引文格式：王云凯,焦洋,张婕,等. 基于精细三维模型的危岩监测技术研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(11): 78-81. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.11.016

基于精细三维模型的危岩监测技术研究

王云凯[1,2]，焦　洋[1]，张　婕[1]，孙　磊[1,2]
（1. 江苏省地质测绘大队，江苏 南京 211102；2. 江苏省自然资源厅地质时空信息工程技术创新中心，江苏 南京 211102）

摘　要：传统危岩监测方法存在效率低下、数据不全面等弊端，且单一倾斜摄影技术无法满足全面数据采集的高标准要求。鉴于此，提出了一种融合实景三维与站式三维点云数据的空地多源数据融合技术。利用该技术成功构建了高精度三维模型，并在此基础上进行了落石解译关键特征提取和岩壁落石运动的模拟分析。结合公园建设的实际需求，提出了针对性的落石防护措施。结果表明，精细三维模型可显著提升岩壁细节特征识别能力，为落石解译关键特征提取和危岩落石运动特性分析提供精确数据支持。研究成果不仅提升了危岩监测的自动化水平和精确度，而且为相关领域的研究和实践提供了技术参考。

关键词：危岩；精细三维模型；落石；多源数据融合
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）11-0078-04

Research on Dangerous Rock Monitoring Technology Based on Fine 3D Model

WANG Yunkai[1,2], JIAO Yang[1], ZHANG Jie[1], SUN Lei[1,2]
(1. Jiangsu Provincial Geological Surveying and Mapping Brigade, Nanjing 211102, China;
2. Technology Innovation Center for Geological Spatio-temporal Information Department of Natural Resources of Jiangsu Province, Nanjing 211102, China)

Abstract: The traditional monitoring methods for dangerous rock have drawbacks such as low efficiency and incomplete data, and the single-source oblique photography technique cannot meet the high standards of comprehensive data collection. To address these problems, we proposed an air-ground multi-source data fusion technology integrating 3D real scene and station-based point cloud data. Utilizing this technology, we successfully constructed high-precision 3D models and further conducted extraction of key features for rockfall interpretation and simulation analysis of rockfall motion on the rock walls. Considering the practical needs of park construction, we proposed targeted protective measures. The results indicate that the fine 3D models significantly enhance the ability of recognizing detailed features of the rock walls, providing accurate data support for the key features extraction of rockfall interpretation and the movement feature analysis of dangerous rocks. The findings of this study not only improve the automation level and accuracy of dangerous rock monitoring, but also offer new technical references for research and practice in the related fields.

Key words: dangerous rock, fine 3D model, rockfall, multi-source data fusion

随着生态文明建设的推进，改建矿山公园成为城市周边废弃露天矿山治理的重要形式[1-2]。由于粗放式无序开采，许多矿山宕口形成了悬崖峭壁，不仅破坏了山体本身，而且带来了危岩、滑坡等地质问题[3]。因此，对该类危岩进行快速监测是公园维护工作的重点。传统危岩监测主要依靠人工在岩壁上进行调绘，无法满足快速监测需求，且对工作人员的安全构成威胁[4]。随着无人机技术的发展，许多学者[5-9]开始利用无人机代替人员进行危岩监测，但基于倾斜摄影的实景三维模型由于采集视角和影像重叠度不稳定，导致模型精度无法满足微观观测需求。部分研究采用倾斜摄影与贴近摄影测量相结合的方法进行建模，但受航线规划限制，特别是在悬崖峭壁底部或无人机信号较弱的情况下，无法提供满足精度要求的实景三维模型。鉴于此，本文以南京市汤山矿坑公园为例，提出了一种空地多源数据融合的矿山宕口精细模型构建方法，以倾斜摄影技术为基础，结合贴近摄影测量和站式三维点云数据进行宕口悬崖精细三维建模，并利用该模型实现了落石解译关键特征提取和落石运动分析。

1　精细模型构建方法

本文采用的数据包括倾斜摄影影像、贴近摄影影

项目来源：江苏省地质局科研资助项目（2023KY13、2024KJ15）。
第一作者简介：王云凯（1988—），硕士，工程师，主要从事摄影测量、激光雷达、组合导航、空间数据库等技术研究工作，E-mail：wangyunkaide163@163.com。

像、站式三维激光扫描点云和控制点。利用多源数据融合技术生成高精度三维Mesh模型，再进行细致的纹理映射，以增强模型的真实感和细节表现。首先对空中倾斜摄影与贴近摄影影像进行融合，通过影像匹配的方式获取场景的稀疏点云，并通过密集匹配生成密集点云[10-13]；然后将密集点云与站式三维扫描点云进行粗配准、精配准的融合处理[14-16]；最后将融合后的点云数据导入模型构建平台，通过构建三角网、三角网平滑处理和纹理映射等步骤生成基于多源数据融合的精细三维模型[17]。

2　应用实例

2.1　环境概况

汤山矿坑公园位于南京市江宁区汤山山体南麓，原为从事石灰石露天开采的采石场。2017年南京市借助“城市双修”试点项目，对该区域进行了专项生态修复工作，不仅提升了水源和湿地等自然生态系统的服务功能，还实现了矿山修复与土地开发的有机结合，打造了供市民游憩的公园，实现了废弃矿山治理的经济和社会效益[18-19]。本文选取该公园4个矿山宕口中的1个作为研究对象，宕口南北长约290 m、东西宽约120 m，东南方向的入口宽度约为36 m，西南部有凹进开挖面，北面岩壁的高差最大，达到了60 m。

2.2　实景三维数据采集

本文采用空中倾斜摄影和岩壁贴近摄影技术采集实景三维数据。利用大疆精灵4 RTK无人机采集倾斜摄影影像数据，飞行路径采用井字形模式，航向、旁向重叠度均设置为80%，无人机云台的倾角设置为−60°，航摄高度设置为120 m。受环境条件和数据采集时间窗口限制，岩壁贴近摄影测量采用更灵活的手动控制无人机拍摄方式。实景三维数据采集的详细情况见图1。同时，本文采用徕卡RTC360三维激光扫描仪采集点云数据，沿岩壁底部架设设备，共采集12站点云数据。该扫描仪的最远扫描距离可达130 m，精度为1 mm+10 ppm，满足精度要求。

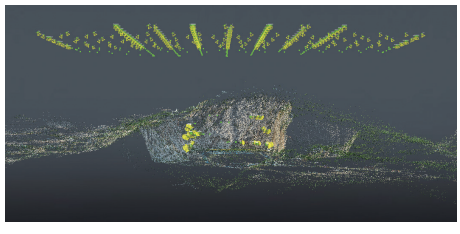


图1　实景三维数据采集

2.3　精细模型建设

本文采用ContextCapture软件进行建模，首先利用空中倾斜摄影与贴近摄影测量影像进行空中三角测量，生成密集点云数据；再利用LiDAR360软件实现密集点云与站式三维扫描点云的精确配准；然后对配准后的站式三维点云进行裁剪，并导入ContextCapture软件中；最后结合空中三角测量成果进行多源数据融合的精细化模型构建。不同建模方法的效果见图2，可以看出，3种方法均能真实反映矿山地物的实际状况，但在模型细节、模型三角网结构等方面存在差异。在岩壁细节呈现方面，基于空中倾斜摄影技术的模型能精细展现岩壁上部的细节特征，但在岩壁中下部出现了拉花和扭曲现象；加入贴近摄影测量技术后，岩壁中下部的模型细节得到了一定程度的增强，但拉花现象仍然存在；而与点云数据融合后的精细模型能很好地弥补这一缺陷，可清晰呈现岩石裂缝、岩石完整轮廓和岩壁植被等详细信息，有助于更准确地描述岩壁的实际状况。在模型三角网结构方面，基于空中倾斜摄影技术的模型，其三角网密度较小，对岩壁细节的展现较弱；加入贴近摄影测量技术后，三角网密度有所增加，岩壁细节表现更为清晰，但在岩石下方区域仍存在低密度三角网；而与点云数据融合后的精细模型具有最高的三角网密度，且在岩石下方区域也保持了较高的密度，因此对岩壁细节表现最精细。



a 空中倾斜摄影　b 空中倾斜摄影+贴近摄影测量　c 融合模型

图2　各种建模方法效果比较分析

2.4　精细三维模型危岩监测应用

2.4.1　落石解译关键特征提取

在危岩监测领域，落石解译是识别和评估落石风险的关键步骤。本文利用构建的精细三维模型提取落石解译的关键特征，主要包括结构面提取和危岩识别。

1）结构面提取。结构面特征是影响岩石稳定性的重要因素，参数包括迹长、产状和隙宽等。本文首先对精细实景三维模型进行分析，识别模型中的几何不连续区域，开展物源区检测；再利用DasViewer等软件通过视觉检查和几何测量工具，识别三维模型中的裂缝和节理线等结构面特征信息；最后对提取的结构面特征进行验证，确保特征识别的准确性和地质学意义。精细模型结构面特征提取结果见图3。



图3 结构面特征参数提取

2）危岩识别。危岩识别是落石解译过程中的关键步骤，以生成的精细三维模型为基础，根据其独特的几何形态特征，利用形态学分析方法精准识别具有潜在危险的岩体，如处于悬空状态或明显突出的岩体。悬空岩体往往呈现与周围岩体脱离的状态，其下方没有明显的支撑结构，受到外力作用时更容易发生坠落；而突出岩体则在整体地形中格外醒目，可能是受长期的风化、侵蚀等自然作用逐渐与主体岩体分离，从而形成潜在的危岩。这些危岩体由于不稳定的几何形态，极易在自然或人为因素的作用下发生崩塌，从而构成严重的安全隐患。测区部分危岩体识别情况见图4，可以看出，危岩由几处较大的危岩带和众多小块危岩组成，且岩壁上分散着各种散碎的小石块。利用分析工具快速量取危岩体的几何尺寸、边界范围、结构面产状等信息，可为危岩体稳定性评估、确定潜在崩塌风险和划分风险等级提供数据支持。

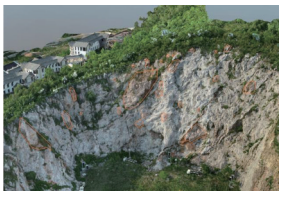


图4 危岩体识别



图5 北部岩壁落石情况

3）落石影响范围与特征。本文利用精细三维模型对落石状况进行统计分析。结果表明，在坡角处既有随着岩壁滑落的碎石散沙，又有崩落的较大石块；北部岩壁坡角处的最大落石粒径达2.3 m，距离坡脚7.5 m，在距离坡脚5 m范围内堆积着较多小石块和几个较大石块（图5）；西部岩壁的落石较少，最大落石粒径为1.2 m，均距离岩壁5 m以内；西南部凹陷区内堆积着大量随岩壁滑落的沙石，最大粒径为0.6 m，距岩壁最远距离达18 m；东部岩壁处的落石多为较大石块，散落分布在距离岩壁9 m的范围内。

2.4.2 落石分析关键参数提取与应用

危岩体在复杂多变的内外因素共同作用下，易发生崩塌现象。在这一过程中，危岩体潜在势能迅速转化为动能，导致其在高陡边坡上进行跳跃、滑动、坠落、相互碰撞等一系列复杂且难以预测的运动，对岩体下方的游客构成了严重的安全威胁[20]，因此对岩壁进行危岩落石的软件模拟尤为重要。本文采用RocFall模拟软件对岩壁落石运动轨迹进行模拟，利用精细三维模型数提取岩壁断面信息，制作dxf格式的岩壁断面；再通过精细模型对断面沿线壁体表面材料属性进行判断，并采用软件内置的经验值表对坡面参数切向恢复系数、法向恢复系数和滚动摩擦系数等进行赋值[21]。

本文选取北部岩壁的一个断面进行落石模拟，根据精细三维模型分析，设置落石初速度和角速度均为0，落石质量为50 kg，落石数量为20个。落石运动轨迹模拟、落石弹跳高度和动能分析结果见图6、7，可以看出，该处落石在岩壁上经历了多次碰撞和反弹，靠近底部岩壁处存在凹进区域，因此落石在该处反弹后的水平位移较大，落石距岩壁的最远距离约为19 m；落石在岩壁滚落运动过程中产生的最大弹跳高度为11.7 m，在距离坡底12 m后，弹跳高度逐渐减小；落石动能在岩壁凹进区域上方达到了5 kJ，在坡底时则增至5.2 kJ，值得注意的是，在距离坡底26 m后，落石动能已消耗殆尽（0 kJ）。

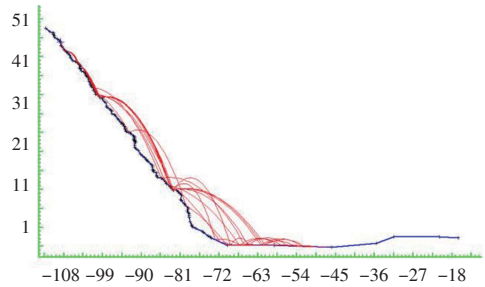


图6 落石轨迹

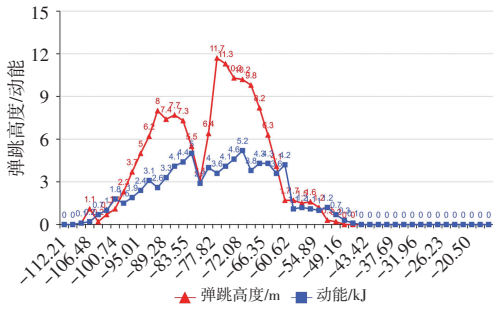


图7 落石弹跳高度和动能分析

2.4.3　落石防护建议

1）划分落石影响区域。本文根据精细三维模型和RocFall软件的落石轨迹模拟结果，综合考虑公园建设情况，划分了落石影响区和安全区。综合考虑东西两侧岩壁的落石情况，将距离北部岩壁25 m以内的区域划分为落石高风险区，禁止人员进入；25~40 m的区域划分为安全缓冲区，需设置明显的警示标志和隔离带，提醒人员注意安全。其他方向岩壁根据分析结果，落石影响区域被划定在距离岩壁4~22 m的范围内。

2）危岩体监测。结合实地勘查和精细三维模型分析情况，对危岩体布设监测点，利用倾斜仪、应变计和位移传感器等实时监测危岩体形变；建立实时数据分析系统，及时发现异常变化；建立定期巡查机制，结合现场勘查与无人机巡检等手段，定期对危岩体及其周边环境进行巡查，及时发现并处理新的裂缝、位移等异常情况；对监测数据进行定期分析，评估危岩体的稳定性变化，为制定针对性的防护措施提供依据。

3）岩壁加固。针对岩壁中存在的结构面、裂隙等不稳定因素，可结合精细三维模型分析结果，采用锚杆加固、喷射混凝土、设置防护网、综合加固等措施提高岩壁的整体稳定性。

3　结　论

本文结合实景三维数据与站式三维点云数据，采用空地多源数据融合技术，成功构建了采矿区宕口岩壁的精细三维模型。与传统方法相比，本文方法有效克服了由飞行方式、航飞光影条件、摄影视角等因素引起的岩壁岩石下方的拉花、变形等问题，显著增强了模型的完整性与准确性。基于构建的精细三维模型，本文提取了落石解译关键特征，包括危岩体块的空间分布、位置、尺寸等参数；进而开展了落石运动轨迹的模拟分析，获取了落石运动轨迹、弹跳高度和动能特性等。结合公园建设的实际需求，本文提出了划分落石影响区域、危岩体监测和岩壁加固等一系列防护措施。

参考文献

[1] 罗蕾,赵慧宁,娄轩齐. 矿山公园的景观改造再利用:以南京汤山矿坑公园为例[J]. 美与时代(城市版),2020(4):73-74

[2] 杨荣清,谢玉航. 基于视觉感受的汤山矿坑公园景观序列研究[J]. 西南林业大学学报(社会科学),2021,5(3):70-74

[3] 王建国,朱渊,姚昕悦. 南京汤山矿坑公园茶室设计札记[J]. 建筑学报,2022(9):66-71

[4] 钟昊楠,段延松. 基于贴近摄影测量的箭穿洞危岩体监测[J]. 资源环境与工程,2023,37(3):357-364

[5] 刘兵兵,吴福,刘昶,等. 基于无人机融合建模的危岩运动模拟及影响区划分[J]. 人民长江,2024,55(7):138-144

[6] 刘美琳,邓睿,李嘉雨,等. 基于无人机和Rocfall的危岩落石特征分析与运动学模拟研究:以圆宝山隧道出口为例[J]. 铁道技术标准(中英文),2024,6(1):36-44

[7] 苏国韶,李战,范秋雁,等. 基于无人机遥感快速建模的危岩体三维离散元计算方法[J]. 广西大学学报(自然科学版),2023,48(3):641-650

[8] 蒋辉. 基于无人机摄影测量的岩体结构面自动识别与稳定性分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2023

[9] Kong D H, Saroglou C, Wu F Q, et al. Development and Application of UAV-SfM Photogram Metry for Quantitative Characterization of Rock Massdiscontinuities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021,141(1):141-153

[10] 何佳男. 贴近摄影测量及其关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2019

[11] 何旷宇. 基于无人机贴近摄影高陡边坡岩体表面信息识别方法[D]. 长沙:湖南大学,2020

[12] 朱鹏程. 基于无人机的矿区地表水平移动监测方法[J]. 地理空间信息,2024,22(3):16-19

[13] 沈吉宝. 空地融合精细化实景三维重建方法[J]. 地理空间信息,2023,21(8):114-117

[14] 郑宇. 基于多源数据融合的建筑物三维建模方法研究[D]. 长春:长春工程学院,2022

[15] 赵夫群,黄鹤. 基于多特征融合的点云配准算法[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2024,60(4):509-515

[16] 冯仕超,郭兴平,韩彦伟,等. 基于三维激光扫描技术在崖墓保护中的应用[J]. 地理空间信息,2022,20(2):57-59

[17] 王树臻,郑国强,王光生,等. 多源点云数据融合的建筑物精细化建模[J]. 测绘通报,2020(8):28-32

[18] 刘宇,李佩乔. “破旧立新”城市双修理论影响下的南京汤山矿坑公园设计解析[J]. 设计,2021,34(19):135-137

[19] 张东,唐子颖. 南京汤山矿坑公园生态修复与景观设计[J]. 中国园林,2019,35(11):5-12

[20] 陈宙翔,叶成,张文波,等. 基于无人机倾斜摄影的强震区公路高位危岩崩塌形成机制及稳定性评价[J]. 地震工程学报,2019,41(1):257-267

[21] 崔志强. 自然边坡危岩体落石运动分析与风险评估:以千丈岩景区为例[D]. 绍兴:绍兴文理学院,2023