

基于无人机倾斜摄影测量的复杂地形 三维建模精度评估研究

陆春伟

(南京建力测绘勘察院有限公司, 江苏 南京 211500)

摘要 复杂地形区域地貌起伏大且地物类型多样, 为提升模型精度和表现力, 本文以无人机倾斜摄影测量为基础, 设计多视角航摄与像控点布设方案, 获取高分辨率影像数据, 并构建三维模型, 结合空三处理、密集匹配和模型优化方法开展精度评估与误差分析。结果表明, 该方法在复杂地形下具备较高建模精度与几何完整性, 对数字地形建模与自然资源调查具有应用价值。

关键词 倾斜摄影测量; 三维建模; 复杂地形; 精度评估

中图分类号: P23; TP242

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.011

0 引言

在地理信息获取与三维重建需求日益增长的背景下, 传统测绘手段在复杂地形区域的效率与精度已难以满足实际需求, 无人机倾斜摄影测量技术具备灵活以及高精度等优势, 成为地形建模与地物识别的重要手段。复杂地形区域存在高差悬殊和地表破碎等问题, 影响模型重建质量与精度控制。本文围绕高精度建模需求亟需构建适应地形特征的测量流程与评估体系, 针对典型复杂地形区域开展系统建模与精度分析, 为精细化地理建模与测绘工程实践提供技术支撑。

1 复杂地形三维建模方案设计与数据获取

1.1 研究区域概况与复杂地形特征分析

研究区域位于西南地区典型山地地貌带, 海拔变化范围在 560 米至 980 米之间, 区域内山势陡峭, 沟壑纵横, 地表覆盖类型呈现明显差异, 包含裸岩、林地、农田以及部分居民点。由于长期自然侵蚀与构造运动的叠加作用, 地形结构破碎, 局部区域存在岩坎与塌陷地形, 地貌单元复杂交错。高程起伏超过 420 米的地段广泛分布于主山脊两侧坡面, 使得常规航空摄影难以获得统一质量的影像数据。受地形影响, 地表反射特性在不同坡向差异显著, 阴影与遮挡问题突出, 对三维重建的影像匹配与深度估计产生干扰。

1.2 无人机航摄方案设计

航摄平台采用四旋翼倾斜摄影无人机系统, 配备五镜头相机组件, 单镜头像素为 2400 万, 传感器尺寸

为 36 毫米 × 24 毫米。在实际飞行中, 规划航线高度根据地形高差动态调整, 从起始点最低 560 米抬升至 980 米以上区域, 确保航带重叠度与侧向覆盖均满足后期重建需求。航向间距控制在 110 米左右, 单条航带平均飞行长度超过 1 200 米, 侧向间隔调整至 85 米以适应地形起伏。飞行速度设定为每秒 6 米, 有效减少因动态模糊带来的图像质量损失。倾斜角设为 45 度, 兼顾立面信息获取与视觉重建的稳定性。每次飞行任务覆盖面积不超过 0.8 平方公里, 并分批实施多区域航摄, 避免因环境变化造成图像条件不一致。

1.3 像控点布设方案与地面测量

控制点布设依据影像覆盖范围与地形特征进行分区设计, 总体布设控制点 24 个, 检查点 10 个。控制点分布优先考虑影像边缘与高差突变地段, 平均间距约为 200 米, 在陡坎、转折地形以及林缘地带加密布设。使用高精度 GNSS 设备进行静态观测, 每个点采集时间不低于 15 分钟。点位布设前对地面稳定性与可识别性进行评估, 选用颜色反差明显的标志布点材料, 保证在所有倾斜视角中清晰可见。控制点测量数据采用 WGS84 坐标系并转换为国家高程基准统一管理, 为后续空中三角测量提供精确支持。

1.4 多视角影像数据与辅助数据获取

影像采集使用五镜头同步曝光机制, 单次飞行获取有效影像数量超过 1 200 张, 前后交叠大于 80 张, 侧向覆盖在 60 张以上。多视角影像覆盖同一地物单元,

作者简介: 陆春伟 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程测绘。

使得在高低起伏区域形成丰富的视差信息,为后续密集匹配提供条件。影像分辨率为地面采样距离2厘米,具备识别微小地物结构的能力。除主影像外,采集高程辅助数据包括公开DEM与地面测点信息,用于初步模型构建与匹配误差控制。部分区域采用手持相机进行补拍,针对阴影严重与遮挡较多的地段进行补充图像获取。数据采集过程中设置影像质量控制环节,剔除模糊图像及过曝图像,保障建模输入数据的一致性与稳定性^[1]。

2 复杂地形三维分析

2.1 数据预处理与检查

数据预处理阶段以提升建模输入数据的稳定性与一致性为目标,针对原始影像进行系统性检查与标准化处理。影像资料导入后,需进行相机参数一致性校核与文件完整性检验,剔除模糊、偏移或重影图像,确保数据链条完整且可溯源。针对地面控制点数据,实施坐标格式统一、空间基准对齐与误差初筛,避免因坐标系不一致引发模型偏移。图像重心分布评估采用均值重心算法,借助计算各张影像中心位置的标准差,判断是否存在航线漂移问题。图像亮度与对比度调整采用灰度拉伸法,提升影像特征点提取质量。在特征点匹配前,引入SIFT算法进行初步特征点筛选,并借助比值约束法剔除低质量匹配,保留高置信度影像对组合,匹配比值计算公式为:

$$R = \frac{d_1}{d_2} \quad (1)$$

式(1)中, d_1 表示最近邻特征点距离, d_2 为次近邻距离。当比值 R 小于阈值0.8时认为匹配可靠,最终预处理结果需满足影像重叠区域分布均衡、控制点空间分布合理与图像清晰度达标等条件。

2.2 空中三角测量与密集匹配

空中三角测量是三维重建的核心环节,决定模型整体的空间精度与相对稳定性。影像导入后借助自动特征点提取算法进行图像匹配,结合控制点与POS数据构建初始空三网络。在计算中采用光束法平差方法,借助最小二乘准则求解外方位元素并优化影像间几何关系。解算过程中引入加权约束模型对像控点进行控制,平差残差控制在2像素以内。完成空三处理后生成稠密点云,密集匹配采用Semi-Global Matching算法对影像对进行像素级深度估计,依据图像灰度一致性与几何约束关系计算每个像素的视差值,匹配结果形成结构化点云数据。在复杂地形区域内,匹配精度受到阴影遮挡与坡面朝向的干扰,需结合视角冗余进

行多角度融合,最终输出的稠密点云数据量超过2800万点,为后续网格构建提供基础空间信息^[2]。

2.3 三维网格与纹理映射生成

三维网格构建以稠密点云为基础,采用Poisson重建算法将离散点集转化为连续曲面。该方法基于多尺度八叉树结构构建空间函数,重建出具有拓扑连续性的三角网格模型。在网格生成过程中对点云法向量进行平滑处理,提升重建表面的一致性与稳定性。复杂地形表面存在大量细小起伏与高差突变区域,网格细节保留策略采用自适应分辨率控制,在平缓区域生成大面单元,在突变区域细化至平均边长不足6厘米的三角形单元。纹理映射阶段选择图像投影误差最小的主影像作为纹理基准,并对不同视角下的纹理进行拼接融合。映射方式采用全自动UV展开算法,将影像信息准确贴合至三维网格面片上,实现高保真度的模型表现还原。

2.4 模型后处理与优化

模型后处理环节面向实际应用需求对初步生成的三维模型进行结构调整与视觉优化。面向地形重建的几何精度优化采用误差分析与局部修复结合的方式,检测点云边界裁切误差并对网格边界进行闭合处理。冗余面片与噪声点剔除以空间邻域一致性与纹理突变检测为依据,清理模型中孤立面与高度异常点。纹理优化环节采用图像光照均衡与颜色平滑算法消除不同角度影像融合产生的色差边界,提升整体视觉一致性。对于局部失真区域结合手工控制点与辅助影像重建小范围局部模型并进行融合更新。在模型导出阶段,对三角网格进行多级简化压缩,将面数控制在220万以内,以满足多平台浏览与实时加载要求,最终模型具备完整地形形态表达与真实表面纹理再现,为精细化地理分析提供可靠空间基础^[3]。

3 三维模型精度评估与分析

3.1 精度评估方案设计

三维模型的精度评估从空间定位和几何结构与视觉质量三个维度展开,综合反映了模型在空间复原及形态表达与视觉表现等方面的可靠性,评估体系包括控制点与检查点的空间残差分析,点云密度与一致性的几何结构分析,以及纹理还原效果的图像评价指标计算。评估数据来源包括控制测量成果和原始影像数据及建模结果与辅助参考模型,空间精度采用三维坐标残差作为主要评价指标,几何完整性使用模型内部点间距一致性与表面连续性作为判据,视觉质量依据影像清晰度及纹理接缝与色彩过渡判断^[4]。

3.2 基于检查点的绝对精度评估

绝对精度评价基于外业布设的 10 个检查点,借助对比模型中同名点坐标与实测坐标之间的误差,计算三维空间偏差。检查点覆盖研究区域不同高程与地貌特征段,确保评估具有代表性。误差计算采用欧氏距离测量方式,对每个检查点计算其 XYZ 三个方向上的误差值,并结合均方根误差进行综合表达。在检查点编号为 CP05 与 CP08 的位置上,Z 向误差分别达到 0.26 米与 0.31 米,是误差最大的两处,主要分布在高陡坡面与林缘转折区。其余检查点误差集中在 0.11 米至 0.24 米之间,模型整体 Z 向误差控制水平优于 XY 向。综合评估结果表明模型在空间定位方面满足高精度测绘应用要求。

3.3 模型内部相对精度与几何完整性分析

模型内部精度主要依赖于稠密点云的分布均匀性与网格结构的几何连续性。随机抽取模型中 5 个子区域进行点间距统计与边长变化分析,对应的数据列于表 1。

表 1 模型子区域内点间距与三角网边长统计表

区域编号	平均点间距(米)	点间距标准差(米)	平均边长(米)	最大边长(米)
A01	0.072	0.013	0.085	0.142
A02	0.068	0.010	0.079	0.136
A03	0.081	0.015	0.090	0.158
A04	0.076	0.014	0.088	0.149
A05	0.069	0.012	0.081	0.132

从表 1 中可见,五个区域的平均点间距集中在 0.068 米至 0.081 米之间,点间距标准差最大值为 0.015 米,说明点云分布较为均匀。三角网平均边长变化范围在 0.079 米至 0.090 米之间,最大边长未超过 0.160 米,表明网格构建过程中未出现显著的间隙与断裂,整体结构连续性良好。

3.4 模型纹理质量与视觉逼真度评估

纹理质量评估以图像清晰度、颜色还原度与缝合过渡平滑度为核心指标。采用图像梯度均值作为清晰度参考,在模型主要展示区域中选取典型纹理片段进行统计,最大梯度值达到 82.5,最低为 61.3,说明纹理贴图具备较强细节表现能力。色彩一致性评估对比多个视角拼接区域中 RGB 通道标准差,最高为 4.8,色差控制在较小范围内,未出现明显色带与色温漂移,纹理拼接边缘采用平滑加权融合算法处理,有效消除了不同影像亮度差异带来的缝隙问题。整体观测模型表

面色彩自然,图像无明显伪影,具备较高视觉还原效果,适用于展示类平台与城市三维可视化系统部署^[5]。

3.5 不同地形特征区域的精度对比分析

将模型划分为五类典型地形单元进行对比,包括陡坎区、林地带、破碎带、坡地段与平台区,每类选取 3 个代表区域进行平均 Z 向偏差与点云密度统计,对比结果如表 2 所示。

表 2 不同地形特征区域建模精度对比表

地形类型	平均 Z 向误差(米)	点云密度(点/平方米)
陡坎区	0.29	1 436
林地带	0.24	1 210
破碎带	0.27	1 085
坡地段	0.18	1 568
平台区	0.13	1 675

数据分析显示平台区的 Z 向误差最小,仅为 0.13 米,点云密度也达到 1 675 点每平方米,是表现最优的区域。陡坎区误差达 0.29 米,密度下降至 1 436 点每平方米,受地形起伏与投影变形影响较大,破碎带因地物复杂与遮挡严重,点云密度最低,仅为 1 085 点每平方米且精度水平波动明显。

4 结束语

本文围绕复杂地形条件下的三维建模展开系统研究,构建以无人机倾斜摄影测量为核心的作业流程,涵盖数据获取和建模处理与精度评估各个环节。结果表明,该方法在高差大与地表复杂区域具备良好的几何还原能力与纹理表达效果,研究成果可为复杂地形下的地理建模与自然资源监测提供实践参考。

参考文献:

- [1] 姜磊,梁聪,赵旭,等.消费级无人机倾斜摄影在弃土土方测量中的应用[J].山西建筑,2025,51(24):153-156,161.
- [2] 高学森.倾斜摄影测量技术在城市大比例尺测图中的应用研究[J].工程建设与设计,2025(22):103-105.
- [3] 霍福广,黄延庆,由博,等.机载 LiDAR 融合倾斜摄影在高压线塔三维建模中的应用[J].能源技术与管理,2025,50(05):10-13.
- [4] 王懂懂,刘春.基于无人机航摄与分阶段空三的古民居实景三维建模方法[J].宁德师范学院学报(自然科学版),2025,37(03):292-298,316.
- [5] 曾捷.无人机倾斜摄影测量技术在房产测绘中的应用:以住宅项目为例[J].居舍,2025(35):30-33.