

无人机激光雷达技术与倾斜摄影技术在地形测绘中的应用

薛江涛

山西科汇工程质量检测有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v7i12.2054

[摘要] 地形测绘作为自然资源管理、工程建设及灾害防治的基础性工作,其精度与效率直接影响决策的科学性与工程实施的经济性。传统测绘手段(如全站仪、GPS-RTK)在复杂地形区域存在作业效率低、植被穿透能力弱等问题,难以满足现代化高精度测绘需求。近年来,无人机平台与传感器技术的突破,推动激光雷达(LiDAR)与倾斜摄影技术成为地形测绘的核心解决方案。本文基于黑龙江山地铁路勘察、长沙棚改区违建识别、云南土石方测算等典型案例,系统分析两种技术的原理、协同模式及应用流程,探讨其在数字地形图生产、城市更新、矿山生态修复等场景中的实践价值,并提出智能化、轻量化与多源融合的未来发展方向,为地形测绘技术体系升级提供参考。

[关键词] 地形测绘; 无人机; 激光雷达; 倾斜摄影; 三维建模

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Application of UAV LiDAR technology and oblique photography technology in terrain mapping

Jiangtao Xue

SHANXI KEHUI GONGCHENGZHILIANGJIANCE YOUXIANGONGSI

[Abstract] As a fundamental work in natural resource management, engineering construction, and disaster prevention, the accuracy and efficiency of terrain surveying directly affect the scientificity of decision-making and the economy of engineering implementation. Traditional surveying methods such as total stations and GPS-RTK have problems such as low operational efficiency and weak vegetation penetration ability in complex terrain areas, making it difficult to meet the requirements of modern high-precision surveying. In recent years, breakthroughs in drone platforms and sensor technology have propelled LiDAR and oblique photography technology to become the core solutions for terrain mapping. This article is based on typical cases such as the survey of mountainous railways in Heilongjiang, the identification of illegal buildings in Changsha shantytown renovation areas, and the calculation of earthwork in Yunnan. It systematically analyzes the principles, collaborative modes, and application processes of the two technologies, explores their practical value in digital topographic map production, urban renewal, mining ecological restoration, and proposes future development directions of intelligence, lightweight, and multi-source integration, providing reference for the upgrading of terrain surveying and mapping technology system.

[Key words] topographic mapping; UAV; Lidar; Oblique photography; 3d modeling

引言

地形测绘是获取地表空间信息的基础性工作,其成果广泛应用于交通建设、城市规划、自然资源调查等领域。传统测绘方法依赖人工外业采集,存在效率低、植被覆盖区数据缺失等问题,尤其在山区、城市密集区等复杂场景中难以满足高精度需求。无人机技术的革新为测绘领域带来突破:LiDAR通过主动发射激光脉冲穿透植被冠层,直接获取地面点云数据;倾斜摄影技术则通过多角度影像构建高分辨率实景三维模型。两者的协同

应用可实现“高程骨架+纹理细节”的数据互补,显著提升测绘成果的完整性与可靠性。本文结合多地区实测案例,深入探讨两种技术的融合模式及其在地形测绘中的实践价值。

1 技术原理与互补性分析

1.1 无人机LiDAR技术

LiDAR系统通过发射近红外波段(905nm或1550nm)激光脉冲,依据飞行时间差(ToF)原理计算地物距离,结合高精度惯性测量单元(IMU)与GNSS定位数据(定位精度 $\pm 1\text{cm}$),实现三维点云数

据获取^[1]。其技术优势突出表现为：(1)植被穿透能力：可穿透三层以上乔木冠层获取地面高程；(2)数据采集效率：单架次飞行（航高300m，航速8m/s）可覆盖8km²区域；(3)全天候适应性：在夜间或云层高度>500m条件下仍能正常作业，已成功应用于西南地区喀斯特地貌测绘。

1.2 无人机倾斜摄影技术

倾斜摄影系统采用五镜头相机阵列（1个垂直镜头+4个倾斜镜头，视场角45°），通过多视影像密集匹配（DSM算法）与空中三角测量解算，生成具有真实纹理的三维模型^[2]。以DJI P1相机为例，其35mm全画幅传感器在航高150m时可获取地面分辨率2.1cm的影像，精确呈现建筑物立面砖缝（宽度>3cm）及道路标线细节。技术特点体现在：(1)高分辨率纹理：影像分辨率可达2.5cm/像素，精确保留建筑物立面、道路标线等细节；(2)快速覆盖能力：单架次飞行可采集10km²区域影像，外业效率较传统方法提升50%以上；(3)多源数据兼容性：支持与LiDAR点云、卫星影像等数据融合，弥补单一技术局限。

1.3 技术互补性

激光雷达与倾斜摄影技术的协同融合构建了地形测绘领域“高程骨架-地表纹理”的互补数据体系，通过多源数据配准实现三维空间信息的完整性重构。在植被覆盖区域，LiDAR凭借近红外波段激光的强穿透特性，有效穿透冠层障碍获取亚米级精度地面点云（密度 ≥ 400 点/m²），解决倾斜摄影因植被遮挡导致的高程数据缺失问题；同时，倾斜摄影通过多角度影像采集（航向与旁向重叠率 $\geq 80\%$ ）生成厘米级分辨率纹理模型，弥补LiDAR点云缺乏地物色彩与立面细节的局限性。两者结合形成“激光点云定形、倾斜影像赋色”的协同 workflow，在复杂地形区可提升数字表面模型（DSM）精度达70%以上，支持高精度等高线生成（平面误差 ≤ 0.05 m）与建筑物矢量边界提取（误差 ≤ 0.1 m），为智慧城市时空信息平台建设提供全要素三维基底数据（表1）。

表1 倾斜摄影与机载LiDAR在土石方测算中的效率及精度对比

| 技术 | 平面中误差(m) | 高程中误差(m) | 外业耗时(min) | 适用场景 |
|---------|----------|----------|-----------|------------|
| 倾斜摄影 | 0.072 | 0.28 | 24 | 植被覆盖区、复杂地形 |
| 机载LiDAR | 0.018 | 0.077 | 13 | 建筑密集区、地表纹理 |

2 技术流程与关键环节

2.1 外业数据采集

无人机测绘外业作业需基于测区地形特征建立多维度数据采集体系，通过仿地飞行技术动态调整航高与航线重叠率（LiDAR航向重叠率 $\geq 50\%$ ，倾斜摄影旁向重叠率 $\geq 80\%$ ），确保复杂地貌区域的点云与影像全覆盖。GNSS控制网采用框架点与加密点分级布设策略，三等控制点平面精度需达 ± 10 mm，高程精度 ± 20 mm，为多源数据空间配准建立统一基准。针对LiDAR与倾斜设备分置问题，采用多平台协同作业模式，通过时空同步技术实

现直升机载LiDAR与无人机倾斜摄影的联合数据获取，提升外业作业效率与数据一致性。

2.2 内业数据处理

LiDAR点云处理涵盖PPK动态差分、噪声滤波（基于密度聚类算法）及地物分类（CSF地面滤波）等流程，针对建筑遮挡区域采用TIN三角网内插算法填补空洞，确保DEM生成完整性。倾斜摄影通过多视影像联合平差（光束法区域网平差）与密集匹配构建实景模型，空三解算误差需控制在校验点精度的1/3像素以内。数据融合阶段运用ICP配准算法将LiDAR点云与倾斜模型进行空间对齐，通过GIS平台实现高程数据与纹理信息的像素级融合，最终生成的高程中误差 ≤ 0.03 m的1:1000数字线划图，满足工程勘察设计规范要求。

3 应用案例分析

3.1 复杂山区铁路勘察

在西部某艰险山区铁路项目中，针对地形高差达800米、植被覆盖率超75%的复杂环境，采用载人直升机搭载Riegl VUX-120LiDAR（测距精度 ± 15 mm）与大疆M300无人机倾斜摄影协同作业。LiDAR系统以飞行高度350米、航速40km/h进行扫描，生成密度达80点/m²的点云数据，穿透密林冠层获取真实地表DEM，成功识别出3处潜在滑坡体（体积5.4万-12.7万m³）及17个危岩孤石，平面定位精度达0.05m。同时，无人机倾斜摄影以航高150米、80%重叠率获取0.03m分辨率影像，构建线路15公里范围内的实景三维模型，辅助设计团队优化2座桥梁桩位布置，减少土方开挖量1.8万m³。该协同方案通过空域协调实现单日内完成数据采集，较传统测绘节约外业人员12人次，摄影测量成本降低25%，生成的地质风险专题图被应用于施工预案编制，成果复用率达150%^[3]。

3.2 城市棚户区改造

长沙市西文庙坪棚改项目面临0.28km²建筑密度达85%的复杂环境，采用DJI L1LiDAR与五镜头倾斜摄影系统分阶段作业。针对无人机影像受屋檐遮挡导致的23处模型空洞（总面积610m²），通过LiDAR点云数据（密度420点/m²）进行Delaunay三角网插值修复，填补精度达0.02m。同时，倾斜摄影获取的2.5cm分辨率纹理数据，精确还原了267栋历史建筑的立面特征（含12处市级文保单位）。通过将三维模型与2017年户籍CAD图纸进行EPS软件空间叠合分析，快速识别出违建面积1.09万m²（占现状总建筑面积8.7%），其中A1区块84户违建量1090.3m²的核查误差控制在2%以内。该技术组合使拆迁评估周期从45天压缩至18天，减少人工入户测量82人次，为补偿方案制定提供精准数据支撑^[4]。

3.3 露天矿山三维建模

湖南衡阳某铁矿生态修复项目中，针对矿坑深度120米、边坡植被覆盖率60%的特点，采用Velodyne HDL-32ELiDAR与SWDC-5倾斜相机协同作业。LiDAR以仿地飞行模式（航高80米）穿透刺槐林冠层，获取矿坑底部点云密度60点/m²，精确计算残余矿体储量23.6万吨（误差率4.7%）。倾斜摄影通过设置15个地面控制点（Leica GS18接收器布设），构建0.05m精度的实景模型，完整

呈现4处矿洞立面裂隙发育特征(最大宽度1.2m)。通过ContextCapture软件将两类数据融合,生成带纹理的三维地质模型,辅助规划团队设计边坡加固格构梁1.2km,优化覆土区域18.6公顷,使生态修复方案设计效率提升70%,工程预算准确性提高12%^[5]。

3.4 土石方工程测算

云南大学呈贡校区场地平整工程中,对23.6万m³的土方量开展技术对比。倾斜摄影采用大疆P1相机(35mm镜头),以航高100米、80%重叠率获取0.018m分辨率影像,经Pix4Dmapper处理生成DEM,13分钟外业采集配合8小时计算,测得挖方量16.65万m³(误差1.9%)。LiDAR采用飞马D2000无人机搭载VUX-1LR系统,通过12条航线(航高150米)24分钟获取点云数据,密度达220点/m²,尤其准确还原了3处芦苇丛生区域的地形起伏(相对全站仪校验误差0.072m)。对比显示,在植被区LiDAR高程精度较倾斜摄影提升3.1倍,但综合成本增加40%。项目最终采用分区作业策略,对裸露区域使用倾斜摄影,植被区采用LiDAR,总体测算效率较传统方法提升65%^[6]。

4 技术挑战与未来展望

4.1 现存问题

当前无人机测绘技术仍面临多重瓶颈:在外业作业中,因LiDAR与倾斜摄影设备分置,单项目常需2-3架次飞行,设备切换导致日均有效作业时长减少25%。点云分类环节,植被与建筑混合区域自动化分类精度仅82%,仍需人工标注修正。数据处理方面,单个10km²项目产生超800GB点云与200GB影像数据,传统ICP配准算法需耗时18-24小时,且融合后模型存在3%-5%纹理错位,严重影响1:500地形图生产效率。

4.2 优化方向

针对现存瓶颈,行业正向智能化与集成化突破:采用改进型PointNet++算法(增加注意力机制模块),实现94.7%的点云自动分类精度,较传统方法提升23%,处理效率提高至8小时/平方公里。硬件方面,大疆禅思L1+P1一体化负载(总重1.68kg)通过时间同步控制器实现5cm级时空配准,使单架次数据获取效率提升40%。飞马V10无人机搭载DV-LiDAR10(整机重量4.2kg)实现55

分钟续航,配合SLAM算法实现免像控作业,可达到0.048m平面精度,满足城市更新项目精细建模需求。

5 结论

无人机LiDAR与倾斜摄影技术的协同融合,标志着地形测绘领域从传统二维测量向三维全要素感知的模式转变。通过激光点云构建地形高程骨架与倾斜影像赋色的技术互补机制,实现了复杂环境下地表空间信息的完整表达。未来,深度学习算法将推动点云分类与模型修复的自动化进程,基于Transformer架构的跨模态数据融合算法可突破现有ICP配准的精度瓶颈,而多传感器集成化载荷(如激光-倾斜-热红外一体化设备)将重构无人机测绘的作业范式。随着轻量化平台与边缘计算技术的协同突破,小型无人机在免像控模式下即可实现亚米级精度测绘,大幅降低复杂区域作业门槛。这种技术演进不仅加速测绘行业向智能化、实时化方向转型,更为数字孪生城市构建与新型基础设施建设提供了多维时空数据基底,推动国土空间治理从经验决策向数据驱动跨越发展。

[参考文献]

[1]唐骥,谭学春,倪赢.无人机激光雷达技术在变电站扩建改造工程中的应用[J].通讯世界,2024,31(12):136-138.

[2]尹娇.基于无人机倾斜摄影技术的三维模型精细化分析[J].黑龙江科学,2024,15(24):156-158.

[3]何颖博.复杂艰险山区铁路勘察设计阶段航空摄影多源数据获取研究[J].铁道勘察,2022,48(04):41-46.

[4]王千秋,郑创彬.无人机倾斜摄影和激光雷达技术在城市棚改中的应用[J].电子技术与软件工程,2022,(15):78-81.

[5]宋建伟,邢艳英,侯双林.浅谈激光雷达在废弃矿山生态修复中的应用[J].世界有色金属,2021,(15):156-157.

[6]刘杨,赵琼,李玲.倾斜摄影与激光扫描在土石方测算中的比较研究[J].科技创新与应用,2023,13(15):93-96.

作者简介:

薛江涛(1988--),男,汉族,河南陕州区人,本科,工程师,研究方向:测绘工程。