

一种基于视觉识别的乒乓球捡球机设计与开发

李文杰, 缪肖凝, 陈振宇, 肖开研, 李一染*

(上海师范大学 信息与机电工程学院, 上海 201418)

摘要: 针对目前乒乓球捡球机捡球机构不完善、乒乓球识别算法适应性差的问题, 提出一种基于视觉识别的智能乒乓球捡球机. 采用树莓派4B开发板作为控制单元, 利用轻量化的you only look once (YOLO) v5s算法, 对乒乓球进行识别; 通过扇叶式集球机构, 将乒乓球卷入收纳篮. 实验结果表明: 在乒乓球数小于150个的情况下, 该捡球机的识别精确率与查全率均可达到95%以上, 漏检率控制在7%以下. 同时, 集球机构结构简单、可靠、效率高, 整体设计方案具有较好的实际应用价值.

关键词: 乒乓球捡球机; 树莓派4B; 目标检测; you only look once (YOLO) v5s算法; 扇叶式集球机构

中图分类号: TP 23 文献标志码: A 文章编号: 1000-5137(2023)02-0248-08

Design and development of a table tennis ball picking machine based on visual recognition

LI Wenjie, MIAO Xiaoning, CHEN Zhenyu, XIAO Kaiyan, LI Yiran*

(College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China)

Abstract: In order to resolve the problems of imperfect ball picking mechanism and poor adaptability of table tennis recognition algorithm, this paper proposes an intelligent table tennis ball picking machine based on visual recognition. We use the Raspberry Pi 4B demo board as the control unit, and recognize the table tennis by the lightly modified you only look once (YOLO) v5s algorithm, and roll the table tennis into the storage basket through the fan-blade type ball collection mechanism. Experimental results show that under the condition that the number of table tennis balls is less than 150, the recognition accuracy and completion rate of the ball picking machine can reach more than 95%, and the missed detection rate is less than 7%. At the same time, the structure of the ball collection mechanism is simple, reliable and efficient, and the overall design scheme has good practical application value.

Key words: table tennis ball picking machine; Raspberry Pi 4B; object detection; you only look once (YOLO) v5s algorithm; fan-blade type ball collection mechanism

收稿日期: 2022-09-07

作者简介: 李文杰(2001—), 男, 本科生, 主要从事计算机视觉、人工智能和深度学习等方面的研究. E-mail: 1000502356@smail.shnu.edu.cn

*通信作者: 李一染(1975—), 男, 副教授, 主要从事智能汽车环境感知及控制技术等方面的研究. E-mail: jdlzy@shnu.edu.cn

引用格式: 李文杰, 缪肖凝, 陈振宇, 等. 一种基于视觉识别的乒乓球捡球机设计与开发 [J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2023, 52(2): 248-255.

Citation format: LI W J, MIAO X N, CHEN Z Y, et al. Design and development of a table tennis ball picking machine based on visual recognition [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2023, 52(2): 248-255.

0 引言

在乒乓球俱乐部或训练室里,学习者在基本动作训练时,乒乓球会大量散落,依靠传统的人力捡球方式,会频繁打断训练进度,并造成学习者体力上的消耗.为此,人们开发了自动乒乓球捡球机.

自动乒乓球捡球机主要解决两个问题:球体的识别与捡拾.识别方面,大多数研究主要采用对比颜色和形状特征的检测算法^[1-3],该方法的优点是算法简单,对控制器性能要求较低,但在识别过程中对环境光照较为敏感,适应性很差.捡拾方面,目前常用的方法为滚轮栅格式^[3-4]、真空吸入式^[5-6]和机械手^[7-8]等.滚轮栅格式捡球机结构简单可靠,不便于抓取乒乓球,导致整体效率不高;真空吸入式捡球机需要保持一定程度的真空吸力,耗电量大,密封要求高,且容易吸入杂物,虽然捡球效果较好,但实用性较差;机械手捡球机结构成熟,但难以对乒乓球进行定位与抓取.

针对上述问题,本文作者设计了一种基于视觉识别的智能乒乓球捡球机,采用旋转的扇叶作为集球机构,并采用改进的 you only look once (YOLO) v5s 算法识别乒乓球,以期获得良好的实用效果.

1 智能捡球机的基本组成和工作原理

智能乒乓球捡球机由集球机构、驱动机构、收纳篮、识别摄像头、超声波传感器与控制单元组成(图1),能够完成识别、移动、捡球、存储和避障等功能.其工作原理为:集球机构通过扇叶的高速转动,完成乒乓球的拾取任务;驱动机构为捡球机的运动提供牵引力;收纳机构用于存储乒乓球;识别摄像头对环境数据进行采集;控制单元利用环境数据,通过目标检测模型,判断乒乓球的具体位置,进而控制捡球机向乒乓球前进,并最终完成拾取工作.在运行过程中,通过超声波传感器不断检测前方,实现障碍物的探测与躲避.

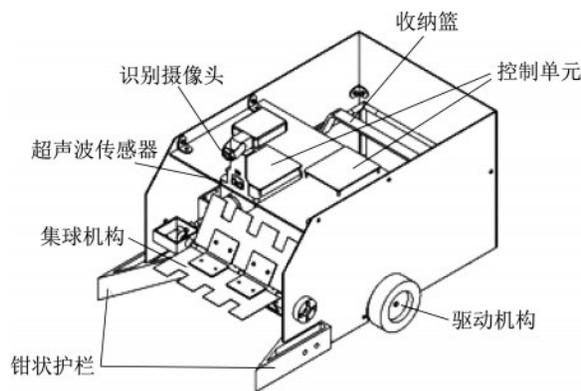


图1 智能捡球机整体设计图

2 智能捡球机机械结构设计

2.1 集球机构

集球机构(图2)为智能捡球机的关键执行部件,通过扇叶的连续旋转,将捡球机前部的乒乓球卷入机构内部,并沿引导坡道将其推入后方的收纳篮中.集球机构由耙状扇叶、三向夹紧器、旋转轴、直角转换器、驱动电机和钳状护栏组成.按照转速 $220\sim 230\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的要求,选择直流减速电机作为驱动电机;基于对旋转叶片工作状态和轻量化的考虑,将扇叶设计为耙状,并用三向夹紧器将叶片与旋转轴固定在一起.驱动电机通过直角转换器驱动旋转轴,带动叶片旋转.由2个锥齿轮组成的直角转换器,简化了传动机构的设计.钳状护栏(图1)将捡球区域由矩形扩大为扇形,进一步提高了捡球效率.

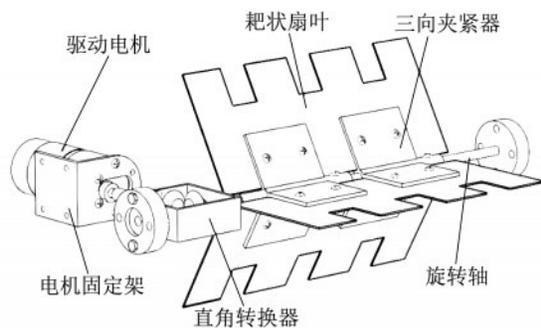


图2 集球机构

2.2 驱动机构

驱动机构(图3)由对称布置在底板两侧的2个驱动轮、2个万向轮和2个驱动电机组成.2个驱动电机位于引导坡道下方,通过支架固定在小车底板上,与两侧驱动轮分别相接.两侧驱动轮在捡球机后方万向轮的配合下,通过对驱动电机的调速控制,实现捡球机的自动转向与前进功能.

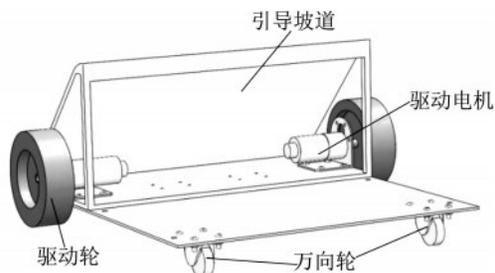


图3 驱动机构

2.3 收纳篮

收纳篮结构(图4)位于捡球机整体机身后部,引导坡道与捡球机侧板、后板围合而成的矩形区域内.收纳篮由支架和布套两部分组成,其中支架由碳素杆通过塑料三向固定器连接制成.此设计一方面实现了结构的轻量化,另一方面通过可替换使用的收纳篮,实现了乒乓球的快速取用,提高了效率.

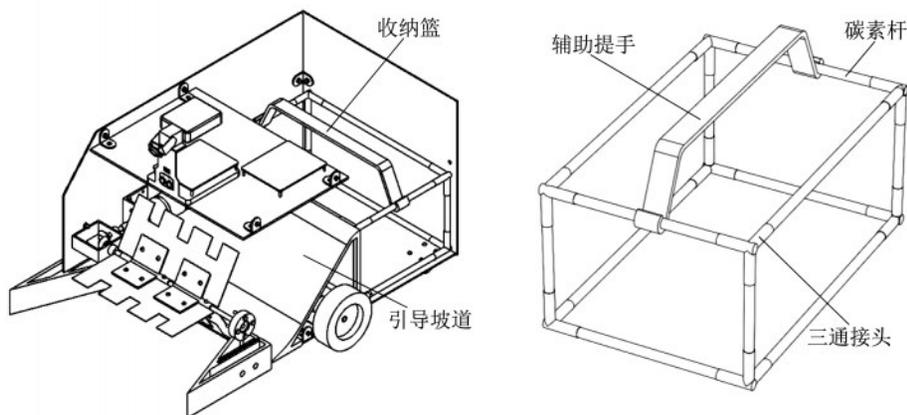


图4 收纳篮结构

3 智能捡球机电子硬件系统设计

捡球机的硬件设计方案采用模块化设计思路,依据各模块与主控板之间不同的通信方式,合理选用

相应的硬件设备,如图5所示。

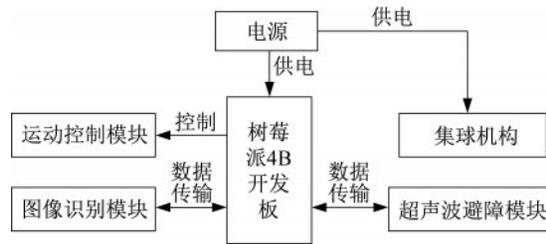


图5 硬件系统框图

本设计的控制单元为树莓派4B开发板。该开发板采用四核64位 ARM Cortex-A72 架构 CPU, 4 GB 内存, 同时搭载6个串口及40个通用输入/输出(GPIO)接口, 能够同时满足设计中的图像识别处理、运动控制及感知避障等功能的需求。

识别模块的图像采集任务由单目摄像头完成。该摄像头的分辨率为640 pixels×480 pixels, 可以准确高速地采集环境的图像信息, 并将图像信息通过USB接口传输给主控板。

避障模块采用HC-SR04超声波传感器, 测距范围在400 cm内, 测距精度可达3 mm^[9]。该传感器配置容易, 使用方法简单。当被测物体的距离发生突变时, 传感器测量数值并不会随之跳变, 故在本设计中, 选用多次测量的均值, 获得精确度更高的探测数据^[10]。

在本设计中, 驱动、集球电机分别选用8 V和12V直流碳刷电机, 运动控制采用L298N双H桥驱动芯片, 通过脉宽调节电机转速。

4 智能捡球机算法设计

4.1 乒乓球识别算法设计

目前常用的乒乓球视觉识别算法主要基于乒乓球的颜色和形状特征, 参数也往往根据当前情况进行设定。当周围环境光照变化引起图像中乒乓球的颜色或形状发生变化时, 就会导致算法的识别率下降, 甚至完全失效^[11-13]。为了解决这一问题, 采用YOLO v5s算法进行乒乓球识别。YOLO v5s算法是一种基于卷积神经网络的深度学习算法, 采用线性回归方式对目标的位置及类别进行预测, 网络简洁, 计算量小^[14-17]。

为了提高YOLO v5s算法在树莓派4B平台上的运行速度, 保证捡球机工作的实时性, 对YOLO v5s算法进行了轻量化改造。由于乒乓球在图片中所占像素区域较小, 在所采用网络中去除了原YOLO v5s结构中大尺度目标与中尺度目标的检测器, 仅保留小尺度目标的检测器, 因此取消了原网络结构中的Neck模块。此外, 乒乓球具有明显的特征信息, 易于检测, 故将主干网络Backbone的层结构进行轻量化, 减少CSP模块中残差模块的数量。优化后的网络结构如图6所示。

对于乒乓球的识别常常会遇到多个球同时出现在视野中的情况, 如何确定首选目标成为必须解决的问题。本算法遵循“最大目标”原则进行选取, 即在当前帧画面中检测到的所有目标中选择面积最大的作为捡球机的首选目标, 进而计算该目标在图片中的坐标值, 通过捡球机的左右转动, 使目标处于画面的中线(捡球机的正前方)位置, 之后进行拾取。

4.2 智能捡球机整体控制算法设计

捡球机整体运作控制流程如图7所示。电源开启后, 捡球机原地转圈, 同时由单目摄像头识别乒乓球进而确定目标球, 主控板开启集球机构, 并控制捡球机向目标球的方向运动, 直到集球结构将目标乒乓球扫入收纳篮。在此过程中, 超声波传感器不断采集前方信息, 若检测到前方有障碍物, 控制单元将控制捡球机绕开障碍物, 之后重新识别乒乓球。

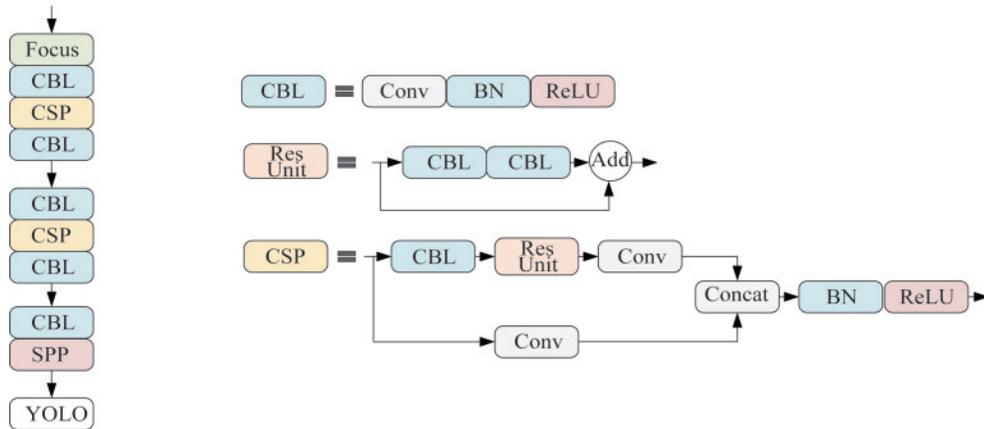


图6 优化后的YOLO v5s网络结构

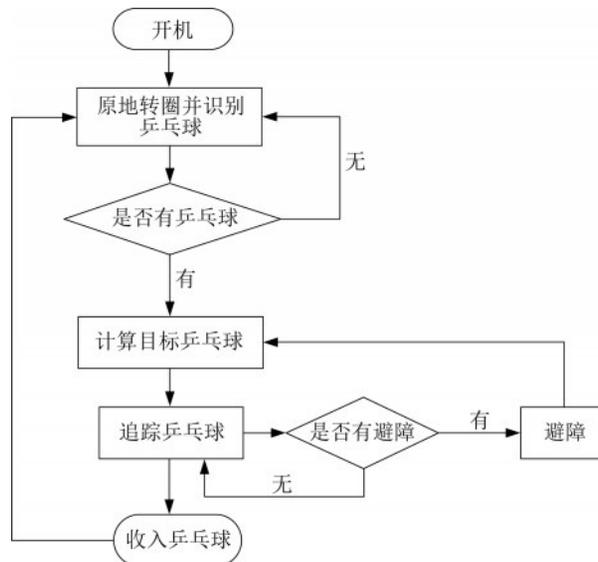


图7 整体控制流程图

5 实验分析

5.1 YOLO v5s 算法的模型训练与部署

实验所用操作系统为 Windows 10;统一计算设备架构(CUDA)和 cuDNN 版本号分别为 11.0 及 8.3.0;深度学习框架为 pytorch, 版本号为 1.8.0; CPU 处理器为 Intel Core i7-12700; 图形处理器(GPU)为 RTX2070Ti. 由于目前国内暂时没有可用的乒乓球标注数据集, 利用 Make Sense 软件对所采集图像样本进行标注, 共获得 500 组数据. 将数据集中 80% 的图像样本作为训练集, 其余 20% 作为测试集. 在模型训练过程中, 所使用超参数如下: 网络迭代次数设置为 500 次; 每个训练批次输入的图片数量设置为 16 张; 初始余弦退火学习率设置为 0.001, 最终学习率收敛至 0.000 1.

如图 8 所示, 将训练好的模型通过树莓派平台适配的 OpenVINO 进行优化, 将 .pt 格式转化为 .onnx 格式模型文件, 然后转换成 Intermediate Representation (IR) 模型, 之后将 out 目录下生成的模型文件部署到树莓派 4B 开发板上. 实验结果显示: 转换后的模型在树莓派平台上的检测效果同 PC 端一致, 能够准确识别乒乓球, 并且视频检测帧率(FPS)为 6.73, 基本能够满足实时检测的需求.

5.2 捡球机工作性能实验

为验证智能乒乓球捡球机工作性能, 从两方面进行实验: 乒乓球识别算法性能及捡球机整体工作性

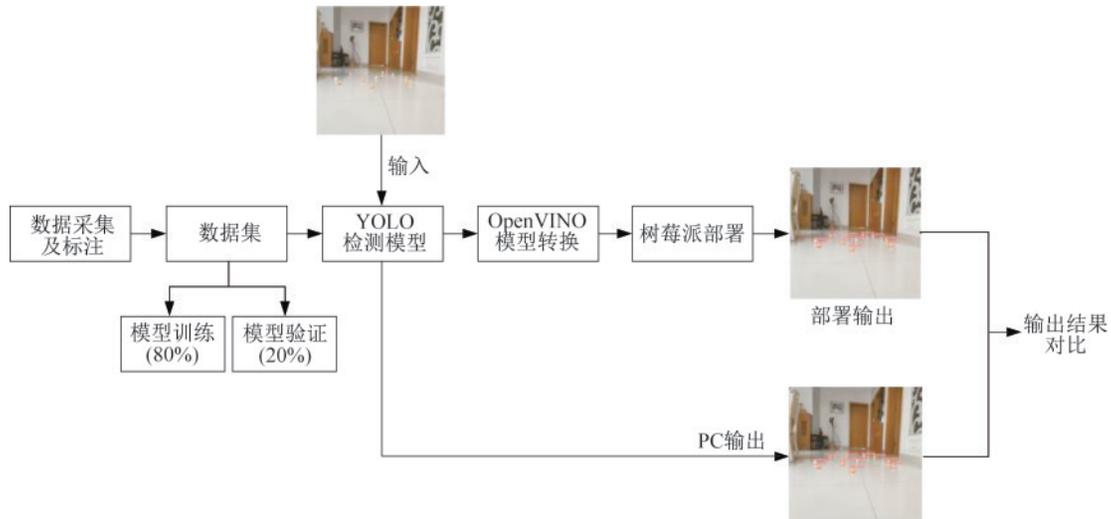


图8 算法模型的训练和部署流程图

能.对于识别算法的性能,从检测精度和轻量化性能两方面进行了评估.在检测精度方面,采用精确率与查全率2个指标进行评估,具体含义及计算公式如下:

精确率(P):评估算法对于目标类别的分类精度,

$$P = \frac{T_p}{T_p + F_p}, \quad (1)$$

其中, T_p 表示实际为正样本,检测结果也为正样本的个数; F_p 表示实际为负样本,检测结果为正样本的个数.

查全率(R):评估算法对于目标总数的查全能力,

$$R = \frac{T_p}{T_p + F_N}, \quad (2)$$

其中, F_N 表示实际为正样本,检测结果为负样本的个数.

实验中设定了不同的球数和光线条件,以验证不同情况下识别算法的检测性能,如表1所示.

表1 乒乓球识别算法性能测试

球数	$P/\%$	$R/\%$
0~49	97.5	98.4
50~74	97.6	98.6
75~99	96.9	97.5
100~124	95.7	95.6
125~150	95.2	95.3

如表1所示,当地面球数在100以内时,算法具有较高的检测精确率与查全率,当地面球数超过100个时,精确率与查全率有略微下降,但检测精确率与查全率仍保持在95%以上,能够满足捡球机目标识别的需要.

在模型的轻量化性能方面,与原有YOLO v5s进行了对比实验.实验中所使用的硬件环境为捡球机实际应用的计算设备树莓派4B开发板,设置了100颗乒乓球作为识别对象,从参数量、检测速度、精确率和查全率4个方面进行了比较,如表2所示.

从表2的比较结果中可以看出,本研究的参数量可缩减为YOLO v5s的57%,检测帧率可提升为YOLO v5s的5.10倍,并且由于乒乓球特征较为明显,经轻量化设计后的网络模型,在精确率与查全率上仅有轻微下降.

表2 网络模型轻量化性能测试

方法	参数量/MB	帧率	P/%	R/%
YOLO v5s	7.62	1.32	97.5	98.1
本研究	4.35	6.73	96.8	97.4

综上实验说明相比于YOLO v5s,本研究的网络模型在轻量化和检测速度上有大幅度提升,而在检测精度上与YOLO v5s处于同一水平,且检测精度能够满足实际使用.捡球机实际检测效果如图9所示.



图9 实际检测效果图

在性能测试之后,通过不同情况下的漏检比例(完成一次捡球工作遗漏球数占所有球数的比例)对该捡球机的整体性能进行了评估,如表3所示.

从表3的数据中可知,对于不同球数,捡球机的漏检率都保持在7%之内,说明该设备能达到较好的捡拾效果.对于一些特殊场景,例如:乒乓球体被遮挡的情况,若遮挡范围过大,算法无法检测,因此对机器器工作流程进行调整,当完成拾球动作后,捡球机将进行巡检,从不同角度再次对场地内散落的乒乓球进行检索,力争避免漏检情况的发生.捡球机实际工作效果如图10所示.

表3 漏检情况统计

球数	漏检率/%
0~49	5.81
50~74	6.24
75~99	6.17
100~124	6.46
125~150	6.86



图10 智能乒乓球捡球机实际工作图

6 结 论

基于视觉识别的方法设计了一种智能乒乓球捡球机.采用树莓派4B开发板,搭载轻量化的YOLO v5s算法,在不同光线条件下,实现对散落乒乓球的准确识别;通过旋转耙状结构的扇叶,实现对乒乓球的快速收集.采用两轮差速机构,实现捡球机的灵活移动;利用超声波传感器,检测和躲避障碍物.实验表明,所设计的捡球机能够达到较好的捡球效果,漏检率较低,且整机结构简单、工作可靠、效率高,具有较好的实用性.目前,该捡球机存在的两方面的问题:1)优化后的YOLO v5s算法在树莓派4B开发板上的实时检测帧仍然偏慢,降低了捡球机的工作速度;2)避障功能响应较慢,特别是对移动障碍物,尚不能很好地检测和躲避.上述问题,将在未来的研究中作进一步的完善.

参考文献:

- [1] LI H Y. Design of table tennis ball picking robot based on LPC1752 [J]. Journal of Applied Science and Engineering Innovation, 2016, 3(1): 22-25.
- [2] REN Y Q. Design and implementation of intelligent automatic table tennis ball picking robot [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [3] ESSAM Z, KHAN M K A, LIM W H, et al. Development of autonomous table tennis ball retrieving robot [J]. Delta University Scientific Journal, 2023, 6(1): 247-254.
- [4] TONG S X, QIN Y W, XIAO K. Table tennis pickup machine based on visual recognition [J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(13): 146-150.
- [5] XU D W, LIU J Q, LIN G. Design and realization of table tennis picking robot [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2014, 42(3): 16-19, 50.
- [6] YEON S H, KIM D, RYOU G, et al. System design for autonomous table tennis ball collecting robot [C]// 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems. Jeju City: IEEE, 2017: 909-914.
- [7] MENG N, HU J. Structure design and optimization of the ping-pong picking up manipulator [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 31(5): 42-45, 50.
- [8] ZHOU X, ZHOU H B, CHEN R, et al. Design of pick-up ball robot based on binocular vision [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2020, 48(3): 34-40, 79.
- [9] WU Q M, LI J H, YIN L L. Design and development of intelligent reading and writing posture reminder [C]// Proceedings of the 11th International Conference on Computer Engineering and Networks Part II. Hechi: CENet, 2021: 238-243.
- [10] SUI S Y, XING X P, LIU C C, et al. Design of monitoring and warning vehicle based on STM32 [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2022, 51(6): 116-119.
- [11] YANG T J. Table tennis location application in the robot tracking based on OPENCV [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [12] JI Y F, REN J, SHI Z H. Real-time tracking of table tennis robot's vision system [J]. Journal of Shanghai University of Sport, 2020, 44(6): 70-75.
- [13] LIN D, PAN L, YI P. Research on the robustness of convolutional neural networks in image recognition [J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2022, 8(3): 111-122.
- [14] REDMON J, DIVVALA S K, GIRSHICK R B, et al. You only look once: unified, real-time object detection [J/OL]. CoRR, 2016: 779-788[2022-02-06]. <https://arxiv.org/abs/1506.02640>.
- [15] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger [C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE, 2017: 6517-6525.
- [16] LI Z R, NAMIKI A, SUZUKI S, et al. Application of low-altitude UAV remote sensing image object detection based on improved YOLO v5 [J]. Applied Sciences, 2022, 12(16): 8314.
- [17] JIANG P Y, ERGU D J, LIU F Y, et al. A review of YOLO algorithm developments [J]. Procedia Computer Science, 2022, 199: 1066-1073.

(责任编辑:包震宇,郁慧)