

사면 카메라를 이용한 고선명 영상획득 계산영상법

Computational Imaging for High Definition Image Acquisition Using Non-frontal Camera

민 성 재, 이 수 영* 
 (Sung-Jae Min¹ and Soo-Yeong Yi^{1,*})

¹Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Abstract: Non-frontal cameras have an image sensor that is intentionally slanted compared to the lens. Because the sensor and the lens are not parallel, the sharp focus plane of the camera is also slanted with variable object distance on the plane according to the lens's law. In this study, we propose a high-definition image-acquisition method that uses a non-frontal camera. A series of images are obtained by rotating the non-frontal camera about an optical axis, and each of the images has a sharp focus plane of variable object distance. We can compose a sharp focus image by selecting focused pixels among the series of images according to a focus measure. The initial results of the non-frontal camera and further work to compose high-definition images are presented in this study.

Keywords: computational imaging, non-frontal camera, high definition image, focus measure, image composition

1. 서론

영상시스템(카메라)의 성능은 그로부터 얻어진 영상의 1) 선명도(definition), 2) 화각(field of view), 3) 조도영역(dynamic range)으로 평가될 수 있다. 기존의 영상시스템은 단순히 이미지 센서에 맺힌 영상을 그대로 사용자에게 표출해 주는 방식으로 이루어져 있으며, 위 성능의 측면에 있어서 일정한 한계를 가지고 있다. 최근 들어 이러한 한계를 극복하기 위한 새로운 계산 영상법(Computational Imaging)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 계산 영상법에 관한 연구는 전기전자공학, 컴퓨터 공학뿐만 아니라 물리광학 등이 연관된 다학제적인 접근 방식이 필요하다.

계산 영상법이란 기존의 영상시스템에 부가적으로 반사체, 렌즈, 빔 스플리터 등의 광학소자와 컴퓨터 연산기능을 적용함으로써 앞서 기술한 기존 영상시스템의 한계를 극복하고, 보다 유용한 영상을 획득하기 위한 새로운 연구방법론을 일컫는다. 지금까지 대부분의 영상관련 연구들의 주제와 내용은 주어진 영상으로부터 필요한 정보를 어떻게 추출할 것인지에 관해 집중되어 있는 반면에, 계산 영상법은 보다 근본적으로 풍부하고 질 좋은 정보를 포함하는 유용한 영상을 어떻게 획득할 것인지에 관한 내용에 초점을 맞추고 있다. 예로서 광각 영상은 좁은 시야각 영상에 비해 보다 넓은 장면을 담을 수 있으므로 이로부터 추출할 수 있는 정보는 더 많을 것이며, 또한 선명 영상의 경우도 영상 후처리 과정을 통해 얻을 수 있는 정보의 질이 더 좋을 것이라는 것은 자명하다.

계산 영상법은 X선 영상, 초음파 영상 분석 등의 의료영상 분야 뿐만 아니라 과학, 가전, HCI(Human Computer Interaction), 로봇 및 원격 감시 등 다양한 산업 분야에 적용될 수 있다.

예로서 곡면형 반사체를 이용하여 영상을 획득하는 catadioptric (catoptric+dioptric) 영상 시스템은 시야각 180도 이상의 초광각 단일시점 영상을 매우 경제적이고, 효율적으로 얻을 수 있으며[1,2], 기존 어안(fish eye) 렌즈를 이용한 영상시스템에 비해 색수차가 적다는 장점이 있으므로 최근 들어 교통감시, 보안, 원격회의, 이동로봇 등 다양한 분야에 적용되고 있다[3]. 또한 곡면형 반사체를 통해 획득한 영상에 영상복원 알고리즘 연산을 적용하여 원근(perspective) 파노라마 영상을 생성할 수 있으므로 자동차 응용에 있어 사각지역을 해소하고 주차, 운전의 안전성을 제고하기 위한 차량용 AVM(Around View Monitoring)등에 활용될 수 있다[4,5].

기존의 카메라는 렌즈 법칙에 따라 일정 거리에 놓인 물체에 대해서만 선명한 상을 맺고, 이외의 거리에 있는 사물에 대해서는 얻어진 영상에 블러(blur)가 생기게 된다. 이 때문에 영상의 질이 저하되고, 이후 영상처리 과정에 문제가 생길 수 있다. 한편 카메라 렌즈와 센서면이 평행하게 설치된 일반 카메라와 달리, 렌즈와 영상센서를 의도적으로 서로 비스듬하게 설치한 사면 영상 카메라는 선명한 상을 얻을 수 있는 물체 거리가 한정되지 않고 넓은 영역에 걸쳐질 수 있다[6]. 본 논문에서는 사면 영상 카메라를 광축(optical axis) 중심으로 회전시키고 얻어진 영상들을 합성함으로써 넓은 영역에 위치해 있는 모든 사물에 대해서 선명한 초점 영상을 얻을 수 있는 새로운 영상 시스템에 관해 연구하고, 그 초기 실험결과를 제시하고자 한다. 사면 영상 카메라 회전에 따라 얻어지는 영상 열에서 선명지수(focus measure)가 높은 화소(pixel)를 추출하여 고선명 영상을 합성할 수 있다[7].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2절에서 렌즈 법칙과 사면 카메라의 원리에 대해서 소개한다. 3절에서는 본 논문

* Corresponding Author

Manuscript received June 6, 2018; revised July 31, 2018; accepted August 6, 2018

민성재, 이수영: 서울과학기술대학교 전기정보공학부(msj5826@seoultech.ac.kr, suylee@seoultech.ac.kr ORCID[®] 0000-0001-8110-1468)

※ 본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업 지원(과제번호: 2018R1D1A1B07044841)에 의하여 연구되었음.

※ 본 논문은 2018년도 ICROS 학술대회에서 초안[12]이 발표되었음.

서 제안하는 사면카메라 광축 중심 회전을 통한 영상획득 및 영상합성 방법에 대해 설명하고, 4절에서는 제안 방법을 검증하기 위한 초기 실험결과를 제시한 후, 5절에서 추후 연구에 대해 설명하고 결론을 맺는다.

II. 사면 카메라

식 (1)은 잘 알려진 렌즈 법칙으로서 볼록렌즈의 초점거리, f 에 따라 선명 상의 위치와 물체 위치 사이의 거리 관계를 나타낸다. 즉, 그림 1에서 G 의 위치에 있는 물체의 경우는 B 의 위치에 놓인 영상 센서에 선명한 상을 맺게 된다. 영상 센서의 거리 b 가 고정되어 있을 때, g 이외의 거리에 있는 물체는 선명한 영상을 맺지 못하고 영상에 블러가 생기게 된다[8].

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

그림 2는 렌즈의 초점거리에 따른 영상 블러 현상을 보여준다. 전면에 있는 물체는 선명한 영상을 가지지만, 배경에 있는 물체의 경우에는 영상 블러에 의해 구분이 어려움을 볼 수 있다.

그림 3은 볼록 렌즈의 효과를 설명하기 위해 고전적인 핀홀 카메라와 비교한 것이다. 볼록 렌즈는 사물에서 반사된 빛을 모아 주는 역할을 하므로 영상센서 노출시간을 짧게 하여 빠른 영상획득을 가능하게 한다는 장점이 있는 반면에, 전술한 바와 같이 렌즈 초점거리에 따른 영상 블러가 발생한다. 렌즈를 사용하지 않는 고전적인 핀홀 카메라는 물체 거리에

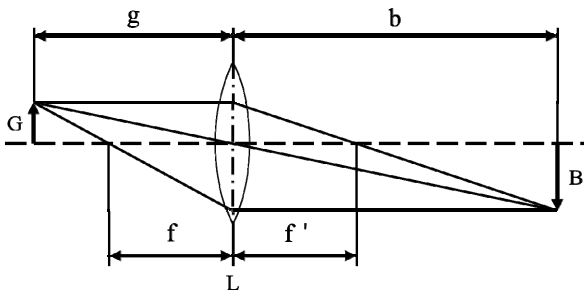


그림 1. 렌즈 법칙.

Fig. 1. Lens' law.



그림 2. 렌즈의 초점거리에 따른 영상 블러.

Fig. 2. Image blur by focal length of lens.

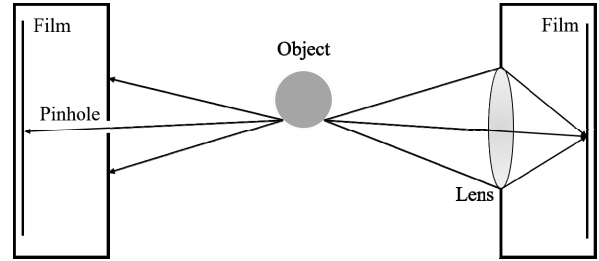


그림 3. 카메라 렌즈의 효과.

Fig. 3. Effect of camera lens.

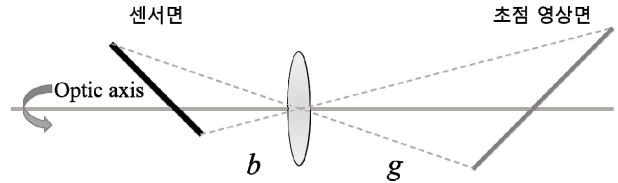


그림 4. 사면 카메라(단면).

Fig. 4. Non-frontal camera (Cross sectional view).

따른 영상 블러가 발생하지 않으나, 노출시간이 길다는 문제점이 있다[8].

기존의 카메라와는 달리 사면 카메라는 그림 4에 보인 바와 같이 카메라 렌즈와 영상센서를 의도적으로 서로 비스듬하게 설치한 것이다[9,10]. 렌즈로부터 영상 센서까지의 거리, b 가 일정하지 않으며, 따라서 렌즈공식에 의해 센서에 선명한 초점 영상을 맺게 되는 물체거리가 식 (2)에 의해 결정된다:

$$g = \frac{b \cdot f}{b - f} \quad (2)$$

III. 사면 카메라 회전을 통한 영상 획득 및 영상합성

이제 그림 4의 사면 카메라를 광축(optical axis)을 중심으로 회전시킨다고 하면, 선명 초점 영상면이 그리는 자취 영역은 그림 5와 같게 된다. 그러므로 그림 5에서 선명 초점영상 영역내의 모든 물체는 사면 카메라 회전에 따라 얻어지는 영상열중 어떤 하나의 영상에서 반드시 선명한 상을 맺게 된다.

사면 카메라 회전에 따라 얻어지는 영상열에서 동일 물체점에 대응되는 화소들의 위치는 미리 주어진 모터회전 스텝각과 광축의 위치로부터 쉽게 찾을 수 있다.

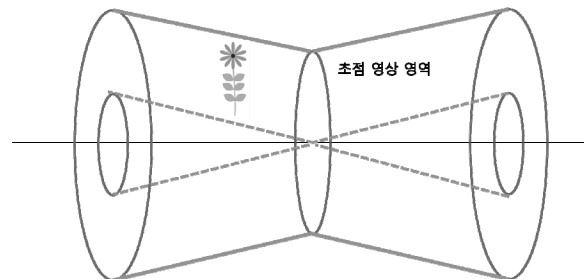


그림 5. 사면 카메라 회전에 의한 선명 초점 영역.

Fig. 5. Sharp focus region according to rotation of non-frontal camera.

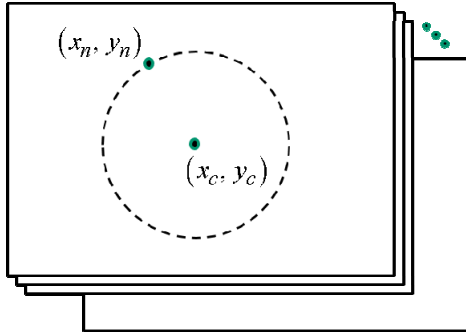


그림 6. 영상열에서 대응 화소들.

Fig. 6. Corresponding pixel points in the image sequence.

예로서 사면 카메라를 영상면에서의 광축, (x_c, y_c) 를 중심으로 스텝각 10도 단위로 360도 회전시키면서 영상을 얻는 경우 $N = 36$ 장의 영상열이 얻어질 것이며, 이 영상열에서 기준 영상(0도)의 한 화소 위치 (x_n, y_n) 에 대응하는 화소의 위치는 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_c \\ y - y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

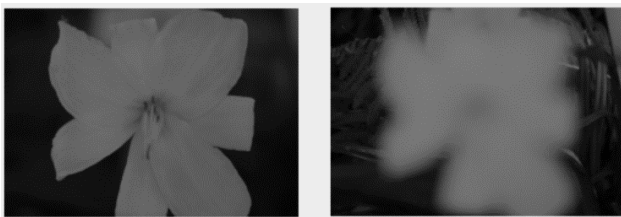
$$\theta_n = \frac{2\pi}{N} n, \quad n = 0, \dots, N$$

위 식에서 $[x_n \ y_n]^T$ 는 n 번째 영상에서의 대응 화소를 의미한다. 얻어진 영상열 중에서 합성 영상의 대응 화소의 선명지수(focus measure)가 가장 높은 화소를 선택하여 배치함으로써 고선명 영상을 얻을 수 있다.

선명지수는 화소의 선명도를 나타내는 것으로 응용 예에 따라 여러 가지 지수들이 개발되어 있다. 가장 쉽게 사용할 수 있는 선명지수는 미분 연산자로서 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\phi(x, y) = \{f(x, y+1) - f(x, y)\}^2 \quad (4)$$

식 (4)는 y 방향 미분의 제곱을 의미하며, 경우에 따라 x 방향, 또는 대각선 방향 미분의 제곱 등을 사용할 수 있으며 선명지수로 많이 사용되는 1차 미분 컨벌루션 연산자를 표 1에 정리하였다[11]. 그림 7은 영상 선명도의 의미를 보여준다.



(a) High definition image

(b) Low definition image

그림 7. 영상의 선명도[3].

Fig. 7. Focus measure.

표 1. 선명지수로 사용되는 1차 미분 연산자[11].

Table 1. First-order derivative operators for constructing focus measures [11].

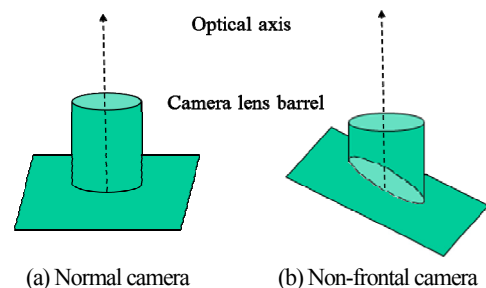
Operator	Horizontal	Vertical
3×3 difference	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 \end{bmatrix}$
3×3 Sobel	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix}$
3×3 Scharr	$\begin{bmatrix} -3 & 0 & +3 \\ -10 & 0 & +10 \\ -3 & 0 & +3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -3 & -10 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ +3 & +10 & +3 \end{bmatrix}$
3×3 Roberts	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$
3×3 Prewitt	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}$
5×5 Sobel	$\begin{bmatrix} -1 & -2 & 0 & +2 & +1 \\ -4 & -8 & 0 & +8 & +4 \\ -6 & -12 & 0 & +12 & +6 \\ -4 & -8 & 0 & +8 & +4 \\ -1 & -2 & 0 & +2 & +1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -4 & -6 & -4 & -1 \\ -2 & -8 & -12 & -8 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +2 & +8 & 12 & 8 & +2 \\ +1 & +4 & 6 & 4 & +1 \end{bmatrix}$

IV. 초기 실험 결과

본 논문에서 제시한 사면카메라 회전을 통한 선명영상 획득 방법의 가능성을 확인하기 위해 기초 실험을 실시하였다. 그림 8은 사면 카메라 제작 방법을 보여준다. 일반 카메라의 경통(barrel)을 비스듬히 절단하여 영상센서 모듈에 붙임으로써 간단히 사면 카메라를 제작할 수 있다.

단위 회전각(예: 1도 단위)에 따라 0도 ~ 360도 사이의 일련의 회전 영상들을 얻고, 이 영상들의 대응 화소들 중에서 선명도가 높은 화소들을 선택하여 영상을 재구성함으로써 일정 영역에 있는 모든 물체들에 대해서 거리에 무관하게 선명한 영상을 얻을 수 있다. 그림 9는 카메라로부터 거리가 다른 위치에 놓여 있는 두 개의 동일한 물체를 사면 카메라 회전을 통해 얻은 샘플 영상들이다.

그림 9(a)에서 “1”에 해당하는 물체 부분을 보면 영상 블러에 의해 어떤 글씨인지 알아보기 어려울 만큼 선명도가 낮지만, 90도 회전된 그림 9(b)에서는 같은 거리에 있는 “1” 물체 부분의 글씨가 선명함을 볼 수 있다.



(a) Normal camera

(b) Non-frontal camera

그림 8. 사면 카메라 제작.

Fig. 8. Production of non-frontal camera.

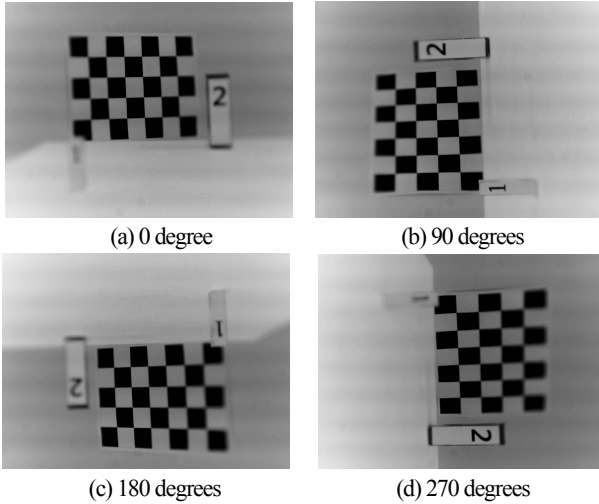


그림 9. 사면 카메라 회전에 따른 영상 획득.

Fig. 9. Image acquisition by rotating non-frontal camera.

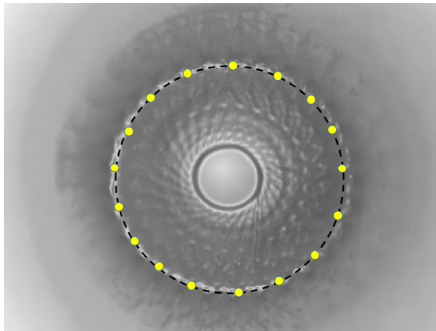


그림 10. 회전 중심을 찾기 위한 영상 중첩.

Fig. 10. Image overlay to find rotation center.

사면 카메라 회전에 따라 얻은 영상열을 식 (3)에 의해 합성하기 위해서는 회전중심을 구해야 한다. 그림 10은 각 영상열을 중첩한 것이다. 그림에서 대응화소점들이 그리는 원 궤적으로부터 다음과 같이 회전중심을 구할 수 있다. $x-y$ 평면에서 원 방정식은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$-2x_c x - 2y_c y + l = -x^2 - y^2, \quad l = x_c^2 + y_c^2 - r^2 \quad (5)$$

여기서 (x_c, y_c) 는 원의 중심 좌표, r 은 반지름을 의미한다. 중첩 영상(그림 10)에서 원 궤적상 동일점들의 좌표, (x_{wi}, y_{wi}) 를 식 (5)에 대입하면 다음 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -2x_{w1} & -2y_{w1} & 1 \\ -2x_{w2} & -2y_{w2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2x_{wN} & -2y_{wN} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_{w1}^2 - y_{w1}^2 \\ -x_{w2}^2 - y_{w2}^2 \\ \vdots \\ -x_{wN}^2 - y_{wN}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\equiv \mathbb{P}_w \mathbf{C} = \mathbf{P}$$

식 (6)의 의사 역행렬(pseudo-inverse) 해는 다음과 같다:

$$\mathbf{C} = (\mathbb{P}_w^T \mathbb{P}_w)^{-1} \mathbb{P}_w^T \mathbf{P} \quad (7)$$

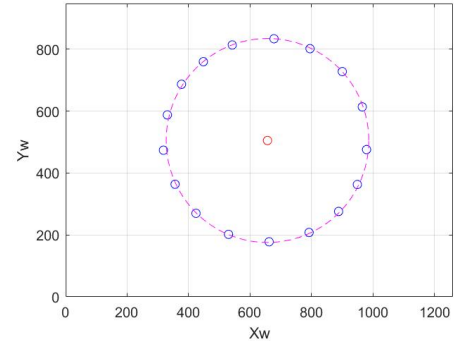


그림 11. 대응 화소들의 회전중심.

Fig. 11. Rotation center of corresponding pixel points.

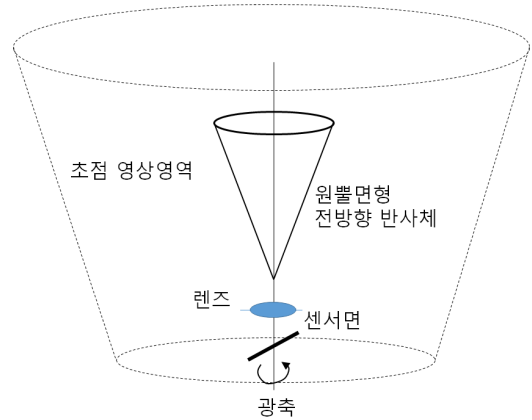


그림 12. 사면 카메라 회전을 통한 전방향 선명 영상 시스템 (예: 원뿔면형 반사체 이용).

Fig. 12. Omnidirectional high definition image acquisition by rotating non-frontal camera with e.g conical omnidirectional reflector.

위에서 $\mathbf{C}$ 는 회전중심 좌표 값, (x_c, y_c) 를 포함한다. 다음 그림 11은 전술한 바와 같이 중첩 영상(그림 10)에 대해 대응화소들이 그리는 원 궤적의 중심을 구한 것이다.

이제 위 그림 5에서 보인 선명 초점영역을 전방향(omnidirectional)으로 확장하기 위해 아래 그림과 같이 원뿔면형, 또는 포물면형 등의 전방향 반사체를 부가적으로 사용할 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 사면 카메라 주위 360도 전방향의 일정 영역에 대해서 카메라 회전에 따라 일련의 영상들을 얻을 수 있으며, 앞서 서술한 바와 같이 선명도 지수(focus measure)가 높은 화소들을 선택하여 합성함으로써 전방향 고선명 영상을 얻을 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 영상센서와 렌즈가 비스듬하게 구성되어 있는 사면 카메라를 광축 기준으로 회전함으로써 일정 영역 내의 모든 사물에 대해서 거리에 관계없이 선명한 영상을 얻을 수 방법에 대해 기술하였다. 카메라 회전에 따라 얻은 영상열에 대해서 대응되는 화소들을 선명지수에 따라 선택하여 조합함으로써 선명 영상을 합성할 수 있다. 고선명 영상

획득 방법과 함께 간단한 초기 실험결과를 제시하였으나, 향후 영상합성 방법에 대한 구체적인 연구가 필요하다. 고선명도 영상은 포함하고 있는 정보량이 매우 크므로 의공학, 천체과학, 생물학 등의 과학 분야 뿐만 아니라 보안, 교통감시, 예술 등 다양한 분야에 적용할 수 있다. 또한 기본적으로 렌즈 법칙이 의미하는 바와 같이 화소의 선명도는 물체 거리정보를 포함하므로 영상을 통한 측광 거리측정에도 응용할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 또한 사면 카메라와 전 방향성 반사체를 이용하여 주변 360도 모든 방향에 대한 고선명 영상을 획득하는 방법에 대해서도 제시하였다.

REFERENCES

- [1] S. Nayar, "Catadioptric omnidirectional camera," *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 482-488, 1997.
- [2] S. Baker and S. Nayar, "A theory of catadioptric image formation," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Computer Vision*, Bombay, pp. 35-42, 1998.
- [3] T. Yagi and S. Kawato, "Panorama scene analysis with conic projection," *IEEE Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Workshop on Towards a New Frontier of Applications, 1990.
- [4] M. Trivedi, T. Gandhi, and J. McCall, "Looking-in and looking-out of a vehicle: selected investigations in computer vision based enhanced vehicle safety," *IEEE Trans. on Intell. Transp. Syst.* vol. 8, no. 1, pp. 109-120, 2007.
- [5] <http://www.neovision.cz/>
- [6] A. A. Krishnan and N. Ahuja, "Range estimation from focus using a non-frontal imaging camera," *Int'l Jour. of Computer Vision*, vol. 20, no. 3, pp. 169-185, 1996.
- [7] A. Kumar and N. Ahuja, "A generative focus measure with application to omnifocus imaging," *Int'l Conf. on Computational Photography*, pp. 1-8, 2013.
- [8] H. Mallot, *Computational Vision*, MIT Press, 2000.
- [9] M. Aggarwal and N. Ahuja, "On generating seamless mosaics with large depth of field," *Proc. of Int'l Conf. on Pattern Recognition*, Barcelona, Spain, pp. 588-591, 2000.
- [10] A. Krishnan and N. Ahuja, "Use of a non-frontal camera for extended depth of field in wide scenes," *Proc. of SPIE*, 2056, pp. 62-72, 1993.
- [11] H. Mir, P. Xu, and P. Beek, "An extensive empirical evaluation of focus measures for digital photography," *Proc. of SPIE*, 9023, 2014.
- [12] S. Min and S. Yi, "High Definition Image Acquisition by Rotating Non-frontal Camera," *Proc. of ICROS 2018*, pp. 422-423, 2018.



민 성 재

2016년 12월~2017년 7월 핸즈온테크놀로지 연구원. 2017년 3월~현재 서울과학기술대학교 재학 중. 관심분야는 로봇 제어, 로봇비전, 아날로그회로.



이 수 영

1988년 2월 연세대학교 전자공학과(공학사). 1990년 2월 KAIST 전기및전자공학과(공학석사). 1994년 8월 KAIST 전기및전자공학과(공학박사). 1995년 3월~1999년 8월 KIST 시스템연구부 선임 연구원. 1997년 2월~1998년 2월 Univ. of Southern California 박사후과정. 1999년 9월~2007년 2월 전북대학교 전자정보공학부 부교수. 2005년 6월~2006년 8월 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문교수. 2007년 3월~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수. 관심분야는 보행로봇, 로봇비전, 이동로봇.