

无人机摄影测量技术在大型工程地形测绘中的应用研究

马焕卿

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i4.6252

[摘要] 随着大型工程对地形测绘精度与效率要求的不断提升,无人机摄影测量技术凭借其灵活高效、低成本、高分辨率等优势,逐渐成为替代传统测绘方法的重要技术手段。本文聚焦无人机摄影测量技术在大型工程地形测绘中的应用,系统分析了其技术原理、数据处理流程与工程实践价值。阐述了无人机平台组成、摄影测量核心算法及数据采集规范,重点探讨了影像预处理、三维重建与精度优化等关键技术。研究结果表明,无人机摄影测量技术可实现厘米级地形测绘精度,显著提升工程效率并降低成本,未来随着5G通信、AI算法与集群协同技术的发展,其应用前景将更加广阔。

[关键词] 无人机摄影测量; 大型工程; 地形测绘; 三维重建; 工程应用

中图分类号: P217 文献标识码: A

Research on the Application of Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry Technology in Large scale Engineering Topographic Mapping

Huanqing Ma

Xinjiang Production and Construction Corps Survey and Design Institute Group Co., Ltd.

[Abstract] With the continuous improvement of terrain surveying accuracy and efficiency requirements for large-scale projects, unmanned aerial vehicle photogrammetry technology has gradually become an important technical means to replace traditional surveying methods due to its advantages of flexibility, efficiency, low cost, and high resolution. This article focuses on the application of unmanned aerial vehicle photogrammetry technology in large-scale engineering terrain surveying, systematically analyzing its technical principles, data processing flow, and engineering practical value. This article elaborates on the composition of unmanned aerial vehicle platforms, core algorithms for photogrammetry, and data acquisition standards, with a focus on key technologies such as image preprocessing, 3D reconstruction, and accuracy optimization. The research results indicate that drone photogrammetry technology can achieve centimeter level terrain surveying accuracy, significantly improve engineering efficiency and reduce costs. In the future, with the development of 5G communication, AI algorithms, and cluster collaboration technology, its application prospects will be even broader.

[Key words] drone photogrammetry; Large scale engineering projects; Topographic mapping; 3D reconstruction; Engineering Application

引言

在大型工程建设领域,地形测绘是规划设计、施工管理及安全监测的基础性工作。传统测绘方法(如全站仪测量、载人航空摄影等)受限于人力成本高、周期长、复杂地形可达性差等问题,难以满足现代工程对高精度、高效率、动态更新的需求。例如,山区高速公路选线需快速获取高分辨率地形数据以优化路线设计,城市地铁施工需实时监测地表沉降以保障安全,海上风电场微观选址需结合地形与风场数据进行精准评估。这些场景对测绘技术的灵活性、时效性和智能化水平提出了更高要求。

1 无人机摄影测量技术基础

1.1 无人机系统组成

无人机摄影测量系统主要由飞行平台、任务载荷、地面控制站及数据处理软件四部分构成。飞行平台是搭载设备的载体,根据应用场景可分为多旋翼无人机、固定翼无人机及垂直起降固定翼无人机。多旋翼无人机灵活性强,适合小范围高精度数据采集;固定翼无人机续航能力强,适用于大面积地形测绘;垂直起降固定翼无人机则结合了两者的优势,可在复杂起降环境中快速部署。任务载荷以光学相机为主,通过高分辨率镜头捕捉地

表影像,部分系统还配备激光雷达(LiDAR)或多光谱相机,用于获取三维点云或植被信息。地面控制站负责飞行任务规划、实时监控与数据接收,操作人员可通过预设航线、调整飞行高度与速度,确保数据采集的完整性与安全性。数据处理软件则完成影像拼接、三维重建与精度分析,将原始数据转化为可用的测绘成果。系统各组件的协同效率直接影响测绘精度,例如相机焦距与飞行高度的匹配度决定了地面分辨率,而定位模块(如RTK-GPS)的精度则决定了地理坐标的准确性。

1.2 摄影测量原理

摄影测量通过解析影像中的几何与辐射信息,还原地物三维形态。其核心原理基于共线方程,即地面点、相机投影中心与像点三点共线。通过多张影像的立体像对,利用前方交会法计算地面点坐标。空中三角测量(ATM)是关键技术,通过匹配不同影像中的同名点,构建稀疏点云并优化外方位元素,最终生成密集点云与数字表面模型(DSM)。光束法平差进一步消除误差,提升模型精度。例如,在无人机低空飞行时,通过连续拍摄的重叠影像(航向重叠率通常设为70%-80%),可确保地表特征被多角度捕捉,从而增强三维重建的可靠性。此外,多光谱影像的引入可辅助分类植被、水体等地物,提升测绘成果的语义信息丰富度。

1.3 数据采集流程

数据采集需遵循“规划-执行-验证”三步流程。首先,根据测区地形与精度要求设计航线,明确飞行高度、速度及影像重叠率。例如,山区测绘需降低飞行高度以捕捉地形细节,而平原地区可适当提高效率。控制点布设是保障精度的关键,需在测区均匀分布地面标志,并通过差分GPS或全站仪测量其坐标。执行阶段,无人机按预设航线自动飞行,相机同步触发拍摄,实时回传影像至地面站。环境因素如风速、光照需动态监控,强风或逆光条件下需调整参数或暂停任务。采集完成后,需验证数据完整性,检查影像清晰度、重叠度及定位信息是否达标。例如,若某区域影像因云层遮挡模糊,需补飞重拍。最终,原始数据经格式转换后导入处理软件,为后续三维建模提供基础。全流程的标准化操作可显著降低人为误差,确保测绘成果的可靠性。

2 数据处理关键技术

2.1 影像预处理

影像预处理是提升数据质量的基础环节,直接影响后续三维重建的精度。原始影像常存在畸变、光照不均及噪声等问题,需通过系统性校正与优化处理。畸变校正主要针对相机镜头引起的径向与切向畸变,利用标定板获取的相机参数,通过数学模型对影像进行几何校正,恢复地物的真实形状。匀光匀色处理则针对光照差异,采用直方图匹配或同态滤波算法,平衡不同影像间的亮度与对比度,避免因光照变化导致的特征匹配失败。此外,影像匹配是预处理的核心步骤,通过提取影像中的特征点(如角点、边缘),利用SIFT(尺度不变特征变换)或SURF(加速稳健特征)算法进行特征描述与匹配,为后续三维重建提供同名点对应关系。对于植被茂密或纹理重复区域,可结合半全局匹配(SGM)算法增强匹配鲁棒性。预处理后的影像需通过质量检查,确保

特征点分布均匀、匹配误差低于阈值,为后续处理提供可靠数据基础。

2.2 三维重建方法

三维重建是无人机摄影测量的核心目标,其核心是通过多视角影像生成地形的三维模型。密集点云生成是第一步,常用软件如PhotoScan或Pix4D通过多视图立体匹配(MVS)算法,利用影像间的视差信息计算每个像素的三维坐标,形成高密度点云。点云经滤波与分类后,可进一步生成数字表面模型(DSM)与数字高程模型(DEM)。DSM包含地表所有物体(如树木、建筑)的高度信息,而DEM则通过滤波去除植被等非地形要素,仅保留地面高程。重建过程中,光束法平差是关键优化步骤,通过最小化重投影误差调整相机参数与点云坐标,提升模型精度。例如,在山区地形中,需结合地面控制点(GCP)与检查点(CP)进行平差约束,避免高程累积误差。此外,多源数据融合可增强模型可靠性,例如将LiDAR点云与光学影像结合,利用LiDAR的高程精度补偿影像匹配的不足,生成更精细的地形模型。

2.3 精度优化策略

精度优化需从数据采集、处理算法与成果验证三方面入手。控制点加密是提升绝对精度的有效手段,在测区均匀布设高密度GCP,并通过差分GPS或全站仪精确测量其坐标,可显著减少系统误差。误差分布分析则通过对比模型高程与实测数据,识别误差集中区域(如陡坡、水域边缘),针对性调整参数或补拍影像。算法层面,多尺度特征匹配可提升复杂地形的适应性,例如对建筑物采用高分辨率影像匹配,对平坦区域采用低分辨率加速计算。此外,引入深度学习算法(如卷积神经网络)可自动分类点云中的噪声与异常点,进一步提升模型质量。成果验证阶段,需通过交叉验证与独立检查点评估精度,例如计算均方根误差(RMSE)或高差中误差,确保模型满足工程需求。对于动态监测场景(如施工期地形变化),可采用时序分析法对比多期模型,识别形变区域并量化变化量。全流程的精度控制需结合工程实际需求,平衡效率与成本,例如道路工程可侧重横断面高程精度,而城市规划则需关注建筑物轮廓的完整性。

3 大型工程地形测绘需求分析

3.1 工程类型与测绘要求

大型工程地形测绘的需求因工程类型而异,其核心目标是为规划设计、施工管理及安全监测提供高精度地形数据。交通工程中,公路与铁路选线需获取沿线地形高程、坡度及横断面信息,精度要求通常达到厘米级,以确保路线优化与土方量计算的准确性;桥梁工程则需重点测绘桩基位置的地质条件与河床地形,辅助基础设计。水利工程对地形数据的动态性要求较高,例如水库库容计算需结合水下地形与水位变化,堤防监测需实时获取地表形变信息。能源工程中,风电场微观选址依赖高分辨率地形数据与风场模拟结果,要求测绘成果能精确反映地形起伏对风速的影响;光伏电站则需分析地形坡度与朝向,优化阵列布局以提升发电效率。此外,城市地下工程(如地铁隧道)对测绘数据的完整性提出挑战,需穿透地表植被与建筑物,获取地下管线

与地质结构信息。不同工程类型对测绘成果的精度、范围与更新频率需求差异显著,例如道路工程侧重高程精度,而城市规划需兼顾地物分类与语义信息。

3.2 传统方法痛点与无人机优势

传统地形测绘方法(如全站仪测量、载人航空摄影)在大型工程中面临多重瓶颈。全站仪依赖人工操作,效率低且受限于通视条件,复杂地形(如山区、水域)中布点困难,导致数据采集周期长、成本高。载人航空摄影虽能覆盖大面积区域,但受天气与空域限制,且高分辨率影像获取成本高昂,难以满足动态监测需求。此外,传统方法的数据处理流程繁琐,人工干预多,易引入主观误差。

无人机摄影测量技术有效突破了上述限制。其灵活性强,可快速部署至复杂环境,例如通过旋翼无人机低空飞行,穿透植被获取地面高程数据,解决传统方法通视难题。成本效益显著,单次飞行可覆盖数平方公里,数据采集效率较全站仪提升数倍。安全性高,无需人员进入危险区域,适用于灾害现场或高海拔地区测绘。在数据处理方面,无人机结合自动化算法(如密集匹配、三维重建),可快速生成高精度DSM与DEM,减少人工干预。例如,山区风电场选址中,无人机可在一周内完成地形数据采集与分析,而传统方法需耗时数月。此外,无人机支持实时数据传输与动态更新,满足施工期地形变化监测需求,为工程进度管理与安全预警提供技术支撑。

4 无人机摄影测量工程应用案例

4.1 项目背景与挑战

某山区高速公路选线需穿越复杂地形,沿线存在高差大、植被茂密、通视条件差等问题。传统测绘方法难以快速获取高精度地形数据,且人工测量安全风险高。项目要求在短时间内完成选线方案比选,并精确计算土方工程量。

4.2 技术方案与实施

采用多旋翼无人机搭载高精度光学相机(分辨率0.02cm)进行低空飞行,飞行高度设定为120米,航向重叠率75%,旁向重叠率65%。针对植被覆盖区域,结合LiDAR点云数据穿透植被,获取真实地面高程。数据采集后,通过PhotoScan软件完成影像匹配、密集点云生成与DSM构建,并利用地面控制点(GCP)进行精度校正,最终生成5cm分辨率的DEM。

4.3 成果与效益

地形分析:基于DEM提取坡度、坡向信息,优化路线设计,

避开高填深挖区域,减少土方工程量约15%。

横断面精度验证:选取10个典型横断面,与传统RTK测量数据对比,高程误差均值小于5cm,满足工程设计要求。

效率提升:无人机数据采集仅用3天,较传统方法缩短80%周期,且无需人员进入危险区域,显著降低安全风险。

4.4 经验总结

无人机技术有效解决了山区地形测绘的通视难题,结合LiDAR可穿透植被,提升数据可靠性。但需注意飞行安全,避免强风或降雨天气作业,同时加密GCP以控制高程误差累积。

5 结论

无人机摄影测量技术凭借高效、灵活、低成本等优势,已成为大型工程地形测绘的核心手段。本文通过系统分析技术原理、关键算法及工程应用案例,验证了其在复杂地形适应性、动态监测能力及多源数据融合方面的显著价值。研究表明,无人机可快速获取厘米级精度地形数据,有效缩短测绘周期并降低人力成本,尤其在山区高速公路选线、城市地铁施工监测等场景中展现出不可替代性。然而,技术推广仍面临数据处理效率低、环境适应性不足、法规限制及标准化缺失等挑战。未来需通过智能化算法优化、硬件性能提升及政策机制创新,进一步释放技术潜力。例如,结合AI与分布式计算提升处理效率,开发抗干扰传感器增强环境适应性,推动空域管理政策改革以简化审批流程,并制定统一行业标准规范作业流程。随着5G通信、边缘计算与集群协同技术的发展,无人机摄影测量将向实时化、自动化、智能化方向演进,为工程建设全生命周期管理提供更精准、更可靠的技术支撑。

【参考文献】

[1]崔波.测绘新技术在测绘工程测量中的应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(06):196-198.

[2]高涛,王丽琴.无人机倾斜摄影测量在竣工规划核实中的应用[J].北京测绘,2025,39(02):227-233.

[3]候晓康.探讨无人机测绘技术在地形测绘中的应用[J].居业,2025,(02):214-216.

[4]褚会鹏,晁冲.无人机测绘技术在建筑工程测量中的应用探析[J].中国高新科技,2025,(02):78-80.

作者简介:

马焕卿(1995--),男,回族,新疆昌吉人,本科,初级,研究方向:测绘工程。