

GPS 데이터 적용을 위한 항공사진측량 최소 기준점수 결정에 관한 연구

A Study on the Determination of the Minimum Number of Control Points for Aerial Photogrammetry Using Simulated GPS Data

金勇日* · 裴台錫**

Kim, Yong-Il · Bae, Tae-Suk

要 旨

항공사진측량 분야에 대한 GPS 기술 응용의 한 예로, 수신기를 항공기에 탑재하여 카메라의 위치를 정확히 측정함으로써 기존의 항공사진측량에서 필요했던 많은 지상기준점을 항공기준점(aerial control points)으로 대체하려는 이론적 연구를 수행했다. 본 연구에서는 GPS 데이터를 항공사진측량에 이용하기 위해 여러 가지 경우에 대해서 Simulation을 통해 항공사진측량에서 대상점의 위치결정에 영향을 주는 조건들을 규명하고, 이에 따라 1:1,000 지형도 작성을 위해 필요한 조건들과 실제의 적용을 위한 값을 제시하였다.

본 연구의 결과는 104매의 사진 블록에서 지상측량을 포함하고, 10 μ m 이상의 정밀도로 좌표측정을 하였을 경우에 6점의 지상기준점 만으로도 충분한 정도의 결과를 얻을 수 있음을 보임으로써 이 기술의 실제적용이 이론적으로 가능함을 입증하였다.

ABSTRACT

As an attempt to apply GPS technique to aerial photogrammetry, an effort is exerted to replace the ground control points that were necessary in the traditional aerial photogrammetry with the aerial control by measuring the position of the camera exposure.

In this study, various situations are simulated to test the conditions that affect the positioning of the points in aerial photogrammetry for the use of GPS data. From the result of the simulations, the necessary conditions and the applicable values to produce a 1:1,000 topographical map were suggested.

In the case of a photo block consists of 104 photos, we found a minimum of six ground control points make acceptable accuracy under the condition of below 10 μ m image positional error and with the ground observations.

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 GPS 기술의 급속한 발전과 더불어 상대측위 방법을 사용하여 위상을 관측함과 아울러 기지점과 이동점을 무선연결(radio link)함으로써 kinematic mode에서 수 cm의 위치결정이 가능하게 되어 이 기술을 기존의 항공사진측량에 이용하려는 연구가 많은 사람들에 의

해서 수행되고 있으며(Colomina, Ackermann, Schade 등), 현재의 수준에서 카메라의 노출중심의 좌표는 10cm 이내에서 결정될 수 있음이 알려져 있다.¹⁾

항공기 탑재 GPS의 이용목적은 크게 두 가지로 나뉘는데, 그 하나는 비행경로를 정확히 추적하여 예정된 경로로 운항함으로써 사진의 노출위치를 정확히 계산하여 계획된 위치에서 촬영할 수 있으므로 종횡중복도를 지나치거나 모자라지 않게 적당한 값으로 줄 수 있다는 것이며, 다른 하나는 기존의 항공사진측량에서 필요한 지상기준점 수를 감소시킬 수 있다는 것이다.

*서울대학교 도시공학과 조교수

**서울대학교 도시공학과 석사과정

Ackermann과 Schade(1993)는 두 개의 횡 strip과 60%의 중중복을 준 경우에 4개의 지상기준점을 사용하여 전체적인 이론적 위치정확도가 $1.4 \sigma_0$ (수평), $1.9 \sigma_0$ (수직)임을 보인 바 있다.²⁾ 또한 Colomina(1989)는 GPS의 위상을 관측함으로써 카메라의 위치를 결정하여 항공기준점(aerial control points)으로 사용하여 미지의 지상점 위치의 평균제곱근 오차가 1.9-2.1 cm(수평), 3.2-4.1 cm(수직)로 결정될 수 있음을 보였다.¹⁾³⁾

이와 같이 GPS 데이터를 이용하여 결정한 항공기준점을 활용하면 지상기준점 측량을 위해 필요한 시간과 비용을 절약하고, 접근제한 지역이나 기준점이 멀리 떨어진 지역의 측량 정확도 향상에 기여할 수 있다.

본 연구의 목적은 GPS 데이터를 이용하여 사진측량의 지상기준점 수를 줄이기 위한 알고리즘 고찰과 그 simulation을 통해 대상점의 위치결정에 영향을 주는 요소들을 규명하고 실제 적용에 있어서 사용할 수 있는 값을 결정함으로써 이 조건하에서 1:1,000 지형도 제작을 위한 최소 기준점수를 결정하는 것이다. 또한 GPS 데이터를 이용한 지형도 제작 업무 뿐만 아니라 항공사진측량의 실제 적용에 사용되는 BUNDLE 조정 프로그램을 구현함으로써, 구조물 변형측량, 정사투영 사진제작 등 많은 응용분야에 활용할 수 있는 토대를 마련하는 것을 목적으로 하고 있다.

1.2 Simulation 수행

지상점의 위치결정을 위한 BUNDLE 조정 프로그램은 C Language로 작성하였다. 그러나 DOS의 메모리 제약(640Kbyte)으로 인해서 사진매수가 10장 이상이 되면 PC에서는 수행할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 UNIX용 C 프로그램으로 컴파일하여 SUN Workstation에서 Simulation을 수행하였다.

2. 사진블럭의 최소제곱 조정

2.1 해석사진측량(Analytical Photogrammetry)

해석사진측량은 기존의 analog 방법의 경우처럼 사진을 도화기에 장착하여 3차원 모델을 재현하는 것이 아니라 사진좌표를 측정함으로써 수학적 계산에 의해 미지 대상점의 3차원 좌표를 구한다. 이러한 해석사진측량의 장점은 다음과 같다.

- ① 카메라의 종류, 초점거리, film의 크기, 표정

(orientation), 비행고도 등에 구애받지 않는다.

- ② 연결점과 결합점을 사용하여 자유도를 높임으로써 정밀도와 정확도 향상을 기대할 수 있다.

- ③ 자연오차와 정오차(film 신축, 대기굴절 왜곡, 카메라 렌즈 왜곡 등)를 효과적으로 제거할 수 있다.

2.2 기본 관측방정식

사진의 블럭조정에 사용되는 기본적인 관측방정식은 다음의 네가지이다.

- ① 상 좌표 관측방정식
- ② 지상점 관측방정식
- ③ 외부표정요소 관측방정식
- ④ 지상측량 관측방정식

지상측량에는 일반적으로 수평거리, 수평각, 방위각, 높이차의 네가지 관측방정식이 이용된다.

2.3 수학적 모형

위에서 기술한 네가지 관측방정식을 결합하여 전체 관측방정식을 구성하면 다음과 같다.⁴⁾

$$\begin{bmatrix} V \\ \dot{V} \\ \ddot{V} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & \ddot{B} \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \\ \ddot{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon \\ \dot{C} \\ \ddot{C} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

- 이 식에서,
- $\epsilon, \dot{\epsilon}, \ddot{\epsilon}$: 외부표정요소, 지상점, 지상측량 표시
- V : 각각의 관측에서의 잔차벡터
- B, I, G : 관측방정식에서의 계수행렬
- $\Delta, \ddot{\Delta}$: 외부표정요소와 지상점에 대한 보정량 벡터
- $\epsilon, \dot{C}, \ddot{C}$: 관측값과 계산값의 차

간단히 표시하면

$$\bar{V} + \bar{B} \cdot \Delta = \bar{C} \quad (2.2)$$

와 같이 나타낸다.

이 식을 최소제곱 해법으로 풀면 다음과 같은 정규방정식으로 표시된다.⁵⁾

$$(\bar{B}^T \bar{W} \bar{B}) \Delta = \bar{B}^T \bar{W} \bar{C} \quad (2.3)$$

다시쓰면

$$\Delta = \left(\overline{B^T W B} \right)^{-1} \overline{B^T W C} \quad (2.4)$$

로 나타낼 수 있다.

2.4 수렴조건

2.4.1 단위 경중률의 표준오차 계산

단위 가중값의 표준오차 (σ_0)는 다음 식으로 구할 수 있다.⁶⁾ 여기서 구하는 값 즉, 단위 가중값의 표준오차 (m_0)는 실제의 값에 대한 추정량이다. 이 값은 사진의 외부표정요소와 지상점 좌표에 대한 분산의 계산에 사용된다.

$$m_0 = \pm \left(\frac{\overline{V^T W V}}{d.o.f} \right)^{1/2}$$

$$= \pm \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij}^T w_{ij} v_{ij} + \sum_{i=1}^m v_i^T w_i v_i + \sum_{j=1}^n v_j^T w_j v_j + \sum_{j=1}^p v_j^T w_j v_j}{d.o.f} \right)^{1/2}$$

$$= \pm \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij}^T w_{ij} c_{ij} + \sum_{i=1}^m c_i^T w_i c_i + \sum_{j=1}^n c_j^T w_j c_j + \sum_{j=1}^p c_j^T w_j c_j}{d.o.f} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

여기서,

n = 지상점수

m = 사진수

p = 지상측량에 관련된 점의 수

d.o.f = 자유도(관측방정식의 수 - 미지수의 수)

2.4.2 수렴조건

외부표정요소와 지상점 좌표에 대한 보정량 계산이 끝난 후 반복계산을 위한 수렴조건은 다음과 같다.⁹⁾ 팔호안은 설정값이다.

① 반복회수 : 일정회수 이상의 반복이 계속될 때 (10회)

② 미소보정량 : 각과 좌표에 대한 보정량이 설정한 값보다 작을 때

(角은 1", 座標는 1 mm)

③ 단위 가중값의 표준오차(m_0)의 변화량이 설정값보다 작을 때

$$\frac{m_0(\text{以前}) - m_0(\text{現在})}{m_0(\text{現在})} < 0.001$$

④ 발산 : m_0 가 연속적으로 커질 때

3. 좌표계 변환

GPS관측에 의해서 얻어지는 좌표는 WGS84 타원체를 기준으로 한 직각좌표이다. 그러나 우리 나라는 Bessel 타원체를 채택하고 있으므로 양자간의 변환이 필요하다.⁷⁾ 또한 우리의 실용성과는 타원체상의 좌표를 횡원통면에 투영(TM, Transverse Mercator Projection)한 값이므로 타원체 상의 좌표에서 평면좌표로의 변환도 이루어져야 한다.⁸⁾ 일반적으로 많이 사용하는 타원체 간의 변환식은 변환요소 방법, MRE 방법, 표준 Molodensky 방법 등이 있다.⁹⁾ 국내에서는 박필호(1993) 등이 발표한 변환요소 방법의 7개 변환계수가 있으나,¹⁰⁾ 이 값들은 우리 나라 전역을 측정하여 결정된 값이 아니라 충남북 일대의 삼각점을 대상으로 하여 만들어진 계수이기 때문에 GPS에 의해 취득된 좌표값을 현재 우리가 사용하고 있는 평면직각좌표 값으로 변환시키기 위한 정확한 변환식의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 아직까지 국내에 GPS 수신기를 항공기에 탑재하여 실제로 얻은 자료가 없기 때문에 타원체 변환에 관한 부분은 실제로 적용하지 않았고, 사용한 데이터는 모두 Bessel 타원체에서 평면직각 좌표계로 표현된 값이다.

4. 데이터 처리와 평가

4.1 데이터 Simulation

4.1.1 기본적인 구성요소

본 연구에서 사용되는 데이터를 작성하기 위한 기본적인 구성요소는 국립지리원 발행의 항공사진측량 작업 내규¹¹⁾와 실제로 항공사진측량 작업을 하는 기관의 내부 규정에 따라 이루어졌으며 그 내용은 다음과 같다.¹²⁾

① 사진측척 : 1 / 5,000

② 카메라의 초점거리 : 152.454 mm

③ 촬영고도 : 850 m (대상지역 평균고도는 100 m)

④ 촬영기선 길이 : 460 m, 촬영경로 간격 : 810 m

⑤ 대상 Block의 크기 : 8 course × 13 photo (104

photo)

- ⑥ image 좌표측정의 표준편차 : 10 μm
- ⑦ 초기값의 표준편차
 - 카메라의 회전각 : 10°
 - 카메라의 좌표 : 0.1 m(수평), 0.5 m(수직)
 - 대상점(기준점)의 공간좌표 : 0.1 m(평면위치, 표고)
 - 대상점(非기준점)의 공간좌표 : 300 m(수평), 100 m(수직)

지상기준점의 경우에 표고기준점은 변환(타원체고에서 정표고)에 따른 오차 때문에 기준점 수가 작아질 경우에는 사용하지 않고 수평기준점 만을 사용한다.

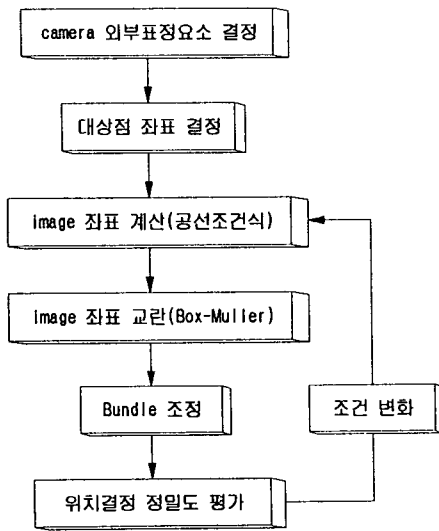


그림 1. 전체 simulation의 순서도

4.1.2 simulation 순서

전체적인 simulation 순서는 다음과 같다.

- ① 카메라의 외부표정요소 결정 : 촬영조건에 맞게 카메라의 공간좌표와 회전각 결정
- ② 대상점 좌표 결정 : 각 사진에 대하여 고르게 분포하도록 대상점 결정
- ③ 공선조건식을 이용하여 image 좌표 계산
- ④ image 좌표를 교란시킴
- ⑤ BUNDLE 조정 프로그램으로 대상점의 좌표계산
- ⑥ 위치결정 정밀도 평가
- ⑦ 위치결정에 관계하는 여러 조건들을 변화시키면서 반복적으로 simulation

4.2 simulation 결과

표 1~8과 같다

4.3 결과의 평가

항공사진 기준점 측량에서 대상점의 사진좌표를 측정하는 다음, 기준점을 이용하여 조정계산을 하는 경우의 오차한계는 기준점 잔차, 연결점(pass point) 및 결합점(tie point)의 조정값의 잔차는 평면위치와 표고 모두 표준편차가 촬영고도의 0.2% 이내이고, 최대값이 촬영고도의 0.4% 이내이어야 한다. 본 연구에서는 촬영고도가 850 m이므로 조정값의 표준편차는 17 cm 이내이어야 하고, 또한 최대값도 34 cm 이내에 있어야 한다.¹¹⁾

(1) 카메라 위치 정확도에 의한 영향

카메라의 위치결정 정확도가 0.1 m(수평), 0.5 m(수

표 1. Simulation 1 (camera의 위치정확도 변화)

구분	항목	사진매수	기준점 수	camera의 위치정확도	좌표측정 정밀도
㉠		104	6	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μm
㉡		104	10	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μm
㉢		104	6	5 m(수평), 100 m(수직)	10 μm
㉣		104	10	5 m(수평), 100 m(수직)	10 μm

표 2. Simulation 1의 결과

(단위 : cm)

	㉠	㉡	㉢	㉣
μ_{m_x}	9.7	9.3	52.6	43.9
μ_{m_y}	13.8	12.6	49.3	40.9
μ_{m_z}	17.2	16.3	107.4	88.3

표 3. Simulation 2 (사진좌표 측정정밀도 변화)

구분 \ 항목	사진매수	기준점 수	camera의 위치정확도	좌표측정 정밀도
㉠	104	6	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μ m
㉡	104	6	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	20 μ m
㉢	104	10	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μ m
㉣	104	10	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	20 μ m

표 4. Simulation 2의 결과

(단위 : cm)

	㉠	㉡	㉢	㉣
μ_{m_x}	9.7	11.8	15.8	20.7
μ_{m_y}	13.8		25.5	11.0
μ_{m_z}	17.2		27.5	16.3

표 5. Simulation 3 (기준점 수 변화)

구분 \ 항목	사진매수	기준점 수	camera의 위치정확도	좌표측정 정밀도
㉠	104	6	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μ m
㉡	104	10	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μ m
㉢	104	50	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μ m
㉣	104	100	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μ m

표 6. Simulation 3의 결과

(단위 : cm)

	㉠	㉡	㉢	㉣
μ_{m_x}	9.7	11.8	9.3	11.0
μ_{m_y}	13.8		12.6	6.3
μ_{m_z}	17.2		16.3	11.6

표 7. Simulation 4 (지상측량 포함 여부)

구분 \ 항목	사진매수	기준점 수	camera의 위치정확도	좌표측정 정밀도	지상측량 有無
㉠	104	6	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μ m	無
㉡	104	6	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μ m	有
㉢	104	10	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μ m	無
㉣	104	10	0.1 m(수평), 0.5 m(수직)	10 μ m	有

표 8. Simulation 4의 결과

(단위 : cm)

	㉠	㉡	㉢	㉣
μ_{m_x}	9.7	11.8	9.3	11.3
μ_{m_y}	13.8		13.1	11.0
μ_{m_z}	17.2		16.9	16.3

직)인 경우에는 기준점이 6점인 경우에도 1:1,000 지형도 도화에 필요한 정밀도를 얻을 수 있다. 일반적으로 항공사진측량에 사용될 GPS 데이터는 cm 수준의 정밀도를 요구하지는 않는다. 적용될 지도축척에 따라 다르지만 0.1~1 m 정도이면 GPS 데이터를 항공기준점으로 사용하기에 충분하다.

(2) 사진좌표 측정 정밀도에 의한 영향

사진측량에서 가장 기본적이고 중요한 관측방정식이 공선조건식에 의한 사진좌표 관측방정식이다. 따라서 원칙적으로 사진좌표의 측정 정밀도가 전체적인 품질을 결정하게 된다. 위의 결과에서 알 수 있는 것처럼 사진좌표 측정 정밀도가 20 μ m 에 미치지 못하는 경우에는 지상기준점이 10점 이상이어야 한다. 그러나 본 연구에서는 항공사진측량에 필요한 최소의 기준점 수를 결정하는 것을 목적으로 하기 때문에 104매의 사진에서 10점 이상의 기준점은 의미를 큰 의미를 갖지 못한다. 따라서 사진좌표 측정장비의 정밀도는 10 μ m 이내이어야 한다. 현재 우리 나라에서 많이 사용하고 있는 해석도화기인 P2, P3의 좌표측정 정밀도는 10 μ m 정도이다. 따라서 이 장비들을 이용하여 사진좌표를 측정할 경우 충분한 정도의 결과를 얻을 수 있다.

(3) 기준점 수의 변화에 의한 영향

위의 ①, ②의 simulation에서도 알 수 있듯이, 카메라의 위치정확도가 0.1 m(수평), 0.5 m(수직)이고, 사진좌표 측정 정밀도가 10 μ m 이내인 경우에는 사진 104매에 대하여 6점의 기준점 만으로도 위치결정의 허용범위를 만족한다.

(4) 지상측량의 영향

항공기준점을 이용하여 조정을 하는 경우 지상측량을 도입함으로써 기준점이 6점인 경우와 10점인 경우 모두 수평위치에서 약 0.5 cm, 표고에서 약 0.3-0.4 cm 정도의 정밀도가 향상되었다.

5. 결 론

5.1 연구의 성과

본 연구의 결과로서 1:1,000 지형도 제작시 GPS 데이터를 이용하여 항공사진측량을 하는 경우 하는 경우에는 6점의 지상기준점 만으로도 충분한 정확도를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

또한 본 연구에서는 실제적으로 GPS를 이용하여 항공

사진측량을 수행할 경우에 사용할 수 있는 조건들과 그 값을 다음과 같이 제시하였다.

i) 카메라의 위치결정 정확도 : 0.1 m(수평), 0.5 m(수직)

ii) 사진좌표 측정 정밀도 : 5 μ m

iii) 지상기준점의 위치 정확도 : 0.1 m(수평위치, 표고)

iv) 지상측량 포함 : 수평거리, 수평각, 방위각, 높이차
따라서 본 연구결과를 이용한다면 기존의 항공사진측량에서 20% 이상을 차지하는 지상기준점 측량에 필요한 비용과 시간을 대폭적으로 절감할 수 있고, 접근 제한지역과 같이 지상기준점을 확보하기가 힘들 경우에 항공기준점을 이용하여 항공사진측량 작업을 수행할 수 있다.

5.2 연구의 발전방향

항공사진측량에 GPS 데이터를 이용하기 위해서 반드시 필요한 선결과제는 다음과 같다.

① 타원체간의 정확한 변환관계식이 개발되어야 한다. 여러 가지 타원체간의 변환 공식과 그에 따른 오차를 결정하여 GPS 데이터를 평면직각좌표로 변환할 때 적용되어야 한다.

② 타원체고를 정표고로 변환시키기 위한 정밀한 지오이드 모형이 개발이 이루어져야 한다.

③ GPS 데이터의 오차소거에 대한 모델링과 그 정확도 점검을 위한 방법을 개발하여 본 연구를 통해서 작성된 조정 프로그램과 결합함으로써 일괄적인 처리를 위한 프로그램이 개발이 필요하다.

이러한 선결과제의 해결과 함께 항공사진측량의 궁극적 목적인 정확한 지도 제작을 위해 GPS 데이터를 이용한 항공사진측량의 정확도 향상에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. I.Colomina, Combined Adjustment of Photogrammetric and GPS Data, 42nd Photogrammetric Week, Stuttgart, 11-16, 1989
2. F.Ackermann, H.Schade, Application of GPS for Aerial Triangulation, PE&RS, Vol.59, No. 11, 1993, pp 1625-1632
3. I.Colomina, A Note on the Analytics of Aerial Triangulation with GPS Aerial Control, PE&RS, Vol.59, No.11, 1993, pp 1619-1624
4. Byung-Guk Kim, Development of a Photogrammetric

- System for Monitoring Structural Deformations of the Sturgeon Bay Bridge, WISCONSIN-MADISON, 1989, pp 47-77
5. Paul R. Wolf, Adjustment Computations:(PRACTICAL LEAST SQUARES FOR SURVEYORS), 2ND EDITION, 1980, p 95
 6. ASP, Manual of Photogrammetry, fourth edition, 1980, pp 37-101
 7. Richard H. Rapp, GEOMETRIC GEODESY, PART I, The Ohio State University, 1989
 8. 佐藤 裕, 測地學の基礎, 山海堂, 1984
 9. Defense Mapping Agency, Defense Mapping Agency Technical Report 8350.2-B, ch.7, 1987
 10. 박필호, 박종욱, 강준목, GPS 실용화를 위한 우리나라 측지계와 WGS 84의 좌표변환(II), 한국측지학회지, 제 11권 제1호, 1993
 11. 국립지리원, 항공사진측량 작업내규, 1988, pp 17-18
 12. 유복모, 사진측정학, 문운당, 1991, pp 63-65