

# 홀로그래픽 스테레오그램 프린팅 제어에 관한 연구

\*이봉호, 김재한, 김태원, 문경애, 김진웅, \*\*조성배

\*한국전자통신연구원, \*\*(주)넘버스

\*leebh@etri.re.kr

## A Study On The Control Of Holographic Stereogram Printing

Bongho Lee, Jae-Han Kim, Tae-Won Kim, KyungAe Moon,  
Jinwoong Kim and SungBae Cho

\*Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

### 요 약

디지털 홀로그래픽 기록 방식에 있어서 기록하고자 하는 영상을 디지털화하는 작업과 더불어 영상을 필름에 투영시키기 위한 공간 광 변조기, 기록 광원을 생성하기 위한 광학 시스템 및 필름 이송을 담당하는 스테이지의 정밀한 제어가 필요하다. 본 논문에서는 디지털 홀로그래픽 기록 시스템을 개발함에 있어서 전체 운용 기능에 해당하는 제어 구조를 제안하고 제안된 구조의 기능과 구현된 결과를 통해 향후 개선 사항을 소개하고자 한다.

### 1. 서론

디지털 방식으로 홀로그래픽 기록하고자 하는 경우, 아날로그 방식과 달리 불연속적인 간섭 무늬를 기록하게 되며 복원 시에는 기록 시 사용한 동일한 파장의 빛을 조사하여 물체의 3 차원 상을 재현한다[1]. 디지털 홀로그래픽 기록(DHP: Digital Holographic Printing)은 일반적으로 콘텐츠 및 광학적인 구성에 따라 스테레오그램과 파면 프린터 방식으로 구분된다. 스테레오그램 방식은 수직 방향 또는 수직/수평 방향에 대해 시차(parallax)를 갖는 다시점 영상을 물체 빔으로 구성한 후 기준 빔과의 광학적인 방법을 이용하여 간섭 무늬를 형성하여 홀로그래픽 필름에 기록하는 방식이다. 파면 프린팅의 경우, 수치적으로 생성된 간섭 무늬를 광학적인 간섭을 통해 기록하는 방법으로 공간광변조기(SLM: Spatial Light Modulator)으로 부터의 회절되는 빔을 기록하는 방식으로 위상 정보를 동시에 기록 할 수 있는 방식이다.

본 논문에서는 스테레오그램 방식으로 홀로그래픽 기록하고자 할 경우, 기록하고자 하는 기능 및 요구되는 성능에 따라 기록 시스템을 운용하기 위한 제어 구조를 제시하고 각 모듈 별 기능 및 기술적인 고려사항을 기술하고자 한다.

### 2. 홀로그래픽 스테레오그램 프린팅

홀로그래픽 스테레오그램 프린팅 시스템은 도시된 그림 1 과 같이 대략적으로 구성될 수 있다. 간섭 무늬를 기록하는 파면 프린팅 방식[2]과 달리 스테레오그램 방식의 프린팅에 있어서는 피사체로부터 획득된 2 차원 직교 이미지(스테레오그램)를 이용하여 호겔 이미지를 생성한 후 이를 광학적인 간섭을 통해 홀로그래픽 필름에 기록한다[3]. 이를 위해서는 스테레오그램 생성을 위한 별도의 생성 과정이 필요하다[4]. 호겔 이미지는 일반적인 CG(Computer Graphics) 객체 데이터로부터 얻거나 실사를 직접 촬영하는 방식으로 생성할 수 있다. 생성된 호겔 이미지는 SLM 을 통해 입력되어 시그널 빔 형성 과정을 통해 집광 렌즈를 통해 필름에 집광된다. 기록 이미지는 일반적으로 호겔(Hologram Element 의 약자)로 불리며 신호 빔의 세기에 적합한 노광이 이루어져야 하므로 SLM 입력 시 정확한 타이밍과 이에 대한 적절한 제어가 요구된다.

광학 시스템의 경우, 일반적으로 가간섭(coherent) 광원인 적,녹,청 레이저를 사용하여 물체 빔 및 참조 빔을 생성하게 된다. 레이저로부터 출발한 광원은 빔 분할기를 통해 분광되어 물체 빔과 참조 빔으로 나누어진다. 광학 시스템에서는 이와 같은 빔을 만들어 내기 위해 광량을 조절하기 위한 광학 서터, 광량을 조절하기 위한 필터 및 가우시안 분포를 갖는 광원을 평행광으로 만들기 위한 빔 확장기 및 공간 잡음을 제거하기 위한 공간 필터, 빔의 파장을 변형하기 위한 파장 판 및 빔의 편광 방향을 조정하기 위한 편광판 등을 사용하여 물체 빔과 참조 빔을 생성하게 된다. 이 과정에서 레이저의 광량 즉 빔의

세기는 외부 시스템을 통해 정밀하게 제어가 되거나 중성 밀도 필터와 같은 광학 부품을 사용하여 수동적으로 조절을 할 수 있다. 또한 셔터의 경우도 노광량 조절을 위해 정밀한 제어가 필요하다. 성능에 따라 다르지만 수 ms 에서 ~ 수 초까지의 제어를 필요로 한다. 또한 광학 시스템은 빔 허리 (beam waist)를 제어하기 위해 별도의 스테이지를 구비할 수 있다. 이를 위해서도 모터를 통한 translation 제어 기능을 필요로 하기도 한다. 빔의 프로파일은 기록 성능에 중요한 영향을 미치는 파라미터로 일반적으로 가우시안 형태의 분포가 최소가 되도록 구성하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 시스템적으로 빔의 프로파일을 획득하여 분포를 분석하여 이를 개선하기 위한 제어 기능을 적용할 수도 있다[5].

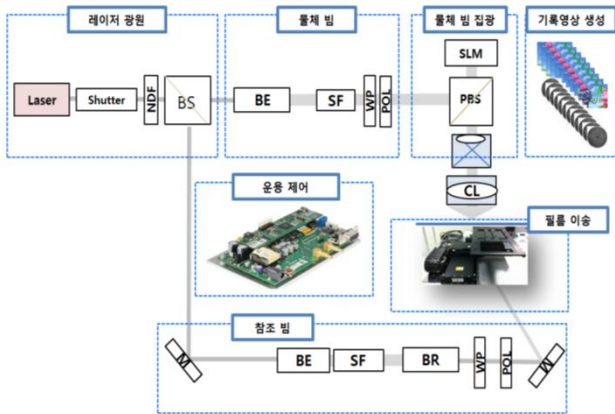


그림 1. 홀로그래픽 스테레오그램 프린팅 시스템 구성도

호겔 기록 방식의 경우, 사용하는 레이저의 종류에 따라 다르지만 연속 레이저 (continuous laser)를 사용할 경우 이송/정지 (step and scan) 방식을 적용한다. 이 방식은 지정된 한 호겔을 노광하기 위해, 순차적으로 이송, 대기, 노광 절차를 갖는 필름 이송 방식이다. 한 호겔 노광을 완료 한 후 다음 호겔을 노광하기 위해 이송하고 정지하는 반복 과정을 갖는 것이 특징이다. 이를 위해서는 이송 정밀도가 높으며 진동 감쇄가 빠른 스테이지를 적용하는 것이 바람직하며 위에서 언급한 SLM 및 광학 시스템과 효율적으로 운용 되어야 하므로 이에 대한 적합한 제어가 요구된다.

### 3. 홀로그래픽 스테레오그램 프린팅 제어

#### 3.1. 기록 제어 흐름도

홀로그래픽 스테레오그램 프린팅에 있어서, 노광 즉 홀로그래픽 필름 상의 기록은 그림 2 와 같은 개념으로 이루어진다. 그림에서와 같이 녹색으로 표기된 사각형은 각 호겔을 나타내는데 dot-matrix 방식으로 한 호겔씩 노광을 해 나간다. 노광 방향 및 이송 방식은 필름의 한 모서리에서 시작하여 raster scan 방식으로 이동하는 것이 효율적이다. 이를 위해서는 필름 이송 시스템인 스테이지는 필름 공간상에 상대적인 위치를 설정 해야 하는데 이를 위해 homing 기능을 두어 이동의 기준점을 설정한다. 기록하고자 하는 홀로그래픽의 크기가 정해지면 homing 위치를 기준으로 맨 첫 호겔의 위치로 이송이 이루어진다. 첫 호겔의 위치를 지정하는 여러 방법이 있겠지만 시작점의 상대적인 위치를 미리 지정하여 해당 지점으로부터 기록될 홀로그래픽의 전체 위치 및 크기를

지정할 수 있다.

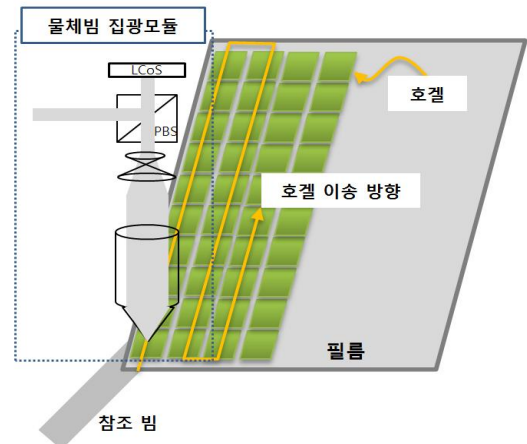


그림 2. 호겔 노광 구조

각 호겔의 노광은 물체 빔과 참조 빔을 호겔 영역내에 위치시켜 간섭 무늬를 생성하는 과정으로 이루어진다. 물체 빔의 경우 SLM 으로부터 입력된 영상이 집광 렌즈를 통해 집광되어 호겔 크기에 해당되는 빔이 입사된다. 반사형 홀로그램을 기록하고자 할 경우에는 필름의 반대 방향에서 호겔의 크기와 동일한 참조 빔을 입사시켜 간섭 무늬를 생성한다. 이 과정에서 해당 호겔의 회절 효율이 정해지는데 이는 두 빔의 정렬 정도와 빔의 프로파일 및 광량에 따라 좌우된다. 광량은 빛의 세기 (intensity)와 필름 면에 입사되는 노출 시간 (exposure time)의 누적에 의해 결정된다. 노출 시간은 광학 시스템의 셔터에 의해서 조절이 될 수 있으며 정밀하게는 수 ms 초에서부터 수 초까지 정밀한 제어가 필요하다. 스테이지의 이송은 셔터와 동기화되어 이루어 져야 한다. 또한 셔터와의 순차적인 절차에 의해 제어되는 것이 바람직하다.

각 호겔 노광 시 물체 빔은 SLM 으로부터 반사된 빔으로 집광 렌즈를 통해 집광되어 호겔 크기에 해당하는 빔의 허리를 필름 면에 일치시켜 모양을 형성한다. 기록 하고자 하는 호겔 영상은 이 SLM 을 통해 평행광에 의해 번조되어 필름 면에 입사된다. 입사 시 노광량은 회절 효율에 영향이 크므로 스테이지 이송 및 셔터의 개폐 시간을 고려한 노광량 제어가 이루어져야 한다.

본 연구에서 제어 구조는 크게 광학 셔터 제어, SLM 제어 및 스테이지 제어 세 기능으로 구분 할 수 있다. 절차 상 스테이지를 중심으로 제어 흐름을 구성하는 것이 적합하며 천연색 홀로그램을 기록하고자 할 경우 그림 3 과 같은 흐름으로 제어 흐름을 가질 수 있다. 전체 흐름을 관장하는 통합제어 (MC: Master Control)단에서 우선적으로 스테이지 초기화를 시작으로 스테이지에 이송 명령을 내린다. 이송 을 완료 했다는 ACK 가 접수되면 기록하고자 하는 해당 호겔 이미지를 SLM 에 입력한다. 이후 진동 완화를 위한 일정한 지연 시간 (waiting time)을 가진 후 해당 광원의 셔터를 열도록 명령을 내린다. 셔터가 열려 있는 시간은 계산된 노광량에 따른 시간에 해당한다. 이후 셔터를 닫은 후 다른 광원의 셔터를 오픈하고 닫는 과정을 반복한다. 적,녹,청을 순차적으로 노광 하고자 할 경우 3 번의 셔터 개폐 과정이 반복되면 통합제어 단에서는 다시 스테이지에 다음 호겔로의 이송을 명령한다. 이후 과정은 위 절차와 동일하며 맨 마지막 호겔까지 반복된다.

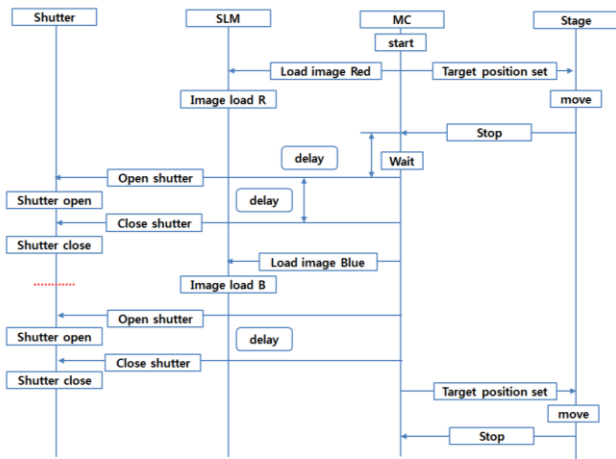


그림 3. 제어 흐름도

### 3.1. 광학 셔터 제어

광학 셔터의 경우, 본 연구에서는 Newport 사의 150Hz, 6mm aperture shutter 와 셔터 노출 시간은 최소 2ms 까지 가져갈 수 있는 셔터 드라이버를 적용하였다. Aperture shutter 의 제어는 외부 TTL 펄스, 원격 스위치 또는 RS-232 를 통해 가능하다. 적·녹·청 셔터를 통합하여 제어할 경우는 RS-232C in/out 포트를 사용하여 연계를 시킨다.

이 방법의 경우, 셔터 개폐 시간은 통합제어 시스템 내의 시스템 타이머를 사용하게 되는데 시스템의 상태 의존적이므로 그림 4 와 같이 별도의 하드웨어 드라이버를 사용하면 셔터 개폐 시간의 정밀도를 높일 수 가 있다.

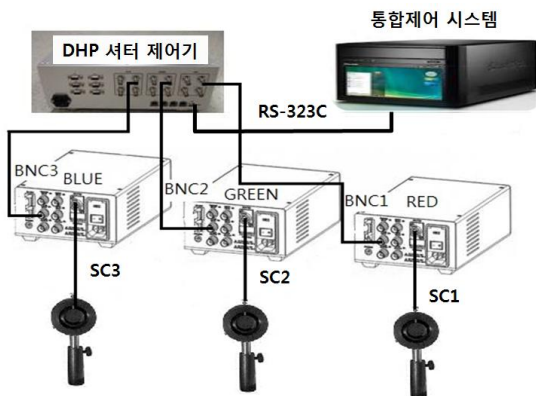


그림 4. 셔터 제어 구조

### 3.2. SLM 제어

SLM 으로는 Holoeye 사의 LC-R 1080 LCoS(Liquid Crystal on Silicon)를 적용하였다. 적용된 LCoS 는 1920x1200 최대 해상도를 지원하며 amplitude 변조를 지원한다. 픽셀 피치는 8.1μ 를 가지며 활성 영역(active area)은 0.72 인치 크기를 가진다. 개조는 256 레벨(8 비트)를 지원하며 신호 포맷은 60Hz DVI-WUXGA 해상도를 지원한다. 통합 제어 시스템과는 DVI 를 통해 인터페이스 하였다. 필름 면에 시그널 빔을 정사각형으로 입사시키기 위해 1080x1080

해상도만을 활성화 시켰으며 나머지 외곽 픽셀(border pixel)들은 계조 값은 “0”으로 처리 하였다. LCoS 로의 이미지 입력은 MC 에서 스테이지로의 호깅 이송 명령이 이루어진 직후에 이루어 지며 이후부터 다음 이미지 입력 시간까지 해당 이미지가 LCoS 에 출력된다. LCoS 로의 출력은 PC 모니터 상에 부 모니터(secondary monitor)로 설정하여 출력하였다. SLM 제어를 위한 고려사항으로는 적·녹·청 광원에 따라 생성된 이미지를 각 채널 별로 지정하여 별도의 SLM 에 입력이 가능해야 한다. 본 연구에서는 단일 SLM 을 사용하여 적·녹·청 각 채널에 해당하는 이미지를 순차적으로 입력하는 방식으로 구현하였다.

### 3.3. 필름 이송 시스템 제어

필름 이송 시스템은 기록 시 중심이 되는 제어 모듈로 필름 이송 시스템의 초기화 및 구동 단계로 구분하여 파라미터를 설정한다. 초기화의 경우, 각 축 모터(XYZ)에 전원을 인가 한 후 가상의 홈(home) 위치를 지정하여 기준 위치를 지정한다. 또한 임의의 지점으로 이송 기능을 제공하기 위해 절대모드(abs mode)를 두었으며, 프린팅 시작 위치, homing, 모터에서 지정된 특정 위치로의 이동 기능을 지원한다. 기록하고자 하는 홀로그램의 사양은 이송 시스템의 이송과 밀접한 관련이 있으므로 홀로그램 필름 환경 설정을 통해 이를 가능하도록 하였다. 이 단계에서 이송 단위에 해당하는 호깅의 크기, 전체 호깅의 개수 및 기록하고자 하는 호깅 영역을 지정할 수 있다. 또한 필름 상의 좌우상하 네 모서리에서 시작할 수 있도록 설정이 가능하도록 구성을 하였다. 필름 이송 시스템의 이송 좌표는 그림 5 및 식 1 과 같다.

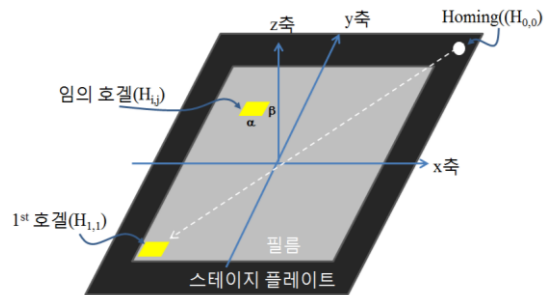


그림 5. 스테이지 이송 좌표계.

$$\begin{aligned}
 H_{ij} &= (x_{i-1} + \alpha, y_{j-1} + \beta) & (a) \\
 H_{ij} &= (x_{i+1} - \alpha, y_{j+1} - \beta) & (b) \\
 X_0 &= x_s, y_0 = y_s, & \\
 1 < i < n, 1 < j < m & (1)
 \end{aligned}$$

$x_s, y_s$  는 시작 위치를 나타내며 homing 위치로부터 미리 지정된 거리를 나타낸다. 식 (a)는 스테이지가 시작 위치로부터 x 축의 경우 오른쪽 방향으로, y 축의 경우 뒤쪽 방향으로 움직일 경우 이송 좌표를 나타내며, 식 (b)는 이와 반대 방향으로 움직일 경우의 이송 좌표에 해당한다. 이송 범위는 x 축 방향으로 n, y 축 방향으로 m 개의 호깅이며,  $\alpha$ 는 호깅의 x 축 방향의 크기,  $\beta$ 는 호깅의 y 축 방향의 크기를 나타낸다.

필름 이송 시스템은 모션 컨트롤러인 UMAC 을 통해 통합제어 시스템과 TCP/IP 통신을 한다. 이 통신 과정에서 모터의 구동과 초기 위치 및 이송 단위(호깅 크기)를 지정한다.

이송에 대한 정밀도를 보장하기 위해 이송 후 이송 결과(ACK) 및 이송된 좌표 값을 받아 사용자에게 제공한다.

### 3.4 제어 시스템 구축 및 시험

제어 시스템은 그림 6 과 같은 구조로 설계 구축 하였고 도시된 GUI와 같이 필름 이송 시스템, 셔터, SLM 및 모니터링 기능을 분리하여 구현하였다.

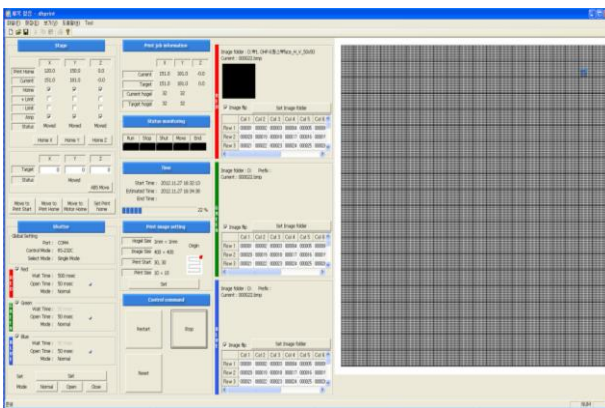
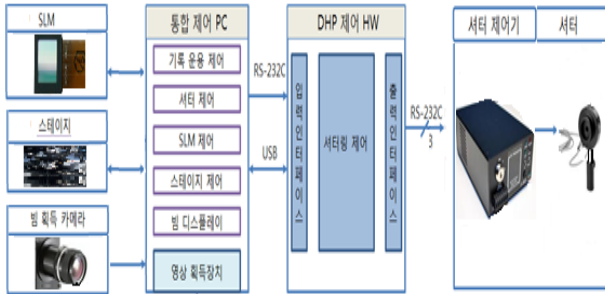


그림 6. 제어 시스템 및 GUI

필름 이송의 경우, 실시간으로 이송되는 좌표 및 상태를 GUI 상에서 확인 할 수 있으며 실제 필름 상의 이동 경로를 확인하기 위한 호겔 수와 동일한 dot-matrix 를 구성하였다. 셔터의 경우 통신 포트 및 셔터링 시간을 각 채널 별 또는 동시 구동을 위한 세팅이 가능하도록 구성하였으며 각 셔터의 동작 상태에 대한 모니터링이 가능하도록 구성하였다. SLM 은 제어 SW 와 별도로 시스템과 인터페이스 하였으며 각 채널 별 호겔 이미지 입력 기능을 구현하였다. 모니터링의 경우, 전체 기록 운용 상태를 필름 이송 시스템 상의 좌표 및 호겔의 위치를 값으로 확인하거나 그래픽하게 확인 할 수 있도록 구현하였다. 또한 대략적인 기록 시간을 추정하여 이를 안내하는 기능도 포함하였다.

시험의 경우, 그림 7 과 같이 전체 시스템을 구축한 후 Ultimate 은염 매질(U-08C)을 사용하여 50x50 호겔을 기록하였다. 호겔의 크기는 1mmx1mm 로 하였으며 콘텐츠는 인물 객체로 HPO(Horizontal Parallax Only)형태로 생성하였다. 본 연구에서 구축한 제어 시스템은 셔터의 셔터링과 필름 이송에 대한 조건을 원하는 형태로 세팅이 가능한 구조로 호겔 크기, 홀로그램 크기, 기록 속도를 가변하여 운용할 수 있다.

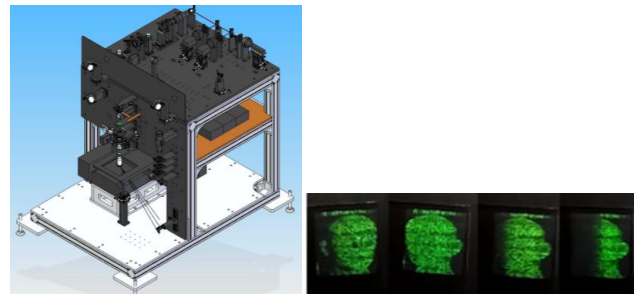


그림 7. DHP 시스템 및 HPO 홀로그램

### 4. 결론

본 논문에서는 홀로그래픽 스테레오그램 프린터를 구축함에 있어 전체 운용을 담당하는 통합 제어 구조를 제안하고 각 모듈 별 기능 및 기술적인 고려사항을 기술하였다. 구체적으로는 광학 셔터 제어, SLM 제어 및 필름 이송 시스템 제어에 대한 구조를 제안하고 이를 기반으로 기능을 정의한 후 구축 시험하였다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합 원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [MKE-2013-10039169, 디지털 홀로그래픽 3D 디스플레이 및 기록 시스템 원천 기술 개발]

### 참조문헌

- [1] 이봉호, 김재한, 이광순, 정원식, 김태원, 허남호, “디지털 홀로그래픽 기록 기술 동향”, 전자통신동향분석, 통권 138 호, 제 27 권, 2012.
- [2] Hoonjong Kang, Elena Stoykova, Jiyung Park, Sunghee Hong and Youngmin Kim (2013), “Holographic Printing of White-Light Viewable Holograms and Stereograms,” Holography – Basic Principles and Contemporary Applications, Dr. Emilia Mihaylova (Ed.), ISBN: 978-953-51-1117-7, InTech, DOI: 10.5772/53412.
- [3] Michael W. Halle, “The Generalized Holographic Stereogram. Master’s thesis,” Department of Architecture and Planning, Massachusetts Institute of Technology, February (1991).
- [4] 김태원, 오관정, 이봉호, 추현곤, 문경애, 김진웅, “디지털 홀로그래픽 프린팅을 위한 효율적인 홀로그래픽 스테레오그램 생성”, 한국광학회 하계학술대회, 2013.
- [5] 김재한, 이광순, 허남호, “3D 영상재현을 위한 디지털 스테레오그램 기록시스템에서의 광특성 측정 및 제어,” W2.3-4, 한국방송공학회 하계학술대회, 2013.