

# 无人机航测遥感技术在山区地形地貌高精度测绘中的误差分析与优化

程名<sup>1</sup> 陈明珠<sup>2</sup>

1 南京江地勘测有限公司 2 江苏宏信地理信息技术有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v8i2.2147

**[摘要]** 随着山区资源开发与工程建设需求的增长,无人机航测遥感技术因高效性与高精度成为山区地形地貌测绘的重要手段,但其在复杂地形、气象环境及设备局限等因素影响下易产生显著测绘误差。本文系统剖析山区地形地貌特殊性、气象环境、设备性能及作业流程引发的误差机制,在此基础上,提出从地形特征自适应航测作业优化、气象环境适应性技术改进、数据处理算法创新及全流程质量控制体系构建等方面提出误差优化策略,以期为山区高精度测绘提供系统性误差解决方案。

**[关键词]** 无人机航测遥感; 山区; 地形地貌; 高精度测绘; 误差

**中图分类号:** V279+.2 **文献标识码:** A

## Error Analysis and Optimization of Unmanned Aerial Vehicle Aerial Surveying and Remote Sensing Technology in High-Precision Mapping of Mountainous Terrain and Geomorphology

Ming Cheng<sup>1</sup> Mingzhu Chen<sup>2</sup>

1 Nanjing Jiangdi Surveying and Mapping Co., LTD.

2 Jiangsu Hongxin Geographic Information Technology Co., LTD

**[Abstract]** With the growth of resource development and engineering construction demands in mountainous areas, unmanned aerial vehicle (UAV) aerial surveying and remote sensing technology has become an important means for mapping the topography and geomorphology of mountainous areas due to its high efficiency and high precision. However, it is prone to significant mapping errors under the influence of factors such as complex terrain, meteorological environment and equipment limitations. This paper systematically analyzes the error mechanisms caused by the particularity of terrain and geomorphology, meteorological environment, equipment performance and operation processes in mountainous areas. On this basis, error optimization strategies are proposed from aspects such as the optimization of adaptive aerial surveying operations based on terrain features, the improvement of adaptive technologies for meteorological environment, the innovation of data processing algorithms and the construction of a full-process quality control system. With the aim of providing systematic error solutions for high-precision mapping in mountainous areas.

**[Key words]** Unmanned Aerial Vehicle (UAV) aerial surveying and remote sensing Mountainous area Topography and landforms High-precision surveying and mapping Error

### 引言

工程测绘作为资源开发、工程建设与生态保护的基础,其精度与效率直接影响项目质量与进度。在山区地形地貌测绘中,传统技术受地形起伏、植被覆盖及复杂气象条件制约,面临作业难度大、数据完整性差等局限,而无人机航测遥感技术凭借高效性、实时性及高精度等优势,成为山区高精度测绘的重要手段。然而,山区特殊地貌与多变环境,加之传感器硬件精度不足、数

据处理算法适应性缺陷等因素,易导致航测数据产生显著误差,影响地形建模精度。因此,进行无人机航测遥感技术在山区地形地貌高精度测绘中的误差分析与优化研究具有十分重要的现实意义。

### 1 无人机航测遥感技术在山区地形地貌测绘中的误差分析

#### 1.1 地形地貌特殊性引发的误差

1.1.1 地形起伏导致的航测盲区与数据缺失。山区复杂地形的剧烈起伏会形成显著的地形遮挡效应,当无人机搭载的激光雷达或光学相机进行数据采集时,陡峭崖壁、深谷褶皱等特殊地貌会因自身几何形态对传感器视场产生物理遮挡,导致地形阴影区及数据采集盲区的出现。这种遮挡使得激光点云无法有效穿透或反射至接收装置,光学影像也因视角限制形成信息缺失区域,进而造成地形建模时关键点位数据的不完整。数据缺失会直接引发三维地形模型的局部失真,导致高程数据偏差、地形特征线断裂等问题,严重影响山区地形地貌测绘成果的精度与完整性,尤其在需要精细表达地形细节的高精度测绘场景中,此类误差的累积效应会显著降低模型的可靠性。

1.1.2 植被覆盖引发的遥感数据偏差。山区不同植被类型与覆盖度特征对遥感数据精度影响显著,茂密植被冠层因自身光谱特性会对光学遥感影像的反射光谱产生干扰,使地表真实光谱特征被植被光谱信息覆盖,导致影像解译时地形要素提取出现偏差;而LiDAR点云受植被遮挡影响,激光穿透能力随植被密度增加而减弱,大量点云仅作用于植被冠层表面,难以到达真实地面,造成地面点云数据缺失。这种植被误判会使地形高程信息处理时将植被高度误判为地表高程,形成高程数据误差,且该误差会在地形建模与数据分析过程中逐级传递,最终导致山区地形地貌测绘成果的高程精度显著下降<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 气象环境因素导致的误差

1.2.1 大气湍流与风力对无人机飞行稳定性的影响。山区特殊风场环境中,山谷风与阵性风的不规则运动形成大气湍流,对无人机飞行轨迹产生持续性扰动,致使无人机飞行姿态出现偏移,进而引发传感器视角发生改变。这种视角变化会使数据采集时的点位坐标与实际地形位置产生偏差,尤其是在强风条件下,无人机飞行稳定性下降,传感器数据采集的连续性和准确性受到显著影响。通过对不同风力等级下的航测数据进行分析,可以建立起风力等级与航测精度之间的量化关联模型,该模型能够反映出随着风力增强,航测数据误差逐渐增大的规律,为山区无人机航测作业在气象条件选择和飞行参数调整方面提供依据。

1.2.2 云雾、降水等天气对遥感信号的衰减。山区多雾气候中,大气气溶胶粒子对光学影像光线产生散射与吸收作用,使成像光线能量衰减,导致光学影像分辨率降低,地形细节特征因影像模糊而难以准确识别;多雨天气下,降水粒子对LiDAR激光信号形成衰减效应,雨滴的遮挡与散射使激光回波信号强度减弱,接收端获取的点云数据密度降低且噪声增加。光学影像分辨率下降会造成地形边界特征提取偏差,而LiDAR信号衰减导致的点云稀疏则使地形起伏细节表达不完整,二者共同作用下,山区地形地貌测绘中地形特征提取精度受到显著影响,复杂地形区域的地貌形态还原准确性大幅降低。

#### 1.3 设备性能与技术局限引发的误差

1.3.1 传感器硬件精度不足导致的测量误差。无人机搭载的光学相机若存在焦距偏差,会使成像时物距计算出现偏差,导致地面点位在影像上的坐标定位不准确;LiDAR激光发射器的角度

误差则会使激光束发射方向偏离理论位置,造成点云数据的空间坐标偏差。在山区长距离测绘场景中,这些硬件误差会随着测绘距离的增加而不断累积,形成显著的点位误差,影响地形点云的三维坐标精度。传感器标定精度直接决定了硬件误差修正的效果,标定精度越高,对硬件固有误差的补偿越充分,地形测绘成果的精度也就越高,二者呈现出明显的正相关关系,因此提升传感器标定精度是降低硬件误差影响的关键途径<sup>[2]</sup>。

1.3.2 数据处理算法对山区地形的适应性缺陷。现有点云滤波算法在山区复杂地形环境中,因难以精准辨识低矮植被与地形点的空间特征差异,常将部分地形点误判为植被点剔除或保留非地面点,致使点云数据中地面点集不完整;而影像匹配算法在地形纹理缺乏区域,如裸露岩石坡面或大面积均质植被区,因缺乏显著特征点导致匹配准确率下降,出现误匹配或匹配点对稀疏问题。点云滤波误差会直接造成地形表面模型的高程偏差与细节缺失,影像匹配精度不足则导致三维模型纹理映射失真及几何结构变形,二者共同作用下,山区地形地貌三维建模的整体精度受到显著影响,难以真实还原复杂地形的空间形态与细节特征。

#### 1.4 作业流程与人为因素引发的误差

1.4.1 航迹规划不合理导致的数据采集漏洞。山区复杂地形条件下,采用固定航高与规则航迹的规划模式存在显著局限性,该模式难以适应地形的起伏变化,易导致航迹重叠度无法满足数据采集需求,且飞行方向若与地形走向不匹配,会进一步加剧数据覆盖盲区的形成。这种规划方式下,无人机在飞行过程中对陡峭崖壁、深谷等特殊地貌区域的数据采集不完整,部分地形区域因航迹覆盖不足而出现信息缺失,直接影响地形建模的完整性。数据覆盖漏洞会使三维地形模型出现局部区域的信息空白,导致地形特征无法完整表达,进而降低山区地形地貌测绘成果的可靠性与精度,难以满足高精度测绘作业的要求。

1.4.2 数据拼接与校准过程中的人为操作误差。在山区多架次、多时段航测数据拼接过程中,控制点布设不足会使不同航次数据缺乏足够空间基准支撑,导致拼接时坐标匹配偏差,而坐标转换参数设置不合理则会加剧不同坐标系间的误差传递,二者共同作用形成明显接缝误差。人工干预校准环节中,操作人员对数据偏差的主观判断差异会导致调整策略不一致,部分区域可能因过度修正出现新的误差,另一部分区域则可能因修正不足保留原有偏差,这种主观操作不确定性直接影响最终成果精度,使山区地形测绘成果的整体一致性和准确性受损。

### 2 无人机航测遥感技术在山区地形地貌高精度测绘的优化策略

#### 2.1 基于地形特征的航测作业优化

2.1.1 动态自适应航迹规划方法。基于数字高程模型(DEM)的山区航迹优化算法,通过解析地形起伏特征生成自适应航测路径,依据不同区域地形坡度与高程差动态调整无人机飞行高度,在陡峭地形区域降低航高并增加航迹密度,于平缓地带保持常规航高以提升作业效率。该算法突破固定航高与规则航迹的局限,设计变航高与不规则航迹组合模式,使无人机在峡谷、崖

壁等复杂地貌区域实现数据采集路径的智能规划,有效扩大地形遮挡区域的传感器覆盖范围,从数据采集源头提升山区地形地貌测绘的完整性与精度<sup>[3]</sup>。

2.1.2多传感器协同数据采集方案。构建无人机LiDAR与高分辨率光学相机协同作业模式,借助LiDAR点云在三维坐标定位方面的精度优势,穿透山区植被冠层获取地面点云数据,同时利用光学相机采集高分辨率影像以记录地形纹理信息,通过设计数据互补采集策略,使LiDAR的三维坐标与光学影像的纹理特征形成信息互补。该方案在山区植被覆盖区作业时,可利用LiDAR点云确定地形真实高程,结合光学影像纹理特征区分植被与地形边界,有效提升复杂植被环境下地形地貌的还原精度。

#### 2.2气象环境适应性改进技术

2.2.1基于气象预报的航测作业决策系统。开发融合山区微气象数据的航测时机评估模型,通过对历史气象数据与对应航测精度数据的分析,建立风力、能见度等气象参数与航测成果精度的量化关联模型,明确不同气象条件下数据采集误差的变化规律。将该模型与实时天气预报系统对接,依据未来时段的气象预测数据动态评估航测作业的适宜性,自动生成优化后的作业计划,在大风、浓雾等恶劣天气来临前调整作业时间或区域,从作业安排层面规避气象环境对数据采集质量的不利影响。

2.2.2传感器抗干扰技术改进。针对山区云雾天气对光学影像的干扰,采用偏振滤波技术对光学相机进行改进,通过偏振片选择性过滤大气散射产生的偏振光,减少气溶胶粒子对光线的散射效应,从而提升云雾环境下光学影像的清晰度与分辨率,使地形细节特征得以准确呈现;针对降水环境对LiDAR信号的衰减,优化LiDAR信号接收系统的滤波算法与硬件灵敏度,增强系统对微弱回波信号的识别与提取能力,降低降水粒子对激光信号的散射干扰,提高复杂气象条件下点云数据的采集密度与质量,确保恶劣天气下山区地形地貌数据采集的可靠性。

#### 2.3数据处理算法优化与创新

2.3.1山区地形专用点云滤波与分类算法。提出基于地形坡度、曲率特征的点云自适应滤波方法,通过计算点云数据中各点的地形坡度与曲率值,构建自适应阈值调节机制,对陡峭地形区域采用更严格的滤波条件,平缓区域则放宽阈值,实现不同地形特征下的精细化滤波处理。同时,引入机器学习技术,利用山区典型地貌的点云样本数据训练植被与地形点的分类模型,通过提取点云的空间几何特征、回波强度等多维特征,提升模型对低矮植被与地形点的辨识能力,从而在复杂地形条件下准确提取地面点云,有效降低植被误判导致的高程误差,提高山区地形地貌测绘的精度<sup>[4]</sup>。

2.3.2多源数据融合的高精度地形建模方法。设计光学影像与LiDAR点云的特征匹配与融合算法,通过提取光学影像中的纹理特征点与LiDAR点云的三维几何特征点,构建跨模态特征匹配网络,实现两类数据的空间位置精准对齐。利用光学影像的纹理信息作为约束条件,在点云插值过程中引入纹理梯度权重,对纹理丰富区域进行高密度插值,对纹理匮乏区域采用几何约束插值,从而构建同时顾及地形三维几何细节与光谱纹理特征的高

精度三维地形模型。该方法通过多源数据的优势互补,有效提升山区地形地貌表达的完整性与细节精度,解决单一数据源在复杂地形区域的建模缺陷。

#### 2.4质量控制与误差补偿体系构建

2.4.1全流程误差实时监测机制。建立涵盖数据采集、预处理至建模输出全流程的误差监测指标体系,依据无人机航测作业特性设定航测姿态偏差阈值、数据完整性标准及建模精度评价参数,以此为基础开发实时质量控制软件。该软件通过嵌入式算法对无人机飞行姿态数据、传感器采集的原始数据完整性以及三维建模过程中的精度指标进行动态追踪,当监测到航测姿态异常、数据缺失超阈值或建模误差超出预设范围时,自动触发多级预警机制,为山区航测作业各环节的误差控制提供实时决策支持<sup>[5]</sup>。

2.4.2基于误差模型的动态补偿技术。通过对山区地形测绘误差数据的系统性分析,提炼地形坡度、植被覆盖度等关键影响因子的分布规律,运用统计学方法构建误差与因子间的量化数学模型,明确不同地形条件下误差的产生机制与传播路径。基于该模型设计误差预补偿算法,将模型参数嵌入航测数据处理流程,在数据采集阶段利用实时传感器数据触发算法运算,对因地形起伏或植被遮挡可能产生的误差进行预判,在数据预处理环节通过模型映射关系对原始数据实施动态修正,使最终输出的地形成果在平面位置与高程精度上均得到有效提升,实现山区航测误差的智能化补偿控制。

### 3 结语

综上所述,通过系统分析无人机航测遥感技术在山区地形地貌高精度测绘中的误差来源,主要包括地形起伏与植被覆盖引发的数据偏差、气象环境对信号的衰减、设备硬件与算法局限及作业流程中的人为误差等,在此基础上,采取基于地形特征的动态航迹规划、多传感器协同采集、气象适应性技术改进、数据处理算法优化及全流程质量控制等综合优化策略,有效提升山区测绘精度。未来可进一步探索新型传感器与智能化数据处理技术在山区复杂场景中的应用,推动无人机航测遥感技术向更高精度、更强适应性方向发展。

#### 【参考文献】

- [1]翁达权.无人机倾斜摄影测绘技术在联合测绘中的应用研究[J].科技资讯,2023,21(22):39-42.
- [2]李阳.无人机倾斜摄影测量在矿山测绘中运用分析[J].世界有色金属,2023(13):19-21.
- [3]徐卓知.倾斜摄影测量与遥感技术运用研究[J].低碳世界,2021,11(1):80-81.
- [4]李光运.在测绘工程中无人机倾斜摄影技术的运用研究[J].中国房地产业,2020(11):282.
- [5]蔡奇.GIS技术和数字化测绘技术在工程测量中的应用[J].工程建设与设计,2023(1):138-140.

#### 作者简介:

程名(1997—),女,汉族,吉林松原人,本科,助理工程师,技术员,研究方向:测绘。