

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.81049

基于协作机器人的食品农药残留检测 前处理系统设计与实现

朱 萍 陈洪波 郑军科

(浙江方圆检测集团股份有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要: [目的] 解决食品农药残留检测中多样样品前处理自动化的技术难题。[方法] 设计基于视觉反馈的机器人控制模块, 控制机械臂对目标物的抓取及移动底盘移动。根据前处理任务节点需求, 对各节点进行硬件设计, 构建自动化工作站, 并采用 PLC 作为主控制器, 控制各工作站的运动。根据多样样品前处理需求, 设计前处理过程管理模块, 实现前处理方案配置与过程监控等功能。[结果] 开发了一套基于协作机器人的食品农药残留检测前处理系统。[结论] 该系统能够按照设定的前处理方案以较高的成功率完成前处理任务, 且试验结果的回收率及精密度均符合 GB 5009.295—2023 的要求。

关键词: 农药残留; 前处理; 机械臂; 视觉; PLC

Design and implementation of a food pesticide residue detection preprocessing system based on collaborative robots

ZHU Ping CHEN Hongbo ZHENG Junke

(Zhejiang Fangyuan Test Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: [Objective] To address the technical challenges of automating the pretreatment of diverse samples in pesticide residue detection in food. [Methods] A visual feedback-based robotic control module was designed to control the robotic arm for grasping target objects and to guide the movement of the mobile chassis. Hardware components were designed for each pretreatment task node based on specific requirements, thereby constructing an automated workstation. A programmable logic controller (PLC) was adopted as the main controller to coordinate the operations of each workstation. In accordance with the needs of diverse sample pretreatment, a pretreatment process management module was developed to enable the configuration of pretreatment schemes and real-time process monitoring. [Results] A pretreatment system for pesticide residue detection in food based on collaborative robots was developed. [Conclusion] The system is capable of completing pretreatment tasks with a high success rate according to predefined schemes, and the recovery and precision of test results meet the requirements of GB 5009.295—2023.

Keywords: pesticide residue; preprocessing; robotic arm; vision; PLC

食品中农药残留量检测主要分为样品制备、样品前处理、仪器检测和数据处理^[1], 其中样品前处理是检测中的关键步骤^[2], 任务主要包括提取、净化和富集。样品前处理由于操作步骤多, 在整个检测过程中耗时占比高。传统的农药残留检测的样品前处理往往靠操作员手工完

成, 工作量大、效率低且质量不稳定。为了提高检测效率, 保证检测的准确率, 一些实验室选择了全自动样品前处理系统^[3-6]替代人工操作进行样品前处理。目前市面上的全自动样品前处理设备以组合式实验台的形式为主, 通过预设固定方法步骤, 实现由机械代替人工进行前

基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划 (编号: 2023MK060)

通信作者: 陈洪波 (1974—), 女, 浙江方圆检测集团股份有限公司正高级工程师, 学士。E-mail: chb@fytest.com

收稿日期: 2024-10-16 **改回日期:** 2025-06-19

引用格式: 朱萍, 陈洪波, 郑军科. 基于协作机器人的食品农药残留检测前处理系统设计与实现[J]. 食品与机械, 2025, 41(8): 70-76.

Citation: ZHU Ping, CHEN Hongbo, ZHENG Junke. Design and implementation of a food pesticide residue detection preprocessing system based on collaborative robots[J]. Food & Machinery, 2025, 41(8): 70-76.

处理操作。但是这些设备存在成本高、可扩展性差和适用场景单一等问题。由于食品农药残留检测的特殊性,相关检测标准和方法更新较为频繁。对于购买这些设备的检测实验室来说,在应对不断变化的检测方法时,能否确保设备功能同步升级,以及有效控制升级成本,成为一项重大挑战。同时,样品前处理因待测组分特点、检测要求以及食品性状等不同采用的方法也不同。目前市售的全自动样品前处理设备已取得显著进展,但在应对多样化前处理方法方面仍存在一定局限性,而研究开发的系统有望为此提供新的解决方案。

经过 60 多年发展,机器人产业已在相关领域实现规模应用。机器人与人工智能等新一代信息技术的融合使人机协同工作成为现实,持续推动生产水平的提高。为使得食品农药残留检测前处理系统智能化、柔性化和服务化,基于移动式协作机器人^[7]的优势,运用计算机视觉、机器人控制理论^[8]、PLC 控制等技术,设计开发一套食品农药残留检测前处理系统。系统拟针对前处理操作中人工取放样品、试剂、试管等目标物自动抓取及前处理操作过程中自动移动至相应操作台位置的需求;针对检测标准中前处理过程不尽相同及标准更新使得前处理过程变化等问题,建立多源设备控制子系统,以工作站模块化调度方式,实现与机械臂、移动底盘协同工作,以期为食品农药残留检测前处理自动化、智能化提供总体方案,满足食品农药残留检测中多样样品前处理的需求,并为类似检验检测自动化系统装备的开发研究提供借鉴。

1 系统总体框架

系统通过基于视觉反馈^[9]的机械臂轨迹规划与控制技术、移动底盘自主导航与避障技术以及自动化控制技术,实现可由机器人操作的样品前处理。在此基础上,系统针对食品样品多样性^[10]及检测方法更新导致前处理方法变化等问题,构建前处理设备工作站及采用前处理步

骤模块化调度的方式,实现前处理步骤及相应参数定义及自由组合。

调研食品检测实验室发现,前处理使用到的仪器包括电子天平、离心机、匀浆机、氮吹仪、涡旋混合器等,关键步骤包括获取任务、离心管揭盖、加液、加萃取物、离心管拧盖、振荡、离心、匀浆、涡旋、氮吹、移取上清液等。结合食品检测实验室基础条件以及实际需求,系统总体框架见图 1。系统包括基于视觉反馈的机器人控制模块^[11-14]、多源设备工作站控制模块以及前处理过程管理模块。

2 系统模块设计与实现

2.1 基于视觉反馈的机器人控制模块

2.1.1 硬件结构 考虑食品检测实验室的复杂多变环境,机器人需要满足安全、操作简单且精度高的要求,系统选取 Universal Robot 六轴协作型机械臂、Intel Realsense-D435i 深度相机、仙工 AMB-300 移动底盘、大寰 PGI-140 电动夹爪作为机器人的主要控制硬件,详见表 1。

机械臂与夹爪配合完成试管等目标物的移动与放置,深度相机实现目标物识别与定位,移动底盘实现机器人在实验室的自主导航。移动底盘与机械臂通过机器人控制柜连接,控制箱内搭载工控机及路由设备,用于接收调度信息、处理工作站回传数据、规划路径等。

2.1.2 机器人控制流程 机器人控制模块的关键在于如何把机械臂、移动底座、夹爪、深度相机、多源设备工作站等组件低耦合高内聚地整合至系统。Robot Operating System (ROS) 是目前机器人研究和开发领域使用最广的开发平台,具有支持模块化架构,并可实现灵活高效的模块间通信等特点。系统基于 ROS 开发平台实现机器人按照设定的前处理方案控制各组件协同进行前处理任务,具体流程见图 2。

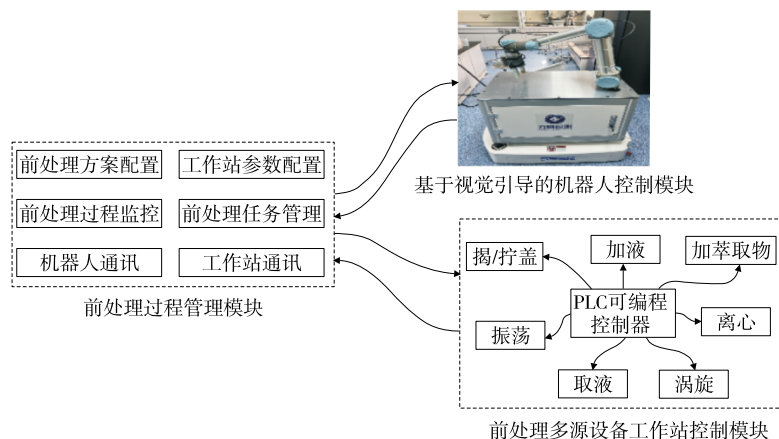


图 1 前处理系统总体框架图

Figure 1 Overall framework of the preprocessing system

表 1 机器人主要硬件

Table 1 Primary hardware of the robot

硬件名称	厂商	型号	主要技术参数
六轴协作型机械臂	优傲机器人公司	UR5	工作范围 850 mm, 负载能力 5 kg, 重复定位精度 ±0.1 mm
移动底盘	上海仙工智能科技股份有限公司	AMB-300	负载能力 300 kg, 导航位置精度 ±5 mm, 导航角度精度 ±0.5°
夹爪	深圳市大寰机器人科技有限公司	PGI-140	抓持力 40~140 N, 位置重复精度 ±0.03 mm, 打开/闭合时间 1.1 s/1.1 s
深度相机	英特尔公司	Realsense-D435i	深度距离约 10 m, 深度分辨率最高 1 280 × 720 @ 90 帧/s, 深度视场角度 (87° ± 3°) × (58° ± 1°) × (95° ± 3°)

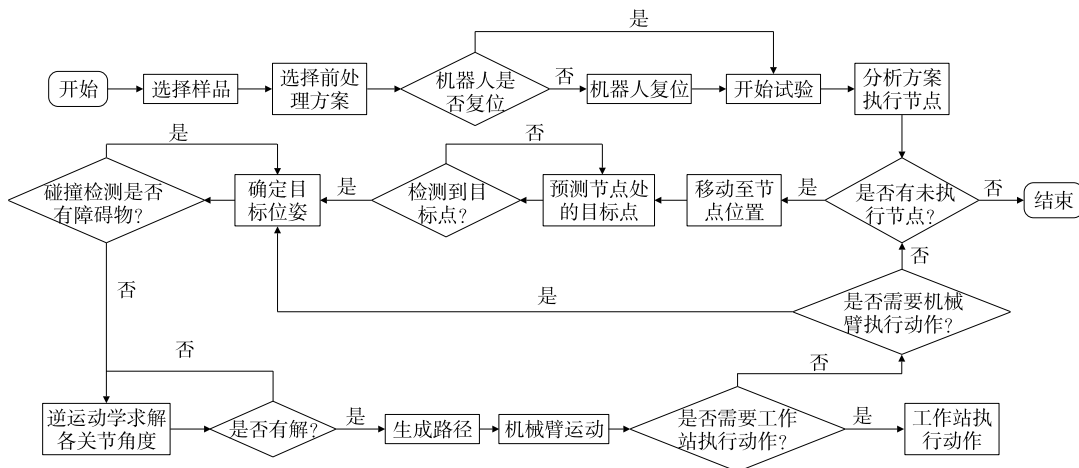


图 2 机器人进行前处理任务的具体流程

Figure 2 Detailed procedure of preprocessing tasks by the robot

2.1.3 视觉定位 在机器人进行前处理任务中,对试管的精准识别、抓取及放置是关键,特别是在离心步骤中。食品检测中离心步骤一般通过高速离心机完成。高速离心机腔体是以一个主轴为中心的圆形结构,通过快速旋转产生的离心力实现试管内混合物的组分分离。由于这个特性,使得每次离心前和离心后,试管位都不固定。为此,系统通过深度相机实时采集离心机腔体内的视觉信息,实现试管及试管位的定位。机器人执行离心任务时离心机腔体内视觉信息见图 3。

机械臂末端抓取离心机腔体内试管的算法步骤为:

(1) 获取相机标定后的位置信息、内部参数以及配



图 3 离心机腔体内视觉图像

Figure 3 Visual image inside the centrifuge chamber

准^[15]后的深度信息。

(2) 在提取 HSV 图像信息及去除背景部分后,使用 OpenCV 的 cv2.findContours() 函数寻找轮廓,使用 cv2.minAreaRect() 函数获取最大面积轮廓的外接矩形的中心点坐标 (u, v), 宽和高, 以及偏移角度。

(3) 相机坐标系与图像坐标系的变换关系可表示为

$$d \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:

d——图像深度值, mm;

u——试管盖外接矩阵中心点在图像坐标系中的水平坐标, 像素;

v——试管盖外接矩阵中心点在图像坐标系中的垂直坐标, 像素;

f_x——x 轴方向的焦距, 像素;

f_y——y 轴方向的焦距, 像素;

c_x——图像中心在 x 轴上的坐标, 像素;

c_y——图像中心在 y 轴上的坐标, 像素;

x, y, z——相机坐标系下的三维坐标, mm。

式(1)中 f_x, f_y, c_x, c_y 均可通过相机内参矩阵得到。

通过式(1)将轮廓矩阵中心点 (u, v) 转为相机坐标系下的坐标,可表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} d_0 \quad (2)$$

为保持TF变换计算的单位一致性,将式(2)的计算

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:

γ, β, α ——相对于 x, y, z 轴的弧度变换,rad。

计算基坐标系下试管坐标 $\text{tube_in_baselink}(x, y, z)$ 及标定板的坐标 $\text{aruco_in_baselink}(x, y, z)$,如式(4)所示。

$$A_{\text{base}} = RA_{\text{cam}} + C, \quad (4)$$

式中:

A_{base} ——试管、标定板在基坐标系下的坐标 $\text{tube_in_baselink}(x, y, z)$ 、 $\text{aruco_in_baselink}(x, y, z)$,m;

A_{cam} ——试管、标定板在相机坐标系下的坐标 $\text{tube_in_camera}(x, y, z)$ 、 $\text{aruco_in_camera}(x, y, z)$,m;

C ——相机在基坐标系下的坐标,m。

(6)机械臂抓取离心机中试管的 z 轴都垂直于地面,且标定板在离心室轴心位置。通过计算 $\text{aruco_in_baselink}(x, y, z)$ 到 $\text{tube_in_baselink}(x, y, z)$ 在各个坐标轴上的差值 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$,运用 $\arctan 2$ 函数确定机械臂末端方向,如式(5)、式(6)所示。

$$\vartheta_x = \arctan 2(\Delta y, \Delta z), \quad (5)$$

$$\vartheta_y = \arctan 2\left(\Delta x, \sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2}\right), \quad (6)$$

式中:

ϑ_x ——机械臂末端执行到目标位置要在 x 轴旋转的角度,rad;

ϑ_y ——机械臂末端执行到目标位置要在 y 轴旋转的角度,rad。

(7)将 4×4 单位矩阵按照 $\theta_x, \theta_y, -\pi/2, \pi/2$ 的旋转角度分别绕 x, y, z, x 轴旋转,并通过 $\text{tf.transformations.quaternion_from_matrix}$ 计算机机械臂末端执行目标位姿的四元数。

(8)通过试管在基坐标系下的坐标 $\text{tube_in_baselink}(x, y, z)$ 及机械臂末端执行目标位姿的四元数,计算出机械臂末端需执行的目标位姿。

2.2 多源设备工作站控制模块

2.2.1 工作站硬件

结果转换为以米为单位,表示为 $\text{tube_in_camera}(x, y, z)$ 。

(4)通过 ros_aruco 包中的 $\text{/aruco_signal/pose}$ 话题获取标定板在相机中的位姿数据,从而得到标定板在相机坐标系中的坐标 $\text{aruco_in_camera}(x, y, z)$ 。

(5)通过ROS发布的TF树,获取相机坐标和基坐标的平移旋转关系,从而计算相机坐标系下试管和标定板坐标转换到基坐标系下的旋转矩阵,如式(3)所示。

处理方案进行前处理操作,将各个前处理步骤构建为一个自动化工作站,并通过站点总控制器来负责与机器人模块通信和协调各工作站的运行。针对食品农药残留检测前处理过程中传统需手工操作的步骤,如加定量试剂/混合萃取物、揭/拧离心管盖、振荡和移液等,使用自动化机械设备以取代人工操作。对于离心和匀浆等需要专用仪器的步骤,通过集成通信模块,实现专用仪器的自动驱动与控制。

2.2.2 各工作站控制与通信 工作站主控器主要由禾川SV-X2E伺服驱动器和SIMATIC S71200 PLC组成,与机器人、各工作站基于Profinet和TCP/IP协议通信。工作站总体控制图见图4。

为实现各工作站按照机器人的指令工作,需要由PLC实现运动控制功能。在拧试管盖步骤中,拧紧试管盖PLC控制程序执行“触发拧”“旋转爪”“读取参数”等指令,驱动工作站中的升降轴、旋爪气缸运行。拧盖参考程序见图5。

2.3 前处理过程管理模块

在实际农药残留检测中,食品的多样性使得其前处理步骤不尽相同。为使得系统更贴合检测实验室需求,开发了食品农药残留检测前处理过程管理模块,实现包括前处理方案及参数配置、工作站点监控、前处理任务管理、前处理过程监控、机器人复位等功能。系统前处理方案配置过程见图6。

3 系统验证

系统依据GB 23200.113—2018《食品安全国家标准植物源性食品中208种农药及其代谢物残留量的测定气相色谱—质谱联用法》进行系统功能测试及加标回收率试验。

3.1 系统功能试验

由于机器人在实验室内移动到目标位平均误差在 $\pm 5 \text{ mm}$,移动和校正耗时相对稳定,试验选取机器人中机械臂操作步骤的关键耗时节点进行测试。测试节点:抓

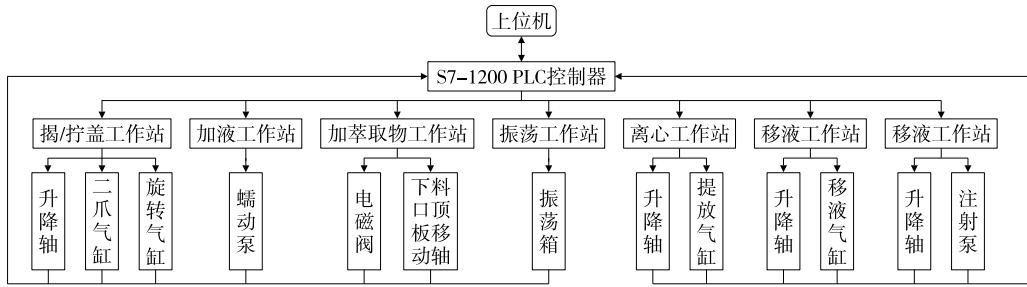


图 4 前处理工作站总体控制图

Figure 4 Overall control diagram of the preprocessing workstation

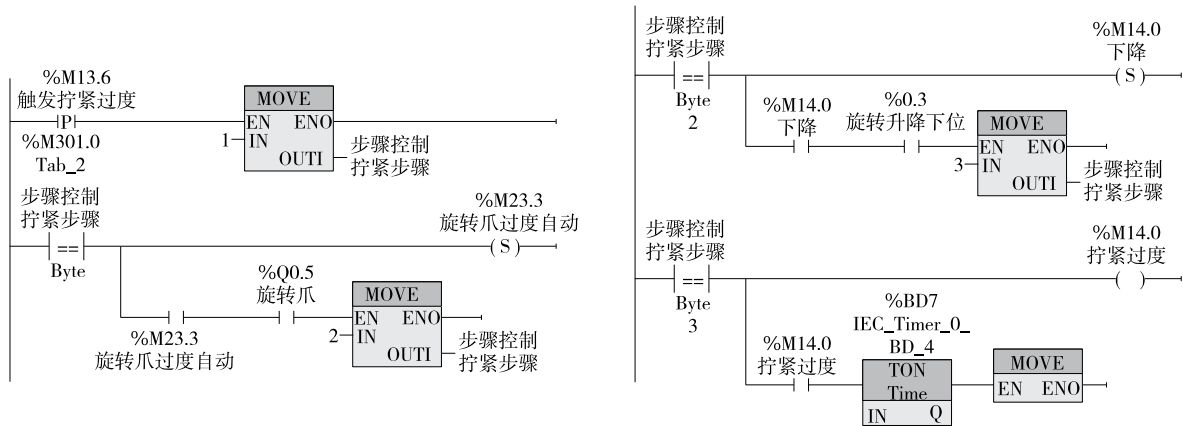


图 5 拧紧试管盖 PLC 程序

Figure 5 PLC program for tightening test tube caps

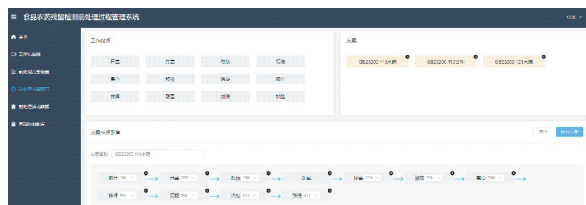


图 6 前处理过程管理模块

Figure 6 Preprocessing process management module

取试管篮中离心管、揭开离心管盖、加液、加盐、拧紧离心管盖、振荡、打开离心机、离心机腔体内放置离心管、启动离心机离心、离心机腔体内抓取离心管。按该方案进行 50 次,每次 1 个试管篮,每个试管篮中放置 4 个含 10 g 试样的 50 mL 塑料离心管。试验结果见表 2,系统操作成功率在 87%~100%,能够以较高的成功率完成前处理任务,其中揭盖和拧盖成功率较低,是由于机械臂送至揭/拧自动化装置处,揭/拧自动化装置进行揭/拧盖过程中离心试管处于腾空状态,当离心试管盖与旋转夹爪之间的摩擦力过小时,旋转夹爪的旋转力会使离心试管向下移动,从而揭/拧盖失败。

3.2 加标回收率试验

为考察采用系统进行前处理的检测方法的准确度与

表 2 系统功能测试结果

Table 2 System function test results

任务节点	成功率/%
抓取离心管	100
揭盖	92
加液	100
加盐	100
拧盖	87
振荡	100
打开离心机	100
离心机腔体内放置离心管	96
启动离心机离心	100
离心机腔体内抓取离心管	100

稳定性,系统依据 GB 23200.113—2018 QuEChERS 前处理方法,对不含待测农药样品(大白菜)按前处理过程管理模块中预设的前处理方案进行加标回收率测定。加标水平分别为 0.01, 0.05, 0.10 mg/kg, 连续 6 次测定。试验结果见表 3,平均回收率在 83.7%~115.7%,标准偏差在 0.57%~11.25%,准确度和精密度符合 GB 5009.295—2023 要求。

表3 样品中16种农药回收率测定结果

Table 3 Determination results of recovery rates for 16 pesticides in the sample

化合物	加标浓度/ (mg·kg ⁻¹)	平均回收 率/%	标准偏 差/%	化合物	加标浓度/ (mg·kg ⁻¹)	平均回收 率/%	标准偏 差/%
克百威	0.01	97.3	9.43	艾氏剂	0.01	95.7	4.47
	0.05	97.3	4.53		0.05	106.1	0.81
	0.10	88.9	9.11		0.10	93.2	0.98
甲胺磷	0.01	90.3	9.84	4,4'-滴滴涕	0.01	93.3	7.13
	0.05	84.1	4.24		0.05	89.1	8.77
	0.10	87.6	7.45		0.10	107.0	6.09
敌敌畏	0.01	84.0	5.63	倍硫磷	0.01	89.3	1.16
	0.05	103.8	2.52		0.05	107.9	0.90
	0.10	96.9	1.80		0.10	103.3	1.68
噁唑啉	0.01	83.7	11.25	联苯菊酯	0.01	84.3	1.79
	0.05	88.2	5.68		0.05	100.7	0.99
	0.10	93.9	6.66		0.10	99.5	1.51
alpha-六六六	0.01	90.7	4.11	氟虫腓	0.01	106.3	3.45
	0.05	112.5	0.57		0.05	115.7	1.41
	0.10	102.0	1.45		0.10	110.6	1.15
异菌脲	0.01	91.0	6.02	肟菌酯	0.01	90.7	3.01
	0.05	95.3	4.18		0.05	96.5	1.69
	0.10	87.7	6.32		0.10	99.9	1.67
胺菊酯	0.01	92.3	3.19	丙环唑	0.01	93.0	3.94
	0.05	89.0	2.78		0.05	92.7	2.19
	0.10	94.5	4.29		0.10	96.7	2.89
氟啶唑	0.01	91.0	2.31	氯苯嘧啶醇	0.01	93.0	2.26
	0.05	94.9	2.06		0.05	92.7	1.51
	0.10	96.7	1.62		0.10	96.7	2.44

4 结论

利用机器人实现食品农药残留检测前处理操作,设计并开发了一套基于协作机器人的食品农药残留检测前处理系统。在作者所在单位食品实验室进行的试验结果表明,加标回收率及精密度均能满足要求,且系统功能稳定,可减少人工劳动强度,提高检测效率。但系统仍存在需要改进的地方,如在复杂的实验室环境通过相机捕获全局环境,提升机器人避障能力;在移液过程中,通过试管分层图像精准获取上清液液柱所在位置,提高机器人移液精准度;建立不同型号试管、试管架等目标物识别模型,提升机器人感知能力。

参考文献

[1] 韦舒婷. 化学分析技术在食品农药残留检测中的应用研究[J]. 农村科学实验, 2024(3): 184-186.
WEI S T. Application of chemical analysis technology in the detection of pesticide residues in food[J]. Rural Scientific

Experiment, 2024(3): 184-186.

[2] 朱勇. 食品检测准确性的影响因素及解决策略研究[J]. 食品安全导刊, 2024(20): 33-35.
ZHU Y. Research on the influencing factors and solution strategies of food testing accuracy[J]. China Food Safety Magazine, 2024(20): 33-35.
[3] 蒋美玲, 唐力华, 钟远生. 智能机器人在检验检测实验室的应用研究综述[J]. 机电工程技术, 2024, 53(2): 51-55.
JIANG M L, TANG L H, ZHONG Y S. Research on the application of intelligent robots in inspection and testing laboratories[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(2): 51-55.
[4] 王征, 高希, 刘文菁, 等. 全自动QuEChERS-LPGC-MS/MS检测茶叶中46种农药残留[J]. 化学研究与应用, 2023, 35(10): 2323-2332.
WANG Z, GAO X, LIU W J, et al. Determination of 46 kinds of pesticide residues in tea by automatic QuEChERS combined with gas chromatography-triple quadrupole tandem mass

- spectrometry[J]. *Chemical Research and Application*, 2023, 35(10): 2 323-2 332.
- [5] 章雪明, 陈旭晋, 曹佳, 等. 农产品药物残留自动化样品制备平台构建和应用[J]. *实验技术与管理*, 2023, 40(12): 169-176.
ZHANG X M, CHEN X J, CAO J, et al. Construction and application of automatic sample preparation platform for drug residues in agricultural products[J]. *Experimental Technology and Management*, 2023, 40(12): 169-176.
- [6] 武晓丽, 易鹏, 戚仓, 等. 自动 QuEChERS 样品制备系统在中药禁用农药残留检测中的应用[J]. *农产品质量与安全*, 2022(3): 36-42, 49.
WU X L, YI P, QI C, et al. Application of automatic QuEChERS sample preparation system in the detection of banned pesticide residues in traditional Chinese medicine[J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2022(3): 36-42, 49.
- [7] 黄海丰, 刘培森, 李擎, 等. 协作机器人智能控制与人机交互研究综述[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(4): 780-791.
HUANG H F, LIU P S, LI Q, et al. Review: intelligent control and human-robot interaction for collaborative robots[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(4): 780-791.
- [8] 克雷格. 机器人学导论[M]. 负超, 王伟, 译. 北京: 机械工业出版社, 2018: 13-37.
CRAIG J J. *Introduction to robotics*[M]. YUN C, WANG W, Trans. Beijing: China Machine Press, 2018: 13-37.
- [9] 王校峰, 王建文, 曹鹏勇, 等. 机器视觉主导的机械臂动态抓取策略研究[J]. *机床与液压*, 2022, 50(17): 38-42.
WANG X F, WANG J W, CAO P Y, et al. Research on dynamic grasping strategy of robot arm dominated by machine vision[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(17): 38-42.
- [10] 陈祥国. 农药残留多残留分析技术在果蔬检测中的应用与挑战[J]. *中外食品工业*, 2024(9): 68-70.
CHEN X G. Application and challenge of pesticide residue multi-residue analysis technology in fruit and vegetable detection[J]. *Global Food Industry*, 2024(9): 68-70.
- [11] 彭本毅. 面向化学实验室自动化的视觉反馈复合机器人应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022: 30-48.
PENG B Y. Application research of visual feedback compound robot for chemical laboratory automation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022: 30-48.
- [12] 陈宝存, 吴巍, 郭毓, 等. 基于 ROS 的机器人自动手眼标定系统设计[J]. *计算机仿真*, 2020, 37(2): 343-348.
CHEN B C, WU W, GUO Y, et al. Automatic hand-eye calibration system of robot based on ROS[J]. *Computer Simulation*, 2020, 37(2): 343-348.
- [13] 刘斌祺. 多移动机器人调度系统的任务调度与路径规划[D]. 大连: 大连理工大学, 2020: 23-38.
LIU B Q. Task scheduling and path planning of multiple mobile robots scheduling system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020: 23-38.
- [14] 王海玲. 基于 ROS 视觉定位的机器人智能抓取系统研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2019: 28-40.
WANG H L. Research on robot intelligent grabbing system based on ROS visual positioning[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2019: 28-40.
- [15] 黄伟, 郭瑞科, 刘大勇, 等. 基于 Kinova 机械臂 RGBD 相机的目标抓取[J]. *空间控制技术与应用*, 2024, 50(1): 100-106.
HUANG W, GUO R K, LIU D Y, et al. Target grasping based on Kinova robot arm and RGBD camera[J]. *Aerospace Control and Application*, 2024, 50(1): 100-106.