

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.10.007

基于改进 YOLOv5s 算法的尾气黑度测量方法研究

程 硕^{1,2}, 王焕钦², 胡俊涛^{1,3}, 夏王进², 虞发军², 方 勇^{1,3}

(1. 合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院 智能机械研究所, 安徽 合肥 230031; 3. 合肥工业大学 智能制造技术研究院, 安徽 合肥 230051)

摘 要:针对传统尾气黑度测量方法精度低、环境适应性差等问题,文章提出一种基于改进 YOLOv5s 算法的尾气黑度测量方法。考虑到尾气形状多变、背景复杂,在现有 YOLOv5s 网络中添加自适应特征融合(adaptively spatial feature fusion, ASFF)和全局注意力机制(global attention mechanism, GAM),提高尾气目标的检测准确度;同时,为减少光照等环境因素对尾气目标检测的影响,基于尾气的高温特性,利用红外图像提高尾气区域检测准确度;并基于标准的林格曼黑度对被检测区域内的尾气黑度进行等级判定。实验结果表明:改进后的 YOLOv5s 对红外尾气目标的检测准确率高达 95.3%,比现有 YOLOv5s 检测准确度提高了 3.4%;同时还降低了光照等环境因素对尾气目标检测结果的影响,改善了算法的鲁棒性;最终尾气黑度判定精度达到 0.5 级,可有效满足现有移动源尾气黑度高精度检测需求。

关键词:林格曼黑度;机动车尾气目标检测;黑度等级判定;红外图像;YOLOv5s 算法

中图分类号:X83;TP391.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)10-1341-08

Research on detection method of Ringelmann emittance of exhaust based on improved YOLOv5s algorithm

CHENG Shuo^{1,2}, WANG Huanqin², HU Juntao^{1,3}, XIA Wangjin², YU Fajun², FANG Yong^{1,3}

(1. Academy of Opto-electric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Intelligent Machines, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 3. Intelligent Manufacturing Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230051, China)

Abstract: For the problems of low accuracy and poor environmental adaptability of traditional detection methods of Ringelmann emittance of exhaust, this paper proposes a detection method of Ringelmann emittance of exhaust based on improved YOLOv5s algorithm. Considering the variable shape and complex background of exhaust, adaptively spatial feature fusion(ASFF) and global attention mechanism(GAM) are added to the existing YOLOv5s network to improve the detection accuracy of exhaust targets. At the same time, in order to reduce the impact of environmental factors such as illumination on exhaust target detection, based on the high temperature characteristics of exhaust, infrared images are used to improve the accuracy of exhaust region detection. Based on the standard Ringelmann emittance, the Ringelmann Emittance level of exhaust in the detected area is determined. The experimental results show that the detection accuracy of the improved YOLOv5s is as high as 95.3%, which is 3.4% higher than that of the existing YOLOv5s; the influence of illumination and other environmental factors on the detection results of exhaust targets is reduced, and the robustness of the algorithm is improved; the final determination accuracy of Ringelmann emittance of exhaust can reach level 0.5,

收稿日期:2022-04-25; **修回日期:**2022-06-28

基金项目:国家自然科学基金民航联合研究基金资助项目(U2133212);安徽省科技重大专项资助项目(202003a07020005; 202203a07020004)和合肥工业大学智能制造技术研究院科研基金资助项目(IMICZ2019001)

作者简介:程 硕(1997—),男,山东潍坊人,合肥工业大学硕士生;

王焕钦(1982—),男,湖南永州人,博士,中国科学院合肥物质科学研究院研究员,博士生导师,通信作者, E-mail: hqwang@iim.ac.cn.

which can effectively meet the high-precision detection requirements of Ringelmann emittance of existing mobile source exhaust.

Key words: Ringelmann emittance; vehicle exhaust target detection; Ringelmann emittance level determination; infrared image; YOLOv5s algorithm

0 引言

我国经济发展迅速,交通运输越来越便利,机动车数量逐渐增多,目前我国的机动车保有量已经达到 3.72×10^8 辆^[1],大量的污染物被排放,包括 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、硫化物、氮化物等^[2],对人体健康有极大的危害,造成了严重的空气污染。研究发现在各种污染中空气污染最为常见,影响也最为严重^[3-4],因此强化机动车等移动污染源的执法检查是一项重要的任务。

目前对移动源林格曼黑度的执法检查主要依赖人工目测,将尾气颜色与林格曼黑度标准比照图比较来确定黑度等级。但这种方法较为落后,受人为主观因素影响大,检测精准度低,且环境适应性差。随着计算机图像处理技术的发展,林格曼黑度测量逐渐向智能化方向发展,很多研究者通过使用传统数字图像处理方法对林格曼黑度进行检测^[5]。文献[6]通过将拍摄的烟囱烟气图像使用阈值分割法分割出烟囱烟气区域并进行黑度等级判定,判定结果与人工判定结果一致;文献[7]通过空间域线性灰度增强,对图像进行预处理,将烟囱烟气图像与背景图像进行分割,然后与标准烟气黑度分级进行对比得到黑度等级;文献[8]对烟囱烟气图像检测进行研究,最终使用迭代阈值分割法进行分割,根据目标与背景平均黑度值的关系得到最终的黑度等级。

虽然上述几种方法在黑度等级判定精度上有所提升,但是依然存在一些问题,如检测时通常以晴朗的天空为背景来拍摄,且需人工选取烟气位置;当背景复杂时可能会导致烟气图像提取失败,环境适应性较差。因此,亟待研发一种尾气检测准确度更高、环境适应性更强和黑度判定更准确的智能检测方法。

近年来,随着深度学习目标检测技术的发展^[9-10],目标检测算法在复杂环境背景中逐渐获得越来越多的应用,这为尾气目标高精度检测提供了可能的技术途径。目前商业化的尾气黑度测量仪通常仅采用 RGB 图像对尾气进行检测,由于受光照等环境因素影响,常会导致误检或漏检。而通常尾气在排放时均具有一定的热量,在红外

成像时可以与背景环境进行明显区分,且与背景光照无直接关系,因而使用红外尾气图像进行尾气目标检测可能会获得更高的检测准确率,从而降低误检和漏检的概率。

针对以上问题,本文提出一种基于改进 YOLOv5s 算法的尾气黑度测量方法。通过对 YOLOv5s 网络进行改进,提高对尾气目标的检测准确率;利用尾气的高温特性,使用红外尾气图像进行尾气目标检测,以减少光照等环境因素对尾气目标检测的影响,并改善检测算法的鲁棒性;使用对红外尾气图像进行检测后并经过区域匹配处理的结果作为输入,通过尾气黑度等级判定算法进行判定,获得高等级的判定准确度。

1 尾气黑度测量总体方案

本文提出的尾气黑度测量流程如图 1 所示。基于采集到的红外和 RGB 尾气图像,首先使用经红外尾气图像数据集训练后的改进的 YOLOv5s 网络对红外尾气图像进行尾气目标检测,得到尾气区域位置信息;然后根据尾气区域位置信息,经过区域匹配,截取出与红外尾气图像相对应的 RGB 尾气图像中的尾气区域,将尾气区域图像进行预处理;最后使用尾气林格曼黑度等级判定算法确定黑度等级。

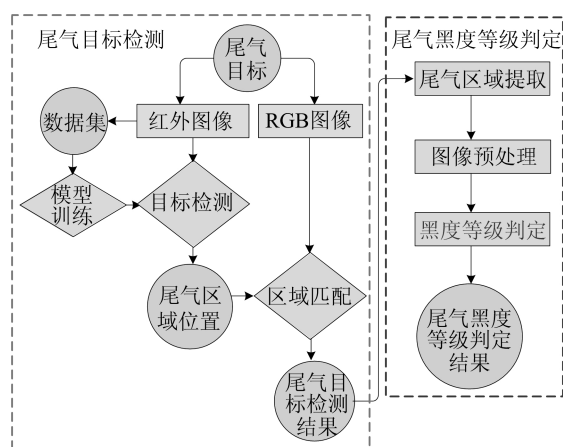


图 1 尾气黑度测量流程

本文拟采用 YOLOv5s 网络为基础网络对尾气目标进行检测,为了提高网络模型的精度和对

尾气目标的检测准确率,对 YOLOv5s 网络进行改进,添加全局注意力机制(global attention mechanism, GAM),并在颈部网络(Neck)部分引入自适应特征融合(adaptively spatial feature fusion, ASFF),最终得到改进的目标检测网络 Smoke-YOLOv5s。经过红外尾气图像数据集训练后,进行尾气目标检测并通过区域匹配获得尾气区域图像,最后判定尾气的林格曼黑度等级。

2 改进 YOLOv5s 的红外尾气目标检测

为了对尾气黑度进行精确测量,首先需要进行尾气目标检测,获得图像中尾气区域的精确位置,本文选用 YOLOv5s 网络作为基础网络,考虑到尾气形状多变、背景复杂,对网络结构进行改进,以提高网络对尾气目标的检测准确率,并使用自建的红外尾气图像数据集进行训练,对红外尾气图像进行尾气目标检测,以减少光照等环境因素影响导致的漏检和误检,改善检测算法鲁棒性。

2.1 YOLOv5s 网络的基本结构

YOLOv5 属于 YOLO 系列网络中的一类。YOLOv5 目标检测网络主要包括 YOLOv5s、YOLOv5l、YOLOv5m、YOLOv5x 4 种类型。YOLOv5s 网络具有流程简单、检测速度快、模型小等特点^[11-14]。

YOLOv5s 网络主要有输入端、特征提取网络(Backbone)、颈部网络和预测输出(Prediction) 4 个部分,网络结构如图 2 所示。

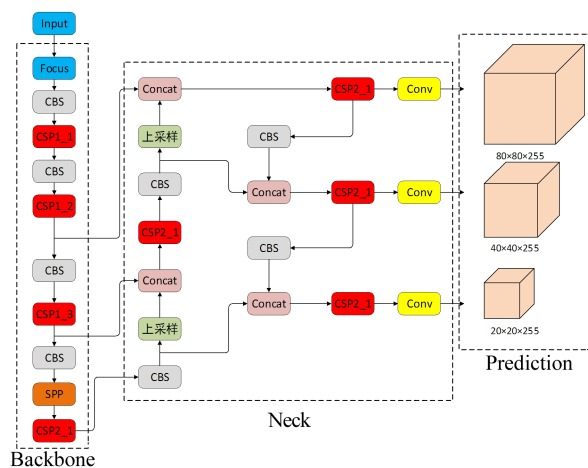


图 2 YOLOv5s 网络结构

YOLOv5s 网络输入端的作用为将图像进行预处理后输入到网络中。

Backbone 部分进行特征的提取,分为 Focus 结构与通信顺序进程(communication sequential

process, CSP) 结构 2 个部分。Focus 结构通过切片操作将图片进行裁剪,比如一个 $8 \times 8 \times 3$ 的图像,经过 Focus 结构后就会变为 $4 \times 4 \times 12$ 的图像,然后经过多次卷积操作,就会生成 $4 \times 4 \times 32$ 的特征图像。CSP1 结构主要是将特征图继续集成。

Neck 网络部分将提取到的特征数据的多样性与鲁棒性进一步增强。该部分主要使用了特征金字塔网络(feature pyramid networks, FPN)和路径聚合网络(path aggregation network, PAN),FPN 将高层的特征信息通过上采样来融合,PAN 通过自顶向下将特征信息进行传递,两者相结合增强了网络对特征的提取能力。CSP2 结构增强了特征融合能力。

Prediction 部分作为整个网络的输出端,负责将目标检测的结果进行输出。

2.2 注意力机制

由于尾气的环境背景较为复杂,为了增强网络对尾气目标的关注度,提高对尾气目标的检测准确度,在 Backbone 部分加入 GAM^[15],提高尾气目标在检测时所获得的注意力资源权重,抑制对其他背景等不重要区域的关注,进而提高网络的特征提取能力。

GAM 在抑制对不重要区域的关注时比压缩激励注意力机制(squeeze and excitation, SE)效率要高。卷积块注意力机制(convolutional block attention module, CBAM)忽略了通道与空间的相互作用,而 GAM 放大了全局跨纬度的交互作用,可以从 3 个维度提取特征,提高了网络的特征提取能力,进而提高了网络的检测准确率。GAM 的原理如下:

$$F_2 = M_c(F_1) \otimes F_1 \quad (1)$$

$$F_3 = M_s(F_2) \otimes F_2 \quad (2)$$

其中: F_1 为输入特征图像信息; F_2 为中间输出; F_3 为最终输出的特征图像信息; M_c 为通道注意力模块; M_s 为空间注意力模块。

与常规的注意力机制添加方式相同,本文选择了在 Backbone 的最后一层添加 GAM 模块。在 YOLOv5s 的主文件中注册并添加 GAM 代码后通过修改 YAML 文件参数,在 Backbone 部分最后一个 CSP 模块加入 GAM,完成添加。添加 GAM 后的 Backbone 网络结构和 GAM 的结构如图 3 所示,GAM 模块通过将 YOLOv5s 中 Backbone 部分的特征图像输出作为输入,经过通道注意力模块后,与初始特征图像融合得到中间

输出,再将中间输出经过空间注意力模块后,与中间输出相融合得到对尾气目标具有高注意力的特征图像输出,并输入到 Neck 部分。

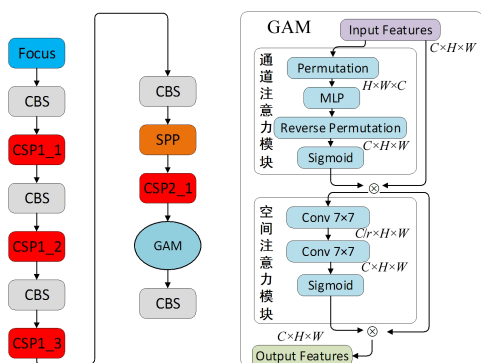


图 3 加入 GAM 的 Backbone 部分

2.3 自适应特征融合

考虑到尾气属于烟羽状物体,扩散快,形状多变,经常会导致检测失败,为了减少此问题,对尾气图像进行多尺度特征融合。自适应特征融合(adaptively spatial feature fusion, ASFF)^[16]更加充分利用不同尺度的特征,通过对特征进行空间过滤,尽可能地保留有用的信息并进行组合。它可以添加到拥有特征金字塔结构的网络中,计算的复杂度却不会有特别大的增加,计算方法为:

$$Y = \alpha X^1 + \beta X^2 + \gamma X^3 \quad (3)$$

其中:Y 为融合得到的特征; α 、 β 、 γ 为权重参数; X^1 、 X^2 、 X^3 为不同尺度的特征。

为了实现多尺度特征融合,本文在 YOLOv5s 网络中 Neck 部分的 PAN 之后加入 ASFF 模块。可以通过在 YOLOv5s 的主文件中注册并添加 ASFF 代码,并修改 YAML 文件中 Neck 层参数,完成 ASFF 模块的添加。引入 ASFF 后的 Neck 网络结构和 ASFF 的结构如图 4 所示,ASFF 模块将 PAN 输出的不同尺度特征图像作为输入,并将各尺度的特征图像分别与权重系数相乘后进行融合,得到融合后的具有多个尺度特征的特征图像输出。

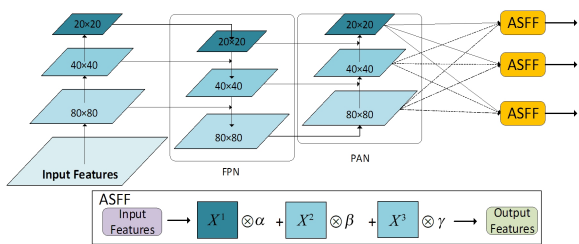


图 4 在 Neck 部分添加 ASFF

经过 2.2 节、2.3 节的改进后,最终得到了改进的 YOLOv5s 网络模型,称之为 Smoke-YOLOv5s。

2.4 基于红外图像的尾气目标检测

受到光照等环境因素的影响,基于 RGB 尾气图像的尾气目标检测可能得不到准确的尾气特征信息,进而出现漏检或者误检。在红外图像中,尾气热辐射区域特征比较明显,可以与背景环境进行明显区分,尾气目标更容易被检测到,使用红外图像进行尾气目标检测可以提高尾气目标检测算法的鲁棒性和检测准确率。本文主要使用红外尾气图像进行尾气目标检测。

本文尾气黑度测量方法中的尾气目标检测部分的流程如下:首先采集相互对应的 RGB 与红外尾气图像,使用红外尾气图像数据集训练 Smoke-YOLOv5s 后,对红外尾气图像进行尾气目标检测得到尾气区域位置数据;为了得到 RGB 尾气图像中的尾气区域,方便尾气黑度等级判定,将检测得到的尾气区域位置数据导出,通过区域匹配,将该尾气区域信息在原始 RGB 尾气图像中标出,可以得到尾气目标检测结果。

3 尾气林格曼黑度等级判定

通过尾气目标检测得到尾气区域位置信息后,再进行尾气黑度测量,即尾气林格曼黑度等级判定。通过区域匹配,将尾气区域在原始 RGB 尾气图像中截取出来,再将尾气提取图像灰度化。本文 RGB 尾气图像位图信息中的像素由 RGB 3 个分量组成。通过使用加权算法对图像的 3 个通道数据进行灰度化加权处理,转换公式如下:

$$H(i, j) = 0.299R(i, j) + 0.587G(i, j) + 0.114B(i, j) \quad (4)$$

其中:H 为灰度值;(i, j) 为像素点坐标;R、G、B 为 RGB 图像三通道分量。使用迭代阈值分割法对尾气图像进行处理,首先通过迭代法求出分割的最佳灰度阈值 T,使用该阈值对图像进行分割得到处理后的图像 g(x, y),分割出用于黑度等级判定的尾气部分,分割公式如下:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) > T; \\ 0, & f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (5)$$

其中:f(x, y) 为原始图像;g(x, y) 为分割后产生的二值图像。通过算法将图像遍历,根据 g(x, y) 获得二值图像中尾气部分的所有像素点坐标,将尾气部分的像素点坐标对应到 H(i, j) 上,取 g(x, y) 为 1 时的像素点坐标作为尾气提取图像

中用于平均灰度值计算的像素点坐标,第 n 个像素点的灰度值 H_n 计算公式为:

$$H_n = H(x, y), \quad g(x, y) = 1 \quad (6)$$

平均灰度值 H_a 的计算公式为:

$$H_a = \left(\sum_{n=1}^N H_n \right) / N \quad (7)$$

其中, N 为像素总数。

黑度值 B 的计算公式为:

$$B = 255 - H \quad (8)$$

其中, H 为每个像素点的灰度值。

通过黑度等级划分比例得出最终的黑度等级,本文中黑度等级精确到小数点后一位。

林格曼将烟气黑度划分为 0~5 级,其中:0 级代表尾气颜色全白;1 级代表尾气黑色占比达到 20%;2 级代表尾气黑色占比达到 40%;3 级代表尾气黑色占比达到 60%;4 级代表尾气黑色占比达到 80%;5 级代表尾气颜色全黑。在图像变为灰度图像后, H 在 0~255 之间,由式(8)转化为黑度值 B 后,0 代表纯白色,255 代表纯黑色。黑度等级划分见表 1 所列,根据黑度值 B 与黑度等级之间的相对比例关系确定具体的黑度等级。

表 1 黑度等级划分

等级	黑度值	黑度等级计算方法	等级范围/级
0	0	$B/(51-0), 0 \leq B < 51$	0~0.9
1	51	$B/(102-51), 51 \leq B < 102$	1.0~1.9
2	102	$B/(153-102), 102 \leq B < 153$	2.0~2.9
3	153	$B/(204-153), 153 \leq B < 204$	3.0~3.9
4	204	$B/(255-204), 204 \leq B < 255$	4.0~4.9
5	255	$5, B=255$	5

林格曼黑度人工对比法就是一种将排出气体颜色与标准林格曼黑度对照图进行对比得到黑度等级的方法^[17],是国家规定的黑度测量标准。可以使用本文方法判定出的结果与之比较,确定在整数黑度等级范围内,结果是否准确。

4 实验测试结果及分析

4.1 尾气图像数据集采集及训练

使用分辨率分别为 $1\ 280 \times 720$ 和 160×120 的可见光摄像头与红外摄像头,采集柴油发动机和汽油发动机尾气的 RGB 图像与红外图像,分别采集到 1 600 张 RGB 与红外尾气图像,尾气图像如图 5 所示。

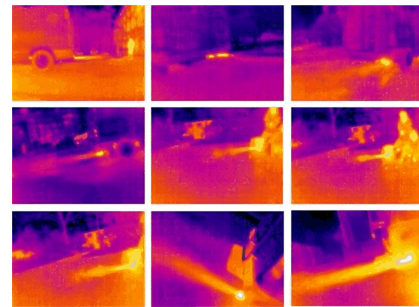
训练所使用的平台硬件配置如下:CPU 为 Intel Core i9-10 900 K,GPU 为 $2 \times$ TITAN RTX

24 GiB,内存为 4×16 GiB DDR4,3 200 MHz。实验平台的操作系统为 Ubuntu18.04,使用 Python 3.7,安装 Pytorch 1.8 深度学习框架以及 OpenCV 4.5。训练中自适应图像尺寸设置为 640×640 ,Batch-size(批尺寸)设置为 64,Epoch(数据集迭代次数)设置为 300。

由于 Smoke-YOLOv5s 网络仅用于对红外尾气图像进行尾气目标检测,为了验证网络改进的效果,本次实验使用红外尾气图像数据集对网络进行训练,其中训练集与测试集的比例为 8:2。IoU 为交并比,训练结果以训练精度 Precision 和 IoU 为 0.5 时的均值平均精度(mean average precision, mAP_{0.5})作为训练效果的评价指标。



(a) RGB尾气图像



(b) 红外尾气图像

图 5 采集的尾气图像

训练结果见表 2 所列。

表 2 训练结果

算法	训练数据集	训练精度/%	mAP _{0.5} /%
YOLOv5s	1 280 张红外图像	90.9	83.8
Smoke-YOLOv5s	1 280 张红外图像	93.2	90.5

使用红外尾气图像数据集训练后,Smoke-YOLOv5s 的训练精度和 mAP_{0.5} 分别达到 93.2%、90.5%,比 YOLOv5s 的训练精度和 mAP_{0.5} 分别提高 2.3%、6.7%。结果表明,经红外尾气图像数据集训练后,与 YOLOv5s 相比,Smoke-YOLOv5s 的精度有所提高,网络改进效

果明显,满足尾气目标检测的需要。

4.2 尾气目标检测结果对比

为了测试 Smoke-YOLOv5s 对红外尾气图像进行尾气目标检测的效果,对 787 张红外尾气图像和相对应的 787 张 RGB 尾气图像进行测试。测试结果见表 3 所列,Smoke-YOLOv5s 对红外尾气图像进行尾气目标检测的检测准确率高达 95.3%,比 YOLOv5s 提高了 3.4%,比 YOLOv5s 对 RGB 尾气图像进行尾气目标检测的检测准确率提高了 8.0%;YOLOv5s 对红外尾气图像进行尾气目标检测的检测准确率比 RGB 尾气图像提高了 4.6%。

结果表明,本文对 YOLOv5s 网络的改进可以提高对红外尾气目标的检测准确率,并且对红外尾气图像进行尾气目标检测可以获得更高的检测准确率。

表 3 尾气目标检测准确率对比

模型	训练数据集	检测图像/张	有效检测图像/张	检测准确率/%
YOLOv5s	1 280 张 RGB 图像	787	687	87.3
YOLOv5s	1 280 张红外图像	787	723	91.9
Smoke-YOLOv5s	1 280 张红外图像	787	750	95.3

4.3 对红外尾气图像目标检测效果

Smoke-YOLOv5s 对红外尾气图像进行尾气目标检测后,为了方便尾气黑度等级判定,需要对相对应的 RGB 尾气图像进行区域匹配,获得 RGB 图像中的尾气区域。暗光照下 Smoke-YOLOv5s 的尾气目标检测结果如图 6 所示,普通光照下 Smoke-YOLOv5s 的尾气目标检测结果如图 7 所示。

从图 6b 可以看出,暗光照下 YOLOv5s 对 RGB 尾气图像的检测出现了漏检,未检测出尾气目标。从图 6c 可以看出,Smoke-YOLOv5s 检测出了红外尾气目标。从图 6d 可以看出,经过区域匹配后得到了较为完整的尾气区域。

从图 7b 可以看出,由于光照等环境因素的影响,YOLOv5s 对 RGB 尾气图像检测后在左上角出现了误检,右下角检测出的尾气区域也不完整。从图 7d 可以看出,Smoke-YOLOv5s 对红外尾气图像检测并经过区域匹配后,得到的尾气区域更准确、更完整。

结果表明 Smoke-YOLOv5s 对红外尾气图像进行尾气目标检测,降低了光照等环境因素的影响,减少了漏检和误检,提高了检测算法的鲁棒

性,而且获得的检测区域更完整、更准确。

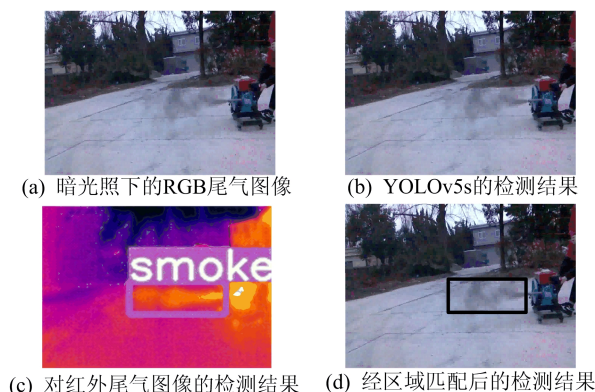


图 6 暗光照下 Smoke-YOLOv5s 的尾气目标检测结果

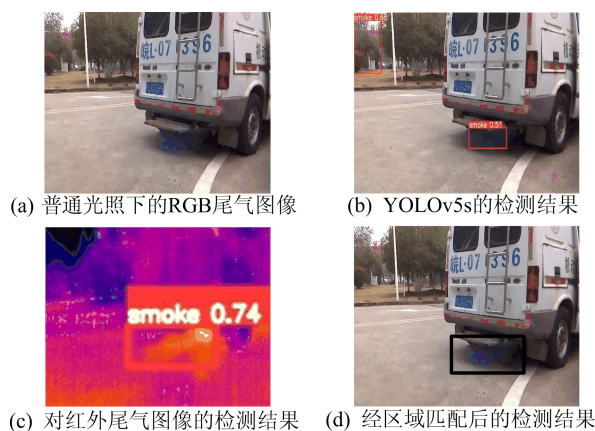


图 7 普通光照下 Smoke-YOLOv5s 的尾气目标检测结果

4.4 黑度等级判定结果

为了验证使用红外尾气图像进行尾气目标检测后判定得到的黑度等级的准确性,选取相互对应的 2 张红外和 RGB 尾气图像,与黑度比照图比较得到黑度等级为 2 级。分别使用经红外尾气目标检测后,通过区域匹配在相对应的 RGB 图像中截取得到的尾气区域图像和经 RGB 尾气目标检测后直接截取得到的尾气区域图像,通过黑度等级判定算法判定黑度等级。黑度等级判定结果如图 8 所示,根据尾气分割图像定位到尾气部分,计算得到黑度等级分别为 2.2 级(图 8b)与 2.5 级(图 8c),都属于 2 级范围。因为图 8b 中对红外尾气图像检测得到的尾气区域更完整,所以尾气部分的平均灰度值更接近真实尾气的灰度值,计算得到的黑度等级更接近真实黑度等级,使得判定的黑度等级准确性更高。

为了验证黑度等级判定算法是否准确,选取 10 张具有代表性的背景复杂且尾气区域完整的尾气提取图像,首先与标准黑度比照图比较判定出黑度等级后,然后与黑度等级判定算法得出的

结果进行对比,结果见表 4 所列。从表 4 可以看出,2 种方法得到的黑度等级结果一致,结果准确,并且由于黑度等级判定算法不受主观因素影响,判定结果更加稳定可靠。

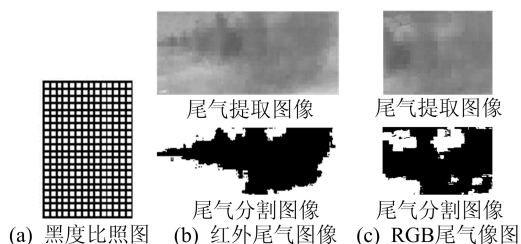


图 8 黑度等级判定结果

表 4 黑度等级测定结果对比

序号	黑度等级		结果
	本文方法判定	人工测定	
1	3.0	3	一致
2	3.1	3	一致
3	3.4	3	一致
4	4.2	4	一致
5	4.1	4	一致
6	4.2	4	一致
7	2.2	2	一致
8	2.5	2	一致
9	3.3	3	一致
10	3.3	3	一致

为进一步测试尾气林格曼黑度等级判定算法的精度,使用判定算法对拍摄采集的各级林格曼黑度标准图进行黑度等级判定,结果见表 5 所列,判定算法对采集到的标准黑度图像判定成功率在 90% 以上,对每一级的判定结果的最大误差值都在 0.5 级以内,判定算法的精度可以达到 0.5 级。

表 5 对标准林格曼黑度图像的判定结果

标准黑度等级	采集判定次数	等级范围	成功次数	最大误差等级	精度
0	50	0~0.9	50	0.3	0.3
1	50	1.0~1.9	48	1.4	0.4
2	50	2.0~2.9	50	2.5	0.5
3	50	3.0~3.9	49	3.5	0.5
4	50	4.0~4.9	50	4.5	0.5
5	50	5.0	45	4.6	0.4

5 结 论

本文提出了一种基于改进 YOLOv5s 算法的尾气黑度测量方法。为了提高对尾气目标的检测准确率,本文对 YOLOv5s 进行了改进,在 YOLOv5s 网络的 Backbone 部分添加 GAM,并在 Neck 部分引入自适应特征融合;同时,为了降

低光照等环境因素对尾气目标检测的影响,利用尾气的高温特性,使用红外尾气图像进行尾气目标检测。该方法使用改进的 YOLOv5s 算法 Smoke-YOLOv5s 对红外尾气图像进行尾气目标检测,然后通过区域匹配将相对应的 RGB 尾气图像中的尾气区域截取并输入到尾气林格曼黑度等级判定算法中,判定黑度等级。实验结果表明,Smoke-YOLOv5s 对红外尾气目标的检测准确率高达 95.3%,比 YOLOv5s 提高了 3.4%,比 YOLOv5s 对 RGB 尾气图像的检测准确率提高了 8.0%,满足尾气目标检测的需求;对红外尾气图像进行尾气目标检测降低了光照等环境因素的影响,提高了检测算法的鲁棒性,并且获得的尾气区域更完整、更准确;使用 Smoke-YOLOv5s 的检测结果判定出的尾气黑度等级准确,与人工测定结果一致,而且算法的判定精度达到 0.5 级,可有效满足现有移动源尾气黑度高精度检测需求。

[参 考 文 献]

- [1] 王程鹏. 机动车尾气目标快速检测算法研究与硬件部署[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
- [2] 耿天召,朱余,魏帧,等. 基于多种源解析技术的合肥市环境空气 PM_{2.5} 来源解析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(6):830-838.
- [3] ROPKINS K, BEEBE J, LI H, et al. Real-world vehicle exhaust emissions monitoring: review and critical discussion[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2009, 39(2): 79-152.
- [4] FRANCO V, KOUSOULIDOU M, MUNTEAN M, et al. Road vehicle emission factors development: a review[J]. Atmospheric Environment, 2013, 70: 84-97.
- [5] 张炎,董永峰. 基于 Matlab 的烟气黑度值测量[J]. 现代信息技术, 2018, 2(1): 109-111.
- [6] 胡科先,李朝松,草晓东,等. 智能化林格曼黑度检测系统设计与开发[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(6): 50-53.
- [7] 于兴智,张学军,颜子夜,等. 工业烟气黑度监测系统工程技术研究[J]. 真空电子技术, 2020(2): 24-27, 53.
- [8] 桂柏林. 基于林格曼黑度的烟囱排放自动监测分析系统的研究与实现[D]. 湘潭:湘潭大学,2009.
- [9] 吴丙芳,叶兵,汪仕铭. 一种双流卷积神经网络的黑烟车检测算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(2): 198-202.
- [10] 李涛,张代胜,张飞,等. 基于改进 YOLO 算法的 FSAC 赛车实时目标检测系统[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(9): 1153-1158.
- [11] 郭磊,王邱龙,薛伟,等. 基于改进 YOLOv5 的小目标检测算法[J]. 电子科技大学学报, 2022, 51(2): 251-258.
- [12] Ultralytics/YOLOv5[EB/OL]. (2020-05-18) [2022-01-18]. <https://github.com/ultralytics/yolov5>.

(下转第 1361 页)

- [7] 谭力,张志,张高华. 湖北省东部矿产资源违规开采点空间转移及成因机制[J]. 资源科学, 2017, 39(4): 678-686.
- [8] 张凌寒. 《民法典》对矿业权制度的系统性治理[J]. 中国矿业, 2021, 30(3): 14-17.
- [9] 殷腾飞,王永志,谭永杰. 全国煤炭矿业权分布规律研究[J]. 中国煤炭, 2015, 41(2): 16-19.
- [10] 路玉林,谭永杰,王永志,等. 全国矿业权分布规律研究[J]. 中国矿业, 2011, 20(7): 29-34.
- [11] 张衡,王文强,林燕,等. 全国煤炭矿业权时空变化特征分析[J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(增刊 1): 31-35, 55.
- [12] SUN W T, WANG Y Q. Coupling analysis of transportation system and public cultural facilities based on POI Data; take Xi'an as an example[J]. World Scientific Research Journal, 2021, 7(4): 414-422.
- [13] 吴琼,吴琪,李树枝,等. 2012 年全国非油气矿产资源开发利用形势[J]. 中国矿业, 2013, 22(9): 6-10.
- [14] 国务院. 国务院关于进一步推进西部大开发的若干意见[EB/OL]. (2008-03-28)[2021-03-16]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2008-03/28/content_2060.htm.
- [15] 国土资源部. 国土资源部发布全国矿产资源规划(2008—2015)[EB/OL]. (2009-01-07)[2021-03-16]. http://www.gov.cn/gzdt/2009-01/07/content_1198508.htm.
- [16] 新华社. 推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动[EB/OL]. (2012-03-28)[2021-03-16]. <http://world.people.com.cn/n/2015/0328/c1002-26764633.html>.
- [17] 国土资源部. 国土资源部关于严格控制和规范矿业权协议出让管理有关问题的通知[EB/OL]. (2012-05-15)[2021-03-16]. http://f.mnr.gov.cn/201703/t20170329_1447084.html.
- [18] 沈明,沈镭,钟帅,等. 基于生态敏感条件的中国资源型城市去产能空间格局优化[J]. 资源科学, 2016, 38(10): 1962-1974.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 1347 页)

- [13] WANG C, WANG H, YU F, et al. A high-precision fast smoky vehicle detection method based on improved yolov5 network[C]//2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design (AIID). [S. l.]: IEEE, 2021: 255-259.
- [14] XIA W, YU F, WANG H, et al. A high-precision lightweight smoke detection model based on SE attention mechanism[C]//2022 2nd International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering (ICCECE). [S. l.]: IEEE, 2022: 941-944.
- [15] LIU Y, SHAO Z, HOFFMANN N. Global attention mechanism; retain information to enhance channel-spatial interactions[EB/OL]. [2022-03-02]. <https://arxiv.org/abs/2112.05561>.
- [16] LIU S, HUANG D, WANG Y. Learning spatial fusion for single-shot object detection[EB/OL]. [2022-03-02]. <https://arxiv.org/abs/1911.09516>.
- [17] 孙鹏. 固定污染源排放烟气黑度的测定:林格曼烟气黑度图法(HJ/T 398—2007)有效性复审意见[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(2): 123-124.

(责任编辑 张镗)

· 信息与动态 ·**《合肥工业大学学报(自然科学版)》专栏征稿启事**

为了贯彻落实党的二十大精神,紧密围绕科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发展战略,《合肥工业大学学报(自然科学版)》设置“机器人与人工智能”“环境污染与防治”两个专栏,面向国内外专家学者征集“机器人与人工智能”“环境污染与防治”领域的原创性学术论文、专题综述;稿件一经录用将优先刊发。

来稿要求政治导向正确、论证充分、具有较强的引领性和创新性。格式要求参见《合肥工业大学学报(自然科学版)》网页投稿指南的征稿简则和投稿模板。

在线投稿网址:<http://xbzss.hfut.edu.cn/xbzk.html>。