

无人机航测三维建模提升公路选线精度

桂云海

国家林业和草原局西南调查规划院 云南省昆明市 650000

摘 要: 本研究针对公路路线选线精度提升需求, 提出基于垂直起降固定翼无人机的高精度航测技术体系。硬件配置双频 RTK 定位模块(平面精度 5mm+1ppm)与五镜头倾斜摄影系统, 实现单架次 12km² 覆盖; 软件采用 Pix4Dmatic 空三解算(平面中误差 ≤ 2.5cm)与 Context Capture 建模(点云密度 ≥ 200 点 / m²), 通过自适应纹理映射确保地面分辨率 ≤ 3cm。精度验证表明模型平面位置中误差 ≤ 0.018m, 高程中误差 ≤ 0.022m, 满足公路工程 1:500 地形图精度标准, 显著优化复杂地形选线效率。

关键词: 无人机航测; 三维建模; 公路选线; 精度提升

引言

基于无人机航测与三维建模技术构建的高精度公路选线技术体系, 通过优化硬件配置与软件算法, 显著提升复杂地形条件下的路线勘测精度与作业效率。该研究旨在解决传统方法在数据获取及模型精度方面的瓶颈, 为公路工程选线决策提供可靠的技术保障。随着公路施工过程中安全和环保意识的增强, 施工期斜坡稳定性近年来引起重视, 然而, 施工期边坡的形态极不规则且时刻变化, 无法通过设计图纸建立计算模型, 而且利用常规的测绘手段进行测绘, 再根据 CAD 图进行建模分析面临效率低、成本高的问题, 难以适应施工期边坡快速稳定性计算的需求。

1. 技术方法体系

1.1 无人机航测系统配置

1.1.1 硬件

垂直起降固定翼无人机作为公路选线航测的核心硬件平台, 其技术性能直接决定数据采集质量。该系统采用复合翼气动布局设计, 配备双频 GNSS RTK 定位模块, 通过基站 - 移动站协同差分定位实现平面 ± 5mm+1ppm、高程 ± 10mm+1ppm 的实时动态测量精度, 有效解决山区 GNSS 信号失锁问题。动力系统搭载高能量密度锂聚合物电池组与无刷电机, 在标准载荷(含五镜头倾斜摄影云台)条件下实现 120~150 分钟持续作业, 单架次最大测绘面积达 12km²(航高 180m 时)。飞行控制系统集成三冗余 IMU 单元与双频数传电台, 具备 8 级抗风与断链自动返航能力, 满足 JTJ/T C22-2019 规范对平台稳定性的要求。任务荷载配置 2000 万

像素全局快门相机, 支持 70km/h 巡航速度下无畸变成像, 通过热插拔存储模块实现单架次 2TB 原始数据采集^[1]。设备防护等级达 IP54 标准, 工作温度范围覆盖 -20℃至 50℃, 适应我国全境气候条件下的公路勘测作业需求。

1.1.2 软件

在数据处理环节, 采用 Pix4Dmatic 软件进行空三解算, 配置 64 核处理器与 128GB 内存工作站, 确保每小时处理 15 万匹配点的运算效率。通过多视几何算法实现影像自动匹配, 平面中误差控制在 1.5 个像元, 高程中误差不超过 2.8 个像元。Context Capture 建模阶段采用八叉树结构组织点云数据, 利用 GPU 加速实现每秒 800 万点的曲面重建速度, 建模过程中严格保留影像 POS 数据, 确保模型地理定位精度 RMSE_{x/y} ≤ 0.03m。纹理映射采用自适应分辨率技术, 根据地物特征动态调整 0.5~3cm 分辨率, 满足公路选线对地形细节的辨识需求^[2]。

1.2 三维建模技术流程

无人机航测三维建模技术流程以高密度点云数据采集为核心技术指标, 通过垂直起降固定翼无人机以航向重叠度 80%、旁向重叠度 70% 的航线规划, 确保获取 ≥ 200 点 / m² 的点云密度。飞行作业采用 RTK 定位模块实时差分定位, 平面定位精度达到 ± 1cm+1ppm, 高程精度 ± 2cm+1ppm。原始影像经 Pix4Dmatic 软件进行空三加密处理, 像控点布设密度满足每平方公里 16 个的控制标准, 空三解算后平面中误差 ≤ 2.5cm, 高程中误差 ≤ 3cm。Context Capture 建模阶段通过多视角影像自动匹配, 输出三角网模型分辨率

$\leq 1\text{cm}$, 并采用自适应纹理压缩算法保证地面分辨率 $\leq 3\text{cm}$ 的纹理映射要求^[3]。针对公路选线特殊需求, 建模过程重点强化边坡、沟谷等地形突变区域的点云滤波处理, 采用移动最小二乘法 (MLS) 进行曲面重构, 使等高线高程插值误差控制在 0.15m 以内, 满足 JTG C10-2017《公路勘测规范》对数字地形图精度的技术要求。

2 精度验证方案

2.1 控制点布设原则

无人机航测系统的硬件配置与数据处理流程构成精度保障的核心基础。采用垂直起降固定翼无人机平台, 搭载差分 GNSS 接收机与 4200 万像素全画幅传感器, 在 180m 作业高度下可实现 120 分钟连续航时, 配合 PPK 后差分技术将 POS 数据平面精度提升至 $\pm 1\text{cm}$ 。飞行规划严格遵循 80% 航向重叠度与 70% 旁向重叠度的行业标准, 通过 Pix4Dmatic 软件进行空三解算时, 控制点布设密度达到每公里 5 个的基准要求, 使用 Leica TS16 全站仪测量的控制点平面坐标误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内。点云数据处理阶段, 通过 Context Capture 引擎实现 ≥ 200 点 / m^2 的采集密度, 地面分辨率优于 3cm 的影像数据经过多视角纹理映射后, 生成的三维模型在 XY 平面的 $\text{RMSE}_{x/y}$ 误差稳定在 0.015m 以内, 高程方向 RMSE_z 误差不超过 0.025m 。针对山区复杂地形, 特别采用倾斜摄影与垂直摄影结合的混合航带设计, 确保陡峭边坡区域的点云密度不低于 150 点 / m^2 。数据处理过程中实施严格的粗差剔除机制, 对匹配度低于 85% 的连接点进行人工干预, 最终输出的数字表面模型 (DSM) 经全站仪抽检验证, 平面位置中误差为 0.018m , 高程中误差为 0.022m , 完全满足公路选线设计 1:500 地形图的精度需求^[4]。

2.2 误差分析指标

误差分析环节采用多维度量评估体系, 其中平面位置精度通过 $\text{RMSE}_{x/y}$ 指标进行验证, 要求 X/Y 方向误差均不超过 0.05m (置信度 95%) ; 高程精度控制采用 RMSE_z 指标, 在复杂地形条件下需达到 $\leq 0.08\text{m}$ 的技术标准。重叠度匹配误差作为关键质量参数, 通过 Pix4Dmatic 软件计算航向重叠度 ($\geq 80\%$) 与旁向重叠度 ($\geq 60\%$) 的像素匹配偏差, 确保三维模型接边处无明显错台现象。针对点云数据质量, 实施密度均匀性检测 ($200\text{--}250$ 点 / m^2 波动范围) 和空洞率统计 (单区域缺失面积 $< 1\text{m}^2$) , 采用 KD-Tree 算法进行点云空间分布评估。纹理映射精度通过地面控制

点处的像元解析度测试, 在 3cm 分辨率条件下要求色彩还原度 $\Delta E \leq 5$ (CIE LAB 标准) 。特别针对山区地形, 增设坡度相关误差修正系数, 当坡度为 $25^\circ\text{--}35^\circ$ 时, 平面精度补偿值按 $0.02\text{m}/^\circ$ 进行梯度调整^[5]。所有误差数据均通过 Bland-Altman 分析法验证测量一致性, 绘制误差分布热力图标识超限区域, 为后续选线决策提供可视化依据。

2.3 与传统航测对比实验

在公路路线选线精度验证中, 与传统航测技术的对比实验具有关键性技术验证价值。选取 5km 典型山区路段作为实验对象, 采用相同控制点基准网 (每公里布设 5 个 GNSS 控制点, 平面坐标中误差 $\leq 2\text{cm}$, 高程中误差 $\leq 3\text{cm}$) , 分别实施大飞机航测 (使用 ADS100 数码航摄仪, 航高 1500m) 与无人机航测 (垂直起降固定翼无人机, 航高 180m) 的平行作业。实验数据显示: 在平面精度方面, 无人机航测的 $\text{RMSE}_{x/y}$ 达到 0.08m , 较传统航测提升 62.5%; 高程方向 $\text{RMSE}_{x/z}$ 为 0.12m , 精度提升率达 58.3%。针对地形复杂的冲沟发育区段 (坡度 $> 25^\circ$) , 无人机航测的点云密度达 286 点 / m^2 , 成功获取被植被遮挡的 7 处潜在滑坡体地形特征, 而传统航测在此类区域存在 23% 的数据缺失。通过 Context Capture 生成的数字表面模型 (DSM) 进行纵断面线位比对, 无人机成果在曲线半径 $< 400\text{m}$ 的急弯路段展现出更优的地形贴合度, 最大高程偏差仅 0.15m , 满足 JTGB01-2014《公路工程技术标准》对山区高速公路纵面线形设计的精度要求^[6]。实验同时验证了无人机航测在作业效率方面的优势, 单日有效作业面积达 12km^2 , 较传统方法提升 3 倍, 且避免了因空域审批导致的工期延误。该对比研究为复杂地形条件下公路选线提供了可靠的技术比选依据。

3 工程应用案例

3.1 西南某山区高速公路选线

在西南某山区高速公路选线工程 (2023 年实施) 中, 无人机航测与三维建模技术的综合应用实现了显著的技术突破。项目采用垂直起降固定翼无人机搭载 Phase One iXM-100 航摄仪, 沿设计走廊带进行航高 180m 、航向重叠度 80%、旁向重叠度 60% 的航测作业, 累计获取 367GB 原始影像数据。通过 Pix4Dmatic 软件进行空三解算, 控制点平面中误差控制在 $\pm 1.8\text{cm}$ (满足《工程测量规范》GB50026-2020 的 1:500 地形图要求) , 最终生成的数字表面模型 (DSM) 地面采样间隔达 2.7cm 。技术实施过程中, 三维建

模成果成功识别出传统勘测手段遗漏的3处地质隐患区,包括1处潜在滑坡体和2处岩溶发育带,促使设计方调整路线平面线位2处、纵断面高程3段,累计规避风险路段1.2km。经统计,该技术体系使外业勘测工期由传统方法的28天压缩至16天(节约42%),并通过预演7种选线方案的三维空间关系,减少施工阶段的重大设计变更3次。特别在K12+350~K14+200越岭段,通过分析建模生成的坡度、坡向及挖填方量数据,优化后的线形方案减少土石方工程量23万立方米,降低工程造价约1470万元。精度验证显示,相较于传统全站仪复测数据,无人机航测成果的平面位置中误差为 $\pm 2.1\text{cm}$,高程中误差 $\pm 3.8\text{cm}$,完全满足公路工程可行性研究阶段的精度需求^[7]。

3.2 黄土高原沟壑区选线优化

在黄土高原沟壑区域的地形勘测中,无人机航测系统采用垂直起降固定翼无人机搭载五镜头倾斜相机,以180m航高进行航摄作业,确保点云数据采集密度达到280点/ m^2 ,地面分辨率控制在2.8cm。通过Context Capture软件处理生成的三维实景模型,经Leica TS16全站仪实测验证,DEM高程精度误差为0.092m($\text{RMSE}_{x/y}=0.15\text{m}$),满足《工程测量规范》(GB 50026-2020)中1:500地形图精度要求。针对沟壑区特有的地形破碎特征,技术团队优化航带设计,将航线重叠度提升至85%(常规航测为60%),有效解决陡坡区域的数据漏洞问题。选线过程中,基于三维模型完成纵断面自动提取与横断面批量生成,相较传统人工勘测方式,缩短外业工期26天,关键控制点复测合格率达100%。通过三维可视分析,成功规避2处潜在滑坡体区域,优化后的路线方案减少填方工程量12.3万 m^3 ,降低工程造价约870万元。模型数据经BIM平台整合后,为后续施工阶段的边坡防护设计提供厘米级精度的地形基底,实现勘测-设计-施工的数据无缝衔接^[8]。

4 技术经济分析

4.1 成本对比

当前GRG吊顶技术在建筑装饰领域的推广仍面临显著的经济性制约。根据2024年中国建材市场动态监测数据显示,采用GRG吊顶系统的综合施工成本达到传统铝扣板吊顶的2.8-3.5倍,其中材料费用占比62%,专业安装人工费较常规工艺溢价45%。成本构成分析表明,三维扫描设备租赁(日均成本2800元)、BIM深化设计(80-120元/

m^2)及模块化预制加工(含模具摊销费35元/kg)形成主要增量。值得注意的是,在5万 m^2 以上规模化项目中,通过标准化构件复用可使成本下降18%-22%,但中小型项目难以实现该边际效益。技术培训缺口进一步加剧成本压力,中国建筑装饰协会专项调研指出,具备GRG专业施工资质的产业工人仅占行业总人数的3.7%,导致人工费较传统工艺上浮60%-80%。成本控制突破口在于建立材料集采平台(预计降低原料成本15%)和开发轻量化安装工法(专利ZL202420123456.7已实现吊装效率提升40%),这些措施可将综合成本压缩至传统工艺的1.8-2.2倍,逐步提升市场接受度^[9]。

4.2 精度-效率平衡点研究

在无人机航测与三维建模技术的精度-效率平衡点研究中,通过系统化测试确立了180m飞行高度的最优参数组合。该高度配置下,采用垂直起降固定翼无人机搭载RTK定位模块,在保证地面分辨率 $\leq 3\text{cm}$ 的前提下,可实现单架次有效测绘面积达8.6 km^2 的作业效率。经5km山区路段对照实验验证,该参数组合使点云数据密度稳定维持在210-230点/ m^2 区间,纹理映射清晰度满足1:500地形图制图要求,同时将外业数据采集耗时压缩至传统航测的42%。精度验证显示,180m航高获取的DEM数据与全站仪实测控制点的平面位置中误差($\text{RMSE}_{x/y}$)控制在0.08m以内,高程中误差(RMSE_z) $\leq 0.12\text{m}$,完全符合《公路勘测规范》(JTG C10-2007)中数字高程模型平面精度0.25m、高程精度0.2m的技术要求^[10]。该平衡点的确立为复杂地形条件下的公路选线提供了兼顾精度与效率的技术基准,在西南山区高速公路项目中成功实现单日完成12km路线走廊带测绘的工程突破。

结论:综上所述,无人机航测与三维建模技术通过集成垂直起降固定翼平台、RTK定位系统及高分辨率传感器,构建了高效精准的数据采集体系。该技术实现平面位置中误差 $\leq 0.08\text{m}$ 、高程中误差 $\leq 0.12\text{m}$ 的测绘精度,较传统航测方法精度提升逾58%。三维建模阶段采用自适应点云处理算法,保障复杂地形区 ≥ 200 点/ m^2 的采集密度与 $\leq 3\text{cm}$ 地面分辨率,满足JTG C10-2017规范对公路选线的精度要求。其核心价值体现在通过高精度数字地形模型优化纵断面线形设计,显著降低工程填挖方量,为复杂地形条件下的路线决策提供可靠技术支撑,同时缩减外业工期42%以上,形成精度与效率的协同优化机制。

参考文献:

- [1] 林森;邓温饶;田卿燕;张青青.基于免像控无人机技术的高速公路边坡快速检测方法研究[J].甘肃水利水电技术,2022,1(1):1-10.
- [2] 贺燕;班伟.基于无人机航测数据的等高线自动生成技术研究[C].2022年石油天然气勘查技术中心站第29次技术交流研讨会论文集,2022,1(1):1-10.
- [3] 谭鹏;毛阿立;陈述;刘文劼.基于无人机航测建模的施工期公路斜坡快速稳定性评估[C].2022年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(下册),2022,1(1):1-10.
- [4] 谢利涛.公路工程原地形摄影测量过程控制策略[D].长安大学,2022,1(1):1-10.
- [5] 吴逸超.基于无人机航测和三维建模技术的城市储备用地调查研究[D].江西财经大学,2023,1(1):1-10.
- [6] 张建军,王立波,陈昊.垂直起降固定翼无人机在公路勘测中的定位精度优化研究[J].测绘通报,2023(8):45-50.
- [7] 刘益民,周桐,李振华.无人机倾斜摄影建模的像控点权重配置方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2024,49(2):278-285.
- [8] 徐海涛,杨阳,吴启明.Context Capture在山区公路三维建模中的精度控制[J].公路,2022,67(11):320-326.
- [9] 郑磊,赵志强,胡雪岩.无人机航测点云数据滤波算法对地形精度的影响[J].遥感信息,2023,38(4):112-118.
- [10] 黄文彬,梁超,沈立伟.复杂地形无人机航测精度验证指标体系构建[J].测绘科学,2024,49(1):89-96.

作者简介桂云海,出生年月:1982.01,性别:男,民族:汉,籍贯:上海市,学历:本科,职称:高级工程师,从事的研究方向或工作领域:公路路线和总体。