

고해상도 카메라와의 동시 운영을 통한 드론 다분광카메라의 외부표정 및 영상 위치 정밀도 개선 연구

Improving Precision of the Exterior Orientation and the Pixel Position of a Multispectral Camera onboard a Drone through the Simultaneous Utilization of a High Resolution Camera

백승일¹⁾ · 변민수²⁾ · 김원국³⁾

Baek, Seungil · Byun, Minsu · Kim, Wonkook

Abstract

Recently, multispectral cameras are being actively utilized in various application fields such as agriculture, forest management, coastal environment monitoring, and so on, particularly onboard UAV's. Resultant multispectral images are typically georeferenced primarily based on the onboard GPS (Global Positioning System) and IMU (Inertial Measurement Unit) or accurate positional information of the pixels, or could be integrated with ground control points that are directly measured on the ground. However, due to the high cost of establishing GCP's prior to the georeferencing or for inaccessible areas, it is often required to derive the positions without such reference information. This study aims to provide a means to improve the georeferencing performance of a multispectral camera images without involving such ground reference points, but instead with the simultaneously onboard high resolution RGB camera. The exterior orientation parameters of the drone camera are first estimated through the bundle adjustment, and compared with the reference values derived with the GCP's. The results showed that the incorporation of the images from a high resolution RGB camera greatly improved both the exterior orientation estimation and the georeferencing of the multispectral camera. Additionally, an evaluation performed on the direction estimation from a ground point to the sensor showed that inclusion of RGB images can reduce the angle errors more by one order.

Keywords : Multispectral Camera, Bundle Adjustment, Exterior Orientation, Georeferencing

초 록

최근 농업, 산림관리, 해양환경 모니터링 등 다양한 분야에서 다분광 카메라의 활용, 특히 드론에 탑재되어 활용되는 사례가 증대되고 있다. 산출되는 다분광 영상은 위치정보를 위해 주로 드론에 탑재된 GPS (Global Positioning System)나 IMU (Inertial Measurement Unit) 센서를 이용해 지리참조(georeferencing)되는데, 보다 높은 정확도를 위해서는 직접 측량한 지상 기준점을 이용하기도 한다. 하지만, 직접 측량에 드는 비용 및 시간으로 인해 또는 직접 접근이 어려운 지역에 대해서는 지상 참조값을 활용하지 않고 지리참조를 수행해야하는 경우가 자주 발생하게 된다. 본 연구는 지상기준점이 가용하지 않은 경우에 다분광카메라로부터의 영상의 지리참조 정밀도를 향상시키기 위해 같이 탑재된 고해상도 RGB카메라의 영상을 활용하는 방안에 대하여 연구한다. 드론 영상은 우선 번들조정을 통해 카메라의 외부표정 요소를 추정하였고, 이를 지상 기준점을 이용한 경우의 외부표정 및 위치결과와 비교하였다. 실험결과, 고해상도 영상을 포함하여 번들조정을 하게 될 경우, 다분광 카메라 영상을 단독으로 활용할 때보다, 다분광 카메라 영상의 지리참조 오차가 비약적으로 감소하였음을 확인하였다. 추가로 한 지상 지점에서 드론으로의 방향각을 추정할 때의 오차를 분석한 결과, 마찬가지로 고해상도 RGB영상을 포함하여 번들조정하게 되면 기존의 방향각 오차가 한 단위이상 감소하는 것으로 나타났다.

핵심어 : 다분광 카메라, 번들 조정, 외부표정요소, 지리참조

Received 2021. 12. 03, Revised 2021. 12. 16, Accepted 2021. 12. 21

1) Member, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University (E-mail: seung1100@pusan.ac.kr)

2) Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University (E-mail: ghghzld1@naver.com)

3) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University (E-mail: wonkook@pusan.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 드론이나 항공기에 다분광 카메라를 탑재하여 지상 피사체의 물리적 성질(물성)을 추출하는 연구 및 활용 사례가 증가하고 있다. 대표적인 사례로는 수목의 식생량 추정(Dash *et al.*, 2017), 농작물의 생장 상태(Lum *et al.*, 2016; de Oca *et al.*, 2018), 농작물 병해탐지(Su *et al.*, 2018), 토지피복 분류(Chen *et al.*, 2020), 해수의 염록소 농도 추정(Baek *et al.*, 2019), 적조 및 녹조 탐지(Kim *et al.*, 2020) 등이 있다. 드론에 탑재 가능한 경량 다분광 카메라는 주로 4~6개의 분광밴드를 가지고 있고 비교적 가벼워 기존에 탑재되어 있는 RGB 카메라 또는 다양한 센서를 복수 구성하여 활용할 수 있다. MicaSense사의 RedEdge-MX와 RedEdge-Blue의 경우는 다른 분광밴드 구성을 가진 복수의 다분광 카메라를 동시에 운영하는 대표적인 사례이다(Chakhvashvili *et al.*, 2021).

다분광 카메라는 기존 RGB카메라에서는 획득할 수 없었던 분광정보를 정량적으로 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 화소 해상도는 상대적으로 낮은 편이고 보통 카메라 본체와 같이 제공되는 IMU/ GPS 장비의 성능 및 배치 위치의 한계로 인하여 촬영영상의 위치정보 정확도가 상대적으로 낮다는 문제가 있다. 획득 영상의 위치정보를 정확히 계산하기 위해서 지상에서 GNSS(Global Navigation Satellite System) 측량 등을 통해서 지상기준점(GCP : Ground Control Point)를 확보하여 후처리하는 방법(Dash *et al.*, 2018; Assmann *et al.*, 2019)이 있는데, 해양이나 산림과 같이 지상기준점 작업이 어렵거나 과도한 시간 및 비용이 소요되는 경우에는 드론 기체의 장비만으로 위치정확도를 제고해야 하는 경우가 발생하게 된다(Tomaštik *et al.*, 2019; Shin *et al.*, 2020). 최근에 RTK(Real Time Kinematic) GPS 기능을 탑재한 드론의 경우에도 GPS 유닛과 다분광 카메라의 정밀한 위치 및 자세 차이로 인해 정밀한 영상 화소의 위치를 계산하는데 한계가 있다. 이를 근본적으로 해결하는 방법은 드론 기체와 다분광 카메라 간에 boresight calibration을 수행하여 GPS/IMU 유닛과 다분광 카메라간의 위치, 자세 차이를 해석적으로 미리 계산하는 것이지만, 시간과 비용이 소요되고 교정 후에도 카메라 탈착을 반복할 경우 교정 정보를 사용할 수 없게 되는 등 실제 활용에서는 제약이 따르게 된다.

본 연구에서는 지상기준점이 없는 경우 다분광카메라 영상을 고해상도 RGB카메라 영상과 결합함으로써 다분광카메라 영상에 대한 외부표정요소와 결과영상화소의 위치정확도가 얼마나 개선될 수 있는지에 대하여 분석하였다. 고해상도 RGB 카메라가 다분광카메라 영상의 위치정확도 제고에 기여할 수

있는 요소는 크게 두 가지로 고려된다. 첫째, 다분광카메라보다 상대적으로 높은 화소해상도로 인하여 해상도 한계로 인한 오차를 줄일 수 있다는 점이고, 둘째로는 실험에 사용된 드론 및 RGB카메라의 경우 동일 제조사의 제품으로 출시되어 드론에 탑재된 RTK GPS를 활용할 수 있다는 점이다. 본 연구에 사용된 드론은 RTK GPS를 탑재하고 있는 DJI사의 Matrice 300 RTK이고, RGB카메라로는 Zenmuse H20 광학카메라를 다분광 카메라로는 RedEdge-MX를 사용하였다. 실험의 목적은 지상기준점에 대한 정보 없이 (1) 다분광 카메라, (2) RGB카메라, (3) 다분광 + RGB카메라의 세 가지 경우에 번들조정을 수행한 후의 결과를 비교하는 것이며, 특히 다분광카메라 하나만 사용하여 독자적으로 번들조정하였을 때보다 다분광 + RGB 카메라를 동시에 사용하여 번들조정을 하였을 때 어느 정도 개선이 이루어지는지를 분석하는 것이 본 연구의 주목적이라고 할 수 있다. 정확도 평가를 위한 참조 위치 결과 값은 GNSS 측위장비를 이용하여 측정한 지상 기준점의 위치를 사용하였고, 다분광카메라, RGB카메라 각각의 영상을 번들조정 없이 사용하여 도출한 위치결과를 기본 비교결과로 같이 제시하였다.

2. 연구 장비 및 자료

2.1 DJI Matrice 300 RTK & Zenmuse H20

Matrice 300 RTK(Fig. 1(a))는 DJI에서 제작한 회전익 드론으로, RTK GPS를 탑재하고 있고, 2.7kg의 최대 탑재 하중과 3개의 센서 장착 포트를 가지고 있다. RTK GPS는 기준국의 보정치를 수신하여 드론의 위치 정밀도를 수 cm급으로 향상시킬 수 있다. 또한, 2.7kg의 탑재하중과 다중 센서 포트는 다양한 센서를 탑재 하여 운용할 수 있는 확장성을 제공하여 준다. Zenmuse H20(Fig. 1(b))는 DJI에서 제작하고 Matrice 300 RTK와 함께 출시되어 판매되는 광학센서로, (1)줌 카메라, (2)광각 카메라, (3)레이저 거리측정기를 포함하고 있다. 본 연구에서는 줌 카메라와 레이저 거리측정기는 사용하지 않고 광각 카메라만을 이용하였으며, 광각 카메라의 성능은 Table 1과 같고, 100m의 고도에서 촬영 시 GSD (Ground Sample Distance)는 약 3.5cm, 촬영 면적은 약 144 × 108m이다.

2.2 MicaSense RedEdge-MX

RedEdge-MX는 MicaSense에서 제작한 다분광 카메라로 다섯 개의 분광영상을 촬영할 수 있는 센서다(Fig. 1(c)). 분광 영상촬영을 담당하는 카메라 본체와 IMU, GPS 데이터를 취득하는 DLS-2(Downwelling Light Sensor-2) 센서로 구성되어 있다. 분광 영상을 촬영하기 위하여 장착 되어있는 5개의

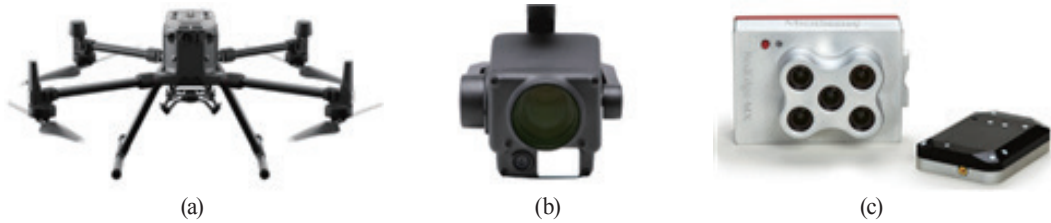


Fig. 1. Images of (a) DJI Matrice 300 RTK and (b) Zenmuse H20, (c) RedEdge-MX

렌즈는 각각 475 ± 10 , 560 ± 10 , 668 ± 5 , 717 ± 5 , 842 ± 20 nm의 분광 중심 파장대와 밴드폭을 가지고 있고, 성능은 Table 1과 같다. 100m의 고도에서 촬영 시 GSD는 약 6.8cm, 촬영 면적은 약 87×65 m이다.

Table 1. Specification of Zenmuse H20 and RedEdge-MX

Specification	Zenmuse H20		RedEdge-MX
	Zoom camera	Wide camera	
Sensor size (mm)	7.60 × 5.70	6.17 × 4.55	4.8 × 3.6
Field of view (°)	66.6	82.9	47.9
Focal Length (mm)	6.83 ~ 119.94	4.5	5.4
Resolution (pixel)	5184×3888	4056×3040	1280 × 960
Weight (g)	678		232

2.3 연구 대상지역 및 관측 자료의 획득

연구 대상지역은 부산대학교 캠퍼스 내에 위치한 광장

인 “넉넉한 터”로, 면적은 0.04km^2 (200×200 m)이다. 대상지역 내에 기준점을 Fig. 2(a)와 같이 배치하였고, Sokkia사의 GCX3를 이용하여 기준점의 좌표를 측정하였다. 기준점 관측에는 VRS-RTK(Virtual Reference Station - Real Time Kinematic) 방식을 이용하였고, 대상지점에서 Fig. 2(b)와 같이 설치 후, 약 30초간 수신하였다. 23개의 기준점에 대한 좌표 측정 성과는 Table 2와 같이 나타내었다.

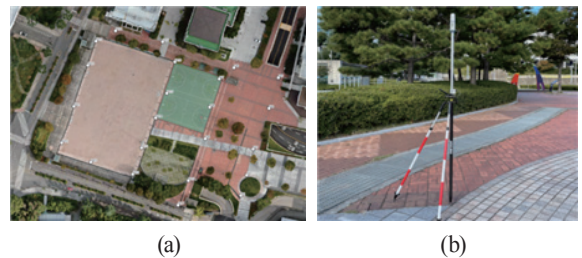


Fig. 2. (a) The study site, “Neok-teo” in Pusan National University, and (b) the photo of the GPS instrument used for securing ground control points

Table 2. Spatial coordinates of the ground control points

Point	NX(m)	EY(m)	Z(m)	Point	NX(m)	EY(m)	Z(m)
Pt01	292775.302	207554.574	63.666	Pt13	292805.485	207493.375	64.149
Pt02	292788.264	207558.263	63.807	Pt14	292824.396	207502.200	64.103
Pt03	292804.733	207562.234	63.803	Pt15	292839.918	207508.876	64.122
Pt04	292830.519	207572.073	63.983	Pt16	292859.823	207513.877	64.125
Pt05	292849.887	207577.816	63.929	Pt17	292872.486	207506.307	64.357
Pt06	292856.244	207550.418	64.236	Pt18	292879.493	207477.332	64.201
Pt07	292848.988	207541.326	64.058	Pt19	292872.978	207465.215	64.098
Pt08	292831.170	207535.451	64.068	Pt20	292857.655	207460.165	64.108
Pt09	292811.233	207532.629	64.107	Pt21	292831.689	207451.611	64.109
Pt10	292784.803	207522.177	64.114	Pt22	292808.659	207444.041	64.107
Pt11	292769.352	207515.869	64.445	Pt23	292796.451	207461.982	64.135
Pt12	292788.831	207487.885	64.109				

기준점 설치 이후, Matrice 300 RTK 드론에 하향 듀얼 브라켓을 설치하였고, 브라켓의 좌측에는 RedEdge를, 우측에는 Zenmuse를 설치하여(Fig. 3(a)) 두 광학센서를 동시에 운용하였다. 항공촬영을 위한 비행계획은 9개의 스트라이프를 구성, 100m의 비행고도, 5m/s의 비행속도, 2초의 영상촬영 간격으로 구성되었다. 항공촬영 이후, Zenmuse H20 광각카메라 영상 약 200장(Fig. 3(b)), RedEdge의 영상은 각 밴드별로 약 200장씩, 약 1,000장을 획득하였다. Zenmuse 영상의 GSD는 3.5cm, 촬영 중복도는 중중복 90%, 횡중복 85%이며, RedEdge 영상의 GSD는 6.5cm, 촬영 중복도는 중중복 85%, 횡중복 75%이다.

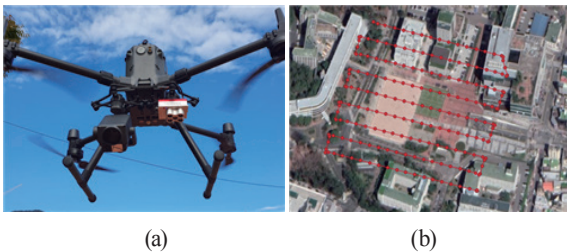


Fig. 3. (a) The image of Matrice 300 RTK and two sensors mounted thereon and (b) the drone flight path provided with the location of capture points

2.4 실험 설계

앞서 서론에 소개된바와 같이, 본 연구의 목적은 RGB 카메라, 다분광 카메라, 그리고 동시 활용시의 번들조정 후 위치도출결과를 비교하는 것으로, 위 3가지의 경우를 각각 Case 3, Case 4, Case 5로 명명하였다. 지상 GNSS 측위를 실시하여 얻은 기준점에서의 위치와 RGB, 다분광 카메라를 모두 이용하여 번들조정 후 획득한 위치값을 참값으로 삼았고 이를 Case 0이라 칭하였다. 참고로 번들조정 없이 각 카메라 영상과 드론 기체의 GPS/IMU 값만을 이용하여 도출한 위치값을 기본성능으로 비교하기 위하여 산출하였고, RGB 카메라의 결과를 Case 1, 다분광 카메라의 결과를 Case 2라 명명하였다(Fig. 4).

주요 비교 대상 변수는 ① 각 영상의 외부표정요소 (x, y, Altitude, roll, pitch, yaw)와 ② 산출된 영상의 위치정확도 (NX, NY, Elevation)로, Case 1~5의 5가지 결과에 대한 외부표정요소 평가는 Case 0에서 도출된 표정요소를 참값으로 간주하여 도출하였고, 산출된 영상의 위치정확도(NX, NY, Elevation)는 GNSS 수신기를 통하여 측정된 기준점 좌표와 비교하였다.

마지막으로, 특정 드론 위치에서 지상의 특정 지점으로의 방향각에 대한 추정 정밀도를 추가로 분석하였다. 이를 위해 제작된 정사영상에서 지상기준점 하나를 선정하고, 그 기준

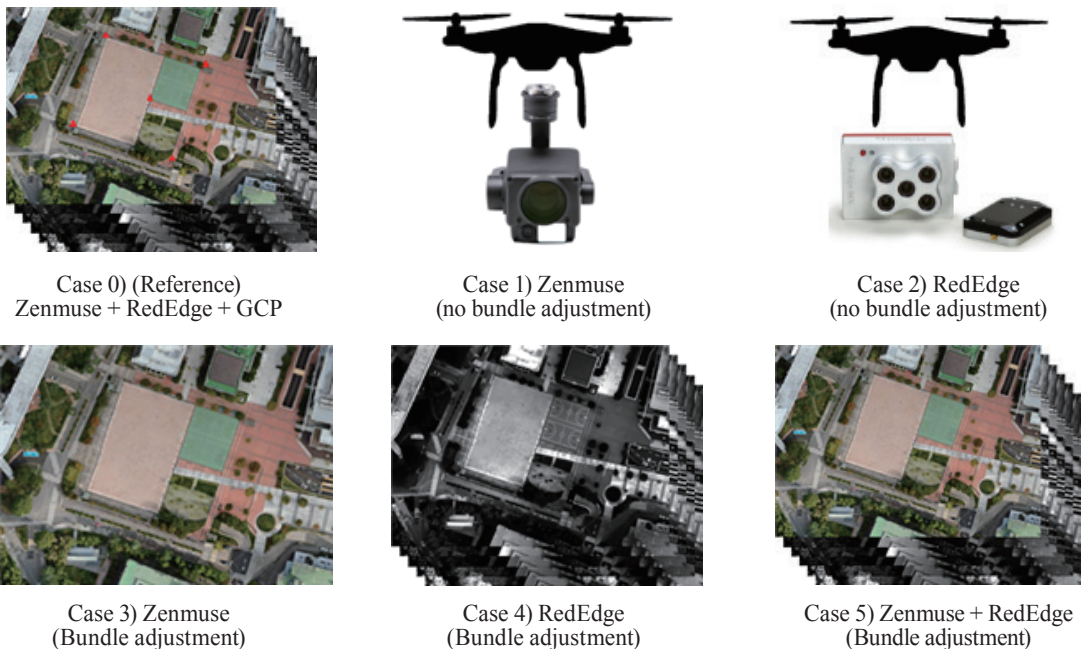


Fig. 4. 6 experiments scenarios performed in this study

Table 3. Interior orientation parameters of each camera calculated from the independent calibration.

parameter (unit)	Zenmuse	RedEdge Band 01	RedEdge Band 02	RedEdge Band 03	RedEdge Band 04	RedEdge Band 05
F(pixel)	2930.57	1442.97	1443.72	1434.59	1443.35	1444.98
Cx(pixel)	10.6557	22.5031	22.4838	7.0676	2.04598	-1.19115
Cy(pixel)	-34.7397	- 6.9422	17.0776	-5.6726	-11.0594	-1.80211
b1(coef)	-2.1614	0.120358	0.149266	-0.878482	0.217243	0.391749
b2(coef)	-0.390822	0.175809	0.11601	0.134737	0.106968	-0.093043
k1(coef)	0.266261	-0.095253	-0.100792	-0.101236	-0.103917	-0.103665
k2(coef)	-0.983267	0.134340	0.139401	0.134389	0.144183	0.135871
k3(coef)	1.25799	-0.014442	-0.021463	-0.018035	-0.029884	-0.022483
p1(coef)	-0.00084911	-0.000819223	-0.00024412	0.00050275	0.00035427	-0.00084884
p2(coef)	0.00219471	0.000804557	-0.00090516	0.00036914	0.00036159	0.00091893

점이 포함된 영상에 대해서 카메라위치-기준점위치 간에 형성되는 관측 방위각, 관측 고도각을 계산하였다(Fig. 5). 계산에는 사용된 지상기준점의 좌표(NX, EY, Elevation)와 드론 카메라의 3차원 좌표(x, y, Altitude)가 필요하다. 결과는 다분광 카메라에 대해서만 수행하였으며 따라서 RedEdge-MX의 영상산출물이 제작된 Case 4와 Case 5를 Case 0과 비교하여 오차를 분석하였다.

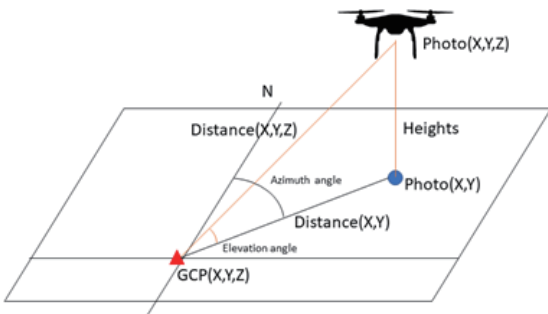


Fig. 5. The sensor-target geometry explained by the azimuth angle and the elevation angle

변들조정은 드론 사진측량 처리 소프트웨어인 Metashape를 이용하여 수행하였다(Agisoft L, 2018). 먼저, 변들조정을 수행하기 전에 렌즈의 왜곡보정을 위한 내부표정요소(Interior orientation)인 카메라의 초점거리(F), 주점좌표(Cx, Cy), 렌즈 왜곡 보정 계수(b1, b2, k1, k2, k3, p1, p2)를 산출하기 위하여 영상과 GCP 23개를 이용한 자체 보정값(Self calibration parameters)을 구하였다(Luhmann *et al.*, 2016) (Table 3). 내부표정요소를 산출한 뒤 영상매칭, 변들조정, 수치표면모델(Digital surface model; DSM), 정사영상을 제작하는 과정을 수행하였다. 대표 케이스인 Case 0의 정사영상과

DSM을 Fig. 6에 나타내었다.

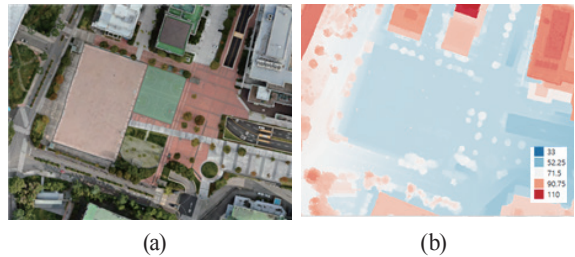


Fig. 6. (a) The orthorectified image and (b) the DSM of the study site

3. 결과

3.1 외부표정요소의 정밀도

각 케이스 별로 변들조정을 통하여 산출된 카메라의 위치 좌표(x, y, altitude)와 회전각(roll, pitch, yaw)의 RMSE(Root Mean Square Error)를 비교하였다(Table 4). 먼저 Zenmuse 카메라로 촬영된 영상의 외부표정요소를 분석하면 Case 1의 경우 x, y, altitude가 각각 약 20 ~ 40cm 이내, IMU의 회전각 정밀도는 roll, pitch, yaw 각각 0.6 ~ 1.3°로 나타났다. Zenmuse에서 촬영된 영상만을 이용하여 변들조정을 수행한 뒤의 결과인 Case 3의 경우 위치정밀도는 x, y, altitude 각각 24cm, 27cm, 10cm로, 회전각은 0.05°, 0.21°, 0.11°로 향상되었다. RedEdge의 영상을 이용한 Case 2의 경우는 x, y, altitude가 각각 약 1.4 ~ 23.1m 이내, IMU의 회전각 정밀도는 roll, pitch, yaw 각각 1.8 ~ 9.3°이내로 나타났다. 변들조정 이후 Case 4에서 위치정밀도는 1.2 ~ 23.1m로 큰 향상이 이루어지지 않았으나, 회전각 정밀도는 0.03 ~ 0.18° 이내로 나타났다.

두 센서의 번들조정 전·후의 외부표정요소를 비교하였을 때, 개선효과는 위치오차 에서보다 회전각 오차 보정에서 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 두 센서에서 촬영된 영상을 함께 이용하여 번들조정을 수행한 Case 5에서는 두 센서에서 촬영된 영상의 위치정밀도는 모두 10cm 이내로 보정됨을 알 수 있고, 회전각도 모두 0.1°이내로 나타났다. 단일 센서의 활용보다 다중 센서에서 촬영된 영상을 이용하면 각각 사용하였을 때 보다 정밀한 위치, 회전각을 얻을 수 있는 것으로 나타난다.

Table 4. The precision of the exterior orientation parameters derived from each Case

Case (unit)	Zenmuse			RedEdge		
	Case 1	Case 3	Case 5	Case 2	Case 4	Case 5
x(m)	0.246	0.236	0.076	1.633	1.241	0.096
y(m)	0.183	0.268	0.064	1.404	1.352	0.092
Altitude(m)	0.214	0.105	0.057	23.07	23.07	0.047
yaw (degree)	1.330	0.047	0.077	9.274	0.033	0.021
pitch (degree)	1.189	0.208	0.084	8.926	0.184	0.047
roll (degree)	0.598	0.114	0.071	1.884	0.133	0.041

앞서, Case 2의 경우에는 3개의 회전각 중에서 yaw와 pitch의 오차가 크게 나타났는데(Table 4), 이는 드론에 다분광 카메라가 설치될 때 카메라 본체와 DLS-2 센서의 설치 위치가 상이하여 발생하는 것으로 보인다. Fig. 7은 Case 0의 yaw, pitch 값을 x축으로, Case 2, 4, 5에서 산출된 yaw, pitch값을 y축으로 하는 산점도 그래프로, 각 케이스별로 상관관계식을 도출하였다. Case 2의 yaw 값은 6.385°의 절편을 가지고 있고(Fig. 7(a)), 에서 pitch 값은 -8.258°의 절편을 가지는 것으로 나타났다(Fig. 7(b)). 이는 DLS-2가 카메라를 기준으로 yaw : 6.385°, pitch : -8.258°만큼 틀어지게 설치된 것으로 추정할 수 있다.

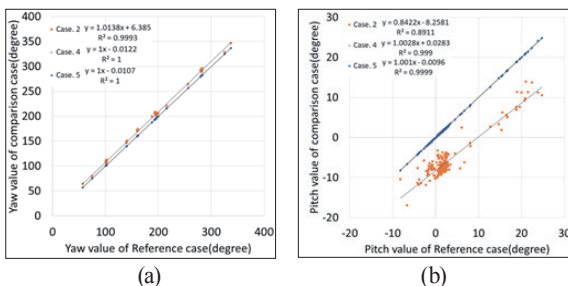


Fig. 7. The scatter plots of (a) yaw angles and (b) pitch angles derived for Case 2, Case 4, and Case 5

3.2 영상 산출물의 위치정밀도 비교

각 Case별로 정사영상과, DSM을 제작하였고, 기준점의 측위 결과를 이용하여 각 산출물의 위치정밀도를 평가하였다(Table 5). 우선, Zenmuse만을 이용해 번들조정한 Case 3, RedEdge만을 이용해 번들조정한 Case 4, 그리고 두 카메라영상을 모두 이용해 산출한 Case 5의 결과를 전반적으로 비교해보면, 수평(x, y), 수직(Elevation) 방향 모두에서 Zenmuse만을 이용하였을 때(Case 3)가 RedEdge만을 이용한 Case 4보다 월등히 오차가 작았다. Case 3의 경우 수평오차 약 25cm 수준, 수직 오차 10cm 수준인 반면, Case 4의 경우 수평오차가 약 2m 수준, 수직오차가 23m 수준으로 나타났다. 두 카메라를 모두 사용한 Case 5의 경우 수평오차는 12cm 수준, 수직오차는 20cm으로 나타났다. 특이할만한 점은 수평오차의 경우, Zenmuse만 사용했을 때보다 오차가 더 작아졌다는 점이다. 수평오차 12cm는 참조값인 Case 0의 2.5cm 보다 5배에 이르는 값이지만, RedEdge만을 이용하는 Case 4의 2m와 비교하면 비약적으로 개선된 것이라 할 수 있다.

Table 5. Positional precision of the generated orthophoto for the three cases tested

Case	Case 0	Case 3 (Zenmuse)	Case 4 (RedEdge)	Case 5 (Zen+RedEdge)
NX(m)	0.015	0.049	1.491	0.055
EY(m)	0.019	0.228	1.237	0.107
Horizontal(m)	0.024	0.234	1.937	0.121
Elevation(m)	0.011	0.104	23.316	0.209
Total(m)	0.027	0.256	23.396	0.242

3.3. 센서의 관측 기하

대상물에서 보는 센서의 방향은 관측 방위각과 관측 고도각으로 표현할 수 있는데, 기준점 8번에 대해 계산된 방위각과 고도각에 대한 산출 정밀도를 Table 6에 나타내었다. RedEdge만을 이용한 Case 4에서 계산된 방위각 오차의 RMSE는 1.33°, 고도각 오차의 RMSE는 0.51°이며, Case 5에서 계산된 방위각과 고도각 오차의 RMSE는 각각 0.08°, 0.04°로 나타났다. Case 4와 비교하였을 때, Case 5에서의 방위각과 고도각의 오차는 각각 약 94%, 92% 감소하였다.

Fig. 8은 기준점과 영상 화소 사이의 수평 거리에 따른 방위각과 고도각의 오차를 나타낸 그래프이다. 우선 방위각(Fig. 8(a))과 고도각(Fig. 8(b))의 경우 모두에서 RedEdge만을 이용한 Case 4의 결과가 Case 5보다 월등히 높은 오차를 가지는 것을 볼 수 있고, 또 그 오차는 기준점과의 위치가 가까운

영상화소일수록 커지는 것을 볼 수 있다. 방위각의 경우, Case 4의 오차는 $\pm 8^\circ$ 에서 수평거리에 따라 서서히 감소하는 반면, Case 5는 거리에 관계없이 일정하게 $\pm 0.1^\circ$ 로 유지되었다. 고도각의 경우도 마찬가지로 Case 4의 결과는 $\pm 1^\circ$ 에서 오차가 형성되다가 거리가 멀어질수록 작아지지만 Case 5결과는 거리에 관계없이 $\pm 0.05^\circ$ 수준에 머물렀다. 또한, 방위각의 경우와 다르게 고도각의 경우 거리가 멀어질수록 0에 수렴하는 것이 아니라 -0.5° 인근으로 수렴하는데 이는 다분광 카메라의 설치 시 발생한 설치각 오차에 의한 편의로 보인다.

Table 6. Estimation errors of the azimuth and the elevation angles for Case 4 and Case 5

Case	Case 4		Case 5	
	Azimuth angle	Elevation angle	Azimuth angle	Elevation angle
Degree	1.335	0.505	0.084	0.041

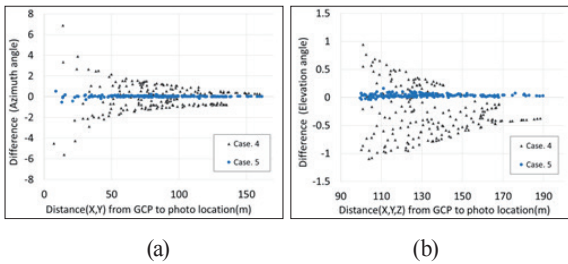


Fig. 8. The scatter plots of errors for the varying distance between the ground location and the camera; (a) azimuth angles, and (b) elevation angles

5. 요약 및 결론

본 연구는 지상기준점 설치 없이 번들조정만으로 영상화소 위치를 도출할 때, 위치 및 자세정보, 그리고 화소해상도가 다소 낮은 다분광 카메라와 더불어 고해상도 RGB카메라를 함께 사용함으로써 위치정밀도가 얼마나 개선되는지에 대한 분석을 수행하였다. 번들조정으로 조정된 카메라의 외부표정 요소는 Zenmuse와 RedEdge 모두 각각의 카메라 영상만을 사용하는 것보다 두 카메라 영상을 융합하여 사용하는 경우가 오차가 더 작게 나타났고, 개선효과는 RedEdge 카메라의 경우에 더 컸다. 구체적으로는 Zenmuse의 경우 위치요소의 오차가 20cm 수준, RedEdge는 수m ~ 수십m였던 것이, 융합 활용 후에는 10cm 미만으로 줄었다. 자세오차는 Zenmuse, RedEdge 모두 최대 0.2° 수준이었으나 융합 후 0.1° 미만으로

감소하였다. 특이할만한 점은 첫째, 독자적으로도 결과가 좋았던 Zenmuse에 융합되는 RedEdge는 오차가 컸던 영상임에도 불구하고 융합 후에는 기존의 Zenmuse독자 결과보다 오차가 더 개선되었다는 점이다. 두 번째 주목할 만한 점은 융합 후의 자세오차는 RedEdge가 Zenmuse의 절반수준으로 더 작았다는 점이다.

영상화소의 위치추정 오차에 대해서도 유사하게 Zenmuse 단독사용시보다 융합 사용시에 결과적으로 더 작은 오차를 가지게 됨을 보여주었지만 (수평 12cm, 수직 25cm 수준), 수평위치 측면에서 이는 Zenmuse 단독사용 시의 20cm 수준보다는 개선되었지만, 수직위치 측면에서는 Zenmuse 단독사용 시 10 cm 수준이었던 것을 감안하면 다소 오차가 높아진 결과를 나타내었다. 이는 RedEdge 단독사용 시의 수직오차가 과도하게 컸던(23m)것에 기인한 것으로 보이며, 이러한 과도한 수직오차는 RedEdge에 사용되는 GPS장비가 미국의 GPS위성신호만을 수신할 수 있어 낮은 정밀도를 보이고 촬영시점마다 달라지는 가용위성의 개수 및 배치 때문인 것으로 추정된다. 마지막으로 관측방향각 산출 정밀도 역시 방위각은 1.5° 수준에서 0.1° 수준으로, 고도각은 0.5° 수준에서 0.05° 수준으로 비약적으로 개선된 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 지상기준점 설치 없이 드론 영상을 통한 공간정보 생산 시 그 위치정밀도에 대한 대략적인 오차범위를 제공하여주고, 또한 저해상도 카메라를 사용할 시, 고해상도 카메라와의 융합 활용이 위치 및 방향각 산출에 비약적인 개선을 이룰 수 있음을 보여주었다. 지상기준점 설치가 힘든 벽오지 및 접근불가 지역에서의 드론 활용 측량 또는 긴급 촬영에 기여할 것으로 보인다. 관측방향각에 대한 오차도출은 피사체의 방향성 반사도 관측 즉 BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function) 분석이나 3차원 모델 구축시에 정확성에 대한 함의를 가진다고 할 수 있다. 다만, 본 연구에서 도출된 오차 및 개선도는 평지를 대상으로 이루어졌기 때문에 기복이 심한 지형의 경우는 오차 수준이 본 연구에서 도출된 결과와 상이할 수 있으며, 개선도 역시 다를 수 있다. 또한, 화소해상도, 위치, 자세 정보가 다소 부족한 영상을 추가 활용함에도 불구하고 융합 후에 고해상도 영상 단독 활용 시 보다 오차가 더 줄어드는 것에 대한 보다 구체적인 분석은 번들조정의 과정을 구체적으로 분석함으로써 추가적으로 연구해야만 하는 향후 과제로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구과

발사업 (FTIS2020179A00-2022-BB01)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Agisoft, L. (2018), *Agisoft PhotoScan user manual: professional edition*. Manual 1.4, Agisoft LLC., St Petersburg, Russia
- Assmann, J.J., Kerby, J.T., Cunliffe, A.M., and Myers-Smith, I.H. (2019), Vegetation monitoring using multispectral sensors—Best practices and lessons learned from high latitudes. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. Vol. 7, No. 1, pp. 54–75.
- Baek, J.Y., Jo, Y.H., Kim, W., Lee, J.S., Jung, D., Kim, D.W., and Nam, J. (2019), A New Algorithm to Estimate Chlorophyll-A Concentrations in Turbid Yellow Sea Water Using a Multispectral Sensor in a Low-Altitude Remote Sensing System. *Remote Sensing*, Vol. 11, No. 19, pp. 2257.
- Chakhvashvili, E., Siegmann, B., Bendig, J., and Rascher, U. (2021), Comparison of Reflectance Calibration Workflows for a UAV-Mounted Multi-Camera Array System, *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 12-16 July, Brussels, Belgium, pp. 8225–8228.
- Chen, P.C., Chiang, Y.C., and Weng, P.Y. (2020), Imaging using unmanned aerial vehicles for agriculture land use classification. *Agriculture*, Vol.10, No. 9, pp. 416.
- Dash, J.P., Pearse, G., Watt, M., 2018. UAV Multispectral Imagery Can Complement Satellite Data for Monitoring Forest Health. *Remote Sensing*, Vol. 10, No. 8, pp. 1216.
- Dash, J.P., Watt, M.S., Pearse, G.D., Heaphy, M., and Dungey, H.S. (2017), Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 131, pp. 1–14.
- de Oca, A.M., Arreola, L., Flores, A., Sanchez, J., and Flores, G. (2018), Low-cost multispectral imaging system for crop monitoring, *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), IEEE*, 12-15 Jun, Dallas, TX, USA, pp. 443–451.
- Kim, W., Jung, S., Kim, K., Ryu, J.H., and Moon, Y. (2020), Mapping Red Tide Intensity Using Multispectral Camera on Unmanned Aerial Vehicle: A Case Study in Korean South Coast, *2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS)*, 26 September-2 October, Waikoloa, HI, USA, pp. 5612–5615.
- Luhmann, T., Fraser, C., and Maas, H.G. (2016), Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 115, pp. 37–46.
- Lum, C., Mackenzie, M., Shaw-Feather, C., Luker, E., and Dunbabin, M. (2016), Multispectral Imaging and Elevation Mapping from an Unmanned Aerial System for Precision Agriculture Applications, *Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture*, 31 Jul – 03 Aug, St. Louis, Missouri, USA, pp. 4-10
- Shin, D., Kim, D., Kim, S., Han, Y., and Nho, H. (2020), A Study on the Use of Drones for Disaster Damage Investigation in Mountainous Terrain. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 5_4, pp. 1209–1220. (in Korean with English abstract)
- Su, J., Liu, C., Coombes, M., Hu, X., Wang, C., Xu, X., Li, Q., Guo, L., and Chen, W.H. (2018), Wheat yellow rust monitoring by learning from multispectral UAV aerial imagery. *Computers and Electronics in Agriculture* Vol. 155, pp. 157–166.
- Tomaščík, 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, No.6, pp. 721.