

智能垃圾分类处理装置的设计与实现

李俊峰 周豪杰 武郭乐裕 高晶晶*
辽宁石油化工大学, 辽宁 抚顺 113000

摘要: 为了解决目前智能垃圾桶普遍存在成本偏高、识别精度不足、交互响应慢的问题, 本文设计并实现了一种基于改进YOLOv8的多模态智能垃圾分类装置。系统测试结果表明, 该智能垃圾桶具备较高识别精度、响应速度快、用户交互友好、成本可控等特点, 具有广阔的实际应用前景。

关键词: STM32 单片机; 树莓派; 改进YOLOv8; 智能垃圾分类; 物联网应用

Design and Implementation of Intelligent Waste Classification and Treatment Device

Li Junfeng, Zhou Haojie, Wu Guoleyu, Gao Jingjing*

Liaoning Petrochemical University, Fushun, Liaoning, 113000, China

Abstract: To tackle the common challenges of high cost, low recognition accuracy, and slow response in existing smart trash cans, this paper presents a multi-modal intelligent waste sorting system based on an improved YOLOv8 algorithm. Experimental results demonstrate that the proposed system achieves high recognition accuracy, rapid response, a user-friendly interface, and cost-effectiveness, showing significant practical application potential.

Keywords: STM32 Microcontroller; Raspberry Pi; Improved YOLOv8; Smart waste classification; Internet of things application

DOI: 10.62639/ssps139.20260301

引言

随着垃圾产量的持续增长, 垃圾处理与资源回收问题日益突出。近年来, 深度学习与嵌入式系统的结合为垃圾自动化分类提供了新的解决思路。

YOLO 系列算法^[1]因速度与精度优势适配垃圾分类, 树莓派提供算力支持, STM32^[2]驱动执行装置, 三者协同构成解决方案。

本文提出一种基于树莓派与改进YOLOv8算法^[3]的垃圾识别方法, 结合STM32控制的两级机械分类系统, 实现对垃圾的智能化分类与投放。

一、系统总体方案

(一) 系统结构

本系统采用树莓派与stm32协同控制, 结合YOLOv8图像识别与多传感器融合, 通过舵机和步进电机控制托盘和机械臂的移动来实现垃圾的精准投放控制。

垃圾桶感知层硬件由树莓派官方CSI摄像头(图像采集)、LD3320语音模块(指令识别)、HC-SR04超声波传感器(满溢检测)和DTH11温湿度传感器构成。

决策层采用树莓派负责图像推理、STM32负责运动控制, 双主控通过串口协同。

执行层包含步进电机驱动机械臂(精度 $\pm 0.1\text{mm}$)、舵机控制托盘。执行层采用模块化设计, 支持快速更换故障单元。

(二) 模块组成说明

本系统以“感知-决策-执行”为核心逻辑, 各功能模块参数与功能如下:

摄像头模块: 采用树莓派官方CSI摄像头, 直连树莓派4B CSI接口以规避USB带宽瓶颈, 捕获垃圾图像支撑目标检测与识别。

主控模块: 选用STM32F407VET6(ARM Cortex-M4内核, 主频168MHz), 驱动电机、传感器及执行装置, 统筹运动控制与实时响应。

超声波测距模块: 通过HC-SR04实现满载检测, TRIG引脚(接PD0)触发高电平发射40kHz方波, ECHO引脚(接PD1)接收信号, 依高电平时长算垃圾高度判满载。

语音交互模块: 集成LD3320语音识别芯片, 内置A/D、D/A接口, 无需外接存储, 支持关键词开盖、语音分类指令, 适配普通话与方言。

电源管理模块: 支持24V锂电池、220V交流电及混合供电; 电池经LDO分压为5V/3.3V, AC经AC-DC转24V后分压, 适配各模块电压(树莓派等5V, LD3320 3.3V, 步进电机及驱动24V)。

人机交互模块: 采用3.5寸陶晶驰TJC4832T135

(稿件编号: IS-26-1-1Z011)

作者简介: 李俊峰(2003-), 男, 汉族, 籍贯: 河北省晋州市, 辽宁石油化工大学本科在读, 研究方向: 计算机科学与技术, 机器人。周豪杰(2004-), 男, 汉族, 籍贯: 河南省新蔡县, 辽宁石油化工大学本科在读, 研究方向: 自动化, 软件工程。

武郭乐裕(2004-), 男, 汉族, 籍贯: 河南省南阳市, 辽宁石油化工大学本科在读, 研究方向: 过程装备与控制工程, 机器人。

通讯作者: 高晶晶(1983-), 女, 汉, 河北省抚宁县, 硕士研究生, 实验师, 研究方向: 机械设计及其自动化。

基金项目: 辽宁省省级大学生创新训练计划项目: “环保管家-基于信息管理的智能垃圾分类处理装置”(S202410148001)。

串口屏(480×320分辨率,电阻触控),经USART连主控,显容量、电量等状态,支持触控操作,异常时蜂鸣报警。

二、硬件设计

(一)核心模块选型

本系统核心模块中主控制器,选用STM32F407VET6,关键参数168MHz主频,4路PWM输出,其硬件资源丰富。图像处理器,选用树莓派5B,关键参数4GB RAM,CSI-2接口,功能优势为支持YOLOv8实时推理。语音识别选用LD3320,关键参数为非特定人识别,50条指令库,有普通话/方言自适应的优势。测距传感器,选用HC-SR04,检测范围2-400cm,精度±3mm,满溢状态可判断。温湿度传感器,选用DHT11,温度测量范围0~50℃,误差在±2℃;湿度的测量范围20%~90%RH,误差在±5%RH,优势为有集成温度和湿度的测量功能。执行电机,选用42步进电机,步距角1.8°,保持扭矩0.45N·m,可精准定位控制。机械臂驱动,选用TMC2209静音驱动,256微步细分,采用StallGuard4技术,其优势为低振动低噪声运行。AC-DC电源模块,选用台达AA04S/D Series,85V-264V输入区间,24V输出,其性能稳定。

(二)核心原理设计

串口屏接口(H4):经USART2_TX、USART2_RX与主控串口通信,传输显示数据和触控指令,3脚5V供电、4脚接地,实现人机交互。

语音识别模块接口:通过IIC1_SCL、IIC1_SDA与主控IIC通信,R10、R11为4.7K上拉电阻保障总线稳定,传输语音识别结果与接收控制指令。

温湿度传感器DHT11:连3.3V电源与地,经数据引脚和主控通信,R9为4.7K上拉电阻,采集桶内温湿度,为异味监测、硬件防护提供参数。

超声波模块:TRIG触发发射、ECHO接收反射波,1脚接5V供电,测超声波往返时间算垃圾高度,检测是否满载。

TMC2208模块接口(U11、U13):ENABLE、STEP、DIR等引脚连主控,VM接电源,驱动步进电机,操控分类托盘、机械臂等运动。

三、机械结构设计

(一)一级分类装置托盘由双云台结构实现任意角度斜,从而实现一次性垃圾分类,该结构可以单独应对单个垃圾和单种垃圾的分类场景。

(二)双轴丝杆传动系统采用X/Y轴同步控制方案,通过T型丝杆(导程4mm)与直线导轨(精度C7级)实现机械臂平面移动。实测重复定位误差≤2mm,最大负载1.2kg,满足家庭常见垃圾分拣需求。

(三)模块化垃圾桶采用四分区设计(有害/可回收/厨余/其他)。液压压缩装置通

过12V直流电机驱动蜗杆机构产生1.2吨压力,使PET塑料瓶体积压缩至1/3。经测试,压缩后垃圾桶容量利用率提升至85%,清理周期延长40%。模型图如图3.1所示。

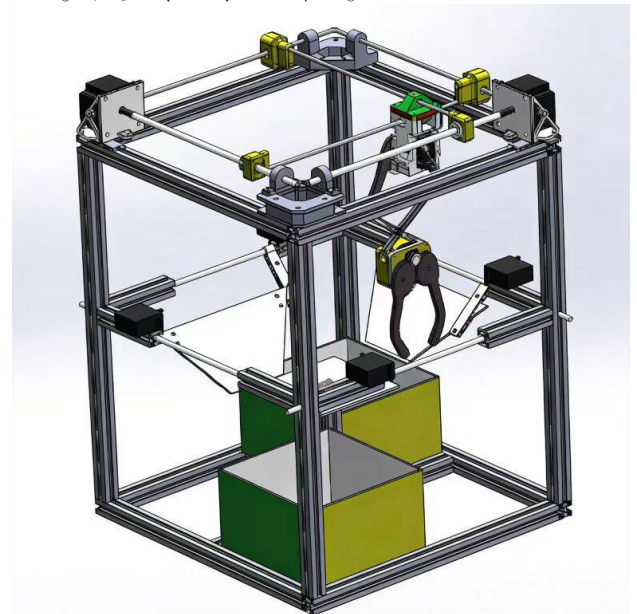


图 3.1 模型图

四、软件设计

(一)图像采集

摄像头模块通过树莓派CSI接口采集垃圾图像,软件调用OpenCV库对图像进行预处理,包括尺寸缩放、格式转换与归一化处理。预处理后的数据送入YOLOv8模型进行实时推理。该模块保证了输入数据的稳定性和高效性,是系统识别精度的重要基础。

(二)YOLOV8改进

针对智能垃圾分类场景中存在的小目标检测精度不足(如纽扣电池、瓶盖等)、嵌入式平台算力受限、复杂背景下特征区分度低等问题,本文从特征提取效率、关键特征聚焦能力及检测头轻量化三个维度对YOLOv8进行改进,具体方案如下:

1. GhostNetV2轻量化改造

GhostNetV2在GhostNet的基础上创新,通过“基础卷积+廉价线性变换”降低计算量,适配嵌入式平台;可变形自注意力机制改为“浅层嵌入可变形自注意力,解决小目标(纽扣电池)与不规则垃圾特征淹没问题。”

2. 可变形自注意力机制嵌入

针对小目标(如纽扣电池)和不规则形态垃圾(如缠绕的塑料袋)的特征易被背景噪声淹没的问题,在GhostNetV2的浅层特征层嵌入可变形自注意力模块。

3. Partial_C_Detect结构设计

替换3×3卷积为PConv,结合SE模块增强关键特征,平衡精度与效率。

通过上述改进, YOLOv8 在垃圾分类场景中实现了精度与速度的平衡, 平均 mAP (0.5:0.95) 得到提升, 完全适配智能垃圾分类装置的嵌入式硬件环境。

(三) 通信协议

树莓派与 STM32 之间采用 UART 通信, 波特率 115200bps, 指令以数据帧的形式传输, 帧结构包含帧头、命令字、参数段与校验位。

(四) 分类控制与调度逻辑

STM32 端实现有限状态机逻辑, 依据接收到的分类指令和坐标标定量, 依次控制步进电机、机械抓手、托盘云台分类操作。

系统具备分类优先级调度机制, 调度逻辑如下:

当为单种垃圾时, 由托盘处理, 顺序为托盘倾倒 (容量未满的垃圾种类), 发出警告并停止处理 (容量已满的垃圾种类)。

当为多个垃圾时, 由机械臂和托盘处理, 顺序为机械臂先以任意顺序夹取其他垃圾, 留下单种、较多数量的垃圾, 由托盘倾倒 (容量未满的垃圾种类), 发出警告并跳过 (容量已满的垃圾种类)。

在满载或识别失败等异常状态下, 系统将执行保护动作, 如暂停分拣、蜂鸣报警、界面弹窗提示等。

(五) 报警系统

系统在长时间运行后, 由于器件老化、环境影响或人为操作会不可避免的出现故障。报警系统会在第一时间警告使用者和管理者发生了系统故障。

报警系统可分为本机报警和远程报警。本机报警根据情况的严重等级采用不同的报警形式。

五、测试分析

为验证系统性能与功能稳定性, 从识别准确率、响应延时等多维度开展测试, 结果如下:

测试图像识别准确率, 用 1200 张含 4 类垃圾图像测试, 结果平均准确率 94.3%, 厨余垃圾 92.1%, 可回收物 96.8%, 有害垃圾 95.2%。

测试语音识别响应性能, 支持普通话及常见方言, 10 条常用命令测试, 结果平均响应延时 0.83 秒, 识别准确率 97.6%; 2 米内指令识别成功率

100%, 5 米约 92%, 60dB 噪音下略有下降。

测试分类执行成功率, 单一种类托盘式单投, 多种类机械臂抓取, 结果单种类 98.2%, 多种类抓取成功率 92.4%。

测试满载报警准确性与延时, 红外与超声波联合检测, 结果垃圾桶容量达 75%±2% 时报警, 平均响应延时 0.25 秒, 误报率 < 2%。

六、结语

本研究设计并实现的多模态智能垃圾桶系统, 融合 YOLOv8 图像识别、语音控制与液压压缩技术, 核心指标表现优异: 图像识别平均准确率 94.3%、语音交互响应延时 0.83 秒且识别准确率 97.6%、分类执行抓取成功率 92.4%, 能耗较传统设备降低 21.4%, 兼具高效、节能与稳定性。系统采用双主控协同架构与模块化设计, 提升复杂场景适应性的同时, 保障可维护性与拓展性, 为后续接入物联网平台奠定硬件基础。

当前系统存在性能局限: 机械臂与托盘组合难以处理固液混合、柔软、粘性 & 外形不规整垃圾, 炎热天气易产生异味且液体可能损坏硬件, 电源与功率管理仍有优化空间。后续将从三方面改进: 一是优化机械结构, 实现固液、小型、粘性垃圾分离并保护硬件; 二是提升图像识别准确率; 三是改进电气系统、优化电气性能并添加自动清洁功能。

智能垃圾桶因智能化、自动化特性, 契合城市垃圾分类需求, 行业前景广阔, 但当前存在成本高、功能与寿命有限、消费者性价比低的问题。未来需聚焦降低生产维护成本、提升使用便捷度与产品可靠性, 这也是本系统后续设计优化的核心方向。

参考文献:

- [1] 赵圣清, 卢仕. 基于树莓派 4B 和 YOLOv5 的自动分类垃圾桶设计 [J]. 工业控制计算机, 2025, 38(06): 87-89+92. DOI: CNKI: SUN: GYKJ. 0. 2025-06-033.
- [2] 盛晴晴. 基于 STM32 的智能分类垃圾桶设计 [J]. 无线互联科技, 2024, 21(10): 57-60. DOI: CNKI: SUN: WXHK. 0. 2024-10-007.
- [3] 巫伟明. 基于 YOLOv8 轻量化改进的生活垃圾检测算法研究与应用 [D]. 广州大学, 2025. DOI: 10. 27040/d. cnki. ggzdu. 2025. 000625.