

## 1. 서론

홀로그래프는 빛의 회절과 간섭을 이용하여 물체광을 재생함으로써 매우 자연스러운 3차원 상을 표현할 수 있다는 점에서 이상적인 3차원 디스플레이 기술로 생각되고 있다. 이에 따라 최근 홀로그래픽 3차원 디스플레이의 연구 개발이 다양한 연구 기관에서 활발히 진행되고 있으며 머지 않아 적절한 시야각과 해상도를 가진 홀로그래픽 3차원 디스플레이가 구현될 수 있을 것으로 기대된다. 이와 같은 홀로그래픽 3차원 디스플레이 기술과 더불어 함께 고려되어야 할 것은 홀로그래픽 콘텐츠의 촬영 기술이다. 전통적인 홀로그래프 촬영은 간섭계에 기반하고 있다. 대상 3차원 물체에 laser와 같은 결맞은 빛을 비추고 반사되어 오는

콘텐츠를 촬영하거나 합성하는 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 광선 분포를 촬영하고 이를 이용해 홀로그래프를 합성하는 기법, 결맞지 않은 자연광 환경에서 물체광의 간섭 무늬를 직접 촬영하는 기법, 깊이 카메라를 이용하여 깊이맵을 얻고 홀로그래프를 합성하는 기법 등이 대표적이다. 본 고에서는 이중 광선 분포에 기반한 홀로그래프 합성 기법을 소개하고자 한다. 광선 분포는 최근의 연구 개발로 다른 기법에 비해 상대적으로 간편하게 촬영할 수 있으며, 광선 분포에 대한 컴퓨터 그래픽스 분야에서 개발되어 온 다양한 기술들을 손쉽게 접목할 수 있다는 점에서 장점을 지닌다. 본 고에서는 먼저 광선 분포의 개념을 설명하고 이를 기존의 일반적인 카메라를 이용하여 간편하게 촬영하는 기법들을 개관한다. 다음으로 촬

# 특집 ■ 홀로그래피

## 광선 분포를 이용한 홀로그래픽 3D 디스플레이 콘텐츠 합성

박재형\*

빛을 참조광과 간섭시켜 그 간섭 무늬를 CCD와 같은 영상 센서로 촬영한다. 이러한 전통적인 홀로그래프 촬영은 물체광의 진폭과 위상 정보를 모두 획득할 수 있으나, 외부광과 진동이 차단된 실험실 환경에서 이루어져야 하고 결맞은 빛을 비추기 위해 물체의 크기가 제한되는 단점을 가진다. 따라서 일반인이 외부 환경에서 손쉽게 촬영할 수 없으며 이는 홀로그래픽 3차원 디스플레이를 위한 콘텐츠 확보에는 큰 제약점이 된다. 이를 극복하기 위하여, 최근 보다 간편한 방법으로 홀로그래픽 3차원 디스플레이를 위한 홀로그래픽

영된 광선 분포 정보를 이용하여 홀로그래프를 합성하는 기법들에 대하여 알아본다.

### 2. 광선 분포의 개념 및 촬영

#### 가. 광선 분포의 개념

광선 분포는 물체로부터 오는 물체광을 이루는 광선들의 위치별 각도별 밝기 분포를 말하며, Light (ray)

\* 인하대학교 정보통신공학과

## 광선 분포를 이용한 홀로그래픽 3D 디스플레이 콘텐츠 합성

field, ray space, plenoptic function 등 다양한 이름으로 불린다.[1] 기하 광학적 해석에서 물체로부터 오는 빛은 무수히 많은 수의 광선들의 집합으로 생각할 수 있으며 이들은 각각 다른 밝기, 위치 및 진행 각도를 가진다. 광선이 자유 공간을 진행하며 겪는 밝기 감쇄를 무시한다면, 광선 분포는 그림 1과 같이 임의의 참조면을 통과하는 광선들의 참조면에서의 위치( $x, y$ ), 참조면을 통과하여 진행되는 각도( $\theta_x, \theta_y$ ) 분포로 나타낼 수 있으며 일반적으로  $L(x, y, \theta_x, \theta_y)$ 와 같은 광선 밝기  $L$ 의 4차원 분포로 표현된다.

물체를 이루는 물체점들이 3차원 공간상에 분포하고 있는데 반하여 광선 분포는 4차원 분포로 표현되므로 보다 높은 차원을 가지고 있으며 이에 따라 광선 분포는 물체점들의 3차원 분포뿐만 아니라 주어진 조명 하에서 개별 물체점들의 각도별 반사 광선 밝기 분포 (specularity, diffusiveness) 정보도 역시 포함하고

있다. 광선 분포를 높은 샘플링율로 획득하면 본래 물체의 3차원 정보나 다양한 시점 영상들을 복원하는 것이 가능하며 본 고의 후반부에서 소개된 바와 같이 홀로그래픽 합성할 수도 있다.

광선 분포를 획득하는 가장 직접적인 방식은 매우 밀집되어 분포하는 카메라들의 2차원 배열을 이용하거나 한 대의 카메라를 2차원 평면상에서 스캔하며 매우 다수의 영상을 촬영하는 것이다. 그러나 이러한 방법은 일반인이 손쉽게 광선 분포를 촬영하고 이를 통해 홀로그래픽 합성해야 하는 홀로그래픽 3차원 디스플레이를 위한 콘텐츠 촬영에는 적합하지 않다. 이하 절에서는 보다 간편한 방법으로 광선 분포를 촬영하는 기술을 소개한다.

### 나. Integral imaging (Light field camera) 기술

광선 분포를 간편하게 획득하는 대표적인 기법은 lens array를 활용하는 integral imaging 촬영 기법이다.[2-4] 그림 2에서 보는 바와 같이 다수의 렌즈가 2차원 평면상에 배열된 렌즈 어레이 뒤에 CCD를 위치시키고 촬영을 하면, 렌즈 어레이의 개별 렌즈에 해당하는 CCD 영역에 해당 렌즈 중심을 통과하는 광선들의 각도별 분포가 촬영되므로, 렌즈 어레이 면에서의 광선 분포의 촬영이 가능하다.

초기의 integral imaging 기반 광선 분포 촬영 기법에서는 렌즈 어레이를 카메라 외부에 위치시키고 렌즈 어레이에 의해 결상된 영상의 집합을 별개의 카메라와 광학계를 이용하여 촬영하였으므로, 렌즈 어레이와 광학계 및 카메라와의 정렬이 어렵고 시스템이 간편하지 않은 문제점이 있었다. 그러나 최근 그림 2의 사진에서와 같이 마이크로 렌즈 어레이를 일반적인 DSLR 카메라의 영상 센서면에 부착함으로써 이러한 정렬 문제를 해결하고 전체 시스템이 일반적인 DSLR 카메라와 동일한 매우 간편한 시스템이 개발되고 상용화도 되는 등 광선 분포를 손쉽게 촬영할 수 있게 되었다.[2-4]

이와 같은 integral imaging 기반 기법

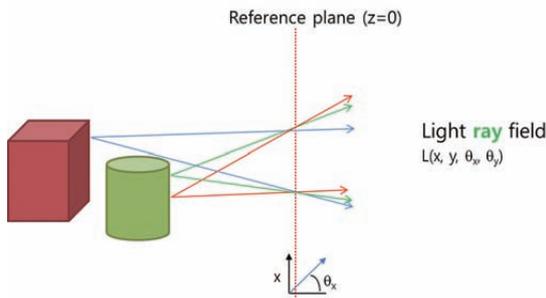


그림 1. 광선 분포 개념

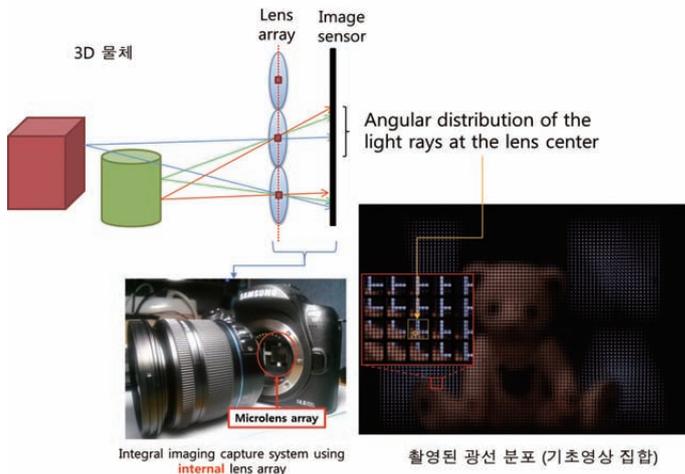


그림 2. 렌즈 어레이를 이용한 광선 분포 촬영

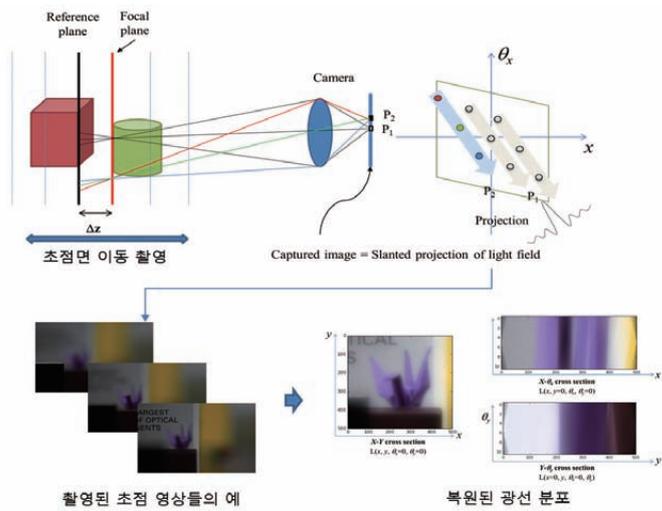
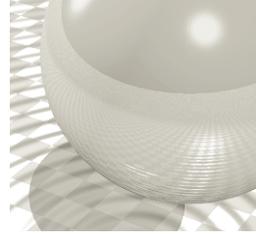


그림 3. 초점 이동 촬영을 통한 광선 분포 촬영

에서는 한 번의 촬영으로 간편하게 광선 분포를 촬영할 수 있다는 것이 가장 큰 장점이다. 그러나 촬영할 수 있는 광선 분포의 공간 및 각도 해상도가 렌즈 어레이를 이루는 렌즈의 개수와 각 렌즈에 배치되는 픽셀의 개수에 의하여 제한되는 단점을 가지므로 고해상도의 광선 분포 촬영에는 아직 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 렌즈 어레이를 미세하게 움직이며 다수의 영상을 촬영하거나, 물체 모양에 대한 사전 정보를 바탕으로 해상도를 향상시키는 신호 처리 기법들이 최근 연구 되고 있다.

### 다. 초점 영상 이동 촬영 기술

광학 분포를 간편하게 촬영하기 위한 또 다른 방법은 초점 영상 이동 촬영 기법이다.[5] 그림 3에서 보는 바와 같이, 일반적인 카메라를 하드웨어 수정 없이 그대로 사용하되 카메라의 초점 거리를 바꾸며 여러 장의 사진을 촬영하는 방법이다.

카메라의 초점면이 광선 분포의 기준면과 일치할 경우 카메라의 각각의 픽셀은 광선 분포 기준면의 해당 위치를 통과하는 서로 다른 각도를 가지는 광선들의 합을 기록하게 되며, 따라서 이 때 촬영된 영상은 기준면에서 표현된 4차원  $(x, y, \theta_x, \theta_y)$  광선 분포를 각 위치  $(x, y)$ 별로 각도  $(\theta_x, \theta_y)$ 에 대해 적분한 2차원 투사 (projection)에 해당한다. 카메라의 초점면이 그림 3에

서 보는 바와 같이 광선 분포의 기준면과  $\Delta z$  만큼 차이가 날 경우, 카메라의 각 픽셀이 기록하는 것은 광선 분포의 기준면을 다른 위치에서 다른 각도로 통과하는 광선들이며, 이 때 촬영된 영상은 4차원 광선 분포를  $\Delta z$ 에 의해 결정되는 방향으로 적분한 기울어진 2차원 투사에 해당한다. 따라서 카메라의 초점면을 이동시키며 다수의 영상을 촬영하면, 4차원 광선 분포의 다양한 2차원 투사들을 얻게 되며, 이들 2차원 투사들을 다시 4차원 광선 분포 공간으로 역투사 시켜 중첩시킴으로써 본래의 4차원 광선 분포를 복원할 수 있다.

이와 같은 초점면 이동 촬영 기법은 기존의 카메라를 하드웨어 수정 없이 그대로 사용한다는 점에서 매력적이며, 특히 카메라의 초점면을 이동하는 것이 기존 상용 카메라의 자동 초점 기능 등을 통해 이미 구현되어 있으므로 손쉽게 구현할 수 있다는 점이 장점이다. 또, 복원된 광선 분포의 공간 해상도가 카메라 자체의 해상도와 동일한 수준이 될 수 있어, 렌즈 어레이를 통해 공간 해상도를 희생하는 integral imaging 기법보다 보다 높은 공간 해상도의 광선 분포를 획득할 수 있다는 것도 주목할 만 하다. 획득할 수 있는 광선 분포의 각도 영역이 카메라의 물체 공간 쪽 F수에 의하여 제한되지만, 애초에 시야각이 넓지 않은 홀로그래픽 3차원 디스플레이를 위한 콘텐츠 촬영의 응용으로는 여전히 유용하다. 아직 한 번의 촬영으로 광선 분포를 얻지 못하고 다수의 촬영을 해야 한다는 점에서 한계를 가지지만, 고속 연속 촬영 기술의 개발, 다수 2차원 투사로부터 본래 4차원 광선 분포를 복원하는 알고리즘의 개선, 변조된 카메라 렌즈 (coded aperture) 기법 개발 등으로 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

## 3. 광선 분포를 이용한 홀로그램 합성

### 가. 호겔 기반 홀로그램 합성

광선 분포를 이용한 홀로그램 합성의 대표적인 기법

# 광선 분포를 이용한 홀로그래픽 3D 디스플레이 콘텐츠 합성

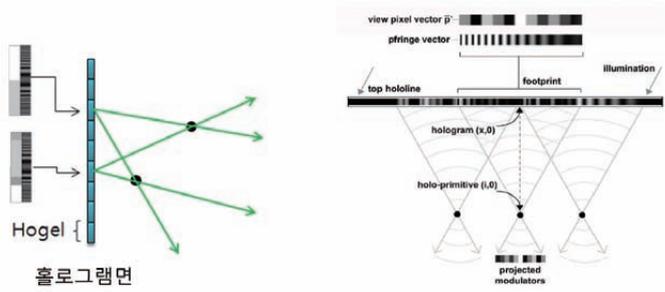


그림 4. 호겔 기반 홀로그램 합성 (오른쪽 그림은 참고 문헌 [7])

은 호겔에 기반한 기술이다.[6,7] 호겔은 그림 4에서 보는 바와 같이 홀로그램면의 각 위치에서 광선의 각도별 분포를 재생하는 단위를 말한다. 개별 호겔은 다수의 픽셀로 이루어져 있으며 이들 픽셀의 변조를 통해 해당 위치에서의 광선의 각도별 분포를 재현한다. 먼저 각 호겔이 차지하는 픽셀의 개수를 고려하여 각 호겔에

서 특정한 각도로 빛을 회절 시킬 수 있는 최적 기저 위상 함수를 미리 계산한다. 다음으로 주어진 광선 분포에서 해당 호겔 위치에 해당하는 광선의 각도별 밝기 분포를 가중치로 하여 해당하는 각도의 기저 위상 함수들을 더해줌으로써 각 호겔의 데이터를 합성한다. 이와 같은 과정을 통해 주어진 광선 분포를 홀로그램면에서 재현할 수 있는 홀로그램 콘텐츠를 합성할 수 있다. 이 때, 각 호겔을 홀로그램면의 영

역을 나누어 배치하지 않고, 홀로그램면에서 서로 중첩되게 배치함으로써 광선 분포가 재현되는 기준면을 홀로그램면이 아닌 다른 위치로 이동할 수도 있으며, 이를 통해 표시하는 3차원 영상의 중심 깊이에 맞춘 홀로그램의 최적화를 도모할 수도 있다.[7]

## 나. 평행 투영 영상 기반 홀로그램 합성

광선 분포를 이용하여 홀로그램을 합성하는 또 다른 방법은 평행 투영 영상에 기반한 기법이다. 이 방법에서는 먼저 물체를 서로 다른 각도로 평행 투영한 영상(orthographic projection image)들의 집합을 광선 분포로부터 얻는다. 이는 4차원  $(x, y, \theta_x, \theta_y)$  광선 분포의 각도  $(\theta_x, \theta_y)$  별 단면(slice)들을 추출함으로써 수행된다. 추출된 평행 투영 영상을 평행 투영 각도에 해당하는 평면파의 위상함수와 곱하고 이를 적분하여 그림 5에서 보는 바와 같이 홀로그램면에서의 한 위치에 대한 복소 진폭을 계산한다. 이와 같은 연산을 모든 평행 투

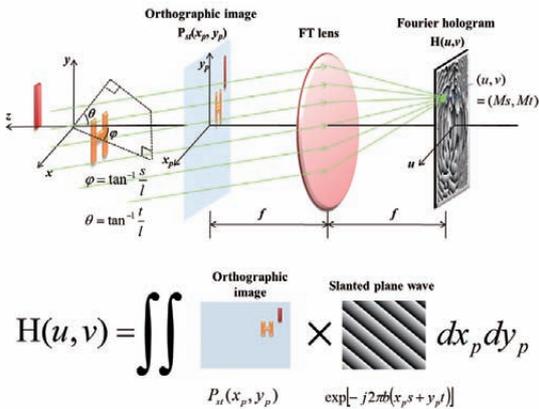


그림 5. 평행 투영 영상 기반 홀로그램 합성

영 영상에 대하여 반복 수행함으로써 3차원 물체에 대한 푸리에 홀로그램을 얻을 수 있다. 이와 같은 방법은 그림 5에서 보는 바와 같이 푸리에 홀로그램의 각 점이 푸리에 렌즈에 의하여 각 평행 투영 영상을 이루는 광선들에 대응된다는 점을 이용한 것이며, 비슷한 방법을 사용하여 프레넬 홀로그램의 합성도 역시 가능하다.[8]

이와 같은 기법은 물체 표면의 위상 분포가 균일하다고 가정할 경우, 홀로그래픽 스테레오그램이 아니라 물체광의 진폭과 위상을 그대로 재현하는 홀로그램을 합성

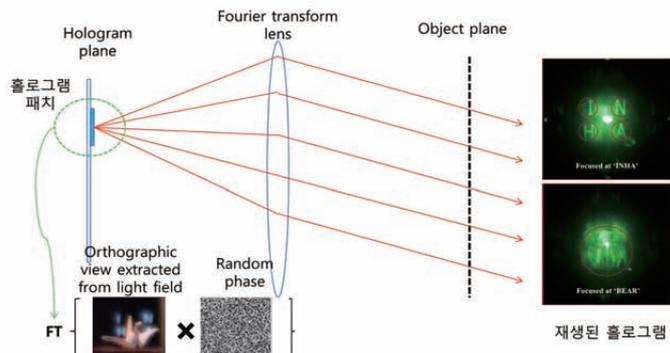


그림 6. 평행 투영 영상 패치 기반 홀로그램 합성

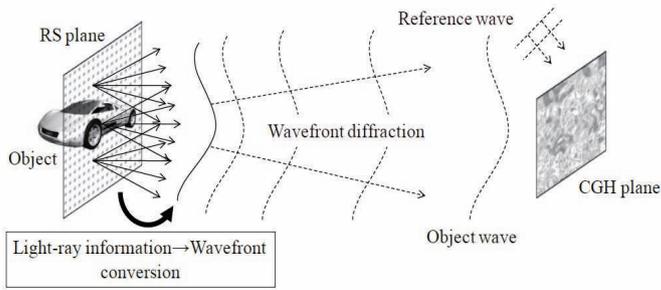
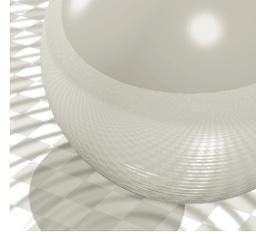


그림 7. 광선 분포 기준면 전파(참고문헌 [9])

할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 그러나 일반적인 diffusive 물체의 경우 표면 위상 분포가 균일하지 않고, 추출 가능한 평행 투영 영상의 개수가 충분치 않을 경우 이러한 방법으로 생성되는 홀로그램의 해상도가 높지 않다는 점에서 한계도 역시 지니고 있다. 홀로그램 해상도가 낮은 단점을 보완하기 위하여 그림 6에서와 같이 평행 투영 영상들을 각각 랜덤한 위상 분포와 곱한 후 푸리에 변환하여 얻은 패치를 이어 붙여 푸리에 홀로그램을 형성하는 기법도 연구되고 있다.[5]

#### 다. 광선 분포 기준면 전파

광선 분포를 이용한 홀로그램 합성의 마지막 방법으로 광선 분포 기준면을 전파하는 기법을 소개한다. 광선 분포는 기준면에서 특정한 공간-각도 간격으로 샘플링된 이산 데이터이므로 해당하는 3차원 물체가 광선 분포의 기준면과 멀리 떨어져 있을 경우 그 재현 품질이 저하된다. 따라서 보통 광선 분포의 기준면은 일반적으로 3차원 물체의 중심 깊이 근처로 설정된다. 그러나 홀로그래픽 디스플레이에서는 그 구조에 따라 홀로그램에서 멀리 떨어진 곳에 3차원 영상을 위치시키는 것이 유리할 수 있으므로, 광선 분포의 기준면을 임의의 위치에 위치시키며 홀로그램을 합성하는 것이 필요하다. 이를 위하여 참고 문헌[9]의 연구에서는 먼저 광선 분포의 기준면에서 복소 광파를 생성한 후 이를 최종 홀로그램까지 프레넬 회절에 기반한 수치적 전파를 시킴으로써 홀로그램을 합성하였다. 이 때, 여러 개의 3차원 물체들이 서로 다른 거리에 존재하고 각 물체에 해당하는 광선 분포들이 각 물체의 중심 거리를

기준면으로 하여 별개로 존재할 경우, 이와 같은 수치적 전파를 각 기준면에 대하여 연속적으로 수행하고 광선 분포로부터 얻어진 각 물체의 실루엣을 기반으로 후방에서 온 복소 광파를 가려줌(masking)으로써 물체간의 가려짐(occlusion)도 구현할 수 있다.

#### 라. 광선 분포에 대한 기존 컴퓨터 그래픽스 기법의 접목

광선 분포 촬영 및 이를 이용한 홀로그램 합성의 장점 중 하나는 광선 분포에 대하여 컴퓨터 그래픽스 분야에서 연구되어 온 기존 기술들을 홀로그램 합성에 쉽게 접목할 수 있다는 것이다. 최근 복소 광파와 광선 분포간의 상호 변환을 통하여 여러 3차원 물체간의 가려짐은 광선 분포들을 이용하여 구현하고 홀로그램의 합성은 복소 광파의 수치 전파를 통해 효율적으로 수행하는 기법이 발표되었으며,[10] 광선 분포내 광선 추적을 통한 사실적인 (photo-realistic) 영상의 홀로그램 합성 기법도 발표된 바 있다.[11] 이러한 기존 컴퓨터 그래픽스 기법의 접목은 최근 많은 관심을 받고 있으며 많은 연구 결과들이 도출될 것으로 기대되고 있다.

#### 4. 결론

본 고에서는 광선 분포의 촬영과 이에 기반한 홀로그램 합성 기법에 대하여 개괄하였다. 광선 분포는 물체 광을 이루는 광선들의 위치별 각도별 분포를 말하며 기존의 DSLR 카메라와 같은 시스템으로 간편하게 촬영하는 기술들이 최근 개발되고 있다. 이와 같이 촬영된 광선 분포를 이용하여 홀로그램을 합성함으로써 홀로그래픽 3차원 디스플레이의 콘텐츠를 손쉽게 얻을 수 있으며, 이는 디스플레이 자체의 기술 개발과 더불어 홀로그래픽 3차원 디스플레이 생태계의 발전 및 대중화에 의미 있는 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다.

## 광선 분포를 이용한 홀로그래픽 3D 디스플레이 콘텐츠 합성

### 참고문헌

- [1] J.-X. Chai, S.-C. Chan, H.-Y. Shum, and X. Tong, "Plenoptic sampling," Proc. ACM SIGGRAPH, 307–318 (2000).
- [2] R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," Stanford Tech. Rep. CTSR 2005-02 (Stanford University, 2005).
- [3] S.-K. Lee, S.-I. Hong, Y.-S. Kim, H.-G. Lim, N.-Y. Jo, and J.-H. Park, "Hologram synthesis of three-dimensional real objects using portable integral imaging camera," Opt. Express, 21(20), 23662–23670 (2013).
- [4] <http://www.lytro.com/>
- [5] J.-H. Park, S.-K. Lee, N.-Y. Jo, H.-J. Kim, Y.-S. Kim, and H.-G. Lim, "Light ray field capture using focal plane sweeping and its optical reconstruction using 3D displays," Opt. Express, 22(21), 25444–25454 (2014).
- [6] M. Lucente, "Optimization of hologram computation for real-time display," Proc. SPIE 1667, 32–43 (1992).
- [7] W. Plesniak, M. Halle, V.M. Bove, Jr., J. Barabas, and R. Pappu, "Reconfigurable image projection holograms," Opt. Eng. 45(11), 115801 (2006).
- [8] J.-H. Park, M.-S. Kim, G. Baasantseren, and N. Kim, "Fresnel and Fourier hologram generation using orthographic projection images," Opt. Express, 17(8), 6320–6334 (2009).
- [9] K. Wakunami and M. Yamaguchi, "Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane," Opt. Express, 19(10), 9086~9101 (2011)
- [10] K. Wakunami, H. Yamashita, and M. Yamaguchi, "Occlusion culling for computer generated hologram based on ray-wavefront conversion," Opt. Express, 21(19), 21811–81822 (2013).
- [11] T. Ichikawa, K. Yamaguchi, and Y. Sakamoto, "Realistic expression for full-parallax computer-generated holograms with the ray-tracing method," Appl. Opt. 52(1), A201–A209 (2013).

### 약력

#### 박재형



- 2013년 3월 - 현재  
인하대학교 정보통신공학과, 부교수
- 2007년 9월 - 2013년 2월  
충북대학교 정보통신공학과 전임강사, 조교수, 부교수
- 2005년 9월 - 2007년 8월  
삼성전자 책임연구원
- 1995년 3월 - 2005년 8월  
서울대학교 전기컴퓨터공학부, 공학사, 공학석사, 공학박사