

UAV기반 저고도 멀티센서 사진측량 시스템의 캘리브레이션

Calibration of a UAV Based Low Altitude Multi-sensor Photogrammetric System

이지훈¹⁾ · 최경아²⁾ · 이임평³⁾

Lee, Jihun · Choi, Kyoungah · Lee, Impyeong

Abstract

The geo-referencing accuracy of the images acquired by a UAV based multi-sensor system is affected by the accuracy of the mounting parameters involving the relationship between a camera and a GPS/INS system as well as the performance of a GPS/INS system. Therefore, the estimation of the accurate mounting parameters of a multi-sensor system is important. Currently, we are developing a low altitude multi-sensor system based on a UAV, which can monitor target areas in real time for rapid responses for emergency situations such as natural disasters and accidents. In this study, we suggest a system calibration method for the estimation of the mounting parameters of a multi-sensor system like our system. We also generate simulation data with the sensor specifications of our system, and derive an effective flight configuration and the number of ground control points for accurate and efficient system calibration by applying the proposed method to the simulated data. The experimental results indicate that the proposed method can estimate accurate mounting parameters using over five ground control points and flight configuration composed of six strips. In the near future, we plan to estimate mounting parameters of our system using the proposed method and evaluate the geo-referencing accuracy of the acquired sensory data.

Keywords : UAV, Multi-sensor System, Calibration, Mounting Parameter, Image Geo-referencing, GPS/IMU

초 록

UAV기반 멀티센서 시스템을 통해 취득된 영상의 지오레퍼런싱 정확도는 사용된 GPS/INS 시스템의 성능뿐만 아니라 카메라와 GPS/INS 시스템간의 상호관계를 나타내는 탑재변수의 정확도에 의해 영향을 받는다. 따라서 멀티센서 시스템 개발에 있어서 탑재변수의 정확한 추정 은 필수적이다. 현재 우리는 재난/재해와 같은 긴급 상황에 대한 빠른 대응을 위해 실시간으로 대상지역을 감시할 수 있는 저고도 UAV기반의 실시간 공중자료획득 시스템을 개발하고 있다. 본 연구는 현재 개발 중인 시스템의 탑재변수 추정을 위한 시스템 캘리브레이션 방법론을 제안한다. 또한 실제 시스템의 제원을 이용한 시뮬레이션 데이터를 이용하여 정확하고 효율적인 캘리브레이션을 위한 효과적인 비행경로 및 지상기준점의 필요 개수를 도출하였다. 실험 결과, 총 6개의 스트립으로 구성된 비행경로를 따라 획득된 데이터와 5점 이상의 지상기준점 정보를 이용하면 제안된 방법론을 통해 정확한 탑재변수의 추정이 가능함을 확인할 수 있었다. 향후에는 제안된 방법론을 이용하여 개발된 시스템의 탑재변수를 추정하고 이를 이용하여 획득된 센서 데이터의 지오레퍼런싱 정확도 평가를 수행할 예정이다.

핵심어 : 무인항공기, 멀티센서 시스템, 캘리브레이션, 탑재변수, 영상 지오레퍼런싱, GPS/IMU

1. 서 론

항공사진측량은 수치지도, 정사영상, DEM 등과 같은

공간정보를 생성하기 위하여 이용되고 있다. 공간정보를 생성하기 위해서는 영상으로부터 지상 객체의 3차원 좌표를 정확하게 획득해야하고 이를 위해 영상의 외부표정

1) 서울시립대학교 대학원 공간정보공학과 석사과정(E-mail : fantest@uos.ac.kr)

2) 정희원 · 서울시립대학교 대학원 공간정보공학과 박사과정(E-mail : shale@uos.ac.kr)

3) 교신저자 · 정희원 · 서울시립대학교 도시과학대학 공간정보공학과 부교수 (E-mail: iplee@uos.ac.kr)

요소를 정확하게 확보하는 것이 중요하다. 기존의 항공사진측량에서는 다수의 지상기준점을 이용하는 전통적인 항공삼각측량 기법으로 영상의 외부표정요소를 결정하였지만, GPS/INS 시스템의 개발 및 성능 향상으로 인해 이를 통해 획득된 위치/자세 데이터와 소수의 지상기준점을 이용하여 외부표정요소를 결정하고 있다. 또한, 최근에는 지상기준점 없이 GPS/INS 시스템을 통해 획득된 위치/자세 데이터만을 이용하여 영상의 외부표정요소를 결정하는 직접 지오레퍼런싱(direct geo-referencing) 방법이 이용되고 있으며 항공사진측량 뿐만이 아닌 다양한 영상기반 어플리케이션에 적용되고 있다(Habib 등, 2010b). 특히, UAV에 카메라와 GPS/INS 시스템을 탑재하여 신속하게 데이터를 획득하고 공간정보를 생성하는 연구들에 적용되고 있으며 재난/재해 피해조사 및 감시/정찰 등과 같은 다양한 분야에서 이를 활용하고 있다.

GPS/INS 시스템을 통해 획득된 위치/자세 데이터를 이용하는 항공사진측량은 센서의 정확도뿐만 아니라 카메라와 GPS/INS 시스템간의 상호관계를 나타내는 탑재변수에 의해 외부표정요소의 정확도가 결정된다. 따라서 시스템 개발 시 정확한 탑재변수(mounting parameters)의 추정 은 필수적이다. 탑재변수는 카메라 좌표계와 GPS/INS 시스템 좌표계간의 원점에 대한 이동벡터(lever-arms offset)와 좌표계간 각 축의 회전각(bore-sight angles)으로 구성된다. 이와 같은 변수들은 시스템 개발 시 실제 측정을 통해 대략적으로 결정할 수 있지만 정확하게 알아낼 수가 없다. 따라서 실제 지상에 대한 정확한 정보를 알고 있는 검증지역을 구축하고 시스템을 적용하여 획득된 데이터를 통해 탑재변수를 추정하는 방법이 이용되고 있다.

탑재변수를 결정하기 위한 과정을 시스템 캘리브레이션이라고 하며, 이는 크게 두 가지 방법으로 분류할 수 있다. 첫째, 두 단계(two step) 방법론은 지상기준점을 이용하여 전통적인 항공삼각측량을 통해 획득된 영상의 외부표정요소와 GPS/INS 시스템을 통해 획득된 위치/자세 데이터를 비교하여 탑재변수를 결정하는 방법으로 개별 영상 마다의 탑재변수를 획득하고 이를 평균하여 최종적으로 탑재변수를 결정한다(Toth, 1998; Cramer 등, 2001). 이 방법은 단순하고 간편하지만 외부표정요소를 정확하게 추정해야 하기 때문에 다수의 지상기준점이 요구된다. 둘째, 한 단계(single step) 방법론은 공선조건식에 GPS/INS 데이터와 탑재변수를 추가하고 이를 이용하여 광속조정법을 통해 결정하는 방법으로 추정된 탑재변수의 정확도가 높으며 소수의 지상기준점만으로도 수행될 수 있다. 그러나

이 방법은 적합한 비행경로를 통해 데이터를 획득해야만 정확한 탑재변수를 추정할 수 있다. 최근에는 이러한 장/단점으로 인해 한 단계 방법론이 활발히 연구되고 있으며 특히 비행경로 및 지상기준점에 따른 탑재변수 추정의 정확도 평가에 관한 연구들이 진행되고 있다(Pinto 등, 2002; Honkavaara, 2003; Honkavaara, 2004).

현재 우리는 재난/재해와 같은 긴급 상황에 대한 신속한 대응을 위해 실시간으로 긴급 상황을 모니터링 할 수 있는 저고도 UAV기반의 실시간 공중자료획득 시스템을 개발하고 있다(최경아 등, 2011). 전체 시스템은 항공부문과 지상부문으로 구성되어 있으며 항공부문은 디지털 카메라, 레이저스캐너, GPS, IMU 등이 탑재된 저고도 UAV기반 시스템으로 피해지역에 대한 센서 데이터를 획득하는 역할을 수행한다. 획득된 센서 데이터는 실시간으로 지상부문으로 전송되며 지오레퍼런싱 과정을 거쳐 공간정보를 생성하게 된다. 영상 지오레퍼런싱은 획득된 GPS/IMU의 위치/자세 데이터를 이용하여 기준점 없이 결합조정에 기반한 연속 항공삼각측량을 통해 진행된다(최경아 등, 2009). 이때 지오레퍼런싱 정확도는 영상과 동시에 취득된 GPS/IMU 데이터의 정확도와 탑재변수의 정확도에 의해 영향을 받는다.

본 연구에서는 현재 개발 중인 UAV기반 실시간 공중자료획득 시스템 중 항공부문 시스템의 탑재변수를 추정하기 위한 선행연구로서 멀티센서 시스템에 대한 캘리브레이션 방법론을 제안하고자 한다. 본 시스템과 같은 UAV기반의 멀티센서 시스템은 기존의 항공측량 시스템과 달리 개별 센서들이 좁은 영역 안에 결합되어 있어 탑재변수가 크지 않고 UAV의 비행 특성상 자세의 변화가 심하기 때문에 이에 적합한 방법론이 요구된다. 따라서 개발된 항공부문 시스템의 제원을 통해 시뮬레이션을 수행하여 실제 시스템을 운용하였을 때 획득 가능한 센서 데이터를 생성하고 이를 이용하여 정확하고 효율적인 시스템 캘리브레이션을 위한 방법론을 도출하고자 한다.

2. 실시간 공중자료 획득 시스템

현재 개발되고 있는 실시간 공중자료 획득 시스템은 재난/재해와 같은 긴급 상황을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 저고도 UAV기반의 멀티센서 시스템이다. 본 시스템은 센서 데이터를 획득하고 지상부문으로 데이터를 전송하는 항공부문과 전송받은 데이터를 이용하여 공간정보를 생성하는 지상부문으로 이루어져 있다. 획득된 데이터

는 실시간으로 지상부문으로 전송되고, 전송된 데이터는 실시간 지오레퍼런싱 과정을 거쳐 정사영상과 DEM을 고속 생성한다. 전체 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 항공부문 시스템은 GPS, IMU, 디지털 카메라, 레이저스캐너 등으로 센서 데이터를 획득하는 센서부와 이러한 센서들의 동작을 지원하는 온보드컴퓨터, 짐발(Gimbal), RF전송모듈, 전력공급모듈 등을 포함하는 센서지원부로 구성된다. 모든 센서와 지원 모듈은 프레임에 통합되어(그림 2) 저고도 UAV에 탑재된다. 취득된 센서 데이터는 지상국으로 전송되며 실시간 지오레퍼런싱을 통해 DSM, 정사영상과 같은 공간정보를 생성한다.

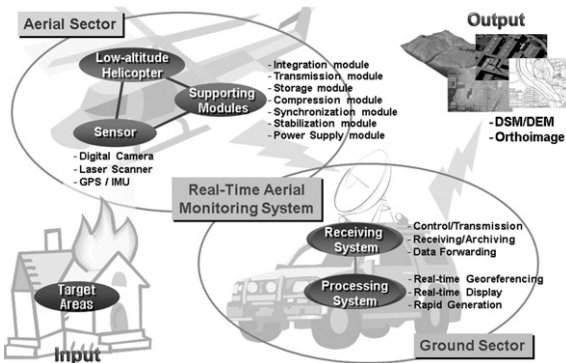


그림 1. 실시간 공중자료 획득 시스템



그림 2. 센서 및 지원 모듈

개발된 시스템은 긴급 상황 발생 시 대상지역의 고해상도 영상을 획득하기 위해 약 150~200m의 저고도에서 운용되며 이로 인해 영상의 지상 커버리지가 기존의 항공영상보다 작다. 또한 UAV에 여러 가지 센서들을 탑재해야 하기 때문에 개별 센서 간 탑재변수의 크기가 작으며, 비행 특성 상 기존 항공측량용 항공기보다 자세의 변화가 크다. 따라서 이러한 시스템의 특성 및 운용 환경 상 UAV기반 시스템에 적합한 방법론이 설정되어야 한다. 특히 탑재변수가 크지 않기 때문에 정밀한 추정이 가능해야 하며 자세의 변화가 심하므로 bore-sight angles을 정확하게

추정하여야 정확도 높은 외부표정요소를 획득할 수 있다. 또한 캘리브레이션 과정 시 지상기준점의 이용이 필수적이므로 경제적인 측면을 고려하여 소수의 지상기준점을 이용할 수 있는 방법론이 요구된다.

3. 시스템 캘리브레이션

시스템 캘리브레이션은 UAV기반 멀티센서 시스템에 탑재되는 카메라와 GPS/IMU 사이의 기하학적 관계인 탑재변수를 결정하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 탑재변수의 추정 정확도 및 경제성을 고려하여 캘리브레이션 방법론을 적용하고자 한다. 따라서 기존의 시스템 캘리브레이션을 위한 두 가지 방법론 중 높은 정확도로 탑재변수의 추정이 가능하고 소수의 지상기준점을 이용하는 한 단계 방법론을 적용하였다.

3.1 시스템 캘리브레이션을 위한 수학적 모델 수립

본 연구는 GPS/IMU를 통해 획득된 위치/자세 데이터와 탑재변수를 추가한 공선조건식을 수학적 모델로 이용한다. 그림 3은 일반적인 항공사진측량을 위해 항공기에 탑재되는 카메라와 GPS/IMU 시스템에 대하여 각각의 개별 좌표계를 정의하고 상대적인 관계를 나타낸 것이다. 시스템 캘리브레이션을 통해 결정하고자 하는 탑재변수는 GPS/IMU 좌표계상에서 카메라 좌표계 원점으로서의 벡터인 lever-arm offset(\vec{P}_C)과 GPS/IMU 좌표계에서 카메라 좌표계로의 회전행렬인 bore-sight angles(R_C^G)이다. 식 (1)은 공선조건식에 탑재변수를 추가한 그림 4에 대한 수학적 모델이며 이를 이용하여 광속조정법 기반의 항공삼각측량을 수행하게 된다. 이때, 카메라의 내부표정요소는 별도의 카메라 캘리브레이션을 통해 정확하게 알고 있다고 가정하였다.

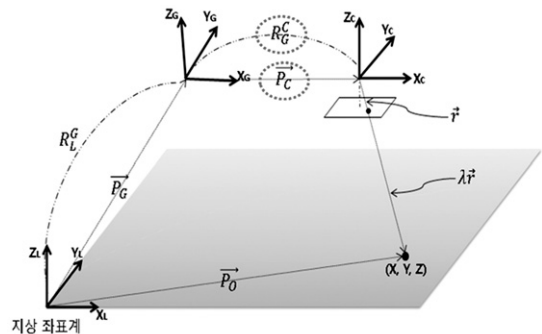


그림 3. 개별 센서들의 기하학적 관계

$$\vec{r} = \frac{1}{\lambda} R_G^C (R_L^C (\vec{P}_O - \vec{P}_C) - \vec{P}_C) \quad (1)$$

여기서,

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} x - x_p \\ y - y_p \\ -c \end{bmatrix} : \text{카메라 좌표계상에서의 영상점 벡터}$$

R_G^C : GPS/IMU 좌표계에서 카메라 좌표계로의 회전행렬 (boresight angles)

\vec{P}_C : GPS/IMU 좌표계상에서의 카메라 좌표계로의 원점 벡터 (lever-arm offset)

R_L^C : 지상 좌표계에서 GPS/IMU 좌표계로의 회전행렬 (GPS/IMU의 자세)

\vec{P}_G : 지상 좌표계상에서의 GPS/IMU 좌표계로의 원점 벡터 (GPS/IMU의 위치)

\vec{P}_O : 지상 좌표계상에서의 지상점 벡터

3.2 항공삼각측량을 통한 탑재변수 추정

기존의 공선조건식에 기반한 수학적 모델인 식 (1)의 좌변에는 카메라의 내부표정요소와 영상점 좌표가 관측값으로 있고 우변에는 탑재변수, GPS/IMU의 위치/자세 그리고 지상 객체의 좌표가 미지수로 있다. 이들의 관계는 비선형이기 때문에 Taylor series의 1차 항까지만 전개하여 선형화하고 GPS/IMU의 위치/자세 데이터와 지상기준점 좌표를 제약조건으로 추가하여 식 (2)와 같은 관측방정식을 수립하였다. 광속조정법 기반의 항공삼각측량은 확률적 제한조건(stochastic constraints)을 포함하는 Gauss-Markov 모델인 식 (2)에 최소제곱법을 적용하여 탑재변수, GPS/IMU의 위치/자세와 지상점 좌표를 추정하게 된다.

$$\begin{bmatrix} y_i \\ y_e \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & A_e & A_p \\ 0 & K_e & 0 \\ 0 & 0 & K_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_m \\ \xi_e \\ \xi_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_i \\ e_e \\ e_p \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} e_i \\ e_e \\ e_p \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \sigma_0^2 \begin{bmatrix} P_i^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & P_e^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & P_p^{-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

y_i : 영상점 좌표에 대한 측정값과 계산값의 차이

y_e : 획득된 GPS/IMU의 위치/자세에 대한 초기값과 제약요소의 차이

y_p : 지상점 좌표에 대한 초기값과 제약요소의 차이

A_m : 공선조건식을 탑재 변수에 대하여 미분한 설계행렬

A_e : 공선조건식을 GPS/IMU의 위치/자세에 대하여 미분한 설계행렬

A_p : 공선조건식을 지상점 좌표에 대하여 미분한 설계

행렬

K_e : GPS/IMU의 위치/자세를 제약조건으로 사용하기 위한 설계행렬

K_p : 지상기준점 좌표를 제약조건으로 사용하기 위한 설계행렬

ξ_m : 탑재 변수에 대한 초기값과의 차이

ξ_e : GPS/IMU의 위치/자세에 대한 초기값과의 차이

ξ_p : 지상점 좌표에 대한 초기값과의 차이

P_i, P_e, P_p : 영상점 좌표, GPS/IMU의 위치/자세, 지상기준점 좌표에 관한 경중률

선형화된 모델 식 (2)는 추정값인 탑재변수, GPS/IMU의 위치/자세 그리고 지상점 좌표에 대한 초기값이 요구된다. 탑재변수에 대한 초기값은 실제 탑재된 카메라와 GPS/IMU간의 lever-arms offset과 bore-sight angles을 대략적으로 측정하여 대입하고 개별 영상의 초기 GPS/IMU의 위치/자세는 실제 획득된 센서 데이터를 이용한다. 지상점 좌표의 초기값은 초기 탑재변수와 GPS/IMU의 위치/자세를 조합하여 계산된 외부표정요소와 영상점 좌표의 측정값을 공선조건식에 대입하여 얻는다. 이때 하나의 지상점은 다수의 영상에 나타나게 됨으로 개별 영상마다의 투영 중심과 영상점을 지나는 직선을 생성한다. 이렇게 생성된 다수의 직선은 동일한 지상점에서 비롯된 것이므로 정확히 한 지점에서 만나야 한다. 그러나 개별 영상의 투영 중심과 영상점 좌표에 오차가 존재하기 때문에 하나의 지상점에서 만나지 않는다. 그러므로 최소제곱법을 이용하여 모든 직선에 가장 근접한 점을 계산하여 지상점 좌표의 초기값으로 결정한다.

제안된 광속조정법 기반의 캘리브레이션은 직접 측정된 영상점 좌표 값과 공선방정식에 의해 계산된 값의 차이의 제곱의 합을 최소로 하는 탑재변수, GPS/IMU로 획득된 위치/자세와 지상점 좌표를 추정한다. 따라서 식 (2)로부터 식 (3)과 같은 정규방정식을 수립하고 이 식을 이용하여 탑재변수, GPS/IMU의 위치/자세와 지상점 좌표가 수립할 때까지 반복 조정계산하면 최종적으로 보정된 탑재변수, 위치/자세와 지상점 좌표를 획득할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_m^T P_i^{-1} A_m & A_m^T P_i^{-1} A_e & A_m^T P_i^{-1} A_p \\ A_e^T P_i^{-1} A_m + K_e^T P_e^{-1} K_e & A_e^T P_i^{-1} A_e + K_e^T P_e^{-1} K_e & A_e^T P_i^{-1} A_p \\ A_p^T P_i^{-1} A_m & A_p^T P_i^{-1} A_e & A_p^T P_i^{-1} A_p + K_p^T P_p^{-1} K_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_m \\ \xi_e \\ \xi_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.3 시스템 캘리브레이션을 위한 비행경로 및 지상기준점

정확한 시스템 캘리브레이션을 위해서는 수학적 모델 뿐만 아니라 적절한 비행경로와 지상기준점이 제공되어야 한다. 이는 결정하고자 하는 탑재변수가 GPS/IMU의 위치/자세 데이터와 높은 상관관계를 갖기 때문이다. 따라서 비행경로 및 지상기준점이 적절히 제공되어야 정확하게 탑재변수를 결정할 수 있다. 시스템 캘리브레이션 시 최소로 요구되는 비행경로 및 지상기준점의 구성은 lever-arm offsets 중 ΔX , ΔY 와 bore-sight angles 중 roll, pitch angle을 결정하기 위한 100% 중첩을 두고 획득된 서로 반대 방향으로의 두 개의 스트립, bore-sight angles 중 yaw angle을 결정하기 위하여 두 개의 스트립 중 50%의 side lap을 갖으면서 평행을 이루는 스트립, 그리고 ΔZ 를 결정하기 위한 하나의 지상기준점이다(Habib, 2010a). 본 연구에서는 정확하고 효율적인 시스템 캘리브레이션을 수행할 수 있는 최적의 비행경로 및 지상기준점의 개수를 도출하기 위하여 다양한 비행경로와 지상기준점의 분포를 시뮬레이션하고 제안된 수학적 모델에 기반한 캘리브레이션을 통해 그 결과를 분석하였다.

4. 실험 및 결과 분석

본 연구에서는 개발된 항공부문 시스템에 대한 효율적이고 정확한 시스템 캘리브레이션 방법을 도출하기 위하여 3 종류의 비행경로에 따른 시뮬레이션을 수행하였으며 지상기준점의 개수에 따라 추정되는 탑재변수와 지상점 좌표의 정확도를 분석하였다.

4.1 데이터 시뮬레이션

시뮬레이션 데이터는 개발된 항공부문 시스템의 제원에 기초하여 생성하였으며 그 순서는 그림 4와 같다. 먼저 대상 지역의 표고를 지정하고 비행고도와 경로를 설정하였다. 이때 비행경로는 그림 5와 같이 총 6개의 스트립을 3 종류로 분류하여 각각의 비행경로를 생성하였다. 이때, 동-서 방향으로의 스트립(L1, L2, L3)은 고도 150m로 설정하여 스트립 당 8장의 영상을 획득하고, 남-북 방향으로의 스트립(L4, L5, L6)은 고도 200m로 설정하여 스트립 당 4장의 영상을 획득하도록 하였다. 항공 시스템은 정해진 경로를 따라 60km/h의 속도로 비행하고 초당 1개의 영상을 획득하는 시나리오를 가정하였다. 이때 영상 간 중복도는 150m의 비행고도에서 85%, 200m의 고도에서 88.5%

였다. 스트립간의 중복도는 50%로 정하였으나 L1과 L2, L4와 L5간의 중복도는 100%로 설정하였다.

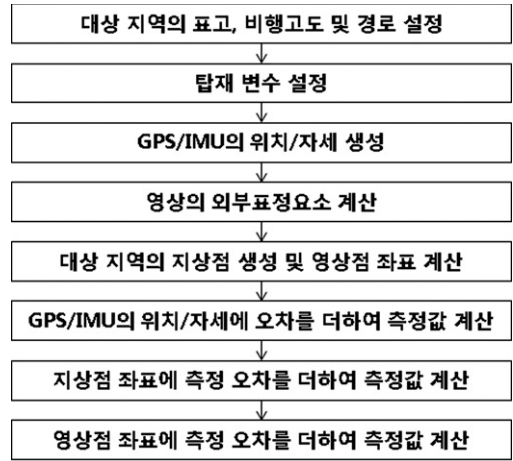


그림 4. 시뮬레이션 순서도

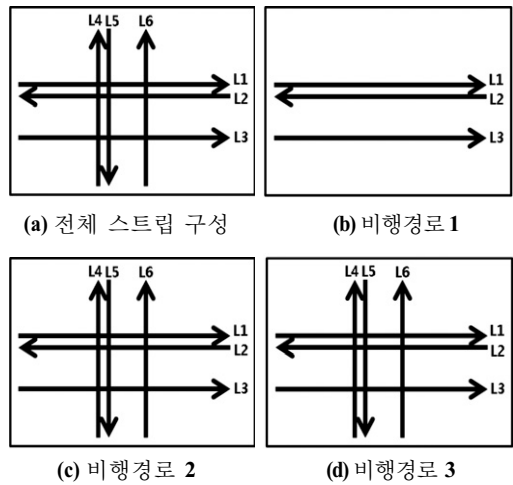


그림 5. 비행경로 설정

참값의 탑재변수를 설정하고 영상 획득 시점마다의 GPS/IMU의 위치/자세를 생성하였으며, 두 데이터를 이용하여 영상의 외부표정요소를 계산하였다. 대상 지역 내 지상점을 규칙적으로 분포시켰으며 이에 대응되는 영상점의 좌표를 외부표정요소를 이용하여 back projection을 통해 생성하였다(최경아 등, 2009). 이렇게 시뮬레이션된 탑재변수, GPS/IMU 데이터, 외부표정요소, 지상점, 영상점은 참값이며, 각각 측정 오차를 더하여 실제 시스템을 운용하였을 때 획득될 것으로 예상되는 측정값을 생성하였다. 실제 시스템에 탑재된 센서의 정확도

를 고려하여 GPS의 측정오차는 수평위치와 수직위치가 동일하게 0.1m의 표준편차를 갖도록 생성하였으며, IMU의 측정오차는 roll, pitch에 0.03°, yaw에 0.06°의 표준편차를 갖도록 생성하였다. 센서 제원상의 RTK 모드 일 때 정확도는 이보다 높지만, 본 연구에서는 실제 데이터를 획득하였을 때를 가정하여 센서 정확도를 약 2배 정도 낮게 설정하였다. 지상점의 측정오차는 0.05m의 표준편차를 갖도록 생성하였으며 영상점의 측정오차는 한 픽셀 사이즈인 7.4 μm의 표준편차를 갖도록 생성하였다. 표 1은 시뮬레이션 데이터 생성 시 주요 변수들을 나타내며 표 2는 설정한 3종류의 비행경로에 따라 생성된 영상, 영상점, 지상점의 개수를 보여준다. 그림 6은 전체 비행경로에 따라 획득된 영상 스트립과 지상점의 분포를 보여주며 삼각형으로 표시된 지상점을 지상기준점, 사각형으로 표시된 지상점을 검사점(check point)으로 이용하였다.

표 1. 시뮬레이션 변수

주요 변수	설정값
Focal length	50mm
No. of pixels	4872 × 3248
Pixel size	7.4 μm
Image size	36.05mm × 24.04mm
Average terrain height	0m
Platform height	150m or 200m
Platform velocity	60 km/h
Frame rate	1 image/s
GPS accuracy	0.1m
INS accuracy (omega, phi)	0.03°
INS accuracy (kappa)	0.06°
Ground points accuracy	0.05m
True mounting parameters lever-arm(ΔX, ΔY, ΔZ)	(0.5, 0.5, 0.5)m
True mounting parameters bore-sight(roll, pitch, yaw)	(0.5, 0.5, 91)°

표 2. 비행경로에 따른 영상, 영상점, 지상점 개수

	영 상	영상점	지상점
비행경로 1	24	360	42
비행경로 2	32	560	49
비행경로 3	36	707	57

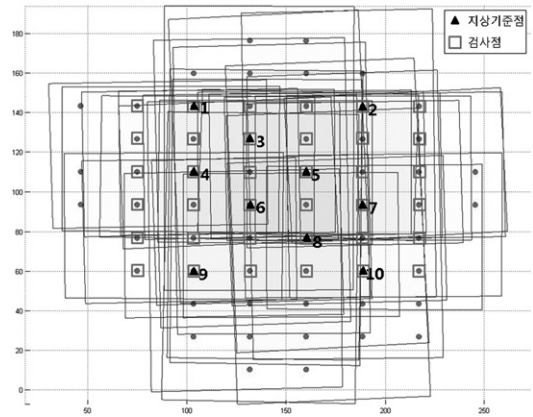


그림 6. 영상 커버리지와 지상점 분포

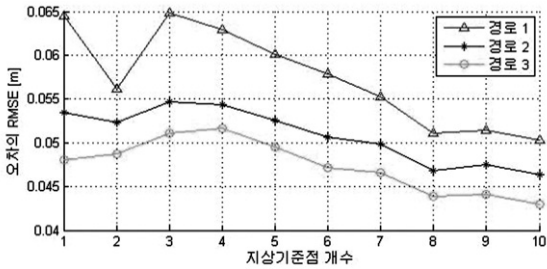
4.2 실험 결과

실험은 효율적이고 정확한 시스템 캘리브레이션 방법을 도출하기 위하여 3 종류의 비행경로에 따른 시뮬레이션 데이터에 제안된 방법론을 적용함에 있어서 제약조건으로 입력하는 지상기준점의 개수를 변경해가며 수행하였다. 이때, 먼저 지상기준점을 제약조건으로 입력하지 않을 경우 어느 정도의 오차가 발생하는지 실험해보았다. 실험결과, 비행경로 1에 대한 실험에서 추정된 지상점의 X, Y, Z 좌표에 대한 RMSE는 각각 0.081m, 0.071m, 1.592m였으며, 비행경로 2에서는 0.061m, 0.076m, 1.253m, 비행경로 3에서는 0.062m, 0.068, 0.888m로 X, Y 좌표에 비해 Z 좌표가 정확하게 추정되지 않음을 확인하였다. 이는 기존의 Habib (2010a)가 제시한 것처럼 탑재변수 중 lever-arm offset의 ΔZ를 결정하기 위해서는 지상기준점이 최소 1개가 필요하지만 이를 만족하지 못하여 Z 좌표를 정확하게 추정하지 못한 것으로 판단된다. 본 실험에서는 탑재변수 추정

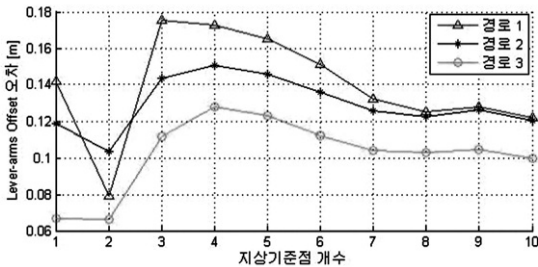
표 3. 지상기준점의 개수에 따른 배치

기준점 개수	기준점 번호
1	5
2	1, 10
3	1, 5, 10
4	1, 2, 9, 10
5	1, 2, 5, 9, 10
6	1, 2, 5, 6, 9, 10
7	1, 2, 4, 5, 6, 9, 10
8	1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10
9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10
10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

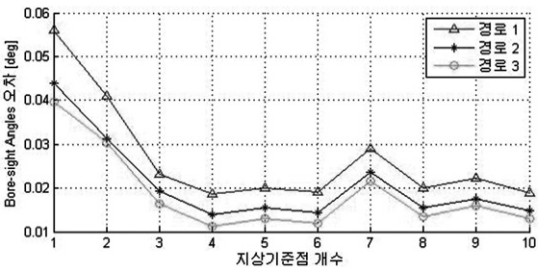
에 있어서 지상기준점은 최소 1개가 주어지면 되지만 정확한 방법론을 도출하기 위해 1~10개의 지상기준점을 제약조건으로 주었을 때 추정되는 탑재변수 및 지상점의 정확도를 분석하였다. 지상기준점은 모든 경로에 대한 실험에서 동일한 지상점을 이용하였으며 표 3과 같은 분포로 배치하였다. 그리고 지상점의 정확도 분석을 위해 그림 6에서 보는 바와 같이 36점의 검사점에 대한 추정된 지상점 좌표에 대한 오차의 RMS 값을 계산했다. 그림 7은 최종 실험 결과로서 추정된 지상점에 대한 오차의 RMS, Lever-arms Offset 오차와 Bore-sight Angles 오차를 보여준다.



(a) 추정된 지상점에 대한 오차의 RMS



(b) 추정된 Lever-arms Offset의 오차



(c) 추정된 Bore-sight Angle의 오차

그림 7. 최종 실험 결과

실험 결과를 살펴보면 추정된 지상점 좌표에 대한 오차의 RMSE가 모든 실험에서 0.1m 이내로 추정되었음을 확인할 수 있다. 특히 경로 3의 실험에서 가장 정확하게 지상

점 좌표가 추정되었음을 보여준다. 또한 Lever-arms Offset 오차와 Bore-sight Angles 오차를 확인해보면 스트립이 증가할수록 정확도가 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 정확한 시스템 캘리브레이션을 수행하기 위해서는 경로 3과 같이 데이터를 획득하여야 할 것으로 판단된다. 효율적인 실험을 위한 지상기준점의 개수 선정을 위해 실험 결과를 살펴보면 지상기준점의 개수가 증가함에 따라 추정되는 지상점의 오차 및 탑재변수의 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 특히 지상기준점의 개수가 5개 이상이 되면 추정된 지상점에 대한 오차의 RMSE가 0.05m 이하로 정확하게 추정되며 Lever-arms Offset 오차와 Bore-sight Angles 오차 역시 크게 변화가 없음을 확인할 수 있다. 따라서 효율적으로 시스템 캘리브레이션을 수행하기 위해서 5점 이상의 지상기준점이 있으면 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 현재 개발 중인 실시간 공중자료획득 시스템의 항공부문 시스템에 대한 탑재변수를 정확하게 추정하기 위하여 시스템 캘리브레이션 방법론을 수립하고 시뮬레이션을 통해 정확하고 효율적인 시스템 캘리브레이션을 위한 최적의 비행경로와 지상기준점의 필요 개수를 확인해보았다. 제안된 시스템 캘리브레이션 방법론에 따라 시뮬레이션을 수행한 결과 스트립간 중복도를 100%로 하는 서로 반대 방향으로의 2개 스트립과 스트립간 중복도를 50%로 하여 중복되는 스트립과 동일한 방향으로의 1개 스트립, 그리고 또 다른 비행고도에서 위와 같은 3개의 스트립을 추가로 구성하여 데이터를 획득하고 5점 이상의 지상기준점 정보를 획득하면 정확한 탑재변수의 추정이 가능함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 최근 다양하게 활용되고 있는 유/무인 항공기 기반의 멀티센서 시스템에 대한 시스템 캘리브레이션을 보다 정확하고 효율적으로 수행할 수 있을 것이며 직접 지오레퍼런싱의 정확도 개선에 도움이 될 것으로 판단된다.

추후에는 개발된 시스템으로부터 획득된 실측 데이터에 본 방법론을 적용하여 탑재변수를 추정하고 이를 이용하여 시스템의 정확도 평가를 수행하는 연구가 필요할 것이다. 또한 본 연구에서는 카메라의 내부표정요소를 정확히 알고 있다고 가정하고 이를 상수로 입력하였지만 향후에는 카메라와 시스템의 캘리브레이션을 동시에 수행하는 방법론에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업의 지능형국토정보기술혁신사업(06국토정보B01) 중 “실시간 공중자료획득시스템 개발” 과제와 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

최경아, 이임평 (2009), UAV 기반 저가 멀티센서시스템을 위한 무기준점 AT를 이용한 영상 Georeferencing, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제27권, 제2호, pp. 249-260.

최경아, 이지훈, 이임평 (2011), 저고도 무인 항공기 기반의 근접 실시간 공중모니터링 시스템 구축, 한국공간정보학회지, 한국공간정보학회, 제19권, 제4호, pp. 21-31.

Cramer, M., and Stallmann, D. (2001), On the use of GPS/inertial exterior orientation parameters in airborne photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* XXXIII, pp. 198-205.

Habib, A., A. P. Kersting, C. Kim, and J. Chow (2010a), Impact of Camera and System Calibration on Photogrammetric Reconstruction using Medium Format Digital Camera, In: *Proceedings of EuroCOW Workshop on “Integrated Systems for Sensor Georeferencing and Navigation”*, Working Group 1/5.

Habib, A., A. Kersting, and K. Bang, (2010b). Comparative Analysis of Different Approaches for the Incorporation of Position and Orientation Information in Integrated Sensor Orientation Procedures. *In: Proceedings of Canadian Geomatics Conference 2010 and ISPRS COM I Symposium*.

Honkavaara, E. (2003), Calibration field structures for GPS/IMU/camera-system calibration, *The Photogrammetric Journal of Finland*, 18(2): pp. 3-15.

Honkavaara, E. (2004), In-flight camera calibration for direct georeferencing. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol XXXV, pp. 166-171.

Pinto, L., and G. Forlani (2002), A single step calibration procedure for IMU/GPS in aerial photogrammetry, *In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, Part B3, pp. 2010-213.

Toth, C. (1998), Direct Platform Orientation of Multi-Sensor Data Acquisition System, *Proceedings of ISPRS Congress Committee IV*, pp. 629-634.

(접수일 2011. 12. 05, 심사일 2011. 12. 05, 심사완료일 2012. 01. 22)