

Light Field 카메라 기술 동향

Technology and Trend of Light Field Camera

김태원 (T.W. Kim) 디지털홀로그래피연구실 선임연구원
정원식 (W.S. Cheong) 입체방송연구실 책임연구원
허남호 (N.H. Hur) 방송시스템연구부 부장

- I. 서론
- II. Light Field 소개
- III. Light Field 획득 방식
- IV. Light Field 카메라 기술
- V. Light Field 카메라 응용
- VI. 결론

* 본 연구는 미래창조과학부의 지원을 받는 방송통신기술개발사업의 연구결과로 수행되었음(11-921-02-001, 무안경 다시점 3D 지원 UHD TV 방송 기술 개발).

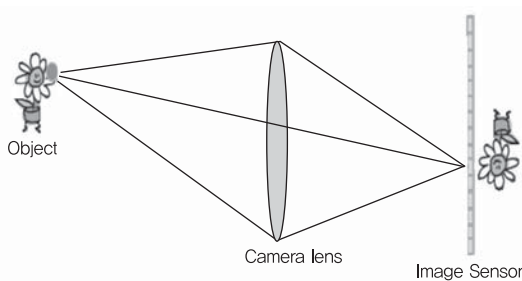
기존 2D 카메라로 획득된 영상은 공간에 존재하는 빛에 대한 손실된 정보를 담고 있어 그 응용에 한계를 가지고 있다. 그러나 공간 내에 존재하는 빛 정보를 획득하여 가지고 있다면 그 공간을 똑같이 인위적으로 다른 장소에서 그대로 재현해 낼 수 있어 다양한 분야에 응용할 수 있을 것으로 기대된다. 근래에 이러한 빛 정보를 획득하기 위한 카메라 기술 및 장치들에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 본고에서는 공간에 존재하는 빛 정보를 나타내기 위한 light field 개념을 소개하고, light field 정보 획득 카메라 기술 및 장치에 대해 살펴본다. 또한 기 개발된 light field 카메라들의 특징들을 비교 분석하고, 다양한 응용 사례에 대해 알아 보기로 한다.

I. 서론

공간에 존재하는 빛(ray)으로 인해 우리는 눈을 통하여 사물을 보고 인식을 할 수 있다. 실제로 공간에 존재하는 빛에 대한 모든 정보를 가지고 있다면 원하는 시간에, 원하는 장소에서 그 공간을 그대로 재현해 낼 수도 있을 것이다. 우리가 일상 생활에서 많이 사용하고 있는 디지털 카메라는 이러한 빛에 대한 정보를 획득할 수 있는 대표적인 장치로, 카메라 렌즈를 통하여 들어온 빛의 세기(radiance) 정보를 영상 센서(image sensor)를 이용해서 획득하여 영상 데이터로 저장하는 기능을 갖고 있다. 그러나 기존 2D 카메라로 획득된 영상은 공간에 존재하는 빛에 대한 손실된 정보를 담고 있다. 즉 (그림 1)에서 보는 바와 같이 기존 카메라는 물체(object)의 한 점으로부터 나오는 빛들(rays)이 카메라 렌즈를 통과한 후에 영상 센서의 한 점에서 모여 적분된(integrated) 값을 획득하기 때문에 개별 빛들의 세기 및 방향(ray directions) 대한 정보를 잃게 된다.

실제로 물체의 한 점으로부터 나오는 서로 다른 방향의 빛들에 대한 정보를 획득하여 저장할 수 있다면 가상의 카메라를 설정하여 임의의 시점(viewpoint) 또는 임의의 초점(focusing)에 해당하는 영상을 새롭게 생성해 낼 수 있어 가상 세계 구축, 3DTV 등등의 다양한 분야에 응용할 수 있을 것이다.

본고에서는 II 장에서 light field 개념에 대해 소개하고, III장에서는 light field 정보를 획득하기 방법 및 장



(그림 1) 2D 카메라 영상 생성 원리

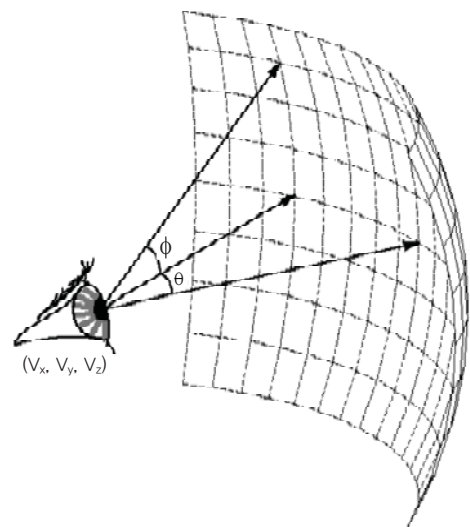
치들에 살펴본 후에, 대표적인 light field 정보 획득 장치인 plenoptic 카메라 시스템에 대해서 IV장에 설명한다. 마지막으로 V장에서 light field 카메라의 응용 사례를 소개한 후에 VI 장에서 결론을 맺기로 한다.

II. Light field 소개

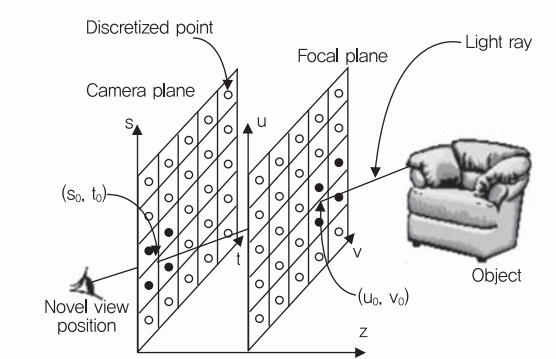
공간상의 한 점을 통과하는 빛의 세기 정보를 표현하기 위해서는 빛이 통과하는 점의 3차원 위치, 빛의 진행 방향, 색상과 관련된 빛의 파장, 그리고 시간 등의 변수를 필요로 한다. Adelson and Bergen[1]는 이러한 빛의 세기 정보를 표현할 수 있는 plenoptic function을 제안하였는데, (그림 2)에서 보는 바와 같이 7개의 매개변수(parameter)를 사용하여 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$p = P(\theta, \phi, \lambda, V_x, V_y, V_z, t)$$

여기서 (θ, ϕ) 는 빛의 방향, λ 는 빛의 파장, (V_x, V_y, V_z) 는 공간상의 3차원 위치, t 는 시간을 나타낸다. Plenoptic function을 알고 있으면 공간상에 존재



(그림 2) Plenoptic function 매개변수화(parameterization)



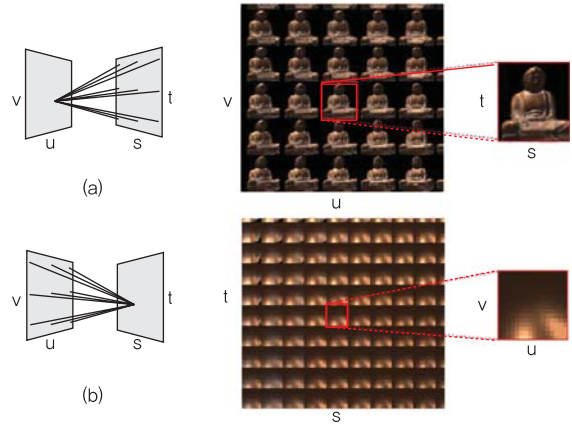
(그림 3) Light slab: 2개 평면 매개변수화에 기반한 4D light field 표현

하는 모든 빛의 세기 정보를 알 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 plenoptic function을 구하기 위해서는 공간상의 모든 위치 및 방향에서의 빛의 세기 등의 실제 측정 데이터가 필요하여 실질적으로 이 함수를 구하는데 어려움이 발생한다. 1996년에 M. Levoy[2]와 S.J. Gortler et al.[3]은 SIGGRAPH에 plenoptic function을 간소화하여 4개의 매개변수를 이용한 4D light field를 제안하였는데 이는 2개의 평면 사이에 정의되는 빈 공간(empty space)에 존재하는 빛의 세기 정보를 표현하기 위한 방법으로, 빛이 진행 방향을 따라 세기가 변하지 않고, 단일 파장 성분을 가지며 시간에 따른 빛의 세기가 변화가 없다는 가정을 이용하였다((그림 3) 참조).

(그림 4)에 이러한 4D light field의 이해를 돕기 위해 실제 예로 가상의 다시점 카메라 시스템을 이용해서 얻어진 영상 데이터로 표현된 light field를 도시하였다.

III. Light field 획득 방식

Light field 개념이 제안된 이후 이를 획득하기 위한 다양한 기술과 장치들이 제안되었는데, 대표적으로는 여러 대의 카메라를 사용하여 시점이 다른 복수의 영상을 캡처함으로써 light field 정보를 획득할 수 있는 시스템을 들 수 있다. 본 장에서는 light field 데이터를 획득



(그림 4) 영상에 의한 4D light field 개념 도시(M. Levoy [2])

하기 위한 다양한 방법과 장치들에 대해 살펴보고 각각의 방식들의 특징을 비교하여 살펴보기로 한다.

1. 획득 방식

Light field 획득 기술은 크게 다수의 카메라 배열(multiple camera array)에 기반한 방식과 렌즈 배열(lens array)에 기반한 단일 카메라 방식으로 나눌 수 있는데 아래에 각 방식의 대표적인 시스템과 이를 이용한 응용 사례를 살펴본다.

가. 다수 카메라 배열(multiple camera array) 방식

2005년에 Stanford 대학에서는 100대의 카메라 배열((그림 5)참조)을 이용한 실시간 비디오 획득 시스템을 구축하였는데, 이것은 평면상에 균일하게 분포되어 있는 100대의 카메라로부터 획득되는 640x480(VGA) 영상을 MPEG 압축을 통하여 초당 30 프레임씩 약 2분 30초 정도 길이의 영상 시퀀스를 실시간으로 획득하여 저장할 수 있다[4]. 이 시스템을 활용하여 각 카메라의 노출 시간(exposure time)을 달리하고, 카메라의 시야각 FOV(Field of View)를 겹치게 배열함으로써 모자이



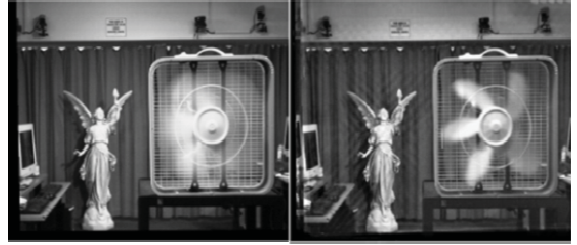
(그림 5) Stanford 대학의 100대의 카메라로 이루어진 카메라 배열



(그림 6) SAP 기술을 이용한 가려진 영역 복원 모습

킹(mosaicking) 기법을 사용하여 HDR(High Dynamic Range) 고해상도(High Resolution) 비디오 시퀀스를 만들어 낼 수 있다. 또한 동시에 획득된 영상을 공통의 평면에 등록(registration)함으로써 아주 큰 개구(aperture) 사이즈를 갖는 카메라를 만들어 낼 수 있는데 이러한 기술을 SAP(Synthetic Aperture Photography)라 부르며, 단일 카메라를 이용해서 촬영된 영상의 경우 숲과 같은 장애물에 의해서 가려진(occluded) 영역이 발생 할 수 있는데 이 SAP 기술을 적용하면(그림 6)과 같이 가려진 영역을 복원할 수 있다.

기존에는 카메라를 이용하여 촬영 시 어두운 장소에 빛의 양을 많게 하기 위한 방법으로 보통 노출 시간을 늘이거나 렌즈 개구 사이즈를 크게 해야 하는데, 노출 시간을 늘이면 빠르게 움직이는 물체 촬영 시에 motion blur 현상이 발생하고, 렌즈 개구 사이즈를 증가 시키면 카메라 DOF(Depth of Field)가 줄어드는 문제점이 발생한다. 그러나 다수 카메라 배열 시스템을 활용할 경우 적은 노출 시간과 작은 렌즈 개구 사이즈를 가진 카메라들을 사용해도 빠른 움직임에 대처하고 확장된 DOF를 갖는 밝은 영상을 획득할 수 있다(그림 7)참조).

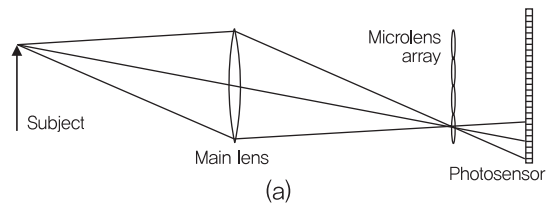


(a) (b)

(그림 7) 2D 카메라로 획득한 영상(a)과 SAP에 의한 확장 DOF와 빠른 모션 캡처 영상(b)

나. 렌즈 배열(lens array) 기반 단일 카메라 방식

2005년에 Stanford 대학의 Ng이 Adelson et al.[5]이 구현한 plenoptic 카메라 프로토타입 시스템을 기반으로 소형(compact) light field 카메라 시스템을 구현하였다 [6][7]. 실제 구현을 위해 일반 디지털 카메라를 기반으로(그림 8)과 같이 MLA(Micro Lens Array)를 영상 센서 앞에 위치 시켜 물체의 한 점으로부터 나오는 여러 방향의 빛들 중 카메라 주 렌즈(main lens)를 통과한 빛들의 세기 정보를 방향 별로 분리하여 저장할 수 있는



(a)



(b)

(그림 8) 렌즈 배열 방식의 light field 획득 개념(a)과 light field 카메라 실제 모습(b)



(그림 9) 서로 다른 깊이에 초점이 맞춰진 영상 예

plenoptic 카메라 시스템을 개발하였다. 렌즈 배열을 사용하여 빛의 방향 정보를 획득 하는 개념은 Lippmann 이 1908년에 처음으로 제안하였으며[8], 이 원리는 오늘날의 집적 영상(integral imaging)의 효시가 되었다. Plenoptic 카메라의 대표적인 특징으로는 촬영 이 후에 사후 영상 refocusing 기능을 들 수 있으며((그림 9) 참조), 획득된 원 데이터(raw data)의 화소 재배치(pixel reordering)를 통해 신호 처리를 통하지 않고 시점(viewpoint)이 다른 영상을 간단히 추출할 수 있는 기능도 가지고 있다. 이렇게 추출된 영상들은 3D 입체 디스플레이의 콘텐츠로 사용할 수도 있다. 이러한 plenoptic 카메라는 구현의 용이성으로 인해 상용 제품이 이미 출시 되었으며, 대표적으로는 미국의 Lytro 카메라와 독일의 Raytrix 카메라를 들 수 있다.

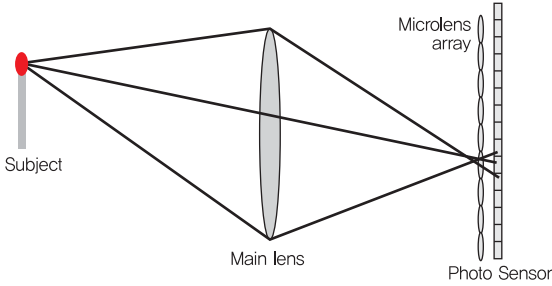
2. 획득 방식 비교 분석

렌즈 배열 기반 단일 카메라 방식에 비해 다수 카메라 배열 시스템은 상대적으로 넓은 FOV를 가지는 장점이 있으나, 시스템 구축을 위한 비용이 많이 소요되며, light field 획득을 위해서는 카메라 간 배치(alignment),

카메라 간 신호 이득(gain) 차이로 인한 색상 불일치, 카메라 내/외부 매개변수 보정(camera internal/external calibration) 등의 문제를 선 해결해야 하고 실제 활용하기 위해서는 관련 분야 전문 지식이 필요함에 따라 일반 사용자가 시스템을 다루기에는 어려움이 있다. 또한 카메라 자체 부피 때문에 카메라간 간격을 줄이는데 한계가 있고 이로 인해 카메라 사이에 존재하는 light field 정보를 획득할 수 없어 영상 생성 시 정보 부재로 인해 화질이 떨어지는 경우가 발생할 수 있다. 이에 반해 렌즈 배열 기반 단일 카메라 방식은 다수 카메라 배열 방식에 비해 구축 비용이 비교적 저렴하고, 카메라 간 배치, 신호 이득, 보정 등의 문제 해결이 용이해서 일반 사용자도 이 시스템을 이용해 손쉽게 light field 정보 획득이 가능하다. 또한 카메라 보정, 배치 등의 문제가 단순하여 다수 카메라 방식에 비해 깊이(depth) 정보 추출이 용이하고, 3DTV를 위한 입체 영상 생성 시 입체감 조절이 용이한 이점도 가지고 있다. 그러나 단일 카메라 방식의 경우 고해상도의 영상 센서(Ng가 개발한 plenoptic 카메라의 경우 4,000x4,000 이상의 영상 센서 해상도)가 필요로 되는데, 현재의 영상 센서 기술로는 공간(spatial) 영상 해상도가 다수 카메라 방식에 비해 떨어지는 불리한 부분이 있지만, 이는 추후 영상 센서 기술의 발전으로 해결될 수 있을 것으로 기대된다.

IV. Light field 카메라 기술

앞 장에서 살펴 보았듯이 light field 카메라 영상 획득 원리는 기존의 2D 카메라 획득 원리와는 근본적인 차이가 있다. 앞서 (그림 1)에서 알 수 있듯이 2D 카메라의 경우 물체의 한 점으로부터 나온 빛들의 세기를 영상 센서의 한 점에서 적분하여 저장하는 반면에 light field 카메라의 경우에는 ML(Micro Lens)에 의해 각 방향의 빛의 세기가 서로 분리되어 영상 센서에 저장되게 된다(그림 10)참조. 본 장에서는 대표적인 light field 카메라

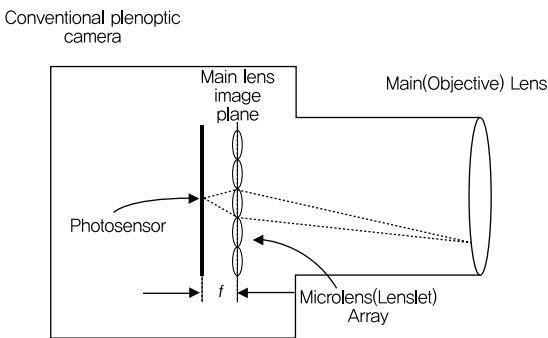


(그림 10) Light field 카메라 원리

시스템에 대해서 살펴보고 이들 카메라 시스템의 특징을 비교 분석해 보기로 한다.

1. Plenoptic 카메라(Lytro 카메라)[6][7]

Ng에 의해 구현된 plenoptic 카메라는 2006년에 직접 설립한 Lytro라는 회사를 통해 Lytro 카메라로 출시된 상태이다. 이 plenoptic 카메라는 MLA를 주 렌즈의 IP(Image Plane)에 위치하도록 하고, 영상 센서는 MLA의 초점거리(focal length)에 위치하도록 설계가 되어 있다(그림 11) 참조). 이때 하나의 ML에 해당하는 영상 센서 영역에 형성되는 MI(Micro Image)를 통해 물체의 한 점으로부터 나오는 빛들의 세기 정보를 방향 별로 분류하여 획득할 수 있다. 또한 plenoptic 카메라를 이용하면 이전 장에서 언급되었듯이 주 렌즈 영역(area) 안의 부개구(sub-aperture)에 해당하는 부개구 영상(sub-aperture image)을 얻을 수 있으며, 카메라 내부



(그림 11) Plenoptic 카메라(Lytro 카메라) 개념도

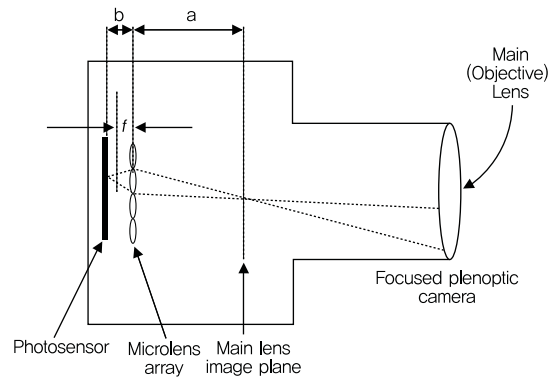
의 임의의 평면에 가상 카메라를 위치시킴으로써 ray-tracing 기법을 이용하여 사후 refocusing 된 영상을 계산을 통해 얻을 수 있다. 실제로 빠른 계산을 위해서 plenoptic sampling 이론에 기반한 4차원 주파수 공간에서 2차원 평면을 슬라이싱(slicing)함으로써 refocusing 된 영상을 빠른 속도로 얻은 방법도 있다[9]. Plenoptic 카메라로부터 부개구 영상을 추출할 시에 영상 센서의 해상도 한계로 인해 최종 획득되는 영상의 공간(spatial) 해상도가 낮은 문제점이 있다.

2. Plenoptic 2.0 카메라[10][11]

Plenoptic 2.0 카메라는 기존 plenoptic 카메라의 낮은 시점 영상 해상도 문제를 해결할 수 있는 구조로 명칭상 구별을 위해 기존의 plenoptic 카메라를 plenoptic 1.0 카메라라고도 부른다. 아래에 plenoptic 2.0 카메라의 대표적인 방식에 대해 알아본다.

가. Focused plenoptic 카메라[10]

(그림 12)에서 보듯이 plenoptic 카메라 1.0과 달리 MLA가 주 렌즈의 IP에 위치하지 않고 IP로부터 거리 a 만큼 떨어진 위치에 놓여 있다. 이러한 이유로 MLA는 기존의 plenoptic 카메라와는 달리 각각의 ML이 소형 카메라 역할을 하면서 주 렌즈의 IP에 맺히는 상을 획득



(그림 12) Plenoptic 카메라 2.0 개념도

하게 되는데, 거리 a, b가 렌즈 공식을 따른다는 것을 이용하여 각 방향(angular direction) 영상 해상도를 줄임으로써 공간 영상 해상도를 향상시켰다.

나. Multi-focus plenoptic 카메라[11]

Plenoptic 카메라의 대표적인 응용 예인 사후refocusing 기능을 위해서는 DOF가 확장되어야 하는데, 기존의 고정된 초점거리를 갖는 MLA를 사용할 경우에는 DOF 한계로 인해 refocusing을 통해 모든 깊이에서 정밀하게 초점이 맞춰진 영상을 생성하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 multi-focus plenoptic 카메라는 기존의 한 개의 초점거리를 가지는 MLA 대신에 2~3개 정도의 서로 다른 초점거리를 갖는 ML로 이루어진 MLA를 사용하여 DOF를 확장시킴으로써 refocusing 응용 범위를 넓힐 수 있다.

3. Raytrix 카메라[12]

독일에서 개발되어 상용 제품으로 출시된 Raytrix 카메라는 기존의 plenoptic 카메라 1.0과 2.0의 기능을 개선하여 이전보다 6배 이상 증대된 DOF를 가지며, 시점 영상의 해상도를 영상 센서 해상도의 1/4까지 늘릴 수 있는 기능을 지원한다. DOF 증가의 경우 multi-focus plenoptic 카메라의 경우와 유사하게 3개의 서로 다른

초점거리를 갖는 ML를 사용하는데, 이때 특수 제작된 MLA를 사용함으로써 기존 plenoptic 카메라보다 더 우수한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다.

4. 비교분석

지금까지 소개된 각 plenoptic 카메라의 특성 및 규격을 용이하게 비교하기 위해 <표 1>에 요약하여 표시하였다[13]. 현재까지 상용 제품으로 나와 있는 plenoptic 카메라 중에서 성능이 가장 우수한 제품으로 알려진 Raytrix 카메라는 영상 센서의 해상도가 다른 카메라에 비해 상대적으로 작지만, 특수 제작된 MLA를 사용하기 때문에 제품 가격이 상대적으로 고가이다. 실제로 Raytrix 카메라는 주로 산업용을 목표로 생산되고 있고, Lytro 카메라는 일반 소비자를 겨냥한 제품으로 출시되고 있다. Lytro 카메라의 경우 현재 상당한 컴퓨팅 파워가 필요로 되는 비디오 영상을 지원하지 않고 있으나 조만간 이를 지원하는 제품을 선보일 예정으로 알려져 있다. Plenoptic 카메라를 실제 구현 관점에서 살펴보면 기본적으로는 고해상도의 영상 센서 이외에도 주 렌즈와 ML의 F-number 매칭이 필요로 된다. 그러나 자체적으로 조사한 바에 의하면 주 렌즈와 ML의 개구 사이즈 차이로 인해서 F-number 매칭을 만족하고 및 기타 필요 요구 조건을 충족시키는 MLA 제작 시 기술적 어려움이 있는 것으로 파악되었다.

<표 1> Plenoptic 카메라 비교[13]

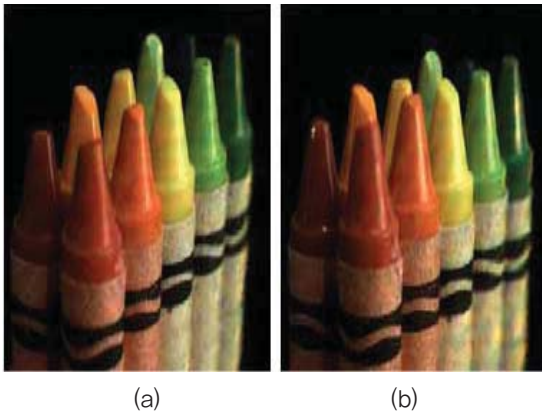
	Plenoptic 카메라	Plenoptic 카메라 2.0	Raytrix 카메라
Max. Effective Resolution	0.06 Mpixels	1 Mpixels	3 Mpixels
Sensor Resolution	16 Mpixels	16 Mpixels	10 Mpixels
Extended DoF	No	Yes	Yes
Specialized MLA	No	No	Yes
Available Products	Yes	No	Yes
Patent	Yes	Yes	Yes
Real Time	No	Yes	Yes

V. Light field 카메라 응용

앞에서도 언급 했듯이 light field 카메라를 이용하면 사후 refocusing(그림 9)참조), 시점 영상 생성, HDR 영상 생성, super-resolution 영상 생성, 깊이 추정(depth estimation) 등의 다양한 응용이 가능하다. 본 장에서는 이러한 light field 카메라의 대표적 응용들에 대해 살펴보기로 한다.

1. 새로운 시점 영상 생성 (novel view synthesis)

Light field 카메라를 통해 얻어진 MI를 이용하면 MI 내에서 같은 화소 위치에 있는 화소값들을 조합하여 시점이 서로 다른 부개구 영상을 신호 처리 없이 화소값 재배치를 통해 간단히 생성해 낼 수 있다(그림 13) 참조). 이때 생성되는 영상의 시점들은 주 렌즈 영역 안의 공간 위치에 해당한다. 이외에도 가상의 카메라를 임의의 위치에 놓고 ray tracing 방법을 통해 새로운 시점(novel viewpoint) 영상을 생성할 수도 있다. 이렇게 생성된 시점 영상들은 3D 입체 디스플레이를 위한 콘텐츠로 활용할 수도 있어 light field 카메라와 3DTV의 연계 가능성을 모색해 볼 수도 있을 것이다.



(그림 13) 주 렌즈의 위쪽 위치에서 바라본 부개구 영상(a)과 주 렌즈의 아래 위치에서 바라본 부개구 영상(b)



(그림 14) HDR 영상: 개구 사이즈가 큰 MI로부터 생성된 영상(a)과 개구 사이즈가 작은 MI로부터 생성된 영상(b)

2. HDR 영상

Light field 카메라의 MLA 설계 시에 각각의 ML이 서로 다른 개구 사이즈를 갖도록 함으로써 한 번의 촬영을 통해 노출이 다른 MI 영상을 동시에 얻을 수 있다.

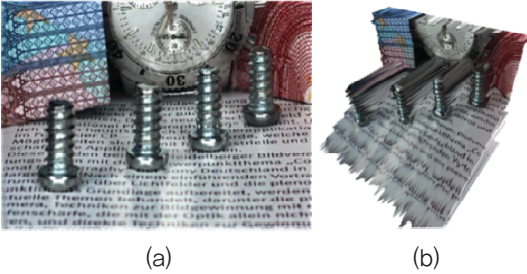
특이할 점은 기존 전통적인 카메라로 노출을 달리하면서 찍은 HDR 영상 생성 시에 정지 영상에 대해서만 적용이 가능하나, light field 카메라의 경우에는 한 번의 촬영을 함으로 정지 영상뿐만 아니라 비디오 영상에 대해서도 HDR 기법 적용이 가능하다[14](그림 14) 참조).

3. Super-resolution 영상

Light field 카메라로부터 얻어진 light field 데이터로부터 화소 재배치를 통해 시점 영상을 만들어 낼 수 있어 이를 이용하면 기본적으로 super-resolution 기법을 적용하여 초고해상도 영상을 만들어 낼 수 있다. Light field 카메라의 경우 모자이크 기법을 사용하지 않고도,



(그림 15) MI로부터 생성된 영상(a)과 Super-resolution 기법을 적용하여 생성된 영상(b)



(그림 16) 시점 영상(a)과 추정된 깊이 정보(b)

카메라 기하 구조와 ML 매개변수 정보를 이용하여 super-resolution 영상을 생성해낼 수 있다는 특징을 가진다[15](그림 15) 참조).

4. 깊이 추정

ML 영상들로부터 화소 재배치된 두 장의 시점 영상을 이용하여 스테레오 매칭을 통해 깊이 정보를 추정할 수 있다. Light field 카메라의 경우 ML 사이즈와 자세 (orientation) 등의 정보를 미리 알 수 있어 스테레오 매칭을 위한 별도의 3D 보정(calibration) 과정이 필요치 않다는 장점이 있다(그림 16) 참조).

VI. 결론

본고에서는 최근에 활발히 연구가 진행되고 있는 light field 개념에 대해 살펴보았고, light field 정보를 획득하기 위한 방법, 장치들과 관련 최신 연구 기술 동향에 대해서 알아보았다. 향후 센서 기술의 발달로 인한 영상 해상도 증가와 컴퓨터 계산 속도가 증가됨에 따라 가까운 미래에 지금보다 훨씬 다양한 분야에서 light field 카메라 기술을 활용한 응용 사례들이 나타날 것으로 기대해도 좋을 것으로 보인다.

약어 정리

DOF Depth of Field

FOV Field of View
 HDR High Dynamic Range
 IP Image Plane
 MI Micro Image
 ML Micro Lens
 MLA Micro Lens Array
 SAP Synthetic Aperture Photography

참고문헌

- [1] E.H. Adelson and J.R. Bergen, "The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision," Computational Models of Visual Process., 1991, pp. 3-20.
- [2] M. Levoy and P. Hanrahan, "Light Field Rendering," Proc. 23rd Ann. Conf. Comput. Graphics Interactive Techn., 1996, pp. 31-42.
- [3] S.J. Gortler et al., "The Lumigraph," Proc. 23rd Ann. Conf. Comput. Graphics Interactive Techn., 1996, pp. 43-54.
- [4] B. Wilburn et al., "High Performance Imaging Using Large Camera Arrays," ACM Trans. Graphics, vol. 24, no. 3, July 2005, pp. 765-776.
- [5] E.H. Adelson and J.Y.A. Wang, "Single Lens Stereo with Plenoptic Camera," IEEE Trans. Pattern Analysis and Mach. Intell., vol. 14, no. 2, Feb. 1992, pp. 99-106.
- [6] R. Ng et al., "Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera," Stanford University Computer Science Tech Report CSTR 2005-02, 2005.
- [7] R. Ng, Digital Light Field Photography, doctoral dissertation, Stanford University, CA, USA, 2006.
- [8] G. Lippmann, "La Photographie integrale", Comtes Rendus, Academie des. Sciences, Vol.146, 1908, pp.446-451,
- [9] R. Ng, "Fourier Slice Photography," ACM Transactions on Graphics, vol. 24, no. 3, 2005, pp. 735 - 744.
- [10] A. Lumsdaine and T. Georgiev, "The Focused Plenoptic Camera," IEEE International Conf. Computational Photography (ICCP), 2009, pp. 1-8.
- [11] T. Georgiev and A. Lumsdaine, "The Multi-Focus Plenoptic Camera," IS&SPIE Electron. Imaging, Jan. 2012.
- [12] C. Perwaß and L. Wietzke, "Single Lens 3D-camera with Extended Depth-of-Field," Proc. SPIE, San Francisco, USA, Jan. 2012, pp. 22-26.

- [13] http://raytrix.de/tl_files/downloads/02_Raytrix_Technology.pdf
- [14] T.G. Todor, A. Lumsdaine and S. Goma, "High Dynamic Range Image Capture with Plenoptic 2.0 Camera," Signal Recovery Synthesis, San Jose, CA, USA, Oct. 2009.
- [15] T.G. Georgiev and A. Lumsdaine, "Superresolution with Plenoptic Camera 2.0," Signal Recovery Synthesis, San Jose, CA, USA, Oct. 2009.