

无人机 LiDAR 点云方向数据在地形测绘中的应用研究

姜丙功

太原市市政工程设计研究院 山西 太原 030002

摘要:为解决传统地形测绘效率低、复杂地形适配性差等难题,本文围绕无人机LiDAR点云数据在地形测绘中的应用展开研究。阐述无人机LiDAR系统组成、工作原理及点云数据特性,分析数据采集与预处理关键技术,结合矿山、高植被覆盖区等典型场景开展应用实践,验证其精度与效率优势。研究表明,该技术可实现高精度、高效率非接触测绘,能有效解决植被遮挡等技术难点,降低作业成本,可为各类地形测绘工程提供可靠技术支撑,具有广泛推广价值。

关键词: 无人机LiDAR点云方向; 数据; 地形测绘; 应用

引言:地形测绘是国土规划、工程建设、生态保护等领域的基础工作,传统测绘技术依赖人工操作,存在效率低下、人力成本高、复杂地形难以覆盖等局限,难以满足新时代大范围、高精度测绘需求。随着无人机技术与LiDAR技术的融合发展,无人机LiDAR点云技术凭借高效、精准、非接触等优势,成为地形测绘领域的研究热点。基于此,本文深入研究该技术在地形测绘中的应用,破解技术痛点,为测绘工作提质增效提供理论与实践参考。

1 无人机LiDAR点云数据相关理论与技术基础

1.1 无人机LiDAR系统组成与工作原理

(1) 系统组成: 无人机平台(如M350RTK)提供稳定搭载支撑, LiDAR传感器(如禅思L2)负责激光发射与回波接收, GNSS定位系统获取实时位置信息, IMU惯性测量单元捕捉飞行姿态, 数据存储与传输模块实现数据留存与同步, 各模块协同保障数据采集的连续性与准确性。(2) 工作原理: LiDAR传感器主动发射激光脉冲并接收回波, 通过飞行时间法(ToF)计算目标距离, 结合GNSS的位置数据与IMU的姿态数据, 解算出点云三维坐标; 多回波技术可多次接收反射信号, 有效穿透植被, 提升复杂地形数据采集效果。

1.2 无人机LiDAR点云数据的特性

(1) 空间特性: 核心包括点云密度、空间分辨率和三维坐标精度, 航高越高、航速越快, 点云密度越低、分辨率越差, 如禅思L2在150米航高、15米/秒航速下可保持较高点云密度, 满足高精度测绘需求。(2) 属性特性: 反射强度可区分地物类型, 回波次数反映目标层次, 二者为地形地物分类提供支撑, 多回波数据能穿透植被缝隙, 获取林下地表真实信息, 解决植被覆盖区测绘难题。(3) 数据短板: 原始点云易受环境干扰产生噪声, 存在数据冗余问题, 且植被茂密区域易出现地表点缺失, 影响后续数据处理精度^[1]。

2 无人机LiDAR点云数据的采集与预处理技术

2.1 点云数据采集方案设计

(1) 测区概况分析: 测区地形类型直接决定采集参数, 平原区采用常规参数, 丘陵与矿山因地形起伏大需降低航高、提升重叠率, 高植被区启用多回波模式; 测区范围影响飞行架次与航线规划, 大范围测区需合理规划分区域、规划起降点; 环境方面, 暴雨、强风影响飞行稳定性, 电磁干扰干扰GNSS信号, 需提前踏勘排查, 规避不利因素以保障数据采集稳定准确。(2) 采集参数设置: 结合禅思L2实测经验, 航高按测绘比例尺调整, 1:500比例尺控制在100-150m, 1:1000比例尺为150-200m; 航速不超过15m/s, 避免点云密度不足; 航向重叠率80%-90%、旁向重叠率70%-80%, 保障航带衔接; 云台角度依地形坡度调整, 平缓地形-15°至-30°, 复杂地形减小角度减少遮挡, 扫描模式优先选择重复式, 提升点云密度与完整性。如图1。(3) 采集流程: 先开展测区踏勘, 明确边界、障碍物及环境隐患; 根据测区范围与精度要求布设控制点, 用于后续精度验证与校正; 利用专业软件规划航线, 明确起降点、飞行顺序及应急航线; 采集过程中实时监测点云密度、信号强度及设备状态, 及时调整参数; 外业严格选择作业窗口期, 如红树林测绘优先涨潮前作业, 避免潮水遮挡地表点, 确保数据有效。



图1 无人机LiDAR采集参数与地形适配关系图

2.2 原始点云数据预处理流程

(1) 数据格式转换: 原始点云数据多为LAS格式, 需通过CloudCompare、FME等专业软件读取, 转换为大疆智图、Pix4D等后续处理软件支持的格式, 转换过程中需完整保留点云三维坐标、反射强度、回波次数等核心属性, 避免数据丢失或失真, 确保后续处理顺利开展。(2) 点云去噪: 噪声点主要分为离群点与冗余点, 离群点由设备测量误差、环境干扰等因素产生, 冗余点源于航带重叠区域的重复采集; 采用基于统计分析的去噪算法, 通过计算邻域点距离设定合理阈值, 精准剔除离群点, 同时通过聚类分析合并冗余点, 在保证去噪效果的前提下, 最大限度保留有效地形点, 兼顾数据纯度与完整性^[2]。(3) 点云配准: 针对多航带点云易出现的重叠区域错位问题, 采用基于特征点的迭代最近点算法, 提取各航带的关键特征点并进行精准匹配、对齐; 结合PPK(后处理动态定位)功能, 修正GNSS定位过程中的系统误差与随机误差, 显著提升点云配准精度, 确保航带重叠区域衔接流畅, 配准误差控制在对应测绘比例尺的规范要求范围内。

2.3 点云数据滤波与分类

(1) 点云滤波: 核心目的是分离地表点与非地表点, 为后续地形建模提供纯净的地表点数据, 遵循“保留真实地表、精准剔除干扰点”的原则; 常用滤波算法包括移动窗口滤波、形态学滤波、多尺度特征分析等, 平原区优先采用移动窗口滤波, 效率高且滤波效果稳定; 复杂起伏地形选用形态学滤波, 可有效适应地形变化; 高植被区采用多尺度特征分析算法, 能够穿透植被缝隙, 精准保留林下地表点, 提升滤波针对性与效果^[3]。(2) 点云分类: 将点云数据划分为地形点与非地形点两大类, 非地形点主要包括植被、建筑物、人工设施等; 基于点云的反射强度、空间坐标、回波次数等属性与空间特征, 优化自动分类算法, 提升分类准确率; 在植被覆盖区, 采用单木分割技术, 精准分离单株植被与地表点, 排除植被对地形建模的干扰, 为后续高精度地形建模奠定基础。

2.4 预处理效果评价

(1) 评价指标: 明确设定核心评价指标, 点云数据完整性需覆盖测区98%以上, 无明显遗漏区域; 噪声去除率不低于95%, 确保点云数据纯净; 分类准确率 $\geq 90\%$, 减少分类错误对后续处理的影响; 配准误差需符合对应比例尺测绘的精度要求, 确保点云数据的空间一致性, 全面保障预处理后数据满足后续地形建模及相关应用需求。(2) 评价方法: 采用多维度评价方式, 通过可视化对比, 直观观察去噪、滤波后点云的清晰度、连续性及地表细节保留情况; 通过数据统计分析, 核算各项评价

指标的具体数值, 判断是否达标; 结合实地控制点验证, 对比点云三维坐标与实地测量坐标的偏差, 全面、客观评价预处理质量, 若不达标则返回对应环节重新处理, 直至满足要求。

3 无人机LiDAR点云数据在地形测绘中的应用实践

3.1 不同类型地形的测绘应用

(1) 矿山地形测绘: 主要应用于矿山开采动态管理与生态修复监测, 数据采集重点为矿山边坡、采空区, 需降低航高、提升点云密度, 预处理时重点剔除开采粉尘产生的噪声点; 精度验证需满足高程中误差 $\leq \pm 0.3\text{m}$, 结合点云数据完成土方量计算, 为矿山开采规划、储量核算及生态修复方案制定提供精准数据支撑。(2) 高植被覆盖区地形测绘: 适用于芦仙山景区、红树林等场景, 核心应用多回波植被穿透技术, 结合多尺度滤波算法提取林下地面点, 避免植被遮挡导致的地表点缺失; 精度保障措施包括加密控制点、优化飞行参数提升点云密度, 确保林下地表点提取准确率 $\geq 90\%$, 满足景区地形测绘、红树林生态保护监测的精度要求^[4]。(3) 平原与丘陵地形测绘: 优化常规测绘流程, 简化外业控制点布设, 依托无人机LiDAR高效采集优势, 作业效率较传统测绘提升10倍以上; 与传统测绘成果对比, 平面、高程精度相当, 可高效完成1:500比例尺地形图生成, 适配城乡规划、土地确权等常规测绘需求, 大幅降低人工成本。

3.2 地形测绘成果生成

(1) 数字高程模型(DEM)生成: 基于预处理后的纯净地表点云数据, 采用不规则三角网(TIN)剖分技术, 将地表点连接成连续三角面构建初始DEM; 模型优化策略包括剔除异常三角面、平滑地形起伏, 填补植被遮挡或数据缺失区域, 确保DEM分辨率与精度符合对应测绘比例尺要求, 准确反映地形高程变化。(2) 数字地形模型(DTM)与数字正射影像(DOM)生成: DTM通过提取DEM中的地形特征点、线(如坡脊线、山谷线), 明确地形起伏规律与地貌特征; DOM融合LiDAR点云的空间定位优势与可见光相机的纹理信息, 采用影像纠正、拼接技术生成, 兼具高精度定位与清晰纹理, 为地形图绘制提供直观支撑^[5]。(3) 地形图绘制: 以点云数据、DEM及DOM为基础, 自动提取等高线, 根据地形类型设置等高距(1:500比例尺常用1m等高距), 标注地形符号、地物信息, 补充权属、注记等内容, 按照测绘规范完成地形图编制, 确保成果符合行业标准, 可直接用于工程设计、规划审批等工作。

3.3 应用精度分析与验证

(1) 精度验证方案: 在测区均匀布设不少于20个控制点, 采用GNSS静态测量获取控制点实测三维坐标; 精度评价指标包括平面中误差、高程中误差, 通过计算点云坐标与实测坐标的偏差, 结合规范公式核算误差值, 判断测绘成果是否达标。(2) 不同场景精度分析: 矿山场景高程中误差 $\leq \pm 0.3\text{m}$, 平原场景 $\leq \pm 0.15\text{m}$, 高植被区 $\leq \pm 0.25\text{m}$, 均满足对应比例尺测绘规范要求, 且与传统测绘精度相当; 误差来源主要包括飞行参数偏差、预处理算法误差、环境干扰及地形复杂度影响。(3) 精度影响因素分析: 飞行航高、航速对精度影响较大, 航高每提升50m, 高程误差增加约0.05m; 预处理算法中滤波、配准精度直接影响成果质量, 误差占比约30%; 地形复杂度越高、环境干扰越强, 误差越大, 量化分析显示复杂地形误差较平原地形高40%左右。

3.4 工程应用案例分析

(1) 案例概况: 选取云南露天矿山、广西芦仙山景区两个典型案例, 云南露天矿山测区面积 8km^2 , 地形复杂、边坡陡峭, 作业需求为开采动态监测与土方量核算; 广西芦仙山景区测区面积 5km^2 , 高植被覆盖, 需求为景区地形测绘与生态保护规划, 均采用禅思L2传感器搭配M350RTK无人机作业。(2) 应用过程: 数据采集阶段, 矿山测区航高120m、航速12m/s, 景区测区启用多回波模式; 预处理阶段, 采用统计去噪、迭代最近点配准及多尺度滤波算法, 解决矿山粉尘噪声、景区植被遮挡问题; 成果生成阶段, 构建DEM、DOM, 完成地形图绘制与土方量计算, 解决了传统测绘难以覆盖边坡、林下区域的技

术难点。(3) 应用效果: 精度上, 两个案例均满足规范要求; 效率上, 较传统测绘缩短工期60%以上; 成本上, 减少人工投入70%, 大幅降低作业成本。实践总结得出, 无人机LiDAR技术适配复杂地形测绘, 核心是优化飞行参数与预处理算法, 可广泛应用于各类地形测绘工程。

结束语

本文系统完成了无人机LiDAR点云数据在地形测绘中的应用研究, 明确了系统工作机制、数据处理流程及应用要点, 通过典型案例验证了该技术在不同地形场景中的适用性与优越性。该技术可有效弥补传统测绘短板, 提升测绘精度与效率, 降低作业风险。未来可结合人工智能、大数据技术优化数据处理算法, 进一步提升复杂环境下的适配能力, 推动地形测绘向智能化、高效化方向发展, 助力测绘地理事业高质量推进。

参考文献

- [1] 陈强. 机载LiDAR技术在地形图测绘中的应用及精度分析[J]. 测绘技术装备, 2022(3): 70-74.
- [2] 白斌. 机载LiDAR在大比例尺地形图测绘中的应用分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(4): 186-188.
- [3] 顾晨阳. 无人机LiDAR技术在复杂地形测绘中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(8): 156-159.
- [4] 许嘉豪. 无人机LiDAR测绘技术在地质灾害调查中的应用[J]. 地质灾害与环境, 2022, 33(4): 78-82.
- [5] 张宇轩. 无人机LiDAR测绘技术在森林资源监测中的应用[J]. 林业资源管理, 2023, 56(3): 102-106.