

# 드론을 활용한 철근콘크리트 말뚝기초 시공 오차 자동화 측정 방법

성현우<sup>1</sup> · 김진호<sup>2</sup> · 강현욱<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>(주)현대특수건설 주임연구원 · <sup>2</sup>(주)현대특수건설 연구실장 · <sup>3</sup>광주대학교 건축학부 건축공학과 조교수

## Automated Measurement Method for Construction Errors of Reinforced Concrete Pile Foundation Using a Drones

Seong, Hyeonwoo<sup>1</sup>, Kim Jinho<sup>2</sup>, Kang, HyunWook<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher, Hyundai Teuksu Construction Research Center

<sup>2</sup>Head of Research Division, Hyundai Teuksu Construction Research Center

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Gwangju University

**Abstract :** The purpose of this study is to present a model for analyzing construction errors of reinforced concrete pile foundations using drones. First, a drone is used to obtain an aerial image of the construction site, and an orthomosaic image is generated based on those images. Then, the circular pile foundation is automatically recognized from the orthomosaic image by using the Hough transform circle detection method. Finally, the distance is calculated based on the the center point of the reinforced concrete pile foundation in the overlapped data. As a case study, the proposed concrete concrete pile foundation construction quality control model was applied to the real construction site in Incheon to evaluate the proposed model.

**Keywords :** Drone, Reinforced Concrete Pile, 3Dimension Modeling, Hough Transform Circle Detection Method

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

현재 건축, 토목, 플랜트 건설사업에서 드론을 활용한 관리기술 및 측량기술이 개발되면서 활용도 또한, 지속적으로 확대되고 있다. 즉, 드론을 활용한 이미지 촬영기술을 적용하여 관리자가 육안으로 확인할 수 있는 장소적 한계의 보완이 가능한 것이다. 또한, 드론은 관리자가 필요로 하는 광범위한 자료를 수집하기 위한 시간을 단축할 수 있으며, 이와 같이 수집된 자료를 통하여 측량, 모니터링, 안전관리 등에 대한 의사결정 기초자료로 활용되고 있다(Kim, 2020).

건설산업에서의 드론기술과 관련된 주요 선행연구를 살

\* **Corresponding author:** Kang, Hyun-Wook, Department of Architectural Engineering, Gwangju University, 277 Hyodeok-Ro, Nam-Gu, Gwangju, Korea  
**E-mail:** khw@gwangju.ac.kr  
**Received** December 6, 2021: **revised** January 10, 2022  
**accepted** January 26, 2022

※ 본 논문은 석사학위논문(성현우, 드론을 활용한 건설현장의 철근콘크리트 말뚝기초 시공 오차 분석 모델 제안 및 사례를 통한 검증)의 주요 연구 내용과 결과를 요약한 것임.

펴보면, 넓은 대지에서 진행되는 토목공사, 플랜트공사를 중심으로 토공량 산정, 안전관리, 현장 모니터링 분야에 적용하기 위한 연구와 드론으로 촬영된 이미지를 3차원 모델링으로 변환하여 공정진행 등에 관련된 의사결정을 명확하게 하기 위한 연구 등이 수행되었다(Sin, 2019). 그러나 건축시 설물(주상복합, 사무동, 공동주택 등)의 공사는 대지가 협소한 도심지 또는 고층으로 건설되므로 드론을 활용하는 범위가 상대적으로 제한된다. 이에 따라 건축공사를 진행하는 단계에서 드론을 활용시켜 촬영하기 위한 장애물이 없는 환경 조건과 촬영된 이미지로 시공 정밀도 등을 측정하고 확인할 수 있는 공정을 검토해 보면, 토공 및 지정공사가 적합하므로 지상층 공사가 진행되기 전 단계인 토공 및 지정공사 단계에서 드론을 활용한 측량 및 관리기술의 개발과 적용을 위한 연구가 필요하다. 즉, 대규모 공동주택 등과 같은 건축공사는 많은 수량의 말뚝을 시공하고 그 시공된 말뚝의 오차를 기능공이 직접 육안으로 측정하는 방법에서 드론을 활용하여 촬영된 이미지와 말뚝구조도면과 일치시켜 시공오차를 측정함으로써 생산성을 향상시킬 수 있기 때문이다.

따라서 본 연구는 건축공사의 토공 및 지정공사 단계에서 드론을 활용하여 철근콘크리트 말뚝기초의 시공 오차를 측정하기 위한 자동화 모델을 제시하고 사례연구를 통하여 제

시된 모델의 활용성을 검증하는 것으로 구체적인 목적은 다음과 같다.

첫째, 드론으로 촬영된 이미지와 3차원 모델링 기술 그리고 허프 변환 원형 검출 방법을 적용하여 시공된 말뚝기초를 자동으로 인식하는 모델을 제시한다.

둘째, 제시된 모델의 활용성을 검증하기 위하여 토공 및 지정공사가 진행 중인 건축시설물 1개소를 선정하고 드론으로 촬영된 이미지와 말뚝기초 구조도면과 중첩시켜 시공 오차를 확인한다.

### 1.2 연구의 범위 및 절차

본 연구는 드론을 활용하여 말뚝기초의 시공 오차를 분석하는 모델을 제시하고 그 모델의 활용성을 검증하고자 사례 연구를 하는 것이다. 사례연구를 위한 대상은 토공 및 지정공사가 진행되고 있는 건축물 건설현장으로 한정하여 제시된 모델의 활용성을 검증한다. 상기와 같은 연구의 목적과 범위에 따른 연구절차를 구체적으로 설명하면 다음과 같다.



Fig. 1. Process of Research

1) 드론(Drone) 기술의 개발 현황과 건설산업에서 드론을 활용하기 위한 선행연구를 고찰한다.

2) 본 연구의 목적에 따라 드론을 이용하여 말뚝기초 시공 오차를 분석하기 위한 모델을 제시하며, 세부적으로 시공 오차를 분석하기 위한 모델 구성, 말뚝기초 시공 오차를 분석하기 위한 필요자료 수집 대상 그리고 말뚝기초 시공 오차 분석 및 시각화 방법으로 분류하여 설명한다.

3) 제시된 말뚝기초 시공 오차 분석 모델의 활용성을 검증하기 위한 사례연구를 한다. 사례연구는 착공 후 토공 및 지정공사가 진행되고 있는 교육시설물 건축현장 1개소를 선정하여 실제로 드론을 활용시켜 항공이미지를 촬영하고 정사모자이크<sup>1)</sup> 이미지를 생성한다.

4) 상기와 같이 촬영된 이미지를 허프 변환 원형 검출 방

법<sup>2)</sup>에 적용하여 정사모자이크 이미지를 원형의 말뚝으로 인식시키게 하였다.

5) 마지막으로 원형의 말뚝을 인식한 결과에 구조도면을 중첩시켜 정사모자이크 이미지와 구조도면의 말뚝 중심점을 기준으로 연단거리를 계산하고, 수평 위치변동 10cm 또는 15cm를 기준으로 시공 오차를 분석한다.

## 2. 드론 기술 및 선행연구 고찰

### 2.1 드론 기술 개발 현황

과거 드론은 첨단 군사기술 및 스포츠 경기, 미디어 제작 등을 촬영하기 위한 레저용 기술로 활용되고 있었으나, 최근에는 드론을 각기 다른 산업 분야에 적합하게 개량하여 활용하고 있다. 이에 따라 민간 드론 시장은 급격한 성장세를 보였으며, 향후 5년 동안에는 이전보다 더 빠르게 성장할 전망이다(Kang, 2015).

글로벌 리서치 기관인 Statista에서 발표한 자료에 따르면, 2016년부터 2025년까지 세계 민간 드론 시장의 규모는 지속적으로 증가할 것이며, 2025년까지 12,647백만 달러(한화 약 14조 7,150억 원)까지 규모가 커질 것으로 예상하고 있다(Statista, 2016).

글로벌 리서치 기관인 Statista의 통계자료와 같이 2025년도의 민간 드론 시장 규모는 2016년도 대비 약 21배 증가할 것으로 예측하였다.

### 2.2 건설분야 드론 선행연구 고찰

건설분야에서 드론을 활용하기 위하여 진행된 주요 선행연구를 살펴보면 다음과 같다.

드론을 활용한 측량기술 개발과 측량 시 사용되는 상용 Software에 대한 성능 등을 비교하였으며(Lee, 2018), 드론을 이용하여 건설현장관리, 자재조달관리, 유지관리에 활용하기 위한 방안과 적용 가능성을 분석하였다(Kim, 2015). 그리고 항공측량 기법을 적용하여 수직 경사면에 위치한 도로와 같은 지형을 3차원으로 모델링하는 방법과 드론 카메라 각도를 지면과 수평하게 조정할 경우 또는 45° 조정할 경우에 대한 3차원 모델링 구현 방법을 연구하였다(Aguera-Vega, 2018). 드론을 이용한 측량연구 중에서 착공 전에 대

1) 정사모자이크(orthomosaic, orthophotograph)는 스케일과 왜곡이 균일하도록 기하학적으로 보정된 항공 사진 또는 위성 이미지이다.  
 2) 영상 내 2차원 (x, y) 좌표공간의 픽셀들은 (r, θ) 매개변수 공간에서 곡선의 형태로 나타난다. 또한 (x, y) 좌표공간에서 같은 직선상에 존재하는 픽셀들의 경우 (r, θ) 매개변수 공간에서 교점이 존재한다. 허프 변환 원형 검출 방법은 이러한 특징을 이용하여 영상의 특징픽셀들을 (x, y) 좌표공간에서 (r, θ) 매개변수 공간으로 사상(mapping)시킨 후, 보팅 과정을 통해 교점을 찾아 원의 형태를 추출하는 방법이다.

지를 촬영하고 그 정보를 기반으로 3차원 모델을 생성하여 토공량(절토량, 반출량, 되메우기량 등)을 측정하는 방법도 제안되었다(Siebert Teizer, 2014).

선행연구를 고찰한 결과, 현재 건설분야에서 드론은 항공 촬영 정보를 이용하여 측량을 하기 위한 방법으로 사용되고 있다는 것을 확인할 수 있었으며, 특히, 토목 공사의 토사량을 산출하기 위한 목적으로 드론을 이용한 항공촬영 및 측량에 대한 연구가 활발히 진행되었다(Lee, 2020). 즉, 드론은 항공촬영에 의하여 수집된 자료를 기반으로 사용자가 확인 및 분석하고자 하는 결과를 도출하는 도구이기 때문에 드론이 활용하는 경로 상에 장애물이 없어야 한다. 이에 토목, 플랜트분야에서는 착공, 시공, 준공단계에서 다양하게 활용되지만, 건축분야에서는 지상층 공사가 진행되고 그 내부에서 마감, 전기, 기계 등 각종 공사가 진행되므로 토공 및 지정공사단계에서 적극적으로 활용되고 있는 것이다.

반면에, 드론을 활용한 항공측량기법을 사용하여 시공되는 구조물 등에 대한 오차를 측정하는 선행연구가 부족하므로 건축물의 토공 및 지정공사단계에서 철근콘크리트 말뚝기초의 시공 오차를 분석하는 방법을 제시하고자 한다. 즉, 기존에는 시공된 말뚝을 기능공이 직접 육안으로 측정하여 도면과 비교한 후 오차를 판단하였으나, 이와 같은 방법은 인력 및 공정관리 측면에서 생산성이 저하되는 문제가 발생할 수 있다.

따라서 드론을 활용하기 위한 장애물이 없는 토공사 단계에서 많은 수량의 말뚝에 대한 시공오차를 신속하게 측정하고 결과를 정량적으로 도출함으로써 의사결정의 생산성을 향상하기 위함이다.

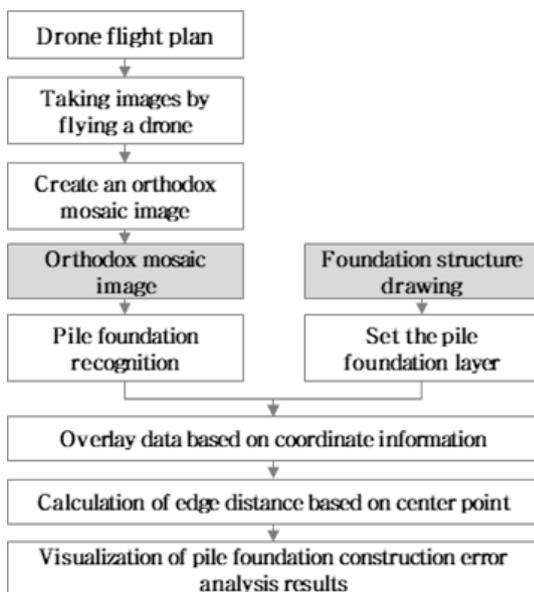


Fig. 2. Process of Construction Error Analysis Mode

### 3. 말뚝기초 시공 오차 분석 모델

#### 3.1 말뚝기초 시공 오차 분석 모델 구성

말뚝기초의 시공 오차를 분석하기 위한 모델은 ① 항공 이미지를 촬영한 결과를 정사모자이크 이미지로 생성한다. 정사모자이크 이미지는 다양한 각도에서 촬영한 다수의 이미지를 하나로 결합한 이미지이다. ② 허프 변환 원형 검출 방법을 활용하여 정사모자이크 이미지에서 원형 형태의 말뚝기초를 자동으로 인식하는 과정을 거친다(Park, 2014). ③ 말뚝기초 인식 결과를 포함하는 정사모자이크 이미지와 말뚝기초 구조도면을 중첩시킨다. ④ 중첩된 정사모자이크 이미지와 구조도면 상의 말뚝기초 중심점을 기준으로 연단거리를 계산하고, 수평 위치변동 10cm~15cm를 기준으로 말뚝기초의 시공 오차를 분석한다.

드론의 비행과 정사모자이크 이미지 생성은 DJI사의 GS Pro<sup>3)</sup> 소프트웨어를 사용하였으며, 정사모자이크 이미지가 생성되면 파이썬(Python 3.7)을 사용하여 말뚝기초 자동 인식 및 연단거리 계산 방법을 구현하였다. 본 연구에서 사용한 DJI사의 GS Pro와 파이썬 개발 환경에 대한 자세한 설명은 아래와 같다.

드론을 통해 건설현장의 항공이미지를 촬영하기 위해서 DJI사의 원격 비행 어플리케이션인 DJI GS Pro를 사용하였다. DJI GS Pro 어플리케이션은 항공이미지를 촬영하기 위한 대상 구역의 비행경로 및 이미지 촬영 방식을 설정하면 자동으로 항공이미지를 확보할 수 있다. 그리고 각 항공이미지에 대한 3차원 좌표 정보와 비행경로 데이터까지 확보할 수 있어 3차원 모델 및 정사모자이크 이미지 생성 과정에서 정확도의 개선이 가능하다.

항공이미지를 처리하기 위한 3차원 사진 측량 소프트웨어는 Pix4D<sup>4)</sup>사의 Pix4Dmapper를 사용하였다. Pix4D는 스위스의 컴퓨터비전연구소에서 개발한 3차원 데이터 처리 전문 소프트웨어로 경량 무인비행기나 드론이 촬영한 다수의 이미지를 사용하여 정사모자이크 이미지와 3차원 모델을 생성하기 위한 목적으로 개발되었다.

이와 같은 Pix4Dmapper 소프트웨어를 건설현장에서 활용하는 경우 지상기준점(Ground Control Point; GCP)에 대한 GPS 정보를 추가적으로 입력함으로써 카메라의 내·외부 매개변수를 산출하여 왜곡을 최소화하는 항공이미지 정합의 최적화 과정을 거친다. 항공이미지의 정합 시 지상기준점 개수가 많을수록 정합의 정확성이 증가하며, 왜곡의 발생 가능성을 낮출 수 있다. 위와 같은 이미지 정합 및 최적화 과

3) WWW.dji.com

4) WWW.pix4d.com

정을 거치면 건설현장에 대해 높은 정확도를 지닌 고해상도 정사모자이크 이미지를 생성할 수 있다.

생성된 정사모자이크 이미지 내에서 말뚝기초를 자동으로 인식하고 정사모자이크 이미지와 구조도면을 중첩한 후 말뚝기초의 중심점을 기준으로 연단거리를 계산하기 위한 상용 소프트웨어가 존재하지 않기 때문에 본 연구에서는 파이썬과 OpenCV (Open Source Computer Vision) 라이브러리를 사용하여 기능을 구현하였다.

OpenCV는 컴퓨터비전과 관련된 프로그래밍을 보다 쉽게 사용할 수 있도록 영상처리, 3D 구성, 추적, 기계학습, 인식, 딥러닝 등 유용한 기능을 다수 포함하는 공개 프로그래밍 라이브러리이다. 본 연구에서는 파이썬 3.7 버전과 OpenCV 3.3 버전을 사용하여 프로그래밍하였다.

### 3.2 말뚝기초 시공 자료 수집 방법

본 연구에서는 회전의 쿼드콥터인 DJI사의 Mavic 2 Zoom 기체를 사용하여 항공이미지를 수집하며, Mavic 2 Zoom은 무게 905g, 크기 322×242×84mm의 소형 드론이며, 사방면에 장애물감지 센서가 부착되어 있어 건설현장 내 존재하는 크레인 및 각종 물체와의 충돌을 방지할 수 있다.

또한, Mavic 2 Zoom은 1/2.3형 12MP CMOS 이미지센서와 2배 광학 줌 렌즈(24mm~48mm, 35 동급)를 가지고 있기 때문에 와이드 앵글부터 미드레인지까지 사용자의 조작에 따라 설정을 용이하게 변경하여 다양한 항공이미지 수집이 가능하다. 그리고 DJI Mavic 2 Zoom은 소형 드론으로서 최초로 100m 거리에서 신속하게 줌 인하여 특정 영역에 대한 세부적인 정보를 지닌 항공이미지를 수집할 수 있다.



Fig. 3. Drone Image

본 연구에서는 드론의 비행은 DJI사의 GS Pro 어플리케이션을 통해 카메라 각도를 지면과 수평으로 조정된 경우와 지면으로부터 45°로 기울어지도록 조정된 경우로 구분하여 자동 비행을 수행하였다. 카메라 각도를 지면과 수평으로 조정하여 확보한 이미지는 말뚝기초의 상단부에 대한 형상 정보를 파악하기에 적합하며, 카메라 각도를 지면으로부터 45°로 기울어지도록 조정하여 확보한 이미지는 말뚝기초의 측면부에 대한 형상 정보를 파악하기에 적합하기 때문이다.

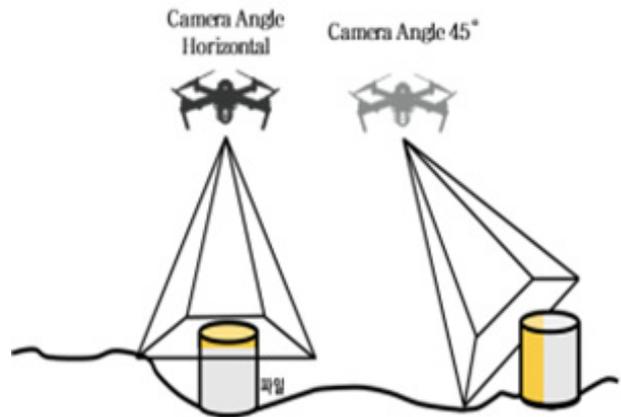


Fig. 4. Camera Shooting Angle

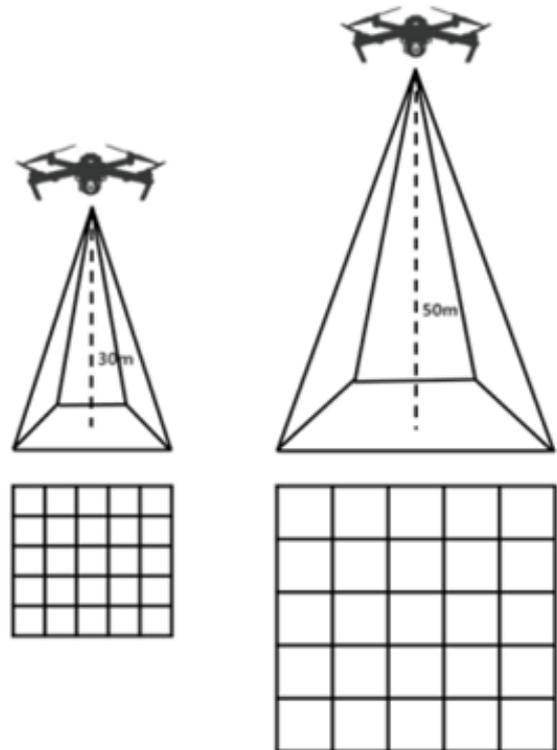


Fig. 5. GSD by Flight Altitude

드론의 비행은 지면으로부터 30m와 50m 고도에서 반복적으로 수행된다. 비행고도는 이미지의 Ground Sampling Distance (GSD)에 직접적으로 영향을 미치기 때문에, 최종 결과물인 정사모자이크 이미지의 정밀도 측면에서 중요하게 고려되어야 한다. Mavic 2 Zoom의 내장 카메라 최고해상도인 4K (4,000×3,000)로 설정할 시 비행고도가 30m인 경우의 GSD는 약 1cm이며, 50m인 경우의 GSD는 약 1.7cm이다.

각 이미지간 겹치는 영역에 대한 비율은 수직 방향 85%, 수평 방향 70%로 설정하였다. 이는 눈과 모래로 덮인 지형에 대한 이미지를 확보하는 경우에 대해 Pix4D사에서 명시한 권장 겹침 비율을 반영한 것이다. 철근콘크리트 말뚝 기

초 시공이 이루어지는 기초 공사 단계에서의 건설현장은 대부분 유사한 색상과 형상을 지닌 흙과 모래로 이루어져 있기 때문에 이미지 내 시각적으로 특징이 적다. 따라서 이미지의 겹치는 영역에 대한 비율을 보다 높은 수준으로 설정하여야 이후 이어지는 3차원 모델 생성 과정에서 정확성을 확보할 수 있다.

### 3.3 말뚝기초 시공 오차 분석 및 시각화 방법

건설현장 전역에 대한 정사모자이크 이미지에는 수많은 말뚝기초가 존재하기 때문에, 사용자가 일일이 말뚝기초를 표시하는 것은 많은 시간이 소요되므로 말뚝기초를 자동으로 인식하기 위한 허프 변환 원형 검출 방법을 사용하였다. 허프 변환(Hough Transform)은 디지털 이미지의 형상 인식을 위해 널리 사용되는 방법이다.

말뚝기초를 자동으로 인식하기 위한 방법을 설명하면 다음과 같다. 정사모자이크 이미지와 말뚝기초 구조도면과 중첩하기 위해서는 설계기준점이 위치한 영역이 포함되도록 비행계획을 수립하여야 한다. 설계기준점은 착공 전 X, Y, Z의 3차원 좌표를 GNSS (Global Navigation Satellite System)장비를 통해 측량하여 위치·표고 등이 표시된 지점을 말한다. 즉, 도면작성을 비롯하여 각종 측량의 기준점이 되는 축점이다.

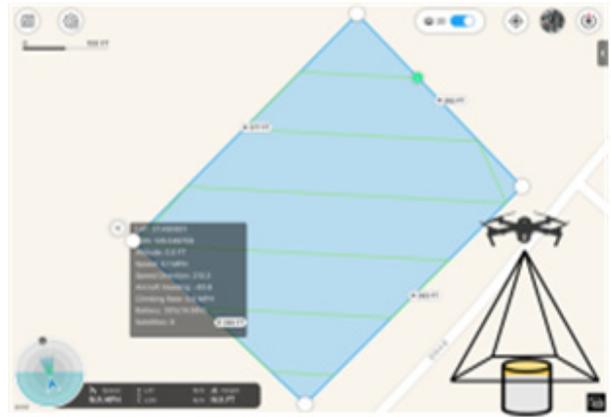
즉, 구조도면에서 설계기준점의 위치를 알 수 있고 해당 설계기준점은 현장에서 사용하는 좌표계에 따라 3차원 좌표가 표시되기 때문에 정사모자이크 이미지의 설계기준점에 3차원 좌표를 입력함으로써 두 데이터는 동일한 좌표계와 스케일 값을 갖게 되어 자동으로 중첩이 가능한 것이다. 그리고 허프 변환 원형 검출 방법을 통해 정사모자이크 이미지에서 말뚝기초를 자동으로 인식한 뒤, 정사모자이크 이미지와 말뚝기초 구조도면을 중첩시켜 말뚝기초의 중심점에 대한 거리를 계산할 수 있다. 이와 같이 말뚝기초를 자동으로 인식하기 위한 허프 변환 원형 검출 방법으로 본 연구에서는 Python의 영상처리 라이브러리인 OpenCV에 내장된 허프 원형 검출 알고리즘을 사용하였으며, 처리 절차는 다음과 같다.

- ① 이미지 입력
- ② RGB 색공간의 색상 이미지를 흑색조( grayscale) 이미지로 변환 후 이진화
- ③ 이진화 이미지 내 윤곽선 검출
- ④ 허프 변환을 통한 원 검출
- ⑤ 검출한 원에 대한 중심점 및 반지름에 정보 추출

허프 원형 검출 방법을 통한 말뚝기초 자동 인식 시 현장 내 존재하는 다른 원형의 물체를 인식하는 오류를 방지하기 위해서는 구조도면 상의 말뚝기초 반지름과 동일한 원형

물체만을 인식하도록 설정하여야 하며, 말뚝기초 상단부가 2/3정도 노출되도록 하여야 한다.

따라서 말뚝기초 구조도면 상의 중심점을 기준으로 가장 근접한 위치의 정사모자이크 이미지의 중심점을 선정하여 이격된 거리를 계산하고 그 거리가 시공 오차 허용 수치를 초과하게 되면, 해당 말뚝기초를 빨간색으로 시각화하였다. 이와 같은 모델을 활용하여 단시간 내 말뚝기초의 시공 오



(a) Flight Plan #1



(b) Flight Plan #2



(c) Flight Plan #3

Fig. 6. Drone Flight Plan

차를 정확하게 분석하여 객관적인 결과를 현장관리자에게 제공할 수 있는 것이다.

## 4. 말뚝기초 시공 오차 분석 모델 검증

### 4.1 사례선정 및 항공이미지 촬영

본 연구에서 제시한 말뚝기초 시공 오차 분석 모델의 현장 적용성 및 정확성을 검증하기 위하여 기초 공사가 진행 중인 건설현장을 사례로 선정하였다. 선정된 사례는 인천광역시에 위치한 교육시설 신축공사이며, 터파기가 완료되어 말뚝기초가 시공 중이다. 또한, 항공안전법에 따라 드론 비행이 가능한 구역에 위치하고 설계도면에서 정한 기준점과 현장에서 설치한 기준점이 동일한 조건을 가지고 있다.

항공이미지 촬영을 위해 DJI사의 Mavic 2 Zoom을 사용하였으며, 항공이미지를 수집 시 건설 장비로 인한 이미지 매칭 결과의 부정적 영향을 최소화하기 위해 모든 작업이 마친 오후 5시 이후에 드론 비행 및 항공이미지를 촬영하였다. 이와 같이 사례로 선정된 건설현장의 항공이미지를 촬영하기 위한 드론의 비행계획은 다음과 같다.

3차원 모델링을 구성하기 위해서 상기와 같이 평면촬영, 우측촬영, 좌측촬영으로 비행계획을 수립하고 DJI사의 Mavic 2 Zoom 기체를 DJI GS Pro 어플리케이션을 활용하여 항공이미지를 촬영하였다. 비행고도의 경우 현장 내 타워크레인 및 파일 드라이버와 충돌이 발생하지 않고 최대한 근접한 위치에서 정밀한 항공이미지를 촬영할 수 있도록

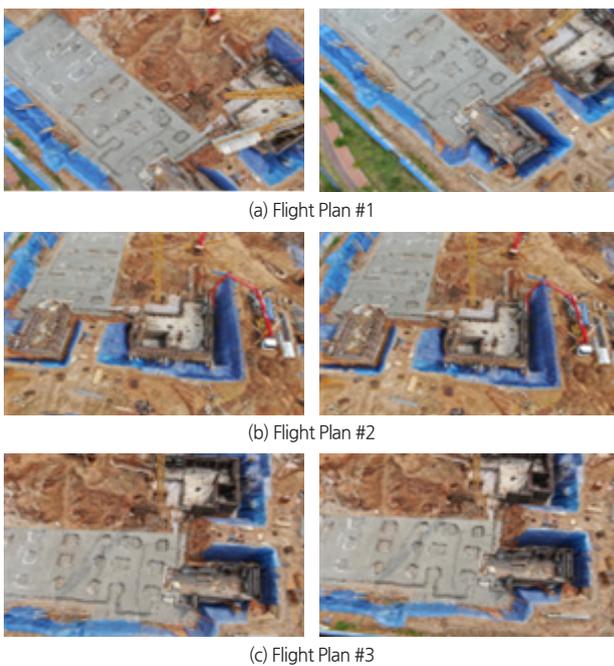


Fig. 7. Shooting Image

45m로 설정하였다. 말뚝기초의 상단부와 좌측 및 우측면에 대한 항공 이미지를 균일하게 확보하기 위해서 3회 비행을 통해 총 132개의 항공이미지를 확보하였다(Fig. 7).

3차원 좌표 보정 및 3차원 모델의 정확성을 향상하기 위해서 현장 내 다수 위치에 총 11개의 GCP를 설치하였고 GPS장비를 이용하여 3차원 좌표 정보를 획득하였다.

### 4.2 정사모자이크 이미지 생성

정사모자이크 이미지는 3차원 모델을 기반으로 생성되기 때문에 먼저, 촬영된 항공이미지에 3차원 좌표 정보와 Pix 4Dmapper를 이용하여 3차원 모델을 생성하였다.



Fig. 8. 3D Modeling

다음으로, 정사모자이크 이미지의 정밀도는 3차원 모델링의 정밀도와 비례하므로 3차원 좌표 정보에 대한 평균제곱근오차(Root Mean Squared Error)를 산정하였다. 평균제곱근오차는 측량분야에서 예측한 값과 실제값의 차이를 비교할 때 사용되는 측도이므로 측량 결과의 정밀도를 판단하기 위한 기준으로 적합하다. 이에 따라 3차원 모델링으로 정사모자이크를 생성하여 정밀도를 검토한 결과 평균제곱근오차는 0.012m로 도출되었다.

Table 1. Orthodox mosaic image precision verification result

Images	Median of 42256 keypoints per image
Dataset	133 out of 133 images calibrated (100%), all images enabled
Camera Optimization	5.74% relative difference between initial and optimized internal camera parameters
Matching	Median of 19070.3 matches per calibrated image
Georeferencing	Yes, 4 GCPs (4 3D), mean RMS error = 0.012 m

생성된 정사모자이크의 정밀도 결과 0.012m는 ‘국토지리정보원고시 제2016-3280호 일반측량 작업규정’의 ‘제3장 지형현황측량 제15조(지형현황측량)’에 명시된 정밀도  $\pm 30$  cm 이내이며, 말뚝기초의 수평 위치변동에 대한 시공 오차 범위인 15cm와 비교하여도 약 십분의 일에 해당하는 오차값이다.



Fig. 9. Orthodox mosaic image creation result

따라서 말뚝기초의 수평 위치변동에 대한 시공 오차 분석을 목적으로 사용하기에는 충분한 정밀도를 가진 데이터로 판단된다. 상기와 같은 과정에 따라 도출된 정사모자이크 이미지 생성 결과는 다음 그림과 같다.

### 4.3 허프 변환 말뚝기초 자동 인식

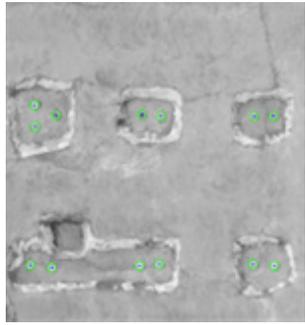
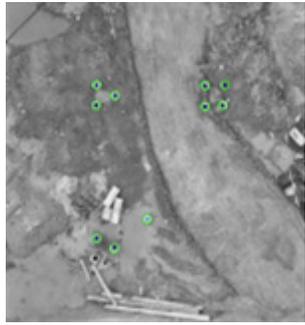
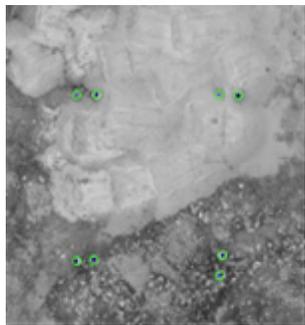
사례 건설현장의 말뚝기초를 자동으로 인식하기 위해 허프 변환 원형 검출 방법을 적용하였다. 그러나 생성된 정사모자이크 이미지의 크기가 너비 17,006 픽셀, 높이 16,929 픽셀로 데이터의 용량적 한계로 인하여 정사모자이크 이미지를 너비 1,024 픽셀, 높이 1,024 픽셀로 분할하여 허프 변환 원형 검출 방법에 적용하였다. 이와 같은 방법에 따라 촬영된 환경이 서로 다른 3가지 이미지를 적용하여 말뚝기초를 인식한 결과는 다음과 같다.

말뚝기초를 자동으로 인식한 결과, Recognition #1, #3는 이미지 상의 말뚝 개수를 전부 인식하였으나, Recognition #2는 말뚝기초 1개를 인식하지 못하고 말뚝이 아닌 원형의 물체를 인식하는 오류가 발생되었다. 이와 같은 원인은 정사모자이크 이미지상에 원형의 형태로 표현되어 있지 않아 발생된 오류로 확인되었다.

### 4.4 말뚝기초 중심점 연단거리 계산

사례의 말뚝기초 중심점 연단거리의 계산은 정사모자이크 이미지 내 기준점 3곳에 대한 3차원 정보 좌표를 입력하고, AutoCAD 소프트웨어에서 불러들이면 두 데이터는 자

Table 2. Before and After Recognition of Pile

Before Recognition	After Recognition
	
Recognition #1	
	
Recognition #2	
	
Recognition #3	

동으로 중첩된다. 이렇게 중첩된 두 데이터 상의 수치는 실제 수치와 동일하기 때문에 두 중심점 사이의 거리값은 곧 연단거리이며, 수평 위치변동 오차이다. 이와 같이 말뚝기초 구조도면과 정사모자이크 이미지를 중첩한 결과, 구조도면 상에 표기된 모든 말뚝기초가 아닌 정사모자이크 이미지 내 매몰되지 않은 상태인 39개의 말뚝기초를 기준으로 중심점 연단거리를 계산하였다.

또한, 시공된 말뚝기초의 오차를 명확하게 육안으로 확인하기 위해서 구조도면 상의 말뚝기초 위치와 실제 시공된 말뚝기초 위치의 변동에 대한 시각화를 하였다.

말뚝기초의 시공 오차를 시방서에서 정한 100mm로 설정하여 확인한 결과, 13개의 말뚝기초를 제외한 나머지 26개

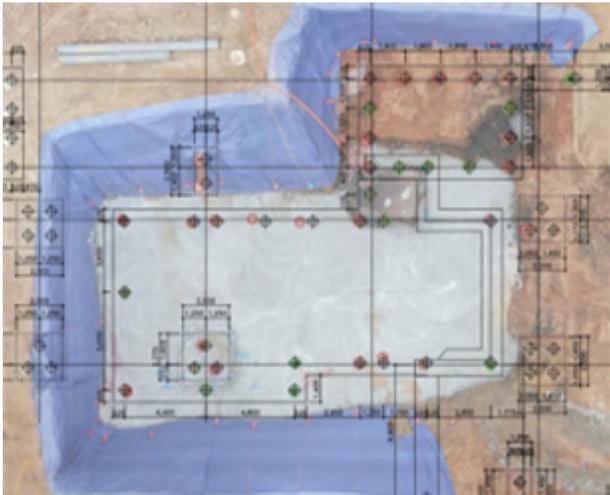


Fig. 10. Calculation Result of Pile Foundation Distance



Fig. 11. Analysis Result of Pile Foundation Construction Error

의 말뚝기초가 허용 오차 범위를 초과한 것으로 확인되었다.

## 5. 결론

본 연구의 목적은 드론을 활용하여 말뚝기초의 시공 오차를 분석하는 모델을 제시하고 그 모델의 활용성을 검증하고자 사례연구를 하는 것이다. 이에 따라 말뚝기초의 시공 오차를 분석하기 위해서 ① 드론으로 이미지를 촬영한 결과를 정사모자이크 이미지로 생성하고 ② 허프 변환 원형 검출 방법을 활용하여 정사모자이크 이미지에서 원형 형태의 말뚝기초를 자동으로 인식시킨다. ③ 말뚝기초 인식 결과를 포함하는 정사모자이크 이미지와 말뚝기초 구조도면을 중첩시켜 정사모자이크 이미지와 구조도면 상의 말뚝기초 중심점을 기준으로 연단거리를 계산하여 말뚝기초의 시공 오차를 분석하는 모델을 제시하였다.

본 연구에서 제시한 말뚝기초 시공 오차 분석 모델의 현장 적용성 및 정확성을 검증하기 위하여 기초 공사가 진행 중인 건설현장을 사례로 선정하였다. 선정된 사례는 인천광역시에 위치한 교육시설 신축공사이며, 터파기가 완료되어 말뚝기초가 시공 중이다. 이와 같은 사례의 말뚝기초 중심점 연단거리의 계산은 정사모자이크 이미지 내 기준점 3곳에 대한 3차원 정보 좌표를 입력하고, AutoCAD에서 불러들이면 두 데이터는 자동으로 중첩된다. 이렇게 중첩된 두 데이터 상의 수치는 실제 수치와 동일하기 때문에 두 중심점 사이의 거리값은 곧 연단거리이며, 수평 위치변동 오차이다.

따라서 말뚝기초 구조도면과 정사모자이크 이미지를 중첩한 결과, 구조도면 상에 표기된 모든 말뚝기초가 아닌 정사모자이크 이미지 내 매몰되지 않은 상태인 39개의 말뚝기초를 기준으로 시방서에서 정한 시공 오차를 100mm로 설정하여 확인한 결과, 13개의 말뚝기초를 제외한 나머지 26개의 말뚝기초가 허용 오차 범위를 초과하였다.

본 연구에서 제시한 모델은 다수의 철근콘크리트 말뚝의 시공정밀도를 인력이 투입되지 않고 항공 촬영을 통하여 정량적인 정보와 시각적 정보 모두 포함된 결과를 도출하므로 건설사업에 참여자에게 시공 오차의 확인과 대책을 마련하기 위한 원활한 의사결정의 기준으로 활용이 가능하다.

## References

- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Martínez-Carricondo, P., López, J.S.H., Mesas-Carrascosa, F.J., García-Ferrer, A., and Pérez-Porrás, F.J. (2018). "Reconstruction of extreme topography from UAV structure from motion photogrammetry." *Measurement*, 121, pp. 127-138.
- Kang, M.J. (2015). "Started domestic drone pilot business, preparing to enter the logistics industry." *Korea Maritime Research Institute*, 2015(11), pp. 48-51.
- Kim, H.G., Kim, H.J., and Park, S.J. (2015). "Construction Industry Drone Applicability." *Construction Engineering and Management*, 16(4), pp. 3-8.
- Kim, S.J. (2020). "Recent Research Trends and Implications on the use of Drones in Construction Industry." *Construction Engineering and Management*, 21(1), pp. 45-49.
- Lee, S.B., Auh, S.C., Song, M.H., Kim, J.J., and Park, K.C. (2020). "Calculation of Earthwork Volume by UAV Photogrammetry at Expressway Construction Sites." *Korea Society of Civil Engineering*, pp. 426-427.
- Lee, J.H., Hwang, D.W., and Choi, J.H. (2018). "The overview and application of measurement using drones." *Yooshin*, 25, pp. 237-256.

- Park, E.S., Yu, C.H., and Choi, J.W. (2014). "Real-time Line Detection Algorithm for UAV via Hough Transform." *Institute of Control, Robotics and System*. pp. 275-276.
- Sin, S.H. (2019). A study on development of slope inspection method using drone. MS thesis, Hanyang Univ.
- Siebert, S., and Teizer, J. (2014). "Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system." *Automation in construction*, 41, pp. 1-14.
- Statistica 'Projected commercial drone revenue worldwide from 2016 to 2025'

---

**요약 :** 본 연구의 목적은 드론을 활용하여 철근콘크리트 말뚝기초의 시공 오차를 분석하는 모델을 제시하는 것이다. 이에 따라 먼저, 드론을 활용하여 건설 현장에 대한 항공이미지를 획득하고 이를 기반으로 정사모자이크 이미지를 생성하고 다음으로 허프 변환 원형 검출 방법을 활용하여 정사모자이크 이미지에서 원형 형태의 말뚝기초를 자동으로 인식하도록 하였다. 마지막으로, 중첩된 정사모자이크 이미지와 구조 도면 상의 철근콘크리트 말뚝기초의 중심점을 기준으로 연단거리를 계산하고, 수평 위치변동 15cm를 기준으로 철근콘크리트 말뚝기초의 시공 오차를 분석한다. 또한, 제시된 모델의 활용성을 검증하기 위하여 토공 및 지정공사가 진행 중인 교육시설물 1개소를 선정하여 적용한 결과, 시공된 말뚝기초 전부를 자동으로 인식하였고 오차범위를 초과한 말뚝기초의 개수를 도출하였다.

**키워드 :** 드론, 철근콘크리트 말뚝기초, 3차원 이미지, 허프 변환 원형 검출 방법

---