에서 홀로그램을 재현하는 경우에는 상기 3가지 데이터로부터 각 방법을 활용하여 홀로그램을 생성 할 수 있다. 본 논문에서는 압축 복원과 전송 수신을 제외한 획득과 디스플레이에 대하여 기술적 고려 요소들을 분석한다.



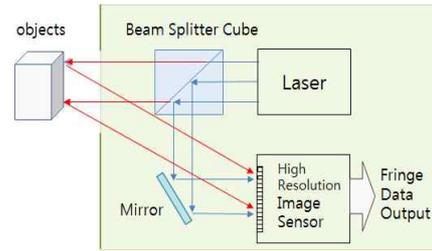
[그림 1] 디지털 홀로그램 비디오 시스템 구성도

2.1 홀로그래픽 정보 획득 시스템

홀로그래픽 정보 획득 시스템의 한 종류인 홀로그래픽 카메라는 그림2에서와 같이 레이저를 대상 물체에 조사한 후, 반사되는 반사파와 레이저 기준파 간의 간섭파인 프린지(fringe) 간섭패턴을 기록 할 수 있어야 한다. 기록 소자의 공간대역폭(SBP; space-bandwidth product)은 소자의 전체 폭[meter]과 최대 공간 주파수[cycle/m]의 곱으로 정의할 수 있는데 공간대역폭을 크게 하려면 기록 소자의 폭인 CCD의 면적을 크게 하는 동시에 단위 센서의 크기는 작게 하여 샘플링 간격이 좁도록 하여 대역폭을 늘여야 한다. 광파의 대역폭이 샘플링 간격의 역수인 최대 공간 주파수보다 크다면, 광파의 스펙트럼이 겹치는 현상인 앨리어싱(aliasing)이 일어난다.

간섭과 프린지 패턴의 전형적인 최소 간격(fringe spacing)을 300nm 정도로 하고 카메라의 요구 해상도를 계산해 보면 다음과 같다. 홀로그램은 mm² 당 약 10⁷개의 프린지 간격을 갖게 되므로 홀로그램의 크기를 30 x 30[cm]의 크기로 정하여 프린지 기록용 카메라의 규격을 산정해 보면, 총 10¹²개의 프린지 변화를 기록해야 프린지 형태로 생성된 홀로그램 전체정보를 획득하게 된다. 카메라의 CCD가 프린지 당 4개의 픽셀로 기록한다고 가정하면, 4X10¹²개의 픽셀이 필요하므로 결국 4 Tera-pixels의 초고해상도 영상 센서를 갖는 카메라가 요구된다. 최신 상용 카메라는 약 8 Mega pixel 수준이므로 이러한 카메라에 대하여 5백배 이상의 고 해상도를 갖는 카메라가 요구된다. 프린지를 binary로 기록한다고 가정하고 압축 없이 30 fps의 동영상을 획득 전송을 위해서는 총 120 Tbps의 데이터 획득 및 전송속도가 요구된다. 이 데이터들은 프린지 패턴의 특성상 시간 및 공간적 잉여정보

(temporal-spatial redundancy)가 많지 않아서 압축이 쉽지 않으므로, 현재의 방송 전송 채널을 이용해서 전송하는 것은 불가능하다.



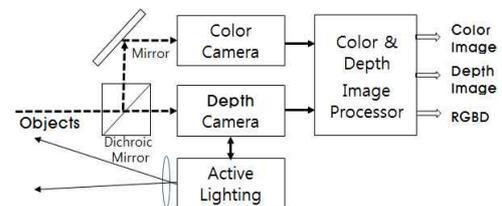
[그림 2] 홀로그램 프린지 직접 기록 카메라 개념도

프린지 패턴을 촬상 소자로 획득하지 않고, 달리 얻을 수 있는 방법으로는 coherent 광원을 이용하는 optical scanning holography(OSH) 방식과 자연광을 이용하는 incoherent한 방식이 있다.

coherent 광원을 이용하는 OSH 방법은 time-dependent한 2개의 Fresnel zone plate 간섭패턴을 물체에 조사한 후에 2D로 스캐닝을 하여 이를 기록하는 방식이다[2].

현재까지 구현된 시스템은 실시간 획득이 가능하지 않으므로 작은 크기의 물체에 대해서 실험적으로 프린지 패턴을 얻고 있으며 컬러 구현도 못하고 있는 수준이다. 또 다른 방법인 self-interference incoherent digital holography(SIDH) 방식에서는 풀 컬러로 자연광에서의 획득이 가능한 카메라 구조이지만, 아직까지는 잡음이 많으며 활용 가능한 수준의 시스템을 구현하지 못하고 있다.[3]

현재의 영상처리 및 카메라 H/W 기술 수준으로는, 컬러 영상과 depth 정보를 얻고 영상 압축을 거친 후에 전송을 하며 이 데이터로부터 홀로그램을 생성하는 방법이 가장 바람직하다. 즉, 그림 3과 같이 컬러 영상과 함께, 펄스 레이저 등의 조명을 이용하여 depth 영상을 얻고, 이를 HEVC(High Efficiency Video Coding)와 같은 동영상 압축 방식을 적용하여 데이터 량을 대폭 줄인 후에 전송하고 수신 단에서 복원하고 이를 이용하여 CGH로 홀로그램 영상을 재현 하는 방법이 현실적인 방법이 된다. 멀티뷰 카메라는 부피가 큰 단점과 함께, depth를 얻기 위한 양안 영상의 정합이 필요하므로 최적의 시스템은 될 수 없다. 이에 따라, 그림3과 같은 컬러 영상과 depth영상을 동일 광축에서 획득할 수 있는 단일 카메라 형태의 영상 획득 시스템이 바람직하며, 이러한 방식을 사용함으로써 후 처리 부담이 적으며 홀로그램 재현 시 오류가 적어 품질 높은 홀로그램을 재현할 수 있게 될 것이다.



[그림 3] 컬러 및 depth 영상의 동시 획득용 동축 카메라 구조도

이 경우의 데이터 량을 계산해 볼 때, RGB+depth 영상의 HD 해상도를 각각 8bit로 처리하고 30 fps의 동영상을 획득하는 경우에는, [표 1]에 정리된 바와 같이, 약 255 x 10⁹ bps 이므로 약 255 Gbps로 데이터가 획득되는 것이다. 이 경우, 기존의 100:1 이상의 고압축 알고리즘을 사용하면, 현재 개발 중인 5G 채널로 홀로그램 재현용 데이터의 전송

이 가능할 것이다.

	간접패턴 직접기록	컬러/거리 영상획득
획득용 영상 센서 해상도	4 Tera-pixels	2 Mega-pixels
요구 전송 속도 (비압축)	120 Tbps	255 Gbps

[표 1] 영상 센서 해상도와 요구 전송 속도의 비교

2.2 디지털 홀로그래픽 디스플레이

큰 물체를 디스플레이 하려면 화면의 크기는 커야 하며, 회절각이 큰 홀로그래픽 디스플레이를 구현하려면 픽셀의 크기는 작아야 하며, 화면 크기는 크게 하고, 최대한 픽셀의 크기는 작도록 (즉, 픽셀의 수는 많도록) 디스플레이용 회절 소자를 구현하여야 한다.

2차원 TV와 같이 큰 화면과 10도 이상의 시야각의 홀로그래픽 디스플레이를 구현하려면, 매우 큰 공간대역폭을 갖는 회절 디스플레이 소자가 요구된다. 이를 평가하는 지표로 공간 대역폭이 사용되며, 기록 소자에서와 같이 공간 주파수와 대역폭의 곱으로 정의할 수 있다.

예를 들어, 532nm의 파장으로 10도의 회절각을 갖는 가로 및 세로의 길이가 각각 30cm와 30cm인 홀로그래픽 디스플레이를 구현하려면, 픽셀 피치가 약 3 μ m이고 10Giga개의 픽셀로 구성되는 디스플레이가 필요하다. 현재 상용화된 8 Mega 픽셀의 4K UHD 디스플레이와 비교하면 약 1,250배의 픽셀 수가 요구되는 것이다. 이 경우에 10 Giga pixel의 SBP는 약 4x10⁴ 가 된다. 위와 거의 동일한 면적이고, 가로 및 세로의 길이가 각각 41cm와 22cm인 4K UHD TV 경우에 SBP를 계산해 보면 약 4x10³ 정도의 값이 됨을 알 수 있다.

디지털 홀로그래픽 디스플레이를 위해서는 현재 가장 많이 사용되는 회절 디스플레이 소자인 LCD의 경우에 모바일 단말의 디스플레이가 가장 작은 크기의 픽셀로 이루어져 있는데 픽셀 피치가 약 50 μ m정도이며, 상용 LCoS의 경우는 약 8 μ m 정도의 픽셀 피치를 갖는다. 이외에 고속 동작이 가능한 반사형 미러 소자인 DMD 소자는 10 μ m 전후의 픽셀 피치를 갖는다. 그러나 이러한 DMD 소자의 크기는 1인치 정도이므로, 공간대역폭은 10³ 정도의 값을 갖는다. 현재 활용되고 있는 공간광변조기의 종류와 규격 및 연구 개발 현황은 표2와 같으며, 대체적으로 SLM은 크기가 작고 픽셀 피치는 요구 수준에 미치지 못한다.

구분	개발 기관 및 연구 내용	
기존 상용 SLM 소자	DMD (Digital Micro-mirror Device)	TI 픽셀피치가 7.5 μ m 이고 화면크기가 1.38인치 micro-mirror 칩 개발함(시야각 2도)
	LCoS (Liquid Crystal on Silicon)	Sony 픽셀피치가 4 μ m 이고 화면크기가 0.7인치 패널을 개발함(시야각 8도)
	LCD (Liquid Crystal on Silicon)	LG Display 픽셀피치가 47 μ m 이고 화면크기가 5인치 패널을 개발함(시야각 0.5도)
최근 SLM 기술 연구	AOM (Acousto-Optic Modulator)	MIT 표면 탄성파 소자에 광도파관을 사용하여 빛을 회절시켜 광시야각을 제공하는 소형 저가 SLM을 연구 중(시야각 25도)
	OASLM (Optically Addressed SLM)	QinetiQ 빛을 전기신호로 변환해주는 광센서 배열을 사용하여 대용량 홀로그램 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 μ m이하로 줄이는 SLM을 연구 중(시야각 30도)
	DND (Diffractive-Nano Device)	IMEC MEMS(micro-electro mechanical systems)기술 기반 픽셀피치 1 μ m의 SLM 개발(시야각 30도)

[표 2] 공간광변조기 종류와 규격 및 연구 현황

기존의 SLM은 홀로그래피용이 아닌 2차원 영상의 프로젝션으로 개발된 소자들이 대부분이다. 따라서 이를 홀로그래픽 디스플레이로 활용하는 데에는 한계가 있으며, 그간의 많은 연구는 이러한 소자의 한계를 극복하려는 시도로 볼 수 있다. 최근 선진국에서는 홀로그램을 응용을 위한 서브 μ m 픽셀의 소자 구현 연구에 노력하고 있다. 기존의 소자로

홀로그램을 크게 디스플레이 하려는 경우에는 SLM을 이어 붙이는 형태의 tiling 방법이 있으며, 시야각을 넓히는 방법으로는 DMD와 같이 고속 동작이 가능한 경우에 scanning 방법으로 이를 구현 할 수 있다. 지금까지 구현된 홀로그래픽 디스플레이를 살펴보면, MIT는 1989년에 세계 최초로 AOM방식을 적용한 Mark I 시스템에서 32,768x192 픽셀로 25x25x25[mm] 크기의 시야각 15도의 홀로그램을 재현 하였고 Mark II 시스템에서는 18채널의 262,144 x 8 픽셀의 영상으로 150x75x150[mm] 크기와 시야각 30도를 갖는 홀로그램을 구현하였다. 2011년에 MIT는 거리 추출 camera인 MS사의 Kinect를 사용해 depth 정보를 얻어 2D영상과 depth 영상을 전송한 후, 15 fps정도의 속도로 홀로그램을 재생하는 데모를 하였다. 아리조나 대학에서는 멀티뷰 카메라로부터 획득된 영상에서 3차원 영상을 생성하고 일본의 Nitto Denko Tech.에서 개발한 재기록이 가능한 photo-refractive polymer 에 펄스레이저를 조사하여 50x50[mm] 크기로 2초마다 갱신되는 동영상 홀로그램을 재현하였다. 독일의 SeeReal사에서는 해상도가 2,560 x 6,144 개이며 픽셀피치는 52 x 156[μ m]크기인 LCD 패널을 이용하고, 시청자의 동공을 추적하여 광원을 패널 뒤에서 steering하는 방식으로, 시분할 되는 2개의 시야창 영상을 시청자의 양안 동공에 위치하도록 하여, 2007년에 20인치 크기의 서브홀로그램 디스플레이 VISION20 시스템을 개발하였다.

이와 같이, 디지털 홀로그래픽 디스플레이를 기존 2D 텔레비전과 비슷한 크기와 시야각으로 보여주기 위해서는 결국 화소의 크기를 수 μ m 이하로 현저히 작게 구현해야 하며, 동시에 화면을 크게 제작해야 하는 기술적 난제가 존재한다.

3. 결론

본 논문에서는 홀로그래픽 TV를 구축하는데 고려해야 하는 기술적인 주요 요소를 도출하고 분석하였다. 획득에서는 기록용 활상 소자의 해상도 한계 때문에 홀로그램의 프린지(fringe) 패턴을 직접 촬영하여 얻을 수 없으므로, 컬러 영상과 depth영상을 광학적 동축에서 동시에 얻어 전송하는 현실적인 방안을 테이터량의 분석을 통해 제시하였다. 홀로그래픽 디스플레이에서 화면을 크게 하고 넓은 시야각의 디스플레이를 구현하기 위해서는, 결국 작은 픽셀 피치를 가지며 많은 화소로 구성되는 넓은 면적의 공간광변조 소자를 개발해야하는 과제가 있다.

[감사의 글]

본 연구는 『Giga KOREA 디지털 홀로그래픽 테이블탑형 단말 기술 개발 사업』 [과제번호: GK-15D0100]의 정부 출연금으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

[참고문헌]

- [1] 서영호, 김동윤, 배윤진, 최현준, 유지상, 김동욱, “디지털 홀로그래픽 정보의 스케일러블 전송을 위한 부호화 기법,” Telecom. review, 제21권 4호, pp.656-672, 2011년 8월
- [2] 김유석, 김태근, “탈축 수평시차 홀로그램 변환과 스펙클 잡음없는 디지털 홀로그램,” 한국광학회지, 25권 제2호, pp.85-89, April. 2014
- [3] Myung K. Kim, “Full color natural holographic camera,” Optics Express, vol.21, no.8, April 2013