

基于视觉定位的自动化移液装置研究

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] 针对现代食品检测实验室在样品前处理过程中精度差、受人为因素影响较大等问题, 研制自动化移液装置, 提升检测效率与质量, 同时减少设备成本, 降低维护复杂度, 满足多种样本液在不同规格试管间的双通道移液需求。[方法] 采用电机驱动丝杆的传动结构, 实现旋转夹爪与移液头的横移、垂直移方向的准确运动。采用微升级精度的吸取泵对被测样本液进行精确吸取与释放。基于 YOLOv8 目标检测算法设计移液控制系统的上位机, 实现移液区检测及液面初定位, 并对移液装置的各执行单元实施调度。设计以 STM32 单片机为控制核心的下位机, 通过网络模块与上位机连接通信, 接收运动指令及上报各电机运行状态。[结果] 研制了一套基于视觉定位的自动化移液装置。[结论] 该装置能够按照设定的程序以较高精度完成移液任务, 且试验结果满足 JJG 646—2006 标准要求, 可满足食品检测中样品前处理过程所需移液需求。

关键词: 食品检测; 前处理; 移液装置; 视觉定位

An automated pipetting device based on visual positioning

ZHU Ping CHEN Hongbo ZHENG Junke

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

Abstract: [Objective] Aiming at the poor precision and great susceptibility to human factors in the process of sample pretreatment in modern food testing laboratories, an automatic pipetting device is developed to improve the detection efficiency and quality, reduce the cost of equipment and the complexity of maintenance, and meet the needs of dual-channel pipetting of various sample liquids between different specifications of test tubes. [Methods] The transmission structure of the screw driven by the motor is adopted to realize the accurate transverse and vertical movement of the screwing jaw and the pipette tip. A micro-upgrade precision suction pump is used to accurately absorb and release the sample liquid. On the basis of the YOLOv8 target detection algorithm, the upper computer of the pipetting control system is designed to realize the detection of the pipetting area and the initial positioning of the liquid level, and the execution units of the pipetting device are scheduled. The lower computer with STM32 single chip microcomputer as the control core is designed to connect with the upper computer through the network module to receive motion instructions and report the running state of each motor. [Results] An automatic pipetting device based on visual positioning is developed. [Conclusion] The device can complete the liquid transfer task with high precision according to the set procedure, and the test results meet the requirements of JJG 646—2006 standard, which can meet the liquid transfer requirements of sample pretreatment process in food testing.

Keywords: food testing; pretreatment; pipetting device; visual positioning

在食品检测过程中, 需要检测人员在短时间内完成大量样品的处理与检测工作, 包括制样、前处理、检测分析和数据处理。传统样品的处理与检测大部分操作往往以人工为主, 其中样品的成分和含量测定则主要依靠分

析仪器, 其整体的时间成本、人工成本相对较高, 且人为因素容易影响检测质量和检测效率。随着智能化与自动化技术的迅速发展, 食品自动化和智能化检测程度越来越高、应用范围越来越广泛^[1-6]。在食品检测技术中化学

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: 2025-03-07 **改回日期:** 2025-08-02

引用格式: 朱萍, 陈洪波, 郑军科. 基于视觉定位的自动化移液装置研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 99-106.

Citation: ZHU Ping, CHEN Hongbo, ZHENG Junke. An automated pipetting device based on visual positioning[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 99-106.

分析法和微生物检测法是最常用的方法。在使用这些方法的过程中,涉及大量移液操作,需要将液体试验样本或化学试剂转移至离心管中。传统人工操作方式效率低且移液精度易受人为因素干扰,继而影响检测结果的稳定性和重复性,而由仪器装置代替人工操作可以很好地解决这一问题。

1957 年,德国科学家 Heinrich Schnitger 发明了第一支移液器,基于气体活塞原理实现了吸液和放液,极大提升了液体微量处理的准确性与效率^[7]。其后,又出现了可调量程移液器、电子移液器、多道移液器等移液技术^[8],进一步提高了移液效率和精度。随着现代科学的发展,自动移液工作站逐步普及,通过集成 AI 算法、传感器、IoT 技术等技术,可有效满足高通量、高效率、高精度试验分析的需求,成为数字化实验室构建中的关键节点。目前市面上的自动移液工作站应用场景主要聚焦于生物医学、分子诊断、药物研发等领域^[9-12],具有不同程度的模块化、多通道、高精度及智能控制等功能,多适配于孔板、PCR 管等标准化耗材,对离心试管等多规格容器的兼容性较差,其结构普遍复杂、成本较高,维护也较为困难。在食品检测实验室,广泛使用 50, 15, 10 mL 等不同规格的离心试管进行移液,样本处理具有体积大、类型多样等特点。然而,当前主流自动移液工作站大多针对微量液体进行高密度分液,对食品检测领域样本的处理缺乏适应性。此外,检测标准较为频繁地更新,导致食品检测实验室对自动移液工作站的适配性、经济性及操作灵活性要求更高。试验拟研制一款结构精简、成本适中、广泛适配的基于视觉定位的自动化移液装置,采用模块化设计及深度视觉检测技术,实现对不同规格离心试管的快速精准移液,以期食品检测自动化升级提供依据。

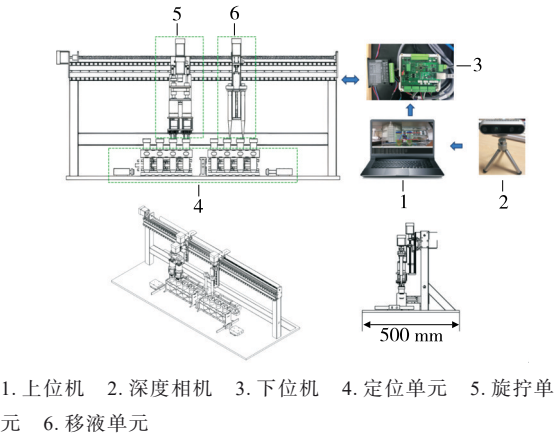
1 装置结构与工作原理

基于视觉定位的自动化移液装置主要由定位单元、

旋拧单元、移液单元和控制系统组成,如图 1 所示。

装置工作原理:将需要移液的试管架和待分装液体的试管架分别放置于定位器的左侧平台与右侧平台,控制系统发出控制指令使二位五通电磁阀通电,驱动 LDA20 气缸推出,将位于试管架后的夹爪组件夹紧 4 个离心试管,确保离心试管保持直立且不会旋转;视觉检测模块检测移液区域,计算得出移液区域三维空间坐标;控制系统发出指令给升降电机,驱动滑轨与升降组件将旋拧组件置于试管架正上方后,旋拧电机驱动输出轴带动旋拧轴转动继而旋拧离心试管盖,其中升降电机与旋拧电机均采用 42 步进电机,额定电压 24 V,额定功率 48 W;根据移液区域三维空间坐标,控制系统驱动移液电机控制移液头进入移液试管内部指定位置,控制系统控制辅助气缸和换向阀实现吸液和放液。从 50 mL 离心试管中移取一定量的样本液至 15 mL 离心试管为例的装置工作流程如图 2 所示。

装置最小吸取量为 200 μL 的精度,最大吸取量为



1. 上位机 2. 深度相机 3. 下位机 4. 定位单元 5. 旋拧单元 6. 移液单元

图 1 装置结构图

Figure 1 Overall framework of the device

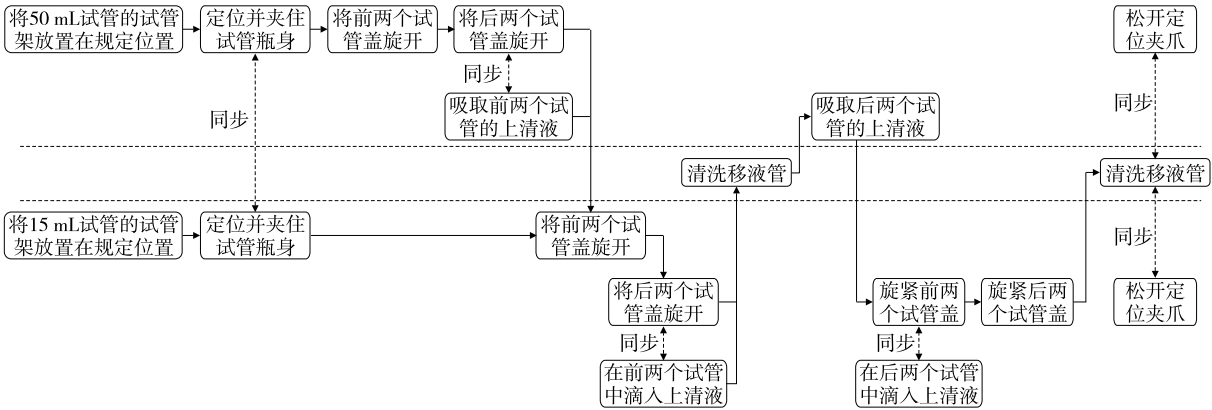


图 2 装置工作流程图

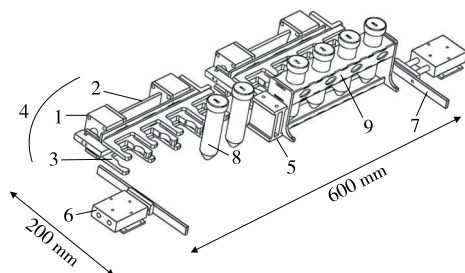
Figure 2 Workflow chart of the device

10 mL,横移与垂直移动位置精度达到 0.1 mm,移动速度为 2~20 mm/s 可调,网络控制延时 10 ms,整体设备电耗 < 20 W,试管从上设备到移液完成于 30 s 内完成。

2 关键部件设计与实现

2.1 定位单元

定位单元主要由夹爪组件、定位器、驱动气缸和扫掠板组成(见图3),实现对试管架的快速定位与姿态校正,以提高旋拧单元旋拧离心管盖的成功率及移液单元移取上清液的精确度。在定位单元中,两组夹爪组件之间设置一个定位器,并在相对于定位器的另一侧设置一组扫掠板及驱动气缸,扫掠板固定于驱动气缸一侧。首先,将两个试管架置于定位器两侧,实现粗定位。然后,控制系统控制直径为 20 mm 的驱动气缸驱动扫掠板移动,推动两个试管架与定位器抵接,使得两组试管架中的 8 个离心试管保持在同一水平线。最后,控制系统控制 2 个夹爪组件同时夹紧 8 个离心试管。



1. 夹紧气缸 2. 气缸连接板 3. 夹爪 4. 夹爪组件 5. 定位器 6. 驱动气缸 7. 扫掠板 8. 离心管 9. 试管架

图3 定位单元主要部件

Figure 3 Main components of the positioning unit

针对食品检测实验室常用的 50, 15, 10 mL 等不同规格试管,设计夹爪组件,以提高装置的普适性。夹爪组件主要由夹紧气缸、气缸连接板及夹爪组成,夹爪组件三视图如图4所示。夹爪使用 3 个夹爪片,通过“正—反—正”安装,可抱紧不同规格的试管瓶身。

2.2 旋拧单元

旋拧单元主要由升降组件、旋拧组件和夹紧组件组成(见图5),实现夹持并旋拧不同规格离心试管盖的同时提高旋拧管盖的成功率,可实现旋拧 30~42 mm 范围内的试管盖。升降组件包括旋拧电机、滑轨等,负责抬起、下降旋拧组件相应距离;旋拧组件包括旋拧电机、旋拧轴,通过旋拧电机驱动旋拧轴与夹紧组件旋转;夹紧组件包括夹紧座、夹紧气缸、夹紧齿轮、硅胶管,通过旋拧电机旋转夹紧气缸输出轴上设置的齿轮,与其周围均等分布的 3 个夹紧齿轮啮合,继而实现旋拧管盖。每个夹紧齿轮设置 1 个硅胶管,使得 3 个夹紧齿轮上的硅胶管配合形成等

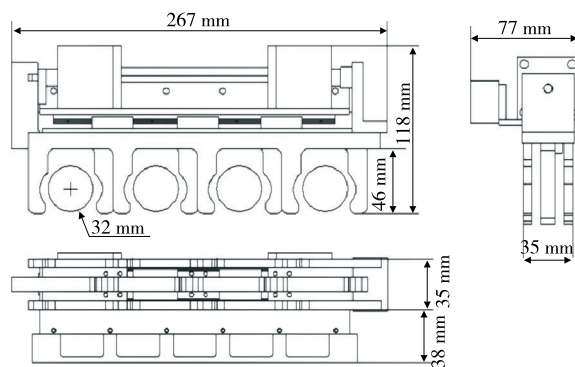
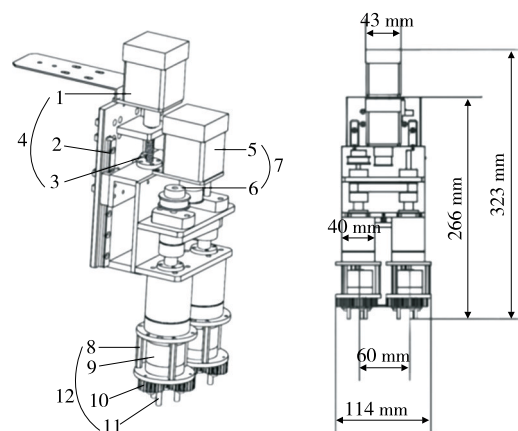


图4 夹爪组件的俯、正视图和侧视图

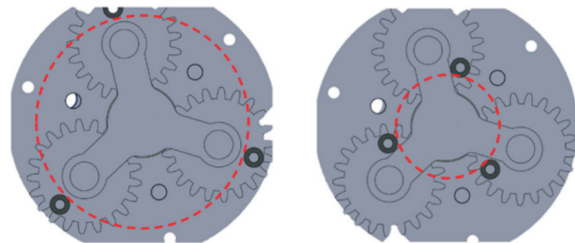
Figure 4 Top view, front view, and side view of the jaw assembly



1. 升降电机 2. 滑轨 3. 丝杠 4. 升降组件 5. 旋拧电机 6. 旋拧轴 7. 旋拧组件 8. 夹紧座 9. 夹紧气缸 10. 夹紧齿轮 11. 硅胶管 12. 夹紧组件

(a) 旋拧单元结构

(b) 旋拧单元部件尺寸



夹取试管盖的最大直径为 44 mm 夹取试管盖的最小直径为 10 mm
(c) 夹紧齿轮结构

图5 旋拧单元主要部件

Figure 5 Main components of the screwing unit

边三角夹爪,通过夹紧齿轮旋转调节 3 个硅胶管之间的距离,实现旋拧不同规格的离心管盖。

2.3 移液单元

移液单元主要由升降组件、光电传感器、滑动座及移液组件管组成(见图6)。升降组件负责移液组件的升降,通过设置的光电传感器实现对升降距离的控制。移液组件负责吸液和排液,组件中的移液管在其上端连接气管,

通过气动换向阀与辅助气缸协同实现吸液和排液。工作过程:控制系统根据上清液检测模块的检测信息驱动电机转动,使得升降组件执行部位向下运动,并根据光电传感器测出移动距离,当到达相应位置后,控制电机停止转动。此时,移液管已到达离心试管内指定位置,控制器控制移液组件进行吸液与放液。

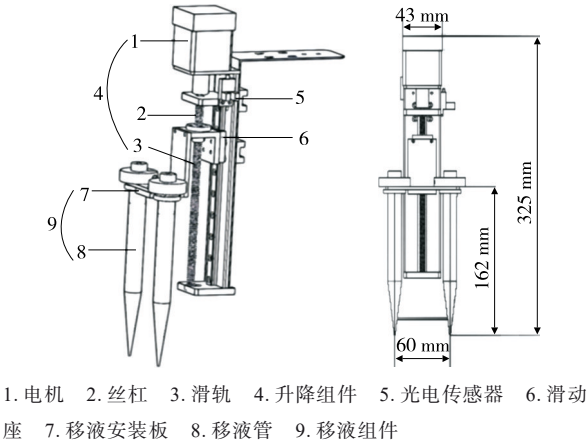


图6 移液单元主要部件

Figure 6 Main components of the pipetting unit

2.4 装置控制系统

装置控制系统^[13]分为上位机和下位机两部分,功能模块如图7所示。

上位机系统基于机器人操作系统(ROS)开发^[14],包括运动规划模块、移液区域定位模块和异常监测模块。运动规划模块控制各机械轴实现多轴协调运动,自动按

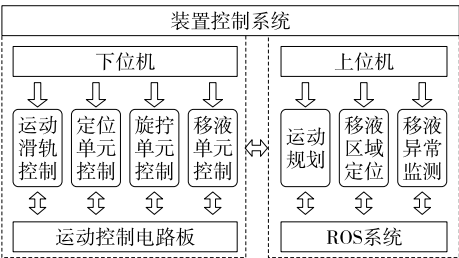


图7 装置控制系统功能
Figure 7 Control system function of the device

规划路径高效运动。上清液检测模块基于 You Only Look Once version 8 目标检测算法与 Intel RealSense 相机,通过获取离心试管中移液区域的三维空间坐标计算移液头吸液位置。异常监测模块实时监测移液过程中可能发生的异常状况,供系统动态调整运动状态。下位机以 STM32^[15]单片机为控制核心,通过集成电路板实现对移液装置各执行单元的精准控制和状态监测,包括泵驱动模块、传感器采集模块、电机及安全保护模块和通讯接口模块,集成电路板设计如图8所示。

2.5 视觉定位

在自动化移液装置进行移液任务过程中,确保移液头处于正确的移液区位置,是实现高精度样本液移取的关键。考虑到食品检测实验室中样本液种类繁多、成分复杂,液面形态存在显著差异,且容器规格多样,因此对装置的环境适应性和检测鲁棒性提出了更高要求。为此,装置通过视觉定位及液位传感器实现冗余液位检测,以提高复杂样本液体移取的稳定性及装置的广泛适用

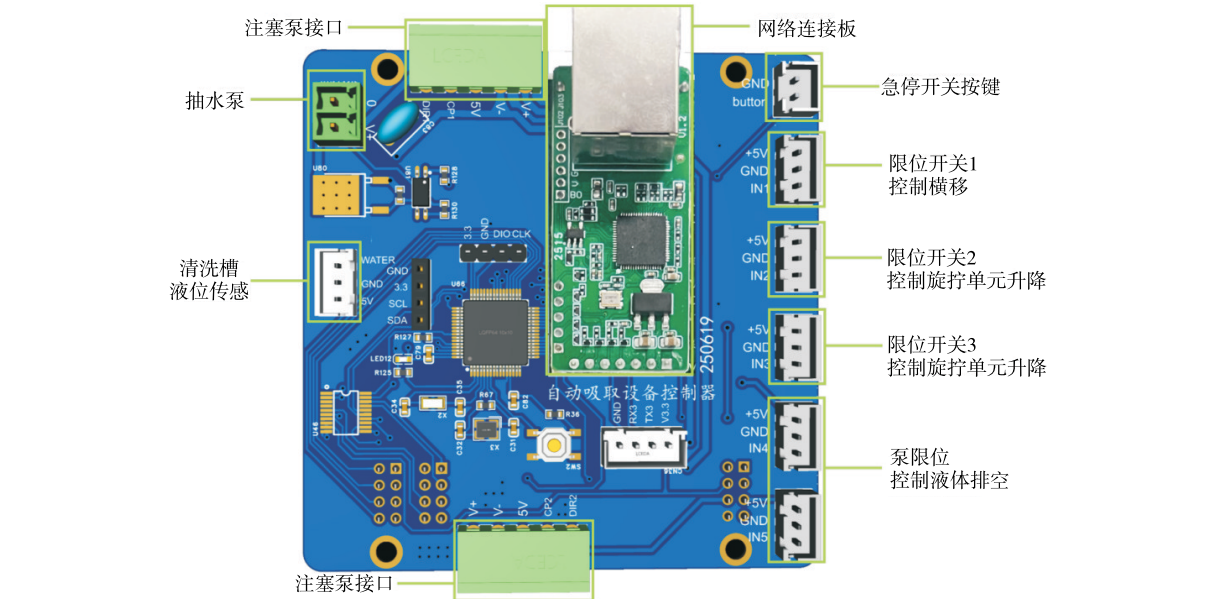


图8 集成电路板设计
Figure 8 Integrated circuit board design

性。视觉定位功能实现移液区液位初定位,液位传感器部分实现吸液过程液位变化监测。视觉定位功能利用 You Only Look Once version 8 目标检测算法在非规则形状与小尺度目标识别中的优势^[16],实现基于 You Only Look Once version 8 的移液区域定位方法^[17-19],通过计算得出的移液区三维空间坐标信息,指导移液头自主调整位置。

由于缺乏公开可用的液位图像数据集,在某单位的食物检测实验室自主采集 1 000 张试管液位图像,构建用于移液区域检测的专用数据集。为提升模型对复杂样本的识别能力,针对原始数据中液面浅、分层不明显或存在水汽干扰等少样本情况,结合模型训练效果反馈,采用旋转、缩放、镜像翻转及颜色抖动等图像增强方法对相关图像进行扩充处理,从而提升数据集的多样性与平衡性,增

强模型对边界模糊、不规则液面等典型场景的鲁棒性与泛化能力。

为系统评估 You Only Look Once version 8 目标检测算法在移液区域检测任务中的适用性与性能表现,选取 You Only Look Once version 8 目标检测算法系列模型的不同版本(n、s、m)作为预训练基础模型,分别设置 100 轮与 300 轮训练轮数进行模型训练。通过对比各版本模型在关键指标上的表现,评估模型在移液区域检测中的精度、鲁棒性与收敛特性,为模型选型与部署提供依据。由表 1 可知,YOLOv8m-Epoch300 在识别精细液面与沉淀分界方面具备最优能力。考虑装置对精确移液的要求,选取 YOLOv8m-Epoch300 模型作为装置的移液区域检测模型。

表 1 各训练模型指标数据

Table 1 Index data of each training model

指标	YOLOv8n-Epoch100	YOLOv8n-Epoch300	YOLOv8s-Epoch100	YOLOv8s-Epoch300	YOLOv8m-Epoch100	YOLOv8m-Epoch300
Precision	0.935 9	0.941 4	0.951 2	0.927 4	0.922 4	0.951 3
Recall	0.946 5	0.952 5	0.952 6	0.937 6	0.959 9	0.950 7
mAP@0.5	0.959 1	0.962 2	0.961 1	0.958 8	0.961 7	0.973 9
mAP@0.5:0.95	0.827 1	0.831 2	0.841 4	0.837 8	0.837 3	0.846 4
Box Loss	0.695 4	0.687 4	0.674 0	0.695 3	0.673 6	0.688 2
Class Loss	0.405 6	0.409 8	0.369 8	0.400 4	0.339 6	0.351 3

检测到移液区后,根据移液区检测框,计算移液区的空间坐标及移液头初定位,具体算法步骤为:

(1) 从移液区检测框中选取液面区一个像素点(检测框上边界中点),记为像素坐标 (μ, ν) 。

(2) 通过调用 Intel RealSense API,从与 RGB 图像对齐的深度图中读取深度值 d 。

(3) 利用相机的内参矩阵 K ,将像素坐标 (μ, ν) 映射为相机坐标系下的三维坐标 (x_c, y_c, z_c) ,计算式为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = d \cdot K^{-1} \begin{bmatrix} \mu \\ \nu \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:

d ——检测框上边界中点像素坐标 (μ, ν) 的深度值,

mm;

K ——深度相机的内参矩阵;

μ ——检测框上边界中点像素点在图像水平方向上的位置,像素;

ν ——检测框上边界中点像素点在图像垂直方向上的位置,像素。

K 表示为

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:

f_x —— x 轴方向的焦距,像素;

f_y —— y 轴方向的焦距,像素;

c_x ——光心在 x 轴上的坐标,像素;

c_y ——光心在 y 轴上的坐标,像素。

式(2)中 f_x 、 f_y 、 c_x 、 c_y 可通过调用 Intel RealSense API 得到。

(4) 通过 Aruco 标定板进行外参标定,获得相机坐标系到移液装置基座(移液头)坐标系的齐次变换矩阵 T_{cb} ,将相机坐标系下检测框上边界中点坐标 (x_c, y_c, z_c) 映射到基座坐标系 (X, Y, Z) ,计算式为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = T_{cb} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:

T_{cb} —— 4×4 齐次变换矩阵(表示相机坐标系下检测框上边界中点转换为基座坐标系下的位置所需的所有旋

转和平移)。

(5) 根据预设浸入深度(如 3 mm)计算移液头下降目标高度,计算式为

$$\Delta h = |Y| + 3, \tag{4}$$

式中:

$|Y|$ ——基座(移液头)坐标系下的检测框上边界中点在 y 轴方向上的距离,mm。

3 样机试验

根据 JJG 646—2006《移液器》计量检测标准^[20]进行功能测试及性能试验。

3.1 样机功能试验

选取装置移液过程中关键节点进行测试。测试节点包括正直抱紧试管、打开盖子、拧紧盖子、吸液、放液。测试方案为从放置在一个试管架中的 4 个 50 mL 离心试管中移取 6 mL 样本液至放置在另一个试管架中的 4 个 15 mL 离心试管中,进行 50 次,一次一组试管架,试验结果见表 2。由表 2 可知,装置操作成功率为 92%~100%,能够以较高的成功率完成相关节点操作。打开盖子和拧紧盖子成功率较低,一是由于重复多次试验后,气缸气压降低导致旋拧装置的夹爪夹持力不足,导致与试管盖之间摩擦力过小;二是由于试验用的各离心试管高度有误差,旋拧装置下压至离心试管盖时过紧,导致旋拧试管盖的力不够大。

表 2 装置功能测试结果

Table 2 System function test results			
测试节点	成功率/%	测试节点	成功率/%
正直抱紧试管	100	吸液	100
打开盖子	92	放液	100
拧紧盖子	94		

3.2 样机性能试验

根据 JJG 646—2006 计量检测标准,以标称容量为 10 000 μL 进行计量性能验证,结果见表 3。标称容量表示检定移液器的最大吸液量,检定点表示目标吸液量,容量允许误差和测量重复性是移液器需满足的移液性能标准。

表 3 JJG 646—2006 计量检测标准

Table 3 Measurement and testing standards of JJG 646—2006		
检定点/ μL	容量允许误差/%	测量重复性/%
1 000	± 1.0	≤ 0.5
5 000	± 0.6	≤ 0.2
10 000	± 0.6	≤ 0.2

根据 JJG 646—2006,采用称重法对容量允许误差和测量重复性进行测量,所用的设备与材料见表 4。将纯水于实验室中放置 24 h 并保持温度恒定,试验开始前,启动移液装置对移液管充分润洗,确保移液管路和泵内残留纯水稳定。

表 4 设备与材料

Table 4 Equipment and materials	
设备/材料	规格或条件
电子天平	赛多利斯 BCE95I-10CN
测试液体	纯水(温度 25 $^{\circ}\text{C}$)
称量容器	50 mL 离心管

由于移液装置为双通道,设计试验步骤为:① 使用电子天平准确测量 2 个空离心试管质量 m_0 ,装入试管架;② 使用移液装置移取 1 次检定点液量的纯水到 2 个空离心试管中;③ 分别称量 2 个含纯水的离心试管质量 m_1 ;④ 计算每个离心试管的实际移取蒸馏水体积 V_{20} ,并按式(5)进行计算。

$$V_{20} = (m_1 - m_0) \times K(t). \tag{5}$$

从 JJG 646—2006 附录 B 查 $K(t)$ 值,25 $^{\circ}\text{C}$ 水温对应的 $K(t)$ 值为 1.001 766 cm^3/g 。

按上述步骤,分别移取 1 000,5 000,10 000 μL 的液量,每个检定液量重复移取 10 次并计算,试验结果见表 5。

根据试验结果,计算每组每个通道 10 次测量值的算术平均值 $\bar{v}$,分别按式(6)和式(7)计算容量允许误差和容量测量重复性,结果见表 6。

$$E = \frac{v - \bar{v}}{\bar{v}} \times 100\%, \tag{6}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \times 100\%, \tag{7}$$

式中:

- v ——检定点容量, μL ;
- $\bar{v}$ ——10 次测量的算术平均值, μL ;
- v_i ——单次测量值与 10 次测量的算术平均值之差, μL ;
- n ——测量次数;
- $\bar{v}$ ——10 次测量的算术平均值, μL 。

由表 6 可知,移液装置的所有移液通道的各检定点计量性能指标均满足 JJG 646—2006 标准要求,符合装置设计要求。

4 结论

通过设计精简机械结构及开发控制系统,研制了一

表 5 移液管试验结果
Table 5 Test results of the pipette

检定点/ μL	左移液管			右移液管		
	m_0/g	m_1/g	$V_{20}/\mu\text{L}$	m_0/g	m_1/g	$V_{20}/\mu\text{L}$
1 000	15.936 6	16.935 7	1 000.864 40	15.879 4	16.870 7	993.050 6
	15.937 1	16.928 8	993.451 34	15.899 4	16.887 5	989.845 0
	15.909 5	16.904 5	996.757 17	15.837 9	16.828 7	992.550 0
	15.932 8	16.927 7	996.656 99	15.860 6	16.860 9	1 002.066 5
	15.979 7	16.975 5	997.558 58	15.746 1	16.738 5	994.152 6
	15.860 2	16.851 9	993.451 34	15.824 0	16.815 6	993.351 2
	15.960 3	16.955 5	996.957 52	15.775 4	16.766 4	992.750 1
	15.745 2	16.744 1	1 000.664 10	15.882 3	16.876 3	995.755 4
	15.879 4	16.874 3	996.656 99	15.842 7	16.842 8	1 001.866 2
	15.843 6	16.840 1	998.259 82	15.909 5	16.896 8	989.043 6
5 000	15.790 2	20.782 5	5 001.116 40	15.904 3	20.912 3	5 016.844 1
	15.852 9	20.845 4	5 001.316 80	15.980 6	20.979 4	5 007.627 9
	15.815 5	20.812 1	5 005.424 00	15.732 6	20.723 6	4 999.814 1
	15.819 4	20.820 1	5 009.531 20	15.938 4	20.931 3	5 001.717 5
	15.766 4	20.740 1	4 982.483 60	15.732 6	20.723 6	4 999.814 1
	15.831 1	20.814 8	4 992.501 20	15.737 2	20.743 9	5 015.541 8
	15.846 1	20.827 4	4 990.097 00	15.835 1	20.819 3	4 993.002 1
	15.797 4	20.792 2	5 003.620 80	15.884 1	20.872 4	4 997.109 3
	15.838 2	20.812 1	4 982.683 90	15.758 2	20.739 4	4 989.996 8
	15.805 9	20.801 3	5 004.221 90	15.761 1	20.748 8	4 996.508 3
10 000	15.738 2	25.677 7	9 957.053 20	15.874 1	25.812 9	9 956.351 9
	15.844 2	25.799 0	9 972.380 20	15.773 0	25.712 3	9 956.852 8
	15.785 8	25.730 3	9 962.062 00	15.726 8	25.661 9	9 952.645 4
	15.772 6	25.696 1	9 941.024 90	15.765 1	25.710 7	9 963.163 9
	15.836 3	25.789 6	9 970.877 50	15.837 3	25.773 9	9 954.148 0
	15.814 3	25.769 6	9 972.881 10	15.842 3	25.793 9	9 969.174 5
	15.840 2	25.828 3	10 005.739 00	15.776 2	25.678 1	9 919.386 8
	15.914 8	25.837 3	9 940.023 10	15.871 2	25.771 2	9 917.483 4
	15.859 6	25.791 2	9 949.139 20	15.774 1	25.727 9	9 971.378 4
	15.842 1	25.775 2	9 950.641 90	15.734 4	25.669 4	9 952.545 2

表 6 所有检定点计量性能指标数据
Table 6 Measurement performance index data of all verification points

检定 点/ μL	容量允许误差		测量重复性	
	左侧移液管	右侧移液管	左侧移液管	右侧移液管
1 000	0.288	0.559	0.477	0.443
5 000	0.054	−0.036	0.194	0.179
10 000	0.380	0.489	0.197	0.186

套基于视觉定位的自动化移液装置。结果表明,试验装置的移液精度及稳定性均能满足标准要求,系统在连续

200 h 的测试中稳定运行,减少了人为移液误差,提高了检测效率。在装置使用过程中有需进一步改进之处,如在机械的运动过程中,需要配合传感器的反馈实现试管夹取的自适应位置调整,防止夹爪夹取位置偏离中心较多使得夹持力下降;在保证移液精度与样本间无污染的情况下,实现多种移液方式处理能力;与其他自动化检测设备集成,实现食品检测全流程自动化操作。

参考文献

[1] 丁浩哈, 谢祯奇, 沈嵩, 等. 基于人工智能的集成食品检测技术应用与展望[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(5): 13-23, 32.

- DING H H, XIE Z Q, SHEN S, et al. Application and prospect of integrated food testing technology based on artificial intelligence [J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(5): 13-23, 32.
- [2] 黄晓琛, 张凯利, 刘元杰, 等. 机器学习与计算机视觉技术在食品质量评价中的研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(12): 1-10.
- HUANG X C, ZHANG K L, LIU Y J, et al. Research progress on machine learning and computer vision technology in food quality evaluation[J]. Food Science, 2024, 45(12): 1-10.
- [3] 丁浩晗, 田嘉伟, 谢祯奇, 等. 机器学习和大数据在食品领域的应用[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(24): 353-361.
- DING H H, TIAN J W, XIE Z Q, et al. Applications of machine learning and big data in food industry[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(24): 353-361.
- [4] 孙名楷. 人工智能技术在现代食品检测中的应用与展望[J]. 现代食品, 2024, 30(22): 159-161.
- SUN M K. Application and prospect of artificial intelligence technology in modern food detection[J]. Modern Food, 2024, 30(22): 159-161.
- [5] 裴锋, 王焕芹, 黄平, 等. 食品检测智能化发展对食品质量提升的研究[J]. 食品安全导刊, 2025(13): 180-182.
- PEI F, WANG H Q, HUANG P, et al. Research on the improvement of food quality through the intelligent development of food inspection[J]. China Food Safety Magazine, 2025(13): 180-182.
- [6] 赵雯雯. 食品检测技术现状及未来发展趋势与挑战[J]. 食品安全导刊, 2024(34): 165-167.
- ZHAO W W. The current status, future development trends, and challenges of food testing technology[J]. China Food Safety Magazine, 2024(34): 165-167.
- [7] 马丁. 当一个共同的问题遇到一个巧妙的头脑[J]. EMBO 报告恩博报告, 2005, 6(9): 797-800.
- MARTIN K. When a common problem meets an ingenious mind [J]. Embo Reports, 2005, 6(9): 797-800.
- [8] 张志强, 张扬, 邱维宝, 等. 超声移液及微量移液技术进展和展望[J]. 合成生物学, 2023, 4(5): 916-931.
- ZHANG Z Q, ZHANG Y, QIU W B, et al. Progress and prospect of ultrasonic liquid transfer and low-volume liquid transfer technology[J]. Synthetic Biology Journal, 2023, 4(5): 916-931.
- [9] 李锦赫. 基于高通量制备的微流量移液工作站关键技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2021: 2-4.
- LI J H. Research on key technologies of microfluid-transfer workstation based on high throughput preparation[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021: 2-4.
- [10] 叶宝春. 微量液体移液技术研究及在基因编辑检测仪中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 15-21.
- YE B C. Research on micro-volume liquid pipetting technology and its applications for gene editing detector[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 15-21.
- [11] 杜建东. 基于嵌入式的全自动移液工作站研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2024: 2-13.
- DU J D. Research on automatic pipetting workstation based on embedded system[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2024: 2-13.
- [12] 张春明. 基于智能移液器的微量液体处理系统关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018: 16-25.
- ZHANG C M. Research on key technologies of micro-liquid processing system based on intelligent pipette[D]. Nanjing: Southeast University, 2018: 16-25.
- [13] 王正家, 吕召雄, 翟中生, 等. 一种用于样品前处理的加液仪控制系统设计[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 110-114.
- WANG Z J, LV Z X, ZHAI Z S, et al. Design of a adding liquid instrument control system for sample pretreatment[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 110-114.
- [14] 胡春旭. ROS 机器人开发实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 26-77.
- HU C X. ROS robot development practice[M]. Beijing: China Machine Press, 2018: 26-77.
- [15] 何宇驰, 陈永乐, 贺良, 等. 基于 STM32 的茶叶揉捻机揉捻桶转速模糊 PID 设计[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 74-80.
- HE Y C, CHEN Y L, HE L, et al. Fuzzy PID design for rotating speed of rolling drum of tea twisting machine based on STM32[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 74-80.
- [16] 王炼, 柳军, 皮杰, 等. 基于 YOLOv8n 的猪肉新鲜度图像识别算法[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 98-104.
- WANG L, LIU J, PI J, et al. Image recognition algorithm for pork freshness based on YOLOv8n[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 98-104.
- [17] 张科, 彭远刚, 王跃明, 等. 基于改进 YOLOv8 的试管及液位识别算法[J]. 计算机应用, 2024, 44(S2): 296-301.
- ZHANG K, PENG Y G, WANG Y M, et al. Test tube and liquid level recognition algorithm based on improved YOLOv8 [J]. Journal of Computer Applications, 2024, 44(S2): 296-301.
- [18] 任克勤, 陶青川. 基于 YOLOv5 的试管检测算法[J]. 现代计算机, 2022, 28(7): 1-7, 14.
- REN K Q, TAO Q C. Tube detection algorithm based on YOLOv5[J]. Modern Computer, 2022, 28(7): 1-7, 14.
- [19] 吴祝清, 谭逢富, 李冬秀, 等. 基于 YOLOv5 的试管样本液位检测[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(4): 61-67.
- WU Z Q, TAN F F, LI D X, et al. Liquid level detection of test tube sample based on YOLOv5[J]. China Medical Devices, 2023, 38(4): 61-67.
- [20] 施娟. 基于衡量法的移液器校准技术研究[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(8): 113-115, 117.
- SHI J. Study on pipette calibration based on gravimetric methods[J]. Metrology & Measurement Technique, 2017, 44(8): 113-115, 117.