

基于无人机影像的地形测绘精度提升方法研究

陶家祥

大理市土地收购储备交易中心, 云南 大理 671000

[摘要] 无人机摄影测量技术正经历从“可用”到“可靠”的关键转型阶段, 其精度提升面临多维度技术挑战。从系统论视角看, 测绘精度受传感器性能、飞行稳定性、环境因素、处理算法等多元变量耦合影响, 需要建立全局优化模型。当前技术发展呈现三个显著特征: 硬件系统向多传感器集成化发展, 数据处理向智能化方向演进, 质量控制向全过程追溯转变。这些趋势为精度突破提供了新的技术路径, 但也带来了系统复杂度提升、误差源增多等新问题。特别是在应对复杂地形和恶劣环境时, 传统精度控制方法往往失效, 亟需创新性的解决方案。本研究从系统工程角度出发, 构建包含感知层、处理层和应用层的全链路精度保障体系, 重点解决异构数据融合、动态环境适应和智能质量控制等核心问题。

[关键词] 无人机摄影测量; 地形测绘; 精度优化; 多源数据融合; 误差控制

DOI: 10.33142/ect.v3i5.16476

中图分类号: P231

文献标识码: A

Research on the Method of Improving Terrain Surveying Accuracy Based on Unmanned Aerial Vehicle Images

TAO Jiexiang

Dali Land Acquisition and Reserve Trading Center, Dali, Yunnan, 671000, China

Abstract: Unmanned aerial vehicle photogrammetry technology is undergoing a critical transformation stage from "usable" to "reliable", and its accuracy improvement is facing multidimensional technical challenges. From a systems theory perspective, surveying accuracy is influenced by the coupling of multiple variables such as sensor performance, flight stability, environmental factors, and processing algorithms, requiring the establishment of a global optimization model. The current technological development presents three significant characteristics: hardware systems are evolving towards multi-sensor integration, data processing is evolving towards intelligence, and quality control is shifting towards full process traceability. These trends provide new technological paths for precision breakthroughs, but also bring about new problems such as increased system complexity and more sources of error. Especially when dealing with complex terrain and harsh environments, traditional precision control methods often fail, and innovative solutions are urgently needed. This study starts from the perspective of systems engineering and constructs a full chain accuracy assurance system that includes perception layer, processing layer, and application layer, focusing on solving core issues such as heterogeneous data fusion, dynamic environment adaptation, and intelligent quality control.

Keywords: unmanned aerial vehicle photogrammetry; topographic mapping; precision optimization; multi source data fusion; error control

精度提升需求主要源于三个方面的业务转型: 首先, 测绘服务对象从传统地形图向实景三维模型扩展, 对几何精度和纹理真实性提出更高要求; 其次, 应用场景从静态测绘向动态监测延伸, 需要解决多时相数据的一致性问题; 再次, 服务模式从成果交付向按需服务转变, 要求建立量化的精度保障机制。这些变化使得传统以控制点为核心的精度控制方法难以满足需求, 必须在技术体系上进行根本性创新。当前制约精度提升的关键因素包括: 传感器标定的时效性不足, 难以适应野外复杂环境; 自动化处理算法的场景泛化能力有限; 质量评价指标单一, 缺乏全过程精度追溯能力。这些问题的解决需要跨学科协作, 特别是光学工程、计算机科学和测绘科学的深度融合。

1 无人机摄影测量在地形测绘中的应用价值

1.1 提高地形测绘精度

无人机摄影测量技术凭借其高分辨率影像采集能力,

显著提升了地形测绘的精度。通过集成全球定位系统差分定位与高精度惯性导航系统, 无人机能够在低空飞行中精确捕捉地表特征, 生成厘米级甚至毫米级精度的地形数据。相较于传统测绘方法, 无人机摄影测量减少了人为操作误差, 并能适应复杂地形, 实现全面覆盖, 确保地形特征的高保真还原。结合立体像对技术与数字高程模型, 可进一步细化地形细节, 为精准地形分析提供坚实的数据基础。

1.2 提升测绘工作效率

传统测绘通常需要大量人力和物力进行现场作业, 效率较低。而无人机作业不受地形复杂度和部分天气条件的限制, 能够在短时间内完成大面积区域的影像采集, 极大地缩短了测绘周期, 提升了工作效率。无人机摄影测量结合自动化处理软件, 如自动空中三角测量与影像匹配算法, 能快速生成测绘成果, 显著缩短从数据采集到成果输出的时间^[1]。此外, 无人机作业具有高度灵活性, 可根据任务需求快速调

整飞行计划,实现测绘任务的即时响应与高效执行。

2 基于无人机摄影测量的地形测绘的具体测量方法

2.1 飞行航线规划

飞行航线规划是确保测绘精度的首要环节,其核心在于建立空间几何关系与飞行参数的映射模型。现代航线规划系统需综合考虑摄影测量学中的共线方程与投影几何原理,通过构建飞行高度、影像重叠度与地面采样距离之间的数学关系,实现最优航摄设计。在丘陵地带作业时,需引入数字表面模型辅助的变高飞行算法,使无人机始终保持恒定的相对航高。针对城市建筑区测量,应采用倾斜摄影与垂直摄影相结合的混合航线模式,通过多视角影像获取解决建筑物遮挡问题。当前先进的航线规划软件已集成大气折射校正模块,能自动补偿不同海拔高度下的光线折射误差。飞行任务执行阶段需实时监控风速、光照强度等环境参数,动态调整飞行速度与曝光间隔,确保影像质量满足后期处理要求。

2.2 影像采集技术

高质量影像采集依赖于光学系统性能与摄影参数的协同优化。镜头畸变校正需基于严格的实验室标定结果,应用布朗-康拉德模型对径向畸变和切向畸变进行数字补偿。在光照条件复杂的场景下,应启用高动态范围成像模式,通过多曝光融合技术扩展影像的亮度动态范围。针对不同地表覆盖类型,需选择特定的光谱响应波段:植被监测宜采用近红外波段增强叶绿素反射特征,而地质勘察则需侧重短波红外波段以突出岩矿光谱特性^[2]。时间同步精度直接影响多传感器数据融合质量,现代无人机系统已实现微秒级的PPS脉冲同步,确保GNSS时间戳与快门触发信号的严格对齐。此外,影像存储应采用无损压缩格式,最大程度保留原始辐射信息,为后续的光束法平差提供可靠数据源。

2.3 控制点设置与测量

控制点测量构成摄影测量空三加密的基准框架,其布设方案需遵循空间均匀性与特征显著性原则。在传统测量中,控制点标志通常采用同心圆或棋盘格图案,其几何中心定位精度可达亚像素级。随着测量技术的发展,自然特征点已逐步替代人工标志点,通过SIFT或SURF算法提取稳定的高对比度特征。控制点坐标测定需采用静态GNSS观测方法,观测时长不少于4个卫星星座周期,数据处理应遵循IGS精密星历标准。在困难地区作业时,可引入移动激光扫描系统辅助控制点测量,通过点云配准技术将控制点纳入统一坐标系。针对大面积测区,建议采用分级控制网结构,首级控制点间距不超过5km,图根点密度根据成图比例尺确定,确保误差传播在允许范围内。

2.4 数据处理流程优化

摄影测量数据处理是精度提升的关键环节,需建立严格的质控体系。点云处理阶段应依次实施噪点剔除、地面点分类与空洞修复操作,其中基于形态学的渐进加密三角网滤波算法能有效分离地面与非地面点。在密集匹配过程中,半全局匹配(SGM)算法通过能量函数最小化策略,可在纹理缺失区域保持匹配连续性。三维重建环节需特别注意建筑物边缘的几何保真度,结合CSG建模思想对点云进行规则化处理。针对大范围测区,应采用分块平差策略,通过设置重叠带消除接边误差^[3]。最终成果生成阶段,需通过金字塔结构与LOD技术实现多尺度表达,满足不同应用场景的精度需求。整个处理流程应建立完整的元数据记录,包括传感器参数、处理算法版本及精度评价指标,确保成果的可追溯性。

3 地形测绘精度优化面临的挑战

3.1 影像畸变与传感器误差

光学系统固有的镜头畸变导致影像几何变形,包括桶形畸变和枕形畸变,严重影响空三加密的精度。传感器安装误差引起的外方位元素偏差,造成影像间的相对定向误差累积。温度变化导致的CCD阵列形变,使得内方位元素发生不可预测的漂移。惯性测量单元的时间同步误差,造成曝光时刻与定位数据的时间错位。陀螺仪零偏不稳定性引起的姿态角漂移,导致投影中心位置计算出现系统性偏差。像元尺寸不均匀造成的采样误差,破坏了影像的严格几何对应关系。

3.2 复杂环境下的数据缺失

茂密植被覆盖导致地面激光穿透率下降,点云数据出现大量空洞。水域表面的镜面反射特性造成特征点匹配失败,无法建立有效的立体像对。高反射率地表产生的光饱和现象,使影像丧失纹理细节。建筑物密集区的遮挡效应,形成多视角影像间的盲区。动态物体如车辆、行人造成的瞬时遮挡,引入非地表真实信息。阴影区域的信噪比急剧下降,导致局部匹配精度恶化。

3.3 控制点布置的局限性

特殊地形条件下人工控制点布置困难,如悬崖、沼泽等危险区域。城市环境中高大建筑遮挡GNSS信号,影响控制点坐标测量精度。缺乏显著特征的均质区域,难以选取稳定的控制点目标。控制点密度与测量成本之间的矛盾,制约了大范围测区的精度均匀性。控制点标志的材质退化,造成长期监测项目的基准不稳定。控制点与影像分辨率不匹配,导致中心定位误差增大。

3.4 多源数据融合的精度损失

不同传感器时空基准不统一,引入坐标转换误差。激光点云与摄影测量点云的密度差异,造成特征匹配困难。多时相数据的大气条件变化,导致辐射特性不一致。异构

数据的分辨率不匹配,影响融合结果的几何一致性。数据采集平台动态特性差异,引起采样方式不兼容。坐标系转换过程中的投影变形,破坏原始数据的拓扑关系。

3.5 自动化处理算法的鲁棒性不足

特征提取算法对低纹理区域的适应性不足,造成匹配点分布不均。点云分类算法在复杂场景下的泛化能力有限,导致地物误判。边缘检测算法受噪声干扰严重,影响建筑物轮廓提取精度。空洞修复算法对大面积缺失的恢复效果不佳,引入虚假地形。光束法平差对粗差的抵抗能力弱,造成误差传播失控。三维重建算法对遮挡区域的推测缺乏物理依据,产生几何失真。

4 地形测绘精度优化策略

4.1 硬件层面优化

在无人机平台有限载荷约束下,需建立传感器间的动态耦合模型,解决机械振动引起的相对位置偏移问题。针对多光谱传感器,需开发基于辐射定标场的波段一致性校正方法,消除各通道间的辐射响应差异。对于激光雷达系统,重点解决扫描镜与IMU的时间同步问题,通过纳秒级时间戳同步技术降低点云畸变。此外,应建立传感器老化的定期检测机制,通过实验室标准环境下的周期性复检,确保长期使用中的参数稳定性。在复杂电磁环境中,需采用多频段GNSS接收机设计,通过频率分集提升抗干扰能力。惯性导航系统应引入温度补偿算法,降低零偏随温度变化的漂移量。针对城市峡谷效应,开发基于视觉里程计的辅助定位模块,利用建筑物立面特征实现位置修正。在卫星拒止环境下,可探索地磁匹配与气压高度计融合的替代导航方案。同时需优化硬件散热设计,避免长时间工作导致的性能衰减。

4.2 数据处理算法改进

在神经网络模型设计中,应重点考虑计算效率与精度的平衡,开发轻量化特征提取网络架构。针对不同地形类别,建立自适应训练策略,使模型能够自动识别并适应各类地表纹理特征。在模型部署阶段,需设计在线学习机制,利用实际作业数据持续优化网络参数。同时应开发模型不确定性评估模块,为后续平差提供可靠性指标。点云滤波算法需建立多尺度分析框架,实现从粗到细的渐进式滤波。针对不同地物类型,设计差异化的滤波参数策略,如建筑物区域采用严格滤波阈值,植被区则适当放宽。空洞修复应结合地形连续性分析与地物语义信息,避免简单插值导致的特征失真。对于大面积缺失区域,可引入生成式模型进行合理性推测,但需建立严格的几何约束条件。

4.3 控制点动态优化方法

在复杂地形区域实施控制点优化时,需建立三维空间精度传递模型,通过构建精度衰减函数来量化控制点影响

范围。针对高山峡谷地形,应开发基于视线分析的布设位置优化算法,确保每个控制点的最大可视范围。对于城市建筑密集区,需研究多视角影像联合定位技术,利用建筑物立面特征增强控制点的空间约束强度^[4]。在植被覆盖区,可探索穿透性控制标志设计,通过特殊材质和形状提高在复杂背景下的识别率。同时应建立控制点稳定性评价体系,定期监测标志物位移和形变情况。无人机自主识别控制点技术是重要发展方向,需开发基于深度学习的实时识别算法,实现飞行过程中的动态控制点采集。该技术需要解决不同光照条件下的特征提取稳定性问题,以及快速影像匹配与坐标解算的实时性要求。此外,应构建控制点信息管理系统,实现从布设、测量到维护的全生命周期管理,为后续测绘项目提供可复用的基准网络。

4.4 多时相数据联合平差

多时相数据处理的核心在于建立时空统一的误差控制模型。需要研究地表变化检测与平差权重分配的联动机制,通过变化幅度自动调整特征点的约束强度。针对季节性变化区域,应开发基于物候特征的时相归一化算法,消除植被生长周期对匹配精度的影响。在城市建设区,需构建建筑物三维模型约束下的平差方法,利用稳定结构特征维持基准一致性。长期监测项目中,需重点解决基准维持问题。可通过建立永久性控制场网络,实现毫米级的位置基准传递。研究多源数据融合的基准转换算法,解决不同时期技术标准差异带来的系统偏差。同时应开发时空数据分析平台,实现多期成果的自动对齐与变化量测,为地表形变分析提供可靠数据基础。

4.5 实测数据验证与误差模型构建

误差模型的构建需要采用多层级验证策略。在仪器层面,通过实验室标准环境测试获取传感器固有误差特性;在数据采集层面,设计飞行交叉验证方案量化外业操作误差;在处理环节,实施分阶段精度检测定位主要误差源。应建立误差传播的贝叶斯网络模型,实现不确定性的动态传递与累积分析。质量追溯系统需实现全要素关联,包括原始影像、中间成果和最终产品之间的双向链接。开发基于区块链技术的质量认证体系,确保检测数据的不可篡改性。同时应构建知识驱动的误差预警机制,当处理过程中出现异常精度指标时自动触发复核流程。最终形成闭环的质量控制体系,实现从误差发现到参数优化的完整迭代。

5 结语

无人机测绘精度提升是一个持续优化的过程,需要建立技术研发、标准制定和工程应用的协同推进机制。从技术发展角度看,未来应重点关注三个方向:一是新型传感器技术的工程化应用,如量子导航、光谱成像等前沿技术的实用化突破;二是人工智能技术的深度嵌入,实现从数

据采集到成果生成的全流程智能化;三是云端协同的作业模式创新,构建分布式计算与边缘计算相结合的新型处理架构。在标准体系方面,需要加快制定适应无人机测绘特点的精度评定标准和质量控制规范,建立统一的测试验证环境。在人才培养上,应加强复合型技术队伍建设,培养既懂测绘专业又掌握先进信息技术的创新型人才,为行业可持续发展提供人力支撑。

[参考文献]

[1]翁宇强.无人机遥感航测下宅基地高精度地图测绘方法[J].信息记录材料,2024,25(7):197-199.

[2]王凯,李伟,祖维涛.基于无人机影像的三维模型地形图绘制方法[J].长江信息通信,2024,37(8):8-11.

[3]张旭.无人机倾斜测量在大比例尺地形图绘制中的应用及精度分析[J].化工矿产地质,2024,46(4):352-356.

[4]章达成,袁伟俭,李荣军.倾斜摄影测量在全要素地形数据生产中的应用研究[J].测绘与空间地理信息,2025,48(3):208-210.

作者简介:陶家祥,(1977.10-),单位名称:大理市土地收购储备交易中心,毕业学校和专业:中国地质大学(北京)测绘专业。