

디지털 홀로그래픽 기록 기술 동향

Trends of Digital Holographic Printing Technologies

이봉호 (B.H. Lee)	실감방송시스템연구팀 선임연구원
김재한 (J.H. Kim)	실감방송시스템연구팀 책임연구원
이광순 (G.S. Lee)	실감방송시스템연구팀 책임연구원
김태원 (T. Kim)	방송시스템연구부 선임연구원
정원식 (W.S. Cheong)	실감방송시스템연구팀 팀장
허남호 (N.H. Hur)	방송시스템연구부 부장

* 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행됨(10039169, 디지털 홀로그래픽 3D디스플레이 및 기록시스템 원천기술 개발).

디지털 홀로그래픽 프린팅(Digital Holographic Printing: DHP)은 종래의 아날로그 방식이 아닌 디지털 기록 방식으로 이미지 또는 간섭무늬를 홀로그래픽 매질에 기록하여 정지 화상에 대한 홀로그램 상을 재생하는 홀로그래픽 기술이다. 현재 개발 중인 스테레오그램(stereogram) 기반 DHP는 수직/수평 방향의 시차(parallax)를 갖는 초다시점 영상을 매질에 촘촘히 기록하여 마치 아날로그 홀로그램과 같이 자연스럽게 3차원 상을 재현하는 기술이다. 하지만 이러한 기술은 과도기적인 성격의 기술로 향후에는 위상 정보를 포함하고 있는 홀로그램인 프링지 패턴(fringe pattern)을 직접 기록함으로써 보다 더 자연스러운 형태의 홀로그램 상을 재생할 수 있는 기술이 추가적으로 개발될 것으로 예상된다. 그러므로 본 고에서는 Zebra Imaging사에서 개발한 스테레오그램 기반의 DHP 기술과 Nihon 대학이 시도한 프링지 기반의 DHP 기술 동향을 다루고자 한다.

스마트 미디어 시대의
방송통신 융합기술 특집

- I. 디지털 홀로그래픽 기록 기술 개요
- II. DHP 기술 동향
- III. 결론

1. 디지털 홀로그래픽 기록 기술 개요

디지털 홀로그래픽(holographic) 기록이라 함은 홀로그램이라 불리는 3차원 상을 재생하기 위해 감광 매질(일반적으로 감광 입자가 매우 작은 홀로그래픽 필름)에 간섭 패턴을 형성하는 기술을 의미한다. 디지털 홀로그래픽 기록은 아날로그 방식과 달리 불연속적인 간섭무늬를 기록하게 되며 복원 시에는 기록 시 사용한 동일한 파장을 포함하는 빛을 조사하여 물체의 3차원 상을 재현하는 방식이다. 디지털 홀로그래픽 기록은 일반적으로 콘텐츠 및 광학적인 구성에 따라 스테레오그램(stereogram)과 프린지(fringe) 방식으로 구분할 수 있다. 스테레오그램 방식은 수직 방향 또는 수직/수평 방향에 대해 시차(parallax)를 갖는 다시점 영상을 물체 빔(beam)으로 구성한 후 기준 빔과의 광학적인 방법을 이용하여 간섭무늬를 형성하여 홀로그래픽 필름에 기록하는 방식이다.

반면 프린지 방식은 스테레오그램 방식과 달리 콘텐츠의 경우 수치적으로 미리 계산된 간섭 패턴(fringe pattern)을 광학적인 간섭 작용 없이 생성된 간섭 패턴의 크기를 변환하여(이 과정을 resizing이라고 하며 광집광 시 사용되는 렌즈도 resizing에 적합한 렌즈를 사용) 홀로그래픽 필름에 기록하는 방식이다.

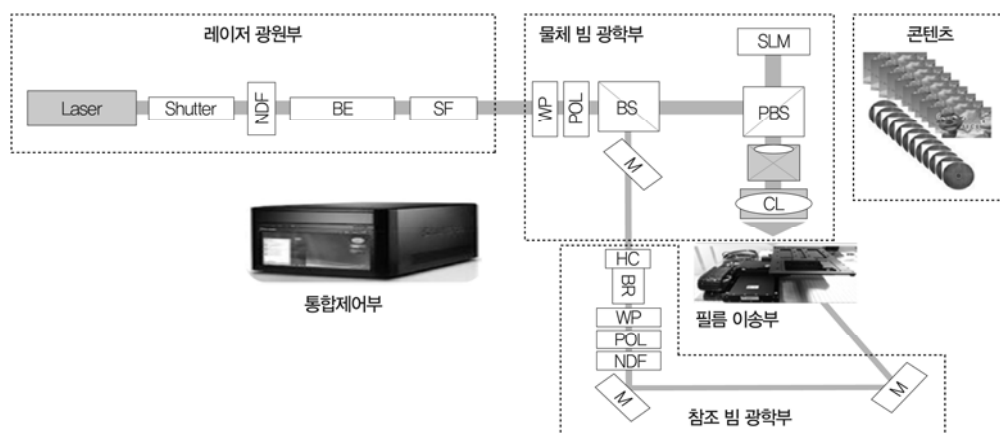
이를 위해서는 기본적으로 레이저와 같은 가간섭(co-

herent) 광원이 필요하며 간섭 패턴을 생성하기 위해서는 간섭 광학계가 구축되어야 한다. 기록 필름으로는 은염(silver halide) 및 포토폴리머(photopolymer)를 사용할 수 있으며, 필름 이송을 위해서는 스테이지(stage)와 같은 정밀 이송 시스템이 필요하다. 마지막으로 광학계와 스테이지를 포함하여 전체 기록 시스템을 순차적으로 동작시키기 위해서는 통합제어 기능이 필요하다.

일반적으로 디지털 홀로그래픽 기록 시스템의 구성은(그림 1)과 같이 구성할 수 있다[1].

광원부는 레이저로 한정하여 구성된 예로 컬러를 기록하고자 할 경우에는 RGB 파장에 해당하는 레이저를 사용하여 빔을 출력하게 된다. 본고에서는 공간 필터(spatial filter)까지를 광원부로 분류하였으며 레이저를 출발한 빔은 셔터를 통해 노광에 필요한 빔의 출력이 조절되며 보다 더 세밀하게는 반 파장판(half wave plate)이나 중성 농도 필터(neutral density filter)를 통해 조절이 가능하다. 일반적으로 빔 확장기(beam expander)를 통해 원하는 직경의 크기로 빔이 확장된 후 공간 필터를 통해 noise 성분이 제거되고 평행 빔(collimated beam)이 출력된다.

광원부로부터 출력된 빔은 물체 빔과 참조 빔으로 분리되어 물체 빔은 공간 광 변조기(Spatial Light Modulator: SLM)에 입사되어 반사 또는 투과된 빔이 집광 렌즈(converging lens)를 통해 필름 면에 입사하게 된다.



(그림 1) 디지털 홀로그래픽 기록 시스템 구성도

참조 빔은 원광원 그대로 필름 면에 입사되어 물체 빔과 간섭을 일으킨다. 물체 빔 광학부는 크게 SLM과 광학 헤더에 해당하는 집광 렌즈가 중요한 부분이다. SLM은 홀로그램 재생 화질 및 선명도(휘도)와 밀접한 관련이 있으며 투과형 또는 반사형의 SLM이 사용된다. (그림 1)에서는 반사형 타입의 SLM이 도시되어 있다. 편광 빔 분할기(Polarized Beam Splitter: PBS)를 통과한 빔은 SLM에 입사된 후 물체 빔을 형성한 후 편광이 바뀌어 다시 PBS를 통해 집광 렌즈로 입사된다. 집광 렌즈는 입사된 빔을 원하는 크기로 집광을 하게 되는데 일반적으로 대물 렌즈(objective lens)가 사용된다. 집광 렌즈는 화각(Field Of View: FOV)이 중요한 파라미터로 이는 홀로그램 재생 시 기록된 각 홀로그램 원소라 불리는 호겔(hogel: hologram element)이 빛을 발산하는 각도에 해당하므로 각도가 클수록 좋은 상을 재현하는데 유리하다.

콘텐츠는 기록하고자 하는 필름의 크기, 호겔의 크기 및 호겔별 해상도를 고려하여 다양하게 제작이 가능하다. 스테레오그램 콘텐츠는 스테레오그래픽 3차원 방식의 2차원 배열(array) 영상으로 원하는 시점 수에 해당하는 이미지를 렌더링 또는 촬영을 통해 생성한 후 픽셀 재배치 과정을 거쳐 호겔 이미지가 생성되게 된다. 영상 생성 시 고려할 파라미터로는 시야각(viewing angle), 화각(FOV), 카메라 대수, 샘플링, 2차원 영상의 해상도 및 시야 거리(viewing distance) 등이 고려되어야 한다. 또한 카메라의 프로젝션 방식 및 카메라 기하(geometry) 왜곡을 고려하여 생성한다[2].

통합제어부는 디지털 홀로그래픽 기록 시스템을 전체적으로 제어하고 운용하기 위한 시스템으로 크게 광학부 및 필름 이송부를 제어하고 기록 시 전체적인 동작을 제어하는 기능을 담당한다. 기본적인 기능으로는 광학부의 광학 셔터 제어, SLM으로의 영상 로딩 및 필름 이송부 제어로 분류할 수 있다. 광학 셔터의 경우, 노광에 필요한 빔의 세기를 제어하기 위한 목적으로 노광량을

계산하여 해당 시간 동안 광학 셔터를 개폐하여 빔의 세기를 제어한다.

호겔 이미지는 광학부와 필름 이송부와의 타이밍을 고려하여 SLM에 로딩된다.

필름 이송부는 기본적으로 X축 및 Y축 이송 기능이 필요하며 필요에 따라서는 물체 빔의 초점을 조정하기 위해 Z축에 대한 이송 기능도 필요하다. 필름 이송부는 지정된 호겔의 크기 및 이송 거리에 맞게 정확하게 필름을 이송하는 기능을 제공해야 하는데 이에 대한 정밀도가 떨어질 경우 홀로그램 재생 시 왜곡을 발생할 수 있다. 또한 필름 이송부는 이송 후 다음 호겔을 기록하기 전까지 진동이 비교적 신속하게 안정되어야 하는데, 요구되는 기록 속도를 감안하여 진동 방지 또는 저감 기술이 적용되어야 한다.

홀로그래픽 필름의 경우, 은염과 포토폴리머가 사용될 수 있는데 은염의 경우는 포토폴리머에 비해 회절 효율이 떨어지는 단점이 있으며 추가적으로 현상을 위해 화학적 처리 과정인 wet processing 작업이 필요하다. Wet processing 작업은 현상과 표백 작업으로 분류될 수 있으며 각 매질에 적합한 조건으로 현상과 표백이 이루어져야 최적의 홀로그램 상을 재생할 수 있다. 반면에 포토폴리머의 경우는 wet processing 작업이 별도로 필요하지 않는 매질이다. 포토폴리머를 이용한 홀로그램의 기록 과정은 두 입사 빔의 간섭에 의한 회절격자의 생성 과정으로 설명될 수 있으며 물체 빔과 참조 빔이 입사되면 그 빛을 흡수하여 모노머(monomer)를 폴리머(polymer)로 변화시킨다. 구성 성분을 살펴보면, 모노머는 실질적인 정보를 저장하는 역할을 하며 광화학적인 반응을 통해 폴리머로 변화함에 따라 굴절률 변조를 발생시킨다[3].

II. DHP 기술 동향

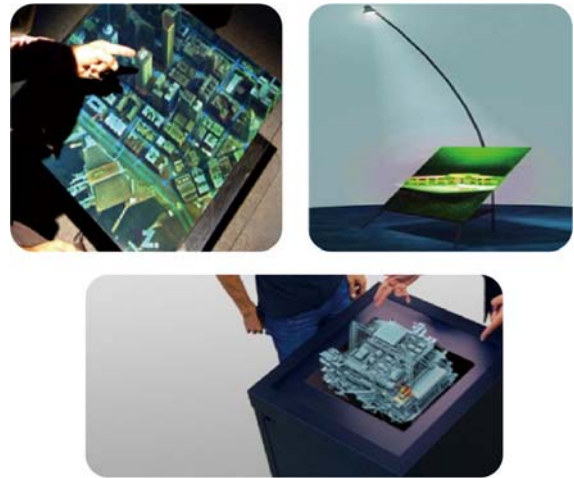
DHP(Digital Holographic Printing) 기술은 그 동안

국내에서는 많은 관심을 받지 못하다가 최근에 홀로그래피 관련 정책 연구가 시작되면서 정부 출연 연구기관 및 기타 관련 업체를 통한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 디지털 홀로그래픽 프린팅 기술의 국제 동향을 살펴보면, 1996년에 설립된 Zebra Imaging사를 필두로, Rabbitholes사, Geola사 등의 업체를 중심으로 디지털 홀로그래픽 프린팅 기술 개발이 이루어 졌으며 아직은 초기 단계이지만 관련 시장이 형성되어 있다. II장에서는 대표적인 홀로그래픽 프린팅 기술 동향을 스테레오그램 기반 DHP 기술을 개발하고 있는 Zebra Imaging사, Rabbitholes사 및 Geola사와 프린지 기반 DHP를 연구하고 있는 니혼대학교로 분류하여 간략하게 소개를 하고자 한다.

1. Zebra Imaging사의 DHP 기술 동향

Zebra Imaging사는 MIT 출신의 대학원생들에 의해 1996년에 설립되었다. Zebra Imaging사의 기술은 Stephen Benton 교수가 이끈 Spatial Imaging Group에서 수행한 연구에 바탕을 두고 있다. Zebra Imaging사는 현재 30개가 넘는 핵심 미국 특허를 보유하고 있으며 그 외 다수의 해외 특허를 현재 등록 중에 있다. Zebra Imaging사의 대표적인 홀로그래픽 프린팅 기술인 ZScape™ 기술은 지형(terrain) 영역, 설계 디자인 등의 다양한 응용 분야에서 이용되고 있으며 각각의 응용 분야에서 기존에는 경험할 수 없었던 3차원 영상 체험을 가능하게 해준다[4].

이러한 홀로그래픽 디지털 프린팅 기술에 의해서 프린팅된 홀로그램은 사용자가 어느 각도의 위치에서 바라보더라도 3차원 입체감 체험이 가능하고 이러한 3차원 홀로그램은 full-color로 표현되어, 여러 사람이 회의를 하는 장소에서 이 기술을 이용하면 목적인 관련 분야 정보를 쉽게 이해하고 정보 전달을 빠르게 할 수 있어서 telepresence에서 구현하려는 목표와 유사하게 회



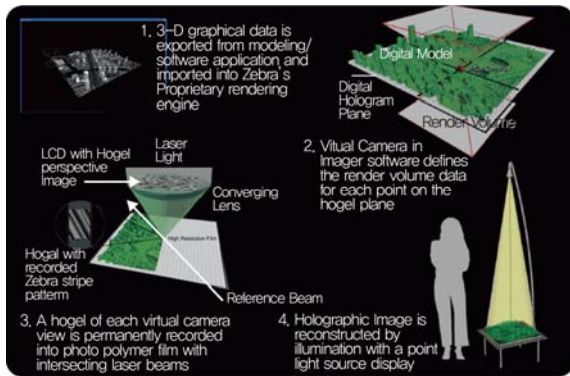
(그림 2) Zebra Imaging사의 홀로그램 프린팅 시연

의 진행이 되도록 도움을 줄 수 있다.

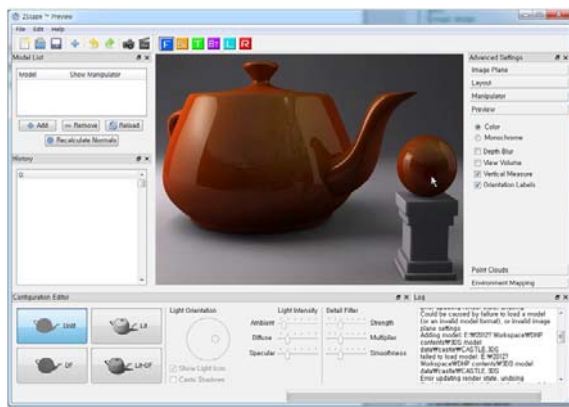
ZScape™ 홀로그래픽 디지털 프린팅 기술의 기본 원리는 홀로그래픽 스테레오그램 개념에 기반하고 있어 3차원 CG(Computer Graphics) 모델로부터 다양한 시점에서 해당하는 2차원 영상을 컴퓨터를 이용하여 렌더링하거나, 또는 실사 비디오 영상으로부터 얻어진 영상 열을, 홀로그래픽 필름에 순차적으로 호젤 단위로 기록함으로써 최종적인 3차원 홀로그램이 생성된다. 이때 보통 기록되는 호젤의 개수는 약 100,000 단위에 해당하며 실제로 호젤 개수에 해당하는 만큼의 영상 렌더링이 필요하다. 기록 후 홀로그래픽 필름에 기록된 홀로그램 상을 보기 위해서는 할로젠 LED(Light Emitted Diode) 램프와 같은 조명 장치를 이용하여 홀로그램에 빛을 조사시키면 (그림 2)와 같이 간단하게 3차원 홀로그램 상을 재생할 수 있다.

가. Zebra Imaging DHP 특징

Zebra Imaging DHP 기술은 (그림 3a)와 같은 절차를 통해 기록이 진행된다. 이 과정은 3D 그래픽 데이터 생성, 기록 이미지(호젤 이미지) 생성, 광학계를 통한 간섭 무늬 기록 및 재생 빔 조명을 통한 재생 단계로 간략화할 수 있다.



(a) 기록 과정



(b) ZScape® Preview

(그림 3) Zebra Imaging사의 홀로그램 기록 과정 및 ZScape® Preview SW

나. 스테레오그램 생성

3D 그래픽 데이터 생성 과정은 일반적인 3D 그래픽 데이터를 통해 원하는 시점의 2D 이미지를 획득하는 과정으로 3Ds Max나 Maya 같은 툴을 사용하거나 파일 형태로 생성된 경우 Zebra Imaging사의 ZScape®을 통해 최종적인 호겔 이미지를 생성한다. 지원되는 애플리케이션 및 포맷은 다음과 같다.

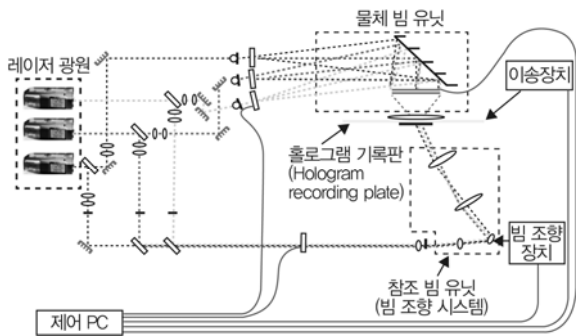
- 3Ds Max, Autodesk Maya, Rhinoceros 및 구글의 sketchup
- .obj, .fbx, .3ds, dae, .stl, .tif 포맷
- .xyz, xyzi, .pts, .csv, .las와 같은 포인트 클라우드(point clouds) 데이터

3D 모델 데이터는 기록에 적합한 영상(호겔 이미지)

으로 구성되어야 하는데, 이를 위해 Zebra Imaging사에서는 (그림 3b)에 도시된 ZScape® Preview SW를 개발하였다. 처리 절차를 살펴보면, 먼저 3Ds Max와 같이 애플리케이션에서 ZScape® Preview에서 요구되는 형태로 3D 모델 데이터를 출력(expert)한다. Zebra Imaging사에서는 이에 대한 자세한 안내서를 별도로 제시하고 있다. 이러한 절차에 따라 적절하게 출력된 3D 모델 데이터는 ZScape® Preview로 import되어 호환성 테스트를 통해 유효성이 검증된다. 이후 3D 모델 데이터는 사용자가 원하는 형태로 렌더링되는데 디폴트로 단면 polygon 형태로 디스플레이된다. Back face culling 및 렌더링에 필요한 기본적인 파라미터를 세팅한 후 다음 단계로 이미지를 획득하기 위해 조명 (lighting)을 설정한 후 2차원 영상 프레임을 획득하기 위해 모델의 회전 각도(angle of view), 거리, 영역, 방향 및 카메라 방식을 설정하는 과정을 통해 원하는 프레임을 획득하게 된다. 조명의 경우 미리 설정된 값을 통해 홀로그램 기록에 적합한 형태의 조명 조건을 설정할 수 있다. 또한 모델의 디테일을 살리기 위해 디테일 필터(detail filter) 기능을 지원하며 이를 통해 실시간 전역 조명(real-time global illumination)이 가능한 것이 특징이다.

다. Zebra Imaging DHP 광학 엔진

Zebra Imaging사는 펄스 레이저(pulsed laser) 기반의 기록 광학계를 사용하고 있다. 펄스 레이저는 CW (Continuous Wave) 레이저에 비해 고속 기록이 가능한 특징을 갖고 있으며 이는 스테이지의 이송 방식에 영향을 미친다. CW 레이저를 사용할 경우, 스테이지의 이송 방식이 매 호겔별로 settling time을 갖는데 반해, 펄스 레이저는 스캐닝 방식으로 구동되어 기록 속도를 개선할 수 있다. 광학 시스템의 경우, Zebra Imaging사에서 가장 최근에 등록된 특허인 “Method and Apparatus for Recording One-Step, Full-color, Full Parallax,



(그림 4) Zebra Imaging 사의 One-step, Full Color, Full Parallax DHP 시스템 구성도

Holographic Stereograms”[5]를 참조하면 다음과 같은 특징의 기술을 적용하고 있음을 알 수 있다.

(그림 4)에 도시된 도면에서 알 수 있듯이, full color, 호겔 동시 노광, 가변 호겔 크기, 참조 빔 조향 기능이 지원된다. 자료에 따르면, 기존 선행 방식들과 달리 상기 기능을 지원하기 위해 (그림 4)와 같은 형태의 시스템을 고안한 것으로 분석된다. 간략하게 특징을 살펴보면, 먼저 광원부는 컬러 기록을 위해 RGB 각 파장대의 레이저로 구성되어 있으며 각 레이저로부터 출력된 가간섭 빔(coherent light beam)은 각각의 광 경로를 통해 물체 빔 유닛으로 전달된다. 특징으로는 공간 필터 이전에 빔 분리기(beam splitter)를 통해 물체 빔과 참조 빔으로 분리한다. 물체 빔의 경우 해당하는 공간 필터를 통해 잡음이 제거된 후 바로 다음에 위치한 셔터를 통해 물체 빔의 광량이 조절되는 구조를 취하고 있다. 셔터를 통과한 각 파장의 물체 빔은 미러를 통해 SLM에 미러링된 후 집광 렌즈를 통해 기록 매질에 입사된다. 물체 빔 유닛의 경우 특히 기록 성능에 중요한 영향을 미치는 광학적 구성 및 기술을 고려하였음을 알 수 있다. 우선적으로, SLM을 투과 또는 반사된 물체 빔은 광학 소자를 통해 호겔에 집광이 되어야 하는데 이 부분에 있어서 해당 FOV를 갖는 집광 렌즈를 사용하거나 HOE(Holographic Optical Element)를 사용하여 집광 시킬 수 있는 구조를 고안하였다. 또는 물체 빔을 고르게 분

산시키거나 물체 빔 마스크를 사용하지 않을 목적으로 빔 확산기(diffuser)를 SLM과 집광 렌즈 사이에 위치하는 방안을 고안하였다. 이 외에도, 일반적으로 voxel(volumetric element)을 조정하기 위해 별도의 복셀 제어 렌즈(voxel control lens)를 집광 렌즈와 기록 매질 사이에 위치하여 홀로그램 상이 재생되는 스크린(SLM)의 위치를 가변적으로 조정할 수 있도록 하는 방법을 고안하였다. 이러한 기술이 현재 Zebra Imaging사의 기록 시스템에 적용되었는지 여부는 확인할 수 없지만 자료에 기술된 내용을 보면 선명하면서도 왜곡이 없는 홀로그램 상의 재생을 위해서는 위에서 언급한 기술이 적용되었을 것으로 짐작할 수 있다. 참고문헌 [5]에 명시된 다른 도면에 따르면, 다중 노광 방식을 위해 (그림 4)와 같은 구조를 복수로 구성하여 기록 성능 및 효율을 향상시키는 방법을 추가로 고안하였음을 알 수 있다.

홀로그램 재생 시에는 기록 광원과 동일한 파장을 포함하는 빛을 조사하여 홀로그램 상을 재생한다. 일반적으로 기록 시 입사되었던 참조 빔과 동일한 빔, 예로 평행광(collimated beam)을 사용하면 최적의 상을 재생할 수 있지만, 일반적인 환경에서는 점 광원 형태의 광원을 사용하고 있다. 이 경우 기록된 필름의 크기가 작은 경우는 크게 문제가 없지만 큰 경우에는 각 호겔의 위치에 따라 입사각이 달라 재생되는 각 휘도 분포(angular intensity distribution)가 달라 영상의 왜곡이 발생한다. 이를 개선하기 위해 Zebra Imaging사에서는 참조 빔 조향 방법을 고안하였다. 참조 빔의 입사각을 조향하기 위해 빔 조향 거울(deflection mirror) 및 빔 조향 렌즈를 사용한다. 조향 미러는 일반적인 2축 정밀 스테이지에 부착되어 원하는 각도에 맞게 자동으로 조정된다. 빔 조향 렌즈는 빔 조향을 위해 별도로 설계된 렌즈로 렌즈의 초점 거리를 고려하여 축(normal axis) 상의 배치를 결정한다. 빔 조향 성능을 개선하기 위한 부가적인 방법으로는 참조 빔의 일부분만을 사용하기 위해(일반적으로 masking이라 함) 개구(aperture)와 relay lens를 사용하

여 빔 조향 거울에 입사시키는 방법을 고안하였다. 다른 방식으로는 이동 광 섬유 케이블(fiber optic cable) 및 전달된 참조 빔을 모으기 위한 optical coupler lens를 구성하여 참조 빔을 입사시키는 것이 특징이다. 이 방법은 광 섬유 케이블을 사용함으로써 인하여 이동형(movable) 빔 조향이 가능하여 이러한 목적으로 고안한 것으로 분석된다.

2. Geola사의 DHP 기술 동향

Geola(리투아니아 빌뉴스(Vilnius) 소재)에서는 1999년부터 펄스 레이저를 이용한 디지털 홀로그래픽 프린터를 개발하였으며, 디지털 3D 홀로그래픽 프린팅인 i-lumogram 기술을 이용하여 i-lumographic이라 불리는 홀로그램을 제작하고 있다[6].

가. i-Lumographic 콘텐츠 생성

기록용 콘텐츠를 제작하기 위한 첫째 방식으로, 3Ds Max나 Maya와 같은 프로그램을 이용하여 디지털 영상을 생성하고 렌더링하는 방법을 적용하고 있다.

둘째로는 카메라를 사용하여 실제 영상을 얻는 방법으로 Geola는 i-lumographic 영상에 적합하도록 자체 개발한 (그림 5)에 도시된 형태의 HoloCam이라는 카메라 장치를 이용하여 실사 영상을 획득하고 있다. 이 카메라는 촬영하려는 전경의 중앙부를 지향하며 여러 장

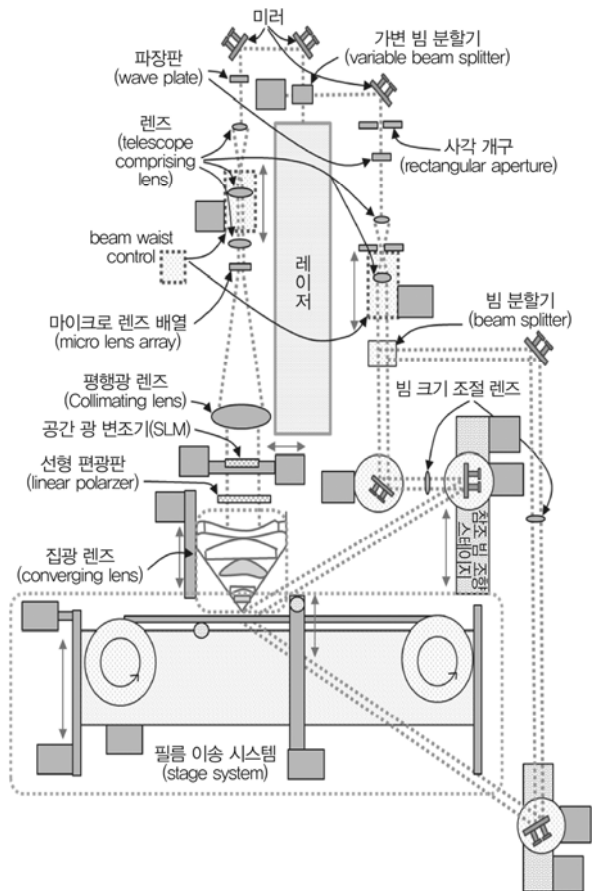


(그림 5) Geola HoloCam 카메라

의 사진을 획득한다. 이 HoloCam은 이동용과 스튜디오 용이 있는데, 카메라는 직선 레일을 이동하며 사진을 연속하여 찍는데 전경의 중앙을 찍을 수 있도록 카메라가 회전하는 구조로 되어 있으며, 약 7~15초 정도의 시간에 전체 영상을 획득한다.

셋째로는 위의 두 가지 방법을 복합하는 방식이다. 비디오 후 처리(post processing) 프로그램을 이용하여 실제 영상에 가상 영상을 합성하는 방식으로 i-lumographic 영상을 제작한다.

Lumographic 영상은 전 방향 시차(full parallax)가 아닌, 수평 방향의 단일 시차 영상만을 제공한다. 즉, Geola 카메라 장치로 실제 영상의 수평 방향의 연속된 영상을 얻으며 이 수평축 영상들을 이용하여 수평 시차 홀로그램을 생성한다.



(그림 6) Geola 홀로그래픽 프린터 시스템

나. Geola Printer 시스템

Geola의 디지털 홀로그래픽 프린터는 full color를 기록하기 위한 시스템으로 RGB 펄스 레이저를 기반으로 구축되었다[7]. (그림 6)과 같은 구조를 가지며 3개가 병렬로 구성된 RGB 기록 광학 엔진과 물체 빔 제어에 해당하는 waist beam control 기능 및 참조 빔 조향 기능을 지원한다. 현재 구축된 기록 시스템의 집광 렌즈 화각(FOV)은 70° 정도이다. 매질은 Geola에서 자체 제한한 은염 매질을 사용하며 HPO(Horizontal Parallax Only)형 홀로그램을 제작하고 있다.

다. Geola DHP 특징

Geola는 고감도의 칼라 photo-material의 제약으로 적색과 녹색 또는 적색과 청색, 청색과 녹색으로 구성되는 2색의 홀로그램을 기록하고 있다. 프린팅 속도로는 시간당 1m 정도 크기의 기록이 가능하다. 기록되는 호젤은 0.8×0.8mm 이상의 크기이며, 각 호젤들은 다른 각도에서 얻어진 600~1,200개의 일반 pixel들의 정보를 가지고 있다. 즉 600에서 1,200장의 다른 각도의 영상을 처리하여 각 호젤마다 각 색채별로 해당 정보를 기록하게 되며, full 컬러의 경우에 각 호젤은 적녹청 세 번의 레이저 노출을 통하여 홀로그래피 영상을 기록하게 된다. i-lumogram 기술 규격은 <표 1>과 같다.

<표 1> i-lumogram 규격

크기	13cm×18cm~최대 1m×1.5m
프린팅	True-color, High resolution, Four-dimensional (three spatial coordinates plus time) printing
타입	Color reflection hologram
시야각	수직 27도, 수평 75도
시점수	640~1,200 시점
노광 (exposure)	6 RGB(660, 532, 440nm) pulsed laser light beams(3 object beams, 3 reference beams을 이용한 dot-exposure)
호젤 크기	0.8mm×0.8mm 이상
광 필름	Geola silver halide film
조명	점광원 할로겐 램프 및 자연광

Geola의 경우, 실사(real)와 가상(virtual) 영상 모두에 대해서 홀로그램 제작이 가능하며, 실사에 가상 영상 합성도 가능하다. 가상 영상 제작용 3D S/W로는 3D CAD(Computer Aided Design) 기반의 프로그램인 3D Studio Max(Autodesk 3Ds Max), Cinema 4D, Maya 등을 이용하여 영상을 제작한다.

Geola는 매질에 대한 솔루션을 가지고 있으며 Geola 매질의 경우, 컬러 기록이 가능한 은염 매질로 PFG-03C를 개발하여 제공하고 있으며 특징으로는 457nm 청색, 514nm 녹색 및 633nm 적색 레이저에 성능이 최적화되도록 고안된 매질로 노출 대비 최대 회절 효율(maximum diffraction efficiency versus exposure)을 보면 청색의 경우 25% 이상이며 녹색과 적색의 경우 45% 이상이다. 은염 매질의 경우, 현상과 표백 과정이라고 하는 wet processing 과정을 거쳐야 하며 Geola에서 권고하는 조건에 맞게 처리해야 최적의 회절 효율을 낼 수 있다.

3. Rabbitholes사의 DHP 기술 동향

Rabbitholes사는 세계 최초로 애니메이션되는 컬러 홀로그램 기록 기술을 개발 하였다. Rabbitholes사 기술은 3차원 애니메이션 소프트웨어로부터 생성된 영상 열을 이용한 홀로그래피 프린팅 기술로 (그림 7)과 같이 움직이는 3차원 영상을 제공함으로써 보다 현실감 있는 3차원 체험을 가능하게 한다. Rabbitholes사의 홀로그램 프린팅 기술을 이용하면 대형 사이즈, full-color, 그리고 고해상도의 애니메이션 효과가 있는 홀로그램을 xyz media 기술을 활용하여 프린팅할 수 있다. 이러한



(그림 7) Rabbitholes사의 애니메이션 홀로그램



(그림 8) Rabbitholes사의 DHP 프린터 및 프린트물

xyz media 기술을 이용하면 움직이는 동영상 물체를 full-color 기반으로 생생하게 재생해 낼 수 있는 홀로그램을 제작할 수 있다. 또한 xyz media 기술을 이용하면 움직이는 물체의 그래픽 동영상을 6초에 한 장씩 3차원 홀로그램으로 재생할 수 있다[8].

(그림 8)은 Rabbitholes사의 DHP 프린터와 프린트된 홀로그램에 대한 그림으로, 특징으로는 물체 빔과 참조 빔을 동일한 방향의 동일한 입사각(광축과 동일)으로 매질에 빔을 입사시키는 특징을 가지고 있다. Zebra Imaging이나 Geola 시스템의 경우 참조 빔을 특정 각도로 입사시키는 구조임에 반해 Rabbitholes사는 동일한 각도로 입사하는 구조를 취하고 있다.

4. Nihon 대학교의 프린지 프린터 기술 동향

프린지 프린터는 간섭 패턴을 수치적으로 계산한 후 이를 SLM을 통해 물체 빔으로 변조한 후 렌즈를 통해 크기를 변환하여 매질에 기록하는 방식으로 일본의 니혼대학교에서 최초로 연구를 시작하였다.

가. 프린지 프린터의 콘텐츠 생성

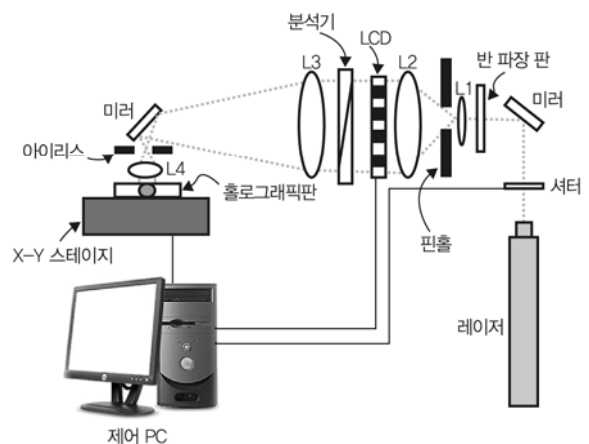
프린지 프린터의 경우, 스테레오그램 방식과 달리 2차원 직교 영상이 아닌 간섭무늬를 기록하며 이에 대한 생성 과정은 다음과 같다.

먼저 3D 객체 데이터를 이용하여 3차원 객체로부터 3차원 정보인 point cloud 데이터를 획득한다. Point cloud 데이터는 x, y, z, 및 r, g, b 값으로 구성된 데이터로 3차원 공간 정보를 가지고 있어 간섭무늬를 수치적으로 계산할 수 있다. 이러한 3차원 정보인 point cloud 데이터를 이용하여 해당 호젤 위치에 대한 간섭패턴을 CGH(Computer Generated Hologram)를 이용해 수치적으로 계산한다. CGH의 경우, 어떠한 알고리즘을 사용하느냐에 따라 콘텐츠 생성 속도 및 간섭무늬의 품질에 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 PAS(Phase-added Stereogram) 및 I-PAS(Improved PAS)를 사용할 수 있으며 I-PAS의 경우 고속 생성이 가능하고 간섭무늬의 품질 또한 Fresnel hologram에 근접한 수준의 간섭 패턴 생성이 가능하다[9].

이러한 수치적인 방식에 의해 생성된 간섭 패턴은 광학계를 통해 크기를 변환시켜 매질에 기록하게 된다.

나. 프린지 프린터 광학 시스템

프린지 프린터의 광학 시스템의 구성은 (그림 9)와 같으며 스테레오그램 기록 방식과 유사하나 수치적으로



(그림 9) 프린지 프린터 시스템

계산된 간섭 패턴만을 기록하므로 참조 빔 광학 모듈을 필요로 하지 않는다. 광학적인 경로를 살펴보면, 광원으로 부터 평행 광을 생성한 후 SLM을 통해 간섭무늬를 변조하여 물체 빔을 생성한 후 이를 크기 변환 렌즈를 통해 호겔 크기에 맞게 패턴 크기를 변환(resizing)하여 기록하는 방식이다[10]. 원하는 호겔의 크기 및 렌즈의 FOV 특성에 따라 집광(converging)되는 스테레오그램 기록 방식과 달리 크기 변환 렌즈(resizing lens)를 사용하여 간섭무늬의 크기를 변환하여 기록하므로 집광 렌즈의 특성도 다르다.

III. 결론

본고에서는 디지털 홀로그래픽 기록 기술 동향을 소개하였다. DHP 기술은 콘텐츠 특성에 따라 스테레오그램 방식과 프린지 방식으로 구분할 수 있으며 현재 스테레오그램 방식의 경우 홀로그래프의 품질 및 기술 수준이 상용 수준에 도달하였으며 프린지 방식의 경우 원천 기술 확보를 위한 연구가 진행 중에 있다. 국내에서는 현재 ETRI, KETI, 한교아이씨, 저스텍 및 충북대학교를 중심으로 관련 기반 기술 연구를 진행 중에 있으며 스테레오그램 및 프린지 프린트 기술을 병행하여 연구하고 있다. DHP 기술이 향후 일반 사용자가 불편함 없이 사용할 수 있도록 하려면 집적화 기술을 통해 시스템이 간소화되어야 하며 또한 진동에 안정적인 기술 개발이 이

루어져야 한다. 또한 홀로그래프 시장의 활성화를 위해서는 고휘도를 만족하는 기록 매질 및 다양한 핵심 원천 기술의 개발이 필요하다.

약어 정리

CAD	Computer Aided Design
CG	Computer Graphics
CGH	Computer Generated Hologram
CW	Continuous Wave
DHP	Digital Holographic Printing
FOV	Field Of View
HOE	Holographic Optical Element
HPO	Horizontal Parallax Only
I-PAS	Improved-PAS
LED	Light Emitted Diode
PAS	Phase-added Stereogram
PBS	Polarized Beam Splitter
SLM	Spatial Light Modulator

참고문헌

- [1] 이봉호 외, “디지털 홀로그래픽 기록 시스템 설계,” 한국광학회 동계학술발표회, 2012. 2, pp. 139-140.
- [2] 이광순 외, “반사형 디지털 홀로그래픽 기록 콘텐츠 생성에 대한 연구,” 한국광학회 하계학술대회, 2012. 8, pp. 63-64.
- [3] 정현섭 외, “투과형 기록구조에서 반사형 포토폴리머의 광학 특성 및 미세패턴 기록,” 한국광학회지, vol 18, no. 1, 2007. 2, pp. 8-13.
- [4] www.zebraimaging.com
- [5] Zebra Imaging Inc., “Method and Apparatus for Recording One-Step, Full-color, Full Parallax, Holographic Stereograms,” 2011-304891, Aug. 2012.
- [6] www.geola.com
- [7] Geola Technologies LTD., “Holographic Printer,” PCT WO 03/034155 A1, Apr. 2003.
- [8] www.rabbitholes.com
- [9] H. Kang, T. Yamaguchi, and H. Yoshikawa, “Accurate Phase-added Stereogram to Improve the Coherent Stereogram,” *Appl. Opt.*, vol. 47. no. 19, July 2008.
- [10] T. Yamaguchi et al., “Development of Fringe Printer and Its Practical Applications,” ISDH, 2009.

용어해설

Digital Holographic Printing(DHP) 수직, 수평 또는 full parallax를 갖는 홀로그래픽 영상을 RGB 광학계를 통해 프린지를 직접 생성하거나 생성된 프린지를 광매질에 기록하여 홀로그래픽 3차원 상을 재생하기 위한 디지털 홀로그래픽 프린터 기술

Stereogram DHP 스테레오그래픽 3차원 방식의 2차원 배열(array) 영상을 광학적인 방식으로 간섭무늬를 생성하여 매질에 기록한 후 3차원 홀로그래프 상을 재현하는 기술

Fringe DHP 프린지 프린터 또는 파면 기록 방식의 홀로그래픽 프린터라고도 하며 수치적 계산에 의하여 생성된 간섭무늬를 간섭계(interferometry) 없이 기록 매질에 기록하여 3차원 홀로그래프 상을 재현하는 기술