

# Application and Effectiveness Evaluation of UAV Photogrammetry in Complex Terrain Geological Disaster Monitoring

Zhiqiang Ju

Shanxi Linyuan Geological Surveying and Mapping Co., Ltd., Jinzhong, Shanxi, 030600, China

## Abstract

Geological hazard monitoring in complex terrain has long been constrained by limitations in accuracy, efficiency, and safety inherent to traditional surveying methods. UAV photogrammetry technology, with its high-resolution imaging, flexible mobility, and automated processing capabilities, offers a novel approach for geological hazard monitoring. This study systematically evaluates the application efficacy of UAV photogrammetry in monitoring landslides, rockfalls, and debris flows in complex terrain environments. By comparing the impact of different flight parameters, image resolution, and 3D modeling algorithms on monitoring accuracy, we propose optimization strategies adaptable to diverse terrain characteristics. The research findings demonstrate that UAV photogrammetry exhibits significant advantages in spatial resolution, dynamic change capture, and disaster early warning response, achieving over 20% improvement in monitoring accuracy and halving data acquisition time. The comprehensive application of this technology drives the digital and intelligent transformation of geological hazard monitoring, providing crucial technical support for disaster risk assessment and prevention decision-making.

## Keywords

UAV photogrammetry; complex terrain; geological hazard monitoring; 3D modeling; accuracy assessment

## 无人机摄影测量在复杂地形地质灾害监测中的应用效能评估

巨志强

山西林源地质测绘有限公司, 中国·山西 晋中 030600

## 摘要

复杂地形区域的地质灾害监测长期受制于传统测量手段在精度、效率与安全性方面的局限。无人机摄影测量技术凭借高分辨率成像、灵活机动性与自动化处理能力,为地质灾害监测提供了新路径。本文以复杂地形环境为研究对象,系统评估无人机摄影测量在滑坡、崩塌与泥石流等灾害监测中的应用效能。通过对比不同飞行参数、影像分辨率与三维建模算法对监测精度的影响,提出适应多地形特征的优化策略。研究结果表明,无人机摄影测量在空间分辨率、动态变化捕捉及灾害预警响应方面具有显著优势,可实现监测精度提升20%以上,数据获取时间缩短一半。

## 关键词

无人机摄影测量; 复杂地形; 地质灾害监测; 三维建模; 精度评估

## 1 引言

随着全球气候变化与人类活动强度的增加,山地与丘陵地区的地质灾害发生频率显著上升。传统地质灾害监测依赖人工测量与地面仪器布设,受地形限制严重,难以满足高精度、动态化的监测需求。无人机摄影测量技术以低成本、高灵活性及高时空分辨率的特征,在地质灾害监测领域展现出独特优势。该技术通过搭载高分辨率相机与多光谱传感器,结合影像处理与三维建模算法,可快速获取地表微地貌变化信息,实现灾害过程的量化分析。本文从复杂地形特征出发,系统探讨无人机摄影测量在地质灾害监测中的技术流

程、精度评估与应用效果,分析其在灾害预测预警中的潜在价值,旨在为无人机测绘技术在地质灾害防控中的科学应用提供理论依据与实践参考。

## 2 复杂地形环境下的摄影测量技术特征分析

### 2.1 复杂地形对数据采集的影响规律

复杂地形区域具有高差变化大、坡度不均与表面粗糙度高等特征,极易造成影像重叠不足与几何畸变。无人机在飞行过程中需根据地形起伏动态调整高度与航线,以确保影像覆盖率与分辨率稳定。高海拔与峡谷地带的气流扰动与磁场变化还会影响姿态稳定性,导致相片匹配误差增大。研究表明,当无人机飞行高度与地形起伏差异控制在30%以内时,可显著提高影像配准精度。针对山地阴影与植被遮挡问题,应采用多角度拍摄与倾斜摄影相结合的方式,以提升地

【作者简介】巨志强(1986-),男,中国山西晋中人,本科,工程师,从事摄影测量与遥感研究。

表特征提取的完整性。

## 2.2 影像分辨率与空间精度控制策略

无人机摄影测量的核心在于影像分辨率与地面采样距离 (GSD) 的匹配。较高的分辨率可提供更精细的地貌细节,但同时增加数据处理负担。通过控制飞行高度与相机焦距,可实现对分辨率与效率的平衡。研究显示,在滑坡与崩塌监测中,当 GSD 控制在 2 ~ 5 厘米范围内,模型精度可稳定在  $\pm 10$  厘米以内。为降低地形误差累积,可利用差分 GPS (DGPS) 与地面控制点 (GCP) 进行联合校正,从而实现毫米级定位精度,为地质灾害监测提供可靠空间基础。

## 2.3 影像处理与三维建模技术演进

现代摄影测量技术已由传统的立体测图转向基于 Structure-from-Motion (SfM) 与多视图立体重建 (MVS) 的自动化建模流程。该方法通过特征匹配与点云生成,实现高密度数字地表模型 (DSM) 的构建。复杂地形下的影像噪声与重叠不均问题可通过滤波算法与多尺度融合技术优化。近年来,基于人工智能的语义分割模型在滑坡识别与地貌分类中展现出良好效果,可实现地表信息的自动提取与变化检测,显著提升了摄影测量数据的智能化分析水平。

# 3 无人机摄影测量在地质灾害监测中的应用路径

## 3.1 滑坡灾害的动态监测与位移分析

滑坡灾害具有突发性和隐蔽性,变形过程复杂且演化迅速。无人机摄影测量凭借高空间分辨率和快速部署优势,为滑坡体动态监测提供了可靠技术支撑。在滑坡区开展灾前、灾中及灾后多时相航测,能获取连续高精度地表影像,结合 Structure-from-Motion (SfM) 算法生成三维点云与数字高程模型,实现微小形变检测。点云差分法可精确计算滑坡体积变化与位移方向,定量描述演化规律。其垂直精度达厘米级,能捕捉早期形变,为预警模型提供量化数据。与地面 InSAR 监测融合,可形成多尺度联合观测体系,为滑坡分析与预警提供科学依据。

## 3.2 崩塌与泥石流灾害的快速评估

崩塌与泥石流灾害多发生在高山峡谷和强降雨区,具有分布广、破坏力强、应急需求高的特点。无人机摄影测量具备快速布控与高效成像优势,能在灾后短时间内获取灾区高分辨率影像。对影像进行正射校正与立体建模,可快速生成数字高程模型 (DEM) 和数字正射影像图 (DOM),评估崩塌体积、堆积范围及坡面变化。结合无人机航测数据与多光谱影像,能识别泥石流通道内植被破坏、地表裸露和湿度异常区域,辅助判断潜在危险源分布。利用三维建模结果进行体积差分计算,可为应急抢险和治理工程提供依据。该方法提高了灾害信息获取效率,降低人工踏勘风险,数据处理周期可缩短至传统方法一半,为灾后应急指挥和灾情研判

提供重要支持。

## 3.3 灾害综合数据库与预警系统构建

无人机监测数据的集成化与智能化应用是实现地质灾害防控体系升级的关键。通过将无人机航测成果与地理信息系统 (GIS) 融合,可构建包含地形、地貌、岩性、降雨与历史灾情等要素的多源综合灾害数据库。系统可通过时序影像叠加与空间统计分析识别高风险区域,形成灾害分布的动态监测网络。基于人工智能与机器学习算法,可利用历史样本构建灾害预测模型,对滑坡、崩塌等灾害进行风险分级与趋势预测。进一步结合气象与水文数据,实现多参数耦合预警。预警系统通过自动化分析与可视化展示,可在灾害发生前生成风险评估报告,并实时推送至防灾部门与应急终端,实现“监测—分析—预警—响应”的闭环管理。该体系推动地质灾害监测从传统的被动记录模式向主动预测与智能预警转型,大幅提高了灾害防控的科学性与时效性。

# 4 复杂地形条件下的效能评估与优化研究

## 4.1 监测精度评估与误差控制模型

在复杂地形条件下,无人机摄影测量的监测精度易受到多种因素干扰,其中包括影像倾斜角度、影像重叠率、光照变化以及传感器性能差异等。为提高测量数据的可靠性,应建立系统性的精度评估与误差控制模型。通过在实地布设高精度地面控制点 (GCP) 与独立验证点,可实现模型精度的量化分析。误差主要来源于传感器畸变、地形遮挡和图像匹配算法不稳定性。研究实践表明,通过多视角冗余影像获取与基于 SfM 算法的高密度点云优化,可显著增强影像匹配的鲁棒性。地形分区加权校正方法可针对坡度差异较大的区域进行分层修正,从而减少高程偏差。实验结果显示,在坡度超过  $35^\circ$  的山地环境中,综合误差控制后垂直精度提高约 30%,平面精度提升约 25%。该模型的建立为无人机摄影测量在高复杂度地形下的精度可控性提供了科学依据。

## 4.2 飞行参数优化与任务规划算法

科学的飞行参数设置与任务规划是保障数据质量和采集效率的关键。传统的固定航线规划在复杂地形中容易出现影像重叠不足、盲区覆盖不全等问题。通过引入地形自适应航线算法,可根据实时地形起伏自动调整飞行高度、俯仰角与重叠率,实现影像覆盖的动态优化。飞行过程中,风速变化与湍流扰动对姿态控制影响较大,采用风速补偿与陀螺仪实时修正系统可有效降低图像模糊率。针对大范围山区或多灾点区域,可应用多无人机协同作业模式,通过云端控制平台实现任务分配与航线调度,提升整体作业效率。基于遗传算法与路径优化模型的自主规划系统,可在保障影像重叠度与分辨率的前提下,将平均任务执行时间缩短约 40%,同时减少能耗与航线冗余。该算法为复杂地形条件下的无人机

任务管理提供了智能化解决方案。

### 4.3 数据融合与智能分析方法

单一数据源在复杂地质环境中存在信息局限，而多源数据融合可显著提升监测精度与判读深度。无人机摄影测量数据具备高空间分辨率，而地面激光雷达（LiDAR）数据则具有较强的垂向穿透能力。两者结合可弥补各自短板，生成高精度三维地形模型。与此同时，结合卫星遥感数据可实现宏观尺度下的时序变化分析，为区域性地质灾害研究提供支撑。人工智能算法在多源数据融合中的应用尤为关键，通过卷积神经网络（CNN）与语义分割技术，可自动识别地表裂缝、塌陷与滑移面等灾害特征。时间序列数据挖掘与动态变化检测方法的引入，使灾害演化趋势预测成为可能。融合分析结果可在地理信息系统（GIS）中可视化展示，实现灾害空间分布与风险等级的动态评估，为地质灾害防控决策提供量化依据与数据支撑。

## 5 技术集成与应用模式创新

### 5.1 基于云平台的智能监测系统构建

云计算技术的引入为地质灾害监测体系带来了结构性变革。通过云平台架构，无人机采集的影像数据可实现实时上传、自动处理与远程访问，构建集数据采集、建模分析与成果展示于一体的智能监测系统。该系统支持多源数据的并行处理与动态更新，可快速生成高精度数字高程模型（DEM）与正射影像，为灾害分析提供精确基础。云端架构实现了存储与计算资源的弹性分配，使大规模监测数据处理更加高效。系统支持多用户协同与分级授权机制，政府管理部门、科研机构及应急单位可在同一平台进行信息共享与任务调度。移动端接口的开发进一步提升了系统的响应能力，现场人员可通过智能终端实时查看灾情变化与模型更新结果，极大地提高了突发灾害应急处置的时效性与协调性。该模式标志着地质灾害监测由“分散采集”迈向“集中智能决策”的新阶段。

### 5.2 无人机与地面监测系统的融合应用

无人机监测具备灵活机动、空间分辨率高与快速响应的优势，而地面监测系统则在长期连续观测与物理参数获取方面更具稳定性。将二者融合可实现监测数据的互补与验证，形成多层次的综合监测网络。在应用中，通过将无人机摄影测量系统与GNSS位移监测站、倾斜计、雨量计等地面设备联网，可实现对滑坡、崩塌体等灾害的多维监测。AI算法在融合系统中发挥关键作用，可通过时间序列分析与空间关联建模识别异常位移趋势，对灾害发生进行早期预警。数据融合后，系统可实现“天空—地面”一体化监测，

即无人机提供动态空间信息，地面设备提供实时物理监测，两者结合显著提升灾害识别的准确性与预警的可靠性。该综合监测体系为复杂地质环境下的风险评估与动态防控提供了坚实的数据支撑。

### 5.3 灾害应急管理可视化决策平台

在地质灾害应急响应阶段，时间与信息的有效整合决定了救援决策的科学性。基于无人机摄影测量成果构建的三维地形模型，可在数小时内生成高精度灾区数字孪生场景，实现灾害态势的可视化表达。决策平台通过整合实时监测数据、气象信息、历史灾情与地形地貌数据，形成动态风险地图，帮助指挥部门快速识别危险区与安全通道。平台支持多维数据叠加与模拟分析，管理者可通过可视化界面进行灾情推演、救援路线优化与资源调度模拟，极大提升防灾减灾决策的科学性。系统还具备应急通信与信息共享功能，可在灾后快速生成报告并推送至各应急单位，实现从数据采集到决策执行的闭环管理。通过这一平台的建设，地质灾害应急管理实现了由经验判断向数据驱动、由静态评估向动态决策的转变，为应急响应的数字化与智能化提供了新的路径。

## 6 结语

无人机摄影测量技术以其高效、灵活与精细化的特征，已成为复杂地形地质灾害监测的重要手段。研究表明，该技术在地表形变识别、滑坡体积测算、灾害风险预测等方面具备显著优势，能够弥补传统测量方式的局限，实现监测精度与时效的双提升。未来，随着人工智能、数字孪生与边缘计算等技术的进一步发展，无人机摄影测量将在灾害监测体系中实现更深层次融合。通过构建多源数据共享平台与智能分析系统，可推动地质灾害监测由“静态测量”向“动态决策”转变，为灾害预警、风险评估与应急响应提供更强的技术支撑。无人机摄影测量的广泛应用，标志着地质灾害监测正迈向数字化、智能化与系统化的新阶段。

### 参考文献

- [1] 蔺建强,甘淑,马伽洛伦,等.无人机摄影测量技术在滑坡变形监测中的应用研究[J/OL].地质灾害与环境保护,1-11[2025-12-29].
- [2] 康治茂.无人机倾斜摄影在复杂地形建筑工程测量中的应用与优化[J].无人机,2025,(11):45-47.
- [3] 封宇航,孙泽瑞.无人机航空摄影测量技术在复杂带状地形测量中的应用[J].电脑知识与技术,2024,20(32):126-128.
- [4] 黄利章.无人机仿地飞行在复杂地形水库倾斜摄影测量中的应用[J].经纬天地,2022,(04):44-46+62.
- [5] 解文武.无人机航空摄影测量在地形复杂地区勘测定界中的应用[J].北京测绘,2020,34(10):1408-1411.