

基于改进YOLO的煤矿主运输系统人员跌落风险识别研究

张纪锁

乌审旗蒙大矿业有限责任公司, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 017399

摘要: 煤矿主运输系统中破碎机平台、煤仓入口及转载点等区域空间结构复杂、设备运行密集, 是人员跌落事故的高风险区域。针对传统“人防+物防”模式在复杂井下环境中存在响应滞后、识别精度不足等问题, 本文提出一种基于改进YOLO算法的煤矿主运输系统人员跌落风险识别方案。该方法通过引入多尺度特征融合模块与坐标注意力机制优化目标检测模型, 并结合骨骼姿态识别与运动轨迹分析实现对人员跌落风险行为的提前预判, 同时依托边缘计算架构构建实时检测与多级预警机制。实验结果表明, 改进模型在井下复杂环境中的平均检测精度(mAP_{50})达到93.2%, 误报率低于0.02%, 系统响应时间控制在10秒以内, 有效提升了煤矿主运输系统人员安全监测能力。研究成果为智慧矿山环境下煤矿人员安全风险识别与智能防控提供了新的技术路径。

关键词: 煤矿主运输系统; 跌落风险识别; 改进YOLO算法; 智慧矿山安全监测

Research on Fall Risk Identification for Personnel in Coal Mine Main Transport System Based on Improved YOLO

Zhang Jisuo

Wushenqi Mengda Mining Co., Ltd., China Inner Mongolia Ordos 017399

Abstract: In the coal mine main transport system, areas such as crusher platforms, coal bunker inlets, and transfer points feature complex spatial structures and dense equipment operation, making them high-risk zones for personnel fall accidents. To address the problems of delayed response and insufficient recognition accuracy in the traditional "human defense + physical defense" approach under complex underground environments, this paper proposes a fall risk identification scheme for personnel in the coal mine main transport system based on an improved YOLO algorithm. The method enhances the object detection model by introducing a multi-scale feature fusion module and a coordinate attention mechanism. Combined with skeletal posture recognition and motion trajectory analysis, it enables early prediction of personnel fall risk behaviors. Meanwhile, a real-time detection and multi-level warning mechanism is constructed based on an edge computing architecture. Experimental results show that the improved model achieves an average detection accuracy (mAP_{50}) of 93.2% in complex underground environments, with a false alarm rate below 0.02% and system response time controlled within 10 seconds, effectively enhancing the personnel safety monitoring capability of the coal mine main transport system. The research findings provide a new technical pathway for personnel safety risk identification and intelligent prevention and control in smart mine environments.

Keywords: Coal mine main transport system; Fall risk identification; Improved YOLO algorithm; Smart mine safety monitoring

0 引言

煤矿主运输系统是井下生产作业的重要组成部分, 其运行过程涉及破碎机、煤仓及皮带运输设备等多类大型机械设备。传统安全防护模式主要依赖人工巡检和物理防护设施, 但在井下低照度、高粉尘和设备遮挡等复杂环境条件下, 传统方法难以及时发现潜在危险行为。因此, 研究适用于复杂井下环境的人员跌落风险识别方法, 对于提升煤矿安全管理水平具有重要意义。

1 煤矿主运输系统人员跌落风险分析

1.1 主运输系统关键作业区域跌落风险特征分析

煤矿主运输系统是井下生产活动的重要环节, 其运行过程涉及破碎机、转载点、煤仓及皮带运输机等多类设备, 这些区域往往空间结构复杂、设备运行频繁, 成为人员跌落事故的高风险区域。特别是在煤仓口、转载溜槽以及皮带机检修平台等位置, 由于存在高差结构和开放式作业环境, 一旦作业人员失足或防护措施失效, 极易发生跌落事

故^[1]。此外,主运输系统通常位于井下巷道深部区域,环境照度较低且粉尘浓度较高,导致现场视觉感知条件较差,增加了安全管理难度。在传统安全管理模式中,多依赖人员巡检和防护栏等物理措施进行风险防控,但在设备连续运行条件下,人员活动频繁且作业空间有限。

1.2 复杂井下环境对视频识别技术的影响

煤矿井下环境具有低照度、高粉尘及复杂背景等特点,这些因素对基于视频的人员识别技术产生显著影响。首先,井下照明条件有限,摄像设备获取的图像通常存在亮度不足和噪声干扰等问题,导致人员目标与背景之间的对比度较低,影响目标检测算法的识别精度。其次,煤矿运输系统运行过程中产生大量粉尘颗粒,这些颗粒在摄像画面中形成散射噪声,使得图像细节信息受到干扰,容易造成目标边缘模糊和误检现象^[2]。此外,主运输系统设备结构复杂,如皮带机、支架及管线等设施容易形成遮挡,使得人员目标在图像中出现部分遮挡或短时消失,增加了连续识别难度。

1.3 跌落行为识别算法的关键技术挑战

在煤矿主运输系统安全监测中,实现对人员跌落行为的准确识别是提升安全管理水平的重要技术目标。然而,与普通人员检测相比,跌落行为识别涉及动态行为分析与时序特征提取,对算法性能提出了更高要求。首先,跌落行为通常发生时间较短,其动作特征变化迅速,传统基于单帧图像分析的方法难以准确捕捉行为变化过程。其次,在复杂井下环境中,人员姿态变化多样,如弯腰、攀爬或检修动作等,这些正常作业行为在视觉特征上可能与跌落动作存在一定相似性,从而增加误判风险。由于井下视频数据样本获取难度较大,跌落行为数据样本数量有限,这在一定程度上限制了深度学习模型的训练效果^[3]。

2 基于改进 YOLO 的煤矿主运输系统人员跌落风险识别方案

2.1 方案概述

针对煤矿主运输系统破碎机、转载点及煤仓等区域人员跌落风险难以及时识别的问题,本文提出一种基于改进 YOLO 目标检测算法的 AI 视频智能防控方案,通过构建“实时检测—风险预判—多级预警”的主动防御体系,实现对危险行为的动态识别与提前干预。该方案以井下视频监控数据为基础,结合深度学习目标检测算法,对人员活动状态进行实时识别,并通过行为分析模块对潜在跌落风险进行判定。传统视频监控系统多依赖简单图像检测方法,在低照度、高粉尘及复杂背景条件下识别准确率较低,难

以满足煤矿安全管理的实时性与可靠性要求。

改进 YOLO 算法通过深度卷积网络实现多尺度目标检测,具有较高的识别速度与检测精度,因此适合应用于煤矿井下实时监控场景。在具体实现过程中,系统首先通过视频流采集模块获取井下监控画面,并利用优化后的目标检测模型对人员目标进行实时识别;随后通过姿态估计与行为分析算法对人员运动状态进行分析,判断是否存在接近危险区域或失衡跌落的风险;最终结合风险等级判定机制,实现对异常行为的快速预警。

2.2 方案设计

2.2.1 井下复杂环境下的目标检测模型结构优化

针对井下低照度、高粉尘、目标遮挡等问题,对 YOLO 模型进行多尺度特征融合与坐标注意力机制双维度优化,通过数学公式推导实现特征权重自适应分配,提升模型检测精度。

(1) 多尺度特征融合权重计算:

采用加权特征融合方式,将浅层细节特征、中层语义特征、深层全局特征进行加权融合,融合特征图计算如公式 (1) 所示:

$$F_{\text{fusion}} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot F_i$$

式中: F_{fusion} 为融合后特征图; ω_i 为第 i 层特征图自适应权重,满足 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$; F_i 为不同尺度下采样得到的特征图。

通过自适应权重学习,小目标人员特征权重提升 30% 以上,解决井下小目标、遮挡目标漏检问题。

(2) 坐标注意力机制特征加权公式:

引入坐标注意力机制替代传统通道注意力,保留目标空间位置信息,特征增强计算如公式 (2)(3) 所示:

$$z_c = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W X_c(i,j) \tag{2}$$

$$f_{\text{out}} = X \cdot \sigma(z_h) \cdot \sigma(z_w) \tag{3}$$

式中: z_c 为全局平均池化特征; $X_c(i,j)$ 为输入特征图; σ 为 Sigmoid 激活函数; z_h 、 z_w 为水平、垂直方向坐标注意力权重; f_{out} 为注意力增强后特征。

通过坐标注意力加权,模型对危险区域人员目标特征提取精度提升 12.3%。

2.2.2 基于姿态识别与轨迹分析的跌落风险行为判定方法

在实现人员目标检测的基础上,进一步构建跌落风险行为判定模型,是提升安全监测能力的重要环节。与传统基于单帧图像分析的方法不同,本研究采用骨骼姿态估计与运动轨迹追踪相结合的方式,对人员行为进行动态分析。

首先，通过姿态识别算法提取人体关键点信息，如头部、肩部、膝关节及脚部等关键节点，并构建人体骨骼结构模型。通过对关键点位置关系的分析，可以判断人员身体姿态是否出现异常变化，例如身体重心偏移、倾斜角度增大或突然失去平衡等情况。其次，结合目标跟踪算法对人员运动轨迹进行连续记录，通过分析人员移动路径与危险区域之间的空间关系，实现对风险行为的提前识别。例如，当人员持续靠近煤仓边缘或跨越防护区域时，系统可根据预设规则判断其行为是否具有跌落风险。

2.2.3 基于边缘计算的实时检测与多级预警机制

为了满足煤矿安全监控系统对实时性的要求，本文在系统架构中引入边缘计算技术，通过部署轻量化模型实现高效的视频数据处理。在传统集中式计算模式下，井下视频数据需要传输至地面服务器进行分析，容易产生网络延迟，影响风险预警的及时性。通过在井下边缘计算设备中部署优化后的 YOLO 模型，可以直接在本地完成目标检测与行为分析，从而大幅降低数据传输延迟。在模型设计方面，通过网络结构剪枝和参数压缩技术构建轻量化模型，使检测速度达到 200FPS 以上，能够满足井下实时监测需求。在风险预警机制方面，系统根据识别结果设置不同等级的预警策略。当检测到人员接近危险边界或出现异常姿态时，系统首先触发现场声光报警装置，对作业人员进行即时提醒；同时将风险信息上传至地面调度中心，在监控平台弹出预警提示；对于持续存在的高风险行为，还可通过人员定位系统向相关作业人员发送定向提醒信息。

2.3 实验结果

为验证改进 YOLO 算法在煤矿主运输系统人员跌落风险识别中的有效性，本研究选取某大型煤矿主运输系统作为实验应用场景，在破碎机平台、煤仓入口以及皮带转载点等高风险区域部署视频监测设备，并构建包含井下低照度、高粉尘及人员遮挡等复杂环境条件的视频数据集。实验过程中共采集监控视频数据约 120 小时，从中标注有效图像样本约 2.8 万帧，并对改进模型与传统 YOLO 模型进行对比测试。评价指标主要包括平均检测精度（mAP₅₀）、误报率以及系统响应时间等关键指标。实验结果表明，经过多尺度特征融合与坐标注意力机制优化后的模型在井下复杂环境中的识别性能明显提升。系统在边缘计算设备上运行稳定，能够实现实时检测与快速预警，具体实验结果如表 1 所示：

从实验数据可以看出，改进 YOLO 模型在人员目标检测精度方面提升约 6.7 个百分点，同时误报率显著降低。

依托边缘计算平台，系统检测速度达到 200FPS 以上，可实现对井下视频流的实时分析。在现场运行阶段，通过与声光报警装置及调度监控系统联动，当人员靠近煤仓边缘或进入危险区域时系统能够在 10 秒内完成风险识别与预警。根据矿井安全管理部门统计，在系统投入运行后的 6 个月内，破碎机和煤仓等危险区域的人员跌落相关事故发生率同比下降 82% 以上。

表1 改进YOLO算法与传统模型性能对比

模型类型	平均检测精度mAP ₅₀	误报率	平均响应时间	处理速度
传统YOLO模型	86.5%	0.061	18s	135FPS
改进YOLO模型	93.2%	0.019	9.6s	205FPS

3 后续完善措施

3.1 构建多源感知融合的风险识别体系

在煤矿主运输系统人员跌落风险识别应用取得初步成效的基础上，进一步提升系统稳定性与识别准确率，需要构建多源感知融合的安全监测体系。目前多数系统主要依赖视频数据进行人员识别，但在井下粉尘浓度较高或设备遮挡严重的情况下，单一视觉信息仍可能出现短时识别失效问题。因此，应在视频监测基础上引入多种传感技术，如人员定位系统、惯性传感器以及激光扫描设备等，实现多源数据融合分析。同时，利用激光测距或深度摄像设备可以对危险边界区域进行三维建模，从而更加精准地识别人员与危险区域之间的距离关系。

3.2 持续优化算法模型与数据训练机制

在 AI 视频识别系统实际应用过程中，算法模型的持续优化对于提升识别精度具有重要意义。煤矿井下环境具有明显的场景差异，不同矿井在光照条件、设备布局及作业方式等方面存在差别，因此需要通过不断扩充训练数据和优化模型结构来提升算法的适应能力。首先，应建立覆盖多种井下环境的训练数据集，通过采集不同照度、粉尘浓度以及设备遮挡条件下的视频样本，增强模型对复杂环境的泛化能力。其次，可通过引入半监督学习或迁移学习方法，在有限标注数据条件下进一步提升模型训练效率。此外，在模型结构优化方面，可以结合轻量化网络设计与动态推理机制，提高算法在边缘设备上的运行效率。同时，通过在线学习机制对系统运行过程中采集的新数据进行持续训练，使模型能够不断适应新的作业环境。

3.3 完善智能预警与安全管理联动机制

当前视频识别系统主要承担风险监测与报警功能，但

在实际生产管理中,预警信息的快速传递与处理同样至关重要。因此,应将智能识别系统与矿井调度管理平台、人员定位系统及安全管理系统进行深度融合,实现信息共享与协同管理。例如,当系统检测到人员进入危险区域或出现跌落风险行为时,除了触发现场声光报警外,还应将预警信息同步传输至地面调度中心,由管理人员进行实时监控和调度指挥。同时,通过人员定位系统可以快速确定作业人员位置,并向相关人员发送定向提醒信息。此外,还可以通过建立风险数据分析平台,对系统运行过程中记录的历史数据进行统计分析,从而识别高风险作业区域和时段,为安全管理决策提供依据。

4 结语

综上所述,煤矿主运输系统人员跌落风险识别是保障矿井安全生产的重要环节。通过对井下环境特点及跌落风险特征进行分析,并结合改进 YOLO 算法构建智能识别与

预警系统,可以显著提升人员目标检测精度和风险识别效率。实验与现场应用结果表明,该方法在复杂井下环境中具有良好的识别性能和实时响应能力。未来,可进一步通过多源数据融合、算法持续优化以及安全管理系统联动等方式完善风险识别体系,从而推动煤矿安全监测技术向更加智能化和精准化方向发展,为智慧矿山建设提供更加可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 齐芳平,石晔,崔志威等.基于改进 YOLOv5 的巡更安全风险识别方法研究[J].上海节能,2023(12): 1876-1881.
- [2] 王士昂.基于驾驶行为检测的车队安全驾驶服务系统的设计与实现[D].北京交通大学,2023.
- [3] 赵乾.基于过程跟踪感知的煤矿员工行为安全风险识别研究[D].中国矿业大学(北京),2023.