DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0105-05

基于三维激光点云无人机测绘技术的露天煤矿开采方法

冯树清[1], 包建军[1], 郭苏煜[1], 孙立超[1], 郭晓松[2], 孙 虎[3]

(1.内蒙古电投能源股份有限公司,内蒙古 通辽 028000; 2.中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司, 沈阳 110000;
3.内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗薛家湾镇国家能源准能集团公司,鄂尔多斯 010300)

摘 要:传统的露天煤矿开采工作难以对爆破时产生的影响进行精确控制,这对矿区的工作人员与建筑的安全性带来影响。为了提高露天开采的效率与安全性,将三维激光点云无人机测绘技术应用于露天煤矿智能开采中,利用无人机获取矿区地形图从而构建三维激光点云模型,并结合 *K*-维度树(*K*-dimensional tree,*K*-D)算法和贪婪三角形算法实现煤矿开采前的爆破设计,依据爆破振动安全距离、飞散物控制距离及冲击波影响范围等公式,计算出对周边建筑和人员影响最小的安全距离。实验结果表明,采用该算法的煤矿地形点云数据偏差平均值为 1.94 cm,爆破参数误差平均值为 1.886 cm,实际爆破效果偏差为 2.22 cm,且开采时间缩短 27.52%,验证了研究所提方案的有效性。可为露天煤矿开采提供更精确和安全的技术方案。

关键词:三维激光点云;无人机测绘;露天煤矿;智能开采;矿区检测; *K*-维度树

中图分类号: TP274+.5;TP391.99 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)07-0105-05

Intelligent mining method of open-pit coal mines based on 3D laser point cloud unmanned aerial vehicle surveying technology

Feng Shuqing[1], Bao Jianjun [1], Guo Suyu [1], Sun Lichao [1], Guo Xiaosong [2], Sun Hu [3]

(1. Inner Mongolia Power Investment Energy Co., Ltd., Tongliao 028000, Inner Mongolia, China;
2. China Coal Technology Engineering Group (CCTEG), Shenyang Engineering Company, Shenyang 110000, China;
3. National Energy Zhuneng Group Company, Xuejiawan Town, Zhungeer Banner, Ordos 010300, China)

Abstract: Traditional open-pit coal mining is difficult to accurately control the impact of blasting, which affects the safety of workers and buildings in the mining area. In order to improve the efficiency and safety of open-pit mining, the application of 3D laser point cloud unmanned aerial vehicle surveying technology in intelligent mining of open-pit coal mines is studied. The terrain map of the mining area is obtained by unmanned aerial vehicles to construct a 3D laser point cloud model, and the *K*-D tree algorithm and greedy triangle algorithm are combined to achieve blasting design before coal mining, Based on formulas for blasting vibration safety distance, flyrock control distance, and shock-wave influence range, the safe distances that minimize impacts on surrounding buildings and personnel are calculated. The experimental results show that the average deviation of coal mine terrain point cloud data using the proposed technology is 1.94 cm, and the average error of blasting parameters is 1.886 cm, The actual blasting deviation is 2.22 cm, and the mining time is reduced by 27.52%, which verifies the effectiveness of the proposed scheme. Research can provide more accurate and safe technical solutions for open-pit coal mining.

Keywords: 3D laser point cloud; UAV surveying and mapping; opencut coal mine; intelligent mining; mining area inspection; *K*-dimensional tree

随着社会经济迅速发展,各行各业对矿石资源的需求也越来越大。因此,成本低、见效快的露天煤矿开采成为能源生产的重要组成部分[1]。然而,传统的露天煤矿开采方式不仅面临着复杂的地形问题,还伴随着开采时爆破的安全性低和效率低的问题[2]。其中露天煤矿开采时使用炸药进行爆破是一种常见的做法,相比于使用各种挖掘设备进行开采所需成本较低,尤其是在开采巨型煤矿时。然而传统的露天煤矿开采爆破设计通常依赖二维的地形数据和人工填药,容易在开采时出现误差。随着科学技术的发展,三维激光点云和无人机测绘技术被应用于各行各业中,三维激光点云可将无人机测绘的图片转换成立体模型图[3-4]。宋琨等[5]提出将无人机 3D 点云应用于高陡斜坡

收稿日期:2025-01-30;**录用日期**:2025-03-28

基金项目:辽宁省自然科学基金面上项目(2023-MS-342)

作者简介:冯树清(1969—),男,高级工程师,研究方向为露天采矿技术、安全生产、智能矿山。

通信作者:郭晓松(1985—),男,高级工程师,研究方向为露天煤矿智能化建设一体化解决方案、选煤厂工程设计咨询、数字化交付平台。

引用本文:冯树清, 包建军, 郭苏煜, 等. 基于三维激光点云无人机测绘技术的露天煤矿开采方法[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):105-109.
(Feng Shuqing, Bao Jianjun, Guo Suyu, et al. Intelligent mining method of open-pit coal mines based on 3D laser point cloud unmanned aerial vehicle surveying technol[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):105-109.)

岩体结构信息测量中。首先利用无人机摄影技术对高陡岩质斜坡测量,并构建斜坡岩体的 3D 点云模型。实验结果表明该方法获得的岩体结构信息精度满足要求,且方法高效可行。Pan 等[6]提出基于无人机和 3D 点云的螺栓松动自主数据采集方法。该方法使用无人机对螺栓图像采集,并构建 3D 点云模型对螺栓松动部位进行定位和量化。实验结果表明该方法具有较高的精度,与 2D 视觉方法相比对螺栓松动的评估更加稳健和全面。基于此,研究将三维激光点云无人机测绘技术应用于煤矿智能开采研究中,生成数字地图模型,并开发出爆破工程安全距离预测功能,结合 *K*-D 树算法和贪婪三角算法实现爆破时的爆破设计,计算爆破时允许安全距离,降低爆破带来的安全事故。研究旨在为露天矿区开采的智能化与安全性提供技术参考。研究的创新点为通过应用三维激光点云技术和无人机测绘技术对露天煤矿生成高精度的数字地图,弥补了传统平面地图的不足,并创新性地将数字模拟地图与爆破开采工作相结合,开发预测爆破安全距离预测的功能。

1 煤矿智能开采方法设计

1.1 三维激光点云模型构建

露天煤矿测量是矿产资源开发利用的关键技术,对于推动国家经济发展具有重要意义。随着科技的进步,传统的煤矿区测量方式已逐渐显露出效率低下、危险区域测量人员难以抵达等问题。而无人机可在短时间内覆盖大面积的煤矿区,尤其是地形复杂的区域。除此之外无人机可灵活调整飞行的路径与高度,以适应露天煤矿区多变的地形[7-8]。因此研究选用无人机测绘技术对露天煤矿的地形进行测量,生成三维激光点云图像,为煤矿智能开采安全距离预测方案设计提供数据支持[9]。通常无人机测绘时的飞行路线大致可以划分成 3 个区域,分别是飞往测量煤矿区域的航线、在煤矿区域采集数据的内部航线及降落区的航线。在测量时应保证采集到的图像质量、覆盖范围都是最优且避免坠机等因素的出现。无人机测绘时的飞行高度由煤矿区地面的分辨率决定,其计算公式如式(1)所示。

$$H = \frac{f \times \mathrm{GSD}}{a} \tag{1}$$

式中,a 为像元尺寸;H 为无人机测绘时的航行高度;GSD 为露天煤矿区域的地面分辨率;f 为无人机的镜头焦距。

无人机摄像的基线长度与飞行高度直接影响到采集影像的重叠度和三维重建的精度,因此基线长度参数合理设置也是测绘任务成功的关键步骤,其计算公式如式(2)所示。

$$L_1 = aP_1(2 - A) \tag{2}$$

式中,L_1 为无人机的摄像基线长度;P_1 为无人摄像的航向分辨率;A 为无人机的航行方向重合度。

此时无人机在露天矿区航线的间隔计算公式如式(3)所示。

$$L_2 = 2PR_1 - D \cdot \frac{PR_1}{2} \tag{3}$$

式中,L_2 为邻近的两个无人机测绘相片中间的横向距离;D 为旁向重叠度;R_1 为旁向分辨率。

通过获得无人机测绘的露天煤矿地形图片可构建三维激光点云模型,其中,稀疏点云和稠密点云是构建三维模型的核心步骤[10-11]。稀疏点云重构采用运动复原的结构重构方法,而稠密点云重构采用多目立体视觉方法,实现对稠密度点云的重构。三维重建的示意图如图 1 所示。

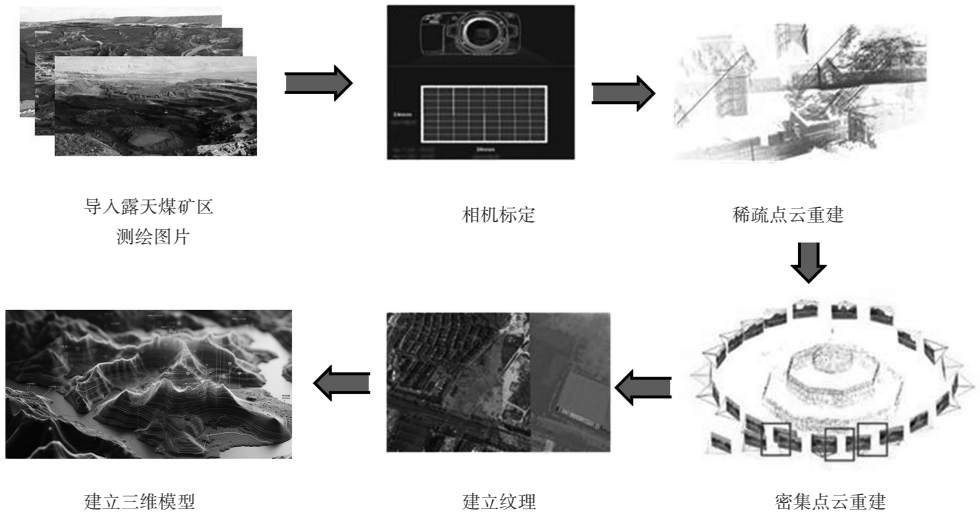


图 1 露天煤矿区地形三维重建的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional terrain reconstruction of the open-pit coal mining area

研究采用多目立体视觉算法重构稠密点云,首先对露天煤矿地形的原始特征进行筛选,得到稀疏面元并将其设置为种子点,在此基础上,对其进行随机发散形成稠密面元,再通过筛选对错误的面元进行消除。稀疏点云的重构使用运动复原方法,其通过一系列的 2D 图像,来获取采集到的露天煤矿图像中场景的 3D 坐标,从而对露天煤矿区的 3D 场景进行重建[12]。该方法首先获取无人机测绘中的项集内参矩阵,再对图像中的特征点检测和匹配,最

后计算双视图之间的基本矩阵和本质矩阵。

1.2 基于三维激光点云模型的方案

露天煤矿开采时,首先进行穿孔爆破操作,在采场矿岩内钻凿一定直径和深度的定向爆破孔后使用炸药等进行破坏,然后是运输煤矿资源和排土工作[13]。然而传统的爆破操作不仅涉及复杂的安装和范围控制问题,还伴随着潜在的安全风险。因此在煤矿智能开采过程中对爆破装药和爆破安全距离的计算至关重要。受之前煤矿运输作业等原因,待爆破区域的台阶顶面通常不平坦,而传统的爆破设计忽视了这个因素导致计算结果不准确。研究将三维激光点云模型应用至露天煤矿待爆破区中,对这一问题进行数值模拟。在模型中模拟出爆炸炮孔的布置坐标后,直接将该坐标放入三维激光点云中搜索,大概率得不到该点的高程值,因此研究应用 K-D 树中查找近邻法搜索该坐标的最近点,此时可将最近点作为爆破点的标高,然后,再根据上一孔的高程与超深计算出爆破炮孔的孔深。

露天矿山台阶爆破中,底盘的抵抗是影响露天煤矿区爆破的重要参数,若参数设置不当,进而导致爆破范围评估差距大。基于此,研究引入贪婪三角算法,在三维激光点云模型中生成三角形的网格,把计算过程转换成多面体底面的锥体集合,通过对锥体体积进行筛选和计算,可以准确地计算出每一个炮孔实际承载的岩体体积,进而计算出炮孔的装药量[14]。建立云三角网的示意图如图 2 所示。

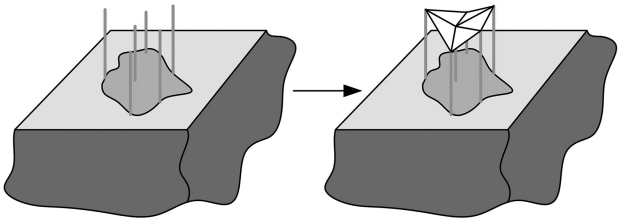


图 2 云三角网构建示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cloud triangular network construction

贪婪三角算法以示例三角为起始面,对曲面进行连续延伸,形成较为完整的三角栅格曲面,最终依据投影点云之间的 3 个点的拓扑关系生成完整的表面模型[15]。由此可精确计算出露天矿区爆破孔所需的装药量。爆破操作过程还必须计算其安全距离,避免煤矿开采时对人和建筑产生影响,爆破振动的安全距离公式如式(4)所示。

$$R = \left(\frac{K}{V}\right)^{\frac{1}{a}} Q^{\frac{1}{3}} \tag{4}$$

式中,Q 为最大爆破装药量;K 为露天煤矿的场地系数;a 为露天煤矿装药时爆破的衰减系数;R 为爆破的安全距离;v 为最大振动速度。

爆破个别飞散物的安全距离计算公式如式(5)所示。

$$R_F = 20K_F n^2 W \tag{5}$$

式中,R_F 为露天煤矿区爆破开采产生的飞散物的安全距离;n 为单药包最大爆炸作用系数;W 为最大装药的最低阻力;K_F 为爆破安全系数。

爆破冲击波对人产生安全影响的距离计算方式如式(6)所示。

$$R_C = \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{\Delta P}{H}\right)^{\frac{1}{\beta}}} \tag{6}$$

式中,R_C 为爆破产生的冲击波对人产生安全影响的距离;H 为露天煤矿区域的场地系数;ΔP 为爆破产生的超压最大值;β 为爆破产生的冲击波衰减系数。

露天煤矿的监测中爆破冲击波环境复杂、干扰因素多,常导致传感器采集数据存在时序偏移与幅值失真[16-18]。其对建筑产生安全影响主要是由超压造成的,因此其对建筑的安全距离计算公式如式(7)所示。

$$R_b = \frac{40 \cdot Q^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{Q_{ci}}{Q_{cT}}\right)^{\frac{1}{2}}}{t^+} \tag{7}$$

式中,R_b 为不会对露天矿区附近建筑造成影响的安全距离;Q_{ci} 为露天煤矿开采时使用的爆破炸药所产生的热量;Q_{cT} 为使用的 TNT 热量;t^+ 为露天煤矿所产生的冲击波作用时间。

将露天煤矿的爆破参数与三维激光点模型结合设计露天煤矿智能开采方案。

2 智能开采方法有效性验证

为了验证研究所设计的煤矿智能开采方案有效性,选用大疆经纬 M300 RTK 无人机作为测绘机器,其拥有最长 55 min 飞行时间、最远 15 km 图传、达到 IP45 防护等级,机身六面均配备双目视觉及红外传感器避障系统,适用于露天煤矿区的测绘工作。数据处理平台采用一台处理器为 Intel Core i9,内存条为 64 GB DDR4 RAM,显卡为 NVIDIA RTX 3090 及操作系统为 Windows 10 的电脑进行工作。三维激光点云处理软件使用 Pix4Dmapper。对三维激光点云数据精度和煤矿开采时爆破的设计精度实验结果如表 1 所示。

表 1 三维激光点云数据精度和煤矿开采时爆破的设计精度实验结果

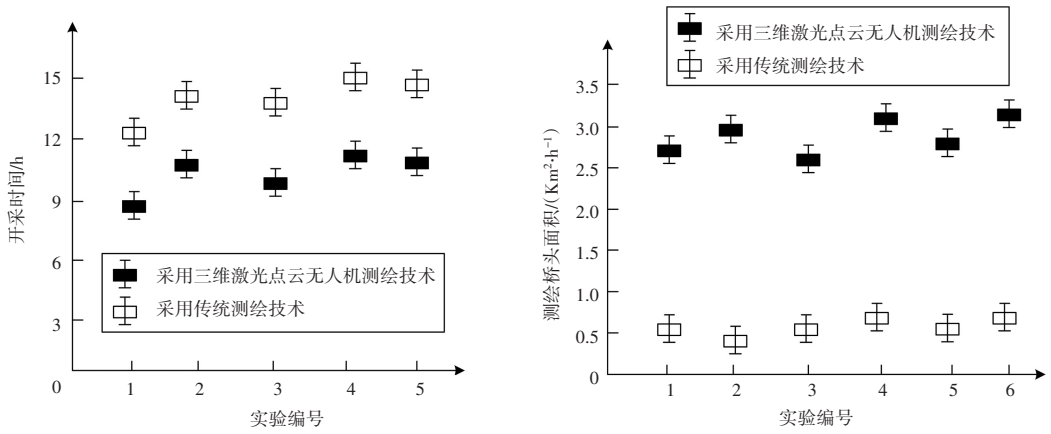
Tab. 1 Experimental results on the accuracy of 3d laser point cloud data and the design accuracy of blasting during coal mining

cm

实验编号	点云数据偏差	实际测量数据	爆破设计参数误差	爆破实际效果偏差
1	2.3	132	1.6	2.4
2	1.8	145	2.1	1.9
3	2.0	123	1.9	2.6
4	1.5	127	1.23	1.8
5	2.1	143	2.6	2.4

由表 1 所示的实验结果表格可知,5 个实验中的露天煤矿地形点云数据偏差平均值为 1.94 cm,其与露天煤矿区实际地形测量的数据偏差值较小,说明研究所提出的三维激光点云方案的数据精度在实际应用中可达到预期的标准。根据三维激光点设计的爆破参数误差平均值为 1.886 cm,而爆破实际效果偏差的平均值为 2.22 cm,爆破设计参数误差与实际效果偏差相差 0.334 cm,与实际效果偏差较小,说明研究所提出的三维激光点云技术可以有效提高爆破设计的精度,减少与实际爆破参数的偏差。对使用三维激光点云技术前后的露天煤矿开采时间和测绘效率实验结果如图 3 所示。

图 3(a)为采用三维激光云无人机测绘技术前后的煤矿开采时间对比,采用传统测绘技术得到露天煤矿平均开采时间为 13.84 h,采用三维激光点云无人机测绘技术的平均开采时间为 10.03 h,相较于传统方案降低了 27.52%,实验结果表明使用三维激光点云无人机测绘技术后,可以缩短煤矿的开采时间。图 3(b)为采用三维激光点云无人机测绘前后的露天煤矿测绘效率结果对比,采用传统测绘技术得到露天煤矿平均测绘效率为 0.55 km^2/h,采用三维激光点云无人机测绘技术的露天煤矿平均测绘效率为 2.91 km^2/h,相较于传统测绘方案提高了 2.36 km^2/h,测绘效率大幅提升,验证了三维激光点云无人机测绘技术在露天煤矿地形测绘效率中的有效性。对三维激光点云模型在煤矿爆破设计和优化中的实验结果如表 2 所示。



(a) 采用三维激光点云无人机测绘技术前后的煤矿开采时间对比 (b) 采用三维激光点云无人机测绘技术前后的煤矿测绘效率对比

图 3 使用三维激光点云技术前后的露天煤矿开采时间和测绘效率实验结果

Fig. 3 Experimental results of the mining time and mapping efficiency of open-pit coal mines before and after the application of 3D laser point cloud technology

表 2 露天煤矿智能开采方案在爆破设计中优化实验结果

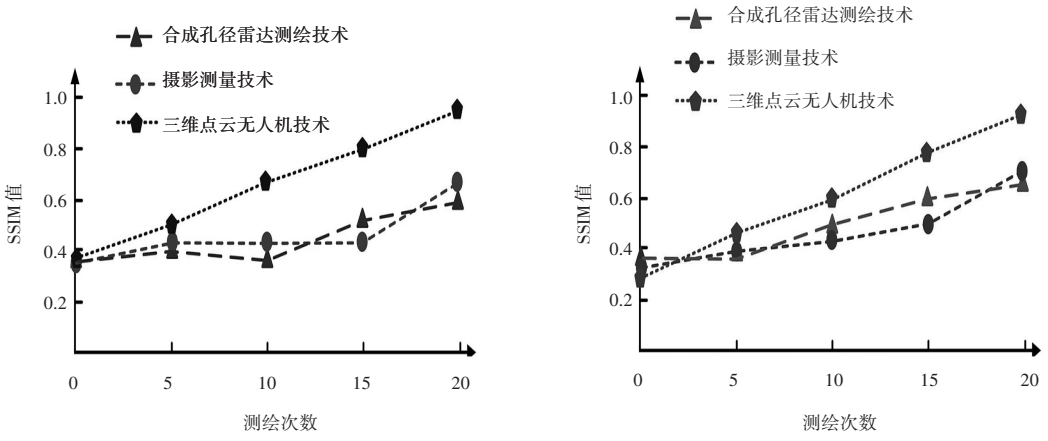
Tab. 2 Optimization results of the intelligent mining scheme for open-pit coal mines in blasting design m

实验编号	传统方法爆破安全距离	优化后爆破安全距离	传统方法飞散物控制距离	优化后飞散物控制距离	传统方法冲击波影响安全距离	优化后冲击波影响安全距离
1	168	152	192	183	230	220
2	154	143	186	172	225	208
3	154	149	195	186	236	232
4	149	136	212	198	240	223
5	142	138	189	174	228	215
6	163	154	188	172	232	226

表 2 为露天煤矿智能开采方案在爆破设计中的优化结果,传统方法的平均爆破安全距离为 155 m,经过优化后的平均安全距离为 145.3 m,相较于传统方法降低了 9.7 m,实验结果表明使用三维激光点云模型后可有效控制爆破产生的风险,将爆破产生的安全影响距离缩短。传统方法对飞散物平均控制距离和冲击波影响的平均安全影响分别为 193.6 m 和 231.83 m,使用三维激光点云无人机测绘技术后对飞散物平均控制距离和冲击波影响的平均安全影响分别为 180.83 m 和 220.66 m,相较于传统方法减少了 12.77 m 和 11.17 m,说明使用三维激光点云技术可有效控制爆炸飞散物的产生距离与爆破对周围环境的影响距离,减少对周围环境的影响。其中,不同算法对露天煤矿平坦和复杂地形的结构相似度指数(structural similarity index, SSIM)结果对比如图 4 所示。

由图 4 可知,采用三维点云无人机测绘技术在平坦和复杂的露天煤矿地形中展现了卓越性能,并在地形重建上都呈现了明显的优势。图 4(a)中,随着测绘次数的增加,所有技术的 SSIM 都呈现出增长趋势,三维激光点云无人机测绘技术的 SSIM 值从初始的 0.38 增长至 0.94,其增长速度和幅度均显著超过其他测量技术。图 4(b)中,采用三维

点云无人机测绘技术的 SSIM 值从 0.34 增长至 0.94,表现出了强大的地形复原能力。而使用三合成孔径雷达测绘技术和摄影测量技术的 SSIM 值增长幅度较小,仅从 0.37 和 0.34 提升至 0.46 和 0.51,实验结果验证了三维点云无人机测绘技术在露天煤矿地形三维复原中的有效性。



(a) 不同算法对露天煤矿平坦地形生成的影响　　(b) 不同算法对露天煤矿复杂地形生成的影响

图 4　不同测量技术对平坦和复杂的露天煤矿地形的影响

Fig. 4　The influence of different measurement techniques on flat and complex terrain of open-pit coal mines

3　结论

为了提高露天煤矿开采时的效率和安全性,研究提出将三维激光点云无人机测绘技术应用于露天煤矿智能开采中,使用三维激光点云无人机测绘技术对露天煤矿的地形进行测量,构建三维激光点云模型,结合爆破工程的理论知识与点云模型设计精确的爆破。实验结果表明,露天煤矿地形点云数据偏差平均值为 1.94 cm,爆破参数误差平均值为 1.886 cm,采用三维激光点云无人机测绘技术的平均开采时间为 10.03 h,相较于传统方案降低了 27.52%,平均测绘效率为 2.91 km^2/h,相较于传统测绘方案提高了 2.36 km^2/h。结果验证了研究所提方案的有效性,可减少煤矿开采时爆破的设计误差,并控制爆破时产生的飞散物影响及安全距离。但是,研究并未考虑极端天气条件下无人机测绘工作的稳定性与准确性,未来将研究如何增强无人机在极端天气条件下的稳定性。

参考文献

[1]包妮沙, 韩子松, 于嘉欣, 等. 基于改进 Faster-RCNN 的露天煤矿开采区遥感识别方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(12): 1759-1768.
[2]王皓永, 任晓玲, 沈强, 等. 基于空气间隔优化的骨料用灰岩爆破粉矿率控制[J]. 爆破, 2023, 40(4):110-114.
[3]冯东明, 葛健, 吴刚, 等. 基于无人机点云与 BIM 模型的桥梁施工进度识别方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(6): 1-7.
[4]刘家辛, 温刚, 田小壮, 等. 基于三维点云的变电站无人机巡检路径规划[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6):1-49.
[5]宋琨, 仪政, 宋琪. 基于无人机 3D 点云的高陡斜坡岩体结构特征[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(5):103-107.
[6]Pan X, Tavasoli S, Yang T Y. Autonomous 3D vision-based bolt loosening assessment using micro aerial vehicles[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2023, 38(17): 2443-2454.
[7]肖友刚, 满香娜, 伍国华, 等. 考虑地形起伏的机载 SAR 测绘航线规划方法[J]. 航空学报, 2023, 44(17):213-229.
[8]朱熠, 田辉, 郝向宇, 等. 基于数字地形平滑和人工势场的无人机近地三维路径规划[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(1):265-271.
[9]李全生, 周伟, 陈树召, 等. 基于"空-天-地-深"一体化的露天矿采动 损伤监测与评价技术体系与实践[J]. 中国煤炭, 2025, 51(11):2-10.
[10]王诚林, 夏秀华, 郭士茹, 等. 基于三维激光点云的动态道路场景自动驾驶车辆定]位方法[J]. 激光杂志, 2023, 44(11):188-193.
[11]吴文清, 王新雅, 刘泓佚, 等. 基于激光点云的预制混凝土箱梁外观尺寸检测方法研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(4):25-32.
[12]崔昊杨, 韩奕, 张驯, 等. 基于改进 U-Net 结构生成对抗网络的运动模糊绝缘子图像复原方法[J]. 电网技术, 2023, 47(6):2594-2603.
[13]朱乾荣, 柏艳红, 王银, 等. 改进贪婪投影三角化的点云三维重建算法研究[J]. 应用激光, 2024, 44(4):230-236.
[14]李辉, 王董东, 杜文康, 等. 安家岭煤矿爆破振速预测与安全允许距离研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(10):156-161.
[15]杨洪涛, 陆广慧, 沈梅. 基于双目视觉的齿轮三维点云精确重构方法研究[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(10):56-59.
[16]汪海, 李传洋. 基于三维建模和激光点云的建筑物目标监测系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(10):148-152.
[17]王忠鑫, 张令非, 曹建, 等. 大型露天煤矿边坡工程数字化与智能监测预警技术研究进展[J]. 工矿自动化, 2025, 51(11):54-64.
[18]王识辉, 周亚森, 宋雷同. 露天煤矿智能化开采决策系统[J]. 工矿自动化, 2025, 51(增刊 1):13-16.