

비측정용 카메라를 이용한 Multi-Looking 카메라의 플랫폼 캘리브레이션 실험 연구

Experiment on Camera Platform Calibration of a Multi-Looking Camera System using single Non-Metric Camera

이창노¹⁾ · 이병길²⁾ · 어양담³⁾

Lee, Chang No · Lee, Byoung Kil · Eo, Yang Dam

Abstract

An aerial multi-looking camera system equips itself with five separate cameras which enables acquiring one vertical image and four oblique images at the same time. This provides diverse information about the site compared to aerial photographs vertically. The geometric relationship of oblique cameras and a vertical camera can be modelled by 6 exterior orientation parameters. Once the relationship between the vertical camera and each oblique camera is determined, the exterior orientation parameters of the oblique images can be calculated by the exterior orientation parameters of the vertical image. In order to examine the exterior orientation of both a vertical camera and each oblique cameras in the multi-looking camera relatively, calibration targets were installed in a lab and 14 images were taken from three image stations by tilting and rotating a non-metric digital camera. The interior orientation parameters of the camera and the exterior orientation parameters of the images were estimated. The exterior orientation parameters of the oblique image with respect to the vertical image were calculated relatively by the exterior orientation parameters of the images and error propagation of the orientation angles and the position of the projection center was examined.

Keywords : Multi-looking Camera, Oblique image, Camera Self-Calibration, Exterior Orientation

초 록

항공용 Multi-looking 카메라는 1대의 사진기 몸체에 5대의 카메라를 설치하여 동시에 1장의 연직사진과 4개의 경사사진을 획득하므로, 연직방향으로 촬영된 일반 항공사진에 비해 현장에 대한 다양한 정보를 제공한다. 연직사진용 카메라에 대한 경사사진용 카메라의 기하학적 관계는 6개의 외부표정요소에 의해 모델링 될 수 있으며, 그 기하학적 관계가 결정되면 경사사진에 대한 외부표정요소는 연직사진의 외부표정요소로부터 계산될 수 있다. Multi-looking 카메라에서의 연직카메라와 경사카메라의 상대적 외부표정요소를 검사하기 위하여, 실내 캘리브레이션 타겟을 설치한 후 하나의 비측정용 디지털카메라를 사용하여 세 지점에서 촬영방향 바뀌가며 14장의 사진을 취득하였다. 카메라 자체검정에 의해 카메라의 내부표정요소와 각 사진에 대한 외부표정요소가 추정되었고, 연직사진에 대한 경사사진의 상대적 외부표정요소가 각 사진에 대한 외부표정요소로부터 계산되었다. 상대적 외부표정요소 중 회전각과 투영중심점 위치에 대한 오차가 지상좌표 추정에 미치는 영향이 각각 분석되었다.

핵심어 : Multi-looking 카메라, 경사사진, 카메라 자체검정, 외부표정

1. 서 론

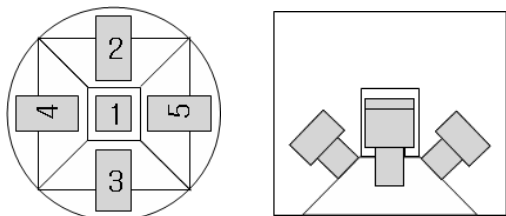
항공용 Multi-looking 카메라는 1대의 몸체에 여러 대

(보통 5대)의 카메라를 설치한 것으로서 동시에 연직방향, 비행방향의 전후, 비행방향의 좌우를 촬영하여 1개의 지점에 대해 1장의 연직사진과 4개의 경사사진으로 구성

1) 정회원 · 서울산업대학교 건설공학부 조교수(E-mail:changno@snut.ac.kr)

2) 정회원 · 경기대학교 토목공학과 전임강사(E-mail:basil@kgu.ac.kr)

3) 연결저자 · 정회원 · 건국대학교 신기술융합학과 조교수(E-mail:eoandrew@konkuk.ac.kr)



(a) 카메라 배치 평면 개념도 (b) 카메라 배치 측면 개념도

그림 1. Multi-looking 카메라

된 항공사진을 제공하므로 단일 방향으로 촬영된 일반 항공사진에 비해 현장에 대한 다양한 현지 지형정보를 제공할 수 있다. Multi-looking 카메라의 각 카메라는 그림 1에서와 같이 홀더에 장착되어 상대적인 자세 및 위치가 고정된다. 따라서 GPS/INS에 의한 촬영 위치와 자세는 중앙에 장착된 1번 카메라에 대한 값을 계산하고 나머지 4대의 카메라에 대한 촬영위치 및 자세는 1번 사진기에 대한 상대적인 촬영위치와 자세에 대한 값으로부터 변환하여 사용할 수 있다.

최근 개발되는 항공사진측량용 디지털 카메라도 항공사진의 촬영면적을 넓히기 위해 여러 대, 일반적으로 4대의 팬크로매틱 카메라와 4대의 다과장 카메라를 사용하여 하나의 사진을 합성하고 있다. 항공용 Multi-looking 카메라는 사진을 합성하지는 않지만, 경사사진용 카메라의 상대적인 6개의 외부표정요소를 구하는 과정은 항공사진 사진용 디지털 카메라 영상 처리와 대부분 동일한 처리 절차를 가진다. 즉, 각각의 카메라는 캘리브레이션을 통해 내부표정요소를 결정하고, 각 카메라의 6개의 외부표정요소가 카메라시스템 내부에 대해 계산된다. 외부표정요소가 정해지면 각 영상으로부터 하나의 가상영상으로의 변환식이 계산되어 가상영상으로 투영된다. 이때 투영중심의 3차원 위치는 실내 실험을 통해 정확히 알 수 있지만, 자세에 관한 3개의 각은 요구되는 정확도에 맞게 구할 수 없으므로 항공촬영을 통해 얻어진 영상을 이용하여 계산된다. 먼저 영상들의 중복된 영역에서 매칭기법에 의해 접합점을 추출하고, 추출된 접합점을 이용하여 번들블록조정에 의해 자세에 대한 정확한 각을 계산한다 (Heier 등, 2002; Kröpfel 등, 2004; Paparoditis 등, 2006; Zeitler 등, 2002).

일단 Multi-looking 카메라를 제작하면 다시 변경하는 것은 많은 비용과 시간을 필요로 하므로 사전에 단일 디지털카메라를 사용하여 충분한 실험을 통해 알고리즘의

유효성을 검증할 필요가 있다. 본 연구에서는 실내에 캘리브레이션 타깃을 설치하고 단일 카메라로 각 지점에서 여러 방향으로 촬영한 후, 셀프 캘리브레이션에 의해 카메라 내부표정요소와 외부표정요소를 결정하였다. 동일 위치에서 얻어진 영상에 대해서는 타깃 평면에서 촬영된 영상을 기준으로 상대적인 외부표정요소를 계산하여 비교분석 하였다.

2. 카메라 캘리브레이션

2.1 셀프 캘리브레이션

비 측정용(non-metric) 카메라를 이용하여 3차원 공간 측량을 하는 경우, 정확한 내부 표정요소 획득을 위해 셀프 캘리브레이션(Self-Calibration)을 수행한다. 셀프 캘리브레이션의 결과는 복원하고자 하는 왜곡 변수의 선정, 캘리브레이션 사이트의 구성 및 촬영 영상의 조합 등 여러 가지 조건에 의하여 영향을 받는다. 내부 표정요소로는 1970년대 초에 제안된 8 매개변수 식을 가장 많이 활용하여 왔다(Kenefick 등, 1972). Fraser(1997)는 이미지의 x, y 축간의 축척 및 비직교성분을 나타내는 2개의 변수를 추가하여 10 매개변수 식을 제안하였고, 비 측정용 카메라의 경우, 초점거리(c), 주점이동량(x_0, y_0), 방사왜곡 계수(k_1)의 네 인자로 어느 정도 정확한 결과를 얻을 수 있음을 밝혔다. 줌 렌즈 CCD 카메라의 변수계산과 3차원 위치정확도 평가 연구가 수행되었고, 초점거리 변화에 따른 방사왜곡 관련 변수의 패턴 분석 연구가 진행된 바 있다(유환희 등, 2003; 정성수 등 2008). 또한 캘리브레이션 사이트 구성과 관련해서는 수렴각도가 큰 두 장 이상의 영상을 사용하고, 지상 기준점을 3차원으로 구성하는 것이 결과 정확도 향상에 영향을 미치는 것으로 연구된 바 있다(Gruen 등, 1992; 오재홍 등, 2006).

본 연구에서는 비측정용 디지털 카메라를 사용하였으므로 초점거리(c), 주점이동량(x_0, y_0), 방사왜곡계수(K_1)의 네 인자를 내부표정요소로 고려하였으며, 셀프 캘리브레이션 번들 조정은 식 (1)과 같이 공선조건식을 구성하였다.

$$x - x_o + \Delta x_r = -c \frac{U}{W}, y - y_o + \Delta y_r = -c \frac{V}{W} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X - X_L \\ Y - Y_L \\ Z - Z_L \end{bmatrix}$$

$$\Delta x_r = K_1(x - x_o)r^2$$

$$\Delta y_r = K_1(y - y_o)r^2$$

$$r^2 = (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2$$

여기서 x, y 는 사진좌표, x_o, y_o 는 주점이동량, $\Delta x_r, \Delta y_r$ 는 방사왜곡 보정량 그리고 c 는 주점거리이다. 또한, X, Y, Z 는 지상 좌표, X_L, Y_L, Z_L 는 카메라 투영 중심의 좌표 그리고 M 은 회전행렬이다.

2.2 상대적 외부표정요소

Multi-looking 카메라 시스템에서 연직사진을 위한 중앙카메라의 좌표시스템을 기준으로 각각의 경사사진용 카메라의 상대적 외부표정요소를 수립하였다. 상대적인 외부표정요소에 관한 식을 유도하기 위해 식 (1)을 연직사진용 카메라(첨자 1로 표시)와 경사사진용 카메라(첨자 2로 표시)에 대해 행렬식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{y}_1 \\ -c \end{bmatrix} = \lambda_1 M_1 \begin{bmatrix} X - X_{L1} \\ Y - Y_{L1} \\ Z - Z_{L1} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \tilde{x}_2 \\ \tilde{y}_2 \\ -c \end{bmatrix} = \lambda_2 M_2 \begin{bmatrix} X - X_{L2} \\ Y - Y_{L2} \\ Z - Z_{L2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\tilde{x} = x - x_o + \Delta x_r, \quad \tilde{y} = y - y_o + \Delta y_r$$

카메라 1(연직사진용 카메라)에 대한 카메라 2(경사사진용 카메라)의 자세와 위치를 구하기 위해 식 (2)의 카메라 2에 대한 행렬식을 다시 쓰면 식 (3)과 같이 되며,

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_2 \\ \tilde{y}_2 \\ -c \end{bmatrix} = \lambda_2 M_2 M_1^T M_1 \left\{ \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{L1} \\ Y_{L1} \\ Z_{L1} \end{bmatrix} + M_1^T M_1 \begin{bmatrix} X_{L2} - X_{L1} \\ Y_{L2} - Y_{L1} \\ Z_{L2} - Z_{L1} \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

식 (3)에서 카메라 1 좌표시스템에서 카메라 2 좌표시스템으로의 회전행렬과 카메라 1 좌표시스템에서 카메라 2의 투영중심좌표가 고정되어 있으므로 식 (4)와 같이, 상대적 외부표정요소에 관한 식이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_2 \\ \tilde{y}_2 \\ -c \end{bmatrix} = \lambda_2 M_{12} M_1^T \left\{ \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{L1} \\ Y_{L1} \\ Z_{L1} \end{bmatrix} + M_1^T \begin{bmatrix} X_{L12} \\ Y_{L12} \\ Z_{L12} \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

여기서, $M_{12} = M_2 M_1^T$ 은 카메라 1 좌표시스템에서 카메라 2 좌표시스템으로의 회전행렬

$$\begin{bmatrix} X_{L12} \\ Y_{L12} \\ Z_{L12} \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_{L2} - X_{L1} \\ Y_{L2} - Y_{L1} \\ Z_{L2} - Z_{L1} \end{bmatrix}$$

은 카메라 1 좌표시스템에서 카메라 2의 투영중심좌표

따라서 연직사진에 대한 경사사진의 상대적 외부표정요소가 결정되면 중앙 카메라에 의한 연직사진의 외부표정요소로부터 경사사진의 상대적 외부표정요소가 계산될 수 있다.

3. 실험데이터

실내에서 단일 카메라로 Multi-looking 카메라와 비슷한 촬영조건을 구축하여 실험을 수행하였다. 사용한 카메라는 비측정용 디지털 카메라인 캐논 EOS-5D 이며, 초점거리, 픽셀크기 등 카메라에 관한 정보는 표 1에 나타나고 있다. 캘리브레이션을 위해 실험실 벽면에 약 15cm 간격으로 124개의 타깃을 설치하였으며, 그 중 50%는 20cm 높이로, 나머지는 0cm 높이로 벽면에 토탈스테이션용 타깃을 부착하였다(그림 2). 타깃의 3차원 좌표는 Leica TC 2000을 사용하여 측정하였으며, 측각 정밀도는 $\pm 0.5''$ 측거 정밀도는 $\pm(1\text{mm}+1\text{ppm})$ 였다. 측정된 좌표는 상대적 좌표이므로 측거 정밀도에서 거리에 관계없는 1mm의 오차는 거의 영향을 미치지 않는다. 일부 측점에 대해 중복 측정하였으며 이 때 오차량, 즉 좌표의 상대적 차이값은 약 0.1mm이었다.

카메라 캘리브레이션을 위해 타깃이 설치된 벽면에서 약 2m정도 떨어진 평행한 직선을 따라 3 지점에서 촬영되었다. 중앙지점에서는 카메라를 수평으로 하여 벽면의

표 1. 캐논 EOS-5D 카메라

형태	디지털 AF/AE SLR
이미지센서	35.8 x 23.9mm CMOS (3:2)
픽셀 피치	8.2 x 8.2 μ m
기록해상도	Large(4,368 x 2,912픽셀)
초점거리	c = 50mm

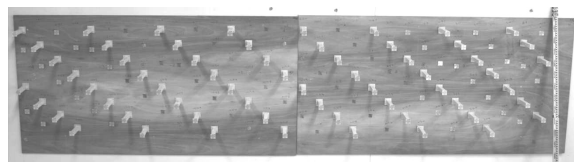


그림 2. 캘리브레이션 타깃

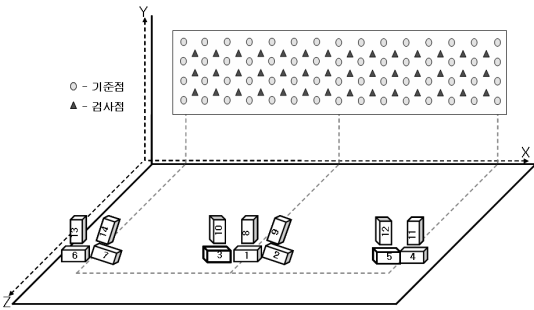


그림 3. 카메라 촬영 계획도

타깃에 대해 연직방향과 좌우로 30° 회전하여 촬영하고 다시 수직방향으로 카메라를 세운 후 연직방향과 좌우로 30° 회전하여 촬영하였다. 회전각은 삼각대에 부착되어 있는 분도원을 기준으로 설정하였으며 그 정확도를 알 수는 없었다. 다른 2 지점에 대해서는 벽면의 한정된 크기로 인해 연직방향과 좌측 또는 연직방향과 우측 방향으로만 촬영을 하였다(그림 3).

이와 같은 방법으로 14장의 사진이 얻어졌으며, 카메라 캘리브레이션을 위해 사진좌표가 측정되었다. 전체 124개의 타깃 중 약 50%를 기준점으로 하고 나머지를 검사점으로 하였으며 사진 상에 나타나지 않은 일부 타깃과 검사점 중 중복 촬영 되지 않은 점들을 제외하여 60개의 기준점과 48개의 검사점이 캘리브레이션과 정확도 평가를 위해 사용되었다.

4. 결과 및 분석

4.1 셀프 캘리브레이션

14장의 사진으로부터 전체 233개의 사진점 즉, 평균적으로는 사진 당 약 17점의 기준점으로 다소 많은 기준점이 사용되었지만, 실험의 특성상 사진 별로 기준점 수의 차이가 크며 카메라를 세로로 돌려서 찍은 사진 8의 경우 기준점의 수는 7점 이었다. 식 (1)의 공선조건식을 선형화하여 단일 최소제곱식(Unified Least Square Equation)을 구성하였다. 내부표정요소, 외부표정요소 그리고 기준점에 대하여 편미분하여 선형화를 수행하고, 내부표정요소와 외부표정요소를 미지수로 하는 축약 정규방정식이 만들어진다(Mikhail 등, 2001; 오재홍 등, 2006). 이와 같은 과정으로 최소제곱법에 의한 반복계산을 통해 최종적인 내부표정요소와 외부표정요소가 계산되었다. 셀프 캘리브레이션에 의한 내부표정요소 추정값과 그에 대한 추

표 2. 내부표정요소 추정값 및 추정오차

	c (mm)	x_0 (pixel)	y_0 (pixel)	K_1
추정값	53.199	-35.5	-7.0	$4.1156 \times 10^{-5} / \text{mm}^2$
추정오차	0.023	1.6	1.9	$4.7546 \times 10^{-7} / \text{mm}^2$

표 3. 검사점에 의한 정확도 평가

RMSE _x (pixel)	RMSE _y (pixel)	RMSE _r (pixel)
1.46	1.11	1.84

정오차(표준편차)는 표 2와 같다.

셀프 캘리브레이션에 대한 정확도 분석을 위하여 별도의 48개 검사점을 사용하였다. 토탈스테이션에 의해 측정된 검사점의 3차원 좌표와 셀프 캘리브레이션으로부터 얻어진 내부표정요소와 외부표정요소를 이용하여 사진상으로 투영하여 사진좌표를 계산하였다. 계산된 사진좌표와 직접 사진에서 측정된 사진좌표의 차이로부터 전체 14 사진에 대한 평균제곱근 오차(RMSE)가 계산되었다(표 3). 계산된 평균제곱근 오차는 x좌표에 대해 약 1.5픽셀, y좌표에 대해 1.1픽셀로서 실험에 사용된 디지털 카메라가 비측정용 카메라인 점을 고려하면 비교적 정확한 결과로 판단된다.

4.2 상대적 외부표정요소

셀프 캘리브레이션에서 추정된 각 사진에 대한 외부표정요소로부터 식 (4)에 의해 연직사진(사진 1, 사진 4, 사진 6, 사진 8, 사진 11, 사진 13)에 대한 경사사진의 상대적 외부표정요소를 계산하였다. 표 4는 이해를 돕기 위해 비슷한 상대적 외부표정요소를 가질 것으로 기대되는 사진 쌍은 인접한 행에 위치하도록 정렬되어 있다. 즉, 사진 1에 대한 사진2의 상대적 외부표정요소는 사진 6에 대한 사진 7의 상대적 외부표정요소와 유사한 값을 갖도록 촬영되었다. 실제 계산된 경사사진의 상대적 외부표정요소는 회전각에 대해 최대 약 0.9° 정도(사진 8에 대한 사진 9의 ω 와 사진 13에 대한 사진 14의 ω) 차이를 보였으며, 투영중심점 위치에 대해서는 최대 약 12.3mm 정도(사진 8에 대한 사진 10의 Y_L 와 사진 11에 대한 사진 12의 Y_L) 차이를 보였다.

다음으로, 추정된 상대적 외부표정요소 중 회전각과 투영중심점 위치의 오차가 실제로 3차원 위치 계산에 얼마나 영향을 미치는 지를 분석하였다.

식 (4)에서 좌변에 지상좌표가 위치하도록 정리하면 식 (5)을 얻는다.

표 4. 경사사진의 상대적 외부표정요소

연직사진	경사사진	$\omega(^{\circ})$	$\varphi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	$X_L(\text{mm})$	$Y_L(\text{mm})$	$Z_L(\text{mm})$
1	2	-0.0441	-29.8383	-0.4408	14.8813	0.2760	5.0537
6	7	-0.1021	-29.7564	-0.4738	18.0819	1.4980	8.4116
1	3	-0.1924	30.1815	0.5121	-20.6959	-0.1560	5.7578
4	5	-0.2506	29.6419	0.5040	-11.9177	1.9274	5.7577
8	9	-30.2311	0.1375	-0.5999	0.0533	-33.2450	-39.7756
13	14	-29.3684	0.2134	-0.6039	2.3797	-41.7714	-33.0262
8	10	29.5822	0.1909	0.6622	-1.3343	24.5437	49.9022
11	12	29.8383	0.1036	0.7332	-3.9941	12.2880	50.0486

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda_2} M_1^T M_{12}^T \begin{bmatrix} \tilde{x}_2 \\ \tilde{y}_2 \\ -c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{L1} \\ Y_{L1} \\ Z_{L1} \end{bmatrix} + M_1^T \begin{bmatrix} X_{L12} \\ Y_{L12} \\ Z_{L12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에 의하면 상대적 외부표정요소 중 회전각에 의한 오차는 사진축척의 분모수($1/\lambda_2$)에 비례하여 증가하는 반면, 투영중심점 위치의 오차는 사진축척의 분모수($1/\lambda_2$)에 관계없는 것을 알 수 있다. 표 4의 결과로부터 상대적 외부표정요소에 의해 경사사진의 외부표정요소를 계산할 경우 회전각과 투영중심점 위치의 오차가 각각 3차원 위치 계산에 어떠한 영향을 미치는 지 모의실험을 하였다. 비슷한 상대적 외부표정요소를 갖는 사진 쌍에 대해 첫 번째 사진 쌍에 대한 상대적 외부표정요소를 사용하여 다른 사진 쌍의 경사사진의 외부표정요소를 구하였다. 예를 들어 사진 1에 대한 사진 2의 상대적 외부표정요소를 사용하여 식 (6)와 같은 방법으로 경사사진인 사진 7의 외부표정요소를 계산하였다.

$$\begin{bmatrix} X_{L7} \\ Y_{L7} \\ Z_{L7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{L6} \\ Y_{L6} \\ Z_{L6} \end{bmatrix} + M_7^T \begin{bmatrix} X_{L12} \\ Y_{L12} \\ Z_{L12} \end{bmatrix}, M_7 = M_{12} M_6 \quad (6)$$

여기서, $M_{12} = M_2 M_1^T$ 은 카메라 1 좌표시스템에서 카메라 2 좌표시스템으로의 회전행렬

$$\begin{bmatrix} X_{L12} \\ Y_{L12} \\ Z_{L12} \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_{L2} - X_{L1} \\ Y_{L2} - Y_{L1} \\ Z_{L2} - Z_{L1} \end{bmatrix}$$

라 2의 투영중심좌표

M_6 은 셀프 캘리브레이션에서 추정된 사진 6에 대한 회전행렬

$$\begin{bmatrix} X_{L6} \\ Y_{L6} \\ Z_{L6} \end{bmatrix}$$

은 셀프 캘리브레이션에서 추정된 사진 6에 대한 투영중심좌표

계산된 외부표정요소와 검사점의 사진좌표를 이용하여 지상좌표를 계산하였으며 이때 지상좌표의 Z좌표는 측정값으로 고정하고 X와 Y좌표를 계산하여 평균제곱근오차(RMSE)를 구하였다. 서론에 서술한 바와 같이 항공용 Multi-looking 카메라는 가상적인 사진을 합성하지는 않지만, 상대적인 6개의 외부표정요소를 구하는 과정은 항공사진측량용 디지털 카메라 영상 처리와 대부분 동일한 과정을 거친다. 따라서 Multi-looking 카메라도 항공사진측량용 디지털 카메라와 마찬가지로 투영중심의 3차원 위치는 실내 실험을 통해 원하는 정확도로 추정할 수 있지만 자세에 관한 3개의 각은 실내 실험만으로는 요구되는 정확도에 맞게 구할 수 없을 것으로 판단되므로 회전각과 투영중심점 위치의 오차에 의한 영향을 분리하여 비교분석하였다. 먼저 셀프 캘리브레이션에 의한 경사사진의 외부표정요소를 사용한 경우(case 1), 상대적 외부표정요소를 사용하여 회전각과 투영중심점 위치를 계산한 경우(case 2), 상대적 외부표정요소를 사용하여 회전각만 계산하고 투영중심점 위치는 셀프 캘리브레이션에 의한 값을 사용한 경우(case 3), 상대적 외부표정요소를 사용하여 투영중심점 위치만 계산하고 회전각은 셀프 캘리브레이션에 의한 값을 사용한 경우(case 4)에 대한 평균제곱근오차(RMSE)를 표 5에 정리하였다.

표 5에서 case 2의 평균제곱근오차 중 투영중심점 위치에 따른 오차(case 4)는 그 크기가 표 4에 나타난 상대적 외부표정요소 중 투영중심점 위치의 차이와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 예를 들어, 상대적 외부표정요소 중

표 5. 상대적 외부표정요소 오차에 따른 지상좌표 계산 오차

사진번호	case 1 (RMSE)		case 2 (RMSE)		case 3 (RMSE)		case 4 (RMSE)	
	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)
7	0.4865	0.3434	1.2633	0.9560	4.3429	1.9843	5.2295	1.1731
5	0.5510	0.3542	36.1080	1.8360	27.4384	2.3377	8.8996	2.2162
14	0.4525	0.5348	33.0497	2.5078	46.4437	4.0163	13.1365	2.3763
12	0.6773	0.8165	2.1776	1.3029	12.8978	3.5174	11.8035	2.6716

투영중심점의 Z_L 값이 거의 일치하는 사진 1에 대한 사진 3과 사진 4에 대한 사진 5의 투영중심점 위치의 차는 $|(X_L, Y_L)_{4,5} - (X_L, Y_L)_{1,3}| = (8.7782\text{mm}, 2.0834\text{mm})$ 로 표 5의 결과와 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 표 5에서 사진 12와 14의 경우 카메라를 수직으로 세워서 촬영하였으므로 X와 Y의 방향이 표 4와 바뀌었을 뿐 그 크기는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

즉, 상대적 외부표정요소 중 투영중심점 위치에 의한 오차는 사진축척과 관계없이 그 크기가 유지된다. 반면에 식 (5)로부터 알 수 있듯이 회전각에 대한 오차는 사진축척의 분모 수에 따라 변하므로 실제 항공촬영 시에는 표 5에 나타난 오차보다 훨씬 크게 증가할 것이다. 예를 들어, 본 연구에서 사용한 카메라의 초점거리가 대략 50mm 정도 이고 타깃이 설치된 벽면으로부터 약 2m 거리에서 촬영이 이루어졌으므로 연직사진의 경우 축척은 약 1:40이 된다. 동일한 조건으로 축척 1:5,000으로 항공촬영을 했다고 가정하면 표 7의 회전각에 대한 오차 크기는 125배 증가할 것이므로 사진 14의 경우 X방향 오차가 $125 \times 46.4437\text{mm} \approx 5.8\text{m}$ 정도로 증가한다. 따라서 Multi-looking 카메라의 상대적 외부표정요소를 추정할 때에는 투영중심점 위치보다는 회전각에 대한 정확도를 높이는 것이 효율적이다.

5. 결 론

본 연구에서는 Multi-looking 카메라에서 카메라 간의 상대적인 외부표정요소의 오차가 지상좌표 측정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 단일 카메라를 사용하여 실험하였다. 비측정용 카메라를 사용하였으므로 먼저 셀프 캘리브레이션에 의해 내부표정요소를 추정하였으며 검사점을 사용하여 사진상의 평균제곱근 오차를 계산해 본 결과 x, y 모두 약 1.5 픽셀 이내였다.

동일 조건으로 촬영된 사진에 대해서는 셀프 캘리브레

이션에 의해 추정된 외부표정요소로부터 연직사진을 기준으로 카메라 간의 상대적인 외부표정요소를 추정하고 비교하였다. 그 결과 상대적인 외부표정요소 중 투영중심점에 대한 오차가 지상좌표 측정에 미치는 영향은 사진축척에 관계없이 그 크기가 최대 10mm 정도로 유지되는 반면 회전각에 대한 오차는 사진축척에 분모수에 비례하므로 Multi-looking 카메라의 상대적 외부표정요소 추정할 때에는 투영중심점 위치보다는 회전각에 대한 정확도를 높이는 것이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

향후 보다 실제적인 결과를 얻기 위해서는 실제 상대위치 및 자세가 고정된 멀티카메라를 적용하여 상대적 외부표정요소를 추정할 필요가 있으며, 캘리브레이션 정확도에 영향을 줄 수 있는 다른 요소들, 즉, 타깃과 카메라 간의 거리, 중앙카메라와 주변카메라의 경사각 등 대한 실험이 필요하다. 또한 항공사진측량용 디지털 카메라의 경우와 마찬가지로 실제 항공촬영을 통해 실내 캘리브레이션을 통해 얻어진 상대적인 회전각의 추정 정확도를 향상시켜야 할 것으로 판단되며, Multi-looking 카메라가 항공기에 탑재되어 운영되면서 카메라간의 상대적 위치 및 자세가 변할 수 있으므로 주기적인 실험을 통해 상대적 외부표정요소가 안정적으로 유지가 되는지도 확인할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신사업과제(과제번호:07국토정보C02)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

오재홍, 이창노, 어양담 (2006), 비측정용 디지털 카메라의 효율적인 자체 검정을 위한 대상지 구성, 한국측량학회지, 제24권, 제3호, pp. 281-288.

- 유환희, 정상용, 김성삼 (2003), 줌렌즈 CCD 카메라의 기하학적
검정 정확도 평가, *한국측량학회지*, 제 21권, 제3호, pp. 245-
254.
- 정성수, 허준, 우선규 (2008), 초점거리 변화에 따른 렌즈왜곡의
경험적 모델링, *한국측량학회지*, 제26권, 제1호, pp. 93-100.
- Fraser, C.S. (1997), Digital camera self-calibration, *ISPRS Journal
of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 52, pp. 149-159.
- Gruen, A., Beyer, H.A. (1992), System calibration through self-
calibration. Workshop on Calibration and Orientation of
Cameras in Computer Vision(TU-1), *ISPRS XVII Congress*,
Washington, DC, p. 33.
- Heier, H., Kiefner, M., Zeitler, W. (2002), Calibration of the
Digital Modular Camera, *FIG XXII International Congress*,
Washington, D.C. USA.
- Kenefick, J.F., Gyer, M.S., Harp, B.F. (1972), Analytical self-
calibration, *Photogramm. Eng.* 38, pp.1117-1126.
- Kröpfl, M., Kruck, E., Gruber, M. (2004), Geometric calibration
of the digital large format aerial camera UltraCamD, *ISPRS,
IAPRS*, Istanbul, Turkey, Commission I, pp. 42-44.
- Mikhail, E. M. and Bethel, J. S., McGlone, J. C. (2001), *Intro-
duction to modern photogrammetry*, John Wiley & Sons Inc.,
New York, pp. 136-137.
- Paparoditis, N., Souchon, J. P., Martinoty, G., Marc, P.
D.(2006), High-end aerial digital cameras and their impact on
the automation and quality of the production workflow, *ISPRS
Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 60, pp.
400-412.
- Zeitler, W. , Doerstel, C., Jacobsen, K. (2002), Geometric calibration
of the DMC: method and results, Pecora 15/Land Satellite In-
formation IV/ISPRS Commission I/FIEOS.

(접수일 2008. 6. 17, 심사일 2008. 7. 22, 심사완료일 2008. 7. 30)