Light field camera를 이용한 영상 재초점 기술

김 정 태
이화여자대학교

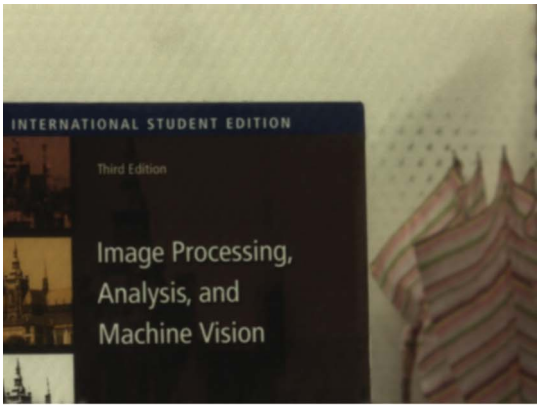
Ⅰ. 서 론

Light field 카메라 (혹은 Plenoptic 카메라)는, 2D 영상 센서 평면에 도달하는 빛의 양을 영상화하는 일반적인 카메라와 달리, 공간상에서의 여러 방향에서 도달하는 빛의 양, 즉 light field를 분리하여 기록하고 이를 통하여 3차원 깊이의 추정, 임의의 초점에서 초점을 맞춘 영상을 연산하여 생성하는 재초점 (refocusing) 기능등을 구현하는 카메라이다[1-2]. 이를 위하여, light field 카메라는 메인 렌즈에 의해서 모아진 빛의 양을 마이크로 렌즈 배열 (microlens array)을 사용하여 도달하는 방향에 따라서 분리하여 기록한다. 메인렌즈 평면상의 2D 위치에서 마이크로렌즈 초점 평면상의 2D 위치에 도달한 빛을 기록하므로, 메인렌즈 평면상에서의 2D 위치와 마이크로렌즈 초점 평면상에서의 2D 위치에 의해 결정되는 4D light field 데이터가 기록된다. 이렇게 생성된 4D light field 데이터를 이용하면 센서 평면이 임의의 위치로 이동된 영상, 즉 가상의 위치에서 초점이 맞은 영상을 4D light field 데이터의 선적분을 통하여 생성해 낼 수 있다. 따라서, 4D light field 데이터를 먼저 촬영하고 나중에 임의의 위치에서 초점을 맞춘 영상을 계산을 통하여 얻을 수 있으므로, 초점 여부에 상관없이 영상을 획득한 후 임의의 위치에서 재초점 (refocusing)을 수행하는 기술을 구현할 수 있다[1-2].

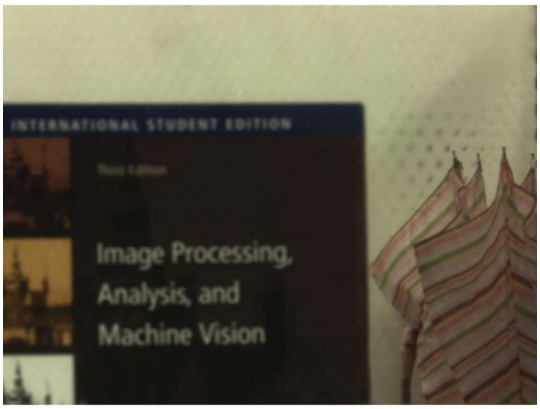
일반적인 2D 카메라로 영상을 획득할 시에는, 피사체의 위치에 따라 심도가 달라지게 되어서 초점을 앞쪽의 물체에 맞추는 경우 뒤쪽의 물체가 흐려지고 뒤의 물체에 맞추는 경우 앞쪽이 흐려지는 등의 문제가 있을 뿐 아니라, 피사체에 렌즈를 맞추고 초점을 잡는데 적지 않은 시간이 걸리므로 원하는 피사체에 초점이 맞지 않는 경우도 발생한다. 또한, 영상을 획득할 때의 초점과는 다른 초점의 영상

은 생성하기 힘들다.

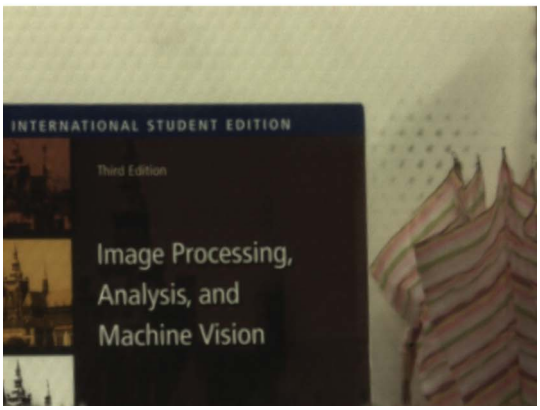
Light field 카메라를 사용하면 임의의 초점에서 재초점된 영상을 계산을 통해 생성할 수 있을 뿐만 아니라



(a)



(b)



(c)

〈그림 1〉 Light field 카메라 영상 (a) 근거리에 초점이 맞은 경우 (b) 원거리에 초점이 맞은 경우 (c) 초점이 맞은 부분들을 이용하여 피사계심도를 확장한 영상

여러 초점에서 재초점된 영상들을 생성한후 초점이 잘 맞는 부분들로만 구성된 영상을 얻을 수 있어서 피사계심도 (Depth of focus)를 대폭적으로 확장할 수 있는 장점이 있어서, light field 카메라는 IT 기기들의 차세대 카메라로써 커다란 잠재력을 가지고 있다.

〈그림 1〉은 Raytrix 사의 light field 카메라 R1을 사용하여 촬영한 light field 데이터를 사용하여 생성한, 가까운 곳에 초점을 맞춘 영상, 먼 곳에 초점을 맞춘 영상, 그리고 초점이 맞는 부분만으로 구성된 영상을 보여준다.

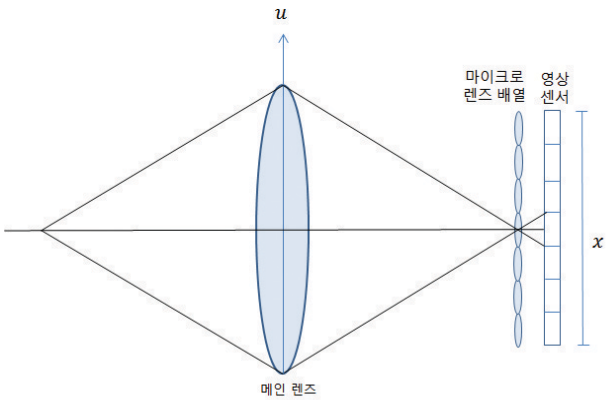
Light field 카메라의 기본적인 개념은 이미 1900년도 초반에 나왔으나[1] 실제로 구현 가능한 light field 카메라에 대한 최근 연구는 단일 스테레오 비젼 문제를 위한 Adelson 과 wang 의 논문으로부터 본격화 되었다[1]. 그리고 2000년경부터 Stanford 대학에서 마이크로렌즈 배열을 사용한 plenoptic 카메라에 대한 연구가 이루어졌고[2-3], 이 연구를 기반으로 하여 Lytro라는 회사에서 plenoptic 카메라의 실용화가 시작되는 단계에 있다. 또한 독일 회사인 Raytrix 가 light field 카메라를 출시하였고, 최근에는 Adobe systems 에서도 light field 카메라를 개발하여 출시 예정이라고 보도한 바 있다. 또한, Stanford 대학에서는 plenoptic 카메라의 원리를 이용한 light field 현미경 프로젝트를 진행하고 있다. Light field 현미경은 표본 (specimen)으로부터 방출되는 4D light field 정보를 획득한 후 재초점을 사용하여 3D 볼륨 스택을 생성하고 deconvolution 을 통하여 개선된 3D 영상 볼륨을 제공할 수 있어 빛에 민감한 표본이나 움직이는 표본들의 3D 볼륨 영상화에 유용하게 사용될 수 있다[4].

Ⅱ. Light field 카메라를 이용한 refocusing 기술

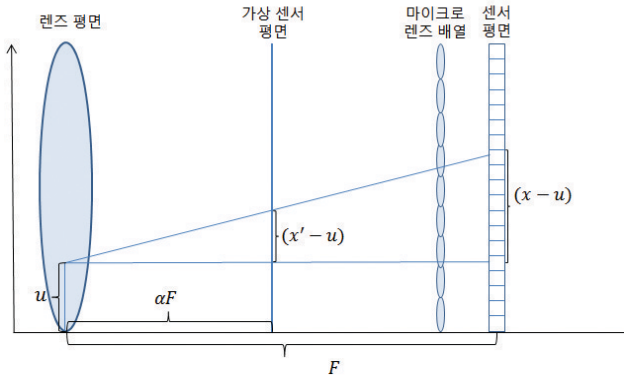
기존의 카메라는 메인렌즈에 의해서 여러 방향의 빛이 모아지고, 이 모아진 빛의 양을 2D 영상 센서에서 영상화하므로, 2D 영상 센서에 도달한 빛이 어떤 방향에서 왔는지에 관한 정보는 잃어버리게 된다. 재초점을

수행하기 위해서는, 영상 센서의 동일한 위치에 도달한 빛이더라도, 다른 경로를 통하여 도달한 빛들을 각기 분리하여 4D light field 데이터를 기록하여야 한다. 이를 구현하는 plenoptic 카메라의 광학 시스템은 〈그림 1(a)〉를 기반으로 설명할 수 있다. 〈그림 1(a)〉에서 메인 렌즈는 마이크로렌즈 배열에 초점이 맞아 있고 마이크로렌즈는 광학적으로 무한대 (optically infinite) 위치인 메인렌즈 상에 초점이 맞아 있다[3, 5]. 메인렌즈에 의해 모아진 빛이 마이크로렌즈 배열에 도달하면 이를 마이크로렌즈가 다시 도달한 방향에 따라서 분리하고 이 분리된 빛이 마이크로렌즈 아래에 위치한 영상 센서에 기록 되게 된다. 메인렌즈 평면상의 위치를 (u, v)라 하고 메인렌즈의 초점 평면상에서의 위치를 (x, y)라 하면 light field 카메라는 (u, v)에서 출발하여 (x, y)에 도달한 빛의 양, 즉 light field를 기록하게 된다. 물론 유한한 개수의 마이크로렌즈와 영상센서를 사용하기 때문에 연속적인 (x, y, u, v)에 대한 light field를 모두 기록할 수는 없고 마이크로렌즈 배열의 마이크로렌즈의 개수와 영상 센서의 개수에 의해서 결정되는 샘플링에 의해, 초점 평면에서의 위치 (x, y)와 메인렌즈 평면상의 위치 (u, v)축에 의해 결정 되는 4D light field 공간을 샘플링한 값들을 기록한다[3, 5]. 만약, 메인렌즈의 초점 평면의 영상, 즉 전통적인 2D 카메라와 같은 영상을 생성하고자 하면 마이크로렌즈 배열에 도달한 빛의 양을 더해주기만 하면 되고, 이때 해상도는 마이크로 렌즈의 개수에 의하여 결정된다[3].

〈그림 2(a)〉와 같은 light field 카메라로 획득한 4D light field 데이터를 사용하여 가상의 영상 센서 평면에서 재초점된 영상을 생성하는 과정은 〈그림 2(b)〉를 사용하여 설명할 수 있다. 〈그림 2(b)〉에서 가상 영상 센서 평면에 영상 센서가 위치하였을 때의 영상을 얻고자 하는 경우를 가정하여 보자. 영상 센서 평면상에서의 위치 (x, y)의 영상 밝기 값은 모든 경로를 통해 (x, y)에 도달한 모든 빛의 합으로 이루어지므로, 임의의 가상 센서 평면 (x', y')의 영상 밝기 값은 이 점에 도달하는 light field 들의 합으로 연산할 수 있다[3]. 〈그림 2(b)〉에서 메인렌즈 평면상의 위치 (u, v)로부터 가상적



(a)



(b)

〈그림 2〉 Plenoptic 카메라의 optical 시스템 (a) plenoptic 카메라 시스템 (b) plenoptic 카메라의 가상 light field[3, 5]

으로 합성한 센서 평면 상의 임의의 위치 (x', y')에 도달하는 light field는, (u, v)로부터 (x, y)에 도달하여 기록하여 둔 light field $L(x, y, u, v)$로부터 삼각형의 비례 관계를 이용하여 구할 수 있다[3]. 따라서 가상 센서 평면 (x', y')에서 계산된 영상 밝기 값은 모든 (u, v)로부터 (x', y')에 도달하는 light field 의 합으로 구할 수 있고, 4D light field 데이터가 (x, y, u, v) 영역에서 연속 함수이라고 가정하면 연산된 밝기 값은 다음 식 (1)과 같이 얻어진다[3].

$$I(x',y') = \frac{1}{\alpha f^2}\iint L\left(u\left(1-\frac{1}{\alpha}\right)+\frac{x'}{\alpha}, v\left(1-\frac{1}{\alpha}\right)+\frac{y'}{\alpha}, u, v\right)dudv \quad (1)$$

여기서 α는 메인렌즈로부터 센서 평면까지 거리에 대

한 가상 센서 평면까지의 거리의 비율이다. 식 (1)에서 볼 수 있듯이, 획득한 4D light field 데이터를 적절한 방향을 따라서 선적분을 수행하게 되면 임의의 심도에 초점을 맞춘 영상을 연산을 통하여 계산해 낼 수 있다.

식 (1)과 같은 재초점 연산은 4D light field 데이터의 선적분을 직접 수행하지 않고 4D light field 데이터의 4D 퓨리에 변환을 주파수 영역에서 slicing 하여 식 (1)의 선적분의 2D 퓨리에 변환된 값을 얻고 이를 역 퓨리에 변환을 수행하여 생성할 수 있다[3]. 이는 널리 알려진 퓨리에 슬라이스 정리 (Fourier Slice theorem)을 4D 로 확장한 것으로, 확장된 퓨리에 슬라이스 정리는 다음 식 (2)와 같이 정의된다[3].

$$F^M \circ I_M^N \circ B = S_M^N \circ \frac{B^{-T}}{|B^{-T}|} \circ F^N \qquad (2)$$

여기서, F^M은 M차원 퓨리에 변환을, I_M^N은 N차원 함수를 M차원 함수로 프로젝션하는 연산자, B는 기저 (basis) 변환을 나타내고, S_M^N은 N차원 퓨리에 변환에서 M개의 변수를 제외한 나머지 변수들을 0으로 고정하여 slicing 하는 연산을 나타낸다[3]. 상기와 같은 일반화된 퓨리에 슬라이스 정리에서 N=2, M=1로 두고 기저 변환 B를 회전 행렬로 둔 경우가 널리 알려진 퓨리에 슬라이스 정리이다[3]. 따라서 식 (2)와 같은 관계식에서 다음 식 (3)과 같은 기저변환을 사용하면 2차원 선적분된 식 (1)의 퓨리에 변환을 얻을 수 있다[3].

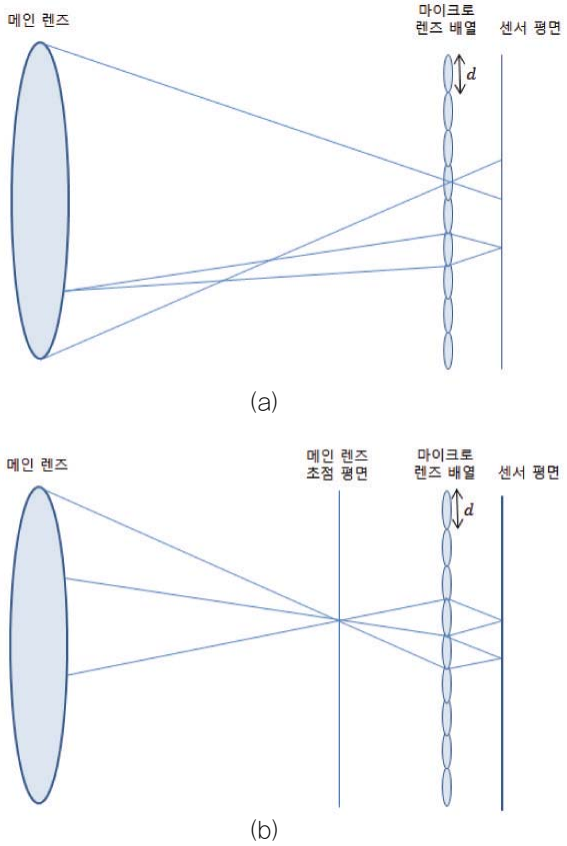
$$B = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 1-\alpha & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 1-\alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (3)$$

물론 4D light field 데이터가 연속 함수가 아니라 샘플링된 함수이므로 적절한 보간 (interpolation) 등이 필요하다. 4D 퓨리에 변환 및 일반화된 퓨리에-슬라이스 정리르 사용하여 임의의 위치에서 초점이 맞은 영상의 2차원 퓨리에 변환을 얻고 이를 역퓨리에 변환을 수행하여 2차원 영상을 생성해 내는 기법이, 식 (1)에 기반하여 공간 상에서 선적분을 수행하는 것보다 연산량의 측면에서 보다 효율적이다[3].

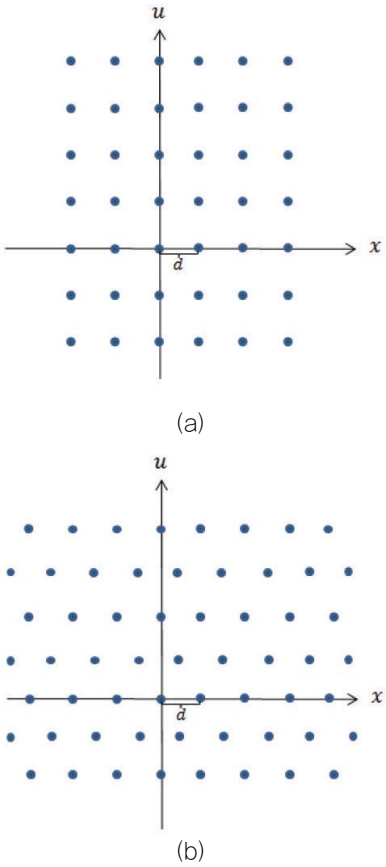
Ⅲ. Focused plenoptic 카메라

Ⅱ장에서 설명한 light field 카메라는 마이크로렌즈 하나가 공간상에서 마이크로렌즈에 도달하는 light field 데이터를 방향에 따라서 분리하여 센서에 기록하므로 공간 분해능이 마이크로렌즈의 개수에 의해서 결정이 되고 방향성의 분해능은 각 마이크로 렌즈 아래의 영상 센서의 개수에 의해서 결정된다. 일반적으로 마이크로 렌즈를 아주 작게 만들기 어렵다는 문제 때문에 방향 분해능에 비하여 공간상에서의 분해능이 만족스럽지 않다는 단점을 가지고 있다. 이를 극복하기위한 보다 일반화된 light field 카메라 시스템이 연구되었고[3, 5-7], 이에 기반한 Plenoptic 2.0 카메라 시스템은 2장에서 설명한 시스템과는 다르게 메인렌즈의 초점을 마이크로 렌즈 배열 평면에 맞추지 않고 마이크로렌즈 배열의 앞쪽 혹은 뒤쪽에 맞추어서 영상을 획득하는 방법이다[6]. 〈그림 3(a)〉는 메인렌즈의 초점이 마이크로 렌즈에 맞아 있고 마이크로렌즈의 초점은 메인렌즈에 맞아 있는 2장에서 설명한 시스템이다. 이 시스템은 마이크로렌즈가 광학적 무한대 거리에 있는 메인렌즈에 초점에 맞아 있으므로 모든 렌즈 평면을 샘플링하게 되고 그 결과 방향성은 센서 평면상에서의 센서 개수에 의해서 결정된다[6]. 이에 반해 〈그림 3(b)〉 시스템은 메인렌즈의 초점이 마이크로렌즈 배열 앞 쪽에 형성되어 있고, 각 마이크로렌즈는 메인렌즈의 초점 평면에 초점이 맞아 있는 시스템이다. 이 경우, 〈그림 3(b)〉에서 볼 수 있듯이 메인렌즈 초점 평면상의 한 점을 기준으로 각 마이크로렌즈는 메인렌즈 상의 sub-apertue 부분을 겹치지 않게 샘플링한 영상을 획득한다[6]. 즉, 메인렌즈의 초점 평면상의 한 점을 기준으로, 방향성의 샘플링이 마이크로렌즈의 개수에 의해서 결정된다.

〈그림 3(a), (b)〉의 시스템에서 메인렌즈 상에서의 위치 u와 메인렌즈의 초점 평면에서의 위치 x로 구성되는 2D 공간에서의 하나의 마이크로 렌즈가 수행하는 샘플링을 나타내면 〈그림 4(a), (b)〉와 같다[6]. 〈그림 4(a)〉의 경우 하나의 마이크로 렌즈가 공간상에서 마이크로 렌즈에 도달하는 모든 방향성에서의 light field



〈그림 3〉 Light field 카메라 시스템 (a) 메인렌즈의 초점이 마이크로 렌즈에 맞아 있는 시스템 (b) 메인렌즈의 초점이 마이크로 렌즈 앞쪽에 맞아 있는 시스템[6]



〈그림 4〉 Light field 카메라 샘플링 (a) 그림 2.2 (a) 시스템의 샘플링 패턴 (b) 그림 2.2 (b) 시스템의 샘플링 패턴[6]

를 샘플링한다. 따라서 방향성의 샘플링 개수가 마이크로렌즈하의 영상 센서의 개수와 동일하다[6]. 〈그림 4(b)〉의 경우는 마이크로렌즈가 메인렌즈의 초점 평면에 초점이 맞아 있으므로, 하나의 마이크로렌즈 아래의 센서들이 초점 평면상의 다른 위치들을 샘플링하게 된다. 하나의 마이크로렌즈가 샘플링 하는 초점 평면상의 다른 위치들은 메인렌즈 상에서의 다른 위치들에서 도달하는 light field 이다. 따라서 동일 마이크로렌즈하의 영상 센서에서 영상화되는 값들의 샘플링 패턴은 〈그림 4(b)〉와 같이 u가 증가할수록 x가 감소하는 기울어진 형태의 샘플링 패턴을 가지고 샘플링 개수는 마이크로렌즈하의 영상 센서의 개수와 동일하다[6]. 〈그림 4(b)〉 의 경우는 x방향의 샘플링 즉, 공간상의 분해능이 마이크로렌즈에 초점을 맞춘 경우 보다 향상됨을 볼 수 있다. 그러나 이 경우에는 방향성에 대한 분해능은 떨어지게 된다. 방향과 위치 공간을 샘플링 하는 패턴은 마이크로렌즈의 초점거리를 변경함으로써 형태가 변화하게 된다.

Light field 카메라의 공간성과 방향성의 총 분해능은 마이크로렌즈의 전체 개수와 영상센서의 개수에 의해서 결정이 되므로 공간 분해능을 향상시키면 방향성 분해능은 저하되게 된다[6]. 물론, 영상의 공간 분해능을 향상 시키게 되면 light field 방향 정보의 분해능은 감소한다는 문제점이 있으나, 방향성이 중복된 정보를 가지는 경우가 많으므로[5] 공간 분해능이 더 중요한 경우에는 focused plenoptic 카메라를 사용할 수 있다. 획득한 4D light field 데이터를 사용하여 refocused 영상을 얻는 방법은 Ⅱ장에서 설명한 방법을 사용할 수 있다.

Ⅳ. Light field 카메라를 위한 영상 처리 기법

앞 절들에서 설명한 light field 데이터를 이용한 재초점 기술 이외에도 light field 카메라를 위한 영상 처리 분야에는 다양한 연구 주제가 있으며 각 분야에서 연구가 활발히 수행되고 있다. Light field 카메라는 근본적으로 공간과 방향의 분해능이 마이크로렌즈의 개수와 센서 해상도에 의해서 결정이 되므로, 해상도를 향상시키기 위해서는 마이크로렌즈와 센서의 개수를 늘려야 하는데 이는 물리적인 제조 과정의 한계로 인하여 급격히 해상도를 향상시키기 힘들다. 따라서 주어진 영상으로부터 해상도를 향상시키는 초고해상도 영상 복원(super resolution image reconstruction) 기술이 중요한 연구 분야로서 활발히 연구가 수행되고 있다[7-8]. 또한, 영상의 대비도를 확장하는 high dynamic range (HDR) 영상 처리 기법도 연구되고 있다[9]. 이를 위하여 마이크로렌즈 배열에 필터를 장착하여 다른 밝기의 영상들을 얻은 후, 이를 융합하여 대비도를 향상시키는 방법 등에 관한 연구가 수행되었다[9]. 그 밖에 잡음 제거, 효과적인 재초점 기술, 스테레오 영상에의 응용 등에도 연구들이 진행되고 있다[10].

Ⅴ. 결론

먼저 촬영하고 연산을 통해 임의의 초점에서의 영상을 생성하는 light field 카메라는 스마트폰에의 영상 카메라, 재초점이 필요한 방송용이나 영화용 카메라, 3D 카메라 등에 새로운 기능을 제공할 수 있어서 추후 카메라 시장에 큰 변화를 불러올 잠재력을 가지고 있다. 본고에서는 이러한 light field 카메라의 가장 핵심적인 기능인 재초점 기술을 광학 시스템과 영상 처리에 중점을 두어 소개하였다. 비록 light field 카메라의 기본 개념은 매우 오래된 것이나, 최근에서야 MIT, Stanford 등의 학계에서의 연구를 기반으로, Lytro, Raytrix, Adobe 등에서 응용 제품이 출시되고 있어서 아직 그 기술 개발이 초기 단계에 있다고 할 수 있다. 추후 light field 카메라 분야에 있어서 보다 고성능의 light field 광학 시스템의 개발, light field 카메라에 특화된 영상 처리기술 개발 등이 필요할 것으로 생각 된다.

참 고 문 헌

[1] E.H Adelson and J.Y.A. Wang, "Single lens stereo with a plenoptic camera," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 2, no. 2, pp. 99-106, 1992.

[2] R. Ng, M. Levoy, M.Bredif, G. Duval, M. Horowitz and p. Hanrahan, "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," Computer Science Technical Report CSTR, Vol. 2, 2005.

[3] R. Ng, "Digital Light Field Photograghy," A dissertation submitted to the department of computer science and the committee in graduate studies of stanford university, 2006

[4] M. Levoy, R. Ng, A. Adams, M. Footer and M. Horowitz, "Light field microscopy," ACM Transactions on Graphics, Vol. 25, No. 31, 2006.

[5] T. Georgiev and A. Lumsdaine, "Resolution in Plenoptic Cameras," in Computational Optical Sensing and Imaging, OSA Technical Digest, 2009

[6] A. Lumsdaine and T. Georgiev, "The focused plenoptic camera," 2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), pp. 1-8, April 2009.

[7] T. E. Bishop, S. Zanetti and P. Favaro, Bishop, "Light field superresolution," 2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), pp. 1-9, April 2009.

[8] K. Mitra and A. Veeraraghaven, "Light field denoising, light field superresolution and stereo camera based refocussing using a GMM light field patch prior," Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), pp. 22-28, 2012.

[9] T. Georgiev, A. Lumsdaine and G. Chunev, "Using Focused Plenoptic Cameras for Rich Image Capture," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 31, no. 1, pp. 62-73, 2011.

김 정 태

1985~1989 서울대학교 제어계측 공학과 학사
1989~1991 서울대학교 제어계측 공학과 석사
1998~2004 University of Michigan, Ann Arbor, Ph.D
1991~2004 삼성전자 디지털 미디어 연구소
2004~현재 이화여자대학교 부교수

〈관심 분야〉
영상 복원, 영상 추정, 의료 영상처리, computational photography