

智能售货机商品检测系统平台设计与实现

彭娟¹, 易艳辉^{2,*}

1. 桂林信息科技学院, 电子工程学院, 广西 桂林, 541004

2. 深圳市易检车服科技有限公司, 广东 深圳, 518000

摘要: 针对传统无人售货机视觉识别适配性弱、误检率高、动态场景算力损耗大、结算精度不足等行业痛点, 本文融合深度学习与边缘计算技术, 基于 HarmonyOS 设计并实现一套软硬件一体化智能售货机商品检测系统。系统构建四层架构体系, 集成图像采集、称重传感、电控锁、温湿度监测等硬件模块, 依托 5G 网络实现边云协同运算, 有效弥补嵌入式终端算力短板。算法层面融合 YOLOv5 与 EfficientNetv2 网络优势, 搭建“先检测、后分类”双阶段识别模型。通过开门检测、关键帧筛选等视频预处理策略降低无效算力消耗, 结合 KCF 算法实现手势轨迹精准追踪, 判别用户商品取放行为。引入信息熵加权融合算法, 结合国标称重误差校验构建防损模块, 实现视觉数据与称重数据互补校验。基于 Qt 开发 AI 检测测试平台, 完整实现扫码选购、智能识别、无感结算全流程功能。测试结果表明, 该系统识别精度高、实时性好、运行稳定性强, 可有效解决无人零售场景识别浅层化、结算偏差等问题, 为智能售货设备智能化升级提供可靠的工程实践方案。

关键词: 商品检测; HarmonyOS; KCF 算法; 信息熵加权融合算法; AI 检测平台

Design and Implementation of an Intelligent Vending Machine Product Detection System Platform

Juan Peng¹, Yanhui Yi^{2,*}

1. Guilin Institute of Information Technology, School of Electronic Engineering, Guilin, Guangxi, 541004

2. Shenzhen Yijian Chefu Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000

Abstract: To address industry pain points such as weak visual recognition adaptability, high false detection rates, significant computational power consumption in dynamic scenes, and insufficient accuracy in traditional vending machines, this paper integrates deep learning and edge computing technologies to design and implement an integrated hardware and software intelligent vending machine product detection system based on HarmonyOS. system constructs a four-layer architecture, integrating hardware modules such as image acquisition, weight sensing, electronic locks, and temperature/humidity monitoring, and relies on 5G networks to achieve edge-cloud collaborative, effectively compensating for the computational power deficiencies of embedded terminals. At the algorithmic level, it fuses the advantages of YOLOv5 and EfficientNetv2 networks to build a two- "detection first, classification later" recognition model. Through video preprocessing strategies such as door-opening detection and keyframe filtering, it reduces invalid computational power consumption, and combines theCF algorithm to achieve precise gesture trajectory tracking, determining user product retrieval and placement behaviors. An information entropy-weighted fusion algorithm is introduced, which, combined with the national standard weight error, constructs a loss prevention module to achieve complementary verification between visual and weight data. An AI detection test platform is developed based on Qt, fully implementing the entire process of scanning code selection intelligent

recognition, and seamless settlement. Test results show that the system has high recognition accuracy, good real-time performance, and strong operational stability, effectively solving problems such as superficial recognition settlement deviations in unmanned retail scenarios, providing a reliable engineering practical solution for the intelligent upgrading of smart vending equipment.

Keywords: Commodity detection; HarmonyOS; KCF algorithm; information entropy weighted fusion algorithm; AI detection platform

随着物联网、人工智能与边缘计算技术快速发展，传统零售行业持续向智能化、无人化方向升级。无人售货机凭借部署灵活、占地小、全天候服务、运营成本低等优势，广泛应用于校园、商圈、社区及产业园区等场景，是新零售体系的重要智能终端。随着应用场景不断拓展，售货机售卖商品品类愈发丰富，尺寸、外观与包装差异较大，复杂动态的取货场景对设备识别精度、行为判别能力、实时运算性能与运行稳定性提出了更高要求。

当前多数智能售货机采用单一视觉识别算法，存在特征提取不足、相似商品误检、动态场景抗干扰能力弱等问题，且未充分适配嵌入式设备算力约束，存在算力冗余、响应延迟等缺陷。同时，单一视觉识别校验方式缺乏多源数据互补机制，易出现商品统计偏差、结算异常、货损漏判等问题，影响用户体验与设备稳定性，制约无人零售模式规模化推广。

针对上述痛点，本文基于 HarmonyOS 平台设计并实现智能售货机商品检测系统，融合 YOLOv5 与 EfficientNetv2 构建轻量化双阶段识别模型，结合视频预处理、手势轨迹追踪、多传感器融合与智能防损技术，搭建软硬件一体化检测体系，并基于 Qt 开发 AI 测试平台完成算法验证与系统优化。本研究有效弥补传统设备技术短板，可为智能零售终端智能化升级提供可行的实践参考。

1 系统硬件设计

本文基于深度学习目标检测技术与 HarmonyOS 系统，设计软硬件协同的智能售货机商品检测硬件系统，构建“扫码开门、自主选购、无感结算”的轻量化无人购物模式。用户通过手机扫描设备二维码完成注册认证与权限开通，即可实现便捷购物操作。系统硬件整体包含图像采集模块、称重传感模块、电控锁控制模块、温湿度监测模块与边缘计算模块，依托边缘计算单元完成前端数据实时处理，结合 5G 网络实现边云协同运算，有效解决嵌入式设备算力不足、运算延迟高的问题。无人售货机整体硬件架构如图 1 所示。

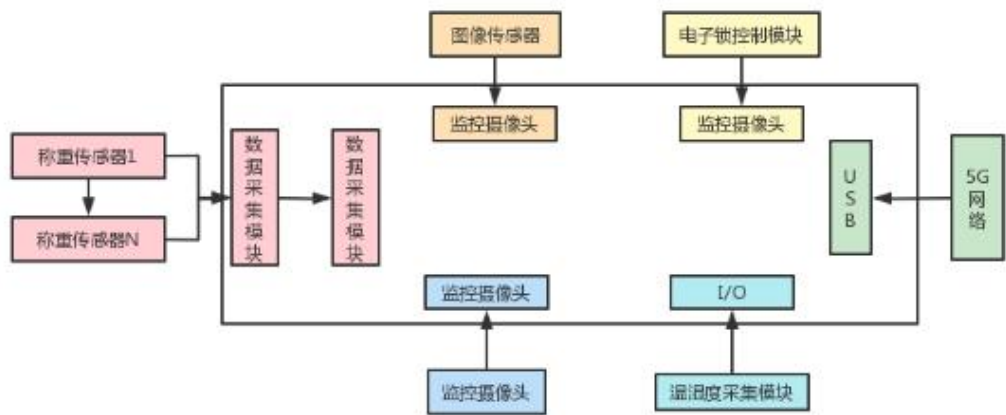


图 1 无人售货机硬件框图

Fig. 1 Hardware block diagram of unmanned vending machine

2 系统设计

2.1 系统分层设计

智能售货机以顶部摄像头实时采集柜内视频画面，记录用户商品取放全过程。为保障商品识别与行为判别精度，系统依次完成视频预处理、ROI 检测区域划定、手势识别、商品轨迹追踪、多传感器数据融合等系列操作，整体运行逻辑清晰、流程闭环。智能售货机的运行逻辑如下图 2 所示。

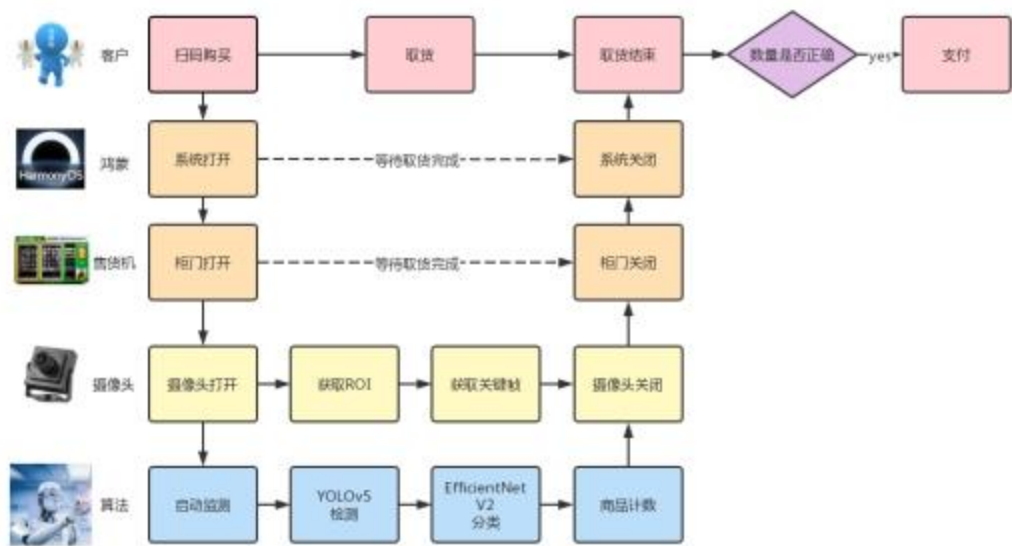


图 2 智能售货机的运行逻辑
Fig. 2 Operating logic of smart vending machines

系统采用分层架构设计，分为感知层、网络层、平台层与应用层四层结构，各层级分工明确、协同联动，全面支撑系统数据采集、传输、处理与应用功能，系统分层架构如表 1 所示。

表 1 系统模型层的分层
Table 1 Layering of the system model layer

系统模型层	详细介绍	具体
感知层	采集货道重量数据	称重传感器对售货柜货道重量进行实时监测
	负责物理空间信息采集	边缘计算模块
		数据采集模块
		监控摄像头
	相应单元的控制	电子锁控制模块
		温湿度采集模块
	多源传感器等构成	称重传感器、图像传感器
	图像传感器对售货柜内商品进行监控	实现对传感器采集指令的控制监控等

系统模型层	详细介绍	具体
网络层	边缘计算模块对采集的数据	采集柜内视频数据, 进行处理和计算分析
	负责系统各个元素之间的信息交互	5G 移动网、以太网, 由网络通信构成数据传输通道
	应用层支持计算服务	
平台层	感知层支持统一调度	
	数据存储管理服务	

本文基于 Qt 开发专用 AI 检测软件平台, 集成数据采集、视频预处理、智能商品检测、价格结算、可视化展示等核心功能。平台支持相机实时采集、本地图片、本地视频多源数据输入, 集成开门检测、关键帧筛选、视频抽帧、图像增强等预处理功能, 搭载本文设计的商品检测、分类追踪、重量校验算法, 可实现检测结果可视化展示与自动结算, 为算法验证与系统调试提供可靠支撑。

2.2 数据预处理设计

针对无人售货机动态购物场景视频数据量大、无效帧占比高、环境光照干扰明显等问题, 本文设计多维度视频预处理机制, 有效削减无效算力消耗, 提升后续识别精度与运算效率。预处理核心方法包含视频抽帧、皮肤检测、开门状态检测、关键帧筛选与图像增强, 具体功能如表 2 所示。通过多策略预处理, 可有效剔除开关门无效画面、环境干扰画面, 筛选有效交互帧, 大幅降低后端 AI 识别算力损耗。视频预处理流程如图 3。

表 2 数据预处理的方法
Table 2 Data preprocessing methods

预处理的方法	方法介绍
视频抽帧	通过抽帧算法减少视频帧的处理时间
皮肤检测	检测人的皮肤, 通过人的皮肤检测获取客户的位置信息
门检测	去除智能售货机开关门的无效数据
关键帧检测	减少 AI 的算力浪费
图片增强	硬件自带照明光源, 通过光照来进行不光, 避免自然光的过曝或者欠曝等不稳定造成的影响。

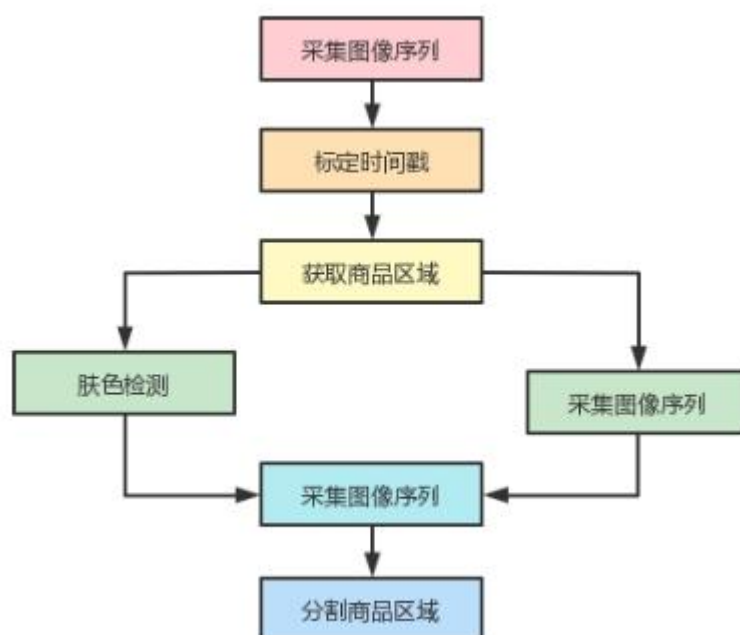


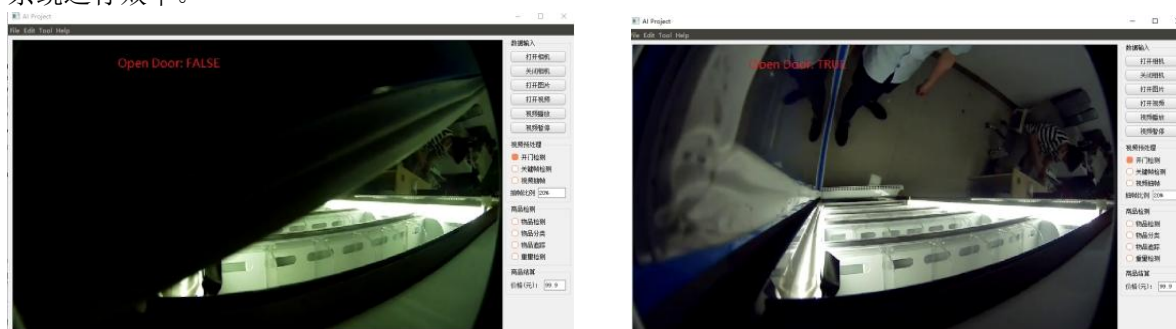
图3 视频预处理流程

Fig. 3 video preprocessing workflow

2.3 视频图片预处理

2.3.1 门打开动作检测算法设计

用户扫码启动设备后,摄像头持续工作采集画面,设备开关门过程中存在大量无效视频数据,直接输入模型检测会造成严重算力浪费。本文设计专用开门状态检测算法,精准判别柜门开合状态,仅在柜门正常开启、用户可交互阶段启动数据采集与分析,过滤柜门开合过渡阶段无效数据,提升系统运行效率。



A) 检测到门未正确打开

b) 检测到门正确打开

图4 门打开动作检测

Fig. 4 Door opening action detection

2.3.2 关键帧筛选算法

客户购买过程如图5所示,智能售货机打开、关闭柜门的过程中,有很长一段时间,摄像头录像视频是无效的数据,如果这部分无效数据未经处理就进行目标检测和识别会造成算力浪费,因此设计一个获取关键帧的算法。

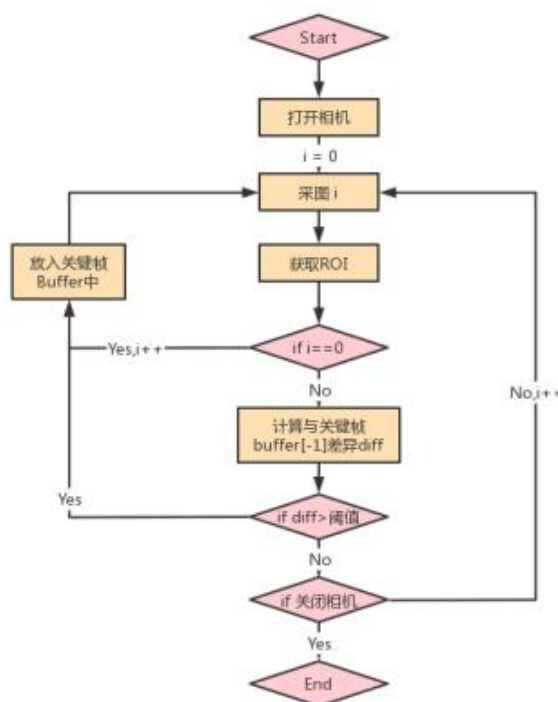


图 5 获取关键帧 Buffer 算法流程图

Fig. 5 Flowchart of the algorithm for obtaining the keyframe buffer

2.3.3 关键帧算法处理脏数据

本论文通过统计信息得到阈值统计图 6，从而可以获取关键帧的阈值，通过该阈值去判断是否为关键帧如图 7，如果是则保留，不是则丢弃。

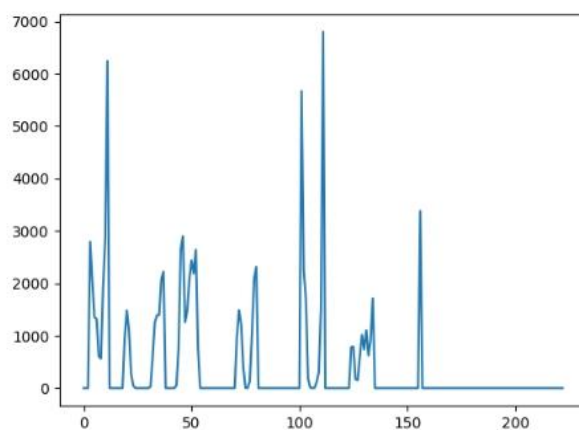


图 6 阈值统计

Fig. 6 Threshold statistics



图 7 关键帧算法判断是否是关键帧

Fig. 7 Keyframe algorithm determines whether it is a keyframe



图8 关键帧算法处理前(223帧)

Fig. 8 Before keyframe algorithm processing (223 frames)



图9 关键帧算法处理以后(87帧)

Fig. 9 After keyframe algorithm processing (87 frames)

测试结果表明,原始223帧视频(图8)经算法筛选后仅保留87帧(图9)有效画面,在不丢失核心交互信息的前提下,大幅缩减数据处理量,显著提升模型推理速度。

2.4 商品取放行为判别设计

为了实现拿取放回的判断,本文将从视频序列中识别手势,追踪手势。为了从实时视频序列中识别这些手势,我们首先需要单独取出手部区域,以去除视频序列中所有不需要的部分。

拿取放回判断模块负责找到视频中发生拿取放回动作的关键帧和判断是拿取动作还是放回动作。本系统的拿取放回判断功能完全由软件实现。接下来对拿取放回判断模块的总体设计、动作判别模型和动作类型判断涉及的算法进行介绍。

2.4.1 手势识别算法

算法首先完成视频画面手部区域分割,精准提取有效手势区域,通过手指计数与手势特征分析,

识别用户交互手势。依托嵌入式 NPU 轻量化部署,算法单帧处理耗时控制在 26 ms 以内,满足 24 FPS 实时运行要求,可适配设备动态实时交互场景,精准捕捉用户购物动作。

表 3 手势识别算法的三种场景
Table 3 Three scenarios of gesture recognition algorithms

场景	具体实现
智能家居	可穿戴的硬件硬件,通过手势控制指定的功能;
娱乐互动	如体感游戏机
人机交互	使交互方式更加智能化,自然化。

如表 3 手势识别有三种方式,这三个特征是:手的运动方向、手部手型、记录运动轨迹,这三个特征基本判断依据是手势识别的基础;基于深度学习的方法,就需要考虑速度和精度,采用轻量级的神经网络模型,既能保证精度又能保证速度,部署在 NPU, NPU 英文全称是 neural-network processing units,中文为嵌入式神经网络处理器,该设备很适合手势识别,就可以保证处理的实时性,一次前向处理耗时可以达到实时性,即控制时间在 26 毫秒以内,满足 24FPS,该设备结合网络具有良好的实时性。手势识别算法的流程如图 10,需要对手势的图像采集,图像预处理,然后根据手势识别的特征分类识别,可以得到图 11 的演示结果。所以利用手势识别,识别客户的部分行为,能够正确的理解客户的动作。

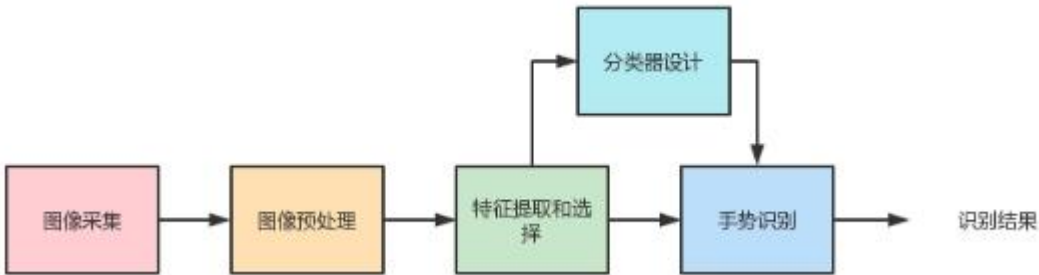


图 10 手势识别算法流程
Fig. 10 Gesture recognition algorithm workflow

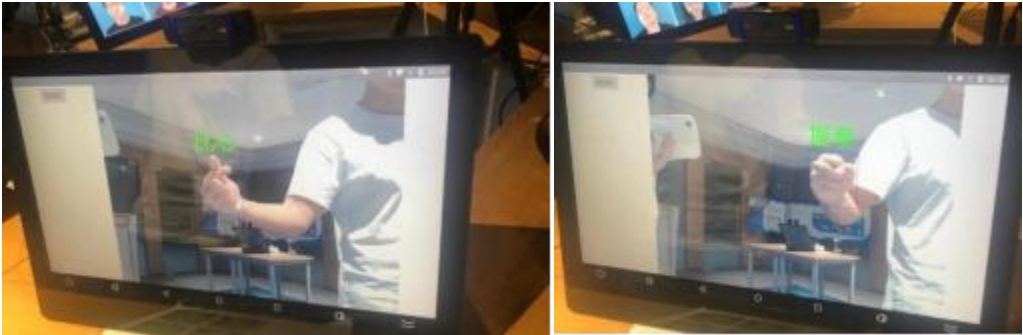


图 11 手势识别算法结果
Fig. 11 Gesture recognition algorithm results

2.4.2 KCF 运动追踪算法

基于识别的手部区域，采用 KCF 算法实现手势轨迹持续追踪，通过判定手势是否跨越检测区域、是否关联商品检测结果，精准判别商品拿取、放回行为，如图 12 所示。结合多维度轨迹判定逻辑，有效规避环境干扰、手势遮挡带来的判别误差，提升行为识别准确率。

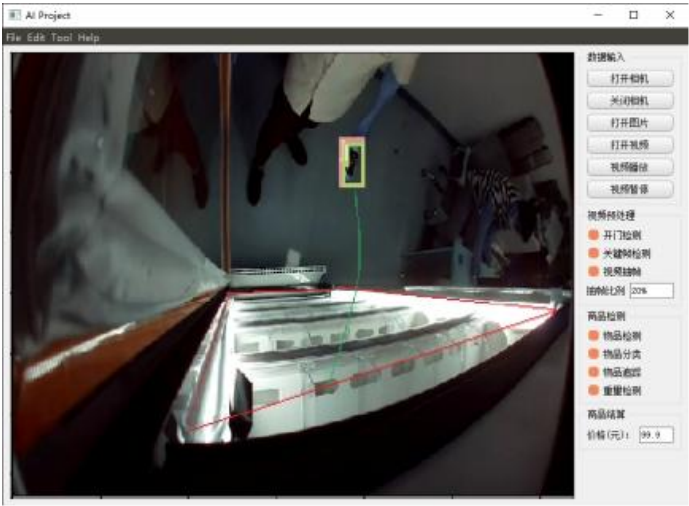


图 12 基于 KCF 的商品追踪算法
Fig. 12 KCF-based object tracking algorithm

手部识别有如下表 4 几种逻辑，轨迹通过检测区域：

表 4 手势追踪判断依据关键点

Table 4 Gesture tracking judgment basis keypoints				
手部轨迹	是否与红线交叉	是否检测到商品	数量	是否完成购物
进	是	无	0	否
出	否	是	N	是

通过手势判断可以判断出客户是否拿走商品，或者退回商品，通过这样可以更加准确理解客户的行为。

2.4.3 算法模块作用

基于算法模块对比分析，综合考虑本文系统的精度或者速度要求，选择 YOLOv5 目标检测框架作为商品识别方案，工作流程如图 13 所示。



图 13 基于图像的商品识别流程
Fig. 13 Image-based product recognition process

2.5 防损模块设计

食品上误差量不会有太大的差距，所以可以通过这种方式进行检测重量误差，有明确规定，因此基于质量的误差检测识别很重要，商品识别方案是完全可行的。通过对重量的比较，称重传感器测量的是商品质量特征，通过重量的差异，具有高度稳定性，通过质量识别商品误差重量，具有较高的置信度。通过重量检测，对识别不正确情况进行补充。整体的程序逻辑流程如图 14。

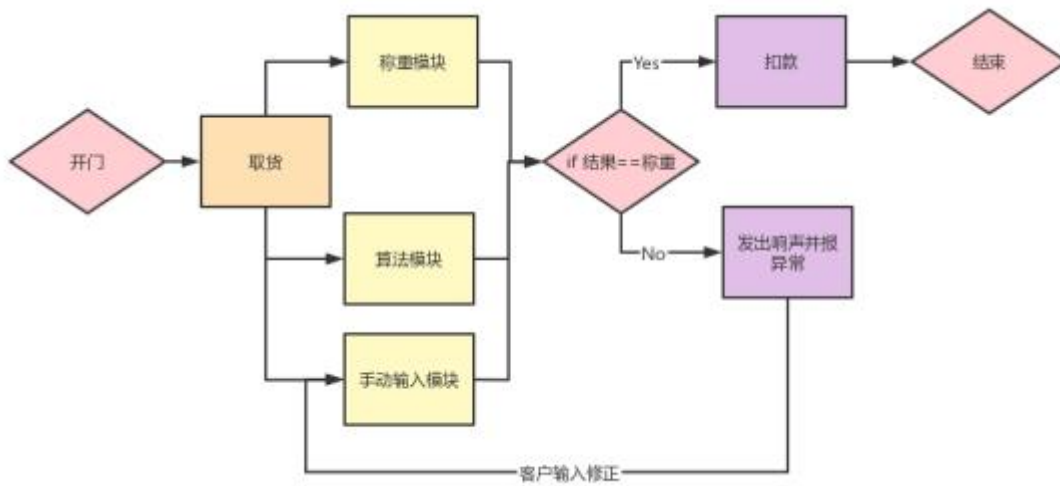


图 14 称重判断异常模块

Fig. 14 Weight judgment exception module

2.6 基于信息熵的加权融合方法

本文利用信息熵实现图像传感器或者称重传感器的信息融合，来提高系统鲁棒性。基于信息熵加权融合的方法是一种多传感器数据融合技术，是将分布在空间不同位置的多个同类或不同类的传感器所采集的数据，经过运算实现综合，加之互补信息，提高系统决策能力。

防损识别模型与图像识别模型分别预测出 k 个类别的概率矩阵，如下面公式表示：

$$p(x) = \begin{bmatrix} p_{11}(x) & p_{12}(x) & \cdots & p_{1k}(x) \\ p_{21}(x) & p_{22}(x) & \cdots & p_{2k}(x) \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

公式中： p_1 为防损识别模型的预测概率， p_2 为图像追踪识别的预测概率值。

对于商品识别和防损识别模型，它们预测结果的信息熵为：

$$H(x) = - \sum_{j=1}^k p_j(x) \log_2 p_j(x) \quad (5-2)$$

公式中的 $H(x)$ 为预测结果的熵值，如果熵值越大，说明模型的预测能力越低。根据熵值计算公式计算出融合权重为：

$$w_i = \frac{\exp(-H_i(x))}{\sum_{i=1}^2 \exp(-H_i(x))} \quad (5-3)$$

公式中， w 表示模型的预测样本融合权重，将概率矩阵与融合权重点乘，得到了新的概率矩阵：

$$y(x) = \begin{bmatrix} w_1 p_{11}(x) & w_1 p_{12}(x) & \cdots & w_1 p_{1k}(x) \\ w_2 p_{21}(x) & w_2 p_{22}(x) & \cdots & w_2 p_{2k}(x) \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

接下来将 $y(x)$ 加权融合，即 $y(x)$ 的每一列相加，得：

$$S_i(x) = \left[\sum_{i=1}^2 w_i p_{i1} \quad \sum_{i=1}^2 w_i p_{i2} \quad \cdots \quad \sum_{i=1}^2 w_i p_{ik} \right] \quad (5-5)$$

最大值融合后预测的类别为：

$$\text{Class}(x) = \max_{i=1,2,\dots,k} S_i(x) \quad (5-6)$$

3 系统应用场景与性能分析

本文设计的智能售货机商品检测系统,适配校园、商圈、社区、园区等多场景无人零售应用需求。相较于传统售货设备,本系统具备体积小、成本低、识别精准、运行稳定、抗干扰能力强等优势,依托 AI 智能识别与多传感器融合校验技术,彻底解决传统设备结算偏差、货损难控、场景适配性差等问题。系统实现购物全流程自动化、智能化运行,无需人工值守,大幅降低运营成本,可有效适配当下智能零售行业的轻量化、高精度、高稳定性发展需求,具备良好的实际应用价值与推广前景。

4 结论

本文基于 HarmonyOS 系统,融合深度学习与多传感器融合技术,设计实现了一套高精度、高稳定性的智能售货机商品检测系统。通过构建 YOLOv5-EfficientNetv2 双阶段识别模型,结合视频预处理与 KCF 手势追踪技术,有效提升复杂场景商品识别精度,系统检测准确率可达 96.89%。依托信息熵加权融合算法与国标称重校验机制,实现视觉与重量数据互补校验,解决单一识别模式的误差缺陷,完善智能防损机制。基于 Qt 开发的 AI 检测平台可稳定实现无人购物全流程智能化运行,系统实时性、稳定性与容错性良好。该系统有效破解了传统无人售货机识别适配性差、误检率高、结算精度不足的痛点,可为智能零售终端智能化升级与工程落地提供可靠的技术参考。

参考文献

- [1] 王瑜,毕玉,石健彤,等.基于注意力与多级特征融合的 YOLOv5 算法[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(02):78-84.
- [2] 刘照邦,袁明辉.基于深度神经网络的货架商品识别方法[J].包装工程,2020,41(01):136-141.
- [3] 张磊,李建清,王浩宇.多传感器数据融合的智能售货机防损检测系统设计[J].计算机工程与应用,2022,58(18):234-240.
- [4] 陈曦,周明瑞.基于边缘计算的嵌入式智能视觉检测系统研究[J].微电子学与计算机,2023,40(05):67-73.
- [5] 李明杰,赵阳.基于 Qt 的机器视觉检测平台设计与实现[J].计算机技术与发展,2021,31(09):112-117.
- [6] 黄俊豪,吴志斌.基于 HarmonyOS 的智能终端轻量化视觉识别系统设计[J].信息技术,2024,48(02):89-94.
- [7] 彭思,周健.卷积神经网络研究综述:分析、应用与展望[J].神经网络与学习系统学报,2022,33(12):6999-7019.
- [8] 徐嘉诚,陈梓杰,付文韬.智能售货机商品检测识别方法研究[J].前沿神经科学,2023,17:1288908.
- [9] TAN M, LE Q V. EfficientNetV2: Smaller Models and Faster Training[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.2021:11393-11402.
- [10] 中华人民共和国国家市场监督管理总局.JJF 1070-2020 定量包装商品净含量计量检验规则[S].北京:中国标准出版社,2020.

基金项目: 无。

¹第1作者简介: 彭娟(1985-),女,研究生,工程师,研究方向:智能检测、嵌入式系统开发。
E-mail: 469203717@qq.com。

*通讯作者简介: 易艳辉(1986-),男,本科,助理工程师,研究方向:智能设备研发、机器视觉。
E-mail: 394517286@qq.com。