

네트워크 RTK 무인기의 항공삼각측량 정확도 평가 Accuracy Assessment of Aerial Triangulation of Network RTK UAV

한수희¹⁾ · 홍창기²⁾

Han, Soohye · Hong, Chang-Ki

Abstract

In the present study, we assessed the accuracy of aerial triangulation using a UAV (Unmanned Aerial Vehicle) capable of network RTK (Real-Time Kinematic) survey in a disaster situation that may occur in a semi-urban area mixed with buildings. For a reliable survey of check points, they were installed on the roofs of buildings, and static GNSS (Global Navigation Satellite System) survey was conducted for more than four hours. For objective accuracy assessment, coded aerial targets were installed on the check points to be automatically recognized by software. At the instance of image acquisition, the 3D coordinates of the UAV camera were measured using VRS (Virtual Reference Station) method, as a kind of network RTK survey, and the 3-axial angles were achieved using IMU (Inertial Measurement Unit) and gimbal rotation measurement. As a result of estimation and update of the interior and exterior orientation parameters using Agisoft Metashape, the 3D RMSE (Root Mean Square Error) of aerial triangulation ranged from 0.153 m to 0.102 m according to the combination of the image overlap and the angle of the image acquisition. To get higher aerial triangulation accuracy, it was proved to be effective to incorporate oblique images, though it is common to increase the overlap of vertical images. Therefore, to conduct a UAV mapping in an urgent disaster site, it is necessary to acquire oblique images together rather than improving image overlap.

Keywords : Disaster, Unmanned Aerial Vehicle, Virtual Reference Station, Oblique Image, Aerial Triangulation

초 록

본 연구에서는 건물이 혼재한 준 도심 지역에서 발생할 수 있는 재난/재해를 가정하여 네트워크 RTK (Real Time Kinematic) 측위가 가능한 무인기를 이용한 항공삼각측량의 정확도를 평가하였다. 검사점 측위의 신뢰성을 확보하기 위해 검사점을 건물의 옥상에 설치하여 네 시간 이상의 GNSS (Global Navigation Satellite System) 정적 측위를 수행하였다. 객관적인 정확도 평가를 위해 소프트웨어에서 자동으로 인식 가능한 코드화된 대공 타겟을 사용하였다. 무인기에서는 네트워크 RTK 측위의 일종인 VRS (Virtual Reference Station) 방식을 이용하여 영상 취득 당시 카메라의 3차원 좌표를 측정하였고, IMU (Inertial Measurement Unit)와 짐벌 회전각 측정을 통해 카메라의 3축 회전각을 측정하였다. Agisoft Metashape를 이용하여 내·외부 표정요소를 추정·갱신한 결과, 항공삼각측량의 3차원 RMSE (Root Mean Square Error)는 영상의 중복도와 촬영 각도의 조합에 따라 크기는 0.153 m에서 작게는 0.102 m로 나타났다. 더욱 높은 수준의 항공삼각측량 정확도를 확보하기 위해서는 연직 영상의 중복도를 높이는 것이 일반적이나 경사 영상을 추가하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 대응 단계의 재난/재해 현장에서 긴급하게 무인기 매핑을 수행할 경우 중복도를 높이기 보다는 경사 영상도 함께 취득할 필요가 있다.

핵심어 : 재해/재난, 무인기, Virtual Reference Station, 경사 영상, 항공삼각측량

Received 2020. 11. 24, Revised 2020. 12. 03, Accepted 2020. 12. 08

1) Member, Associate Professor, Dept. of Geoinformatics Engineering, Kyungil University (E-mail: scivile2@gmail.com)

2) Corresponding Author, Member, Associate Professor, Dept. of Geoinformatics Engineering, Kyungil University (E-mail: ckhong@kui.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 기후변화로 인해 재해/재난의 빈도와 강도가 심화되는 가운데 예방, 대응, 복구 단계에서 다양한 센서를 이용한 재해/재난 모니터링의 중요성이 증가하고 있다. 무인기는 2000년대 중반부터 보급되기 시작하면서 다양한 분야에서 활용되고 있으며 재해/재난 모니터링 분야에서도 활용 사례가 증가하고 있다. 특히 산불 감시 분야에서 활발하게 응용되고 있으며, 무인기에서 촬영한 가시 영상과 딥러닝을 이용한 산불 감지(Shin and Lee, 2017), 감시 영역을 확장하기 위한 장기 체공형 태양광 무인기의 활용(Chung *et al.*, 2020), 해상도 및 감시 영역 범위의 관점에서 KOMPSAT-3A 위성과 상보 보완적으로 산불 피해 강도 분석에 활용한 사례(Shin *et al.*, 2019)를 들 수 있다. 재해/재난 피해 지역의 3차원 매핑과 신속한 피해 탐지를 목적으로 무인기를 활용한 사례도 있다. 풍수해에 의한 피해 규모를 정량적으로 분석하기 위하여 3차원 지형 자료와 정사영상을 생성한 연구(Kim *et al.*, 2019), 피해 지역에서 취득한 무인기 영상을 준 실시간으로 좌표 등록하기 위한 연구(Joo, 2018), 재난 상황에서 딥러닝을 기반으로 무인기 이동 경로 설정 및 인명 탐지를 자동화하기 위한 연구(Wu *et al.*, 2019) 등이 있다. 구조물의 변위 또는 변형을 효율적으로 계속하기 위하여, 무인기 영상으로부터 구축한 기준 영상 데이터 베이스를 이용하여 무인기 영상을 자동으로 좌표 등록하고 변위를 탐지하기 위한 연구(Kim *et al.*, 2018), 교량을 대상으로 비디오를 촬영하고 기준 영상과 정합하여 3차원 포인트 클라우드를 추출함으로써 교량의 형상 및 크기를 분석하는 연구(Han *et al.*, 2018) 등이 있다.

한편, 무인기 영상의 항공삼각측량 정확도 분석과 관련된 다양한 연구가 수행되었다. 국외에서는 AscTec Falcon 8 무인기와 Panasonic LX-3 카메라를 이용하여 평면오차 2.3 cm, 연직오차 3.8 cm를 기록한 연구(Manyoky *et al.*, 2012), 같은 장비를 이용하여 1 cm GSD (Ground Sampling Distance) 영상으로부터 평면오차 4.9 cm를 기록한 연구(Rijsdijk *et al.*, 2013)가 있다. 국내에서는 DJI Phantom2 Vision Plus 무인기와 내장 FC200 카메라를 이용하여 55 m 높이에서 촬영한 영상으로부터 평면오차 10.2 cm, 연직오차 66.4 cm를 기록한 연구(Lee, 2015), SenseFly eBee 고정형 무인기와 Canon IXUS 127 카메라를 이용하여 130 m 높이에서 촬영한 영상으로부터 평면오차 7.6 cm - 7.9 cm를 기록한 연구(Sung and Lee, 2016)가 있다. 또한 DJI Inspire 1 T600 무인기와 Zenmuse X3 카메라를 이용하여 110 m 높이에서 촬영한 영상으로부터 평면오차 4.2 cm - 7.6 cm를 기록한 연구(Lee *et al.*, 2017)도 있

다. 이상 연구들은 지상 기준점을 이용하여 항공삼각측량을 수행하였으며 대체로 평면오차는 10 cm 이내, 연직오차는 1 m 이내로 나타났다.

이후 무인기 영상의 항공삼각측량 정확도를 개선하기 위한 연구도 수행되었다. Han(2017)은 고선명도 영상을 취득하기 위한 비행 및 카메라 설정 방법을 제시하고 DJI Matrice 600 무인기와 Sony ILCE-7M2 카메라로 110 m 높이에서 촬영한 영상과 GNSS 정지 측위로 취득한 지상 기준점을 이용하여 수평오차 1.4 cm, 연직오차 2.3 cm를 기록하였다. Lee and Lee(2017)와 Lee *et al.*(2018)은 다양한 각도에서 촬영한 경사 영상을 이용하여 항공삼각측량을 수행한 결과 정확한 3차원 모델 형성에는 경사 영상의 사용이 효과적이라는 결론을 제시하였다. Tomaščík *et al.*(2019)은 RTK/PPK (Real-Time Kinematic / Post-Processed Kinematic) 측위가 가능한 Sensefly eBee plus 무인기를 이용하여 수평오차 4.4 cm, 연직오차 8.2 cm를 기록하였으며 이는 네 개 또는 아홉 개의 지상 기준점을 이용한 항공삼각측량보다 높은 정확도였다.

본 연구는 건물이 혼재한 준 도심 지역의 재해/재난 대응 및 복구 단계에서 긴급하게 무인기 매핑을 수행해야 하는 상황을 가정하여 지상 기준점을 사용하지 않고 정밀한 항공삼각측량을 수행하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여 네트워크 RTK 방식 중 하나인 VRS 측위가 가능한 무인기를 이용하여 연직 및 경사 방향으로 영상을 취득하고 검사점을 이용하여 항공삼각측량의 정확도를 평가하고자 한다. 검사점은 건물의 옥상에 설치하여 GNSS 정지 측위를 수행함으로써 측량의 신뢰성을 확보하고, 검사점에는 소프트웨어에서 자동으로 인식 가능한 코드화된 대공 타겟을 설치함으로써 정확도 평가의 객관성을 제고하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 지상 기준점 설치 및 3차원 좌표 측정 방법

본 연구에서는 영상에서 검사점의 중심을 정확하게 인식하고 검사점의 3차원 좌표를 정밀하게 측정하기 위하여 코드화된 타겟 설치와 GNSS 정지 측위를 시행하였다. 코드화된 타겟은 Fig. 1과 같이 Agisoft Metashape 소프트웨어에서 자동으로 인식할 수 있도록 고안된 형태이다. 가로, 세로 각각 1 m 크기의 아크릴판에 시트지를 부착하는 방식으로 열 개를 제작하여 설치하였으며 그 중 연구 영역 내에 있는 일곱 개를 사용하였다. GNSS 신호 수신 시 멀티패스의 영향을 최소화하기 위하여 모든 검사점은 건물의 옥상에 설치하였고 옥상의 지장물에 대한 상향각은 20도 이내가 되도록 위치를 조정하였다. GPS

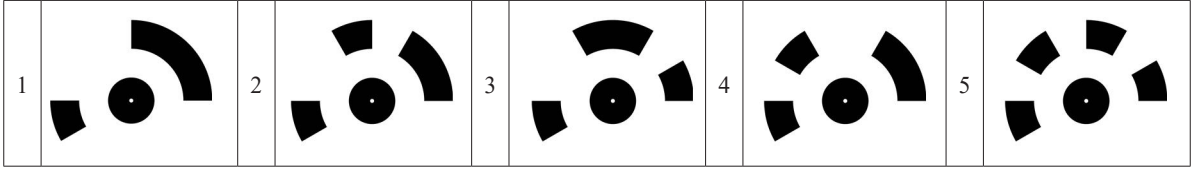


Fig. 1. Samples of aerial target detectable by Agisoft Metashape (Han and Hong, 2017)

Table 1. Specifications of GNSS receiver and static survey

GNSS receiver		GNSS static survey	
Model	Trimble R8S	Occupation time	Over 4 hours
Signals	GPS L1/L2/L5, GLONASS, SBAS, Galileo, Beidou	Mask angle	10°
Positioning accuracy	Static and fast static Horizontal: 3 mm + 0.5 ppmL Vertical: 5 mm + 0.5 ppmL (L: baseline length)	Sampling rate	30 sec
		Ephemeris	Broadcast



Fig. 2. GNSS static survey of check points

(Global Positioning System)와 GLONASS로부터 30초 간격으로 수신된 이중주파수 데이터를 네 시간 이상 취득하였다. 검사점의 3차원 좌표를 결정하기 위하여 인근의 대구 상시기준국(TEGN)을 기준점으로 설정한 후 상대 측위를 수행하였으며 데이터 처리는 Trimble Business Center 소프트웨어를 사용하였다. GNSS 수신기의 제원과 검사점의 측위 모습은 Table 1 and Fig. 2와 같다.

2.2 비행 및 촬영 방법

본 연구의 대상 지역은 구릉과 건물이 혼재된 곳으로서 지면에서는 무인기의 시통이 어려워 건물의 옥상에서 비행 미션을 수행하였다. 이와 같은 상황은 준 도심 징역에서 무인기 매핑을 수행할 때 일반적으로 발생할 수 있는 상황으로도 볼 수 있다. 지면을 기준으로 GSD에 따른 비행고도와 촬영 중복도를 결정했다면 건물의 옥상에서는 건물의 높이에 따라 중복도를 변경해 주어야 한다. 즉, Fig. 3과 같이 카메라 센서의 크기 (a), 화소수(n), 주점거리(f)에 대하여 목표한 GSD를 위한 비

행 고도(h₁)와 중복도(P₁)를 지면에서 결정하였을 때, 건물 옥상에서 비행을 시작하려면 새로운 중복도(P₂)를 Eq. (1)과 같이 결정할 수 있다. 비행 속도(v)는 넓은 면적을 촬영할 수 있도록 결정해야 하는데, 어느 수준까지는 빠르게 해야 촬영 면적이 늘어나는 특성이 있다. 그러나 디지털 카메라는 촬영한 영상을 저장하고 다음 촬영을 준비하는 동안 시간이 필요하므로 높은 중복도를 유지하기 위해서는 비행 속도를 충분히 높이지 못할 수도 있다. 또한 비행 속도가 빨라지면 카메라의 노출 시간(t) 동안 이동한 거리만큼 영상에 번짐이 발생하므로 노출 시간을 제한할 필요가 있다. 허용 번짐 크기를 k 화소라고 하면 노출 시간은 Eq. (2)와 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 h_1 &= \frac{f \times n}{a} \text{GSD} \\
 P_2 &= \frac{h_2/h_1 A - (1 - P_1)A}{h_2/h_1 A} = 1 - (1 - P_1) \frac{h_1}{h_2} = 1 - (1 - P_1) \frac{h_1}{h_1 - \Delta h} \quad (1) \\
 (\text{or } P_1 &= 1 - (1 - P_2) \frac{h_1 - \Delta h}{h_1})
 \end{aligned}$$

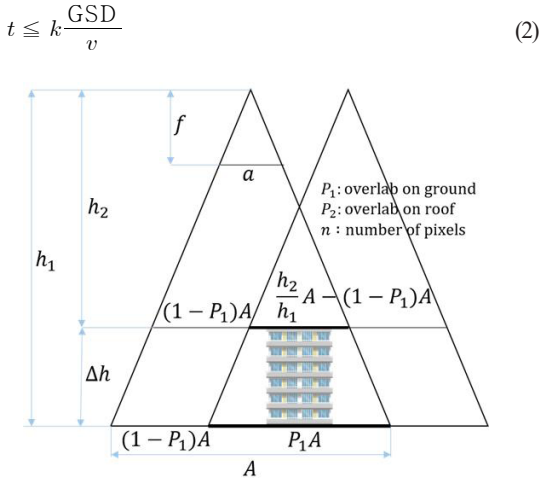


Fig. 3. Relationship between the two overlaps of the ground and the top of a building

비행 경로와 촬영 각도는 두 가지 방식으로 설정하였는데, 방식 1은 높은 중복도로 연직 방향으로만 촬영하는 방식이고 (Fig. 4(a)), 방식 2는 상대적으로 낮은 중복도의 연직 방향(Fig. 4(b))과 경사 방향(Fig. 4(c))으로 촬영하는 방식이다. 아울러 방식 1과 방식 2로 촬영한 영상의 총 매수는 서로 비슷하게 유지하고자 하였다.

2.3 항공삼각측량 및 정확도 평가

본 연구에서는 네트워크 RTK의 일종인 VRS 방식으로 촬영 당시 무인기 카메라의 3차원 좌표를 취득하였고, IMU와 짐벌 회전각 측정을 통해 카메라의 3축 회전각을 측정하였다.

Agisoft Metashape의 align photos 기능과 optimize alignment 기능을 이용하여 카메라의 내·외부 표정요소를 추정·갱신하였다. 2.1 장의 검사점들은 내·외부 표정요소 갱신에는 사용하지 않고 모두 항공삼각측량의 수평 및 연직오차 측정에만 사용하였다. 항공삼각측량은 방식 1과 방식 2로 취득한 영상들의 조합을 대상으로 시행하였다. 즉, 방식 1로 취득한 연직 영상을 기반으로 방식 2로 취득한 경사 영상을 추가하는 조합(V1, V1+O)과, 방식 2로 취득한 연직 영상을 기반으로 경사 영상을 추가하는 조합(V2, V2+O)을 형성하였다(Fig. 5). 이를 통해 경사 영상의 추가로 인한 항공삼각측량의 정확도 변화 추이를 살펴보고자 하였다.

3. 실험 및 결과

3.1 무인기의 제원 및 실험 대상 영역

본 연구에서 사용한 무인기와 카메라, 렌즈의 제원은 Table 2와 같다. 무인기는 회전식 방식으로서 이 주파 GNSS 신호 수신이 가능하여 영상 취득 당시 카메라의 3차원 좌표를 RTK/PPK 및 네트워크 RTK 방식으로 측정할 수 있고, IMU와 짐벌 회전각 측정을 통해 카메라의 3축 회전각을 측정할 수 있다. 카메라는 3축 짐벌 일체형으로서 초점거리 25 mm의 단렌즈를 탑재하여 약 47도의 화각을 갖는다.

대상 영역은 경상북도 경산시 소재 대학의 캠퍼스이며 촬영 영역의 면적은 약 145,000 m²이다. 건물의 높이는 약 10~20 m이며 지면의 최저 지점과 건물의 최고 지점의 높이 차이는 약 50 m이다. 검사점의 배치는 Fig. 6과 같으며 3차원 좌표 측정 결과는 Table 3과 같다.



Fig. 4. Flight routes: (a) method 1 (vertical 1), (b) method 2 (vertical 2), and (c) method 2 (oblique from north to south)



Fig. 5. Image combinations for accuracy assessment

Table 2. Specifications of UAV, camera, and lens

UAV		Camera		Lens	
Model	DJI Matrice 210 RTK V2	Model	DJI Zenmuse X5S	Model	Olympus M.Zuiko 25 mm/1.8
Wing type	4 rotary wings	Type	Camera with 3-axis gimbal	Type	Prime lens
Weight(max.)	4.91 kg (6.14 kg)	Weight	461 g	Weight	145 g
Flight time	33 min (24 min in 6.14 kg)	Pixels	5280 x 3956	Focal length	25 mm
GNSS	GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo	Sensor type	CMOS 4/3 inch	Max. aperture	f/1.8



Fig. 6. Distribution of check points

Table 3. 3D coordinates of check points

Check point	Longitude (°)	Latitude (°)	Ellipsoidal height (m)
target 4	128.8000219	35.91012124	128.3011
target 5	128.7992487	35.90865269	120.8323
target 6	128.8020155	35.90867503	118.3603
target 7	128.8011959	35.90929426	123.1004
target 8	128.8022289	35.90933602	125.0671
target 9	128.8016725	35.91029658	127.3006
target 10	128.800353	35.90903258	115.6474

3.2 비행 경로 및 촬영 설정

무인기는 한 건물의 옥상에서 이륙하여 100 m 높이에서 비행하였으며 지면으로부터 측정된 평균 고도는 약 128m로 나타났다. 주어진 배터리를 소진하며 대상 영역을 촬영하기 위하여 방식 1에서는 건물 옥상 기준 80 %의 중첩 중복도로 설계하였으며 이는 지면 기준 85 % 내외의 중복도에 해당한다. 방식 2에서는 연직 방향 촬영 시 옥상 기준 종방향 80 %, 횡방향 70 %의 중복도로 설계하였으며 이는 지면 기준 75 - 85 %의 중복도에 해당한다. 아울러 방식 2에서는 60 도의 저각으

로 남북 방향 촬영을 수행하였다. 방식 2는 경사 영상을 촬영하기 위해 경로가 추가됨에 따라 촬영 가능한 영상의 매수가 방식 1보다 적었다. 방식 1은 2020년 11월 5일 오전 11시 25분부터, 방식 2는 2020년 11월 7일 오전 11시 35분부터 촬영을 시작하였다(Table 4).

Table 4. Specifications of image acquisition methods

Method	Orientation	Number of images	Flight altitude (m)	Endlap/sidelap from roof (%)	Max. flight speed (m/s)	Exposure time (sec)
Method 1	Vertical	602	100	80/80	5	1/500
Method 2	Vertical	330	100	80/70	5	1/500
	Oblique (N to S)	187	100	70/60	6	1/500

3.3 항공삼각측량 정확도 평가 및 결과

Agisoft Metashape에서 reference settings - measurement accuracy - camera accuracy 항목은 카메라 외부표정요소 초기값의 경중량을 나타내는 요소로서, 무인기의 VRS 측위 편차를 고려하여 0.05 m로 설정하였다. Optimize alignment에서 갱신할 카메라 내부표정요소로서 주점거리(f), 주점변위(cx, cy), 방사왜곡 및 편심왜곡 계수(k₁, k₂, k₃, p₁, p₂)를 선택하였으며 추가로 affinity 및 non-orthogonality 계수(b₁, b₂)를 선택하였다. 이 설정들은 항공삼각측량의 오차를 최소화하기 위해 시행착오를 통해 결정된 것이며, 그와 관련된 이론적인 고찰은 논외로 한다.

Fig. 5의 네 가지 영상 조합에 대한 항공삼각측량의 동서, 남북, 연직 및 3차원 RMSE (Root Mean Square Error)는 Table 5와 같다. 최대 평면 RMSE는 V1에서 0.093으로 나타났고 최소 평면 RMSE는 V2에서 0.076으로 나타났으며, 최대 연직 RMSE는 V1에서 0.121로 나타났고 최소 연직 RMSE는 V1+O

Table 5. Estimated aerial triangulation errors (meters, () denotes the number of images)

Check point	V1 (602)				V1+O (789)			
	Longitude	Latitude	Height	3D	Longitude	Latitude	Height	3D
target 4	-0.017	-0.091	0.124	0.155	-0.003	-0.142	0.036	0.147
target 5	-0.056	0.089	0.124	0.163	-0.045	0.061	0.062	0.098
target 6	0.049	0.137	0.078	0.165	0.033	0.103	0.009	0.109
target 7	0.021	0.045	0.118	0.128	0.022	0.007	0.053	0.058
target 8	0.058	0.074	0.127	0.158	0.057	0.032	0.048	0.081
target 9	0.032	-0.064	0.139	0.156	0.041	-0.112	0.033	0.123
target 10	-0.017	0.056	0.131	0.144	-0.014	0.022	0.066	0.071
Std. dev.	0.038	0.077	0.018	0.012	0.033	0.083	0.018	0.029
RMSE	0.039	0.084	0.121	0.153	0.035	0.083	0.048	0.102
Check point	V2 (330)				V2 + O (517)			
	Longitude	Latitude	Height	3D	Longitude	Latitude	Height	3D
target 4	-0.022	-0.071	-0.089	0.116	-0.009	-0.158	0.034	0.162
target 5	-0.050	0.077	-0.088	0.127	-0.032	0.028	0.074	0.085
target 6	0.042	0.103	-0.165	0.199	0.043	0.064	0.006	0.077
target 7	0.011	0.036	-0.088	0.095	0.021	-0.018	0.069	0.074
target 8	0.051	0.067	-0.089	0.123	0.066	0.017	0.056	0.088
target 9	0.025	-0.046	-0.056	0.076	0.040	-0.112	0.036	0.124
target 10	-0.024	0.047	-0.082	0.098	-0.016	-0.006	0.091	0.092
Std. dev.	0.035	0.060	0.031	0.037	0.033	0.074	0.027	0.029
RMSE	0.035	0.067	0.099	0.125	0.037	0.078	0.059	0.105

에서 0.048로 나타났다. 즉, 평면 오차는 10 cm 이내, 연직 오차는 12 cm 이내로서 상당히 정확한 것을 알 수 있다.

연직 영상으로만 구성된 V1과 V2를 비교하면 V1은 중복도가 높고 영상의 매수가 많음에도 불구하고 RMSE가 더 크다. 일반화하기는 어려우나, V1과 V2의 연직 표준 편차는 0.018과 0.031로서 V1이 작으네, 이는 V1에서 연직 편위가 발생한 상태에서 안정적으로(또는 over-fit 되어) 외부 표정요소가 결정된 것으로 해석할 수 있다. 반면, V1+O는 V1에 경사 영상을 추가함으로써 연직 RMSE는 0.121에서 0.048로 60% 감소하고 3차원 RMSE는 0.153에서 0.102로 33% 감소하여 오차가 대폭 감소된 것을 알 수 있다. 그 이유는 경사 영상을 추가함으로써 고도 차이가 큰 대상면(지면 vs. 건물의 옥상) 간의 에피폴라 기하가 보다 안정적으로 형성되었기 때문인 것으로 해석할 수 있다. V2+O도 V2에 경사 영상을 추가함으로써 연직 RMSE는 0.099에서 0.059로 40% 감소하고 3차원 RMSE는 0.125에서 0.105로 19% 감소하였는데, 이 역시 V2+O의 오차 감소 이유와 동일하게 설명할 수 있다.

이상의 결과들을 통해 기록이 큰 지역의 항공삼각측량의 정

확도를 높이기 위해서는 경사 영상을 추가하는 것이 효과적이라고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 건물이 혼재한 준 도심 지역에서 발생할 수 있는 재난/재해를 가정하여 네트워크 RTK 측위가 가능한 무인기를 이용한 항공삼각측량의 정확도를 평가하였다. 검사점 측위의 신뢰성을 확보하기 위해 검사점을 건물의 옥상에 설치하여 네 시간 이상의 GNSS 정적 측위를 수행하였다. 객관적인 정확도 평가를 위해 소프트웨어에서 자동으로 인식 가능한 코드화된 대공 타겟을 사용하였다. 본 연구에 사용한 무인기는 GNSS RTK/PPK 또는 네트워크 RTK 측위를 이용하여 영상 취득 당시 무인기 카메라의 3차원 좌표를 취득할 수 있고, IMU와 짐벌 회전각 측정을 통해 카메라의 3축 회전각을 취득할 수 있다. 이에 네트워크 RTK의 일종인 VRS 방식으로 3차원 좌표를 취득하였고 Agisoft Metashape를 이용하여 내부 표정요소를 추정·갱신하였다. 결과적으로 항공삼각측량

의 3차원 RMSE는 영상의 중복도와 촬영 각도의 조합에 따라 크기는 0.153 m에서 작게는 0.102 m로 나타났다. 높은 수준의 항공삼각측량 정확도를 확보하기 위해서는 연직 영상의 중복도를 높이는 것이 일반적이나, 경사 영상을 추가하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 대응 단계의 재난/재해 현장에서 긴급하게 무인기 매핑을 수행할 경우 연직 영상의 중복도를 높이기 보다는 경사 영상도 함께 취득할 필요가 있다고 볼 수 있다.

향후 항공삼각측량의 정확도를 향상시킬 수 있는 적절한 중복도의 설계, 연직 및 경사 영상의 구성 비율, 비행 경로 설정 방법 등을 탐구하고자 한다. 아울러 더욱 높은 수준의 정확도를 확보하기 위해 무인기의 RTK/PPK 측위 방법도 탐구하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 행정안전부 재난안전 산업육성지원 사업의 지원을 받아 수행된 연구의 결과임(no.20009742)

References

- Chung, D.K., Lee, M.H., Kim, H.Y., Park, J.Y., and Lee, I. (2020), Development of forest fire monitoring system using a long-term endurance solar powered drone and deep learning, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 28, No. 2, pp. 29-38. (in Korean with English abstract)
- Han, D., Park, J.B., and Huh, J. (2018), Orientation analysis between UAV video and photos for 3D measurement of bridges, *Journal of the Korean Society of Survey, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 36, No. 6, pp. 451-456. (in Korean with English abstract)
- Han, S. (2017), High-resolution and high-definition image acquisition using UAV and high-precision aerial triangulation, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 25, No. 3, pp. 101-109. (in Korean with English abstract)
- Joo, Y.D. (2018), A Study on the construction of near-real time drone image preprocessing system to use drone data in disaster monitoring, *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol. 18, No. 3, pp. 143-149. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.Y., Choi, K.A., and Lee, I.P. (2018), Drone image-based facility inspection – focusing on automatic process using reference images, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 26, No. 2, pp. 21-32. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.S., Song, B.G., Cho, S.B., and We, G.J. (2019), Applicability of drone mapping for natural disaster damage investigation, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 27, No. 2, pp. 13-21. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.R., Han, Y.K., and Lee, W.H. (2018), Comparison of orthophotos and 3D models generated by UAV based oblique images taken in various angles, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 3, pp. 117-126. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.R. and Lee, W.H. (2017), Comparison of orthophoto and 3D modeling using vertical and high oblique images taken by UAV, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 25, No. 4, pp. 35-45. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.C., Kim, J.H., and Um, J.S. (2017), Accuracy and economic evaluation for utilization of national/public land actual condition survey using UAV images, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 35, No. 3, pp. 175-186. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.C. (2015), Assessing the positioning accuracy of high density point clouds produced from rotary wing quadcopter unmanned aerial system based imagery, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 23, No. 2, pp. 39-48. (in Korean with English abstract)
- Manyoky, M., Theiler, P.W., Stuedler, D., and Eisenbeiss, H. (2011), Unmanned aerial vehicle in cadastral applications, *ISPRS Zurich 2011 Workshop*, ISPRS, Zurich, Switzerland, pp. 57-62.
- Rijsdijk, M., van Hinsbergh, W.H.M., Witteveen, W., ten Buuren, G.H.M., Schakelaar, G.A., Poppinga, G., van Persie, M., and Ladiges, R. (2013), Unmanned aerial systems in the process of juridical verification of cadastral border, *UAV-g2013*, ISPRS, Rostock, Germany, pp. 325-331.
- Shin, J.I., Seo, W., Kim, T., Woo, C., and Park, J. (2019), Analysis of availability of high-resolution satellite and UAV multispectral images for forest burn severity classification, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 35, No. 6-2, pp. 1095-1106. (in Korean with English abstract)

- Shin, W.J. and Lee, Y.T. (2017), Design and implementation of local forest fire monitoring and situational response platform using UAV with multi-sensor, *The Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, Vol. 10, No. 6, pp. 626-632. (in Korean with English abstract)
- Sung, S.M. and Lee, J.O. (2016), Accuracy of parcel boundary demarcation in agricultural area using UAV-photogrammetry, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 34, No. 1, pp. 53-62. (in Korean with English abstract)
- Tomašík, J., Mokroš, M., Surový, P., Grznárová, A., and Merganič, J. (2019), UAV RTK/PPK method—an optimal solution for mapping inaccessible forested areas?, *Remote Sensing*, Vol. 11, Issue 6, p. 721.
- Wu, C., Ju, B., Wu, Y., Lin, X., Xiong, N., Xu, G., Li, H., and Liang, X. (2019), UAV autonomous target search based on deep reinforcement learning in complex disaster scene, *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 117227-117245.