

文章编号: 1671-251X(2024)08-0099-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18172

基于 Stair-YOLOv7-tiny 的煤矿井下输送带异物检测

梅晓虎¹, 吕小强², 雷萌³

(1. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司 枣泉煤矿, 宁夏 银川 750000;

2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015;

3. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对现有煤矿井下输送带异物检测方法应对复杂场景适应性差、无法满足实时性和轻量化要求、处理尺寸差异较大异物时表现不佳的问题, 基于轻量化 YOLOv7-tiny 模型进行改进, 提出了一种 Stair-YOLOv7-tiny 模型, 并将其用于煤矿井下输送带异物检测。该模型在高效层聚合网络(ELAN)模块中添加特征拼接单元, 形成阶梯 ELAN(Stair-ELAN)模块, 将不同层级的低维特征与高维特征进行融合, 加强了特征层级间的直接联系, 提升了信息捕获能力, 增强了模型对不同尺度目标和复杂场景的适应性; 针对检测头引入阶梯特征融合(Stair-fusion), 形成阶梯检测头(Stair-head)模块, 通过逐层融合不同分辨率的检测头特征, 增强了中低分辨率检测头的特征表达能力, 实现了特征信息的互补。实验结果表明: Stair-YOLOv7-tiny 模型在输送带异物开源数据集 CUMT-BelT 上的检测效果优于 CBAM-YOLOv5, YOLOv7-tiny 及其轻量化模型, 准确率、平均精度均值、召回率和精确率分别达 98.5%, 81.0%, 82.2% 和 88.4%, 检测速度为 192.3 帧/s; 在某矿井下输送带监控视频分析中, Stair-YOLOv7-tiny 模型未出现漏检或误检, 实现了输送带异物的准确检测。

关键词: 输送带异物检测; YOLOv7-tiny; 多尺度目标检测; Stair-fusion; 高效层聚合网络; 检测头

中图分类号: TD528/634

文献标志码: A

Foreign object detection of coal mine underground conveyor belt based on Stair-YOLOv7-tiny

MEI Xiaohu¹, LYU Xiaoqiang², LEI Meng³

(1. Zaoquan Coal Mine, CHN Energy Ningxia Coal Industry Co., Ltd., Yinchuan 750000, China; 2. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China; 3. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The existing methods for detecting foreign objects in underground coal mine conveyor belts have poor adaptability to complex scenarios, cannot meet real-time and lightweight requirements, and perform poorly when dealing with foreign objects with large size differences. In order to solve the above problems, a Stair-YOLOv7-tiny model is proposed based on the lightweight YOLOv7-tiny model for improvement, and applied to the detection of foreign objects in coal mine underground conveyor belts. This model adds feature concatenation units to the efficient layer aggregation network (ELAN) module to form a Stair-ELAN module. The model fuses low dimensional features from different levels with high-dimensional features, strengthens the direct connection between feature levels, enhances information capture capabilities, and strengthens the model's adaptability to objects of different scales and complex scenes. The introduction of Stair-head feature fusion (Stair-fusion) for detection heads forms a Stair-head module. The model enhances the feature expression capability of medium and

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2024-08-20; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51904197); 天地(常州)自动化股份有限公司科研项目(2022FY0009)。

作者简介: 梅晓虎(1986—), 男, 宁夏银川人, 高级工程师, 硕士, 现从事煤矿信息化与智能化建设方面的工作, E-mail: 15054039@ceic.com。通信作者: 雷萌(1987—), 女, 安徽砀山人, 副教授, 博士, 研究方向为计算机视觉与智能检测, E-mail: lmsiee@cumt.edu.cn。

引用格式: 梅晓虎, 吕小强, 雷萌. 基于 Stair-YOLOv7-tiny 的煤矿井下输送带异物检测[J]. 工矿自动化, 2024, 50(8): 99-104, 111.

MEI Xiaohu, LYU Xiaoqiang, LEI Meng. Foreign object detection of coal mine underground conveyor belt based on Stair-YOLOv7-tiny[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(8): 99-104, 111.



扫码移动阅读

low resolution detection heads by fusing detection head features of different resolutions layer by layer, achieving complementary feature information. The experimental results show that the Stair-YOLOv7 tiny model has better detection performance than CBAM-YOLOv5, YOLOv7 tiny, and its lightweight model on the open-source dataset CUMT BelT for conveyor belt foreign objects. The accuracy, average precision, recall, and precision are 98.5%, 81.0%, 82.2%, and 88.4%, respectively, and the detection speed is 192.3 frames per second. In the video analysis of conveyor belt monitoring in a certain mine, the Stair-YOLOv7-tiny model does not have any missed or false detection, achieving accurate detection of foreign objects in the conveyor belt.

Key words: conveyor belt foreign object detection; YOLOv7-tiny; multi scale object detection; stair feature fusion; efficient layer aggregation network; detection head

0 引言

作为煤炭运输的关键设备,输送带运行状态直接关系到煤矿的生产效率与作业安全^[1-2]。然而,物料中混入的矸石和锚杆等异物极易卡在输送带及其辅助设施之间,导致输送带磨损、划伤甚至撕裂^[3],严重干扰煤矿正常生产,还可能引发安全事故,造成重大经济损失。因此,准确且快速地检测输送带上的异物,对于提高输送带运行的安全性和稳定性至关重要。

基于图像处理的输送带异物检测方法通过提取物体的颜色、纹理、形状、空间关系等特征,对煤与非煤异物图像进行处理,可实现异物自动检测,成为输送带异物检测的研究重点之一。Dou Dongyang 等^[4]针对不同的煤炭运输环境,提取了包括颜色、纹理等 19 个特征,利用 Relief-支持向量机(Relief-Support Vector Machine, Relief-SVM)实现了异物识别。王燕等^[5]将图像预处理、帧间差分与卡尔曼滤波相结合,实现了大块异物自动识别。程健等^[6]通过改进的高斯混合模型提取背景信息,减少了背景干扰,有效提升了异物识别效果。上述基于人工特征提取的传统图像处理计算效率高,但特征提取过于依赖专家知识和经验,导致异物检测算法的鲁棒性较差。

随着深度学习的快速发展,以卷积神经网络为基础的异物识别方法利用其自动特征学习能力,显著提高了识别的准确性和可靠性。Pu Yuanyuan 等^[7]利用 VGG16 和迁移学习策略,解决了训练数据不足和计算资源受限的问题,实现了异物的高效识别。程德强等^[8]采用基于 ResNet 的轻量级网络进行异物分类,在资源受限环境下实现了高效分类。曹正远等^[9]利用不含异物的正常煤流图像训练基于双注意力的生成对抗网络,实现了异常煤流图像的识别。杨建辉等^[10]基于双路卷积神经网络,实现了煤和异物的识别。基于卷积神经网络的异物识别方法在准确性上取得了显著效果,但在应对复杂场景方面仍

存在不足。近年来,目标检测算法凭借其对复杂场景的适应性,逐渐被用于输送带异物识别领域^[11]。任志玲等^[12]在 CenterNet 中使用深度可分离卷积替代标准卷积,并结合加权特征图融合算法,显著提高了异物检测的准确率和效率。Zhang Mengchao 等^[13]利用深度可分离卷积技术对 YOLOv4 的主干网络和颈部网络进行优化,构建了轻量级的 YOLOv4,在保持异物检测精度的同时,提升了检测速度。郝帅等^[14]使用结合 YOLOv5 与卷积块注意力模型(Convolutional Block Attention Module, CBAM)的 CBAM-YOLOv5,有效解决了煤尘和输送带高速运行对异物检测精度的影响。高涵等^[15]针对细长物体检测效果差的问题,设计了一种基于低层次特征增强与 Transformer 机制的异物检测算法。上述目标检测算法在复杂场景下的检测性能有所提高,但在满足实时性和轻量化要求方面仍面临挑战。YOLOv7-tiny 通过引入模型重参数化、高效层聚合网络(Efficient Layer Aggregation Networks, ELAN)及辅助头训练方法,不仅显著提高了推理效率,还减少了计算开销^[16-17]。然而,在处理尺寸多样的异物时,多尺度目标检测性能仍有待进一步提升^[18]。

本文在 YOLOv7-tiny 模型的基础上进行改进,提出了一种 Stair-YOLOv7-tiny 模型,并应用于煤矿井下输送带异物检测。一方面,改进 ELAN 结构,通过引入阶梯 ELAN(Stair-ELAN)模块,实现高低维特征的融合,优化特征层间的信息流动,从而增强信息捕获能力;另一方面,优化检测头设计,通过引入阶梯检测头(Stair-head)模块,强化不同分辨率检测头之间的特征融合,弥补传统检测头中单一尺度特征的不足,实现特征信息的互补,从而提升模型的多尺度目标检测能力。

1 Stair-YOLOv7-tiny 模型

为满足多尺度异物检测的需求,针对 YOLOv7-tiny 的 ELAN 模块和 3 个检测头进行改进,构建

Stair-YOLOv7-tiny 模型, 通过融合不同层级的低维与高维特征, 丰富检测头模块中的高维语义特征, 从而有效提升输送带异物检测性能。Stair-YOLOv7-tiny 模型主要由骨干网络、特征融合模块和 Stair-head 模块组成, 如图 1 所示。骨干网络主要用于抽

取低维的边缘、纹理特征, 并逐步生成丰富的高维语义特征; 特征融合模块将骨干网络中的低维特征与高维特征融合, 增强模型的特征表达能力; Stair-head 模块从融合后的特征中提取待测目标的位置及类别信息, 实现异物识别。

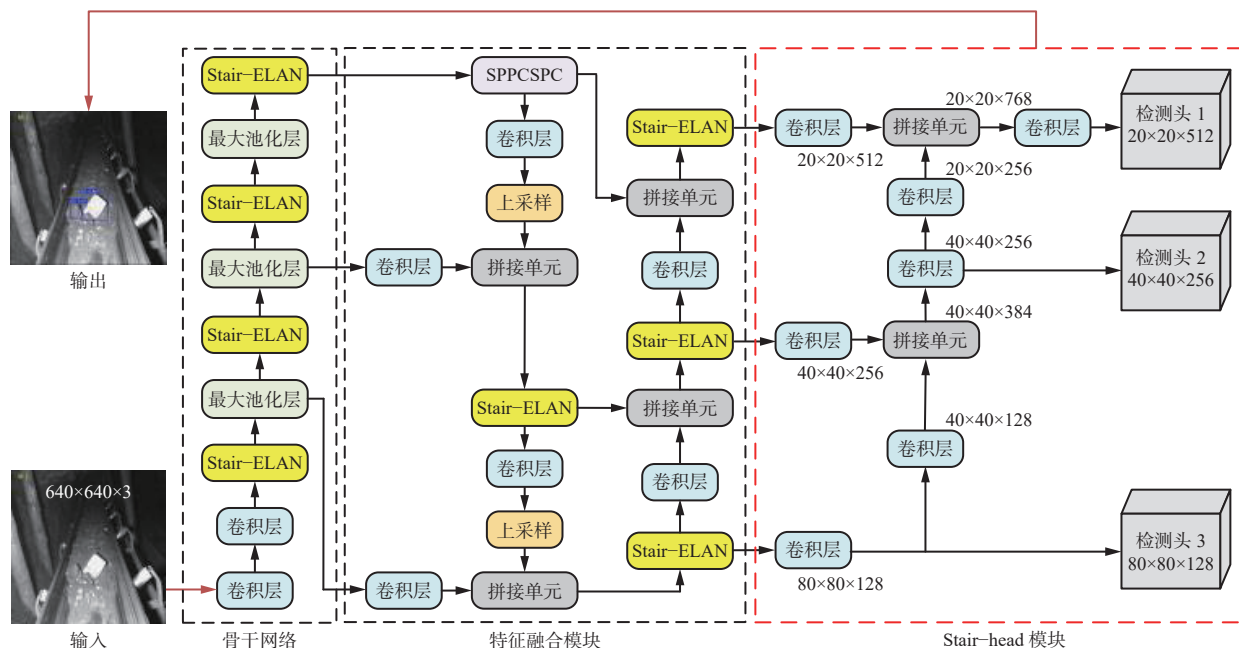


图 1 Stair-YOLOv7-tiny 模型结构

Fig. 1 Structure of Stair-YOLOv7-tiny model

1.1 Stair-ELAN 模块

ELAN 模块将不同层级的卷积特征沿通道维度进行堆叠, 缩短了模型训练过程中梯度传播的路径长度, 有助于缓解常见的梯度消失和梯度爆炸问题, 从而提升模型训练的稳定性和效率^[19]。然而, ELAN 模块在特征融合上过分依赖数据堆叠, 若前后层级的卷积输出距离较远, 堆叠中的特征联系可能变得稀疏, 增加了从融合特征中提取有效信息的难度。为解决该问题, 本文对 ELAN 模块进行改进, 设计了 Stair-ELAN 模块, 如图 2 所示。通过在 ELAN 模块中添加特征拼接单元, 将低维特征与高维特征进行融合, 得到分辨率为 $40 \times 40 \times 128$ 的融合特征, 进一步丰富特征数据的层级融合信息。这种阶梯特征融合 (Stair-fusion) 策略缩短了信息流动的路径, 加强了高维特征与低维特征间的直接联系, 从而提升了模型对信息的捕获能力。由于特征在各层间的直接传递, 模型能更有效地利用高维特征的语义信息和低维特征的细节信息, 这不仅有助于模型加速收敛, 而且有利于提升模型学习复杂模式的能力。

1.2 Stair-head 模块

YOLOv7-tiny 模型通过 3 个不同的卷积操作生成 3 种不同分辨率的检测头, 然而这些检测头之间

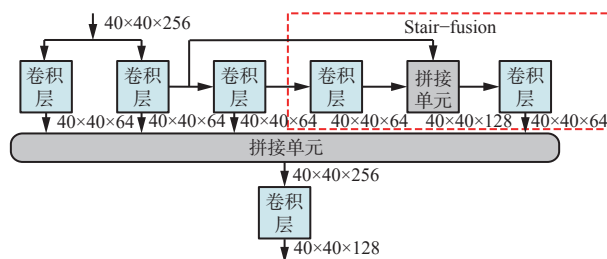


图 2 Stair-ELAN 模块结构

Fig. 2 Structure of stair-efficient layer aggregation networks (ELAN) modular

的特征数据关联性较弱, 面对环境复杂、目标尺寸多样的井下视频图像时, 可能导致目标置信度不足和漏检问题。为增强多尺度特征间的关联性并丰富中低分辨率检测头的特征信息, 本文提出了 Stair-head 模块。与传统方法在不同尺度上独立进行检测不同, Stair-head 模块从高分辨率检测头开始提取特征, 然后依次与中低分辨率检测头的特征融合, 逐渐增强中低分辨率检测头对细节信息的捕捉能力。引入 Stair-fusion 后, 不同层级的检测头之间可以共享特征信息, 形成更加丰富的特征表达, 弥补了单一尺度特征的不足, 实现了特征信息的互补, 从而在复杂场景和多尺度目标检测中提升了模型的检测精度及对小尺寸目标的识别能力。

2 实验与结果分析

2.1 数据集

从真实煤矿井下输送带监控视频中抽取图像并构建输送带异物开源数据集 CUMT-BelT, 其中包含矽石图像、锚杆图像各 2 000 张。为评估基于 Stair-YOLOv7-tiny 的煤矿井下输送带异物检测算法在真实场景下的检测效果, 对数据集进行清洗, 并使用 LabelImg 对数据进行标注, 得到 2 943 张有效图像, 其中包含矽石图像 1 514 张、锚杆图像 1 429 张。按照 8:1:1 的比例将数据集随机划分成训练集、验证集和测试集, 用于模型训练和性能评估。

异物尺寸分布如图 3 所示, 尺寸范围从十几像素到几百像素不等, 涵盖了各种大小和形状的目标, 以便评估模型的多尺度目标检测能力。

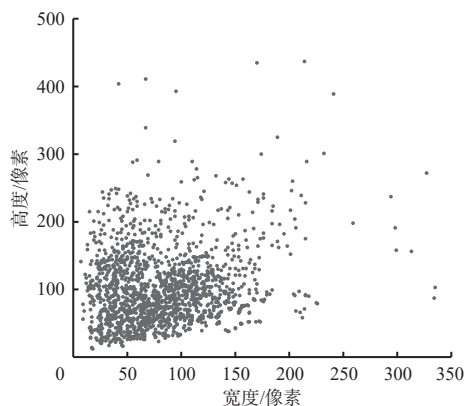


图 3 异物尺寸分布

Fig. 3 Distribution of foreign object size

2.2 模型训练

主要软硬件配置为 Intel(R) Core(TM) i9-10980XE CPU @ 3.00 GHz 处理器、48 GiB 的 NVIDIA

RTX A6000 GPU、Ubuntu 20.04 操作系统, 使用 PyTorch 框架进行训练及推理。超参数设置: 迭代轮次为 500, 初始学习率为 0.01, 并在训练末期调整至 0.001; 使用动量梯度下降法对参数进行更新, 权重衰减系数为 0.005; 使用 Mosaic 数据增强算法增加训练数据的多样性; 测试阶段, 模型的置信度阈值为 0.5, 交并比阈值为 0.65。

模型在训练过程中的损失函数值变化曲线如图 4 所示。可看出当迭代次数达到 100 左右时模型初步收敛; 在 500 轮迭代后模型收敛。模型训练结束后, 选择在验证集上表现最佳的模型在测试集上评估其性能。

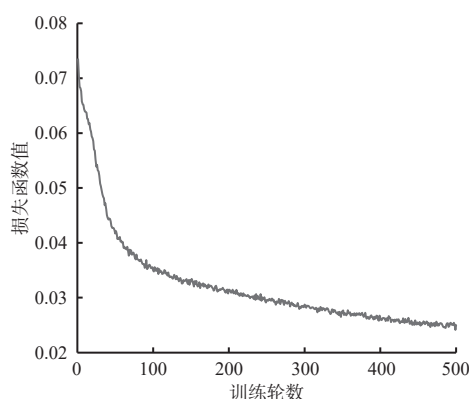


图 4 损失函数值变化曲线

Fig. 4 Loss function value change curve

2.3 实验结果

2.3.1 性能对比

为验证 Stair-YOLOv7-tiny 的优越性, 与 CBAM-YOLOv5^[14], YOLOv7-tiny^[16], YOLOv7-tiny-Ghost^[20], YOLOv7-tiny-MobileNetv2^[21], YOLOv7-tiny-ShuffleNetv2^[22]模型进行性能对比, 结果见表 1。

表 1 不同模型性能对比结果

Table 1 Performance comparison results of different models

模型	精确率/%	召回率/%	平均精度均值/%	准确率/%	浮点运算数/ 10^9	单帧推理时间/ms	检测速度/(帧·s ⁻¹)
CBAM-YOLOv5	87.8	80.3	78.2	94.7	113.2	16.2	61.7
YOLOv7-tiny	85.3	80.1	76.5	94.2	13.0	4.8	208.3
YOLOv7-tiny-Ghost	87.5	79.5	78.0	95.4	10.4	5.9	169.5
YOLOv7-tiny-MobileNetv2	85.1	79.0	76.3	93.1	15.2	14.3	69.9
YOLOv7-tiny-ShuffleNetv2	86.1	74.4	75.2	91.6	9.1	7.0	142.9
Stair-YOLOv7-tiny	88.4	82.2	81.0	98.5	19.3	5.2	192.3

从表 1 可看出, Stair-YOLOv7-tiny 的精确率、召回率、平均精度均值和准确率均最高, 分别达 88.4%、82.2%、81.0% 和 98.5%, 较基准模型 YOLOv7-tiny 分别提升了 3.6%、2.6%、5.9% 和 4.6%。与目前较为先进的输送带异物检测模型 CBAM-YOLOv5 相比, Stair-YOLOv7-tiny 模型整体检测性能表现更优, 主

要原因是 CBAM-YOLOv5 模型只针对大块矽石设计, 未针对小尺寸异物进行特别优化, 而 Stair-YOLOv7-tiny 利用 Stair-fusion 提高了对尺寸各异的矽石与锚杆的检测效果, 且模型复杂度仅为 CBAM-YOLOv5 的 17.1%。与 YOLOv7-tiny 的轻量化变体模型(YOLOv7-tiny-Ghost, YOLOv7-tiny-MobileNetv2

和 YOLOv7-tiny-ShuffleNetv2)相比, Stair-YOLOv7-tiny 模型在单位时间内处理的图像数据量最大,检测速度达 192.3 帧/s,远高于监控摄像机的常规帧速率(25 帧/s),验证了 Stair-YOLOv7-tiny 在输送带异物检测任务中的高效性。

2.3.2 消融实验

为验证 Stair-ELAN 模块和 Stair-head 模块对异物检测效果的提升作用,以 YOLOv7-tiny 为基准模型进行消融实验,结果见表 2。可看出使用 Stair-

ELAN 模块替换 ELAN 模块后,与 YOLOv7-tiny 相比,准确率和平均精度均值分别提升了 1.2% 和 1.7%,单帧推理时间仅增加了 0.1 ms;引入 Stair-head 模块后,虽然单帧推理时间增加了 0.3 ms,但准确率和平均精度均值分别实现了 3.1% 和 3.7% 的提升;当 Stair-ELAN 和 Stair-head 模块同时引入 YOLOv7-tiny 模型时,单帧推理时间增加了 0.4 ms,但精确率、召回率、平均精度均值和准确率均达到最优,证明了 Stair-fusion 在提升模型性能方面的有效性。

表 2 消融实验对比结果
Table 2 Comparison results of ablation experiment

Stair-ELAN	Stair-head	精确率/%	召回率/%	平均精度均值/%	准确率/%	单帧推理时间/ms	检测速度/(帧·s ⁻¹)
×	×	85.3	80.1	76.5	94.2	4.8	208.3
√	×	86.5	81.4	77.8	95.3	4.9	204.1
×	√	87.1	82.0	79.3	97.1	5.1	196.1
√	√	88.4	82.2	81.0	98.5	5.2	192.3

2.3.3 可视化结果

为直观评估复杂矿井环境下输送带异物检测性能,通过摄像机实时采集山东某矿井下输送带多点监控视频,并经过井下千兆环网传送到地面监控中心,在监控中心服务器部署相关模型,执行输送带异物检测任务。不同场景下 CBAM-YOLOv5, YOLOv7-tiny, YOLOv7-tiny-Ghost 和 Stair-YOLOv7-tiny 模型的识别效果如图 5 所示(使用红色和蓝色矩形框分别表示矽石和锚杆,使用黄色圆圈表示漏检区域)。

可看出在场景 1 中, YOLOv7-tiny 未能检测到远处的矽石异物;在场景 2 中, CBAM-YOLOv5, YOLOv7-tiny 和 YOLOv7-tiny-Ghost 模型对于密集场景中相邻矽石的检测均显现出不足,漏检问题较为明显;在场景 3 中,上述 3 种模型均未能识别出紧邻矽石的锚杆;在 3 种场景中, Stair-YOLOv7-tiny 模型均未发生漏检和误检情况,证明了该模型在复杂环境下依然具有较强的异物识别能力。

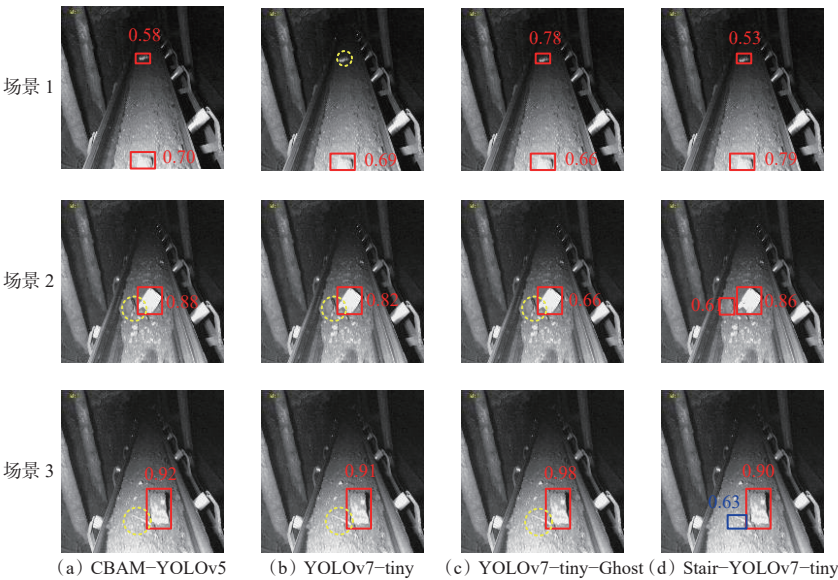


图 5 不同模型的输送带异物检测结果

Fig. 5 Conveyor belt foreign object detection results of different models

3 结论

1) 在 YOLOv7-tiny 的基础上,引入 Stair-fusion

策略,设计了 Stair-ELAN 模块,显著增强了模型对不同尺度特征的捕捉能力;利用 Stair-head 模块进一步融合 3 个不同分辨率的检测头特征,实现了特征

信息的有效互补,从而提高了对多尺度目标的检测精度。

2) 在输送带异物开源数据集 CUMT-BelT 上进行实验,结果表明所提 Stair-YOLOv7-tiny 模型的输送带异物检测效果优于 CBAM-YOLOv5, YOLOv7-tiny 及其轻量化模型,异物检测的准确率、平均精度均值、召回率和精确率分别达 98.5%, 81.0%, 82.2% 和 88.4%, 检测速度达 192.3 帧/s。在某矿井下输送带监控视频上的测试结果表明, Stair-YOLOv7-tiny 模型在不同场景下均未出现漏检或误检,可实现输送带异物准确检测。

参考文献(References):

- [1] YAN Pengcheng, SUN Quansheng, YIN Nini, et al. Detection of coal and gangue based on improved YOLOv5.1 which embedded scSE module[J]. Measurement, 2022, 188. DOI: [10.1016/j.measurement.2021.110530](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110530).
- [2] WANG Yong, JIANG Zhipeng, WANG Yihan, et al. Intelligent detection of foreign objects over coal flow based on improved GANomaly[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2024, 46(3): 5841-5851.
- [3] WANG Xi, GUO Yongcun, WANG Shuang, et al. Rapid detection of incomplete coal and gangue based on improved PSPNet[J]. Measurement, 2022, 201. DOI: [10.1016/j.measurement.2022.111646](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111646).
- [4] DOU Dongyang, WU Wenze, YANG Jianguo, et al. Classification of coal and gangue under multiple surface conditions via machine vision and relief-SVM[J]. Powder Technology, 2019, 356: 1024-1028.
- [5] 王燕, 郭潇楠, 刘新华. 带式输送机大块异物视觉检测系统设计[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(12): 1939-1943.
WANG Yan, GUO Xiaoqiang, LIU Xinhua. Design of visual detection system for large foreign body in belt conveyor[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(12): 1939-1943.
- [6] 程健, 王东伟, 杨凌凯, 等. 一种改进的高斯混合模型煤矸石视频检测方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(1): 118-123.
CHENG Jian, WANG Dongwei, YANG Ling kai, et al. An improved Gaussian mixture model for coal gangue video detection[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(1): 118-123.
- [7] PU Yuanyuan, APEL D B, SZMIGIEL A, et al. Image recognition of coal and coal gangue using a convolutional neural network and transfer learning[J]. Energies, 2019, 12(9). DOI: [10.3390/en12091735](https://doi.org/10.3390/en12091735).
- [8] 程德强, 徐进洋, 寇旗旗, 等. 融合残差信息轻量级网络的运煤皮带异物分类[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1361-1369.
CHENG Deqiang, XU Jinyang, KOU Qiqi, et al. Lightweight network based on residual information for foreign body classification on coal conveyor belt[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1361-1369.
- [9] 曹正远, 蒋伟, 方成辉. 基于双注意力生成对抗网络的煤流异物智能检测方法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(12): 56-62.
CAO Zhengyuan, JIANG Wei, FANG Chenghui. Intelligent detection method for coal flow foreign objects based on dual attention generative adversarial network[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(12): 56-62.
- [10] 杨建辉, 黄子洋, 汪梅, 等. 机器视觉灰度化金字塔卷积模型的煤流异物识别[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 194-201.
YANG Jianhui, HUANG Ziyang, WANG Mei, et al. Recognition of unwanted objects in coal flow based on gray pyramid convolution model of machine vision[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 194-201.
- [11] 薛旭升, 杨星云, 齐广浩, 等. 煤矿带式输送机分拣机器人异物识别与定位系统设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 33-41.
XUE Xusheng, YANG Xingyun, QI Guanghao, et al. Design of foreign object recognition and positioning system for sorting robot of coal mine belt conveyor[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 33-41.
- [12] 任志玲, 朱彦存. 改进 CenterNet 算法的煤矿皮带运输异物识别研究[J]. 控制工程, 2023, 30(4): 703-711.
REN Zhiling, ZHU Yancun. Research on foreign object detection of coal mine belt transportation with improved CenterNet algorithm[J]. Control Engineering of China, 2023, 30(4): 703-711.
- [13] ZHANG Mengchao, CAO Yueshuai, JIANG Kai, et al. Proactive measures to prevent conveyor belt failures: deep learning-based faster foreign object detection[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 141. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2022.106653](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106653).
- [14] 郝帅, 张旭, 马旭, 等. 基于 CBAM-YOLOv5 的煤矿输送带异物检测[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 4147-4156.
HAO Shuai, ZHANG Xu, MA Xu, et al. Foreign object detection in coal mine conveyor belt based on CBAM-YOLOv5[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 4147-4156.

(下转第 111 页)

- algorithm based on YOLOv5s improvement[J]. *Coal*, 2023, 32(3): 22-25.
- [15] 曹帅, 董立红, 邓凡, 等. 基于 YOLOv7-SE 的煤矿井下场景小目标检测方法[J]. *工矿自动化*, 2024, 50(3): 35-41.
- CAO Shuai, DONG Lihong, DENG Fan, et al. A small object detection method for coal mine underground scene based on YOLOv7-SE[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(3): 35-41.
- [16] 王科平, 连凯海, 杨艺, 等. 基于改进 YOLOv4 的综采工作面目标检测[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(2): 70-76.
- WANG Keping, LIAN Kaihai, YANG Yi, et al. Target detection of the fully mechanized working face based on improved YOLOv4[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(2): 70-76.
- [17] 顾清华, 何鑫鑫, 王倩, 等. 基于改进 YOLOv5 的煤矿井下暗环境矿工安全穿戴智能识别[J]. *矿业研究与开发*, 2024, 44(3): 201-208.
- GU Qinghua, HE Xinxin, WANG Qian, et al. Research on intelligent recognition of safety wearing of miners in dark environment of coal mine based on improved YOLOv5[J]. *Mining Research and Development*, 2024, 44(3): 201-208.
- [18] 寇发荣, 肖伟, 何海洋, 等. 基于改进 YOLOv5 的煤矿井下目标检测研究[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(7): 2642-2649.
- KOU Farong, XIAO Wei, HE Haiyang, et al. Research on target detection in underground coal mines based on improved YOLOv5[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(7): 2642-2649.
- [19] GE Zheng, LIU Songtao, WANG Feng, et al. Yolox: Exceeding YOLO series in 2021[Z/OL]. [2024-04-23]. <https://arxiv.org/pdf/2107.08430>.
- [20] YU F, KOLTUN V. Multi-scale context aggregation by dilated convolutions[Z/OL]. [2024-04-23]. <https://arxiv.org/pdf/1511.07122>.
- [21] DAI Jifeng, QI Haozhi, XIONG Yuwen, et al. Deformable convolutional networks[C]. The IEEE International Conference on Computer Vision, Venice, 2017: 764-773.
- [22] QI Yaolei, HE Yuting, QI Xiaoming, et al. Dynamic snake convolution based on topological geometric constraints for tubular structure segmentation[C]. The IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, Paris, 2023: 6070-6079.
- [23] LIU Huajun, LIU Fuqiang, FAN Xinyi, et al. Polarized self-attention: towards high-quality pixel-wise regression[Z/OL]. [2024-04-23]. <https://arxiv.org/pdf/2107.00782>.
- ~~~~~
- (上接第 104 页)
- [15] 高涵, 赵培培, 于正, 等. 基于特征增强与 Transformer 的煤矿输送带异物检测[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(7): 199-208.
- GAO Han, ZHAO Peipei, YU Zheng, et al. Coal mine conveyor belt foreign object detection based on feature enhancement and Transformer[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(7): 199-208.
- [16] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. YOLOv7: trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[C]. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vancouver, 2023: 7464-7475.
- [17] 唐俊, 李敬兆, 石晴, 等. 基于 Faster-YOLOv7 的带式输送机异物实时检测[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(11): 46-52, 66.
- TANG Jun, LI Jingzhao, SHI Qing, et al. Real time detection of foreign objects in belt conveyors based on Faster-YOLOv7[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(11): 46-52, 66.
- [18] 付翔, 秦一凡, 李浩杰, 等. 新一代智能煤矿人工智能赋能技术研究综述[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(9): 122-131, 139.
- FU Xiang, QIN Yifan, LI Haojie, et al. Summary of research on artificial intelligence empowerment technology for new generation intelligent coal mine[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(9): 122-131, 139.
- [19] ZHANG Xindong, ZENG Hui, GUO Shi, et al. Efficient long-range attention network for image super-resolution[C]. European Conference on Computer Vision, Tel Aviv, 2022: 649-667.
- [20] ZHANG Bin, XIAO Deqin, LIU Junbin, et al. Pig eye area temperature extraction algorithm based on registered images[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 217. DOI: [10.1016/j.compag.2023.108549](https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108549).
- [21] JIA Kunming, NIU Qunfeng, WANG Li, et al. A new efficient multi-object detection and size calculation for blended tobacco shreds using an improved YOLOv7 network and LWC algorithm[J]. *Sensors*, 2023, 23(20). DOI: [10.3390/s23208380](https://doi.org/10.3390/s23208380).
- [22] MA Ningning, ZHANG Xiangyu, ZHENG Haitao, et al. ShuffleNet V2: practical guidelines for efficient CNN architecture design[C]. European Conference on Computer Vision, Munich, 2018: 122-138.