

고성능 RTK 드론을 이용한 3차원 지형지물 모델링 품질평가

김성삼, 석재욱, 임언택*, 정용한, 구슬
국립재난안전연구원 재난원인조사실

Quality Assessment of Three Dimensional Topographic and Building Modelling using High-performance RTK Drone

Seong Sam Kim, Jae-Wook Suk, Eon Taek Lim*, Yong-Han Jung, Seul Koo
Division of Disaster Scientific Investigation, National Disaster Management Research Institute

요약 최근 고성능 관측센서가 탑재된 소형 상용 드론이 재난분야를 비롯한 다양한 분야에서 활용되고 있다. 본 논문에서는 실시간 이동측위 위성항법시스템과 고해상 카메라가 탑재된 드론을 활용하여 3차원 지형·지물 모델링 품질 성능 평가를 위한 3가지 드론맵핑 방식별 기하 정확도 및 3D 모델링 결과를 비교·분석하였다. 그 결과, 재난 현장의 피해조사 등과 같이 신속성과 적시성이 요구되는 분야에서는 RTK 측위 성과와 번들 블록 조정을 통해 충분한 정사영상의 기하 정확도를 확보할 수 있음을 알 수 있었다. 다만, 최종적인 활용목적에 따라 지상기준점 측량 성과를 활용하여 2~3cm 수준의 측위 정확도를 확보할 필요가 있다. 드론맵핑 방식별 정사영상의 기하 정확도는 기존 맵핑 방식과 지형기반 맵핑 방식은 수직 및 경사촬영을 병행하는 방식에 비해 다소 양호한 측위 정확도를 보였다. 3차원 건물 모델링의 경우, 측위 정확도는 상대적으로 낮지만, 수직/경사촬영을 병행하는 맵핑 방식은 기존 방식에 비해 전반적으로 완성도가 높은 3차원 모델을 효과적으로 생성함을 알 수 있었다. 본 논문의 드론맵핑 방식별 특성과 측위 성능, 3차원 모델링 실험 결과를 고려할 때 향후, RTK 드론과 DEM 정보를 활용한 산악지역의 드론맵핑을 통해 급경사지 붕괴 조사나 위험성 평가 업무에 드론의 활용성을 확장할 수 있을 것이다.

Abstract Recently, small commercial drones equipped with advanced sensing technologies have had extensive applications in numerous fields, including disaster management. This study presents a comparative analysis of three drone mapping approaches: conventional, terrain follow, and smart oblique approaches. This was done using a drone with built-in real-time kinematic (RTK) GNSS and a high-resolution camera to evaluate the performance in terms of geometric accuracy and 3D modeling quality. It is expected that sufficient geometric accuracy of orthoimages can be obtained through RTK positioning and bundle block adjustment in areas where speed and timeliness are required, such as damage assessment in disaster sites. However, even commercial drones may need to secure positioning accuracy within 2-3 cm using ground control points depending on their final applications. The geometric accuracy of orthoimages for the conventional and the terrain follow approaches showed better positioning result than the smart oblique approach, which combined vertical and oblique photography. Despite relatively low positioning accuracy, smart oblique drone mapping approaches effectively generated a 3D building model with better completeness than conventional methods. Considering the characteristics and positioning performance of each drone mapping approach and the experimental results of 3D modeling, the use of drones in slope failure investigations or risk assessments in mountainous areas can be expanded through drone mapping using RTK drones and a digital terrain model (DTM).

Keywords : RTK Drone, 3D Modelling, Quality Assessment, Geometric Accuracy, DTM

본 논문은 국립재난안전연구원의 연구과제(NDMI-주요-2023-06-02) 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Eon Taek Lim(National Disaster Management Research Institute)
email: charmante93@korea.kr

Received April 17, 2023

Revised May 8, 2023

Accepted May 12, 2023

Published May 31, 2023

1. 서론

최근 센싱 기술이 고도로 발전하면서 고정밀/고해상도 관측 센서가 탑재된 드론 플랫폼이 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히, 실시간 이동측위 위성항법시스템(RTK-GNSS: Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System)이 탑재된 드론 플랫폼으로 지상에서 별도의 기준점 측량 과정없이도 우수한 정확도의 맵핑 성과품을 얻을 수 있어, 드론사진측량 활용 분야에 상용 RTK 드론이 주력 상품으로 자리매김하고 있다[1-4].

드론사진측량은 인공위성이나 항공기와 같은 기존의 지구관측 플랫폼과 달리 신속하게 경제적으로 고해상의 3차원 공간정보를 취득할 수 있는 도구로 각광받고 있다. 현장에서 드론사진측량을 수행하는 과정은 대상지 상공에서 고해상 항공사진을 일정한 비행고도와 중복도로 캡처한다. 수백~수천 장에 이르는 중복 촬영된 항공사진으로부터 특징점을 추출하고, 이를 영상 간의 접합점으로 정합하여 저밀도(sparse)의 점군(point cloud) 자료를 생성한다. 이렇게 생성된 3차원 점군 지형 자료는 평면 위치와 표고 정보, RGB 정보를 함께 포함하고 있어 3차원 지형정보를 보다 현실적으로 표현할 수 있다. 이 점군 자료로부터 카메라 검정(camera calibration)과 지상 기준점 측량 성과 등을 활용하여 최종적으로 고정밀 3차원 지형모델(DSM: Digital Surface Model/DTM: Digital Terrain Model), 고해상 정사영상을 생성하게 된다. 드론의 비행고도와 지상기준점 성과 활용 여부에 따라 다소 차이가 나지만, 이러한 드론맵핑을 통해 수평/수직 오차(RMSE: Root Mean Square Error)가 일반적으로 수 cm 이내의 절대 정확도로 효율적인 2D/3D 지형맵핑을 수행할 수 있다[5-8].

드론맵핑 성과물인 3차원 지형모델의 품질은 지상표본거리(GSD: Ground Sampled Distance), 중복도와 카메라 촬영각도, 비행높이, 드론의 비행 방향 및 경로 등의 비행계획 특성에 따라 좌우된다. 3차원 지형모델로부터 대상 지역의 고도, 경사, 지형 기록 변화 등의 정보를 얻을 수 있어, 대상지역의 비행계획 수립시 필요한 핵심 자료이다. 드론의 비행경로 또한 비행계획시 고려해야 할 요소로, 일반적으로 드론에 탑재된 카메라의 방향을 따라 비행경로가 결정되나, 지형의 기록 변화가 심한 산악지형과 급경사 지역에서는 지형 변화와 시야 차폐로 인한 비행 안전성이 확보되어야 하므로 보다 신중하게 고려해야 한다[9].

최근 드론 광학 카메라의 성능이 더욱 향상되고 대응

량 자료처리 병렬 연산이 가능해지면서 사진측량으로 얻어지는 3차원 점군자료의 점밀도나 정확도가 드론 항공 LiDAR(Light Detection and Ranging) 수준과 거의 비슷해지고 있다. 또한, 경사촬영이 가능한 카메라 마운트와 맵핑 기능이 출시되면서 기존의 지붕 중심으로 얻어지던 3차원 점군자료에서 건물의 측면과 벽면 정보까지 취득할 수 있게 되었다. 또한, 소형 드론 LiDAR 센서가 상용화되면서, 드론 LiDAR 측량과 그 성과의 활용에 대한 관심이 높아지고 있다. 1.064mm의 적외선 파장대를 이용하는 일반적인 LiDAR 시스템 외에 532nm의 녹색 파장대를 이용하여 해저나 하천, 저수지의 수심측량이 가능한 Green LiDAR 시스템도 출시되고 있다. 드론맵핑을 위한 드론 탑재센서의 선택은 맵핑 성과물과 활용 목적에 따라 좌우된다. 최종적인 맵핑 성과물의 형태가 LiDAR 점군 자료와 3차원 지형모델인지, 아니면 사진측량 성과물인 고해상도 정사영상 인지 여부에 따라 광학 카메라 혹은 LiDAR 센서가 탑재될 수 있기 때문이다.

드론맵핑 처리 기술개발은 2010년 이후 드론사진측량 전용 소프트웨어를 개발해 온 Agisoft, Pix4D, Bentley, Dronedeploy와 전 세계 소형 상용 드론 제품의 70% 이상을 독점하고 있는 DJI사도 수년간 다양한 경험을 통해 드론맵핑 소프트웨어를 최근 출시하여 클라우드 서버 솔루션을 통해 고객이 데이터를 업로드하고 처리, 정확도를 검증하는 기능까지 제공하고 있다[10].

기존의 드론맵핑 방식은 기설정된 촬영 고도와 카메라 각도(nadir direction)로 일정 경로를 따라 비행하며 항공사진을 수직 촬영하므로, 지형 기록이 있는 산악지형이나 3차원 건축물 측면에 대한 모델 제작에는 한계가 발생함을 여러 연구사례에서 지적한 바 있다[1-3]. 또한, DTM과 같은 지형정보의 변화뿐만 아니라 드론에 탑재된 카메라의 위치(X, Y, Z)와 회전각(ω , φ , κ)을 계산하여 고정된 축척의 사진을 촬영할 수 있는 지형적 특징을 기반으로 하는 비행계획을 수립하는 방법론이 제안되었다[3].

본 논문에서는 재난원인 현장조사를 위해 촬영고도가 일정한 평지 환경에서 고해상의 고정밀 드론맵핑 성과물을 얻을 수 있는 기존의 드론맵핑 방식과 개선된 드론맵핑 방식에 의한 3차원 지형정보 생성결과를 비교·분석하였다. 실험 대상지는 행정안전부와 지자체에서 위험지역 지구로 관리 중인 급경사지 사면을 대상으로 선정하였다. 이를 위해 대상지역의 드론 항공촬영과 지상기준점 측량을 수행한 후 드론맵핑 성과물을 생성하여 항공촬영 방식별 정확도를 평가하였다.

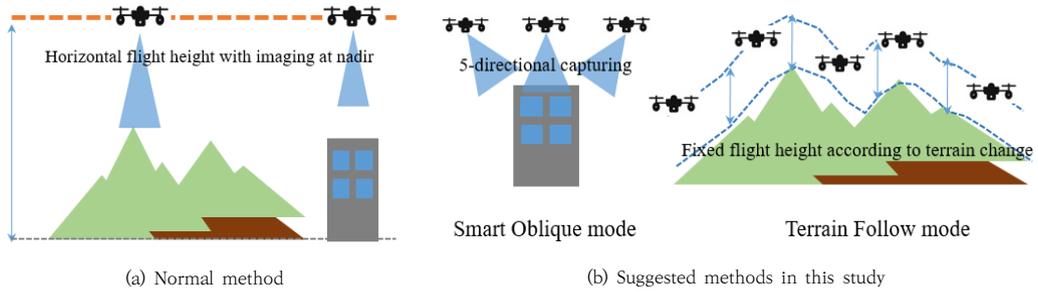


Fig. 1. Drone imaging methods for 3D terrain and building modelling

2. 연구 자료 및 방법

2.1 연구 대상지

실험 대상지는 행정안전부와 지자체에서 사면 위험지구로 지정·관리중인 경남 밀양에 위치한 급경사지 사면으로, 산악 지형의 사면 하단부는 풍화된 암석이 중력방향으로 낙하하여 기저부에 퇴적된 테일러스 지형의 자연 비탈면이다. 사면과 2차선 도로 사이에는 주택, 상가, 학교 등 주거·상업시설이 있는 마을과 인접해 있어 재난발생시 인적·물적 피해가 크게 우려된다. 행정안전부에서 주관하는 급경사지 관리실태 중앙합동 실태점검 등을 통해 위험성 평가와 낙석 등 피해 예방을 위한 상시적이고 주기적인 급경사지 관리가 이루어지고 있다[9].

2.2 연구 활용장비

연구에 사용된 장비는 DJI Matrice 300 RTK 드론과 Zenmuse P1 광학 카메라로, 세부 사양은 Table 1과 Table 2와 같다. 2개의 배터리가 장착된 DJI Matrice 300 RTK의 무게는 6.3kg이다. 포지션 모드(P모드)에서

최대 17m/s로 비행이 가능하며, 맵핑을 위한 자동 비행 시에는 비행 효율과 안전성을 고려하여 2~3m/s 저속으로 운용된다. 비행시간이 최대 55분으로 기존 DJI Inspire2와 비교해 보면 비행시간이 2배 이상 늘었고, RTK 기능으로 호버링 수평·수직 정확도가 $\pm 0.1m$ 로 향상되었다. Zenmuse P1/L1 센서 탑재가 가능한 DJI Matrice 300 RTK 드론은 다양한 항공촬영 방식을 지원하고 있다. DJI Matrice 300 RTK에 장착된 Zenmuse P1은 무게 800g의 광학 카메라로, 센서는 35.9×24mm의 풀 프레임, 조리개는 f/2.8~f/16, ISO는 100~25,600까지 설정할 수 있다. 특히, 유효픽셀은 4,500만 화소(8,192×5,460)로 DJI Inspire2에 비해 해상도가 2배 이상 향상되었다. 본 연구에서는 DJI Matrice 300 RTK 드론을 활용하여 대상지역을 사전에 설정된 일정한 고도에서 수직(nadir) 촬영을 수행하는 기존의 방식과 맵핑 영역을 수직 촬영과 그 주변으로 전후좌우 4개 방향에서 경사촬영을 수행하는 수직/경사 촬영 병행 방식, 마지막으로 지형의 형상을 따라 설정된 촬영고도에서 일정하게 유지하며 항공촬영을 수행하는 지형기반 항공촬영 방식으로 실험을 진행하였다.

Table 1. Specification of DJI Matrice 300 RTK and its built-in optic camera

DJI M 300 RTK	Specification	Features	DJI Zenmuse P1	Specification	Features
Size	810×670×430mm		Size	198×166×129mm	
Weight	6.3kg (incl. battery)		Weight	800g	
Fight speed	Max. 17m/s (P mode)		CCD size	35.9×24mm (full frame)	
Flight time	Max. 55min.		Effective Pixel	45MP	
Hovering accuracy	Hor.: $\pm 0.1m$ Ver.: $\pm 0.1m$		Image size	8,192×5,460 (3:2)	
RTK accuracy	Hor.: $\pm 1.0cm$ Ver.: $\pm 1.5cm$		Aperture	f/2.8~f/16	
			ISO	100~25,600	

Table 2. Experimental circumstance of Matrice 300 RTK and its built-in Zenmuse P1 sensor

Mapping mode	Flight height(m)	Camera angle(°)	Overlap/Sidelap(%)	Flight time	Ground coverage (m ²)	No. of image	GSD (cm/pix.)
Normal	150	90	80/80	4m 53s	53,428	208	1.88
Smart Oblique	200	90/60	70/80	8m 21s	43,270	218	2.51
Terrain Follow	88~174(80)	90	80/80	10m 53s	43,274	628	1.00

2.3 연구 방법 및 절차

드론을 활용하여 재난현장을 조사할 때, 주변의 다양한 지형·사물 등 주변 환경을 사전에 확인해야 한다. 산악지형에서 흔히 볼 수 있는 급경사지 사면은 형태가 복잡하고, 사회기반 시설물의 종류와 형상도 다양하므로, 이를 고려하여 재난현장 조사를 위한 드론 활용성 검토가 필요하다. 기존의 드론 항공촬영은 카메라 각도를 수직으로 고정하고 일정한 촬영 고도에서 이루어지므로, 특히 산악지형이나 3차원 건축물 측면에 대한 모델 제작에 한계가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 산악 지형의 기복 변화에 따라 일정한 비행고도에서 항공촬영을 수행하거나 표고를 세분화해서 지형 변화에 따라 계단식으로 비행하는 방식도 제안되었다. 시설물의 3차원 모델을 생성하기 위해 대상 시설물의 수직 촬영과 여러 측면 방향에서 경사촬영을 수행하여 건축물의 벽부나 측면의 공간 정보를 추가적으로 취득하여 텍스처 맵핑하는 방식도 제안되고 있다.

본 연구에서는 재난현장의 피해조사나 재난발생 원인 조사를 위한 대상지역의 신속한 맵핑 자료의 취득과 자료처리를 위해 다음과 같은 연구 과정으로 진행되었다. 먼저 재난 위험성 평가를 위한 대상 지역을 선정하고, 그 지역을 대상으로 RTK-GNSS를 활용하여 지상 기준점 측량을 수행하였다. 기존의 드론 항공측량 방식(normal)과 지형·지물의 맵핑과 3차원 모델링을 위해 수직/경사 촬영 병행 방식(smart oblique)과 지형기반 항공촬영 방식(terrain follow)으로 대상지역의 드론 항공영상을 취득하였다. 각각의 항공촬영 방식에 따라 드론맵핑 전문 SW에서 초기 자료처리, 점군/메쉬 생성, DSM/DTM, 정사영상 등의 최종 맵핑 성과물을 생성하였으며, 각 드론 항공촬영 방식별로 검사점(check point)의 위치 오차와 모델링 생성 결과를 비교·분석하여 드론맵핑 정확도를 평가하였다(Fig. 2).

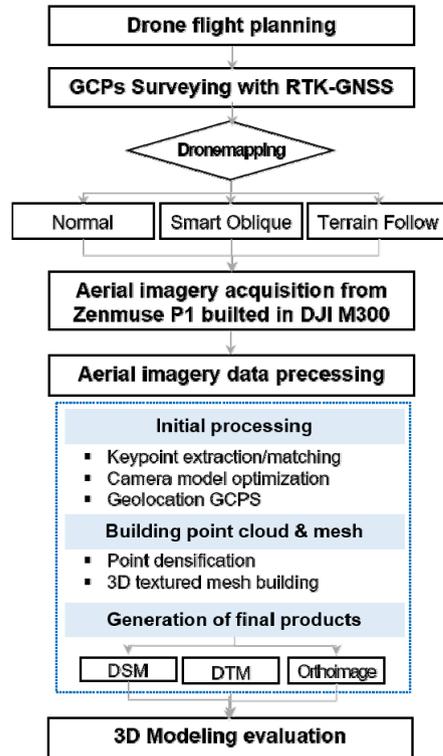


Fig. 2. Flowchart of study

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험 자료 처리 결과

3.1.1 지상기준점 측량

재난현장에 따라 지상기준점 측량을 수행하기 어려운 상황이 흔히 발생하지만, 일반적으로 드론맵핑을 수행할 때, 지상기준점 성과를 활용하면 보다 정밀한 맵핑 성과물을 생성할 수 있다. 연구 대상지의 지상기준점 측량은 Trimble R10과 VRS 측량으로 수행하였다. 드론맵핑 정확도 평가를 위해 Fig. 3과 같이 대상지내 도로의 양측

가장자리를 따라 총 9점의 지상기준점과 검사점을 배치하였으며, 4점은 지상기준점으로, 나머지 5점은 검사점으로 활용하였다. 지상기준점과 검사점의 측량 성과는 Table 3과 같다.



Fig. 3. Location of GCPs and CKs

Table 3. Results of GCPs surveying

Point	X(m)	Y(m)	Z(m)
GCP1	325319.625	192129.153	92.533
GCP2	325334.488	192109.452	92.671
GCP3	325306.695	192067.873	91.319
GCP4	325279.529	192010.866	90.145
CK1	325308.905	192100.015	91.878
CK2	325315.489	192089.131	91.796
CK3	325301.644	192082.912	91.516
CK4	325291.449	192049.709	90.777
CK5	325293.907	192027.831	90.344

3.1.2 항공촬영

기존 드론 항공촬영 방식은 실험 대상지의 주변 산악 지형의 표고를 고려하여 비행 고도를 150m, 비행 진행 방향과 경로 패스간 중복도를 각각 80%, 80%로 계획하였다. 비행 진행 방향을 따라 수직으로 항공 촬영하였다.

총 비행시간은 4분 53초, 촬영면적은 53,428㎡, 전체 촬영된 사진 수는 208장, 사진의 GSD는 1.88cm/pixel이었다.

수직/경사 촬영 병행 방식은 대상지역내 직하 방향과 전후좌우 4방향에서 경사 촬영을 추가 병행해야 하므로, 맵핑 영역보다 다소 넓게 촬영하도록 계획했다. 비행경로가 기존 방식보다 더 산악 지형으로 치우치기 때문에 주변 산악지형의 높이를 고려하여 비행고도를 200m로 결정하였다. 카메라 각도의 직하방향은 90°, 경사촬영 방향은 60°로 설정하였다. 사진의 중복도는 비행 진행방향 중복도(overlap)는 70%, 경로 패스간 중복도(sidelap)는 80%로 설정하였다. 총 비행시간 8분 21초, 촬영면적은 43,270㎡, 사진 수는 218장, GSD는 직하방향으로 2.51cm/pixel였다. 마지막으로 지형기반 항공촬영 방식은 우선 사전 대상지역의 드론 항공촬영을 통해 저해상의 DSM을 제작한 후, Matrice 300 컨트롤러에 입력하였다. 이 DSM 정보를 토대로 비행고도를 80m로 설정하였다. 카메라 각도는 직하 방향(90°), 중복도 각각 80%, 80%로 설정하였다. 실제 비행고도는 이륙지점의 해발고도를 기준으로 88m에서 174m까지 촬영되었으며, 총 비행시간은 10분 53초, 촬영면적은 43,274㎡, 전체 촬영 사진 수는 628장, GSD는 1cm/pixel로 평균 비행고도가 80m로 설정했기 때문에 결과적으로 가장 높은 사진 해상도를 보였다.

3.1.3 드론맵핑 정확도 평가

본 연구에서 사용된 드론맵핑 전문 소프트웨어는 Pix4DMapper로, 광학, 다중분광 영상자료 등을 처리할 수 있고, 정밀한 점군자료와 DSM 등 3차원 모델링, 정사영상 등의 성과품을 제작할 수 있다.

지상기준점 측량 성과의 사용 여부에 따른 맵핑 성과물의 품질 정확도를 평가하기 위해 각 항공촬영 방식별

Table 4. Comparison of mapping accuracy for different drone mapping methods without GCPs surveying results

Point	Normal			Smart Oblique			Terrain Follow		
	dX(m)	dY(m)	dZ(m)	dX(m)	dY(m)	dZ(m)	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
CK1	0.064	0.038	0.224	0.041	0.005	0.243	0.032	0.007	0.217
CK2	0.067	0.033	0.228	0.037	0.008	0.249	0.026	0.005	0.201
CK3	0.075	0.037	0.232	0.065	0.001	0.259	0.041	0.008	0.194
CK4	0.051	0.016	0.247	0.046	0.027	0.241	0.022	0.002	0.218
CK5	0.067	0.015	0.242	0.050	0.021	0.288	0.042	0.004	0.233
RMSE	0.066	0.029	0.235	0.049	0.016	0.257	0.034	0.006	0.213

Table 5. Comparison of mapping accuracy for different drone mapping methods with GCPs surveying results

Points	Normal			Smart Oblique			Terrain Follow		
	dX(m)	dY(m)	dZ(m)	dX(m)	dY(m)	dZ(m)	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
CK1	0.000	0.004	0.012	0.005	0.010	0.000	0.002	0.000	0.016
CK2	0.003	0.003	0.013	0.009	0.011	0.008	0.004	0.013	0.001
CK3	0.006	0.004	0.018	0.017	0.019	0.020	0.010	0.001	0.002
CK4	0.009	0.009	0.009	0.005	0.003	0.003	0.008	0.014	0.030
CK5	0.005	0.002	0.047	0.001	0.008	0.053	0.011	0.011	0.047
RMSE	0.005	0.005	0.024	0.009	0.011	0.026	0.008	0.010	0.026

로 취득한 검사점의 GNSS 측량성과와 맵핑 성과물인 정사영상에서 취득한 검사점의 절대좌표간의 RMSE를 비교·분석하였다. RTK 기능을 가진 고성능 드론인 점을 고려하여 지상기준점 측량 성과를 이용하지 않고 앞서 제시한 3가지 드론 항공촬영 방식으로 드론맵핑을 수행했을 때 맵핑 정확도를 확인하였다. 이 때, GNSS 검사점과 정사영상의 동일한 검사점에서 독취한 좌표값의 RMSE를 비교하여 분석하였다. 기존 드론 항공촬영 방식의 수평방향 RMSE는 각각 6.6cm, 2.9cm, Z방향은 23.5cm였으며, 수직 및 경사 병행 방식의 수평/수직방향 RMSE는

각각 4.9cm, 1.6cm, 25.7cm였고, 지형기반 항공촬영 방식의 RMSE는 3.4cm, 0.6cm, 21.3cm로 나타났다(Table 4). 3가지 방식 모두 수평방향(X, Y축)의 RMSE는 cm급의 정확도를 나타냈고, 수직방향(Z축)으로는 20cm 이상의 오차를 보이고 있었다. 그러므로, cm급의 RTK 기능을 가진 고성능 드론이라 할지라도, 맵핑의 활용 목적과 산출물의 정확도 요구수준을 고려하여 정확도를 보다 정밀하게 확보하는 방안을 강구해야 할 것으로 판단된다.

다음으로 지상기준점 측량 성과를 사용하여 3가지 드론맵핑 방식별 드론맵핑 정확도를 동일한 방법으로 독취

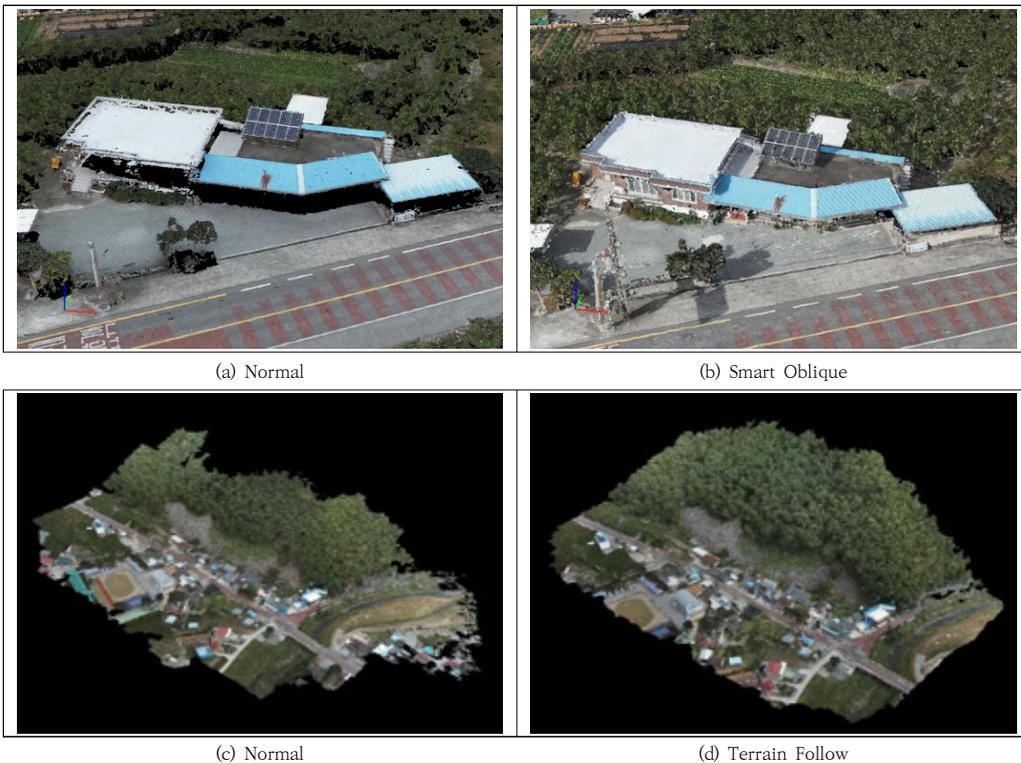


Fig. 4. 3D point cloud models results each drone mapping method: Building(above), Steep slope(below)

한 검사점간의 RMSE를 비교하여 분석하였다. 기존 방식의 수평방향 RMSE는 각각 0.5cm, 0.5cm, 수직방향은 2.4cm였으며, 수직 및 수평병행 방식의 RMSE는 각각 0.9cm, 1.1cm, 2.6cm였고, 지형기반 항공촬영 방식의 RMSE는 각각 0.8cm, 1cm, 2.6cm였다(Table 5). Kersten et al.(2022)의 연구 결과와 유사하게 GCPs 측량 성과를 사용했을 때 3가지 방식 모두 수평방향의 RMSE는 mm급의 정확도를 나타냈고, 수직방향으로는 2cm 내외의 오차를 보였다.

3.2 3차원 모델링 정확도 평가

DJI Matrice 300 RTK 드론과 Zenmuse P1 카메라를 활용하여 앞의 3가지 드론맵핑 방식별 3차원 모델링 정확도 평가를 통해 재난현장 조사 활용성을 평가하였다.

먼저, 대상지역내 다양한 시설물 중 건물에 대한 점군자료 기반 3차원 모델 생성 정확도를 비교하였다. 카메라가 직하방향으로 드론맵핑을 수행하는 기존 드론 항공촬영 방식에서의 3차원 건물 모델링은 정사투영된 지붕면을 제외하고 건물의 측면이나 벽부에서는 점군자료가 거의 생성되지 않아 제대로 3차원 모델이 구현되지 않음을 직관적으로 확인할 수 있다. 반면, 수평 및 수직병행 방식으로 생성된 건물 모델은 정사투영된 지붕 부분뿐만 아니라 처마 아래 벽부까지 전반적으로 완성도가 높게 3차원 건물 모델이 생성됨을 확인할 수 있었다. 또한, 표고 변화가 심한 산악 지형에 대한 3차원 모델의 결과를 평가한 결과, 기존 드론 항공촬영 방식은 이륙지점의 표고를 기준으로 일정한 고도에서 직하방향으로 촬영되는 기하조건 때문에 산악지형의 표고의 변화를 제대로 반영할 수 없어 사면 상부의 산 정상부에 대한 특징점 추출과 정합이 제대로 수행되지 않아 산 정상부를 포함한 전반적인 3차원 지형모델의 완성도가 낮은 것으로 평가되었다. 수직촬영과 주변 지형의 경사촬영 사진을 병행한 방식은 기존 드론 항공촬영 방식에 비해 산악 사면 부분의 3차원 모델의 완성도가 높으나 여전히 산 정상부의 모델이 제대로 생성되지 않음을 확인하였다. 마지막으로 지형 변화를 고려하여 일정한 고도에서 항공촬영하는 방식은 2가지 맵핑 방식에 비해 사면부 뿐만 아니라 정상부의 3차원 모델 결과도 가장 완성도 높게 생성되어 표고 변화가 있는 산악지형의 3차원 모델 생성이나 지형공간 구축에 효과적임을 확인할 수 있었다.

4. 결론 및 제언

본 논문에서는 고성능 RTK 드론을 활용한 정밀 3차원 지형·지물 모델링 품질 성능 평가를 위해 3가지 드론 맵핑 방식별 기하 정확도 및 3D 모델링 성과를 비교·분석하였다.

첫째, 고해상 카메라 Zenmuse P1을 활용한 드론맵핑 성과의 기하정확도를 비교·분석한 결과, 측위 정확도 수준보다 재난 현장의 신속한 피해조사 등과 같이 신속성과 적시성이 요구되는 활용 분야에서는 RTK 측위 성과와 번들 블록 조정을 통해 드론맵핑 성과를 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, cm급의 위치결정이 가능한 RTK-GNSS 드론이라 할지라도 Z방향의 과대한 오차 등을 감안할 때, 최소 1점이나 그 이상의 지상기준점을 적절하게 현장에 배치하여 2~3cm내외의 신뢰성있는 위치결정 성과를 확보할 필요가 있을 것으로 판단된다.

둘째, 기존의 수직방향의 일정고도에서의 드론 항공촬영 방식과 일정한 고도(본 실험에서는 비행고도 80m)에서 지형의 고저를 감안하여 항공촬영하는 방식은 수직 및 경사촬영을 병행하는 방식에 비해 다소 양호한 측위 정확도를 보였다. 측위 정확도가 상대적으로 낮은 단점에도 불구하고 수직 및 경사촬영 병행 방식은 기존 드론 항공촬영 방식에 비해 정사투영된 지붕 부분뿐만 아니라 처마 아래 벽부까지 전반적으로 완성도가 높은 3차원 점군자료 모델을 효과적으로 생성함을 알 수 있었다.

결과적으로 드론맵핑 방식별 특성과 측위 정확도, 3차원 모델링 품질을 고려해 볼 때, 향후, RTK 드론과 DEM 정보를 활용한 산악지역의 드론맵핑을 통해 급경사지 붕괴 조사나 위험성 평가 업무에 조사 드론의 활용성을 확장할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] T. Kersten, J. Wolf, M. Lindstaedt, "Investigations into the accuracy of the UAV system Dji Matrice 300 Rtk with the sensors Zenmuse P1 and L1 in the Hamburg test field", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLIII-B1-2022, pp.339-346 2022. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-339-2022>
- [2] F. Diara, M. Roggero, "Quality Assessment of DJI Zenmuse L1 and P1 LiDAR and Photogrammetric Systems: Metric and Statistics Analysis with the Integration of Trimble SX10 Data", *Geomatics*. Vol.2,

No.3 pp.254-281.

DOI: <https://doi.org/10.3390/geomatics2030015>

- [3] E-E. Papadopoulou, C. Vasilakos, N. Zouros, N. Soulakellis, "DEM-Based UAV Flight Planning for 3D Mapping of Geosites: The Case of Olympus Tectonic Window, Lesvos, Greece", *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol.10, No.8, p.535.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10080535>
- [4] S. M. S. M. Daud, M. Y. P. M. Yusof, C. C. Heo, L. S. Khoo, M. K. C. Singh, M. S. Mahmood, H. Nawawi, "Applications of drone in disaster management: A scoping review", *Science & Justice*, Vol.62, Iss.1, pp.30-42, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2021.11.002>
- [5] S. Kim, J. Kim, J. Kim, "National Disaster Scientific Investigation and Disaster Monitoring using Remote Sensing and Geo-information", *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol.35, No.5_2, pp.763-772.
DOI: <https://doi.org/10.7780/KJRS.2019.35.5.2.1>
- [6] S. Kim, B. Song, S. Cho, H. Kim, "Applicability of drone mapping for natural disaster damage investigation", *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol.27, No.2, pp. 13-21. Mar. 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7319/kogsis.2019.27.2.013>
- [7] S. S. Kim, D. Kim, D. Y. Shin, H. J. Nho, "Assessment and Analysis of Disaster Risk for Steep Slope using Drone and Terrestrial LiDAR", *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol.28, No.4, pp.13-24. Dec. 2020.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7319/kogsis.2020.28.4.013>
- [8] S. S. Kim, T. H. Kim, J. S. Sim "Applicability assessment of UAV mapping for disaster damage investigation in Korea", *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-3/W8, pp.209-214, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-209-2019>
- [9] NDMI, Study on Improving Disaster Site Mapping Performance of Multi-sensors based Disaster Investigation Robot, R&D Report, National Disaster Management Research Institute, Korea. pp.50-64. 2022.
- [10] Shotkit, 8 Interesting DJI Statistics(Fact Checked for 2023), [Internet]. Shotkit, 2023, Available From: <https://shotkit.com/dji-stats/> (accessed Mar. 30, 2023)

김 성 삼(Seong Sam Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 국립경상대학교 대학원 도시공학과 (공학석사)
- 2007년 8월 : 국립경상대학교 대학원 도시공학과 (공학박사)
- 2008년 2월 ~ 2009년 12월 : 연세대학교 박사후연구원

- 2009년 12월 ~ 2010년 12월 : University of Calgary, Post-Doc. Fellow
- 2011년 2월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 책임연구원/시설연구사

<관심분야>

사진측량, 원격탐사, GIS, UAV, 재난사고 조사분석

석 재 욱(Jae-Wook Suk)

[정회원]



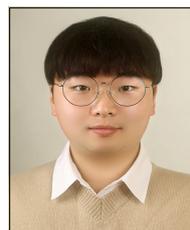
- 2008년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 탐사공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 (공학박사)
- 2013년 4월 ~ 2015년 10월 : 한국시설안전공단 선임연구원
- 2015년 11월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구사

<관심분야>

지반공학, 지질공학

임 언 택(Eon Taek Lim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 국립한밭대학교 대학원 도시공학과 (공학석사)
- 2020년 3월 ~ 2020년 12월 : 한국교통연구원 4차산업혁명교통연구본부 연구원
- 2021년 7월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 재난원인조사실 연구원

<관심분야>

재난사고 조사분석, 공간정보, UAV

정 용 한(Yong Han Jung)

[정회원]



- 2017년 2월 : 국립경상대학교
도시공학과 (공학석사)
- 2018년 7월 ~ 2021년 6월 :
(주)지구지적측량 과장
- 2021년 7월 ~ 현재 : 국립재난안
전연구원 연구원

<관심분야>

지적측량, 사진측량, 원격탐사, GIS, UAV

구 슬(Seul Koo)

[정회원]



- 2013년 2월 : 국립경상대학교
대학원 도시공학과 (공학석사)
- 2013년 5월 ~ 2017년 12월 :
국립재난안전연구원 연구원
- 2022년 11월 ~ 현재 : 국립재난안
전연구원 연구원

<관심분야>

사진측량, 원격탐사, GIS, UAV