

지형모델 구축 방법에 따른 토공물량 산정의 정확도 평가

Accuracy Evaluation of Earthwork Volume Calculation According to Terrain Model Generation Method

박준규¹⁾ · 정갑용²⁾

Park, Joon Kyu · Jung, Kap Yong

Abstract

Calculation of quantity at construction sites is a factor that has a great influence on construction costs, and it is important to calculate accurate values. In this study, topographic model was created by using drone photogrammetry and drone LiDAR to estimate earthwork volume. ortho image and DSM (Digital Surface Model) were constructed for the study area by drone photogrammetry, and DEM (Digital Elevation Model) of the target area was established using drone LiDAR. And through accuracy evaluation, accuracy of each method are 0.034m, 0.35m in horizontal direction, 0.054m, 0.25m in vertical direction. Through the research, the usability of drone photogrammetry and drone LiDAR for constructing geospatial information was presented. As a result of calculating the volume of the study site, the UAV photogrammetry showed a difference of 1528.1m³ from the GNSS (Global Navigation Satellite System) survey performance, and the 3D Laser Scanner showed difference of 160.28m³. The difference in the volume of earthwork is due to the difference in the topographic model, and the efficiency of volume calculation by drone LiDAR could be suggested. In the future, if additional research is conducted using GNSS surveying and drone LiDAR to establish topographic model in the forest area and evaluate its usability, the efficiency of terrain model construction using drone LiDAR can be suggested.

Keywords : Accuracy Analysis, Drone, Earthwork, LiDAR, Photogrammetry, Volume Calculation

초 록

건설현장에서 토공물량 산정은 설계에서 시공에 이르기까지 공사비에 큰 영향을 주는 요소로 정확한 값을 산출하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 토공물량 산정을 위해 드론 사진측량과 드론 LiDAR를 이용한 방법으로 지형모델을 생성하였다. 드론 사진측량 방법으로 연구대상지의 DSM (Digital Surface Model) 및 정사영상을 구축하였으며, 드론 LiDAR를 이용해 연구대상지의 DEM (Digital Elevation Model)을 구축하였다. 각각의 방법으로 생성된 지형모델에 대한 정확도 평가를 수행하여 각각의 방법이 수평방향 0.034m, 0.035m, 수직방향 0.054m, 0.025m의 차이를 나타내어 지형모델 구축을 위한 드론 사진측량과 드론 LiDAR의 활용성을 제시하였다. 연구대상지의 토공물량 산정 결과, 드론 사진측량은 GNSS 측량 성과와 1528.1m³의 차이를 나타내었으며, 드론 LiDAR는 160.28m³의 차이를 나타내었다. 토공물량의 차이는 식생 및 가건물로 인한 지형모델의 차이로 판단되며, 연구를 통해 드론 LiDAR에 의한 물량산정의 효율성을 제시할 수 있었다. 향후 추가적인 연구를 통해 GNSS (Global Navigation Satellite System) 측량과 드론 LiDAR를 활용한 방법으로 산림지역에서의 지형모델 구축 및 활용성에 대한 평가가 이루어진다면 드론 LiDAR를 이용한 지형모델 구축의 활용성을 제시할 수 있을 것이다.

핵심어 : 정확도 분석, 드론, 토공, 라이다, 사진측량, 체적계산

Received 2021. 01.25 Revised 2021. 02. 19, Accepted 2021.02.23

1) Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Seoul University, Republic of Korea (E-mail: jkpark@seoul.ac.kr)

2) Corresponding author, Member, Visiting Professor, Department of Construction Engineering Education, Chungnam National University, Republic of Korea (E-mail: jungjusa@hanmail.net)

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

건설현장의 토공물량 산정은 설계부터 시공에 이르기까지 공사비에 큰 영향을 미치는 요소로 정확한 물량의 산정이 중요하다(Kim and Back, 2020; Lee *et al.*, 2019; Skog and Händel, 2019). 실제 토목공사에서는 토공물량 산정을 위해 GNSS (Global Navigation Satellite System) 및 토털스테이션을 이용한 중·횡단 측량을 수행하고 있지만, 많은 인력과 시간이 소요되는 어려움이 있다. 최근 드론을 이용한 사진측량 방법이나 LiDAR를 건설현장에 적용한 연구가 이루어지고 있다(Kim *et al.*, 2019; Lee and Lee, 2019; Moon and Yun, 2019; Park and Kim, 2018). 드론은 사람의 접근이 어려운 지형에 대한 데이터 취득에 활용되고 있으며, 건설 현장에서는 모니터링 분야에 활용되고 있다(Lee *et al.*, 2018; Kim, 2020). 드론을 이용한 사진측량은 빠른 데이터 취득과 3차원의 지형모델을 생성할 수 있는 장점이 있다. 최근 드론 사진측량의 토목공사 현장 적용성에 관한 연구와 3차원 공간정보 기반의 건설공사 관리 시스템 개발 등 건설현장에 드론을 활용한 연구가 수행되었다(Kim *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2019; Park and Um, 2020). 이 밖에도 사면 붕괴 예방을 위해 드론을 활용하여 사면의 3차원 지형모델을 구축하고 설계에 적용하는 방법을 제시한 연구나 드론을 이용한 건설공사의 진도 관리방안과 지형 모니터링에 초점을 두어 건설 현장을 비교한 연구도 수행되었다(Song *et al.*, 2019; Kim and Kim, 2019; Lee *et al.*, 2020).

한편, LiDAR 기술의 발전으로 과거에 비해 빠르게 다양한 대상물의 기하학적 정보를 취득할 수 있게 되었다(Ahn and Ko, 2019; Kang and Lee, 2020). LiDAR는 수많은 레이저를 대상물에 발사하여 짧은 시간에 포인트클라우드 형태의 데이터를 취득할 수 있는 기기로 공간정보 구축과 관련된 많은 분야에서 활용되고 있으며, 주로 DEM 생성을 위한 효과적인 방안으로 알려져 있다(Choi *et al.*, 2019; Oh and Kim, 2019). 하지만 드론 LiDAR는 현재 적용이 시작되는 단계로 건설공사 토공량 산정에 적용된 사례가 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 드론 사진측량 및 드론 LiDAR 방법으로 지형모델을 구축하고 토공물량을 산정하며, GNSS 측량 결과와 비교 및 분석을 통해 각각의 방법으로 산정된 토공물량의 정확도를 평가하고자 하였다. Fig. 1은 연구 흐름도를 나타낸다.

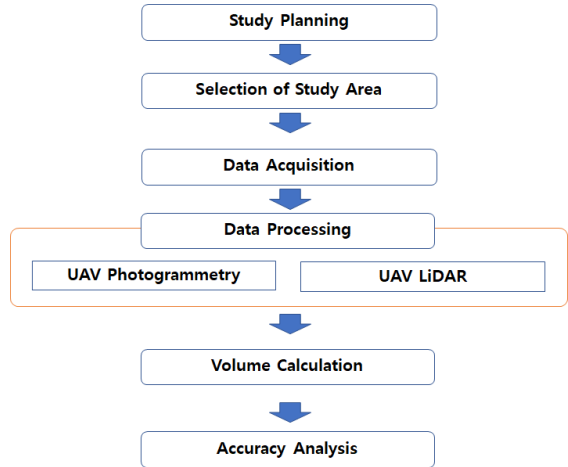


Fig. 1. Study flow

2. 데이터 취득 및 자료처리

본 연구에서는 드론 사진측량 및 드론 LiDAR를 이용한 지형 모델 생성 및 토공물량 산정을 위해 전라남도 여수 인근의 건설현장을 연구대상지로 선정하였다. 드론 사진측량을 위한 데이터 취득은 DJI사의 Phantom4 RTK를 이용하였으며, LiDAR는 드론에 탑재가 가능한 YellowScan사의 SurveyorUltra 모델을 이용하였다. Fig. 2는 연구대상지이며, Fig. 3은 Phantom4 RTK와 SurveyorUltra를 나타낸다(DJI, 2020; YellowScan, 2020).

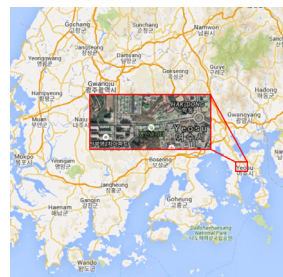


Fig. 2. Study area



Fig. 3. Phantom4 RTK and SurveyorUltra

2.1. 드론 사진측량

드론 사진측량을 위한 데이터 취득은 연구대상지 주변에 대해 중 및 횡중복도 80%로 총 7개의 strip으로 이루어졌으며, 소요된 시간은 20분 이었다. 촬영고도는 150m로 총 147매의 사진이 촬영되었으며, GSD (Ground Sample Distance)는 3cm였다. 드론 사진측량의 자료처리는 UAS Master 소프트웨어를 이용하여 외부표정요소와 지상기준점을 이용한 항공삼각측량을 수행하고, DSM과 정사영상을 제작하였다. Fig. 4

는 드론 사진측량을 위한 데이터 취득 경로이다.

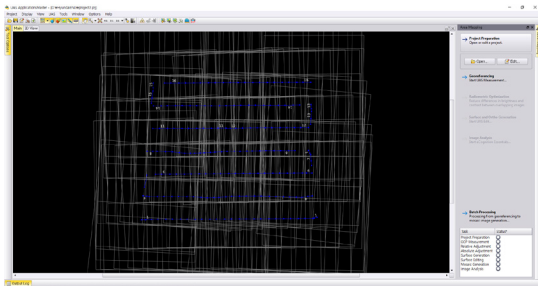


Fig. 4. Data acquisition path of drone photogrammetry

DSM 생성은 SGM (Semi Global Matching) 방법을 이용하였다. SGM은 연속된 좌측과 우측의 드론 영상 매칭을 위한 Cost를 계산하고, 계산된 Cost를 순차적으로 누적시킨 후, 누적된 Cost의 최대 또는 최소값에 해당하는 시차를 계산하는 방식으로 수행된다(Hirschmuller, 2008; Lee *et al.*, 2017). Fig. 5는 SGM 처리 과정을 나타낸다.



Fig. 5. SGM process

정사영상은 DSM을 이용하여 폐색영역 보정, 모자이크 처리, 칼라매칭의 과정을 통해 수행되었다. Fig. 6은 DSM 및 정사영상 제작을 위한 자료처리 화면이며, Figs. 7과 8은 드론 사진측량에 의한 결과물을 나타낸다.

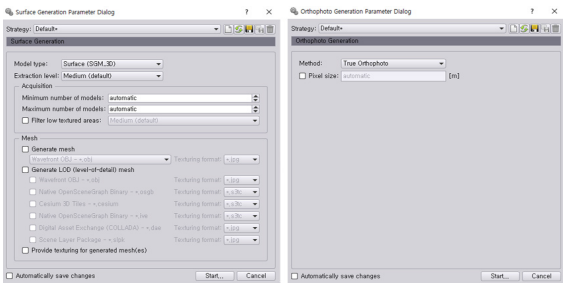


Fig. 6. Data processing for DSM and ortho image

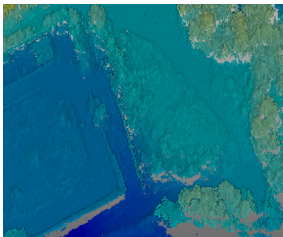


Fig. 7. DSM



Fig. 8. Ortho image

2.2. 드론 LiDAR

드론 LiDAR를 이용한 방법은 데이터 취득에 15분이 소요되었으며, 드론 LiDAR의 도달거리를 고려하여 건물 주변과 도로주변의 고도를 다르게 하여 각각 100m와 50m고도에서 수동비행으로 수행되었다. Fig. 9는 드론 LiDAR의 데이터 취득 경로를 나타낸다.

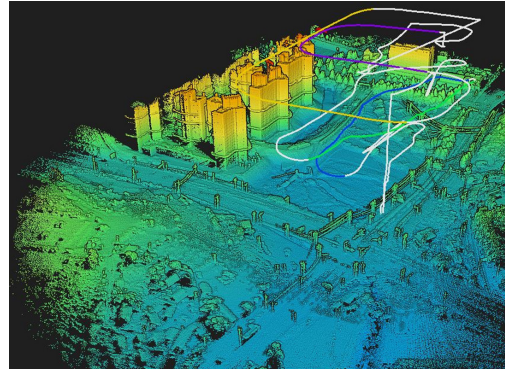


Fig. 9. Data acquisition path of drone LiDAR

드론 LiDAR는 지상기준점을 이용한 경로처리 및 포인트클라우드 생성의 과정으로 데이터 처리를 수행하였다. 경로처리는 드론의 지상기준점에서 정지측량을 통해 얻은 GNSS 데이터를 기준으로 드론의 GNSS/INS 데이터를 처리하여 정확한 드론의 비행경로와 자세를 계산하는 과정이다. Fig. 10은 드론 경로처리 화면이며, Fig. 11은 처리결과와 정밀도를 나타낸다.

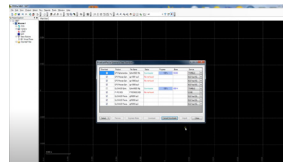


Fig. 10. Drone path processing screen

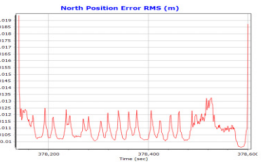


Fig. 11. Precision of processing results

데이터 처리를 통해 얻은 결과물인 포인트클라우드에서 DEM 생성을 위해 식생과 지면을 분류하였다. 지면분류에는 Realworks 소프트웨어의 자동분류 기능을 이용하였으며, 자동분류 레이어 중 Ground와 Vegetation을 분류하였다. Table 1은 classification 레이어 중 일부이며, Fig. 12는 식생과 지면분류 결과로 파랑색은 지면, 노랑색은 식생을 나타낸다.

Table 1. Classification layer

Classification Value	Meaning
1	Unclassified
2	Ground
3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation
5	High Vegetation
6	Building
7	Low Point
⋮	⋮

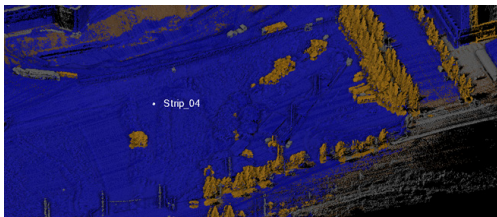


Fig. 12. Classification result

분류 결과에서 식생을 제거하고, 지면을 추출하여 DEM을 생성하였다. 포인트클라우드 형태의 DEM을 이용하여 체적 계산을 위한 TIN (Triangulated Irregular Networks)를 생성하였다. Figs. 13과 14는 각각 지면분류 결과와 TIN을 나타낸다.

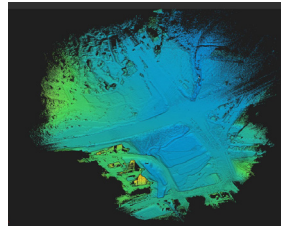


Fig. 13. Ground classification results

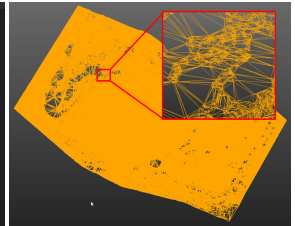


Fig. 14. TIN results

2.3. 성과물 검증

드론 사진측량 및 드론 LiDAR 성과물의 검증을 위해 연구대상지에 설치한 5점의 검사점 성과를 이용하여 드론 사진측량 및

Table 2. Check points and verification results

Coordinate of Check Point			
No.	N(m)	E(m)	H(m)
1	257762.010	240771.320	43.900
2	257866.051	240752.360	42.820
3	257975.720	240847.314	42.910
4	257866.327	240846.392	54.935
5	257600.070	240854.140	52.825

Verification Result of DSM(Drone Photogrammetry)			
No.	dN(m)	dE(m)	dH(m)
1	0.025	0.024	0.054
2	0.034	0.026	0.051
3	0.024	0.031	0.049
4	0.024	0.024	0.048
5	0.031	0.024	0.035

Verification Result of DEM(Drone LiDAR)			
No.	dN(m)	dE(m)	dH(m)
1	0.034	0.031	0.024
2	0.035	0.024	0.023
3	0.024	0.030	0.021
4	0.037	0.021	0.024
5	0.024	0.027	0.025

드론 LiDAR에 의해 제작된 성과물의 좌표성과를 비교하였다. Table 2는 성과물 검증 결과를 나타낸다.

성과물 검증 결과 드론 사진측량에 의한 DSM은 수평방향으로 최대 0.034m, 수직방향으로 최대 0.054m의 차이를 나타내었다. 드론 LiDAR 성과는 수평방향 0.035m, 수직방향 0.025m이내의 편차를 나타내었다. 드론 사진측량은 드론 LiDAR에 비해 높은 수평정확도를 나타내었으며, 수직정확도는 드론 LiDAR에 의한 방법이 더 높은 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 LiDAR의 경우 포인트클라우드 형태의 데이터에서 검사점에 대한 정확한 수평위치를 선정하기 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 2가지 방법 모두 1:1,000 수치지형도의 허용정확도 이내의 값으로 이러한 결과는 드론을 이용한 사진측량과 LiDAR에 의한 방법을 활용한 지형모델 구축이 가능함을 나타내는 것이다. Table 3은 수치지형도 구축을 위한 허용정확도이다(Ministry of Government Legislation, 2020).

Table 3. Permissible accuracy for 1:1,000 digital map

Maximum error(m)		
Plane	Contour	Height
0.4	0.6	0.3

3. 토공물량 산정 및 정확도 평가

연구대상지의 토공물량 산정을 위해 대상 영역을 선정하였다. 물량산정이 필요한 영역은 식생이 일부 있는 사면으로 평탄화를 위한 절토 예정지 도면을 이용하였다. Fig. 15는 물량산정 대상 영역을 나타낸다.

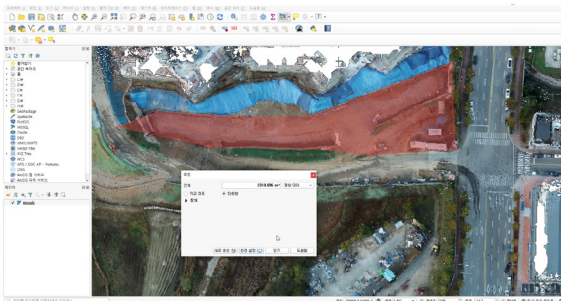


Fig. 15. Volume calculation area

대상 영역은 가건물과 식생이 일부 존재하는 지역으로 면적은 2310.70m²이다. 물량산정을 위해 대상 영역의 설계도면을 이용하여 기준면을 설정하고, 10cm 간격의 격자를 생성하

여 체적을 계산하였다. Figs. 16과 17에 사진측량과 LiDAR에 의한 물량산정 결과를 나타내었다.

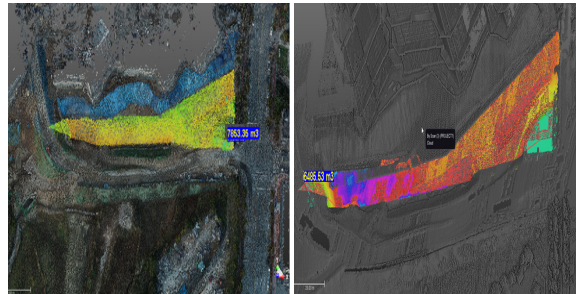


Fig. 16. Volume Calculation by UAV Photogrammetry **Fig. 17. Volume Calculation by Drone LiDAR**

토공물량 산정에 대한 정확도 평가를 위해 해당 영역의 GNSS 측량성과와 비교하였다. GNSS 측량성과는 해당지역의 중형단 측량을 통해 구축된 지형모델을 이용하여 절토량을 산정한 것이다. Table 4는 각각의 방법에 의한 물량산정 결과를 비교한 것이다.

Table 4. Comparison of volume calculation results

GNSS	DSM (Drone Photogrammetry)	DEM (Drone LiDAR)
6,325.25m ³	7,853.35m ³	6,485.53m ³

드론 사진측량은 GNSS 측량 성과와 1528.1m³의 차이를 나타내었으며, 드론 LiDAR는 160.28m³의 차이를 나타내었다. 드론 사진측량의 경우 연구대상지의 식생이나 가건물에 대한 물량이 포함되어 있어 GNSS 측량 성과보다 큰 값을 나타낸 것으로 판단된다. 드론 LiDAR는 GNSS 측량과 160.28m³의 차이를 나타내었는데 이러한 결과는 토공물량 산정을 위한 방안으로 드론 사진측량보다 드론 LiDAR에 의한 방법이 더욱 효과적임을 나타내는 것이다. Fig. 18은 드론 사진측량과 드론 LiDAR에 의한 지형모델의 차이를 나타낸다. 그림에서 노랑색은 드론 사진측량에 의한 지형모델이며, 빨강색은 드론 LiDAR에 의한 지형모델을 나타낸다.

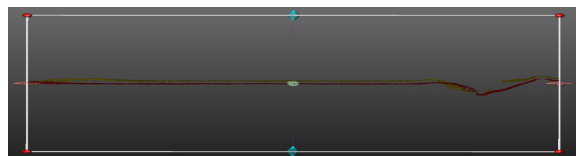


Fig. 18. Difference of Terrain Model between Drone Photogrammetry and Drone LiDAR

토공물량 산정이 필요한 지역이 산림지역인 경우 이러한 물량의 차이는 더욱 커질 것이며, 사진측량에 의한 방법은 적용이 어려울 것이다. 물량 산정을 위한 데이터 취득 및 자료 처리 시간에서도 드론 LiDAR에 의한 방법은 드론 사진측량에 비해 효율성이 높다. Table 5는 무인항공기 사진측량과 드론 LiDAR에 의한 물량산출에 소요되는 시간을 비교한 것이며, 자료처리에 사용한 워크스테이션의 사양을 함께 나타내었다.

Table 5. Comparison of working time and specification of workstation

Item	Drone Photogrammetry	Drone LiDAR
Data Aquisition	20min	15min
Data Processing	240min	60min
Volume Calculation	10min	10min
Total	270min	85min

Specification of workstation	
CPU	I9-10980XE (3.0G/24.75M/2066) 18core
Mainboard	ASUS PRIME X299-A II
Graphic card	GEFORCE RTX3070 EX BLACK D6 8G
HDD	Samsung 970EVO PLUS NVME 2TB
RAM	Samsung 32G PC4-21300 DDR4*2

식생이나 건물 등으로 인해 사진측량의 적용이 어려운 지역에서 드론 LiDAR는 토공물량 산정을 위한 효과적인 방안이 될 것이다. 드론 LiDAR는 기존의 GNSS 측량에 의한 방법보다 더욱 실제에 가까운 지형의 형상을 얻을 수 있어 산림지역에서 기존 방법보다 정확한 물량 산정이 가능할 것이다. 추가적인 연구를 통해 GNSS 측량과 드론 LiDAR를 활용한 방법으로 산림지역에서 공간정보 구축 및 비교가 이루어진다면 드론 LiDAR를 이용한 공간정보 구축의 효율성을 제시할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 드론 사진측량 및 드론 LiDAR 방법으로 지형모델을 구축하고 토공물량을 산정하였다. 드론 사진측량 및 드론 LiDAR를 이용한 방법으로 연구대상지에 대한 정사영상, DSM 및 DEM을 구축하였으며, 정확도 검증을 수행하였다. 정확도 검증 결과 각각의 방법이 수평방향 0.034m, 0.035m, 수직방향 0.054m, 0.025m의 차이를 나타내어 지형 모델 구축을 위한 드론 사진측량과 드론 LiDAR의 활용성을 제시하였다. 연구대상지의 토공물량 산정 결과, 드론 사진측량은 GNSS 측량 성과와 1528.1m³의 차이를 나타내었으며, 드론 LiDAR는 160.28m³의 차이를 나타내었다. 이러한 차이는 연구대상지의 식생 및 가건물로 인한 지형모델의 차이로 판단되며, 연구를 통해 드론 LiDAR를 활용한 토공물량 산정의 효율성을 제시할 수 있었다. 향후 추가적인 연구를 통해 GNSS 측량과 드론 LiDAR를 활용한 방법으로 산림지역에서의 지형모델 구축 및 비교가 이루어진다면 드론 LiDAR를 이용한 지형모델 구축의 효율성을 제시할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2018R1C1B6004021)

References

Ahn, K.J. and Ko, D.S. (2019), A Study on Reconstruction of 3-Dimensional Spatial Model Based on Photogrammetry Using V-World and Its Use as Urban 3D, *Journal of Digital Contents Society Content*, Vol. 20, No. 1, pp. 119-126. (in Korean with English abstract)

Choi, Y.H., Yeon, M., Kim, H.J., and Lee, D.Y. (2019), Extreme Value Analysis of Statistically Independent Stochastic Variables, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 33, No. 1, pp. 222-228.

DJI, products, *DJI*. Available From: <https://www.dji.com/kr>(last date accessed: 16 Dec 2020)

Hirschmuller, H. (2008), Stereo processing by semiglobal matching and mutual information, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 30, No. 2, pp. 328-341.

- Jin, Z, X and Baek, S.H. (2020), Identification of Primary Activity and Management Plan for Construction Standard Unit Price, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 10, pp.589-601. (in Korean with English abstract)
- Kang, J.O. and Lee, Y.C. (2020), UAV and LiDAR SLAM Combination Effectiveness Review for Indoor and Outdoor Reverse Engineering of Multi-Story Building, *Journal of Cadastre & Land InformatiX*, Vol. 50, No. 2, pp. 69-79. (in Korean with English abstract)
- Kim, B.W., Hong, S.H.; Oh, J.H., and Hwang D.Y. (2017), Evaluate the Accuracy of Drone Photogrammetry Surveying Using Water Reference Points, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 2, pp. 445-449. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.B. (2020), A Study on the Monitoring Method of Landslide Damage Area Using UAV, *Journal of the Korean Society of Industrial Application*, Vol. 23, No. 6, pp. 1043-1050. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.J., Kim, B.S., Kim, T.H., and Kim, N.G. (2019), A Study on Project Information Integrated Management Measures Using Life Cycle Information in Road Construction Projects, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 11, pp. 208-216. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.W. and Kim, Y.S. (2019), Development and Evaluation of High-precision Earth-work Calculating System using Drone Survey, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 18, No. 4, pp. 87-95. (in Korean with English abstract)
- Lee, D.G., Kim, K.D., Yang, S.Y., and Lee, H.J. (2017), Study on the Possibility of Forest Geospatial Information Generation using Past Panchromatic Forest Aerial Photograph Scanning Database, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 25, No. 4, pp. 107-116. (in Korean with English abstract)
- Lee, G.S. and Lee, J.J. (2019), The analysis of Photovoltaic Power using Terrain Data based on LiDAR Surveying and Weather Data Measurement System, *Journal of Cadastre & Land InformatiX*, Vol. 49, No. 1, pp. 17-27.
- Lee, P.Y., Lee, S.W., Byun, Y.S., Cho, C.Y., and Lee, M.J. (2018), Optimal Period by Calculating and Applying Correction Factor based on Setting of Non-Working Days of Construction Projects, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 19, No. 12, pp. 669-676. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.K., Seo, M.B., and Kim, J.W. (2020), Analysis on the Determinants of Land Compensation Cost: The Use of the Construction CALS Data, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 10, pp. 461-470. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.K., Hong J.K., and Hong, S.C. (2020), A Study on the Anomaly Prediction System of Drone Using Big Data, *Journal of Internet Computing and Services*, Vol. 21, No. 2, pp. 27-37. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Government Legislation, Regulation, Public Survey Work Regulations, *Ministry of Government Legislation*. Available From: <https://www.law.go.kr/> (last date accessed: 16 Dec 2020)
- Moon, J. H. and Yun J. J. (2019), Development of a Boat Operator Computer Scoring System Based on LiDAR and WAVE, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 25, No. 4, pp. 119-126. (in Korean with English abstract)
- Oh, J.S. and Kim, D.E. (2019), Lineament Extraction and Its Comparison Using DEMs based on LiDAR, Digital Topographic Map, and Aerial Photo in the Central Segment of Yangsan Fault, *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 54, No. 5, pp. 507-525. (in Korean with English abstract)
- Park, J.K. and Um D.Y. (2020), Comparison of Characteristics of Drone LiDAR for Construction of Geospatial Information in Large-scale Development Project Area, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 1, pp. 768-773. (in Korean with English abstract)
- Park, J.W. and Kim, S. (2018), Productivity analysis for the 3D digitization of earthwork sites based on scanning conditions, *International Journal of Railway*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-9. (in Korean with English abstract)
- Skog, I. and Händel P. (2019), In-Car Positioning and Navigation Technologies—A Survey, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 4-21.
- Song, Y.S., Lee, C.O., Oh, H.J., and Park J.H., Application

of Terrestrial LiDAR to Monitor Unstable Blocks in Rock Slope, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 29, No. 3, pp. 251-264. (in Korean with English abstract)

YellowScan, products, *YellowScan*. Available From: <https://www.yellowscan-lidar.com/> (last date accessed: 16 Dec 2020)