

基于机器视觉的智能送货小车的设计

曹金豪, 朱 丹, 薛 琰, 王 杨

(南京理工大学紫金学院 智能控制学院, 江苏 南京 210023)

摘要:近年来,物流行业的迅猛发展推动了智能小车在货物配送领域的广泛应用。基于传统物流模式,对基于机器视觉的智能送货小车设计方案进行了研究,创新性地融合了图像分类及模糊比例积分微分(proportional-integral-differential, PID)控制,实现了多场景下的高效货物分拣搬运功能,设计了麦克纳姆轮底盘与三自由度机械臂的高效协同控制的策略,实验表明了该策略能够使小车灵活适应复杂地形并实现精准投递,验证了该设计方案在目标检测准确率及货物分类搬运性能方面的优势,显示其优于传统物流系统,为智能物流领域提供了新的技术解决方案。随着技术的进一步优化和应用场景的拓展,该方案有望在更多领域实现广泛应用,推动智能物流技术的持续进步。

关键词:机器视觉;目标检测;物流自动化;机械臂;图像分类;麦克纳姆轮

中图分类号:TH24

文章编号:1000-0682(2025)06-0064-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.06.012

Intelligent delivery carts based on machine vision

CAO Jinhao, ZHU Dan, XUE Yan, WANG Yang

(School of Intelligent Control, Zijin College, Nanjing University of Science and Technology, Jiangsu Nanjing 210023, China)

Abstract: In recent years, the rapid development of the logistics industry has driven the widespread application of intelligent vehicles in cargo delivery systems. Based on traditional logistics models, this study investigated a design scheme for an intelligent delivery vehicle that leverages machine vision technology. The proposed design integrates image classification and fuzzy proportional-integral-differential control to enable autonomous navigation and efficient cargo sorting and transportation across diverse scenarios. The research also reviewed the current state of synergistic control strategies involving Mecanum wheel chassis and 3-DOF robotic arms, demonstrating their ability to enhance vehicle adaptability in complex terrains and ensure precise delivery. Experimental results validated the design's superiority in object detection accuracy and cargo classification performance, outperforming traditional logistics systems. This work provides a new technical solution for intelligent logistics applications. With further optimization of the technology and expansion of application scenarios, the proposed solution is expected to achieve broader implementation across multiple fields, driving the continuous advancement of intelligent logistics technology.

Keywords: machine vision; target detection; logistics automation; robotic arm; image classification; Mecanum wheel

0 引言

近年来,随着电商的快速发展与物流的爆发式增长,智能化逐渐成为提升配送效率的关键^[1-2]。

传统物流智能车依赖人工分拣与固定路径运输,存在效率低、成本高、适应性差等缺点,尤其在复杂动态环境下难以满足实时性要求。针对这些不足,该文提出了一种基于机器视觉的智能送货小车系统,该设计创新性地采用多摄像头模块协同工作

收稿日期:2024-05-15

基金项目:2024 年江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目“基于视觉的智能送货小车的设计”(202413654030Y);2024 年南京理工大学紫金学院校级科研项目(2024ZRKX0401009)

第一作者:曹金豪(2004—),男,本科,研究方向为智能机器人。

E-mail: cjh15380962393@outlook.com。

通信作者:朱丹(1984—),女,硕士,讲师,研究方向为嵌入式系统研究、C 语言、智能机器人。E-mail: 149954751@qq.com。

的系统架构,通过数据融合实现了循迹与路况识别、目标检测和图像分类的高效协同以实现高精度目标识别与分类,有效提升复杂场景的适应性;在控制模块,设计分层式模糊 PID 算法优化运动稳定性,并基于麦克纳姆轮逆运动学模型实现全向移动的精准控制,融合陀螺仪姿态数据,显著增强动态避障的实时性。为提高实验的灵活性,该设计采用内部嵌有磁铁的卡片模拟货物,机械臂配备通电磁铁以实现对于卡片的拾取。同时,使用 RT-Thread 实时操作系统,为小车的感知与控制模块提供了高效的实时任务调度能力。随着技术的进一步优化和应用场景的拓展,智能送货小车有望在更多领域实现广泛应用,推动智能物流技术的持续进步。

1 系统方案设计

系统基于机器视觉技术,选用 RT1064 作为主控芯片^[3],其采用 Arm Cortex-M7 内核,主频高达 600 MHz,具备卓越的 CPU 性能和实时响应能力并支持图像传感器零延迟数据流传输,适合处理复杂货物分类任务。摄像头模块 1 选用 OpenART mini,用于实现货物的分类,核心搭载 MIMXRT1064 多核处理器架构,自带视觉处理脚本,支持神经网络模型部署与训练,不仅可以完成机器视觉(machine vision)应用,还可以完成神经网络模型的部署和训练。为提高货物分类准确性和效率,采用 YOLOv5 算法^[4],并收集了约 9320 张涵盖水果、纸箱、药品等常见货物类型的图像,覆盖不同光照、背景和姿态。摄像头模块 2 选用 MCX Vision,用于实现货物的位置检测,其采用先进的架构设计,具备强大的计算能力,能够高效处理复杂目标检测算法,主频高达 250 MHz,能够满足轻型 AI 模型的实时计算需求。在货物检测任务中,高效的计算性能可以显著缩短检测时间,提升系统的实时性,使其能够快速响应动态场景中的目标变化,尤其是在运动过程中对货物进行实时检测。道路寻迹模块使用的是总钻风 MT9V034,其芯片具备双寄存器组架构,支持 2 组独立配置参数(包括分辨率、帧率、HDR 等)的快速切换,切换延迟小于 1 ms,在实际应用中,将其配置为 640×480 VGA 分辨率输出,同时利用其 120 dB 高动态范围特性确保复杂光照条件下的成像质量。显示屏选用 IPS200,采用 IPS 技术,可清晰显示待搬运货物。陀螺仪选用 IMU660RA,结合姿态数据确保车体旋转角度及机械臂抓取精度。与此同时,采用 RT-Thread^[5]来对代码进行开发和运行,它是一个

嵌入式实时多线程操作系统,其基本属性之一是支持多任务,允许多个任务同时运行,但这并不意味着处理器在同一时刻执行了多个任务。实际上,一个处理器核心在某一时刻只能运行一个任务。RT-Thread 通过任务调度器进行非常快速的任务切换(调度器根据优先级决定此刻该执行的任务),从而给人造成多个任务在一个时刻同时运行的错觉。在 RT-Thread 系统中,任务通过线程实现,RT-Thread 中的线程调度器也就是任务调度器,任务调度的功能可以极大地提高 CPU 的利用率,提高摄像头的帧率,提高车辆前进的上限,且能在各个方面轻松的切换任务。为了进一步提升该设计的实践能力,自主设计并绘制了电路原理图以及 PCB 布局,不仅充分发挥了 RT1064 开发板的高性能和灵活性,还确保了系统的稳定性和可扩展性,与系统需求高度契合。系统设计结构如图 1 所示。

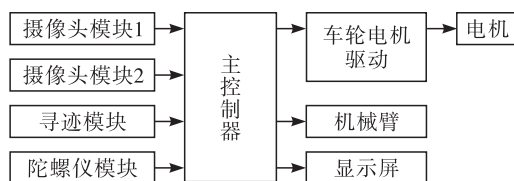


图 1 系统设计结构图

智能送货小车搭载三自由度机械臂系统^[6],采用麦克纳姆轮底盘结构。机械臂可以实现水平旋转、垂直旋转和前后伸缩的运动。麦克纳姆轮底盘支持全向移动,提升移动效率并实现灵活操作。这种设计使其能够在三维空间中灵活移动,适应多种搬运任务,尤其是在狭小或复杂的工作环境中实现货物搬运^[7],这使其在搬运小型货物时,能够精确地抓取和放置物品,由于其结构紧凑且重心下移,三自由度机械臂在高速运动中能够保持高效和平稳的运行,从而减少误差和意外掉落的风险。为提高卸货的效率,采用通电磁铁与 3D 打印的物体放置框相结合的设计:通电时,放置框会吸附在车上,断电后自动倾倒,便于货物卸出与分类储存,提高卸货效率。所有货物识别和抓取完成后,送货任务结束,送货任务流程如图 2 所示。

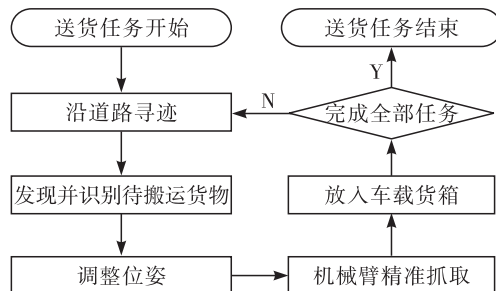


图 2 送货任务流程图

2 图像处理及控制算法

2.1 图像分类

针对物流场景中多品类货物的快速分类需求,选用 YOLOv5 作为核心分类引擎,YOLOv5 凭借单次前向传播机制,适用于快速响应场景^[8]。在多种数据集上,其不仅展现出卓越的检测精度,能够准确识别和分类图像中的目标物体,还通过优化网络结构(如深度可分离卷积和 MobileNetV3 块)实现了轻量级设计化,减少了模型的参数量和计算量,通过优化网络结构实现轻量化^[9],从而在资源受限的设备上也能高效运行^[10]。此外,其内置丰富的数据增强方法(如随机缩放、裁剪、翻转等)和多尺度训练策略,显著提升了模型的泛化能力和对不同尺度目标的检测精度。其对图像的旋转、缩放和遮挡具有较强的鲁棒性,使其能够适应复杂的实际应用场景。

训练具体流程如下:YOLOv5 的分类数据集的构建不需要建立 txt,不需要 labeling,直接按类别建立文件夹,最后输入 train 和 test 的上一级文件夹进行训练,直接按类别建立文件夹就可以,分别为 test、train、val。其中 train 代表训练集,test 代表验证集,用来在训练的过程中对模型进行测试,防止过拟合。YOLOv5 的分类模型只需要 train 和 test 就可以训练,这里的 val 是在训练结束后验证模型在独立的数据集上的准确度,以验证模型的泛化能力,上面每个文件夹内都建立了目标类型的文件夹里面放有目标图片。接着就是配置训练参数:在 YOLOv5 的配置和训练过程中,首先需要选择合适的模型作为起点,默认情况下使用的是预训练模型 yolov5 - cls.pt。根据具体需求,可以修改训练数据路径,并决定是否使用预训练模型。通过调整学习率、批次大小、训练轮数等参数,可以完成训练参数的配置。配置完成后,即可启动训练过程,模型将基于提供的数据集进行学习和优化。

2.2 控制算法

在智能送货小车的货物定位与位置矫正过程中,车体位置、货物位置及其角度参数的动态变化构成了复杂的非线性控制问题,传统 PID 控制方法依赖于精确的数学建模,要求对系统中的各类扰动进行建模与补偿,然而这种方法不仅耗时,且难以全面覆盖实际系统中的所有扰动因素,从而限制了系统的快速性和鲁棒性。为此,该文提出模糊 PID 控制算法^[11-12],以适应复杂环境下的动态控制需求。模糊 PID 控制算法的核心思想在于将精确的物理量转

化为基于经验的语言描述,通过模糊规则实现对控制参数的动态调整。这种方法模拟了人类的模糊推理机制,通过对偏差值及其变化率的实时评估,自适应地修正 PID 控制器的参数,从而显著提升了系统的响应速度和适应性。与传统 PID 控制器相比,模糊 PID 控制器在原有结构基础上引入了模糊推理模块。具体而言,模糊 PID 控制器的工作流程包括以下关键步骤:首先,输入量(如货物与车体的坐标偏差及其变化率)通过模糊器进行量化处理,量化公式如下:

$$b = k \left(a - \frac{x_H - x_L}{2} \right) \quad (1)$$

式中: k 为比例系数, $k = \frac{2n}{x_H - x_L}$,无量纲; a 为输入量, m ; x_H 为输入物理量的最大值, m ; x_L 为输入物理量的最小值, m ; n 为离散化论域的范围,无量纲。

去模糊化运算采用重心法,其公式如下:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^P C^*(i) \mu_C^*(i)}{\sum_{i=1}^P \mu_C^*(i)} \quad (2)$$

式中: f 为去模糊化后的精确控制量,无量纲; $C^*(i)$ 为模糊集合中第 i 个点的具体值,无量纲; $\mu_C^*(i)$ 为模糊集合中第 i 个点的隶属度,无量纲; P 为模糊集合中参与计算的点的总数,无量纲。最终,去模糊化后的控制量作为 PID 参数的调整值输出,实现对智能送货小车的动态控制。

在设计中,模糊 PID 控制器的输入量为货物与车体的坐标偏差及其变化率,这 2 个输入量能够全面描述货物与车体之间的相对位置关系及其动态变化,为控制器提供了足够的信息以做出合理的控制决策。控制器的输出量为 PID 参数的调整值,这些调整值用于实时更新 PID 控制器的比例参数、积分参数和微分参数,从而实现了对送货小车的动态控制。通过模糊推理机制,系统将输入量模糊化处理后,依据预定义的模糊规则库进行推理,并通过去模糊化运算得到精确的控制量输出。这一过程模拟了人类的模糊推理机制,能够实时适应复杂环境中的动态扰动,显著提升了车体控制系统的快速性和鲁棒性。

2.3 目标检测算法

目标检测算法主要可分为 One stage(单阶段)目标检测算法和 Two stage(双阶段)目标检测算法两种类型。考虑到双阶段目标检测算法需要依赖于候选区域生成步骤从而可能会遗漏小目标,而在实际任务中很多货物都属于小目标,再者单阶段与双

阶段相比省去了生成候选区域的时间,可以减少运行时间,提高了执行效率和实时性,所以采用单阶段目标检测算法。

系统采用单阶段目标检测算法中的 YOLOv11 检测算法实现对货运物品的目标检测,凭借创新的多尺度特征融合与动态感知技术,突破传统检测设备在复杂货运场景下的限制,能够高效应对不同光照、堆叠密度等环境,实现全流程自动化货物监测。作为 YOLO 系列的最新算法,YOLOv11 在继承快速检测优势的基础上,针对货运场景进行深度优化。其输入端通过动态多尺度增强与跨模态信息融合,可自动适应不同尺寸货物及光照条件,精准捕捉货物边缘特征;骨干网络引入轻量化异构卷积结构与双向注意力机制,既能快速提取通用特征,又能聚焦货物细节,有效提升堆叠货物、遮挡货物的识别准确率;颈网络采用分层级联特征金字塔架构,结合自适应权重分配策略,实现不同层次特征的高效交互,增强特征表达能力;输出端运用改进的多类别联合预测模型,基于概率密度回归输出货物位置与类别,同步识别货物类型、装载状态及异常情况,实现一站式货物检测与状态分析。YOLOv11 网络结构如图 3

所示,主要由输入端、基准网络(Backbone)、颈网络(Neck)以及头网络(Head)输出端 4 个模块组成:

(1)输入端:输入图像大小为 (640×640) 像素。采用增强版 Mosaic 数据增强,混合更多图像以丰富场景。基于深度学习算法自适应计算锚框,贴合目标分布。运用智能缩放算法,依据图像内容精准调整尺寸,保留关键信息。

(2)Backbone:采用新型卷积神经网络架构,结合深度可分离卷积与空洞卷积,在不同图像粒度上高效提取特征。引入注意力机制模块,聚焦关键目标区域,增强特征表达能力,提取通用且关键的特征表示。

(3)Neck 网络:处于 Backbone 和 Head 之间,构建特征融合网络。利用多尺度特征金字塔结构,通过双向特征传递,将底层细节特征与高层语义特征充分融合,提升特征多样性与鲁棒性,顺畅传递特征至预测层。

(4)Head 输出端:对融合后的图像特征进行预测。采用改进的边界框回归算法,结合高斯损失函数,更精准生成边界框。运用多类别分类器,通过 Softmax-2D 激活函数,输出目标类别概率,快速完成目标检测结果输出。

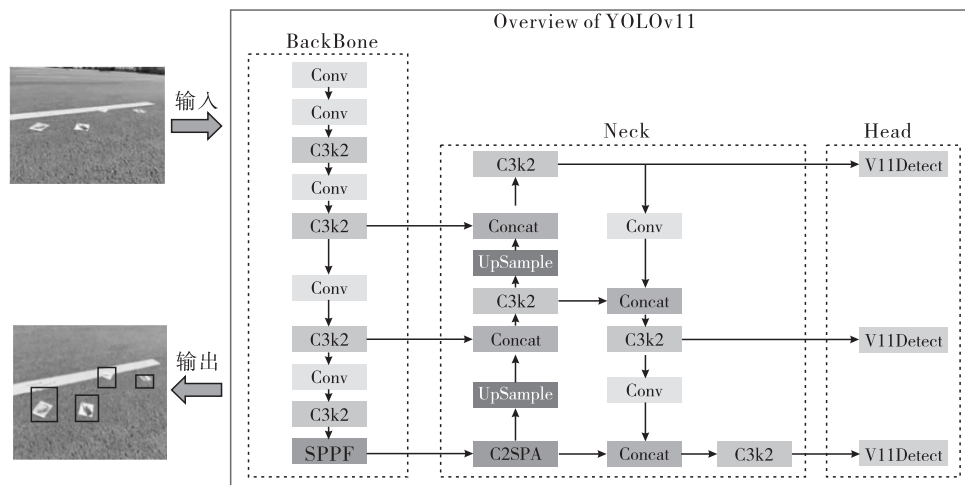


图 3 YOLOv11 网络结构图

3 系统实验验证

为了便于开展实验,采用了一种创新的方法:将生活中常出现的货物如纸箱、药剂盒、头盔等印制在配备磁铁的透明亚克力板上。这样既便于操作,又能确保了训练的灵活性、实用性。同时,为了实现实验教学与学科竞赛一体化,采用全国大学生智能汽车竞赛的赛道模拟实际道路,场景化道路模拟如图 4 所示。

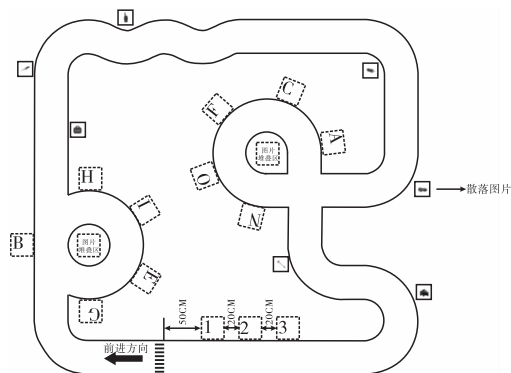
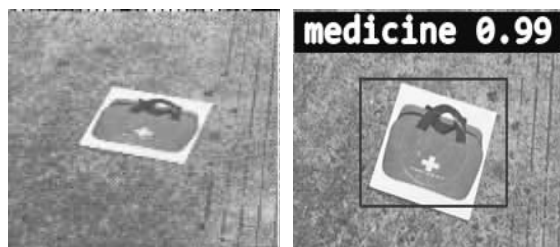


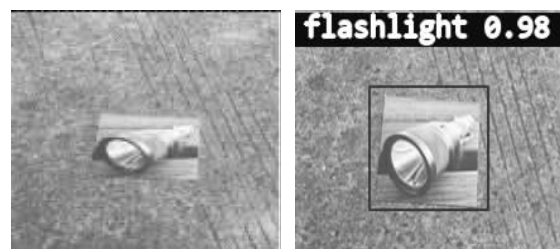
图 4 场景化道路模拟图

3.1 图像分类验证

为了验证在不同环境下的分类性能,针对以药剂盒、手电筒等为代表性的送货物品进行了细致分类实验,分类结果如图 5 所示。鉴于实际工作场景中光照强度往往会对识别分类产生显著影响,该研究特别设计了验证不同时间光照强度对图像分类准确率的实验,详细测试结果见表 1。



(a) 药剂盒分类结果



(b) 手电筒分类结果

图 5 送货物品分类结果

表 1 不同时间点测试结果

时间点	样本数量/个	分类准确率/%
8:00	80	91
12:00	80	85
16:00	80	80

3.2 控制算法验证

实验使用内部嵌有磁铁的卡片模拟货物,机械臂配备通电磁铁以实现对其拾取。实验中,小车沿预定路径行驶并检测到目标卡片(如图 6(a)所示),随后向卡片方向小车完成 90 度转向(如图 6(b)所示),由于机械臂活动范围有限,车体需要进行位姿矫正以确保机械臂能够精准对准卡片。矫正过程如下:以卡片为参考点,小车首先沿 x 轴方向移动,使自身 y 轴与卡片 y 轴对齐(如图 6(c)所示)。随后,小车继续沿 y 轴方向移动,完成最终的位姿调整(如图 6(d)所示),这个过程对控制精度提出了严格要求。

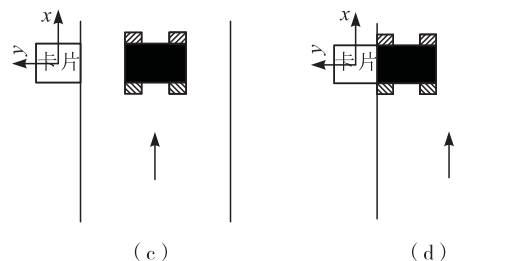
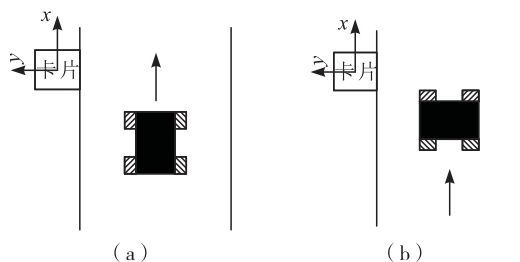


图 6 货物模拟搬运图

验证结果表明,在低速运行情况下,常规 PID 控制虽可将误差控制于 5% 以内,但该设计所采用的模糊 PID 控制算法展现出更为卓越的性能,其偏差最大值不超过 2%。实验研究进一步表明,该模糊 PID 控制算法对诸如打滑等各类扰动因素,能够实现极为理想的抑制效果,相较于常规 PID 控制,其优越性显著,体现出在应对复杂工况时更精准、更稳定的控制能力,对提升系统整体性能具有关键作用。

3.3 目标物体分类搬运验证

为了实际评估所提出的货物检测方法,通过运行在 PyCharm 环境中的程序代码进行了一系列测试实验,以验证 YOLOv5 算法在货物检测任务中的性能表现。首先在实验室环境中进行了广泛的测试,部分结果如图 7 所示。在实验中,利用 MCX Vision 视觉传感器,实时捕获其监测区域内的目标图像信息。MCX Vision 传感器系统将捕获的视觉图像数据传输至其内置的处理单元,进行图像信号处理,中央控制系统进一步对检测结果进行分析和处理,为后续的目标定位和管理提供支持。为了验证程序的可行性,系统在不同的实际场景中进行了货物检测,包括道路边缘、快递站、仓库架。以道路边缘为例,道路边缘检测结果如图 7(b)所示,准确的框选了出现的货物。实验结果表明,YOLOv5 算法在多样化场景中均表现出良好的检测性能,能够准确识别和定位货物,为货物检测提供了有效的技术支持。

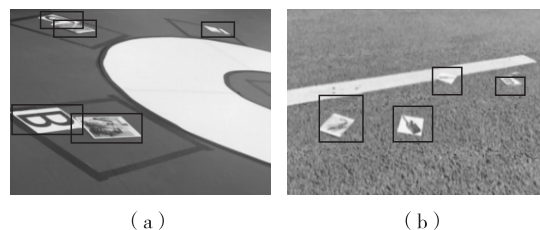


图 7 道路边缘检测结果

3.4 目标物体分类搬运验证

目标物体分类搬运流程如图 8 所示。



图 8 目标物体分类搬运流程

小车接收到工作人员发出的任务执行信号时,随即启动并沿预设道路行驶,对沿途的货物进行勘测。一旦检测到货物,车体向其靠近调整最佳拾取位姿并依据其特征对其进行精准归类,将其装入车上的放置框。待货物搜索任务完成,小车在行进过程中检测到斑马线时,便会启动货物分类程序,将车内的货物按照既定分类规则,精准地放置到物体放置区域内。随后,小车按照预设路径返回指定地点,至此,任务圆满结束。

4 结论

该系统的主要贡献如下:(1) 高效货物识别与分类,采用改进的轻量化 YOLO 模型,实现高精度目标检测与分类,分类准确率达到 0.988,显著提高了物流配送的效率和准确性;(2) 结合模糊 PID 控制算法,增强了小车在动态环境中的避障能力,确保了配送过程的稳定性和安全性;(3) 该系统不仅适用于物流配送场景,还可拓展应用于医院物资运输、战场物资配送、仓库货物搬运等多个领域,具有广泛的应用前景和推广价值。

参考文献:

- [1] MUVVALA K, LALAM S G, SHAIKA, et al. Design and Implementation of Versatile Delivery Robot[J]. Engineering Proceedings, 2024, 66(1): 42-42.
- [2] 沈进超,冯思凯,彭辉,等. 基于目标检测的六自由度机械臂麦轮机器人在物流搬运中的应用[J]. 电气时代, 2024(5): 32-36.
- [3] 倪可凡,赵俊驰,朱文婷. 基于 RT1064 单片机的智能车设计与实现[J]. 电子元器件与信息技术, 2022, 6(10): 59-62.
- [4] 徐佳鹏,张朝辉,李智,等. 基于 YOLO 模型的小麦外观分类算法研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44(03): 83-87.
- [5] 丁一明,李文魁,张煦光. AUV 运动控制器 CAN 通信模块在 RT-Thread 上的设计与实现[J]. 自动化仪表, 2021, 42(09): 10-13.
- [6] THANH P N, HUNG N, HA Q T N. Development of the robotic motion controller for a wheeled manipulator[J]. Measurement and Control, 2025, 58(3): 323-338.
- [7] 马超,谢春仁,陈光晃,等. 基于 KEBA 控制器的双臂装配机器人设计与实现[J]. 自动化仪表, 2025, 46(01): 36-40+45.
- [8] SATYABRATA S, ASIS K T. Real-time lane detection for autonomous vehicles using YOLOv5 Segmentation Model[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2024, 17(1): 718-728.
- [9] 费春国,文章,庄子波. 多尺度特征与注意力检测头的轻量化 FOD 检测[J]. 自动化仪表, 2024, 45(10): 110-116.
- [10] MUGTABA A M A, ERSEN Y. Evaluating YOLOv4 and YOLOv5 for Enhanced Object Detection in UAV-Based Surveillance[J]. Processes, 2025, 13(1): 254-254.
- [11] 冯忠国,张小辉. 基于自整定模糊 PID 的柔性管道加热控制系统研究[J]. 自动化仪表, 2024, 45(05): 66-72.
- [12] 漆小华. 基于模糊 PID 算法的三轮智能车应用[J]. 长江信息通信, 2024, 37(02): 141-144.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号:52-49 国际发行代号:BM529 定价:18.00 元/期 108.00 元/年
地址:西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编:710075 电话:029-81871277
网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱:gyybbjb@126.com