

UAV 기반 저가 멀티센서시스템을 위한 무기준점 AT를 이용한 영상의 Georeferencing

Image Georeferencing using AT without GCPs for a UAV-based Low-Cost Multisensor System

최경아¹⁾ · 이임평²⁾

Kyoungah Choi · Impyeong Lee

Abstract

The georeferencing accuracy of the sensory data acquired by an aerial monitoring system heavily depends on the performance of the GPS/IMU mounted on the system. The employment of a high performance but expensive GPS/IMU unit causes to increase the developmental cost of the overall system. In this study, we simulate the images and GPS/IMU data acquired by an UAV-based aerial monitoring system using an inexpensive integrated GPS/IMU of a MEMS type, and perform the image georeferencing by applying the aerial triangulation to the simulated sensory data without any GCP. The image georeferencing results are then analyzed to assess the accuracy of the estimated exterior orientation parameters of the images and ground points coordinates. The analysis indicates that the RMSEs of the exterior orientation parameters and ground point coordinates is significantly decreased by about 90% in comparison with those resulted from the direct georeferencing without the aerial triangulation. From this study, we confirmed the high possibility to develop a low-cost real-time aerial monitoring system.

Keywords : Georeferencing, Aerial Triangulation, mini UAV, GPS/IMU, MEMS IMU

초 록

공중 모니터링 시스템으로 획득된 센서 데이터의 georeferencing 정확도는 시스템에 탑재된 GPS/IMU의 성능에 크게 의존된다. 그러나 고성능이지만 고가인 GPS/IMU의 탑재는 전체 시스템의 개발비를 크게 증가시키는 문제를 야기한다. 이에 본 연구는 MEMS 형태의 저가 통합형 GPS/IMU를 탑재한 UAV 기반의 공중 모니터링 시스템으로부터 취득된 영상 및 GPS/IMU 데이터를 시뮬레이션하고, 시뮬레이션된 센서 데이터에 지상기준점을 사용하지 않고 aerial triangulation을 적용하여 영상 georeferencing을 수행한다. 영상 georeferencing의 결과를 분석하여 각 영상의 추정된 외부표정변수와 지상점 좌표의 정확도를 평가한다. Aerial triangulation 없이 direct georeferencing을 수행한 결과와 비교할 때 외부표정변수와 지상점 좌표의 RMSE가 90%이상 감소하였다. 본 연구를 통해 저가 실시간 공중 모니터링 시스템 개발의 높은 가능성을 확인할 수 있었다.

핵심어 : 지상좌표화, 항공삼각측량, 소형무인항공기, GPS/IMU, MEMS IMU

1. 서 론

국회예산정책처의 통계자료에 따르면 우리나라는 최근 10년간 반복되는 각종 재난·재해로 총 17조 7천억 원의 재산피해가 발생하였으며 2000년부터 2004년까지 소요된 피해 복구비는 21조 7천억 원 가량이다. 이러한

추이를 따른다면 향후 예상되는 재난·재해의 피해 규모와 피해액은 엄청난 사회적 손실로 다가올 것이다. 이러한 사회적 손실을 최소화하기 위해 재난·재해의 발생을 미연에 방지하기 위한 주기적인 모니터링이 요구될 뿐만 아니라 재난·재해 발생 시 신속하고 정확하게 피해지역 및 피해규모 등을 파악하여 최적의 대응체계

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

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

를 구축할 수 있도록 실시간 모니터링이 이루어져야 한다. 더욱이 공간정보 분야의 세계시장은 6% 대의 꾸준한 성장률을 보이고 있으며 2010년에 이르러는 83.4억 달러 규모의 시장을 형성할 것으로 전망된다 (Frost&Sullivan, 2003). Google Earth 및 MS Virtual Earth 등의 고품질 공간정보 포털 서비스 시장의 확대만 고려하더라도 공중모니터링이 공간정보 분야에 기여할 비율은 상당히 클 것으로 기대된다.

이와 같은 공중모니터링을 위해 공중 platform 사용이 필수적이며 그 종류는 위성, 유인항공기, 무인항공기 등 다양하다. 최근에는 공중모니터링의 용이성과 신속성을 확보하기 위해 항공 platform으로써 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)의 활용이 대두되고 있다. UAV에 기반한 긴급 매핑 시스템은 운용에 소요되는 시간, 비용 그리고 인력이 유인비행체에 비하여 상대적으로 적어 높은 주기로 모니터링을 가능하게 한다. 뿐만 아니라 UAV 비행 고도가 유인비행체나 위성에 비하여 낮고 자율비행이 가능하기 때문에 높은 공간 해상도의 센서 데이터를 안정적으로 취득할 수 있게 한다. 게다가 무선통신기술의 발전에 힘입어 UAV 시스템에서 취득된 센서 데이터를 실시간으로 지상에서 전송받을 수 있게 되면서 UAV 기반의 공중모니터링 시스템의 활용분야가 급증하고 있다.

국외에서는 UAV 기반의 공중모니터링 시스템으로부터 획득된 영상은 다양한 농업 원격 탐사에 활용되었다. 포도의 최적 수확기를 결정하기 위해 고해상도의 RGB 영상이 사용되었고(Johnson et al., 2003), 커피가 익어가는 것을 모니터링하는데 다중 스펙트럼 영상의 활용 가능성이 검토되었다(Johnson et al., 2004). 전세계에 걸친 물 부족 현상으로 인해 수자원 관리와 관개 통제가 중요한 문제로 인식되었다(Richards, 2002). 수자원 관리 분야에서는 실시간 모니터링이 중요한 요구사항이다. 이에 따라 수자원 관리와 관개 통제에 UAV 시스템으로부터 획득된 다중 스펙트럼 영상을 이용하였다(Haiyang et al., 2008). 이밖에도 교통 통제, 국경 순찰, 산불 감시(Casbeer et al., 2005)와 같은 다양한 분야에 소형 UAV 기반의 공중모니터링 시스템 활용이 시도되었다. 국내에서는 6시간 비행이 가능한 군단급 정찰용 UAV 개발을 완료하여 양산 중이며(박민우, 2005), 재해 모니터링을 위해 저고도 UAV 시스템을 개발하였다(김성삼 외, 2006). 또한 2002년 스마트 무인기 기술개발(Smart UAV) 개발 사업을 시작으로 지능형 무인항공기를 개발 중에

있으며 향후 농작물관리, 산불 감시 및 통제, 기상 관측 및 오염 측정 등 다양한 분야에 활용할 예정이다(황인용 외, 2005).

UAV 시스템으로부터 획득된 센서 데이터가 georeferencing되었을 때 이로부터 다양한 공간 정보를 도출할 수 있다. Georeferencing은 센서 데이터에 데이터가 획득된 시점의 위치와 자세를 tagging하는 기술로써 georeferencing의 정확도는 UAV에 탑재된 GPS/IMU의 성능에 크게 의존된다. 이로 인해 기존 시장을 점유하고 있는 대부분의 시스템은 고가·고성능의 GPS/IMU를 채택하였고, 이는 결국 공중모니터링 시스템의 가격 상승으로 이어졌다. 국외에서 소형 UAV에 저가 GPS/IMU와 카메라를 탑재하여 영상을 취득하고 영상으로부터 추가적인 공간정보를 도출하기 위해 georeferencing을 수행하는 연구가 이루어졌다. 지상기준점 측량을 통해 확보된 GCP와 저가 GPS/IMU로부터 획득되는 위치/자세정보를 사용해 georeferencing하여 임업과 농업에 저가 UAV 시스템 사용의 잠재력을 확인해본 연구(Grensdorffer et al., 2008), 저가 GPS/IMU 센서 데이터와 virtual globe로부터 제공되는 3D 모델에서 지상기준정보를 추출하여 이들을 결합해 영상을 georeferencing하는 연구(Eugster and Nebiker, 2007), 기존의 정사영상을 사용하여 georeferencing을 수행한 연구(Gabriel et al., 2006), 저가 GPS/IMU로부터 야기되는 오차를 형태기반접합방법(feature based stitching method)으로 조정하고 기존에 georeferencing된 영상에 맞추어 새로운 영상을 georeferencing(Austin et al., 2008)하는 연구 등이 있었다. 이상의 indirect georeferencing 방법 이외에도 GPS/IMU로부터 획득된 위치/자세 정보에 기초하여 영상의 외부표정변수와 지상점의 좌표를 추정하는 direct georeferencing을 채택한 연구(Ryan et al., 2005)도 있다. 반면 국내에서는 UAV 기반 시스템이 아닌 유인항공기 기반의 시스템으로부터 획득된 GPS/INS 데이터에 의한 영상 georeferencing에 관한 연구(한상득 외, 2004), GPS/INS 데이터를 이용한 영상의 direct georeferencing에 관한 연구 등이 있다(송연경 외, 2005, 박운용 외, 2004).

기존 연구의 대부분은 상용소프트웨어에 의존적이며 지상기준정보를 요구하거나 저가의 GPS/IMU가 갖는 오차를 그대로 영상 georeferencing에 전파한다. 본 연구에서는 중저가의 UAV platform에 저가 GPS/MEMS IMU, 중저가 디지털 카메라를 탑재한 모니터링 시스템을 설계하여 이로부터 획득되는 영상을 GCP 없이 AT(Aerial

Triangulation)를 이용하여 georeferencing할 때 기대되는 정확도를 확인하고자 한다. 이를 위해 시스템 설계를 통해 도출된 센서 사양에 부합하는 센서데이터를 시물레이션하고 시물레이션 데이터에 대하여 AT를 수행하여 저가의 GPS/MEMS IMU로부터 주어진 위치/자세를 보정하고 이를 이용해 영상 georeferencing을 수행한다.

2. UAV 기반 멀티센서시스템 설계 및 제원 도출

오늘날 UAV 시스템의 빠른 발전과 함께 다양한 사양의 UAV 시스템이 출현하였다. UVS International에 의해 제시된 기준에 따라 UAV의 최대탑재중량, 최대비행고도, 최장비행시간, 최장운용반경 등을 고려하여 mini-UAV와 micro-UAV를 분류할 수 있다. 표 1은 mini-UAV와 micro-UAV의 분류 기준을 보여준다(Eugster and Nebiker, 2008). 그 기준에 따르면 최대탑재중량이 30kg 미만, 최대비행고도가 300m, 최장비행시간이 2시간미만, 최장운용반경이 10km미만인 시스템의 경우 mini-UAV로 분류될 수 있다. 본 연구에서는 UAV 시장조사를 통해 mini-UAV의 조건을 만족하는 중저가 근접(Close-range) 무인 헬기를 platform으로 채택하고자 한다. 대부분의 mini-UAV 시스템은 사전에 지정된 비행경로대로 자동 비행이 가능하고 원격으로 항법 조정이 가능하다. 그러나 이러한 비행 통제 시스템은 MEMS IMU와 네비게이션 급의 GPS 수신기 등을 채용하기 때문에 이로부터 획득된 영상의 georeferencing 정확도는 일반적으로 매우 낮은 수준으로 나타난다.

표 1. mini-UAV와 micro-UAV의 분류

Category	Micro	Mini
Max. Take Off Weight	< 5kg	< 30kg
Max. Flight Aititude	250m	150~330m
Endurance	1h	< 2h
Data Ling Range	< 10km	< 10km

중저가의 mini-UAV에 저가 GPS/MEMS IMU, 중급의 디지털 카메라를 탑재하여 이로부터 획득되는 위치/자세 정보를 aerial triangulation으로 보정하여 영상을 georeferencing해 봄으로써 중저가 시스템의 이용가능성을 검증하는 것을 연구의 목표로 설정하였다. Platform은 수

직 이착륙이 가능한 회전익 UAV (helicopter) 범주에서 payload가 30kg을 넘지 않고 비교적 안정적인 비행이 가능한 SWISS UAV사의 NEO S-300을 선택하였다. 그림 1은 NEO S-300의 외형이다. 저가의 GPS/MEMS IMU는 일반적으로 mini-UAV에 탑재되는 GPS/IMU의 정확도를 고려하여 roll and pitch angle 정확도가 1~2°, heading angle 정확도가 3~5°, 수평 위치 정확도가 2.5m, 수직 위치 정확도가 5m와 비슷한 센서들 중에 별도의 위치/자세 결정 기술이 필요 없는 상황을 시물레이션하고자 일체형을 채택하였다. 선정된 GPS/MEMS IMU의 위치 결정 오차는 2~2.5m이며 자세 결정 오차는 heading, roll, pitch가 각각 2°이다. 선정된 카메라는 소형 디지털 카메라 (small format digital camera)로 17mm의 초점거리 렌즈를 장착하여 200m 고도에서 촬영하였을 때 GSD(Ground Sampling Distance)가 약 41cm이고 초당 최대 10장의 영상을 획득할 수 있다. 각 센서의 추가적인 제원은 표 2에서 살펴볼 수 있다.



그림 1. mini-UAV (SWISS UAV: NEO S-300)

표 2. UAV Platform 및 탑재 센서의 제원

Component	Model	Specification
UAV	NEO S-300 (SWISS UAV)	Payload : 20kg Flight Endurance : 2.5~3Hours
DC	GD155000C (GEVICAM)	Frame rate : 10fps Effective Pixels : 2456×2508 Pixel size : 3.45μm
Lens	XNP 1.4/17 (schneider)	F-number : 1.4 Focal Length : 17mm
GPS	MTI-G (Xsens)	Position accuracy : 2.0~2.5m Angular accuracy : 2deg
MEMS		GPS Data rate : 4Hz
IMU		IMU Data rate : 100Hz Weight : 0.068Kg

3. 영상 Georeferencing 방법론

AT는 2개 이상의 영상에 대하여 영상이 획득된 순간에 카메라의 위치와 자세를 결정하는 수학적 과정으로 영상 georeferencing 방법 중에 하나이다. 본 연구에서는 지상기준점(GCP: Ground Control Point) 없이 AT를 수행하여 저가의 GPS/MEMS IMU로부터 주어진 영상의 외부표정변수와 지상점 좌표를 조정계산하여 영상을 georeferencing 한다. 그 방법의 주요 과정은 (1) Bundle Block Adjustment 기반의 AT의 수학적 모델을 수립하고, (2) 이로부터 GPS/IMU 정보를 이용한 무기준점 AT의 수학적 모델을 유도하고, (3) AT 수행을 위한 초기값을 설정하고, (4) 최소제곱법을 적용하여 외부표정변수를 추정한다.

3.1 Bundle Block Adjustment 기반 AT의 수학적 모델

AT의 방법으로는 영상의 투영중심(Perspective Center), 하나의 지상점과 그 점을 나타내는 영상점이 하나의 직선 상에 존재해야 한다는 식(1)의 공선조건식에 기반한 Bundle Block Adjustment와 7 parameter transformation에 기반한 Independent Model Method 등이 있다. 각 영상 pair마다 상대표정을 수행하여 임의의 3D 모델을 생성한 후 이것들을 절대좌표계로 좌표변환하기 위한 7 parameters(scale factor:s, translation factors: x_t, y_t, z_t , rotation angle: ω, ϕ, κ)를 결정해야하는 Independent Model Method에 반해 Bundle Block Adjustment는 상대표정의 과정 없이 각 영상의 외부표정변수를 동시에 결정하게 된다. 본 연구에서는 Bundle Block Adjustment(McGlone, 2004)를 이용하여 AT를 수행한다.

$$\begin{aligned} x &= x_p - c \frac{(X - X_c)r_{11} + (Y - Y_c)r_{12} + (Z - Z_c)r_{13}}{(X - X_c)r_{31} + (Y - Y_c)r_{32} + (Z - Z_c)r_{33}} \\ y &= y_p - c \frac{(X - X_c)r_{21} + (Y - Y_c)r_{22} + (Z - Z_c)r_{23}}{(X - X_c)r_{31} + (Y - Y_c)r_{32} + (Z - Z_c)r_{33}} \end{aligned} \quad (1)$$

where (x_p, y_p) : 영상의 주점 좌표
 c : 렌즈의 초점 거리
 $\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$: 회전행렬
 (X_c, Y_c, Z_c) : 외부표정요소 중 렌즈의 중심 위치
 (X, Y, Z) : 지상점 좌표

내부표정요소를 상수로 하였을 때 Bundle Block Adjustment의 수학적 모델은 식(2)과 같이 표현할 수 있다. 미지수는 영상 m장의 외부표정변수와 n개의 지상점 좌표이다.

$$(x_i^j, y_i^j) = f(EO_1, EO_2, \dots, EO_m, X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, \dots, X_n, Y_n, Z_n)$$

where m : 영상의 개수
 n : 지상점의 개수
 (x_i^j, y_i^j) : 영상점의 좌표

(2)

외부표정변수와 지상점 좌표의 초기값을 이용해 최초의 영상점 좌표를 계산하게 되고 그 후로는 조정계산된 외부표정변수와 지상점 좌표를 이용해 영상점 좌표를 갱신하게 된다. 식(3)은 이와 같은 개념을 적용하여 식(2)를 다시 표현한 것이다. 함수 f 는 비선형이고, 미지수에 대한 초기값이 참값에 근접하다는 가정하에 ξ_e, ξ_p 는 충분히 작은 값으로 나타내어지며 이에 Taylor series의 1차 항까지만 전개하여 식(4)처럼 선형화한다. 이를 다시 정리하면 식(5)와 같은 Gauss-Markov Model로 표현된다.

$$\begin{aligned} Y &= f(\Xi_e, \Xi_p) + e \\ Y &= f(\Xi_{e0} + \xi_e, \Xi_{p0} + \xi_p) + e \end{aligned} \quad (3)$$

where Y : 영상점 좌표 측정값
 Ξ_e : 외부표정변수
 Ξ_p : 지상점 좌표
 Ξ_{e0} : 외부표정변수의 초기값
 Ξ_{p0} : 지상점 좌표의 초기값
 ξ_e, ξ_p : 초기값과 참값과의 차이
 e : 영상점좌표에 포함된 측정오차

$$Y \approx f(\Xi_{e0}, \Xi_{p0}) + \frac{\partial f}{\partial \Xi_e} \xi_e + \frac{\partial f}{\partial \Xi_p} \xi_p + e \quad (4)$$

$$\frac{Y - f(\Xi_{e0}, \Xi_{p0})}{y} = \underbrace{\left[\frac{\partial f}{\partial \Xi_e} \quad \frac{\partial f}{\partial \Xi_p} \right]}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \xi_e \\ \xi_p \end{bmatrix}}_{\xi} + e \quad (5)$$

Gauss-Markov Model에서 design matrix를 외부표정변수 부분과 지상점 좌표 부분으로 나누어 표현하면 식(6)과 같다. 식(6)은 지상점좌표에 대한 정보를 포함하고 있지 않기 때문에 7개의 rank deficiency를 갖는다. 이를 보완하기 위해 일반적인 AT의 경우에는 지상기준점과 같은 지상점좌표에 대한 정보를 제약요소로 포함하여 외부표정변수와 지상점 좌표에 대한 단일해를 추정한다.

다.

$$y = [A_e A_p] \begin{bmatrix} \xi_e \\ \xi_p \end{bmatrix} + e \quad (6)$$

3.2 GPS/IMU 정보를 이용한 무기준점 AT의 수학적 모델

본 연구에서는 지상기준점 없이 AT를 수행하여 위치/자세 정보를 보정하고자 한다. 따라서 기준점이 없이 식(6)의 rank deficiency를 제거하기 위해 GPS/MEMS IMU 데이터를 이용하여 외부표정변수에 제약조건을 추가하여 식(7)과 같은 관측방정식을 수립한다. 따라서 설계행렬은 외부표정변수와 관련된 부분 A_e , 지상점과 관련된 부분 A_p 그리고 제약조건과 관련된 부분 K_e 로 구성된다.

$$\begin{bmatrix} y_i \\ y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_e A_p \\ K_e 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_e \\ \xi_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ e_0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} e \\ e_0 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 0 & P_i^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & P_e^{-1} \end{bmatrix} \sigma_0^2 \quad (7)$$

- where y_i : 영상점좌표에 대한 측정값 및 계산값과 차이
- y_e : 외부표정변수에 대한 초기값 및 제약요소와 차이
- ξ_e : 외부표정변수에 대한 초기값과의 차이
- ξ_p : 지상점 좌표에 대한 초기값과의 차이
- A_e : 공선방정식을 외부표정변수에 대하여 미분한 설계행렬
- A_p : 공선방정식을 지상점 좌표에 대하여 미분한 설계행렬
- K_e : 외부표정변수를 제약조건으로 사용하기 위한 설계행렬

설계행렬(Design Matrix) A_e 와 A_p 는 비선형 공선방정식을 각 변수에 대해 미분하여 수립하고, 설계행렬 K_e 는 GPS/MEMS IMU로부터 획득된 정보를 모든 개별외부표정변수에 대한 직접적인 제약조건으로 사용하기 때문에 단위행렬(Identity Matrix)로 설정한다. 또한, 영상점 좌표의 측정오차에 대한 분산공분산 행렬 P_i^{-1} 와 GPS/MEMS IMU의 센서측정오차에 대한 분산공분산 행렬 P_e^{-1} 를 고려하여 가중값행렬(Weight Matrix) P 를 설정한다.

3.3 AT 수행을 위한 초기값 설정

식(1)의 공선조건식의 좌변에 영상의 내부표정요소(x_p, y_p, c)와 외부표정변수($X_c, Y_c, Z_c, \omega, \phi, \kappa$), 그리고 영상점이 나타내는 지상 객체의 좌표(X, Y, Z)가 있고 우변에는 영상점 좌표(x, y)가 있다. 이들의 관계는 비선형이기 때문에 Taylor series를 이용한 선형화가 이루어져야 하고 이 때 좌변에 있는 내부표정요소, 외부표정변수, 지상점 좌표에 대한 초기값이 필요하다. AT 수행에서 내부표정

요소는 별도의 카메라 보정이 이루어졌다는 가정 하에 상수로 설정하고 외부표정변수와 지상점좌표에 대한 초

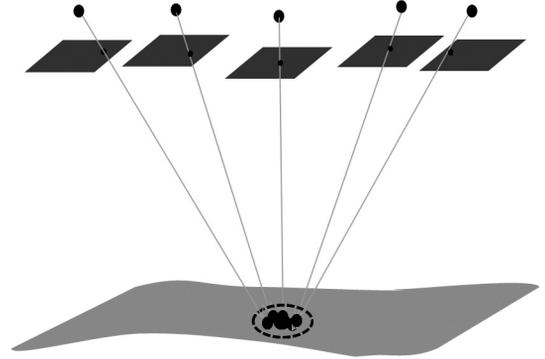


그림 2. 지상점 좌표의 초기값 결정

기값을 계산한다.

모든 영상의 개별적인 외부표정변수의 초기값은 GPS/MEMS IMU로 취득된 개별 영상을 취득한 시점의 데이터를 이용하여 설정한다. 지상점 좌표의 초기값을 결정하기 위해서 먼저 하나의 지상점이 나타나는 다수의 영상에 대해서 개별적으로 그림 2에서 나타난 것과 같이 개별 영상의 외부표정변수 초기값과 영상점 좌표의 측정값을 공선조건식에 대입하여 개별 영상의 투영 중심과 영상점을 연장하는 하나의 직선을 생성한다. 즉, 하나의 지상점이 m개의 영상에 나타난다면 개별적으로 m개의 직선이 생성된다. 모든 m개의 직선은 하나의 동일한 지상점이 서로 다른 영상에 투영되어 나타난 영상점으로부터 비롯되었기 때문에 오차가 전혀 없다면 하나의 지상점에서 만나야 한다. 그러나 외부표정요소 초기값과 영상점 좌표 등에 오차가 존재하기 때문에 하나의 점에서 만나지 않고, 이에 모든 직선에 가장 근접한 점을 최소제곱법으로 계산하여 지상점의 초기값을 결정한다.

3.4 최소제곱법 적용을 통한 외부표정변수의 추정

Bundle Block Adjustment에서는 영상점 좌표에 대하여 직접 측정한 값과 공선방정식에 해당 외부표정변수와 지상점 좌표를 대입하여 계산한 값과 차이의 제곱의 합을 최소로 하는 외부표정변수와 지상점 좌표를 구한다. 식(7)와 같은 Gauss-Markov 모델에 최소제곱법을 적용하여 식(8) 및 식(9)와 같은 정규방정식(normal equations)을

수립한다. 여기서 정규행렬(normal matrix)은 외부표정변수만 관련된 부분 N_{ee} , 지상점만 관련된 부분 N_{pp} , 외부표정변수와 지상점이 동시에 관련된 부분 N_{ep} 로 구성된다. 또한, 좌변은 C_e 와 C_p 로 구성된다. GPS/MEMS IMU 정보로 구성된 외부표정변수에 대한 제약조건은 N_{ee} 와 C_e 에 포함되게 된다.

UAV에 탑재한 디지털 카메라로 취득하는 경우는 일반적으로 상당히 많은 수의 영상과 지상점에 대한 미지수를 추정하게 된다. 이로 인해 최소제곱법을 적용할 때 수립되는 정규행렬(normal matrix)의 크기가 상당히 커지기 때문에 역행렬 연산에 보다 효율적인 방법을 반드시 적용해야 한다. 식(9)의 정규행렬에서 N_{pp} 는 3 x 3의 block diagonal 행렬로 표현되기 때문에 상당히 효율적으로 N_{pp} 의 역행렬을 계산할 수 있다. N_{pp} 의 역행렬을 이용하여 식(9)를 식(10-12)의 과정을 통해 정리하면 식(13)과 같은 Reduced Normal Matrix N_{rep} 를 이용하여 표현된다. 여기서 N_{rep} 는 band matrix로 표현되며 특히 UAV로 취득한 하나 또는 수 개의 strip으로 구성된 영상의 경우는 band의 크기가 아주 작아지기 때문에 역행렬을 아주 효율적으로 계산할 수 있다. 이러한 식을 이용하여 외부표정변수와 지상점 좌표가 수렴할 때까지 반복하여 조정계산하면 보정된 위치/자세 정보와 지상점 좌표를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_e^T P_i^{-1} y_i + K^T P_e^{-1} y_e \\ A_p^T P_i^{-1} y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_e^T P_i^{-1} A_e + K^T P_e^{-1} K & A_e^T P_i^{-1} A_p \\ A_p^T P_i^{-1} A_e & A_p^T P_i^{-1} A_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\xi}_e \\ \hat{\xi}_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} C_e \\ C_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{ee} & N_{ep} \\ N_{pe} & N_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\xi}_e \\ \hat{\xi}_p \end{bmatrix}$$

where $C_e = A_e^T P_i^{-1} y_i + K^T P_e^{-1} y_e$

$$\begin{aligned} C_p &= A_p^T P_i^{-1} y_i \\ N_{ee} &= A_e^T P_i^{-1} A_e + K^T P_e^{-1} K \\ N_{ep} &= A_e^T P_i^{-1} A_p \\ N_{pe} &= A_p^T P_i^{-1} A_e \\ N_{pp} &= A_p^T P_i^{-1} A_p \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} C_e &= N_{ee} \hat{\xi}_e + N_{ep} \hat{\xi}_p \\ C_p &= N_{pe} \hat{\xi}_e + N_{pp} \hat{\xi}_p \end{aligned} \quad (10)$$

$$\hat{\xi}_p = N_{pp}^{-1} (C_p - N_{pe} \hat{\xi}_e) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} C_e &= N_{ee} \hat{\xi}_e + N_{ep} N_{pp}^{-1} (C_p - N_{pe} \hat{\xi}_e) \\ &= N_{ee} \hat{\xi}_e + N_{ep} N_{pp}^{-1} C_p - N_{ep} N_{pp}^{-1} N_{pe} \hat{\xi}_e \end{aligned} \quad (12)$$

$$\underbrace{C_e - N_{ep} N_{pp}^{-1} C_p}_{C'} = \underbrace{(N_{ee} - N_{ep} N_{pp}^{-1} N_{pe})}_{N_{red}} \hat{\xi}_e \quad (13)$$

4. 실험 및 결과 분석

4.1 데이터 시뮬레이션

설계된 시스템의 platform과 센서의 제원, 대상영역, 비행경로 등에 기초하여 외부표정변수, 영상점 및 지상점 좌표의 참값과 측정오차가 포함된 관측값을 생성한다. 시뮬레이션의 순서는 그림 3과 같고 그림 4에서 간략하게 묘사한다.

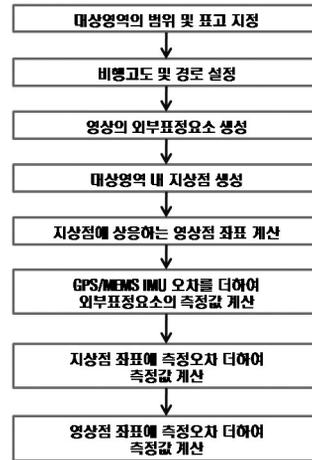


그림 3. 시뮬레이션 순서도

대상영역의 수평 범위와 표고를 지정하고 대상영역을 모두 포함할 수 있도록 비행고도와 경로를 설정한다. 본 연구에서는 다양한 조합으로 실험을 수행하여 그 영향을 확인하고자 비행고도는 200m, 400m로 비행경로는 800m 길이의 1개 스트립과 500m 길이의 2개 스트립으로 나누어 시뮬레이션 데이터를 생성하였다. UAV는 정해진 경로를 따라 36km/h의 속도로 비행하고 초당 2개의 영상을 획득하는 시나리오를 가정하였다. 이때 중복도는 200m의 비행고도에서 95%, 400m의 비행고도에서 97.5%였다. 스트립이 2개인 경우 스트립 간의 중복도(sidelap)는 20%로 정하였다. 연산의 단순화를 위하여 대상영역 내 지상점을 규칙적으로 분포시키고 이에 상응하는 영상점의 좌표는 해당 영상의 외부표정변수를 기준으로 back projection하여 생성하였다. 이렇게 시뮬레이션된 외부표정변수, 지상점, 영상점은 참값이며 AT를 수행한 후 그 결과를 검증하기 위해 사용할 것이다. 참

값의 외부표정변수, 지상점, 영상점에 각각 측정 오차를 가산하여 측정된 외부표정변수 즉, GPS/MEMS IMU에서 획득된 카메라의 위치/자세와 지상점, 영상점의 측정 좌표를 생성하였다. 센서의 정확도를 고려하여 GPS의 측정오차는 수평위치와 수직위치 모두 동일하게 2.25m의 표준편차를 갖도록 생성하였고 MEMS IMU의 측정오차는 roll, pitch, heading 모두 동일하게 2°의 표준편차를 갖도록 생성하였다. 선정된 GPS/MEMS IMU는 결합형으로 IMU의 drift를 GPS 및 지자기 센서로 보정하는 결합루틴이 있기 때문에 MEMS IMU의 측정오차에는 drift를 고려하지 않았다. 지상점의 측정오차는 5cm의 표준편차를 갖도록 생성하였으며 영상점의 측정오차는 카메라 detector의 한 픽셀 사이즈가 3.45 μ m임을 고려하여 3.45 μ m의 표준편차를 갖도록 생성하였다.

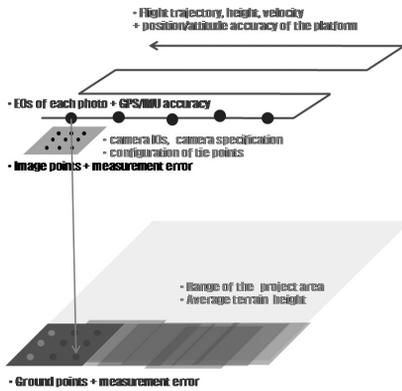


그림 4. 시뮬레이션 개념도

시뮬레이션 데이터 생성 시 고정된 값들과 실험 조합에 따라 바뀌는 값들은 표 3에 나타난 것과 같다. 한 영상의 ground coverage는 비행고도가 200m일 때 약 99.7m × 83.5m이고 비행고도가 400m일 때 약 199.4m × 167.1m이다. 800m 길이의 스트립이 1개일 경우 고도에 따라 생성된 영상의 개수는 각각 144, 124장이고 500m 길이의 스트립이 2개일 경우 고도에 따라 생성된 영상의 개수는 각각 168, 128장이다. 각 실험 조합에 따라 생성된 영상점과 지상점의 개수는 표 4에서 보는 것과 같다. 보통 항공사진의 AT 수행 시 영상점을 3×3 패턴으로 생성하는 것이 일반적이지만 이 경우는 GCP없이 GPS/MEMS IMU 데이터에 의존하여 중저가 카메라의 영상에 대하여 AT를 수행하므로 사진 간의 높은 정합성을 유지하여 상호표정의 정확도를 높이고자 영상점을 5

×5 패턴으로 생성하였다. 또한, 이는 기존에 개발된 다양한 영상정합 알고리즘을 이용한다면 많은 수의 사진 간의 공액점을 상당히 효율적으로 생성할 수 있음을 고려하였다.

그림 5는 비행고도 200m에서 800m 길이의 비행경로를 시뮬레이션한 결과의 일부분을 보여준다. 빨간색 선은 참값의 비행경로이고 초록색 선은 측정오차가 포함된 관측값의 비행경로이다.

표 3. 실험 설계

	sensor	properties	values
Fixed Values	Lens	Focal length	17mm
	Camera	Frame rate	2
		No. of Pixels	2456 × 2058
		Pixel size	3.45 μ m
		Image size	8.47 × 7.10mm
	Platform	Flying velocity	36km/h
	configuration	pattern	5 × 5
		Sidelap	0.2%
	GPS	Position accuracy	2.25m
	MEMS IMU	Angular accuracy	2deg
Changed Values	Platform	Flying aitude	200m(94.984%)
		(Overlap)	400m(97.492%)
	Configuration	No. of Strips/	1/800m
		Length of a strip	2/500m

표 4. 생성된 영상, 영상점, 지상점의 개수

configuration		No. of Images	No. of Image points	No. of ground points
Aitude: 200m	800m strip X1	144	2505	160
	500m strip X2	168	2713	140
Aitude: 400m	800m strip X1	124	1926	60
	500m strip X2	128	2081	72

4.2 실험 결과

비행고도 200m, 400m와 비행경로 800m 스트립 1개, 500m 스트립 2개로 나눠 설계된 총 4개의 실험 조합에

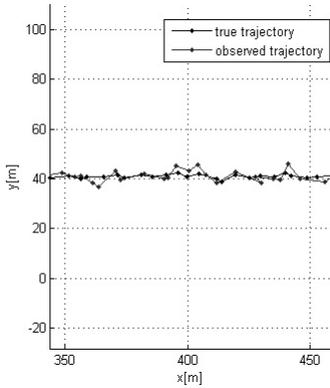


그림 5. 생성된 비행경로

따라 외부표정변수, 지상점과 영상점 좌표의 측정값과 참값을 시뮬레이션 하였다. 생성된 시뮬레이션 데이터 중 측정값에 대하여 Bundle Block Adjustment에 기반한 AT를 수행하여 외부표정변수(위치/자세)와 지상점 좌표를 보정하였다. 그 결과는 그림 6과 같은 순서로 참값과 비교하여 분석한다.



그림 6. 분석 과정

그림 7은 200m의 고도에서 800m의 직선 경로를 비행 시 획득된 데이터에 대하여 외부표정변수와 지상점 좌표의 초기값에 의해 계산된 영상점 좌표의 오차와 그 히스토그램이다. AT를 통해 외부표정변수와 지상점 좌표가 수렴할 때까지 반복 조정계산한 결과를 이용해 계산된 영상점 좌표의 오차와 그 히스토그램은 그림 8에서 보여주고 있다. 조정계산 전의 오차의 범위는 약 -2~2mm이었으나 조정 후 -10 μ m~10 μ m로 감소하였음을 알 수 있다. 외부표정변수와 지상점 좌표가 수렴하기까

지는 총 11번의 반복 조정계산이 수행되었으나 3번째 반복수행에서 거의 결과값에 근사하였다.

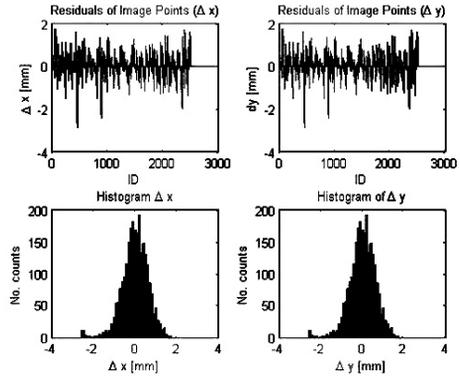


그림 7. 조정계산 전 영상점 좌표 오차 (비행고도: 200m, Strip: 800m×1)

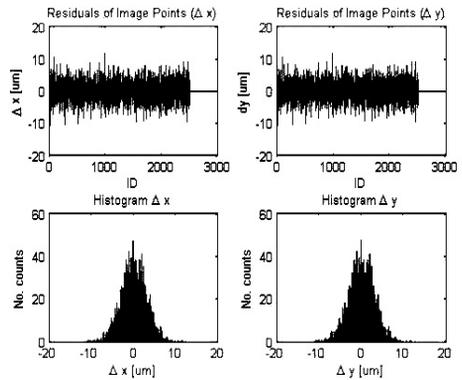


그림 8. 조정계산 후 영상점 좌표 오차 (비행고도: 200m, Strip: 800m×1)

그림 9와 그림 10은 외부표정변수 중에 위치정보(X_c, Y_c, Z_c)의 조정 전과 후에 해당하는 참값과 비교한 오차이다. 조정 전 위치정보 오차의 범위는 약 -5000~5000mm이었으나 조정 후 그 범위가 1/5정도로 줄었음을 확인할 수 있다. 조정 전 위치정보의 RMSE가 (X_c, Y_c, Z_c)에 대하여 각각 2214mm, 2175mm, 2282mm이었던 것이 조정 후 각각 386mm, 504mm, 294mm로 감소하였다.

그림 11과 그림 12는 외부표정변수 중에 자세정보(ω, ϕ, κ)에 대한 조정 전과 후에 해당하는 참값과 비교한 오차이다. 조정 전 자세정보 오차의 범위는 약 -5~5°이었으나 조정 후 그 범위가 1/10정도로 줄었고 특히 κ 에 대한 오차가 크게 감소하였음을 확인할 수 있다. 조정 전

자세정보의 RMSE는 (ω , ϕ , κ)에 대하여 각각 1.786°, 1.916°, 2.100°이었던 것이 조정 후 각각 0.144°, 0.190°, 0.051°로 감소하였다.

그림 13과 그림 14는 지상점 좌표(X, Y, Z)에 대한 조정 전과 후에 해당하는 참값과 비교한 오차이다. 조정 전과 후의 지상점 좌표의 오차에 대한 통계값은 표 5에서 확인할 수 있다. 조정 전의 RMSE를 살펴보면 지상점

좌표 X, Y, Z 중에 Z의 RMSE가 상당히 큰 수치임을 알 수 있다. 이것은 높은 중복도(overlap)와 작은 카메라 시각(view angle)에 기인한 짧은 baseline 때문이다. 결과적으로 Z좌표가 X, Y좌표와 비교하여 상대적으로 가장 큰 RMSE 감소를 나타낸다.

그림 10, 그림 12, 그림 14에서 보는 바와 같이 조정 후에 참값과 비교한 오차를 살펴보면 조정 전과 비교하

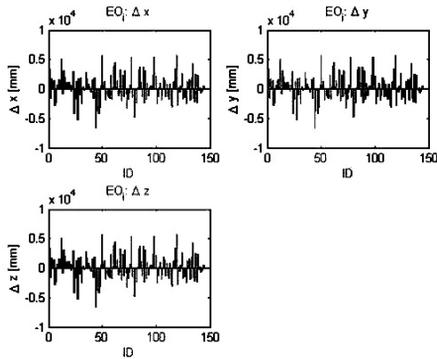


그림 9. 조정계산 전 위치정보 오차 (비행고도: 200m, Strip: 800m×1)

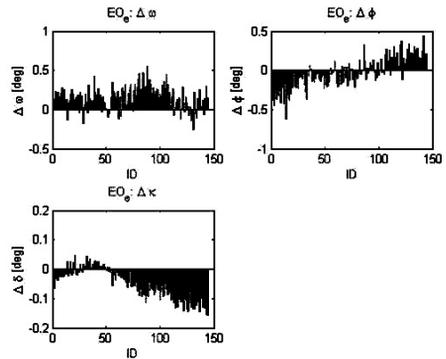


그림 12. 조정계산 후 자세정보 오차 (비행고도: 200m, Strip: 800m×1)

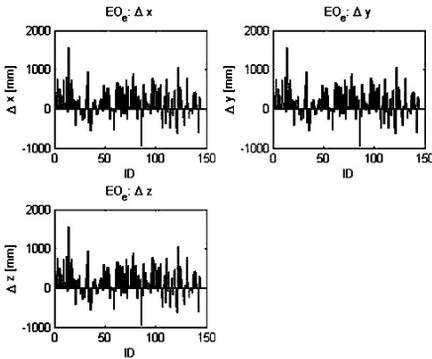


그림 10. 조정계산 후 위치정보 오차 (비행고도: 200m, Strip: 800m×1)

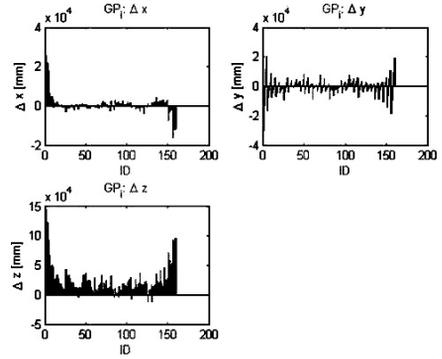


그림 13. 조정계산 전 지상점 좌표 오차 (비행고도: 200m, Strip: 800m×1)

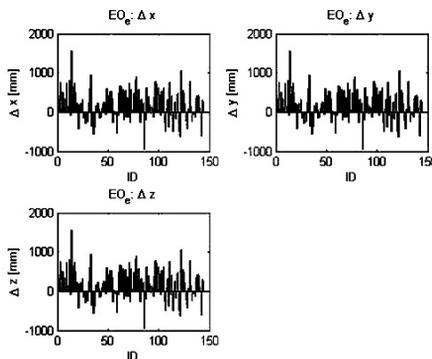


그림 11. 조정계산 전 자세정보 오차 (비행고도: 200m, Strip: 800m×1)

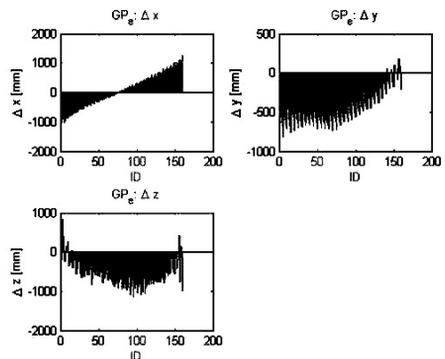


그림 14. 조정계산 후 지상점 좌표 오차 (비행고도: 200m, Strip: 800m×1)

표 5. 조정계산 전과 후의 지상점 좌표에 대한 통계값

	Initial Ground Points			Adjusted Ground Points		
	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]
Minimum	-15982	-30069	-11222	-1017	-810	-1132
Maximum	25700	20325	145135	1259	175	820
Average	571	-661	24694	65	-439	-563
Std_dev.	4701	5544	25537	561	218	315
RMSE	4736	5583	35577	565	492	647

면 오차의 크기가 크게 감소하였지만 완전히 random하지 않고 systematic한 패턴을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 특히 하나의 strip만을 사용했기 때문에 영상 간의 공액점을 통해서 외부표정변수의 회전각들이 독립적으로 정확하게 추정되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 만약 수 개의 지상기준점이나 다수의 strip을 사용한다면 보다 정확하게 추정될 것으로 기대된다.

4.3 종합적 분석

이상의 결과와 그에 대한 분석은 200m 고도에서 800m

의 직선경로를 비행하면서 획득된 센서 데이터에 대한 것이다. 표 6, 표 7, 표 8 그리고 표 9를 살펴보면 모든 실험 조합에 대한 결과의 RMSE 및 그 향상도를 확인할 수 있다. 이를 종합해보면 고도가 높아질수록 RMSE의 향상도는 낮아진다는 것을 알 수 있다. 또한 영상 간의 큰 중복도로 baseline이 짧아지고 이 때문에 지상점 좌표 중 Z의 초기 RMSE가 크게 나타나기 때문에 AT 수행으로 가장 큰 향상도를 보인다.

표 6. 조정계산 전,후의 RMSE 비교
(비행고도: 200m, Strip: 800m×1)

Parameters			200m		
			Ini.App.	adjusted	%
EOs	X	m	2.222	0.431	19.4
	Y	m	2.177	0.510	23.4
	Z	m	2.284	0.308	13.5
	W	deg	1.792	0.207	11.6
	P	deg	1.917	0.193	10.1
	K	deg	2.104	0.072	3.4
GP	X	m	4.736	0.565	11.9
	Y	m	5.583	0.492	8.8
	Z	m	35.577	0.647	1.8
No. of images	-		144		
No. of GPs	-		160		
No. of IPs	-		2505		
No. of lter	-		11		

표 7. 조정계산 전,후의 RMSE 비교
(비행고도: 200m, Strip: 500m×2)

Parameters			200m		
			Ini.App.	adjusted	%
EOs	X	m	2.405	0.544	22.6
	Y	m	2.192	0.542	24.7
	Z	m	2.219	0.445	20.1
	W	deg	1.920	0.217	11.3
	P	deg	1.714	0.246	14.3
	K	deg	2.123	0.040	1.9
GP	X	m	6.000	0.493	8.2
	Y	m	3.867	0.420	10.9
	Z	m	38.288	0.553	1.4
No. of images	-		168		
No. of GPs	-		140		
No. of IPs	-		2713		
No. of lter	-		13		

표 8. 조정계산 전,후의 RMSE 비교
(비행고도: 400m, Strip: 800m×1)

Parameters			200m		
			Ini.App.	adjusted	%
EOs	X	m	2.329	0.982	42.2
	Y	m	2.541	1.006	39.6
	Z	m	2.226	0.230	10.3
	W	deg	2.080	0.149	7.2
	P	deg	2.076	0.146	7.0
	K	deg	2.142	0.066	3.1
GP	X	m	12.696	0.227	1.8
	Y	m	10.349	0.307	3.0
	Z	m	88.534	0.594	0.7
No. of images		-		124	
No. of GPs		-		60	
No. of IPs		-		1926	
No. of lter		-		12	

표 9. 조정계산 전,후의 RMSE 비교
(비행고도: 400m, Strip: 500m×2)

Parameters			200m		
			Ini.App.	adjusted	%
EOs	X	m	2.313	0.959	41.5
	Y	m	2.332	0.912	39.1
	Z	m	2.401	0.206	8.6
	W	deg	2.201	0.183	8.3
	P	deg	1.966	0.145	7.4
	K	deg	2.099	0.064	3.1
GP	X	m	20.642	0.772	3.7
	Y	m	15.087	1.070	7.1
	Z	m	119.846	1.701	1.4
No. of images		-		128	
No. of GPs		-		72	
No. of IPs		-		2081	
No. of lter		-		12	

5. 결론

본 연구에서는 mini-UAV에 기반한 공중모니터링 시스템으로부터 획득되는 센서 데이터에 지상기준점 없이 AT를 수행하여 georeferencing된 결과를 확인하였다. Georeferencing을 위해 공중모니터링 시스템으로부터 획득되는 영상, GPS/MEMES IMU로부터의 위치/자세 정보를 시뮬레이션 하였고 시뮬레이션 데이터에 AT를 수행하여 UAV의 위치/자세를 보정하고 영상을 georeferencing하였다. 그 결과 영상의 외부표정변수와 지상점 좌표의 RMSE가 크게 개선되었다. 이를 통해 mini-UAV를 platform으로 하고 저가의 GPS/MEMS IMU와 카메라를 탑재한 시스템으로부터 획득된 센서 데이터도 충분한 정확도를 가지고 georeferencing될 수 있다는 것을 입증하였다. 따라서 기존 시장의 고가 시스템대신 중저가 시스템을 재난·재해 감시 시스템, 교통 모니터링, 국경 모니터링, 무단 폐수 방류 감시 등 다양한 분야에 활용할 수 있을 것이다. 무기준점 AT를 통한 UAV의 위치/자세 보정에 관한 연구는 향후 영상 기반 네비게이션에 활용될 수 있으며 모니터링 시스템에 라이더를 탑재하였을 때 보정된 위치/자세를 라이더데이터의 georefer-

encing에 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 지금은 Simultaneous AT 알고리즘을 적용하였기 때문에 획득되는 전체 영상의 개수가 증가함에 따라 기하급수적으로 연산량이 증가하는 단점이 있다. 향 후에는 현재 개발 중인 SequentialAT 알고리즘 적용을 통하여 연산 속도를 크게 향상시킬 수 있고 궁극적으로 실시간 georeferencing을 가능하게 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업의 지능형국토정보기술혁신사업과제(07국토정보C03) 중 “실시간 공중자료획득시스템 개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

김성삼, 심재현, 손흥규, 유환희 (2006), 저고도 UAV를 이용한 자연재해 모니터링, 한국공간정보시스템학회 학술회의논문집, 한국공간정보시스템학회, pp. 221-226.

- 박민우 (2003), 국내 항공기 및 UAV 개발 동향, 한국전산유체공학회 학술대회논문집, 한국전산유체공학회, pp. 1-3.
- 박운용, 박홍기, 위광재, 송연경 (2004), 외부표정변수 직접결정에 의한 수치정사영상 생성, 한국GIS학회지, 한국GIS학회, 제 13권, 제 1호, pp. 55-63.
- 송연경, 박운용, 박홍기 (2005), Direct Georeferencing에 의한 CCD 영상의 적용기법, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 23권, 제 1호, pp. 77-88.
- 한상득, 조규전, 이재원 (2004), GPS/INS에 의한 외부표정변수결정에 관한 경험적 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 22권, 제 1호, pp. 45-52.
- 황인용, 유갑선, 김학선 (2005), Smart-UAV 데이터링크 신뢰성 향상을 위한 RF 시스템 및 통신 링크 분석, 한국통신학회논문지, 한국통신학회, 제 30권, 제 2A호, pp. 66-79.
- Casbeer, D. W., Li, S. M., Beard, R. W., McLain, T. W. and Mehra, R. K. (2005), Forest Fire Monitoring with Multiple Small UAVs, *Proceedings of the American Control Conference*, Portland, USA.
- Chao, H., Baumann, M., Jensen, A., Chen, Y., Cao, Y., Ren, W. and McKee, M. (2008), Band-reconfigurable Multi-UAV-based Cooperative Remote Sensing for Real-time Water Management and Distributed Irrigation Control, *Proceedings of 17th IFAC World congress*, Seoul, Korea.
- Chris McGlone (2004), *Manual of Photogrammetry*, 5th Edition, ASPRS, Bethesda, Maryland, USA, pp. 847-870.
- Eugster, H. and Nebiker, S. (2008), UAV-Based Augmented Monitoring - Real-Time Georeferencing and Integration of Video Imagery with Virtual Globes, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS, Beijing, China.
- Eugster, H. and Nebiker, S. (2007), Geo-registration of Video Sequences Captured from Mini UAVs-Approaches and Accuracy Assessment, *Proceedings of 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, Padua, Italy.
- Grensdorffer, G. J., Engel, A. and Teichert, B. (2008), The Photogrammetric Potential of Low-cost UAVs in Forestry and Agriculture, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS, Beijing, China.
- Hruska, R. C., Lancaster, G. D. Harbour, J. L. and Cherry, S. J. (2005), Small UAV-Acquired, High-Resolution, Georeferenced Still Imagery, *Proceedings of Wildlife Society 12th Annual Conference*, ASPRS, Madison, USA.
- Jensen, A., Baumann, M. and Chen, Y. (2008), Low-cost Multispectral Aerial Imaging Using Autonomous Runway-free Small Flying Wing Vehicles, *Proceedings of the 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Boston, USA.
- Johnson, L. F., Herwitz, S. R., Logitz, B. M. and Dunagan S. E. (2004), Feasibility of Monitoring Coffee Field Ripeness with Airborne Multispectral Imagery, *Applied Engineering in Agriculture*, ASABE, Vol. 20, pp. 845-849.
- Johnson, L. F., Herwitz, S. R., Dunagan S. E., Logitz, B. M., Sullivan, D. V. and Slye R. E. (2003), Collection of Ultra High Spatial and Spectral Resolution Image Data over California Vineyards with a Small UAV, *Proceeding of the 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Honolulu, USA.
- Ladd, G. B., Mitra, M. and Bland, G. L. (2006), Rectification, Georeferencing, and Mosaicking of Images Acquired with Remotely Operated Aerial Platforms, *Proceedings of ASPRS 2006 Annual Conference*, ASPRS, Reno, USA.
- Richards, A. (2002), Coping with Water Scarcity: The Governance Challenge, URL <http://repositories.cdlib.org/igcc/PP/PP54>.

(접수일 2009. 3. 29, 심사일 2009. 4. 10, 심사완료일 2009. 4. 22)