

개선된 화질의 영상을 이용한 열화상 카메라 캘리브레이션

김주오, 이덕우*
계명대학교 컴퓨터공학부

Calibration of Thermal Camera with Enhanced Image

Ju O Kim, Deokwoo Lee*
Department of Computer Engineering, Keimyung University

요약 본 논문에서는 3개의 시점을 가진 열화상 카메라의 캘리브레이션을 수행하는 방법을 제안하고, 카메라의 내부 파라미터 추정 및 그 결과의 정확도를 파악하기 위해 역투영 오류값을 제시한다. 3개의 시점을 가진 카메라는 일반 카메라와 다르게 각 시점마다 겹치는 영상이 존재하지 않고, 획득한 영상의 화질은 일반 카메랄 획득한 영상보다 낮다. 카메라 캘리브레이션은 3차원 실제 영상의 좌표 정보 또는 카메라와 목표물체 사이의 거리를 계산하기 전에 반드시 수행되어야 하는 작업이다. 카메라 캘리브레이션 작업을 통해 얻는 것은 카메라의 내부 및 외부 파라미터이며 내부 파라미터는 카메라의 초점거리, 비대칭계수, 이미지 중심점으로 구성되어 있고, 외부 파라미터는 사용되는 카메라들 사이 또는 사용되는 카메라의 상대적 위치인 회전행렬과 변위벡터로 구성되어 있다. 본 논문에서는 열화상 카메라의 캘리브레이션을 수행하는 방법을 제안하며, 열화상 카메라의 캘리브레이션 수행을 위해 온도에 반응하는 열상 체커보드를 활용한다. 캘리브레이션이 안정적으로 수행되기 위해 본 논문에서는 심층 학습 기반 활영대상 물체의 화질을 개선하여 코너 추출의 정확도를 높인 후 캘리브레이션 파라미터 계산을 수행하고, 개선된 화질의 영상이 캘리브레이션을 개선한 결과를 제시한다.

Abstract This paper proposes a method to calibrate a thermal camera with three different perspectives. In particular, the intrinsic parameters of the camera and re-projection errors were provided to quantify the accuracy of the calibration result. Three lenses of the camera capture the same image, but they are not overlapped, and the image resolution is worse than the one captured by the RGB camera. In computer vision, camera calibration is one of the most important and fundamental tasks to calculate the distance between camera (s) and a target object or the three-dimensional (3D) coordinates of a point in a 3D object. Once calibration is complete, the intrinsic and the extrinsic parameters of the camera(s) are provided. The intrinsic parameters are composed of the focal length, skewness factor, and principal points, and the extrinsic parameters are composed of the relative rotation and translation of the camera(s). This study estimated the intrinsic parameters of thermal cameras that have three lenses of different perspectives. In particular, image enhancement based on a deep learning algorithm was carried out to improve the quality of the calibration results. Experimental results are provided to substantiate the proposed method.

Keywords : Calibration, Thermal camera, Multiple lenses, Reprojection error, Image enhancement

본 연구는 2021년도 한국연구재단(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 (No. 2019R1G1A1100172)임.

*Corresponding Author : Deokwoo Lee(Keimyung Univ.)

email: dwoolee@kmu.ac.kr

Received January 5, 2021

Revised February 9, 2021

Accepted April 2, 2021

Published April 30, 2021

1. 서론

카메라 보정(Camera Calibration)은 렌즈 왜곡을 교정하거나 세계 단위에서 물체 치수를 측정하여 카메라로 캡처한 이미지의 품질을 향상시키는 데 사용되는 기법이다. 보정된 카메라는 실제 물체 크기를 측정하기 위한 기계 비전, 항법 및 3D 장면 재구성을 위한 로봇공학 등과 같은 응용 분야에서 필수적인 구성요소이다. 카메라 캘리브레이션에는 카메라의 특성(내재적 및 외적 파라미터)을 결정하는 것이 포함된다. 고유 파라미터는 렌즈의 초점 길이, 광학 중심, 렌즈 왜곡 계수 등 카메라의 내부 특성을 정의한다. 이러한 매개 변수를 알면 렌즈 왜곡에 적합한 이미지 품질을 개선하고 실제 거리를 픽셀 단위로 매핑할 수 있다. 외인 파

라미터는 고정된 물체를 기준으로 카메라 위치를 정의하며, 이러한 파라미터는 움직임으로부터 스테레오 캘리브레이션 및 구조에 필수적이다. 카메라 캘리브레이션은 컴퓨터 비전에 필요한 단계이다. 이 프로세스는 2차원 영상에서 메트릭 정보를 추출하는 프로세스로, non coplanar과 coplanar 카메라 캘리브레이션 두 가지 유형으로 나눌 수 있다. non coplanar 캘리브레이션은 카메라 파라미터를 결정하는 데 용이하지 않지만 정교한 설정과 고가의 장치가 필요한 반면, coplanar 캘리브레이션은 정교한 설정이 필요하지 않지만 캘리브레이션 절차가 non coplanar 케이스보다 더 복잡하다. non coplanar 캘리브레이션과 관련된 대부분의 작업은 다음과 같다. Tsai는 카메라 캘리브레이션을 위한 RAC(방사형 정렬 제약)를 제안했다[1]. 대부분의 파라미터는 선형 방법에 의해 폐쇄형 솔루션에서 계산된다. 초점 길이, 변환 벡터의 깊이 성분 및 방사형 왜곡 계수는 비선형 구조로 계산된다. Chatterjee는 카메라 매개변수가 선형 및 비선형 최적화 방법 모두에 의해 계산되는 non coplanar 카메라 캘리브레이션을 위한 알고리즘을 제시했다[2]. 그러나 Tsai의 방법과 Chatterjee의 방법 계산 모두 목표물체의 점과 센서 사이의 거리가 사전에 알려져 있다고 가정하여 하나의 이미지를 사용하여 카메라 매개 변수를 계산한다. Zhang은 카메라 캘리브레이션을 위한 유연한 새로운 기법을 제안했다[3]. Zhang의 방법은 카메라 파라미터를 계산하기 위해 적어도 세 개의 이미지를 필요로 한다. 따라서 정량화된 잡음과 렌즈 왜곡은 카메라 파라미터에 영향을 준다. 비선형 최적화 단계의 매개변수가 분기되거나 전역 극단값이 아닌 국소 극단값으로 이동할 수 있다.

또한 한 이미지를 사용한 캘리브레이션 알고리즘보다 계산 시간이 더 많이 걸린다. Sirisantisamrid 외 연구진은 잡음에 강한 회전각을 변화시키기 위해 하나의 영상을 사용하여 카메라 캘리브레이션의 초기 값을 결정하는 방법을 제안했다[4, 5]. 이후로 연구에서는 반복 시 영상 좌표가 수정되는 카메라 캘리브레이션 기술도 제안했다[6, 7]. 열화상 카메라의 다른 특성은 많은 용도의 기존 가시광선 카메라보다 우수하거나 상호보완적이다. 예를 들어 열화상 카메라는 열악한 조명 또는 조명 변화 및 먼지와 안개에도 보다 강력하다[8]. 그래서 열화상 카메라는 차량 운전, 표적 인식 및 추적, 미사일 유도, 전투 정찰 등의 군사 응용 분야에서 널리 채택될 수 있다. 기존의 많은 컴퓨터 비전 알고리즘의 전조로 영상촬영 시스템에 대해 정확하고 효율적인 카메라 캘리브레이션을 수행해야 한다. 열화상 카메라는 일반적인 캘리브레이션 패턴의 질감이나 모양을 인식할 수 없기 때문에 열화상 카메라 보정에는 몇 가지 중요한 적응 포인트가 필요하다[9]. 이 작업에 대한 기준 접근 방식은 정확성, 편리성 및 유연성 측면에서 많은 한계를 가지고 있다. 따라서 열화상 카메라의 캘리브레이션을 위해 한 가지 기본적인 사항은 캘리브레이션 패턴이 높은 열 대비(contrast)를 제공해야 한다는 것이다. 이러한 과정에 대한 연구는 열화상 영상과 컴퓨터 비전의 영역에서 연구가 활발히 진행중이다. 열화상 이미지의 특징은 가시광선 파장보다 긴 파장 길이의 전자파이다. 적외선 파장에는 다음과 같은 특성이 있습니다. 사람의 눈에 보이지 않는다는 점, 에너지의 크기가 작다는 점, 모든 종류의 물체에서 방출되는 장파장이라는 점, 흑백 영상은 항상 낮은 해상도와 신호 대 잡음 비율을 가진다는 특성을 가진다. 따라서 열 이미지는 대개 저대비 상태로 흐릿하게 나타나며 물체의 질감을 반영하기 어렵다. 열화상 영상의 특성은 캘리브레이션 과정에 영향을 미치므로 결과의 정확도에 영향을 미친다. 본 논문에서는 열화상 카메라 캘리브레이션을 수행하는 방법을 제안한다. 캘리브레이션의 안정성을 높이기 위해서 대상의 화질을 개선하여 캘리브레이션 파라미터 계산결과의 안정성을 추가한다. 2장에서는 열화상 카메라로 획득한 이미지의 화질을 개선하고 3장에서는 내부 파라미터를 구하기 위한 캘리브레이션의 절차를 제시한다. 4장에서는 실험의 결과를 제시하고 5장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

2. 본론

일반적으로 단일 이미지 초해상도(Single image super resolution, SISR) 기술을 이용하여 저해상도(low resolution) 이미지가 주어진 고해상도(high resolution) 이미지를 생성하는 문제를 해결한다[10, 11]. SISR은 보안 및 보안 감시 이미징에서 주문형 더 많은 이미지 세부 정보가 필요한 의료 이미지에서 컴퓨터 비전 응용분야에서 많이 사용되며 많은 SISR 방법들이 컴퓨터 비전 분야에서 연구되어 왔다. 초기 방법에는 양방 보간법과 Lanczos 재샘플링과 같은 보간법이 포함된다[12, 13, 14]. 현재의 학습 방법은 LR에서 HR 패치로의 매핑을 모델링하는 데 널리 사용된다. 인접 임베딩 방법은 패치 하위 공간을 보간한다[15]. 희소 코딩 방법은 희소 신호 표현을 기반으로 학습된 컴팩트 사전을 사용한다[16]. 최근에는 랜덤 포레스트와 컨볼루션 신경망(Convolutional neural network, CNN)을 활용하여 정확도가 크게 향상되었다 [17, 18]. 그 중에서 CNN을 사용하여 LR에서 HR로의 매핑을 엔드 투 엔드 (end to end) 방식으로 학습할 수 있음을 입증했다. 본 논문에서 사용한 VDSR (Very deep super resolution) 기술은 기존의 SRCNN의 문제점을 해결한 방식으로 VDSR은 SRCNN보다 더 많은 수의 계층을 설정하여 이미지의 좁은 영역에서의 정보를 얻는 기존의 방식보다 넓은 수용영역(receptive field)를 사용하여 보다 많은 영상 정보를 사용해서 높은 스케일에서도 좋은 성능을 나타내며, 잔류학습 (residual learning) 방식과 높은 학습률 (learning-rate)를 사용하여 빠른 수렴 결과 (convergence)를 만들어 냈다. 잔류학습 방식은 LR과 HR 이미지의 유사도가 높음으로 인해서 높은 효율을 가진다. SRCNN이 단일 스케일에서만 가능하였지만 VDSR은 단일 모델이면서 다양한 스케일에 적용이 가능하다. RGB 이미지를 YCbCr 이미지로 변환한 후 각 3채널을 원하는 스케일로 업스케일한다. 3채널중 Y채널만을 사용하는데 인간은 색의 변화보다 밝기의 변화에 더 민감하기 때문에 Y채널만 사용하여 훈련한다. LR 이미지의 업스케일 된 Y채널을 HR의 Y채널과의 차이를 예측하도록 학습한다. Fig. 1은 실험에 사용한 열상 체커보드의 기본 이미지이며 본 연구에서 사용한 카메라로 촬영하였다. 본 논문에서 사용하는 장비는 열상카메라 장비이기에 일반적인 체커보드로는 캘리브레이션을 수행할 수 없다. 그러므로 Fig. 1에서 보여주는 열상 체커보드를 사용하였다.

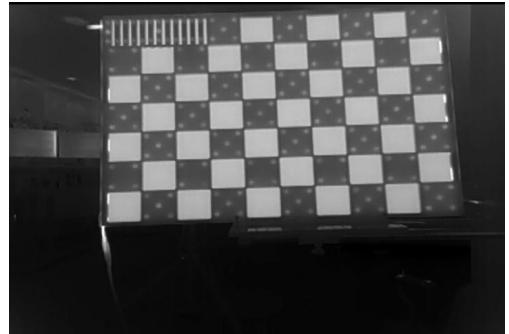


Fig. 1. Original image of thermal checkerboard

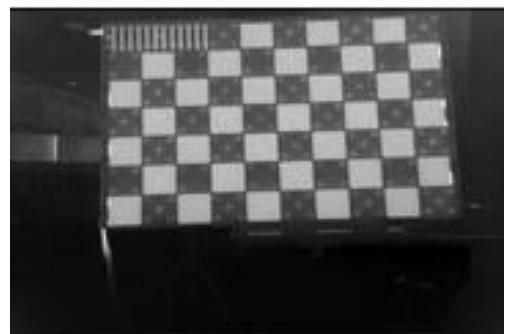


Fig. 2. Image of thermal checkerboard with low-resolution

Fig. 2 는 Fig. 1을 다운스케일 한 영상으로서 다운스케일 과정을 통해서 저해상도 영상을 만들어낸다. 이 과정에서 영상의 고주파 성분이 손실된다.

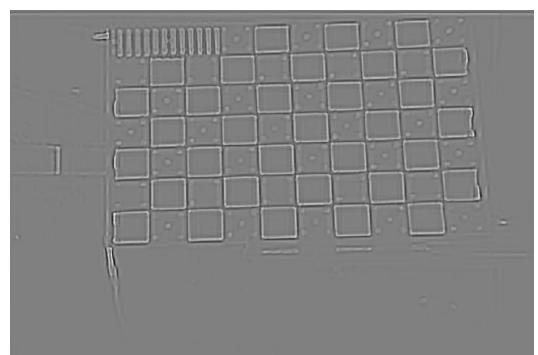


Fig. 3. Upscaled luminance components from Fig. 2

VDSR은 이미지의 Y채널 만을 사용하기 때문에 RGB에서 YCbCr로 변환한후 업스케일링하여 데이터를 얻는다.

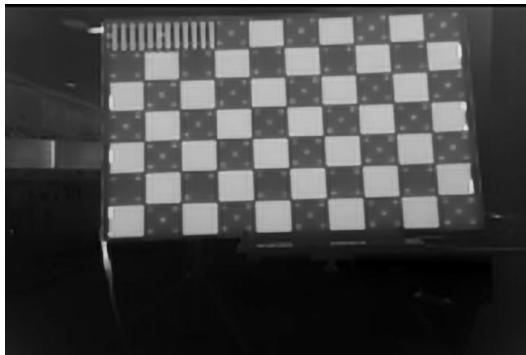


Fig. 4. High-Resolution image obtained using VDSR

Fig. 4 는 HR 이미지의 Y채널에서 업스케일링된 LR 이미지의 Y채널의 차이값을 예측하도록 학습하여 고해상도 이미지를 복원한 그림이다.

3. 카메라 캘리브레이션

본문에서는 열화상 카메라 캘리브레이션을 진행한다. 열화상 카메라의 특성상 전형적인 체커보드로는 불가능하기 때문에 Fig. 5와 같은 열을 발산하는 특수한 체커보드를 사용하였다.



Fig. 5. Thermal checkerboard used for calibration

카메라 캘리브레이션을 위해서 체커보드 코너 검출을 실행한다. 코너 검출을 위해서 기울기 (gradient) 기반의 영상을 활용하여 코너를 추출한다 (Fig. 6). 카메라 캘리브레이션에서 내부 파라미터를 추출하기 위해 3차원 좌표와 2차원 좌표 간의 관계를 Eq. (1)과 같이 정의한다.

$$W[x \ y \ 1] = [X \ Y \ Z \ 1] \begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix} K \quad (1)$$

Eq. (1)에서 (X, Y, Z, I) 는 월드 좌표 (동차 좌표계)를 의미하고 (x, y, I) 는 픽셀단위의 이미지 좌표 (동차 좌표계)를 의미한다. K 는 카메라 내부 행렬을 의미한다. W 는 스케일 계수이며 0이 아닌 임의의 상수를 사용할 수 있다. 카메라 내부 행렬은 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있으며 f_x, f_y 는 각각 x와 y방향으로의 초점거리(focal length)를 의미하고, 초점거리는 렌즈의 중심과 이미지 센서와의 거리를 나타내며 픽셀단위로 표현된다. c_x, c_y 는 이미지 주점 (principal point)를 의미하고 카메라 렌즈의 중심점을 나타낸다. s 는 비대칭 계수 (skew coefficient)를 의미하고 이미지 센서 배열이 y축으로 기울어진 정도를 나타낸다.

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ s & f_x & 0 \\ c_x & c_y & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

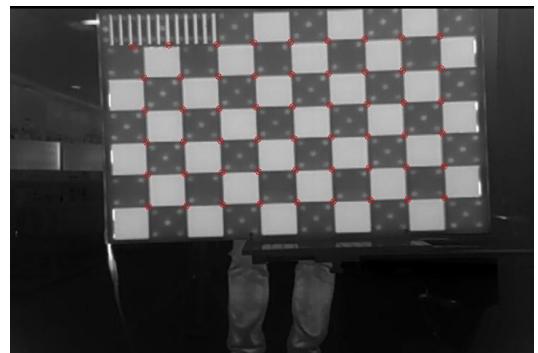


Fig. 6. Thermal checkerboard with corner detection

다음으로 Levenberg-Marquardt 알고리즘 (Eq. (3), (4))을 사용하여 모든 변수를 동시에 추정한다 [19].

$$P_{k+1} = P_k - (J_r^T W J_r)^{-1} J_r^T W r(p_k), k \geq 0 \quad (3)$$

$$J_r(p) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(p)}{\partial p_1} & \cdots & \frac{\partial r_1(p)}{\partial p_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_n(p)}{\partial p_1} & \cdots & \frac{\partial r_n(p)}{\partial p_m} \end{bmatrix},$$

$$r(p) = \begin{bmatrix} r_1(p) \\ r_2(p) \\ \vdots \\ r_n(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - f(x_1, p) \\ y_2 - f(x_2, p) \\ \vdots \\ y_n - f(x_n, p) \end{bmatrix} \quad (4)$$

4. 실험 결과

본 논문에서 열화상 카메라는 3개의 렌즈로 구성되어 있으며 (각 렌즈를 각각 cam1, cam2, cam3으로 표기 한다) 이 세 개의 렌즈가 획득하는 영상 간에는 오버랩되는 부분이 없다는 특징이 있다 (Fig. 7).

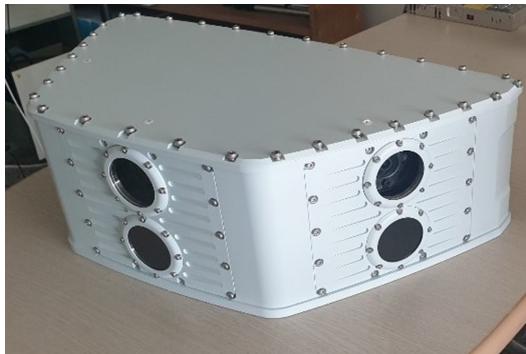


Fig. 7. Infrared Camera with three lenses

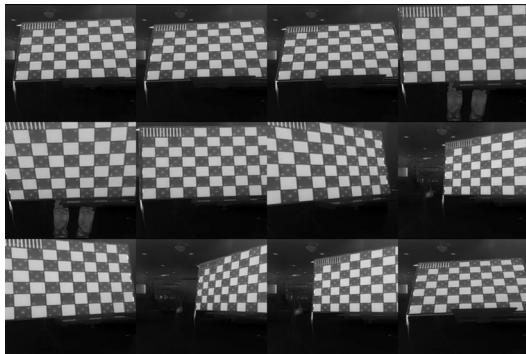


Fig. 8. Thermal checkerboard from cam1

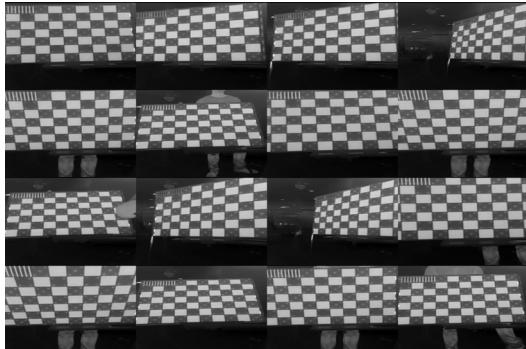


Fig. 9. Thermal checkerboard from cam2

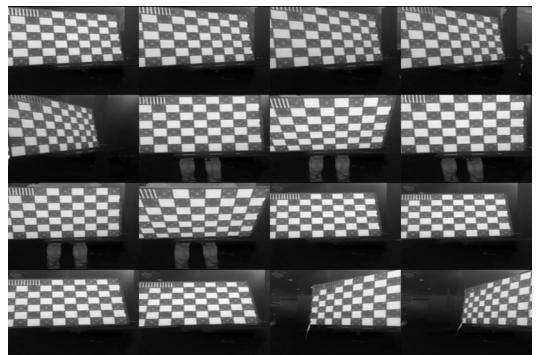


Fig. 10. Thermal checkerboard from cam3

또한 열상 체커보드의 구조 특성상 기울이는 각도를 제어할 때 열이 전도되서 코너부를 정확히 측정하지 못하는 경우도 발생하여 기존의 체커보드에 추가하여 원형의 체커보드도 함께 사용하였다.

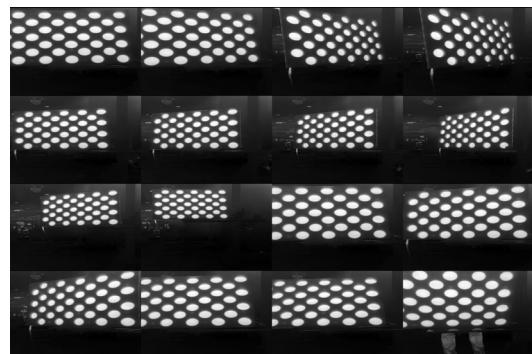


Fig. 11. Thermal checkerboard with circular patterns from cam1

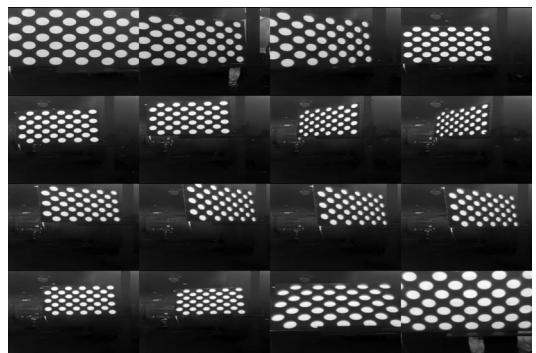


Fig. 12. Thermal checkerboard with circular patterns from cam2

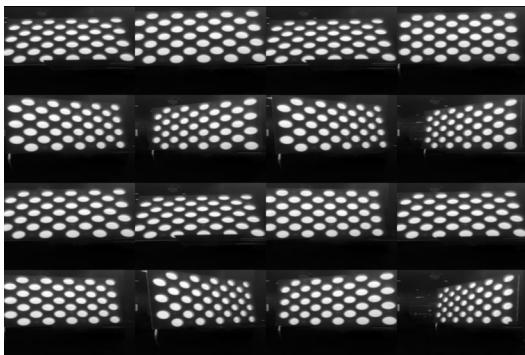


Fig. 13. Thermal checkerboard with circular patterns from cam3

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 각 cam1, cam2, cam3에서 여러각도로 설정한 사진이고 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13는 cam1, cam2, cam3에서 원형 체커보드를 사용하여 여러 각도에서 얻은 사진이다. Fig. 14는 열상 체커보드와 원형 열상 체커보드에서 코너 검출을 한 대표 사진이다.

Fig. 15 (a),(b),(c)는 cam1, cam2, cam3에서 캘리브레이션을 진행한 후 촬영한 각 영상의 역투영 오류 (reprojection error)를 나타낸 그래프이고 Fig. 16 (a),(b),(c)는 cam1, cam2, cam3에서 원형 체커보드를 사용하여 캘리브레이션을 진행한 후 계산된 역투영 오류를 나타낸 그래프이다. Table 1에서는 카메라로 촬영한 후 나온 역투영 오류를 나타내고 있으며 Error1과 Error2는 각각 영상의 화질 개선 전과 개선 후의 역투영 오류 평균값이고, Error3과 Error4는 각각 원형 패턴을 사용하여 화질 개선을 하기 전과 후에 나온 역투영 오류 평균값을 나타낸 것이다. 이 표에서 볼 수 있듯이 원형 체커보드보다 기본 체커보드가 더 좋은 성능을 나타내고 있다. 이것은 원형 패턴보다 사각형 패턴에서 코너 추출이 더 정확하게 이루어 졌기 때문이다. 그리고 볼 수 있으며, 전체적으로 화질을 개선한 후의 역투영 오류가 작아짐을 확인할 수 있다.

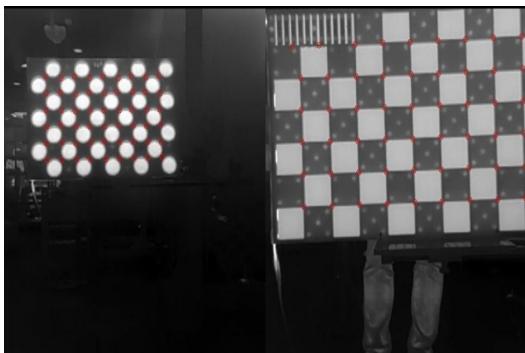
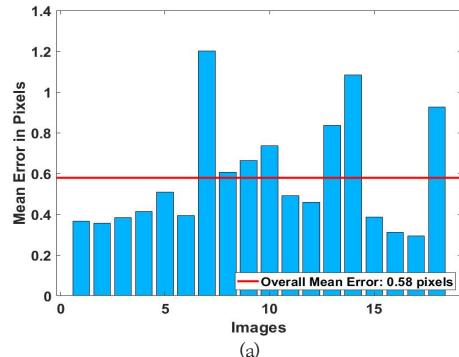
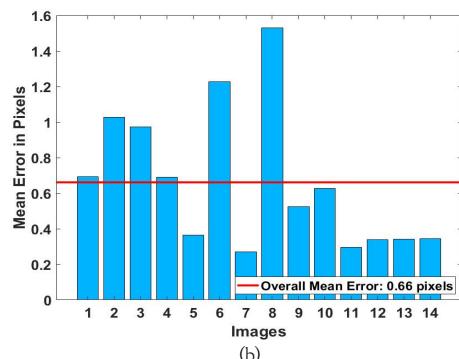


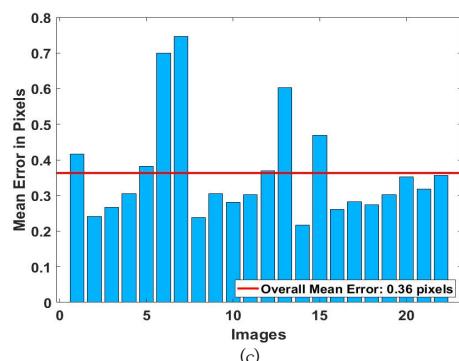
Fig. 14. Corner detection of checkerboard



(a)



(b)



(c)

Fig. 15. Reprojection errors of calibration.
(a) cam1, (b) cam2, (c) cam3

Table 1. Reprojection Errors (Average)

| Cmaera | Error1 | Error2 | Error3 | Error4 |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| CAM 1 | 0.72 | 0.44 | 1.54 | 1.00 |
| CAM 2 | 0.67 | 0.51 | 1.12 | 0.65 |
| CAM 3 | 0.91 | 0.35 | 1.44 | 1.24 |

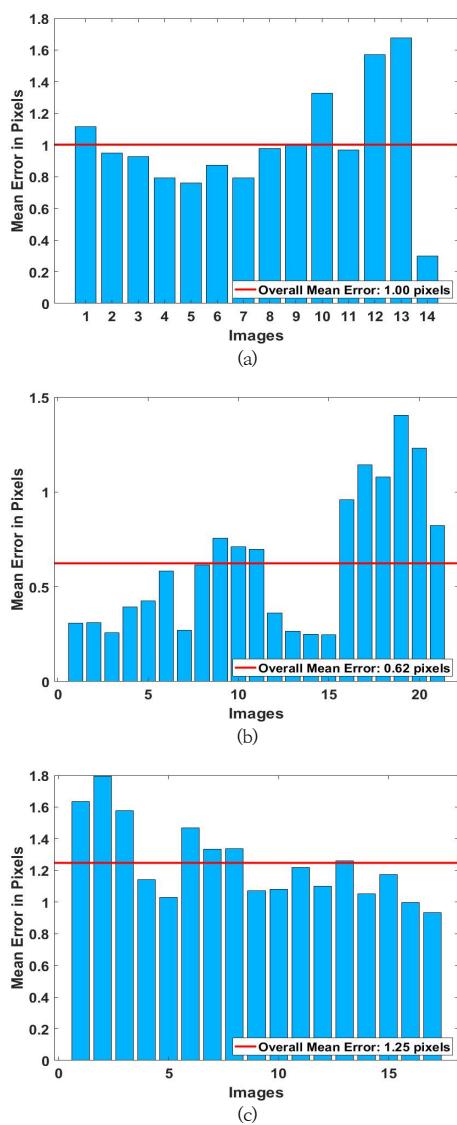


Fig. 16. Reprojection errors with circular patterns.
(a) cam1, (b) cam2, (c) cam3

5. 결론

본 논문에서는 개선된 화질의 영상을 이용한 열화상 카메라 캘리브레이션을 수행하는 방법을 제시하였다. 캘리브레이션 정확도를 높이기 위한 방법으로 VDSR신경망을 이용하여 화질을 개선하였고 안정적인 캘리브레이션 파라미터 계산 결과를 제공한다. 실험을 통해서 화질 개선이 이루어진 후의 역투영 오류가 낮아짐을 확인하였다.

고, 원형패턴보다 사각패턴에서의 역투영 오류가 더 낮음을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 3개의 렌즈로 구성된 카메라의 내부 파라미터의 계산을 주로 다루었으며 향후에는 외부 파라미터의 계산에 대한 연구를 수행할 것이다.

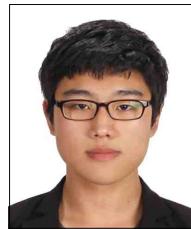
References

- [1] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-3, pp. 323-343, 1987.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JRA.1987.1087109>
- [2] C. Chatterjee and V. P. Roychowdhury, "Algorithms for coplanar calibration," Machine Vision and Applications, Springer-Verlag 2000, pp. 84-97, 2000.
DOI : <https://doi.org/10.1007/s001380050127>
- [3] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. PAMI-22 no. 11, pp. 1330-1334, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/34.888718>
- [4] K. Sirisantisamrid, T. Matsuura and K. Tirasest, "A determination method for initial values of coplanar camera calibration parameters," APCCAS2006, Singapore, pp.1069-1072, Dec. 4-7, 2006.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/APCCAS.2006.342273>
- [5] K. Sirisantisamrid, T. Matsuura and K. Tirasest, "Determination of initial parameters with noise robustness for coplanar calibration," IEEE TENCON2006, Hong Kong, Nov. 14-17, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TENCON.2006.343939>
- [6] K. Sirisantisamrid, K. Tirasest and T. Matsuura, "An algorithm for coplanar camera calibration," IIHMSP2007, Kaohsiung, Taiwan, pp. 596-599, Nov. 26-28, 2007.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/IIH-MSP.2007.72>
- [7] K. Sirisantisamrid, K. Tirasest and T. Matsuura, "A determination method of camera parameters for coplanar camera calibration," ICEAST2007, Bangkok,Thailand, pp.830-833, Nov. 21-23, 2007.
DOI : <https://doi.org/10.1109/APCCAS.2006.342273>
- [8] S. Vidas, R. Lakemond, "A mask-based approach for the geometric calibration of thermal-infrared cameras". IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 61, 6, pp.1625-1635, 2012.
DOI :<http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2012.2182851>
- [9] Z Baisheng. "Calibration study of High-precision Near Infrared Camera". Chinese Medical Equipment Journal, 12, 32, pp.15-17, 2011.
DOI : <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.9.094107>
- [10] M. Irani and S. Peleg, "Improving resolution by image registration". CVGIP: Graphical models and image

- processing, 53, 3, pp.231-239, 1991.
DOI:[http://dx.doi.org/10.1016/1049-9652\(91\)90045-L](http://dx.doi.org/10.1016/1049-9652(91)90045-L)
- [11] W. T. Freeman, E. C. Pasztor, and O. T. Carmichael. "Learning low-level vision". International journal of computer vision, 40, 1, pp.25-47, 2000 DOI : <https://doi.org/10.1023/A:1026501619075>
- [12] C. E. Duchon. "Lanczos filtering in one and two dimensions". Journal of Applied Meteorology, 18, 8, pp.1016-1022, 1979. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018%3C101_6:LFOAT%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018%3C101_6:LFOAT%3E2.0.CO;2)
- [13] J. Sun, Z. Xu, and H.-Y. Shum. "Image super-resolution using gradient profile prior". 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June, 2008.
DOI : <https://doi.org/10.1109/CVPR.2008.4587659>
- [14] D. Glasner, S. Bagon, and M. Irani. "Super-resolution from a single image". 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, September, 2009.
DOI : <https://doi.org/10.1109/ICCV.2009.5459271>
- [15] C. G. Marco Bevilacqua, Aline Roumy and M.-L. A. Morel. "Low-complexity single-image super-resolution based on nonnegative neighbor embedding". British Machine Vision Conference, pp.135.1-135.10, 2012.
DOI : <http://dx.doi.org/10.5244/C.26.135>
- [16] R. Zeyde, M. Elad, and M. Protter. "On single image scale-up using sparse-representations". Curves and Surfaces, pp.711-730, 2012.
DOI:http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27413-8_47
- [17] S. Schulter, C. Leistner, and H. Bischof. "Fast and accurate image upscaling with super-resolution forests". Conference on Computer Vision and Pattern Recognition , pp.3791-3799, 2015.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2015.7299003>
- [18] C. Dong, C. C. Loy, K. He, and X. Tang. "Image superresolution using deep convolutional networks". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 38, 2, pp.295-307, 2016.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2439281>
- [19] J. More. "The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory". Numerical Analysis, 630, pp. 105-116, 2006.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1007/BFb0067700>

김 주 오(Ju O Kim)

[준회원]



- 2020년 2월 : 계명대학교 컴퓨터 공학전공 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 일반대학원 컴퓨터공학과 (석사과정)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 대구경북과학기술원 지능형로봇연구부 위촉 연구원

<관심분야>

신호처리, 영상처리, 컴퓨터비전

이 덕 우(Deokwoo Lee)

[정회원]



- 2007년 2월 : 경북대학교 전자전 기컴퓨터학부 졸업(공학사)
- 2012년 12월 : North Carolina State University, USA, 전기컴퓨터공학부 석사, 박사
- 2013년 1월 ~ 4월 : Washington Univ. in St. Louis, USA, 박사후 연구원

- 2013년 9월 ~ 2016년 8월 : 삼성전자 무선사업부 책임 연구원
- 2016년 9월 ~ 2018년 2월 : 영산대학교 가상현실콘텐츠 전공 조교수
- 2018년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 공과대학 컴퓨터공학전공 조교수

<관심분야>

신호처리, 영상처리, 컴퓨터비전