

基于无人机机载 LiDAR 航测的建筑工程测绘方法

曹启明

石家庄石房房产测绘有限责任公司 河北 石家庄 050000

摘要:为解决传统建筑工程测绘作业效率低、复杂场景适应性弱、数据完整性不足等行业痛点,本文研究无人机机载 LiDAR 航测测绘技术体系。系统阐述其工作原理、设备组成与技术优势,规范了航测筹备、数据采集、点云处理及成果输出的完整作业流程。通过实际建筑工程试验开展精度验证与方法对比,证实该技术测绘精度达标、作业效率更高,能够满足现代建筑工程设计、施工及竣工验收的精细化测绘需求。

关键词: 基于无人机机载 LiDAR 航测; 建筑工程; 测绘方法

引言: 建筑工程测绘是工程建设质量管控的基础性关键工作,直接影响施工放样、结构复核与竣工验收的准确性。传统全站仪逐点测量、常规摄影测量等方式,存在外业耗时长、遮挡区域易产生测量盲区、弱纹理区域精度不稳定等缺陷。为提升建筑测绘的智能化与精细化水平,本文依托无人机机载 LiDAR 航测技术,构建成套测绘作业方法,并结合工程实例验证技术效果,为复杂建筑场景测绘作业提供可靠的技术支撑与实践依据。

1 无人机机载 LiDAR 航测核心理论与系统组成

1.1 机载 LiDAR 航测技术原理

(1) 激光雷达测距基于脉冲飞行时间法,发射高频激光脉冲,接收目标回波,记录往返时间并结合光速计算斜距;联合瞬时扫描角与平台位姿,经几何解算生成三维点云坐标,映射地物表面空间信息。(2) GNSS 与惯性导航紧耦合融合:地面基准站与机载 GNSS 同步观测,利用载波相位差分获取厘米级定位;IMU 实时测量角速度与加速度,经卡尔曼滤波融合 GNSS/IMU 数据,填补卫星失锁期间导航空白,确保点云具备高精度空间基准。(3) 飞控系统实时解算并调整偏航、俯仰、横滚角,协同气压计与超声波传感器维持定高飞行;针对低空建筑测绘,通过预设航线和自适应姿态调节,保障激光波束对建筑立面与屋顶的稳定覆盖。

1.2 无人机 LiDAR 航测系统组成

(1) 飞行平台系统选用多旋翼无人机,具备垂直起降、悬停精度高、抗风性强的特点,续航能力可满足单架次约 40 分钟低空作业需求,其低速稳定飞行特性显著增强点云数据采集的均匀性与重复精度,高度适配建筑工程场地受限、作业高度低的测绘场景。(2) 机载 LiDAR 感知系统由激光雷达扫描仪、高分辨率数码相机及高精

度 IMU 构成;激光雷达发射频率可达数十万点/秒,测距精度厘米级,配合多回波技术穿透植被缝隙;相机同步采集影像数据,为点云赋色与纹理映射提供基础。(3) 地面控制与数据传输系统包含 GNSS 地面基准站,为差分定位提供固定参考解;数传电台实时回传飞行参数与点云预览数据,地面监控模块可视化呈现飞行轨迹与设备工况,便于作业人员动态调整飞行策略^[1]。

1.3 建筑工程测绘技术特性与优势

(1) 对比传统全站仪逐点采集模式,机载 LiDAR 单架次可获取百万级点云,大幅缩短外业耗时;相比摄影测量,无需布设密集像控点,且在弱纹理区域仍保持高精度数据输出,综合效率提升数倍。(2) 复杂建筑场景适配优势显著,激光具有一定穿透性,可部分穿透植被冠层获取地表真实高程;在建筑密集区,多回波技术有效减少遮挡影响,弥补传统测量难以作业的盲区。(3) 三维数据采集优势突出,点云数据直接反映建筑三维坐标、外轮廓及分层高程信息,可快速生成 DEM、DSM 及三维建筑模型,精细化程度满足建筑工程设计、施工及竣工验收各阶段测绘需求。

2 基于无人机机载 LiDAR 航测的建筑工程测绘流程与方法

2.1 航测前期筹备工作

(1) 测区现场勘查,梳理建筑布局、地形条件、作业环境及安全风险。作业前需组织技术人员实地踏勘,全面调查测区内建筑物高度分布、间距疏密、周边高压线及通信塔等障碍物空间位置,评估电磁干扰强度与起降场地平整度;同步识别临空作业风险源(如高层建筑边缘风切变区域),为后续飞行方案编制提供基础环境数据。(2) 测绘精度指标设定,结合建筑施

工、验收规范确定航测精度标准。依据《工程测量标准》(GB50026)及建筑项目设计图纸对平面位置中误差、高程中误差的允许限差要求,结合点云密度与测距精度间的理论关系,合理设定点云平均密度(如不低于100点/m²)和平面、高程中误差阈值,确保航测成果满足建筑放样、竣工测量等工序的精度验收要求^[2]。(3)飞行方案规划,包含飞行高度、航线间距、重叠度、起降点位布设。根据测区建筑最高点高程与无人机安全超限高度,计算相对航高;按激光扫描角与点云密度需求设计航线间距及航向重叠率(通常不低于30%),布设起降点需避开信号遮挡区域并满足应急返航安全距离,形成覆盖全测区的网格化航线方案。

2.2 野外航测数据采集实施

(1)设备调试与参数校准,对无人机、LiDAR 传感器、定位系统进行精度校验。起飞前完成惯导系统对准、激光雷达校场标定及 GNSS 基站静态初始化,检查相机时码同步与存储介质状态,通过试飞测试验证姿态控制稳定性与数据记录完整性。(2)自动化航线飞行与数据采集,按照规划航线完成建筑整体点云数据采集。依托飞控系统执行预设航线,实时监控飞行姿态、卫星数及设备温度,确保激光脉冲发射频率与扫描角度稳定;作业中留意电池电量与风速变化,适时调整飞行策略以保障采集连续性。(3)特殊区域补测作业,针对建筑边角、阴影区、遮挡区开展精细化补测。对于主航线难以获取完整数据的建筑背光面、檐下空间及密集楼间窄缝区域,采用悬停扫描或变角度航线进行加密补测,通过人工干预方式补充关键结构点云,确保建筑几何信息完整无遗漏^[3]。

2.3 点云数据预处理技术

(1)原始点云数据筛选,剔除飞行抖动、环境干扰产生的无效离散点。依据回波强度、扫描角度及空间分布特征设定阈值过滤明显偏离地物表面的离群点,同时剔除因飞鸟、雨雾等偶然因素产生的噪声点,保留有效地物回波数据。(2)点云去噪与平滑处理,去除植被、杂物等冗余噪声数据。采用基于局部离群因子或移动窗口法的滤波算法区分地面点与非地面点,重点滤除低矮植被及施工堆料等非建筑要素;对建筑表面点云进行平滑优化,在保持棱角特征前提下减少随机噪声^[4]。(3)坐标系统转换与数据配准,统一工程测绘坐标系,完成多航带数据拼接。将点云由 WGS-84 坐标系经七参数转换至地方工程坐标系,同时基于航带间重叠区域的点云特征进行 ICP 精配准,消除航带接边误差,生成覆盖完整测区的整体点云模型。

2.4 建筑工程测绘成果提取与生成

(1)建筑轮廓、墙体、屋面等核心结构要素自动提取。基于点云的几何特征(法向量变化、局部曲率、平面拟合度)采用区域生长与 RANSAC 算法自动识别建筑立面、屋脊线和外墙转角点,分割提取各栋建筑的轮廓边界及层高线。(2)DSM、DTM 模型构建,生成测区地形与建筑表面三维模型。利用滤波后地面点构建数字地形模型(DTM),以全部地物点云生成数字表面模型(DSM),通过插值算法生成网格模型,直观反映建筑高度分布与地形起伏关系。(3)工程测绘成果输出,包含地形图、立面图、三维模型、工程量数据。按照建筑工程制图标准,自动或半自动生成建筑物平、立、剖矢量图,输出主流格式的三维实景模型;结合建筑要素分类统计屋面面积、立面面积及土方量等工程量数据,形成满足设计、施工及验收全流程需求的标准化成果报告。

3 基于无人机机载 LiDAR 航测的建筑工程试验与精度验证分析

3.1 试验工程概况

(1)试验测区位置、建筑类型、工程规模与测绘作业需求。选某市高新区在建商业住宅综合体为试验区,测区面积约0.2km²,含6栋高层住宅(22~28层)、2栋多层商业及地下车库出入口;工程处于主体结构及二次结构交叉施工阶段,需获取建筑角点定位、楼层高程复核及立面垂直度检测数据,为施工质量管控提供测绘依据。(2)试验设备参数、作业环境条件与试验方案设计。采用大疆 M350 无人机搭载禅思 L2 激光雷达,激光波长905nm,发射频率24万点/秒,测距精度2cm,视场角70°,IMU 精度0.02°;地面配 D-RTK2 基站。试验日晴,风力2~3级,温度22℃。设计航高70m,航线间距35m,航向重叠率30%,布设主航线5条、补测航线3条,飞行速度6m/s。(3)试验参照标准,依据建筑工程测绘规范确定精度评价指标。依据《工程测量标准》(GB50026-2020)与《建筑变形测量规范》(JGJ8-2016),确定平面中误差≤5cm、高程中误差≤3cm为核心精度指标,点云密度≥100点/m²为数据质量合格标准。

3.2 试验数据处理与成果分析

(1)试验点云数据预处理效果分析,验证去噪、配准处理的有效性。原始点云经统计滤波与渐进加密三角网滤波后,噪声剔除率3.5%,建筑立面完整度明显提升;航带间 ICP 配准后接边偏差由原始7.5cm降至1.0cm以内,点云连续、楼层分界清晰。(2)建筑结构要素

提取成果展示,分析轮廓、高程、尺寸提取效果。采用RANSAC平面分割与区域生长算法,成功提取各栋建筑轮廓线与层高信息;与施工图对比,角点平面偏差3~6cm,层高提取误差 $\pm 2.5\text{cm}$,阳台、窗台等凸出构件识别完整。(3)三维建模成果优化与细节完善,实现建筑精细化三维还原。基于点云构建DSM与实景模型,经立面规则化与棱线增强处理后,屋檐、空调板、构造柱等细部还原清晰,模型效果与现场高度一致。

3.3 测绘精度检测与对比分析

(1)布设精度检测控制点,采用传统精密测绘设备获取真值数据。测区均匀布设20个检测控制点(建筑角点12个、墙面点5个、地面点3个),用徕卡TS60全站仪(测角 $0.5''$,测距 $0.6\text{mm}+1\text{ppm}$)独立测量三维坐标作为真值。(2)平面精度、高程精度误差统计,分析机载LiDAR测绘数据误差范围。LiDAR成果与全站仪真值逐点比对,平面中误差 $\pm 3.5\text{cm}$,高程中误差 $\pm 2.2\text{cm}$;最大平面偏差 5.8cm ,最大高程偏差 3.9cm ,全部检测点满足规范限差。(3)与传统测绘方法、摄影测量方法的效率、精度对比分析。全站仪需4.5工作日,摄影测量(含控制点与空三)需3工作日,LiDAR从飞行至预处理完成仅0.8工作日,效率优势明显;LiDAR精度优于摄影测量(平面中误差约 6.2cm 、高程约 5.0cm),与全站仪实测精度高度吻合。

3.4 误差来源与优化对策

(1)设备误差,包含传感器精度、无人机飞行姿态偏差带来的测绘误差。激光测距系统误差、扫描角编码量化误差及IMU陀螺漂移为主要硬件误差,飞行中姿态角瞬时波动亦影响坐标解算精度。优化对策包括作业前检校场标定、采用紧耦合后处理平滑算法、严格限定飞行地速与角速度变化率。(2)环境与作业误差,天气、遮挡、航线规划不合理引发的数据偏差。阵风加剧

抖动,雾霾衰减回波强度,建筑密集区多路径效应与信号遮挡致点云缺失或测距偏差;航线未顾及建筑高差致点云密度不均。优化对策为选择适航天气、测前详细踏勘、按建筑高差实施仿地飞行、对盲区预设补测航线^[5]。(3)数据处理误差,点云去噪、配准、要素提取算法的局限性误差及优化方法。滤波算法可能错删低矮构件点云,ICP配准在特征平淡区易陷局部最优,语义分割对复杂立面附属物存在分类混淆。优化方法包括引入多尺度保护滤波、采用特征描述子增强配准稳健性、结合深度学习方法提升复杂场景建筑要素自动识别精度。

结束语

本文完整构建了无人机机载LiDAR航测的建筑工程测绘作业体系,明确了标准化作业流程与数据处理方法,通过工程试验证明其具备高精度、高效率、场景适配性强的突出优势。同时全面总结设备、环境与数据处理环节的误差成因,并提出针对性优化改进策略。后续可结合智能算法优化点云处理与要素提取精度,持续完善技术体系,助力建筑工程测绘行业智能化、高效化转型升级发展。

参考文献

- [1] 刘洪飞,张烁,李宏超.基于无人机激光雷达的建筑变化立体检测[J].现代雷达,2024,46(07):52-57.
- [2] 王磊,赵吉元,李阳.无人机机载LiDAR技术在建筑工程精细测绘中的应用[J].测绘通报,2023,9(S2):112-115.
- [3] 匡再谊.无人机倾斜摄影与LiDAR融合技术在建筑测绘中的应用研究[J].华北自然资源,2024,23(06):106-109.
- [4] 韩新哲.无人机大比例尺测图技术在建筑工程中的应用[J].科技创新与生产力,2023,44(12):138-141.
- [5] 陈宇,周凯.复杂城区建筑无人机LiDAR航测精度控制与数据处理[J].工程勘察,2022,50(09):68-72.