

基于改进YOLOv5s模型的红外弱小目标检测方法

张建君 陈玉丹 刘玉玲 张明明 黄富瑜

Infrared dim target detection method based on improved YOLOv5s model

ZHANG Jianjun, CHEN Yudan, LIU Yuling, ZHANG Mingming, HUANG Fuyu

引用本文:

张建君, 陈玉丹, 刘玉玲, 等. 基于改进YOLOv5s模型的红外弱小目标检测方法[J]. 应用光学, 2024, 45(5): 975–981. DOI: 10.5768/JAO202445.0502005

ZHANG Jianjun, CHEN Yudan, LIU Yuling, et al. Infrared dim target detection method based on improved YOLOv5s model[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(5): 975–981. DOI: 10.5768/JAO202445.0502005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0502005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

层次卷积滤波红外弱小目标检测方法

Hierarchical convolution filtering method for infrared dim small target detection

应用光学. 2023, 44(4): 826–833 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0403003>

基于改进YOLOv5s的曲面光学镜片缺陷检测

Defect detection of curved optical lenses based on improved YOLOv5s

应用光学. 2024, 45(4): 781–789 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0403003>

基于改进YOLOv3的小目标检测算法

Small object detection algorithm based on improved YOLOv3

应用光学. 2024, 45(4): 732–740 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0402002>

改进YOLOX-S的红外舰船目标检测算法

Infrared ship target detection algorithm based on improved YOLOX-S

应用光学. 2023, 44(5): 1054–1060 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0502006>

复杂背景下红外图像弱小目标检测

Dim-small targets detection of infrared images in complex backgrounds

应用光学. 2021, 42(4): 643–650 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0402002>

多维特征点空间的红外弱小目标检测方法

Multi-dimensional feature point space infrared dim target detection method

应用光学. 2020, 41(6): 1268–1276 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0606002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 05-0975-07

基于改进 YOLOv5s 模型的红外弱小目标检测方法

张建君^{1,2}, 陈玉丹¹, 刘玉玲³, 张明明³, 黄富瑜¹

(1. 陆军工程大学 石家庄校区, 河北 石家庄 050003; 2. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081; 3. 北京遥感设备研究所, 北京 100854)

摘 要: 针对复杂背景下红外场景对比度低、特征不足、细节不清而导致的目标检测效率低的问题, 在 YOLOv5s 模型基础上通过创建 TCC (two-way convolution and Concat) 模块并引入华为 Ghost 模块, 提出了一种基于改进 YOLOv5s 模型的红外弱小目标检测方法。首先, 结合红外图像的低级语义特征, 采取二路卷积和多尺度思想创建了 TCC 模块, 提升了特征提取的全面性; 接着, 为进一步简化网络结构、减少网络参数量, 引入轻量化 Ghost 模块改进了 SPP 池化层和 CSP2 卷积网络; 最后, 以无人机为实验对象, 构建了白天和夜间不同背景条件下的红外弱小目标数据集, 实验验证了本文改进算法的有效性。结果表明: 改进后的 YOLOv5s 模型在较少损失帧频的情况下, 检测精度提升了 1.34%, 平均精度均值 (mean average precision, mAP) 提升了 2.26%, 优于 YOLOv4-tiny 和 YOLOv7-tiny 两种轻量化模型, 并与 YOLOv8s 模型精度相当, 但模型参数量仅为 YOLOv8s 模型的 53%, 完全可以满足嵌入式设备部署的需求。

关键词: 目标检测; 红外弱小目标; YOLOv5s; TCC 模块; Ghost 模块

中图分类号: TN219; TP319

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0502005

Infrared dim target detection method based on improved YOLOv5s model

ZHANG Jianjun^{1,2}, CHEN Yudan¹, LIU Yuling³, ZHANG Mingming³, HUANG Fuyu¹

(1. Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China; 2. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China; 3. Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854, China)

Abstract: To solve the low accuracy of target detection caused by low contrast, insufficient features, and unclear details in complex infrared scenes, an improved infrared dim target detection method based on YOLOv5s model was proposed by creating a two-way convolution and Concat (TCC) module and introducing the Huawei Ghost module. Firstly, combining the low-level semantic features of infrared images, a TCC module was created using two convolution and multi-scale thought, which improved the comprehensiveness of feature extraction. Then, to simplify the network structure and reduce the number of parameters, a lightweight Ghost module was introduced to improve the SPP pooling layer and CSP2 convolutional network. Finally, using unmanned aerial vehicles (UAVs) as experimental objects, a dataset of infrared dim targets was constructed under various meteorological conditions during day and night, verifying validity of the improved algorithm. The results show that the detection accuracy of the improved YOLOv5s model is increased by 1.34%, and the mean average precision (mAP) is increased by 2.26%, which is superior to YOLOv4-tiny and YOLOv7-tiny models. It has the same accuracy as YOLOv8s model, but the number of model parameters is only 53% of the YOLOv8s model, which fully meets the needs of embedded device deployment.

Key words: target detection; infrared dim target; YOLOv5s; TCC module; Ghost module

收稿日期: 2024-03-14; 修回日期: 2024-06-23

基金项目: 河北省自然科学基金 (F2021506004)

作者简介: 张建君 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电对抗与信息处理研究。E-mail: ajune_best@163.com

通信作者: 黄富瑜 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事红外侦察与信息处理研究。E-mail: hfyoptics@163.com

引言

近年来,我国无人机尤其是小型无人机民用化产业发展迅猛,但由于缺乏监管,无人机抵近侦察、非法测绘、扰乱航空秩序甚至爆恐袭击等案例频频发生,严重影响了国家和社会安全^[1-2]。2017年4月,成都双流机场发生多起无人机非法闯入事件,导致百余架飞机迫降或返航;2018年2月,河北唐某等人利用无人机对某地违规拍摄,导致民航多架次航班改航;2023年9月,南京 PN6444 航班遭遇飞鸟自杀式撞击,导致飞机发动机受损、机身震动。在学术界,将上述低空飞行(高度 1 km 以下)、速度慢(55 m/s 以下)、尺寸小(雷达截面积小于 2 m²)的目标统称为“低慢小目标”。诸如无人机、鸟群之类的低慢小目标管控难、侦测难、处置难,已成为非传统空中安全威胁的典型代表,如何有效应对低慢小目标的现实威胁已成为各国要地安防侦察领域研究的难点^[3-4]。在低慢小目标侦测方面,红外侦测技术凭借其抗干扰能力强、目标检测概率高、穿雾透霾且昼夜可用等优势而成为低慢小目标检测技术研究的热点^[5-7]。然而,受限于红外辐射成像机制,当目标距离较远时,红外目标呈现为点状的弱小目标,细节不清、特征不强,信噪比较低,给目标检测带来了极大挑战。

随着深度学习理论不断发展,将深度学习应用于红外低慢小目标检测算法中取得了较好的效果^[8]。基于深度学习的通常分为以 R-CNN 系列^[9]为代表的两阶段检测算法和以 YOLO 系列^[10]为代表的单阶段检测算法,相比而言,YOLO 系列算法可兼顾高检测准确率和检测速度,已被广泛应用到红外目标检测领域。文献[11]针对复杂背景下红外弱小目标检测问题,提出了一种基于 YOLO-IDSTD 的轻量化实时检测网络模型,实现了红外弱小目标准确又快速的检测;文献[12]利用深度可分离卷积替换 YOLOv4 模型中的普通卷积,设计了一种 GpNet 轻量型红外目标检测网络,平均检测精度提高 2.5%;文献[13]通过增加浅层特征图、改进锚框、增强小目标等处理改进了 YOLOv4 模型,平衡了运行速度和检测精度,实现了低慢小无人机目标的实时检测;文献[14]将压缩-激励模块引入到 YOLOv5 算法中,显著提升了对无人机目标的检测性能。

上述 YOLO 检测算法虽然能较好地完成特定

背景或数据集下的目标检测,但在用于本文研究时会遇到新的问题:1) 本文红外目标图像为超广角红外凝视相机采集的红外点状目标图像,语义特征信息更少;2) 与数据集中红外弱小目标相比,本文所研究红外弱小目标的尺度更小,检测难度更大;3) 在不同复杂背景下检测空中红外弱小目标时,当前算法检测误检率更高。针对上述问题,本文选取结构参数和计算量较少的单阶段 YOLOv5s 作为基础模型,通过创建 TCC 模块来提升特征提取的全面性,引入 Ghost 模块进一步优化网络结构,在保证检测实时性的同时减少了参数量,提高了检测精度。

1 YOLOv5s 模型框架

作为一种单阶段目标检测模型,YOLOv5s 在 YOLOv4 的基础上添加了一些改进算法,使模型的灵活性和速度有了大幅提升。YOLOv5s 模型框架主要包括 4 个部分^[14]: 输入端(Input)、主干网络(Backbone)、颈部网络(Neck)和预测端(Prediction),如图 1 所示。

1) 输入端(Input): 主要功能是检测图像的输入,该部分通常使用 Mosaic 数据增强、自适应锚框、自适应图像尺度缩放等操作来提高模型的训练速度和检测精度。

2) 主干网络(Backbone): 实际上是一个在不同图像细粒度上聚合并形成图像特征的优质卷积神经网络,该部分通常由 Focus 切片结构、标准卷积层 CBS(convolution Bn SiLu)、跨阶段局部网络 CSP(cross stage partial network)、空间金字塔池化模块 SPP(spatial pyramid pooling)等组成,在此将 CBL(convolution Bn Leaky_relu)替换成 CBS。

3) 颈部网络(Neck): 采用特征金字塔网络 FPN(feature pyramid network)和路径聚合网络 PAN(path aggregation network)进行图像特征的聚合,进一步提升图像特征的提取能力。

4) 预测端(Prediction): 主要是设置损失函数,通常采用 GIOU_Loss 为损失函数,同时通过非极大值抑制 NMS(non-maxima suppression)来筛选目标框。

2 模型改进

针对红外弱小目标图像分辨率差、特征少、细

节不清等问题, 本文以 YOLOv5s 算法模型为基础, 通过优化设计其网络结构, 实现红外弱小目标的训练和检测。改进后的 YOLOv5s 模型如图 2 所示, 主要改进内容包括: 1) 采用二路卷积思想创

建 TCC 模块, 替换 Backbone 中的部分 CBS 模块, 以保留更多的红外图像语义信息; 2) 引入华为 Ghost 模块改进 SPP 结构和 CSP2 结构, 减少网络参数量。

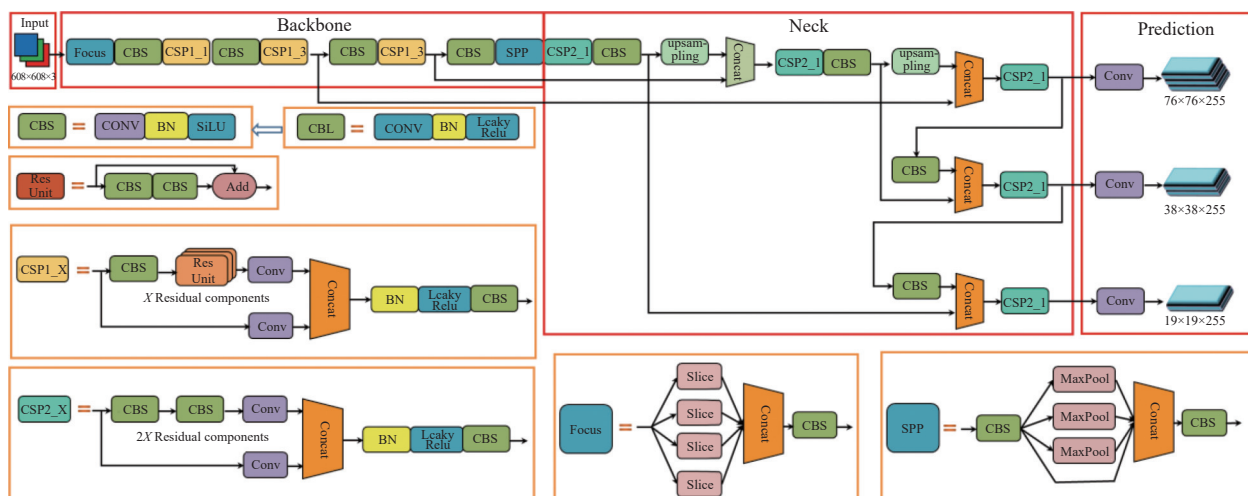


图 1 YOLOv5s 模型结构

Fig. 1 YOLOv5s model structure

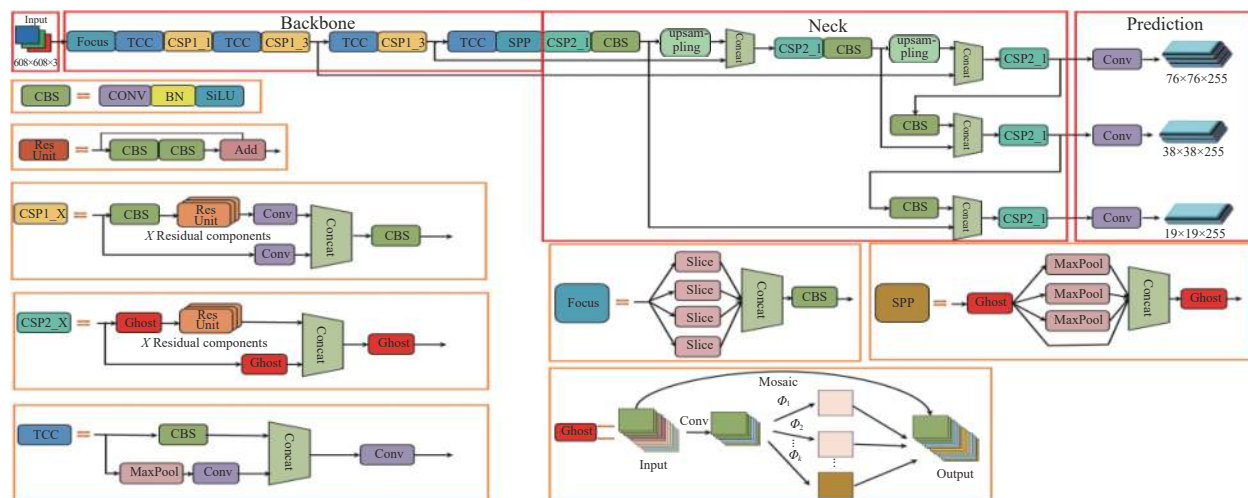


图 2 改进的 YOLOv5s 模型结构

Fig. 2 Improved YOLOv5s model structure

2.1 TCC 模块创建

红外图像主要表现为低级语义特征, 红外弱小目标在图像中呈现为点状, 无明显的形状和纹理信息。针对此问题, 本文修改了 YOLOv5 网络 Backbone 中的 CBS 模块, 采取二路卷积和多尺度思想创建了 TCC 模块, 如图 3 所示, 以进一步提升特征提取的全面性。

TCC 模块的工作流程为: 首先, 取一半通道数的特征图, 经过常规 CBS 模块得到降维的特征图; 其次, 待另一半通道数特征图最大池化后, 进

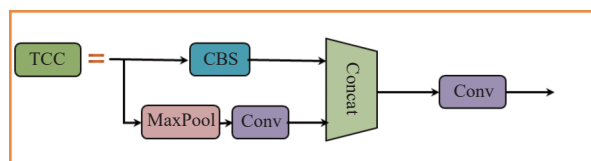


图 3 TCC 模块结构

Fig. 3 TCC module structure

行步长为 2 的卷积操作, 来降低图片的维度, 得到一组特征图; 最后, 将两路经 CBS 模块和最大池化操作后的图像信息进行 CONCAT 拼接操作,

再输入到 1×1 的卷积层中, 进行不同通道信息的融合操作。

经 TCC 模块处理后, 特征图像的语义信息能够有效地保留, 这些信息再传入 CSP1_X 模块特征提取后, 更加有利于目标特征的检测和提取。

2.2 引入 Ghost 模块的 SPP 结构和 CSP2 结构改进

2020 年, 针对主流卷积神经网络 (CNNs) 在中间特征映射中广泛存在的冗余问题, 华为诺亚方舟^[15]在 CVPR2020 上创新性地提出了一种分阶段卷积计算模块——Ghost 模块, 如图 4 所示。该模块分为普通卷积核廉价的线性运算两部分: 首先, 使用更少量的非线性卷积核对输入的特征层进行压缩, 大幅减少运算量; 其次, 利用深度分离卷积, 从上面生成的特征图中变换出冗余的特征信息; 最后, 将上面两步获取的特征图进行 Concat 拼接, 以此来消除冗余特征, 得到更加轻量化的网络模型。

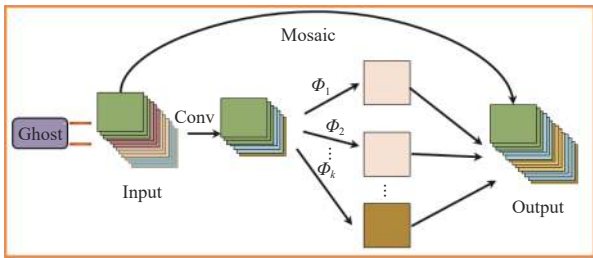


图 4 Ghost Module 结构

Fig. 4 Ghost module network structure

考虑到红外弱小目标检测中存在的特征少、干扰多的问题, 特征提取网络不应太过复杂, 为此本文将 Ghost 模块引入到 SPP 结构改进中, 改进后的 SPP 结构如图 5 所示。具体过程为: 先利用 3 个卷积和大小不同的最大池化层对 Ghost 模块得到特征图进行下采样, 之后将各自输出结果进行拼接融合, 并将其与初始特征相加, 最后经过卷积操作, 将输出恢复到同初始输入一致。

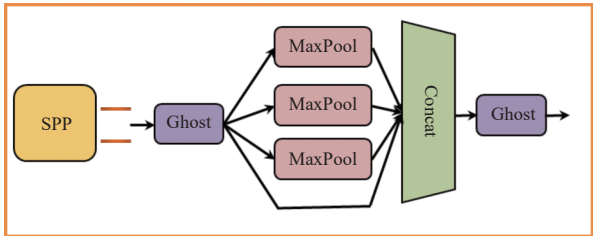


图 5 引入 Ghost 模块后的 SPP 结构改进

Fig. 5 Improved SPP structure after introducing Ghost module

兼顾红外弱小目标检测的实时性要求, 同时权衡参数量和计算量之间的关系, 本文使用 Ghost 卷积替代 Neck 中 CSP2_X 模块的卷积网络, 以减少整个网络的参数量, 提高网络的效率, 改进后的 CSP2_X 结构如图 6 所示。

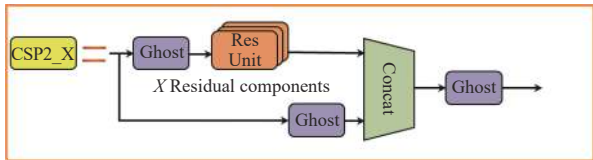


图 6 引入 Ghost 模块后的 CSP2_X 结构改进

Fig. 6 Improved CSP2_X structure after introducing Ghost module

3 数据集与评价指标

3.1 数据集

本文所研究红外目标图像是超广角红外图像, 由于网络上缺乏高质量公开的超广角红外弱小目标图像数据集, 为此课题组利用搭建的超广角红外凝视相机采集构建目标数据集。该相机是一款非制冷氧化钒长波红外相机, 成像方式为等距投影成像, 焦距为 7.2 mm, 图像分辨率为 640 像素 $\times$ 512 像素, 像元尺寸为 $17 \mu\text{m}$, 响应波段为 $8 \mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$, 视场角为 $110^\circ \times 82^\circ$ 。为包容更大空域的目标场景, 等距投影成像会将物空进行变形压缩^[16], 并且越靠近视场边缘, 成像压缩越厉害, 这使得超广角相机采集的红外弱小目标图像与传统高斯相机采集的红外弱小目标图像存在明显的特征差异。

数据集构建的目标对象为不同距离处的多架次无人机目标, 部分样本图像如图 7 所示。

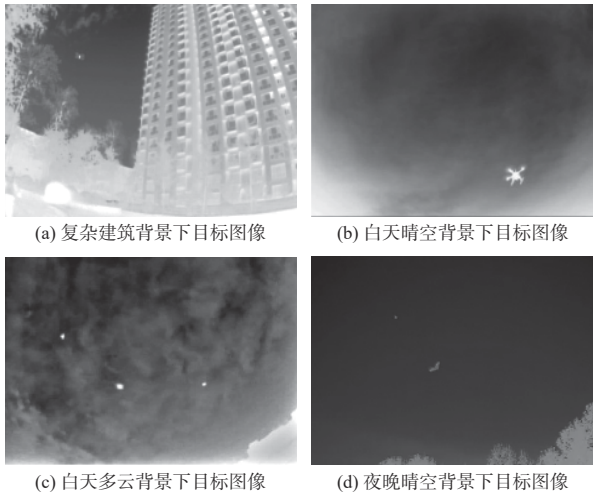


图 7 部分数据集图像

Fig. 7 Partial images of dataset

数据集构建时,使用边界框工具 LabelImg,并采用 VOC 格式进行标注,保存为 XML 格式,最终得到 2 个数据集。其中检测用数据集包含 6 021 张红外图像,识别用数据集包含 7 343 张红外图像。

实验训练测试中,Epoch 设置为 100, Batch_size 设置为 16,图像输入尺寸为 640 像素×512 像素,具体实验平台及环境配置如表 1 所示。

表 1 实验平台及环境配置

Table 1 Configuration of experimental platform

名称	环境参数
操作系统	Ubuntu
CPU	Intel(R) Xeon(R) Platinum 8255C
GPU	NVIDIA RTX 2080 Ti
深度学习框架	Pytorch1.5.1
CUDA版本	10.1

3.2 评价指标选取

本文选取精确率(Precision)、召回率(Recall)、平均精度(AP)、平均精度均值(mAP)、每秒处理帧数(FPS)、计算量(FLOPS)、参数量(Params)等指标^[10,14,17]对模型改进效果进行全面客观的评价。

精确率(Precision)和召回率(Recall)是一对用来度量分类器精确程度的机器学习指标,前者指模型预测的所有目标中检测正确的概率,后者指所有真实目标中识别正确的概率,定义式如下:

$$P_{\text{recision}} = \frac{T_p}{T_p + F_p} \tag{1}$$

$$R_{\text{ecall}} = \frac{T_p}{T_p + F_N} \tag{2}$$

式中: T_p 为模型预测目标中真实目标的数量; F_p 为模型预测目标中虚假目标的数量; F_N 为实际为真目标但被模型预测为假目标的数量。

平均精度均值(mAP)是全面衡量模型目标检测精度的指标,定义式为

$$P_{\text{mAP}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{\text{AP}_i} \tag{3}$$

式中: P_{AP_i} 为模型数据集中第*i*个类别的精度平均值; N 为模型中所有 P_{AP} 的数目。

另外,每秒处理帧数(FPS)是目标检测算法每秒能够处理的图像数量,代表了模型的检测速度;计算量(FLOPS)则用于评估训练检测模型的技术复杂度;而参数量(Params)是指检测模型的参数量,用于评估对计算内存资源的消耗。

4 验证实验与分析

4.1 检测实验与分析

以白天、夜间晴空背景和白天多云背景下不同距离处的多架次无人机目标数据集为对象,开展目标检测实验,结果如图 8 所示。

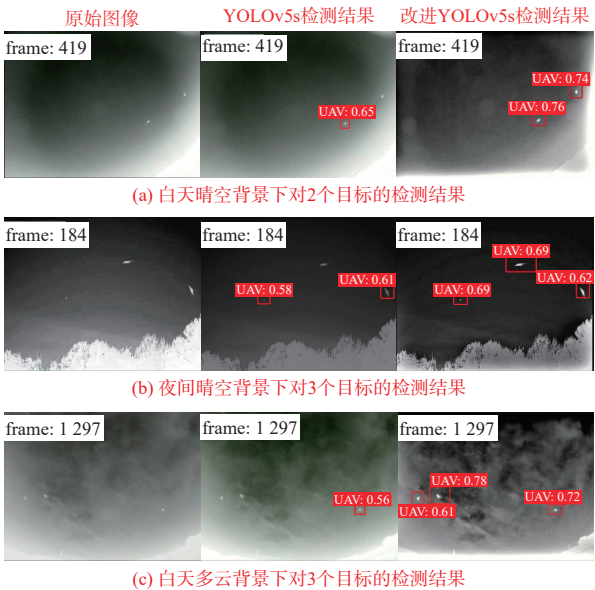


图 8 YOLOv5s 改进前后目标检测结果对比

Fig. 8 Comparison of target detection results before and after YOLOv5s improvement

其中,图 8(a)、图 8(b)、图 8(c)依次对应 3 种背景下不同架次无人机目标的检测结果;各图中,左边列为原始图像,中间列为 YOLOv5 检测结果,右边列为本文 YOLOv5 改进后的检测结果。对图 8 的结果分析如下:

1) 从漏检情况来看,针对 3 幅图像中的多架次无人机目标,改进前的 YOLOv5 方法均出现了漏检,而本文改进后的 YOLOv5 方法检测出了全部目标,说明改进后的方法对不同背景下的红外弱小目标检测具有较强的适应能力。

2) 从目标尺度来看,在图示 3 个视频序列中,改进前后可检出的最小尺度分别为 16 个像素、10 个像素,说明改进后的方法对不同尺度目标检测具有较好的鲁棒性。

3) 从置信度和检测概率来看,改进后的方法目标检测的置信度明显提高,检测精度提升了 1.34%, mAP 值提升了 2.26%。

4.2 消融实验与分析

为了验证改进模型对红外弱小目标检测的有效性,设置了 4 组消融实验。其中,组 1 未引入 TCC 模块和 Ghost 模块,组 2 只引入了 Ghost 模块,组

3 只引入了 TCC 模块,组 4 同时引入了 TCC 模块和 Ghost 模块,结果如表 2 所示。

对比表 2 中第 2 行、第 3 行与第 1 行,在 YOLOv5s 模型中分别引入 TCC 模块和 Ghost 模块后,虽然 FPS 和 FLOPS 指标稍有下降,但 3 项精度指

标和参数量均得到了改善;在 YOLOv5s 模型中同时引入 TCC 模块和 Ghost 模块后,虽然牺牲了一些检测速度,但在不影响实时性的前提下有效提高了检测精度,减少了参数量,降低了训练复杂度。

表 2 消融实验结果

Table 2 Ablation experimental results

组号	Precision/%	Recall/%	mAP@0.5/%	FPS/(frame·s ⁻¹)	FLOPS/G	Params/M
YOLOv5s	93.55	92.27	90.04	73	17.303	6.627
YOLOv5s中引入TCC	94.91	92.96	91.91	70	17.044	6.303
YOLOv5s中引入Ghost	95.11	93.64	91.94	64	16.520	6.288
YOLOv5s中引入TCC+Ghost	94.89	92.61	92.30	68	16.260	5.964

4.3 对比实验与分析

为了验证不同 YOLO 模型对红外弱小目标的检测效果,同样选取图 8 中所建不同背景下红外弱小目标数据库,将本文 YOLOv5s 改进模型与改进前模型、YOLOv4-tiny 模型、YOLOv7-tiny 模型、YOLOv8s 模型进行了对比实验,结果如图 9 所示。

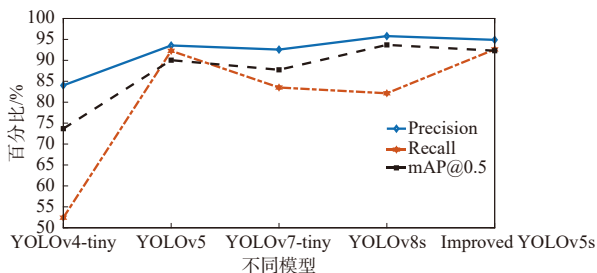


图 9 对比实验结果

Fig. 9 Comparative experimental results

对图 9 具体分析如下:

1) 在精确率(Precision)指标评价方面,改进后的 YOLOv5s 模型分别优于 YOLOv4-tiny 模型和 YOLOv7-tiny 模型 10.8% 和 2.32%,但稍逊于 2023 年最新推出的 YOLOv8s 模型。

2) 在召回率(Recall)指标评价方面,改进后的 YOLOv5s 模型效果最佳,相比 YOLOv4-tiny 模型、YOLOv7-tiny 模型和 YOLOv8s 模型,Recall 值分别提升了 40.2%、9.1%、10.48%。

3) 在平均精度均值(mAP)指标评价方面,改进后的 YOLOv5s 模型与 YOLOv8s 模型相当,分别优于 YOLOv4-tiny 模型和 YOLOv7-tiny 模型 18.62% 和 4.56%。

4) 此外,通过考察参数量指标,本文改进后模型的参数量(Params)约为最新 YOLOv8s 模型的

53.4%,但检测速度可满足实时检测需求。

综上可知,本文改进模型综合权衡了检测精度、检测速度、参数量和计算量等指标,在超广角红外弱小目标数据集上表现优异,可满足嵌入式设备实时性高概率目标检测的需求。

5 结论

本文通过更换卷积创建 TCC 模块、引入 Ghost 模块改进 SPP 结构和 CSP2 结构,提出了一种基于 YOLOv5s 模型改进的红外弱小目标检测方法,提升了检测精度,减少了网络参数量。消融实验和对比实验表明:改进后模型的参数量减少了 10%,检测速度为 68 帧/秒,平均检测精度提高了 2.26%,与最新 YOLOv8s 模型相当,但参数量仅为 YOLOv8s 模型的一半,说明改进后的 YOLOv5s 模型更适用于红外弱小目标的检测,可较好地移植到红外侦测设备的目标检测算法中。

参考文献:

- [1] 杨欣,王刚,李棕,等.基于深度卷积神经网络的小型民用无人机检测研究进展[J].红外技术,2022,44(11): 1119-1131.
YANG Xin, WANG Gang, LI Liang, et al. Civil drone detection based on deep convolutional neural networks: a survey[J]. Infrared Technology, 2022, 44(11): 1119-1131.
- [2] 白春玉,郭亚周,刘小川,等.民用轻小型无人机碰撞安全特性研究进展[J].航空学报,2022,43(6): 137-153.
BAI Chunyu, GUO Yazhou, LIU Xiaochuan, et al. Research progress of collision safety characteristics of civil

- light and small UAVs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(6): 137-153.
- [3] RASOL J, XU Y, ZHANG Z, et al. An adaptive adversarial patch-generating algorithm for defending against the intelligent low, slow, and small target[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(5): 1439.
- [4] YU X, WEI S, FANG Y, et al. Low-altitude slow small target threat assessment algorithm by exploiting sequential multifeature with long short-term memory[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(18): 21524-21533.
- [5] ZHUO Z, LIAN J, LIU J. Infrared UAV target detection based on continuous-coupled neural network[J]. *Micro machines*, 2023, 14(11): 2113.
- [6] ZHAO M, LI W, LI L, et al. Infrared small UAV target detection via isolation forest[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1.
- [7] SUN H, LIU Q, WANG J, et al. Fusion of infrared and visible images for remote detection of low-altitude slow-speed small targets[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 2971-2983.
- [8] 张子林, 喻松林, 王戈, 等. 基于改进 YOLOv7 的机载红外弱小目标检测算法[J]. *激光与红外*, 2024, 54(1): 84-91.
- ZHANG Zilin, YU Songlin, WANG Ge, et al. Airborne infrared dim target detection algorithm based on improved YOLOv7[J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(1): 84-91.
- [9] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S.l.]: [s.n.], 2014: 580-587.
- [10] 李晓佩, 张寅宝, 李严培, 等. 一种基于 YOLOv5s 的红外图像目标检测改进算法[J]. *激光与红外*, 2023, 53(7): 1043-1051.
- LI Xiaopei, ZHANG Yinbao, LI Yanpei, et al. An improved method of infrared image target detection based on YOLOv5s[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(7): 1043-1051.
- [11] 蒋昕昊, 蔡伟, 杨志勇, 等. 基于 YOLO-IDSTD 算法的红外弱小目标检测[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(3): 502-511.
- JIANG Xinhao, CAI Wei, YANG Zhiyong, et al. Infrared dim and small target detection based on YOLO-IDSTD algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 502-511.
- [12] 李现国, 曹明腾, 李滨, 等. GpNet: 轻量型红外图像目标检测算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(6): 1092-1101.
- LI Xianguo, CAO Mingteng, LI Bin, et al. GpNet: Lightweight infrared image target detection algorithm[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(6): 1092-1101.
- [13] 吴璇, 张海洋, 赵长明, 等. 基于改进 YOLOv4 的低慢小无人机实时探测算法[J]. *应用光学*, 2024, 45(1): 79-88.
- WU Xuan, ZHANG Haiyang, ZHAO Changming, et al. Improved YOLOv4 for real-time detection algorithm of low-slow-small unmanned aerial vehicles[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(1): 79-88.
- [14] 宋谱怡, 陈红, 苟浩波. 改进 YOLOv5s 的无人机目标检测算法[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(1): 108-116.
- SONG Puyi, CHEN Hong, GOU Haobo. Improving UAV object detection algorithm for YOLOv5s[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(1): 108-116.
- [15] HAN K, WANG Y, TIAN Q, et al. Ghostnet: more features from cheap operations[C]//IEEE CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle: IEEE, 2020: 1580-1589.
- [16] 黄富瑜, 李刚, 周冰, 等. 红外立体视觉与图像融合技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2022: 13-15.
- HUANG Fuyu, LI Gang, ZHOU Bing, et al. Infrared stereo vision and image fusion technology[M]. Beijing: North Industries Press, 2022: 13-15.
- [17] 李海军, 孔繁程, 林云. 基于改进 YOLOv5s 的红外舰船检测算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(8): 2415-2422.
- LI Haijun, KONG Fancheng, LIN Yun. Infrared ship detection algorithm based on improved YOLOv5s[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(8): 2415-2422.