《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Volume 24, Number 3, June 2013

DOI: http://dx.doi.org/10.3807/KJOP.2013.24.3.120

Numerical Reconstruction of Two-dimensional Object from the Image Captured by a Random Lens Array

Sung-In Hong[1], Nam Kim[1], and Jae-Hyeung Park[2†]

[1]*School of Information and Communication Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea*

[2]*School of Information and Communication Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

(Received April 17, 2013; Revised manuscript June 10, 2013; Accepted June 14 2013)

We propose a method to reconstruct the two-dimensional object from an image captured through an array of random lenses each of which has random shape, size, and focal power. In the proposed method, the characteristics of the random lens array are estimated by capturing images for known elementary inputs, and then the object is reconstructed by measuring correlations between the random lens images of the object and the elementary inputs. The experimental results show that the original object can be recognized by the proposed reconstruction method. Nevertheless, further quality enhancement is required to increase feasibility and to extend to general three-dimensional object cases.

Keywords: Random lens array, Two-dimensional image reconstruction

OCIS codes: (110.0110) Imaging systems; (080.3620) Lens system design; (150.1488) Calibration

불규칙 렌즈 배열을 통과한 영상을 이용한 2차원 물체의 수치적 복원

홍성인[1] · 김 남[1] · 박재형[2†]

[1]충북대학교 정보통신공학부

㉾ 361-763 청주시 흥덕구 내수동로 52

[2]인하대학교 정보통신공학부

㉾ 402-751 인천광역시 남구 인하로 100

(2013년 4월 17일 받음, 2013년 6월 10일 수정본 받음, 2013년 6월 14일 게재 확정)

본 논문에서는 임의의 모양, 크기, 및 초점 거리를 가지는 렌즈들의 불규칙한 배열을 통과하여 저장되는 영상으로부터 원본 2차원 객체의 모양을 복원하는 방법을 제시한다. 제안된 방법에서는 먼저 단일 물체점의 위치를 바꾸어가며 불규칙 렌즈 배열을 통한 촬영을 수행하여 각 물체점 위치에 대한 불규칙 렌즈 배열 영상들을 확보한다. 이와 같은 각 물체점별 불규칙 렌즈 배열 영상들을 임의의 모양을 가지는 2차원 물체에 대한 불규칙 렌즈 배열 영상과 비교하여 유사도를 산출함으로써 임의의 모양을 가지는 2차원 물체를 복원한다. 실험 결과를 통하여 원본 물체를 인식할 수 있는 수준으로 물체의 복원이 가능함을 확인하였다. 추후 보다 높은 해상도의 복원과 3차원 물체로의 확장을 위한 추가 연구가 필요함도 확인하였다.

Keywords: 불규칙 렌즈 배열, 2차원 영상 복원

OCIS codes: (110.0110) Imaging systems; (080.3620) Lens system design; (150.1488) Calibration

I. 서 론

일반적인 카메라 이미징 시스템은 결상 광학계에 기반하고 있다. 물체면의 한 점에서 출발한 광선들은 카메라 렌즈에 의하여 영상 센서면의 한 위치에 모이며 그 밝기가 기록된다. 이에 따라 카메라의 영상 센서면에 기록되는 영상은 물체를 특정 위치에서 바라본 하나의 2차원 원근 투사 영상이다. 최근에는 물체 공간에 대한 보다 많은 정보를 획득하기 위하여 전통적인 결상 광학계에 기반한 카메라 이미징 시스템을 변형하는 홀로그래피 기반, 혹은 기하 광학 기반의 계산 광학 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-4] 마이크로 렌즈 배열을 이용하여 물체 공간으로부터 전파되는 광선들의 위치

†E-mail: jh.park@inha.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

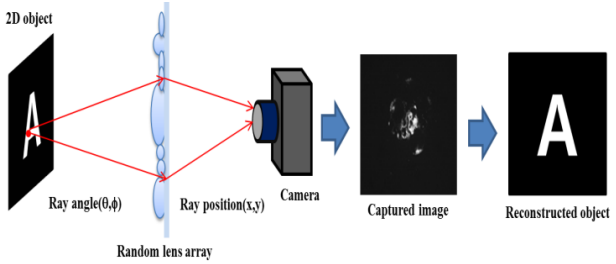


FIG. 1. Concept of the proposed method.

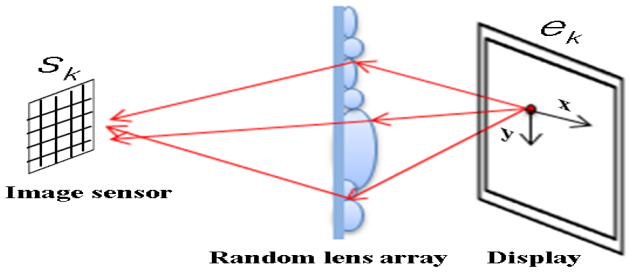


FIG. 2. Calibration process.

별/방향별 분포를 촬영한 후 이를 분석하여 물체의 3차원 정보를 추출하는 Light field 카메라 혹은 집적 영상(integral imaging) 카메라 기술은 기하 광학 기반 계산 광학 카메라 시스템의 대표적인 예이다.[3, 4]

집적 영상 카메라 기술에서는 일반적으로 같은 파라미터를 가지는 작은 렌즈들이 균일한 간격으로 배열되어 있는 렌즈 배열을 활용하여 광선들의 분포를 촬영한다. 그러나 이러한 균일한 렌즈 배열을 사용할 경우에는 사용되는 렌즈의 f-number에 의하여 field of view(FOV)가 제한되고, 촬영되는 광선 분포의 공간/각도 샘플링 간격, 즉 해상도가 고정되는 한계를 지니고 있다.[5]

이를 보완하기 위한 시도로서 서로 다른 초점 거리를 가지거나 서로 다른 크기를 가지는 렌즈들로 이루어진 렌즈 배열을 활용한 기술들이 제시된 바 있다.[6] 그러나 렌즈의 초점거리뿐만이 아니라 크기, 초점거리, 배열, 모양 등이 완전히 불규칙적인 렌즈 배열에 대한 연구는 아직 이루어진 바 없다. 이러한 불규칙 렌즈 배열은 특히 최근 많은 주목을 받고 있는 압축 측정(compressed sensing) 기술을[7, 8] 장면 적응적인 계산 광학 카메라 시스템에 적용하여 촬영 광선 분포의 해상도를 향상시키는 데도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 기하 광학 기반의 장면 적응적인 가변 불규칙 렌즈 배열을 이용한 계산광학 카메라 시스템의 기초 연구로서, 장면에 관계 없이 고정된 임의의 불규칙 렌즈 배열을 이용하여 촬영함으로써 왜곡된 영상으로부터 원본 물체 모양을 복원하는 기술을 제안한다. 그림 1은 제안된 기술의 개념도를 보여준다. 물체로부터 오는 광선들은 불규칙 렌즈 배열을 통과하며 굴절되어 카메라에 촬영된다. 제안된 기술은 이와 같이 촬영된 영상을 분석하여 원본 물체 모양을 복원한다. 본 논문은 2장에서 복원 알고리즘, 3장에서 실험 결과를 기술하고 4장에서 결론을 제시한다.

II. 원 리

제안된 기술에서는 먼저 물체면의 특정 위치로부터 출발하는 광선들이 불규칙 렌즈 배열을 통과하여 영상 센서에 어떠한 분포로 도달하는지에 대한 정보를 획득한다. 이를 위하여 그림 2에서 보는 바와 같이, 특정 위치에 일정한 밝기의 점이 존재하는 단위 영상 $e_k(x,y)$을 디스플레이에 표시한 후, 불규칙 렌즈 배열을 통과한 후 영상 센서에 생성되는 영상

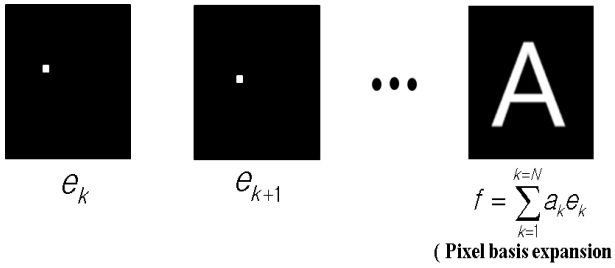


FIG. 3. Elementary point objects and general two-dimensional object.

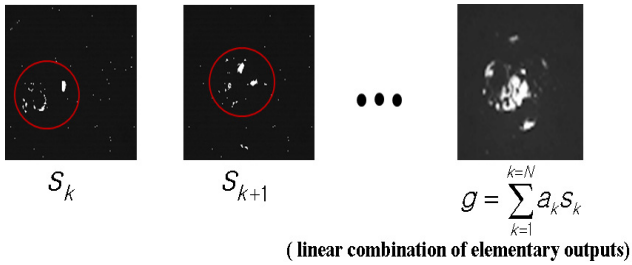


FIG. 4. Images captured through random lens array for elementary point objects and general two-dimensional object.

$s_k(x,y)$을 촬영한다. 이와 같은 과정을 디스플레이에 표시되는 물체점의 위치를 일정한 간격으로 이동시키며 반복적으로 수행하며 각각의 영상을 저장한다.

그림 3과 4는 물체점 영상 $e_k(x,y)$과 촬영된 불규칙 렌즈 배열 통과 영상 $s_k(x,y)$의 예를 보여준다. 이 때, 디스플레이에 표시되는 임의의 모양을 지니는 입력 영상 $f(x,y)$는 k번째 물체점의 밝기에 해당하는 계수 a_k를 이용하여

$$f(x,y) = \sum_{k=1}^{k=N} a_k e_k(x,y) \tag{1}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 불규칙 렌즈 배열을 통한 영상 형성은 선형적인 과정이므로 이러한 임의의 모양의 입력 영상 $f(x,y)$에 대한 불규칙 렌즈 배열 통과 영상 $g(x,y)$는

$$g(x,y) = \sum_{k=1}^{k=N} a_k s_k(x,y) \tag{2}$$

와 같이 나타난다. 따라서 본 연구의 원본 물체 복원은 원본 물체 영상에 대한 불규칙 렌즈 배열 통과 영상 $g(x,y)$와 각 단위 물체점 영상에 대한 불규칙 렌즈 배열 통과 영상들 $s_k(x,y)$들로부터 원본 물체 영상을 이루는 단위 물체점 영상들의 계수 a_k들을 구하는 것으로 요약될 수 있다.

본 연구에서는 계수 a_k를 도출하기 위해 원본 물체 영상에 대한 불규칙 렌즈 배열 통과 영상 $g(x,y)$과 각 단위 물체점 영상에 대한 불규칙 렌즈 배열 통과 영상들 $s_k(x,y)$간의 유사도에 기반한 방법을 제안한다. 일반적으로 두 신호 간의 유사도는 상관계수를 이용하여 정량화 될 수 있으며, 임의의 두 2차원 영상 신호 $h(x,y)$와 $r(x,y)$간의 상관계수 $<h(x,y), r(x,y)>$는

$$\langle h(x,y), r(x,y)\rangle = \frac{\sum_{x,y}(h-\bar{h})(r-\bar{r})}{\sqrt{\sum_{x,y}(h-\bar{h})^2}\sqrt{\sum_{x,y}(r-\bar{r})^2}}, \tag{3}$$

와 같이 정의된다.[9] 여기서 $\bar{h}$와 $\bar{r}$는 각 영상 신호의 평균을 의미한다. 본 연구에서의 $g(x,y)$과 $s_k(x,y)$를 식 (3)에 적용하고, 식 (2)를 고려하면

$$\begin{aligned}\langle g, s_k\rangle &= \frac{\sum_{x,y}(g-\bar{g})(s_k-\bar{s}_k)}{\sqrt{\sum_{x,y}(g-\bar{g})^2}\sqrt{\sum_{x,y}(s_k-\bar{s}_k)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\sum_{x,y}(g-\bar{g})^2}}\sum_{i=1}^{N} a_i \frac{\sum_{x,y}(s_i-\bar{s}_i)(s_k-\bar{s}_k)}{\sqrt{\sum_{x,y}(s_k-\bar{s}_k)^2}} \\ &= \frac{\sum_{x,y}\left(\sum_{i=1}^{N} a_i(s_i-\bar{s}_i)\right)(s_k-\bar{s}_k)}{\sqrt{\sum_{x,y}(g-\bar{g})^2}\sqrt{\sum_{x,y}(s_k-\bar{s}_k)^2}}\end{aligned} \tag{4}$$

와 같은 관계를 얻을 수 있다. 이 때, 식 (4)를 단순화하기 위하여 본 연구에서는 수정된 상관계수 $|h(x,y), r(x,y)>$를 다음 식 (5)와 같이 제안한다.

$$|h,r\rangle = \sqrt{\sum_{x,y}(h-\bar{h})^2}\,\langle h,r\rangle = \frac{\sum_{x,y}(h-\bar{h})(r-\bar{r})}{\sqrt{\sum_{x,y}(r-\bar{r})^2}} \tag{5}$$

식 (5)의 정의를 식 (4)에 적용하면,

$$|g,s_k\rangle = \frac{\sum_{x,y}\left(\sum_{i=1}^{i=N} a_i(s_i-\bar{s}_i)\right)(s_k-\bar{s}_k)}{\sqrt{\sum_{x,y}(s_k-\bar{s}_k)^2}} = \sum_{i=1}^{i=N} a_i |s_i, s_k\rangle \tag{6}$$

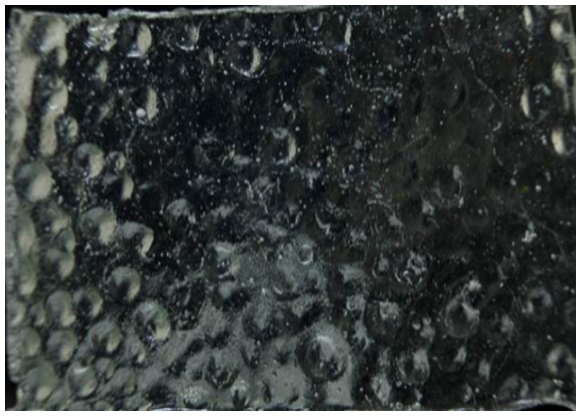
와 같이 표현될 수 있으며, 식 (6)은

$$\begin{pmatrix}|g,s_1\rangle\\ |g,s_2\rangle\\ \vdots\\ |g,s_N\rangle\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}|s_1,s_1\rangle & |s_2,s_1\rangle & \cdots & |s_N,s_1\rangle\\ |s_1,s_2\rangle & |s_2,s_2\rangle & \cdots & |s_N,s_2\rangle\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ |s_1,s_N\rangle & |s_2,s_N\rangle & \cdots & |s_N,s_N\rangle\end{pmatrix}\begin{pmatrix}a_1\\ a_2\\ \vdots\\ a_N\end{pmatrix} \tag{7}$$

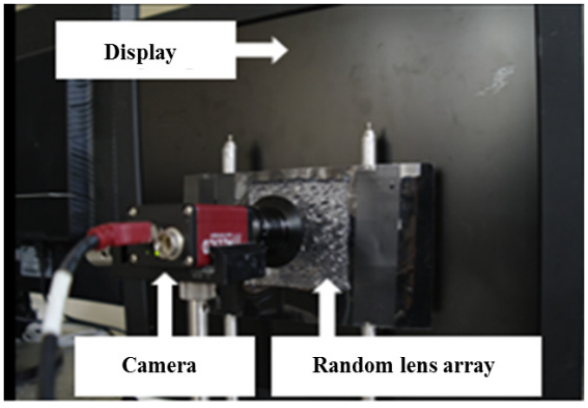
와 같이 행렬 형태로 표현된다. 따라서 식 (7)에서 $|s_i, s_j>$ 행렬의 역행렬을 구함으로써 계수 a_k들을 구할 수 있으며 이를 $f(x,y)=\sum_{k=1}^{k=N} a_k e_k(x,y)$에 적용하여 원본 물체 영상 $f(x,y)$를 복원할 수 있다.

III. 실험 결과

본 논문에서 제안된 불규칙 렌즈 배열을 통과한 영상으로부터의 원본 2차원 물체 영상 복원 기법을 실험적으로 검증하였다. 실험에 사용된 불규칙 렌즈 배열은 약 1.52의 굴절율을 가지고 있는 Copernicia Cerifera (carnauba) wax를 이용



(a)



(b)

FIG. 5. Experimental setup. (a) Fabricated random lens array. (b) Experimental setup.

하여 만들어졌다. 그림 5(a)는 제작된 불규칙 렌즈 배열을 보여준다. 실험 과정은 크게 단위 물체점 영상 $e_k(x,y)$들에 대한 불규칙 렌즈 배열 통과 영상 $s_k(x,y)$을 촬영하여 저장하는 칼리브레이션 과정과 실제 2차원 물체 $f(x,y)$에 대한 불규칙 렌즈 배열 통과 영상 $g(x,y)$를 촬영하고 이로부터 물체 모양 $f(x,y)$를 복원하는 복원 과정 두 가지 단계로 구분된다

칼리브레이션 과정은 그림 5(b)와 같은 실험 구성으로 이루어졌다. 실험에 사용된 CMOS 카메라는 6.7 mm 픽셀 크기를 가지고 있고 해상도는 1280×1020이다. 칼리브레이션 과정을 위해 디스플레이에 표시된 물체점 영상 $e_k(x,y)$와 실험적으로 촬영된 불규칙 렌즈 배열 통과 영상 $s_k(x,y)$의 예는 그림 6과 같다. 디스플레이에 표시된 물체점에서 출발한 광선들이 불규칙 렌즈 배열을 통과하여 다양한 패턴으로 CMOS 카메라에 촬영됨을 알 수 있다. 이진 물체점 영상 $e_k(x,y)$은 검은 배경위에 4×4 픽셀 크기의 흰색 사각형을 x, y 방향으로 각 64픽셀의 범위에서 한 픽셀 단위로 이동하면서 N=64×64=4096장 준비하였으며, 촬영된 $s_k(x,y)$영상은

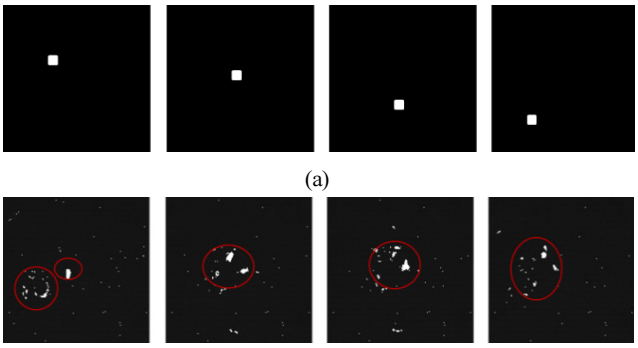


FIG. 6. Examples of elementary point objects and corresponding images captured through the random lens array. (a) Elementary point objects e_k. (b) Images s_k captured through random lens array for elementary point objects.

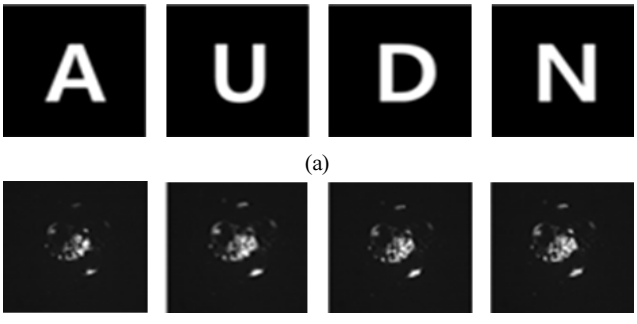


FIG. 7. Two-dimensional objects and corresponding images captured through random lens array. (a) Two-dimensional object images f. (b) Images g captured through the random lens array for two- dimensional objects.

각각 640×512크기의 해상도를 가지고 있다.

실험에서 2차원 물체 영상 $f(x,y)$로는 그림 7(a)와 같은 4가지 문자 영상을 사용하였다. 그림 7(b)는 그림 7(a)의 각 문자 영상에 대해 실험적으로 촬영된 불규칙 렌즈 통과 영상 $g(x,y)$을 보여준다.

그림 8은 실험에서 측정된 $|s_i,s_j>$행렬의 값의 분포를 보여준다. 예상되는 바와 같이 $|s_i,s_j>$행렬의 대각 성분은 같은 불규칙 렌즈 통과 영상간의 수정된 상관계수이므로 높은 값을 나타내며, 비대각 성분은 낮은 값을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 비대각 성분이 완전한 0은 아니므로, 각 불규칙 렌즈 통과 영상들 $s_k(x,y)$이 서로 직교하는 것은 아니다.

그림 9은 그림 7(b)의 촬영 영상으로부터 제안된 방법으로 복원된 영상을 보여준다. 그림 7(b)의 촬영 영상에서는 원본 물체를 인식할 수 없으나, 그림 9의 실험 결과에서는 비록 높은 해상도는 아니지만 원본 물체 영상을 인식할 수 있을 정도로 복원이 됨을 확인할 수 있다. 원본 물체와의 Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)은 그림 9에 표시된 바와 같이 20.8dB에서 23dB사이로 측정 되었다. 그럼에도 불구하고 그림 9의 실험 결과의 해상도는 매우 낮은 수준이며, 이는 불규칙 렌즈 배열의 반사광 등 실험 과정에서 생긴 여러 잡음 요인에 의한 것으로 여겨진다. 특히 그림 10에서와 같이 단위

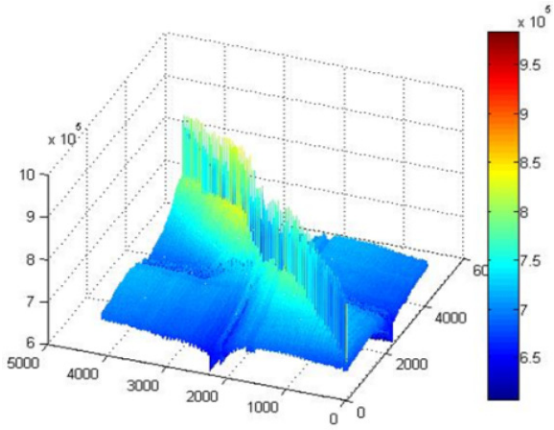


FIG. 8. Measured correlation matrix $|s_i, s_j>$.

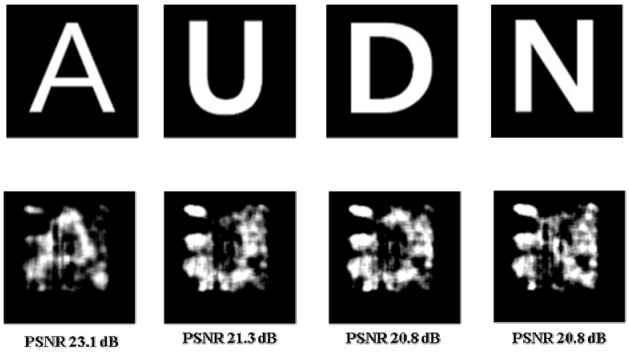


FIG. 9. Reconstruction result.

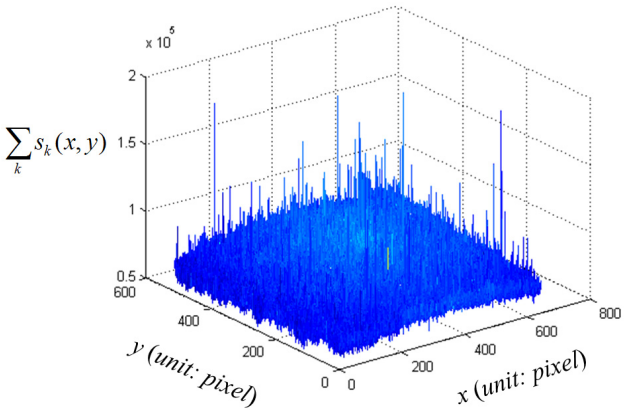


FIG. 10. Aggregated random lens array images for elementary inputs $\sum_k s_k(x,y)$.

물체점에 대한 불규칙 렌즈 배열 통과 영상들의 합 $\sum_k s_k(x,y)$이 매우 불균일한 밝기 분포를 보이며, 이는 복원된 물체 영상이 위치별로 큰 신호 대 잡음 비율을 가지는 이유가 될 수 있을 것으로 생각된다. 향후 향상된 결과를 얻기 위하여는 이러한 점들의 보완이 필요하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 불규칙한 렌즈 배열을 통과한 영상을 복원하는 방법을 제안하였다. 먼저 불규칙 렌즈 배열의 특성을 파악하기 위하여 단위 물체점에 대한 불규칙 렌즈 배열 통과 영상 촬영 실험을 수행하였고, 이렇게 확보된 단위 영상들을 이용하여 일반적인 2차원 물체에 대한 복원 방법을 제시 하였다. 제안된 방법에서는 단위 영상들간의 상관도를 수정된 상관 계수를 이용하여 산출하고 이를 통해 불규칙 렌즈 배열을 특성화하는 2차원 행렬을 구성하였다. 이렇게 구성된 2차원 특성 행렬을 이용하여 단위 물체점들의 2차원 물체에 대한 공헌도를 도출하고 원본 2차원 물체 영상을 복원하였다. 실험을 통하여 본 논문에서 제안된 방법으로 불규칙 렌즈 배열 영상으로부터 원본 2차원 물체 영상을 복원할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 제시된 연구의 다음 과제로 복원되는 영상 화질의 향상을 위해서 영상 잡음 제거, 명암 향상 등의 기법이 개발되어야 한다. 또, 고정된 불규칙 렌즈 배열이 아니라, 공간광변조기를 활용하여 장면에 적응적인 불균일 가변 광학계를 활용하여야 화질 향상 및 3차원 물체 장면으로의 확장이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2012-014550)

References

1. Y. Choi, T. D. Yang, C. Fang-Yen, P. Kang, K. J. Lee, R. R. Dasari, M. S. Feld, and W. Choi, "Overcoming the diffraction limit using multiple light scattering in a highly disordered medium," Phys. Rev. Lett. **107**, 023902 (2011).
2. D. B. Conkey, A. M. Caravaca-Aguirre, and R. Piestun, "High-speed scattering medium characterization with application to focusing light through turbid media," Opt. Express **20**, 1733-1740 (2012).
3. R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," Stanford Technical Report CTSR 2005-02 (2005).
4. J.-H. Park and K.-M. Jeong, "Frequency domain depth filtering of integral imaging," Opt. Express **19**, 18729-18741 (2011).
5. J.-H. Park, K. Hong, and B. Lee, "Recent progresses in three-dimensional information processing based on integral imaging," Appl. Opt. **48**, H77-94 (2009).
6. J.-S. Jang and B. Javidi, "Large depth-of-focus time-multiplexed three-dimensional integral imaging by use of lenslets with nonuniform focal lengths and aperture sizes," Opt. Lett. **28**,1924-1926 (2003).
7. M. M. Marim, M. Atlan, E. Angelini, and J.-C. Olivo-Marin, "Compressed sensing with off-axis frequency-shifting holography," Opt. Lett. **35**, 871-873 (2010).
8. R. Fergus, A. Torralba, and W. T. Freeman, "Random lens imaging," MIT CSAIL Technical Report 2006-058 (2006).
9. P. Peebles, *Probability, Random Variables and Random Signal Principles*, 4th ed. (McGraw-Hill, 2001), p. 145.