특집논문 (Special Paper)
방송공학회논문지 제17권 제6호, 2012년 11월 (JBE Vol. 17, No. 6, November 2012)
http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2012.17.6.964
ISSN 1226-7953(Print)

Depth+RGB 카메라 기반의 수직 리그를 이용한 고화질 디지털 홀로그래픽 비디오 생성 시스템의 구현

구 자 명[a)], 이 윤 혁[a)], 서 영 호[a)], 김 동 욱[a)‡]

System Implementation for Generating High Quality Digital Holographic Video using Vertical Rig based on Depth+RGB Camera

Ja-Myung Koo[a)], Yoon-Hyuk Lee[a)], Young-Ho Seo[a)], and Dong-Wook Kim[a)‡]

요 약

본 논문에서는 최근 관심이 고조되고 있는 3차원 입체 비디오 처리 기술의 최종 목표인 디지털 홀로그램을 생성하는데 필요한 객체의 좌표와 색상정보가 들어있는 RGB 영상와 깊이 영상을 획득하여 디지털 홀로그램으로 변환하는 시스템을 제안한다. 먼저, 가시광선과 적외선의 파장을 이용하여 파장에 따라 투과율이 달라지는 콜드 미러를 사용하여 같은 시점을 갖는 RGB와 깊이 영상을 얻는다. 카메라 시스템이 갖는 다양한 왜곡을 없애기 위한 보정과정을 거친 후에 해상도가 서로 틀린 RGB 영상과 깊이 영상의 해상도를 조절한다. 그리고 깊이 정보를 이용하여 디지털 홀로그램으로 구현할 객체를 추출한다. 마지막으로 컴퓨터 생성 홀로그램 (computer-generated hologram, CGH) 알고리즘을 이용하여 추출한 객체를 디지털 홀로그램으로 변환한다. 제안한 시스템의 각 알고리즘은 C/C++/CUDA로 구현하였고, LabView 환경에서 이들을 통합하였다. 고속화를 위하여 홀로그램을 생성하는 것은 범용 그래픽처리유닛 (general-purpose computing on graphics processing unit, GPGPU)를 이용하였다. 제안한 시스템을 이용하여 생성한 디지털 홀로그램은 기존의 것보다 더욱 우수한 화질을 가진다는 것을 확인하였다.

Abstract

Recently the attention on digital hologram that is regarded as to be the final goal of the 3-dimensional video technology has been increased. A digital hologram can be generated with a depth and a RGB image. We proposed a new system to capture RGB and depth images and to convert them to digital holograms. First a new cold mirror was designed and produced. It has the different transmittance ratio against various wave length and can provide the same view and focal point to the cameras. After correcting various distortions with the camera system, the different resolution between depth and RGB images was adjusted. The interested object was extracted by using the depth information. Finally a digital hologram was generated with the computer generated hologram (CGH) algorithm. All algorithms were implemented with C/C++/CUDA and integrated in LabView environment. A hologram was calculated in the general-purpose computing on graphics processing unit (GPGPU) for high-speed operation. We identified that the visual quality of the hologram produced by the proposed system is better than the previous one.

Keyword : digital hologram, computer-generated hologram (CGH), RGB+depth camera, vertically structured camera system

Ⅰ. 서 론

3차원 입체 비디오 서비스는 단순한 2차원 비디오와는 달리 영상에 나타난 물체들의 거리감, 입체감 등을 제공하는 서비스로, 차세대 정보통신 서비스의 중심이 될 것이라고 주목받고 있다. 특히, 영화 '아바타'가 3D 영상의 열풍을 이끌면서 세계 3D 관련 업체들이 지금까지 연구하고 준비하던 기술들을 개방하기 시작하였고, 3D 관련 콘텐츠 편집, 제작하는 도구와 3차원 영상 획득 장치까지 여러 분야에 관련된 것들이 출시가 되었다.

3차원 입체 비디오는 표현 방식에 따라 양안식, 다안식, IP(Integral Photography), 파노라마, Omni, 다시점, 홀로그램 등으로 분류할 수 있는데, 현재의 3D 비디오 서비스는 주로 좌우의 두 시점 영상을 이용한 스테레오스코피(stereoscopy) 방식이며, 셔터 글라스 방식 또는 편광 방식의 안경식 모니터를 사용하고 있다. 현재, 시청자들이 3D 안경으로 영상을 즐길 때, 안경을 착용하는 불편함뿐만 아니라, 현기증, 피로감과 같은 문제점이 나타나고 있다[1][2]. 이를 해결하기 위해서 다시점(multi-view) 또는 극초다시점(ultra multi-view), 궁극적으로는 오토스테레오스코피(auto-stereoscopy) 기술이 개발되고 있다. 하지만 아직까지 현재의 기술 수준으로는 무안경 방식이 더욱 큰 불편감을 주고 있으며, 과다한 전송 데이터 양 때문에 아직까지는 이른 것으로 판단이 되고 있다. 입체 영상을 시청하는데 시청자의 안전에 문제가 발생하면서 국제 표준화기구[3] 및 일본[4]에서 시청자들의 안전한 시청을 위하여 가이드라인을 발표한 바 있으며, 우리나라에서도 '3DTV 방송 안전 가이드라인'을 발표하였는데, 이 문서에서는 시청안정성을 위한 시청 및 콘텐츠 제작 가이드라인을 제시하고 있다[5].

이렇게 3D 콘텐츠를 시청하는데 문제점들이 나타나면서 이를 동시에 해결할 수 있는 방법으로, 공간상에 3D영상을 맺혀 영상을 일반 사물처럼 보듯이 안경을 착용하지 않고 볼 수 있는 홀로그램에 대한 관심이 높아지고 있다. 홀로그램 비디오는 빛의 세기뿐만 아니라 위상 정보까지 포함하여 원래의 3차원 입체상을 공간상에 정확히 재현할 수 있는 가장 이상적인 입체 시각 시스템이며, 결국에는 3차원 입체 비디오 처리 기술의 최종 목표는 완전한 입체를 구현한 홀로그램 서비스인 것이다. 홀로그램은 1946년 Dennis Gabor에 의해 최초로 제안된 이래 3차원 정보를 기록할 수 있다는 특징 때문에 많은 관심을 끌었고, 그리고 1966년 이후 많은 연구자들이 컴퓨터에 의한 홀로그램(computer- generated hologram, CGH)의 제작을 주로 유럽, 미국, 일본에서 꾸준히 연구해 오고 있다[6][7].

지금까지는 각 단위기능에 대한 연구가 대부분을 차지하고 있는데, 즉, 여러 가지 디지털 홀로그램의 생성 방법 및 그와 연계된 디스플레이 방법, 디지털 홀로그램을 디스플레이하기 위해 필요한 광학적 회절 장치(공간광변조기, spatial light modulator, SLM)의 해상도 증가 및 화소크기 축소, 디지털 홀로그램의 압축, 정보보안 및 정보보호, 홀로그램 프린팅 등에 대해 연구가 진행되어오고 있다. 이런 디지털 홀로그램을 CGH로 생성하기 위해서는 대상 객체의 (x, y, z)좌표와 그 점(화소)에서의 각 색상정보 (또는 luminance 정보)의 세기가 필요하다. 현실적으로는 위치 정보와 빛의 세기 정보를 구분하여 획득할 수 없으며, 일반적으로 RGB영상에서 (x,y)좌표와 빛의 세기를 얻고, 깊이 정보로부터 z좌표를 얻어 CGH를 구현하고 있다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 것처럼, CGH를 구현하기 위해서는 정확히 시점이 일치하면서 해상도가 같은 RGB영상과 깊이 영상이 필요한데 그것을 얻기 위해서 빛의 파장에 따라 투과율이 달라지는 콜드 미러(cold mirror)를 이용하여 원하는 정보를 얻고, 그것을 CGH로 구현하여 홀로그램 영상을 디스플레이하는 시스템을 제안한다. 이 시스템은 원하는 데이터 획득을 위한 카메라 시스템, 카메라 및 영상 보정, 컴퓨터-생성 홀로그램(computer-generated hologram, CGH) 생성으로 구성되어 있다. 제안하는 시스템은 LabView® 환경에서 구현되며, 각 파라미터들은 GUI를 통해 제어되도록 구현한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문이 제

a) 광운대학교(KwangWoon University)
‡ Corresponding Author : 김동욱 (Dong-Wook Kim)
E-mail: dwkim@kw.ac.kr
Tel: +82-2-940-5167 Fax: +82-2-919-3940
※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2010-0026245).
· Manuscript received September 10, 2012 Revised October 24, 2012 Accepted October 24, 2012

안하는 카메라 시스템에 대해 설명하고, 3장에서는 제안하는 카메라 시스템에 사용된 홀로그램 생성에 대해 설명한다. 4장에서는 시스템을 구현하고, 실험을 수행하여 실험 결과 및 성능을 나타내고, 이를 토대로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 타겟 시스템

본 논문이 디지털 홀로그램 서비스에 필요한 양질의 홀로그램을 생성하기 위해서는 고화질의 CGH를 얻는 것을 목적으로 하고 있는데 이를 위한 필요한 데이터를 획득장치로부터 획득한다. CGH에 필요한 데이터는 홀로그램 대상 객체에 대한 광 강도(light intensity)와 깊이 정보인데, 이를 얻기 위해서 카메라 시스템의 획득 장치로는 깊이 카메라와 RGB 카메라가 동시에 필요하다. 그리고 이 경우에는 두 카메라의 초점과 광각이 일치하여야 하는데, 이를 해결하기 위해서 두 획득영상의 시점과 해상도를 맞추는 과정이 필요하다. 그래서 본 논문에서는 디지털 홀로그램에 필요한 CGH를 생성하기 위해서 필요한 데이터인 시점과 해상도가 일치한 깊이 정보와 광 강도 정보를 쉽게 얻을 수 있는 카메라 시스템을 제안한다.

1. Depth Camera

깊이 정보를 얻는 가장 전통적인 방법은 변위 정보를 스테레오 정합에 의해 생성하는 것이며, 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 스테레오 정합으로 고품질의 깊이 정보를 얻는 것은 매우 어려운 일이다.

최근 깊이 정보를 직접 획득할 수 있는 깊이 카메라가 대중에게 널리 보급되고 있다. 깊이 카메라는 크게 두 가지 정도로 분류되는데, 하나는 TOF(time-of-flight)방식이고, 또 하나는 구조광(structured light)을 이용한 스테레오 정합 방식이다. 다음 그림 1에서 이 두 방식의 대표적인 카메라들을 보이고 있다.

TOF 방식의 깊이 카메라는 특정신호를 조사할 수 있는 LED나 레이저 같은 광원과 반사된 신호를 검출하는 센서로 구성된다. 이 방식은 카메라에서 신호를 조사하고, 이 신호가 반사되는 신호의 상관도를 계산하여 거리로 환산하는 방식이다. SR4000은 적외선 등의 빛을 발광부에서 조사하고 물체에 부딪쳐 반사되어 돌아오는 빛을 검출 후, 거리를 계산하는 방식이다. TOF 방식은 세부적으로는 여러 방법이 사용되나, 조사파와 반사파의 위상 차이를 이용하는 방법이 가장 많이 사용되며, SR4000도 이 방식을 사용하고 있다[8].

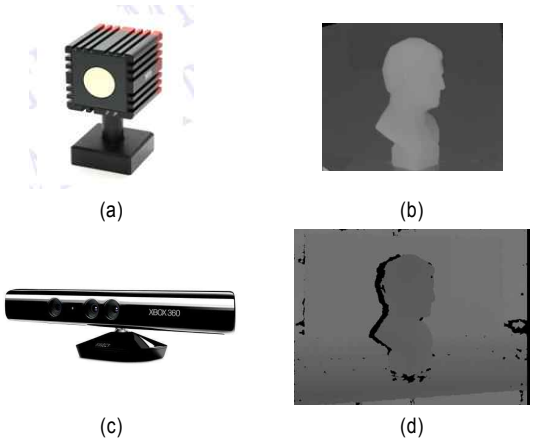


그림 1. 대표적인 깊이 카메라: (a) SR4000, (b) SR4000 깊이영상, (c) kinect, (d) kinect 깊이영상
Fig. 1. representative depth camera: (a) SR4000, (b) depth image by SR4000, (c) kinect, (d) depth map by kinect

다음 수식은 앞에서 말한 방식으로 깊이 값을 구하는 수식이다.

$$z = \frac{1}{2}\frac{c\Delta\phi}{\omega} \tag{1}$$

c는 조사광의 속도, ω는 조사광의 각주파수, $\Delta\phi$는 조사파와 반사파의 위상 차이를 각각 나타낸다. 즉, TOF방식은 조사된 파와 입사된 파의 위상차로 거리를 측정하는 것이다. 이 방식을 사용하는 SR4000는 그림 1(b)에 나타난 것처럼 정확성이 높고 양질의 깊이 정보를 제공한다. 하지만 해상도가 낮은 단점이 있다.

Microsoft사에서 출시한 스테레오 정합 방식을 사용하는

Kinect는 빛을 조사하는 발신부와 반사파를 감지하는 수신부가 일정 간격 분리되어 있다. 따라서 특정한 패턴을 갖는 적외선 구조광을 조사하고, 물체에 반사되어 돌아오는 파를 조사한 파와 스테레오 정합하여 깊이 정보를 추출하는 구조이다[9]. 그리고 Kinect는 그림 2에서 나타난 것처럼 한 장면을 RGB와 depth를 동시에 촬영이 가능하다. 이 카메라는 상대적으로 높은 해상도를 갖고 있지만 그림 1(d), 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 스테레오 정합에 의해서 폐색영역(occlusion)이 발생하여 깊이 정보의 화질이 나쁘다는 큰 단점을 갖고 있다. 디스플레이할 객체에 대한 정보가 정확하면 CGH에 의해 생성되는 홀로그램의 질도 높아지기 때문에 객체에 대한 정확한 깊이 정보가 필요하다. 그래서 본 논문에서는 양질의 깊이 정보를 제공하는 SR4000을 시스템에 사용한다.

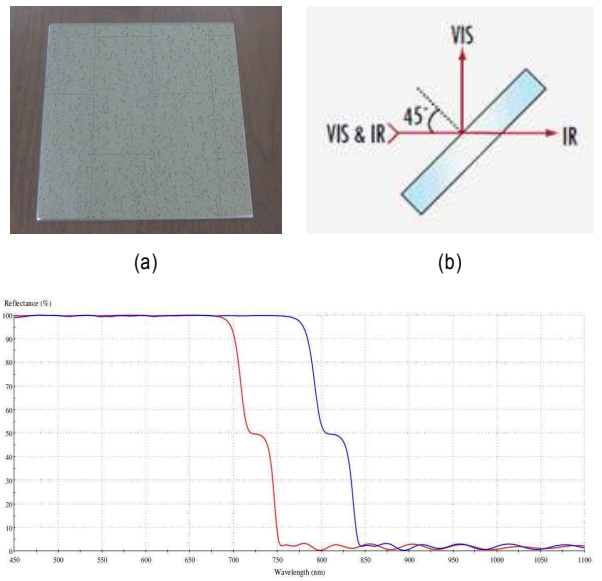
(a) (b)

그림 2. kinect RGB+depth 영상의 예: (a) RGB 영상, (b) 깊이 영상
Fig. 2. RGB + depth images by kinect: (a) RGB Image, (b) depth image

2. 콜드 미러

앞서 말한 것처럼 CGH를 생성하기 위해서는 대상 객체의 (x, y, z)좌표와 그 점에서의 각 색상정보(또는 광 강도 정보)가 필요하다. 이를 위해서 RGB영상에서 (x,y)좌표와 빛의 세기를 얻고, 깊이 정보로부터 z좌표를 얻어야 한다. 그러나 현존하는 기술로는 RGB영상과 깊이영상을 따로 얻는 경우가 대부분이다. 이 경우에는 두 영상의 장면이 정확히 일치하지 않거나, 서로 해상도가 다른 경우가 대부분이다. 따라서 본 논문에서는 이를 해결하기 위해서 사용하는 카메라의 특성을 이용하여 시점이 일치하면서 해상도가 같은 영상을 획득할 수 있는 카메라 시스템에 대해 기술한다.

양질의 깊이 정보를 얻기 위해서 선택한 SR4000은 깊이 정보를 얻기 위해서 적외선 수신부 주변에 있는 적외선 발생기로 물체에 조사하여 물체에서 반사되어 돌아오고, RGB카메라는 일반적으로 가시광선으로 피사체를 찍기 때문에 두 카메라의 적외선과 가시광선의 파장을 이용한다면 같은 시점의 광 강도와 깊이 정보를 얻는 것이 가능하다. 그래서 우리는 빛에 파장에 따라 투과율이 달라지는 콜드 미러를 제작하였다. 다음 그림 3(a)는 제작한 콜드 미러이다.



(a) (b)

(c)

그림 3. 콜드 미러의 특성: (a) 콜드 미러, (b) 콜드 미러의 입사각, (c) 콜드 미러의 분광특성
Fig. 3. characteristic of cold mirror: (a) cold mirror, (b) incident angle of cold mirror, (b) spectral characteristics of mirror

그림 3(b)에서 볼 수 있듯이 콜드 미러를 45도로 고정시킨 후, 카메라로 촬영하면 파장에 따라 빛이 투과 또는 반사가 된다. 그래서 우리는 같은 시점에 depth+RGB를 만들기 위해서 콜드 미러에 그림 3(c)처럼 분광특성을 부여하여 가시광선은 90도로 반사가 되지만 적외선은 투과하게 콜드 미러를 제작하였다. 그림 3(c)의 파랑 그래프는 실험을 위해 이전에 제작한 콜드 미러의 분광특성으로 실험하면서

콜드 미러에 의한 RGB영상의 변화는 없었지만 깊이 카메라로부터 얻은 깊이영상을 보면서 콜드 미러에 대한 적외선 투과율에 문제가 있다고 판단한 후, 우리 카메라 시스템에 적합한 분광특성을 찾아 제작한 것이 빨강 그래프의 분광특성을 갖는 콜드 미러이다.

3. 제안한 카메라 시스템

홀로그램을 생성하기 위해서는 아주 정밀한 깊이 정보가 필요하다. 그렇기 때문에 훌륭한 홀로그램 시스템을 위해서는 좋은 깊이 카메라를 써야 하고, 깊이 카메라 자체에서 정확한 광 강도 정보를 주지 않기 때문에 홀로그램 생성을 위해서 정확한 RGB 또한 필요하다.

이를 해결하기 위해서 수직리그를 제작을 하였는데, 그림 4은 같은 시점에 대한 깊이 영상과 RGB 영상을 촬영 가능하도록 우리가 제작한 depth+RGB 수직 리그의 사진이다. 이전에 콜드 미러에 대한 설명에서 알 수 있듯이 같은 시점에 대해 촬영한 깊이 영상과 RGB영상을 얻기 위해서 그림 4처럼 수직리그에 콜드 미러를 45도로 고정을 시킨다. 이렇게 함으로서 깊이 카메라는 정면 촬영을, RGB 카메라는 90도 반사 촬영이 되면서 같은 시점에 대한 깊이 영상과 RGB 영상 획득이 가능하게 된다. 그리고 수직리그는 원하는 카메라 배치 및 고정을 할 수 있으며, 정확한 촬영을 위해서 카메라의 수평 교정을 세밀하게 하는 것이 가능하다.

그림 4. 수직 리그
Fig. 4. Vertical rig

그림 5는 CGH 생성에 필요한 데이터인 depth+RGB 영상을 획득하기 위해서 제안하는 시스템 구조이다.

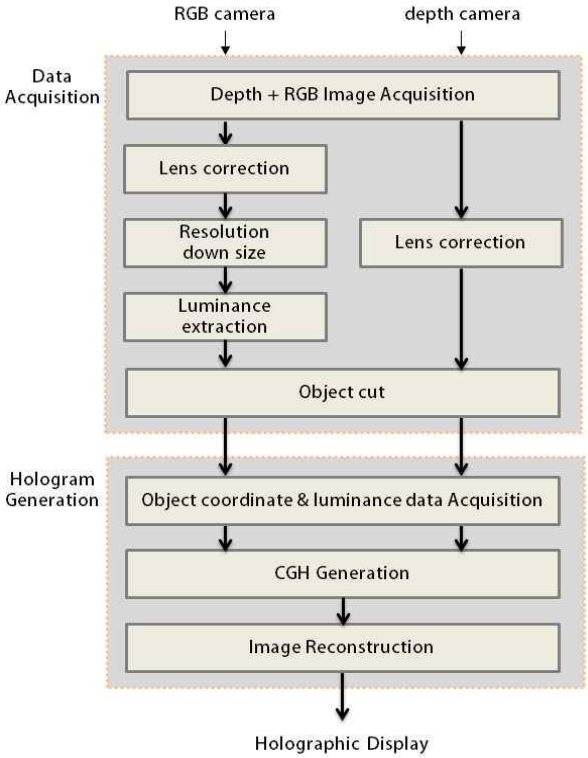


그림 5. 카메라 시스템의 구성도
Fig. 5. Structural diagram of the camera system

CGH생성에 필요한 영상 획득과정에서 먼저, 카메라로 통해 얻은 영상에는 카메라 렌즈에 의해 생긴 왜곡이 존재하기 때문에 이를 해결하기 위해서 획득한 depth+RGB 영상을 각각 왜곡 교정한다. 그 다음, 획득한 영상들의 해상도가 서로 틀리기 때문에 RGB 영상의 해상도를 깊이 영상에 맞게 조정한다. RGB 영상의 해상도를 그대로 깊이 영상의 해상도에 맞춘 후, 만약 광각이 일치하지 않아 촬영한 피사체에 크기가 서로 틀린다면 RGB의 해상도를 깊이 영상의 광각에 맞게 조절한다. 그 다음 RGB 영상의 중심을 기준으로 깊이 영상의 해상도만큼 RGB 영상을 자르면 된다. 하지만, 깊이 영상과 RGB 영상의 해상도가 일치해도 시점이 안 맞는 경우가 발생하기 때문에 RGB 영상에 중심 기준으

로 자르는 위치를 x,y 방향으로 조절하여 깊이 영상과 동일한 시점이면서 깊이 영상의 해상도와 일치하는 RGB 영상을 얻을 수 있다. 그 다음 CGH 생성에 필요한 데이터인 광 강도를 RGB 영상에 있는 빨강, 초록, 파랑성분을 이용하여 추출한다. 마지막으로 홀로그램으로 생성할 객체에 대한 데이터만을 얻기 위해서 깊이 영상의 depth정보를 이용해서 객체가 아닌 부분들을 제외시킨다. 영상 획득과정이 끝난 후, 얻은 정보들과 CGH 알고리즘을 이용하여 CGH를 생성한 후, 마지막으로 디지털 홀로그램을 영상으로 복원한다. 다음은 CGH 생성 및 홀로그램 복원에 대해서 설명한다.

III. 홀로그램 생성

디지털 홀로그램은 홀로그래피의 간섭무늬를 CCD 카메라에 기록하고 비디오 신호로 전송하여 수신 단에서 SLM (Spatial Light Modulator)에 표시된 간섭무늬에 레이저광을 조사함으로써 영상을 재생하는 기법이다. 다음 그림 6은 디지털 홀로그램의 촬영과 복원 과정을 간략히 도식화 한 것이다. 디지털 홀로그램은 레이저광을 집광 렌즈로 평행광을 만들고, 빔 분리기로 참조파와 객체파로 나눈다. 객체파는 객체에 조사된 다음 참조파와 함께 직접적으로 CCD에 조사되어 간섭무늬를 형성한다. 간섭무늬를 SLM에 인가하고 여기에 평행 광을 조사하면 1차 회절 광이 발생하면서 실사 영상을 재생할 수 있게 된다[14]. 홀로그램은 그림 6와 같은 방법으로도 취득할 수 있지만 이러한 광학 시스템 자체를 수학적으로 모델링한 연산에 의해서 취득할 수도 있다. 이러한 수학적인 연산을 통해 얻는 방법을 CGH라고 한다.

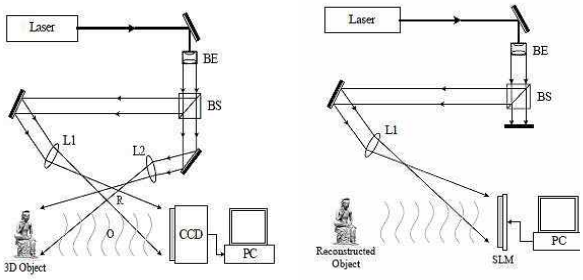


그림 6. 디지털 홀로그램 획득 및 영상복원: (a) 획득, (b) 복원
Fig. 6. Digital hologram acquisition and its image reconstruction: (a) acquisition, (b) reconstruction

1. Computer-Generated Hologram(CGH)

홀로그램은 간섭현상을 일으키는 장치나 도구를 휴대하기 용이치 않으며, 사용하는데 매우 복잡하고 정교하기 때문에 CGH로 생성한 다음 디지털 홀로그램으로 사용한다[10][11]. 홀로그램은 두 개의 광파(물체파와 기준파)를 간섭시켜서 만드는 프린지 패턴(fringe pattern)인데, CGH는 기존에 발표된 두 광파의 간섭현상을 수학적으로 모델링한 것으로, 식 (2)에 그 식을 나타내었으며, 홀로그램이나 물체평면의 크기($p_j x_j, p_j y_j$)에 비해 홀로그램과 물체와의 거리($p_j z_j$)가 충분히 크면 식 (2)를 식 (3)으로 간략화 할 수 있다.

$$I_{\alpha j} = \sum_j A_j \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{(p_\alpha x_\alpha - p_j x_j)^2 + (p_\alpha y_\alpha - p_j y_j)^2 + (p_j z_j)^2}\right] \quad (2)$$

$$I_{\alpha j} \approx \sum_j A_j \cos\left[2\pi\left\{\frac{p_j z_j}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda p_j z_j}\left[(p_\alpha x_\alpha - p_j x_j)^2 + (p_\alpha y_\alpha - p_j y_j)^2\right]\right\}\right] \quad (3)$$

여기서, $I_{\alpha j}$는 물체평면의 좌표 (x_j, y_j, z_j)의 광원(빛의 세기 A_j)이 홀로그램 평면의 좌표 (x_α, y_α)에 미치는 간섭영향을 나타내고, p_α와 p_j는 홀로그램평면의 화소크기와 물체평면의 화소크기를 각각 나타낸다. 간섭현상을 일으키는 두 광파는 동일한 것으로 간주하고(분파하여 사용함), 그 파장은 λ이다.

식 (3)에서 코사인 함수를 분리하여 계산할 수 있고, 또 홀로그램 평면의 한 열에서 맨 좌측 또는 한 행에서 맨 위의 화소 값을 계산한 후, 그 때 생성된 중간결과들을 반복연산하면 나머지 화소 값들을 계산할 수 있다. 이때, 하나의 광원이 모든 홀로그램 화소에 미치는 영향을 계산하면 물체 화소의 z_j 변화를 최소로 할 수 있다[12]. 그러나 이 방법은 각 광원으로 홀로그램 전체에 미치는 영향을 계산한 결과

를 다음 광원에 대한 영향을 계산하기 전에 메모리에 저장하였다가 다음 광원에 누적덧셈을 하기 위해서 다시 메모리에서 꺼내야 하기 때문에 메모리 접근횟수와 그에 따른 시간 때문에 병목현상이 심하게 발생한다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서 본 연구팀은 한 홀로그램 화소에 모든 광원이 미치는 영향을 계산한 후, 다음 홀로그램 화소로 진행하는 방식을 제안하여, 다른 모든 성능은 변함이 없고 메모리 접근 횟수를 약 1/20,000로 줄인 계산방식을 제안한 바 있으며[13], 본 논문에서도 이 방법을 사용한다.

2. GPU를 이용한 고속 생성

CGH 기법은 각 광원에서 생성되는 디지털 홀로그램들을 한 장으로 축적하면 3D 객체에 대한 디지털 홀로그램이 생성되는데 이 과정이 전체적으로 상당한 연산량을 필요로 한다. 예를 들어, 생성하려는 3D 객체의 크기가 200×200이고 생성하려는 디지털 홀로그램의 크기가 1,024× 1,024이라면, 총 41,943,040,000번을 연산해야 디지털 홀로그램 한 장을 생성할 수 있다. 이런 방대한 연산량을 해결하는 방법으로 GPU를 이용하여 홀로그램의 각 광원에 대한 CGH 연산이 CUDA를 통해서 병렬적으로 동시에 처리하는 것이다. 그림 7처럼 3D 객체의 각 광원을 각각의 쓰레드로 CGH연산을 수행하여 디지털 홀로그램을 한 장 생성하는 것이다. 그리고 이러한 과정이 3D 객체의 모든 광원에서 반복된다.

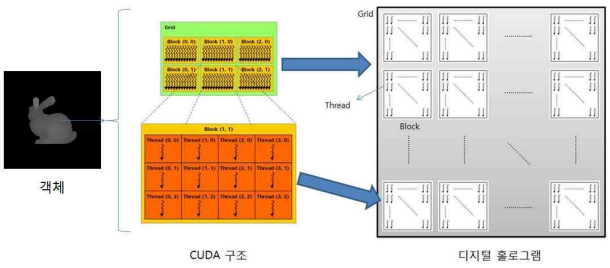


그림 7. CUDA를 이용한 디지털 홀로그램 생성
Fig. 7. Generation of digital hologram using CUDA

GPU를 구성하고 있는 스트림 코어의 개수가 많으면 많을수록 동시에 연산할 수 있는 처리 개수도 늘어나기 때문에 일반적으로 단일의 GPU기반보다 다수의 GPU기반으로 사용했을 때가 성능이 더 뛰어나다[17]. 본 논문에서는 CGH를 고속으로 연산하는 방법으로 다수 GPU를 병렬적으로 동작할 수 있게 지원하는 Labview를 이용하여 다수 GPU 기반으로 병렬처리 연산을 통해 고속으로 연산하는 방법을 사용한다.

그림 8은 Labview를 활용하여 병렬적으로 동작하는 CUDA 시스템과 이를 이용한 고속 CGH연산 과정을 보여주고 있다. 3D 객체의 정보(광원의 좌표, 깊이 정보)를 GPU의 개수만큼 균등 분할하여 각 GPU의 CUDA 커널에 전송한 후, 각 커널은 병렬적으로 전송받은 데이터를 CGH 수식에 대입하여 연산을 한다. 연산 후 생성된 각각의 디지털 홀로그램들을 한 장으로 축적하면 원하는 객체의 디지털 홀로그램이 생성된다.

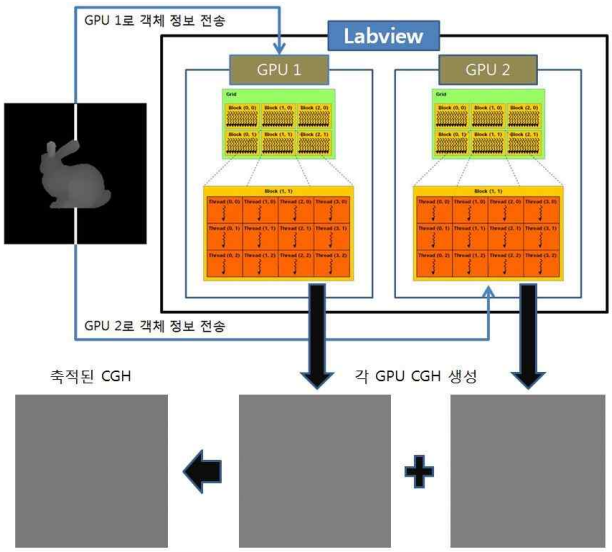


그림 8. Multi-GPU 기반에서의 디지털 홀로그램 생성
Fig. 8. Generation of digital hologram based on Multi-GPU

3. 홀로그램 복원

홀로그램 영상을 복원하기 위해서는 광학장치를 이용한다. 또한 연구단계에서는 생성한 홀로그램을 테스트하기 위해서 S/W 방식으로 어느 특정한 거리에서 홀로그램을 재생하는 것으로 가정하여 복원할 수 있다.

홀로그램 영상을 복원하는 광학장치을 이용하여 홀로그램을 생성할 때 CGH를 SLM에 다운로드하고 생성 때와 동일한 파장의 광원을 조사하여 복원한다. 영상복원 장치는 획득장치와 매우 유사하며, 분파된 두 광파 중 참조파만을 사용한다. 디지털 홀로그램 영상을 복원할 때 획득과 동일한 광원을 사용하는 것이 일반적이며, 획득과 동일한 조건의 장치를 사용한다. 디지털 홀로그램은 광파의 회절현상을 적절히 일으키는 장치(공간광변조기, SLM)에 띄우고, 여기에 획득할 때의 기준파와 동일한 광파를 조사하면 원래의 물체 위치에 그 물체의 영상이 맺히게 된다.

S/W적인 복원 방법은 홀로그램을 2차원 영상으로 취급하여 확인하고 화질을 테스트하기 위한 것이다. 2차원으로 복원하는 것이라 특정 거리에서만 복원이 되기 때문에 이 경우는 복원될 거리를 지정해준 다음, 그 거리의 평면에 맺히는 2차원 영상을 복원하게 된다. 이를 위해 식 (4)에 정의된 Fresnel 변환을 이용하였다[10][15]. Fresnel 변환은 본 논문의 초점이 아니기 때문에 자세한 설명은 참고문헌으로 대신한다.

$$F(x,y)=\frac{e^{ikz}}{i\lambda z}e^{\frac{i\pi}{\lambda z}(x^2+y^2)}\iint f(\xi,\eta)e^{\frac{i\pi}{\lambda z}(\xi^2+\eta^2)}e^{-\frac{i2\pi}{\lambda z}(\xi x+\eta y)}d\xi d\eta \quad (4)$$

여기서 $F(x,y)$와 $f(\xi,\eta)$는 각각 복원된 영상과 홀로그램 영상의 화소 값을 나타내며, $i=\sqrt{-1}$ 이다. z는 복원 영상의 깊이 값을 나타내며, k와 λ는 사용한 광파의 파수(wave number)와 파장을 각각 나타낸다.

Ⅳ. 시스템 구현 및 결과

본 논문이 제안하는 시스템은 National Instrument사의 LabView® 환경에서 구축하였으며, 시스템에 필요한 각 기능들은 LabView® 환경에 맞는 라이브러리로 만들었다. 그리고 총 3개의 GPGPU를 사용하여 CGH 생성에 두 개, 테스트를 위한 S/W 방식의 홀로그램 영상복원에는 1개를 각각 사용하였다. 우리가 사용한 GPGPU는 nVidia사의 GPU를 사용하여, CUDA®로 프로그래밍하였고, GPGPU를 사용하지 않은 나머지 기능들은 C/C++로 프로그래밍하였다.

앞에서 설명한 것과 같이 디지털 홀로그램 생성에 필요한 데이터 획득을 위해 사용한 카메라는 MESA Image사의 SR4000®을 사용하였으며, 이 카메라의 깊이영상 해상도는 176×144이다. RGB카메라는 Allied Vision Technologies사의 Pike F210C IRF24[16]이고, 이 카메라의 RGB영상 해상도는 1,920×1,080이다. CGH는 1,024×1,024의 해상도로 생성하였으며, 광학장치에 의한 홀로그램 복원을 하기 위해서는 1,920×1,080의 해상도(SLM의 해상도)로 생성하였다.

1. 실험 결과

그림 9는 수직리그와 콜드 미러를 이용한 카메라 시스템으로 필요한 데이터를 획득한 후, 데이터를 사용하여 CGH 및 홀로그램 영상 복원 결과이다.

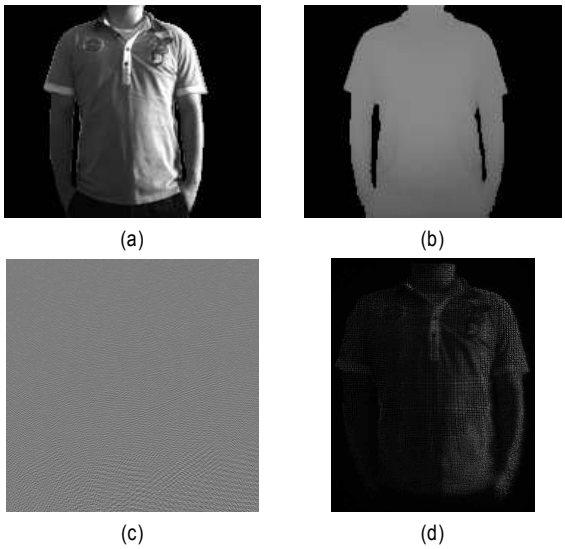


그림 9. CGH 생성 과 영상복원 예: (a) 객체의 광 강도 영상, (b) 객체의 깊이 영상, (c) 생성한 CGH, (d) 복원영상
Fig. 9. CGH generation and image reconstruction: (a) luminance image of object, (b) depth image of object, (c) CGH generation, (d) reconstruction image

그림 9(a)와 (b)는 획득한 영상에서 깊이 정보를 이용하여 홀로그램으로 생성할 객체에 대한 데이터만을 얻기 위해서 객체가 아닌 부분들을 제외시킨 영상으로, 각각 광 강도 영상과 깊이영상이다. 그림 9(c)는 획득한 그림 9(a)와 (b)를 이용하여 앞에서 언급한 CGH 알고리즘으로 생성한 CGH이며, 그림 9(d)는 생성한 CGH를 식 (4)의 Frensnel 변환을 적용하여 복원한 영상이다. 그림 9에서 알 수 있듯이 제안한 카메라 시스템으로 CGH생성에 필요한 데이터를 쉽게 획득 할 수 있고, 양질의 광 강도와 깊이 정보를 획득함으로서, 그것을 이용하여 뛰어난 홀로그램 복원 영상을 얻을 수 있다.

2. 시스템 구현

그림 10에 본 논문이 제안하는 시스템을 구현한 결과의 최상위 계층에 해당하는 LabView 프로그램 결과를 보이고 있다. 내부 기능블록은 시스템 구성도에서 설명한 기능들을 수행한다. 윗 부분은 깊이 카메라로부터 깊이 정보를 나타내고, 아래 부분은 RGB 카메라로부터 광 강도 정보를 얻게 각각 구현되어 있다. 카메라 렌즈에 의한 왜곡을 없애주는 왜곡 교정 기능블록이 존재하고, RGB 영상 획득 부분에서는 깊이 영상의 해상도에 맞추기 위한 해상도 조절 기능이 존재한다. 또한 깊이 정보를 이용하여 객체만의 정보를 얻고, 뒷 부분에는 얻은 정보를 이용하여 CGH 생성 및 영상 복원하는 기능블록이 구현되어 있다.

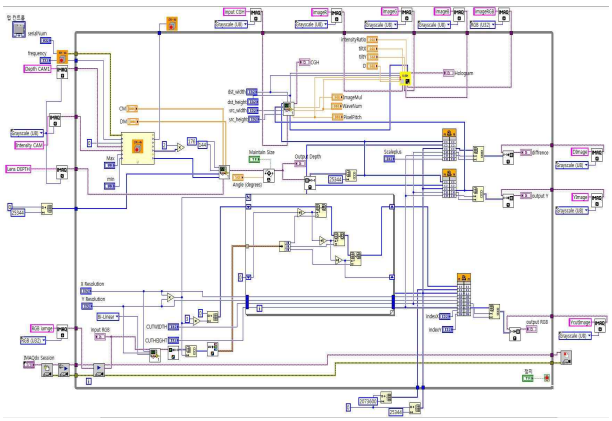


그림 10. 최상위 계층의 구현 결과
Fig. 10. Top-level implementation result

그림 11은 이 시스템을 동작시키기 위해 설계한 GUI를 보이고 있다. 맨 위에 있는 4개의 사진 중에서 맨 왼쪽에 2개의 사진은 RGB 카메라로부터 획득한 영상으로 왼쪽은 RGB 영상이고 오른쪽은 광 강도 영상이다. 맨 위 3번째 사진은 깊이 카메라로부터 얻은 깊이 영상으로, 깊이 정보를 이용하여 홀로그램으로 만들 객체만을 나타내고 있다. 위에 있는 두 개의 숫자 쌍 표시창은 여러 카메라를 사용할 경우 원하는 카메라를 선택할 수 있게 조절 가능한 사용하는 카메라의 번호와 사용 변조주파수를 각각 나타낸다. 맨 위에 4번째 사진은 깊이 정보를 이용하여 홀로그램으로 만들 객체의 광 강도 영상이다.

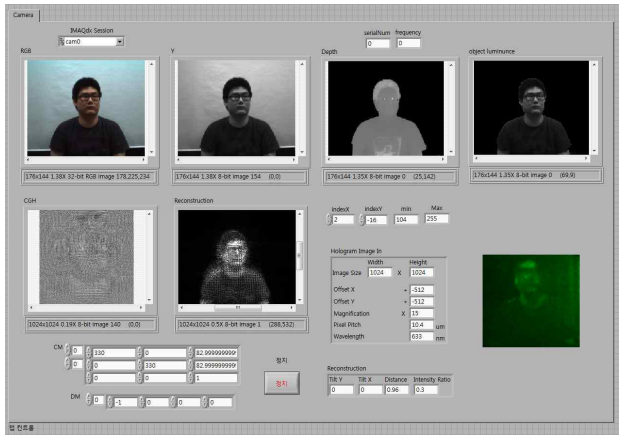


그림 11. 시스템 동작을 위한 GUI
Fig. 11. GUI for system operation

그 아래의 두 영상 중 좌측은 생성된 CGH, 우측은 시뮬레이션에 의해 복원된 영상이며, 광학장치에 의해 복원된 영상을 촬영한 것은 맨 오른쪽에 있다. CGH와 시뮬레이션에 의해 복원된 영상 아래에 있는 표시창은 카메라 렌즈 왜곡을 없애기 위한 왜곡 교정에 필요한 카메라 내부 파라미터와 왜곡 조절 파라미터이아, 우측 맨 위에 표시창 중에 왼쪽 2개는 광 강도 영상과 깊이 영상의 인덱스를 맞게 조절 가능한 조절창이며, 우측에 min과 max 표시창은 깊이 영상의 깊이값의 최소와 최대값을 8-비트 스케일로 나타낸다. 그리고 아래에 있는 작은 표시창들은 홀로그램 생성에

사용된 파라미터들을 나타내고 있는데, CGH의 높이와 너비, 광원의 확대배율, 광원과 CGH의 화소크기, 사용한 광파의 파장, 물체평면과 홀로그램 평면간의 거리, 복원영상의 밝기 배율, 카메라에 대한 CGH 및 복원영상의 좌우 회전 각도를 각각 나타내고 있다.

GUI 환경에서 각 기능별 평균 수행시간을 표 1에 나타냈다. 표 1의 항목 중 영상획득, 왜곡 보정과 CGH 생성은 각각 병렬로 수행된다. 모든 기능이 CGH 생성과는 프레임 단위로 병렬적으로 수행된다고 간주할 수 있기 때문에 이 시스템의 동작 수행시간 중 가장 긴 것에 의해 전체적인 시스템의 동작속도가 결정된다. 표 1에서 보는 바와 같이 CGH 생성이 가장 긴 시간을 소요하므로 이 기능을 시스템에 포함할 경우 프레임당 219[ms]가 소요된다. 생성된 디지털 홀로그램을 SLM을 이용하여 디스플레이하는 것은 단순한 비디오 출력이기 때문에 수행시간에 영향을 주지 않는다. 따라서 본 시스템은 초당 약 4.6장의 디지털 홀로그램을 생성할 수 있다. 만일 동작 중에 S/W적인 복원을 수행하여 테스트하고자 한다면 평균 378ms의 동작시간을 갖는다. 물론 S/W를 이용한 복원은 오프라인으로 동작을 해도 무방하므로 이 시간에 대한 의미는 없다.

표 1. 기능별 프레임당 평균 수행시간
Table 1. Average execution time per frame for each function

Function	Execution time [ms]
Image acquisition	21
Lens correction	54
CGH generation	219

3. 디지털 홀로그램 비교

그림 12는 제안한 시스템과 기존의 시스템에서 생성된 디지털 홀로그램을 비교하기 위한 S/W 복원 영상이다. 그림 12(a)는 본 논문에서 제안한 수직리그를 이용한 카메라 시스템을 이용한 결과이고, 그림 12(b)는 [18]에서 발표된 시스템에 의해 생성된 복원 영상이다. 인터랙티브 서비스 시스템은 디지털 홀로그램을 위해 SR4000에서 획득된 intensity와 깊이로 영상을 복원한다. 그림 12에서 알 수 있듯이 인터랙티브 서비스 시스템은 부정확한 객체의 광 정보로 디지털 홀로그램을 생성한 것에 비해, 제안한 시스템은 객체의 실제 RGB 영상으로부터 얻은 정밀한 광 강도를 이용하였기 때문에 정확한 객체의 정보가 담긴 디지털 홀로그램의 생성이 가능하다. 인터랙티브 서비스 시스템은 카메라로부터 획득한 영상 데이터에서 홀로그램 영상 복원까지의 소요 시간은 시뮬레이션에 의해 복원할 경우는 평균 352ms, 시뮬레이션 대신 광학장치에 의한 복원의 경우는 평균 183ms이다. 그래서 우리가 제안한 방법이 초당 평균 4.6장을 생성하지만, 인터랙티브 서비스 시스템은 초당 평균 5.4장을 생성한다. 그 이유는 고화질의 디지털 홀로그램 생성하기 위해 영상 보정 과정을 거쳐 추가적인 처리 시간이 소모되었기 때문이다.

(a) (b)

그림 12. 복원 영상 비교 예: (a) 제안한 시스템의 복원 영상, (b) 인터랙티브 서비스 시스템의 복원 영상
Fig. 12. reconstruction image comparison : (a) reconstruction image of proposed system, (b) reconstruction image of Interactive Service System

V. 결 론

본 논문에서는 CGH 생성에 필요한 시점과 해상도가 일치하는 depth+RGB 영상을 간단하게 획득하여 CGH를 생성 및 영상 복원할 수 있는 카메라 시스템을 구축하였다. 먼저, 가시광선과 적외선의 파장을 이용하여 빛의 파장에 따라 투과율이 다른 콜드 미러를 사용하여 CGH 생성에 필요한 데이터인 같은 시점에 대한 RGB 영상과 깊이 영상을 획득하였다. 획득한 영상에는 카메라 렌즈에 의해 생긴 왜

곡이 존재하기 때문에 이를 해결하기 위해서 각각 왜곡을 보정하였다. 획득한 영상들의 해상도가 서로 다르기 때문에 RGB 영상의 해상도를 깊이 영상에 맞게 조정하고 RGB 영상에서 CGH 생성에 필요한 데이터인 광 강도 성분을 획득하였다. 그리고 홀로그램으로 생성할 객체에 대한 데이터만을 얻기 위해서 깊이 영상의 depth정보를 이용해서 객체가 아닌 부분들을 제외시킨 후, 마지막으로, 얻은 정보들과 CGH 알고리즘을 이용하여 CGH를 생성한 후, 디지털 홀로그램 영상으로 복원하였다.

구현 결과 광학장치에 의한 영상복원의 경우 프레임당 평균 219ms 소요가 되며, 초당 약 4.6장의 디지털 홀로그램을 생성할 수 있다. 만일 시뮬레이션에 의한 영상 복원을 수행하여 테스트하고자 한다면 프레임당 평균 378ms가 소요된다. 현재 고화질의 홀로그램 생성이 가능하지만, 아직 성능이 실시간에 미치지 못하고 있다. 고속 알고리즘을 개발하여 시스템 속도를 실시간 동작 속도로 높이는 것이 필요하며, 이것이 본 연구팀의 향후 연구 분야이기도 하며, 향후 디지털 홀로그램의 서비스 시스템을 구축할 때 본 논문의 구현 방법 및 결과가 좋은 기반기술이 될 수 있으리라 기대한다.

참 고 문 헌

[1] T. Motoki, H. Isono, and I. Yuyama, “Present Status of Three-Dimensional Television Research,” Proc. IEEE 83(7): 1009-1021(July 1995).

[2] Edited by O. Schreer, et al., 3D Video Communications, John Wiley & Sons Ltd., Atrium, England, 2005.

[3] ISO IWA3, Image safety reducing the incidence of undesirable biomedical effects caused by visual image sequences, 2005.

[4] 3D Consortium, “3DC Safety Guideline for Popularization of Human-friendly 3D,” 2006.

[5] Telecommunications Technology Association (TTA), “3DTV broadcast safety guidelines,” TTAK.KO-07.0086, 2010. 12. 23.

[6] T. Motoki, H. Isono, and I. Yuyama, “Present Status of Three-Dimensional Television Research,” Proc. IEEE 83(7): 1009-1021(July 1995).

[7] J. K. Chung and M. H. Tsai, Three-Dimensional Holographic Imaging, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

[8] SR4000Data Sheet, http://www.mesa-imaging.ch/prodview4k.php, MESA Imaging, Oct. 2010.

[9] J. L. Wilson, Microsoft kinect for Xbox 360, PC Mag. Com, Nov. 10, 2010.

[10] S. A. Benton and V. M. Bove, Jr., Holographic Imaging, John Wiley and Sons Inc., Hoboken NJ, 2008.

[11] Reichelt, et al., “Holographic 3-D Displays – Electro-holography within the Grasp of Commercialization”, A part of the Book named as Advances in Lasers and Electro Optics, INTECH, pp. 683-710, April 2010.

[12] T. Shimobaba, T. Ito, "An efficient computational method suitable for hardware of computer-generated hologram with phase computation by addition", Computer Physics Communications, vol. 138, pp. 44-52, 2001.

[13] Y.-H. Seo, H.-J. Choi, J.-S. Yoo, and D.-W. Kim, “Cell-based hardware architecture for full-parallel generation algorithm of digital holograms”, Optics Express, Vol. 19. Issue 9, pp. 8750-8761, 2011.

[14] P.Hariharan, Basics of Holography, Cambridge University Press, 2002.

[15] U. Schnar and W. Jueptner, Digital Holohtaphy, Springer, Berlin, Germany, 2005.

[16] http://www.alliedvisiontec.com/emea/home.html

[17] J-S Song, J-S Park, Y-H Seo, and J-I Park, “Fast Generation of Digital Hologram Based on Multi-GPU”, Journal of broadcast engineering, Vol. 16. Issue 6, pp. 1009-1017, Nov. 2011.

[18] Y-H Seo, Y-H Lee, J-S Yoo, M-B Kim, H-J Choi, and D-W Kim, “A Prototype Architecture of an Interactive Service System for Digital Hologram Videos”, Journal of broadcast engineering, Vol. 17. Issue 4, pp. 695-706, July. 2012.

저 자 소 개

구 자 명

- 2012년 2월 : 안양대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 일반대학원 석사과정(공학석사)
- 주관심분야 : 3D 영상처리, 디지털 홀로그램

저 자 소 개

이 윤 혁

- 2012년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 일반대학원 석사과정(공학석사)
- 주관심분야 : 디지털 홀로그램, SoC 설계

서 영 호

- 1999년 2월 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
- 2001년 2월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학석사)
- 2004년 9월 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
- 2003년 9월 ~ 2004년 6월 : 한국전기연구소 연구원
- 2005년 9월 ~ 2008년 2월 : 한성대학교 조교수
- 2008년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 교양학부 부교수
- 주관심분야 : 실감미디어, 2D/3D 영상 신호처리, 디지털 홀로그램

김 동 욱

- 1983년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1985년 2월 : 한양대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1991년 9월 : Georgia 공과대학 전기공학과 졸업(공학박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자재료공학과 교수
- 2000년 3월 ~ 2001년 12월 : 인티스닷컴(주)연구원
- 2006년 3월 ~ 현재 : (사)실감미디어 산업협회 이사
- 2009년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 실감미디어 연구소장
- 주관심분야 : 3D 영상처리, 디지털 홀로그램, 디지털 VLSI Testability, VLSI CAD, DSP 설계, Wireless Communication