

계산사진학 (Computational Photography)

I. 서론

최근 스마트 폰, 스마트 TV 등 다양한 스마트 기기의 등장에 따라 영상이해 기술에 대한 관심이 연구개발자 집단을 넘어 일반인들에게 까지 폭넓게 확산되고 있다. 영상이해에 속한 여러 기술 중에서도 계산사진학 (Computational Photography) 분야는 그것이 보여주고 있는 무한한 활용가능성으로 인해 가장 뜨거운 분야의 하나가 되었다고 해도 과언이 아니다. 기존의 아날로그 사진기에서 사용되던 전통적인 센서인 필름을 디지털 센서로 대체하고, 그에 간단한 영상처리 기술을 통해 더 '나은' 화질의 영상을 제공해 주고자 하는 디지털 사진학 (digital photography)과 달리 계산사진학에서 추구하는 것은 전통적인 사진기로 찍은 영상에 비해 더 나은 화질의 영상을 제공하는 것을 넘어 새롭게 재창조된 영상을 제공하는 것이다. <그림 1>은 image retargeting이라고 하는 계산사진학의 한 기술을 이용하여 왼쪽 영상에서 걸어가는 여인의 모습을 자연스럽게 제거한 예 (오른쪽)를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 새로이 생성된 결과 영상은 원 영상에 비해 '낮다'의 여부보다는 '다르다', '새롭다'의 의미로 이해해야 한다. 이 분야에서 특히 관심을 갖는 영역은 dynamic range, 포커스, 해상도, depth-of-field, 형태에 대한 암시, 반사, 조명 등이며 이로 인해, 디지털센서, 새로운 광학계, 구동부, 스마트 조명 등 다양한 하드웨어가 결합되어 사용되기도 한다.

계산사진학은 고해상도화 (super-resolution), 더블러링 등과같이 전통적인 영상처리 분야의 주제를 포함하기도 하지만 대부분 상대적으로 새로운 주제로 이루어진다. 경험품질 (quality-of-experience)이 강조되는 이 스마트 시대에, 계산사진학은 단순한 화소의 조합으로 이루어진 사진이 아닌 풍부한 시각적 경험을 제공하고자 한다.



김창익
한국과학기술원



〈그림 1〉 영상 리타게팅 (image retargeting)의 예^[1]

〈그림 2〉는 실내에서 창밖의 밤풍경을 바라보는 모습을 담고있다. 기존의 카메라로는 아름다운 야경을 위해 실내의 인물을 포기하거나, 실내의 인물을 제대로 표현하기 위해 야경을 담는 일을 포기해야만 했고, 이는 현재 방 안에서 경험하고 있는 현실을 사진에 제대로 반영하지 못함을 뜻한다. 반면 〈그림 2〉의 맨 오른쪽의 계산사진학 기법을 이용하여 생성한 사진에서는 실내에서 야경을 바라보며 느끼는 감정과 경험이 충실히 기록될 수 있음을 보여준다^[2].

일반적으로 계산사진학 [3]은 크게 네 개의 부류로 분류한다. 계산조명 (Computational illumination), 계산광학 (computational optics), 계산센서 (computational sensors), 및 계산처리 (computational processing). 다음 장에서는 위의 네가지 분야에 대해 좀 더 자세히 알아보도록 한다.



〈그림 2〉 계산사진학을 이용하여 실내와 야경을 동시에 표현해 내는 예^[2]

II. 본 론

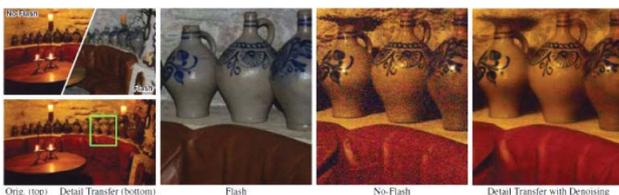
1 계산 조명 (Computational illumination)

계산 조명이란 구조적인 방법 (structured fashion)으로 조명 상태를 조절하여 새로운 영상을 생성해 내는 기술이다. 이 중 Flash/no-flash imaging의 경우(〈그림 3〉 참조), [4]에서 저자들은 저조명 환경에서 플래시 사진과 플래시없이 찍은 사진 두장을 이용하여 주변 분위기를 유지하면서 디테일을 살려주고 노이즈를 억제하는 방법을 제안하였다. 일반적으로 저조명 환경에서 플래시없이 영상 (ambient image, 이하 A)을 찍는 경우 다음과 같은 세가지 딜레마에 빠지게 된다. 첫째, 저조명 상태를 극복하기 위해 광노출 시간 (exposure time)을 길게 할 경우 충분한 양의 빛을 받아들이는 대신 카메라 흔들림이나 장면 내 물체의 움직임으로 인한 화면의 흐려짐이 나타나게 된다. 둘째, 더 많은 빛을 받아들이기 위해 카메라의 조리개 (aperture)를 크게 연다면 사진은 low depth-of-field 상태로 찍히게 되어 (전경 객체에 초점을 맞춘 경우) 배경이 흐려지는 결과를 낳게 된다. 셋째, ISO 세팅을 통해 카메라의 이득값 (gain)을 증가시키는 경우, 짧은 노출시간으로 인해 충분한 양의 빛을 확보하지 못한 영상 센서는 심각한 노이즈에 직면하게 된다. 이와 같은 문제를 동시에 해결하기 위해 저조명 환경에서 플래시를 켜고 사진을 찍게 되지만 이 경우 원래의 분위기가 완전히 달라지는 치명적인 단점이 있다. 촛불을 마주하고 앉은 연인 사이의 오렌지 색 따스한 분위기, 어느 달밤의 푸르고 차가운 느낌이 플래시를 이용한 영상에서는 크게 왜곡되고 마는 것이다. 따라서 플래시 영상이 갖는 적은 노이즈와 디테일, 플래시없이 찍은 영상이 전달해 주는 원래의 장면 분위기를 담은 영상을 생성해 내는 게 이 논문의 목표가 된다. 〈그림 4〉에서 보듯이 기본적으로 bilateral filtering을 통해 플래시없이 찍은 ambient 영상 A의 노이즈 성분을 제거하고자 한다. 플래시의 사용으로 인해 발생하는 그림자나 과도한 포화 (saturation) 영역인 specularity 경우에는 플래시 영상 F의 신뢰성이 떨어지므로 bilateral filter로 노이즈가

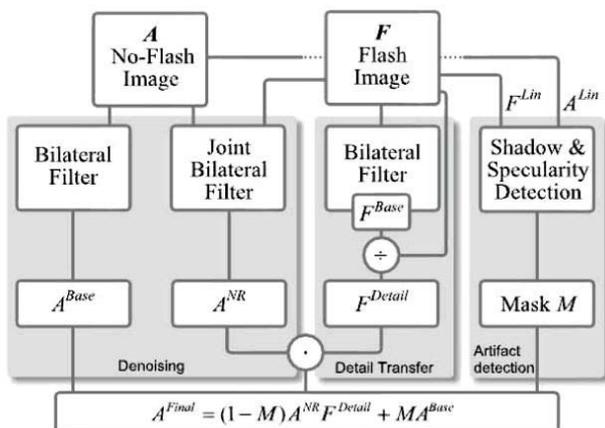
억제된 A (즉, 그림에서 A^{base}) 를, 나머지 영역에는 range 커널에서 노이즈가 많은 A 대신 F를 사용한 Joint bilateral filtering을 통해 노이즈가 저감된 영상 A^{NR} 을 만들고 그에 F에서 잘 표현되고 있는 영상의 디테일 성분(F^{Detail})을 합한 영상 ($A^{NR}F^{Detail}$) 사용하면 최종적인 A^{Final} 영상이 되는 것이다. Bilateral filtering과 joint bilateral filtering 이란 에지를 보존하면서 영상을 블러하게 만드는 방법으로서 이에 대해 기본 지식이 필요한 독자는 [5-7]을 참조하기 바란다.

Raskar 등 [8]은 네 개의 다른 조명 위치 (렌즈의 상하좌우)로 네 장의 사진을 찍어 물체의 실루엣을 생성해 내는 방법을 제안하였다. 깊이 불연속 선을 따라 그림자를 검출함으로써 깊이 윤곽선, 즉 물체의 실루엣을 생성해 내는 것이다.

계산 조명 분야에 속하는 다른 기술로는 different exposures imaging^[9], image-based relighting^[10, 11] 및 structured illumination^[12, 13] 등을 예로 들 수 있다. 지면 관계상 상세한 설명은 생략하나 앞에서 설명



〈그림 3〉 Flash/no-flash imaging by Petschnigg



〈그림 4〉 Flash/no-flash 를 이용한 영상개선 시스템^[4]

한 flash/no-flash imaging의 기본 접근 철학이 multi-flash imaging이나 different exposures imaging과 같은 유사 기술에 확장될 수 있음을 짐작할 수 있을 것이다.

2 계산 광학 (Computational optics)

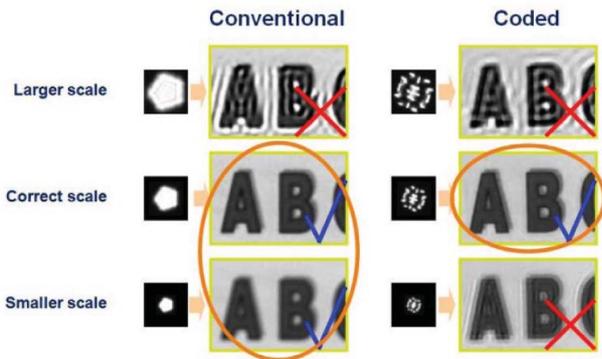
계산 광학이란 ‘광학적으로 부호화된 영상’ (optically coded images)을 취득한 후, 새로운 영상을 생성하기 위해 계산적 복호화 (computational decoding)를 수행하는 방법을 일컫는다. 대표적인 방법으로, 일반적으로 “Coded aperture”라 불리는 기법으로서 카메라의 렌즈부에 독특한 패턴이 들어간 필터를 삽입하여 영상내의 디포커스 정도를 알아내는 방법이 있다^[14]. 〈그림 5〉는 기존의 aperture와 coded aperture를 보여준다. 〈그림 6〉에서 보듯이 coded aperture를 이용하면 흐려진 (blurred) 상태에 적합한 스케일을 알아낼 수 있어서 가장 적합한 커널로 디컨볼루션을 수행할 수가 있게 된다. 저자들은 논문에서 Kullback-Leibler (KL) divergence를 최대화 하는 aperture 패턴을 제안하였고, K개의 다른 aperture scale로 복호화된 (디블러된) 영상을 구하여 $e_k = y - f_k * x_k$ 의 오차식을 최소화하는 k를 구한다. f_k 와 주어진 블러 영상 y에 대해 아래의 에너지 함수를 최소화 하는 디블러된 영상 x를 구한다.

$$x = \underset{\text{Convolution error}}{\operatorname{argmin}} \underbrace{|f \otimes x - y|^2}_{\text{Convolution error}} + \underbrace{\lambda \sum_i \rho(\nabla x_i)}_{\text{Derivatives prior}}$$



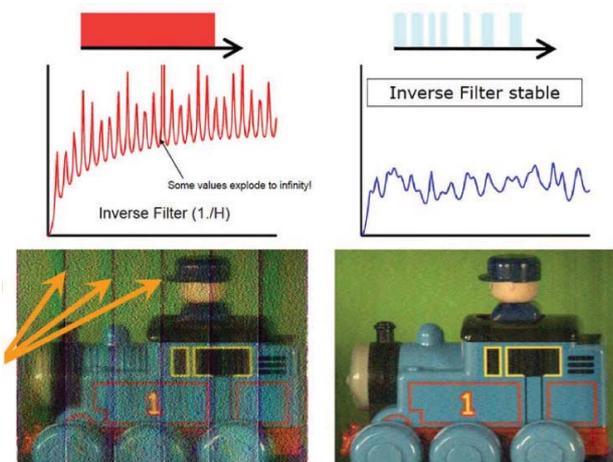
(a) 일반적인 aperture (b) coded aperture

〈그림 5〉 일반적인 aperture와 부호화된 aperture의 비교



〈그림 6〉 Coded aperture 기법을 이용하여 blur kernel 크기를 알아내는 예

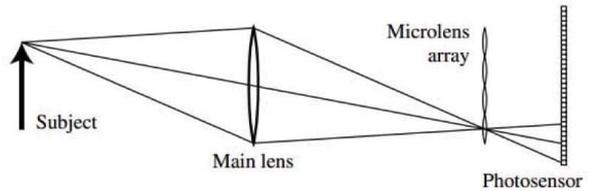
Zhou^[15] 등은 최근 논문에서 한 쌍(pair)의 서로 다른 coded aperture를 사용하여 취득한 두 장의 영상으로부터 깊이 정보를 알아내는 것뿐 아니라 고화질의 완전 포커스된 (all focused) 영상을 얻을 수 있음을 보였다. Raskar 등은 [16]에서 효과적인 모션 디블러링을 위해 카메라 노출 시간 (exposure time)을 기존의 box filter 형태 대신 랜덤한 형태로 변형하면 모션 블러 함수의 푸리에변환 결과에서 zero lobe를 줄일 수 있음을



〈그림 7〉 계산광학에서 모션 디블러링의 예. 왼쪽 그림은 노출 시간을 길게하여 취득한 영상에서 발생한 모션블러를 역변환 필터를 이용하여 제거한 예를 보여준다. zero lobe 부근에서의 왜곡이 생긴다. 반면, 오른쪽 그림은 계산광학 기법을 이용하여 랜덤 시퀀스의 형태로 노출시간을 셋팅하여 역변환시 오버슈트로 인한 왜곡이 발생하지 않게 한 결과이다

보였다. 이는 디블러링을 위한 블러함수의 역변환, 즉 푸리에 공간에서 블러함수로 블러영상을 나눌 때, 예기치 못한 overshoot가 발생하는 것을 막아준다. 〈그림 7-(a)〉에서 보듯이 box filter 형태의 기존의 노출함수를 이용하면 역함수에서 무한대로 치솟는 값들로 인해 모션 디블러된 영상에 banding artifact 가 생성되는 반면, 랜덤코드로 생성된 노출함수를 사용한 〈그림 (b)〉에서 보듯이 역변환 함수가 stable하여 만족스러운 모션 디블러 결과를 얻을 수 있게 된다.

[17]에서 저자들은 plenoptic camera를 이용한 light field photography 기법을 보여준다. 이는 [18]에서 Adelson과 Wang에 의해 제안된 개념과 유사한 것으로서 〈그림 8〉에서 보듯이 주 렌즈의 상이 맺히는 곳에 기존의 포토센서 대신 마이크로렌즈 어레이를 위



〈그림 8〉 Plenoptic camera (light field photography)



〈그림 9〉 계산광학을 이용하여 이미 취득된 영상에 리포커싱이 적용된 예

치시키고 그 뒷단에 포토센서를 두는 방법이다. 이를 통해 포토센서에 입사되는 빛의 양은 물론 입사방향까지도 기록할 수 있으므로, 이러한 4D light field 데이터의 선적분을 통해 가상의 다른 깊이에서 포커스된 여러영역들에 대해 재초점 (refocusing)을 구현해 낼 수 있다. <그림 9>는 제안된 카메라로 단 한번의 촬영 후 재초점 (refocusing) 기술을 이용하여 영역별로 포커스 상태를 달리할 수 있음을 보여주고 있다. 최근에는 여러개의 칼라필터를 조리개로 사용하여 깊이 추정을 가능케 하는 방법이 제시되었다^[19].

3 계산 센서 (Computational sensors)

계산 센서란 영상 취득과 처리 부분이 결합된 하드웨어를 개발하는 분야이다. 예를 들어, 센서 수준에서 HDR (high dynamic range) 영상을 구현할 수 있게 하는 노력이 있다. 하나의 셀 안에 서로다른 감도를 가진 여러 개의 센싱 엘리먼트를 장착하는 방법 등이 제시되었다. 그 외에 인공 망막, retinex 센서 등의 개발이 이 분야에 속한다고 볼 수 있다.

4 계산 처리 (Computational processing)

계산 처리란 계산광학 등에서 보듯이 광학적인 선처리를 하지 않고 기존의 카메라를 통해 취득한 영상을 영상처리 기법을 통해 새로운 영상으로 생성해 내는 기술로서, 일반적인 측면에서 일컫는 계산사진학의 많은 부분을 차지하고 있다고 할 수 있다. 널리 알려진 연구 주제로는 영상처리 측면에서의 디블러링, 초고해상도화 (super-resolution), 파노라마 영상 생성, 영상 매칭, 영상 인페인팅, 포토몽타주, 영상처리를 이용한 HDR, all-focus imaging 등이 있다. 본 회지의 다른 논문들에서 각 주제를 자세히 다루고 있는 관계로 본 절에서는 자세한 설명을 생략하고자 한다. 이 분야의 또 다른 매력으로는 연구 주제의 해결책은 물론 연구 주제 자체가 새롭게 제안될 수 있는 분야로서, 예를 들어 [21]에서 제안된 일명 'Beatification' 알고리즘은 사진에 찍힌 얼굴 영상을, 실제 인물의 정체성은 보존하면서 조금 더 매력적으로 보일 수 있도록 영상을 보정해 주는



<그림 10> Beatification의 예. 왼쪽: 원영상.
오른쪽: 처리영상

방법이다 <그림 10>. 이와같이 주어진 영상으로부터 새로운 영상을 생성해낸다는 계산사진학 (구체적으로는 계산처리)의 기본개념을 바탕으로 수많은 연구주제가 새로이 제안되고 연구될 수 있다는 점이 큰 매력이라 할 수 있겠다.

III. 결론

지금까지 계산사진학에 관하여 네가지 세부 분야로 나누어 간단히 고찰을 하였다. 분야의 특성상, 모든 연구 주제를 나열하기는 불가능하고, 세부분야별로 몇가지의 예를 드는 수준에서 기술을 하였다. 그러나 이러한 예를 통해 계산사진학이 무엇인가 하는 궁금증은 쉽게 풀렸으리라 생각한다. 물론 하나의 세부주제가 동시에 네 분야 중 여러 개에 속할 수도 있다.

스마트 폰, 스마트 TV 등과 같이 지능형 응용이 끊임 없이 연구 개발되고 있는 요즘, 지난 수십년간 꾸준히 많은 발전을 이루어 온 영상이해 (computer vision) 기술의 발전에 힘입어 계산사진학에 대한 관심과 연구 열기와 필요성은 더욱 고조되고 있다고 할 수 있다.



참 고 문 헌

- [1] Avidan and Shamir, "Seam Carving for Content-Aware Image Resizing," ACM SIGGRAPH 2007
- [2] Agrawal et al., "Removing Photography Artifacts using Gradient Projection and Flash-Exposure Sampling," Siggraph 2005.
- [3] Raskar et al., "State of The Art Report: Computational Photography," ACM / Eurographics, Sept. 2006.
- [4] Petschnigg et al., "Digital Photography with Flash and No-Flash Image Pairs," ACM Siggraph, 2004.
- [5] Durand and Dorsey, "Fast bilateral filtering for the display of HDR images," ACM Siggraph 2002.
- [6] E. Eisemann and F. Durand, "Flash photography enhancement via intrinsic relighting," ACM Trans. Graph., vol. 23, no. 3, pp. 673-678, 2004.
- [7] H. Yu, L. Zhao, and H. Wang, "Image Denoising Using Trivariate Shrinkage Filter in the Wavelet Domain and Joint Bilateral Filter in the Spatial Domain," IEEE Trans. Image Processing, vol. 18, no. 10, pp. 2364-2369. 2009.
- [8] Raskar et al, "Non-photorealistic Camera: Depth Edge Detection and Stylized Rendering using Multi-Flash Imaging," Siggraph 2004.
- [9] Kang et al., "High dynamic range video," ACM Trans. on Graphics 22, 3. 2003.
- [10] Ko Nishino and Shree K. Nayar, *Eyes for relighting*, ACM Trans. Graph., **23** (2004), no. 3, 704-711.
- [11] Tien-Tsin Wong, Pheng-Ann Heng, and Chi-Wing Fu, *Interactive relighting of panoramas*, IEEE Comput. Graph. Appl., **21**, no. 2, 32-41, 2001.
- [12] Heintzmann, R. and G. Ficz, Breaking the resolution limit in light microscopy. Briefings in Functional Genomics and Proteomics, 2006. 5(4): p. 289-301.
- [13] Schermelleh, et al., Subdiffraction Multicolor Imaging of the Nuclear Periphery with 3D Structured Illumination Microscopy. Science, 2008. 320(5881): p. 1332-1336.
- [14] Leven et al., "Image and Depth from a Conventional Camera with a Coded Aperture," ACM siggraph 2007
- [15] Zhou et al., "Coded Aperture Pairs for Depth from Defocus and Defocus Deblurring," Int J Comput Vis (2011) 93: 53-72
- [16] R Raskar, A Agrawal, J Tumblin, "Coded Exposure Photography: Motion Deblurring via Fluttered Shutter," siggraph 2006.
- [17] Ng et al., "Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera," Stanford Tech Report CTSR 2005-02
- [18] ADELSON, T., AND WANG, J. Y. A. "Single lens stereo with a plenoptic camera," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14, 2 (Feb), 99-106, 1992.
- [19] Kim et al., "Multifocusing and Depth Estimation Using a Color Shift Model-Based Computational Camera," IEEE Transactions on Image Processing 21(9): 4152-4166 (2012)
- [20] Street, "High dynamic range segmented pixel sensor array," US patent 5789737, Aug. 1998.
- [21] Leyvand et al., "Data-Driven Enhancement of Facial Attractiveness," Siggraph 2008.



김창익

1989년 연세대학교 전기공학과 학사.
1991년 포항공과대학교 전자전기공학과 석사.
2000년 University of Washington, Seattle, 전기공학과 박사
1991년 ~ 1997년 주)SKC 중앙연구소 선임연구원
2000년 ~ 2005년 Epson R&D Inc., Palo Alto, USA. Senior member of Technical Staff.
2005년 ~ 2009년 한국정보통신대학교 조교수, 부교수
2009년 ~ 현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 부교수

〈관심분야〉
영상 이해, 3차원 영상처리