

## 적외선 열화상 카메라용 캘리브레이션 타겟 개발

### Development of Calibration Target for Infrared Thermal Imaging Camera

김수언\*, 최만용\*<sup>†</sup>, 박정학\*, 신광용\*\*, 이의철\*\*\*

Su Un Kim\*, Man Yong Choi\*<sup>†</sup>, Jeong Hak Park\*, Kwang Yong Shin\*\* and Eui Chul Lee\*\*\*

**초 록** 카메라 영상 캘리브레이션은 머신비전과 같은 비전검사기술분야에서 영상으로부터 기하학적 정보를 정확하게 추출하고자 할 때 정확성을 높이는데 필요한 매우 중요한 과정이다. 그러나 기존에 가시광 카메라에 사용되던 캘리브레이션 타겟은 중적외선, 원적외선 열화상 카메라에 적용하기 어렵다. 최근에 적외선 열화상카메라를 이용한 결함측정기술이 많이 사용되면서 적용할 수 있는 캘리브레이션 타겟 개발이 요구되고 있다. 따라서 본고에서는 유한요소 열전달 해석을 이용하여 가시광 카메라와 적외선 열화상카메라 모두에 적용 가능한 캘리브레이션 타겟을 제안하였다. 개발된 캘리브레이션 타겟을 열화상카메라와 가시광 카메라로 촬영하여 비교실험 하였으며, 실험결과 제안된 캘리브레이션 타겟의 효율성을 보여준다.

**주요용어:** 적외선 열화상기술, 렌즈 왜곡, 캘리브레이션, 가시광 영상, 열화상

**Abstract** Camera calibration is an indispensable process for improving measurement accuracy in industry fields such as machine vision. However, existing calibration cannot be applied to the calibration of mid-wave and long-wave infrared cameras. Recently, with the growing use of infrared thermal cameras that can measure defects from thermal properties, development of an applicable calibration target has become necessary. Thus, based on heat conduction analysis using finite element analysis, we developed a calibration target that can be used with both existing visible cameras and infrared thermal cameras, by implementing optimal design conditions, with consideration of factors such as thermal conductivity and emissivity, colors and materials. We performed comparative experiments on calibration target images from infrared thermal cameras and visible cameras. The results demonstrated the effectiveness of the proposed calibration target.

**Keywords:** Thermography, Lens Distortion, Calibration, Visible Image Thermal Image

#### 1. 서 론

캘리브레이션은 머신비전과 같은 비전검사기술 분야 등에서 영상으로부터 기하학적 정보를 정확하게 측정하고자 할 때 필요한 매우 중요한 과정으로[1]. 실제 3D공간좌표에서 카메라 2D영상좌표로의 변환된 상관관계에 관련된 변수들을 찾는 과정이라 할 수 있다. 이들 변수들은 카메라 내부와 외부로 나뉘지며, 일반적으로 많이 사용되는 핀홀 카메라모델에서는 9개의 변수(focal length:  $f$ , distortion parameter:  $k$ , cell width and height:

$s_x, s_y$ , principal point of the image:  $c_x, c_y$ , orientation parameter:  $\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z$ )로 구성된다. 여기서 초점길이(focal length:  $f$ )와 카메라 센서 한쪽셀의 폭 높이(cell width and height:  $s_x, s_y$ )를 제외한 변수값을 캘리브레이션을 통해 얻을 수 있다[14].

근래에 이와 같은 비전검사분야에서 검사체 내부의 결함 검출을 위해 열 특성을 이용한 적외선 열화상기술이 많이 사용되고 있다. 결함 검출기능을 넘어서 정량적 결함 측정을 위해서는 적외선 열화상검사기술도 비전검사기술과 같이 캘리브레이션이 필수적이라고 볼 수 있다.

[접수일: 2014. 5. 13, 수정일: 2014. 6. 20, 게재확정일: 2014. 6. 21] \*한국표준과학연구원 삶의질측정표준본부, \*\*상명대학교 문화기술연구소, \*\*\*상명대학교 컴퓨터과학과, <sup>†</sup> Corresponding Author: Metrology for Quality of Life, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea (E-mail: mychoi@kriss.re.kr)

현재까지 카메라 캘리브레이션과 관련된 다양한 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Zhang은 폐쇄 형태 해법, 최대은도추정법 및  $9 \times 9$  정사각형의 패턴을 가진 종이 체스보드를 이용하여 유도성 기법의 가시광 카메라 캘리브레이션 방법을 제안하였다[3]. 그는 실제 좌표 위치와 취득된 영상에서의 사영, 기하학적인 보간법, 회전과 이동에 따른 외부 카메라 파라미터 및 내부 카메라 파라미터와의 관계를 상세히 분석하였다. 그러나, 적외선 열화상 카메라는 취득된 영상의 열 정보를 이용하기 때문에, 종이 형태의 체스보드는 적외선 열화상 카메라를 캘리브레이션을 하는데 적합하지 않다. 기존 종이 형태의 체스보드를 이용한 가시광 카메라의 캘리브레이션 문제점을 해결하기 위해, Cheng 등은 램프를 이용해 일정한 시간 동안 체스보드 패턴에 열을 가하여 적외선 열화상 카메라를 캘리브레이션하는 방법을 제시하였다[4]. 램프를 이용해 체스보드를 가열하는 경우, 램프로 체스보드의 전 영역을 동등한 열로 가열해야 하는데, 이러한 과정이 어렵기 때문에 좋은 품질의 열화상 영상을 얻기 어렵다. Bajcsy 등은 무선방식의 MEMS (micro electro-mechanical sensor)을 이용하여 적외선 열화상 카메라를 캘리브레이션하는 방법을 제안하였다[5]. MEMS을 이용해서 적외선 열화상을 취득할 경우, 체스보드와 MEMS의 센서간의 온도 차가 작기 때문에, 취득된 열화상 영상의 품질이 저하되는 문제점이 발생하여, 캘리브레이션의 정확도가 감소된다는 문제점이 있다. 가시광과 적외선 열화상 카메라를 이용하여 선명한 캘리브레이션 패턴을 동시에 얻기 위해, Yang 등은 열과 빛을 발생시키는 원 형태의  $5 \times 5$  전등을 검정색 플라스틱 보드에 장착하는 방법을 소개하였다[6].  $5 \times 5$ 의 원 전등에 전원을 공급하면, 열과 빛은 전등의 중심에서부터 근접한 바깥 영역으로 퍼지는 현상이 발생된다. 따라서, 검정색 플라스틱 보드에  $5 \times 5$ 의 원 전등의 중심을 정확하게 측정하기 어렵기 때문에, 정확한 캘리브레이션이 어렵게 된다. 게다가, Luhmann 등에 의해 열이 있는 타겟 램프들을 기반으로 하는 캘리브레이션 보드를 제안하였지만[7], 선명한 캘리브레이션 패턴을 얻기 위해서는 차가운 하늘의 온도 환경이 요구 되기 때문에 캘리브레이션은 날씨에 제약을 받는다는 문제

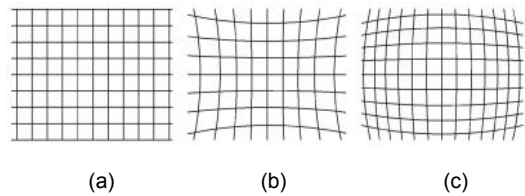


Fig. 1 Distortion images: (a) no distortion:  $k = 0$ , (b) pincushion distortion:  $k > 0$ , (c) barrel distortion:  $k < 0$

점이 있다. 전원을 공급하는 캘리브레이션 방법의 비용문제를 줄이고 캘리브레이션 과정상에 시간의 효율성을 높이기 위해 Ursine 등은 구리판 (방사율 0.09)과 높은 방사율을 가진 스프레이 잉크 (방사율 0.98)를 사용하여 환경에 제약적이지 않은 두 개의 캘리브레이션 보드를 제안하였다[8]. 적외선 열화상 카메라의 구리판에 체스보드의 패턴 영상을 취득하기 위해, 보드 패턴은 비대칭의 외부 조명으로부터 비선형의 패턴을 가지게 되는데, 이로써 카메라 캘리브레이션의 정확도에 영향을 준다는 문제점이 있다.

앞에서 언급한 이전 연구들에 대한 가시광 및 적외선 열화상 카메라의 캘리브레이션 문제점을 해결하기 위해, 본고에서는 새로운 캘리브레이션 장치를 제안한다. 제안하는 캘리브레이션 장치는 원과 직사각형의 패턴을 가지고 있으며, 가시광과 적외선 열화상 카메라 모두의 캘리브레이션 정확성을 높이기 위해 정밀가공과 함께 열 전도성과 방사율을 고려한 재질을 캘리브레이션 타겟으로 사용하였다.

캘리브레이션 과정을 통해 교정되어야 하는 대표적인 현상은 방사왜곡으로 이미지를 촬상하는 모든 카메라는 비선형적인 또는 방사왜곡을 수반한다. Fig. 1은 격자모양의 이미지로 구현한 대표적인 형태의 렌즈왜곡이다[9]. Fig. 1의 (a)는 왜곡이 일어나지 않은 원본 이미지이며, (b)는 광학 장치에서 주로 발생하는 pincushion distortion, (c)는 어안렌즈에 나타나는 barrel distortion이다. 대부분의 렌즈에서 왜곡은 방사왜곡으로 다음 식으로 나타내어진다[10,11,14].

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - 4k(u^2 + v^2)}} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (1)$$

식(1)에서  $(u, v)$ 는 원상태의 픽셀위치이며  $(\tilde{u}, \tilde{v})$ 는 방사왜곡 후 이동된 픽셀위치를 나타낸다. 변수  $k$ 는 방사왜곡의 양을 나타내며,  $k$ 가 음수이면 왜곡은 Fig. 1(c)와 같이 barrel 모양의 이미지로 나타나고, 양수이면 Fig. 1(b)의 pincushion 모양으로 나타난다.

왜곡변수 다음으로 알아내야 할 변수는 피사체로부터의 현재 카메라에 대한 포즈값( $\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z$ )과, 영상 폭의 중심 좌표( $c_x, c_y$ )이다. 카메라 영상을 획득할 때 이러한 포즈 값과 파라미터들을 고려한다면 이런 변수들로부터 발생할 수 있는 렌즈 왜곡을 바로잡을 수 있고, 물체의 정확한 측정이 가능하다[12].

본 고에서는 열화상 카메라 캘리브레이션 타겟 개발을 위해 정확도와 사용빈도가 높은 원형마크(circular marks)와 라인(line) 형태를 이용한 캘리브레이션 타겟을 선정하였다[10,11,13,14]. 다음의 Fig. 2가 본 연구에 사용된 범용 캘리브레이션 타겟이다. 원형마크와 사각라인을 이용한 타겟으로 원형마크와 사각라인이 정밀하게 프린팅 된 필름지를 알루미늄과 플라스틱 복합재질 플레이트 표면에 접착한 구조이다. 캘리브레이션 타겟의 전체 사각 라인 외곽치수는 100 mm × 100 mm이며, 라인 폭은 3.125 mm이다. 원형 마크의 지름은 6.25 mm이고, 원형 마크간 거리는 12.5 mm이다. 필요에 따라 패턴 형상의 비율을 유지한 채 크기를 변형해서 사용하면 큰 공간이나 현미경과 같은 매우 작은 공간의 캘리브레이션에도 사용할 수 있다. Fig. 2(a)는 캘리브레이션 타겟의 평면을 나타내며 Fig. 2(b)는 이것을 이용하여 가시광 카메라와 캘리브레이션 알고리즘을 통해 얻은 결과 이미지이다.

캘리브레이션 알고리즘에 사용된 최적화 방정식 다음의 수식(2)와 같다.

$$d(c) = \sum_{i=1}^k \|m_i - \pi(M_i, c)\|^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

여기서 벡터  $c$ 는 카메라 모델에서의 9개의 변수( $f, k, s_x, s_y, c_x, c_y, \alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y, t_z$ )이며,  $m_i$ 는 원형마크 중심좌표이고,  $\pi(M_i, c)$ 는 이들의 투영좌표들이다. 그리고  $k = mn$ 으로 원형마크의 개수이다 [14].

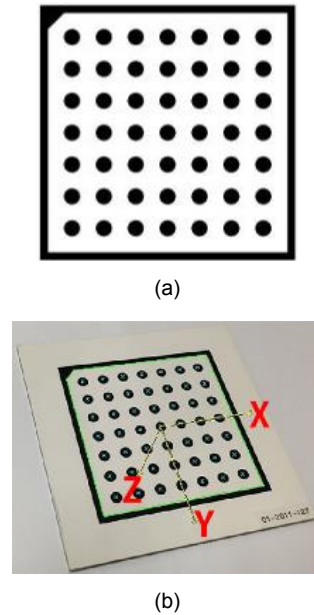


Fig. 2 Calibration target using circular marks and rectangular grids. (a): image of a calibration plate (visible camera), (b): calibration algorithm applied image (visible camera)

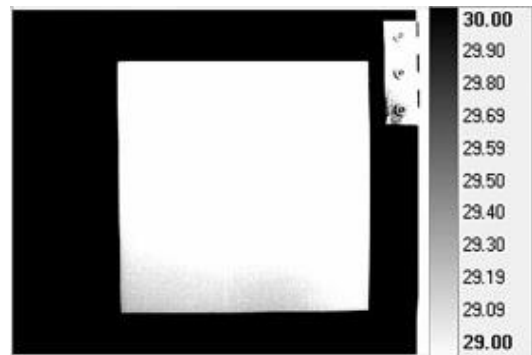


Fig. 3 Infrared thermal image of existing calibration target

## 2. 적외선열화상 캘리브레이션 타겟 개발

적외선 열화상 카메라는 CCD나 CMOS를 이용한 가시광 카메라와 달리 물체가 방사하는 적외선을 렌즈를 통해 받아들여 이미지 센서에 촬상시키므로 열전도와 방사율을 고려한 타겟이 필요하다. 다음의 Fig. 3은 Fig. 2의 가시광 카메라 캘리브레이션 타겟을 적외선 열화상 카메라로 촬영한 이미지이며, 캘리브레이션을 위한 이미지를 얻지 못한 것을 보여준다.

이러한 결과는 사용된 캘리브레이션 타겟에는 패턴간의 단일 재질을 사용하였으므로 열전도가 전체에 걸쳐 균등하게 이루어졌기 때문이고 사료된다. 따라서 본고에서는 이를 해결하기 위해 가시광 카메라와 적외선 열화상 카메라 모두 적용 가능한 캘리브레이션 타겟을 설계하였다.

## 2.1. 캘리브레이션 타겟 설계

설계에 앞서 주요한 사항은 캘리브레이션 타겟의 이미지는 정밀함을 요구하므로 물리적으로 주어진 치수가 열전도에 의해 경계가 확산되거나 축소되어 보여서는 안된다는 점이다. 따라서 제시한 캘리브레이션 타겟의 구조는 Fig. 4와 같이 열전도율을 고려하여 4개의 요소로 구성하였으며, 같은 요소끼리는 접촉면을 밀착시키고 서로 다른 요소끼리 접촉면을 작게 하여 열전도가 일어나는 것을 최소화하였다. 이를 위해 범용 FEA (finite element analysis) 소프트웨어인 ANSYS를 사용하여 열전도해석을 다양한 재료와 설계조건을 달리하면서 수행하였으며 다음과 같은 최적의 설계조건을 구하였다. Fig. 4(b)는 FEA를 이용한 열해석 결과이다. FEA에 사용한 재질은 AL6061이며, density는  $26.988 \text{ g/cm}^3$ , conductivity는  $166.9 \text{ W/mk}$  이다. 해석은 정상상태조건으로 초기 온도는  $22^\circ\text{C}$ 로 설정하고 맨 아래 플레이트에  $30^\circ\text{C}$ 로 가열하여 1초 후 전도된 온도분포 결과를 도출하였다. 해석된 결과는 Fig. 4(b)와 같으며 그림과 같이 구분되어야 될 경계부분의 구성 요소 간 열전도가 두드러지게 나타나지 않은 것을 확인할 수 있다.

## 2.2. 캘리브레이션 타겟 제작 및 적용

해석한 값을 토대로 실제 캘리브레이션 타겟을 설계 제작하였다. 가시광 카메라와 적외선 열화상 카메라에 공용 사용을 위해 Table 1과 같은 재원으로 아노다이징하여 도금처리 하였다.

Table 1 Specifications of calibration target

Classification	Color	Emissivity	Material
A	Silver	0.04	AL 6061
B	Black	0.95	AL 6061

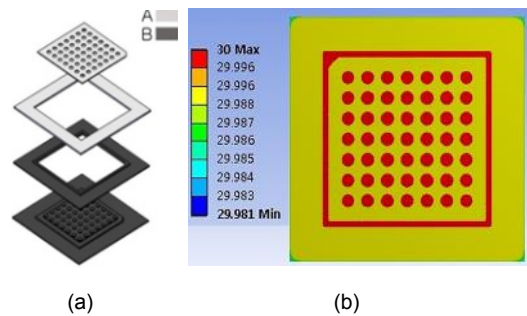


Fig. 4 Calibration target design. (a): calibration target structure, (b): thermal conductivity analysis using FEA

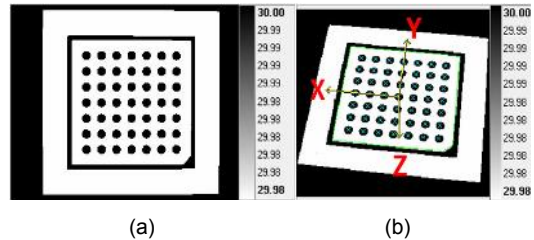


Fig. 5 Experimental results. (a): image of a calibration plate (IR camera), (b): calibration algorithm applied image (IR camera)

제작된 캘리브레이션 타겟을 적외선 열화상 카메라에 적용하여 Fig. 5의 결과를 얻었다.  $30^\circ\text{C}$ 를 설정된 전기식 열 전도장치에 제작된 캘리브레이션 타겟을 설치하고 적외선 열화상 카메라를 이용하여 이미지를 획득하였다. Fig. 5(a)는 적외선 열화상 카메라를 이용해 획득한 캘리브레이션 타겟 이미지이며, Fig. 4(b)의 해석결과와 유사함을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 적외선 열화상에 기존의 캘리브레이션 알고리즘을 적용한 결과이다. Fig. 2(b)의 Visible 카메라 캘리브레이션 알고리즘 적용 결과와 같이 알고리즘이 잘 적용된 것을 보여준다.

## 3. 라인프로파일 비교

본고에서 제시한 캘리브레이션 타겟을 가시광 카메라(Crevis MV-CX30U)와 열화상카메라(Cedip silver 480 m)로 촬영하여 동일한 픽셀 크기의 이미지( $320 \times 240$ )를 획득하였고, 그레이 스케일로 변환 후 Fig. 6(a),(b)와 같이 위에서 첫 번째 열

Table 2 Comparison of line profiling pixel number

	L1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	L2
Visible	6	13	12	12	12	13	12	12	6
IR	6	12	13	12	13	12	12	12	7

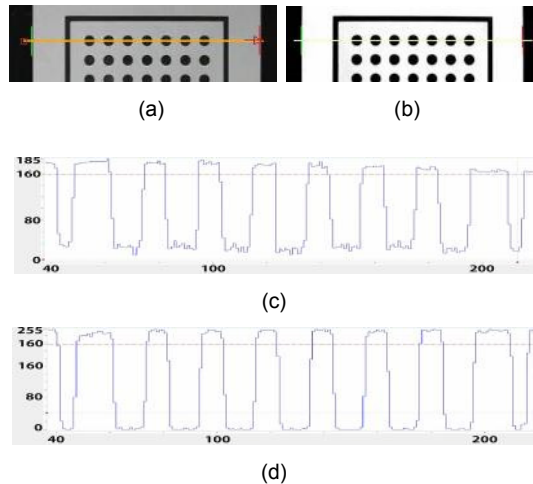


Fig. 6 Experimental results (a) region of visible camera image, (b) region of IR camera image, (c) line profile of (a), (d) line profile of (b)

의 라인과 원형마크에 선형 RoI(region of interest)를 생성하여 Fig. 6(c), (d)의 라인프로파일(line profile)을 구하였다. 이들 라인프로파일의 라인과 원형마크의 픽셀 수를 비교하여 나타낸 표가 Table 2이며, L과 C는 라인과 원형마크들의 약자로 좌로부터 순서를 매겨 표기하였다. Table 2의 결과와 같이 가시광 카메라 이미지와 적외선 열화상의 각 픽셀수가 유사한 것으로 나타났고 Fig. 6(c), (d)에서와 같이 IR 이미지가 visible 이미지보다 각 line과 circular marks의 여백과의 대비효과가 크고 균일한 값으로 나타났다. 이를 통해 본고에서 제시한 캘리브레이션 타겟이 IR카메라의 캘리브레이션에 적용이 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

기존의 가시광 카메라에서 사용되는 캘리브레이션 타겟은 패턴에 따라 방사율이 다르게 프린팅 되어있지만, 적외선 열화상에서 캘리브레이션에 필요한 이미지 패턴을 얻지 못했다. 본 연구에서는 캘리브레이션 타겟의 열전도차 특성을 구

조적으로 구현함과 동시에 상반된 방사율을 적용하여 캘리브레이션 타겟을 설계하였고, 이를 적외선 열화상 카메라에 적용한 결과 영상 캘리브레이션을 위한 적합한 이미지를 획득할 수 있었으며, 가시광 카메라 이미지에 비해 배경과의 대비가 크고 뚜렷한 경계의 이미지임을 보여준다. 본 캘리브레이션 타겟을 이용하면 렌즈 왜곡과 카메라 포즈를 고려한 정량적 결함 측정과 함께 정확도가 개선될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No.20121620100020).

이 논문은 미래창조과학부와 한국연구재단의 방사선기술개발사업으로 연구 지원한 (No.2013M2A2A9043706)의 결과물입니다

#### 참고문헌

- [1] L. N. Smith and M. L. Smith, "Automatic machine vision calibration using statistical and neural network methods," *Image and Vision Computing*, Vol. 23, No. 10, pp. 887-899 (2005)
- [2] I. J. Aldave, P. V. Bosom, L. V. Gonzalez, I. L. de Santiago, B. Vollheim, L. Krausz and M. Georges, "Review of thermal imaging systems in composite defect detection," *Infrared Physics and Technology*, Vol. 61, pp. 167-175 (2013)
- [3] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334 (2000)
- [4] S. Y. Cheng, S. Park and M. M. Trivedi, "Multiperspective thermal IR and video arrays for 3D body tracking and driver activity analysis," *In CVPR'05 proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, p. 3-3 (2005)

- [5] P. Bajcsy and S. Saha, "A new thermal infrared camera calibration approach using wireless MEMS sensors," *Proceeding of the Communication Networks and Distributed Systems Modeling And Simulation Conference*, pp. 1-6 (2004)
- [6] R. Yang, W. Yang, Y. Chen and X. Wu, "Geometric calibration of IR camera using trinocular vision," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, pp. 3797-3803 (2011)
- [7] T. Luhmann, J. Ohm, J. Piechel and T. Roelfs, "Geometric calibration of thermographic cameras," *Proceedings of International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Part 5 Commission V Symposium*, Newcastle upon Tyne, UK. XXXVIII 411-415 (2010)
- [8] W. Ursine, F. Calado, G. Teixeira, H. Diniz, S. Silvino and R. de Andrade, "Thermal/Visible Autonomous Stereo Visio System Calibration Methodology for Non-controlled Environments," *Proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference on Quantitative Infrared Thermography*, Naples Italy (2012)
- [9] C. C. Slama, C. Theurer and S. W. Henriksen, "Manual of Photogrammetry," 4th ed.; American Society of Photogrammetry: Falls Church, VA, USA (1980)
- [10] R. Lenz and D. Fritsch, "Accuracy of videometry with CCD sensors," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 45, No. 2, pp. 90-110 (1990)
- [11] S. Lanser, C. Zierl, and R. Beutlhauser, "Multibildkalibrierung einer CCD-Kamera," *Mustererkennung*, Informatik aktuell, G. Sagerer, S. Posch, F. Kummert, Eds.; Springer-Verlag: Berlin, Germany, pp. 481-491 (1995)
- [12] B. Prescott and G. F. McLean, "Line-Based Correction of Radial Lens Distortion," *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 59, pp. 39-47 (1997)
- [13] J. Heikkilä, "Geometric camera calibration using circular control points," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, pp. 1066-1077 (2000)
- [14] C. Steger, M. Ulrich and C. Wiedemann, "Machine Vision Algorithms and Applications," WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., pp. 180-198 (2008)