

## 비측정용 디지털 카메라의 효율적인 자체 검정을 위한 대상지 구성

### A Photogrammetric Network and Object Field Design for Efficient Self-Calibration of Non-metric Digital Cameras

오재홍<sup>1)</sup> · 이창노<sup>2)</sup> · 어양담<sup>3)</sup>

Oh, Jae Hong · Lee, Chang No · Eo, Yang Dam

#### Abstract

Recent increase in the number of pixels of a non-metric digital camera encourages to use it for close-range photogrammetry such as modeling cultural asset and buildings. However, these cameras have to be calibrated for close-range photogrammetry application. For self-calibration, an appropriate photogrammetric network and object field should be designed. In this paper, we studied the effect on self-calibration accuracy changes according to the change of the number of ground control points, dimensions of the ground control points, and the combination of images. We concluded that self-calibration with three photos including a vertical photo can give the stable accuracy of interior orientation parameters and 10 ground control points on a plane can give high accuracy for object reconstruction.

Keywords : Close-range Photogrammetry, Camera Self-Calibration, Non-metric Camera, Calibration Site Configuration

#### 초 록

최근 비 측정용 디지털 카메라의 화소수가 급증하고, 카메라 단가 또한 저렴해져 문화재 및 시설물의 3차원 공간 측량 등에도 이를 활용할 수 있게 되었다. 그러나 비 측정용 카메라를 측량용으로 활용하기 위해서는, 카메라 자체검정을 통해 내부 표정요소를 정확히 계산해내야 한다. 이를 위해서는 적절한 검정 대상지의 구성 및 촬영계획이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 지상기준점 수, 사진의 수, 기준점의 차원(2차원 및 3차원) 등의 조건에 따른 카메라 자체 검정 정확도에 대하여 분석하였다. 실험 결과, 근거리 사진측량을 위한 자체검정 대상지 구축 시 수직사진을 포함하는 3장 이상의 사진으로 안정된 정확도를 얻을 수 있음을 알 수 있었고, 3차원 복원을 목적으로 하는 경우, 평면상의 지상기준점 10점으로도 높은 정확도의 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

핵심어 : 근거리사진측량, 카메라 자체검정, 비 측정용 카메라, 검정 대상지 구성

## 1. 서 론

과거 전문가용으로만 여겨졌던 SLR(Single-Lens Reflex) 카메라가 최근 저가의 고해상도 DSLR(Digital SLR) 카메라로 보급되기 시작하였다. 또한, 화소수 또한 비약적으로 증가하여 천만화소 카메라가 등장하였으며 이러한

고해상도화 추세는 계속 진행될 것으로 보인다. 이러한 추세는 측정용 카메라로만 수행해왔던 근거리 사진측량(Close-Range Photogrammetry)을 저가의 카메라로 수행할 수 있는 계기를 마련하였다. 그러나 비 측정용 카메라를 이용하여 3차원 공간 측량을 하기 위해서는 정확한 내부 표정요소를 알아야 하며 이를 위해 카메라 자체검정

1) 한국전자통신연구원 텔레매틱스 · USN연구단 공간정보연구팀 연구원(E-mail:ojh@etri.re.kr)

2) 연결저자 · 정회원 · 서울산업대학교 토목공학과 전임강사(E-mail:changno@snut.ac.kr)

3) 정회원 · 국방과학연구소 선임연구원(E-mail:eoandrew@yahoo.co.kr)

(Self-Calibration)과정을 거쳐야 한다. 자체 검정 모델로는 1970년대 초에 제안된 8매개변수 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 이 방식의 정확도는 1:100,000 이상이라고 하였다.

자체 검정의 결과는 여러 가지 조건에 의하여 영향을 받는데, 복원하고자 하는 왜곡 변수의 선정, 자체 검정 대상지 구성 그리고 촬영 영상의 조합 등이 있다.

왜곡 변수의 선정에 관해 Fraser(1997)는 고정밀 측량이 필요치 않은 3차원 공간 측량 분야의 경우 초점거리( $c$ ), 주점 이동량( $x_0, y_0$ ), 방사왜곡계수( $K_1$ )의 네 인자로서 어느 정도 정확한 결과를 얻을 수 있음을 밝혔다.

Gruen 등(1992)은 검정 대상지 구성과 관련하여 다양한 조건 별로 내부 표정요소를 결정하는 실험을 수행하였고, 그 결과 수렴각도가 큰(high convergent) 최소 두 장 이상의 영상을 사용하고, 지상 기준점은 3차원으로 구성할 것을 제안하였다.

Pullivelli(2005)는 저가의 디지털 카메라의 안정성을 연구한 논문에서 자체 검정으로 내부표정요소를 지속적으로 동일한 값을 구할 수는 없더라도, 향후 번들 조정 시에 외부표정요소와의 상관관계로 인하여 보상이 됨을 밝혔다.

국내의 경우 카메라 자체 검정과 관련하여 직접선형변환식(DLT) 등을 이용하여 카메라의 물리적 매개변수를 도출하는 연구가 주로 진행되었다(유복모 등, 1997; 정수 등, 2005).

검정 대상지를 신규로 구축하는 것은 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 검정 대상지 구축비용의 절감과 검정 시간 단축은 비 측정용 카메라의 근거리 사진측량분야에서의 활용도를 높일 수 있는 중요한 요인이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지상기준점 개수, 사진의 개수, 기준점의 차원(2차원 및 3차원)을 변화시켜가면서 자체 검정을 통한 내부 표정요소의 정확도에 대해 분석하였다.

## 2. 디지털 카메라 자체 검정

카메라 자체 검정은 카메라 내부표정요소를 구해내고 영상의 왜곡을 보정해주기 위한 두 가지의 목적을 지닌다. 다음은 영상 왜곡의 종류를 설명한 것이다.

### 2.1 렌즈 왜곡

#### 2.1.1 렌즈 방사 왜곡(Radial lens distortion)

렌즈 방사 왜곡 모델은 주로 홀수차수의 다항식으로 표현된다.

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7$$

$$r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (1)$$

여기서,  $x, y$ 는 사진좌표,  $x_0, y_0$ 는 주점이동량,  $K_i$ 항은 방사왜곡의 계수 그리고  $r$ 은 주점으로부터의 방사거리이다. 식 (1)로부터  $x, y$  사진좌표 보정량은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\Delta x_r = \bar{x} \Delta r / r$$

$$\Delta y_r = \bar{y} \Delta r / r \quad (2)$$

고정밀 정확도가 필요하지 않은 분야에서는  $K_1$  계수만을 사용하는 것으로 충분한 결과를 얻을 수 있으며,  $K_2, K_3$  계수는 고정밀 분야 또는 광각 렌즈의 경우에 사용될 수 있다(Fraser 1997).

#### 2.1.2 렌즈 편심 왜곡(Decentering distortion)

카메라 렌즈 간에 불일치로 인하여 렌즈 편심왜곡이 발생하며, Brown에 의해 제안된 식 (3)의 모델로 보정할 수 있다(Brown 1966).

$$\Delta x_d = P_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2P_2 \bar{x}\bar{y}$$

$$\Delta y_d = 2P_1 \bar{x}\bar{y} + P_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) \quad (3)$$

그러나, 편심 왜곡 변수  $P_1, P_2$ 와 주점이동량  $x_0, y_0$ 간에는 상관도가 98%에 이르므로 3차원 공간 측량을 위해 서라면 검정 시에 편심 왜곡이 주점이동량에 의해 보상되도록 하는 것이 좋다. 왜냐하면, 미지수 개수를 줄일 수 있을 뿐 아니라 상용 프로그램에서는 본 편심 왜곡 변수의 입력을 지원하지 않는 경우가 많기 때문이다(McGlone 등, 2004).

### 2.2 초점면 왜곡

#### 2.2.1 초점면 2차원 왜곡(In-Plane Distortion)

초점면 2차원 왜곡은 필름의 수축 등으로 발생하는  $x, y$ 축의 축척차이에서 일어나는 왜곡으로서 필름 카메라에서 주로 일어나는 문제다.

$$\Delta x_f = b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} \quad (4)$$

여기서  $b_1$ 은 수평, 수직축간의 축척차이의 보정계수,  $b_2$ 는 두 축간의 비직교성에 대한 보정계수이다. 그러나 두 값은 크기가 굉장히 작아서 실제 근거리 사진측량에서는 무시된다.

### 2.2.2 초점면 굴곡왜곡(Out-of-plane Distortion)

초점면이 편평하지 않아 영상 좌표에 왜곡이 발생하게 되는 왜곡이다. 이는 사진측량의 정확도의 한계를 가져오게 하는 주요한 요인이다. 필름 카메라의 경우 초점면을 직접측정가능하고 이를 3차 또는 4차식으로 모델링하여 보정해줄 수 있다. 그러나 디지털 카메라의 경우 필름 카메라와 다르게 카메라에 장착한 이후에는 초점면의 직접 측정이 어려우며, 자체 검정 과정을 통해서 초점면의 편평도를 모델링하거나 왜곡값 보정을 할 수가 없다.

## 2.3 확장 공선 조건식

### 2.3.1 부가 매개변수(Added Parameter) 모델

자체 검정 조정식은 식 (5)와 같은 공선조건식에서 출발한다.

$$x - x_0 + \Delta x = -c \frac{U}{W}, \quad y - y_0 + \Delta y = -c \frac{V}{W}$$

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X - X_L \\ Y - Y_L \\ Z - Z_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $x, y$ 는 사진좌표,  $x_0, y_0$ 는 주점이동량,  $\Delta x, \Delta y$ 는 왜곡 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. 왜곡 보정량  $\Delta x, \Delta y$ 는 물리적으로 해석 가능한 카메라의 주요 4가지 왜곡값으로 이루어져 있으며, 식 (6)과 같다.

$$\Delta x = \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_u + \Delta x_f,$$

$$\Delta y = \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_u + \Delta y_f \quad (6)$$

여기서,  $\Delta x_r$ 는 방사왜곡량,  $\Delta x_d$ 는 편심왜곡량,  $\Delta x_u$ 는 초점면 굴곡 왜곡량 그리고  $\Delta x_f$ 는 초점면 2차원 왜곡량이다.

### 2.3.2 선형화 및 축약 정규방정식 구성

부가 매개변수 모델을 선형화하여 단일 최소제곱식(unified least square equation)을 구성한다(Mikhail 등,

2001). 즉, 내부표정요소, 외부표정요소 그리고 지상기준점에 대하여 편미분하여 선형화를 수행하고, 공선조건식의 관측방정식 (7)을 구성한다. 외부 표정요소, 내부표정요소와 지상기준점에 대한 매개변수의 초기값 역시 관측방정식으로 취급하여 식 (8)과 같이 구성한다.

$$v + \dot{B}\delta + \hat{B}\delta + \ddot{B}\delta = f \quad (7)$$

$$\hat{v} - I\delta = \hat{f}, \quad \ddot{v} - I\delta = \ddot{f} \quad (8)$$

여기서,  $\bullet$ 는 외부표정요소,  $\wedge$ 는 내부표정요소,  $\bullet\bullet$ 는 지상기준점에 대한 표식이며,  $B$ 는 각각에 대한 편미분 계수 행렬,  $\delta$ 는 각 요소에 대한 보정량,  $I$ 는 단위행렬,  $f$ 는 관측방정식의 상수항 그리고  $v$ 는 잔차벡터이다. 제약조건(Constraint)이 없는 경우 위 식들을 하나의 행렬로 나타내면 식 (9)로 되고, 정규방정식은 식 (10)과 같다. 참고로 Fraser(1997)는 제약조건이 자체 검정 정확도 향상에 큰 영향을 가져다주지 못한다고 하였다.

$$\begin{bmatrix} v \\ \hat{v} \\ \ddot{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{B} & \hat{B} & \ddot{B} \\ -I & 0 & 0 \\ 0 & -I & 0 \\ 0 & 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \hat{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ \hat{f} \\ \ddot{f} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{N} & \ddot{N} & \overline{N} \\ \ddot{N}^T & \hat{N} & \overline{N} \\ \overline{N}^T & \overline{N}^T & \ddot{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \hat{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{t} \\ \hat{t} \\ \hat{t} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $\dot{N} = \dot{B}^T W \dot{B} + \dot{W}$ ,  $\ddot{N} = \dot{B}^T W \ddot{B}$ ,  $\overline{N} = \dot{B}^T W \overline{B}$ ,  $\hat{N} = \hat{B}^T W \hat{B} + \hat{W}$ ,  $\overline{N} = \hat{B}^T W \overline{B}$ ,  $\ddot{N} = \ddot{B}^T W \ddot{B} + \ddot{W}$ ,  $\hat{t} = \dot{B}^T W f - \dot{W} \hat{f}$ ,  $\hat{t} = \hat{B}^T W f - \hat{W} \hat{f}$ ,  $\hat{t} = \ddot{B}^T W f - \ddot{W} \hat{f}$

본 식을 축약하기 위해, 식 (10)의 3행에서 아래 식 (11)을 구하고, 식 (11)을 식 (10)의 1행과 2행에 대입하면 식 (12)와 같은 축약 정규방정식이 만들어진다. 이와 같은 과정으로 반복계산을 통해 최종적인 내부표정요소와 외부표정요소를 구해내게 된다.

$$\delta = \ddot{N}^{-1} (\hat{t} - \overline{N}^T \delta - \overline{N}^T \delta) \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{N} - \overline{N} \ddot{N}^{-1} \overline{N}^T & \ddot{N} - \overline{N} \ddot{N}^{-1} \overline{N}^T \\ \overline{N}^T - \overline{N} \ddot{N}^{-1} \overline{N}^T & \ddot{N} - \overline{N} \ddot{N}^{-1} \overline{N}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{t} - \overline{N} \ddot{N}^{-1} \hat{t} \\ \hat{t} - \overline{N} \ddot{N}^{-1} \hat{t} \end{bmatrix} \quad (12)$$

## 3. 연구 방법

### 3.1 개요

본 연구에서는 자체 검정의 정확도에 영향을 미치는 지상 기준점의 개수, 사진 조합, 자체 검정 기준점의 차원을

변화시키며 검정 결과를 분석하였다. 실험 데이터는 가상으로 생성하였으며, 본 연구의 절차는 그림 1과 같으며, 적용 실험을 위한 검정 대상지 구성은 그림 2와 같다. 다양한 조건의 가상 데이터를 생성한 후, 각각 자체 검정을 수행하였다. 그 결과 첫 번째로 내부표정요소의 물리적인 값이 참값과 어떻게 달라지는지를 분석하고, 두 번째로 추측된 내부표정요소를 광속조정에 활용하여 지상좌표 복원의 정확도를 분석하였다.

본 연구에 사용한 가상 데이터 조합은 표 1과 같으며, 총 360개 데이터 조합을 생성한다(기준점차원(2)×사진조합(6)×기준점조합(3)×데이터세트(10)=360개). 이 때, 지상기준점 분포와 사진 조합은 표 2, 표 3과 같다.

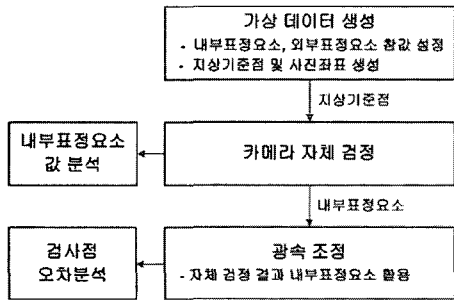


그림 1. 연구 절차도

### 3.1.1 자체 검정

360개 데이터에 대하여 각각 자체 검정을 수행하였다. 왜곡 변수는 2절에서 언급하였듯이 근거리 사진측량용 검정에는  $c, x_0, y_0, K_1$  네 인자만으로 충분한 정확도를 얻을 수가 있으므로, 네 인자만을 사용하였다. 지상 기준점과 사진 좌표 측정 시에는 랜덤 측정 오차를 고려하였다.

### 3.1.2 추측된 내부표정요소 값 분석

사진 수, 기준점 수 그리고 지상 기준점 차원의 변화에 따라 계산된 내부표정요소를 참값과의 비교를 통해 내부표정요소의 오차(RMSE)를 계산하고 분석하였다.  $c$ 와  $K_1$ 의 경우에는 사진좌표에 미치는 오차가 사진 상의 위치에

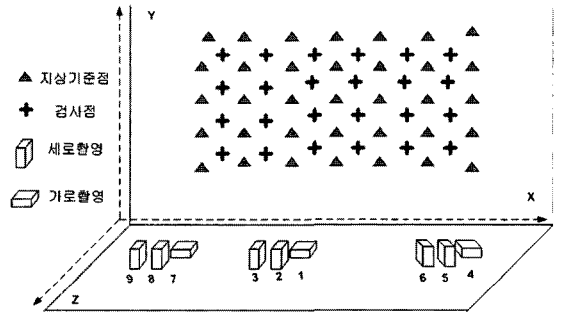


그림 2. 대상지의 기준점과 카메라 배치도

표 1. 가상 데이터 조합

기준점 차원(2종)	지상기준점 개수(3종)	사진 조합(6종)	생성 횟수(10종)
2차원 평면, 3차원 공간	35점, 20점, 10점	9장, 7장, 5장, 3장, 2장, 1장	10회 반복

표 2. 3차원 지상기준점 분포(2차원 평면의 경우 분포는 동일)

<p>35 점</p>	<p>20 점</p>	<p>10점</p>	
-------------	-------------	------------	--

표 3. 사진 조합

9장		3장	
7장		2장	
5장		1장	

따라 다르므로 계산된 내부표정요소를 고정하고 오차가 없는 검사점(check point)을 외부표정요소에 오차가 없는 수직사진(1번 사진)에 투영시켜 검사점의 사진 좌표 참값과의 비교를 통해 사진좌표 오차를 계산하고 정확도를 분석하였다.

### 3.1.3 내부표정요소의 광속 조정 활용

다양한 조건별로 자체 검정을 수행한 후 계산된 내부표정요소를 상수로 고정시키고 좌/우/중앙(7번, 1번, 4번 사진) 사진의 광속 조정을 통해 외부표정요소를 구하였다. 이 때, 자체 검정에 사용한 지상기준점 중 15개를 사용하되, 지상기준점과 사진 좌표에 랜덤 측정 오차를 새로 부여하였다. 구해진 외부표정요소를 이용하여 최소제곱법으로 24개 검사점의 지상좌표를 구하고 이를 검사점의 참값과의 차이를 계산하여 지상좌표 오차를 구하였다. 계산된 오차는 이해를 돕기 위해 수직사진(1번 사진)의 해상도(Ground Sample Distance)를 고려하여 화소(pixel) 단위로 환산하였다.

## 4. 실험 데이터 및 결과

### 4.1 가상 데이터 생성

본 연구에서는 실험 대상 카메라로 캐논 EOS300D를 가상으로 이용하였다. 카메라 규격에 나온 EF-S렌즈의 경우 주점거리가 18~55mm 이므로 초점거리의 참값을 근거리 사진측량에서 주로 사용하게 되는 광각인 18mm로 하였다. 주점이동량과 방사왜곡량의 경우, 비 측정용 카메라

인 경우를 감안하여 왜곡량을 측정용 카메라(보통 1픽셀 이내)에 비해 상대적으로 크게 설정했으며, CCD(Charged Coupled Device) 한 화소의 크기인 0.007mm를 고려하여 50픽셀이 넘지 않도록 아래 표 4와 같이 참값을 설정하였다.

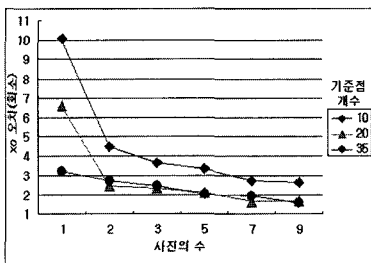
외부표정요소의 경우, 적절한 수렴각을 만들기 위해 좌/우측 카메라간의 기선고도비(Base/ Height ratio)를 약 1 정도로 설정하고, 좌/우측과 중심 간에는 약 0.5 정도가 되도록 설정하였다(Height 는 3300mm, 좌~우측 카메라 간 Base는 1600mm로 설정하였다).

### 4.2 카메라 자체 검정

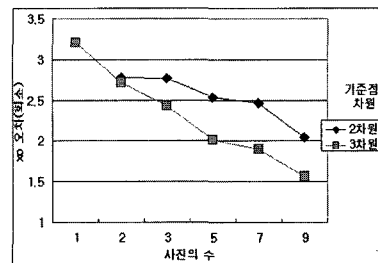
생성된 360개의 데이터 세트를 활용하여 자체 검정을 수행하였다. 이 때 가중치행렬 생성을 위한 표준편차는 지상기준점 좌표 1mm, 사진좌표 1 화소를 사용하였고, 내부표정요소와 외부표정요소의 초기값에 대한 표준편차는 자유롭게 조정될 수 있도록 충분히 큰 값을 설정하였다.

기준점 개수, 사진 장수 및 기준점 차원의 변화에 따라 계산된  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $c$ ,  $K_1$ 을 각각의 참값과 비교하여 차이값을 계산하였고 그 오차는 아래 그림 3, 그림 4, 그림 5 그리고 그림 6과 같다.

그림 3과 그림 4에서  $x_0$ ,  $y_0$ 의 경우 사진의 장수가 1장에서 2장으로 증가하는 경우 정확도가 크게 향상되나 그 이후로는 증가의 정도가 낮아진다. 2장 이상의 사진을 사용하는 경우 기준점 개수가 10점에서 20점으로 증가하는 경우에는 정확도가 향상되나 20점과 35점 사이의 차이는 거의 없어짐을 알 수 있다. 기준점은 2차원보다 3차원의



(a) 3차원 기준점의 경우



(b) 35개 기준점 사용의 경우

그림 3. 기준점 개수, 사진의 수, 기준점 차원에 따른  $x_0$  오차 변화

표 4. 카메라의 제원 및 내부표정요소 참값

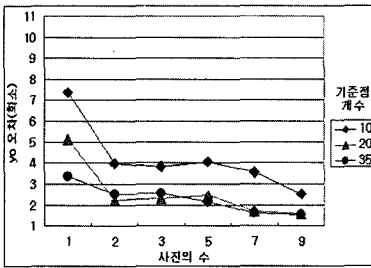
$c$	CCD	영상크기	$x_0$	$y_0$	$K_1$
18mm	7 micron	3072×2048	0.35mm(50 화소)	-0.21mm(30 화소)	-0.0001(최대 왜곡 약 40화소)

기준점을 사용하는 것이 0.5 화소 정도 더 정확해지는 것을 알 수 있다(1장의 사진을 2차원 평면에 위치한 기준점을 사용하여 자체 검정을 수행하는 경우에는 최소제곱식은 수렴하지 않는다). 특히, 사진을 5장 이상 사용하는 경우,  $x_0$ 보다  $y_0$ 의 경우 정확도 향상 폭이 커지는데, 이는 5장 이상 사용 시에 90도 회전된 사진이 포함되어 나타나는 영향으로 보인다.

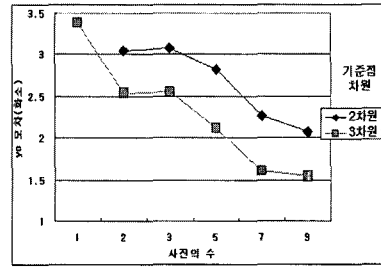
그림 5에서는 사진 1장을 사용하는 경우를 제외하고는 사진수의 증가에 따른  $c$ 의 정확도 향상이 크지 않다. 그러나 지상기준점의 차원수가 3차원인 경우 2차원의 경우

와 비교하여 정확도가 커짐을 알 수 있다. 이는 3차원 지상기준점 사용 시  $c$ 와 외부표정요소와의 상관도가 어느 정도 해소됨을 보여준다고 할 수 있다.

그림 6에 사진수의 증가에 따른  $K_1$  정확도 증가 효과는 거의 없으며 주로 기준점 수의 증가에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이는  $K_1$ 이 기준점의 배치와 밀도에 의해 영향을 받기 때문으로 해석된다. 사진 1장에서 2장으로 증가시키는 경우 정확도가 낮아지는데, 이는 사진 1번이 전체 기준점을 포함하는 반면, 사진 4, 7번은 좌/우 측에서 찍어 지상기준점이 사진전체에 분포되지 않기 때

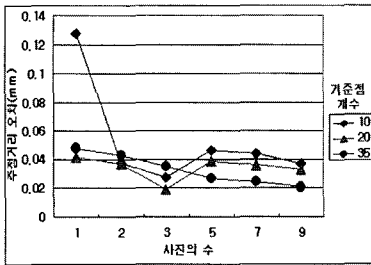


(a) 3차원 기준점의 경우

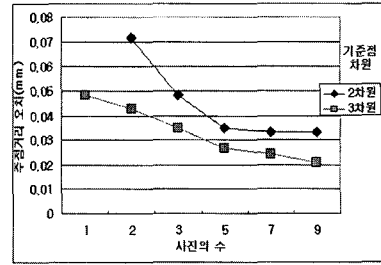


(b) 35개 기준점 사용의 경우

그림 4. 기준점 개수, 사진의 수, 기준점 차원에 따른  $y_0$  오차 변화

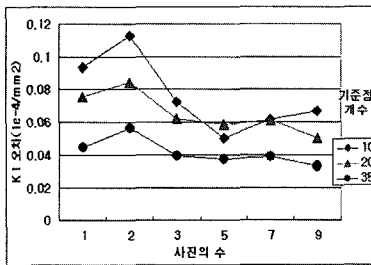


(a) 3차원 기준점의 경우

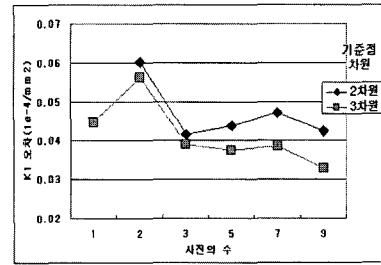


(b) 35개 기준점 사용의 경우

그림 5. 기준점 개수, 사진의 수, 기준점 차원에 따른  $c$  오차 변화

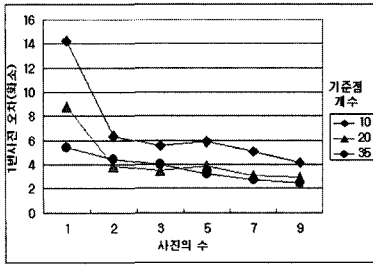


(a) 3차원 기준점의 경우

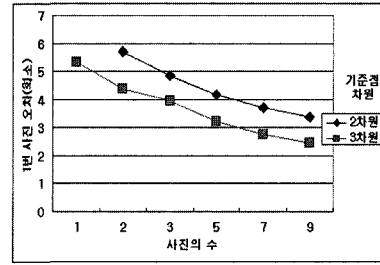


(b) 35개 기준점 사용의 경우

그림 6. 기준점 개수, 사진의 수, 기준점 차원에 따른  $K_1$  오차 변화

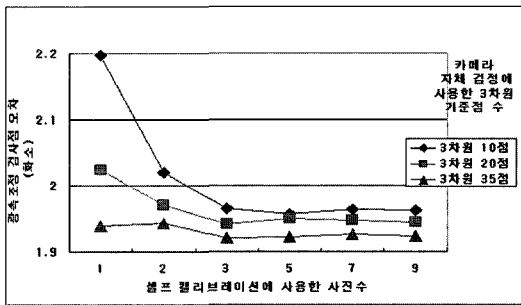


(a) 3차원 기준점의 경우

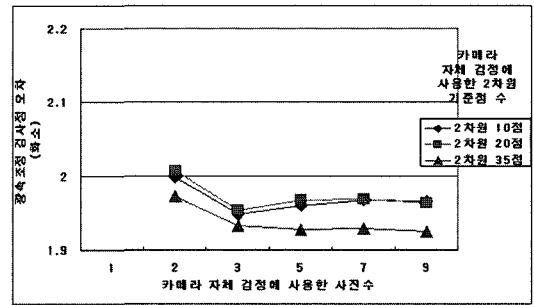


(b) 35개 기준점 사용의 경우

그림 7. 기준점 개수, 사진의 수, 기준점 차원에 따른 1번 사진좌표 오차 변화



(a) 자체 검정 시에 3차원 기준점사용



(b) 자체 검정 시에 2차원 기준점사용

그림 8. 광속조정 후 검사점 오차 변화

문으로 해석된다.

$c$ 와  $K_1$ 의 경우 사진 상의 위치에 따라 오차값이 틀려 지므로, 앞서 구한 내부표정요소를 활용하여 24개의 검사 점을 수직사진(1번 사진)에 투영시키고 참값과의 차이를 이용하여 전체적인 사진좌표의 오차를 평가하였다. 그 결과는 그림 7과 같다. 전체적으로 사진 1장을 사용한 경우에는 기준점의 증가에 따른 정확도 향상이 크나, 사진을 여러 장 사용하는 경우에는 기준점 증가의 효과가 크게 줄어들는다. 기준점 수가 충분한 경우 사진 수 증가에 따라 정확도는 향상되나 그 효과는 점점 감소한다. 3차원 기준점의 사용 시 2차원 기준점을 사용하는 경우보다 1 화소 정도 더 정확해짐을 보인다.

### 4.3 내부표정요소의 광속 조정 활용

좌/우/중앙(7번, 1번, 4번 사진) 사진의 광속 조정 시, 경중를 계산을 위한 이미지 측정 오차는 1 화소, 지상기준점 오차는 1mm로 입력하였으며, 광속조정 후 24개의 검사점 좌표값을 구했다. 계산된 검사점 좌표와 참값을 비교하여 얻어진 오차는 수직사진(1번 사진)의 해상도로 나누어 화소 단위로 환산하였다. 결과는 아래 그림 8과

같다.(사진 상의 1 화소오차는 지상오차로 약 1.3mm이다.  $1.3\text{mm} \cong 3300\text{mm}(Z_L) \times 0.007\text{mm} / 18\text{mm}(c)$ )

그림 8(a)에서 보듯이 사진을 1장 사용하여 구한 내부표정요소의 경우 4.2절의 결과와 같이 물리적인 값의 정확도는 낮으나, 번들 조정에 사용했을 경우 3차원 복원의 정확도는 상대적으로 좋아짐을 알 수 있다. 또한, 자체 검정에 사용한 지상기준점의 차원이 2차원인 경우에도 3차원인 경우와 비교하여 광속조정 후 3차원 복원 결과는 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 Pullivelli(2005) 연구의 SPR (Single Photo Resection) 방법에서 보이는 것과 같이 내부표정요소의 오차가 외부표정요소와의 상관관계로 보상되기 때문이다.

자체 검정에 3장 이상의 사진을 사용한 경우 내부표정요소 결과 값을 광속조정에 사용하면 3차원 복원 정확도는 안정되며 광속조정 기준점의 개수에 영향을 적게 받을 수 있다.

## 5. 결론

비 측정용 디지털 카메라를 근거리 사진측량에 사용하

기 위해서는 자체 검정을 통해 내부표정요소를 결정하는 과정이 필요하다. 그러나 검정 대상지 구축에는 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 자체 검정을 위하여 다양한 지상기준점 분포와 사진 조합을 통해 자체 검정을 수행하고 구해진 내부 표정요소의 물리적인 값과 근거리 사진측량에 사용되었을 때의 3차원 복원 정확도에 대하여 분석해보았다.

실험 결과, 내부표정요소의 물리적인 값의 정확도는 사진수가 증가할수록, 지상기준점이 증가할수록 좋아졌으나 사진 장수가 2장~3장 및 지상기준점은 20개 이상부터는 그 영향이 크지 않았다. 또한 3차원으로 형성된 지상기준점이 2차원 지상기준점보다 나은 결과를 보여주었다. 그러나 광속 조정에 사용하는 경우에는 내부표정요소의 물리적인 값의 정확도가 낮다하더라도 외부표정요소와의 상관관계로 인하여 3차원 복원 정확도는 상대적으로 높았다.

본 연구를 통해, 근거리 사진측량을 위한 자체 검정 시에, 지상기준점의 배치와 밀도를 안정적으로 가져갈 수 있는 수직사진을 포함하는 3장 이상의 사진으로 안정된 정확도의 내부표정요소를 얻을 수 있음을 알 수 있었고, 3차원 복원을 목적으로 하는 경우, 2차원 지상기준점 10점으로도 높은 정확도의 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

향후 보다 실제적인 결과를 얻기 위해서는 실제 필드 데이터에 적용할 필요가 있으며, 자체 검정에 영향을 줄

수 있는 기타 요소들(B/H비, 촬영 각도) 등에 대한 실험이 필요하다.

## 참고문헌

- 정수, 이창노, 오재홍 (2005), 직접선형변환 매개변수로부터 물리적 사진기 매개변수의 산정, 한국지형공간정보학회지, 제13권, 제2호, pp. 39-43.
- 유복모, 이석근, 최송옥, 김기홍 (1997), 근거리 사진측량을 위한 CCD 사진기 검정에 관한 연구, 한국지형공간정보학회지, 제5권, 제1호, pp. 159-165.
- Brown, D.C. (1966), Decentering distortion of lenses, *Photogramm. Eng.*, 32(3), 444-462.
- Fraser, C.S. (1997), Digital camera self-calibration, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 52, pp. 149-159.
- Gruen, A. and 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, pp. 33.
- Kenefick, J.F., Gyer, M.S. and Harp, B.F. (1972), Analytical self-calibration, *Photogramm. Eng.* 38, pp. 1117-1126.
- McGlone J., C., Mikhail, E. M. and Bethel, J.S. (2004), *Manual of photogrammetry*, ASPRS, pp. 878-879.
- Mikhail, E. M. and Bethel, J. S. and McGlone, J. C. (2001), *Introduction to modern photogrammetry*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 136-137.
- Pullivelli, A. M. (2005), *Low cost digital cameras : calibration, stability analysis, and applications*, Master thesis, University of Calgary, Alberta, Canada. pp. 44-46.

(접수일 2006. 4. 28, 심사일 2006. 5. 15, 심사완료일 2006. 7. 7)