

배경 잡음 제거 알고리즘을 적용한 3차원 광자 계수 집적 영상의 화질 향상

조기욱¹ · 김영준¹ · 김철수² · 조명진^{1*}

Visual quality enhancement of three-dimensional photon-counting integral imaging using background noise removal algorithm

Ki-Ok Cho¹ · Young jun Kim¹ · Cheolsu Kim² · Myungjin Cho^{1*}

^{1*}Department of Electrical, Electronic, and Control Engineering, IITC, Hankyong National University, 327 Chungang-ro, Anseong-si, Kyonggi-do 17579, Korea

²Department of Electric Energy and Computer Engineering, Gyeongju University, 188 Taejongro, Gyeongju city, KyeongsangBukdo, 38065, South Korea

요 약

본 논문에서는, 배경 잡음 제거 알고리즘을 적용하여 일반적인 3차원 광자 계수 집적 영상의 화질을 개선하는 방법을 설명한다. 광자 계수 영상법은 광자가 매우 희박한 환경에서 소수의 광자를 검출하여 영상을 시각화 하는 방법이다. 하지만, 배경에서 발생하는 광자의 수가 많을 때, 원하는 물체의 광자 검출은 매우 어렵다. 이로 인해, 복원된 영상의 화질이 저하되는 문제점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 불필요한 배경 잡음을 제거하고 오로지 원하는 물체에서만 광자를 검출하는 새로운 광자 계수 영상법을 제안한다. 또한, 3차원 정보를 획득하기 위해 집적 영상을 사용한다. 제안된 알고리즘의 유용성을 증명하기 위하여 광학적 실험을 수행하고 성능 평가를 위해 평균 제곱 오류 값을 계산한다.

ABSTRACT

In this paper, we present a visual quality enhancement technique for conventional three-dimensional (3D) photon counting integral imaging using background noise removal algorithm. Photon counting imaging can detect a few photons from desired objects and visualize them under severely photon-starved conditions such as low light level environment. However, when a lot of photons are generated from background, it is difficult to detect photons from desired objects. Thus, the visual quality of the reconstructed image may be degraded. Therefore, in this paper, we propose a new photon counting imaging method that removes unnecessary background noise and detects photons from only desired objects. In addition, integral imaging can be used to obtain 3D information and visualize the 3D image by statistical estimations such as maximum likelihood estimation. To prove and evaluate our proposed method, we implement the optical experiment and calculate mean square error.

키워드 : 3D 디스플레이, 깊이 변환, 요소 영상, 집적 영상, 정치 영상 디스플레이

Key word : 3D display, depth conversion, elemental images, integral imaging, orthoscopic display

Received 08 March 2016, Revised 15 March 2016, Accepted 28 March 2016

* Corresponding Author Myungjin Cho (E-mail:mjcho@hknu.ac.kr, Tel:+82-31-670-5298)

Department of Electrical, Electronic, and Control Engineering, IITC, Hankyong National University, 327 Chungang-ro, Anseong-si, Kyonggi-do 17579, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.7.1376>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

소량의 방사선 조건에서 물체나 장면의 영상을 획득하는 것은 매우 어렵다. 이 조건에서는 광자의 수가 매우 희박하기 때문에 일반적인 영상 장치를 사용하여 정보를 획득하는 것은 불가능하다. 광자 계수 영상 (Photon-counting Imaging)[1-11]은 빛이나 광량이 희박한 환경에서 물체나 장면의 영상을 기록할 수 있기 때문에 이와 같은 환경에 매우 적합하다. 광자 계수 영상에서 깊이 정보를 획득하기 위해서는 무안경식 3D 기록 방법의 하나인 집적 영상 (Integral Imaging)[12-16]을 적용할 수 있다. 집적 영상은 완전시차 (Full parallax)와 연속적인 시점 (Continuos viewing point)을 제공하는 장점을 가지고 있으며, 레이저와 같은 능동 광원 (Active light source)을 사용하지 않아서 구현이 간단하다. 하지만, 낮은 해상도와 좁은 시야각은 집적 영상의 단점이다. 광자 계수 영상법 (Photon counting imaging)에서는 영상을 획득할 때, 물체뿐만 아니라 배경에서 발생하는 미세한 광량에도 영향을 받게 되어 물체에 대한 정확한 광자를 검출하기 어렵다. 이는 광자가 희박한 환경에서 배경과 물체의 광량이 비슷하게 분포하기 때문이다. 기존의 광자 계수 영상법에서는 기록하고자 하는 장면의 모든 광자를 검출하기 때문에 상대적으로 물체에 대한 광자 검출이 희박할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해, 본 논문에서는 불필요한 배경 잡음의 광량을 제거하고 오로지 물체에서만 광자를 검출하는 새로운 광자 계수 영상법을 제안한다. 배경 잡음을 제거하기 위해 우선 전체 영상에서 배경의 광량 분포를 분석하고, 문턱값 (Threshold)을 정한다. 그런 다음, 광자 계수 영상법을 사용하여 물체에서 광자를 검출한다. 또한, 3차원 정보를 획득하고 보다 화질이 개선된 복원 영상을 구하기 위해 집적 영상을 사용하였다. 본 논문에서 제안하는 기술을 검증하고 평가하기 위해, 광학적 실험을 수행하였고, 평균 제곱 오류 (Mean Square Error: MSE)를 계산하였다.

II. 본 론

2.1. 광자 계수 영상법

광자 계수 (Photon-counting)란, 어떠한 물체나 장면

에서 나오는 광자의 수를 계수하는 것이다. 소량의 광자만이 존재하는 환경에서는 광자의 수가 드물게 발생하기 때문에 이는 수학적 통계 모델인 푸아송 분포 (Poisson Distribution)를 따르게 된다[17]. 이를 이용하여 광자 계수 검출기를 수학적으로 모델링할 수 있다. 이와 같이 소량의 방사선 조건에서 광자를 검출하여 영상을 복원하는 기술을 광자 계수 영상법 (Photon counting imaging)이라 한다. 물리적인 광자 계수 검출기는 고가의 장비이기 때문에 본 논문에서는 광자 계수 검출기의 수학적 모델을 사용한다. 앞에서 설명했듯이, 광자 계수 검출기는 푸아송 분포를 따르기 때문에 다음과 같은 식으로 정의될 수 있다.

$$C_x = Poisson(N_p \lambda_k(x, y)) \quad (1)$$

$$\lambda_k = \frac{I_k(x, y)}{\sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} I_k(x, y)} \quad (2)$$

여기서, λ_k 는 일반적인 영상 장치로 기록한 원본 영상 I_k 의 전체 에너지를 단위 에너지로 정규화한 것이고, N_x 와 N_y 는 x 와 y 방향으로의 화소의 개수이며, N_p 는 영상에서 검출하고자 하는 광자의 수를 의미한다. 식 (1)에서와 같이 광자가 희박한 환경에서 λ_k 와 N_p 를 곱해주면 푸아송 분포를 통해 높은 확률의 광자 수가 생성된다.

2.2. 3차원 광자 계수 집적 영상의 획득 및 3차원 시각화

본 논문에서는 3차원 영상을 획득하는 방법 중 하나인 집적 영상 기법을 사용한다. 이 기술은 3차원 물체에 대하여 서로 다른 원근감을 가지는 여러 영상을 렌즈 배열이나 카메라 배열을 통해 기록하는 방법으로 이렇게 기록된 영상들을 요소 영상 (Elemental image)이라 한다. 요소 영상의 해상도를 높이기 위해 본 논문에서는 그림 1과 같이 카메라 배열을 사용하는 합성 조리개 집적 영상 (Synthetic aperture integral imaging: SAIL) [13]을 사용한다.

이렇게 기록된 요소 영상들은 광자의 수가 매우 희박하기 때문에 요소 영상 자체로는 기록된 영상이 무엇인지 인식할 수 없다.

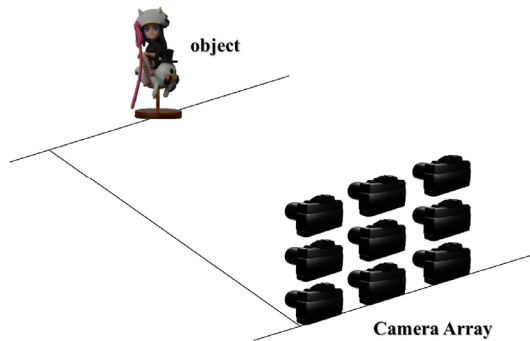


Fig. 1 Pickup of integral imaging (Synthetic Aperture Integral Imaging).

따라서, 통계적 추정법 중의 하나인 최대 가능도 추정법 (Maximum Likelihood Estimation: MLE)[3]을 사용하여 복원 영상을 구할 수 있다. 이를 위해서는 우선 기록된 영상의 최대 가능도를 구해야 하는데, 이는 다음 식과 같다.

$$P(C_x|N_p\lambda_k) = \frac{(N_p\lambda_k)^{C_k} e^{-N_p\lambda_k}}{C_k!} \quad (3)$$

$$L(\lambda) = \prod_{k=0}^{K-1} \prod_{l=0}^{L-1} \frac{(N_p\lambda_k)^{C_k} e^{-N_p\lambda_k}}{C_k!} \quad (4)$$

여기서 $P(\cdot)$ 는 광자 계수의 확률 밀도 함수이고 $L(\cdot)$ 는 최대 가능도 함수이다.

식 (4)를 계산의 편의를 위해 \log 를 취하고 MLE를 통해 추정하면 다음과 같다.

$$\log[L(\lambda)] \propto \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} C_k \log(N_p\lambda_k) - \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} N_p\lambda_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial \log[L(\lambda)]}{\partial \lambda_k} = \frac{C_k}{\lambda_k} - N_p = 0 \quad (6)$$

$$\therefore \hat{\lambda}_k = \frac{C_k}{\lambda_k}$$

최종적으로 추정된 각각의 요소 영상은 식 (6)과 같이 된다.

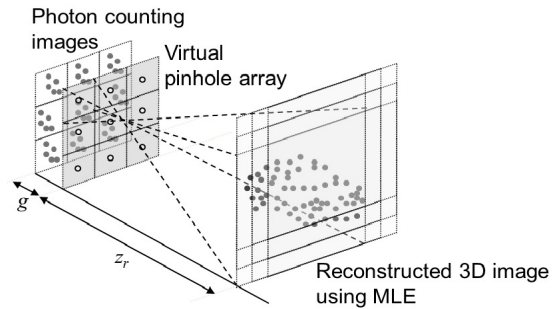


Fig. 2 Reconstruction of 3D photon counting integral imaging

이제 그림 2와 컴퓨터 집적 영상 재생(Computational integral imaging reconstruction: CIIR) 알고리즘을 사용하여 3차원 영상으로 복원하면 식(7)과 같다.

$$\tilde{I}^{z_r} = \frac{1}{N_p KL} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} C_{kl}(x+k\Delta x, y+\Delta y) \quad (7)$$

$$\Delta x = \frac{N_x fp}{c_x z_r}, \Delta y = \frac{N_y fp}{c_y z_r} \quad (8)$$

여기서 K, L 은 요소 영상의 x, y 축 개수, f 는 렌즈의 초점 길이, p 는 핀홀 간의 간격, c_x, c_y 는 영상 센서의 x, y 크기, z_r 은 재생하고자 하는 깊이이고 $\Delta x, \Delta y$ 는 각 요소 영상이 투영될 때 x, y 축으로의 이동 픽셀 수이다.

2.3. 배경 잡음 제거

광량이 희박한 환경에서는 광자 계수 영상법을 이용하는 영상을 획득하고 시각화 하였을 때, 원하는 타겟의 정보뿐만 아니라 배경에서 발생하는 미세한 광량에 대해서도 광자가 생성된다. 일반적인 광자 계수 영상법을 사용하여 영상을 획득할 때, 관찰자의 시점에서는 잡음이 섞인 영상과 비슷하게 인식 될 수 있다. 또한 이로 인하여 영상의 화질 저하가 우려된다. 따라서, 이와 같은 잡음을 전체 영상의 픽셀 분포를 분석하고 문턱값(Threshold)을 주어 배경에서 생성되는 광자를 차단하고 원하는 타겟의 화질을 향상시킬 수 있다. 배경이 원하는 물체보다 픽셀을 많이 점유하고 있는 경우에는 전

체 영상의 평균값이 배경에서 점유하는 픽셀을 나타내게 되므로 문턱값을 평균값으로 둘 수 있다. 물체가 점유하는 픽셀의 수가 배경 보다 많은 경우에는 새로운 문턱값을 정해야 한다.

본 논문에서는 배경이 물체보다 큰 경우에 대해서만 고려한다. 따라서, 배경 잡음을 제거하는 문턱값은 다음과 같이 정할 수 있다.

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{if, } x_i > \bar{a} \text{ 일 때, } x_i) \quad (9)$$

$$x_i \leq \bar{a} \text{ 일 때, } 0$$

식 (9)에서 \bar{a} 는 영상의 전체 픽셀의 평균값이다. 영상에서의 $x_i \leq \bar{a}$ 이면 광자를 생성하지 않으며, $x_i > \bar{a}$ 이면 광자를 생성한다. 이러한 수식에 의하여 그림 3과 같은 영상을 획득 할 수 있다.

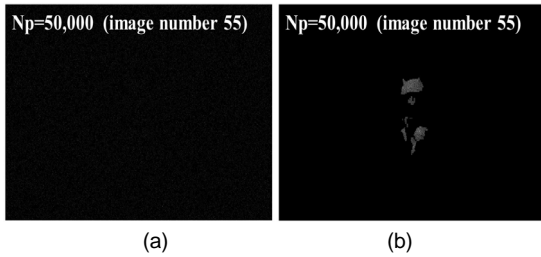


Fig. 3 Elemental images. (a) without background noise removal (b) with background noise removal

그림 3은 알고리즘을 적용하기 전과 후를 비교한 영상으로, 사용된 광자의 수는 50,000개로 동일한 수를 사용하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 배경 잡음이 많이 존재할 경우에는 광자의 점유율이 배경에서 높기 때문에 물체에서 광자를 생성하기가 어렵다. 반면에, 배경 잡음을 제거한 경우에는 광자의 점유율이 물체에서 높게 나타나므로 물체의 광자를 보다 많이 생성할 수 있다.

III. 실험 결과

본 실험에서는 실제 어두운 환경을 설정하여 광량이 희박한 조건을 만들고 광학적 실험을 진행하였다. 실험을 위하여 DSLR 카메라를 사용하였으며, 고해상도의 요소 영상을 획득하기 위해 합성 조리개 집적 영상을

사용하여 10(H)×10(V)의 요소 영상을 획득하였다. 영상 센서의 크기는 36mm×24mm이다. 각 요소 영상간의 간격은 x, y축 모두 $p=2\text{mm}$ 로 동일하게 하였으며, 영상의 크기는 3008(H)×2000(V)이다. 초점거리는 50mm이고 물체의 거리는 380mm이며, 사용한 광자의 수는 각 요소 영상 당 50,000개를 사용하였다. 이는 전체 영상의 픽셀 수 (6,016,000개)와 Grayscale (256 level)을 고려하였을 때, 0.003%의 광량을 검출한 것이라 할 수 있다. 실험 셋업은 그림 1과 같다.

그림 4와 그림 5는 각각 일반적인 광자 계수 요소 영상과 배경 잡음을 제거한 광자 계수 요소 영상이다. 두 그림에서 볼 수 있듯이, 동일한 광자 수를 사용하더라도 배경 잡음을 제거한 광자 계수 요소 영상이 물체를 더 정확하게 인식하고 시각화함을 알 수 있다.

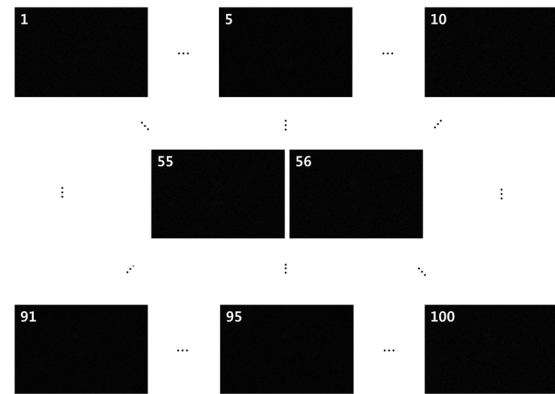


Fig. 4 Conventional photon counting elemental images

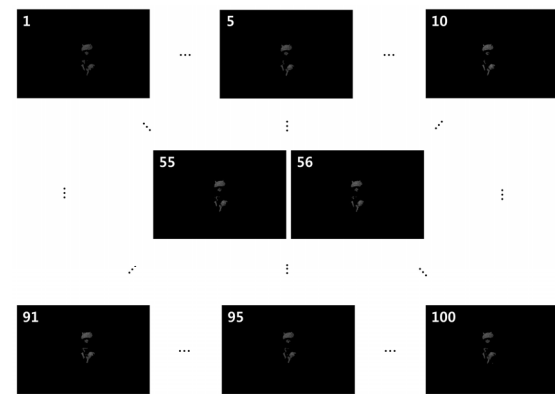


Fig. 5 Photon counting elemental images with background noise removal

이는 배경에서 발생될 수도 있는 불필요한 광자의 생성을 막고, 원하는 물체로부터 광자가 집중적으로 생성될 수 있도록 하는 것이다.

그림 6은 일반적인 광자 계수 영상과 배경 잡음 제거 알고리즘을 적용한 2차원 영상을 식 (3)-(8)을 사용하여 깊이 방향으로 3차원 영상을 추정한 결과이다. 동일한 광자 수를 사용하였으며, 참고 영상은 광량이 충분히 많은 환경에서 획득한 영상을 3차원으로 재생한 것이다. 참고 영상의 재생 깊이가 또한 동일하다.

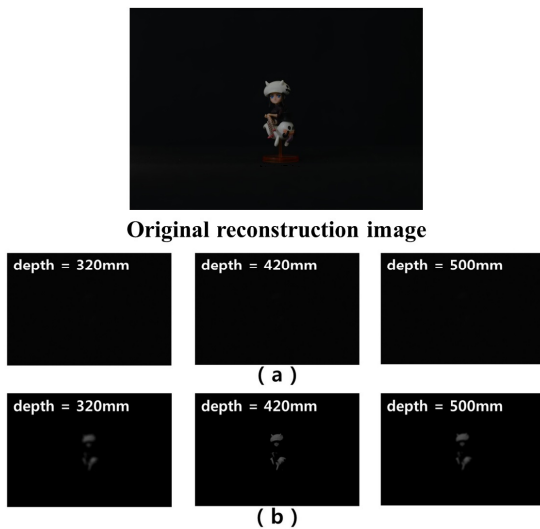


Fig. 6 Reconstruction results of photon counting integral imaging (a) without background noise removal (b) with background noise removal

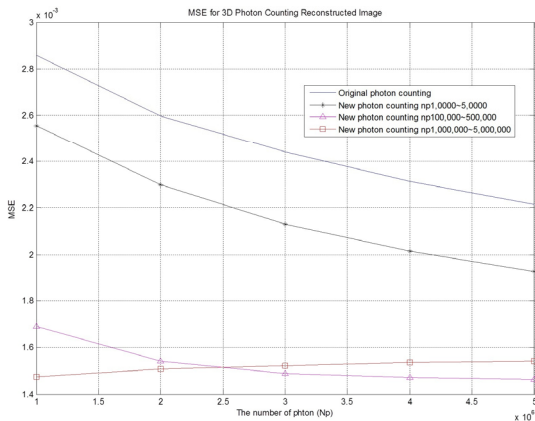


Fig. 7 Mean square error via various number of photons

영상의 성능 평가는 참고 영상과 그림 6의 재생 결과 영상들 간의 평균 제곱 오류 (Mean square error: MSE)를 계산하여 수행하였다. 그림 7은 광자의 수에 따른 MSE 결과를 나타낸다.

그래프에서 볼 수 있듯이, 일반적인 광자 계수 영상보다 배경 잡음 제거를 통한 영상의 화질이 향상되었음을 알 수 있다. 또한 광자가 충분할수록 영상의 화질이 향상됨을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 실제 어두운 환경에서 3차원 광자 계수 영상을 획득하여, 배경에서 발생하는 잡음을 제거하고 영상의 화질을 향상시키는 기술에 대하여 설명하였다. 제안된 알고리즘으로 배경 잡음을 효과적으로 제거하고 광자 계수 영상의 화질을 개선하였음을 광학적 실험을 통하여 보였다. 그리고 광자가 희박한 환경에서는 배경 잡음에서 발생하는 광자량이 전체 영상의 화질에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한, 배경이 점유하고 있는 광자량과 물체가 점유하고 있는 광자량의 비율에 의해 문턱값이 정해져야 함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 배경의 비율이 물체의 비율보다 상대적으로 큰 경우에 대해서만 분석하였지만, 향후에는 다양한 경우에 대해서 분석하고 새로운 알고리즘을 연구할 필요가 있다. 제안된 기술은 소량의 방사선 조건에서 물체나 장면을 시각화 할 때, 보다 효율적이고 화질이 개선된 결과를 얻을 수 있는 새로운 광자 계수 영상법이다. 이는 앞으로 방사선 조건의 다양한 분야에 적용될 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(NRF-2013R1A1A2057549).

REFERENCES

[1] S. Yeom, B. Javidi, C. W. Lee, and E. Watson, "Photon-counting passive 3D image sensing for reconstruction and recognition of partially occluded objects," *Optics Express* vol. 15, no. 24, pp. 16189-16195, November 2007.

[2] I. Moon and B. Javidi, "Three-dimensional recognition of photon-starved events using computational integral imaging and statistical sampling," *Optics Letters*, vol. 34, no. 6, pp. 731-733, March 2009.

[3] B. Tavakoli, B. Javidi, and E. Watson, "Three dimensional visualization by photon counting computational Integral Imaging," *Optics Express*, vol. 16, no. 7, pp. 4426-4436, March 2008.

[4] J. Jung, M. Cho, D. K. Dey, and B. Javidi, "Three-dimensional photon counting integral imaging using Bayesian estimation," *Optics Letters*, vol. 35, no. 11, pp. 1825-1827, June 2010.

[5] E. Perez, M. Cho, and B. Javidi, "Information authentication using photon-counting double-random-phase encrypted images," *Optics Letters*, vol. 36, no. 1, pp. 22-24, January 2011.

[6] M. Cho, A. Mahalanobis, and B. Javidi, "3D passive photon counting automatic target recognition using advanced correlation filters," *Optics Letters*, vol. 36, no. 6, pp. 861-863, March 2011.

[7] M. Cho and B. Javidi, "Three-dimensional photon counting integral imaging using moving array lens technique," *Optics Letters*, vol. 37, no. 9, pp. 1487-1489, May 2012.

[8] M. Cho and B. Javidi, "Three-dimensional photon counting axially distributed image sensing," *IEEE/OSA Journal of Display Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 56-62, January 2013.

[9] M. Cho and B. Javidi, "Three-dimensional photon counting double-random-phase encryption," *Optics Letters*, vol. 38, no. 17, pp. 3198- 3201, September 2013.

[10] M. Cho, "Three-dimensional color photon counting microscopy using Bayesian estimation with adaptive priori information," *Chinese Optics Letters*, vol. 13, no. 7, pp. 070301-1-070 310-4, July 2015.

[11] J. Y. Jang and M. Cho, "Image visualization of photon counting confocal microscopy using statistical estimation," *Optik*, vol. 127, no. 2, pp. 844-847, January 2016.

[12] G. Lippmann, "La photographie integrale", *C. R. Acad. Sci.* vol. 146, pp. 446-451, March 1908.

[13] J. S. Jang and B. Javidi, "Three-dimensional synthetic aperture integral imaging," *Optics Letters*, vol. 27, no. 13, pp. 1144-1146, July 2002.

[14] S. H. Hong, J. S. Jang, and B. Javidi, "Three-dimensional volumetric object reconstruction using computational integral imaging," *Optics Express*, vol. 12, no. 3, pp. 483-491, February 2004.

[15] M. Cho, M. Daneshpanah, I. Moon, and B. Javidi, "Three-Dimensional Optical Sensing and Visualization Using Integral Imaging," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 4, pp. 556-575, April 2011.

[16] J. S. Jang and B. Javidi, "Three-dimensional integral imaging of micro-objects," *Optics Letters*, vol. 29, no. 11, pp. 1230-1232, June 2004.

[17] J. W. Goodman, *Statistical Optics*, Rosewood Drive, MA: JOHN WILLEY & SONS, INC., 1985.



조기옥(Ki-Ok Cho)

한경대학교 정보제어공학사
 한경대학교 전기전자제어공학석사
 한경대학교 전기전자제어공학과 박사과정
 ※관심분야 : 3차원 영상 획득, 3차원 영상 디스플레이, 3차원 물체 추적, 3차원 광자 계수 영상, 3차원 영상 암호화



김영준(Young Jun Kim)

한경대학교 정보제어공학사
 한경대학교 전기전자제어공학과 석사과정
 ※관심분야 : 3차원 영상 획득, 3차원 영상 디스플레이, 3차원 깊이 추적, 3차원 물체 추적



김철수(Cheolsu Kim)

1985년 2월 ~ 1989년 2월 경북대학교 전자공학과 공학사
1989년 3월 ~ 1991년 2월 경북대학교 전자공학과 공학석사
1991년 3월 ~ 1997년 2월 경북대학교 전자공학과 공학박사
1995년 3월 ~ 1998년 2월 김천대학교 전자통신과 전임강사
2008년 2월 ~ 2009년 1월 미국 Univ. of Connecticut 방문연구교수
1998년 3월 ~ 현재 경주대학교 전기에너지컴퓨터공학과 교수
관심분야 : 광신호처리, 3D 디스플레이, 광암호화, 워터마킹, 뇌-컴퓨터인터페이스 등



조명진(Myungjin Cho)

부경대학교 정보통신공학사
부경대학교 정보통신공학석사
삼성전자 선임연구원
University of Connecticut, Electrical Engineering, PhD.
University of Connecticut, Post-Doctoral Fellow
한경대학교 전기전자제어공학과 조교수
※관심분야 : 3차원 영상획득, 3차원 영상 디스플레이, 3차원 물체 추적, 3차원 광자계수 영상, 3차원 영상 암호화, 디지털 홀로그래피, 수중 영상처리