

文章编号:1671-5896(2026)04-0908-08

基于 Yolov7-Tiny 的车身漆面损伤检测

任伟建¹, 佟宇航¹, 任璐², 张永丰³

(1. 东北石油大学 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 海洋石油工程股份有限公司
海洋工程技术中心, 天津 300450; 3. 大庆油田有限责任公司 第二采油厂, 黑龙江 大庆 163414)

摘要: 针对 Yolov7-Tiny (You Only Look Once v7 Tiny) 在车身漆面微小损伤以及不明显损伤检测中存在特征提取能力不足、细节信息丢失和计算效率低的问题, 提出一种改进的 Yolov7-Tiny 算法。首先在主干网络中引入 RepNCSPELAN4 (Re-parameterizable Cross Stage Partial Efficient Layer Aggregation Networks) 模块替换 ELAN-Tiny (Efficient Layer Aggregation Networks Tiny) 模块增强模型的特征提取能力; 其次引入 Swish 激活函数以提升模型的非线性表达能力; 最后在颈部网络引入空间到深度卷积 SPDConv (Space to Depth Convolution), 结合改进的 SPDConv_Res (Space to Depth Convolution_Residual) 检测头以保留微小目标的细节信息并平衡参数负担; 并在颈部网络引入分布偏移卷积 DSConv (Distribution Shift Convolution), 保证缺陷特征信息充分融合的同时提升计算效率。在自建数据集上的实验结果表明, 改进后的模型 mAP@50 达到了 86.0%, 相比基线模型提升 7.4%, 计算量降低 3.3×10^9 次。在提升精度的同时, 一定程度上减少了计算资源的需求。

关键词: Yolov7-Tiny 目标检测算法; 缺陷检测; 漆面检测; 空间到深度卷积; 分布偏移卷积

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Surface Damage Detection of Vehicle Paint Based on Yolov7-Tiny

REN Weijian¹, TONG Yuhang¹, REN Lu², ZHANG Yongfeng³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;
2. Marine Engineering Technology Center, Offshore Oil Engineering Company Limited, Tianjin 300450, China;
3. No. 2 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163414, China)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient feature extraction ability, loss of detail information, and low computational efficiency in the detection of minor damages and unobvious damages on the car body paint surface by Yolov7-Tiny (You Only Look Once v7 Tiny), an improved Yolov7-Tiny algorithm is proposed. Firstly, the RepNCSPELAN4 (Re-parameterizable Cross Stage Partial Efficient Layer Aggregation Networks) module is introduced into the backbone network to replace the ELAN-Tiny (Efficient Layer Aggregation Networks Tiny) module, to enhance the feature extraction ability of the model. Secondly, the Swish activation function is introduced to improve the nonlinear expression ability of the model. Finally, the SPDConv (Space to Depth Convolution) is introduced into the neck network. Combined with the improved SPDConv_Res (Space to Depth Convolution_Residual) detection head, it retains the detail information of small targets and balances the parameter burden. The DSConv (Distribution Shift Convolution) is introduced into the neck network, ensuring the full fusion of defect feature information and improving the computational efficiency simultaneously. Experimental results on the self-built dataset show that the mAP@50 of the improved model reaches 86.0%, which is 7.4% higher than that of the baseline model, and the computational amount is reduced by 3.3×10^9 .

收稿日期: 2025-05-07

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (D2022107001)

作者简介: 任伟建 (1963—), 女, 黑龙江泰来人, 东北石油大学教授, 博士生导师, 主要从事油气集输过程故障诊断研究, (Tel) 86-15765988699 (E-mail) renwj@126.com。

times. While improving the accuracy, it also reduces the demand for computational resources to a certain extent.

Key words: You only look once v7 tiny detection algorithm(YOLOv7-Tiny Object Detection Algorithm); defect detection; paint inspection; space to depth convolution (SPDConv); distribution shift convolution (DSConv)

0 引 言

由于车身漆面上细微划痕、轻微凹陷等微小损伤不仅影响车辆的美观, 并且直接关系其市场竞争力, 因此精确识别漆面损伤对确保车身漆面的品质尤为重要。然而传统的人工缺陷质检方法存在精度低、易漏检等问题^[1]。随着汽车行业向“新四化”趋势发展^[2], 车身漆面检测逐渐实现自动化。其中深度学习算法因其较强的鲁棒性和泛化能力得到广泛应用。当前主流深度学习算法可分为以 R-CNN (Region-based Convolutional Neural Networks)^[3] 系列为代表的两阶段算法和以 SSD (Single Shot multibox Detector)^[4]、YOLO (You Only Look Once)^[5] 系列为代表的单阶段算法。其中两阶段算法精度高但检测速度较慢, 单阶段算法速度较快但精度略低^[6]。而 Yolo 系列作为单阶段目标检测算法, 具备较高的准确性, 近年来逐渐用于工业缺陷检测中。

Yolov7^[7] 共分为标准版 Yolov7、增强版 Yolov7X 以及轻量级 Yolov7-Tiny 3 个版本。其中轻量级 Yolov7-Tiny 算法逐渐应用于微小缺陷检测领域: 徐威等^[8] 改进 Yolov7-Tiny 并提出 PSD-Yolo (Partial Spatial and Decoupled fully connected Yolo) 算法, 通过轻量化模块、注意力机制及损失函数优化, 提升光伏电池缺陷检测精度并增强模型可部署性; 阳丽莎等^[9] 采用 GSConv (Grouped Spatial Convolution) 重构 ELAN (Efficient Layer Aggregation Network) 模块, 并引入 SPDConv (Space to Depth Convolution) 与 MPDIoU (Minimum Point Distance Intersection over Union) 损失函数, 提升带钢缺陷检测的精度。

虽然上述研究推动了 Yolov7-Tiny 在缺陷检测领域的应用, 但其仍存在以下局限: 在主干网络的特征提取时, ELAN-Tiny 模块因缺乏跨阶段交互和多尺度特征捕捉能力, 限制了对复杂特征的表达; LeakyReLU 激活函数非线性表达能力弱, 难以捕捉复杂特征; 颈部网络中普通卷积下采样时, 步长操作易使微小目标关键特征丢失; 特征融合阶段过多使用卷积堆叠, 导致参数量和计算量增加, 对检测速度造成一定的影响。

为解决上述问题, 笔者在 Yolov7-Tiny 基础上, 首先在主干网络引入 RepNCSPPELAN4 模块, 通过增强网络深度和跨阶段连接弥补 ELAN-Tiny 在复杂场景下特征提取能力的不足; 引入 Swish 激活函数以增强模型的非线性表达能力; 颈部网络引入空间到深度卷积以缓解下采样时细节特征丢失问题; 并使用结合残差结构的空间到深度卷积作为新的检测头; 最后引入分布偏移卷积, 利用其计算特性优化检测效率。

1 改进的 Yolov7-Tiny 算法

Yolov7-Tiny 结构如图 1 所示, 由输入、主干网络、颈部网络和检测头组成^[10]。输入模块通过调整图像尺寸、Mosaic 数据增强^[11] 和 OpenCV 预处理优化输入数据; 主干网络由普通卷积、ELAN-Tiny 层和 MPConv (Max-Pool Convolution) 卷积层构成; 普通卷积提取特征, ELAN-Tiny 学习特征, MPConv 拼接特征; 颈部网络基于改进的 PAFPN (Path Aggregation Feature Pyramid Network) 架构, 通过自上而下高语义特征与自底向上细粒度特征的张量级联构建跨分辨率交互通道, 并借助跳跃连接保护浅层特征完整性; 检测头部基于融合特征图, 通过多分支架构和预设的锚框参数同步预测目标坐标、类别及定位精度, 集成任务对齐分配器实现正负样本动态匹配以提升分类定位耦合度。

笔者在 Yolov7-Tiny 的基础上作出如下改进: 主干网络中, 将 ELAN-Tiny 模块替换为 RepNCSPPELAN4 模块以提升微小目标的特征提取与跨层特征交互能力; 同时引入 Swish 激活函数解决 LeakyReLU 激活函数非线性表达能力不足的问题; 颈部网络中, 将下采样模块普通卷积替换为空间到深度卷积以缓解下采样时细节丢失问题, 并改进空间到深度卷积做为新的检测头缓解参数膨胀问题; 最后在颈部网络的 ELAN-Tiny 模块中引入分布偏移卷积并调整结构, 降低计算成本并保证特征高效融合。笔者改进后的 Yolov7-Tiny-RSPD (RepNCSPPELAN4+SPDConv+ELAN-DS+Swish) 网络结构如图 2 所示。

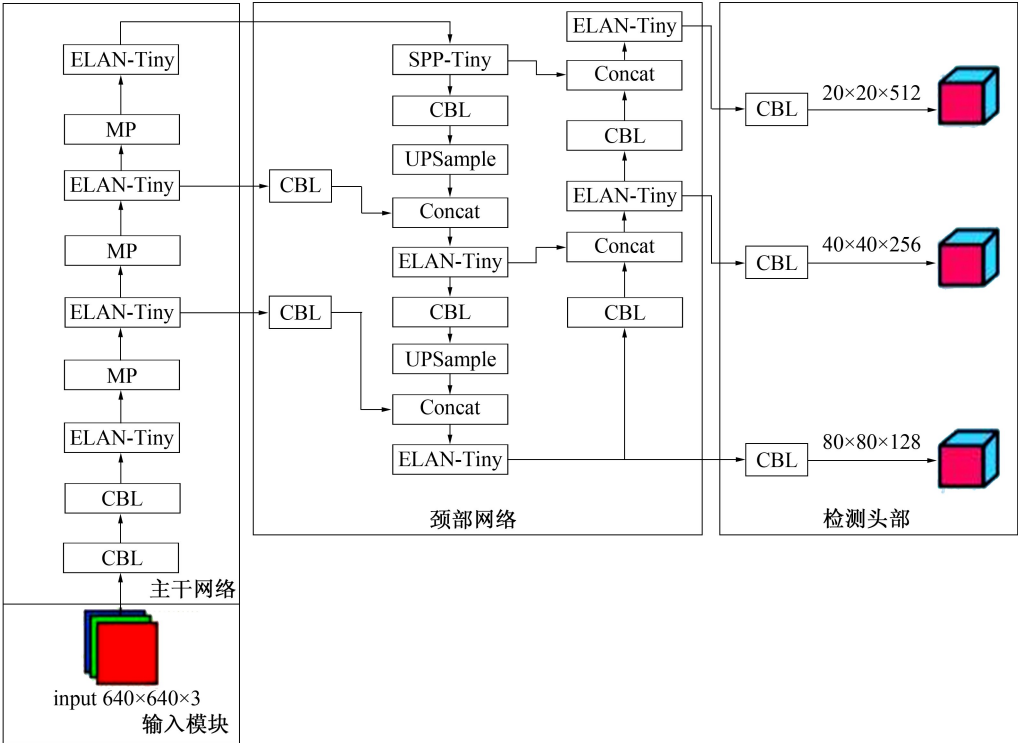


图 1 YOLOv7-Tiny 结构

Fig. 1 Structure diagram of YOLOv7-Tiny

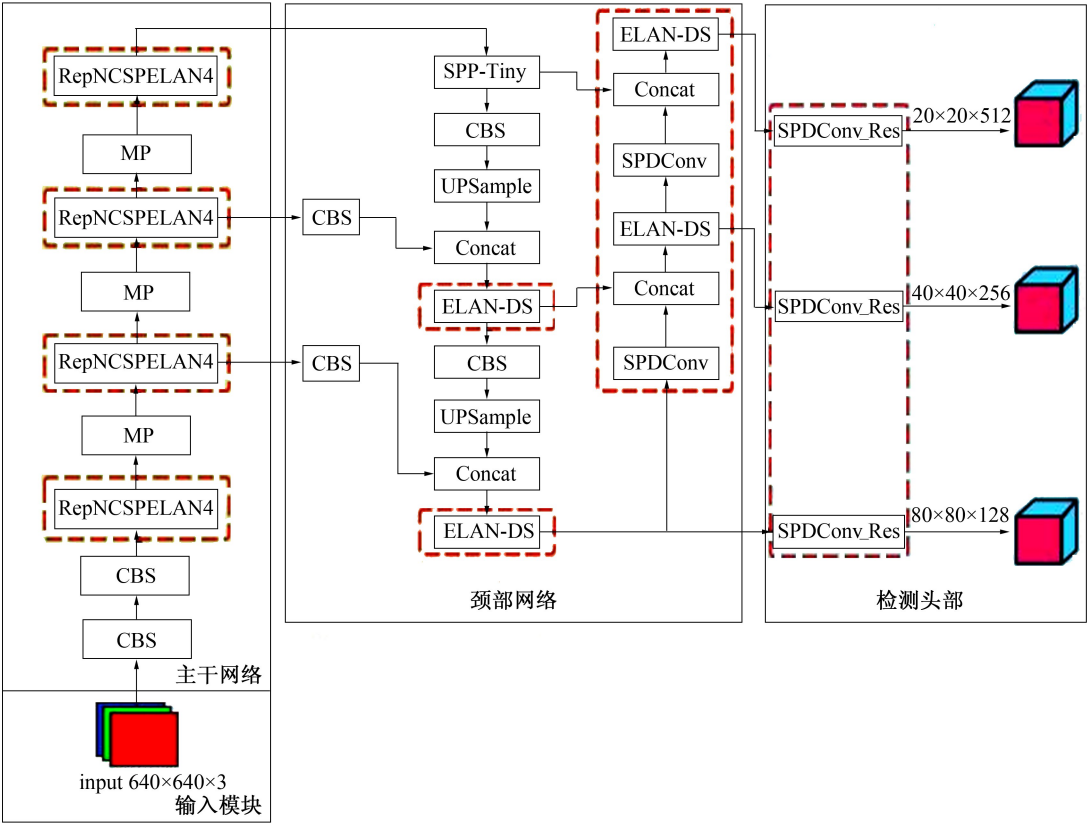


图 2 YOLOv7-Tiny-RSPD 结构

Fig. 2 Structure diagram of YOLOv7-Tiny-RSPD

1.1 主干网络改进

1.1.1 RepNCSPELAN4 模块

由于 Yolov7-Tiny 主干网络中的 ELAN-Tiny 模块的设计仅依赖于卷积和拼接操作, 缺乏跨阶段交互与多尺度特征捕捉能力, 导致梯度流动不稳定, 限制了其在复杂任务中的表现。为此在主干网络引入 RepNCSPELAN4^[12] 模块, 结构如图 3 所示。其结合跨阶段部分网络(CSPNet: Cross Stage Partial Network)和高效层聚合网络(ELAN)以提升跨层级信息交互能力并强化多尺度特征捕捉与整合效率; 并引入重参数化卷积(RepConv: Re-parameterizable Convolution), 训练时以多分支结构增强梯度反馈; 推理时将分支参数重参数化到主分支, 降低计算与内存开销, 实现高效推理的同时提升特征提取能力。将 Yolov7-Tiny 主干网络中的 ELAN-Tiny 模块替换为 RepNCSPELAN4 后, 梯度流动不稳定、多尺度特征捕捉不足的问题有所缓解, 实现保持轻量化的同时提升检测精度。

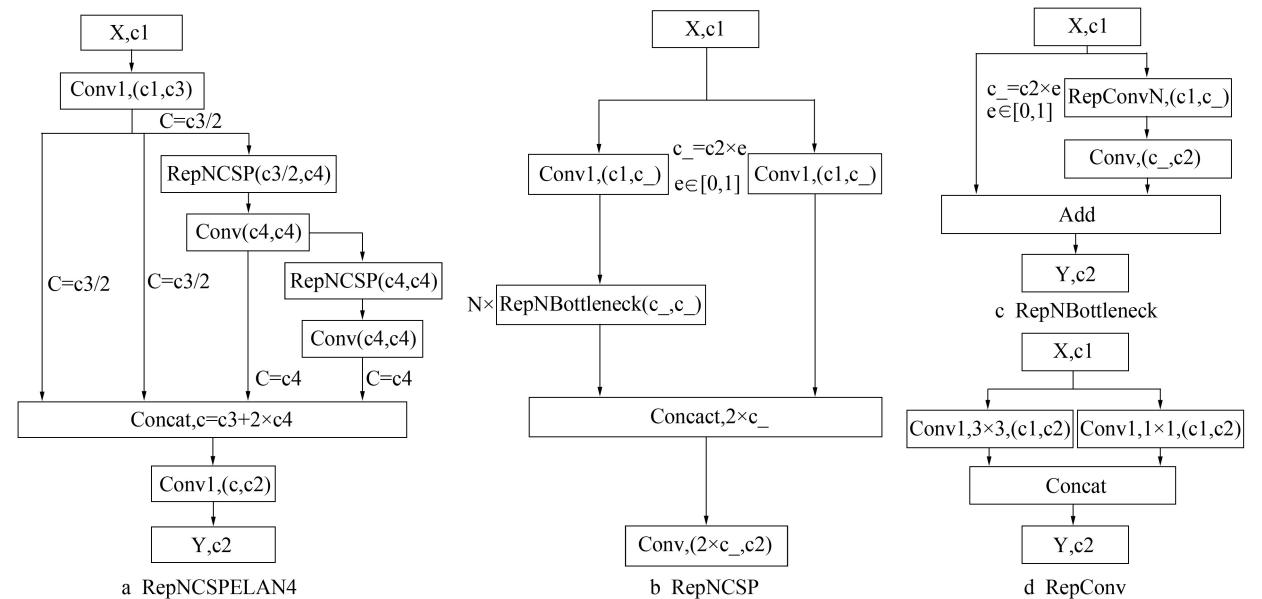


图 3 RepNCSPELAN4 结构

Fig. 3 Structure diagram of RepNCSPELAN4

1.1.2 Swish 激活函数

Yolov7-Tiny 中使用 LeakyReLU 作为激活函数, 其通过给负输入设定小斜率避免了在负值区域输出为零的问题^[13]。然而 LeakyReLU 的分段线性特性导致其非线性表达能力较弱, 难以捕捉复杂特征与细微的特征变化, 且无法避免梯度爆炸问题。故引入 Swish 激活函数, 与 LeakyReLU 函数相比, Swish 激活函数更加平滑并且全程可导, 可确保其在反向传播时梯度计算更稳定, 而且其非线性特性可对所有输入进行非线性变换, 因此可捕捉到更复杂的特征关系。

1.2 颈部网络改进

1.2.1 SPDConv 模块

Yolov7-Tiny 颈部网络使用步长为 2 的卷积进行下采样, 但其步长和池化操作使图像空间分辨率逐步下降, 导致微小目标细节信息被削弱。为此笔者在颈部网络引入空间到深度卷积(SPDConv^[14])。其结构如图 4 所示, 由空间到深度层(SPD layer: Space to Depth layer)和非步长卷积层(non-strided layer)构成。在空间到深度层中通过间隔采样分割原始特征图为多个子特征图, 经通道维度拼接后形成高维特征表达, 压缩

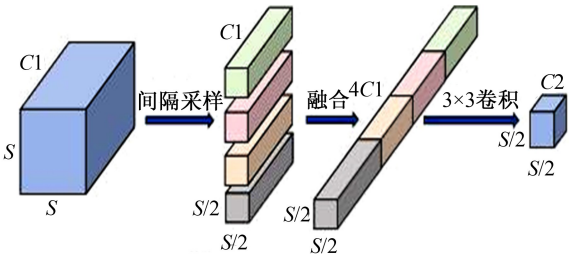


图 4 SPDConv 结构

Fig. 4 SPDConv structure diagram

空间分辨率同时扩展通道强化特征多样性^[15]；随后使用非步长卷积层保留分辨率，抑制下采样导致的细节损耗。这种双阶段结构提升了模型对小目标的检测能力，使网络在复杂或低分辨率场景下依然能高效捕捉细节。

若仅用 SPDConv 替换检测头中普通卷积则会带来参数量激增问题。为平衡检测精度与参数负担，在检测头部引入改进后的空间到深度卷积 SPDConv_Res，结构如图 5 所示。输入特征图经空间到深度层与通道拼接形成高维特征表达；主路径通过 1×1 卷积压缩通道数精简冗余信息，并通过 3×3 卷积提取特征；残差路径使用 1×1 卷积直接从高维特征映射到目标输出通道，保留原始特征信息；最后将两路输出相加融合后输出特征图^[16]。通过空间重组、通道精简与残差融合机制，在高效计算与特征保留之间实现平衡。

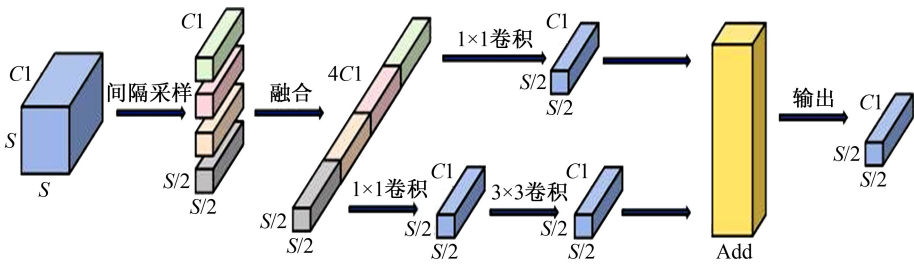


图 5 改进后的 SPDConv_Res 卷积模块

Fig. 5 The improved SPDConv_Res convolution module

1.2.2 DSCConv 模块

在 Yolov7-Tiny 的特征融合阶段，ELAN-Tiny 中普通卷积堆叠的全连接计算造成模型复杂度增加和资源消耗。为此笔者引入分布偏移卷积 DSConv (Distribution Shift Convolution)^[17]，结构如图 6 所示。DSConv 由可变化量内核 (VQK: Variable Quantized Kernel) 和分布偏移器两部分组成：可变化量内核用于存储整数值以降低存储开销；分布偏移包括卷积核的分布偏移 (KDS: Kernel Distribution Shifter) 与通道的分布偏移 (CDS: Channel Distribution Shifter) 两部分。这些偏移操作通过缩放权重和偏置调整模仿原始网络权重分布减少计算量。

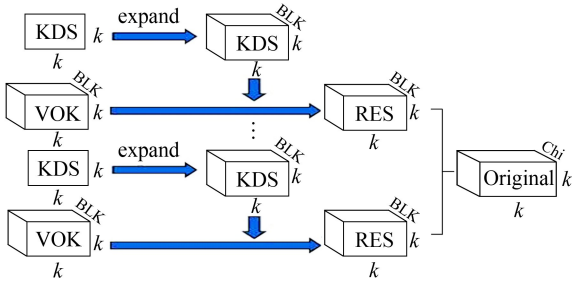


图 6 DSConv 结构

Fig. 6 DSConv structure diagram

笔者同时针对颈部网络的 ELAN-Tiny 结构 (见图 7a) 进行改进，如图 7b 所示。首先采用步长为 2 的 3×3 分布偏移卷积提取特征，使卷积能适应不同区域特征变化。随后采用 3×3 分布偏移卷积细化特征图表示，增强对不同尺度的适应能力。最后使用 1×1 分布偏移卷积降低通道数，减少计算量并进一步融合通道信息。

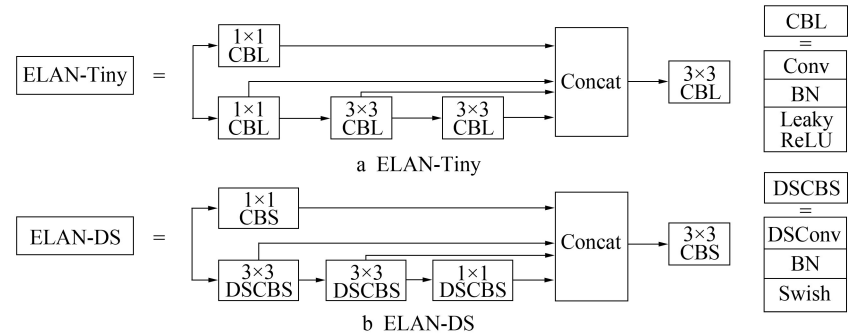


图 7 ELAN-Tiny 与 ELAN-DS 结构

Fig. 7 Structure diagram of ELAN-Tiny and ELAN-DS

2 实验及结果

2.1 实验环境与数据

实验环境配置如下: Nvidia 3060 12G GPU, Ubuntu 22.04, CUDA 版本 11.3, 深度学习框架 Pytorch 1.10.2。训练使用 Adam 优化器, 进行 400 个训练轮次(epochs)。并在训练使用精确率(Precision), 召回率(Recall), 平均精度均值(mAP: mean Average Precision)和每秒帧数(FPS: Frames Per Second)作为评价指标^[18]。

实验从公开数据集网站 Roboflow 收集获得图像共 3 616 张, 使用开源数据标注工具 LabelImg 对数据进行重新标注。其中, 微小点状缺陷统一标注为 minor_defect, 凹陷类缺陷标注为 dent, 划痕类缺陷标注为 scratch。训练集、验证集、测试集划分比例为 7 : 2 : 1。

2.2 消融实验

消融实验结果如表 1 所示。其中基线 Yolov7-Tiny 模型 mAP@50 为 78.6%, 参数量 6.0×10^6 个, 计算量 13.2×10^9 次; 实验 1、2、3 在基线模型的基础上依次叠加 RepNCSPeLAN4、Swish 激活函数与 SPDConv_Res 后, mAP@50 提升 7.5%, 参数量增加了 2.5×10^6 个; 笔者算法在实验 3 的基础上引入 ELAN-DS, 实现参数量与计算量的优化, mAP@50 较基线提升了 7.4%。综合比较, 虽然笔者算法参数量略有增加, 但检测精度却有显著提升, 实现了效率与精度的平衡。

表 1 消融实验表
Tab. 1 Table of ablation experiments

算法	RepNCSPeLAN4	Swish	SPDConv_Res	ELAN-DS	mAP@50/%	参数量/个	计算量/次
Yolov7-Tiny	×	×	×	×	78.6	6.0×10^6	13.2×10^9
实验 1	√	×	×	×	80.1	6.4×10^6	12.8×10^9
实验 2	√	√	×	×	83.6	6.4×10^6	12.8×10^9
实验 3	√	√	√	×	86.1	8.5×10^6	13.3×10^9
笔者算法	√	√	√	√	86.0	7.4×10^6	9.9×10^9

2.3 对比实验

笔者算法对比实验结果如表 2 所示。其中笔者算法 mAP@50 达到 86.0%, 为最高; Yolov8 算法 mAP@50 值最接近笔者算法且更加轻量化, 但其轻微缺陷(minor_defect)精度较笔者算法低 3.1%; 其次 Yolov5s 算法 mAP@50 仅比笔者算法低 2.7%, 参数量比笔者算法低 4×10^6 个, 但笔者算法计算量与 FPS 更优; 与 Faster-RCNN、SSD、YoloX 相比, 笔者算法具有一定的优势。

表 2 对比实验表
Tab. 2 Comparison experiment table

算法	AP(minor_defect)/%	AP(dent)/%	AP(scratch)/%	mAP@50/%	参数量/个	计算量/次	FPS
Faster-RCNN	50.8	86.1	85.3	74.7	137.2×10^6	83.4×10^9	18.1
SSD	47.2	88.6	92.8	75.2	24.5×10^6	87.9×10^9	31.3
YoloX	55.4	89.3	90.8	78.5	54.2×10^6	54.2×10^9	26.5
Yolov5s	60.1	94.8	95.1	83.3	7.0×10^6	16.0×10^9	38.2
Yolov8	60.8	97.0	97.2	85.0	3.1×10^6	8.2×10^9	44.7
笔者算法	63.9	97.1	97.0	86.0	7.4×10^6	9.9×10^9	48.1

2.4 模型检测效果可视化对比

笔者算法与 Yolov7-Tiny 检测效果对比如图 8 所示。从图 8 可看出, 对凹陷检测, Yolov7-Tiny 算法针对不明显凹陷存在漏检问题。笔者算法在相同检测区域中针对不明显凹陷能进行识别, 而且在其他类别损伤中较 Yolov7-Tiny 算法置信度更高; 对轻微缺陷类损伤检测, Yolov7-Tiny 算法存在检测不稳定和漏检问题, 笔者算法较 Yolov7-Tiny 算法不仅能检测出多个轻微缺陷目标, 且划痕类缺陷的置信度提升。综合上述, 笔者算法对小目标以及不明显目标的检测能力有一定的提升, 减少了漏检、误检的概率。

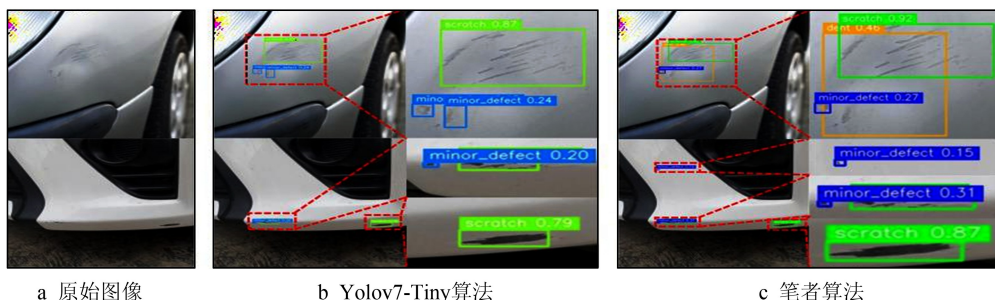


图8 检测效果

Fig.8 Detection effect

3 结 语

针对车身的小目标以及不明显缺陷,笔者提出了一种基于 Yolov7-Tiny 的改进算法。首先在主干网络引入 RepNCSPELAN4 模块以加强特征提取能力;随后引入 Swish 激活函数增强非线性表达能力;然后为防止在普通卷积步长操作造成微小细节丢失,在颈部网络以及检测头部引入空间到深度卷积 SPDConv 和改进后的空间到深度卷积 SPDConv_Res,避免微小细节丢失;最后为了平衡特征融合效率与计算负担,在颈部网络引入分布偏移卷积 DSConv。实验结果表明,笔者算法相较基线模型检测效果有显著提升。

参考文献:

- [1] 邹彦艳, 曹衍芬, 张馨月, 等. 基于 YOLOv8-DSG 的钢铁表面缺陷检测算法 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2025, 43(1): 116-125.
ZOU Y Y, CAO Y F, ZHANG X Y, et al. Algorithm for Defect Detection of Steel Surface Based on YOLOv8-DSG [J]. Journal of Jilin University (Information Science), 2025, 43(1): 116-125.
- [2] 程晓雪, 张亚磊, 毕静, 等. 漆面外观缺陷智能检测系统技术应用 [J]. 汽车实用技术, 2024, 49(24): 78-82.
CHENG X X, ZHANG Y L, BI J, et al. Application of Intelligent Detection System Technology for Paint Surface Appearance Defects [J]. Automobile Applied Technology, 2024, 49(24): 78-82.
- [3] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, NY, USA: IEEE, 2014: 580-587.
- [4] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single Shot Multibox Detector [C]//Computer Vision-ECCV 2016: 14th European Conference. Amsterdam, The Netherlands: Springer International Publishing, 2016: 21-37.
- [5] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2016: 779-788.
- [6] 张利巍, 杨万帅. 基于改进 Yolov3-Tiny 的加油站目标检测算法研究 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2024, 42(3): 559-566.
ZHANG L W, YANG W S. Research on Gas Station Target Detection Algorithm Based on Improved Yolov3-Tiny [J]. Journal of Jilin University (Information Science), 2024, 42(3): 559-566.
- [7] 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]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Vancouver, Canada: IEEE, 2023: 7464-7475.
- [8] 徐威, 李为相, 方志, 等. 基于改进 Yolov7-tiny 的光伏电池缺陷检测算法 [J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(15): 336-343.
XU W, LI W X, FANG Z, et al. Solar Cell Defect Detection Algorithm Based on Improved Yolov7-Tiny [J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(15): 336-343.
- [9] 阳丽莎, 李茂军, 胡建文, 等. 基于改进 Yolov7-Tiny 的带钢表面缺陷检测算法 [J]. 计算机工程, 2025, 51(1): 208-215.

YANG L S, LI M J, HU J W, et al. Strip Steel Surface Defect Detection Algorithm Based on Improved Yolov7-Tiny [J]. Computer Engineering, 2025, 51(1): 208-215.

[10]周世睿,陶楚青,费敏学. 基于多传感器融合的隧道运营风险感知方法 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2025, 43(2): 347-354.

ZHOU S R, TAO C Q, FEI M X. Multi-Sensor Based Method for State Perception of Tunnel Operation and Maintenance [J]. Journal of Jilin University (Information Science), 2025, 43(2): 347-354.

[11]罗箫瑜,张志. 基于改进 YOLOX 的变电站设备缺陷检测方法 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2023, 41(5): 848-857.

LUO X Y, ZHANG Z. Defect Detection for Substation Based on Improved YOLOX [J]. Journal of Jilin University (Information Science), 2023, 41(5): 848-857.

[12]WANG C Y, YE H I, MARK LIAO H Y. Yolov9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information [C]//European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer Nature Switzerland, 2024: 1-21.

[13]袁硕,刘玉敏,安志伟,等. 基于改进 ShuffleNetV2 网络的岩石图像识别 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2023, 41(3): 450-458.

YUAN S, LIU Y M, AN Z W, et al. Rock Image Recognition Based on Improved ShuffleNetV2 Network [J]. Journal of Jilin University (Information Science), 2023, 41(3): 450-458.

[14]SUNKARA R, LUO T. No More Strided Convolutions or Pooling: A New CNN Building Block for Low-Resolution Images and Small Objects [C] // Proceedings of the 2022 European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. Grenoble: Springer, 2022: 443-459.

[15]江晟,张仲义,汪宗洋,等. 基于改进 Yolov7 的交通路口目标识别算法 [J]. 吉林大学学报(理学版), 2024, 62(3): 665-673.

JIANG S, ZHANG Z Y, WANG Z Y, et al. Target Recognition Algorithm of Traffic Intersection Based on Improved Yolov7 [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2024, 62(3): 665-673.

[16]欧阳继红,王梓明,刘思光. 改进多尺度特征的 Yolo_v4 目标检测方法 [J]. 吉林大学学报(理学版), 2022, 60(6): 1349-1355.

OUYANG J H, WANG Z M, LIU S G. Yolo_v4 Object Detection Method with Improved Multi-Scale Features [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2022, 60(6): 1349-1355.

[17]NASCIMENTO M G, FAWCETT R, PRISACARIU V A. Dsconv: Efficient Convolution Operator [C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Seoul, Republic of Korea: IEEE, 2019: 5148-5157.

[18]何乐华,谢光珍,刘柯翔,等. 基于 Yolov5 的倒地检测 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2024, 42(2): 378-386.

HE L H, XIE G Z, LIU K X, et al. Ground Detection Based on Yolov5 [J]. Journal of Jilin University (Information Science), 2024, 42(2): 378-386.

(责任编辑:张洁)