

基于三维激光扫描技术的 金矿采空区调查对比分析研究

孙萌鑫^{1,2},冷芳³,邢晓平^{1,2},寻鹏^{1,2},毕进超¹,姜兆君^{1,2*}

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队(山东省第六地质矿产勘查院),山东威海 264209;2. 山东省数据开放创新应用实验室,山东威海 264209;3. 山东大学文化传播学院,山东威海 264209)

摘要:本文采用三维激光扫描技术,分别使用手持 ZEB-HORIZON 型便携三维激光扫描仪和站式天宝 TX8 三维激光扫描仪 2 种设备进行井下采空区测量,结合 GeoSLAM Hub、RealWorks、Geomagic Studio 等相关软件,进行了点云的去噪、抽稀、三维建模等一系列处理,快速有效地计算出采空区的体积、金属量等相关信息。通过手持 ZEB-HORIZON 型便携三维激光扫描仪和天宝 TX8 站式三维激光扫描仪数据对比和精度评定,发现手持 ZEB-HORIZON 型便携三维激光扫描仪更适合远距离、复杂环境的井下测量,经过多站测量后的数据采集更加高效,测量精度更加准确,能够为国土、公安等相关部门提供有力的数据支撑。

关键词:三维激光扫描;采空区;三维建模;金属量;精度评定

中图分类号:P237

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2024.09.010

引文格式:孙萌鑫,冷芳,邢晓平,等.基于三维激光扫描技术的金矿采空区调查对比分析研究[J].山东国土资源,2024,40(9):74-78. SUN Mengxin, LENG Fang, XING Xiaoping, et al. Comparative Analysis on Gold Goaf Survey Based on Three-dimensional Laser Scanning Technology[J]. Shandong Land and Resources, 2024, 40(9): 74-78.

0 引言

近年来,山东省积极开展非金属矿山采空区调查工作。烟台市金矿资源丰富,矿山经过多年开采,采空区存在塌陷、冒落等风险。在此条件下,为规范山东省非金属矿山安全生产,消除安全隐患,急需进行金矿的采空区调查研究工作。

三维激光扫描技术应用领域众多,其中,在古建筑修复中的应用尤为强大^[1-2]。在以往的采空区调查中,以煤矿、石膏矿居多,且常用的方法是高密度电阻率法、氦气探测法、地震勘测法等^[3-8]。但在金矿采空区调查中,简单且常用的方法是利用物探技术进行调查^[9-10]。但对于时间紧、深度高的采空区,很难利用物探技术进行调查^[14-19],为了准确地测量

采空区的体积和金属量等信息,利用 ZEB-HORIZON 型便携三维激光扫描仪、天宝 TX8 站式三维激光扫描仪地种设备分别对该金矿进行扫描,准确的获取了采空区的体积、金属量等关键信息。

1 项目概述

1.1 研究区概况

研究区位于山东省烟台龙口市,为山东省下辖县级市,由烟台市代管。龙口市位于胶东半岛西北部、渤海湾南岸,东邻蓬莱区,南邻栖霞市、招远市,西、北濒渤海,天津、大连隔海相望。龙口市属温带季风气候,四季分明,冬无严寒,夏无酷暑,气候变化平缓。龙口市是国内滨海煤炭基地、山东省国家煤炭储备基地,可保障胶东半岛半数以上的用煤,沿海

收稿日期:2024-07-04;修订日期:2024-07-20;编辑:陶卫卫

基金项目:山东省烟台市招远市自然资源和规划局矿山井下测绘项目(SDGP370685202102000068)

作者简介:孙萌鑫(1990—),男,山东栖霞人,工程师,主要研究方向为摄影测量与遥感、矿山测量等;E-mail:1078570048@qq.com

* 通讯作者:姜兆君(1976—),男,山东烟台人,主要从事测绘工程等工作;E-mail:lhtcyj@126.com

大陆架下蕴藏着丰富的石油和天然气资源,为胶东半岛提供大量清洁能源,市内黄金、花岗岩等矿产储量丰富,存在一定的采空区安全隐患。

1.2 数据获取方式

本研究采用三维激光扫描仪扫描数据作为数据源,分别使用手持 ZEB-HORIZON 型便携三维激光扫描仪、天宝 TX8 站式三维激光扫描仪 2 种设备,分为 2 组同时扫描作业。其中,手持 ZEB-HORIZON 型便携三维激光扫描仪是基于 SLAM 算法的移动式三维激光扫描系统,可以不依靠 GPS 技术动态测量和记录不同环境下的空间三维信息,其设备具有便携、采集效率高、灵活性高的特点;而天宝 TX8 站式三维激光扫描仪可在短时间(约 2~4 min)内完成一次典型的测绘任务,同时结合 RealWorks 可导入主流 AutoCAD 等软件的进行高效数据分析。

1.3 研究方法

三维激光扫描技术可以快速获取物体表面空间坐标、颜色、反射强度等信息,在巷道围岩变形监测、井下采空区测量等领域应用广泛^[20-21]。本研究采用手持 ZEB-HORIZON 型便携三维激光扫描仪、天宝 TX8 站式三维激光扫描仪进行采空区扫描、数据处理与分析,通过对比分析,研究更适合井下采空区测量的方式方法。

2 采空区测量

2.1 三维激光采空区测量

测量人员沿主巷道、沿脉巷、穿脉巷、天井及溜井进行井巷工程测量,主要流程有下井前的准备工作、测站点选择与控制点测量、数据获取、数据传输与点云数据处理、成果数据计算等。

2.1.1 ZEB-HORIZON 型便携三维激光扫描仪

(1)准备工作。①仪器机具:ZEB-HORIZON 型便携三维激光扫描仪、激光测距仪、锤球、棉线、钢卷尺;②配套软件:GeoSLAM Hub、RealWorks、Geomagic Studio 等;③人员安排:需仪器操作员、安全员各 1 人;④检查事项:检查扫描仪和激光测距仪电量是否充足,使用是否正常。

(2)测站控制点选择与测站控制点测量。测站控制点布设点位应平整、无积水、视线良好,且测站控制点应尽可能均匀布设。在选择起测站点的顶板

坐标位置悬挂棉线和垂球,将顶板点位引到地面,并做好标记,利用激光测距仪测量该点顶板至地面的距离。

(3)数据获取。三维激光扫描仪启动后,将扫描仪机头底座中心放置于控制点标记处静止 10 s,扫描仪将自动识别并录入该位置为测站点位,随后手持扫描仪跟随安全员沿巷道工程移动,对巷道进行扫描,当测量人员持便携式扫描仪移动到控制点位时,再次将扫描仪机头底座中心放置于控制点标记处,保持扫描仪静止 10 s,每次扫描任务至少需扫描 3 个控制点,完成扫描后返回起始点进行数据校正。

(4)数据传输与点云数据预处理。将原始数据导入 GeoSLAM Hub 软件,输入控制点坐标,平差计算后为点云数据赋予坐标,最后导出带有坐标数据的 laz 格式压缩点云。将压缩点云导入 RealWorks 软件中,各个测站的点云通过特征点进行拼接,拼接后经过去噪处理,生成可利用的点云数据。

2.1.2 天宝 TX8 站式三维激光扫描仪

(1)准备工作。①仪器机具:天宝 TX8 站式三维激光扫描仪、标靶球、三脚架;②配套软件:RealWorks、AutoCAD 2016、Geomagic Studio 等;③人员安排:需仪器操作员、辅助人员、安全员各 1 人;④检查事项:检查扫描仪和激光测距仪电量是否充足,使用是否正常。

(2)测站控制点选择与测站控制点测量。测站控制点应均匀布设且特征明显,为减少测量次数和便于拼接,设备应尽量选择选择在巷道交汇处,在合适的位置整平后,为测站之间的衔接工作,每测站至少放置 4 个标靶球,通过标靶球实现两站之间的拼接,选择特征点明显的控制点并做好标记,以便内业坐标输入。

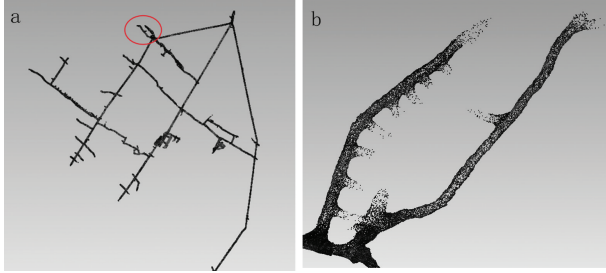
(3)数据获取。三维激光扫描仪开机后设置任务和扫描参数,放置标靶球后按开始键启动扫描仪。测量人员迁站需由安全员带领,并注意两站之间的衔接,尽可能减少测站迁移两站拼接产生的误差。

(4)数据传输与点云数据预处理。将三维激光扫描仪中的的原始数据文件导入 RealWorks 软件,利用标靶球进行数据拼接,通过控制点赋予平面坐标和高程信息,经过去噪、点云稀释处理,生成可利用的点云数据。

2.1.3 数据建模

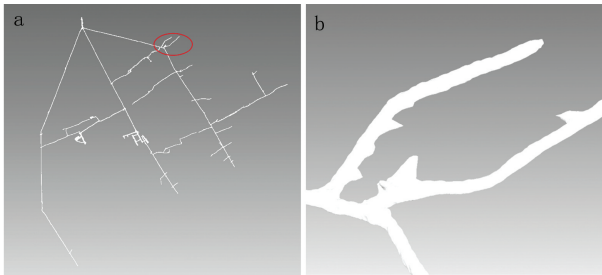
以该金矿某一中段数据为例,将扫描结果拼接

后,形成整个中段的点云数据,将处理好的点云数据导入 Geomagic Studio 软件进行再次去噪、封装后,创建三角网进行三维建模,抽稀后的点云数据与建模结果分别如图 1、图 2 所示。



a—点云抽稀数据;b—点云数据抽稀局部放大图。

图 1 点云抽稀数据图



a—模型图;b—模型局部放大图。

图 2 数据建模模型图

2.1.4 数据计算

本次采用面积分割法进行金属量估算。估算公式见式(1)一式(3):

$$V = S' \cdot m' \tag{1}$$

$$Q = V \cdot D \tag{2}$$

$$P = Q \cdot C \tag{3}$$

式中: V —块段体积; m' —块段平均水平厚度; S' —块段垂直投影面积; Q —块段矿石量; D —矿石体积质量值; P —块段金属量; C —块段平均品位。

2.2 ZEB-HORIZON 扫描与 TX8 扫描对比

(1)扫描效率。就井下采空区调查而言,相较于天宝 TX8 扫描仪,ZEB-HORIZON 扫描仪的效率更高。具体表现在工作效率方面,ZEB-HORIZON 扫描仪单站扫描时间为 15 min,扫描巷道或采空区长度约 500 m。TX8 扫描仪单站扫描时间为 2~4 min,扫描巷道或采空区长度根据现场环境而定,单站扫描约 30~80 m。总体而言,ZEB-HORIZON 扫描仪每小时的工作效率约 2 000 m, TX8 扫描仪每小时的工作效率约 750 m,ZEB-

HORIZON 扫描仪单站测量时间长,但整体的时间上扫描效率更高。

(2)扫描数据质量。对 2 种扫描数据处理后,通过对比发现,ZEB-HORIZON 扫描仪扫描的数据分布均匀,而天宝 TX8 扫描仪在测站周围点云稠密,距离测站较远处点云较为稀疏,30 m 外点云数据更为稀少,在短距离、少测站情况下, TX8 扫描测量的效果尚可,但长距离需多次设置测站,数据经过多次拼接后误差积累且越来越大。均匀的数据计算矿石量数据更为准确,因此,ZEB-HORIZON 扫描仪扫描的井下数据质量更高。

(3)数据兼容性。ZEB-HORIZON 扫描仪扫描数据需借助于 GeoSLAM Hub 软件,经数据下载、导入及预处理后,赋予点云数据坐标,待运行结束后可查看点云数据的精度情况,同时可以导出 laz 格式的压缩点云数据。天宝 TX8 扫描仪扫描数据则助于 RealWorks 软件,经数据下载、导入及匹配拼接后,可导出不同格式的点云数据,RealWorks 软件的优点是兼容 ZEB-HORIZON 扫描仪扫描数据,从而使扫描数据处理更加快速高效。

3 结果与精度评定

3.1 结果

通过计算,该中段模型的体积为 19 956.611 m³,表面积为 42 611.193 m²,如图 3、图 4 所示。



图 3 某中段三维模型体积图

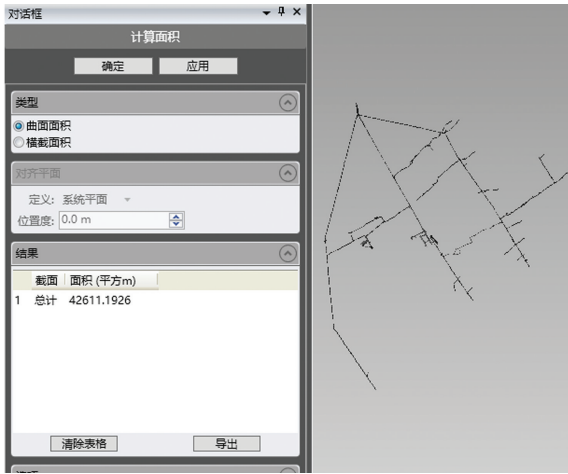


图 4 某中段三维模型表面积图

利用已有的采空区体积质量值资料以及计算的采空区矿石量,结合取样化验测定采空区金矿石的平均品位后,有效获取该中段金开采量。

3.2 精度评定

无论是天宝 TX8 扫描仪还是 ZEB - HORIZON 扫描仪,其数据的精度都受井下控制点的约束。在扫描过程中,ZEB - HORIZON 扫描仪不需要每一测站的拼接工作,因而不存在误差累计,因此误差相对较小。而天宝 TX8 扫描则需逐测站拼接从而导致误差累计,且测站数越多误差累计越大,因此误差相对较大。

对天宝 TX8、ZEB - HORIZON 扫描仪的数据进行平差计算,经对比发现,天宝 TX8 扫描仪单站数据的扫描精度为毫米级,约 1~2 mm;ZEB - HORIZON 扫描仪单站数据的扫描精度在厘米及和亚米级之间,约 2~20 cm(精度跟井下环境与控制点密切相关);单站天宝 TX8 扫描仪的数据精度优于 ZEB - HORIZON 扫描仪的数据精度,精度评定见表 1、表 2 所示。

表 3 天宝 TX8 扫描仪误差累计数据统计(数据节选)

测站	测站 1	测站 2	测站 3	测站 4	测站 5	测站 6	测站 7	测站 8	测站 9
拼接误差累计/cm	2.1	3.9	6.2	8.7	11.2	12.9	15.8	18.6	20.7

4 结语

(1)在采空区调查中,特别是远距离、复杂环境下,ZEB - HORIZON 扫描仪扫描的点云数据分布更加均匀,且在精度、效率方面明显优于天宝 TX8 扫描仪。

由于井下环境下没有标志性地物, TX8 扫描仪的软件自动化匹配程度较低,数据需要手动拼接,单站手动拼接误差约 1~3 cm,经过多次拼接后误差积累越来越大,因此多次拼接后的天宝 TX8 扫描仪扫描精度大大降低,经五十测站后的拼接误差能够达到米级,误差累计见表 3,而 ZEB - HORIZON 扫描仪每站都有控制点,不存在误差积累,因此在多次测站的 ZEB - HORIZON 扫描仪的数据精度优于天宝 TX8 扫描仪的数据精度。

表 1 ZEB - HORIZON 扫描仪单站数据精度误差表(数据节选,坐标略)

测站	点号	差值/m			空间 误差/m
		ΔX	ΔY	ΔH	
1	JC1	0.075	-0.068	0.067	0.122
	JC2	0.025	-0.062	-0.068	0.095
	JC3	-0.167	0.194	-0.072	0.266
	JC4	0.067	-0.064	0.072	0.177
均方根误差/m:0.177					
2	JC5	-0.057	-0.048	-0.061	0.096
	JC6	0.118	0.057	-0.038	0.136
	JC7	0.036	-0.078	0.062	0.106
	JC8	-0.032	-0.056	0.033	0.072
均方根误差/m:0.105					

表 2 天宝 TX8 扫描仪单站数据精度统计(数据节选,坐标略)

测站	点号	差值/mm			空间 误差/mm
		ΔX	ΔY	ΔH	
1	JC1	-0.87	-0.65	0.58	1.23
	JC3	-0.69	0.77	-0.87	1.35
	JC6	0.82	-0.80	0.64	1.31
	JC8	0.78	0.85	0.77	1.39
均方根误差/mm:1.32					
2	JC9	0.79	-0.58	-0.94	1.36
	JC10	0.88	-0.71	0.84	1.41
	JC12	-0.86	0.78	-0.76	1.39
	JC15	1.00	-0.69	0.75	1.43
	均方根误差/mm:1.40				

(2)在采空区调查中,ZEB - HORIZON 扫描仪的外业扫描效率更高,作业时间更短。

(3)通过 ZEB - HORIZON 扫描仪对该金矿进行采空区建模、计算矿量等工作,能够有效为采空区调查、治理等工作提供更加精准的数据,为国土、公安等部门提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 李承伟,汪鸿钊,何春容,等. 三维激光扫描技术在古建筑修缮中的应用[J]. 居舍,2020(26):63-64.
- [2] 李雪. 基于古建筑保护修缮需求的三维激光扫描数据应用研究[D]. 北京:北京工业大学,2018.
- [3] CHAO N, LU Z, ZHAI P. Application of High-density Resistivity Method in Detecting Gold Mine Goaf[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2010(6):29-31.
- [4] 黄建权,李明陆,栗超良,等. 高密度电阻法在石膏矿采空区勘察中的应用研究[J]. 工程地球物理学报,2021,18(2):237-243.
- [5] 于志山. 煤矿采空区探测方法探究[J]. 科技创新导报,2013(11):89.
- [6] 李兆令,郭文建,王石. 氦气测量和瞬变电磁综合探测技术在煤炭采空区调查中的应用研究[J]. 工程勘察,2022,50(5):73-78.
- [7] 杨楠,曲泽良. 综合地球物理方法在浅地表高阻采空区探测中的应用[J]. 山东国土资源,2023,39(8):29-36.
- [8] 杜贤军,牛浩,李明阳,韩冬. 综合物探对多煤层采空区综合勘察对比研究[J]. 山东国土资源,2024,40(2):27-32.
- [9] 宗传志. 综合物探技术在潍烟线金矿采空区勘察中的应用[J]. 铁道勘察,2021,47(2):76-81.
- [10] JIN S B. Study and Discussion on filling method of goaf in Xinmin Gold Mine[J]. World Nonferrous Metals, 2019(1):47-49.
- [11] ZHU, YUAN D. Goaf Treatment for Gold Mine under Ex-
- press way[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012(178-181):1218-1221.
- [12] 杨小龙,张崇礼,周开心,等. 综合物探技术在煤矿采空区探测中的应用[J]. 黑龙江科学,2022,13(8):51-53.
- [13] 胡安顺,孟庆鲁. 浅层地震反射波法在石膏矿采空区调查中的应用[J]. 山东国土资源,2018,34(2):61-65.
- [14] 王如喜. 多种地球物理勘测方法在金矿采空区勘察中的应用[J]. 中国金属通报,2019(11):58-60.
- [15] 黄玉辉. 综合物探技术在煤矿采空区调查中的应用[J]. 陕西水利,2015(3):148-150.
- [16] LIU R T, LIU J R, LIU J X. On investigation and distribution law for goaf of Xishan mine area[J]. Shanxi Architecture, 2014(16):58-59.
- [17] 朱俊峰,胡翔云,张祖勋,等. 多尺度点云噪声检测的密度分析法[J]. 测绘学报,2015,44(3):282-291.
- [18] 谢宏全,谷风云,李勇,等. 基于激光点云数据的三维建模应用实践[M]. 武汉:武汉大学出版社,2014.
- [19] 赵彤,王雨辰,李根云,解磊,于超. 综合物探方法在煤矿采空区勘察中的应用:以济南市钢城区某项目为例[J]. 山东国土资源,2022,38(3):27-33.
- [20] 师博轩. 基于三维激光扫描的巷道点云处理方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.
- [21] 白立飞,潘宝玉,张兰. 三维激光扫描技术在数字矿山领域的应用[J]. 山东国土资源,2013,29(8):46-49.

Comparative Analysis on Gold Goaf Survey Based on Three-dimensional Laser Scanning Technology

SUN Mengxin^{1,2}, LENG Fang³, XING Xiaoping^{1,2}, XUN Peng^{1,2}, BI Jinchao¹, JIANG Zhaojun^{1,2}

(1. No. 6 Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (No. 6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources), Shandong Weihai 264209, China; 2. Shandong Provincial Data Open Innovation Application Laboratory, Shandong Weihai 264209, China; 3. Cultural Communication College of Shandong University, Shandong Weihai 264209, China)

Abstract: In this paper, by using three-dimensional laser scanning technology, using handheld ZEB-HORIZON portable 3D laser scanner and Trimble TX8 station-mounted 3D laser scanner separately, measurement of underground goaf have been carried out. Combining with GeoSLAM Hub, RealWorks, Geomagic Studio and other relevant softwares, a series of processing have been conducted, such as point cloud denoising, thinning and 3D modeling. It can quickly and effectively calculate the volume and metal content of the goaf. Through data comparison and accuracy evaluation between the handheld ZEB-HORIZON portable 3D laser scanner and the Trimble TX8 station 3D laser scanner, it is found that the handheld ZEB-HORIZON portable 3D laser scanner is more suitable for remote and complex mine measurement. After multi-station measurement, the handheld ZEB-HORIZON portable 3D laser scanner data collection is more efficient and the measurement accuracy is more accurate. It can provide powerful data support for relevant departments, such as land and public security department.

Key words: Three-dimensional laser scanning; goaf; three-dimensional modeling; metal quantity; accuracy evaluation