정규논문 (Regular Paper)
방송공학회논문지 제17권 제4호, 2012년 7월 (JBE Vol. 17, No. 4, July 2012)
http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2012.17.4.695

디지털 홀로그램 비디오를 위한 인터랙티브 서비스 시스템의 프로토타입 설계

서 영 호[a)], 이 윤 혁[a)], 유 지 상[a)], 김 만 배[b)], 최 현 준[c)], 김 동 욱[a)‡]

A Prototype Architecture of an Interactive Service System for Digital Hologram Videos

Young-Ho Seo[a)], Yoon-Hyuk Lee[a)], Ji-Sang Yoo[a)], Man-Bae Kim[b)], Hyun-Jun Choi[c)], and Dong-Wook Kim[a)‡]

요 약

본 논문은 디지털 홀로그램 비디오를 서비스할 수 있는 서비스 시스템을 제안하는 것을 목적으로 한다. 이 시스템은 현존하는 2차원 또는 3차원 영상/비디오를 서비스하는 시스템의 프레임, 즉 데이터 획득, 처리, 전송, 수신, 복원의 과정을 그대로 따른다고 가정한다. 이 시스템은 또한 시청자의 시점을 추적하여 그 시점에 해당하는 디지털 홀로그램을 서비스하는 인터랙티브 동작 기능을 포함하고 있는데, 이 기능을 위해서 시청자의 시점에 해당하는 가상시점의 영상 정보를 생성하고, 이를 홀로그램으로 만들어 사용한다. 본 논문에서는 이 시스템의 주요 동작만을 포함하는 프로토타입을 구현하며, 이 시스템에는 데이터 획득을 위한 카메라 시스템, 카메라 캘리브레이션과 영상보정, 깊이와 빛의 세기 영상의 화질개선, 중간시점 영상 생성, 디지털 홀로그램 생성, 시뮬레이션과 광학장치에 의한 홀로그램 영상 복원 기능을 포함한다. 제안한 프로토타입 시스템을 구현한 결과 한 프레임의 디지털 홀로그램을 생성하고 시뮬레이션에 의해 영상을 복원하는 데까지 약 352ms가 소요되었으며, 시뮬레이션 복원 대신 광학장치로 복원할 경우는 약 183ms의 시간이 소요되었다.

Abstract

The purpose of this paper is to propose a service system for a digital hologram video, which has not been published yet. This system assumes the existing service frame for 2-dimensional or 3-dimensional image/video, which includes data acquisition, processing, transmission, reception, and reconstruction. This system also includes the function to service the digital hologram at the viewer's view point by tracking the viewer's face. For this function, the image information at the virtual view point corresponding to the viewer's view point is generated to get the corresponding hologram. Here in this paper, only a prototype that includes major functions of it is implemented, which includes camera system for data acquisition, camera calibration and image rectification, depth/intensity image enhancement, intermediate view generation, digital hologram generation, and holographic image reconstruction by both simulation and optical apparatus. The proposed prototype system was implemented and the result showed that it takes about 352ms to generate one frame of digital hologram and reconstruct the image by simulation, or 183ms to reconstruct image by optical apparatus instead of simulation.

Keyword : digital hologram video, computer-generated hologram (CGH), interactive system, prototype, intermediate view point image generation

Ⅰ. 서 론

영화 '아바타'가 상영된 지 2년 반이 지난 지금 가히 우리는 3D 시대에 살고 있다고 해도 과언이 아니다. 이것은 과거 3D 영화가 상영되었을 때와는 달리, 아바타가 촉매가 되어 3D 영상/비디오의 촬영에서부터 편집/저작도구까지 모든 과정의 장비 또는 장치가 유수의 기관들로부터 출시되어 이제는 돌이킬 수 없는 지경에 이르렀기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 방송이나 영화 등 3D 콘텐츠를 즐기는 시청자들은 안경을 착용하는 불편함과 피로감, 현기증 등의 불편감을 호소하고 있다. 안경착용에 대한 불편함은 무안경 방식의 3D 디스플레이를 선택할 수 있으나, 현재의 기술수준은 무안경 방식에서 더욱 큰 불편감을 느끼기 때문에 안경착용의 불편함을 해결하기에는 아직 이른 것으로 판단된다[1][2]. 현기증 등의 불편감은 좌우영상을 해당 눈에 강제로 주입하는 방식이기 때문인 것으로 보고되고 있다. 이 또한 아직은 문제를 완전히 해결하지 못하고 있고, 현재 많은 연구들이 진행되고 있으며, 최근 국내에서도 '3DTV 방송 안전 가이드라인'을 발표한 바 있다[3]. 이 문서는 개괄적이기는 하지만, 3D 콘텐츠의 시청 안전성을 위한 시청 및 제작 가이드라인을 제시하고 있다.

안경착용의 불편함과 강제주입 방식으로 인한 불편감을 동시에 해결할 수 있는 방법으로 최근 홀로그램에 대한 관심이 높아지고 있다. 홀로그램은 공간상에 영상을 맺게 하는 방식이므로 안경을 착용할 필요가 없고 양안으로 사물을 보듯이 시청할 수 있으므로 두 문제를 동시에 해결할 수 있다. 따라서 홀로그램은 궁극적인 3D 디스플레이 방법으로 간주되고 있다[4]. 1946년 Dennis Gabor가 홀로그램을 발명한 후 현재까지 많은 연구가 꾸준히 진행되어 왔으며, 그 많은 부분이 유럽, 미국, 일본에서 진행되었다. 디지털 홀로그램의 생성에서부터 디스플레이에 이르기까지 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있는데, 지금까지는 각 단위기능에 대한 연구가 대부분을 차지하고 있다. 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 지금까지 연구가 진행되어오고 있다. 그러나 아직 홀로그램을 방송 등으로 서비스하기에는 복원영상의 크기와 선명도에서 많이 부족하다. 따라서 홀로그램, 즉 디지털 홀로그램을 서비스하는 시스템에 대해서는 구체적인 연구가 진행된 사례가 없고, 발표된 바도 없다. 단, 최근에 시청자의 눈을 추적하여 초점에 해당하는 부분만 홀로그램으로 디스플레이하는 부분 홀로그램 방법으로 홀로그램 생성 및 디스플레이 시스템을 발표한 적은 있다[5].

본 논문은 디지털 홀로그램을 서비스하기 위한 시스템을 궁극적인 목표로 한다. 이 시스템은 디지털 홀로그램을 송신측과 수신측 어느 곳에서도 생성할 수 있으며, 현재 홀로그램 복원영상의 시야각이 좁은 단점을 보완하기 위해 시청자의 위치를 추적하여 그 시점에 해당하는 홀로그램을 서비스할 수 있는 방법을 포함한다. 이 시스템은 궁극적으로는 실시간, 즉 초당 30 프레임을 디스플레이하는 것을 목표로 하고 있으며, 디지털 홀로그램을 생성하는데 많은 시간이 소요되므로 많은 양의 전용 하드웨어가 포함되어야 한다. 그러나 본 논문에서는 이 시스템 전부를 구현하지 않고 그 중 중요한 요소들만을 구현하는 프로토타입을 제안하고자 한다. 이 프로토타입에는 홀로그램 생성에 필요한 영상데이터를 획득하기 위한 카메라 시스템, 카메라 캘리브레이션과 영상 보정, 중간시점 영상데이터 생성, 디지털 홀로그램 생성, 시뮬레이션과 광학장치에 의한 홀로그램 영상 복원 등을 포함하고 있다. 디지털 홀로그램은 컴퓨터-생성 홀로그램(computer-generated hologram, CGH)을 사용하고, 고속 동작이 필요한 부분은 전용 하드웨어 대신 GPGPU(general-purpose graphic processing unit)를 사용한다. 제안하는 프로토타입 시스템은 LabViewⓇ 환경에서 구현되며, 각 파라미터들은 GUI를

a) 광운대학교 (KwangWoon University)
b) 강원대학교 (KangWon University)
c) 목포해양대학교 (Mokpo National Maritime University)
‡ 교신저자 : 김동욱 (Dong-Wook Kim)
E-mail: dwkim@kw.ac.kr
Tel: +82-2-940-5167 Fax: +82-2-919-3940
※ 이 논문은 2012년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.
· 접수일(2012년5월31일),수정일(2012년6월22일),게재확정일(201년7월11일)

통해 제어되도록 구현한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 본 논문에서 타겟으로 하는 서비스 시스템의 전체적인 동작을 설명하고, 3장에서는 이 시스템을 구성하는 기능들을 설명한다. 4장에서는 이 시스템 중 주요 기능만을 포함하는 프로토타입 시스템을 정의하고, 이를 구현하여 실험을 수행한다. 마지막으로 5장에서는 3장과 4장의 결과를 토대로 이 논문의 결론을 맺는다.

II. 타겟 시스템

그림 1은 본 논문이 궁극적인 목표로 하는 타겟 시스템을 흐름도로 나타낸 것이다. 본 논문에서는 현재 영상 콘텐츠를 서비스하는 시스템의 프레임을 그대로 유지하는 것으로 가정하였다. 즉, 송신측에서 필요한 데이터를 획득하여 가공하고, 정보보호 및 보안 솔루션을 적용하여 송신하면, 수신측에서 암호화된 데이터를 복호화하고 압축을 풀어서 홀로그램 영상/비디오를 복원하는 시스템이다. 이 시스템은 연산에 의해 디지털 홀로그램을 생성(컴퓨터-생성 홀로그램, computer-generated hologram, CGH)하는 방식(CGH Generation)을 택하고 있는데, 송신측보다 수신측의 연산능력이 우수할 경우를 감안하여 송신측이 아니라 수신측에서 CGH를 생성하는 방식도 포함하고 있다. 즉, 그림 1에서 위쪽 흐름도는 송신측에서 CGH를 생성하는 경우를, 아래쪽 흐름도는 수신측에서 CGH를 생성하는 경우를 각각 보이고 있다.

본 논문이 CGH를 대상으로 하는 서비스를 목적으로 하기 때문에 CGH 생성에 필요한 데이터를 획득장치(Depth+Intensity Image Acquisition System)로부터 획득한다. 이 데이터는 대상 물체의 깊이정보(depth)와 광강도(light intensity) 정보이며, 컬러 홀로그램을 생성하기 위해서는 R, G, B의 정보가 모두 필요하다. 이 획득장치로는 깊이 카메라와 RGB 카메라를 동시에 사용여야 한다. 이 경우 두 카메라의 초점과 광각이 일치하여야 하여야 하는데, 그렇지 않는 경우가 많으므로 이때는 두 획득영상의 크기와 해상도를 맞추는 과정이 필요하다(Depth & Intensity Image Enhancement). 최근 동일한 초점과 해상도의 깊이정보와 RGB 또는 광강도 정보를 동시에 제공하는 깊이 카메라가 많이 출시되고 있으므로[6][7] 이들 카메라를 사용할 수도 있다. CGH의 화질은 그 특성상 깊이영상이나 광강도 영상의 화질에 크게 좌우된다. 따라서 Depth & Intensity Image Enhancement에서는 깊이영상의 화질을 개선하는 과정이 포함된다. CGH의 화질은 또한 두 입력 영상의 해상도에도

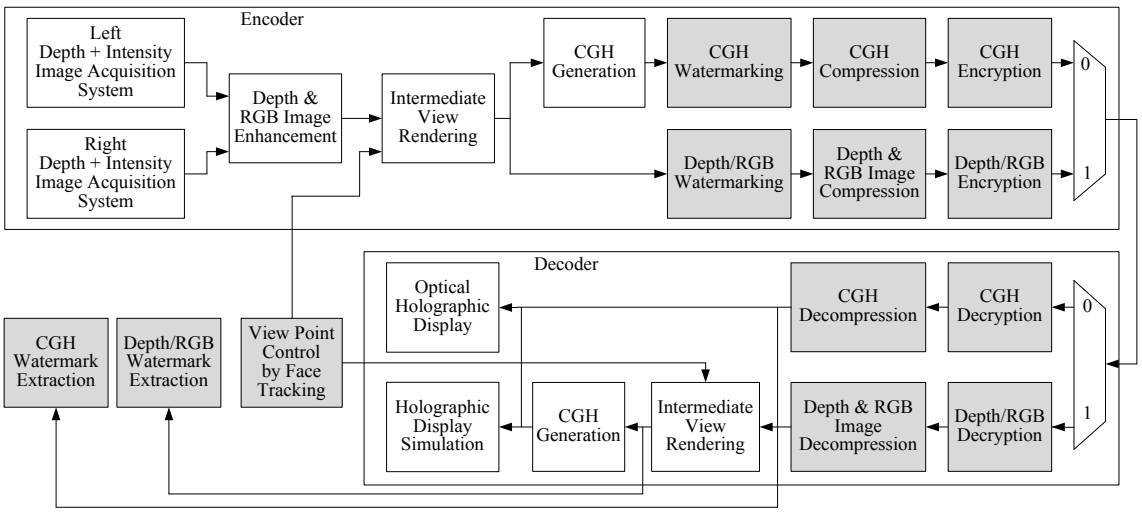


그림 1. 본 논문이 추구하는 타겟 시스템
Fig. 1. The target system that this paper is pursuing

크게 영향을 받으므로 저해상도의 깊이영상과 광강도 영상을 고해상도로 바꾸는 과정도 이 기능에 포함된다.

이 시스템은 또한 디지털 홀로그램의 시야각이 좁은 단점을 해결하기 위하여 시청자의 시점에 해당하는 홀로그램 영상을 제공하는 방법을 포함하고 있다. 이 방법은 시청자의 얼굴 또는 눈을 추적하고 그 결과에 따라 해당 시점의 데이터(깊이정보와 광강도 정보)를 렌더링(Intermediate View Rendering)하여 CGH를 생성한다. 이 중간시점 영상 렌더링 과정은 CGH를 어느 곳에서 생성하느냐에 따라 송신측 또는 수신측에서 생성할 수 있다. 그림에서 시청자의 얼굴을 추적하는 기능(View Point Control by Face Tracking)은 제안하는 시스템과 직접적인 관계가 없으므로 시스템 내부에 포함시키지 않았으며, 단지 얼굴추적 기능으로부터 얼굴의 위치정보를 받아 중간시점 영상 생성에 사용한다.

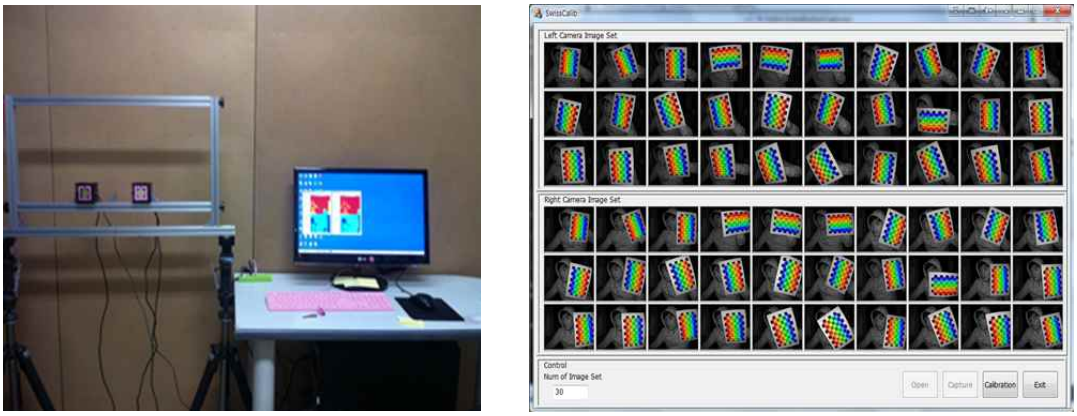
III. 시스템의 동작

본 장에서는 그림 1의 흐름도에 나타낸 각 기능블록을 구현한 방법에 대해 설명한다. 그림 1의 두 흐름도에서 중복되는 동작이 다수 있는데, 각 동작을 한 번만 설명하기로 한다. 또한 부호화와 복호화의 쌍을 이루는 경우가 많은데, 대부분의 경우 복호화는 부호화의 역순으로 이루어지므로 부호화만 설명한다.

1. 깊이 + 광강도 영상획득 시스템 (Depth + Intensity Image Acquisition system)

깊이영상과 광강도영상을 동시에 획득하는 시스템은 카메라 시스템이다. 이 시스템은 스테레오 또는 다시점 카메라로 촬영한 영상들 간의 시차(disparity)를 구하여 깊이정보를 획득하는 고전적인 방법으로부터 RGB 카메라와 깊이 카메라를 상하, 좌우, 또는 수직 리그(rig)를 사용하여 배치하는 방법까지 많은 방법들이 가능하다. 최근 동일 초점, 동일 광각, 동일 해상도의 깊이영상과 RGB[6] 또는 광강도(명도, luminance)[7]를 동시에 제공하는 깊이 카메라가 출시되었는데, 본 논문에서는 [7]의 깊이 카메라를 사용하였다. 또한 앞 장에서 설명한 바와 같이 본 시스템은 시점을 제어하여 시청자의 시점에 해당하는 CGH를 생성하는 기능을 포함하고 있으므로 두 대의 깊이 카메라를 동시에 사용하는 시스템을 구축하였는데, 그림 2 (a)에 구축한 시스템을 보이고 있다.

획득된 두 쌍의 영상 데이터의 보정(rectification)과 중간시점 영상 렌더링을 위하여 카메라 캘리브래이션(calibration)을 수행한다. 그 방법은 광강도영상에 대해 체스



(a) (b)

그림 2. 두 대의 깊이 카메라로 구성된 데이터 획득 시스템: (a) 카메라의 배치, (b) 카메라 캘리브래이션
Fig. 2. Data acquisition system composed by two depth cameras: (a) camera arrangement, (b) camera calibration

(chess)보드를 사용하여 수행하며, 최대 30쌍의 영상을 획득하여 사용한다. 그림 2 (b)에 카메라 캘리브래이션을 위한 GUI를 보이고 있는데, 체스보드에 나타난 색깔은 해당하는 경계점 쌍이 검출되었음을 나타낸다. 두 카메라로부터 획득된 영상들에 대한 영상보정도 수행하였는데, 카메라 캘리브레이션은 초기에 한 번만 수행하며, 영상보정은 모든 영상 프레임에 대해 수행한다.

2. 깊이+RGB영상의 화질개선 (Depth+RGB Image Enhancement)

본 논문에서는 두 대의 동일한 깊이 카메라를 사용하기 때문에 깊이영상과 RGB영상(본 논문에서는 광강도영상)의 화질 개선은 두 가지로 이루어진다. 그 첫 번째가 깊이영상에서 경계부분이 흐려지는(blurring) 현상을 보완하는 것이다. 일반적으로 깊이카메라로 촬영한 깊이영상은 스테레오 정합 등으로 구한 깊이영상에 비해 경계부분이 흐려지는 현상이 발생한다. 이것은 적외선을 조사하고 그 광파가 돌아오는 시간을 계산하여 깊이를 계산하는 ToF(time-of-flight) 방식의 깊이 카메라에서 특히 두드러지는데, 본 논문에서도 ToF 방식의 깊이 카메라[7]를 사용한다. 경계부분의 흐림 현상을 개선하는 방법은 깊이영상의 1, 2차 미분과 가우션 커널(Gaussian kernel)을 사용하여 깊이값의 변화에 따라 경계부분의 깊이값을 보상해주는 방법이다[8].

깊이영상 및 RGB영상의 해상도를 증가시키는 방법으로 두 가지를 사용하였다. 그 첫 번째 방법은 양선형(bilinear) 보간법(interpolation), 양방향(bilateral) 보간법, 양방향 고등차수(bicubic) 보간법에 깊이영상 화질개선에 사용한 방법을 적용하여 경계부분의 화질을 개선하는 방법을 사용하였다[9]. 또 다른 방법은 Mallat-트리 웨이블릿(wavelet) 변환할 때 수평, 수직 방향으로 1/2 축소(decimation)을 수행하지 않고 그대로 변환한 후 복원하는 방법이다[10].

3. 중간시점 영상 렌더링 (Intermediate View Rendering)

본 논문에서 사용한 두 카메라 사이의 임의의 시점에 해당하는 깊이영상과 RGB 또는 광강도영상을 생성하는 방법을 간략히 도식화하면 그림 3과 같다. 이 과정의 입력으로는 두 카메라에서 획득하여 보정된 깊이영상과 광강도영상을 사용한다. 좌우 영상 각각에서 원하는 중간시점의 깊이영상과 광강도영상을 생성하고 그 결과의 두 영상을 결합(blending)하여 원하는 시점의 영상을 생성한다. 이 때 결합한 영상에서 좌우측 카메라로부터 획득한 영상의 정보를 사용할 수 없는 부분, 즉 홀(hole)이나 비폐색(disocclusion) 영역은 가장 근접한 배경화소로 채운다.

좌우 카메라로 획득한 영상으로부터 중간시점 영상을 생성하는 방법에 있어서 본 논문에서는 획득된 두 깊이영상에서 빈도수가 많은 대표적인 큰 깊이값과 작은 깊이값을 선정하고, 이들을 대상으로 스테레오 정합을 수행하여 단위 깊이값 당 변위의 크기를 추출하여 사용하는 방법[11]과 3D 워핑(warping)을 사용한 방법[12]을 모두 고려하였으며, 그 뒤의 홀-필링(filling) 방법은 동일하게 적용하였다.

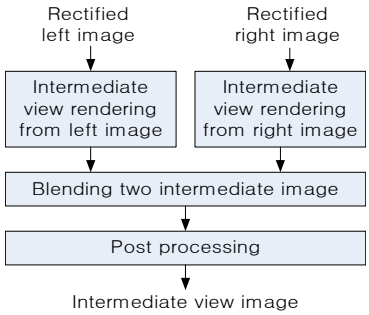


그림 3. 중간시점 영상 렌더링
Fig. 3. Intermediate view image rendering

4. CGH 생성

CGH는 기존에 발표된 두 광파의 간섭(interference)현상을 모델링한 식을 사용하였다. 이것을 식 (1)에 보이고 있는데, 물체의 크기($p_j x_j, p_j y_j$)에 비해 홀로그램과 물체사이의 거리($p_j z_j$)가 충분히 크면 식 (2)와 같이 간략화 시킬 수 있다.

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

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

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

식 (2)에서 코사인 함수의 각도항을 분리하여 계산할 수 있고, 또 홀로그램 평면의 한 열에서 맨 좌측 또는 한 행에서 맨 위의 화소값을 계산할 때 생성되는 중간결과들을 사용하면 반복연산 방법으로 나머지 화소값들을 쉽게 계산할 수 있다. 이때 z_j의 값을 변경하지 않고 하나의 광원이 모든 홀로그램 화소에 미치는 영향을 계산하는 방식을 [13]에서 제안한 바 있다. 그러나 이 방법의 단점은 각 광원으로 홀로그램 전체에 미치는 영향을 계산한 결과를 다음 광원에 대한 영향을 계산하기 전에 모두 메모리에 저장하여야 하기 때문에 메모리 접근횟수와 시간에 병목현상이 심하게 발생한다. 이에 본 연구팀은 한 홀로그램 화소에 모든 광원이 미치는 영향을 계산하고 다음 홀로그램 화소로 진행하는 방식을 제안하여, 다른 모든 성능은 동일하나 메모리 접근 횟수를 약 1/20,000로 줄인 계산방식을 제안한 바 있으며[14], 이 논문에서도 이 방법을 사용한다.

5. 워터마킹 (Watermarking)

이 시스템에 사용되는 디지털 워터마킹 방법은 그림 4와 같다[15]. 워터마킹을 수행하기 전에 선행과정으로서 주파수-영역으로 변환한 데이터에 대해 계수의 특성을 미리 확인하고 그 결과를 토대로 워터마킹이 진행되는데, 그 특성은 홀로그램은 계수의 에너지 분포, 깊이영상과 RGB(광강도)영상은 주파수 대역에 대한 특성에 해당한다. 이 특성으로 삽입될 워터마크의 비가시성(invisibility)과 공격에 대한 강인성(robustness)을 고려하여 최적의 워터마킹 위치를 파악한다. 이를 토대로 홀로그램 또는 깊이영상과 RGB영상을 해당 주파수 대역으로 변환한 다음 기 선정된 위치의 계수를 추출하여 주어진 워터마크를 삽입하고, 그 결과를 역변환하여 워터마크가 삽입된 데이터를 만든다.

삽입된 워터마크는 워터마크 삽입 과정의 역순으로 추출할 수 있다. 참고로, 워터마크의 추출은 서비스가 이루어질 때마다 일어나는 것이 아니라 소유권 주장이 필요할 때만 일어난다.

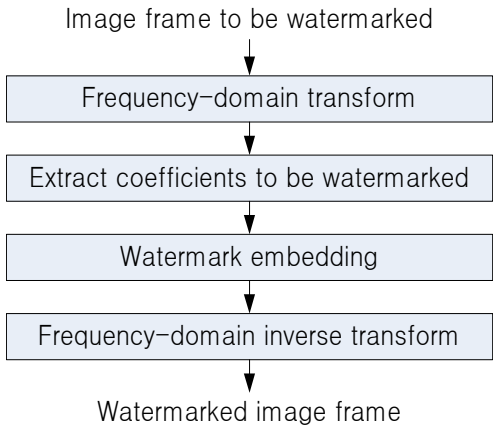


그림 4. 디지털 워터마킹
Fig. 4. Digital watermarking

6. 데이터 압축(Compression)

데이터 압축방법은 깊이영상+RGB(광강도)영상과 디지털 홀로그램의 방법이 서로 다른데, 그림 5에 각 방법을 흐름도로 나타내었다. 깊이영상과 RGB(또는 광강도영상)은 그림 5 (a)와 같이, 먼저 RGB영상을 H.264/AVC로 압축한다. 이 때 생성된 움직임 벡터를 그대로 이용하여 깊이영상을 압축하는데, 깊이영상은 중간시점 영상을 생성하는데 매우 중요하므로 무손실(lossless) 압축을 수행한다.

반면 홀로그램은 일부분이 대상물체 전체의 정보를 포함하고 있고, 부분 홀로그램의 위치에 따라 마치 그 위치에서 물체를 보는 듯한 복원영상을 만들어 내는 특성을 이용한다[16]. 먼저 홀로그램을 분할하여 변화가 가장 적은 순서로 배열한다. 이 배열에서 MCTF(motion compensated temporal filtering)을 수행하여 압축한다.

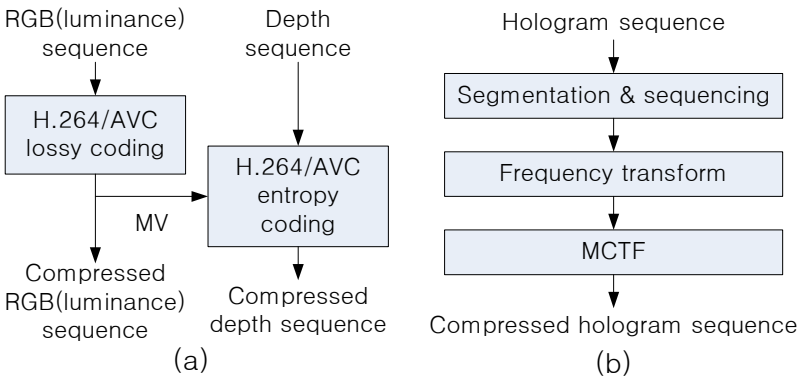


그림 5. 데이터 압축: (a) 깊이영상과 광강도영상, (b) 디지털 홀로그램
Fig. 5. Data compression: (a) depth image and luminance image, (b) digital hologram

7. 데이터 암호화(Encryption)

데이터의 암호화는 키를 알고 있는 사람만 복호화하여 올바른 데이터를 사용할 수 있도록 하는 데이터 은닉방법이다. 논 논문에서는 깊이영상, 광강도영상, 홀로그램 모두 동일한 방법을 적용하였으며, 그 방법을 그림 6에 도식화하였다[17]. 먼저, 한 프레임의 데이터를 주파수 영역으로 변환하여 일정 값보다 높은 에너지를 갖는 계수를 추출한다. 이 계수들을 블록 암호화 알고리듬을 사용하여 암호화하고, 그 결과를 원 위치로 환원한 다음 주파수 변환의 역변환을 취하여 암호화된 데이터를 획득한다. 블록 암호화 방법으로는 DES, 3DES, SEED, AES 중 하나를 선택하여 사용할 수 있도록 하였다.

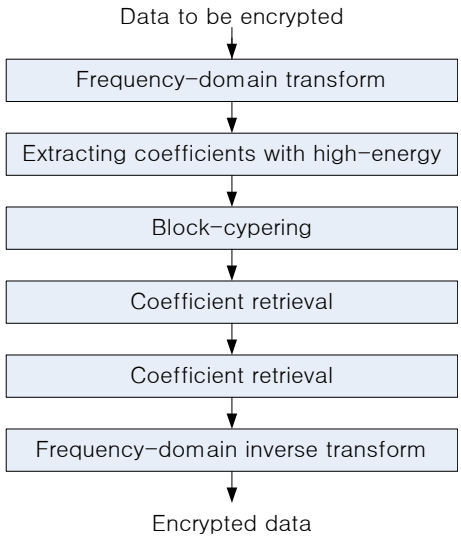


그림 6. 데이터 암호화
Fig. 6. data encryption

8. 홀로그램 영상의 복원

홀로그램 영상을 복원하는 방법으로 시뮬레이션 방법과 광학장치에 의한 방법 모두를 사용한다. 광학장치에 의한 방법은 CGH를 SLM에 다운로드하고 생성 때와 동일한 빛을 조사하여 복원하였다. 광학적 복원을 위한 장치는 가장 기본적인 형태를 사용하였고 이 방법은 [13], [17], [18]에서 쉽게 찾을 수 있으므로, 이 논문에서는 설명을 생략한다. 시뮬레이션 방법은 식 (3)의 Fresnel 변환을 적용하여 연산에 의해 영상을 복원하였다[18].

$$F(x,y)=\frac{e^{ikz}}{i\lambda z}e^{\frac{i\pi}{\lambda z}(x^2+y^2)}\iint f(\xi,\eta)e^{\frac{i\pi}{\lambda z}(\xi^2+\eta^2)}e^{-\frac{i2\pi}{\lambda z}(\xi x+\eta y)}d\xi d\eta \quad (3)$$

이 식에서 $f(\xi,\eta)$와 $F(x,y)$는 홀로그램 영상과 복원된 영상의 화소값을 각각 나타내며, $i=\sqrt{-1}$ 이다. z는 복원영상의 깊이값, k와 λ는 사용한 광파의 파수(wave number)와 파장을 각각 나타낸다.

Ⅳ. 프로토타입 시스템 구현 및 결과

앞 장에서 설명한 서비스 시스템 중 현재는 일부만으로 구성된 프로토타입 시스템을 구현하였다. 즉, 그림 1의 시스템 중 흰색으로 표시된 블록들만 구현하였는데, 이 블록들이 본 논문에서 타겟으로 하는 시스템의 가장 기본적이고 중요한 동작들이라고 판단하였다. 그림 7에 이 프로토타입 시스템의 구성도를 흐름도 형식으로 나타내었다. 이 시스템을 구성하는 각 블록의 동작은 앞 장에서 이미 설명하였으므로, 이 장에서는 구현 방법과 그 결과에 대해서만 설명한다.

1. 시스템 구현

그림 7의 시스템은 National Instrument사의 LabView® 환경에서 구축하였으며, 각 기능블록은 이 환경에 맞는 dll(dynamic linking library) 파일을 만들어 부착하였다. 총 6개의 CPU 쓰레드(thread)와 3개의 GPGPU를 사용하여 구현하였는데, CPU는 카메라로부터 데이터를 획득하고 카메라 캘리브레이션과 영상보정, 깊이영상과 광강도영상의 화질개선, 중간시점 영상 렌더링, 세 개의 GPGPU 구동에 각각 사용하였으며, 세 GPGPU는 CGH 생성에 두 개, 시뮬레이션에 의한 영상복원에 1개를 각각 사용하였다. GPGPU는 nVidia사의 GPU를 사용하였으며, CUDA®로 프로그래밍하였고, GPGPU를 사용하지 않은 기능블록들은 C/C++로 프로그래밍하였다.

앞장에서 설명한 것과 같이 데이터 획득 카메라는 MESA Image사의 SR4000®을 사용하였으며, 이 카메라의 해상도는 깊이영상과 광강도영상 모두 176×144이다. 두 대의 카메라를 동시에 사용하기 위하여 두 카메라의 변조주파수로 29MHz와 30MHz를 각각 사용하였다. CGH는 시뮬레이션에 의한 영상복원을 위해서는 1,024×1,024의 해상도로 생성하였으며, 광학장치에 의한 복원을 위해서는 1,280×1,024의 해상도(SLM의 해상도)로 생성하였다.

본 논문에서는 CGH 생성을 위한 전용 하드웨어를 사용하지 않고 GPU를 이용한 구현방식을 택하였는데, GPU를 이용한 CGH 생성은 이미 많은 연구가 진행되었다[19][20]. 본 논문에서는 앞장에서 설명한 CGH 생성방법을 그대로 GPU에 구현하였다.

2. 구현 결과

그림 8에 구현한 결과의 최상위 계층 결과를 보이고 있다. 내부 기능블록은 그림 7의 구성도와 동일한 위치에서 1:1 대응된다. 그림 9에 이 시스템을 동작시키기 위해 설계한 GUI를 보이고 있다.

그림 9의 좌측 위쪽 사진들 위의 좌우측에 있는 두 개의 숫자 쌍 표시창은 여러 카메라를 사용할 경우 좌우측 영상으로 사용하는 카메라의 번호와 사용 변조주파수를 각각 나타낸다. 가운데 제어버튼은 중간시점 생성 방법을 3D 워핑과 변위증분방법 중 선택할 수 있는 버튼이다. 그 아래에 있는 6개의 사진은, 위쪽 3개는 광강도영상, 아래쪽 3개는 깊이영상을 나타내며, 좌우측 각각의 두 영상 쌍은 좌우측의 각 카메라로부터 획득한 영상, 가운데 영상 쌍은 생성된

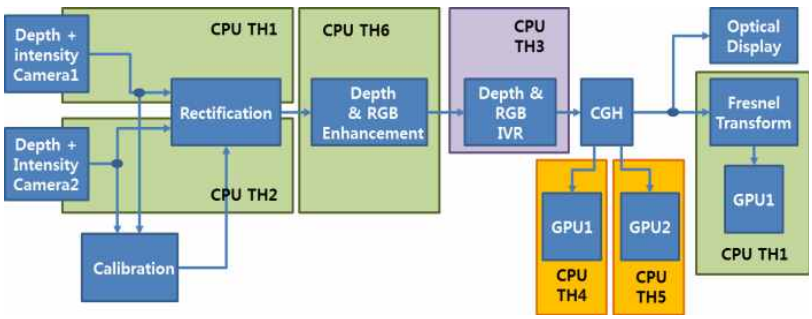


그림 7. 프로토타입 시스템의 구성도
Fig. 7. Structural diagram of the prototype system

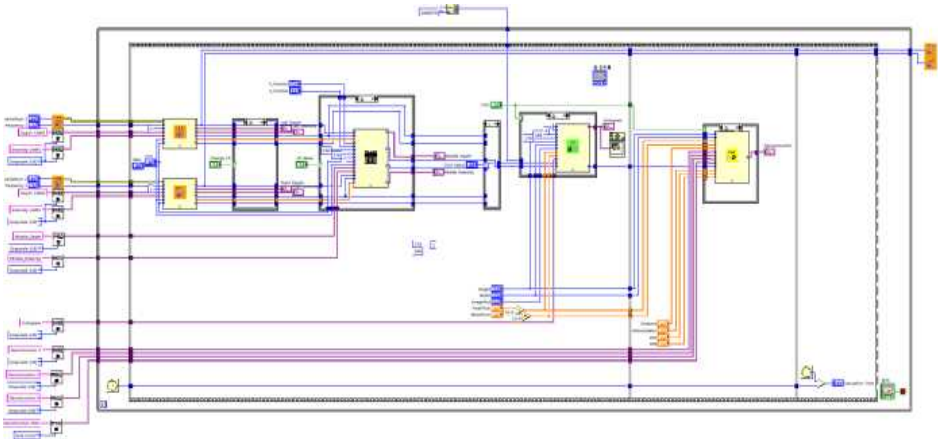


그림 8. 최상위 계층의 구현 결과
Fig. 8. Top-level implementation result

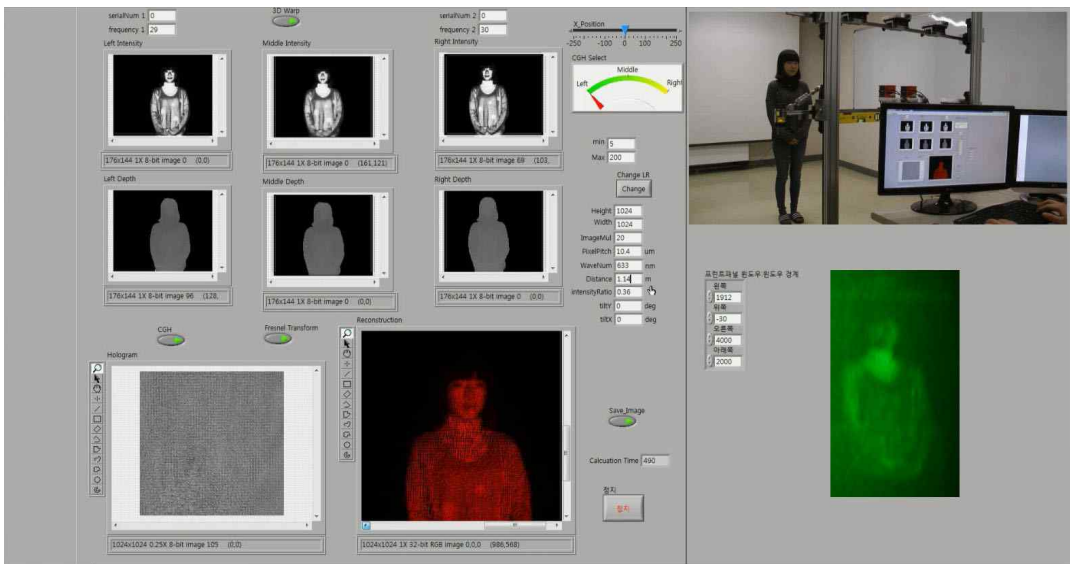


그림 9. 시스템 동작을 위한 GUI
Fig. 9. GUI for system operation

중간시점 영상들이다. 그 우측에 횡으로 표시된 척도는 생성한 중간시점 영상의 시점을 나타낸다. 좌측 카메라와 우측 카메라가 -100과 +100에 해당하며, 생성할 중간시점은 -250에서 +250까지 가능하도록 되어 있다. 그 아래의 회전침은 좌측 카메라로부터 획득된 영상, 중간시점 영상, 우측 카메라로부터 획득된 영상을 각각 CGH 생성에 사용할 수 있도록 하는 제어창이다. 그 아래의 min과 max 표시창은 중간시점의 깊이값의 최소와 최대값을 8-비트 스케일로 나타낸다.

6개의 사진 아래에 작은 두 개의 버튼이 있는데, CGH 생성여부와 복원방법을 선택하는 버튼이다. 그 아래의 두 영상 중 좌측은 생성된 CGH, 우측은 시뮬레이션에 의해 복원된 영상이며, 광학장치에 의해 복원된 영상을 촬영한 것은 맨 오른쪽 아래에 있다. 사진과 영상에 걸쳐있는 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 회전각도를 각각 나타내고 있다. 오른쪽의 그림은 실험환경을 보이고 있으며, 그 아래의 4개의 표시창은 복원영상 중 표시되는 부분의 좌우상하 경계를 나타낸다.

이 GUI 환경에서 카메라로부터 획득한 영상 데이터에서 홀로그램 영상 복원까지의 소요 시간은 시뮬레이션에 의해 복원할 경우는 평균 352ms, 시뮬레이션 대신 광학장치에 의한 복원의 경우는 평균 183ms이었다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 디지털 홀로그램을 서비스하는 시스템의 구조를 제안하고, 이 시스템을 타겟으로하여 그 중 주요 동작만을 포함하는 프로토타입 시스템을 구현하였다. 이 서비스 시스템은 기존의 영상서비스 시스템의 프레임을 그대로 유지하고 있으며, 홀로그램의 시야각을 확보하고 시청자의 직/간접적인 요청에 따라 시점을 제어하기 위해 시청자의 얼굴을 추적하여 해당 시점의 정보를 추출함으로써 시청자와 인터랙티브하게 동작하는 기능을 포함하고 있다.

구현한 프로토타입은 깊이정보와 RGB 또는 광강도 정보를 획득하기 위한 카메라 시스템, 카메라의 캘리브래이션과 영상보정, 깊이정보 및 RGB 정보의 화질 개선, 시청자의 얼굴을 추적하여 해당 시점의 영상정보를 추출하는 중간시점 영상 생성, 컴퓨터-생성 홀로그램(CGH) 생성, 그리고 시뮬레이션 및 광학장치에 의한 홀로그램 영상 복원 기능을 포함하고 있다. 이 중 연산시간이 많이 필요한 CGH 생성과 시뮬레이션에 의한 영상 복원 기능은 GPGPU를 사용하여 구현하였으며, 나머지 기능들은 C/C++로 구현하였다. 시스템은 LabView® 환경에서 구축하였으며, 모든 가능한 파라미터들을 표시하고 제어할 수 있는 GUI를 구축하여 동작시켰다.

구현결과 시뮬레이션에 의한 영상복원의 경우 평균 352ms, 광학장치에 의한 영상복원의 경우는 평균 183ms가 소요되었다. 이 속도는 본 연구가 목표로 하는 실시간 서비스의 동작속도에는 미치지 못하는 속도이다. 이것은 더 많은 기능을 GPGPU로 구현하고, CGH 생성 기능을 전용 하드웨어로 구현하여 속도를 증가시킬 수 있으며, 이것은 본 논문의 향후 연구 중 하나이다. 본 논문에서 제시한 프로토타입 시스템은 현재 동작속도가 비록 실시간에 미치지 못하지만, 향후 디지털 홀로그램의 서비스 시스템을 구축할 때 본 논문의 구현 방법 및 결과가 좋은 기반기술이 될 수 있으리라 사료된다.

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, P. Kauff, and T. Sikora, 3D Video Communications, John Wiley & Sons Ltd., Atrium, England, 2005.

[3] TTA, “3DTV Broadcasting Safety Guideline,” TTAK.KO-07.0086, 2010. 12. 23.

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

[5] N. Costa and A. Cartaxo, Advances in Lasers and Electro Optics, INTECH, April 2010.

[6] Kinect data sheet, http://www.microsoftstore.com/store/msstore/en_US/pd /Kinect-for-Xbox-360/productID.216507400.

[7] SR4000 Data Sheet, http://www.mesa-imaging.ch/prodview-4k.php, MESA Imaging, Oct. 2010.

[8] J. I. Gil and M. B. Kim, “Perceptual Quality improvement of Stereoscopic Image,” IPCV 2011, pp. 278-282, July 2011.

[9] M. B. Kim and S. E. Jang, “Depth Map Interpolation using High Frequency Components,” Intl. Workshop on Advanced Image Technology, pp. 646-649, Jan. 2012.

[10] J. M. Lim and J. S. Yoo, Super-resolution Algorithm using Discrete Wavelet Transform for Single Image,“ Korean J. of Broadcasting, Vol. 17, No. 2, pp. 344-353, March 2012.

[11] J. M. Koo, J. W. Lee, Y. H. Seo, H. J. Choi, J. S. Yoo, and D. W. Kim, “Intermediate Depth Image Generation using Disparity Increment of Stereo Depth Images,” Korean J. of Broadcasting, Vol. 17, No. 2, pp. 363-373, March 2012.

[12] T. J. Kim, E. Y. Chang, N. H. Hur, J. W. Kim, and J. S. Yoo, “Virtual Viewpoint Image Synthesis Algorithm using Multi-view Geometry,” Korean J. of Broadcasting, Vol. 34, No. 12, pp. 1154-1166, Dec. 2009.

[13] 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.
[14] 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.
[15] H. J. Choi, Y. H. Seo, J. S. Yoo, and D. W. Kim, “Digital watermarking technique for holography interference patterns in a transform domain,” OPTICS and LASERS in ENGINEERING, Vol. 46, No. 4, pp. 343-348, Jan. 2008.
[16] Y. H. Seo, H. J. Choi, J. S. Yoo, G. S. Lee, C. H. Kim, S. H. Lee, S. H. Lee, and D. W. Kim, “Digital hologram compression technique by eliminating spatial correlations based on MCTF,” OPTICS COMMUNICATIONS, Vol. 283, pp. 4261-4270, July 2010.
[17] H. J. Choi, Y. H. Seo, and D. W. Kim, “A Hybrid Encryption Technique for Digital Holography using DCT and DWT,” Intl. J. of KIMICS, Vol. 9, No. 3, pp. 271-275, June 2011.
[18] U. Schnar and W. Jueptner, Digital Holohtaphy, Springer, Berlin, Germany, 2005.
[19] T. Shimobaba, T. Ito, N, Masuda, Y, Ichihashi, and N. Takada, "Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL", Optics Express, vol. 18, no. 10, pp. 9955-9960, May. 2010.
[20] Y. Pan, X. Xu, S. Solanki, X. Liang, R. Bin, A. Tanjung, C. Tan, and T.-C. Chong, "Fast CGH computation using S-LUT on GPU", Optics Express, vol. 17, No. 21, pp. 18543-18555, Oct. 2009.

저 자 소 개

서 영 호

- 1992년 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
- 2001년 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학석사)
- 2004년 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
- 2003년 ~ 2004년 : 한국전기연구소 연구원
- 2005년 ~ 2008년 : 한성대학교 조교수
- 2008년 ~ 현재 : 광운대학교 교양학부 부교수
- 주관심분야 : 실감미디어, 2D/3D 영상 신호처리, 디지털 홀로그램

이 윤 혁

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

유 지 상

- 1983년 : 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1985년 : 서울대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1991년 : Purdue대학교 전기공학과 졸업(공학박사)
- 1993년 ~ 1994년 : 현대전자산업(주) 산전연구소 선임연구원
- 1994년 ~ 1997년 : 한림대학교 전자공학과 교수
- 1997년 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 교수
- 주관심분야 : 3D 영상처리, 웨이블릿 기반의 영상처리, 영상 압축, 영상 인식, 비선형 신호처리

저 자 소 개

김 만 배

- 1983년 : 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1986년 : University of Washington 전기공학과 졸업(공학석사)
- 1992년 : University of Washington 전기공학과 졸업(공학박사)
- 1992년 ~ 1998년 : 삼성종합기술원 수석 연구원
- 1993년 : Georgetown University 의과대학 객원연구원
- 1996년 : University of Rochester 전기공학과 객원연구원
- 1998년 ~ 현재: 강원대학교 전기전자정보통신공학부 교수
- 주관심분야 : 비디오신호처리, 영상통신, 입체영상처리, 의료영상처리

최 현 준

- 2003년 : 광운대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
- 2005년 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학석사)
- 2009년 : 광운대학교 일반대학원 졸업(공학박사)
- 2009년 ~ 2010년 : 광운대학교 연구교수
- 2010년 ~ 2011년 : 안양대학교 정보통신공학과 조교수
- 2011년 ~ 현재 : 목포해양대학교 전자공학과 조교수
- 주관심분야 : 2D/3D 영상 신호처리, 디지털 홀로그램

김 동 욱

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