

引用格式:许凯,雷斯聪,范崇盛,等.基于语义分割的钢材缺陷检测算法[J].有色设备,2024,38(2):59-64.

XU Kai, LEI Sicong, FAN Chongsheng, et al. Steel defect detection algorithm based on semantic segmentation[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(2): 59-64.

基于语义分割的钢材缺陷检测算法

许凯,雷斯聪,范崇盛,蒋佳茗,张雪迎

(上海航天设备制造总厂有限公司,上海 200245)

[摘要] 针对语义分割算法在钢材缺陷检测的实际应用与研究较少,以及传统语义分割方法对缺陷分割精度较低的情况,提出基于 HRNet(High-Resolution Net)的钢材表面缺陷深度高分辨率特征检测方法。该方法采用多级网络并联架构保持高分辨率特征,通过并行多分辨率卷积和重复多分辨率融合机制提取强位置敏感度的高分辨率特征,结合 HRNet 对增强数据集进行冻结训练与迁移学习,最终实现钢材表面缺陷图像的高精度分割。试验表明,该方法对钢材缺陷具有较好的分割效果,其平均交并比(MIOU)指标和平均像素精度(MPA)指标分别达到 94.92% 和 97.64%。

[关键词] HRNet; 钢材缺陷; 并行多分辨率卷积; 重复多分辨率融合

[中图分类号] TP273

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2024)02-0059-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.02.010

0 引言

随着国家对高质量钢发展要求,钢材在生产以及成品阶段的质量检测需求逐渐提升^[1]。针对生产中因工艺以及设备等限制出现的钢材表面划痕、油斑、氧化皮等缺陷,基于图像处理以及计算机视觉的缺陷检测正逐步取代传统人工检测方式,从而提升检测效率以及精度。

目前对钢材缺陷的主要检测方式为目标识别,主流算法包括单阶段如 SSD(Single Shot MultiBox Detector)、YOLO(You Only Look Once)等算法,双阶段如 R-CNN(Region-Convolutional Neural Networks)、Faster-R-CNN 等算法。卢海滨^[2]通过在 YOLOV5s 的主干网络添加 CA(Coordinate Attention)注意力机制以及 Swin Transformer 自注意力机制提高模型特征提取能力,相比传统 YOLOV5s 将 MPA 提高 6.4%。朱传军等^[3]以 YOLOV5 为架构基础,设计空对深 CA 注意力模块避免下采样过程中的特征信息丢失,从而提高钢材表面小目标对象识别精度。上述几种

钢材的缺陷检测方式主要以目标识别的锚框形式进行判定,但是针对钢材表面缺陷的精确语义分割研究尚少^[4]。蓝王力^[5]通过数据预处理结合语义分割搭建一套钢材缺陷检测实时系统,利用特征级联以及感受以改进增强特征提取能力。钟喜扬^[6]通过设计类残差模块网络实现对带钢表面的实时端到端像素级检测。上述几种对缺陷的语义分割基于常见的高阶与低阶特征信息相互维度转换的方式进行,在高阶向低阶压缩或低阶向高阶维度扩张时,特征信息的丢失不可避免。

本文提出一种基于 HRNet(High-Resolution Net)^[7-10]的钢材语义分割模型,采用多级网络并行联接架构,全程维持高分辨率特征取代高低阶信息融合,通过并行多分辨率卷积逐渐增加高分辨率至低分辨率形成并行多分辨率流,利用重复融合机制将跨分辨率间的特征进行信息交互,提升空间敏感度。采用冻结训练以及迁移学习加快网络收敛,结合高分辨率特征图和精准空间信息实现高精度钢材缺陷识别分割。

1 面向语义分割的高分辨率网络

1.1 HRNet 模型结构

语义分割对位置信息敏感,传统模型基于串联

[收稿日期] 2024-02-10

[第一作者] 许凯(1997—),男,江苏仪征人,助理工程师,硕士,主要研究方向为运载火箭系统测试。

架构进行编码得出低分辨率特征,再将低分辨率特征经过上采样层恢复至输入图像分辨率进行像素级分类,表征空间增加,但实际位置敏感度随着降采样时分辨率丢失而下降。HRNet 全过程保持高分辨

率,子网络间进行重复多尺度融合,学习一个空间敏感度强的高分辨率表征,保留准确的空间信息。模型如图 1 所示。

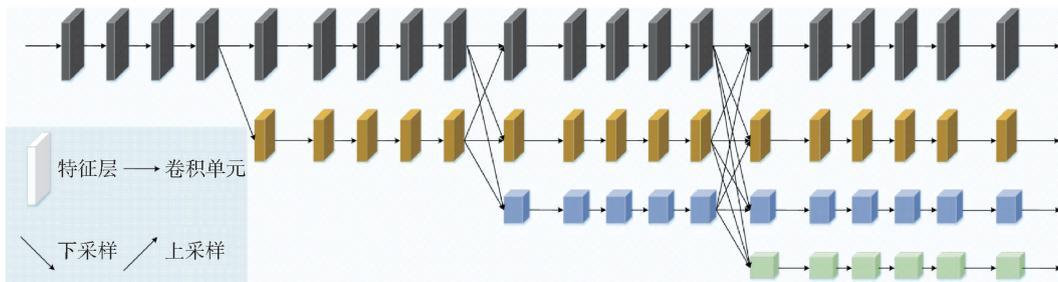


图 1 High-Resolution Net (HRNet) 网络模型图

Fig. 1 High Resolution Net (HRNet) network model diagram

HRNet 由高分辨率到低分辨率子网组成,在并行的子网之间通过重复的多尺度融合丰富特征信息。图 1 中灰色特征层所在阶段为第一阶段,始终维持高分辨网络,保留空间位置敏感度以及高分辨率特征。图 1 中黄色特征层所在阶段为第二阶段,从第二阶段开始依次通过步长为 2 的 3×3 卷积进行下采样形成高至低 (high-to-low) 分辨率子网络,将原有分辨率降低至 $1/4$ 。子网络特征图通过上采样达到前一阶段网络分辨率进行多尺度融合,丰富上层子网络的特征信息。相比串行联接网络,HR-Net 采用多级网络并行联接的方式,全程保留的高分辨率网络取代低至高 (low-to-high) 上采样操作和

高低阶语义信息融合,将相似深度相似级别的低分辨率特征图反复与上层高分辨率特征图进行多尺度融合,提高高分辨率表征信息。

1.2 重复多分辨率融合

重复融合机制将跨分辨率间的特征进行多次信息交互。DeepLabv3+ 模型结合空洞空间金字塔池化模块进行多尺度信息融合,HRNet 结合融合思想具备 2 个特点:(1)融合输出 4 个分辨率特征;(2)采样深度融合策略,对融合模块进行多次重复。图 2 为 3 种分辨率特征融合模块示例,多分辨率特征融合机制依次推导。

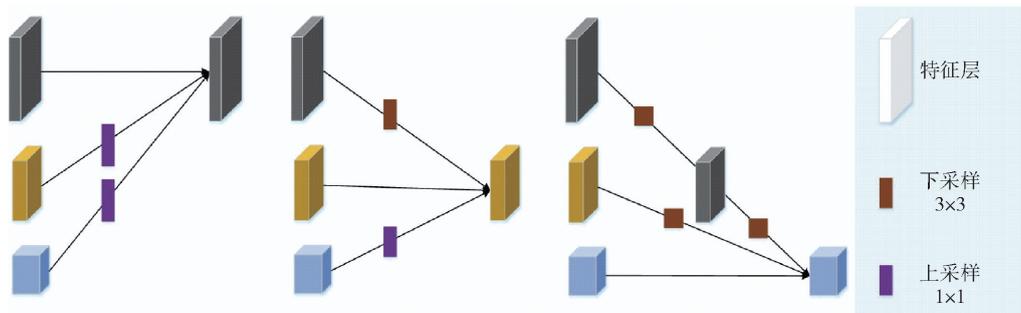


图 2 高中低 3 种分辨率特征融合模块示例

Fig. 2 Example of feature fusion module for high, medium, and low resolutions

引入交换单元实现并行子网之间的信息交互。图 2 中为 3 个阶段进行尺度融合的交流模块,每个模块包含 3 个并行的卷积单元,通过交换单元进行高中低三尺度信息融合。通过 3×3 卷积进行高分辨率特征图下采样, 1×1 卷积进行中低分辨率特征

图的上采样操作,针对不同交换模块设计的交换单元能够提高整体网络性能。输入分辨率特征可表示为 R_m^i ,输出分辨率特征表示为 R_m^o 。其中, m 为 1,2,3 级索引。每个输出特征由三级输入特征经过处理再融合形成,表达式为式(1)。

$$R_m^o = f_{1m}(R_1^i) + f_{2m}(R_2^i) + f_{3m}(R_3^i) \quad (1)$$

式中, $f_{km}(\cdot)$ 为对应上采样或下采样的处理函数, 函数选择取决于输入分辨率索引 k 和输出分辨率索引 m 。若 $k < m$, $f_{km}(R)$ 函数将对输入特征进行单次或连续下采样操作; 相反, 若 $k \geq m$, 则利用双线性上

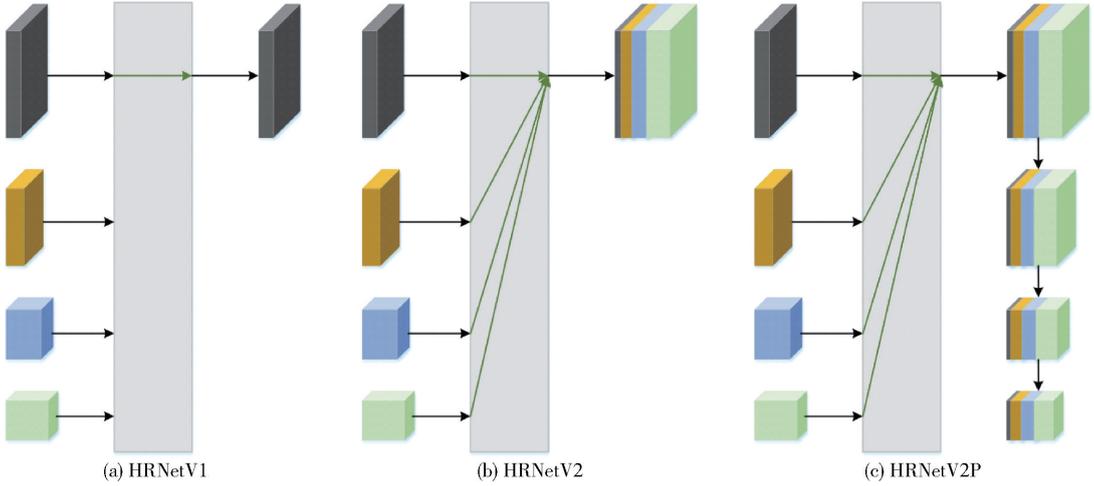


图3 HRNet的3种多尺度融合Representation head图

Fig. 3 Three multi-scale fusion representation head diagrams for HRNet

图3中由左至右依次为HRNetV1、HRNetV2以及HRNetV2P。相比HRNetV1的单个高分辨率特征输出, HRNetV2将低分辨率特征进行双线性上采样调整为高分辨率, 使用 1×1 卷积进行通道数对齐, 达到多尺度特征融合输出原图像分辨率大小特征图进行语义分割分类器预测。而HRNetV2P基于HRNetV2进行多级输出, 常用于构建目标检测模型。

2 试验与结果分析

2.1 数据集构建

本文数据集采用东北大学的钢材缺陷公开数据集(NEU-DET), 本文所用钢材缺陷图像为液体、油斑、氧化皮、划痕。钢材液体以及油斑是生产过程中的残余物, 划痕主要表现为直线状, 在前期生产过程中可能因轧机张力小, 钢材在轧辊中出现相对滑动而产生, 后期可能因运输、装卸等产生。氧化皮则是最为常见的一种钢材缺陷, 主要由于除鳞阶段残留所致。本文所用图像训练集与验证集为9:1, 图像像素大小为 200×200 。在原有数据集基础上, 通过数据增强方式进行扩充样本, 提高模型训练后的泛化性。考虑钢材在实际生产运

采样并进行 1×1 卷积对齐通道数。

Representation head利用并行多分辨率卷积和重复多分辨率融合提取的主干特征进行预测, 如图3所示。

输过程的相对位置, 采用角度增强方式, 考虑在实际外部环境下采用光照增强方式, 通过混合增强将数据样本扩充至945张。

2.2 评价指标

语义分割的客观评价指标主要包含像素精度PA, 平均像素精度MPA以及平均交并比MIOU。以钢材图像为例, 以钢材缺陷作为目标的总体像素数量中经过分割识别正确的像素数量两者比值即为像素精度(PA)。而平均像素精度(MPA)即钢材缺陷像素精度与背景像素精度的平均值。平均交并比(MIOU)即钢材缺陷与对应背景的预测结果和标签结果的交集并集比值。平均准确性(mPrecision)表明钢材缺陷预测结果占有结果准确性的平均值。

2.3 试验结果分析

试验所用软件为python 3.7, opencv-python 4.5.3, pytorch1.7.1。计算机配置为64位windows 10版本, CPU位Intel(R) Core(TM) i7-11800H, GPU为NVIDIA GeForce RTX 3050 Ti。

采用东北大学钢材缺陷公开样本进行试验。数据扩充原则依据光照强度和姿态条件形成多样化均衡数据集。设置输入图片统一为 418×418 , 初始世代为70, batch_size批次为8, 学习率基准定为

0.000 5,采用冻结训练方式加快网络收敛速度。在 70 次世代后,调整 batch_size 批次为 4,解冻训练阶段学习率基准减小至 0.000 05,采用 Adam 优化器。采用迁移学习先对数据集进行预训练,再将预训练权重作为初始训练权重。训练时设置早停机制,在 loss 损失值连续 10 个世代没有降低后,网络将停止权重参数的更新。

将本文算法与传统语义分割方法 PsPNet、DeepLabV3 + 深度学习方法进行对比试验,结果见表 1。由表 1 可见,本文基于 HRNet 的语义分割算法在平

表 1 钢材缺陷图像的语义分割模型评价指标数值对比

Table 1 Comparison of evaluation index values for semantic segmentation models of steel defect images

模型	MIOU	MPA	mPrecision
PsPNet	90.48	93.58	98.59
DeepLabV3 +	89.31	95.05	98.32
本文算法	94.92	97.64	99.25

均交并比和平均像素精度上均明显优于 PsPNet 和 DeepLabV3 + 算法,其 MIOU 达到 94.92%,MPA 达到 97.64%,较 PsPNet 指标分别提升 4.44% 和 4.06%,较 DeeplabV3 + 分别提升 5.61% 和 2.59%。

为便于横向算法比对与纵向原图比对,将网络模型预测图改为掩模图形式,结果如图 4 ~ 图 6 所示。由图 4 可见,液体油斑由于存在表面张力,浮于钢材表面,灰度明显且边界清晰,因此分割掩模图中 3 种算法均有较好表现。由图 5 可见,钢材氧化皮缺陷分割掩模图中 PsPNet 相较其他 2 种算法存在对小目标分割不全情况,缺陷边缘处的平滑度较差,容易产生毛刺。分析原因为 PsPNet 网络特征提取相对较浅,虽然通过金字塔池化增强网络对全局信息和局部信息的敏感性,但是在上采样过程中仍存在细节信息丢失情况。由图 6 可见,钢材划痕缺陷分割掩模图中,PsPNet 与 DeepLabV3 + 算法在顶部划痕分割中均存在识别不足现象,由于划痕在灰度图中为间断性细小线状,识别分割难度大,在下采样

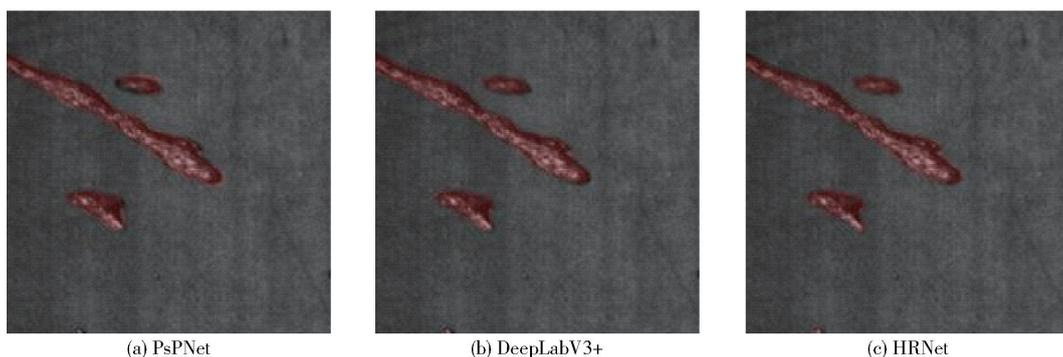


图 4 钢材液体油斑缺陷各网络分割效果比对

Fig. 4 Comparison of segmentation effects of different networks for steel liquid oil spot defects

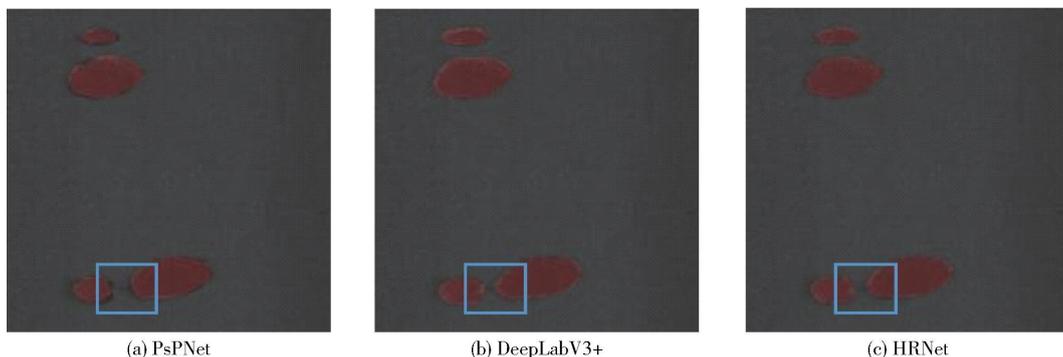


图 5 钢材氧化皮缺陷各网络分割效果比对

Fig. 5 Comparison of segmentation effects of different networks for steel oxide scale defects

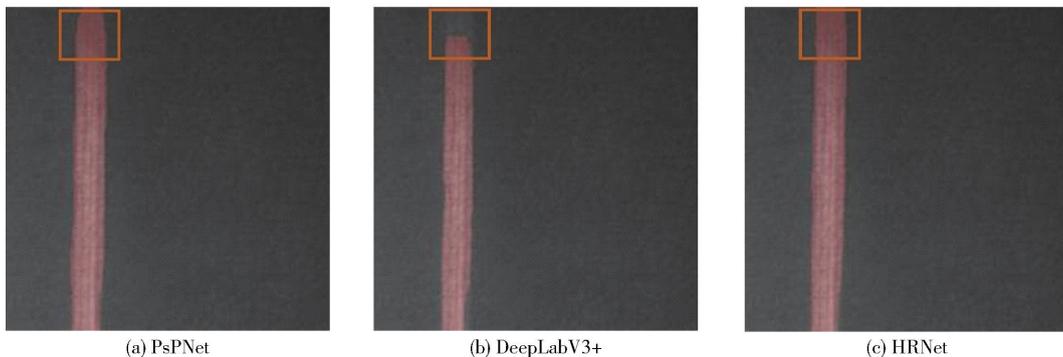


图 6 钢材划痕缺陷各网络分割效果对比

Fig. 6 Comparison of segmentation effects of different networks for steel scratch defects

过程中容易丢失细节,而本文算法中基于 HRNet 全程保持高分辨率特征,保留特征图的位置敏感度。因此,本文方法对钢材各项缺陷目标的像素分割更加精准。

3 结论

1) 针对钢材缺陷检测中语义分割研究尚少,以及分割精度低影响钢材质量评价以及后续处理问题,提出一种基于 HRNet 网络的钢材缺陷检测分割方法,为钢材缺陷高精度识别分割提供新的思路。

2) 语义分割对位置信息敏感,因此需要高分辨率表征。上采样虽然将特征分辨率恢复至高分辨率,但是由于下采样时分辨率丢失实际导致位置敏感度下降。本文基于多级网络并联架构维持高分辨率特征,通过并行多分辨率卷积和重复多分辨率融合机制提取强空间信息的高分辨率特征,保留准确高分辨率空间信息。

3) 通过迁移学习将预训练权重作为初始权重,利用主干冻结训练缩减训练时间,防止初期权重值受到影响,避免权值随机产生的特征不明显,提高模型训练效率。

[参考文献]

- [1] 王国栋. 钢铁行业技术创新和发展方向[J]. 钢铁, 2015, 50(9): 1 - 10.
- [2] 卢海滨. 基于 YOLOv5s 的钢材表面缺陷检测研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [3] 朱传军, 梁泽启, 付强, 等. 针对钢材表面小目标缺陷实时检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(11): 133 - 137.
- [4] 田萱, 王亮, 丁琪. 基于深度学习的图像语义分割方法综述[J]. 软件学报, 2019, 30(2): 440 - 468.
- [5] 蓝王力. 基于语义分割的钢材表面缺陷检测系统的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [6] 钟喜扬. 面向热轧带钢表面缺陷检测的图像语义分割算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [7] WANG Jingdong, SUN Ke, CHENG Tianheng, et al. Deep high-resolution representation learning for visual recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(10): 3349 - 3364.
- [8] 田如帅. 基于深度学习的钢板表面缺陷检测方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [9] 渠逸. 基于 YOLOv5 的表面缺陷检测优化算法[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(5): 80 - 87.
- [10] 张训飞. 基于语义分割的钢材缺陷检测算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.

Steel defect detection algorithm based on semantic segmentation

XU Kai, LEI Sicong, FAN Chongsheng, JIANG Jiaming, ZHANG Xueying

(Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing Co., Ltd, Shanghai 200245, China)

Abstract: This article proposes a high-resolution feature detection method for steel surface defects based on HRNet (High Resolution Net) to address the limited practical application and research of semantic segmentation algorithms in steel defect detection, as well as the low accuracy of traditional semantic segmentation methods in defect segmentation. The method adopts a multi-level network parallel framework to maintain high-resolution features, extracts high-resolution features with strong position sensitivity through parallel multi-resolution convolution and repeated multi-resolution fusion mechanisms, and combines HRNet to perform freeze training and migration learning on the enhanced dataset, ultimately achieving high-precision segmentation of steel surface defect images. The experiment shows that this method has a good segmentation effect on steel defects, with an average intersection to union ratio (MIOU) index and an average pixel accuracy (MPA) index of 94.92% and 97.64%, respectively.

Key words: HRNet; steel defect; parallel multi-resolution convolution; repetitive multi-resolution fusion



敬告读者

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况。本刊开通由中国知网提供的“腾云”网络采编系统,作者投稿请注册并登录本刊主页上的“作者投稿系统”进行相关操作,网址 <https://yssb.cbpt.cnki.net/>。注册登录后可以向本刊投稿并查询稿件处理状态。请勿重复注册,否则可能导致您的信息查询不完整。

本刊文章数字版可在中国知网(<http://www.cnki.net>)、万方数据知识服务平台(<https://www.wanfangdata.com.cn/>)、维普网(<http://www.cqvip.com/>)下载使用。

本刊从未委托任何单位或个人组稿或代收、代转稿件,作者咨询投稿事宜请拨打编辑部办公电话 010-63936591、63933053 联系。

《有色设备》编辑部