

저가형 UAV 사진측량의 정밀도 및 정확도 분석 실험에 관한 연구

An Experimental Study on Assessing Precision and Accuracy of Low-cost UAV-based Photogrammetry

윤성현¹⁾ · 이흥규²⁾ · 최웅규³⁾ · 정우철⁴⁾ · 조연정⁵⁾

Yun, Seonghyeon · Lee, Hungkyu · Choi, Woonggyu · Jeong, Woochul · Jo, Eonjeong

Abstract

This research has been focused on accessing precision and accuracy of UAV (Unmanned Aerial Vehicle)-derived 3-D surveying coordinates. To this end, a highly precise and accurate testing control network had been established by GNSS (Global Navigation Satellite Systems) campaign and its network adjustment. The coordinates of the ground control points and the check points were estimated within 1cm accuracy for 95% of the confidence level. FC330 camera mounted on DJI Phantom 4 repeatedly took aerial photos of an experimental area seven times, and then processed them by two widely used software packages. To evaluate the precision and accuracy of the aerial surveys, 3-D coordinates of the ten check points which automatically extracted by software were compared with GNSS solutions. For the 95% confidence level, the standard deviation of two software's result is within 1cm, 2cm, and 4cm for the north-south, east-west, and height direction, and RMSE (Root Mean Square Error) is within 9cm and 8cm for the horizontal, vertical component, respectively. The interest is that the standard deviation is much smaller than RMSE. The F-ratio test was performed to confirm the statistical difference between the two software processing results. For the standard deviation and RMSE of most positional components, exception of RMSE of the height, the null hypothesis of the one-tailed tests was rejected. It indicates that the result of UAV photogrammetry can be different statistically based on the processing software.

Keywords : UAV, Photogrammetry, Precision, Accuracy, Hypothesis Test

초 록

저가형 UAV기반 사진측량의 정밀도와 정확도를 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 높은 정확도의 지상기준점과 검사점의 3차원 좌표를 추정하고자 GNSS정지관측과 기선해석, 망조정을 수행하였고, 신뢰수준 95%에 대하여 정확도가 1cm 이내인 좌표를 확보하였다. 실험 대상지에 대한 항공 사진은 DJI Phantom 4와 이에 탑재된 FC330 카메라로 7회 반복 촬영하였고, 이를 두 가지 소프트웨어로 처리하였다. 10개 검사점에 대한 소프트웨어 자동 추출 좌표와 GNSS 추정해를 비교하여 표준편차 및 RMSE를 분석하였다. 두 소프트웨어 처리 결과, 95% 신뢰수준에 대해 표준편차는 남북, 동서, 높이 방향 각각 약 1cm, 2cm, 4cm 이내, RMSE는 수평과 높이 각각 9cm, 8cm 이내였으며, 표준편차가 RMSE에 비해 현저히 작았다. 두 소프트웨어 처리 결과의 통계적 차이를 확인하고자 F-ratio 검정을 수행하였다. 정밀도에 대해서는 모든 좌표 성분에 대해 한쪽꼬리 검정의 귀무가설이 기각되었고, RMSE에 대해서는 수평에 대한 것만 기각되었다. 이에 따라, 동일한 사진 자료를 처리하더라도 소프트웨어에 따라 그 결과에 통계적 차이가 있을 수 있음에 유의할 필요가 있다.

핵심어 : UAV, 사진측량, 정밀도, 정확도, 가설검정

Received 2022. 06. 07, Revised 2022. 06. 13 Accepted 2022. 06. 15

1) Member, Dept. of Eco-friendly Offshore Plant FEED Engineering, Changwon National University (E-mail: shyun92@changwon.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil Engineering, Changwon National University (E-mail: hykulee@changwon.ac.kr)

3) Dept. of Global Smart City, Sungkyunkwan University (E-mail: toco717@gmail.com)

4) Dept. of Civil Engineering, Changwon National University (E-mail: jeongpro@mgitcorp.com)

5) Dept. of Civil Engineering, Changwon National University (E-mail: jopol2007@naver.com)

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

저가형 UAV는 비용적 부담이 적고 여러 종류의 센서로 넓은 지역에 대한 공간정보를 신속하게 취득할 수 있으며, 사람의 접근이 어려운 지역에 대한 데이터 취득이 용이하기 때문에 다양한 분야에서 활용 및 관련 연구가 지속적으로 증가하고 있다(KARI, 2018; MOLIT, 2021). UAV 활용 예로는 홍수, 폭우 등에 의한 풍수해와 산불과 같은 재난 모니터링 및 실태 조사(Kim *et al.*, 2010; Park and Park, 2015; Shin *et al.*, 2017), 환경오염 감시(Park *et al.*, 2019), 다양한 센서를 활용한 토지 피복 분류 및 각종 주제도 제작, 열환경 특징 분석(Yang and Lee, 2018; Choi, 2015; Kim *et al.*, 2022), 군사 작전에서 활용(Kim, 2010; Kim *et al.*, 2015), 지적 분야에서 필지 경계 구분(Park *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2018), 배달 서비스(Thwa *et al.*, 2020) 등이 있다. 앞서 언급한 UAV 특징을 고려할 때, UAV 기반 항공사진측량은 댐, 토사 사면, 제방 등 토목 구조물 모니터링에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해서는 해당 기술에 의한 결과의 정밀도, 정확도를 파악할 필요가 있으며, 이와 관련하여 국내외 다수의 연구가 수행된 바 있다.

Park *et al.* (2016)은 저가형 UAV 항공사진측량 결과로부터 차선을 포함한 도로의 위치정보를 추출하고 이에 대한 정확도를 분석하여, 도로 영역에 대한 정밀 지도 제작과 갱신에 UAV 사진측량이 효과적이라 하였다. Kim *et al.* (2021)도 유사한 연구를 수행하여 공원 부지에 대한 지형 현황도를 제작하고, 그 정확도를 평가하여 공원 조성 계획에 해당 기술의 활용 가능성을 주장하였다. Choi and Lee (2016), Udin and Ahmad (2014), Stocker *et al.* (2019), Przbilla *et al.* (2019)는 UAV 기체와 카메라 센서 종류, 비행고도, 지상기준점(GCP: Ground Control Point) 수, 중복도, 단순 촬영과 2회 교차 촬영, 내부 표정 입력 여부, 처리 소프트웨어 등 조건에 따른 UAV 사진측량 정확도를 분석하였다. 이들은 비행고도가 낮을수록, 중복도는 높을수록, GCP의 수는 많을수록 RMSE가 작으며, 특히, GCP가 적을수록 중복도의 영향이 크게 나타남을 보였다. 또한, 카메라의 기계적 안정성(mechanical stability)이 우수하고 2회 교차 비행을 수행했을 때 정확도가 더 높다는 사실을 밝혔다. 내부표정요소 입력은 비교적 불안정한 카메라로 취득한 사진 처리 결과의 정확도 향상에 도움이 되었으나, 안정적인 카메라 활용 결과에는 큰 영향을 미치지 않는다는 결론을 도출하였으며, 소프트웨어에 따라 사진측량 정확도에 차이가 있음을 보였다. Martinez-Carricondo *et al.* (2018)은 UAV 사진측량에 활용하는 GCP 배치와 개수에 대하여 각각 5가지, 12가지 시나리오를 설정해 실험을 수행하고, 서로 다른 조건

에 대한 점군(point clouds) 자료의 점간 거리와 RMSE를 비교하였다. 각 점군 자료의 점간 거리는 GCP가 위치한 지점에서 가장 작고, 이로부터 멀어질수록 커졌다. GCP를 가장자리에 배치했을 때 수평 정확도가 가장 높으며, 높이 정확도를 고려해 실험 대상지 중앙에 GCP를 추가하는 것이 바람직하고, GCP 개수는 1ha 당 0.5 ~ 1개를 배치하는 것을 제안하였다. Ferrer-Gonzalez *et al.* (2020)은 폭에 비해 길이 방향이 긴 도로를 실험 대상으로 선정하여 Martinez-Carricondo *et al.* (2018)과 유사한 실험을 수행하였다. GCP 배치 4가지, GCP 개수는 배치에 따라 3 ~ 4가지 시나리오를 구성해 각 조건에 대한 사진측량을 실시하고 그 결과를 RMSE에 대하여 비교하였다. GCP 개수는 많을수록 정확도 증가에 도움이 되며, 도로 양쪽 끝에 GCP를 배치하고 내부에는 지그재그 혹은 도로 양옆에 쌍을 이루도록 배치할 때 가장 높은 정확도로 공간 정보 구축이 가능함을 보였다.

구조물 모니터링에 UAV 기반 사진측량 적용 가능성을 검토하기 위해서는 정확도뿐만 아니라 정밀도를 살펴볼 필요가 있으나 기존의 연구들은 사진측량 결과를 RMSE 측면에서만 분석하였고, 각기 다른 조건에 대한 RMSE를 수치의 대소만으로 비교하였다. 이와 더불어 기존 연구 대부분은 RTK (Real-Time Kinematic) 측량으로 지상기준점과 검사점(check point)의 3차원 좌표를 결정해 측점 사이 상대 정확도가 균질하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 구조물 모니터링에 UAV 사진측량 적용 가능성을 살펴보기 위해 우선 사진측량의 외부표정과 결과 분석에 활용하는 측점의 신뢰적인 3차원 좌표를 추정하고, 이들 사이 상대정확도를 균질하게 하기 위해 GNSS 정지측량과 기선해석, 망조정을 수행하였다. 이후 DJI Phantom 4로 동일한 조건에 대한 7회 반복 촬영을 수행하였고, 이미지 지리 결과를 RMSE뿐만 아니라 표준편차에 대해서도 평가하였다. 또한, 각기 다른 소프트웨어 처리 결과에 대한 통계적 차이 여부를 판단하기 위해 가설검정을 적용하였다.

본 논문은 총 4개 장으로 구성되며, 2장에서는 연구 대상지와 그 선정 이유, 지상기준점 및 검사점 성과 산정, UAV 사진측량 및 결과 분석 방법을 소개한다. 3장에서는 GNSS 측량에 의한 지상기준점 및 검사점 성과, UAV 사진측량의 표준편차와 RMSE 비교 및 분석 결과를 언급하고, 마지막 장에서는 본 실험 결과를 토대로 도출한 결론을 제시한다.

2. 연구 방법

저가형 UAV 사진측량의 정밀도와 정확도를 분석하기 위한

본 연구의 실험 대상지로 경상남도 ○○시의 공원을 선정하였고, 이에 대한 전경을 지상기준점과 검사점의 개략적인 배치와 함께 Fig. 1에 나타내었다. 해당 지역 선정 이유는 대상지 중심부가 대부분 잔디로 피복되어 있고, 외곽은 수목이 자리하고 있어 태양 고도에 따른 빛 반사가 촬영 이미지에 미치는 영향이 적기 때문이다. 또한, 실험 대상지 면적이 약 38,000m² 이고 수목과 인공구조물이 실험 대상지 가장자리에 위치하기 때문에 UAV 운용과 GNSS 관측, 지상기준점 및 검사점의 균질한 배치가 용이한 지역이라 판단하였다.

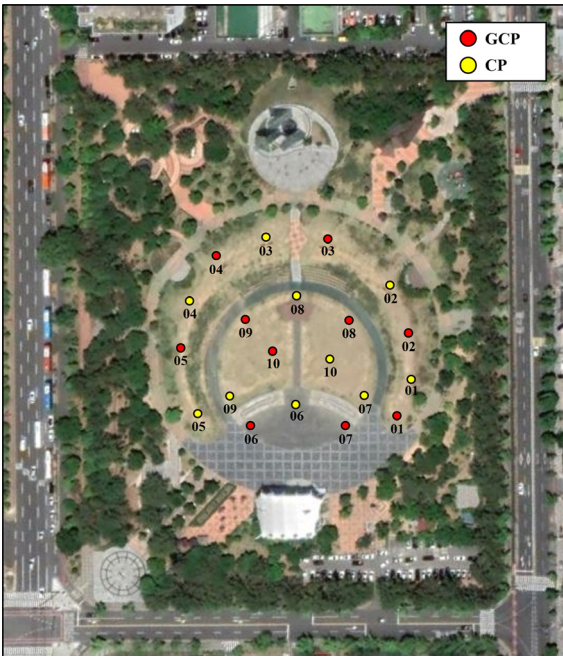


Fig. 1. Experimental area and layout of GCPs and check points

본 연구는 데이터 취득과 처리, 그리고 결과 분석의 세 단계로 수행되었으며, 이 절차 Fig. 2에 나타내었다. 많은 UAV 사진측량 관련 연구에서 지상기준점 및 검사점의 3차원 좌표를 GNSS-RTK 방식으로 결정하였으나, 이는 측점 사이 오차 분배를 수행하지 않아 상대정확도가 불균질하며, 미지정수 결정을 위한 통계검정의 불완전성에 의해 추정 좌표의 정확도가 낮을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 1에서 확인할 수 있는 바와 같이 지상기준점과 검사점 각 10점의 3차원 좌표는 GNSS 정지 관측방식 측량한 후 기선해석과 3차원 벡터 망 조정 절차에 의해 상대정확도가 1cm 이내의 균질한 20개 측점의 좌표를 추정하였다.

실험 대상지의 항공사진은 저가형 UAV인 DJI Phantom 4로 취득하였으며 사진측량의 정밀도를 분석하기 위해 동일한 비행 조건으로 7회 반복 촬영하였다. 이들 사진 자료를 두 가지 소프트웨어로 처리하고 3차원 공간정보, 정사사진(orthophoto), DSM (Digital Surface Model)을 생성하였다. 실험에 활용한 두 사진측량 소프트웨어는 사진 자료를 처리하여 3차원 모델, 정사사진, DSM을 생성할 뿐만 아니라, 검사점에 대해 입력 좌표(GNSS 추정해)와 사진측량을 통해 결정된 좌표의 차이를 계산해 사용자에게 제공한다. 이를 이용하여 사진측량의 정밀도, 정확도를 나타낼 수 있는 표준편차와 RMSE를 계산하였다. 이들 통계값 계산에는 검사점 10개의 7개 세션에 대한 좌표 차이 모두를 활용하였으며, RMSE는 GNSS 성과를 참값으로 간주하여 계산하였다(Federal Geographic Data Committee, 1998; Martinez-Carricondo *et al.*, 2018). 본문에서 이들 계산 결과는 신뢰수준 95%로 표현하였고, 이를 위해 1차원 좌표 성분에 대해서는 1.96, 2차원(수평)에 대한 것은 2.45를 곱하여 나타냈다(Ghilani and Wolf, 2006).

두 소프트웨어 처리 결과에 대한 표준편차와 RMSE의 차이가 통계적으로 유의미한지 확인하고자 가설검정을 수행하였으며, 두 표본에 대한 비교를 위해 F-ratio 검정을 적용하였다(ISO, 2015; Ghilani and Wolf, 2006). 먼저 Eq. (1)에 의해 유의수준 5%에 대한 양쪽꼬리 검정을 수행하여 두 소프트웨어의 결과가 통계적으로 동일한지 판단하였고, 양쪽꼬리 검정의 귀무가설이 기각되는 경우에는 Eq. (2)를 적용해 동일한 유의수준으로 한쪽꼬리 검정을 수행하였다. Eqs. (1) and (2)는 표준편차에 대해 표현한 것으로, 두 표본의 정확도에 대한 가설검정에는 표준편차 대신 RMSE를 대입하였다.

$$H_0 : \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = 1 \quad (\sigma_1^2 = \sigma_2^2) \tag{1}$$

$$H_a : \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \neq 1 \quad (\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2)$$

$$H_0 : \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \leq 1 \quad (\sigma_1^2 \leq \sigma_2^2) \tag{2}$$

$$H_a : \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} > 1 \quad (\sigma_1^2 > \sigma_2^2)$$

where, H_0 represents the null hypothesis and H_a is the alternative hypothesis, σ_1^2 and σ_2^2 indicate the standard deviation for the results of SW-1 and SW-2, respectively.

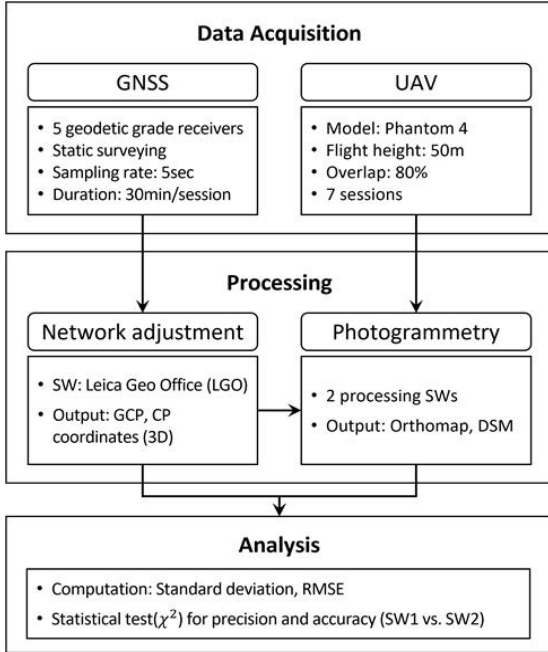


Fig. 2. Experimental procedure

3. 항공 촬영 실험 및 분석

3.1 지상기준점 및 검사점 설치

외부표정과 사진측량 정밀도 및 정확도 계산을 위해 실험 대상지에 고루 배치한 20개 측점에서의 GNSS 관측은 Table 1에 나타난 바와 같이 수행하였다. 측지등급 수신기와 안테나 5대를 사용하였고, 절사각을 5°로 설정하여 세션별 5초 간격으로 30분 동안 위성 신호를 저장하였다. Fig. 3은 GCP 06에서 Alpha 수신기로 정지측량을 수행하고 있는 장면을 예시로 나타낸 것이다.

Table 1. GNSS surveying equipments and settings

Equipment & settings	Details
Receiver (Antenna)	Sokkia GSR2600 (SOK702), GSR2700 (SOK GR2700IS), GRX1 (SOKGRX1) Javad Alpha 1 & 2 (JAV_GRANT-G3T)
Constellation	GPS (Global Positioning System)
Sampling interval	5 seconds
Observation period	30 minute per session
Mask elevation	5 degrees
Dynamics	Static



Fig. 3. Example of GNSS surveying with the Alpha receiver

GNSS 관측데이터는 Leica의 기선해석 및 망조정 소프트웨어 LGO (Leica Geo Office) 버전 8.4로 처리하였다. 기선 해석을 수행하고 폐합차를 점검해 과대오차를 우선 제거하였고, 1개 측점을 고정된 최소제약조정을 통해 폐합차 점검에서 발견하지 못한 과대오차를 추가로 규명 및 소거하였다. 이후 3점을 고정된 다점제약조정을 수행해 실험 대상지에 설치한 측점들의 3차원 좌표를 최종 결정하였다(Ghilani and Wolf, 2006). 이때, Table 1에서 나타난 바와 같이 실험에 활용한 GNSS 안테나 종류가 각기 달라 기선해석 수행 전, 각 안테나에 대한 PCV (Phase Center Variation) 모델을 정확히 입력하여, 균질한 정확도의 높이 성과를 산출하고자 하였다(Yun and Lee, 2020).

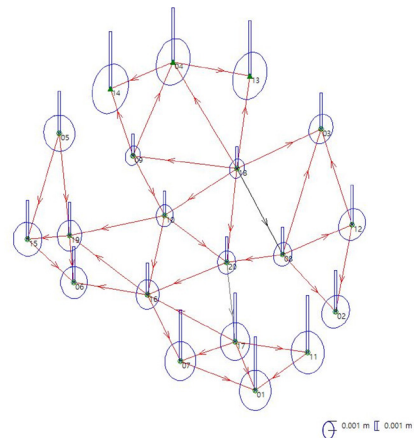


Fig. 4. Error ellipse and bar of GCPs, check points

망 조정에 포함된 기선의 수는 40개이며, 20개 미지점 중 3 점을 고정하여, 최종 자유도는 69이다. 사후분산인자는 1.31

로 사전분산인자와 사후분산인자에 대한 F비 검정을 통과 하였다. 이를 통해 과대오차 규명과 소거, 오차의 분배가 적절히 이루어졌음을 파악할 수 있다. Fig. 4는 망조정 과정에서 계산하는 각 측점의 절대 오차타원과 막대를 망도와 함께 나타낸 것이다. 절대 오차타원과 막대는 각각 수평과 높이 좌표의 추정 정확도를 나타내는 값으로(Ghilani and Wolf, 2006), 이에 대한 평균을 Table 2에 정리하였다. 신뢰수준 95%에 대해 오차타원 장축과 단축의 길이는 각각 0.419cm, 0.328cm, 오차 막대 크기는 0.796cm로, 이는 망조정을 통해 추정된 측점의 3차원 좌표가 1cm 이내의 정확도로 결정되었음을 보여준다.

Table 2. Average of magnitude of error ellipse and bar (σ_{95})

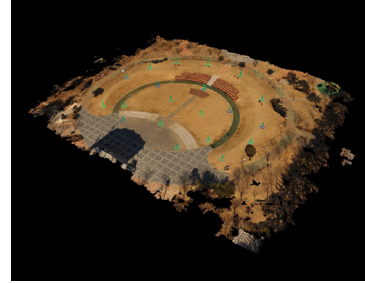
Error ellipse			Error bar (cm)
Major-axis (cm)	Minor-axis (cm)	Rotation angle (°)	
0.419	0.328	5.76	0.796

3.2 항공사진 촬영 및 처리

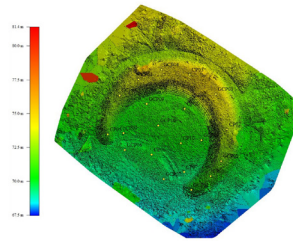
실험 대상지에 대한 항공사진 촬영은 저가형 회전익 UAV 인 DJI Phantom 4와 이에 부착된 카메라 FC330 모델로 수행하였으며, 카메라 초점거리는 3.61mm, 이미지 해상도는 12MP (4,000 X 3,000)이다. UAV 비행 계획 및 사진 촬영에는 모바일폰 애플리케이션 Pix4Dcapture를 활용하였다. 애플리케이션 상에서 비행 속도는 최대, 중복도는 종·횡방향 모두 80%, 비행고도는 50m로 설정하였고, 이에 따라 이론적인 GSD는 2.16cm/px이다(Peng *et al.*, 2019). 7회 반복 비행 및 촬영으로 취득한 사진 매수는 평균 131장이었다.

취득한 항공사진은 2가지 상용 소프트웨어(즉, SW-1 & SW-2)로 처리하였으며, 이때, 처리 설정값은 소프트웨어에서 제공하는 기본값으로 하였다. 이들 프로그램은 영상정합, 항공삼각측량에 의한 외부표정요소 결정과 점군 자료 생성, 정사사진과 DSM 등과 같은 사용자가 요구하는 공간자료를 생성한다(Lee *et al.*, 2018). Fig. 5는 본 연구에서 SW-1으로 제작한 3차원 공간객체 모델, 정사사진, DSM의 예시를 나타낸 것이다.

7회 반복 촬영을 통해 취득한 영상을 각 소프트웨어로 처리한 후 출력한 보고서에서 제공하는 GSD를 평균한 결과 SW-1과 SW-2 각각 1.93cm/px, 2.17mm/px이다. 동일한 사진 자료를 처리하였으나, 이처럼 소프트웨어에 따라 GSD에 차이가 있는 이유는 각 소프트웨어의 데이터 처리 알고리즘 등이 다르기 때문으로 보인다(Stocker *et al.*, 2019).



(a) 3 dimensional model



(b) DSM



(c) Orthophoto

Fig. 5. Some results of the UAV image processing in this study

Fig. 6은 7회 촬영 사진을 SW-1과 SW-2로 각각 처리한 후 소프트웨어가 자동 추출한 10개 검사점 좌표와 GNSS 추정의 차이를 추출해 도시한 것이다. 각 소프트웨어의 결과에서 동일 측점에 대한 7개 세션 좌표 차이가 유사한 크기와 부호를 갖는 반면, 동일한 측점이라 하더라도 소프트웨어에 따라 좌표 차이의 크기와 부호가 확연히 다른 것을 확인할 수 있다. 이처럼 동일한 사진 자료를 처리하였음에도 불구하고 처리 소프트웨어에 따라 결과에 차이가 있는 것은 다른 연구 결과에서도 발견된 바 있으며(Przbilla *et al.*, 2019; Stocker *et al.*, 2019), 그 원인은 앞서 살펴본 평균 GSD 차이의 영향으로 보인다.

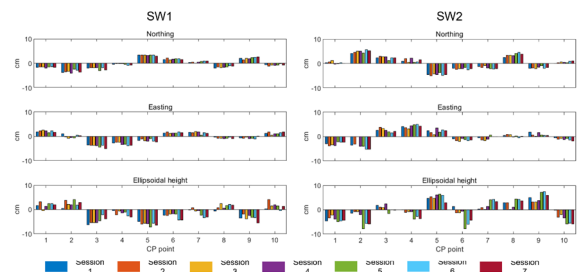


Fig. 6. Differences of UAV photogrammetry and GNSS solutions from each SW

Fig. 7은 두 소프트웨어 처리 결과의 표준편차를 각 좌표성분에 대해 신뢰수준 95%로 나타낸 것으로, 남북(northing), 동서(easting), 높이(height) 방향에 대해 각각 약 0.67cm ~ 0.93cm, 0.88cm ~ 1.54cm, 2.22 ~ 3.62cm 이다. SW-1 결과가 SW-2의 그것에 비해 높은 정밀도를 보이며, 특히, 높이 방향에서의 차이가 다른 좌표 성분에 비해 크다. 이들 표준편차 차이가 통계적으로 유의미한지 분석하고자 F-ratio 검정하고 그 결과를 Table 3에 정리하였다. 이때, 두 표본의 자유도는 각 좌표 성분 모두 69이다. 각 좌표 성분에 대한 F비값과 양쪽꼬리 검정의 임계값을 비교한 결과 세 좌표 성분 모두 귀무가설이 기각되어, 두 소프트웨어 처리 결과의 정밀도가 통계적으로 같지 않음을 보인다. 이에 따라 한쪽꼬리 검정을 추가로 수행하였으며, F비값과 임계값을 비교했을 때, 한쪽꼬리 검정의 귀무가설도 세 좌표 성분 모두에서 기각된다. Eq. (2)에서 설정한 바에 따라 SW-2 처리 결과의 정밀도가 SW-1의 그것에 비해 통계적으로 같거나 우수하다고 말할 수 없다. 이것은 SW-1으로 처리한 결과가 SW-2에 의한 것보다 통계적으로 더 정밀하다는 것을 의미한다. UAV 사진측량 표준편차 분석 결과에 따르면, 수평 방향 각 좌표 성분에 대해서는 1 ~ 1.5cm, 높이 방향은 약 4cm 이하의 정밀도를 확보할 수 있음을 확인하였으나, 처리 소프트웨어에 따라 결과의 정밀도 다를 수 있음에 유의가 필요하다.

Fig. 8은 두 소프트웨어로 처리한 결과의 RMSE를 신뢰수준 95%에 대해 나타낸 것으로 수평과 높이성분 각각 7 ~ 9cm, 약 6 ~ 8cm로 계산되었으며, 이는 다른 연구자들의 결과와 유

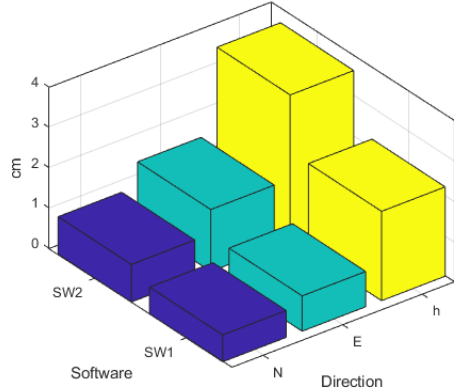


Fig. 7. Standard deviations of two SWs (σ_{95})

사한 수준이다(Deliry and Avdan, 2021). 절대적인 수치만 고려했을 때, RMSE는 SW-1에 대한 것이 SW-2의 그것보다 작다. 이러한 차이를 통계적으로 비교하기 위해 가설검정을 수행하고 그 결과를 Table 4에 요약하였다. 이때, 두 표본의 자유도를 수평 성분은 140, 높이에 대해서는 70으로 설정하여 임계값을 결정하였다. 우선 양쪽꼬리 검정을 수행하였을 때, 수평 방향 검정값은 임계값을 초과하여 귀무가설이 기각되었으나, 높이 방향의 결과에서는 귀무가설이 기각되지 않았다. 이에 따라 수평 방향에 대해서만 한쪽꼬리 검정을 다시 수행하였고, 귀무가설이 기각되었다. RMSE에 대한 가설검정 결과에 따르면, 높이 방향에 대해서는 두 소프트웨어 처리 결과가 통계적으로 다르지 않았으나, 수평 방향에서는 SW-2의 결

Table 3. Standard deviations(σ_{95}) and results of hypothesis test

Direction	Standard Deviation (cm)		Test statistics	Two-tailed			One-tailed	
	SW-1	SW-2		Criteria		Test Results	Criteria	Test Results
				Lower	Upper			
N	0.666	0.932	1.956	0.621	1.609	1.490	Reject	
E	0.876	1.536	3.071				Reject	
h	2.216	3.621	2.670				Reject	

Table 4. Results of accuracy assessment with hypothesis tests

Direction	RMSE (cm)		Test statistics	Two-tailed			One-tailed	
	SW-1	SW-2		Criteria		Test Results	Criteria	Test Results
				Lower	Upper			
Horizontal	6.987	9.051	1.678	0.717	1.395	Reject	1.322	Reject
Vertical	6.374	7.631	1.433	0.624	1.604	Pass	-	-

과가 SW-1의 그것보다 정확도가 불량한 것으로 판명되었다. RMSE를 분석한 결과에서도 소프트웨어에 의한 통계적 차이를 확인할 수 있으므로, UAV 사진측량 시 소프트웨어 선정에 유의해야 할 것이다.

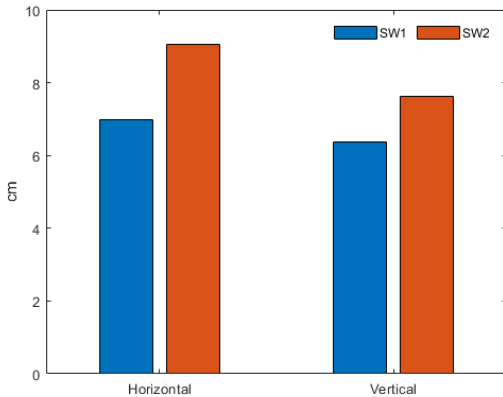


Fig. 8. RMSEs of two SWs (σ_{95})

4. 요약 및 결론

토목 구조물 모니터링에 저가형 UAV 기반 사진측량 적용 가능성을 검토하기 위해 DJI Phantom 4와 이에 탑재된 FC330 카메라를 활용해 항공사진을 동일한 조건으로 7회 반복 촬영하였고, 이를 두 가지 소프트웨어로 처리하였다. 그 결과를 표준편차와 RMSE에 대해 분석하여 다음의 결론을 도출하였다.

첫째, 저가형 UAV 기반 사진측량 정밀도와 정확도를 기존의 연구 사례들 보다 엄격히 평가하고자 GNSS 정지측량으로 위성 신호를 수신하고 이에 대한 기선해석과 망조정을 수행하였다. 그 결과 20개 측정점의 수평과 높이 좌표에 대한 평균 정확도가 1cm 이내인 신뢰적인 성과를 추정하였고, 이를 영상 처리와 그 결과 분석에 활용하였다.

둘째, 두 가지 상용 소프트웨어로 드론 항공 촬영 사진을 각각 처리한 결과, 정밀도는 95% 신뢰수준에 대해 남북, 동서, 높이 방향 각각 약 1cm, 2cm, 4cm 이내, 정확도는 수평과 높이 성분 각각 신뢰수준 95%에 대해 약 7~9cm, 약 6~8cm로 계산되었다. 본 연구 결과에서 주목할 점은 표준편차가 RMSE에 비해 현저히 낮다는 것이다. 이에 따라, 콘크리트 덩의 제체, 식생이 자라지 않은 연약지반, 토사 사면, 계방 등 변위가 점진적으로 발생하는 토목 구조물의 모니터링에 저가형 UAV 사진측량 기술을 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

마지막으로, 두 소프트웨어 처리 결과에 대한 표준편차와

RMSE 차이가 통계적으로 유의한 수준인지 검토하기 위해 F-ratio 가설검정을 수행하였고, 그 결과 표준편차는 세 좌표 성분 모두에서 통계적인 차이가 있었다. RMSE는 수평 방향에 대해서는 소프트웨어에 따른 통계적 차이를 발견할 수 있었으나 높이에 대해서는 통계적으로 다르지 않았다. 가설검정을 통해 소프트웨어에 따라 사진측량의 표준편차와 RMSE에 통계적으로 유의미한 차이가 있을 수 있음을 확인하였으므로, 영상처리 결과 분석 및 활용 시 이러한 사실에 유의할 필요가 있을 것이다.

본 연구 결과는 특정 조건 및 설정 아래서 도출된 것으로 UAV 기체와 카메라 센서, 비행고도, 중복도, 처리 소프트웨어 등에 따라 결과가 달라질 수 있음에 주의할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 일부 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(NTIS 과제고유번호: 1345341781, NRF 과제관리번호: 2021RIS-003)

References

- Choi, J. (2015), Thematic map generation by using multispectral imagery based on UAV, *Journal of the Institute of Constructional Technology*, Vol. 34, No. 2, pp. 53-59.
- Choi, K. and Lee, I. (2016), Accuracy analysis of coastal area modeling through UAV photogrammetry, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 32, No. 6, pp. 657-672. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2016.32.6.10>
- Deliry, S.I. and Avdan, U. (2021), Accuracy of unmanned aerial systems photogrammetry and structure from motion in surveying and mapping: a review, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Vol. 49, No. 8, pp. 1997-2017. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01366-x>
- Federal Geographic Data Committee (1998), *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*, National Aeronautics and Space Administration: Virginia, USA, 28p.
- Ferrer-Gonzalez, E., Aguera-Vega, F., Carvajal-Ramirez, F., and Martinez-Carricondo, P. (2020), UAV photogrammetry

- accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points, *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 15, 19p.
<https://doi.org/10.3390/rs12152447>
- Ghilani, C.D. and Wolf, P.R. (2006), *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*, 4th edition, John Wiley & Sons Inc.
- ISO (2015), ISO 17123-8, Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK).
- KARI (2018) *Global Commercial Drone Market Status and Forecast*, Aviation Issue No. 5, KARI, Daejeon, Korea, 21p.
- Kim, M.G., Jung, G.Y, Kim, J.B., and Yun, H.C. (2010), Applicability analysis of UAV for storm and flood monitoring, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 28, No. 6, pp. 655-662.
- Kim, D. (2010), *A Study on the Operational Effectiveness and Improvement of Battalion-Level UAV using AWAM*, Ph. D. dissertation, Konkuk University, Seoul, Korea, 142p.
- Kim, D., Baik, S., and Baek, S. (2015), Proposing required video processing functionalities of future-oriented army small size unit unmanned aerial vehicle (UAV) and verifying the employment concepts, *Korean Journal of Military Art and Science*, Vol. 71, No. 1, pp. 109-128.
<https://doi.org/10.31066/kjmas.2015.71.1.005>
- Kim, D., Back, K., and Kim, S. (2021), Production and accuracy analysis of topographic status map using drone images, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 22, No. 2, pp. 35-39.
<https://doi.org/10.14481/jkges.2021.22.2.35>
- Kim, S., Park, K., Lee, S., and Song, B. (2022), Analysis of thermal environment characteristics by spatial type using UAV and ENVI-met, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 25, No. 1, pp. 28-43.
<https://doi.org/10.11108/kagis.2022.25.1.028>
- Lee, S., Mun, D., Seong, W., and Kim, J. (2018), Accuracy Analysis According to the Number of GCP Matching, *The Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 21, No. 3, pp. 127-137.
<https://doi.org/10.11108/kagis.2018.21.3.127>
- Martinez-Carricondo, P., Aguera-Vega, F., Carvajal-Ramirez, F., Mesas-Carrascosa, F.J., Garcia-Ferrer, A., and Perez-Porras, F.J. (2018), Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points, *International journal of applied earth observation and geoinformation*, Vol. 72, pp. 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>
- MOLIT (2021), Drone, 1 trillion won in the domestic market by 2025.the leap of the seven superpowers contries, *Korean policy briefing*, <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148896841#sitemap-layer> (last data accessed: 01 June 2022)
- Park, J.K. and Park, J.H. (2015), Reservoir failure monitoring and identified by the UAV aerial images, *Crisisonomy*, Vol. 11, No. 4, pp. 155-167.
- Park, J.P., Park, K.H., and Hong, S.E. (2016), A study on acquisition of parcel boundary information in inaccessible area using UAV, *Journal of the Korean Society of Cadastre*, Vol. 32, No. 1, pp. 91-102.
<https://doi.org/10.22988/ksc.2016.32.1.007>
- Park, J.H, Hong, S.E., and Park, K.H. (2018), A study on the method of land boundary demarcation in cadastral resurvey project using UAV, *Journal of the Korean Society of Cadastre*, Vol. 34, No. 4, pp. 59-73.
- Park, C.H., Choi, K., and Lee, I. (2016), Lane extraction through UAV mapping and its accuracy assessment, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 34, No. 1, pp. 11-19.
<https://doi.org/10.7848/ksgpc.2016.34.1.11>
- Park, G., Park, K., Moon, B., and Song, B. (2019), Monitoring of non-point pollutant sources: management status and load change of composting in a rural area based on UAV, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 22, No. 2, pp. 1-14.
<https://doi.org/10.11108/kagis.2019.22.2.001>
- Peng, A.S., Turkmen, A., Eickhoff, B., Finta, M., and Gerads, P. (2019), Design of a Ground Sampling Distance Graphical User Interface for an Unmanned Aerial Vehicle System, *In 2019 53rd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, IEEE, 20-22 March, Baltimore, Maryland, USA, pp. 1-6.

- Przybilla, H.J., Gerke, M., Dikhoff, I., and Ghassoun, Y. (2019), Investigations on the geometric quality of commercially available cameras for UAV applications, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-2/W13, pp. 531-538.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-531-2019>
- Shin, W. and Lee, Y. (2017), Design and implementation of local forest fire monitoring and situational response platform using UAV with multi-sensor, *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, Vol. 10, No. 6, pp. 626-632.
<https://doi.org/10.17661/jkiict.2017.10.6.626>
- Stocker, Nex, F., Koeva, M., and Gerke, M. (2019), UAV-based cadastral mapping: an assessment of the impact of flight parameters and ground truth measurements on the absolute accuracy of derived orthoimages, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 42, pp. 613-617.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-613-2019>
- Thwa (2020), A study on the intelligent delivery management system using UAV-edge computing technology, *Journal of KIISE*, Vol. 47, No. 12, pp. 1208-1214.
<https://doi.org/10.5626/JOK.2020.47.12.1208>
- Udin, W.S. and Ahmad, A. (2014), Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation flying altitude using unmanned aerial vehicle, *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 26-29 August, Kuching, Sarawak, Malaysia, Vol. 18, 7p.
- Yang, S. and Lee, H. (2018), Land cover classification of high-spatial resolution imagery using fixed-wing UAV, *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 14, No. 4, pp. 501-509.
<https://doi.org/10.15683/kosdi.2018.12.31.501>
- Yun, S. and Lee, H. (2020), Influence of radome types on GNSS antenna phase center variation, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 38, No. 1, pp. 11-21.
<https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.1.11>