

三维激光扫描技术在矿山采空区空间形态分析中的应用研究

李宜萱 曹 雪 赵中华 张彭源 杨名赫

沈阳城市建设学院 辽宁 沈阳 110167

【摘要】：矿山采空区作为矿产资源开采后形成的地下空洞，其空间形态的隐蔽性、复杂性直接威胁矿山生产安全与地表生态环境。传统采空区探测方法难以满足复杂采空区精准分析需求，本文以移动 SLAM 三维激光扫描技术为核心，系统阐述其原理、技术优势及采空区空间形态分析的核心流程；通过优化动态数据采集方案、改进 SLAM 点云配准算法，构建完整技术体系；选取山西某煤矿采空区为工程实例，开展实地探测与数据验证，精准获取采空区体积、跨度、顶板下沉量等关键参数，分析其空间形态特征与稳定性风险。研究表明，移动 SLAM 技术在采空区空间形态测量中的相对误差 $\leq 2.5\%$ ，为矿山采空区安全防控与生态修复提供技术支撑，具有重要的工程应用价值。

【关键词】：移动 SLAM；三维激光扫描；矿山采空区；空间形态分析；点云处理；安全评估；三维建模

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.048

引言

移动 SLAM 技术是一种融合激光扫描、惯性测量 (IMU)、里程计的动态三维测量技术，具有非接触、动态连续、高效灵活的优势。无需预设固定站点，可在人员移动过程中实时获取采空区三维点云数据，同步完成设备定位与空洞地图构建，全程无需人员近距离接触危险区域。近年来，该技术已在地下洞穴探测、室内建模等封闭复杂环境中应用，但在矿山采空区空间形态分析中，仍面临动态扫描噪声控制难、SLAM 配准精度低、复杂结构数据缺失等问题。基于此，本文针对矿山采空区封闭、狭小、结构不规则的环境特点，优化移动 SLAM 技术的动态采集流程，改进点云数据处理方法，构建适配采空区特点的空间形态分析体系；结合山西某煤矿采空区工程实例，验证技术的可靠性与实用性，为矿山采空区精准探测与安全治理提供新路径。

1 移动 SLAM 三维激光扫描技术原理与采空区分析核心理论

1.1 移动 SLAM 三维激光扫描技术原理

移动 SLAM 技术通过集成“激光扫描仪+IMU 惯性测量单元+轮式/手持里程计”的移动设备，在无预设参考点的情况下，实现“动态扫描-实时定位-同步建模”一体化作业。激光扫描模块向采空区岩壁发射连续激光束，捕获反射信号并计算目标点距离；IMU 单元实时采集设备运动姿态，里程计记录移动距离，共同确定设备在空间中的实时位置；SLAM 算法通过“前端里程计估计+后端回环检测”，优化设备位姿误差，将离散激光点云统一到同一坐标系，生成连续完整的采空区点云地图；最终输出包含三维坐标 (X、Y、Z)、反射强度的海量点

云数据，支持后续形态分析与建模。针对矿山采空区环境特点，本研究选用手持移动式 SLAM 激光扫描系统，核心参数为扫描精度 $\pm 3\text{mm}$ ，有效扫描距离 0.3-50m，点云密度可达 40 点/ mm^2 ，动态扫描速度 0.5-1.0m/s，单次作业续航 ≥ 4 小时，满足采空区连续扫描需求。

1.2 采空区空间形态分析核心指标

采空区空间形态分析的核心目标是获取反映空洞结构特征与稳定性的关键参数，为安全评估提供量化依据，具体包括三类指标。采空区总体积、有效空洞体积、平面投影面积、最大跨度（水平方向）、最大高度（垂直方向）、顶板平均厚度、侧壁坡度；顶板下沉量、侧壁收敛量、空洞轮廓规整度、裂隙发育密度；顶板暴露面积、高宽比（高度/跨度）、围岩完整性系数、采空区与地表垂直距离。

2 矿山采空区移动 SLAM 三维激光扫描技术应用流程

2.1 前期准备工作

2.1.1 现场踏勘与风险评估

首先对采空区入口周边地质环境进行踏勘，明确采空区形成时间、开采方式、围岩岩性及坍塌隐患区域；采用地质雷达初步探测采空区大致范围与埋深，标记危险区域；规划连续扫描路径，确保路径覆盖采空区所有区域，且避开不稳定地段，优先选择底板平整区域作为主扫描路线。

2.1.2 扫描方案设计

基于采空区规模，主路径规划沿采空区长度方向设置 1 条中线主路径，沿宽度方向设置 2 条侧路径，路径间距 $\leq 5\text{m}$ ，确

保相邻路径扫描重叠区域 $\geq 20\%$ （满足 SLAM 配准需求）；对顶板裂隙区、侧壁残留岩体等关键区域，规划往返式加密路径，扫描速度降至 0.3m/s，提升点云密度至 60 点/mm²；激光扫描频率设为 300kHz，IMU 采样频率设为 200Hz，确保动态运动中设备姿态捕捉精度；开启“回环检测”功能，减少长距离扫描的累积误差。

2.2 动态数据采集过程

2.2.1 设备校准与调试

在采空区入口平整区域，对移动 SLAM 设备进行静态校准：通过水平静置 10 分钟，完成 IMU 零偏校准；沿已知长度的直线往返移动，完成里程计误差校准；连接设备与便携式终端，启动 SLAM 扫描软件，预览激光扫描范围，确保设备镜头无遮挡，数据传输正常。

2.2.2 动态扫描作业

操作人员穿戴安全装备，手持移动 SLAM 设备沿规划路径匀速移动，保持设备镜头朝向采空区内部岩壁，避免剧烈晃动；扫描过程中，终端实时显示点云地图生成情况，对漏扫区域立即返程补扫；对高风险区域，采用“远距离绕行扫描”，确保人员安全；单条路径扫描完成后，暂停设备并检查点云完整性，无问题后进入下一条路径，直至全部区域扫描完成。

2.2.3 数据导出与备份

扫描结束后，将原始点云数据导出至终端，同时备份至 2 个独立移动硬盘；记录扫描过程中的环境参数及设备异常情况，为后续数据处理提供参考。

2.3 点云数据预处理

2.3.1 点云去噪

采用“动态噪声滤波+统计滤波”组合算法，基于 SLAM 设备的 IMU 姿态数据，剔除运动加速度 $>0.5\text{m/s}^2$ 时采集的点云；计算每个点与其邻域点的平均距离，剔除距离大于 2.0 倍标准差的孤立点，确保点云纯净度 $\geq 95\%$ 。

2.3.2 点云配准

基于移动 SLAM 的位姿数据，采用“回环检测+ICP 算法”优化配准。识别扫描路径中重叠区域的特征点，修正设备长距离移动的累积位姿误差；对回环检测后的点云进行精细配准，最小化对应点的距离误差，最终配准误差 $\leq 0.5\text{mm}$ ，确保全采空区点云在同一坐标系下连续无错位。

2.3.3 点云精简与分割

采用“体素网格滤波”，设置体素大小为 5mm，在不影响精度的前提下，将点云数据量减少 50%（如从 3.5GB 降至 1.8GB），提升后续建模效率；采用“区域生长算法”，根据点云的法向量、曲率特征，将采空区点云与周边围岩、内部残留岩体点云分割，提取纯空洞点云数据。

2.4 三维建模与形态分析

2.4.1 三维模型重建

采用“三角网格建模法”构建采空区三维可视化模型，对预处理后的点云数据进行法向量估算与排序，建立点云间的拓扑关系；采用 Delaunay 三角剖分算法，将离散点云连接成连续的三角网格面，形成采空区表面模型；对模型进行平滑处理，并根据点云反射强度差异赋予颜色，清晰还原采空区内部结构特征。

2.4.2 形态参数提取

基于三维模型，采用“几何计算+多断面分析”方法提取核心参数，采用“蒙特卡洛积分法”，在模型边界内随机生成 100 万个采样点，计算采空区总体积与有效空洞体积，精度 $\pm 2.5\%$ ；生成 5 个平行水平断面与 3 个垂直断面，取各断面最大距离的平均值作为最大跨度与最大高度；将重建模型与原始开采设计模型对齐，计算顶板各点的垂直位移量，识别下沉量最大区域；通过模型提取侧壁轮廓线，采用线性拟合计算坡度角度，取各区域平均值作为侧壁平均坡度。

2.4.3 稳定性初步评估

结合提取的形态参数，采用“层次分析法”建立稳定性评估体系。选取 4 个核心评价指标顶板厚度（权重 0.35）、最大跨度（权重 0.25）、高宽比（权重 0.20）、围岩完整性系数（权重 0.20）；划分评价等级，计算综合评分，判断采空区稳定性风险。

3 工程实例验证

3.1 工程概况

选取某国有煤矿的 3#采空区作为研究对象，该采空区为 2015 年关闭的急倾斜煤层采空区，开采方式为走向长壁式开采，煤层厚度 3.5-5.0m，采空区埋深 25-40m，围岩主要为中粒砂岩与页岩。根据前期地质雷达探测，采空区大致范围为长 60m、宽 30m、高 8-12m，周边已出现轻微地表裂缝，存在坍塌风险，需精准探测其空间形态以制定治理方案。

3.2 数据采集与预处理

3.2.1 数据采集

采用 TrimbleX7 移动式 SLAM 激光扫描系统，按“1 条中线主路径+2 条侧路径+1 条顶板加密路径”开展动态扫描，具体采集参数见表 1。

表 1 采空区移动 SLAM 数据采集参数表

扫描路径	扫描速度 (m/s)	采样密度 (点/mm ²)	扫描时长 (min)	覆盖范围
中线主路径	0.8	40	15	采空区中部全长度
左侧路径	0.7	40	18	采空区左侧壁+部分底板

右侧路径	0.7	40	16	采空区右侧壁+部分底板
顶板加密路径	0.3	60	22	采空区顶板全范围
扫描路径	扫描速度 (m/s)	采样密度 (点/mm ²)	扫描时长 (min)	覆盖范围

本次采集共获取原始点云数据 3.5GB, 包含点云数量约 1.5 亿个, 各路径点云重叠度 25%-30%, 无明显扫描盲区, 满足后续分析需求。

3.2.2 数据预处理结果

采用 CloudCompare2.14 与 TrimbleRealWorks12.0 软件进行点云预处理:

去噪处理后, 剔除动态噪声点与粉尘杂点约 600 万个, 点云纯净度达 96%;

SLAM 配准优化后, 整体配准误差 0.4mm, 各路径点云衔接无错位; 点云精简后, 数据量降至 1.8GB, 点云密度保持 20 点/mm², 精度无明显损失。

3.3 三维建模与形态分析结果

3.3.1 三维模型重建

基于预处理后的点云数据, 采用 GeomagicStudio2022 软件构建采空区三维网格模型, 模型分辨率达 3mm, 可清晰还原采空区顶板 3 条主要裂隙、右侧壁残留岩体及底板起伏特征, 见图 1。

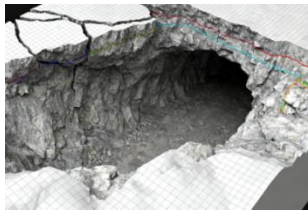


图 1 三维模型

3.3.2 空间形态参数提取

通过模型分析, 提取 3#采空区核心形态参数, 与地质雷达探测结果对比, 相对误差均≤2.5%, 具体结果见表 2。

表 2 采空区空间形态参数提取结果表

形态参数	移动 SLAM 测量结果	地质雷达探测结果	相对误差	备注
采空区总体积	13020m ³	12750m ³	+2.1%	含内部残留岩体体积 800m ³
有效空洞体积	12220m ³	11950m ³	+2.3%	纯空洞体积 (剔除残留体)
平面投影面积	1880m ²	1850m ²	+1.6%	水平投影面积
最大跨度 (东西向)	33.1m	32.6m	+1.5%	中部区域最大水平距离
最大高度 (垂直向)	11.0m	10.8m	+1.8%	右侧壁中部最高处
顶板平均厚度	6.0m	6.2m	-3.2%	最小厚度 3.2m (东部区域)
侧壁平均坡度	76°	75°	+1.3%	北部侧壁最陡 (83°)
形态参数	移动 SLAM 测量结果	地质雷达探测结果	相对误差	备注

3.3.3 稳定性评估结果

基于提取的形态参数, 采用层次分析法计算综合评分为 61 分, 评估等级为临界稳定。风险点 1 最大跨度 33.1m, 高宽比 0.33; 风险点 2 顶板平均厚度 6.0m, 东部区域仅 3.2m, 且存在 3 条长裂隙, 易发生顶板坍塌; 风险点 3 北部侧壁坡度 83° (> 75°), 岩体剥落风险较高。

4 结论

移动 SLAM 三维激光扫描技术可精准获取矿山采空区的空间形态参数, 测量相对误差≤2.5%, 精度接近静态三维激光扫描, 且效率提升 33%、安全性显著高于传统方法, 适配矿山采空区的复杂危险环境; 通过优化“动态路径规划、SLAM 配准算法、点云去噪流程”, 可有效解决移动 SLAM 在采空区应用中的盲区、误差、噪声问题, 构建完整的技术应用体系; 工程实例表明, 基于移动 SLAM 数据制定的采空区治理方案, 可精准针对高风险区域, 显著提升治理效果, 为矿山采空区安全防控与生态修复提供科学依据。通过移动 SLAM 与多技术的融合, 可进一步拓展其在矿山采空区动态监测、灾害预警中的应用, 为矿山安全生产提供更全面的技术支撑。

参考文献:

[1] 周逸文,张涛,段隆臣,等.我国矿山采空区综合治理研究综述[J].安全与环境工程,2022,29(04):220-230.

[2] 雷政可.三维激光扫描技术在矿山测绘建模中的应用分析[C]//中国国土经济学会,河北大学.“产业链空间配置优化与国土空间规划创新研讨会”暨第三届中国国土经济学会国土空间规划学术年会论文集(一).嵩县前河矿业有限责任公司,;2025:60-62.

[3] 康涛.基于三维激光扫描技术的金属矿山采空区测量应用研究[J].世界有色金属,2025,(09):166-168.

[4] 葛德志,杨振邦.三维激光扫描技术在矿山采空区数字化中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2025,(02):42-44.

[5] 施青刚.基于地面三维激光扫描的采空区建筑物变形监测研究[J].科技资讯,2024,22(20):176-178.