

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.023

基于三维激光的地下矿爆破快速验收技术研究*

张宝金¹,荆洪迪²,刘莹莹³,迟强¹,楚长青⁴,张兴帆²

(1. 鞍钢矿业有限公司 眼前山分公司,鞍山 114000;2. 中国科学院 沈阳自动化研究所,沈阳 110016;
3. 鞍钢集团 关宝山矿业有限公司,鞍山 114000;4. 鞍钢矿业有限公司,鞍山 114000)

摘要: 测量验收在采掘工程中起着监督和指导作用,然而传统地下矿的爆破验收流程与方法均难以满足现代生产需求,进而影响到地下矿山开采的效率和质量。为提升地下矿山测量验收工作效率,以眼前山铁矿-213 m水平巷道为研究对象,探讨了一种基于高精度激光SLAM算法的新型测量验收方法,通过获取地下矿山开挖前后的巷道点云数据,为后续的数据分析与处理奠定基础。在数据处理过程中,采用点云去噪、ICP配准、点云分割和切片等一系列方法,建立了一套完整的地下矿山采掘工程测量验收流程。点云去噪技术能够有效去除数据中的噪声,提高数据的纯净度和可信度;ICP配准方法则通过迭代优化实现点云的精确对齐,确保了数据的高度一致性;点云分割和切片技术则为不规则爆堆体积的精准计算提供了有效的解决途径。基于本文研究成果,该方案显著提高了高精度激光SLAM测量验收方法的工作质量与效率,不仅能够地下矿山开采过程中的施工质量提供保障,还为地下矿山爆破设计优化提供了重要的技术支持。

关键词: 地下矿;爆破;验收;激光SLAM;点云

中图分类号: TD672 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)01-0192-07

Research on Rapid Acceptance Technology of Underground Mine Blasting based on 3D Laser Scanning

ZHANG Bao-jin¹, JING Hong-di², LIU Ying-ying³, CHI Qiang¹, CHU Chang-qing⁴, ZHANG Xing-fan²

(1. Ansteel Mining Co., Ltd., Yanqianshan Branch, Anshan 114000, China;
2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. Ansteel Guanbaoshan Mining Co., Ltd., Anshan 114000, China;
4. Anshan Steel Mining Co., LTD., Anshan 114000, China)

Abstract: Measurement acceptance plays a crucial supervisory and guiding role in mining engineering. However, traditional blasting acceptance processes and methods in underground mines are insufficient to meet modern production needs and affect the efficiency and quality of underground mining. To address this issue, the Yanqianshan Iron Mine -213 m level roadway was studied to explore a new measurement and acceptance method based on a high-precision laser SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algorithm. By obtaining point cloud data of the roadway before and after underground mine excavation, the foundation for subsequent data analysis and processing was estab-

收稿日期 (Date of reception): 2023-05-04

网络首发日期 (Published online): 2024-12-27

作者简介: 张宝金 (1980-), 男, 辽宁鞍山人, 工程师, 主要从事采矿技术, 机电设备管理工作, (E-mail) 27584696@qq.com。

通讯作者: 荆洪迪 (1988-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 副研究员, 主要从事智慧矿山方向研究工作, (E-mail) jinghongdi@sia.cn。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (编号: U21A20106) 基于多元数据的矿山精细爆破设计理论与能耗控制研究

About the author: ZHANG Bao-jin (1980-), male, born in Anshan, Liaoning province, engineer, mainly engaged in mining technology and mechanical and electrical equipment management, (E-mail) 27584696@qq.com.

Corresponding author: JING Hong-di (1988-), male, born in Chifeng, Inner Mongolia, Ph. D, associate researcher, mainly engaged in the research work of smart mining, (E-mail) jinghongdi@sia.cn.

Fund Programs: Joint Fund project of National Natural Science Foundation of China (No. U21A20106) Research on Fine Blasting design Theory and Energy consumption Control based on multivariate data

lished. In the data processing phase, methods such as point cloud denoising, ICP (Iterative Closest Point) registration, point cloud segmentation, and slicing were employed to create comprehensive measurement and acceptance processes for underground mining engineering. Point cloud denoising effectively removes noise and enhances data purity and credibility. The ICP registration method ensures precise alignment of point clouds through iterative optimization, maintaining high data consistency. Point cloud segmentation and slicing techniques offer practical solutions for accurately calculating irregular explosion volumes. The research results demonstrate that this high-precision laser SLAM measurement acceptance method improves work quality and efficiency. It ensures construction quality in underground mining and provides critical technical support for optimizing underground blasting designs.

Key words: underground mine; blasting; acceptance; Laser SLAM; point cloud

近年来,随着经济全球化发展与各国战略资源配置规划交易,我国对矿产资源的需求不断提高,我国矿山企业在国际上将面临着更加激烈的竞争和挑战^[1,2]。矿山企业必须及时准确地掌握矿山的生产运行情况,以便于快速地做出决策优化。测量验收工作在矿山企业生产运营过程中有着极为重要的作用,是维持矿山安全、高效、稳定发展的关键环节,也是需要不断创新创效、合理优化的重点对象。

然而,当前矿山测量验收工作面临着诸多挑战,包括工作流程的繁杂、标准的不统一以及工程技术人员严重缺乏。这些问题导致生产测量验收数据获取不及时、不准确,严重影响地下矿山的生产效率。因此,如何在不增加技术人员的情况下满足测量验收的准确性与时效性,同时保障测量验收数据的真实性和可靠性,使生产作业计划得到严格执行,充分发挥计划的指导作用,对矿山企业来说是一个亟待解决的问题。

近年来,国内外学者在相关领域开展了部分研究工作。崔晓荣等提出了一种新的评估方法^[3],通过定量分析采空区的稳定性和爆破效果,提高了验收的准确性和效率。元玉浩等利用 SLAM 技术实现了综采工作面的实时三维建图^[4],显著提高了数据收集的效率和准确性。XU 等则通过改进视觉 SLAM 系统的场景自适应描述符^[5],增强了系统在复杂矿山环境中的定位准确性。段志鑫与郑顺义等分别探讨了三维点集的表面重构和数据精简方法^[6,7]。这些研究通过优化点云数据处理技术,提高了数据处理的效率和精确度。在数字图像相关测量方面,樊爽等提出了一种高精度的数字图像相关测量方法^[8],通过逐点移动最小二乘拟合,提高了数据获取的精度和可靠性。此外,优化算法在矿业测量中的应用也不可忽视,戚远航等研究了一种优化算法在解决复杂路径规划问题中的应用^[9],这一算法同样具有潜在地应用于矿山测量路径优化的可能性。

综上所述,以上研究成果多是集中在某一方面

进行探索,并未形成一个快速、精准的测量验收方案。因此,本研究旨在提出一种高精度激光 SLAM 测量验收方法,不仅能够提高矿山测量验收的自动化水平,还通过技术创新提高了测量的准确性和时效性。确保生产作业计划的严格执行,充分发挥计划的指导作用,从而提高矿山的生产效率和经济效益,并且对促进矿山工程测量验收的自动化、智能化发展具有重要的理论和实践意义。

1 三维激光扫描数据获取

1.1 SLAM 扫描技术

不同于露天矿山利用无人机倾斜摄影技术快速重构采场环境的快速性、简易性,地下矿山环境复杂恶劣,对设备的使用要求较多、较高^[10]。采用高精度、高密度采样的三维激光扫描设备是地下矿山开采环境精准重构的发展趋势。三维激光扫描技术获取点云数据不但可以提供井下环境真实的空间信息,包括尺度、位置和姿态等,而且对光照和纹理变化等因素不敏感,能够完整地保留深度信息。基于地图构建算法(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)解决了空间点坐标定位问题,可以快速高效地收集空间可见目标表面的点云数据,形成具有真实空间位置的三维空间模型。

采用 SLAM 技术避免了扫描设备操作过程中需要手动连续定位坐标的部分环节,减轻了扫描工作量并提高了工作效率,为井下虚拟环境重构提供了一种崭新途径,如图 1 所示。

1.2 数据采集

眼前山铁矿是鞍钢矿业公司下属主体矿山,位于鞍山市千山区,是鞍钢重要的铁矿原料生产基地之一,年产量接近 500 万 t,采矿方法为无底柱分段崩落法,点云数据采集区域主要位于 -213 m 生产水平,基于 SLAM 的现场采集情况如图 2、图 3 所示。

地下矿点云数据现场采集过程中需要手持 SLAM 激光检测设备进入回采巷道开展爆破验收作

业(如图4所示)。到达待测量的回采巷道采场后,随即正对待测爆堆开启SLAM激光检测设备,即可快速获得待测采场爆堆的高精度点云数据,通过自主开发程序的点云数据预处理功能,可以得到采场爆堆的精准三维模型,进而完成爆堆模型体积、块度分布等参数的快速计算、分析与验收。

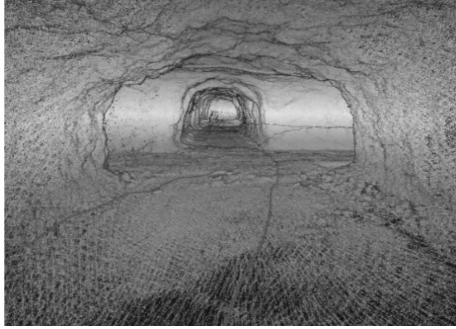


图1 地下矿SLAM即时定位与构建应用实例

Fig. 1 Real time positioning and construction application examples of SLAM in underground mines



图2 SLAM点云数据现场采集情况

Fig. 2 On-site collection of SLAM point cloud data



图4 地下矿现场爆堆数据采集

Fig. 4 Data collection for on-site blast rock pile of underground mines

2.2 基于icp的点云配准

基于三维激光扫描技术获取地下矿爆堆三维点云,受环境、设备状态和人为因素影响,往往建立的爆破前、后巷道点云模型,具有不同的坐标系,将不

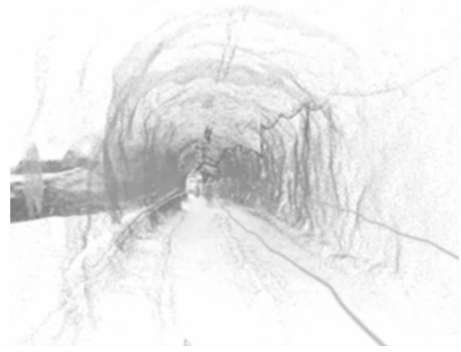


图3 地下矿巷道现场点云数据

Fig. 3 On-site point cloud data of underground mine tunnels

2 巷道点云数据预处理

2.1 基于MLS的点云拟合

利用三维激光扫描仪直接获取的地下矿巷道点云数据,由于拍摄环境、人为因素等的影响,可能存在孔洞或多余的部分,还需对原始点云进行去噪、拟合处理。

移动最小二乘法(moving least square,简称MLS)相较于其他拟合方法具有完备性和连续性,且精度较高。该算法是在点云原始数据点的基础上,利用高阶多项式插值的方式来对周围数据点进行拟合,重建表面点云的缺失部分,这不仅可以保持点云原始样本不变,而且可以使填补的孔洞区域与原始表面较为契合。

由图5可见,基于移动最小二乘法进行巷道三维点云去噪、拟合,有很好的效果,完整地去除了巷道和工作面上的点云噪声点。

同坐标系下的爆破前、后点云模型整合于同一坐标系,即巷道点云配准,其主要过程为求解两片点云之间的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 。

假设点云 $\{Q\}$ 为目标点云(参考点云), $\{P\}$ 为

源点云(待配准的点云), $p_i (i \in 1, 2, \dots, N)$ 是 $\{S\}$ 中的一个点, q_i 是 $\{E\}$ 中与 p_i 距离最近的点。

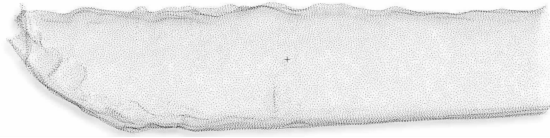


图 5 巷道拟合结果

Fig. 5 Results of roadway fitting

计算从 $\{P\}$ 到 $\{Q\}$ 的 RT 变换矩阵,包括旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 。假设参数变换是准确的,那么点云 $\{P\}$ 中的每一个点 p_i ,经过 RT 矩阵变换后将会与点云 $\{Q\}$ 中的点 q_i 完全重合,即: $q_i = R p_i + T$ 。但由于有噪声的存在,前后两次扫描所得点云不可能完全重合,所以定义目标函数

$$F = \sum_{i=0}^N |q_i - (R p_i + T)|^2$$

使目标函数最小的 R, T 即为所求变换参数。 F 其实就是参考点云 $\{Q\}$ 与已经进行 R, T 矩阵空间变换的 $\{P'\}$ 之间的平均距离。

点云的配准主要包括:降采样、 icp 配准、获取旋转平移矩阵三个步骤。见图 6。

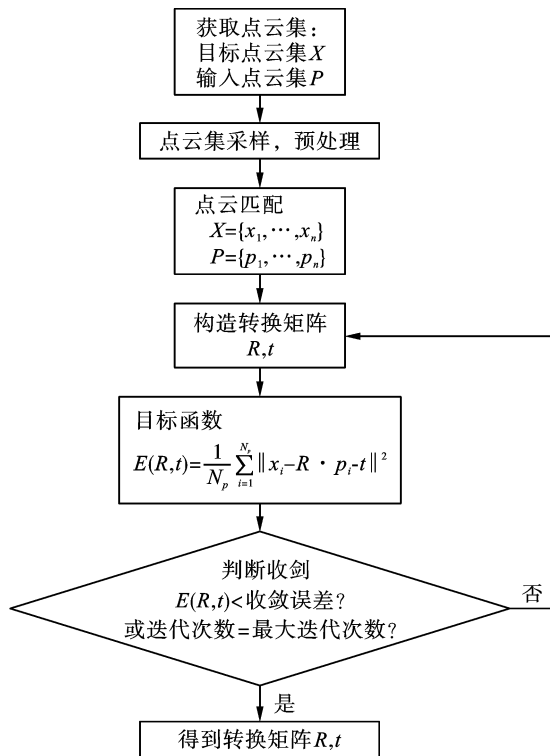


图 6 点云配准过程

Fig. 6 Point Cloud Registration Process

(1) 点云预处理

点云数据降采样能大幅提升算法速度。采用体

素降采样的方法,将输入的点云数据搭建为一个三维体素栅格,然后在每个体素(即边长为 m, n, o 的三维小立方体)内,用体素栅格中所有点的重心来近似表征显示。降采样点云只是用来参与运算从而获得变换矩阵,未降采样的点云的配准才是需要的,因此每次得到的矩阵还要用于去更新未降采样的源点云。

(2) icp 配准

采用 PCL 实现爆破前、后巷道点云的配准,需引入 $icp.h$ 模块,并设置相关参数,包括输入待配准点云、输入目标点云、设置最大迭代次数、设置最大距离阈值等。建立 kd 搜索树,并求解变换矩阵,满足要求即可结束迭代,不满足则重新建立点对关系。

(3) 配准结果

为验证上述算法和解法的可行性,在鞍钢眼前山地下矿开展了现场三维激光测量数据的采集,在该矿 -213 m 水平随机选取采场爆堆进行数据采集,利用扫描得到的爆破前、后回采进路工作面点云数据进行测试。利用上述方法根据标靶坐标来求解变换参数,演示点云坐标的配准过程,表 1 为部分点云数据配准情况,图 7 为点云配准前后情况对比。

转换参数结果如下

$$R = \begin{bmatrix} 0.961 & -0.029 & 0.276 \\ 0.046 & 0.997 & -0.056 \\ -0.273 & 0.067 & 0.960 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} 0.002 \\ 0.000 \\ -0.003 \end{bmatrix}$$

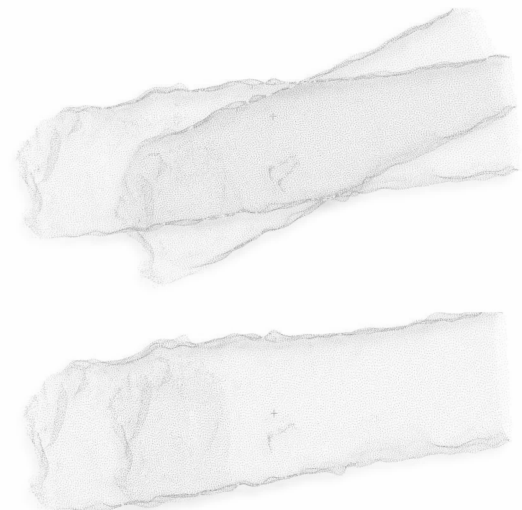


图 7 点云配准结果

Fig. 7 Result of point cloud registration

3 不规则爆堆体体积计算

3.1 基于半径内近邻搜索的爆堆点云分割

半径内近邻搜索 (Neighbors within Radius

Search),是指搜索点云中一点在球体半径 R 内的所有近邻点。

表 1 部分点云数据配准情况

Table 1 Registration of Partial Point Cloud Data

序号	源数据点			目标数据点		
	x	y	z	x	y	z
1	-0.01526126	0.00043970	-0.00830737	-0.01480601	0.000766529	-0.0102525
2	-0.01518825	0.00032031	-0.00836621	-0.01473088	0.000636529	-0.0102749
3	-0.01516975	0.00044918	-0.00824519	-0.01473473	0.000778649	-0.0101682
4	-0.01510933	0.00025281	-0.00835222	-0.01466542	0.000566950	-0.0102318
5	-0.01514618	0.00033604	-0.00829021	-0.01471015	0.000659469	-0.0101922

搜索每个点的 k 邻域的步骤

(1) 搜索子立方体的范围。

(2) 将子立方体范围内的各点记录到点集 M 中,对已经搜索过的子立方体编号及数量进行标记;半径 r 值扩大后再次进行搜索,将新搜索到的未进行过标记的子立方体加入点集 M 中。

(3) 判断点集 M 中的点的数量与 k 值的大小关系,若大于等于 k ,则转入步骤(4);若小于 k ,则将 r 值扩大 a 倍(取 $a = 1.1$),转入步骤(2),然后再次进行搜索。

(4) 标记所求点并计算其与 M 中点的距离 d 。

判断 d 值与半径 r 值的大小关系,若 $d \leq r$,则将该点记录到点集 N 中;若 $d > r$,则不符合要求,不做记录。计算点集 N 中点的数量 s 。

(5) 判断 s 值和 k 值的大小关系,若 $s \geq k$,则按照 d 值的大小以升序方式进行排序,选取距离最近 k 个点作为期望 k 邻域。一个点的 k 邻域搜索结束后,再进行下一个点的 k 邻域搜索,需要对已经标记过的子立方体和点进行复位;若 $s < k$,则再扩大 r 值,转入步骤(1)。

分割结果如图 8 所示。

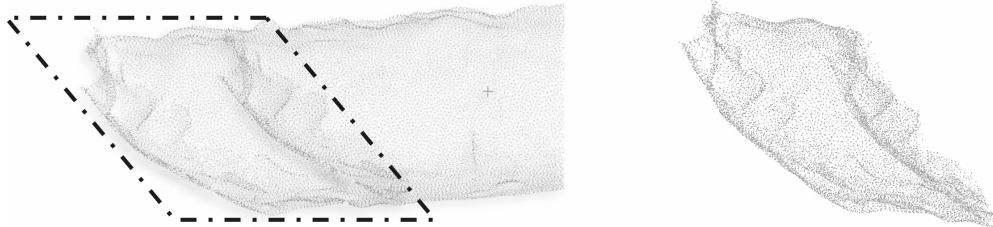


图 8 爆堆分割结果

Fig. 8 Results of blast rock pile segmentation

3.2 基于切片法的爆堆体积计算

切片法是将点云模型先在某一坐标轴方向上进行切片操作,再分别计算切片上、下两表面的面积,通过积分的方式累计多层切片体积求得总体积,具体流程如下:

(1) 点云切片:纵轴方向切割点云数据,以 h 的间距将高度为 H 的点云模型自下而上依次切割,得到 n 组水平点云切片 S_i ;其中, $n = H/h$; $S_i = \{D(x, y, z) | x, y \in R^+, z = (i/n)H, i \in [0, n]\}$ 。

(2) 切片点云轮廓确定:采用双向最近点搜索法对单个乱序的点云切片进行排序,得到正确的点云切片外轮廓多边形。

(3) 计算切片面积:平面点云切片排序完成后,该平面点云由 m 个点组成,切片面积计算公式为

$$A_i = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{m-1} \begin{vmatrix} x_j & y_j \\ x_{j+1} & y_{j+1} \end{vmatrix}$$

式中: A_i 为点云切片外轮廓对变形围成的面积; x_j, y_j 为点云切片外轮廓多边形 $P_i = (i \in [0, n])$ 的顶点 $P_j = (j \in [0, m])$ 的坐标; i 为点云切片编号; j 为点云切片外轮廓多边形的顶点编号; n 为点云切片个数减 1。

(4) 计算点云体积:将各个切片的面积 A_i 累加,乘以相邻切片间距 h ,即点云总体积。

3.3 地下矿爆破验收系统开发与应用

采用 C++ 语言,基于 PCL1.8.1 + VTK8.0.0 开发了地下矿掘进爆破验收系统,包括采场爆堆体积、面积计算、爆堆及采场爆破效果展示等,并集成了点云数据的显示、点云格式转换、点云曲面重构、

点云配准等功能,主要功能有以下几方面:

(1)点云优化:主要功能是在点云加载的基础上,对密度不规则的点云数据进行平滑处理、去除因为遮挡问题造成的离群点、大量数据进行下采样、去除噪音数据等。

(2)曲面重建:在点云加载、点云优化以及基于icp点云配准的基础上,开发基于移动立方体算法、贪婪投影三角化算法、泊松算法、隐性曲面重建算法、Delaunay 3D算法的曲面重建功能。

(3)体积与面积测量:在地下矿爆堆曲面重建

的基础上,对爆堆进行表面积和体积的快速计算分析。

为验证系统的有效性,创建点云数据测试集,图9所示的测试点云数据采集于眼前山铁矿-213 m水平8#回采巷道。首先对导入的点云数据进行自动icp配准(如图9所示),随后对配准后的点云数据进行分割与曲面重建,最后实现地下矿爆堆表面积与体积等数据的快速计算分析(如图10所示),测试结果符合现场工程实际。

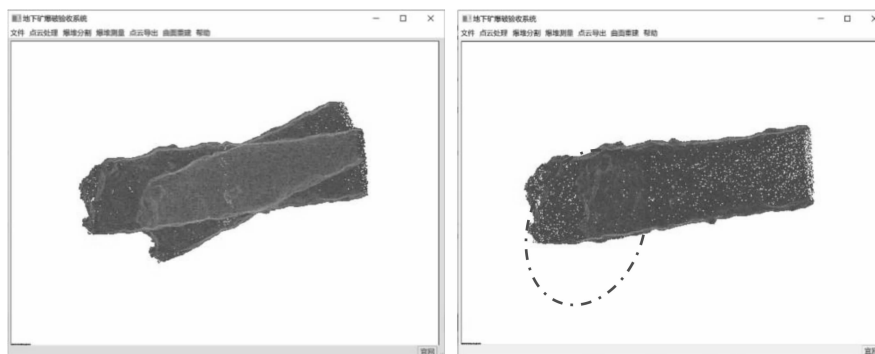


图9 地下矿巷道点云数据配准

Fig. 9 Underground mine roadway point cloud data registration

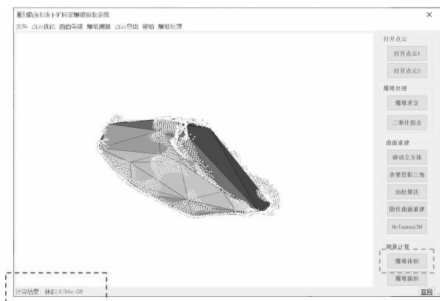


图10 爆堆体积计算

Fig. 10 Volume calculation of blast rock pile

4 结论

本研究解决了地下矿采掘工程中,工程量快速、精准统计的难题,改变了传统人工测量与全站仪打点等计算方式,为地下矿山爆破工程设计优化与掘进工程质量快速、精准验收提供了技术支撑。

(1)基于SLAM三维激光扫描技术,研究了地下矿复杂工况条件下的采掘工程快速验收方法,并通过眼前山地下矿现场采集的点云数据进行验证,应用效果良好。

(2)基于MLS移动最小二乘法的高阶多项式插值方式重建表面点云的缺失部分,可以使填补的孔洞区域与原始表面较为契合,解决了地下矿狭长巷

道视角遮挡的问题。

(3)采用icp点云配准方法,降低了现场三维激光检测对于视角和空间位置的要求,可以直接对不同视角检测到的点云数据进行自动配准,通过曲面重建后,利用切片法对三维模型进行统计分析,最终得到准确的采掘工程量,完成验收工作。

参考文献 (References)

- [1] HE Miao, XIAO Wei, ZHANG Hang, et al. The changes and influencing factors of urban LUCC and EF footprint in energy resource areas: An empirical evidence from China using HLM model[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1196(1):012026.
- [2] ZHUCKOV V I, LEONTIEV L I, ZAYAKIN O V, et al. The problems of application of domestic ore raw materials in the production of ferroalloys[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 966: 012038.
- [3] 崔晓荣,林谋金,郑炳旭,等. 矿山采空区崩落爆破评估验收方法[J]. 金属矿山, 2015(9):11-15.
- [3] CUI Xiao-rong, LIN Mou-jin, ZHENG Bing-xu, et al. Inspection and assessment of caving and blasting effect in underground goafs[J]. Metal Mine, 2015(9):11-15. (in Chinese)

- [4] 亓玉浩,关士远. 基于激光 SLAM 的综采工作面实时三维建图方法[J]. 工矿自动化,2022(11):1-7.
- [4] QI Yu-hao, GUAN Shi-yuan. Real-time 3D mapping method of fully mechanized working face based on laser SLAM [J]. Journal of Mine Automation, 2022(11):1-7. (in Chinese)
- [5] XU Li-chao, FENG Chen, KAMAT Vineet R, et al. A scene-adaptive descriptor for visual SLAM-based locating applications in built environments [J]. Automation in Construction, 2020, 112:103067.
- [6] 段志鑫. 三维激光扫描数据精简、表面重构方法及应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
- [6] DUAN Zhi-xin. Research on 3D laser scanning data simplification, surface reconstruction methods and applications[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 郑顺义,苏国中,张祖勋. 三维点集的自动表面重构算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2005(2):154-157.
- [7] ZHENG Shun-yi, SU Guo-zhong, ZHANG Zu-xun. Automatic reconstruction of 3D surface model with 3D irregular points based on projection constrain [J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005(2):154-157. (in Chinese)
- [8] 樊爽,郭玉荣. 基于逐点移动最小二乘拟合的数字图像相关测量[J]. 激光与光电子学进展,2022(11):1-16.
- [8] FAN Shuang, GUO Yu-rong. Digital image correlation measurement based on pointwise moving least-square fitting [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2022(11):1-16. (in Chinese)
- [9] 戚远航,蔡延光,黄戈文,等. 带固定半径近邻搜索 3-opt 的离散烟花算法求解旅行商问题[J]. 计算机应用研究,2021,38(6):1642-1647.
- [9] 戚远航,蔡延光,黄戈文,等. 带固定半径近邻搜索 3-opt 的离散烟花算法求解旅行商问题[J]. 计算机应用研究,2021,38(6):1642-1647.
- [9] QI Yuan-hang, CAI Yan-guang, HUANG Ge-wen, et al. Discrete fireworks algorithm with fixed radius nearest-neighbor search 3-opt for travelling salesman problem [J]. Application Research of Computers, 2021, 38(6):1642-1647. (in Chinese)
- [10] JING Hong-di, LI Yuan-hui, LI Kun-meng. Study on the deformation mechanism of soft rock roadway under blasting disturbance in Baoguo Iron Mine[J]. Shock and Vibration, 2018(Pt. 7):1-12.

(上接第 165 页)

- [11] 李启月,曾海登,赵新浩,等. 炮孔约束下双槽聚能管对乳化炸药殉爆距离影响的研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):1-4,12.
- [11] LI Qi-yue, ZENG Hai-deng, ZHAO Xin-hao, et al. Study on the influence of double groove shaped charge tube under borehole constraint on the detonation distance of emulsion explosives[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2020, 40(6):1-4, 12. (in Chinese)
- [12] 王清标,王涛,田成林,等. 周边孔聚能装置间隔装药在光面爆破中的应用研究[J]. 爆破, 2024, 41(1):77-84.
- [12] WANG Qing-biao, WANG Tao, TIAN Cheng-lin, et al. Research on the application of peripheral hole energy gathering device interval charge in smooth blasting[J]. Blasting, 2024, 41(1):77-84. (in Chinese)
- [13] 刘忠磊,王旭华,王应魁,等. 约束条件下聚能装置对乳化炸药引爆距离影响的研究[J/OL]. 爆破, 2024: 1-9. [2024-07-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20240227.1744.002.html>.
- [13] LIU Zhong-lei, WANG Xu-hua, WANG Ying-kui, et al. Study on the influence of energy gathering device on the detonation distance of emulsion explosives under constrained conditions [J]. Blasting, 2024: 1-9. [2024-07-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20240227.1744.002.html>. (in Chinese)
- [14] 张昌锁,田家璇,李泽. 一种周边眼光面爆破整体装药装置: 中国, CN202322295959. X [P]. 2024-01-30.
- [14] ZHANG Chang-suo, TIAN Jia-xuan, LI Ze. A comprehensive explosive device for peripheral vision blasting: China, CN202322295959. X [P]. 2024-01-30. (in Chinese)
- [15] 岳中文,张士春,邱鹏,等. 装药结构对切缝药包爆破效果影响的研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10):27-34.
- [15] YUE Zhong-wen, ZHANG Shi-chun, QIU Peng, et al. Study on the influence of charge structure on the blasting effect of slotted explosive packs [J]. Vibration and Shock, 2018, 37(10):27-34. (in Chinese)
- [16] 王凯飞,张昌锁,郝兵元,等. 高地力环境下聚能爆破动、静作用对岩石内裂纹起裂与扩展机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1):50-64.
- [16] WANG Kai-fei, ZHANG Chang-suo, HAO Bing-yuan, et al. Research on the mechanism of initiation and propagation of internal cracks in rocks under dynamic and static effects of energy gathering blasting in high ground force environment [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1):50-64. (in Chinese)