

단일 카메라 캘리브레이션과 스테레오 카메라의 캘리브레이션의 비교

Calibration Comparison of Single Camera and Stereo Camera

김의명¹⁾ · 홍송표²⁾

Kim, Eui Myoung · Hong, Song Pyo

Abstract

The stereo camera system has a fixed baseline and therefore has a constant scale. However, it is difficult to measure the actual three-dimensional coordinate since the scale is not fixed when relative orientation parameters are determined through the key-point matching in the stereo image each time. Therefore, the purpose of this study was to perform the stereo camera calibration that simultaneously determines the internal characteristics of the left and right cameras and the camera relationship between them using the modified collinearity equation and compared it with the two independent single cameras calibration. In the experiment using the images taken at close range, the RMSE (Root Mean Square Error) of $\pm 0.014\text{m}$ was occurred when the three dimensional distances were compared in the single calibration results. On the other hand, the accuracy of the three-dimensional distance of the stereo camera calibration was better because the stereo camera results were almost no error compared to the results from two single cameras. In the comparison of the epipolar images, the RMSE of the stereo camera was 0.3 pixel more than that of the two single cameras, but the effect was not significant.

Keywords : Stereo Camera System, Relative Orientation Parameters, Modified Collinearity Equation, Stereo Camera Calibration, Epipolar Image

초 록

스테레오 카메라 시스템은 물리적으로 고정된 기선길이를 가지고 있어 축척이 일정하나 스테레오 영상에서 매번 특징점 매칭을 통해서 상호표정요소를 결정할 경우 축척이 고정 되어 있지 않아 실제 3차원 좌표를 측정하기 어려운 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 수정된 공선조건식을 이용하여 좌우측 카메라의 내부적인 특성 및 카메라 간의 관계를 동시에 결정하는 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하고 이를 단일 카메라 캘리브레이션과 비교하는 것을 목적으로 하였다. 실험을 통해 근거리 촬영한 영상에서 결정한 3차원 거리를 비교하였을 경우 단일 캘리브레이션의 결과에서는 $\pm 0.014\text{m}$ 의 평균제곱근오차가 발생한 반면 스테레오 카메라의 경우에는 오차가 거의 발생하지 않았기 때문에 스테레오 카메라 캘리브레이션의 3차원 거리의 정확도가 우수하게 나타났다. 에피폴라 영상의 중시차에 대한 비교에서는 스테레오 카메라를 이용한 경우가 단일 카메라의 경우 보다 평균제곱근오차가 최대 0.3 픽셀 정도의 차이를 보였으나 그 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

핵심어 : 스테레오 카메라 시스템, 상호표정 요소, 수정된 공선조건식, 스테레오 카메라 캘리브레이션, 에피폴라 영상

Received 2018. 06. 25, Revised 2018. 07. 20, Accepted 2018. 08. 28

1) Corresponding Author, Member, Department of GIS Engineering, Namseoul University (E-mail: kemyoung@nsu.ac.kr)

2) Department of GIS Engineering, Namseoul University (E-mail: bbcuco@gmail.com)

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.

1. 서론

스테레오 카메라 시스템은 인간의 시각체계에서 입체감을 인지할 수 있는 요소 중 양안방법을 모방하여 기계적으로 구현한 것으로 물리적으로 고정된 좌우측 카메라에 의하여 스테레오 영상을 취득하는 시스템이다. 자율주행에서 스테레오 카메라를 이용하면 3차원 위치정보를 신속하게 취득할 수 있기 때문에 단안 카메라를 대체하여 스테레오 카메라 시스템의 활용성이 높아지고 있는 추세이다. 스테레오 카메라 시스템을 이용하여 3차원 위치정보를 추출하는 과정은 크게 에피폴라 영상을 이용하여 시차지도(disparity map)를 제작한 후 시차베제식을 이용하여 3차원 위치정보를 추출(Hong and Kim, 2018)하며, 관련 연구로는 스테레오 카메라를 이용하여 근거리의 입체시 영상을 제작하거나 소규모 객체의 3차원 모델링을 위해 카메라의 기하학적 배치에 제약이 없는 시차지도를 생성하는 연구가 수행되었다(Jang *et al.*, 2012).

하지만 이 경우 촬영 거리가 멀어질수록 카메라 렌즈왜곡이 커지기 때문에 거리측정 및 3차원 위치결정시에 정확도가 낮은 문제점이 발생한다. 이를 위해 카메라의 초점거리, 주점 위치, 렌즈왜곡계수와 같은 내부적인 특성을 정확하게 파악하는 카메라 캘리브레이션을 선행적으로 수행하여야 한다(Kim, 2018). 카메라 캘리브레이션과 관련하여 좌우측 카메라를 독립적으로 캘리브레이션하여 3차원 위치정보를 취득하는 연구들이 수행되었다(Lee *et al.*, 2010; Shin *et al.*, 2011; Park and Choi, 2012; Fredriksson *et al.*, 2014; Hwa *et al.*, 2015). 하지만 스테레오 카메라 시스템은 좌우측 카메라가 물리적으로 고정되어있기 때문에 내부적인 특성 뿐만 아니라 카메라와 카메라 간의 고정된 상호표정요소(기선벡터, 회전량) 또한 결정하여야 하는데, 이를 스테레오 카메라 캘리브레이션이라 한다.

스테레오 카메라 캘리브레이션을 위하여 좌우 카메라를 각각 단일 캘리브레이션 한 후 두 카메라간의 관계를 영상정합을 통해서 결정된 상호표정요소를 이용하여 결정하는 방법도 있다(Zhang, 2000; Bradski and Kaehler, 2008). 그러나 두 카메라간의 관계를 나타내는 상호표정요소가 영상정합의 결과에 영향을 받아 매번 달라질 수 있는 문제점이 있다(Park *et al.*, 2018). 따라서 본 연구에서는 좌우측 카메라의 내부표정요소 및 상호표정요소를 동시에 결정할 수 있는 수정된 공선 조건식을 이용하여 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하고 이를 단일 카메라 캘리브레이션과 비교하는 것을 목적으로 하였다.

2. 연구방법

2.1 타겟 촬영 및 검출

스테레오 카메라의 캘리브레이션을 위해서 Fig. 1의 오른쪽과 같이 A0사이즈 크기로 구성된 4개의 체커보드(checker board)를 출력하여 캘리브레이션 타겟으로 사용하였다. 체커보드의 크기를 다소 큰 크기로 제작한 이유는 스테레오 카메라를 구성하고 있는 좌우 영상에서 체커보드를 촬영하였을 때 흑백타겟점이 영상 전반적으로 분포할 수 있도록 하기 위해서이다.

체커보드를 구성하고 있는 흑백타겟점의 3차원 위치는 수평 및 수직위치 정확도가 $\pm 3\text{mm}$ 인 토탈스테이션(SOKKIA FX-101)을 이용하여 관측하였다. 캘리브레이션을 위한 체커보드 영상의 촬영은 일정한 거리에서 스테레오 카메라는 움직이지 않고 체커보드 타겟의 위치와 자세를 바꿔가면서 좌우측 각 34장의 영상을 촬영하였다.



Fig. 1. Checker board

체커보드를 구성하고 있는 흑백타겟점의 사진좌표는 반자동 타겟검출 기법(Kim, 2018)을 이용하여 각 체커보드 영상의 중심점을 추출하였으며, 타겟영상의 분포는 Fig. 2와 같다.

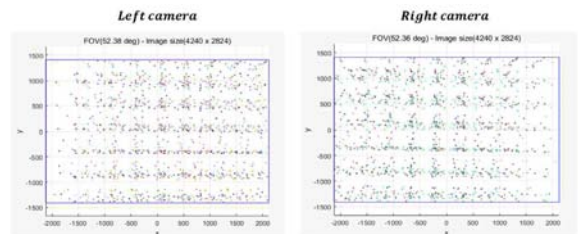


Fig. 2. Distribution of image coordinates of target

2.2 공선조건식

기존의 단일 카메라 캘리브레이션은 Fig. 3과 Eq. (1), Eq. (2)과 같이 공선조건식을 이용한 번들블록조정(BBA : Bundle Block Adjustment)을 통해 캘리브레이션 매개변수를 결정하였다. Eq. (1)에서 r_I^G 는 지상의 3차원 좌표를 나타내는 벡터, r_c^G 는 카메라의 위치, R_c^G 는 카메라의 자세, r_i^c 는 렌즈 왜곡이 보정된 3차원 사진좌표를 나타내는 벡터를 나타낸다.

$$r_I^G = r_c^G + \lambda R_c^G r_i^c \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{bmatrix} + \lambda R_c^G \begin{bmatrix} x_i - x_c - \Delta x \\ y_i - y_c - \Delta y \\ -c \end{bmatrix}$$

where r_I^G = ground coordinates, r_c^G = perspective center, λ R_c^G : scale, = rotation matrix from camera coordinate system to ground coordinate system, r_i^c = image coordinates.

$$\begin{aligned} \Delta x &= (x_i - x_c)(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \Delta y &= (y_i - y_c)(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ r &= \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

where $(\Delta x, \Delta y)$ = the compensations for the radial lens distortion, k_1, k_2 = the radial lens distortion parameters, (x_i, y_i) = a image coordinate, (x_c, y_c) = a principal point.

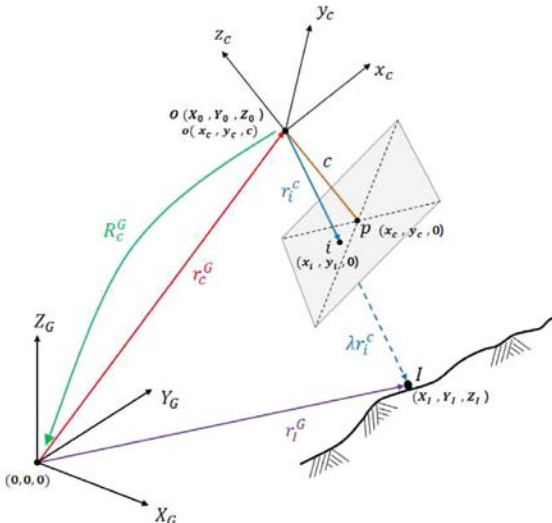


Fig. 3. Collinearity equation

2.3 수정된 공선조건식

스테레오 카메라 캘리브레이션은 Fig. 4과 Eq. (3)와 같이 수정된 공선조건식을 이용한 BBA를 통해 캘리브레이션 매

개변수를 결정하였다(Kersting *et al.*, 2012 ; Lari *et al.*, 2014a ; Lari *et al.*, 2014b). 수정된 공선조건식을 이용하면 각 카메라의 내부표정요소 뿐만 아니라 고정된 상호표정요소(기선벡터, 회전관계) 또한 결정할 수 있다.

Eq. (3)에서 r_I^G 는 지상의 3차원 좌표를 나타내는 벡터, r_L^G 는 좌측카메라의 위치, R_L^G 는 좌측카메라의 회전행렬, r_R^L 은 좌우측 카메라의 기선벡터, R_R^L 은 좌우측 카메라간의 회전행렬, r_i^R 는 우측 카메라에서 렌즈왜곡이 보정된 3차원 사진좌표를 나타내는 벡터를 나타낸다. 여기서, 스테레오 카메라의 상호표정요소인 회전행렬과 기선벡터를 나타내는 R_R^L 과 r_R^L 의 초기값은 쿼터니언(quaternion)을 이용한 공간후방회회법(spatial resection)을 이용하여 결정하였다(Mazaheri and Habib, 2015; Kim, 2018). 여기서 쿼터니언은 3차원 공간에서 회전각을 나타내는 1개의 실수 부분과 회전축을 나타내는 3개의 허수 부분으로 이루어진 일종의 4차원 벡터를 나타낸다.

$$r_I^G = r_L^G + R_L^G r_R^L + \lambda R_L^G R_R^L r_i^R \quad (3)$$

where r_I^G = ground coordinates, r_L^G = perspective center of left camera, λ = scale, R_L^G = rotation matrix from left camera to ground coordinate system, r_R^L = baseline vector, R_R^L = rotation matrix from right camera coordinate system, to left camera coordinate system, r_i^R = image coordinates.

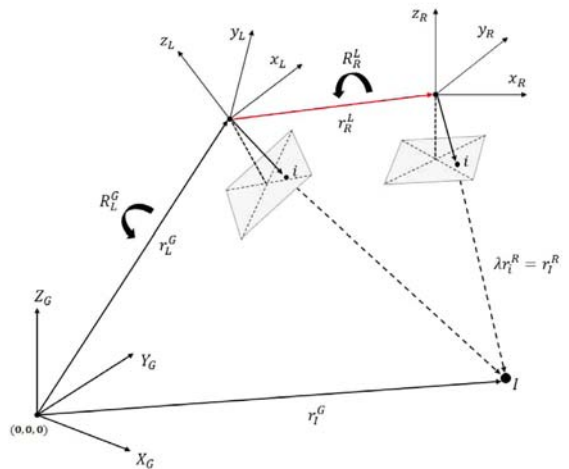


Fig. 4. Modified collinearity equation

3. 실험

3.1 스테레오 카메라 시스템

본 연구에 사용한 스테레오 카메라는 Fig. 5와 같이 드론에 탑재하여 신속·정확하게 지형을 측량하기 위한 목적으로 제작되었으며, 스테레오 카메라 간의 기선벡터(dx, dy, dz)는 (0.4m, 0m, 0m), 회전량 (dω, dφ, dκ)은 (0°, 0°, 0°)로 설계·제작되었다.

스테레오 카메라를 구성하고 있는 좌우 카메라는 동일한 Sony ICX834 모델을 사용하였으며 카메라의 제원은 Table 1과 같다.



Fig. 5. Stereo camera system

Table 1. Camera specifications

Model	Sony ICX834
Image size (columns×rows)	4240 × 2824 pixels
Pixel size	3.1μm
Nominal focal length	16mm (5161.290 pixels)

카메라 캘리브레이션은 스테레오 카메라를 구성하고 있는

좌우 카메라를 각각 독립적으로 캘리브레이션하는 단일 캘리브레이션과 좌우 카메라의 상호표정요소를 고려할 수 있는 스테레오 카메라 캘리브레이션으로 구분하여 실험하였으며, 본 실험에서는 모두 동일한 데이터 셋(타겟영상)을 사용하였다. 또한, 카메라의 렌즈왜곡은 접선왜곡의 영향이 크지 않기 때문에 k_1, k_2 매개변수를 이용한 방사방향 렌즈왜곡만을 모델링 하였다(Habib and Morgan, 2003).

3.2 단일 캘리브레이션 및 상호표정요소의 결정

단일 캘리브레이션은 스테레오 카메라를 구성하고 있는 좌우 카메라가 서로 독립되어 있다고 가정하여 카메라를 각각 단독으로 캘리브레이션하는 것을 나타낸다. 그리고 상호표정요소는 좌우 카메라를 각각 단일 카메라 캘리브레이션 한 후 스테레오 영상의 수동으로 관측한 접합점을 이용하여 상호표정요소를 결정하였다.

좌우 카메라에 대해 각각 단일 캘리브레이션을 수행한 결과는 Table 2와 같으며, 사후 표준편차($\hat{\sigma}_o$)값은 각각 ±0.366과 ±0.369픽셀로 나타나 0.5픽셀이내의 양호한 결과값을 보였다. 또한 좌우 카메라의 주점(x_c, y_c)과 초점거리(c)에 대한 표준편차는 1픽셀내외로 양호한 값을 보였다. 결정된 내부표정요소와 Fig. 6 ~ Fig. 8의 스테레오 영상에서 앞에서 설명한 것과 같이 접합점을 이용하여 Table 3 ~ Table 5와 같이 스테레오 영상간의 상호표정요소를 결정하였다.

이 때, 좌우 카메라의 X축 방향의 거리를 나타내는 dx는 물리적으로 설계된 0.4m로 고정하고 상호표정요소를 결정하였다.

본 연구의 스테레오 시스템은 좌우측 카메라가 물리적으로 고정되어 있기 때문에 모두 같은 상호표정요소 값을 가져야 하지만, Table 3 ~ Table 5에서 나타난 것과 같이 상호표정요소 값이 서로 같지 않은 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 Fig. 6 ~ Fig. 8과 같이 상호표정요소를 결정할 때 접합점의 분포와 영상정합의 결과에 영향을 받기 때문이다.

Table 2. Calibration parameters for two independent single cameras

Camera	Stdev (pixel)	IOP(pixel) ±stdev(pixel)			Distortion parameters ±stdev(pixel)	
	$\hat{\sigma}_o$	x_c	y_c	c	k_1 (pixel ²)	k_2 (pixel ⁴)
left	±0.366	12.801 ±0.6625	-33.044 ±0.6667	5180.965 ±1.2232	-2.82380E-09 ±3.83143E-11	1.16004E-16 ±5.53230E-18
right	±0.369	24.159 ±0.9517	-44.660 ±0.6255	5181.826 ±1.1822	-3.03399E-09 ±3.20868E-11	1.27731E-16 ±4.24504E-18

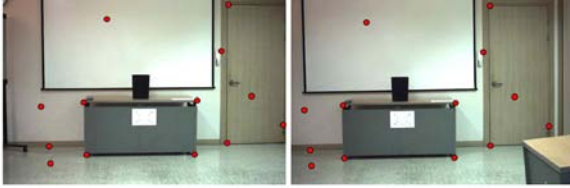


Fig. 6. Stereo image-case A with the tie points



Fig. 7. Stereo image-case B with the tie points

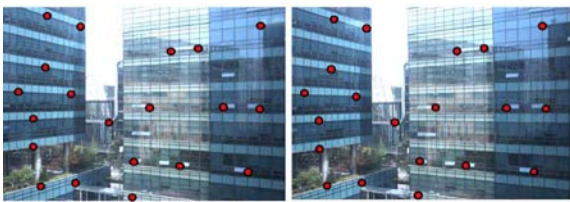


Fig. 8. Stereo image-case C with the tie points

Table 3. Relative orientation parameters for two single cameras using case A

Pixel	Meter			Degree		
	dx	dy	dz	Omega	Phi	Kappa
$\hat{\sigma}_o$						
± 0.133	0.40000	0.00075	-0.01038	-0.45872	0.30315	0.65234

3.3 스테레오 카메라 캘리브레이션

단일 카메라 캘리브레이션과 달리 스테레오 카메라 캘리브레이션은 좌측카메라를 기준카메라로 설정하고 우측카메라는 종속카메라로 두어 두 카메라의 관계를 설정 할 수 있는

Table 6. Calibration parameters for a stereo camera

Camera	Stdev (pixel)	IOP(pixel) \pm stdev(pixel)			Distortion parameters \pm stdev(pixel)	
	$\hat{\sigma}_o$	x_c	y_c	c	k_1 (pixel ²)	k_2 (pixel ⁻⁴)
left	± 0.446	16.732 ± 0.4975	-29.719 ± 0.5416	5179.042 ± 1.0833	-2.97597E-09 $\pm 3.16980E-11$	1.20200E-16 $\pm 4.87030E-18$
right	± 0.446	20.867 ± 0.7523	-43.465 ± 0.5436	5181.528 ± 1.0885	-2.98678E-09 $\pm 3.17733E-11$	1.26136E-16 $\pm 4.62565E-18$

Table 4. Relative orientation parameters for two single cameras using case B

Pixel	Meter			Degree		
	dx	dy	dz	Omega	Phi	Kappa
$\hat{\sigma}_o$						
± 0.240	0.40000	-0.00077	-0.01080	-0.43935	0.41211	0.60146

Table 5. Relative orientation parameters for two single cameras using case C

Pixel	Meter			Degree		
	dx	dy	dz	Omega	Phi	Kappa
$\hat{\sigma}_o$						
± 0.259	0.40000	-0.01159	-0.12319	-0.44013	0.18266	0.61220

수정된 공선조건식을 이용하여 Table 6, Table 7과 같이 내부표정요소와 상호표정요소를 동시에 결정하였다. 앞에서 설명 하였듯이 스테레오 카메라 캘리브레이션은 내부표정과 상호표정요소를 동시에 결정하였기 때문에 사후표준편차값은 각 ± 0.446 픽셀로 같게 나타났으며, 스테레오 카메라의 주점 (x_c, y_c) 과 초점거리(c)에 대한 표준편차도 1픽셀내외로 양호한 값을 보였다.

Table 6에서 알 수 있듯이 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하였을 경우의 내부표정요소와 Table 2에서 수행한 내부표정요소가 초점거리의 거의 1픽셀이내의 거의 유사한 값을 가지고 있으나 주점위치 (x_c, y_c)는 다소 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행할 때 두 카메라와의 관계를 나타내는 상호표정요소도 함께 결정 되면서 주점방향과 상호표정요소의 dx, dy 또는 omega, phi값이 서로 상호작용 하였기 때문이다.

Table 7의 상호표정요소의 결과에서 알 수 있듯이 스테레오 카메라를 설계할 때에 dx는 0.4m이고 두 카메라의 회전관계는 없는 것을 설계하였으나 실제 스테레오 카메라에 대한

Table 7. Relative orientation parameters using a stereo camera

Pixel	Meter			Degree		
	dx	dy	dz	Omega	Phi	Kappa
$\hat{\sigma}_o$						
± 0.446	0.39893	0.00167	-0.00406	-0.49937	0.32801	0.65523

캘리브레이션을 수행하였을 경우 dx는 약 1mm(=0.4-0.39893) 정도 차이가 나타나고 dy와 dz도 각각 약 2mm와 4mm 정도 이동된 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 좌측카메라를 기준으로 우측카메라의 회전도 나타난 것을 알 수 있다.

4. 정확도 검증

단일카메라 캘리브레이션과 스테레오 카메라 캘리브레이션의 2가지 경우에 대한 비교를 위해서 3차원 거리와 에피폴라 영상을 이용하여 정량적인 비교를 수행하였다.

4.1 삼차원 거리를 이용한 정량적 검증

카메라와 대상물과의 거리가 약 3m인 근거리에서 촬영한 Fig. 6 영상에서 Fig. 9와 같이 책상의 길이와 높이, 그리고 출입구 문의 높이를 살펴보기 위해서 단일 카메라 캘리브레이션 값(Table 2,3)과 스테레오 카메라 캘리브레이션 값(Table 6,7)을 공간전방교회법(spatial intersection)에 적용하여 $a_{01} \sim a_{02}$, $a_{03} \sim a_{04}$, $a_{04} \sim a_{05}$ 사이의 거리를 측정하였다. 여기서 3차원 거리를 이용한 이유는 취득된 좌표가 모두 상대적인 좌표이기 때문이다.

책상과 출입구의 거리 검증을 위한 3차원 위치는 토탈스테이션(SOKKIA FX-101)을 이용하여 측정하였다. 2.1절에서 언급하였듯이 토탈스테이션의 정밀도는 $\pm 3\text{mm}$ 이다. 여기서 토탈스테이션의 정밀도에 의하여 관측점은 소수 셋째 자리까지 표시 되므로, 스테레오 영상을 이용한 삼차원 거리 또한 소수 셋째 자리까지로 계산하여 나타내었다.

Table 8과 Table 9에서 알 수 있듯이 단일 카메라 캘리브레이션의 값을 이용하여 결정한 3차원 거리와 스테레오 카메라 캘리브레이션 값을 이용하여 결정한 3차원 거리의 평균 제곱근오차(RMSE: Root Mean Square Error)는 각 0.014m, 0.000m로 나타났다.

이를 통해, 근거리 영상에서 스테레오 카메라 캘리브레이션 매개변수 값을 적용하여 3차원 거리를 관측할 경우 실제 거리와 유사하게 계산되는 것을 확인할 수 있었다.

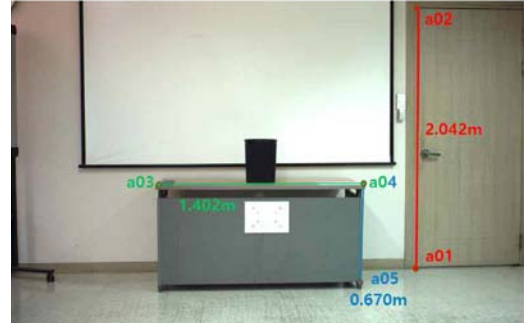


Fig. 9. 3D distance using total station

Table 8. Distance comparison between total station and single camera calibration

unit: meter			
ID	Total station	Single camera calibration	Error
a01-02	2.042	2.021	0.021
a03-04	1.402	1.392	0.010
a04-05	0.670	0.667	0.003
RMSE			0.014

Table 9. Distance comparison between total station and stereo camera calibration

unit: meter			
ID	Total station	Single camera calibration	Error
a01-02	2.042	2.042	0.000
a03-04	1.402	1.402	0.000
a04-05	0.670	0.670	0.000
RMSE			0.000

4.2 에피폴라 영상을 이용한 정량적 검증

에피폴라 영상(epipolar image)이란 원 영상에서 종시차(y-parallax)를 제거한 영상으로 영상 매칭의 비용을 줄이고 효율적으로 3차원 모델을 만들기 위해서 거의 필수적으로 제작하는 영상이다. 에피폴라 영상 제작은 Fig. 7의 근거리 영상(약 6m)과 Fig. 8의 중거리 영상(약 60m)을 이용하였다.

근거리와 중거리에서 촬영한 좌우 영상에 대해 단일 카메라 캘리브레이션 값과 스테레오 카메라 캘리브레이션 값을 이용하여 Fig. 10과 Fig. 11과 같이 에피폴라 영상을 생성하고

몇 개의 접합점에 대해서 중시차를 관측하여 정확도를 평가하였다. 여기서 에피폴라 영상 제작에 필요한 매개변수 값으로는 근거리 영상의 경우 Table 2,4와 Table 6,7의 값을 사용하였고, 중거리의 경우 Table 2,5와 Table 6,7의 값을 사용하여 비교하였다.

Table 10과 Table 11에서 알 수 있듯이 단일 카메라 캘리브레이션 값을 이용하여 생성한 에피폴라 영상의 중시차가 스테레오 카메라 캘리브레이션 값을 이용하여 생성한 에피폴라 영상의 중시차보다 작게 나타났다. 이러한 이유는 좌우 영상의 접합점을 이용한 상호표정요소의 사후표준편차가 스테레오 카메라의 사후표준편차보다 약간 낮아서인 것으로 판단된다.

그러나 중시차의 차이가 0.5픽셀 이내로 나타나 단일 카메라와 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하여 제작한 에피폴라 영상은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 스테레오 카메라를 캘리브레이션을 수행한 경우에는 특징점 매칭을 이

용한 상호표정요소와 달리 기준카메라와 종속카메라와의 관계를 나타내는 축척이 고정된 상호표정요소를 알 수 있으며 연속적으로 촬영할 경우에 매번 상호표정요소를 결정하기 위해서 특징점 매칭을 수행하여야 하는 번거로움 줄일 수 있는 장점이 있다.

Table 10. Y-parallax error at a close range

ID	Single(pixel)	Stereo(pixel)
1	0.313	0.157
2	0.165	0.948
3	0.602	0.458
4	0.024	0.016
RMSE	0.350	0.532

Table 11. Y-parallax error at a middle range

ID	Single(pixel)	Stereo(pixel)
1	0.028	0.627
2	0.233	0.559
3	0.048	0.178
4	0.116	0.257
RMSE	0.133	0.448

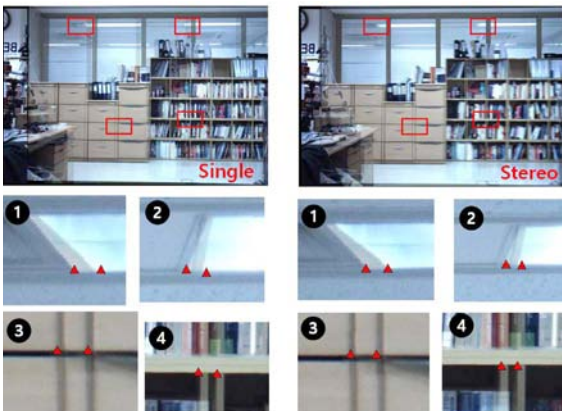


Fig. 10. Epipolar images of close range(about 5m)

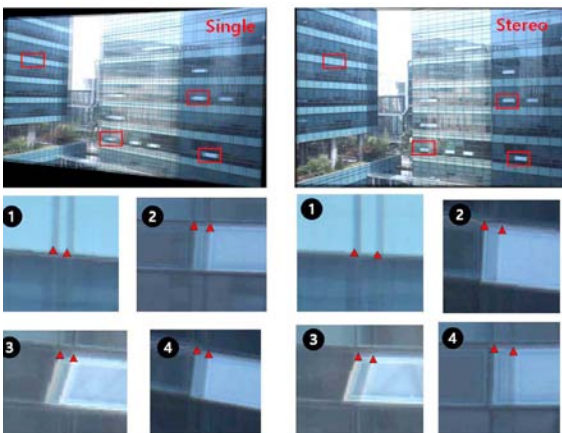


Fig. 11. Epipolar images of middle range(about 60m)

5. 결론

본 연구에서는 수정된 공선조건식을 이용하여 좌우 카메라의 내부표정요소와 두 카메라간의 관계를 동시에 결정하는 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하고 이를 단일 카메라 캘리브레이션과 비교하는 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 수정된 공선조건식을 이용하면 스테레오 카메라를 구성하는 각 카메라의 내부표정요소 뿐만 아니라 두 카메라간의 축척이 고정된 상호표정요소를 동시에 결정할 수 있는 장점이 있어 연속촬영을 수행할 경우 매번 영상 매칭을 통해서 상호표정요소를 결정할 필요가 없는 것을 알 수 있었다.

둘째, 단일 카메라 캘리브레이션 값과 스테레오 카메라 캘리브레이션 값을 이용한 두 가지 경우의 3차원 거리를 토달스테이션 이용한 3차원 거리와 비교하였을 때, 단일 캘리브레이션의 결과에서는 $\pm 0.014m$ 의 평균제곱근오차가 발생한 반면

스테레오 카메라의 경우에는 오차가 거의 발생하지 않아 스테레오 카메라 캘리브레이션의 3차원 거리의 정확도가 우수하게 나타났다.

셋째, 단일 카메라 캘리브레이션 값과 스테레오 카메라 캘리브레이션 값을 이용하여 두 가지 경우의 에피폴라 영상을 제작한 후 접합점을 관측하여 종시차의 오차를 비교한 결과 종시차가 최대 ± 0.3 픽셀로 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

향후 스테레오 카메라 시스템을 드론에 탑재하여 GNSS/IMU (Global Navigation Satellite System/Inertial Measurement Unit) 센서와 기준카메라간의 시스템 카메라 캘리브레이션을 수행한다면 지상기준점을 거의 사용하지 않고도 대상물의 3차원 위치를 결정할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- Bradski, G. and Kaehler, A. (2008), *Learning OpenCV : Computer Vision with the OpenCV Library*, O'Reilly Media, Inc., Sebastopol.
- Fredriksson, J., Enqvist, O., and Kahl, F. (2014), Fast and reliable two-view translation estimation, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 24-27 June, Columbus, USA, pp. 1606-1612.
- Habib, A. and Morgan, M. (2003), Automatic calibration of low-cost digital cameras, *Optical Engineering*, Vol. 42, No. 4, pp. 948-956.
- Hong, S.P. and Kim, E.M. (2018), Calibration accuracy evaluation of stereo camera, *Proceedings of Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, Korean Society for GeoSpatial Information Science, 18-19 May, Jinju-si, Korea, pp. 199-200.
- Hwa, J.H., Song, E.H., Lee, M.Y., Lee, B.K., and Lee, D.W. (2015), Development of an image processing algorithm for paprika recognition and coordinate information acquisition using stereo vision, *Protected Horticulture and Plant Factory*, Vol. 24, No. 3, pp. 210-216. (in Korean with English abstract)
- Jang, W.S., Lee, C., and Ho, Y.S. (2012), Efficient depth map generation for various stereo camera arrangements, *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol. 37, No. 6, pp. 458-463. (in Korean with English abstract)
- Kersting, A.P., Habib, A., and Rau, J. (2012), New method for the calibration of multi-camera mobile mapping systems, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIX-B1, pp. 122-126.
- Kim, E.M. (2018), Semi-automatic camera calibration using quaternions, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 2, pp. 43-50. (in Korean with English abstract)
- Lari, Z., Habib, A., Mazaheri, M., and Al-Durgham, K. (2014a), Multi-camera system calibration with built-in relative orientation constraints (part 2) automation, implementation, and experimental results, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 32, No. 3, pp. 205-216.
- Lari, Z., Habib, A., Mazaheri, M., and Al-Durgham, K. (2014b), Multi-camera system calibration with built-in relative orientation constraints (part 1) theoretical principle, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 32, No. 3, pp. 191-204.
- Lee, N.O., Park, S.Y., and Lee, S.M. (2010), Visualization of the three dimensional information using stereo camera, *The Institute of Electronics Engineers of Korea-System and Control*, Vol. 47, No. 4, pp. 15-20. (in Korean with English abstract)
- Mazaheri, M. and Habib, A. (2015), Quaternion-based solutions for the single photo resection problem, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 81, No. 3, pp. 209-217.
- Park, K.S. and Choi, S.K. (2012), Evaluation of the quantitative practical use of smart phone stereo cameras, *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 20, No. 2, pp. 93-100. (in Korean with English abstract)
- Park, S.G., Kim, E.M., and Lee, J.H. (2018), 3D positioning without control information using a high-resolution stereo camera, *Proceedings of Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, Korean Society for GeoSpatial Information Science, 18-19 May, Jinju-si, Korea, pp. 203-204.

- Shin, H.C., Kim, S.H., and Sohn, K.H. (2011), Hybrid stereoscopic camera system, *Journal of Broadcast Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 602-613. (in Korean with English abstract)
- Zhang, Z. (2000), A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334.