露天矿山扬尘影响下无人驾驶智能感知技术及应用示范*

林巧[1],张磊[1],康庆微[2],高永胜[3],曾思慧[4],刘志高[1],杨书杰[1]

(1.易控智驾科技股份有限公司, 北京 100083;
2.新疆天池能源有限责任公司, 新疆 昌吉回族自治州 831799;
3.新疆哈密三塘湖能源开发建设有限责任公司, 新疆 哈密市 839000;
4.中煤建筑安装工程集团有限公司新疆分公司, 新疆 乌鲁木齐 830063)

摘要:露天矿山无人驾驶矿卡在运输过程中,其感知系统易受风沙、扬尘等恶劣天气影响,导致关键目标的检测与跟踪能力下降,进而引发目标漏检、误检以及停车等后果。为提升扬尘影响下无人驾驶安全高效感知技术水平,采用深度学习算法、点云数据处理技术及多传感器融合方法,提出了无人驾驶矿卡扬尘智能感知模型及方案,并开展了试验验证。在此基础上,确定了无人驾驶运行扬尘分级策略和依据,并将训练好的模型在测试集上进行评估。结果表明,预测平均交并比指标达到87.3%,其中灰尘类别的交并比达到了90.7%,表明感知模型对灰尘类别具有较高的识别精度,能够充分满足矿区无人驾驶对扬尘场景识别的需求。无人驾驶扬尘智能感知方案有效地提升了露天矿无人驾驶环境下的车辆感知能力,点云去除率达95%以上,提高了对环境的感知准确度和敏感度,为无人驾驶矿卡的安全运营提供了有力保障。

关键词:露天矿;扬尘;无人驾驶;智能感知技术;扬尘分级

中图分类号:TD679 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0257-08

Intelligent Perception Technology and Application Demonstration for Unmanned Operations Under Dust Interference in Open-Pit Mines

Lin Qiao[1], *Zhang Lei*[1], *Kang Qingwei*[2], *Gao Yongsheng*[3], *Zeng Sihui*[4], *Liu Zhigao*[1], *Yang Shujie*[1]

(1.EACON Group Co., Ltd., Beijing 100083, China;
2.Xinjiang Tianchi Energy Co., Ltd., Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang 831799, China;
3.Xinjiang Hami Santang Lake Energy Development and Construction Co., Ltd., Hami, Xinjiang 839000, China;
4.Xinjiang Branch, China Coal Construction and Installation Engineering Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830063, China)

Abstract: During the transport of unmanned mining trucks in open-pit mines, their perception systems are highly susceptible to harsh weather conditions such as wind-blown sand and dust. This vulnerability leads to a degradation in the detection and tracking capabilities of key targets, consequently causing adverse consequences such as missed detections, false alarms, and unintended vehicle stops. To enhance the safety and efficiency of perception technologies for unmanned operations under dust interference, an intelligent dust perception model and scheme for unmanned mining trucks were proposed by integrating deep learning algorithms, point cloud data processing techniques and multi-sensor fusion methods, followed by experimental validations. On this basis, a classification strategy and corresponding criteria for dust severity during unmanned operations were established, and the trained model was evaluated on a test dataset. The results indicate that the predicted mean Intersection over Union reaches 87.3%, with the Intersection over Union for the dust category specifically achieving 90.7%. This demonstrates that the perception model possesses high recognition precision for dust, fully satisfying the requirements of dust scene recognition for unmanned operations in mining areas. The unmanned operation dust intelligent perception scheme effectively enhances vehicle perception capabilities in open-pit unmanned operation environments, achieving a point cloud removal rate of over 95%. It significantly improves the accuracy and sensitivity of environmental perception, thereby providing a robust guarantee for the safe operation of unmanned mining trucks.

Key words: Open-pit mine, Dust, Unmanned operations, Intelligent perception technology, Dust classification

---

* **收稿日期**:2025-07-02
基金项目:2022年新疆维吾尔自治区重点研发任务专项项目(20222101658)
作者简介:林巧(1984—),男,浙江温州人,博士,高级工程师,主要从事露天矿山无人驾驶研究。E-mail:linqiao@eacon.com

0 引言

随着智能化技术的快速发展,无人驾驶在露天矿山中的应用日益广泛。然而,露天矿区运输道路多为非结构化土路,随着车辆行驶趟次增加。路面损坏与土质松软问题日益突出。此外,露天矿无人驾驶车辆的感知系统易受风沙、扬尘等天气的影响,对关键目标的检测与跟踪能力显著下降,容易引发目标漏检、误检甚至引发无人驾驶矿卡停车等后果,严重威胁无人驾驶车辆的安全运行。

近年来,针对露天矿山无人驾驶与扬尘智能感知技术,国内外学者在露天矿扬尘识别、感知及无人驾驶优化等方面取得了阶段性进展。赵浩等[1]、孙庆山等[2]、刘伟芳等[3]分析了国内外无人驾驶技术应用现状与新能源卡车发展趋势,探讨了无人驾驶系统在扬尘等复杂场景下的实施方案及其经济效益。王忠鑫等[4]、何帅等[5]从智慧露天矿协同、规划发展路径以及智能化评价体系等角度,分析了露天矿全生命周期、全工程领域的关键技术及需求。赵红泽等[6]、郭英杰[7]分析了智慧露天矿山规划发展路径,指出了无人驾驶矿卡在露天矿智能化建设中的重要意义。林巧等[8-9]、张磊等[10]系统分析了扬尘影响下露天矿无人驾驶大规模应用关键技术及面临的挑战,并实现了露天矿无人驾驶矿卡的大规模运行。周蕴卓等[11]、王艳等[12]提出基于深度学习级联卷积网络的露天矿道路扬尘识别方法,通过优化多尺度特征提取模块,显著提升了扬尘区域分割的精度。张斌等[13]构建了大型露天矿山大气污染防治精准管控框架,结合物联网与边缘计算技术,实现了卡车运输环节扬尘源的动态追踪与污染扩散模拟。王新喆等[14]、刘子亮等[15]、刘宇等[16]通过数值模拟分析了卡车行驶扬尘的扩散规律,研究了运输道路粉尘生成机制并提出了降尘措施。刘光伟等[17]、李少博等[18]利用多模态数据提升了障碍物检测精度,同时开发了基于双目视觉的露天矿无人驾驶卡车实时障碍物检测技术,结合小波变换增强视觉感知系统的多任务处理能力。阮顺领等[19]、顾清华等[20]研发了基于双目视觉的露天矿无人车前障碍检测技术,提升了无人驾驶矿卡在扬尘环境下的高效运行能力。黄佳德等[21]、邵水才等[22]针对无人驾驶自卸车路径规划问题,综合扬尘浓度、坡度与能耗因素,设计了一种基于动态环境感知的混合优化算法。此外,国内无人驾驶技术企业针对扬尘环境对激光雷达的干扰,研发了灰尘过滤算法,提升了无人驾驶运行的环境适应能力[23-24]。

当前研究多集中于扬尘的起尘机理和扩散特征,而矿山无人驾驶在扬尘环境下的智能识别与控制策略仍面临挑战,亟须探索扬尘环境下的传感器抗干扰技术、实时闭环控制算法及相应的应急应对策略,并协同推进政策法规与技术标准建设,以促进矿山无人化与绿色化的深度融合。综上,研究适用于露天矿山扬尘环境的无人驾驶智能感知识别技术,具有重要的理论价值和实践意义。

1 露天矿山无人驾驶扬尘环境分析

露天矿山扬尘环境具有鲜明特征,对无人驾驶感知系统的影响不容忽视。扬尘主要由采矿作业、车辆行驶及自然风力等因素产生,其浓度与分布随时间和空间变化较大。高浓度扬尘会显著降低可见光的穿透能力,导致摄像头采集的图像质量下降、特征信息丢失。同时,扬尘颗粒会对激光雷达与毫米波雷达的探测信号产生散射和衰减,影响目标检测和距离测量的准确性。

扬尘环境对无人驾驶感知系统的影响主要体现在以下 3 个方面:首先,图像传感器的识别准确率显著下降,难以有效检测和分类目标;其次,激光雷达的点云数据质量降低,目标轮廓模糊,影响三维环境重建;最后,单一传感器的可靠性下降,需要通过多传感器融合提高感知系统的鲁棒性。因此,在露天矿山扬尘环境下,设计合理的传感器配置方案和开发先进的感知识别算法至关重要。

2 无人驾驶扬尘智能感知模型及方案介绍

2.1 模型架构

在无人驾驶系统中,点云语义分割是一项关键技术。点云是由激光雷达或其他传感器采集到的三维空间中的离散点数据,可精准描述周围环境的几何结构及物体位置信息。点云语义分割旨在将点云中的每个点赋予特定的语义类别,例如道路、车辆、行人、建筑物等,从而提供对环境更详细和全面的理解。

通过训练深度学习模型识别并分割激光点云中的扬尘区域,进而滤除这些干扰信息,可以有效提升无人驾驶系统的感知能力。Salsanext 模型[25]是一

种基于距离视图(range-view)的神经网络,其网络结构中大量采用 2D 卷积,便于端侧部署。同时,该模型在生成距离视图之前无需对点云进行范围过滤,能够支持远距离点云分割。综合考虑硬件资源、模型性能及分割精度等因素,采用基于距离视图的 SalsaNext 模型,其结构如图 1 所示。

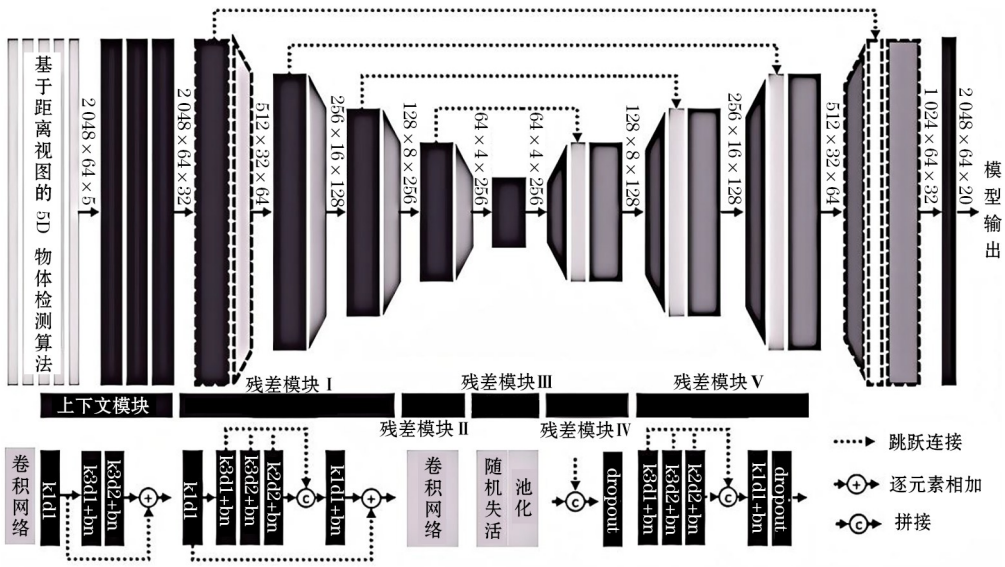


图 1 无人驾驶扬尘智能感知模型结构

Fig.1 Structure of the unmanned operation dust intelligent perception model

2.2 模型原理

2.2.1 点云编码

SalsaNext 模型可接收激光雷达采集的三维点云数据,并将其投影到二维空间。激光雷达点云本身具有稀疏性,通过将其映射为二维网格,可将三维点云处理简化为二维图像分割问题。输入的点云数据主要包含每个点的反射强度、距离信息等。三维点的笛卡尔坐标系(x_i,y_i,z_i)转换为球面坐标系下的二维图像坐标(u_i,v_i):

$$\begin{cases} u_i=\dfrac{1}{2}\left(1-\dfrac{\arctan(\dfrac{y_i}{x_i})}{\pi}\right)W \\ v_i=\dfrac{1}{2}\left(1-\dfrac{\arcsin(\dfrac{z_i}{d_i})-\varphi_{\min}}{\varphi_{\max}-\varphi_{\min}}\right)H \end{cases} \tag{1}$$

式中:W 和 H 分别代表输出图像的宽度和高度;$\varphi_{\min}$和$\varphi_{\max}$分别代表激光雷达的最小仰角和最大仰角;d 代表激光点云的深度信息。对于每一个像素,将三维点云坐标(x,y,z)、点云强度(i)及点云深度(d)填充到特征通道维度作为模型输入,得到模型输入维度为$[W,H,5]$。

2.2.2 网络结构

整体网络结构遵循 U-Net 范式,分为编码器和解码器两个部分。编码器负责从输入的稀疏点云中提取逐层丰富的特征,其主干网络采用融入残差模块的 2D 卷积网络,类似于经典的 ResNet(人工神经网络架构) 结构,但做了针对性优化,以适应点云数据的稀疏性和不均匀分布。

为解决语义分割任务中上下文信息缺失的问题,该网络通过将残差连接和膨胀卷积相结合,融合多个感受野的特征,从而有效捕获全局上下文信息,增强对各类别之间复杂关系的学习能力。

此外,为降低模型计算量与运行时延,网络将语义分割中常见的反卷积上采样替换为像素重排层。像素重排将通道维度信息转换为空间维度信息,以此完成上采样,减少了参数量,并提升了计算效率。随后,网络将重排后的特征与编码器的跳跃连接融合,以保留更多的细节信息。

解码器将特征图还原至原始输入尺寸后,采用 1×1 卷积将通道数对齐至类别数,经由 Softmax 函数输出每个类别对应的分类得分。

2.2.3 无人驾驶扬尘智能感知方案

无人驾驶扬尘智能感知方案由点云数据采集、数据预处理、语义分割模型推理、灰尘数据后处理、融合跟踪和输出灰尘目标构成,具体流程如图 2 所示。

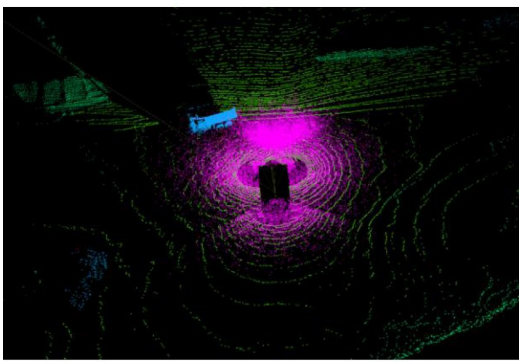


图 2 无人驾驶扬尘智能感知方案流程

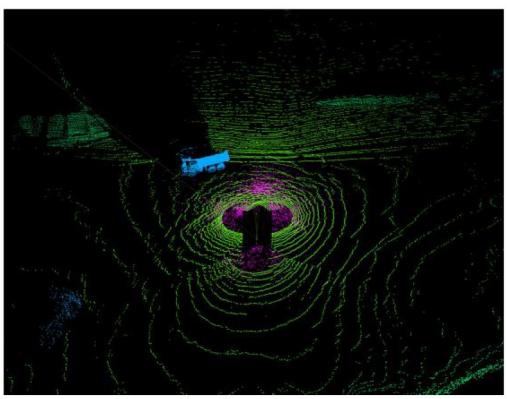
Fig.2 Flow of the unmanned operation dust intelligent perception program

(1) 数据采集:无人驾驶车辆通过激光雷达采集矿山场景下的点云数据。

(2) 数据预处理:对采集的点云数据进行滤波与噪点滤除等预处理,并结合激光雷达特性以及灰尘反射强度特征分布,对灰尘点云进行过滤。预处理前后的点云数据对比如图 3 所示。



(a) 预处理前点云



(b) 预处理后点云

图 3 预处理前后点云数据对比

Fig.3 Comparison of point cloud data before and after preprocessing

(3) 语义分割模型推理:将预处理后的点云输入到预先训练好的语义分割模型中进行推理,分割出点云中的灰尘区域。

(4) 灰尘数据后处理:对推理输出的灰尘点云进行聚类与特性分析,包括分析灰尘的反射强度、灰尘的空间分布特性等,并对灰尘目标进行校验。

(5) 融合跟踪:基于历史帧信息,对检测到的灰尘目标进行时序融合与跟踪。

(6) 输出灰尘目标:将经融合跟踪的灰尘目标进行输出。

通过以上感知方案流程,能够精准将灰尘目标进行输出,有效提升露天矿无人驾驶环境下的车辆感知能力,提高对环境的感知准确度和敏感度,为无人矿卡的安全运营提供保障。

3 扬尘感知智能试验结果与分析

3.1 试验平台搭建及数据准备

为验证所提出技术的有效性,在模拟和实际露天矿山环境中进行了试验验证,试验环境基础情况见表 1。

表 1 试验环境基础情况

Table 1 Experimental environment basics

配置项目	详细参数	环境表配置
操作系统	Ubuntu 20.04	numpy==1.14.0
处理器	Intel(R) Xeon(R) Platinum 8457C @ 2.6 GHz	torchvision==0.2.2.post3 matplotlib==2.2.3 tensorflow==1.13.1
系统类型	64 位操作系统,基于 x64 的处理器	scipy==0.19.1 torch==1.1.0 vispy==0.5.3
GPU	NVIDIA L20 * 4	opencv_python==4.1.0.25
CUDA 版本	10.0	opencv_contrib_python==4.1.0.25 Pillow==6.1.0
pytorch 版本	1.1.0	PyYAML==5.1.1

为衡量语义分割模型对矿区扬尘的识别效果,针对性收集了一批包含灰尘类别的数据集。除灰尘类别外,数据集还包括行人、车辆、挡墙、地面、小障碍物类别,各类别点云数量见表 2。训练集包含 47 251 帧,测试集包含 12 582 帧。

表 2 各类别点云数量

Table 2 Number of point clouds in each category

类别	点云数量/个	占比/%
车辆	15 315 361 581	4.515 6
行人	27 158 702	0.079 8
小障碍物	20 277 195	0.059 6
挡墙	14 744 070 492	43.37
地面	17 665 589 429	51.96
灰尘	5 286 200	0.015

3.2 模型指标分析

3.2.1 衡量标准

对于模型指标的计算,采用平均交并比 mIoU 进行评估,该指标用于衡量预测结果与真实标签之间的重叠程度,值越大表明分割效果越好。

对于某一类别 c,交并比 IoU 的计算公式为:

$$IoU_c=\frac{TP_c}{TP_c+FP_c+FN_c} \tag{2}$$

式中:TP_c 代表类别 c 的真实正例,即正确预测为 c 的像素数;FP_c 代表类别 c 的假正例,即错误预测为 c 的像素数;FN_c 代表类别 c 的假负例,即真实为 c 但未被正确预测的像素数。

mIoU 是对所有类别的 IoU 值取平均,公式为:

$$mIoU=\frac{1}{C}\sum_{c=1}^{C}IoU_c \tag{3}$$

式中,C 代表类别的总数。

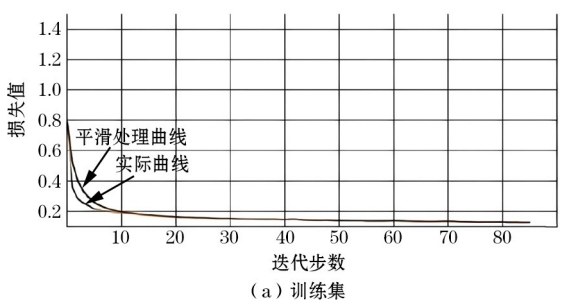
3.2.2 时延分析

运行性能的好坏决定模型能否部署至端侧设备并稳定运行。基于自动驾驶 ADC610 平台(硬件为 Ascend 610,AI 算力 200TOPS)进行耗时分析。在无其他负载、未启用 Aoe 性能优化、AI core 配置为 4 核的条件下,模型前处理耗时约 5.8 ms,模型运行耗时约 40.7 ms,后处理耗时约 3 ms,总耗时为 49.5 ms,能够满足 20 Hz 稳定运行的要求。鉴于常规激光雷达的点云输出频率为 10 Hz,因此该方案能够保证对每一帧激光雷达点云完成前向推理。

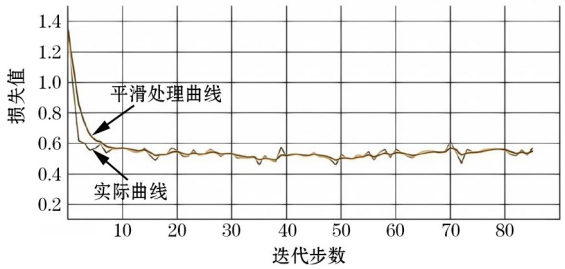
3.2.3 试验结果

综合考虑指标与性能,输入尺寸设置为 1 024 px×160 px×5,其中 1 024 px 和 160 px 分别代表输入图像的宽度和高度,5 代表特征维度;投影俯仰角依据激光雷达规格参数进行配置。

为监控模型训练过程的平稳性,绘制了训练与验证的损失值曲线,如图 4 所示。从图 4 可以看出,训练集和测试集的损失下降平稳,证明了模型训练的有效性。



(a) 训练集



(b) 测试集

图 4 模型训练平稳性

Fig.4 Model training smoothness plot

在用于自动驾驶的一个公共的大规模数据集 nuscenes 数据榜单中,通常将 mIoU 设置为测试结果评价维度,因此选择 mIoU 作为评估指标[26]。

将训练好的模型在测试集上进行评估,各类别结果见表 3。$mIoU$ 指标值为 87.3%,其中灰尘类别的 IoU 指标值达到了 90.7%,表明模型对灰尘类别有较高的识别率,能够充分满足矿区场景的扬尘感知需求。同时,针对尺寸在 20~80 cm 范围内的小障碍物,其激光雷达点云较稀疏,通常 IoU 指标值超过 50%即视为高精度,采用的模型对小障碍物的交并比达到 62.8%,展现了良好的检测性能。

表 3 模型评估结果

Table 3 Model evaluation results %

指标	地面	挡墙	车辆	灰尘	行人	小障碍物
IoU	97.7	95.8	95.3	90.7	81.6	62.8
mIoU	87.3					

3.3 扬尘感知经验分级策略及依据

露天煤矿在冬春之交温度回升,路面扬尘显著增多,无人驾驶矿卡须降低行驶速度以确保安全。云控平台通常采取全区域限速管控策略,待洒水降尘作业完成后再恢复正常通行,且限速恢复往往存在明显滞后,对无人驾驶运输效率造成较大影响。

为此,开发了扬尘分级和平台限速系统。无人驾驶系统启动后,云端向车端下发灰尘降速开关信息;车端接收云端灰尘降速消息后,激光雷达实时检测车辆后方灰尘,分析灰尘密度与空间分布等点云特性,当扬尘条件达到降速阈值时自动执行降速策略。

灰尘分级策略通过统计检测区域的灰尘点云、地面点云、总点云,计算总灰尘密度(D_T),其定义为灰尘点云与总点云的比值。根据总灰尘密度的数据范围,将灰尘分为三级,具体分级策略如下所示:

(1) 一级:$D_T<D_1$;

(2) 二级:$D_1<D_T<D_2$;

(3) 三级:$D_2<D_T$。

其中:D_1 表示检测范围内灰尘点云占总点云的比例等于 0.01,即视为弱灰/无灰场景;D_2 表示检测范围内灰尘点云占总点云的比例等于 0.5,视为中度灰尘场景与重度灰尘场景的阈值。

进一步地,分别计算单个栅格的灰尘密度。当某一栅格灰尘密度超过 D_1 时,计算灰尘栅格的比率(R),灰尘栅格数与总栅格数的比值。根据灰尘栅格的比率数据范围,将灰尘密度进行分级,具体分级策略如下所示:

(1) 一级:$R<D_1$;

(2) 二级:$D_1<R<D_2$;

(3) 三级:$D_2<R$。

根据扬尘感知经验分级策略,可对矿山场景下的灰尘情景进行准确分级,为矿区无人驾驶提供更灵敏的环境感知能力,支持其在复杂场景下做出最安全、高效的行驶策略。

4 现场应用效果

我国露天煤矿多分布于内蒙古、新疆等西部地区,该区域干燥少雨,水资源匮乏且常受沙尘暴影响,生产过程中易产生大量粉尘,严重干扰无人驾驶矿卡的正常运行。

新疆某露天煤矿已实现无人驾驶矿卡规模化应用。然而,受大风等环境因素影响,装载区、运输道路、排土场及转载区等区域部分道路扬尘较大,如图 5 所示,导致无人驾驶矿卡感知误检非预期停车。尤其在混行环节,甚至会逼停人工驾驶车辆,严重时导致人工驾驶车辆熄火溜坡风险。

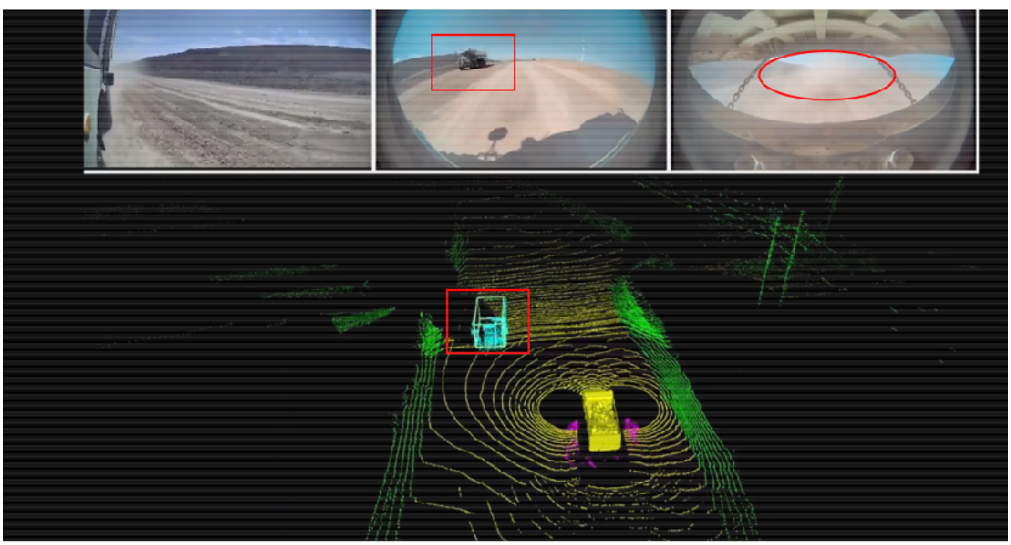
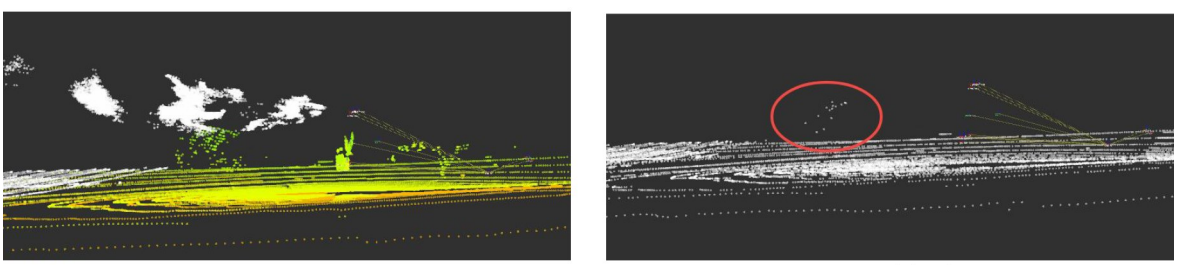


图 5 无人驾驶粉尘智能识别

Fig.5 Unmanned operation dust intelligent recognition

为此,采用激光雷达与摄像头等多源传感器,结合无人驾驶扬尘智能感知方案和点云语义分割算法,对扬尘点云进行实时滤波,如图 6 所示。结果表明,该方案能够有效将无人驾驶粉尘过滤,点云去除率达 95%以上,增强了无人驾驶矿卡感知能力,保障了无人驾驶矿用车能够在恶劣天气和路况下稳定运行,降低了因环境因素导致的安全风险。无人驾驶矿卡作业效率与人工驾驶作业效率持平,满足矿山正常生产作业需求,提升矿山本质安全。



(a) 粉尘过滤前点云 (b) 粉尘过滤后点云

图 6 无人驾驶智能感知效果

Fig.6 Unmanned operation intelligent perception effects

5 结论

(1) 针对露天矿山扬尘环境下无人驾驶智能感知识别技术进行了深入研究和探索,通过分析扬尘环境特点,提出基于深度学习的图像去噪、点云处理和多传感器融合算法,有效提高了无人驾驶系统在扬尘环境下的感知能力。

(2) 开发了扬尘分级和平台限速系统。无人驾驶云端向车端下发灰尘降速开关信息后,激光雷达实时检测车辆后方灰尘,扬尘条件达到阈值后实行降速策略。

(3) 无人驾驶扬尘智能感知方案在新疆某露天煤矿进行了应用验证,点云去除率达 95%以上,无人驾驶矿卡作业效率与人工驾驶作业效率持平。未来将进一步优化算法以适应更极端的扬尘环境,提升系统的实时性和计算效率,并推动智能感知系统与决策控制系统的深度集成,推动无人驾驶技术在露天矿山的更广泛应用,提升矿山本质安全。

参考文献(References):

[1] 赵浩,毛开江,曲业明,等.我国露天煤矿无人驾驶及新能源卡车发展现状与关键技术[J].中国煤炭,2021,47(4):45-50.
Zhao Hao, Mao Kaijiang, Qu Yeming, et al. Development status and key technology of driverless and new energy trucks in open-pit coal mine in China[J]. China Coal,2021,47(4):45-50.

[2] 孙庆山,张磊,庞东君,等.矿用卡车无人驾驶系统实现方式及效益优势分析[J].露天采矿技术,2020,35(2):35-38.
Sun Qingshan, Zhang Lei, Pang Dongjun, et al. Realization way and benefit advantage analysis of autonomous haulage system of mining truck[J]. Opencast Mining Technology, 2020,35(2):35-38.

[3] 刘伟芳,吴迪.国内外露天矿山无人驾驶技术发展现状[J].露天采矿技术,2020,35(4):32-34+38.
Liu Weifang, Wu Di. Technology development status of unmanned driving in open-pit mines at home and abroad[J]. Opencast Mining Technology,2020,35(4):32-34+38.

[4] 王忠鑫,孙鑫,王金金,等.基于 BIM 的智慧露天矿协同工作平台架构与关键技术[J].煤炭科学技术,2019,47(10):36-42.
Wang Zhongxin, Sun Xin, Wang Jinjin, et al. Collaborative work platform architecture and key technologies of intelligent open pit mine based on BIM[J]. Coal Science and Technology,2019,47(10):36-42.

[5] 何帅,王海洋,赵力.露天煤矿智慧化建设关键技术及智能管控理念[J].煤矿安全,2020,51(10):298-304.
He Shuai, Wang Haiyang, Zhao Li. Key technology and intelligent management and control concept of intelligent construction of open-pit coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2020,51(10):298-304.

[6] 赵红泽,刘元旭,王群,等.智慧露天矿山规划发展路径研究[J].中国煤炭,2021,47(1):27-34.
Zhao Hongze, Liu Yuanxu, Wang Qun, et al. Study on the planning and development path of intelligent open-pit mine [J]. China Coal,2021,47(1):27-34.

[7] 郭英杰.露天矿山智能化评价体系研究[J].煤矿安全,2022,53(8):247-251+256.
Guo Yingjie. Research on intelligent evaluation system of open-pit mine[J]. Safety in Coal Mines,2022,53(8):247-251+256.

[8] 林巧,康庆微,蔡明祥,等.露天矿矿用卡车无人驾驶关键技术及规模化应用[J].智能矿山,2025,6(2):28-33.
Lin Qiao, Kang Qingwei, Cai Mingxiang, et al. Key technologies and large-scale application of unmanned driving of mining trucks in open-pit mines[J]. Journal of Intelligent Mine,2025,6(2):28-33.

[9] 林巧,张磊,何玉东.露天矿山无人驾驶常态化应用面临的挑战及对策分析[J].智能矿山,2025,6(1):36-42.
Lin Qiao, Zhang Lei, He Yudong. Challenges and countermeasures analysis of routine application of unmanned driving in open-pit mines[J]. Journal of Intelligent Mine, 2025,6(1):36-42.

[10] 张磊,蔡明祥,林巧.露天煤矿无人驾驶规模化应用与成效[J].智能矿山,2024,5(6):56-64.
Zhang Lei, Cai Mingxiang, Lin Qiao. Large-scale application and achievements of unmanned driving in open-pit coal mines[J]. Journal of Intelligent Mine,2024,5(6):56-64.

[11] 周蕴卓,徐梓菁,毕林.基于深度学习级联卷积网络的露天矿道路扬尘识别[J].煤炭科学技术,2024,52(增刊 2):312-320.
Zhou Yunzhuo, Xu Zijing, Bi Lin. The recognition of dust emission from open-pit mining roads based on cascaded convolutional networks by deep learning[J]. Coal Science and Technology,2024,52(Suppl.2):312-320.

[12] 王艳,张游杰.基于改进残差网络的扬尘图像识别方法[J].计算机系统用,2021,30(5):202-207.
Wang Yan, Zhang Youjie. Dust image recognition method based on improved residual network[J]. Computer Systems & Applications,2021,30(5):202-207.

[13] 张斌,李建超,刘胜军.论大型露天矿山大气污染防治精准管控的实施[J].中国金属通报,2024(5):176-178.
Zhang Bin, Li Jianchao, Liu Shengjun. Implementation of precise control of air pollution prevention and control in large open-pit mines[J]. China Metal Bulletin,2024(5):176-178.

[14] 王新喆,王鹏飞,刘岩.露天矿山自卸卡车行驶扬尘浓度数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2023,43(5):155-161.
Wang Xinzhe, Wang Pengfei, Liu Yan. Numerical simulation study on dust concentration of dump truck driving in open-pit mine [J]. Mining Research and Development,2023,43(5):155-161.

[15] 刘子亮,谭卓英,李华,等.司家营铁矿露天运输道路粉尘发生机理及控制[J].矿业研究与开发,2021,41(7):93-97.

Liu Ziliang, Tan Zhuoying, Li Hua, et al. Dust occurrence mechanism and its control on open-pit transportation toad in Sijiaying Iron Mine[J]. Mining Research and Development, 2021,41(7):93-97.

[16] 刘宇,丁小华,陆翔,等.哈尔乌素露天煤矿采装环节起尘特征及其降尘方式研究[J].煤炭工程,2020,52(增刊2):28-32.
Liu Yu, Ding Xiaohua, Lu Xiang, et al. Dusting characteristics and dust reduction methods in mining and loading links in Haerwusu open pit coal mine[J]. Coal Engineering,2020,52(Suppl.2):28-32.

[17] 刘光伟,雷健,郭直清,等.面向跨模态的露天矿障碍物检测方法[J].煤炭科学技术,2025,53(11):327-340.
Liu Guangwei, Lei Jian, Guo Zhiqing, et al. Cross-modal obstacle detection method for open-pit mine[J]. Coal Science and Technology,2025,53(11):327-340.

[18] 李少博,顾清华,阮顺领,等.融合小波变换的露天矿无人车视觉多任务感知方法[J].煤炭学报,2025,50(增刊1):753-766.
Li Shaobo, Gu Qinghua, Ruan Shunling, et al. A visual multi-task perception method for unmanned vehicles in open pit mines incorporating wavelet transforms[J]. Journal of China Coal Society,2025,50(Suppl.1):753-766.

[19] 阮顺领,张回国,顾清华,等.基于双目视觉的露天矿无人车前障碍检测研究[J].煤炭学报,2024,49(增刊2):1285-1294.
Ruan Shunling, Zhang Huiguo, Gu Qinghua, et al. Research on the detection of obstacles in front of unmanned vehicles in opencast mines based on binocular vision[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49 (Suppl.2): 1285-1294.

[20] 顾清华,王晨曦,王倩,等.考虑卡车尾气排放因素的露天矿粉尘质量浓度预测[J].矿业研究与开发,2024,44(4):161-167.
Gu Qinghua, Wang Chenxi, Wang Qian, et al. Prediction of dust mass concentration in open-pit mines considering truck exhaust emission factors [J]. Mining Research and Development,2024,44(4):161-167.

[21] 黄佳德,刘勇,邓穆坤,等.露天矿场无人驾驶自卸车路径规划方法研究[J].煤炭科学技术,2024,52(8):182-191.
Huang Jiade, Liu Yong, Deng Mukun, et al. Research on path planning methods for autonomous dump trucks in open-pit mines[J]. Coal Science and Technology,2024,52(8):182-191.

[22] 邵水才,王荣,郝鹏飞.无驾驶舱矿山运输机器人的设计与应用[J].智能矿山,2024,5(2):44-51.
Shao Shuicai, Wang Rong, Hao Pengfei. Design and application of cabin-less mine transport robots[J]. Journal of Intelligent Mine,2024,5(2):44-51.

[23] 王琼杰,马晓敏.无人矿卡:一道靓丽风景[N].中国矿业报,2024-11-27(004).
Wang Qiongjie, Ma Xiaomin. Unmanned mine trucks: a beautiful sight[N]. China Mining News,2024-11-27(004).

[24] 马晓敏.为露天矿装上“智慧大脑”[N].中国矿业报,2023-11-20(002).
Ma Xiaomin. Installing a “smart brain” for open-pit mines [N]. China Mining News,2023-11-20(002).

[25] Cortinhal T, Tzelepis G, Aksoy E E. SalsaNext: fast, uncertainty-aware semantic segmentation of LiDAR point clouds for autonomous driving[C]//2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(Ⅳ). Las Vegas:IEEE,2020.

[26] Zuo Xin, Jiang Jiaran, Shen Jifeng, et al. Improving underwater semantic segmentation with underwater image quality attention and muti-scale aggregation attention[J]. Pattern Analysis and Applications,2025,28(2):1-12.