

홀로그래프 3차원 영상 시스템의 전망

1. 서론

시간과 공간을 초월하고자 하는 인간의 열망, 가상의 공간과 시간을 추구하는 인간의 꿈, 그리고 미래에 대한 기대는 3차원 영상에 시스템에 대한 갈망을 키워왔고 홀로그래프는 그를 실현시켜 줄 기술로 끊임없이 거론되었다. 주어진 공간에서 시간에 따라 표류하는 인간의 탈주에 대한 염원을 이뤄 줄 기술로 홀로그래프를 뽑아왔던 것이다. 무엇이 홀로그래프를 인류의 초월과 탈주의 꿈을 이뤄 줄 기술로 인식되게 했는가? 그것은 공간상에 빛의 파면의 완전히 복원할 수 있는 기술적 가능성을 원리적 차원에서 제시했기 때문일 것이다. 본 고에서는 홀로그래프의 기본 원리에 대해 논하고 IT 시대 디지털 왕국의 일원이 된 홀로그래프 즉 디지털 홀로그래프와 디지털 홀로그래프 기반 3차원 영상 시스템의 현재를 리뷰하고 전망하고자 한다.

은 이유로 세기에 대한 공간적 분포뿐 아니라 위상에 대한 공간적 분포도 변조하여 표현해 주어야만 빛의 파면을 공간상에 완전히 재현할 수 있다. 그런데 공간상의 빛의 세기뿐 아니라 위상을 변조해 재현해 주는 것 역시 그리 녹녹하지 않다. 이에 따라 위상 정보를 세기 정보로 변환해 추출하고 이를 공간상에 3차원 영상을 재현하고자 하는 것이 광학 홀로그래피이다. 그럼, 어떻게 위상 정보를 세기정보로 변환할 것인가? 이것에 대한 대답은 파동의 또 다른 전형적인 특징인 간섭에 있다. 빛은 전자기파의 일종으로 맥스웰 방정식을 따른다. 특히 균질 등방 매질인 자유공간에서 맥스웰 방정식은 선형적임으로 빛은 자유공간에서 중첩된다. 따라서 두 빛(제1빛과 제2 빛이라 하자)을 서로 중첩시키면 빛은 선형적으로 더해져 결합된다. 간섭은 선형적으로 더해진 빛의 세기 검출 과정에서 이루어진다. 두 빛은 선형적으로 더해져 결합

특집 ■ 3D Display

홀로그래프 3차원 영상 시스템의 전망

김태근*

2. 홀로그래프의 원리

물체로부터 반사된 빛은 파동의 전형적인 특징인 회절을 통해 공간을 진행하며 회절 패턴의 위상에는 물체의 깊이 정보가 인코딩되어 있다. 따라서 빛의 회절 패턴을 온전히 검출하고 이를 공간상에 재현한다면, 물체의 3차원 영상을 완전히 레코딩하고 공간상에 재현하는 3차원 영상 시스템을 구현 할 수 있다. 그런데 안타깝게도 필름, CCD 등 광 검출기는 세기에 반응하는 즉 제곱법칙에 따르는 검출기로 세기만을 레코딩할 수뿐이 없어 위상에 담겨있는 물체의 깊이 정보를 레코딩 할 수 없다. 같

됐지만 검출된 결합 빛의 세기는 각각의 빛의 세기 부분과 두 빛의 곱 부분으로 구성된다. 이때 두 빛의 곱 부분은 제1빛과 제2빛의 켈레 복소수와의 곱의 실수 부분으로 크기는 결합 빛의 위상에 따라 결정된다. 이때, 두 빛의 위상이 서로 물려있다면 즉 두 빛이 가 간섭성이 있다면 위상에 따라 결정된 곱 부분의 크기는 시간에 따라 평균되어 사라지지 않고 살아남아 검출된다. 이것이 간섭이며 이런 과정으로 빛의 위상을 세기로 변환하여 검출할 수 있다. 따라서 그림 1a와 같이 물체로부터 반사된 빛의 회절 패턴인 제1빛을 가 간섭성이 있는 제2빛으로 중첩시켜 제곱 검출기인 필름으로 검출하면 간섭의 과정

* 세종대학교 광전자공학과

으로 회절 패턴의 위상을 검출할 수 있고 이렇게 검출된 패턴을 광학 홀로그래피라 한다. 이때 물체로부터 반사 혹은 투과된 제1빛을 물체광, 그리고 중첩광인 제2빛의 기준광이라 한다. 홀로그래피를 복원해 공간상에 빛의 파면을 다시 재생하는 과정은 다음과 같다. 그림 1b와 같이 홀로그래피에 레코딩 기준광을 다시 입사시키면 기준광의 분포는 홀로그래피의 패턴에 의해 변조된다. 이때, 홀로그래피는 물체광과 기준광의 켈레복소수의 곱의 실수 부분임으로 홀로그래피에 의해서 변조된 빛의 분포는 물체광과 기준광의 켈레복소수의 곱과 그의 켈레 복소수와의 합의 패턴이 된다. 이때 기준광이 평행파 또는 구면파와 같이 위상 유일 패턴이라면 레코딩 과정에서의 기준광의 위상과 복원과정에서의 기준광의 위상이 서로 복소수 곱의 방법으로 상쇄됨으로 홀로그래피 면에서는 물체광의 회절 패턴과 동일한 빛의 파면과 물체광의 회절 패턴의 켈레 복소수의 빛의 파면을 형성하게 된다. 레코딩 과정에서 그림 1a처럼 기준광의 광축과 물체광의 광축에 사이각을 두고 레코딩 한 경우, 복원된 물체광의 회절 패턴의 광축과 복원된 물체광의 켈레 복소수의 광축이 그림 1b처럼 탈축되는 방식으로 공간적으로 분리된다. 물체광과 물체광의 켈레복소수가 공간적으로 분리됨으로 복원된 물체광의 회절 패턴과 동일한 빛의 파면만 관찰자의 눈에 입사되어 물체의 상을 망막에 형성하게 된다. 이 구조의 홀로그래피 레코딩 및 복원 방법을 기준광과 물체광의 광축이 서로 탈축되어 있다 하여 탈축 홀로그래피라 한다. 한편 레코딩 과정에서 물체광과 기준광의 광축이 서로 탈축되어 있지 않으면 복원 시 물체광의 빛의 파면과 물체

광의 켈레 복소수의 빛의 파면이 공간적으로 분리되지 않아 두 물체광이 동시에 관찰자의 눈에 입사되어 물체광의 켈레 복소수의 빛의 파면은 노이즈로 작용한다. 이를 쌍영상 잡음이라 한다. 홀로그래피는 전술한 레코딩 및 복원 과정을 통해 물체광의 파면을 실제로 공간에 재현하는 방법으로 관찰자로 하여금 물체의 3차원 영상을 향유하게 한다. 반면, 기존의 2차원 영상 광학계는 그림 2와 같이 렌즈를 이용해 물체로부터 회절된 빛을 굴절의 방법으로 다시 모아 모인 빛의 광 경로가 동일한 지점 즉 모인 빛의 위상이 서로 상쇄되어 사라지는 위치인 영상면에 빛의 세기 패턴인 상을 형성한다. 따라서 기존의 2차원 광학계는 세기 검출로 물체의 상을 얻지만 광의 경로가 동일한 특정한 깊이 위치에서의 2차원 영상만을 얻

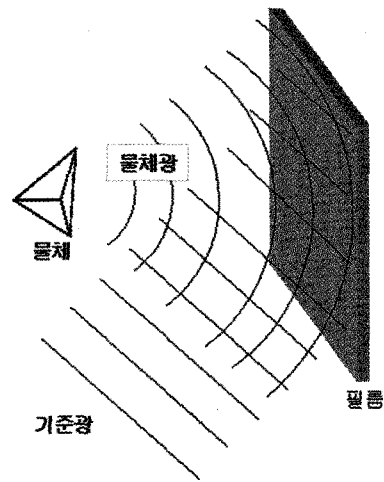


그림 1. (a) 홀로그래피 레코딩 단계

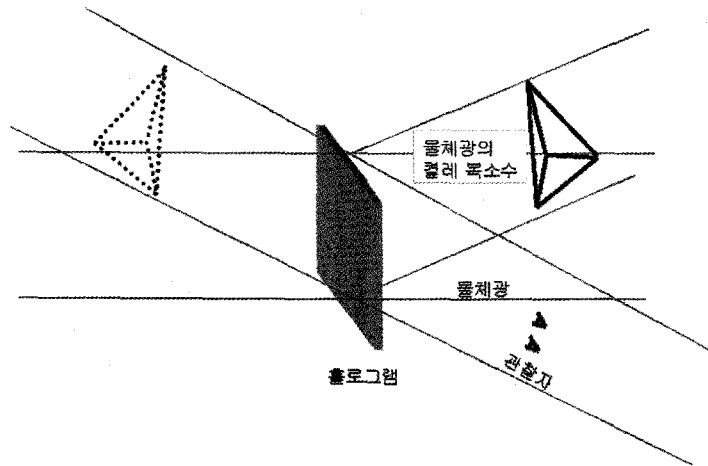


그림 1. (b) 홀로그래피 복원 단계

홀로그래프 3차원 영상 시스템의 전망

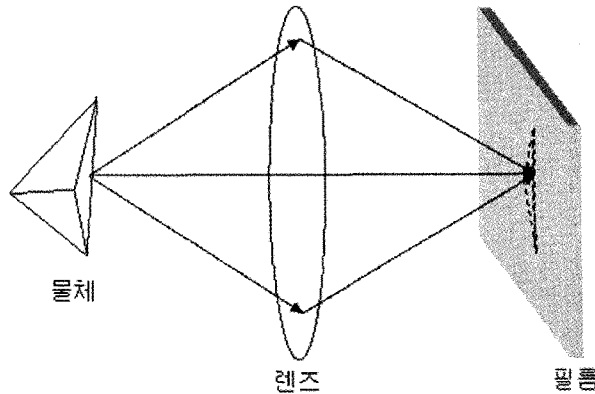


그림 2. 2차원 영상 광학계

을 수 있다. 회절하는 빛을 모아 위상이 서로 상쇄되는 지점에서 상을 형성하고 이를 검출하는 기존의 2차원 영상 광학계와 회절 된 빛을 모으지 않고 회절 패턴을 그대로 검출하는 홀로그래프 3차원 영상 광학계의 본질적인 차이는 디지털 홀로그래프 기법을 이용한 3차원 광학계를 실제의 구현에 있어 2절에서 후술할 다양한 기술적 장점을 제공한다.

3. 디지털 홀로그래프

광학적인 방법으로 물체의 홀로그램을 레코딩하고 이를 복원해 재현하기 위해서는 기준광과 물체광 사이에 간섭성이 있어야 함으로 간섭성이 높은 광원인 레이저가 필요하고, 빛의 위상을 세기로 변환한 간섭패턴은 파장 단위로 세밀함으로 필름에 노광하는 동안 기준광과 물체광 전 경로에 대해서 진동에 매우 민감해 진동 차단이 필요하다. 이와 같은 이유로 광학 홀로그램은 진동 차단 장치가 있는 광 테이블 위에서 레이저를 이용해 촬영하고 재현할 수 분이 없었다. 광학 홀로그램은 진동 차단 환경에서 레이저를 이용해 완벽에 가까운 3차원 영상을 시연하여 완전한 3차원 영상 시스템의 가능성을 제시했으나 진동차단 및 높은 간섭성의 광원에 대한 요구에 따른 한계 역시 명확하였다. 한편 90년대 초 M.I.T.의 미디어 랩의 공간 영상 그룹 (Spatial Imaging Group)에서는 홀로그램을 디지털 왕국으로 끌어들이 광학 홀로그램의 이러한 단점을 극복한 동영상 3차원 디스플레이를 시연하기에 이른다.[1,2] M.I.T.의 연구진들은 가상 물체의 3차

원 공간 분포인 CAD 데이터를 이용해 가상 물체의 회절 패턴을 컴퓨터를 이용해 합성하고 음향-광 변조기를 이용해 합성된 회절 패턴에 따라 빛의 공간적 분포를 변조하여 복원하는 방식으로 디지털 홀로그램을 이용한 3차원 동영상 디스플레이를 시연을 하였다. 컴퓨터를 이용해 회절 패턴을 합성하는 원리나 방법론 그리고 간단한 시연은 전에도 이뤄졌으나 시야각 15도로 수평 크기 5cm×3cm, 깊이 3cm로 인간이 향유하기에 그럴듯한 홀로그램을 이용한 3차원 동영상 디스플레이가 가능함을 보인 최초의 시연이었다.[1,2] 이것은 홀로그램을 본격적으로 그럴듯하게 디지털 왕국으로 끌어들이 시발점이 되었다. 이후 홀로그램은 디지털 연산 및 표현 기술과의 공격적인 결합으로 기존 광학 홀로그램의 한계를 극복하며 전광석화로 발전하는 디지털 왕국의 일원이 된다. 그런데 디지털 왕국에서는 기존 광학 홀로그램에서는 큰 문제가 아니었던 새로운 이슈가 불거진다. 바로 데이터 량이다. 전술한 것처럼 홀로그램은 빛의 간섭 패턴으로 공간적 변화가 파장단위이다. 따라서 파장 단위의 공간적 변화인 홀로그램을 표현하기 위해서는 방대한 데이터 량이 필요하다. 또한, 그림 1a에서처럼 물체의 한 지점에서 회절 된 빛은 홀로그램 평면 전 영역으로 회절됨으로 물체의 한 지점에서의 회절 패턴을 합성하기 위해서는 원칙적으로 전 영역에 대한 인코딩 연산이 필요해 방대한 데이터 량에 대한 방대한 연산이 요구된다. 회절 패턴을 필름에 노광해 촬영하고 재생하던 광학 홀로그램에서는 문제가 되지 않았던 것이다. 방대한 데이터의 표현과 연산은 디지털 데이터로 회절 패턴을 합성하고 표현해야 하기 때문에 발생한 문제들이다. 즉 디지털

왕국의 일원이 되면서 발생한 문제들이다. 홀로그래프의 방대한 회절 패턴에 대한 연산을 컴퓨터한테 시켜 어찌 어찌 받을 새워 계산한다 하여도 또 다른 문제가 발생한다. 이 방대한 데이터 량의 회절 패턴을 표현할 방대한 픽셀 수를 갖는 공간 광 변조기가 없다는 것이다. 따라서 M.I.T.의 연구진들은 회절 패턴의 합성을 효율적으로 하는 알고리즘의 개발, 인간 깊이인지의 낮은 수직 시차 의존성에 따라 수직 시차 제거를 통한 데이터 량 감소, 짧은 픽셀 피치에 대응하는 높은 공간 분해능과 빠른 재조직 시간을 갖는 음향-광 변조기에 기반한 공간 광 변조기의 개발 등을 통해 홀로그래프를 이용한 3차원 동영상을 시연하였다. 디지털 왕국의 일원이 되기위한 홀로그래프는 그후 어떻게 됐을까? 홀로그래프의 디지털 기술과의 융합 전략은 극적인 성공을 거듭한다. 지난 20여 년간 디지털 연산속도의 증가는 가속화됐고, 공간 광 변조기의 픽셀 수는 늘어 났으며, 다양한 신호처리 방법으로 회절 패턴 합성 시간은 단축됐다. 뿐만 아니라 물체 추적 방법, 초고속 스캐닝 방법 등 융합 가능한 다양한 디지털 기술들 또한 그들의 발전 트랙에 따라 개발되었다. 이러한 디지털 왕국의 발전에 발 맞춰 개발한 광학 시스템의 개발이 이뤄졌다. 초고속의 재조직 시간을 갖고 있으나 바이너리 변조만 가능한 공간 광 변조기와 광 지정 공간 광 변조기(optically addressed spatial light modulator)의 결합을 통해 높은 픽셀수를 구현하는 방법[3], 초고속 공간 광 변조기와 수평 방향의 스캐너를 결합해 수평 방향 시야각을 확대하는 방법[4], 관찰자의 관찰 위치를 추적해 관찰자의 관찰위치에만 영상을 복원하는 방식으로 데이터 량을 줄이는 방법[5] 등이 개발 되었다. 홀로그래프의 어떠한 기술적 장점이 앞에서 열거한 다양하고 기발한 광학 시스템의 개발을 가능케 했는가? 홀로그래프는 전술한 것처럼 렌즈에 의해 상을 영상면에 맺게 하고 상의 세기를 레코딩하는 것이 아니라 물체의 회절 패턴을 레코딩하는 것이다 이에 따라, 물체의 한 지점에서 방사된 빛은 홀로그래프 전 영역에 분산되어 인코딩되고 복원시에는 홀로그래프 전 영역에서 변조된 빛이 회절되어 진행해 공간상에 대응하는 깊이 위치에서 초점 맺는 방법으로 빛의 분포를 형성해 복원된다. 따라서 홀로그래프의 몇몇 픽셀에 결함이 있다 하여도 복원된 영상의 질에 큰 영향을

미치지 않는다. 이는 복원된 영상의 정보가 홀로그래프 전 영역에 분산되어 있기 때문이다. 또한, 홀로그래프 광학계에서는 여러 장의 공간 광 변조기를 타일링하여 대면적을 갖는 공간 광 변조기를 형성하는 경우에도 타일링에 따라 형성되는 경계선을 회절의 방법으로 효율적으로 감출 수 있어 타일링이 용이하다. 이는 렌즈를 통해 상을 맺는 기존의 2차원 영상 시스템에서는 해결하기 어려운 난제였다. 또한, 디지털 홀로그래프에서는 위상을 레코딩하고 변조함으로 광학계의 수차, 왜곡 등을 위상을 수치적으로 변조하는 방법으로 용이하게 보정할 수 있다. 이러한 홀로그래프 광학계의 본래적 장점으로 다양하고 기발한 홀로그래프 광학 시스템이 개발 되었으며 새로운 광학계의 개발에 대한 잠재적 가능성 또한 무궁무진 할 것으로 기대한다.

4. 디지털 홀로그래프 3차원 영상 시스템의 전망

지금까지의 홀로그래프 3차원 영상 시스템은 디스플레이 장치 및 방법의 연구에 집중 되어 왔다. 하지만 실제로 완결된 루프의 3차원 영상 시스템의 구현을 위해서는 2차원 영상 시스템의 카메라에 해당하는 실제 물체의 3차원 영상 정보를 추출하는 3차원 영상 정보 추출 장치 및 방법에 대한 연구 역시 활발하게 이뤄져야 할 것이다. 홀로그래프 3차원 영상 시스템은 기존의 2차원 영상 시스템과는 원리적으로 다른 차원, 즉 회절의 방법으로 3차원 영상을 복원한다. 따라서 새로운 광학 시스템의 출현을 기대할 수 있으며 이에 대한 연구가 활발히 이뤄져야 할 것으로 생각한다. 새로운 광학시스템의 개발과 발맞춰 홀로그래프 영상 시스템을 위한 디바이스 개발이 병행되어야 할 것이다. 지금의 공간 광 변조 기술은 2차원 영상 시스템을 위해서 집중적으로 개발돼왔다. 이제는 홀로그래프를 복원을 위한 공간 광 변조기가 집중적으로 개발 될 것으로 기대한다. 향후 디바이스 기술과 기발한 홀로그래프 광학계의 개발이 서로 융합될 것이며 이에 따라 홀로그래프 3차원 영상 시스템의 개발은 가속화돼 빠른 시간 내에 구현될 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Pierre St. Hilaire, Stephen A. Benton, Mark Lucente, "Synthetic aperture holography: a novel approach to three-dimensional displays," Jour. Opt. Soc. Am. A, Vo. 9, No. 11, pp.1969-1977, (1992)
2. Pierre St. Hilaire, "Scalable optical architecture for electronic holography," Opt. Eng., Vol. 34, No. 10, pp. 2900~2911 (1995)
3. Maurice Stanley*a, Mark AG Smith a, Allan P Smith a, Philip J Watson a, Stuart D Coomber a, Colin D Cameron a, Chris W Slinger a, Andrew D Wood, "3D electronic holography display system using a 100 Mega-pixel spatial light modulator," Proceedings of SPIE Vol. 5249, pp.297~308 (2004).
4. Yasuhiro Takaki* and Naoya Okada, "Reduction of image blurring of horizontally scanning holographic display," Opt. Exp. Vol. 18, No. 11, pp. 11327~11334, (2010)
5. SeeReal, "Holographic 3D display solution," http://www.seereal.com/en/holography/holography_technology.php

약 력



김태근

2007년 3월 - 현재
 세종대학교 광전자공학과 부교수
 2003년 3월 - 2007년 2월
 세종대학교 광전자공학과 조교수
 2001년 3월 - 2003년 2월
 세종대학교 광전자공학과 전임강사
 2000년 8월 - 2000년 12월
 삼성종합기술원 전문연구원
 1998년 1월 - 2000년 7월
 Virginia Tech., Electrical and Computer Eng., 공학박사
 1996년 8월 - 1997년 12월
 Virginia Tech., Electrical and Computer Eng., 공학석사
 1991년 3월 - 1996년 2월
 경북대학교 전자공학과, 공학사