

Automatic Generation of GCP/CP Candidate Points Using Survey Area Shape Analysis and Constraint Filtering

Woon-Yong Kim*

*Professor, Dept. of Drone Convergence Technology, Gangwon State University, Gangneung, Korea

[Abstract]

This paper aims to improve the limitations of drone surveying, where the placement of Ground Control Points (GCPs) and Check Points (CPs) depends largely on operator experience and fieldwork time. To achieve this, it proposes an automatic GCP/CP candidate generation method based on survey area shape analysis and constraint filtering. The proposed method calculates geometric indicators of the drone survey area, such as area, perimeter, aspect ratio, circularity, rectangular fitness, convexity, and linearity. Based on these indicators, the survey area is classified into types such as square, rectangle, circle, ellipse, linear infrastructure, and triangle, and type-specific placement rules are applied to generate GCP and CP candidates automatically. In addition, unsuitable candidates are filtered by considering exclusion features such as buildings, roads, rivers and forests, as well as boundary offset conditions. Replacement candidates are then generated while maintaining the original placement role. The placement efficiency of the generated candidates is evaluated using Voronoi distribution analysis, Delaunay network analysis, and CP independence assessment. Through these evaluations, the spatial distribution uniformity of GCPs, network stability, and independent validation capability of CPs can be quantitatively verified. Therefore, the proposed method can support an efficient GCP/CP distribution strategy and contribute to improving drone surveying quality and mission-planning efficiency.

▶ **Key words:** GCP, CP, drone surveying, shape analysis, constraint filtering, Voronoi, Delaunay

[요 약]

본 논문은 드론측량에서 지상기준점(GCP)과 검사점(CP)의 배치가 작업자의 경험과 현장 작업 시간에 의존하는 한계를 개선하고자 한다. 이를 위해 측량영역의 형상분석과 제약조건 필터링을 기반으로 GCP/CP 후보점을 자동 생성하는 방법을 제안한다. 제안 방법은 드론 측량영역의 면적, 둘레, 장단비, 원형도, 사각형 적합도, 볼록성, 선형성 등의 지표를 산출하고 그 지표를 바탕으로 정사각형, 직사각형, 원형, 타원형, 선형인프라, 삼각형 등의 각 유형별 배치 규칙을 적용하여 GCP와 CP 후보점을 자동으로 생성한다. 또한 건물, 도로, 하천·수계, 철도, 수풀·산림 등의 배제지형과 경계 이격거리 조건을 반영하여 부적합 후보점을 필터링하여 기존 배치 역할을 유지할 수 있도록 대체 후보점을 생성한다. 생성된 후보점의 배치 효율성은 Voronoi 분포도, Delaunay 연결망, CP 독립성 평가를 통해 GCP의 공간 분포 균등성, 연결 안정성, CP의 독립 검증성을 정량적으로 확인할 수 있다. 이를 통해 효율적인 GCP/CP 분산 배치 전략 수립과 드론측량 품질 향상 및 임무계획 효율성 증대에 기여할 수 있을 것이다.

▶ **주제어:** GCP, CP, 드론측량, 형상분석, 제약조건 필터링, Voronoi, Delaunay

-
- First Author: Woon-Yong Kim, Corresponding Author: Woon-Yong Kim
 - Woon-Yong Kim (wykim@gw.ac.kr), Dept. of Drone Convergence Technology, Gangwon State University
 - Received: 2026. 06. 10, Revised: 2026. 07. 18, Accepted: 2026. 07. 20.

I. Introduction

드론측량은 기존 항공측량에 비해 낮은 운용비용, 높은 공간해상도, 신속한 현장 투입성, 반복 관측의 용이성 등의 장점을 바탕으로 정사영상 제작, 3차원 지형모델 구축, 시설물 관리, 건설현장 모니터링, 농업·환경 조사 및 선형 인프라 관리 등 다양한 공간정보 구축 분야에서 활용되고 있다[1][2]. 특히 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 영상과 Structure-from-Motion (SfM) 기반 사진측량 기술의 결합은 다중 중복 영상으로부터 카메라 위치와 자세, 3차원 지형 구조를 동시에 추정할 수 있어, 고해상도 공간자료를 경제적으로 생산할 수 있는 방법으로 평가된다[3]. 그러나 드론측량 성과의 절대 위치 정확도는 촬영 영상의 품질만으로 결정되지 않으며, 영상 획득 조건, 카메라 보정, 지형 특성, 지오리퍼런싱 방식, 그리고 지상기준점과 검사점의 배치 상태에 따라 크게 달라진다.

드론측량에서 지상기준점(Ground Control Point, GCP)은 영상 기반 모델을 실제 좌표계에 정합시키는 기준점이며, 검사점(Check Point, CP)은 생성된 정사영상, DSM(Digital Surface Model), 3차원 포인트클라우드 등의 정확도를 독립적으로 검증하기 위한 점이다. 따라서 GCP와 CP는 단순히 측량 절차상 설치되는 표식이 아니라, 드론측량 성과의 신뢰성을 좌우하는 핵심 요소이다. 국내 무인비행장치 측량 관련 기준에서도 GCP와 CP의 수량 및 배치에 관한 조건을 제시하고 있으며[4][5], UAV 사진측량 분야의 여러 연구에서도 GCP의 수량과 공간적 분포가 최종 정확도에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[6]-[10].

그러나 실제 드론측량 현장에서는 GCP와 CP의 위치 선정이 여전히 작업자의 경험, 현장 접근성, 작업 시간, 지형 조건, 안전성 등에 크게 의존하는 경우가 많다. 작업자가 현장에서 직접 후보 위치를 판단하는 방식은 상황 대응성이 높다는 장점이 있지만, 동일한 측량 조건에서도 작업자 숙련도에 따라 배치 결과가 달라질 수 있고, 배치 기준의 일관성을 확보하기 어렵다. 또한 산악지, 하천 주변, 공사 현장, 수풀 지역, 도로·철도·관로와 같은 선형 인프라 구간에서는 표식 설치와 좌표 취득 과정에서 많은 시간과 안전 위험이 발생할 수 있다. 이러한 문제는 드론측량의 자동화와 효율화를 위해 GCP/CP 후보점 선정 과정 역시 사전에 정량화되고 자동화될 필요가 있음을 보여준다.

기존 연구들은 주로 GCP 수량 변화, 외곽 및 내부 배치 전략, CP 기반 RMSE(Root Mean Square Error) 비교, RTK/PPK(Real-Time Kinematic / Post-Processed

Kinematic) 기반 직접지오리퍼런싱의 정확도 평가 등에 초점을 두어 왔다[6]-[12]. 이러한 연구들은 GCP 배치가 정확도에 미치는 영향을 규명하는 데 중요한 기여를 하였으나, 실제 측량영역의 형상 차이와 배제지형 조건을 동시에 고려하여 GCP/CP 후보 위치를 자동으로 생성하는 방법에 대해서는 상대적으로 충분히 다루지 못하였다. 특히 측량영역은 정사각형이나 직사각형과 같은 단순한 형태뿐 아니라 원형, 타원형, 삼각형, 불규칙 다각형, 도로·하천·철도와 같은 선형 인프라 형태로 다양하게 나타난다. 동일한 면적이라도 영역 형상이 다르면 적절한 GCP/CP 배치 방식도 달라져야 하므로, 측량영역의 기하학적 특성을 반영한 후보점 생성 방법이 필요하다. 또한 이론적으로 적절한 위치에 생성된 후보점이라 하더라도 실제 현장에서는 건물, 도로, 하천·수계, 철도, 수풀·산림, 급경사지, GNSS 수신 불량 지역 등으로 인해 표식 설치, 착륙, 마킹, 좌표 취득이 어려울 수 있다. 따라서 GCP/CP 후보점 자동 생성 방법은 단순한 균등 배치나 격자 배치에 그치지 않고, 측량영역의 형상, 공공측량 기준, 배제지형, 경계 이격거리, CP의 독립성 조건 등을 통합적으로 고려해야 한다.

이에 본 연구는 측량영역 형상분석과 제약조건 필터링을 이용한 GCP/CP 후보점 자동 생성 방법을 제안한다. 제안 방법은 KML 또는 지도 기반으로 입력된 측량영역 Polygon을 대상으로 면적, 둘레, 장단비, 원형도, 사각형 적합도, 볼록성, 선형성 등의 형상 지표를 산출하고, 이를 바탕으로 측량영역 유형을 판정한다. 이후 유형별 배치 규칙을 적용하여 GCP와 CP의 1차 후보점을 생성하고, 배제지형과 경계 이격거리 조건을 반영하여 부적합 후보점을 필터링한다. 부적합 후보점에 대해서는 최초 배치 규칙이 의도한 공간적 역할을 유지할 수 있도록 대체 후보점을 탐색한다.

본 연구의 목적은 다음과 같다. 첫째, 측량영역의 기하학적 형상을 정량 지표로 분석하여 GCP/CP 배치 유형을 자동 판정하는 절차를 제시한다. 둘째, 건물, 도로, 하천·수계, 철도, 수풀·산림 등 현장 제약조건을 반영하여 실제 적용 가능한 후보점을 생성한다. 셋째, 부적합 후보점을 단순 삭제하지 않고 기존 배치 역할을 유지하는 대체 후보점 탐색 절차를 포함한다. 넷째, 생성된 후보점의 공간 분포, 연결 안정성, CP 독립성을 정량적으로 평가할 수 있는 절차를 제시한다. 이를 통해 드론측량 임무계획의 자동화, 현장 작업 시간 절감, 배치 결과의 일관성 향상, 측량 성과의 신뢰성 확보에 기여할 수 있을 것이다.

II. Preliminaries

1. Related works

1.1 Public Surveying Standards and GCP/CP

Placement Methods

무인비행장치 기반 공공측량에서 GCP는 정사영상과 3차원 모델을 실제 좌표계에 정합시키기 위한 기준점이며, CP는 생성된 측량 성과의 정확도를 독립적으로 검증하기 위한 검사점이다. 국내 무인비행장치 측량 작업규정은 지상기준점 수량을 1km²당 9점 이상으로 하는 것을 원칙으로 하며, 검사점 수량은 지상기준점 수량의 최소 1/3 이상으로 확보하도록 규정하고 있다[4]. 또한 드론지적측량규정에서도 작업구역 1km²당 지상기준점 9점 이상을 설치하도록 제시하고 있어, GCP 수량 기준은 드론측량 성과의 정확도 확보를 위한 기본 조건으로 볼 수 있다[5].

CP는 GCP와 달리 영상 보정에 직접 사용되는 점이 아니라, 최종 성과의 정확도를 검증하기 위한 독립 기준점으로 사용된다. 따라서 CP는 측량 대상지역에 고르게 분포해야 하며, GCP 인근에 배치되지 않아야 한다[4]. 이는 CP가 GCP 보정망에 종속되지 않고 별도의 검증점으로 기능해야 함을 의미한다. 따라서 GCP/CP 배치에서는 기준점의 수량뿐 아니라 GCP와 CP 사이의 이격성, 측량영역 내 분산성, 보정망 내부 검증 가능성도 함께 고려되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 공공측량 기준을 GCP/CP 후보점 자동 생성의 기본 조건으로 활용한다. 즉, 1km² 이내의 측량영역에 대해 GCP 9점과 CP 3점 이상을 기본 구조로 설정하고, 이후 측량영역 형상과 현장 제약조건을 반영하여 후보점을 자동 생성한다. 이 절에서는 법·제도적 기준과 GCP/CP의 역할을 정리하고, 구체적인 후보점 생성 절차는 제안 방법에서 다룬다.

1.2 Studies on GCP Quantity and Spatial Distribution

UAV 사진측량 분야에서는 GCP의 수량과 공간적 분포가 측량 결과의 정확도에 미치는 영향이 지속적으로 연구되어 왔다. Yu et al.은 대상지 규모에 따라 GCP 수량을 달리하여 UAS 기반 3D 포인트클라우드와 DSM의 정확도를 평가하였으며, CP 기반 RMSE를 이용해 GCP 수량 변화에 따른 정확도 차이를 분석하였다[6]. Seo et al.은 UAV 기반 정사영상 제작에서 GCP 수량과 배치 전략이 정확도에 미치는 영향을 분석하고, 규정에서 제시된 GCP 수량을 그대로 적용하기보다는 대상지 특성과 정확도 요구수준을 고려한 효율적 배치 전략이 필요함을 제시하였다[7]. GCP 배치와 관련해서는 수량뿐 아니라 배치 위치

와 분포 방식이 중요한 요소로 다루어진다. Martínez-Carricondo et al.은 UAV 사진측량에서 GCP 수량과 분포 변화에 따른 정확도를 평가하고, 대상지 외곽 부 배치와 내부 보강 배치가 정확도 향상에 기여할 수 있음을 제시하였다[8]. Sanz-Ablanedo et al. 역시 UAV-SfM 사진측량에서 GCP의 개수와 위치 조합에 따라 정확도가 달라짐을 분석하여, GCP가 단순히 많을수록 좋은 것이 아니라 적절한 위치에 배치되어야 함을 보였다[9].

선형 인프라 대상지는 일반적인 면형 대상지와 다른 배치 전략이 요구된다. 도로, 하천, 철도, 관로와 같은 대상지는 길이가 길고 폭이 좁기 때문에 단순 격자형 배치를 적용하기 어렵다. Ferrer-González et al.은 corridor-shaped study area를 대상으로 GCP 수량과 분포가 UAV 사진측량 정확도에 미치는 영향을 분석하였으며, 선형 대상지에서는 길이 방향의 분산과 폭 방향의 대표성을 함께 고려해야 함을 제시하였다[10].

최근에는 RTK/PPK 기반 직접지오리퍼런싱 기술을 이용하여 GCP 설치 부담을 줄이려는 연구도 진행되고 있다. Liu et al.은 UAV 직접지오리퍼런싱 방식에서 GCP 구성과 배치가 정확도에 미치는 영향을 분석하였으며, 직접지오리퍼런싱이 현장 작업량을 줄일 수 있지만 정확도 검증을 위한 CP와 일부 GCP의 역할은 여전히 중요함을 보였다[11]. Nesbit and Hugenholtz는 고저차가 큰 지형에서 직접지오리퍼런싱 기반 UAV-SfM의 정확도를 평가하며, 지형 조건과 지오리퍼런싱 방식이 결과 품질에 영향을 미친다고 설명하였다[12]. 이러한 연구들은 GCP 작업량을 줄이는 방향을 제시하지만, 측량영역 형상과 현장 배제조건을 함께 고려한 후보점 자동 생성 문제와는 구분된다.

1.3 Studies on Automation and Constraint-Based Candidate Selection

자동GCP 관련 자동화 연구는 주로 설치된 GCP 표식을 영상에서 자동 탐지하거나, 영상처리 및 객체검출 기술을 이용해 기준점을 인식하는 방향으로 수행되어 왔다. 예를 들어 Cheng et al.은 YOLOv5-OBb 기반으로 항공측량용 GCP를 자동 탐지하는 방법을 제시하였다[13]. 이러한 연구는 영상 내 GCP 식별과 후처리 자동화에는 효과적이지만, 측량 수행 전에 어느 위치에 GCP와 CP를 배치할 것인지를 결정하는 후보점 생성 문제와는 연구 목적이 다르다.

실제 GCP/CP 후보점 선정에서는 공간정보 기반 제약조건을 함께 고려할 필요가 있다. 건물, 도로, 하천·수계, 철도, 수풀·산림 등은 표식 설치, 드론 착륙, 자동 마킹, GNSS 좌표취득에 부적합한 지형이 될 수 있다. GIS 분야

에서 Buffer 분석은 특정 지형지물 주변에 일정 거리의 영향권 또는 회피구역을 생성하는 데 활용되며[14], OpenStreetMap은 도로, 건물, 수계, 철도 등 다양한 공간 객체를 tag 기반으로 제공하므로 배제 레이어 구축에 활용될 수 있다[15]. 따라서 OSM 기반 공간데이터와 GIS Buffer 분석을 결합하면, GCP/CP 후보점이 실제 현장 적용 가능한 위치인지 사전에 검토할 수 있다.

다만 기존 연구들은 GCP 수량 및 배치에 따른 정확도 평가, 직접지오리퍼런싱 성능 분석, GCP 영상 탐지 자동화 등 개별 문제에 초점을 두는 경우가 많았다. 반면 측량 영역의 형상분석, 공공측량 기준, 배제지형 필터링, 대체 후보점 탐색을 하나의 자동 생성 절차로 통합한 연구는 상대적으로 부족하다. 본 연구는 이러한 한계를 보완하기 위해 측량영역의 기하학적 유형을 먼저 판정하고, 유형별 배치 규칙과 제약조건 필터링을 결합하여 GCP/CP 후보점을 자동 생성한다.

1.4 Evaluation Methods for GCP/CP Placement

자동 생성된 GCP/CP 후보점은 필요한 수량을 만족하는 것만으로는 충분하지 않으며, 측량영역 전체를 균형 있게 대표하는지, GCP 간 연결망이 안정적인지, CP가 독립 검증점으로 적절한지를 정량적으로 평가해야 한다. 이를 위해 공간분포 평가에서는 Voronoi 또는 Thiessen Polygon 개념을 활용할 수 있다. Voronoi Diagram은 입력점별 가장 가까운 공간 영역을 분할하는 방법으로, 각 GCP가 담당하는 공간 영향권을 산정하는 데 적합하다[16]. 따라서 각 Voronoi Cell의 면적 차이를 분석하면 GCP 분포의 균등성을 평가할 수 있다.

Delaunay Triangulation은 Voronoi 공간분할과 밀접하게 연결된 기하학적 구조로, 입력점 간의 인접 관계와 삼각망 구조를 파악하는 데 활용된다[17]. GCP 후보점을 기준으로 Delaunay 연결망을 생성하면 GCP 간 연결거리, 과도하게 긴 Edge, 납작한 삼각형 등을 확인할 수 있으며, 이를 통해 GCP 보정망의 공간적 안정성을 평가할 수 있다. CP 독립성 평가는 CP가 GCP 보정망으로부터 독립적인 정확도 검증점으로 기능할 수 있는지를 판단하기 위한 평가이다. 공공측량 기준에서 CP는 측량 대상지역에 고르게 분포하고 GCP 인근에 배치되지 않아야 하므로[4], CP와 최근접 GCP 간 거리, CP 간 최소거리, CP가 포함된 GCP 영향권, 측량영역 내 구역 분산성, GCP Convex Hull 내부 포함 여부 등을 함께 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 이러한 공간 평가 방법을 자동 생성된 후보점의 사후 검증 절차로 활용한다. 즉, 관련연구에서는

Voronoi, Delaunay, CP 독립성 평가의 이론적 근거와 활용 가능성을 정리하고, 구체적인 산식과 평가 기준은 평가장에서 제시한다. 이를 통해 GCP/CP 후보점 자동 생성 결과가 단순한 위치 제안에 그치지 않고, 공간적으로 균형 있고 검증 가능한 배치인지 정량적으로 판단할 수 있도록 한다.

III. The Proposed Scheme

1. Overall Structure of Automatic GCP/CP Candidate Generation

GCP/CP 후보점 자동 생성 알고리즘은 측량영역 입력, 형상분석, 유형별 후보점 생성, 제약조건 필터링, 대체 후보점 탐색, 배치 성능 평가, 최종 후보점 출력의 순서로 구성된다. 알고리즘의 입력은 KML 파일 또는 지도에서 직접 설정한 측량영역 Polygon이며, 앱은 해당 영역의 면적을 계산하고 1km² 이내 영역을 GCP/CP 자동 생성 대상으로 처리한다. 또한 Overpass API를 활용하여 건물, 도로, 하천·수계, 철도, 교량·터널 입구, 수풀·산림 등의 배제지형을 조회하고[15], 선택된 배제지형을 지도상에 표시한 뒤 후보점 생성 과정에 반영한다.

제안 알고리즘은 먼저 측량영역 Polygon의 기하학적 특성을 분석한다. 이를 위해 Polygon 면적, 둘레, 단순화 후 꼭짓점 수, 최소회전사각형의 장축 및 단축, 장단비, 원형도, 사각형 적합도, 볼록성, 직각 편차, 선형성 점수 등을 산출한다. 산출된 지표를 기반으로 측량영역을 정사각형, 직사각형, 원형, 타원형, 선형인프라, 삼각형 또는 불규칙 Polygon으로 판정한다. 측량유형이 결정되면 공공측량 또는 자동 측량방식에서는 GCP 9점과 CP 3점 이상을 기본 구조로 설정하고, 유형별 배치 규칙에 따라 1차 후보점을 생성한다. 1차 생성된 후보점은 배제지형 및 경계 이격거리 조건을 통해 적합성을 검토한다. 예를 들어 건물, 도로, 하천·수계, 철도, 수풀·산림 등과의 이격거리 조건을 만족하지 못하거나 측량영역 경계와 너무 가까운 후보점은 부적합 후보로 분류한다. 부적합 후보가 발생하면 단순히 삭제하는 것이 아니라, 해당 후보점이 담당하던 배치 역할을 유지할 수 있도록 동일 구역 또는 인접 구역에서 대체 후보점을 탐색한다.

최종 후보점은 지도 마커와 목록으로 제공되며, JSON 기반 GCP 파일로 저장되어 이후 드론임무계획과 연계하여 활동된다. 전체 GCP/CP 후보점 자동 생성 과정은 그림 1과 같이 크게 측량영역 입력 및 분석단계와 후보점 생

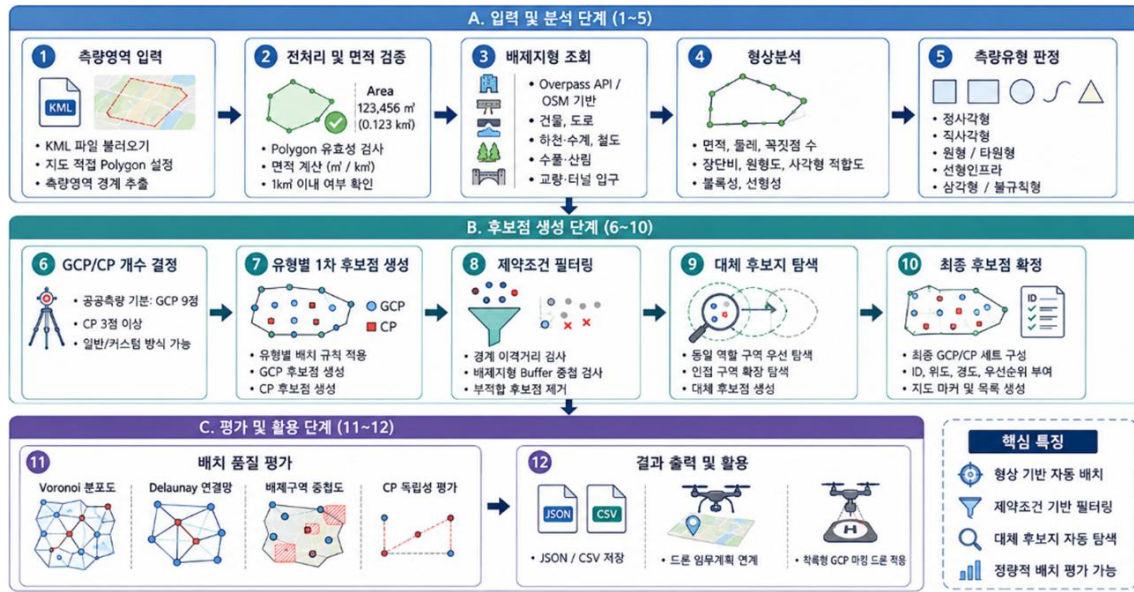


Fig. 1. Overall Workflow of Automatic GCP/CP Candidate Generation

성단계로 측량영역입력, 전처리 및 면적 검증, 배제지형 조회, 형상분석, 측량유형판단, GCP/CP 개수 결정, 유형별 1차후보점생성, 제약조건 필터링, 대체 후보점 탐색을 거쳐 최종 후보점을 확정하는 방식으로 이루어진다.

2. Main Processes in the Input and Analysis

GCP/CP 후보점 자동 생성 과정은 크게 입력 및 분석 단계와 후보점 생성 단계로 구분된다. 입력 및 분석 단계에서는 KML 또는 지도 기반 측량영역을 정의하고, Polygon의 면적과 형상 지표를 산출하여 측량유형을 판정한다. 후보점 생성 단계에서는 판정된 측량유형에 따라 GCP와 CP의 개수 및 배치 규칙을 적용하고, 배제지형과 경계 이격조건을 반영하여 최종 후보점을 생성한다. 먼저 입력 및 분석 단계의 처리 과정은 표1과 같다. 이 과정에서 측량영역 경계, 면적, 형상 특성, 배제지형 정보등을 분석한다. 측량영역의 면적은 Polygon 좌표를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다. 여기서 x_i , y_i 는 미터 단위로 변환된 Polygon 꼭짓점 좌표이며, A는 측량영역의 면적이다. 면적은 m^2 단위로 계산한 후 km^2 단위로 변환하여 자동 생성 대상 여부를 판단한다.

$$A = 1/2 \times | \sum (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) | \quad (1)$$

Table 1. Main Processes in the Input and Analysis

Step	Process Item	Technical Content	Output
1	Survey Area Input	Set the survey target polygon by importing a KML file or entering it directly on the map	Survey area polygon
2	Polygon Preprocessing	Remove duplicate points and check whether the polygon is closed Check for self-intersections	Valid polygon
3	Coordinate Conversion	Convert latitude and longitude coordinates to a meter-based coordinate system for distance and area calculation	Planar-coordinate polygon
4	Area Calculation	Calculate area using the Shoelace formula, etc.	Area A, km^2 -converted value
5	Area Verification	Check whether the area is within 1 km^2 and determine whether automatic generation is possible	Automatic generation availability
6	Exclusion Feature Query	Query buildings, roads, rivers, railways, etc. using the Overpass API, OSM, and GIS layers	Exclusion-feature layer
7	Shape Analysis	Calculate area, perimeter, aspect ratio, circularity, convexity, linearity	Shape analysis metrics
8	Survey Type Classification	Classify the area as square, rectangle, circle, linear infrastructure, etc. based on the calculated metrics	Survey Type

측량영역에 대한 형상 분석을 위해 사용하는 지표는 표 2와 같다.

Table 2. Shape Analysis Metrics of Survey Area

Symbol	Metric	Formula or Meaning	Purpose of Use
A	Area	Area inside the polygon	Determine the number of GCPs/CPs
P	Perimeter	Polygon boundary length	Calculate circularity
V	Number of Vertices	Number of vertices after simplification	Classify triangle/rectangle
L	Major Axis Length	Long side of the minimum rotated rectangle	Calculate aspect ratio
W	Minor Axis Length	Short side of the minimum rotated rectangle	Calculate aspect ratio
R	Aspect Ratio	$R = L/W$	Classify linear infrastructure/rectangle
C	Circularity	$C = 4\pi A/P^2$	Classify circle/ellipse
Q	Rectangular Fitness	$Q = A/(L \times W)$	Classify square/rectangle
H	Convexity	$H = A/A_{\text{hull}}$	Classify concave/irregular type
LS	Linearity Score	Centerline length or width ratio relative to the major axis	Classify linear infrastructure

측량영역 형상 분석 결과는 측량유형 판정에 사용된다. 본 연구에서는 단일 지표가 아닌 복합 지표 기반의 판정 방식을 적용하였다. 예를 들어 장단비가 높고 선형성 점수가 큰 경우 도로, 하천, 관로, 철도와 같은 선형 인프라형으로 분류하고, 원형도가 높고 장단비가 1에 가까운 경우 원형에 가까운 측량영역으로 판정한다. 또한 사각형 적합도가 높고 단순화 후 꼭짓점 수가 4개인 경우에는 장단비에 따라 정사각형 또는 직사각형으로 구분한다. 이러한 분류는 이후 후보점 생성 단계에서 유형별 배치 규칙을 선택하는 기준이 되며, 본 연구에서 적용한 정량적 판정 기준은 Table 3과 같다.

Table 3. Threshold Values and Decision Rules for Survey Area Classification

Survey Type	Threshold Criteria	Placement Considerations
Square	$V_s = 4$, $R \leq 1.20$, $Q \geq 0.85$	3×3 uniform placement
Rectangle	$V_s = 4$, $1.20 < R < 3.00$, $Q \geq 0.85$	Distribution along the major axis
Circle	$C \geq 0.80$, $R \leq 1.20$, $Q < 0.85$	Center plus outer-ring placement
Ellipse	$0.60 \leq C < 0.80$, $1.20 < R < 3.00$	Placement along the major and minor axes
Linear Infrastructure	$R \geq 3.00$ or $LS \geq 0.65$	Alternating left-right placement based on centerline chainage
Triangle	$V_s = 3$	Combination of vertices, edge midpoints, and interior points
Irregular Type	$H < 0.85$ or none of the above criteria are satisfied	Generate candidates based on outer, inner, and junction areas

Note: V_s : number of vertices after simplification, R : aspect ratio, C : circularity, Q : rectangular fitness, H : convexity, LS : linearity score.

3. Main Processes in the Candidate GCP/CP Generation Stage

GCP/CP 후보점 생성 단계는 입력 및 분석 단계에서 산출된 측량유형, 면적, 배제지형 정보를 바탕으로 실제 GCP와 CP

후보점을 생성하는 과정으로 주요 처리 단계는 표 4와 같다.

Table 4. Processes in the Candidate Generation

Step	Process Item	Technical Content	Output
1	Determine the number of GCPs/CPs	Set the number according to public surveying, general surveying, or custom mode	Number of GCPs, Number of CPs
2	Generate Initial Candidates by Type	Apply placement rules for each survey type	Initial GCP/CP candidates
3	Generate Exclusion-Feature Buffers	Apply offset distances around buildings, roads, rivers, railways, etc.	Exclusion zone
4	Constraint Filtering	Check whether candidates overlap boundaries or exclusion zones	Valid/invalid candidates
5	Replacement Candidate Search	Search for replacement points that preserve the placement role of invalid candidates	Replacement candidate
6	Finalize Candidate Points	Integrate valid candidates and replacement candidates	Final GCP/CP set
7	Assign Attribute Information	Assign ID, coordinates, priority, status, and placement role	Candidate attribute data

후보점 개수는 측량 목적과 정확도 요구수준에 따라 달라질 수 있다. 본 논문에서는 공공측량 안정 모드를 기준으로 GCP 9점과 CP 3점 이상으로 구성한다. 또한 유형별 후보점 생성은 측량영역의 형상 특성을 반영할 필요가 있다. 정사각형 영역은 3×3 격자형 배치를 적용이 가능하고, 직사각형 영역은 장축 방향의 분산을 강화할 필요가 있다. 또한 선형인프라 영역은 중심선을 따라 후보점을 배치하되 좌우 교차 방식을 적용하여 길이 방향과 폭 방향의 대표성을 동시에 확보할 필요가 있다. 이러한 유형별 GCP/CP 후보점 생성 규칙은 표 5와 같이 정의한다.

Table 5. Shape-Specific GCP/CP Candidate Generation Rules

Survey Type	GCP Candidate Generation Rules	CP Candidate Generation Rules
Square	3×3 placement based on normalized coordinates $u, v = 0.15, 0.50$, and 0.85	Diagonal dispersion within the grid
Rectangle	4×2 placement along the major axis plus a central reinforcement point	Dispersion in the middle section inside the major axis
Circle	One center point plus points at radius $0.75R$ Eight outer points	Inner zone at radius $0.45R-0.55R$
Ellipse	Placement based on center, major-axis, minor-axis, and diagonal directions	Interior dispersion between the major and minor axes
Linear Infrastructure	Nine points along the centerline section $s = 0.05-0.95$, Alternating left-right placement	Near $s = 0.22$, the center, and $s = 0.78$
Triangle	Three vertices, three edge midpoints, and three interior points	Interior placement between each edge and the center
Irregular Type	Six outer points, two inner points, and one weak-area point	Dispersion in empty internal areas between GCPs

제약조건 필터링은 후보점이 실제 마킹, 좌표취득에 적합한지를 검토하는 과정이다. 후보점이 측량영역 외부에 있거나, 경계 이격거리를 만족하지 못하거나, 건물·도로·하천·수계·철도·수풀·산림 등 배제지형 Buffer와 중첩되는 경우 부적합 후보로 분류한다[14][15].

부적합 후보점이 발생하면 단순히 삭제하지 않고, 해당 후보점의 배치 역할을 유지하는 대체 후보점을 탐색한다. 예를 들어 선형인프라 영역에서 특정 Chainage 위치의 우측 GCP가 도로 Buffer와 충돌하면, 먼저 동일 Chainage 주변의 우측 구역에서 대체 후보를 탐색하고, 실패할 경우 좌측 또는 인접 Chainage 구간으로 확장한다. 이 방식은 배제조건을 만족하면서도 최초 배치 규칙이 의도한 공간 대표성을 유지하기 위한 절차이다. 후보점 탐색 방법은 표 6과 같다.

Table 6. Principles for Replacement Candidate Search

Search Principle	Content
Role Preservation	Preserve the placement role of the original candidate, such as outer, inner, centerline, or junction role
Same-Zone Priority	Search first within the same placement zone
Radius Expansion	Expand the search radius in the order of 20 m, 40 m, 60 m, 80 m, and 100 m
Adjacent-Zone Search	If the same zone fails, search adjacent or opposite zones
Constraint Rechecking	Apply the same exclusion-feature and boundary conditions to replacement candidates
Status Recording	Store replacement candidates with replacement status and the original candidate ID

최종 후보점은 적합 후보와 대체 후보를 통합하여 구성한다. 각 후보점에는 GCP 또는 CP 유형, ID, 위도, 경도, 우선순위, 상태, 배치 역할, 대체 여부, 배제 사유, 배제지형과의 거리 정보가 부여되며 이후 드론 임무계획, 마킹 및 좌표취득, 성과표 자동화 단계와 연계되어 활용할 수 있다. 위의 과정을 포함하는 GCP/CP 후보점 자동 생성 구현 형태는 그림2와 같다.

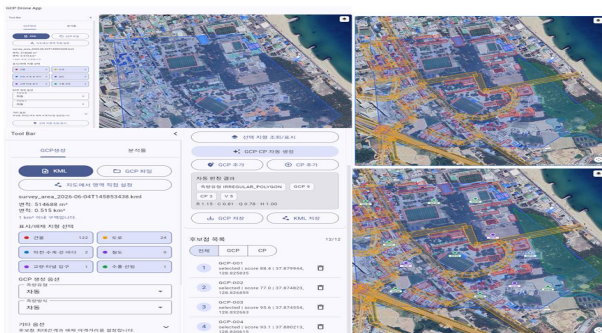


Fig. 2. Implementation of Automatic GCP/CP Candidates

그림 2는 제안한 GCP/CP 후보점 자동 생성 알고리즘의 실용성을 검증하기 위해 GCP Drone App을 구현하였다. 개발

된 애플리케이션은 Flutter와 Dart를 기반으로 Android 및 Web 환경에서 동작하도록 구성하였으며, 사용자가 KML 파일을 불러오거나 지도상에서 직접 측량영역을 설정할 수 있도록 하였다. 입력된 측량영역은 Polygon 형태로 처리되며, 면적 계산, 형상분석, 배제지형 조회, GCP/CP 후보점 생성 및 배치 평가 절차와 연계된다. 지도 시각화에는 Google Maps API를 적용하여 측량영역, GCP/CP 후보점, 배제지형, Voronoi 분포도 및 Delaunay 연결망을 지도상에 표시하였다. 또한 Overpass API를 이용하여 OpenStreetMap 기반의 건물, 도로, 하천·수계, 철도, 수풀·산림 등의 공간 객체를 조회하고, 이를 제약조건 필터링 과정에 반영하였다. 생성된 최종 후보점은 JSON 형식으로 저장할 수 있으며, 측량영역은 KML 형식으로 내보낼 수 있도록 구현하였다. 이를 통해 제안 알고리즘은 이론적 절차에 머무르지 않고, 실제 드론측량 임무 계획에서 후보점 생성, 현장 검토, 결과 저장 및 재활용이 가능한 응용 애플리케이션 형태로 구현하였다.

IV. Evaluation for Generated GCP/CP Candidates

1. Overview of the Evaluation Method

이 장에서는 최종 확정된 GCP/CP 후보점의 배치 품질을 정량적으로 평가하는 방법을 제시한다. 최종 후보점은 이미 측량영역 경계 이격조건과 건물, 도로, 하천·수계, 철도, 수풀·산림 등 배제구역 조건에 따라 배치되었기 때문에 최종 후보점 평가는 생성된 GCP와 CP가 측량영역 전체를 균형 있게 대표하는지, GCP 간 연결망이 안정적인지, CP가 GCP와 독립적인 정확도 검증점으로 기능할 수 있는지의 세 가지 관점에서 평가 체계를 구성한다. 평가 대상과 방법은 표 7과 같다.

Table 7. Evaluation Framework for GCP/CP Candidates

Evaluation Aspect	Evaluation Target	Evaluation Method	Key Metrics	Evaluation Purpose
GCP Distribution Uniformity	GCP	Voronoi Distribution	Voronoi cell area, CV, and maximum/minimum cell ratios	Evaluate whether GCPs are evenly distributed across the entire survey area
GCP Network Stability	GCP	Delaunay Network	Edge distance, maximum edge, number of edges exceeding 500 m, and triangle quality	Evaluate whether the spatial connection structure among GCPs is stable
CP Independence	CP	Distance, zone, and hull analysis	CP-GCP distance, inter-CP distance, cell dispersion, and inclusion in the GCP hull	Evaluate whether CPs are suitable as independent check points

2. Evaluation of Voronoi-Based GCP Distribution

GCP 분포 균등성 평가는 최종 GCP 후보점이 측량영역 전체를 균형 있게 대표하는지를 확인하기 위한 평가이다. 이를 위해 각 GCP를 기준으로 Voronoi Diagram을 생성하고, 각 Voronoi Cell을 측량영역 Polygon 내부로 절단하여 GCP별 담당 영역을 계산한다. 각 Cell의 면적이 유사할수록 GCP가 균등하게 배치된 것으로 해석할 수 있으며, 특정 Cell이 지나치게 크면 해당 영역의 GCP 밀도가 부족한 것으로 판단한다. 반대로 특정 Cell이 지나치게 작으면 해당 GCP가 다른 GCP와 너무 가까운 위치에 배치된 것으로 볼 수 있다.

평균 Voronoi Cell 면적은 다음과 같이 계산된다.

$$V_{mean} = A / N_{GCP} \quad (2)$$

여기서 A는 측량영역 면적이고, N_GCP는 최종 GCP 개수이다. Voronoi Cell 면적의 균일도는 변동계수로 평가된다.

$$V_{cv} = V_{std} / V_{mean} \quad (3)$$

또한 최대 Cell 비율과 최소 Cell 비율은 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$V_{max_ratio} = V_{max} / V_{mean} \quad (4)$$

$$V_{min_ratio} = V_{min} / V_{mean} \quad (5)$$

GCP분포 평가 지표와 평가기준은 표8과 표9에 제시하였다.

Table 8. Voronoi-Based GCP Distribution Metrics

Metric	Formula	Meaning	Interpretation
V_area,i	Area of the i-th Voronoi cell	Area assigned to each GCP	A larger cell indicates a higher possibility of insufficient GCP coverage in that area
V_mean	A / N_GCP	Mean assigned area	Ideal assigned area per GCP
V_cv	V_std / V_mean	Coefficient of variation of cell area	A smaller value indicates a more uniform GCP distribution
V_max_ratio	V_max / V_mean	Maximum Cell Ratio	A larger value indicates an area with insufficient GCP coverage
V_min_ratio	V_min / V_mean	Minimum Cell Ratio	A smaller value indicates possible over-concentration of GCPs

Table 9. Interpretation Criteria for Voronoi Distribution

Evaluation Metric	Good	Moderate	Poor
Voronoi CV	0.30 or less	0.30-0.50	Greater than 0.50
Maximum Cell Ratio	1.5 or less	1.5-2.0	Greater than 2.0
Minimum Cell Ratio	0.5 or more	0.3-0.5	Less than 0.3

본 논문에서는 V_cv가 0.30 이하이고, 최대 Cell 비율이 1.5 이하이며, 최소 Cell 비율이 0.5 이상인 경우 GCP 분포가 양호한 것으로 판단하였다. 이 평가는 최종 GCP 후보점이 특정 구역에 편중되지 않고 측량영역 전체를 균형 있게 대표하는지를 정량적으로 확인하는 데 활용될 수 있다.

3. Evaluation of Delaunay-Based GCP Network Stability

GCP 연결 안정성 평가는 최종 GCP 후보점 간의 공간적 연결 구조가 안정적인지를 확인하기 위한 평가이다. 이를 위해 GCP 후보점을 기반으로 Delaunay Triangulation을 생성하고, 생성된 Edge의 길이와 삼각형의 형태를 분석한다. GCP가 균형 있게 배치되면 Delaunay Edge의 길이가 비교적 균일하고, 지나치게 긴 Edge나 납작한 삼각형이 적게 발생한다. 반면 특정 영역에 GCP가 부족하면 긴 Edge가 발생하고, 전체 연결망의 안정성이 낮아질 수 있다.

Delaunay Edge의 최대거리는 다음과 같이 산출한다.

$$E_{max} = \max(d(GCP_i, GCP_j)) \quad (6)$$

Edge 평균거리는 다음과 같이 계산한다.

$$E_{mean} = (1 / M) \times \sum E_k \quad (7)$$

여기서 E_k는 Delaunay 연결망의 k번째 Edge 길이이며, M은 전체 Edge 수이다. 본 논문에서는 500m를 초과하는 Edge를 GCP 간격이 과도하게 넓은 구간으로 판단하고, 지도상에서 빨간색으로 표시하여 보강 또는 재배치 검토가 필요한 구간으로 산출한다. 여기에서 사용되는 평가 지표와 평가 기준은 표 10과 표11에 제시하였다.

Table 10. Delaunay-Based GCP Network Stability Metrics

Metric	Meaning	Evaluation Purpose
E_mean	Mean Delaunay edge distance	Identify the overall spacing of GCP connections
E_max	Maximum edge distance	Detect GCP sections that are excessively far apart
E_std	Standard deviation of edge distances	Evaluate the uniformity of connection distances
LongEdge_count	Number of edges exceeding 500 m	Detect connection sections exceeding the criterion
T_min_angle	Minimum internal angle of triangles	Detect excessively flat triangles
T_aspect	Triangle aspect ratio	Evaluate the shape stability of the triangular network

Table 11. Interpretation for Delaunay Network Stability

Evaluation Metric	Good	Moderate	Poor
Maximum edge distance	500 m or less	500-600 m	Greater than 600 m
Number of edges exceeding 500 m	0	1-2	3 or more
Minimum internal angle of triangles	20° or more	15-20°	Less than 15°
Triangle aspect ratio	3 or less	3-5	Greater than 5

Delaunay 기반 평가는 GCP가 측량영역 내에서 안정적인 기하학적 보정망을 형성하는지 판단하는 데 유용하다. 특히 Edge 길이와 삼각망 형상은 단순한 점 개수 평가로는 확인하기 어려운 공간적 불균형을 드러낼 수 있다.

4. Evaluation of CP Independence

CP 독립성 평가는 최종 CP 후보점이 GCP와 독립적인 정확도 검증점으로 기능할 수 있는지를 판단하기 위한 평가이다. CP는 정사영상 보정에 직접 사용하는 기준점이 아니라, 생성된 측량 성과의 정확도를 검증하는 검사점이므로 GCP와 지나치게 가까이 배치되어서는 안 된다. 또한 CP 3점이 특정 구역에 집중되면 측량영역 전체의 정확도를 대표하기 어렵다.

본 논문에서는 CP 독립성을 평가하기 위해 CP-GCP 최소거리, CP 간 최소거리, CP가 포함된 GCP Voronoi Cell의 분산 수, 측량영역 내 구역 분산 수, GCP Convex Hull 내부 포함 여부를 산출한다. CP가 GCP와 충분히 이격되어 있고, 서로 다른 구역과 서로 다른 GCP 영향권에 분산되어 있으며, GCP 보정망 내부에 위치할수록 독립성이 높다고 판단한다.

CP와 가장 가까운 GCP 간 거리는 다음과 같이 산출한다.

$$D_CP-GCP,i = \min d(CP_i, GCP_j) \quad (8)$$

CP 간 최소거리는 다음과 같이 계산한다.

$$D_CP-CP,min = \min d(CP_i, CP_j) \quad (9)$$

CP가 GCP Convex Hull 내부에 위치한다는 것은 GCP들이 형성하는 보정망 내부에서 정확도 검증이 이루어진다는 의미이다. 반면 CP가 GCP Hull 외부에 위치하면 보정망 외삽 영역을 검증하는 성격이 강해지므로, 일반적인 내부 정확도 검증 목적에서는 재검토가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 CP 3점이 가능한 한 GCP Hull 내부에 위치하고, 서로 다른 구역과 Voronoi Cell에 분산되도록 평가한다. 여기에서 사용되는 독립성 평가지표와 평가기준은 표 12~13과 같다.

Table 12. CP Independence Evaluation Metrics

Metric	Meaning	Evaluation Purpose
D_CP-GCP,min	Minimum distance between a CP and its nearest GCP	Evaluate independent separation from GCPs
D_CP-CP,min	Minimum distance between CPs	Evaluate dispersion among CPs
Number of dispersed cells	Number of different Voronoi cells containing CPs	Evaluate dispersion across GCP influence zones
Number of dispersed zones	Number of different evaluation zones containing CPs	Evaluate representativeness of the survey area
Number of CPs inside the hull	Number of CPs located inside the GCP convex hull	Verify whether checking is performed within the adjustment network

Table 13. Interpretation Criteria for CP Independence

Evaluation Item	Good	Moderate	Poor
Minimum CP-GCP Distance	100 m or more	50-100 m	Less than 50 m
Minimum distance between CPs	150 m or more	100-150 m	Less than 100 m
Number of Dispersed Voronoi Cells	3 cells	2 cells	1 cell
Number of dispersed zones	3 zones	2 zones	1 zone
Number of CPs inside the GCP hull	3	2	1 or fewer

이와 같은 3축 평가 체계는 최종 GCP/CP 후보점이 배제구역을 이미 회피한 상태라는 전제에서, 배치의 공간적 품질을 정량적으로 검증하기 위한 방법이다. 즉, 후보점의 사용 가능성은 제약조건 필터링 단계에서 판단하고, 최종 후보점 평가는 GCP의 분포 균등성, GCP 연결 안정성, CP 독립성을 중심으로 수행한다. 제시된 평가 방법의 구현 형태는 그림 3과 같다.

그림 2와 그림 3은 해안, 도로, 건물, 녹지 등이 혼재한 약 0.515 km² 규모의 도시-해안 복합지역을 대상으로 제안 애플리케이션을 적용한 사례이다. 애플리케이션은 공공 측량 기준을 고려하여 GCP 9점과 CP 3점을 자동 생성하였다. 생성된 후보점에 대해 Voronoi 기반 분포도 분석을 수행한 결과, 유효 GCP는 9개로 확인되었고 평균 분포거리는 219.5 m, 최근접 최소거리는 149.5 m, 균일성 CV는 0.19로 산출되어 GCP가 비교적 균등하게 분포한 것으로 평가되었다. Delaunay 기반 연결성 분석에서는 삼각형 10개와 연결변 18개가 생성되었으며, 평균 변 길이는 294.5 m, 최대 변 길이는 527.9 m로 나타나 전반적인 연결성은 보통 수준으로 판단되었다. CP 독립성 평가에서는 CP-GCP 최소거리가 121.6 m, CP 간 최소거리가 296.8 m로 산출되었고, CP 구역 분산 수와 CP Voronoi Cell 분산 수가 각각 3으로 나타났다. 또한 3개의 CP가 모두

GCP Hull 내부에 위치하여, 생성된 CP가 GCP 보정망 내에서 독립적인 정확도 검증점으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 사례는 제안 애플리케이션이 실제 지도 기반 측량영역에서 GCP/CP 후보점을 자동 생성하고, 생성 결과의 공간 분포 균등성, 연결 안정성, CP 독립성을 정량적으로 평가할 수 있음을 보여준다.

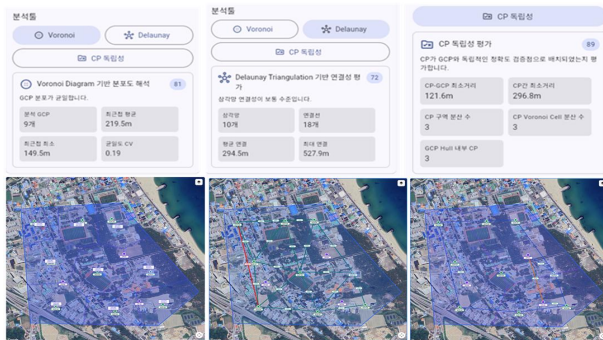


Fig. 3. Implementation of Evaluation for GCP/CP Candidates

이를 통해 자동 생성된 후보점이 측량영역 전체를 적절히 대표하고, 안정적인 GCP 보정망을 형성하며, CP가 독립적인 정확도 검증점으로 기능할 수 있는지를 종합적으로 판단할 수 있을 것이다.

V. Conclusions

본 논문은 드론측량에서 GCP/CP 배치가 작업자의 경험과 현장 조건에 의존하는 한계를 개선하기 위해, 측량영역 형상분석과 제약조건 필터링을 기반으로 한 GCP/CP 후보점 자동 생성 방법을 제안하였다. 제안 방법은 KML 또는 지도 입력을 통해 측량영역 Polygon을 설정하고, 면적, 둘레, 장단비, 원형도, 사각형 적합도, 볼록성, 선형성 등의 지표를 산출하여 측량영역 유형을 판정한다. 이후 유형별 배치 규칙을 적용하여 GCP와 CP 후보점을 생성하였다. 또한 후보점 생성 과정에서 건물, 도로, 하천·수계, 철도, 수풀·산림, 측량영역 경계 등 제약조건을 반영하고, 부적합 후보점은 동일한 배치 역할을 유지할 수 있도록 대체 후보점을 탐색하였다. 이를 통해 단순 격자 배치 방식보다 측량영역의 형상과 현장 조건을 더 효과적으로 반영할 수 있는 자동 생성 절차를 구성하였다.

특히 제안 방법은 모든 지형에 동일한 고정 배치 규칙을 적용하는 방식이 아니라, 측량영역의 형상분석 결과와 제약조건 필터링 결과에 따라 후보점 생성 규칙을 적응적으로 선택하는 구조이다. 정사각형, 직사각형, 원형과 같은 정형

영역에서는 유형별 배치 규칙을 직접 적용하고, 특정 형상으로 명확히 분류되지 않는 불규칙 영역에서는 외곽부, 내부부, 취약구역, 오목부 주변, 후보점 간 공백이 큰 구역 등을 중심으로 후보점을 생성하도록 하였다. 또한 장애물 밀집지역에서는 배제지형 Buffer와 경계 이격조건을 적용하여 부적합 후보점을 제거하고, 동일 배치 역할을 유지하는 대체 후보점 탐색 절차를 통해 공간적 대표성을 보완하도록 하였다.

최종 후보점의 배치 품질은 GCP 분포 균등성, GCP 연결 안정성, CP 독립성의 세 가지 관점에서 평가하도록 하였다. GCP 분포 균등성은 Voronoi Cell 기반 지표를 통해 확인하고, GCP 연결 안정성은 Delaunay 연결망의 Edge 거리와 삼각망 품질을 통해 평가하였다. CP 독립성은 CP-GCP 거리, CP 간 거리, Voronoi Cell 분산, Zone 분산, GCP Hull 내부 포함 여부를 이용하여 검증하였다.

제안된 방식은 기존 수동 배치 방식과 단순 격자 배치 방식에 비해 후보점 생성 및 검토 시간을 단축하고, 배제지형 반영과 대체 후보점 탐색을 통해 현장 적용성을 향상시킬 수 있다. 또한 Voronoi 분포도, Delaunay 연결망, CP 독립성 평가를 통해 생성된 후보점의 적절성을 정량적으로 확인할 수 있으므로, GCP/CP 배치 과정의 작업 효율성과 결과 신뢰성을 동시에 높일 수 있을 것이다.

따라서 제안 방법은 정형화된 평탄지뿐만 아니라 불규칙 다각형 영역, 선형 인프라, 도시 장애물 밀집지역 등에도 확장 적용이 가능한 구조를 갖는다. 이는 제안 알고리즘이 형상분석, 유형별 후보점 생성, 제약조건 필터링, 대체 후보점 탐색, 배치 품질 평가를 분리된 단계로 구성하고 있기 때문이다. 즉, 대상지의 형상이나 장애물 조건이 달라지더라도 전체 알고리즘 구조는 유지하면서, 배제지형 종류, Buffer 거리, 대체 후보점 탐색 반경, 후보점 우선순위 등을 조정하여 다양한 측량환경에 대응할 수 있다.

본 연구의 한계로는 첫째, 제안 방법이 KML 기반 측량영역과 OpenStreetMap 기반 배제지형 정보를 활용하므로, OSM 데이터의 최신성이나 누락 여부에 따라 건물, 도로, 수계, 수풀·산림 등의 배제조건 반영 정확도가 달라질 수 있다는 점이 있다. 둘째, 본 연구에서는 후보점의 배치 적절성을 공간분포와 기하학적 평가를 중심으로 검토하였으나, 실제 드론 촬영 영상과 연계한 CP 기반 RMSE 분석은 제한적으로 수행되었다. 셋째, 산악지역, 급경사지, 수풀·산림 밀집지역, GNSS 수신 불량지역과 같이 지형 기복이 크고 장애물이 많은 환경에서는 단순 형상지표와 OSM 기반 배제지형만으로 후보점의 실제 설치 가능성을 충분히 판단하기 어렵다. 따라서 향후 연구에서는 DEM/DSM 기반 경사도, 고도차, 토지피복, 수목 밀도, GNSS 가시성, 현장 접근성 등의

추가 제약조건을 반영하여 복잡 지형에서의 후보점 생성 정확도를 높일 필요가 있다. 또한 다양한 실제 현장 데이터를 대상으로 제안 방법을 반복 적용하고, 기존의 작업자 경험 기반 수동 배치 방식 및 단순 격자 배치 방식과 비교하여 후보점 생성 시간, 현장 수정 횟수, 배제구역 충돌률, CP 기반 RMSE를 정량적으로 분석할 필요가 있다. 나아가 드론 촬영 영상에서 자동 마킹된 GCP 표식을 영상처리 또는 AI 기반 객체검출 기법으로 자동 인식하고, 정사영상 제작 및 정확도 평가까지 연계한다면, GCP/CP 후보점 생성, 현장 마킹, 좌표취득, 성과 검증이 통합된 드론측량 자동화 체계로 확장될 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 92, pp. 79-97, Jun. 2014. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
- [2] F. Nex and F. Remondino, "UAV for 3D Mapping Applications: A Review," *Applied Geomatics*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-15, Mar. 2014. doi: 10.1007/s12518-013-0120-x.
- [3] M. J. Westoby, J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey, and J. M. Reynolds, "Structure-from-Motion Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications," *Geomorphology*, Vol. 179, pp. 300-314, Dec. 2012. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
- [4] National Geographic Information Institute, "Regulations on Unmanned Aerial Vehicle Surveying," Korean Law Information Center, National Geographic Information Institute Notification No. 2020-5670, Dec. 2020.
- [5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Drone Cadastral Surveying Regulations," Korean Law Information Center, Ministry of Land, Infrastructure and Transport Established Rule No. 371, Aug. 2023.
- [6] J. J. Yu, D. W. Kim, E. J. Lee, and S. W. Son, "Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models," *Drones*, Vol. 4, No. 3, Article 49, Aug. 2020. doi: 10.3390/drones4030049.
- [7] D. M. Seo, H. J. Woo, W. H. Hong, H. Seo, and W. J. Na, "Optimization of Number of GCPs and Placement Strategy for UAV-Based Orthophoto Production," *Applied Sciences*, Vol. 14, No. 8, Article 3163, Apr. 2024. doi: 10.3390/app14083163.
- [8] P. Martínez-Carricondo, F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, F. J. Mesas-Carrascosa, A. García-Ferrer, and F. J. Pérez-Porras, "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, Oct. 2018. doi: 10.1016/j.jag.2018.05.015.
- [9] E. Sanz-Ablanedo, J. H. Chandler, J. R. Rodríguez-Pérez, and C. Ordóñez, "Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used," *Remote Sensing*, Vol. 10, No. 10, Article 1606, Oct. 2018. doi: 10.3390/rs10101606.
- [10] E. Ferrer-González, F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, and P. Martínez-Carricondo, "UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points," *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 15, Article 2447, Jul. 2020. doi: 10.3390/rs12152447.
- [11] X. Liu, X. Lian, W. Yang, F. Wang, Y. Han, and Y. Zhang, "Accuracy Assessment of a UAV Direct Georeferencing Method and Impact of the Configuration of Ground Control Points," *Drones*, Vol. 6, No. 2, Article 30, Jan. 2022. doi: 10.3390/drones6020030.
- [12] P. R. Nesbit and C. H. Hugenholtz, "Direct Georeferencing UAV-SfM in High-Relief Topography: Accuracy Assessment and Alternative Ground Control Strategies along Steep Inaccessible Rock Slopes," *Remote Sensing*, Vol. 14, No. 3, Article 490, Jan. 2022. doi: 10.3390/rs14030490.
- [13] C. Cheng, J. Yang, C. Wang, Z. Zheng, X. Li, D. Dong, M. Chang, and Z. Zhuang, "Automatic Detection of Aerial Survey Ground Control Points Based on YOLOv5-OBb," *arXiv preprint, arXiv:2303.03041*, Mar. 2023.
- [14] Esri, "Buffer," *ArcGIS Pro Documentation*.
- [15] OpenStreetMap Wiki, "Map Features," *OpenStreetMap*.
- [16] Esri, "Create Thiessen Polygons," *ArcGIS Pro Documentation*.
- [17] M. de Berg, O. Cheong, M. van Kreveld, and M. Overmars, *Computational Geometry: Algorithms and Applications*, 3rd ed., Springer, Berlin, 2008. ISBN: 978-3-540-77973-5.

Authors



Woon-Yong Kim received the M.S. and Ph.D. degrees in Computer Science from KwangWoon University, Korea, in 1999, 2006, respectively. Dr. Kim joined the faculty of the Department of Computer Application

at Gangwon State University, Gangneung city, Gangwon-do, Korea, in 2006. He is currently a Professor in the Department of Drone Convergence Technology, Gangwon State University. He is interested in parallel computing, mobile computing, embedded computing and artificial intelligent.