

DOI:10.13205/j.hjgc.202504023

叶涵宇,郭来德,李玥娴,等.改进的YOLOv5算法下的生活垃圾智能分类系统设计[J].环境工程,2025,43(4):232-241.

YE H Y, GUO L D, LI Y X, et al. Design of an intelligent classification system for domestic garbage based on improved YOLOv5 algorithm[J]. Environmental Engineering, 2025, 43(4): 232-241.

改进的YOLOv5算法下的生活垃圾智能分类系统设计

叶涵宇¹ 郭来德^{2*} 李玥娴¹ 邓文博³

(1. 辽宁石油化工大学 创新创业学院, 辽宁 抚顺, 113001; 2. 辽宁石油化工大学 人工智能与软件学院, 辽宁 抚顺 113001; 3. 辽宁石油化工大学 信息与控制工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要:针对生活垃圾分类难、资源回收利用率低等问题,提出了一种基于改进的YOLOv5算法的生活垃圾智能分类系统设计策略,旨在提高生活垃圾分拣过程中对垃圾类别识别的实时性和准确性。该算法以YOLOv5为基础网络,使用GhostNet的C3Ghost模块替换原始的YOLOv5架构中的C3模块,采用了更新的损失函数SIoU,并利用Ghost卷积与CBAM注意力机制级联结构,实现了轻量化主干网络和提高模型性能的目标。实验结果表明,该算法相比YOLOv5,基础网络权重由7.111 M下降至4.039 M,每秒处理帧数从73.8帧提升至82.0帧,模型轻量化达到50%,更易于移植到移动设备上,且具有良好的鲁棒性以及检测性能。该系统应用红外感应、激光测距、图像识别、电机驱动等技术,设计了具备自动开合、破袋、分类、油水渣分离、溢满反馈等功能的智能分类垃圾箱,能够有效收集各类生活垃圾,避免接触传播病菌,提高工作效率,节省人力成本,促进物资的循环利用。

关键词:YOLOv5;轻量化;注意力机制;生活垃圾;智能分类

Design of an intelligent classification system for domestic garbage based on improved YOLOv5 algorithm

YE Hanyu¹, GUO Laide^{2*}, LI Yuxian¹, DENG Wenbo³

(1. School of Innovation and Entrepreneurship, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China;

2. School of Artificial Intelligence and Software, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China;

3. School of Information and Control Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China)

Abstract: This research proposes a design strategy for an intelligent classification system for domestic garbage based on the improved YOLOv5 algorithm. The aim is to enhance both real-time and accuracy in garbage category identification during the domestic garbage sorting process, addressing the issues of difficult domestic garbage classification, low resource recycling rate, and serious environmental pollution. The algorithm uses YOLOv5 as the base network, replaces the C3 module in the original YOLOv5 architecture with the C3Ghost module of GhostNet, employs an updated loss function SIoU, and utilizes the cascade structure of the Ghost convolution combined with the CBAM attention mechanism to achieve the dual goals of lightweighting the backbone network and improving the model performance. The experimental results demonstrated that the algorithm reduced the weight of the network from 7.111 M to 4.039 M compared with the YOLOv5 base network. Additionally, it improved the frame rate from 73.8 FPS to 82.0 FPS, lightened the model by 50%, enhanced portability to mobile devices, and exhibited robust performance and detection capabilities. The system employs a single box with multiple points of interaction, integrating technologies such as infrared sensing, laser distance measurement, image recognition, motor drive

收稿日期:2024-04-18; 修改日期:2024-06-04; 接收日期:2024-06-14

基金项目:国家自然科学基金项目(61273239);全国大学生创新训练计划项目(202410148008)

第一作者:叶涵宇(2003—),男,本科,主要研究方向为计算机视觉和机器学习。15039449904@163.com

*通信作者:郭来德(1978—),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为计算机视觉、机器学习。13842302248@163.com

and others to develop an intelligent classification dustbin featuring automated opening and closing, bag-breaking, sorting, separation of oil and water residue, and overflow feedback capabilities. The bin is capable of effectively handling a wide range of domestic garbage materials. It can effectively process all types of domestic garbage while preventing contact with potential pathogens and enabling intelligent garbage classification. This system not only reduces labor costs but also facilitates material recycling, thereby protecting the human ecological environment.

Keywords: YOLOv5; lightweight; attention mechanism; domestic garbage; intelligent classification

0 引言

近年来,随着混合型垃圾总量的增加,生活垃圾处理问题变得越发棘手。2019年6月发布的《关于在全国地级及以上城市全面开展生活垃圾分类工作的通知》提出,到2025年,全国地级及以上城市要基本完成生活垃圾分类处理系统的建设目标^[1]。尽管垃圾分类一直在进行,但结果并不理想,根本原因在于源头垃圾分类不准确,对垃圾错误的投放、堆放以及回收^[2]。且城市生活垃圾分类的方式仍主要采用人工分拣,工作量大,分拣效率低;传统的机器人分拣方式多基于垃圾图像进行单一重复的抓取任务,系统无法在外界环境改变时继续正常工作^[3]。

相关学者基于机器视觉技术或深度学习技术,在生活垃圾智能分类系统的设计领域已经取得了一定的进展。范金豪等^[4]以YOLOv4网络为基础进行改进,提出用于垃圾分类目标检测任务的YOLO_ES模型;Zhang等^[5]提出一种YOLO_WASTE垃圾分类模型,以YOLOv4网络为基础利用迁移学习进行训练,在自建数据集上取得了良好效果;Liang等^[6]针对图像目标进行识别和定位的问题,提出了一种基于卷积神经网络的多任务学习框架(MTLA),模型精度达到了81.5%;吴蓬勃等^[7]将TensorFlow深度学习与机器视觉技术相结合,设计了垃圾视觉分拣实验平台,通过数据采集、数据标注、模型的迁移训练等步骤,实现了垃圾的视觉分拣;张月文等^[8]以优傲机器人UR10与深度相机Intel Real Sense D435为硬件、YOLOv4目标检测算法和KCF目标跟踪算法为软件基础,设计了基于机器视觉的可回收垃圾智能分拣系统,性能可靠稳定。上述方法在一定程度上有效解决了垃圾分类问题,但是仍然存在图像识别时图像单一、数据集不平衡、网络参数过多以及系统功能不完善等问题。

基于此,本研究提出一种基于改进的YOLOv5算法用于生活垃圾智能分类系统:1)引入GhostNet作为轻量化主干网络,减少模型参数和计算成本,提高检

测速度。2)将Ghost卷积与CBAM级联以利用两者优势;并选用SIoU代替CIoU,考虑更多维度信息,提高模型检测的精度和鲁棒性。3)设计一款集合人体感应、垃圾破袋、垃圾分类、油水渣分离、云平台监测等多种功能的一体化智能分类垃圾箱。

1 系统设计

1.1 系统结构

生活垃圾智能分类系统由物体检测系统、图像识别系统、垃圾分类系统和后台监测系统构成,详见图1。

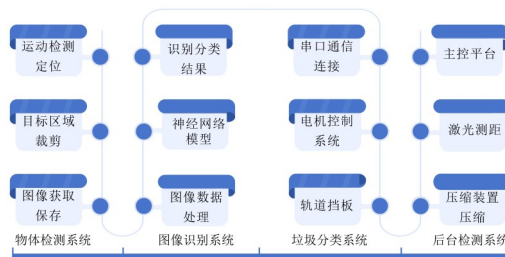


图1 生活垃圾智能分类系统整体组成

Figure 1 Overall composition of the intelligent classification system for domestic garbage

物体检测系统基于机器视觉技术对生活垃圾进行检测与定位,对目标区域图像进行裁剪后,将生活垃圾图像输送到图像识别系统;图像识别系统基于深度学习技术对垃圾图像进行识别和分类,通过串口通信将分类结果发送到垃圾分类系统;垃圾分类系统根据分类结果,利用轨道挡板对垃圾进行分类处理;传感器实时对桶内垃圾进行测距,传送信息驱动压缩装置对桶内垃圾进行压缩,上位机不断获取垃圾箱的位置信息、实时容量信息、类别信息传送到主控平台。

1.2 系统工作原理

生活垃圾智能分类系统工作流程如图2所示。大块垃圾经破袋装置破碎为小块垃圾后,通过传送轨道进入差速分离装置进行单个分离,分离后的垃圾进入物体检测系统;当垃圾经分拣轨道至机器视

觉装置时,垃圾的图像将通过工业镜头处理被视觉传感器检测到,随之图像识别系统由PC机处理对垃圾进行识别分类;PC机将垃圾分类的信息传送到主控器后,垃圾分类系统根据不同的分类结果,利用传送轨道、挡板、分拣轨道等对各类型垃圾进行分拣;测距传感器实时对各桶内储存余量实时监控,通过压缩装置控制储存空间;桶内空间状态通过后台检测系统传送到主控台,完成生活垃圾智能分类系统的整个工作流程。

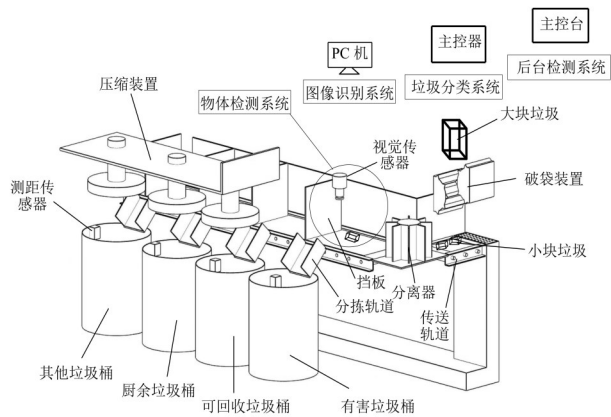


图2 生活垃圾智能分类系统结构

Figure 2 Structure of the intelligent classification system for domestic garbage

2 系统实现的关键技术

2.1 YOLOv5 算法

YOLO 系列算法在目标检测领域获得了广泛的应用。虽然 YOLO 系列已经出现了更高版本的 YOLOv7^[9]、YOLOv8^[10],但 YOLOv5 模型具有较小的模型和较少的计算量以及可观的速度,特别适于实时目标检测任务,且在不考虑 GPU 是否存在的情况下性价比较高,尤其是 PC 端的 CPU 占用少,相比 YOLOv7 和 YOLOv8,更适合在移动设备上运行,且 YOLOv7 和 YOLOv8 更适合复杂物体的识别,而 YOLOv5 更适合小物体的检测,设备使用成本较少,更适用于生活垃圾智能分类系统的设计。YOLOv5 主要由输入、主干、颈部和头部 4 个组件组成,可在 YOLOv5n、YOLOv5s、YOLOv5m、YOLOv5l 和 YOLOv5x 架构中使用。这些架构在网络深度和特征图宽度方面有所不同,并允许使用者选择最满足其特定需求的架构。为了满足对目标检测算法的实际需求,如实时检测和简单部署,我们选择了模型尺寸较小、检测速度较快的 YOLOv5s 作为基础算法。它

可以提供更高的检测精度和更快的处理速度,为生活垃圾智能分类系统的高效运行和准确分类提供了可靠的基础。

2.2 轻量化主干网络

GhostNet^[11]是一种轻量化神经网络架构,旨在在高准确性和低计算成本之间取得平衡,用以解决传统深度神经网络模型尺寸大的缺点。本研究中通过用 GhostNet 模块替换原始的 YOLOv5 架构中的特征提取网络来进行修改。这个模块是为了通过在多个卷积层之间共享权重来减少模型的计算复杂度而创建的。模型的参数更少,同时保持了其准确性。这对于实时应用检测尤为重要,减少了模型参数的数量,使得模型能够更好地利用计算资源,更适合部署在资源受限的生活垃圾智能分类系统上。改进后的 YOLOv5 结构如图 3 所示。

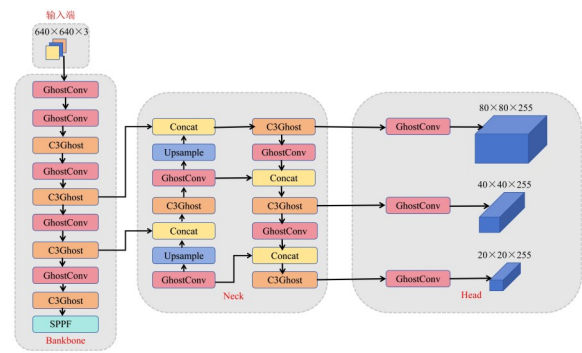


图3 改进后的 YOLOv5 结构

Figure 3 The improved YOLOv5 structure

2.3 模型结构改进

2.3.1 Ghost 卷积

GhostNet 首先利用少量的卷积核对输入的特征图进行特征提取,然后进一步对这部分特征图进行线性变化运算,最后通过拼接操作,生成最终的特征图。

对于输入图像,其中 c 、 h 、 w 为输入通道数,分别对应输入图像的通道、高度、宽度。一般来说,产生 n 个特征映射的任意卷积层的运算可以写成式(1):

$$Y = X * f + b \quad (1)$$

式中: $*$ 表示卷积运算; b 表示偏置; $Y \in R^{h' \times w' \times n}$, 代表输出特征映射有 n 个通道; $f \in R^{c \times k \times k \times n}$, 表示卷积这一层的过滤器。此外, h' 和 w' 是输出特征的高度和宽度映射, $k \times k$ 是卷积滤波器 f 的核大小所需的卷积过程中的 FLOPs 数,可以计算为 $n \times h' \times w' \times c \times k \times k$, 通常是几十万个,因为过滤器的数量 n 和数量通道

c 通常非常大。当使用 Ghost 卷积时,特征图的个数为 $n = m \times s$, 则其运算量见式(2):

$$G = \frac{n}{s} \times h' \times w' \times c \times k \times k \times (s-1) \times \frac{n}{s} \times h' \times w' \times c \times d \times d \quad (2)$$

运算量压缩比见式(3):

$$R = \frac{C}{G} = \frac{sc}{s+c-1} \approx s \quad (3)$$

这个方法减少了非关键特征的学习成本:即通过组合少量卷积核与更廉价的线性变化操作代替常规卷积方式,实现在有效减少卷积运算量的同时,不影响模型的性能^[12]。图4为 Ghost 卷积的实现过程。

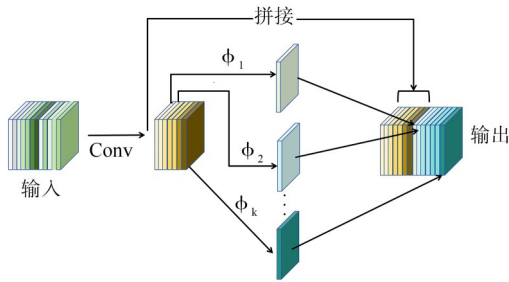


图4 Ghost卷积实现过程

Figure 4 The Ghost convolution implementation process

2.3.2 CBAM注意力机制

CBAM旨在解决传统卷积神经网络在处理不同尺度、形状和方向信息时的限制^[13]。它引入了2种注意力机制:通道注意力和空间注意力。通道注意力用于增强不同通道的特征表示,而空间注意力用于提取空间中不同位置的关键信息。CBAM由2个关键部分组成:通道注意模块(CAM)和空间注意模块(SAM),如图5所示。这2个模块可以嵌入到卷积神经网络(CNN)的不同层中,以增强特征表示。

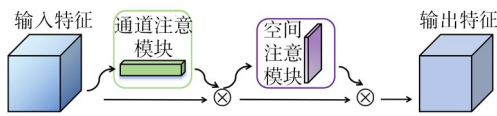


图5 CBAM注意力机制结构

Figure 5 CBAM attention mechanistic structure

在通道注意模块中,首先通过全局平均池化操作计算每个通道的全局特征表示。然后,通过全连接层(或卷积层)学习每个通道的重要性权重。最后,这些权重应用于每个通道的特征图,以增强有用的通道信息。CAM强调关键功能,而SAM强调了这些关键特征的空间定位。通道注意模块的公式

见式(4):

$$M_c(F) = \sigma \left(f^{7 \times 7} \left(\text{Concat} \left(\text{AvgPool}(F), \text{Maxpool}(F) \right) \right) \right) \quad (4)$$

式中: σ 为非线性 σ 型函数; F 为输入特征图;多层感知机MLP由2个线性层和1个ReLU激活函数组成。

空间注意模块的公式见式(5):

$$M_s(F) = \sigma \left(f^{7 \times 7} \left(\text{Concat} \left(\text{AvgPool}(F), \text{Maxpool}(F) \right) \right) \right) \quad (5)$$

式中: $f^{7 \times 7}$ 表示卷积核大小为 7×7 ;Concat表示连接操作。

由此,CBAM可以动态地调整特征图中每个通道和空间位置的重要性,从而提高卷积神经网络的表征能力和性能^[14]。

2.3.3 Ghost卷积与CBAM注意力机制级联结构

Ghost卷积与CBAM注意力机制级联结构实现方式如图6所示。利用CBAM通道注意力机制将输入的特征图通过全局平均池化,得到每个通道的全局平均值,然后通过一组全连接层来生成通道注意力权重,再通过Sigmoid函数生成新的权重参数,这些权重参数被应用到输入特征图的每个通道,使得线性操作对最终目标特征作出更大贡献,从而得到更有效的特征图。Ghost卷积与CBAM注意力机制级联的结构有效结合了Ghost卷积和CBAM注意力机制的优势^[15]。

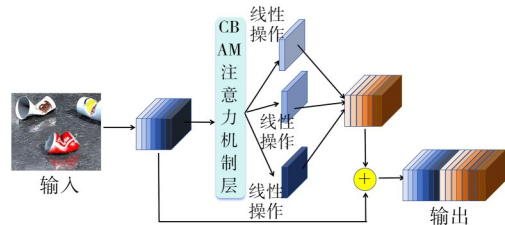


图6 Ghost卷积与CBAM注意力机制级联结构

Figure 6 Structure of the Ghost convolution combined with the CBAM attention mechanism cascade

首先,Ghost卷积使模型减少了大量的浮点型运算,保证了最终特征图通道数不变;其次,在部分原始特征图进行线性操作,生成其余特征图的过程中采用CBAM通道注意力机制保证了其余部分特征图的质量,使全部特征图尽可能对目标预测做贡献。

2.4 改进损失函数

为了加快网络收敛速度,提高检测效果,解决数据集不平衡的问题,并减少在垃圾检测中的误检测,

对于YOLOv5采用了更新的损失函数SIoU^[16]而不是标准的CIoU。CIoU唯一考虑的维度是真实帧和预测帧的重叠面积、质心距离和长宽比。而SIoU可以更好地反映宽度、高度和置信水平的变化,所以我们选择了它,而不是CIoU。SIoU损失函数主要包括以下4个因素:角度成本 Λ 、距离成本 Δ 、形状成本 Ω ,和IoU成本。SIoU函数可表示为式(6):

$$\text{SIoU} = 1 - \text{IoU} + \frac{\Omega + \Delta}{2} \quad (6)$$

角度成本的定义见式(7):

$$\Lambda = 1 - 2 \sin \left(\arcsin(x) - \frac{\Pi}{4} \right) \quad (7)$$

其中:

$$x = \frac{C_h}{\sigma} \quad (8)$$

式中: σ 为地面真实值框与预测框的中心点之间的距离; C_h 为垂直线预测框和地面真相框中心点之间的距离。

基于角度成本的距离成本 Δ 的定义见式(9):

$$\Delta = 2 - e^{\frac{(A-2) \times \left(\frac{c_h}{c_{hl}}\right)^2}{2}} - e^{\frac{(A-2) \times \left(\frac{c_w}{c_{wl}}\right)^2}{2}} \quad (9)$$

式(10)定义了地面真实箱的水平坐标和垂直坐标与预测箱的中心点之间的平均距离:

$$x = \frac{\max(b_{cy}^{gt}, b_{cy}) - \min(b_{cy}^{gt}, b_{cy})}{\sqrt{(b_{cy}^{gt} - b_{cx})^2 + (b_{cy}^{gt} - b_{cy})^2}} \quad (10)$$

式中: c_w 为地面真实盒与预测盒中心点的水平距离; b_{cx} 和 b_{cy} 为预测盒中心点的水平和垂直坐标; b_{cx}^{gt} 和 b_{cy}^{gt} 为地面真实盒中心点的水平和垂直坐标。

形状成本 Ω 的定义见式(11):

$$\Omega = \left(1 - e^{-\frac{|w - w^{gt}|}{\max(w, w^{gt})}} \right)^{\theta} + \left(1 - e^{-\frac{|h - h^{gt}|}{\max(h, h^{gt})}} \right)^{\theta} \quad (11)$$

式中: h^{gt} 和 w^{gt} 为地面真实框的宽度和高度; w 和 h 为预测框的宽度和高度;遗传算法计算 θ 值确定了关注形状的成本数量,在不同的数据集中,该值取值在2~4之间。

IoU成本定义见式(12):

$$\text{IoU} = \frac{A \cap B}{A \cup B} \quad (12)$$

式中: A 为预测框的面积; B 为地面真值框的面积。

本研究中,我们观察到嵌入SIoU损失函数可以提高训练的精度。在目标检测中,模型的损失函数中包含2个关键指标: Objectness(目标性)和

Classification(分类),这些指标的均值越小,表示目标检测和分类的结果越准确。在训练过程中,需要综合考虑和平衡两者,通过合适的权重和优化策略,共同提升模型在目标检测和分类任务上的性能^[17]。

在SIoU函数中,我们对惩罚指标进行了修订,以考虑期望回归向量的角度。SIoU函数显著提高了模型识别不同尺寸缺陷的精度,这在处理涉及图像中不同缺陷尺度的缺陷检测任务时尤其有价值,最终可提高YOLOv5模型的精度和鲁棒性。

3 实验预处理

3.1 数据集处理

YOLOv5算法达到稳定可靠的图像分类模型需要大量的图像数据样本进行学习和训练。由于生活垃圾种类繁多,为了确保垃圾箱的图像识别更准确,团队采取了一系列数据采集方法,包括自主拍摄和互联网收集,以构建完整的垃圾分类数据集。数据集包含了各种生活垃圾的图像样本,涵盖了各种颜色、形状和大小。通过对这些图像样本进行标注和分类,可以为卷积神经网络提供有代表性的训练数据,使其能够更好地理解和识别不同种类的垃圾。该数据集包含了18495张图片,包括可回收垃圾、厨余垃圾、有害垃圾和其他垃圾,涵盖45个不同的垃圾种类,其中设定训练集(train)和验证集(val)的比例为8:2。

在生活垃圾数据集中使用了包含图像和json标签文件的数据,通过数据集的可视化标签文件描述每个图像中包含的垃圾类别和位置信息。具体的标签设置参数如图7所示。

3.2 实验环境配置

本算法是在Windows10系统下进行训练,采用Pytorch深度学习框架,编程语言为Python3.8,CUDA和Cudnn版本号分别为11.3和7.5,显卡为NVIDIA GeForce GTX3060,显存6GB,CPU为Intel Core® i7-11800H八核处理器。

4 实验过程及分析

为了优化本文模型的训练效果,选择初始学习率为0.0001,并将批次大小(Batchsize)设置为8。优化器的选择是SGD(随机梯度下降),训练轮数(Epoch)设定为150。训练过程采用余弦退火方法来衰减学习率。这一方法能够在训练过程中逐渐降低学习率,有助于模型更好地收敛和适应不同的训练阶段。通过合理的参数设置和优化策略,可以训练得到一个在生

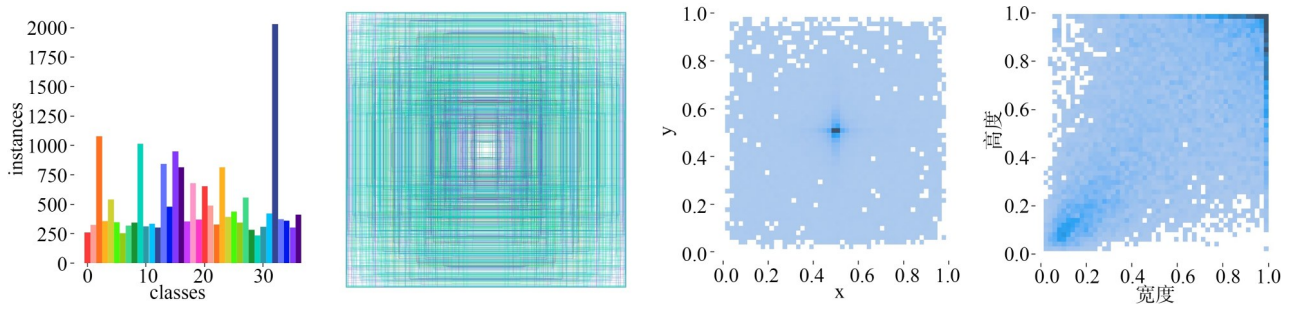


图7 数据集的可视化

Figure 7 Visualization of the data set

活垃圾分类任务中具有较高准确率和鲁棒性的 YOLOv5 模型。图8为该 YOLOv5 模型的结果。

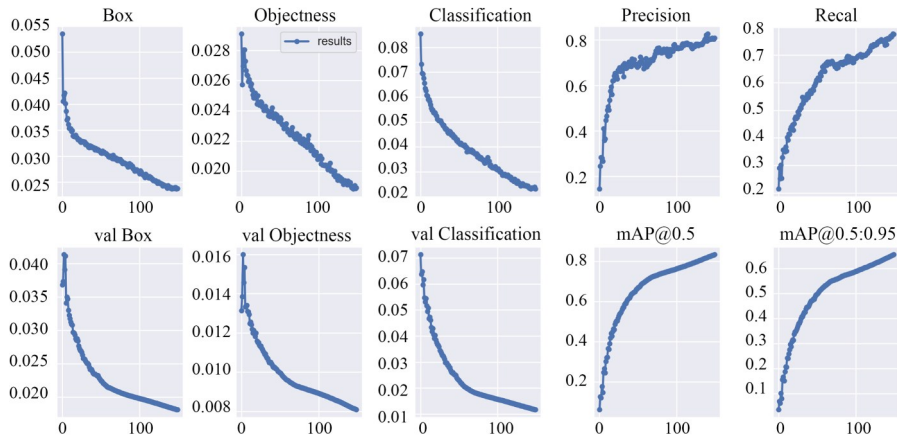


图8 YOLOv5模型结果

Figure 8 YOLOv5 model results

4.1 评价指标

精度 Precision 定义为找对的正类/所有找到的正类,即:

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (12)$$

在分类任务中,精度是衡量分类器的性能指标之一,表示分类器分出的正类中正确的比例。

召回率 Recall 定义为找对的正类/所有本应该被找对的正类,即:

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (13)$$

在分类任务中,召回率是衡量分类器性能的重要指标之一,表示分类器能够正确识别出所有正类样本的能力。

$mAP@0.5$ 和 $mAP@0.5:0.95$ 代表了平均精确率均值(mAP)在不同 IoU 阈值下的计算方式。其中,AP 是根据将召回率 (Recall) 设定为横坐标、精确率 (Precision) 设定为纵坐标绘制的曲线所围成的面积。

m 表示平均,@后面的数值是指用于判断正负样本的 IoU 阈值。@0.5:0.95 表示将阈值取值 0.5~0.95,以 0.05 的步长递增,并对所有阈值下的结果取平均值^[18]。

GFLOPS (giga floating-point operations per second) 指模型每秒 10 亿次的浮点运算数,表示衡量模型的性能参数。GFLOPS 的数值越高,表示模型的浮点运算能力越强,处理复杂计算任务的速度就越快。

每秒处理帧数 FPS(frames per second) 表示模型在图形处理时每秒能够刷新的次数,常被用作评价指标来衡量算法或系统的性能。

参数量表示在机器学习或深度学习中,模型所包含的可学习参数的数量。参数量通常是在训练过程中通过优化算法进行调整的,以实现模型的预测误差最小化。在深度学习中,参数量主要指神经网络中权重(weights)和偏置(biases)的数量。参数量对模型的性能、训练时间、内存占用以及过拟合风险等

方面都有重要影响。

4.2 消融实验

为了验证不同改进方法对模型的影响,本研究设置了1组消融实验。包括:1)原始YOLOv5模型;2)GhostNet作为主干特征提取网络的YOLOv5模型;

3)GhostNet与CBAM注意力机制级联结构作为主干特征提取网络的YOLOv5模型;4)GhostNet与CBAM注意力机制级联结构作为主干特征提取网络,同时使用Siou改进CIoU损失函数的YOLOv5模型。4种模型的实验结果如表1所示。

表 1 消融实验结果
Table 1 Results of ablation experiments

模型	精度/%	召回率/%	平均精度值/%	GFLOPS/s	每秒处理帧数 FPS/(帧/s)	参数量
YOLOv5	80.8	77.5	83.4	16.2	73.8	7111327
YOLOv5+Ghost	76.6	68.5	73.5	8.5	69.1	3773542
YOLOv5+Ghost-CBAM	78.3	73.5	78.6	18.6	78.0	3988432
YOLOv5+Ghost-CBAM+Siou	89.3	87.8	80.5	18.9	82.0	4039271

从表1可知:通过用GhostNet的C3Ghost模块替换原始的YOLOv5架构中的C3模块后,改进模型的权重由7.111M降低至3.774M,但GFLOPS减少了7.7G,FPS降低了4.7帧/s;改进模型YOLOv5+Ghost使用Ghost卷积与CBAM注意力机制级联结构后,权重由3.774M上升至3.988M,但GFLOPS提升了2.4G,FPS提升了4.2帧/s;使用Siou改进CIoU损失函数的改进模型YOLOv5+Ghost-CBAM权重由3.988M上升至4.039M,但GFLOPS提升了0.2G,FPS提升了4.2帧/s,虽然改进模型的平均精度值相比原始模型损失了2.9%,但是模型轻量化达到50%,更易于移植到垃圾检测的设备上,且改进后的模型每秒处理帧数相比于原始模型提升了8.2帧/s,检测更流畅。

4.3 生活垃圾检测效果展示

图9为部分生活垃圾实验检测样本在YOLOv5模型改进后在复杂环境下的效果图。可知:改进后的YOLOv5模型(YOLOv5+Ghost-CBAM+Siou)能够在复杂、多种类垃圾同时出现的环境下进行检测,在光照影响、目标密集、种类繁多等干扰条件下,同样可以取得良好的检测效果。改进后的YOLOv5模型在提高模型检测速度的同时,避免了小目标生活垃圾遗漏,和大目标生活垃圾的置信度和目标框架定位不稳定的问题。

4.4 模型对比分析

为了进一步验证本研究所提出算法的先进性,将YOLOv5+Ghost-CBAM+Siou与传统的目标检测算法YOLOv3^[19]、YOLOv4^[4]、Faster R-CNN^[20]、SSD^[21],以及基于Anchor Free的目标检测算法CenterNet^[22]进行对比,并选取平均精度值(average

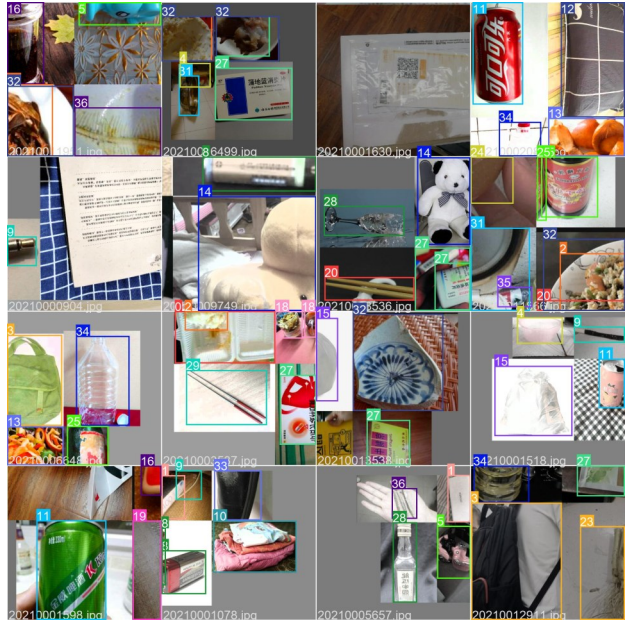


图 9 模型改进后的检测效果
Figure 9 Detection effect after model improvement

precision, mAP)、GFLOPS、FPS和参数量(Params,模型体积)作为评价指标,对比实验结果如表2所示。

由表2可知:虽然目标检测算法YOLOv3、YOLOv4、YOLOv5、Faster R-CNN相比于YOLOv5+Ghost-CBAM+Siou的平均精度均值略高,但YOLOv5+Ghost-CBAM+Siou的GFLOPS和每秒处理帧数均高于其他算法,且参数量相比算法参数量较少的YOLOv5,也仅为其参数量的56%,不仅满足实时检测的需求,其易移植性也大大提高。综上可认为本研究所提出的算法综合表现更佳,不仅具有更快的检测速度,还具有更强的移植性,可以满足生活垃圾智能分类系统的设计需求。

表2 不同算法实验对比

Table 2 Experimental comparison of different algorithms

模型	平均精度值/%	GFLOPS/s	每秒处理帧数 FPS/(帧/s)	参数量
YOLOv3	83.2	3.1	13.5	237957468
YOLOv4	84.8	3.3	14.7	256347894
YOLOv5	83.4	16.2	73.8	7111327
Faster R-CNN	87.1	1.8	8.0	5472334176
SSD	80.1	5.7	25.0	150213546
CenterNet	79.3	7.4	33.0	285426812
YOLOv5 + Ghost-CBAM + SIoU	80.5	18.9	82.0	4039271

5 系统应用

5.1 智能分类垃圾箱的实现

智能分类垃圾箱的实现,是新一代信息与技术融合的结果。目前智能分类垃圾箱有多种形式,其中声控方式的垃圾箱需要投放者对着垃圾箱说出垃圾的名字,垃圾箱判定垃圾所属类别后打开相应的储存桶。但由于住宅区的垃圾多为整袋投放^[23],所以该垃圾箱设计具有自动破袋功能,可以将生活垃圾精细化分类,极大缩短了投放时间。在数据集丰富的情况下,选用本研究中改进的易于移植的YOLOv5模型,可使得图像识别的速度更快,提高了生活垃圾处理分类的效率。该垃圾箱还设置了油水渣分离装置,避免了干湿垃圾混合产生异味和细菌,对人体健康和环境造成影响。分离后的水经过净化处理,可以用于社区或小区内的绿化等方面,资源利用率较高。

此外,该垃圾箱使用光照度传感器,实现对环境光强度的探测,其控制器适用于各种场合,适应性极强。垃圾箱由顶部太阳能板光伏发电。并设有云平台监测功能,可通过微信小程序实时了解垃圾箱的存放状态,便于定时定点进行投放,更加有效地解决居民生活垃圾的分类和处理问题。

5.2 外观设计

对市面上常见垃圾箱进行调研统计分析,结果如下:

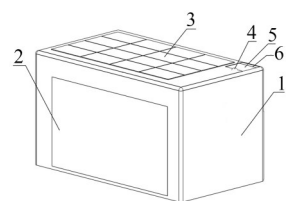
1) 翻盖式垃圾箱:无脚踏板款通常放置在室外,垃圾箱盖较脏,需用手接触;有脚踏板款开盖时弹性大,盖子上的脏物会飞向使用者,卫生性差。

2) 推盖式垃圾箱:无脚踏板款放置在室外,垃圾箱盖较脏,需用手接触,卫生性差。

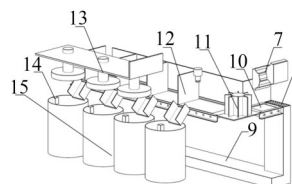
3) 开口式垃圾箱:上方无遮盖,无法阻挡雨水;暴露在空气中的垃圾易发酵,散发异味。

针对现有垃圾箱存在问题,提出了一种智能分

类垃圾箱的设计方案。该方案基于一箱多分的理念,在空间中将垃圾箱整体进行分割,形成多个分类空间,能够解决垃圾箱使用中的直接接触、垃圾处理不便、异味等问题,满足用户对生活垃圾分类的需求。智能分类垃圾箱的外观设计如图10a所示。



a-外观设计



b-工作流程

- 1—箱体 2—可开门 3—光伏发电板 4—红外传感器 5—投放口
6—盖板 7—破袋装置 8—引流管滤网 9—引流管 10—传送轨道
11—差速分离装置 12—识别分类装置 13—压缩装置 14—溢满检测装置 15—垃圾储存装置

图10 智能分类垃圾箱的外观和功能设计

Figure 10 Appearance and function design of the intelligent classification dustbin

5.3 功能设计

智能分类垃圾箱工作流程如图10b所示。智能分类垃圾箱正常工作时间期间,主控板包括MCU和各外设装置为核心的控制单元与各模块相匹配,当人体走进红外范围时,感应模块输出电信号,驱动电机进行旋转控制垃圾箱盖打开,语音助手播报引导用户正确规范投放垃圾。当用户离开感应范围内,箱盖自动关闭。垃圾被正确投入投放口,机器视觉装置会对垃圾进行识别分类。体积 $>2\text{ dm}^3$ 的垃圾会

被破袋装置进行分割,固体垃圾在分拣轨道上进行识别分类后进入到对应的桶区,液体垃圾经引流管过滤后,由无机陶瓷膜进行油水分离。分离后的油污垃圾储存在相应的区域,净化水可再次用于社区或小区的绿化;压缩装置对垃圾箱体的桶内垃圾进行压缩。溢满检测装置对个体内容量进行监测。当垃圾箱的容量达到 100% 时,主控平台通知管理人员调度不同类别的垃圾回收车,携空箱到指定位置进行箱体置换。

6 结 论

针对现有生活垃圾分类面临的问题,本研究提出了一种基于改进的 YOLOv5 算法的生活垃圾智能分类系统设计。使用 YOLOv5 算法进行目标检测,根据实时检测和部署需求,选择轻量级的 YOLOv5s 架构;引入 GhostNet 作为轻量化主干网络,减少模型参数和计算成本,提高检测速度;采用 Ghost 卷积降低运算量,集成 CBAM 注意力机制增强特征表示,将 Ghost 卷积与 CBAM 级联以利用两者优势;并选用 SiO_U 代替 CIoU,考虑更多维度信息,提高了模型检测的精度和鲁棒性。利用改进后的模型在丰富、大量的数据集上进行实验,发现其在检测速度和模型大小方面远优于原算法;与目前主流算法相比,具备体积小、速度快的优势,在表现出良好检测性能的同时,其抗干扰能力较强、鲁棒性较好,在城市生活垃圾的智能管理领域具有较好的应用潜力。

本研究系统设计的智能分类垃圾箱和普通垃圾箱相比,可实现全自动化垃圾分类,具有成本低、电压低功耗、操作简单、实用性强等特点,符合现代社会绿色节能要求,并可通过提高垃圾分类的准确性和效率,促进资源回收和再利用。

参考文献

- [1] 杨慧任. 垃圾分类背景下中国天楹公司财务绩效分析及对策研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2021.
- YANG Y R. Financial performance analysis and countermeasure research of China Tianying Company under the background of garbage classification[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Hydropower Power, 2021.
- [2] 张春男. 生活垃圾分类回收体系及设备设计研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学, 2020.
- ZHANG C N. Research on the design of domestic garbage classification and recycling system and equipment[D]. Shenyang: Shenyang University of Science and Technology, 2020.
- [3] 党宏社, 张超, 庞毅. 基于视觉引导的工业机器人快速分拣系统研究[J]. 电子器件, 2017, 40(2): 481-485.
- DANG H S, ZHANG C, PANG Y. Research on a rapid sorting system for industrial robots based on visual guidance [J]. Electronic Devices, 2017, 40(2): 481-485.
- [4] 范金豪, 崔立志. 基于 Yolo_ES 的垃圾分类目标检测模型[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 160-166.
- FAN J H, CUI L Z. Garbage classification target detection model based on Yolo_ES [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1): 160-166.
- [5] ZHANG R, YIN D, DING J, et al. A detection method for low-pixel ratio object[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(9): 11655-11674.
- [6] LIANG S, GU Y. A deep convolutional neural network to simultaneously localize and recognize waste types in images[J]. Waste Management, 2021, 126: 247-257.
- [7] 吴蓬勃, 姚美菱, 王拓, 等. 基于 TensorFlow 的垃圾分拣机器人设计[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(6): 117-122.
- WU P B, YAO M L, WANG T, et al. Design of a garbage sorting robot based on TensorFlow [J]. Laboratory Research and Exploration, 2020, 39(6): 117-122.
- [8] 张月文, 李松恒, 张炜, 等. 基于机器视觉的可回收垃圾智能分拣系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(7): 98-103, 107.
- ZHANG Y W, LI S H, ZHANG W, et al. Design of intelligent sorting system for recyclable garbage based on machine vision[J]. Laboratory Research and Exploration, 2022, 41(7): 98-103, 107.
- [9] 李晨曦. 基于注意力机制和卷积神经网络的垃圾识别与分类[D]. 太原: 山西大学, 2024.
- LI C X. Garbage identification and classification based on attention mechanism and convolutional neural network [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2024.
- [10] 张传庆. 基于图像处理的机器人垃圾分拣系统研究与开发[D]. 上海: 东华大学, 2024.
- ZHANG C Q. Research and development of a robotic garbage sorting system based on image processing [D]. Shanghai: Donghua University, 2024.
- [11] CAO M L, FU H, ZHU J Y. Lightweight tea bud recognition network integrating GhostNet and YOLOv5[J]. Math Biosci Eng, 2022, 19(12): 12897-12914.
- [12] ARIFANDO R, ETO S, WADA C. Improved YOLOv5-based lightweight object detection algorithm for people with visual impairment to detect buses[J]. Applied Sciences, 2023, 13(9): 5802. <https://doi.org/10.3390/app13095802>.
- [13] 朱春燕. 融合注意力机制的 YOLOv5 交通标志目标检测算法[J]. 价值工程, 2024, 43(13): 113-116.
- ZHU C Y. A YOLOv5 traffic sign target detection algorithm integrated with the attention mechanism [J]. Value Engineering, 2024, 43(13): 113-116.
- [14] LV M, SU W H. YOLOV5-CBAM-C3TR: an optimized model based on transformer module and attention mechanism for apple leaf disease detection[J]. Frontiers in Plant Science. 2024, 14:

- 1323301.
- [15] RAJ G D, PRABADEVI B. Steel strip quality assurance with YOLOV7-CSF: A coordinate attention and SIoU fusion approach [J]. IEEE Access, 2023(11): 129493-129506.
- [16] ZHANG Y, LI H, WANG R, et al. Constrained-SIoU: a metric for horizontal candidates in multi-oriented object detection [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15(1): 956-967.
- [17] 梁继然, 陈壮, 董国军, 等. 基于Ghost卷积和通道注意力机制级联结构的车辆检测方法研究[J]. 天津大学学报, 2023, 56(2): 193-199.
- LIANG J R, CHEN Z, DONG G J, et al. Research on vehicle detection methods based on the cascade structure of Ghost convolution and channel attention mechanism [J]. Journal of Tianjin University, 2023, 56(2): 193-199.
- [18] 朱鑫鹏, 李丹. 基于YOLO5Face在火车站口罩佩戴的检测系统[J]. 电子测试, 2021(24): 50-52.
- ZHU X Q, LI D. Detection system based on YOLO5Face for mask wearing at the railway station [J]. Electronic Test, 2021(24): 50-52.
- [19] REDMON J, FARHADI A. Yolov3: An incremental improvement [J]. ArXiv Preprint, 2018, ArXiv:1804.02767.
- [20] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. FasterR-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [21] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single shot multibox detector [C]//2016 European Conference on Computer Vision. Amsterdam, The Netherlands, 2016:21-37.
- [22] ZHOU X Y, WANG D Q, KRÄHENBÜHL P. Objects as Points [EB/OL]. <https://arxiv.org/pdf/1904.07850.pdf>. 2019-04-25.
- [23] 王文胜, 年诚旭, 张超等. 基于YOLO v5模型的非住宅区自动垃圾分类箱设计[J]. 环境工程, 2022, 40(3): 159-165.
- WANG W S, NIAN C X, ZHANG C, et al. Design of non-residential automatic garbage sorting bins based on the YOLO v5 model[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(3): 159-165