

## 드론 및 MMS를 활용한 건설현장 점군 데이터 통합 기술 개발

### Development of Pointcloud Data Integration Technology in Construction Sites via Drone Photogrammetry and MMS LiDAR

박재우<sup>1\*</sup>, 염동준<sup>2</sup>

Jae-Woo Park<sup>1\*</sup>, Dong-Jun Yeom<sup>2</sup>

#### 〈Abstract〉

This study presents the development of pointcloud data integration technology in construction sites via drone photogrammetry and MMS LiDAR. The integration of pointcloud data from drones and MMS technology can provide precise and accurate 3D digital maps of construction sites, which can benefit the development of smart construction and BIM. The advantages of using both drones and MMS technology for pointcloud data acquisition in construction sites are discussed, along with the limitations and challenges of using drone photogrammetry and MMS LiDAR for pointcloud data integration. The results of this study can contribute to the advancement of pointcloud data integration technology in construction sites and improve the efficiency and accuracy of construction projects.

*Keywords : Pointcloud, Construction Site, Integration, Drone Photogrammetry, MMS LiDAR*

---

1\* 정회원, 주저자(교신저자), 한국건설기술연구원, 건설정책연구소, 수석연구원  
E-mail: jwpark@kict.re.kr

2 정회원, 공동저자, 한국건설기술연구원, 건설정책연구소, 박사후연구원/공학박사

1\* Construction Policy Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

2 Construction Policy Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

## 1. 서론

최근 스마트건설의 활성화를 위한 연구 개발이 활발하게 진행됨에 따라, 도로 토공현장의 3차원 디지털화를 위한 매핑 기술이 지속적으로 개발되고 있다[1-8]. 도로 토공현장의 3차원 매핑을 위해서는 드론 사진측량을 통해 점군 데이터를 생성하거나, MMS(Mobile Mapping System) 기술을 상용차량 또는 무인 주행장치에 적용하여 LiDAR (Light Detection and Ranging) 기반의 점군 데이터를 생성하는 기술이 주로 활용된다.

점군 데이터의 취득을 위해 사용되는 드론과 MMS는 데이터 취득 위치 및 방향 등이 대비됨에 따라, 각 장비를 통해 취득된 점군 데이터는 상호 보완적인 특징을 지닌다. 드론은 현장 지면 기준 수직 상공에서 데이터를 취득하므로 수평 데이터를 중심으로 점군 데이터가 생성되는 반면, MMS의 경우 현장 측면을 위주로 데이터를 취득하게 되므로 수직 데이터를 상대적으로 더 획득할 수 있다. 또한, 점군 데이터 생성 알고리즘의 차이로 인해 일반적으로 MMS로 취득된 점군 데이터의 정밀도가 드론으로 취득된 것에 비해 우수하기 때문에 두 장비로부터 취득된 점군 데이터를 통합 활용할 때 보다 정밀하면서도 정확도 높은 도로 토공현장의 3차원 디지털화를 수행할 수 있으며, 특히 BIM(Building Information Modeling) 등의 확장 가능성이 높을 것으로 기대된다.

본 연구의 목적은 특성이 서로 다른 드론, MMS 기반의 점군 데이터를 활용하여 통합된 도로 토공 현장 디지털 맵을 생성할 수 있도록 하는 통합 기술을 개발하는 것이다. 즉, 단순히 두 점군 데이터의 오버랩(Overlap)을 수행하는 것이 아닌, 드론, MMS로부터 취득된 데이터의 특성을 고려하여 두 데이터가 상호보완적 특성을 유지할 수 있도록 하는 통합 기술을 개발하고, 실제 현장 데이터를

활용하여 통합 기술의 성능을 검증하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 드론, MMS 기술 활용 사례 분석

#### 2.1.1 드론 기술 활용 사례 분석

드론 기반의 사진측량(Photogrammetry)을 활용하여 3차원 디지털 맵을 생성하는 기술은 1)특징점 추출자(SIFT 등)을 활용한 이미지 간 매칭 포인트 추출, 2)Structure from Motion (SfM)을 통한 이미지 간 매개변수 추출, 3)Multi View Stereo(MVS)를 활용한 고밀도 점군 생성의 세 가지 단계로 구분된다.

미국 주 도로국(US State Department of Transportation) 자료에 따르면 약 20건의 드론 관련 연구 프로젝트가 진행 중이며, 지난 5년간 30건 이상의 연구보고서가 발간된 것으로 조사되었다. Table 1은 미국에서 주로 수행된 드론 관련 선행연구를 분석한 것이다.

#### 2.1.2 MMS 기술 활용 사례 분석

MMS 기반의 LiDAR를 활용하여 3차원 디지털 맵을 생성하는 원천 기술은 1)데이터 필터링, 2)특징점 및 키포인트 추출, 3)변환 매트릭스를 통한 점군 정합의 세 가지 단계를 통해 생성된다.

미국 주 교통국 자료에 따르면 현재 4개의 MMS 관련 연구가 수행 중이며, 총 14건의 연구보고서가 발간된 것을 확인할 수 있다. Table 2는 미국에서 주로 수행된 MMS 관련 선행연구를 분석한 것이다.

선행연구 분석 결과, 다양한 분야에서 드론 및 MMS를 활용한 연구를 진행하고 있는 것으로 조사되었다. 그러나, 두 방식의 서로 다른 점군 데이터 취득 및 추출 방법으로 결과물의 특성(Density, Accuracy 등)의 차이가 발생하므로 이를 통합 활용

Table 1. Literature review of research project using drones

Title	Contents
Assessment of Construction Points for Grade Control and Reference in 3D (Georgia Institute of Technology) [9]	· This technology quantifies current earthwork volume by comparing 3D design plans with the current surface model. UAVs are ideal for route surveys, but high-precision on-road surveys favor ground-based laser scanning.
Improvement of Low Traffic Volume Gravel Roads in Nebraska (University of Nebraska-Lincoln) [10]	· Research using UAV-based 3D digital maps to assess surface conditions of unpaved roads. Parameters like width, slope, and crown profile are calculated from 3D digital maps, allowing quantification of deteriorated road surfaces.
Guidelines for utilizing digital maps generated by UAVs in road construction (Georgia Institute of Technology) [11]	· An assessment of UAV digital map utility via focus group meetings and field tests. The meetings provided guidelines on data requirements, like 3D digital maps, orthoimages, and elevation models, for road construction experts.
OST-R CRS&SI Technologies Program (University of Massachusetts Lowell) [12]	· Developed the CivilEye+DIC system, which combines imaging radar and digital cameras, to assess the integrity of structures and quantitatively determine damage.
Development of Multi-Sensor Detachable Platform (ARoMI)	· Developed a technology that enables self-contained 3D modeling of construction sites without blind spots using 3D radar and SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Table 2. Literature review of research project using MMS

Title	Contents
A Comparative Study on the Efficiency of Road Construction Management Using a 3D Point Cloud Created by LIDAR and Photogrammetry (Iowa Department of Transportation) [13]	· This research assessed road flatness using 3D point clouds from Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Photogrammetry. TLS has minimal errors in typical conditions but may encounter mechanical errors. Photogrammetry results can vary based on the photographer's skill and lighting conditions. Both methods support automated data collection and analysis for road flatness management.
Assessment of Construction Points for Grade Control and Reference in 3D (Georgia Institute of Technology) [9]	· In this study, a mobile robot was introduced to create 3D digital maps during road construction. This demonstrates the potential of a Mobile Mapping System (MMS) and achieves full automation from data acquisition to analysis.
LiDAR-Based Mobile Mapping System for Lane Width Estimation in Work Zones (Purdue University) [14]	· This study presents a technology for generating 3D digital maps by integrating a multi-unit LiDAR system and GNSS/INS into the MMS. The research successfully distinguishes lanes in data based on the intensity of reflected laser beams and demonstrates a high accuracy of approximately 3 cm in field experiments.
Project Progress Tracking using LiDAR and 4D Design Models (Oregon state University) [15]	· This study calculates road facility completion using MMS-generated digital maps and 4D models, with automation expected to reduce processing times.

하는 경우는 제한적이며, 조지아텍[9]에서 유사한 수행되었으나, 다종의 센서 장비 중 상황별 계측에 유리한 장비를 선택하는 수준이며, 데이터 통합을 위한 특정한 방법론이 마련되어 있지 않아 단순 데이터의 Overlap으로 데이터의 밀도 불균일 및 계측 데이터간 단차 발생으로 인한 정확도 훼손 등의 문제점이 생길 수 있는 것으로 조사되었다. 즉, 특성이 서로 다른 드론, MMS 기반의 점군 데이터를 활용하여 통합된 도로 토공현장 디지털 맵을 생성할 수 있도록 하는 적정 방법을 마련하는 것이 시급하게 필요한 실정이다.

## 2.2 점군 데이터 통합 선행 알고리즘 분석

점군 데이터의 통합을 위해서는 일반적으로 1) Outlier 제거, 2) 다운 샘플링 등의 알고리즘이 활용될 수 있다. Table 3은 점군 데이터의 균일화 및 통합 관련 알고리즘을 분석한 것이다.

상기 알고리즘을 활용하면 점군 데이터의 균일화를 수행할 수 있으며, 균일화 방법 중 드론, MMS 데이터 통합에 가장 유리한 방법을 적용하는 것이 중요할 것으로 사료된다. 본 연구에서 언급한 문제점을 개선하기 위해 가장 적합하다고 판단되는 알고리즘은 Voxel-based down sampling이지만, 이

Table 3. Point Cloud Data Uniformization and Integration Algorithm

Title	Contents
Random Sample Consensus (RANSAC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· RANSAC generates the number of samples by extracting commonalities among randomly selected points using the following formula.</li> <li>· <math>N = \lceil \frac{\log(1-p)}{\log(1-(1-\eta)^m)} \rceil</math></li> </ul>
K-d tree	<ul style="list-style-type: none"> <li>· The k-d tree is a binary tree composed of k-dimensional points, and it organizes points using a spatially separated data structure, which helps in identifying outliers.</li> </ul>
Moving Least Square (MLS) [16]	<ul style="list-style-type: none"> <li>· MLS, which stands for Moving Least Squares, is one of the most widely used filtering techniques among the projection-based filters. It consists of two main steps, as follows:</li> </ul>
Voxel Grid (VG) Filtering	<ul style="list-style-type: none"> <li>· The VG filtering method first involves generating an arbitrary 3D grid, within which it calculates the point density. This approach aids in identifying and removing outliers within the grid.</li> </ul>
k-NN down sampling	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Similar to the k-d tree method, this approach involves classifying nearby points into k dimensions and downsampling from regions with high point density. It generally requires relatively higher computing resources compared to other methods.</li> </ul>
Voxel-based down sampling	<ul style="list-style-type: none"> <li>· This method involves converting point groups into voxels and generalizing the point density of these voxels, which is relatively complex and carries the risk of removing the original terrain characteristics of the raw data.</li> </ul>
RS-CNN down sampling	<ul style="list-style-type: none"> <li>· The RS-CNN method uses deep learning to extract local features from the original data and performs point cloud downsampling based on this, preserving the terrain characteristics of the raw data.</li> </ul>
Graph-based down sampling	<ul style="list-style-type: none"> <li>· In various deep learning-based point cloud classification technologies such as KCNet and FoldingNet, downsampling is performed using a pre-built k-NN (k-nearest neighbors) graph. This approach involves taking the maximum features of each node through max-pooling.</li> </ul>
Critical Point Layer (CPL)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· The CPL method uses feature maps that have undergone max-pooling to identify key feature points. It performs downsampling based on these identified points.</li> </ul>

를 그대로 활용하기에는 원 데이터의 훼손이 발생할 수 있다는 문제점이 있어, 본 연구에서는 이를 개선하기 위한 새로운 방법을 제안하고자 한다.

### 3. 드론 및 MMS를 활용한 건설현장 점군 데이터 통합 알고리즘 개발

#### 3.1 기술 개요

Voxel-based down sampling은 점군 그룹을 Voxel로 변환하여 Voxel들의 점군 밀도를 일반화 시키는 방식으로, 비교적 높은 복잡성을 가지며, 원 데이터의 지형적 특성을 제거할 위험이 있다. 상기 방식이 원 데이터의 지형적 특성을 제거할 위험성을 가지는 이유에 대해서 살펴보면, 해당 방식은 점군 데이터가 존재하는 영역에 대한 Voxel을 생성하고, Voxel의 중심 좌표를 기준으로 데이터를 일반화 시키는 방법을 사용한다. 점군 데이터의 밀도 조정은 단순히 Voxel의 크기를 조정하는 방법으로 수행된다. 이는 실제 계측된 점군 데이터를 활용하는 것이 아니라, 점군 데이터 인근의 Voxel 중심으로 데이터를 일반화 하는 과정을 포함하기 때문에 실질적인 계측 데이터의 활용이라고 보기에는 어려움이 있다. 이에 따라 원 데이터의 지형적 특성 제거의 위험이 있다고 판단된다.

본 연구에서 제안하는 기술은 Voxel을 기반으로 데이터를 균일화하는 과정에 있어서는 기존 기술과 유사하다고 할 수 있으나, Voxel 내에서 원본 점군 데이터의 밀도를 분석하고, 사용자가 필요로 하는 밀도만큼 그 Voxel의 중심에서 가장 먼 데이터를 순차적으로 제거해나가는 방법이다. 이를 위한 설명은 Fig. 1을 보면서 확인 할 수 있다.

Fig. 1에서와 같이 한 변의 길이 a를 가지는 임의의 Voxel을 생성하면 Voxel 내부에 다수의 점군 데이터가 들어있게 된다. 이때 하나의 Voxel의

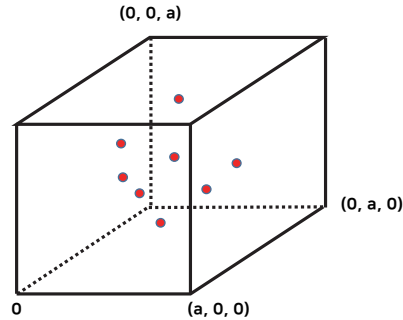


Fig. 1 Point group data samples in one voxel

중심점( $\frac{1}{2}a, \frac{1}{2}a, \frac{1}{2}a$ )을 기준으로 Voxel 내 점군 데이터 간의 거리를 계산한다. 거리 계산을 위한 일반적인 식은 식 1과 같다.

$$Distance = \sqrt{(x_1 - \frac{1}{2}a)^2 + (y_1 - \frac{1}{2}a)^2 + (z_1 - \frac{1}{2}a)^2}$$

...

$$Distance = \sqrt{(x_n - \frac{1}{2}a)^2 + (y_n - \frac{1}{2}a)^2 + (z_n - \frac{1}{2}a)^2} \quad (1)$$

본 연구에서는 식 (1)과 같이 계산된 n개의 계산 결과를 Distance 값이 큰 순서대로 정렬하여, 사용자의 밀도 선택 정도(1개의 Voxel 내에 몇 개의 점군 데이터를 남길 것인지를 선택)에 따라 값이 큰 것부터 제거해 나가는 방식을 적용하고자 한다. 이는 정확도의 우선순위를 고려한 점군 데이터의 선별 방법으로 원 데이터의 특성을 최대한 살릴 수 있다는 장점이 있어 기존 방법에 비해서 건설현장의 특성을 보존하는데 유리하다.

#### 3.2 알고리즘 설계

3.1절에서 제안한 기술이 기존 기술에 비해 훨씬 복잡한 연산 과정을 거치기는 하지만, 원본 데이터에 대한 훼손을 발생시키지 않고, 신뢰도가 높은 점군 데이터를 순차적으로 선택하게 됨으로써 원 데이터의 지형적 특성 제거의 위험이 현저

히 낮아진다. 이를 일반화된 알고리즘으로 정리한 것은 Fig. 2와 같다.

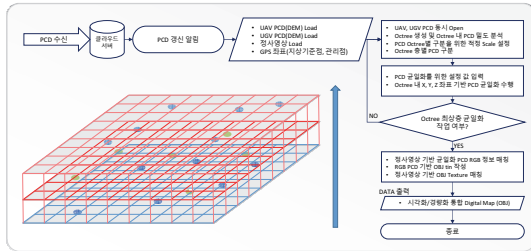


Fig. 2 Modified voxel-based down sampling algorithm

상기 알고리즘은 드론 및 MMS를 활용한 건설 현장 점군 데이터의 활용에 있어 데이터를 통합 활용하기 위한 새로운 방법을 제시하고 있다. 기존에는 본 연구에서 제시하는 기술을 활용하지 못하거나, 일부 활용한다고 해도 원 데이터의 훼손을 가져온다는 한계점이 있었으나, 해당 방법을 적용할 경우 각 장비를 통해 취득된 점군 데이터는 상호보완적인 특징을 모두 살리면서, 보다 정밀하면서도 정확도 높은 도로 토공현장의 3차원 디지털화를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 알고리즘 시스템 반영 및 검증

##### 4.1 개발 알고리즘 시스템 반영

본 연구에서는 선행연구[17]를 통해 한국건설기술연구원에서 개발되었던 DML 시스템에 점군 데이터 통합 기능을 추가하였다(Fig. 3).

추가된 기능은 “큐빅짐”이라는 옵션을 통해 작동할 수 있도록 구현하였으며, 3.2절의 알고리즘 설계에서 고안된 것처럼 격자로 구성된 큐빅 내에서 1점만을 보존하는 방식으로 시스템에서 구현되

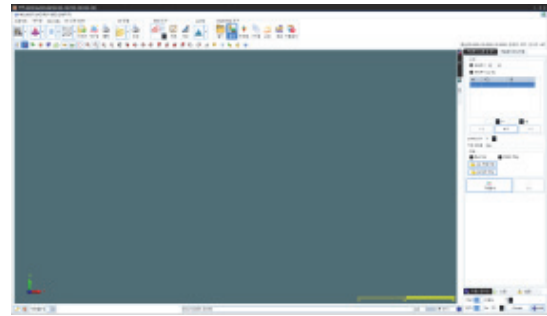


Fig. 3 Main screen of DML software

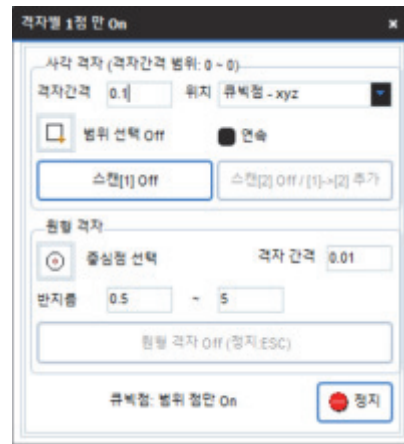


Fig. 4 Modified voxel-based downsampling function

었으며, 격자(Voxel-grid)의 간격 설정을 통해 LOD(Level of Detail)를 설정할 수 있도록 고안하였다(Fig. 4).

##### 4.2 개발 기능 검증을 위한 현장 데이터 수집

본 연구에서 개발 기능을 검증하기 위해 대상으로 삼은 현장은 경기도 용인시 소재의 260×170m 규모 소규모 공동주택 현장이다(Fig. 5). 현장 내의 고저차는 최대 55m로 드론과 MMS 데이터의 상호보완이 이뤄지기 적합한 환경을 지닌 것으로 판단된다.

### 4.3 개발 시스템 현장 검증 결과

#### 4.3.1 드론 기반 점군 데이터 취득

본 연구진은 해당 현장에 대해 드론 사진측량을 실시하여 데이터 취득을 수행하였다. 데이터 취득에는 DJI社 Inspire2 기체가 활용되었으며, 영상 취득에는 Zenmuse X5S 카메라가 사용되었다. 사진 후처리는 Pix4D Mapper 4.7.5가 활용되었으며, Fig. 5의 현장 전경은 드론 측량 데이터로 생성된 점군 데이터를 보여준다.

점군 데이터의 상호보완성을 확인하기 위해 선정한 구간은 Fig. 6는 흙막이 옹벽이 설치된 구간으로, 구조물이 수직으로 설치되어 있어 드론 데이터의 소실구간 확인이 용이하다.

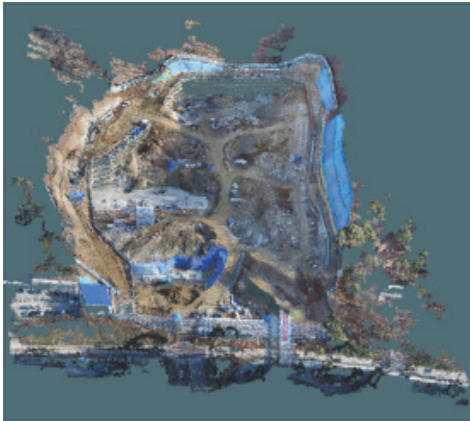


Fig. 5 Target site overview

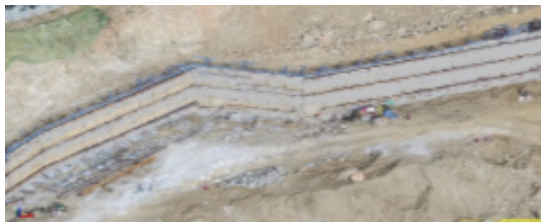


Fig. 6 Retaining wall sections verified with drone pointcloud data

#### 4.3.2 MMS 기반 점군 데이터 취득

본 연구진은 추가로 해당 현장에 대해 MMS를 투입하여 LiDAR 기반 점군 데이터를 취득하였다. 데이터 취득에는 Topcon社의 IP-S3 장비가 활용되었으며, 점군 데이터의 취득을 위해 설치된 Velodyne社의 32ch. LiDAR를 활용하여 점군 데이터의 취득을 수행하였다. 취득된 데이터는 전용 프로그램인 MAGNET Collage를 통해 후처리되었다.

마찬가지로 점군 데이터의 상호 보완성 확인을 위한 선정한 대상지의 MMS 취득 데이터는 Fig. 7에서 확인할 수 있다. MMS 데이터 취득은 차량이 진입 가능한 가도에서만 이뤄지기 때문에 수평 데이터의 소실이 다소 발생한 것을 확인할 수 있는 반면, 옹벽부 데이터는 풍부하게 취득된 것을 확인할 수 있다.



Fig. 7 Retaining wall sections verified with MMS pointcloud data

#### 4.3.3 개발 시스템 검증

기존 DML 시스템에 반영되어 있는 통합 알고리즘은 Voxel-based down sampling 방식으로, 일반적인 방식과의 차이점은 Voxel의 중심점이 아닌 Voxel 중심의 바닥점을 대상으로 점군 데이터의 균일화를 수행한다는 점이다. 기존 알고리즘을 통해 통합된 점군 데이터는 Fig. 8과 같으며, 옹벽부 데이터의 소실이 기존 대비 강화된 것을 확인할 수 있다.

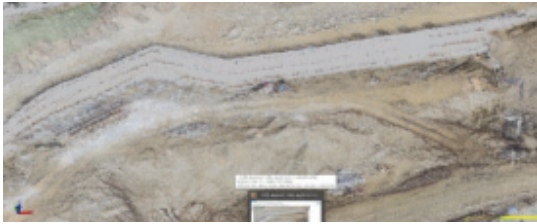


Fig. 8 Retaining wall data using voxel-based down sampling

반면, 본 연구를 통해 개발된 Modified Voxel-based down sampling 방식을 사용할 경우, Fig. 9와 같이 수평, 수직 데이터가 고르게 균일화되어 통합된 것을 확인할 수 있다.

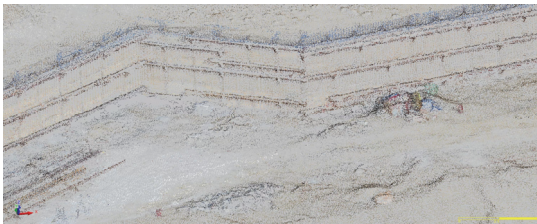


Fig. 9 Retaining wall data using modified voxel-based down sampling

## 5. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 드론, MMS 기술의 활용 사례 분석 결과, 다양한 분야에서 드론 및 MMS를 활용한 연구를 진행하고는 있으나, 두 방식의 차이로 인해 이를 통합 활용하는 경우는 제한적이며, 유사 선행 연구의 경우도 데이터의 밀도 불균일 및 계측 데이터간 단차 발생으로 인한 정확도 훼손 등의 문제점이 생길 수 있는 것으로 분석되었다.

- 2) 점군 데이터 통합에 대한 선행 알고리즘 분석 결과, 드론, MMS 데이터의 통합을 위해 가장 적합한 알고리즘은 Voxel-based down sampling으로 분석되었으나, 원 데이터 훼손의 문제로 이를 그대로 활용할 수 없어 개선 알고리즘의 개발이 필요한 것으로 분석되었다.

- 3) 드론, MMS 점군 데이터 통합을 위해 Modified voxel-based down sampling 알고리즘이 고안되었으며, 해당 알고리즘은 선행 연구를 통해 개발된 DML 시스템에 적용되었다.

- 4) 개발 시스템을 활용한 현장 검증 결과, 기존 알고리즘을 활용할 때 옹벽부 데이터의 소실이 강화되는 반면, 개발 알고리즘을 활용할 때 수평, 수직 데이터가 고르게 균일화되어 데이터 소실이 최소화된 것을 확인하였다.

추후 연구를 통해 드론과 MMS 데이터의 통합뿐만 아니라, 수평적으로 데이터를 취득하는 TLS, UGV 등에도 적용하여 기술 검증을 수행해야 할 것이며, 수치적인 정확도 분석을 통해 개발 기술의 우수성을 검증해야 할 것으로 판단된다. 개발 기술이 성공적으로 현업에서 활용될 경우 건설현장 3차원 디지털화를 보다 정밀하고 정확도 높게 수행함으로써, BIM, AR, VR 등 다분야로 확장될 가능성이 높을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(스마트 건설기술 개발사업: 23SMIP-A158708-04).



## 참고문헌

- [1] J. Xu, L. Ding, P.E. Love, “Digital reproduction of historical building ornamental components: from 3D scanning to 3D printing”, *Automation in Construction*, 76, pp.85-96, (2017).
- [2] Y. H. Lee, W. G. Yun, J. W. Park, “A Study on the Development of the Guidelines for Supervision and Inspection of Earthworks Quantity Using 3D Scanning Technology”, *Journal of The Korean Society of Industry Convergence*, 23(5), pp.735-746, (2020).
- [3] M.J. Chae, G.W. Lee, J. Y. Kim, J.W. Park, M.Y. Cho, “A 3D Surface Modeling System for Intelligent Excavation System”, *Automation in Construction*, 20(7), pp.808-817, (2011).
- [4] S. Kim, J.W. Park, “Analysis of Accuracy and Productivity of Terrestrial Laser Scanner for Earthwork”, *The Journal of the Korea Contents Association*, 15(10), pp.587-596, (2015).
- [5] J.W. Park, D.J. Yeom, “Method for Establishing Ground Control Points to Realize UAV-based Precision Digital Maps of Earthwork Sites”, *Journal of Asian Architecture and Building Technology*, 21(1), pp.110-119, (2022).
- [6] S. El-Omari, O. Moselhi, “Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work”, *Automation in Construction*, 18(1), pp.1-9, (2008).
- [7] J.W. Park, S. Kim, “MMS Accuracy Analysis for Earthwork Site Application”, *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, 22(2), pp.183-189, (2019).
- [8] Yi Lin, Juha Hyypää, Tomi Rosnell, Anttoni Jaakkola, Eija Honkavaara, Development of a UAV-MMS-Collaborative Aerial-to- Ground Remote Sensing System – A Preparatory Field Validation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(4), pp.1893-1898, (2013).
- [9] Y. K. Cho and J. Park, “Assessment of Construction Points for Grade Control and Reference in 3D”, *Georgia DOT Research Project 16-18 Final Report*, (2019).
- [10] Z. Shen, E. Erdogmus, G. Morcoux, C. Cheng, Z. Shang, T. McCabe and A. Kodsy, “Early Detection of Near-Surface Void Defects in Concrete Pavement Using Drone Based Thermography and GPR Methods”, *Nebraska DOT Research Reports Issue January*, (2020).
- [11] J. Irizarry and E. N. Johnson, “Field-Test-Based Guideline Development for the Integration of Unmanned Aerial Systems (UASs) in GDOT Operations”, *Georgia DOT Research Project #16-09 Final Report*, (2019).
- [12] K. Leonard, “United States Department of Transportation Annual Modal Research Plans”, *OST-R CRS&SI Technologies Program*, (2019).
- [13] A. Alhasan, K. Younkin, D. J. White, “Comparison of Roadway Roughness Derived from Lidar and SFM 3D Point Clouds”, *Iowa State University Digital Repository InTrans Project Reports*, (2015).
- [14] A. Habib, Y. Lin, R. Ravi, T. Shamseldin and M. Elbahnasawy, “LiDAR-Based Mobile Mapping System for Lane Width Estimation in Work Zones” *JOINT TRANSPORTATION RESEARCH PROGRAM*, (2018).
- [15] Y. Turkan, M. J. Olsen, J. A. Gambatese, “Project Progress Tracking using LiDAR and 4D Design Models”, *Oregon DOT Tech Report, FHWA-OR-RD-19-12*, (2019).
- [16] S. Fleishman, D. Cohen-Or, C. . Silva, “Robust Moving Least-squares Fitting with Sharp Features”, *ACM Transactions on Graphics*, 24(3), pp.544-552, (2005).
- [17] J. W. Park, W. G. Yun, S. S. Kim, J. H. Song, “A Study on 3D Geospatial Information Model based Influence Factor Management Application in Earthwork Plan”, *The Korean Society of Industry Convergence*, 22(2), pp.125-135, (2019).