

쿼터니언을 이용한 반자동 카메라 캘리브레이션 Semi-automatic Camera Calibration Using Quaternions

김의명¹⁾

Kim, Eui Myoung

Abstract

The camera is a key element in image-based three-dimensional positioning, and camera calibration, which properly determines the internal characteristics of such a camera, is a necessary process that must be preceded in order to determine the three-dimensional coordinates of the object. In this study, a new methodology was proposed to determine interior orientation parameters of a camera semi-automatically without being influenced by size and shape of checkerboard for camera calibration. The proposed method consists of exterior orientation parameters estimation using quaternion, recognition of calibration target, and interior orientation parameter determination through bundle block adjustment. After determining the interior orientation parameters using the chessboard calibration target, the three-dimensional position of the small 3D model was determined. In addition, the horizontal and vertical position errors were about $\pm 0.006\text{m}$ and $\pm 0.007\text{m}$, respectively, through the accuracy evaluation using the checkpoints.

Keywords : Camera Calibration, Quaternion, Checkerboard, Interior Orientation Parameters, Close Range Photogrammetry

초 록

영상을 기반으로 하는 3차원 위치결정에서 카메라는 핵심적인 요소이며 이러한 카메라의 내부적인 특성을 제대로 결정하는 카메라 캘리브레이션 작업은 대상물의 3차원 좌표를 결정하기 위해서 필수적으로 선행되어야 할 과정이다. 본 연구에서는 캘리브레이션을 위한 체크보드의 크기와 형태에 영향을 받지 않고 반자동으로 카메라의 내부표정요소를 결정하는 방법론을 제안하였다. 제안한 방법론은 쿼터니언을 이용한 외부표정요소 추정, 캘리브레이션 타겟의 인식, 번들블록조정을 통한 내부표정요소 매개변수 결정으로 구성되어 있다. 체크보드 형태의 캘리브레이션 타겟을 이용하여 내부표정요소를 결정한 후 소규모 3차원 모형에 대한 3차원 위치를 결정하였으며 검사점을 이용한 정확도 평가를 통해서 수평위치와 수직위치 오차는 각각 약 $\pm 0.006\text{m}$ 와 $\pm 0.007\text{m}$ 를 얻을 수 있었다.

핵심어 : 카메라 캘리브레이션, 쿼터니언, 체크보드, 내부표정요소, 근거리 사진측량

1. 서론

사진측량 및 컴퓨터비전에서 카메라를 이용하여 3차원 위치를 결정할 때 가장 먼저 선행되어야 할 작업 중의 하나는 카메라의 초점거리, 주점위치, 렌즈왜곡계수와 같은 내부적인 특성을 정확하게 파악하는 것이다. 이러한 카메라의 내부적인 특성을 파악하는 것을 카메라 캘리브레이션(calibration)이라고 하고, 카메라 캘리브레이션을 수행하고 나면 3차원 대상물의 점과 사진상에 맺힌 점과의 관계를 정확하게 설정할 수 있게 된다.

카메라 캘리브레이션과 관련한 다양한 연구가 국내외에서 수행되고 있으며 하나의 카메라 몸체에 연속사진과 4개의 경사사진을 촬영할 수 있는 다중촬영 카메라에 대한 카메라 캘리브레이션을 수행한 연구(Lee *et al.*, 2008), 비측량용 카메라의 공공측량 활용성을 평가하기 위해서 카메라 캘리브레이션을 수행하고 수치지도를 제작한 연구가 수행되었다(Seo and Lee, 2017). 핀홀 카메라, 어안렌즈 카메라와 같은 단일 카메라 뿐만 아니라 멀티 카메라를 통합해서 캘리브레이션할 수 있는 연구가 수행되기도 하였다(Houssineau *et al.*, 2016; Ramalingam and Sturm, 2017).

이러한 카메라 캘리브레이션을 수행할 때 번거로운 일중예 하나는 비선형 방정식인 공선조건식을 이용하기 때문에 카메라의 위치와 자세(외부표정요소)에 대한 초기값을 추정해서 넣어야 하는 것이다. 이에 따라 카메라에 GNSS/INS (Global Navigation Satellite System/Inertial Navigation System) 센서가 없거나 실내에서 촬영한 영상의 경우 초기값을 추정하는 것이 매우 어려운 실정이다. 하지만 쿼터니언(quaternion)을 이용하면 이러한 카메라의 외부표정요소에 대한 초기값을 설정하지 않아도 문제를 해결할 수 있다. 또한 Fig. 1과 같이 쿼터니언은 X,Y,Z축을 순차적으로 회전하는 오일러(Euler) 회전과 달리 임의의 축을 기준으로 회전하기 때문에 짐벌락(gimbal lock) 현상이 발생하지 않는 장점이 있다.

본 연구에서는 캘리브레이션 타겟의 크기와 형태에 크게 영향을 받지 않고 카메라 캘리브레이션을 수행할 수 있는 기법을 제안하는 것을 목적으로 하였다. 카메라 캘리브레이션을 수행하는 절차는 캘리브레이션 타겟의 초기 관측점을 이용한 카메라 외부표정요소 추정, 캘리브레이션 타겟의 인식, 번들블록조정(Bundle Block Adjustment, BBA)을 통한 캘리브레이션 매개변수 결정 순으로 이루어진다. 2장에서는 본 연구에서 제안하는 방법론을 기술하였고 3장에서는 체스보드(chessboard) 형태의 타겟을 이용하여 카메라 캘리브레이션을 수행하였다. 또한 4장에서는 캘리브레이션 결과의 검증에 위해서 소규모 3차원 모형을 제작하고 정확도 평가를 실시하였

다. 본 연구를 통한 결론은 5장에 기술하였다.

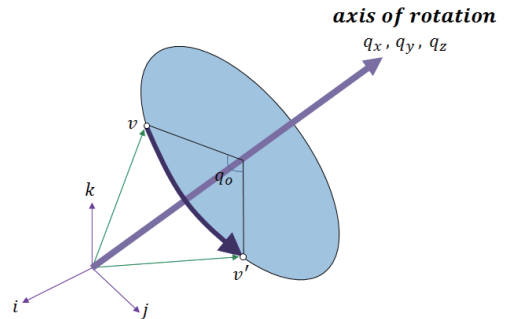


Fig. 1. Quaternion rotation

2. 카메라 캘리브레이션을 위한 타겟인식

2.1 캘리브레이션 타겟 인식을 위한 방법론

카메라 캘리브레이션은 카메라의 초점거리, 주점위치 그리고 카메라의 렌즈왜곡계수를 결정하는 과정이다. 카메라 렌즈 왜곡은 방사왜곡(radial distortion), 접선왜곡(tangential distortion) 등이 있으며, 방사왜곡은 주점에서 방사 방향으로 멀어질수록 3차원 대상물이 사진 상에서 이동되어서 맺히는 현상을 모델링하기 위한 것이고 접선왜곡은 카메라 렌즈를 통과하는 광축과 영상센서(CCD (Charge Coupled Device) 또는 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor))의 수평이 맞지 않아 발생하는 현상을 모델링하기 위한 것이다 (Lee, 2013). 본 연구에서 제안하는 카메라 캘리브레이션을 위한 타겟의 인식방법은 Fig. 2와 같다.

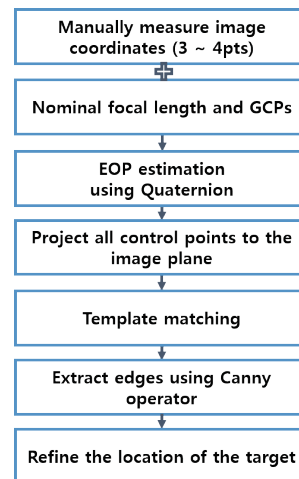


Fig. 2. Target detection for camera calibration

첫 번째 단계는 사용자가 타겟을 촬영한 영상에서 기준점 이 나타나는 3~4점의 영상좌표(또는 사진좌표)를 수동으로 관측한다. 영상좌표를 관측할 때 되도록이면 영상의 중심에서 거리가 먼 세 점 또는 네 점을 관측한다. 물론 규칙적으로 제작된 캘리브레이션 타겟의 경우에는 Harris, Forstner, SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 등의 특징점 추출 연산자를 이용하여 타겟의 모서리점 또는 중심점을 찾을 수 있다. 그러나 타겟의 순서를 정하는 부분에서 비슷한 패턴을 가지고 있는 타겟의 일부만 촬영된 영상이 있을 수 있기 때문에 반자동으로 영상좌표를 관측할 경우 기준점과 영상좌표와의 관계를 설정할 수 있는 장점이 있다.

두 번째 단계는 기준점과 영상좌표 그리고 공칭 초점거리 (nominal focal length)를 이용하여 각 사진의 외부표정요소를 결정한다. 캘리브레이션 타겟의 3차원 기준점 좌표는 직접 관측하여 알고 있거나 체스보드 형태의 미리 설계된 캘리브레이션 타겟의 경우 타겟 간의 간격을 통해서 사용자가 3차원 좌표값을 설정할 수도 있다. 외부표정요소는 초기값의 입력이 필요하지 않는 쿼터니언을 이용한 방법을 사용한다. 세 번째 단계는 카메라의 위치와 자세에 대한 외부표정요소가 결정되고 나면 공칭 초점거리와 기준점을 이용하여 영상에 나타난 지상의 3차원 좌표를 모두 영상에 역 투영하여 대략적인 영상좌표를 결정할 수 있다. 아직까지는 카메라의 내부표정요소를 알 수 없기 때문에 영상좌표가 실제 타겟의 위치에서 벗어나서 나타나게 된다.

네 번째 단계는 투영된 영상좌표를 기준으로 일정한 영역을 설정하여 템플릿(template) 정합을 수행하고 상관계수값이 설정한 임계값 이상인 영상좌표를 추출한다. 템플릿 정합을 통해서 결정된 영상좌표의 정확도를 높이기 위해서 탐색영역의 크기를 줄인 후 타겟 주변의 경계선을 추출한 후 경계선의 교점을 이용하여 수동으로 관측하지 않은 나머지 타겟의 위치를 자동으로 정제한다.

2.2 쿼터니언을 이용한 카메라의 외부표정요소 추정

사진측량에서 지상의 대상물과 카메라와의 관계는 주로 오일러 회전각을 이용하여 표현한다. 3차원 직교좌표계의 좌표축인 X, Y, Z에 대한 오일러 회전을 사진측량에서는 각각 ω , φ , κ 각으로 나타내며 이를 조합하여 지상좌표계와 사진좌표계간의 회전을 나타낼 수 있다. 이러한 오일러 회전을 이용할 때 발생하는 문제점은 3차원 회전을 순차적으로 적용하기 때문에 연산 순서에 따라 두 번째 회전을 수행할 때 회전축의 각이 90°로 회전하게 되면 두 축이 겹쳐지게 되며 이 때 겹친 두 축의 회전이 동일하게 되어 한 축의 회전이 소실되는 짐벌락

현상이 발생한다.

쿼터니언은 3차원 공간에서 회전각을 나타내는 1개의 실수 성분과 회전축을 나타내는 3개의 허수 성분으로 이루어진 일종의 4차원 벡터이다. 쿼터니언은 3차원 공간에서 회전각을 순차적으로 적용해서 발생하는 짐벌락 현상을 방지할 수 있고 공간상의 임의의 회전을 쉽게 나타낼 수 있는 특징이 있다 (Ahn and Chung, 2010; Ahn and Chung, 2011).

쿼터니언을 이용하여 외부표정요소를 추정하기 위해서 사용할 기하학적 조건은 단 사진에서 투영중심과 사진상의 점 그리고 지상점을 이용하여 일종의 공면조건을 구성하는 것이다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 투영중심 o 와 사진상의 두 점 a, b 를 지나는 벡터와 투영중심 O 와 지상의 두 점 A, B 를 지나는 벡터가 축적을 고려하면 동일하다는 것이다.

사진상의 두 점 a, b 와 투영중심 o 를 지나는 평면의 법선벡터를 \vec{n} 이라 하고 투영중심 O 와 지상점 A, B 로 이루어진 평면과 지상점 A, B 를 지나는 벡터 \vec{V} 에 직각인 벡터를 \vec{N} 이라고 하자.

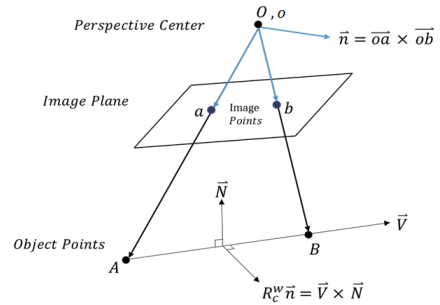


Fig. 3. Geometric constraint to derive the rotation matrix

그리고, 사진좌표계에서 지상좌표계로의 3차원 회전행렬을 R_c^w 라고 할 때 지상좌표계상의 두 벡터 \vec{V}, \vec{N} 과의 관계는 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다(Mazaheri and Habib, 2015).

$$v_i = \vec{V} \times \vec{N} - R_c^w \vec{n} \quad (1)$$

where $\vec{n}, \vec{V}, \vec{N}$ are unit vectors and R_c^w is a rotation matrix from camera to world coordinate system.

미지의 회전행렬 R_c^w 는 Eq. (2)를 이용하여 구하면 된다.

$$R_c^w \equiv \bar{C}_q^* C_q = \begin{bmatrix} q_0 & q_x & q_y & q_z \\ -q_x & q_0 & -q_z & q_y \\ -q_y & q_z & q_0 & -q_x \\ -q_z & -q_y & q_x & q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 - q_x - q_y - q_z \\ q_x & q_0 & -q_z & q_y \\ q_y & q_z & q_0 & -q_x \\ q_z & -q_y & q_x & q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ 0 & r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ 0 & r_{31} & r_{31} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

where $q = [q_o, q_x, q_y, q_z]^T$, $\|q\| = 1$ and q_o is a real part, q_x, q_y, q_z is a imaginary part.

또한, 회전행렬이 결정되고 나면 카메라의 투영중심 (X_o, Y_o, Z_o) 은 Eq. (3)을 이용하여 선형식으로 구할 수 있다 (Mazaheri and Habib, 2015).

$$\begin{bmatrix} R_3p & 0 & -R_1p \\ 0 & R_3p - R_2p \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} XR_3p - ZR_1p \\ YR_3p - ZR_2p \end{bmatrix} \quad (3)$$

where $p = (x, y, f)^T$, $R_1 = (r_{11}, r_{12}, r_{13})$, $R_2 = (r_{21}, r_{22}, r_{23})$, $R_3 = (r_{31}, r_{32}, r_{33})$, (X, Y, Z) is a ground coordinate, (X_o, Y_o, Z_o) is a position of the perspective center.

2.3 타겟의 인식

타겟의 초기 위치는 쿼터니언을 이용하여 추정된 외부표 정요소와 기준점 좌표를 영상에 모두 역투영하여 결정하였다. 카메라의 내부표정요소를 모두 고려할 수 없는 상태이므로 기준점을 영상에 역투영 하였을 경우 카메라의 주점에서 방사방향으로 멀어질 경우 타겟의 초기 위치가 다소 이동되어 나타날 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 타겟의 중심위치를 정확하게 추출하기 위해서 1차적으로 템플릿 정합을 수행하여 타겟의 중심 위치로 이동한 후 타겟의 중심위치를 좀 더 정제하기 위해서 타겟 주변의 경계선을 추출한 후 경계선의 교점을 이용하는 방법을 사용하였다.

템플릿 정합을 수행하기 위한 소규모 템플릿은 타겟 위치를 중심으로 하여 영상에서 2~3개 정도 선정하고 이를 기준으로 상하 및 좌우를 회전하여 부가적인 템플릿 영상을 생성하였다. 이러한 이유는 카메라 캘리브레이션을 위해서 대상을 촬영할 때 카메라의 회전과 기울기 등에 따라 템플릿의 크기와 모양이 달라질 수 있기 때문이다. 또한, 캘리브레이션 타겟의 경우 체스보드와 같이 규칙적인 경우만 있는 것이 아니라 목적에 따라 타겟 간의 거리와 간격이 달라질 수 있다. 또한 불규칙한 패턴을 갖는 타겟의 경우 타겟을 부착하는 과정에서 타겟의 상하 및 좌우가 달라질 수 있기 때문이다.

템플릿 정합을 수행할 때 공칭 초점거리를 이용하여 기준점을 영상에 역투영 하였기 때문에 초기 타겟의 위치좌표가 실제 위치에서 다소 벗어나서 나타날 수 있다. 이러한 이유로 템플릿 정합시 탐색영역의 크기는 실제 타겟의 크기보다 다소 크게 탐색범위를 설정하였다. 탐색범위는 타겟의 실제 영상크

기와 타겟 간의 거리 등을 고려하여 사용자가 입력할 수 있게 하였으며 미리 설정한 최소 상관계수 임계값 보다 높고 여러 상관계수 값들 중에서 가장 높은 값을 갖는 것을 정합점으로 결정하였다. 상관계수 값이 여러 개 있는 이유는 템플릿 영상이 여러 개 존재하기 때문이다.

템플릿 정합을 수행하여 타겟의 중심위치가 1차적으로 결정되고 나면 타겟 중심위치를 정제하여 정확한 위치를 결정하기 위해서 캐니(Canny) 경계선 추출 연산자를 이용하여 타겟 주변의 경계선을 추출 하였다. 추출된 경계선에 Fig. 4 와 같이 내부 원형을 적용하여 경계선의 중심부분을 제거하여 중간 영상을 생성한 후 다시 좀 더 큰 외부 원형을 적용하여 경계선이 교차하는 중심부가 원형으로 비워 있는 영상을 생성 하였다. 타겟의 중심위치를 정제하는 방법은 타겟 주변에서 추출한 경계선에서 타겟의 중심위치까지 떨어진 거리가 가장 최소가 되는 위치가 타겟의 중심위치라는 Eq. (4)를 적용하였다 (Habib et al., 2013).

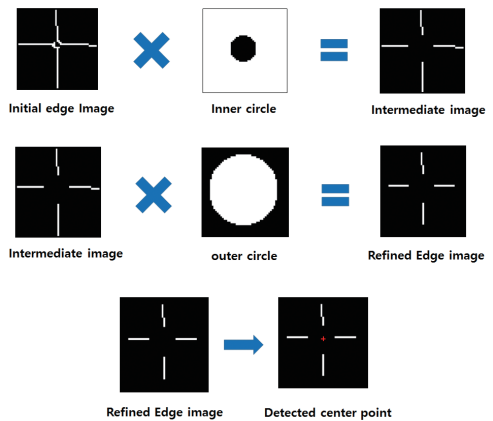


Fig. 4. Determining the center location of the target

$$\phi(x_c, y_c) = \sum \{ (x_c \cos(\theta_i) + y_c \sin(\theta_i) - \rho_i) p_i \}^2 \quad (4)$$

where p_i is a gradient magnitude of the edge image, θ_i is a orientation based on the gradient by the canny edge, ρ_i is a normal distance from the origin, (x_c, y_c) is a center location of the target image.

본 연구에서 사용한 타겟의 형태는 일반적으로 카메라 캘리브레이션을 수행할 때 많이 사용되는 체스보드 형태의 타겟 또는 원형 또는 사각형의 부착형 타겟을 기준으로 하였고 타겟의 중심은 흑색과 백색으로 구성된 것으로 가정하였다.

3. 카메라 캘리브레이션

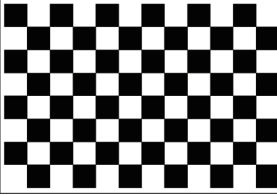
3.1 카메라와 체스보드 제원

카메라 캘리브레이션을 수행하기 위해서 사용한 카메라의 제원은 Table 1과 같다. 또한 캘리브레이션을 위해서 A1 크기로 출력된 체스보드 타겟의 제원은 Table 2와 같다.

Table 1. Camera specifications

Model	Canon 550D
Image size (columns×rows)	5184×3456 pixels
Pixel size	4.3 μ m
Nominal focal length	18.5mm (4300 pixels)

Table 2. Checkerboard target size

Type	Chessboard
Printed size	A1 (594mm×841mm)
Each grid size (columns×rows)	60mm (11×7)
Checkerboard image	

출력된 A1 크기의 체스보드 타겟은 평평한 벽면에 고정시키고 일정한 거리에서 카메라의 위치와 자세를 바꿔가면서 총 16장의 영상을 촬영하였다. 촬영된 체스보드 영상은 Fig. 5와 같다.

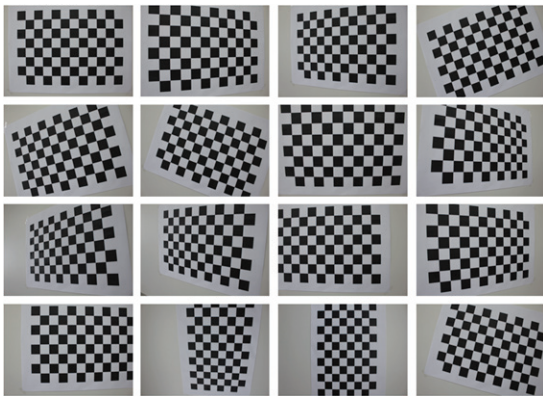


Fig. 5. Target images

비측량용 카메라의 렌즈왜곡을 보정할 때 카메라의 촬영 시야각(또는 화각)이 협각에서 초광각으로 커질수록 방사왜곡을 보정할 수 있는 계수를 추가하여 보정해야 한다. 카메라 렌즈가 다중의 볼록렌즈와 오목렌즈의 조합으로 구성되고 광축이 렌즈의 중심에서 편향되어 있을 때는 접선왜곡 계수를 추가적으로 보정해야 한다. 기준점 좌표와 영상좌표 그리고 공칭초점거리를 초기값으로 하여 카메라 캘리브레이션을 수행하였다. 카메라 캘리브레이션을 위한 모형식은 Eq. (5)와 같다. 카메라 렌즈의 왜곡은 k_1, k_2 매개변수를 이용한 방사방향 렌즈왜곡만을 모델링 하였다. 이러한 이유는 저가형의 비측량용 카메라의 경우 접선왜곡의 영향이 크지 않기 때문이다(Habib and Morgan, 2003).

$$x = x_0 - f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x$$

$$y = y_0 - f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y \quad (5)$$

$$\Delta x = (x - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$\Delta y = (y - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

where x, y are image coordinates, x_0, y_0 are principal points, f is a focal length, $m_{11} \sim m_{33}$ are the rotation elements from ground coordinate to image coordinate, (X, Y, Z) is a ground coordinate, (X_0, Y_0, Z_0) is a exposure station, $(\Delta x, \Delta y)$ is the compensations for the radial lens distortion, k_1, k_2 are the radial lens distortion parameters.

3.2 카메라 내부표정요소

카메라의 렌즈왜곡은 방사방향 왜곡계수 k_1, k_2 를 고려하여 모델링하였다. 촬영한 16장의 영상에서 영상의 중심에서 떨어져서 모서리점에 가까운 4점의 영상좌표를 관측한 후 반자동으로 영상에 나타난 체스보드 타겟의 위치를 결정한 후 BBA를 통해서 카메라의 내부표정요소를 결정하였으며 그 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 알 수 있듯이 BBA를 수행한 후 사후 분산값은 0.399 픽셀(pixel)로 나타났으며 내부표정요소에서 주점위치와 초점거리의 표준편차는 약 $\pm 0.966 \sim \pm 1.427$ 픽셀로 나타났다.

Fig. 6은 카메라 캘리브레이션을 수행하기 위해서 사용한 77개의 기준점을 이용하여 결정된 16장의 영상에 대한 카메라의 위치와 자세를 시각화한 것이다.

Table 3. Determined interior orientation parameters

$\hat{\sigma}_o^2$ (pixel)	IOP(pixel) \pm stdev(pixel)			Distortion parameters \pm stdev	
	x_0	y_0	f	k1 (pixel ²)	k2 (pixel ⁴)
0.3990	7.2752 ± 1.098	6.3958 ± 0.966	4312.7361 ± 1.427	-1.0289106E-08 $\pm 5.1432556E-11$	4.5964419E-16 $\pm 4.9652962E-18$

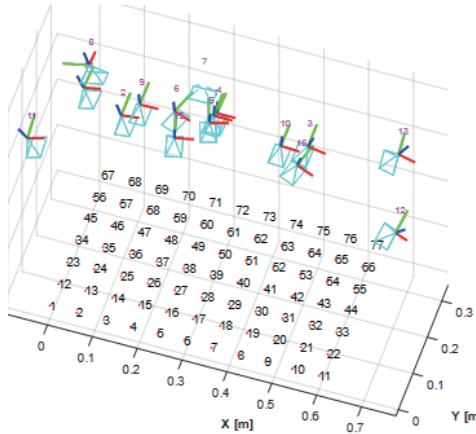


Fig. 6. Camera positions and orientations

4. 3차원 모형을 이용한 결과분석

캘리브레이션된 카메라를 이용하여 3차원 대상물의 정확도를 평가하기 위해서 소규모 3차원 모형을 Fig. 7과 같이 제작하였다. 모형의 가로×세로 크기는 각각 0.895m와 0.922m이며 실생활에서 쉽게 구할 수 있는 물체를 이용하여 높이를 표현할 수 있도록 하였다.



Fig. 7. 3D objects

소규모 3차원 모형에 대해 토탈스테이션을 이용하여 가상의 지면과 3차원의 높이를 확인할 수 있는 물체가 있는 곳에 Fig. 9와 같이 34군데를 선정하여 기준점 측량을 실시하였으며 이중 6점은 기준점(Δ 표시)으로 사용하고 나머지 28점은 검사점(\circ 표시)으로 활용하여 3차원 정확도 평가에 사용하였다. 캘리브레이션된 카메라를 이용하여 3차원 모형에 대해 13장의 영상을 촬영하였다. 또한 기준점과 검사점의 영상좌표는 수작업으로 관측하였으며 Fig. 8과 같이 이들 영상의 카메라의 위치와 자세를 시각화 하였다. 기준점은 수평 및 수직위치 정확도가 ± 3 mm인 토탈스테이션(SOKKIA SET550RX)을 이용하여 측량하였다.

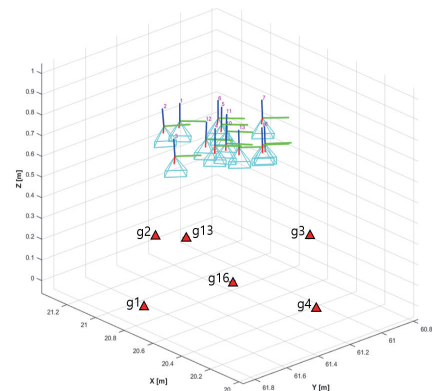


Fig. 8. Camera positions and orientations of experimental area



Fig. 9. Distribution of control and checkpoints

Table 4. Errors using check points

(unit: meters)

ID	X	Y	Z	X'	Y'	Z'	eX	eY	eZ	
g5	20.791	61.214	0.142	20.789	61.214	0.145	0.002	0.000	-0.003	
g6	20.761	60.943	0.132	20.761	60.947	0.129	0.000	-0.004	0.003	
g7	20.642	61.589	0.097	20.641	61.586	0.101	0.001	0.003	-0.004	
g8	20.636	61.352	0.420	20.632	61.352	0.420	0.004	0.000	0.000	
g9	20.513	61.598	0.081	20.512	61.593	0.085	0.001	0.005	-0.004	
g10	20.477	61.209	0.094	20.476	61.206	0.098	0.001	0.003	-0.004	
g11	20.891	61.343	0.097	20.887	61.340	0.104	0.004	0.003	-0.007	
g12	20.905	60.971	0.098	20.900	60.970	0.104	0.005	0.001	-0.006	
g14	20.930	61.077	0.137	20.928	61.081	0.137	0.002	-0.004	0.000	
g15	20.754	61.703	0.144	20.754	61.704	0.147	0.000	-0.001	-0.003	
g17	20.393	61.353	0.182	20.394	61.355	0.179	-0.001	-0.002	0.003	
g18	20.335	61.536	0.180	20.336	61.538	0.179	-0.001	-0.002	0.001	
g19	20.595	61.135	0.216	20.594	61.137	0.215	0.001	-0.002	0.001	
g20	20.207	61.301	0.089	20.208	61.294	0.093	-0.001	0.007	-0.004	
g21	20.404	61.310	0.086	20.404	61.299	0.097	0.000	0.011	-0.011	
g22	20.916	61.067	0.134	20.917	61.071	0.136	-0.001	-0.004	-0.002	
g23	21.077	61.248	0.132	21.079	61.249	0.135	-0.002	-0.001	-0.003	
g24	20.667	61.864	0.094	20.667	61.854	0.106	0.000	0.010	-0.012	
g25	20.651	61.576	0.090	20.650	61.565	0.101	0.001	0.011	-0.011	
g26	20.778	60.928	0.129	20.779	60.930	0.130	-0.001	-0.002	-0.001	
g27	20.323	61.519	0.180	20.327	61.520	0.178	-0.004	-0.001	0.002	
g28	20.806	61.218	0.132	20.800	61.208	0.145	0.006	0.010	-0.013	
g29	20.917	60.967	0.092	20.912	60.964	0.105	0.005	0.003	-0.013	
g30	20.750	61.681	0.142	20.750	61.678	0.147	0.000	0.003	-0.005	
g31	20.503	61.597	0.081	20.502	61.589	0.090	0.001	0.008	-0.009	
g32	20.591	61.142	0.214	20.593	61.143	0.214	-0.002	-0.001	0.000	
g33	20.887	61.555	0.092	20.882	61.545	0.106	0.005	0.010	-0.014	
g34	20.899	61.704	0.094	20.897	61.695	0.106	0.002	0.009	-0.012	
							RMSE	0.003	0.005	0.007

Table 4는 검사점을 이용한 3차원 좌표의 오차를 나타내는 것으로 X, Y, Z는 검사점의 3차원 좌표를 나타내고 X', Y', Z'은 13장의 지상사진에 대해 BBA를 통해서 결정된 3차원 좌표를 나타내며, eX, eY, eZ는 오차를 나타낸다. 28점에 대한 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)는 X, Y축에 대해서 각각 0.003m와 0.005m로 나타났으며 Z축에 대해서는 0.007m로 나타났다. 초점거리가 약 18.54mm($\equiv 4312.7361 \text{ pixel} \times 4.3\mu\text{m}$)이고 대상물과 카메라 사이의 평균거리가 약 0.768m인 것을 고려하면 평균지상해상도(Ground Sampling Distance, GSD)는 약 0.0056m이다. 검사점의 수평위치와 수

직위치에 대한 평균제곱근오차를 픽셀단위로 환산하기 위해서, 수평위치오차는 약 0.0058m($\equiv \sqrt{0.003^2 + 0.005^2}$)이므로 GSD 0.0056m를 고려하여 이를 픽셀단위로 환산하면 약 1.04 픽셀로 나타났고 수직위치는 약 1.25 픽셀로 나타났다.

Table 4에서 각 검사점의 오차를 살펴보면 다른 검사점에 비하여 비교적 g21, g24, g25, g28, g33에서 오차가 크게 나타났다. 이러한 이유는 Fig. 10과 같이 검사점의 경계부에서 영상의 해상도로 인하여 동일한 검사점에 대해 관측오차가 약간 발생하였기 때문이다.

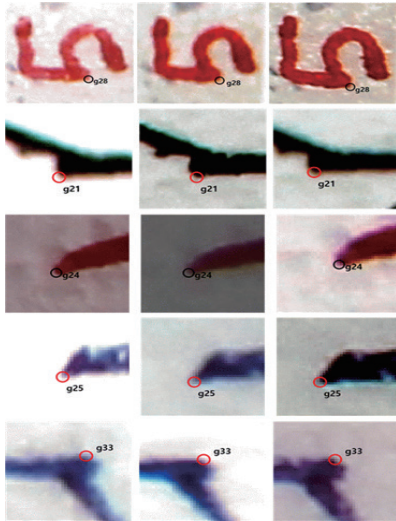


Fig. 10. Checkpoint images containing measurement error

5. 결론

본 연구에서는 비측량용 카메라의 캘리브레이션의 캘리브레이션을 수행하기 위해서 외부표점요소의 초기값이 필요하지 않는 쿼터니언을 이용한 방법론을 제시하였으며 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 제조사에서 알려주는 공칭초점거리와 쿼터니언을 이용한 카메라 위치 및 자세의 초기값을 이용하여 카메라 캘리브레이션을 수행할 수 있는 절차를 제시하였다. 촬영한 영상의 매수가 늘어날수록 카메라 캘리브레이션을 수행할 때 필요한 외부표점요소의 초기값을 설정하는 문제는 상당히 번거로운 일이나 쿼터니언을 이용하여 이러한 문제를 해결할 수 있었다.

둘째, 캘리브레이션을 수행하기 위한 체크보드의 크기와 형태에 관계없이 3~4점의 영상좌표를 관측하면 이를 통해서 기준점과의 영상(또는 사진)좌표와의 관계성을 파악한 후 영상좌표를 관측하지 않은 나머지 기준점을 템플릿정합과 타겟 주변의 경계선의 교점을 이용하여 반자동으로 카메라 캘리브레이션을 수행할 수 있었다.

셋째, 소규모 3차원 모델을 통한 실험을 통해서 카메라 렌즈의 방사방향 왜곡보정을 위해서 k_1 , k_2 값을 추정하여 3차원 위치를 결정하였으며 검사점을 이용한 정확도 평가를 통해서 수평위치오차와 수직위치 오차는 각각 약 $\pm 0.006m$ 와 $\pm 0.007m$ 로 나타났다.

향후 캘리브레이션을 위한 체크보드를 설계하여 자동으로 타겟의 위치를 추출하는 연구가 수행되면 수작업으로 기준점에 대한 3~4점의 초기 영상좌표를 관측하는 번거로움을 줄

일 수 있을 것으로 판단된다.

References

Ahn, J. and Chung, W. (2010), A study on 6-axis articulated robot using a quaternion interpolation, *Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers Fall Meeting, 22 October, Gwangju, Korea*, pp. 294-300. (in Korean with English abstract)

Ahn, J. and Chung, W. (2011), A study on orientations interpolation of 6-axis articulated robot using quaternion, *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 20, No. 6, pp. 778-784. (in Korean with English abstract)

Habib, A., Lari, Z., Kwak, E., and Al-Durgham, K. (2013), Automated detection, localization, and identification of signalized targets and their impact on digital camera calibration, *Revista Brasileira de Cartografia*, Vol. 65, No. 4, pp. 785-803.

Habib, A. and Morgan, M. (2003), Automatic calibration of low-cost digital cameras, *Optical Engineering*, Vol. 42, No. 4, pp. 948-956.

Houssineau, J., Clark, D., Ivekovic, S., Lee, C., and Franco, J. (2016), A unified approach for multi-object triangulation, tracking and camera calibration, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 64, No. 11, pp. 2934-2948.

Lee, J. (2013), Camera calibration and distortion correction, *Korea Robotics Society Review*, Vol. 10, No. 1, pp. 23-29. (in Korean)

Lee, C., Lee, B., and Eo, Y. (2008), Experiment on camera platform calibration of a multi-looking camera system using single non-metric camera, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 26, No. 4, pp. 351-357. (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.

Ramalingam, S. and Sturm, P. (2017), A unifying model for camera calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 39, No. 7, pp. 1309-1319.

Seo, S. and Lee, B. (2017), In-situ self-calibration of non-metric camera and digital stereo plotting for public survey, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 35, No. 3, pp. 145-154. (in Korean with English abstract)