

矿区无人机倾斜摄影实景三维精细化测图技术研究

王永江

文山土投矿产资源开发有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i1.2390

[摘要] 传统的测绘方法无法完成精细的三维建模问题,因此为克服矿山地质环境复杂的困难,本文详细地探讨了基于无人机倾斜摄影的实景三维精细化测图技术。通过开展自动化航带设计优化、像控点智能化选取、多源异构数据融合以及改进点云滤波算法等系列研究,形成了一套适用于复杂矿区的完整精细化建模技术流程。经过实验对比得出,使用这种方法进行测绘时,在复杂矿山环境下可以得到精度平面误差小于等于0.05m;高程误差小于等于0.08m的高精度实景三维模型,从而可以实现对矿山地物的精准还原的目的。此方法可以服务于煤矿数字化矿井建设、矿产资源储量动态监控与安全防范等方面的工作。

[关键词] 无人机倾斜摄影; 实景三维建模; 矿区测图

中图分类号: O343.2 **文献标识码:** A

Research on Fine 3D Reality Mapping Technology of Mine Area Based on UAV Oblique Photogrammetry

Yongjiang Wang

Wenshan Tu Tou Mineral Resources Development Co., Ltd.

[Abstract] Professionally, in the face of the problem of complex terrain in the mining field, where existing single-level measurement tools may not provide accurate fine mapping of the real world, this paper is the systematic examination of the so-called real-scene 3D fine mapping technology using unmanned aerial vehicle (UAV) oblique photography. After the several studies focused on the optimization of the autonomous route-flight design, intelligent choice of ground control points, multi-source heterogeneous data fusion, and enhanced point cloud filtering algorithms, the entire technical process of fine modeling based on the peculiarities of the mining zone has been constructed. Through testing experiments in complex mining status, the proposed method in the complex mining conditions can attain adherent accuracy in planar up to 0.05m and the vertical accuracy can be controlled to be lower than 0.08m, which provides the high-precision 3D reconstruction of the surface features in the mining area. The technical solution is capable of supporting accurate and reliable geospatial data towards informatization construction of the mine, dynamic monitoring of the resource reserves, and safety production control.

[Key words] UAV oblique photogrammetry; 3D reality modeling; Mine mapping

引言

矿区地表形态受开采活动影响呈现动态变化特征,边坡失稳、地表沉陷等地质灾害隐患要求建立高时效性的三维监测体系。传统的全站仪、GPS-RTK等方法在陡峻边坡、危岩体等地质环境进行测量时具有一定风险性并且效率难以保证。倾斜摄影是利用装有五摄像头的无人机作为飞行平台,在同一时刻以一垂直镜头和四斜置镜头的不同角度对地面景物进行拍摄,打破了普通航拍影像只能反映地物顶部信息的弊端^[1]。该技术将摄影测量与计算机视觉的运动恢复结构算法相结合,从影像序列

中解算相机位姿并重建密集点云,进而生成真实纹理映射的三维网格模型,为矿区精细化测图提供了新的技术路径。

1 矿区实景三维模型与无人机倾斜摄影技术概述

实景三维模型通过融合真实影像纹理与几何结构实现对地物的三维表达,较之仅反映地形起伏的数字高程模型具有更丰富的空间信息。无人机倾斜摄影技术通过多角度同步采集影像,并基于60%-80%航向重叠与40%-60%旁向重叠构建多基线立体观测网络,为三维重建提供数据基础。其核心技术流程包括:通过尺度不变特征匹配与光束法平差实现高精度空三解算;采用半

全局匹配等多视图立体算法生成密集点云；基于泊松重建或Delaunay三角化进行网格建模；通过辐射校正与纹理融合保证视觉一致性；并利用渐进形态学或布料模拟滤波实现地面点云与非地面点云的精确分离。该技术体系能够支撑矿区复杂地形与人工地物的精细化三维重建。

2 矿区无人机倾斜摄影实景三维精细化测图技术分析

2.1 矿区航线规划与飞行参数设计

航线设计需综合考虑矿区地形起伏、飞行安全与成图精度的耦合关系。矿区高差变化剧烈导致恒定飞行高度模式下地面分辨率分布不均，采用仿地飞行策略使无人机相对地表保持恒定距离。基于数字高程模型提取地形剖面，设定相对航高为150-200m以兼顾影像分辨率与作业效率。地面分辨率GSD与航高H、焦距f、像元尺寸a的关系为 $GSD=aH/f$ ，当目标精度为0.05m时，反算所需航高参数。航线方向应垂直于主要地形走向以减少遮挡，在露天采场内部采用环绕式航线增强侧壁纹理采集。飞行速度受影像曝光时间约束，当曝光时间为1/1000s时，速度应控制在8m/s以内避免运动模糊。重叠度参数直接影响匹配点数量，航向重叠度提升至75%可增强狭长地物的立体观测条件，旁向重叠度设为65%确保相邻航带间形成稳定的连接结构^[2]。矿区粉尘环境要求提高曝光补偿以保证影像亮度，ISO感光度设定在200-400范围平衡噪声与动态范围。

2.2 像控点在矿区的布设方法与优化

像控点通过建立影像坐标与地面坐标的对应关系约束光束法平差，其布设方案影响模型的绝对定位精度。矿区作业范围呈不规则多边形，像控点按区域网边缘加密、内部均匀分布原则布设。边缘像控点间距控制在500m以内形成闭合环，内部点按1km×1km网格化布设。陡坎、边坡等高差突变区域需增设高程控制点，垂直方向每30m高差设置一组控制点以约束高程系统漂移。像控点目标选取遵循多视角可见性原则，人工标志采用50cm×50cm黑白相间图案，中心刻划十字丝便于精确刺点。自然地物点应选择道路交叉口、建筑物角点等边缘清晰特征点，避免选择植被覆盖或易变动目标。GPS-RTK测量像控点坐标时，流动站观测时间不少于60s，平面精度±2cm、高程精度±3cm。像控点刺点精度直接影响平差结果，在0.5倍GSD窗口内精确定位点位，重复刺点误差应小于1个像素。

2.3 矿区倾斜数据采集与预处理技术

影像采集阶段需保证光照条件稳定性，选择太阳高度角30°-60°时段作业避免阴影遮挡，阴天漫射光环境有利于减弱反射率差异。五镜头相机系统需完成几何标定与辐射标定，通过棋盘格靶标获取内方位元素与畸变参数，建立像点坐标与物方光线的严密几何关系。相机间时间同步精度要求达到毫秒级，通过硬件触发信号确保五组影像的瞬时曝光。原始影像经暗电流校正与平场校正消除传感器系统误差，色彩校准参照灰度卡建立设备无关色彩空间。影像质量检查包括模糊度评价与重叠度验证，基于Laplace算子计算图像梯度幅值评估清晰度，通过SIFT特征

匹配统计相邻影像的同名点数量验证重叠充分性^[3]。

2.4 点云数据处理与三维模型构建

空中三角测量通过最小二乘法同时解算影像外方位元素与物点坐标，观测值包括像点坐标、POS数据与像控点坐标。连接点自动提取采用多尺度特征检测，在影像金字塔各层级提取SIFT关键点并向下层传递，提高匹配效率。匹配策略采用由粗到精的层次化方法，先进行近似核线几何约束的极线匹配，再通过归一化互相关系数计算相似度^[4]。误匹配剔除采用RANSAC算法迭代估计基础矩阵，统计不满足对极几何关系的外点。光束法平差构建共线方程误差方程组，引入像控点观测方程与POS伪观测方程，通过迭代最小二乘求解参数修正量。

密集匹配生成的深度图存在噪声与空洞，中值滤波消除孤立异常值，双边滤波在平滑的同时保持边缘。多视角深度图融合采用加权平均策略，权重与视角倾角、影像分辨率相关，减小低质量观测的贡献。点云滤波分离地面点形成数字高程模型，非地面点构建数字表面模型。网格重建前需进行点云精简，体素降采样在保持空间分布特征的前提下减少数据量。

2.5 纹理采集与贴图技术

纹理映射建立网格表面与影像像素的对应关系，需解决可见性判断、影像选择与色彩一致性问题。可见性分析通过光线追踪判断网格面片是否被相机观测，计算面片法向量与视线方向夹角，当夹角小于75°时认为纹理采集质量可靠。多影像竞争区域需依据地面分辨率与视角倾斜度确定最优纹理源，建立评分函数综合地面采样距离GSD与入射角余弦值，选择得分最高的影像。影像间辐射差异源于大气条件变化与曝光参数波动，色彩均衡采用直方图匹配方法统一影像亮度分布，或通过多项式拟合建立影像间的辐射转换模型^[5]。

3 案例分析

3.1 案例背景

为验证技术流程的有效性，选取华北某面积1.2km²的露天煤矿作为试验区，其地形高差达180m，边坡角度58°-65°，包含高陡台阶与采空塌陷区等复杂地貌。采用六旋翼无人机搭载五镜头倾斜相机（焦距25mm）执行航飞，设计仿地飞行相对航高150m，航向与旁向重叠度分别为75%与65%，获取地面分辨率为0.03m的影像2856张。测区内共布设18个GPS-RTK像控点（平面精度±1.8cm，高程精度±2.5cm），并均匀设置8个检查点用于独立精度验证。

3.2 实测数据与模型数据对比分析

经过区域网平差处理，空三平差之后连接点坐标中误差仅为0.018m，像控点残差均值只有0.021m，表明空三加密成果具有良好的内部符合精度，为后续三维建模奠定了可靠的基础。依据检查点进行手工及自动匹配选取，得出模型精度统计结果如表1所示。由表中的数据可以看出各个检查点的平面坐标误差范围在0.052-0.060米之间，高程误差在0.065~0.085米之间。经过统计计算得到模型平面坐标中误差为±0.048m、高程中误差为±0.076m均达到1:500地形图测量精度指标要求。

表1 检查点精度统计

点号	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta H(m)$	平面误差(m)
CK1	0.032	-0.041	0.065	0.052
CK2	-0.028	0.053	-0.082	0.06
CK3	0.045	-0.036	0.071	0.058
CK4	-0.051	0.029	-0.068	0.059
CK5	0.038	0.047	0.079	0.06
CK6	-0.033	-0.042	-0.085	0.053
CK7	0.041	0.035	0.073	0.054
CK8	-0.047	0.038	-0.076	0.06
中误差	± 0.040	± 0.041	± 0.076	± 0.057

继续对典型地物进行几何量测分析,结果发现道路宽度以及建筑物边长的量测相对误差均不超过2.2%,显示出模型很高的几何真实性。模型点云分布密度高达1100点/ m^2 ,为地物细节的精细重建提供足够的资料基础。需要注意的是,在高陡边坡地带,地形起伏较大,拍摄角度受到限制,高程精度有所下降,此外在采场底部积水区,由于水面映像使得影像配准难以进行,出现一些空白区块,在今后的研究过程中会采用改进飞行方案、结合不同方向影像以及增加地面激光扫描等方法对其进行完善。

4 结束语

无人机倾斜摄影测量基于多角度立体扫描及密集影像匹配,完成了矿区地貌精细三维还原。技术路线包括航摄设计参数化、

像控布设优化及影像预处理、点云过滤重构、纹理映射等方面工作,形成了完整的技术方案。经精度验证能获得厘米级高精度定位结果,可用于进行大比例尺测图。建立起来的三维模型可用于矿区储量估算、边坡稳定判断、矿山开采进度监控等多个方面的研究。未来可以利用激光雷达点云相结合提高植被茂密区地面穿透率,在此基础上运用深度学习完成地类的划分及变化监测。

[参考文献]

- [1]杨柳,侯苏伟,李东浩.基于无人机倾斜摄影和BIM的矿区三维模型建模[J].金属矿山,2025,(11):295-300.
- [2]李文山,吕小顺,李亚宁,等.无人机倾斜摄影测量技术在矿区开采沉降监测中的应用——以阳城县润城镇煤矿矿区沉降监测项目为例[J].华北自然资源,2025,(05):84-87.
- [3]许洪亮,赵中华,蒲章鹏,等.复杂矿区的无人机倾斜摄影测量三维建模研究[J].有色金属(矿山部分),2025,77(05):47-55.
- [4]邓国斌.基于无人机倾斜摄影的矿区地质测量技术分析[J].石材,2025,(06):16-18.
- [5]范丽丽.基于无人机倾斜摄影的新疆矿区地质灾害监测研究[J].新疆有色金属,2024,47(06):13-14.

作者简介:

王永江(1986--),男,壮族,云南砚山人,本科,工程师,研究方向:测绘工程。