

倾斜摄影技术与 Lidar 技术在地形测绘中的应用

李亮

四川省地质调查研究院调查规划研究中心

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8434

[摘要] 针对地形起伏剧烈、植被覆盖密集、通视性严重受限的区域，本研究设计了一种融合无人机激光雷达（LiDAR）与倾斜摄影技术的协同测图方案。LiDAR 凭借其出色的穿透能力和高密度、高精度的三维数据采集特性，可有效克服植被遮挡，精准获取地表高程信息；而倾斜摄影技术则能精确捕捉地物的平面位置，并生成直观的三维模型，极大提升矢量数据采集效率。通过整合这两种技术的优势，实现了高精度地形图的高效生产。本研究基于某实际工程项目案例，验证了该方案完全符合 1:500 数字地形图的精度规范要求。

[关键词] 测绘；地形图；无人机；激光雷达；倾斜摄影

Application of Tilt Photography and Lidar Technology in Topographic Mapping

Li Liang

Sichuan Geological Survey and Research Institute Survey Planning Research Center

[Abstract] This study designs a collaborative mapping scheme that integrates unmanned aerial vehicle LiDAR and oblique photography technology for areas with severe terrain undulations, dense vegetation coverage, and severely limited visibility. LiDAR, with its excellent penetration capability and high-density, high-precision 3D data acquisition characteristics, can effectively overcome vegetation obstruction and accurately obtain surface elevation information; Tilt photography technology can accurately capture the planar position of ground objects and generate intuitive 3D models, greatly improving the efficiency of vector data acquisition. By integrating the advantages of these two technologies, efficient production of high-precision topographic maps has been achieved. This study is based on a practical engineering project case and verifies that the scheme fully meets the accuracy specification requirements of 1:500 digital topographic maps.

[Key words] surveying and mapping; Topographic map; UAV; Lidar; oblique photography

引言

无人机倾斜摄影作为新兴测绘技术，通过多视角影像采集可同步获取地物的空间坐标、光谱特征、表面纹理及几何结构，进而快速构建实景三维模型^[1-3]。相较于数字正射影像（DOM）等二维数据，该类模型在空间信息呈现维度与多维分析能力方面具有显著优势。然而，在地形起伏剧烈、植被郁闭度高、通视性受限的区域，该技术难以精确获取地表高程信息，制约了复杂场景高精度地形测绘的实现。

为突破此瓶颈，近年学者探索了激光雷达测绘解决方案。姜丙波等^[4]采用无人机 LiDAR 与航空摄影融合技术，通过激光点云提升地形图高程精度，但其依赖 DOM 的矢量采集方式对陡坎、河床、建筑等三维特征显著的地物表达能力不足。田正杰等^[5]基于点云 DEM 与 DOM 融合建模开展三维矢量采集，虽保障

了几何精度，却无法准确表达电杆等悬空设施及建筑立面、树高等垂直要素。蒋小海等^[6]直接利用点云进行矢量化虽简化流程，但海量数据导致的渲染迟滞、纹理缺失等问题降低了成图效率。

对此，本研究提出无人机 LiDAR 与倾斜摄影的协同测绘方法：LiDAR 凭借其穿透能力精细构建地表地貌骨架，倾斜摄影则提供高精度三维可视化模型。通过异构数据融合，生成满足大比例尺测图需求的高精度地形图。经某山区测绘工程实证，该方法输出的 1:500 地形图平面位置中误差 $\leq \pm 0.15$ 米，高程中误差 $\leq \pm 0.20$ 米，符合《城市测量规范》（CJJ/T 8-2011）精度要求，具备显著工程推广价值。

1 技术路线

本方案实施流程涵盖规划部署、野外作业与室内处理三个

核心阶段，关键技术包含基线精密结算、地形自适应飞行控制、摄影测量平差、PPK（动态后处理差分）定位修正、点云噪声剔除及地物特征分类。规划阶段重点完成测区空域协调、航线拓扑优化、控制基准网建立及现场环境评估；野外阶段同步实施 GNSS 控制点测量、像控点布设、多角度倾斜摄影及激光雷达扫描；室内处理环节采用双通道数据处理模式——激光点流经定位解算、滤波优化及语义分割生成亚米级数字高程模型（DEM），构建地形高程骨架；航空影像联合 POS 姿态数据通过空中三角测量加密与三维重建生成真实纹理模型，为矢量要素提取提供几何与光谱基准。最终基于数字制图平台融合高程基底与三维矢量框架，输出符合 1：500 精度标准的地形图成果，完整技术架构参见图 1。

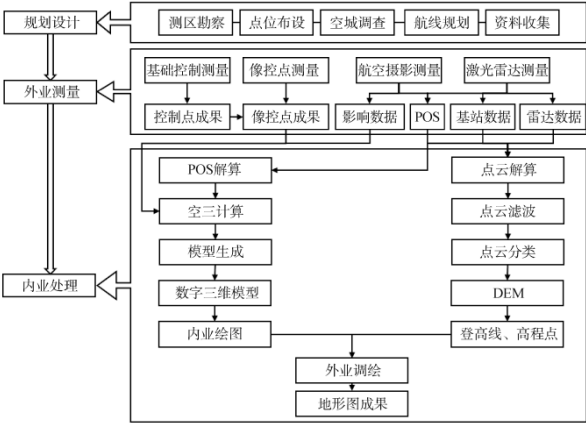


图 1 技术流程图

2 实验与精度评定

2.1 测区基本情况

项目地区典型的综合区域，城镇，耕地，林地均有，地表植被覆盖率达 70%，主要涵盖居民聚落、林地、耕作区、水体及农用道路等地物类型，总面积 10 平方千米，具体范围见图 2 绿色边界。

2.2 控制测量

基于现场地理条件为例，采用 CORS 测定区域内像控点，其空间分布如图 2 所示。



图 2 测区范围及控制点分布图

2.3 数据获取

2.3.1 激光雷达测量

针对测区地理特征，选用大疆 M300 无人机集成 L1 激光扫描系统实施空间数据采集。该高集成度遥感平台融合多源传感器，具备厘米级点云精度实时获取能力，可高效完成专业地理空间信息采集任务，在带状地形测绘等领域具有显著技术优

势。核心作业参数详见表 1。

表格 1 大疆 M300 搭载激光雷达 L1 测量主要飞行参数设置

飞行设置项	具体规划参数
飞行速度/（m/s）	10
飞行模式	仿地飞行
飞行高度（相对高度）/m	110
点云重叠率/%	50
回波模式	三次回波
采样频率/KHS	160
扫描模式	重复扫描、真彩色上色

2.3.2 倾斜摄影测量

倾斜摄影航测任务采用大疆 M300 无人机集成 P1 航摄系统执行，该高分辨率航摄系统融合 35mm 全画幅传感器与三轴云台稳定结构，兼容多规格固定焦距镜头，结合五向倾斜摄影模式显著提升地理信息采集精度与作业效能。关键航测参数配置详见表 2。

表格 2 大疆 M300 搭载光学 P1 相机测量主要飞行参数设置

飞行设置项	具体规划参数
飞行速度/（m/s）	12
飞行模式	仿地飞行
飞行高度（相对高度）/m	300
飞行重叠率/%	航向 80% 旁向 80%

2.4 点云数据处理

获取原始点云后，需实施数据质量检验（含定位精度、点密度及航带接边吻合度），合格数据经 PPK 差分修正、三维重建、坐标系转换、重采样优化、噪声滤波及曲面平滑处理，继而通过地物点云分类实现地面/非地面点分离，最终提取地形点集生成数字高程模型。完整处理流程见图 3。

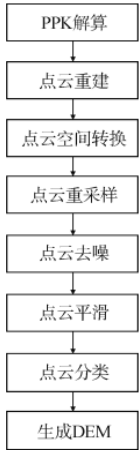


图 3 点云数据处理流程

1) 点云空间定位。原始观测值经 GNSS 差分定位解算获得初始坐标，融合 IMU/GNSS 联合解算参数实现点云大地定向，经坐标系校准后转换至工程坐标系，最终按拓扑规则输出含三维坐标及属性的可编辑点云数据集。

2) 点云密度优化。为提升海量点云处理效率，采用重采样技术实现点集精简：通过设定采样间距或比例阈值压缩数据规模，在保持地形特征前提下显著提升数据读写与运算速度。

3) 噪声滤除。激光扫描数据中存在的无效噪点(如高空悬浮点与地表最低点)将影响数据质量。分类前通过自适应参数阈值消除高位/低位粗差,确保后续处理精度。

4) 曲面平滑处理。基于邻域点集拟合最佳平面方程,优化中心点高程估值。该操作增强点云形态一致性,尤其能压缩地表点云厚度层,提升数字高程模型精度。

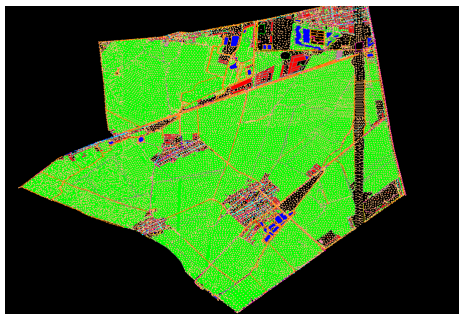
5) 地物分类提取。数字高程模型构建需通过地面点生成三角网,故实施两级分类,机器学习预分类:提取点云特征训练分类器实现初步地物分簇。人工校验精分类:对分类异常区域进行交互式修正,最终分离地面点与非地面点完成地形建模。

建筑实体对激光的遮挡导致其覆盖区域地面点缺失。当点云分类中建筑物尺度阈值设置不足时,易将屋顶点误判为地面点,需人工交互重分类分离。此操作将在建筑区域形成高程数据空洞,可通过邻域高程插值或 TIN 构建时直接修补。密集植被覆盖区需专项处理地面点识别。为验证分类精度,建议采用剖面分析法可视化点云分层效果。

6) 基于数字高程模型(DEM)的高程矩阵,通过空间分析算法自动提取测区等高线及离散高程点,完成地形图核心地形要素的构建。



(a) 数字三维模型



(b) 数字地形图

图4 成果展示

2.5 可见光数据处理

1) 数据质检与增强。对影像、POS 观测值、像控点及基准站等关键数据集实施完整性校验。验证通过后,将影像 POS 数据与基站观测值联合进行 PPK 高精度定位解算,输出毫米级精度的空间姿态数据,为空中三角测量提供精度保障。

2) 摄影测量加密。基于立体测图原理,利用测区均匀分布的控制点解算加密点三维坐标。将 PPK 解算的高精度 POS 数据与影像导入专业软件,通过特征点匹配重建摄影光束几何关系,实现同名光线共轭相交;继而导入像控点人工转刺,执行光束法区域网平差(融合连接点、控制点及 POS 观测值约束),经绝对定向后获取亚像素级精度的连接点坐标,最终解算影像

内方位元素(焦距、像主点)及外方位元素(位置姿态参数)。

3) 实景三维建模流程。摄影测量加密完成后,采用多视影像密集匹配算法生成亚分米级精度点云,依据点云空间分布密度执行自适应分块。基于各瓦片内高密度点云构建不规则三角网(TIN)表面模型,继而生成无纹理三角网基底。通过解算三角面片与对应光学影像的几何映射关系,实现高精度纹理贴图,最终输出高保真实景三维模型。

4) 三维矢量化测图。基于倾斜摄影三维模型,通过专业测绘软件直接执行地物要素矢量化采集。完成室内编辑后,针对模型遮蔽区域的要素缺失及属性不可解析问题,采用野外实测进行数据补采与验证。经全要素拓扑校验无误后,融合激光点云生成的高程点、等高线数据集,集成修饰形成符合 GB/T 20257.1-2017 标准的 1:500 全要素地形图,成果示例见图 4。

2.6 精度评定

全域均匀布设 541 个验证点(含建筑物房基角点、道路转折点等平面特征点,及林间空地、平坦区域等高程基准点),开展地形图精度评估。经统计分析,平面位置中误差 $\pm 0.053\text{m}$ 、高程中误差 $\pm 0.077\text{m}$,两项指标均优于《城市测量规范》(CJJ/T 8-2011) 1:500 地形图限差要求。

表3 全要素地形数据精度统计

实体	规定中 误差/cm	计算中 误差/cm	粗差率	精度 得分
建成建筑物	± 10	± 5.14	1.9%	78.56
围墙	± 10	± 6.23	1.8%	77.12
区块内部	± 10	± 7.07	2.6%	74.08
区块外部	± 10	± 7.64	2.1%	76.57
水系及附属物及其它	± 25	± 14.86	3.4%	73.36
高程一级	± 5	± 4.88	0.9%	79.65
高程二级	± 10	± 7.15	1.2%	78.42
高程三级	± 20	± 9.66	1.8%	77.14

注:粗差是指绝对值大于 2 倍中误差的误差,由外业数据观测、内业数据处理过程中产生。

3 结束语

本研究构建的无人机 LiDAR 与倾斜摄影协同测绘体系,经典型山区工程验证,可满足 1:500 地形图精度标准。然而存在双重局限:其一,分载荷数据采集需重复航测并布设像控点,显著增加外业作业强度;其二,点云自动分类置信度不足,依赖人工干预降低生产效率。未来研究将聚焦地形图全流程自动化生成技术,突破半自动化测绘范式瓶颈。

[参考文献]

- [1]倪叶霖,王文佳,阮建杭.倾斜摄影测量技术与移动激光扫描技术在不动产测绘中的应用对比研究[J].测绘与空间地理信息,2025,48(04):221-224.
- [2]张久龙.单镜头无人机倾斜摄影测量技术在新型基础测绘中的应用[J].经纬天地,2025,(01):53-58.
- [3]朱正如.倾斜摄影测量技术在矿山大比例尺地形图测绘中应用探究[J].世界有色金属,2024,(23):127-129.
- [4]杨翔.倾斜摄影测量技术在不动产测绘中的应用[J].中国信息界,2024,(04):27-29.