

근거리 사진측량을 위한 스테레오 카메라의 안정성 분석 Stability Analysis of a Stereo-Camera for Close-range Photogrammetry

김의명¹⁾ · 최인하²⁾

Kim, Eui Myoung · Choi, In Ha

Abstract

To determine 3D(three-dimensional) positions using a stereo-camera in close-range photogrammetry, camera calibration to determine not only the interior orientation parameters of each camera but also the relative orientation parameters between the cameras must be preceded. As time passes after performing camera calibration, in the case of non-metric cameras, the interior and relative orientation parameters may change due to internal instability or external factors. In this study, to evaluate the stability of the stereo-camera, not only the stability of two single cameras and a stereo-camera were analyzed, but also the three-dimensional position accuracy was evaluated using checkpoints. As a result of evaluating the stability of two single cameras through three camera calibration experiments over four months, the root mean square error was $\pm 0.001\text{mm}$, and the root mean square error of the stereo-camera was $\pm 0.012\text{mm} \sim \pm 0.025\text{mm}$, respectively. In addition, as the results of distance accuracy using the checkpoint were $\pm 1\text{mm}$, the interior and relative orientation parameters of the stereo-camera were considered stable over that period.

Keywords : Camera Calibration, Interior Orientation Parameters, Relative Orientation Parameters, Stability Analysis, Close-range Photogrammetry

초 록

근거리 사진측량에서 스테레오 카메라를 이용하여 3차원 위치를 결정하기 위해 카메라의 내부표정요소뿐만 아니라 카메라 간의 상호표정요소를 결정하는 카메라 캘리브레이션이 선행되어야 한다. 카메라 캘리브레이션을 수행하고 나서 시간이 흐르면 비측량용 카메라의 경우 내부적인 불안정성이나 외부적인 요인에 의해 내부표정요소와 상호표정요소가 변할 수 있다. 본 연구에서는 스테레오 카메라 안정성을 평가하기 위해 두 대의 단일 카메라와 스테레오 카메라의 안정성을 분석뿐만 아니라 검사점을 이용하여 3차원 위치 정확도를 평가하였다. 4개월간 3회의 카메라 캘리브레이션을 수행한 실험을 통해 단일 카메라의 안정성을 평가한 결과 평균제곱근오차는 $\pm 0.001\text{mm}$ 로 나타났으며, 스테레오 카메라의 평균제곱근오차는 $\pm 0.012\text{mm} \sim \pm 0.025\text{mm}$ 로 나타났다. 또한, 검사점을 이용한 거리정확도를 평가한 결과 $\pm 1\text{mm}$ 로 나타나 다시기에 걸쳐 추정된 스테레오 카메라의 내부표정요소와 상호표정요소는 안정적인 것으로 판단되었다.

핵심어 : 카메라 캘리브레이션, 내부표정요소, 상호표정요소, 안정성 분석, 근거리 사진측량

Received 2021. 01. 11, Revised 2021. 02. 01, Accepted 2021. 02. 19

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

2) Member, Dept. of Spatial Information Engineering, M.S. Student, Namseoul University (E-mail: cso8892@nsu.ac.kr)

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

사진측량의 궁극적인 목표는 사진을 촬영한 순간의 광속과 유사하게 일치시켜 고품질의 3차원 좌표를 생성하는 것이다 (Kim, 2020). 이를 위해 카메라의 주점, 초점거리, 렌즈 왜곡계수를 나타내는 내부표정요소에 대한 이해가 필요하며 내부표정요소는 카메라 캘리브레이션을 통해 계산할 수 있다 (Kim, 2018; Kim and Kwon, 2018). 스테레오 카메라의 경우 두 대의 카메라가 고정되어 있으므로 각 카메라의 내부표정요소뿐만 아니라, 카메라 간의 관계인 상호표정요소를 결정하는 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행해야 한다 (Kim and Hong, 2018).

카메라 캘리브레이션과 관련된 연구로는 스테레오 카메라의 좌우 카메라를 개별적으로 캘리브레이션을 수행한 후 영상정합을 통해 상호표정요소를 결정한 연구 (Zhang, 2000), 체스보드의 자동 타겟 검출을 통한 카메라의 내부표정요소와 외부표정요소를 결정한 연구 (Escalera and Armingol, 2010), 비선형 최적화 과정이 생략된 카메라 캘리브레이션 기법을 통해 렌즈 왜곡계수와 내부표정요소를 분리하여 추정하는 연구 (Hong *et al.*, 2015) 등이 수행되었다.

하지만 비측량용 카메라의 경우 주로 사진측량 목적으로 설계되지 않았기 때문에 측량용 카메라에 비해 렌즈가 작고 왜곡이 크며 기하학적 품질이 좋지 않아 내부표정요소가 불안정하다는 특징이 있다 (Cardenal *et al.*, 2004; Fraser, 2006). 자동 초점 설정 등 사용자의 조작으로 인한 의도적인 변동이 아닌 카메라 내부 기하 구조의 불안정성으로 인한 내부표정요소의 변동이 일어날 경우, 3차원 좌표 재구성 결과 정확도에 부정적인 영향을 끼치므로 해당 카메라의 안정성을 평가할 필요가 있다 (Habib *et al.*, 2006).

카메라 안정성과 관련된 연구로는 온도를 다르게 설정한 실험 환경에서 추정된 두 내부표정요소를 이용하여 온도에 따른 내부표정요소의 안정성을 평가한 연구 (Mitshita *et al.*, 2009), 서로 다른 캘리브레이션 기법을 통해 추정된 두 내부표정요소를 이용하여 광속 조정(bundle adjustment)을 수행한 후 결과 간의 간차를 분석하여 내부표정요소의 안정성을 평가한 연구 (Mitshita *et al.*, 2010), 비측량용 단일 카메라를 이용해 주기적으로 캘리브레이션을 수행하고 추정된 각 내부표정요소를 통해 계산한 3차원 좌표를 검증한 연구 (Jeong, 2011), 멀티 카메라 간의 상호표정요소를 이용하여 사진 면에서 발생한 좌표의 시차를 통해 멀티 카메라의 안정성을 분석한 연구 (Habib *et al.*, 2014) 등이 수행되었다.

이에 본 연구에서는 다시기의 스테레오 카메라 캘리브레이션

을 통해 추정된 내부표정요소와 상호표정요소를 기반으로 단일 카메라와 스테레오 카메라의 안정성 분석을 수행하여 사진 면에서 발생하는 변화를 분석할 뿐만 아니라 3차원 위치 정확도 검증을 통해 스테레오 카메라의 안정성을 종합적으로 분석하는 것을 목적으로 하였다.

2. 카메라 안정성 분석 알고리즘

카메라 안정성 분석은 카메라의 대수에 따라 단일 카메라 안정성 분석과 멀티 카메라 안정성 분석으로 구분할 수 있다. 단일 카메라와 멀티 카메라의 안정성 분석 모두 일정한 시기를 두고 추정된 내부표정요소에 대해 광속의 유사성을 평가하는 것이다. 멀티 카메라의 안정성 분석은 여러 대의 카메라로 구성되어 있어 내부표정요소뿐만 아니라 기준 카메라와 종속 카메라 간의 상대적 위치와 자세를 나타내는 상호표정요소도 중요하게 다루어야 한다는 특징이 있다.

단일 카메라의 안정성 분석기법에는 ZROT (Zero ROTation), ROT (ROTation) 방법 등이 있으며, 멀티 카메라는 에피폴라 (epipolar) 기하를 이용한 안정성 분석기법이 있다 (Habib *et al.*, 2006; Habib *et al.*, 2014).

2.1 단일 카메라 안정성 분석

ROT 안정성 분석기법은 두 시기에 걸쳐 결정한 단일 카메라의 내부표정요소를 이용하여 카메라의 투영중심을 고정된 후 카메라를 회전시켜 두 광속의 유사성을 평가하는 것이 특징이다. ROT 안정성 분석을 위해 투영중심에서 두 내부표정요소의 초점거리를 고려하여 왜곡이 있는 가상의 격자점을 정의한 후, 두 내부표정요소의 렌즈 왜곡계수를 고려하여 왜곡을 제거한다. 렌즈 왜곡이 제거된 사진좌표를 위(top view)에서 나타낸 모습은 Fig. 1과 같다.

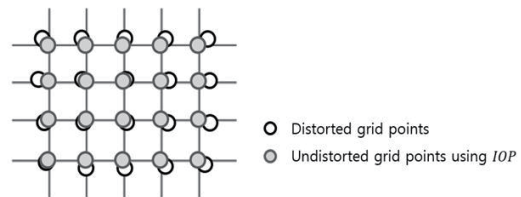


Fig. 1. Undistorted grid points using interior orientation parameters

Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 두 내부표정요소는 투영중심을 공유하나 초점거리가 같지 않을 수 있으므로 왜곡이 제거된 격

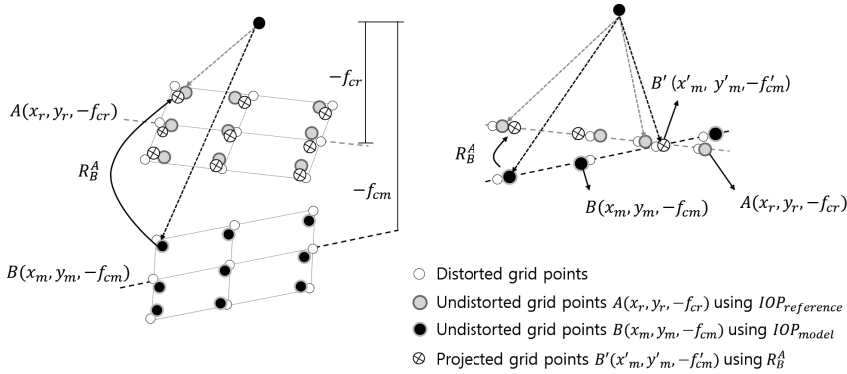


Fig. 2. Single camera stability analysis (ROT)

자점은 평행하지 않다. 첫 번째 시기에 결정된 카메라의 내부표정요소를 기준 카메라의 내부표정요소라 하고, 두 번째 시기에 결정된 카메라의 내부표정요소를 종속 카메라의 내부표정요소라 할 때, 왜곡이 제거된 격자점을 동일 평면상에 일치시키기 위해 종속 격자점 $B(x_m, y_m)$ 에서 기준 격자점 $A(x_r, y_r)$ 로 회전하는 3차원 회전행렬(R_B^A)을 결정해야 한다. 이를 위해 초깃값이 필요하지 않은 쿼터니언(quaternion)을 이용하여 3차원 회전행렬을 결정한다(Ken, 1985).

where, A denotes reference coordinate systems, B denotes model coordinate systems, f_c denotes a focal length, B' denotes projected grid points from model to reference coordinate systems, R_B^A denotes 3D rotation matrix from model to reference coordinate systems.

쿼터니언을 이용하여 3차원 회전행렬을 결정하기 위해 먼저 Eq. (1)과 같이 각 데이터의 평균을 이용하여 좌표를 정규화함으로써 축척 계수를 소거한다.

$$A_n = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ -f_{cr} \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} \bar{x}_r \\ \bar{y}_r \\ -\bar{f}_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r' \\ y_r' \\ -f_{cr}' \end{bmatrix}_i, B_n = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ -f_{cm} \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} \bar{x}_m \\ \bar{y}_m \\ -\bar{f}_{cm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m' \\ y_m' \\ -f_{cm}' \end{bmatrix}_i \quad (1)$$

where, A_n denotes normalized reference coordinate systems, B_n denotes normalized model coordinate systems, (\bar{x}, \bar{y}) denote the average of the coordinates of the image plane, \bar{f}_c denotes the average of focal length, i denotes the number of points.

서로 다른 시기에 걸쳐서 결정된 내부표정요소에서 미지의 3차원 회전행렬(R_B^A)을 결정하기 위해, 정규화된 종속 격자점

을 3차원 회전하여 정규화된 기준 격자점으로 변환하는 관계식을 구성한 후 잔차에 대한 식으로 구성하면 Eq. (2)와 같다.

$$A_n = R_{B_n}^{A_n} B_n + e \quad (2)$$

$$e = A_n - R_{B_n}^{A_n} B_n$$

where, $R_{B_n}^{A_n}$ denotes 3D rotation matrix from normalized model to normalized reference coordinate systems, e denotes a residual vector.

Eq. (2)에서 잔차의 제곱의 합이 최소가 되는 3차원 회전행렬을 구하기 위한 조건을 식으로 나타내면 Eq. (3)과 같으며 이를 통해 잔차 제곱의 합이 최소가 되기 위해 $(B_n)^T (R_{B_n}^{A_n})^T A_n$ 가 최대가 되어야 하는 것을 알 수 있다.

$$\min_{R_{B_n}^{A_n}} \sum_{i=1}^k e_i^T e_i = \min_{R_{B_n}^{A_n}} \sum_{i=1}^k (A_n - R_{B_n}^{A_n} B_n)^T (A_n - R_{B_n}^{A_n} B_n) \quad (3)$$

$$= \min_{R_{B_n}^{A_n}} \sum_{i=1}^k \{ (A_n)^T A_n + (B_n)^T B_n - 2 \{ (B_n)^T (R_{B_n}^{A_n})^T A_n \} \}$$

Eq. (3)은 오일러 각을 이용한 3차원 회전행렬을 구하는 식이므로 이를 쿼터니언을 이용한 회전으로 나타내면 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다. 누적된 \dot{B}_n 행렬을 고유값 분해하여 최대 고유값을 가진 고유벡터를 이용하여 회전행렬을 결정할 수 있다(Mazaheri and Habib, 2015).

$$\max_q \sum_{i=1}^k (\dot{q} \dot{B}_n q^*)_i \cdot A_n \quad (4)$$

$$R_{B_n}^{A_n} B_n = \dot{q} \dot{B}_n q^*$$

where, \hat{q} denotes a unit quaternion, \hat{q}^* denotes the conjugate of a unit quaternion, A_n denotes the unit quaternion of normalized reference coordinates, B_n denotes the unit quaternion of normalized model coordinates.

ROT 안정성 분석에서는 Eq. (4)에서 계산된 3차원 회전행렬 ($R_{B_n}^{A_n}$)과 왜곡을 제거한 종속 카메라의 정규화된 좌표(B_n)를 이용하여 Eq. (5)와 같이 기준 카메라의 사진 면에 일치시킨 후, Eq. (6)을 이용하여 두 격자점 좌표의 차이(spatial offset)를 구한다. 두 격자점 좌표의 차이에 대해 평균제곱근오차를 계산하여 단일 카메라의 안정성을 판단한다.

$$B'_n = R_{B_n}^{A_n} B_n \quad (5)$$

$$\Delta = A_n - B'_n \quad (6)$$

where, B'_n denotes projected grid points from model to reference coordinate systems, Δ denotes spatial offsets between reference grid points and projected model grid points.

2.2 스테레오 카메라 안정성 분석

스테레오 카메라 안정성 분석은 Fig. 3과 같이 에피폴라 기하를 기반으로 다시기에 추정된 내부표정요소 및 상호표정요소를 이용하여 시차의 차이를 비교하는 것이 특징이다.

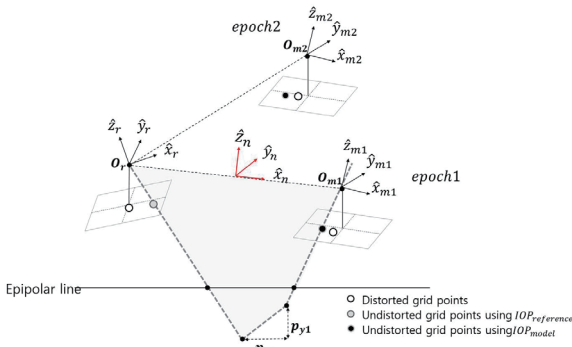


Fig. 3. Multi camera stability analysis

where, $\hat{x}_n, \hat{y}_n, \hat{z}_n$ denote the coordinate axes of the epipolar geometry, O_r denotes the perspective center of a reference camera, O_m denotes the perspective center of a model camera, p_x denotes a x-parallax, p_y denotes a y-parallax.

스테레오 카메라 안정성 분석을 위한 첫 번째 단계는 단일 카메라 안정성 분석과 같이 각 투영중심과 내부표정요소

의 초점거리를 고려하여 왜곡이 있는 가상의 격자점을 정의한 후, 각 내부표정요소의 렌즈 왜곡계수를 고려하여 왜곡을 제거한다.

다음으로 좌우 영상의 왜곡이 제거된 가상의 격자점이 동일 행에서 대응되기 위해 에피폴라 영상을 생성해야 한다. 에피폴라 영상의 사진좌표축은 원 영상의 외부표정요소를 기반으로 Eq. (7)을 이용하여 $\hat{x}_n, \hat{y}_n, \hat{z}_n$ 축 순으로 계산한다 (Kim et al., 2018).

$$\hat{x}_n = \frac{O_m - O_r}{\|O_m - O_r\|}, \hat{y}_n = \frac{\frac{\hat{z}_r + \hat{z}_m}{2} \times \hat{x}_n}{\left\| \frac{\hat{z}_r + \hat{z}_m}{2} \times \hat{x}_n \right\|}, \hat{z}_n = \hat{x}_n \times \hat{y}_n \quad (7)$$

where, $O_r = [X_{O_r}, Y_{O_r}, Z_{O_r}]^T$, $O_m = [X_{O_m}, Y_{O_m}, Z_{O_m}]^T$

특정 시기에 촬영된 스테레오 카메라 시스템은 기준 카메라와 종속 카메라 간의 내부표정요소와 상호표정요소를 알고 있으므로 이를 이용하여 기준 카메라와 종속 카메라의 3차원 사진좌표축($\hat{x}_r, \hat{y}_r, \hat{z}_r, \hat{x}_m, \hat{y}_m, \hat{z}_m$)과 에피폴라 영상의 3차원 사진좌표축($\hat{x}_n, \hat{y}_n, \hat{z}_n$)간의 회전 관계를 결정할 수 있다. 기준 카메라와 종속 카메라로부터 에피폴라 좌표계로의 회전 관계는 Eq. (8)을 이용하여 계산할 수 있다. 여기서, 모든 좌표축의 요소들은 단위벡터이므로 벡터 내적으로 표현할 수 있다.

$$R_{c_r}^{c_n} = \begin{bmatrix} \hat{x}_r \cdot \hat{x}_n & \hat{y}_r \cdot \hat{x}_n & \hat{z}_r \cdot \hat{x}_n \\ \hat{x}_r \cdot \hat{y}_n & \hat{y}_r \cdot \hat{y}_n & \hat{z}_r \cdot \hat{y}_n \\ \hat{x}_r \cdot \hat{z}_n & \hat{y}_r \cdot \hat{z}_n & \hat{z}_r \cdot \hat{z}_n \end{bmatrix},$$

$$R_{c_m}^{c_n} = \begin{bmatrix} \hat{x}_m \cdot \hat{x}_n & \hat{y}_m \cdot \hat{x}_n & \hat{z}_m \cdot \hat{x}_n \\ \hat{x}_m \cdot \hat{y}_n & \hat{y}_m \cdot \hat{y}_n & \hat{z}_m \cdot \hat{y}_n \\ \hat{x}_m \cdot \hat{z}_n & \hat{y}_m \cdot \hat{z}_n & \hat{z}_m \cdot \hat{z}_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

where, $R_{c_r}^{c_n}$ denotes 3D rotation matrix from reference camera to epipolar coordinate systems, $R_{c_m}^{c_n}$ denotes 3D rotation matrix from model camera to epipolar coordinate systems.

Eq. (8)에서 결정된 3차원 회전행렬과 Eq. (9)의 공선조건식을 통해 사진좌표와 에피폴라 사진좌표 간의 관계를 Eq. (10)과 같이 변형된 공선조건식으로 나타낼 수 있다. Eq. (10)에서 x_n 과 y_n 식을 f_n 식으로 나누면 기준 카메라와 종속 카메라의 사진좌표에서 에피폴라 영상의 사진좌표로 변환할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X - X_O \\ Y - Y_O \\ Z - Z_O \end{bmatrix} = \lambda R_c^n(t) \begin{bmatrix} x - x_p - \Delta x \\ y - y_p - \Delta y \\ -f_c \end{bmatrix} = \lambda_n R_c^m(t) \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ -f_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ -f_n \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{\lambda_n} R_m^{c_n}(t) R_c^m(t) \begin{bmatrix} x - x_p - \Delta x \\ y - y_p - \Delta y \\ -f_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

where, $[X \ Y \ Z]^T$ denote a ground control point, $[X_O \ Y_O \ Z_O]^T$ denote the camera position, λ denotes a scale factor, t denotes an epoch time, $[x_p \ y_p]^T$ denote a principal point, Δ denotes lens distortions.

에피폴라 영상에서 Eq. (11)을 이용하여 스테레오 카메라를 구성하고 있는 기준 카메라와 종속 카메라 간의 x-시차와 y-시차를 계산할 수 있다. 다시기에 추정된 스테레오 카메라의 내부표정요소와 상호표정요소를 통해 각 시기에 대한 시차를 Eq. (11)을 이용하여 구한 후, Eq. (12)와 같이 시기 간 시차의 차이(시차차)를 구한다. 시차차가 작을수록 다시기에 추정된 스테레오 카메라의 내부표정요소와 상호표정요소는 안정적이라고 판단할 수 있으며, 시차차가 클수록 불안정하다고 판단할 수 있다.

$$\begin{aligned} px(t) &= ref_x_n - model_x_n \\ py(t) &= ref_y_n - model_y_n \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} dpx &= px_{t(2)} - px_{t(1)} \\ dpy &= py_{t(2)} - py_{t(1)} \end{aligned} \quad (12)$$

where, px denotes an x-parallax and py denotes a y-parallax in epipolar image, $[ref_x_n \ ref_y_n]^T$ denote the coordinates converted from reference camera coordinate to the epipolar image plane, $[model_x_n \ model_y_n]^T$ denote the coordinates converted from model camera coordinate to the epipolar image plane. $[dpx \ dpy]$ denote the parallax difference between two epochs.

3. 실험

다시기에 걸쳐서 추정된 스테레오 카메라의 안정성을 분석하기 위한 절차는 Fig. 4와 같다. 스테레오 카메라를 이용하여 2020년 9월, 11월, 그리고 12월, 총 3회에 걸쳐 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하였다. 추정된 다시기의 스테레오 카메라

의 내부표정요소와 상호표정요소를 기반으로 단일 카메라와 스테레오 카메라의 안정성을 분석하고, 검사점을 활용한 3차원 좌표의 정확도 검증을 수행하였다.

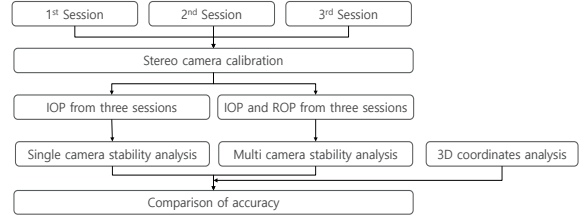


Fig. 4. Flow chart for a stereo-camera stability analysis

3.1. 스테레오 카메라 캘리브레이션

스테레오 카메라 시스템은 Fig. 5와 같이 동일 기종의 두 대의 Canon 800D 카메라로 구성되어 있으며 카메라 간의 기선 길이는 약 0.7m이다. 무선 동조기를 이용하여 좌우 영상이 동시에 촬영할 수 있도록 하였다. Table 1에 나타난 것과 같이 셔터 속도는 1/50초로 설정하였으며 초점거리는 35mm이고 스테레오 카메라의 안정성 분석 실험 기간 내 변동이 없도록 수동모드를 적용하였다.

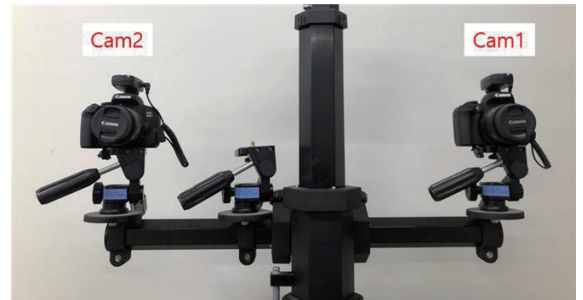


Fig. 5. Stereo-camera

Table 1. Specifications of a stereo-camera

Camera	Width (pixel)	Height (pixel)	ISO	Iris	Shutter speed (sec)	Focal length (mm)	Sensor Size (mm)
Cam1	6,000	4,000	400	F5.6	1/50	35	22.3
Cam2							×14.9

스테레오 카메라의 캘리브레이션을 위해 가로×세로 크기가 170×90cm인 3차원 체커보드를 사용하였다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 체커보드는 흑백 패턴으로 이루어져 있으며 1cm 입체 타겟 5개, 2cm 입체 타겟 4개를 포함하고 있다(Kim and Kwon,

2020). 캘리브레이션 영상 촬영은 스테레오 카메라를 제자리에 고정된 후 약 2.7m 거리에서 체커보드의 위치와 자세에 변화를 주면서 약 26장의 영상을 촬영하였다.

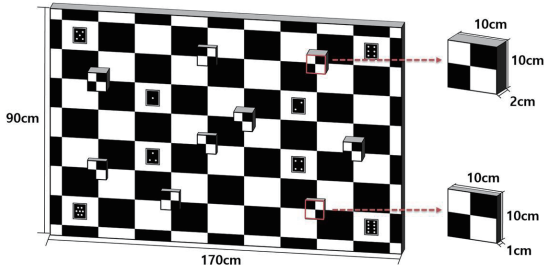


Fig. 6. Checkerboard for a stereo-camera calibration

기준 카메라와 종속 카메라 간의 관계를 고려한 수정된 공선조건식을 이용하여 스테레오 카메라 캘리브레이션을 수행하였으며, 본 연구에서는 좌측 카메라(Cam1)를 기준으로 종속적 상호표정을 통해 두 카메라 간의 관계를 계산하였다(Lari et al.,

2013; Kim and Hong, 2018; Lee, 2019).

Table 2는 3회에 걸쳐 추정된 스테레오 카메라 캘리브레이션의 내부표정요소를 나타내며 사후표준편차($\hat{\sigma}_0$)는 $\pm 0.002\text{mm}$ 로 나타났으며, 1픽셀의 크기가 약 0.004mm 인 것을 고려하여 이를 픽셀 단위로 변환한 결과 각 ± 0.49 픽셀, ± 0.58 픽셀, ± 0.57 픽셀로 모두 1픽셀 이내로 나타났다.

Table 3은 스테레오 카메라를 구성하고 있는 기준 카메라와 종속 카메라 간의 관계인 상호표정요소를 추정된 결과이다. 상호표정요소 중 위치를 나타내는 레버암(lever-arm)의 표준편차는 모두 $\pm 1\text{mm}$ 이내로 나타났으며, 자세를 나타내는 보어사이트(boresight)의 표준편차는 11월과 12월에 다소 높게 나타났다.

3.3. 스테레오 카메라의 안정성 분석

Table 4는 단일 카메라와 스테레오 카메라의 안정성 분석 결과를 나타낸 것이다. ROT 분석기법을 이용한 단일 카메라 안정성 분석 결과 평균제곱근오차는 $\pm 0.001\text{mm}$ 이며, 이를 픽셀 단위로 변환하면 ± 0.38 픽셀로 나타났다. 단일 카메라 캘리브

Table 2. Interior orientation parameters from three sessions

(unit: mm)

Date	Cam	stdev	IOP \pm stdev			Distortion parameters \pm stdev	
		$\hat{\sigma}_0$	x_p	y_p	f_c	k_1	k_2
Sep 2020	Cam1	± 0.002	-0.102 $\pm 1.33\text{E-}03$	-0.308 $\pm 2.13\text{E-}03$	33.890 $\pm 3.02\text{E-}03$	2.77E-12 $\pm 3.29\text{E-}13$	1.76E-19 $\pm 2.16\text{E-}20$
	Cam2		-0.173 $\pm 1.45\text{E-}03$	-0.152 $\pm 1.96\text{E-}03$	34.644 $\pm 3.71\text{E-}03$	3.21E-12 $\pm 1.36\text{E-}13$	1.52E-19 $\pm 7.47\text{E-}21$
Nov 2020	Cam1	± 0.002	-0.092 $\pm 2.23\text{E-}03$	-0.314 $\pm 3.25\text{E-}03$	33.865 $\pm 3.49\text{E-}03$	2.88E-12 $\pm 4.33\text{E-}14$	1.70E-19 $\pm 3.55\text{E-}21$
	Cam2		-0.185 $\pm 2.32\text{E-}03$	-0.154 $\pm 3.35\text{E-}03$	34.635 $\pm 3.64\text{E-}03$	3.28E-12 $\pm 4.43\text{E-}14$	1.52E-19 $\pm 3.63\text{E-}21$
Dec 2020	Cam1	± 0.002	-0.092 $\pm 2.22\text{E-}03$	-0.304 $\pm 3.22\text{E-}03$	33.874 $\pm 3.04\text{E-}03$	2.83E-12 $\pm 4.63\text{E-}14$	1.66E-19 $\pm 3.92\text{E-}21$
	Cam2		-0.184 $\pm 2.36\text{E-}03$	-0.154 $\pm 3.53\text{E-}03$	34.617 $\pm 3.06\text{E-}03$	3.26E-12 $\pm 4.71\text{E-}14$	1.45E-19 $\pm 4.04\text{E-}21$

Table 3. Relative orientation parameters from three sessions

Date	b_x (m \pm mm)	b_y (m \pm mm)	b_z (m \pm mm)	b_w ($^\circ \pm ''$)	b_φ ($^\circ \pm ''$)	b_k ($^\circ \pm ''$)
Sep 2020	0.665 $\pm 1.18\text{E-}04$	-0.002 $\pm 5.22\text{E-}05$	-0.099 $\pm 2.30\text{E-}04$	0.351 $\pm 8.43\text{E-}04$	14.045 $\pm 9.36\text{E-}04$	-0.190 $\pm 5.29\text{E-}04$
Nov 2020	0.665 $\pm 3.19\text{E-}01$	-0.003 $\pm 4.51\text{E-}02$	-0.098 $\pm 2.31\text{E-}01$	0.354 $\pm 2.04\text{E+}01$	14.088 $\pm 1.52\text{E+}01$	-0.192 $\pm 5.61\text{E+}00$
Dec 2020	0.666 $\pm 3.08\text{E-}01$	-0.002 $\pm 3.45\text{E-}02$	-0.099 $\pm 1.84\text{E-}01$	0.350 $\pm 2.28\text{E+}01$	14.076 $\pm 1.63\text{E+}01$	-0.196 $\pm 6.04\text{E+}00$

Table 4. Accuracy comparisons of stability analysis

(unit: mm)

	Date	Comparison I		Comparison II		Comparison III	
		Sep 2020	Nov 2020	Sep 2020	Dec 2020	Nov 2020	Dec 2020
	Camera	Cam1	Cam2	Cam1	Cam2	Cam1	Cam2
Single camera stability analysis	dx RMSE	0.002	0.002	0.002	0.002	0.000	0.000
	dy RMSE	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000
	RMSE	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.000
Multi camera stability analysis	dx RMSE	±0.018		±0.008		±0.012	
	dy RMSE	±0.012		±0.005		±0.008	
	RMSE	±0.025		±0.012		±0.017	

레이션 수행 시 체커보드의 타겟점을 사용자가 약 1/2~2/3픽셀 정확도로 관측한다는 가정을 하면 ROT 분석기법을 이용한 다시기의 단일 카메라 캘리브레이션 결과는 안정적이라고 판단할 수 있다.

스테레오 카메라 안정성 분석기법은 내부표정요소와 상호표정요소를 이용하므로 에피플라 기하를 이용한 시차는 상대적인 값이다. 따라서 기준 시기의 가상의 격자를 참값으로 설정한 후 비교 시기의 가상 격자점과의 시차차를 통해 평균제곱근오차를 계산하였다. 스테레오 카메라 안정성 분석 결과 다시기 간 시차차의 평균제곱근오차는 각 $\pm 0.025\text{mm}$, $\pm 0.012\text{mm}$, $\pm 0.017\text{mm}$ 로 나타났으며 이를 픽셀 단위로 변환하면 약 ± 6.79 픽셀, ± 3.1 픽셀, ± 4.45 픽셀 차이로 나타났다. 스테레오 카메라 캘리브레이션 수행 시 촬영거리가 약 2.7m인 것을 고려하여 비례식(지상해상도:픽셀크기=촬영거리:초점거리)을 통해 촬영거리와 초점거리에 따른 1 픽셀에 대한 지상해상도를 구할 수 있다. 이를 각 픽셀 단위의 평균제곱근오차에 대해 지상해상도를 곱하여 나타낸 지상해상도 차이의 결과는 약 $\pm 0.002\text{mm}$, $\pm 0.001\text{mm}$, $\pm 0.001\text{mm}$ 로 모두 $\pm 0.01\text{mm}$ 이내로 나타났다. 이를 통해 에피플라 영상에서 구한 시차차가 약 $\pm 3\sim\pm 6$ 픽셀로 나타났음에도 불구하고 실제 지상에서의 변화량의 영향이 적으므로 스테레오 카메라 캘리브레이션 결과는 안정적이라고 판단할 수 있다.

스테레오 카메라의 안정성 분석 결과가 단일 카메라 안정성 분석의 평균제곱근오차보다 다소 크게 나타난 이유는 카메라의 구조의 내부적인 불안정성으로 인해 발생한 것이 아니라 스테레오 카메라 캘리브레이션 및 3차원 좌표 검증 시 스테레오 카메라를 이동하는 과정에서 상호표정요소에 영향을 준 것으로 판단된다.

3.4. 검사점을 이용한 3차원 위치 검증

단일 카메라와 스테레오 카메라의 안정성 분석은 지상의 기

준점을 이용하지 않고 사진 면에서 발생하는 변화를 통해 안정성을 판단한 것이다. 본 연구에서는 영상과 카메라 간의 관계뿐만 아니라 지상 기준점의 3차원 좌표를 계산하여 실제 내부표정요소와 상호표정요소의 변화에 따른 3차원 좌표의 정확도 검증을 수행하였다.

3차원 좌표의 정확도 검증을 위해 Fig. 7과 같이 벽면에 스티커 8점을 부착한 후 토탈스테이션을 이용하여 검사점의 3차원 좌표를 관측하였다. 관측에 활용된 토탈스테이션은 SOKKIA FX-101 모델이며 수평 및 수직 위치 정확도는 $\pm 3\text{mm}$ 이다.

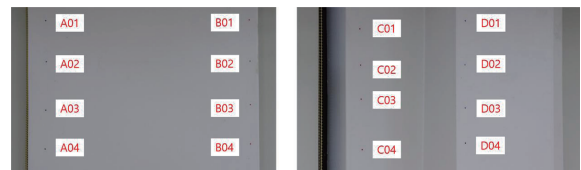


Fig. 7. Checkpoints for evaluating the accuracy of 3D coordinates

세 번의 스테레오 카메라 캘리브레이션 수행 시 촬영 거리를 고려하여 벽면의 검사점을 촬영하였다. Table 5는 토탈스테이션을 이용하여 결정한 검사점의 3차원 좌표와 다시기에 추정된 내부표정요소와 상호표정요소를 기반으로 공간전방교회법을 이용하여 검사점의 3차원 좌표를 결정한 결과를 나타낸 것이다. 결정된 3차원 좌표는 좌측 카메라를 기준으로 한 좌표이므로 검사점 간의 3차원 거리를 계산하여 정확도 검증을 수행하였다.

Table 6은 토탈스테이션으로 관측한 검사점의 3차원 좌표와 스테레오 카메라를 이용하여 결정한 3차원 좌표로 계산한 검사점 간의 거리 차이를 비교한 표이다. Table 6을 통해 다시기의 내부표정요소와 상호표정요소를 이용하여 구한 검사점 간 거리와 토탈스테이션을 이용하여 결정한 검사점 간 거리의 평균

Table 5. 3D coordinates of checkpoints using a stereo-camera

(unit: m)

Point ID		A01	A04	B01	B04	C01	C04	D01	D04
Total station	X	-1.839	-1.844	-0.963	-0.96	1.023	1.031	1.376	1.375
	Y	0.816	0.248	0.824	0.265	0.783	0.339	0.801	0.361
	Z	3.702	3.697	3.922	3.921	4.419	4.421	4.272	4.27
Sep 2020	X	-0.383	-0.385	0.521	0.527	-0.025	-0.015	0.352	0.353
	Y	0.469	-0.098	0.484	-0.076	0.431	-0.015	0.452	0.01
	Z	-2.574	-2.564	-2.596	-2.585	-2.617	-2.615	-2.55	-2.538
Nov 2020	X	-0.512	-0.515	0.386	0.391	-0.116	-0.108	0.232	0.23
	Y	0.476	-0.092	0.487	-0.073	0.433	-0.011	0.454	0.014
	Z	-2.514	-2.504	-2.631	-2.621	-2.45	-2.443	-2.29	-2.278
Dec 2020	X	-0.474	-0.476	0.431	0.436	-0.138	-0.13	0.243	0.243
	Y	0.481	-0.088	0.494	-0.067	0.445	-0.001	0.464	0.023
	Z	-2.385	-2.374	-2.432	-2.422	-2.305	-2.301	-2.258	-2.248

Table 6. Accuracy comparisons using distances between checkpoints

(unit: m)

ID	TS	Session			TS-A	TS-B	TS-C
		Sep 2020	Nov 2020	Dec 2020			
A01-A04	0.568	0.567	0.569	0.569	0.001	-0.001	-0.001
A01-B01	0.903	0.905	0.906	0.906	-0.002	-0.003	-0.003
A01-B04	1.060	1.061	1.063	1.063	-0.001	-0.003	-0.002
C01-C04	0.444	0.445	0.445	0.446	-0.001	-0.001	-0.001
C01-D01	0.383	0.384	0.384	0.384	-0.001	-0.001	-0.002
Mean					0.001	0.002	0.002
RMSE					0.001	0.002	0.002

제공근오차는 각각 $\pm 1\text{mm}$, $\pm 2\text{mm}$, $\pm 2\text{mm}$ 로 나타났다. 이를 통해 다시기에 추정된 스테레오 카메라의 내부표정요소와 상호표정요소를 적용한 3차원 좌표의 거리정확도는 높은 것을 알 수 있었다. 따라서 다시기에 추정된 스테레오 카메라의 내부표정요소와 상호표정요소는 안정적이라고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 스테레오 카메라의 안정성 분석을 위해 단일 카메라와 스테레오 카메라의 안정성 분석기법, 그리고 추정된 내부표정요소와 상호표정요소를 이용한 3차원 위치 검증 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 다시기에 걸쳐서 결정한 카메라의 내부표정요소가 약 ± 3 픽셀로 변동되었으나, 단일 카메라 안정성 분석기법을 통해 사진 면에서 발생한 영향을 분석한 결과 ROT 안정성 분석기법의 평균제공근오차는 $\pm 0.001\text{mm}$ 로 나타났다. 픽셀 단위

로 변환하면 ± 0.38 픽셀로 나타나 회전요소를 고려한 ROT 안정성 분석기법을 통해 개별 카메라의 내부표정요소는 안정적으로 판단되었다.

둘째, 스테레오 카메라 안정성 분석기법을 통해 다시기 간에 피콜라 영상에서 시차치의 평균제공근오차는 각 $\pm 0.025\text{mm}$, $\pm 0.012\text{mm}$, $\pm 0.017\text{mm}$ 로 나타났다. 스테레오 카메라의 안정성 분석기법의 경우 단일 카메라의 안정성 분석기법보다 평균 제공근오차가 다소 크게 나타났으나, 픽셀 단위의 시차치의 평균 제공근오차를 스테레오 카메라 캘리브레이션 수행 시 촬영 거리가 약 2.7m인 것을 고려하여 지상해상도로 변환한 결과 모두 $\pm 0.01\text{mm}$ 이내로 나타나 지상에서의 변화량의 영향이 적으므로 스테레오 카메라의 내부표정요소와 상호표정요소는 안정적으로 판단되었다.

셋째, 다시기에 결정한 내부표정요소와 상호표정요소에 변동이 있고 사후표준편차가 각기 달랐으나, 추정된 표정요소를 이용하여 3차원 좌표를 계산한 결과 거리정확도가 최대

$\pm 2\text{mm}$, 최소 $\pm 0.5\text{mm}$ 로 나타났다. 이를 통해 스테레오 카메라 안정성 분석기법에서 약 $\pm 3 \sim \pm 6$ 픽셀의 평균제곱근오차가 발생했으나 3차원 좌표 결정을 통해 실제 검사점 간의 거리와 차이가 크지 않아 스테레오 카메라의 내부표정요소와 상호표정요소는 안정적으로 판단되었다.

향후 동일 스테레오 카메라 시스템을 이용하여 추가적인 스테레오 캘리브레이션을 수행한다면 내부표정요소와 상호표정요소의 장기간 변화를 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2018R1D1A1B07045817).

References

- Cardenal, J., Mata, E., Castro, P., Delgado, J., Hernandez, M.A., Perez, J.L., Ramos, M., and Torres, M. (2004), Evaluation of a digital non-metric camera (Canon D30) for the photogrammetric recording of historical buildings, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 35, No. B5, pp. 564-569.
- Escalera, A. and Armingol, J.M. (2010), Automatic Chessboard Detection for Intrinsic and Extrinsic Camera Parameter Calibration, *Sensors*, Vol. 10, No. 3, pp. 2027-2044.
- Fraser, C. (2006), Zoom-dependent camera calibration in digital close-range photogrammetry, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 72, No. 9, pp. 1017-1026.
- Habib, A., Datchev, I., and Kwak, E.J. (2014), Stability analysis for a multi-camera photogrammetric system, *Sensors*, Vol. 14, No. 8, pp. 15084-15112.
- Habib, A., Pullivelli, A., Mitishita, E., Ghanma, M., and Kim, E.M. (2006), Stability analysis of low-cost digital cameras for aerial mapping using different georeferencing techniques, *The Photogrammetric Record*, Vol. 21, No. 113, pp. 29-43.
- Hong, Y., Ren, G., and Liu, E. (2015), Non-iterative method for camera calibration, *Optics Express*, Vol. 23, No. 18, pp. 23992-24003.
- Jeong, S. (2011), Evaluation of long-term stability of interior orientation parameters of a non-metric camera, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 29, No. 3, pp. 283-291. (in Korean with English abstract)
- 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)
- Kim, E.M. (2020), *Techniques of Photogrammetry and Computer Vision*, Goomibook, Seoul.
- Kim, E.M. and Hong, S.P. (2018), Calibration comparison of single camera and stereo camera, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 4, pp. 295-303. (in Korean with English abstract)
- Kim, E.M. and Kwon, S.I. (2018), Automatic target recognition for camera calibration, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 6, pp. 525-534. (in Korean with English abstract)
- Kim, E.M. and Kwon, S.I. (2020), Comparison of the accuracy of stereo camera calibration according to the types of checkerboards, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 38, No. 6, pp. 511-519. (in Korean with English abstract)
- Kim, E.M., Choi, H.S., and Hong, S.P. (2018), Generation of epipolar image from drone image using direction cosine, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 4, pp. 271-277. (in Korean with English abstract)
- Lari, Z., Habib, A., Mazaheri, M., and Al-Durgham, K. (2013), 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, D.W. (2019), Estimation of rotation of stereo cameras based on the properties of frequency response of a scene for camera calibration, *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 27, No. 2, pp. 125-132. (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.
- Mitishita, E., Côrtes, J., Centeno, J., and Machado, A. (2009), Small-format digital camera : a study into stability analysis of the interior orientation parameters through temperature

variation, *Proceedings of the 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Presidente Prudente, Sao Paulo, Brazil*, pp. 1-7.

Mitishita, E., Côrtes, J., Centeno, J., Machado, A., and Martins, M. (2010), Study of stability analysis of the interior orientation parameters from the small-format digital camera using on-the-job calibration, *Proceedings of the The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS Convergence in Geomatics—Shaping Canada's Competitive Landscape. Calgary, Canada*, 7p.

Shoemake, K. (1985), Animating rotation with quaternion curves, *Computer Graphics*, Vol. 19, No. 3, pp. 245-254.

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.