

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.60162

面向食品自动化分拣的 Delta 机器人 轨迹跟踪智能控制方法研究

朱梓清¹ 陈小中¹ 杨淼¹ 刘强² 李晓梅³

(1. 常州工程职业技术学院, 江苏 常州 213001; 2. 徐州工程学院, 江苏 徐州 221018;
3. 江南大学, 江苏 无锡 214100)

摘要: [目的] 针对现有 Delta 机器人轨迹跟踪控制方法在食品自动化生产场景中存在的跟踪精度不足、动态响应滞后等问题, 满足食品分拣的高精度、高速度作业需求, 提出一种优化方案。[方法] 在食品自动化生产系统基础上, 提出一种融合反演控制、分数阶理论、滑模控制和自适应律的 Delta 机器人轨迹跟踪控制方法。通过自适应律用于实时补偿系统参数扰动与外部干扰, 利用分数阶理论优化系统动态响应特性, 结合反演控制与滑模控制协同作用提升轨迹跟踪稳定性。并搭建食品分拣试验平台验证试验方法的性能。[结果] 与传统轨迹控制方法相比, 试验方法的轨迹跟踪误差均方根降幅超 50%, 动态响应速度提升 8% 以上, 在不同负载与干扰条件下仍保持良好的稳定性, 可有效满足食品分拣的高精度作业要求。[结论] 多方法融合的控制策略显著提升了 Delta 机器人在食品自动化生产中的作业精度与相应速度。

关键词: Delta 机器人; 轨迹跟踪; 食品自动化分拣; 反演控制; 自适应律

An intelligent trajectory tracking control method of Delta robots for automated food sorting

ZHU Ziqing¹ CHEN Xiaozhong¹ YANG Miao¹ LIU Qiang² LI Xiaomei³

(1. Changzhou Vocational Institute of Engineering, Changzhou, Jiangsu 213001, China; 2. Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou, Jiangsu 221018, China; 3. Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214100, China)

Abstract: [Objective] To address the limitations of existing trajectory tracking control methods for Delta robots in automated food production, such as insufficient tracking accuracy and delayed dynamic response, this study proposes an optimized control scheme to meet the high-precision and high-speed operational requirements of food sorting. [Methods] On the basis of an automated food production system, this paper proposes a trajectory tracking control method for Delta robots by integrating backstepping control, fractional order theory, sliding mode control, and adaptation law. Adaptation law provides real-time compensation for system parameter variations and external disturbances. Fractional order theory optimizes the dynamic response characteristics of the system, while backstepping control and sliding mode control cooperate to improve the stability of trajectory tracking. Additionally, a food sorting test platform is constructed to verify the performance of the proposed method. [Results] Compared with traditional trajectory control methods, the proposed method reduces the root-mean-square error of trajectory tracking by more than 50% and improves dynamic response speed by more than 8%. Meanwhile, it maintains high stability under varying load and disturbance conditions, effectively meeting the high-precision operation requirements of food sorting. [Conclusion] The integrated multi-method control strategy significantly improves both operational accuracy and response speed of Delta robots in automated food production.

Keywords: Delta robots; trajectory tracking; automated food sorting; backstepping control; adaptation law

基金项目: 江苏省高等教育教学改革研究立项课题(编号:2023JSJG734); 江苏省教育科学“十四五”规划重点课题(编号:B/2021/03/37)

通信作者: 朱梓清(1982—), 男, 常州工程职业技术学院高级工程师, 硕士。E-mail: ngdscqa@sina.com

收稿日期: 2025-11-08 改回日期: 2026-01-24

引用格式: 朱梓清, 陈小中, 杨淼, 等. 面向食品自动化分拣的 Delta 机器人轨迹跟踪智能控制方法研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 93-99.

Citation: ZHU Ziqing, CHEN Xiaozhong, YANG Miao, et al. An intelligent trajectory tracking control method of Delta robots for automated food sorting[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 93-99.

随着工业 5.0 的不断推进,食品工业向智能化、柔性化转型,自动化生产设备的作业精度与效率成为制约行业升级的核心因素^[1]。Delta 机器人凭借并联机构的高刚度、快响应特性,在食品分拣、装箱等高速作业场景中被广泛应用,其轨迹跟踪控制性能直接影响食品生产的标准化程度与生产效率^[2]。高精度的轨迹跟踪控制可减少食品物料损伤率、提升分拣合格率,高响应速度则能匹配流水线的快节奏生产需求^[3-4]。

目前,国内外面向食品自动化生产的机器人轨迹跟踪控制方法的研究主要集中在两个方向:① 基于传统控制算法的改进研究,如通过 PID 参数自整定、模糊 PID 结合等方式,但该方法对食品负载波动的适应性有限,在多干扰场景下易出现跟踪偏差^[5-6]。② 先进控制算法的应用探索,如单独采用滑模控制抑制外部扰动或依托反演控制保障系统稳定性。从趋势来看,多算法结合已成为解决食品自动化生产中 Delta 机器人控制难题的主流方向^[7-8]。李文凯等^[9]针对三自由度并联机器人轨迹跟踪过程中存在的系统参数摄动与外部干扰问题,采用改进滑模控制策略,利用其强鲁棒性设计轨迹跟踪控制方案。结果表明,该方法有效提升了机器人轨迹跟踪精度,确保了复杂工况下运动控制的稳定性。杨磊等^[10]针对 Delta 机器人动力学建模复杂(需引入拉格朗日乘子),影响轨迹跟踪控制效率的问题,提出了一种基于 Udwadia-Kalaba 方法进行动力学建模,简化建模流程,并设计配套轨迹跟踪控制策略。结果表明,该方法获得了简洁且可靠的动力学模型,提升了控制效果。李云峰等^[11]针对并联食品分拣机器人需适配分拣作业动态需求,需平衡响应速度与控制稳定性的问题,提出了一种多算法融合的轨迹跟踪控制方法,整合不同算法优势适配食品分拣场景。结果表明,该方法实现了机器人运动响应速度与控制稳定性的平衡,满足了食品分拣的高效、精准作业要求。商德勇等^[12]针对刚柔耦合 Delta 机器人存在动力学耦合干扰,影响复杂工况下轨迹跟踪性能的问题,提出了一种基于奇异摄动理论的非线性混合控制策略,采用分离快、慢变模态分别控制。结果表明,该方法有效抑制了刚柔耦合带来的干扰,优化了轨迹跟踪性能,提升了复杂工况下的控制可靠性。但上述方法在实际食品分拣过程中常出现轨迹偏差过大、响应滞后等情况,无法满足高精度、高速度的生产需求,制约了食品生产智能化水平的提升。

试验拟聚焦食品自动化生产场景的特殊需求,提出一种融合反演控制、分数阶理论、滑模控制(sliding mode control, SMC)和自适应律的 Delta 机器人轨迹跟踪智能控制方法。通过自适应律实时补偿负载波动与外部干扰,利用分数阶理论优化系统动态响应速度,结合反演控制与滑模控制的协同作用抑制抖振、提升跟踪稳定性,形成优势互补的多算法融合控制框架。搭建食品分拣试验平台,通过对比试验验证所提方法的跟踪精度和动态响

应速度等,旨在为 Delta 机器人在食品自动化生产中的精准控制提供一种新方案。

1 食品自动化生产的 Delta 机器人分拣系统

食品自动化生产的 Delta 机器人分拣系统核心由传送装置、视觉系统、分拣装置和工控机四大模块组成,适配食品生产的洁净、高效、精准需求^[13-14]。食品自动化生产的 Delta 机器人分拣系统如图 1 所示。传送装置采用食品级不锈钢材质,表面光滑无死角,符合食品接触安全标准,易清洁消毒。支持可调速运行(0~300 mm/s),适配不同尺寸、质量的食物(如果蔬、零食、预制菜等),避免物料挤压或掉落。视觉系统搭载高速工业相机(拍摄帧率 ≥ 120 fps)和食品专用光源,抗环境光干扰,适配透明、彩色、异形食品识别,将识别到的物料坐标、类别等数据传输至工控机,响应延迟 ≤ 5 ms,保障分拣时效性。分拣装置采用三轴 Delta 机器人作为执行器,配备食品级真空吸盘或柔性夹具,避免损伤食品表面。重复定位精度 ± 0.05 mm,最大分拣速度 ≥ 120 次/min,满足食品生产节拍需求。工控机集成 PLC 和运动控制卡,可实现数据接收、指令下发与多设备协同,描述符合硬件扩展能力。其搭载的工业级处理器运算性能充足,能低延迟处理视觉系统数据,同步控制传送装置与 Delta 机器人,功能逻辑准确。

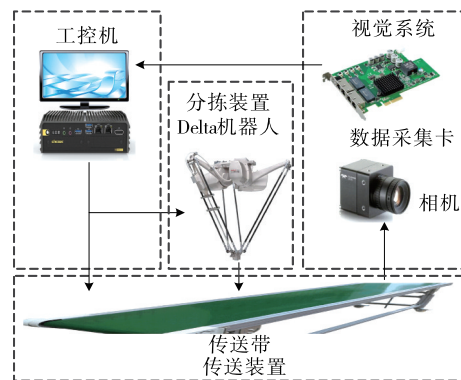


图 1 食品自动化生产的 Delta 机器人分拣系统

Figure 1 Delta robot sorting system for food automation production

2 Delta 机器人轨迹跟踪智能化控制方法

以 Delta 机器人分拣作业的跟踪精度和动态响应速度为核心目标,提出一种融合反演控制、分数阶理论、滑模控制和自适应律的 Delta 机器人轨迹跟踪控制方法。通过自适应律实时补偿系统参数扰动与外部干扰,结合分数阶理论优化动态响应特性,利用反演控制与滑模控制的协同作用提升轨迹跟踪稳定性,最终满足食品分拣场景中高速分拣不损伤物料和精准定位无偏差的核心需求^[15-16]。

2.1 分数阶滑模控制

Delta机器人典型的三自由度并联机构,其运动过程存在强非线性、关节耦合特性及参数不确定性,结合食品分拣场景中的外部干扰(如物料质量波动、传送带振动、关节摩擦波动),建立简化动力学模型如式(1)所示^[17]。

$$M(q)q^{**} + C(q, q^*)q^* + G(q) = \tau + d, \quad (1)$$

式中:

q, q^*, q^{**} ——关节角(rad)、角速度(rad/s)、角加速度向量(rad/s²);

$M(q)$ ——惯性矩阵,kg·m²;

$C(q, q^*)$ ——科里奥利力与离心力矩阵,(kg·m²)/s;

$G(q)$ ——重力项,N·m;

τ ——控制力矩,N·m;

d ——未知参数扰动与外部干扰(如负载变化、振动),N·m。

在Delta机器人轨迹跟踪控制中,传统整数阶滑模控制虽凭借不依赖精确模型、对参数摄动和外部干扰具有强鲁棒性的优势被广泛应用,但其核心局限在于:滑模面设计仅依赖整数阶导数,当系统存在外界扰动(如食品分拣中物料质量突变、传送带启停冲击)等不确定性因素时,控制律切换会加剧抖振现象,表现为控制力矩高频波动,不仅加剧机器人关节磨损,还会使末端执行器跟踪轨迹出现锯齿状偏差,无法满足食品分拣精准抓取无偏移的需求^[18]。

为解决整数阶滑模控制的抖振缺陷并进一步提升系统鲁棒性,基于分数阶理论优化传统滑模控制:通过引入分数阶微分算子(非整数阶导数),使滑模面设计突破整数阶框架的限制,获得更大的参数调节空间,可通过调整分数阶阶数 α ($0 < \alpha < 1$)灵活平衡系统的动态响应速度与鲁棒性,同时利用分数阶算子的记忆特性平滑控制信号切换过程,从根源上抑制抖振。定义分数阶滑模面如式(2)所示。

$$s = D^\alpha e_1 + \lambda e_2, \quad (2)$$

式中:

e_1 ——期望关节角轨迹(由5次非均匀有理B样条轨迹规划生成), $e_1 = q_d - q$;

e_2 ——关节角速度跟踪误差向量, $e_2 = q_d^* - q^*$;

q_d^* ——期望关节角速度,rad/s;

D^α ——Caputo型分数阶导数算子($0 < \alpha < 1$,通过试验优化取 $\alpha = 0.7$,用于调节系统动态响应特性);

λ ——误差调节矩阵(用于平衡跟踪精度与响应速度);

s ——分数阶滑模面向量(确保系统状态沿滑模面快速收敛)。

其核心作用是引导系统状态(e_1, e_2)在有限时间内收敛至滑模面 $s=0$,并沿滑模面渐进趋近目标轨迹。

2.2 融合控制方法

融合控制方法以精准跟踪+快速响应+强鲁棒性为核心目标,通过反演控制、分数阶理论、滑模控制与自适应律的优势互补,构建四阶协同控制框架。针对Delta机器人高阶非线性动力学模型,采用反演控制递归分解策略,将三阶系统分解为2个低阶子系统,降低控制设计复杂度^[19]。

(1)一阶子系统(角位置误差调节):基于 $e_1 = q_d - q$,设计虚拟控制律 q_r^* 如式(3)所示,迫使 e_1 快速收敛至零。

$$q_r^* = q_d^* + k_1 e_1 + D^\alpha e_1, \quad (3)$$

式中:

k_1 ——一阶子系统误差增益。

(2)二阶子系统(角速度误差调节):定义二阶误差 $e_2 = q_d^* - q^*$,对 e_1 求得误差动力学方程如式(4)所示。

$$e_1^* = q_d^* - q^* + k_1 e_1 + D^\alpha e_1 = e_2 + k_1 e_1 + D^\alpha e_1. \quad (4)$$

通过调节 e_2 实现对 e_1^* 的间接控制,确保角位置误差 e_1 渐进稳定。

将分数阶滑模面[式(2)]与反演控制结合,设计滑模控制律[式(5)],增强系统对扰动 d 的抑制能力。

$$\kappa_s = -k_s \text{sat}(s/\epsilon) - d^*, \quad (5)$$

式中:

k_s ——滑模控制增益;

$\text{sat}()$ ——饱和函数;

ϵ ——抖振抑制系数, $\epsilon = 0.01$;

d^* ——干扰估计向量(由自适应律实时更新)。

为进一步优化动态响应,将分数阶算子融入滑模控制律,通过调节 α 使系统兼具快速响应与平稳过渡特性,适配食品分拣线的传送带速度。

针对未知干扰 d ,设计自适应律如式(6)所示,实时估计干扰幅值并补偿至控制律中,提升系统鲁棒性。

$$d^{**} = \gamma_1 s \cdot \text{sat}(s/\epsilon) - \gamma_2 d^*, \quad (6)$$

式中:

γ_1 ——干扰估计增益;

γ_2 ——估计值衰减系数(避免估计值发散);

d^{**} ——干扰估计向量的更新率。

结合反演控制、分数阶滑模控制与自适应律,推导出Delta机器人轨迹跟踪融合控制律如式(7)所示。

$$\kappa = M(q)(q_r^{**} + k_2 e_2 + D^\beta s^*) + C(q, q^*)q_r^* + G(q) + \kappa_s, \quad (7)$$

式中:

k_2 ——二阶子系统误差增益;

D^β ——分数阶导数算子(用于优化滑模面收敛速度);

s^* ——滑模面变化率(确保系统状态在有限时间内收敛至滑模面)。

融合设计以精准跟踪+快速响应+强鲁棒性为核心目标,通过四大理论的优势互补构建控制框架^[20]。首先

利用反演控制分解 Delta 机器人的高阶非线性动力学模型,降低控制设计复杂度。其次引入分数阶理论优化反演控制的虚拟控制律和实际控制律,提升系统动态响应速度与平稳性。再结合滑模控制设计滑模面,增强系统对参数扰动和外部干扰的鲁棒性。最后通过自适应律实时估计并补偿未知干扰与参数波动,解决滑模控制可能存在的抖振问题,形成反演分解—分数阶优化—滑模抗扰—自适应补偿的协同控制机制。融合控制方法的系统框如图 2 所示。

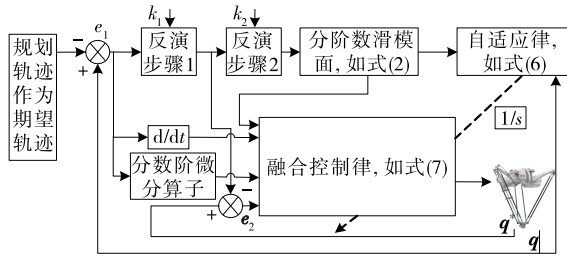


图 2 融合控制方法的系统框图

Figure 2 System diagram of fusion control method

3 Delta 机器人轨迹跟踪智能化控制试验

3.1 试验设置

为验证试验所提融合方法的 Delta 机器人轨迹跟踪方法在食品自动化生产场景中的性能,搭建了食品分拣试验平台如图 3 所示,选取雪饼、曲奇、饮料作为试验样本,覆盖食品生产中典型的轻负载、易破损、异形物料场景。试验参数设置围绕可复现性、可量化对比原则,涵盖试验平台硬件参数与算法核心参数,平台参数明确各组件型号与性能指标,保障试验硬件条件的统一性。算法参数通过正交试验优化确定,以轨迹跟踪误差(mm)、动态响应时间(ms)等为核心评价指标,在食品分拣典型工况(负载 0.01~0.5 kg、传送带速度 100~300 mm/s)下迭代调整。平台参数见表 1,算法参数见表 2。轨迹规划选择 5 次非均匀有理 B 样条曲线进行规划。

3.2 试验结果与分析

为验证试验所提轨迹跟踪控制方法的有效性,进行对比试验:采用 5 次非均匀有理 B 样条曲线进行轨迹规

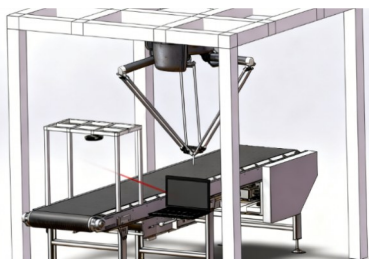


图 3 试验平台

Figure 3 Test platform

表 1 平台参数

Table 1 Test platform parameters

组成	型号
机器人	DR-3iB/8L 机器人
相机	Teledyne DALSA FA-23-1M120
镜头	MVL-KF0818M-12MP
试验目标	雪饼、曲奇和饮料
传送带	德马 DE1000 系列
工控机	德承 DX-1200 系列
系统	搭载 Linux 系统
图像采集卡	智微工业 NIC-I226-4LPOE

表 2 算法参数

Table 2 Algorithm parameters

参数	数值
反演控制一阶误差增益	8.5
反演控制二阶误差增益	12.3
分数阶阶数	0.7
滑模误差调节矩阵	diag(6.2, 6.2, 6.2)
滑模控制增益	5.8
抖振抑制系数	0.01
自适应干扰估计增益	1.2
估计值衰减系数	0.005
干扰估计更新率	0.3

划,规划轨迹的关键路径点见表 3。通过 Delta 机器人运动学逆解算法,将轨迹点的笛卡尔空间坐标转换为各关节的角速度指令,以此作为控制模型的输入信号。分别采用分数阶滑模控制方法与试验融合控制方法,开展角速度跟踪控制试验,系统探究两种方法的轨迹跟踪性能差异。优化前后的角速度跟踪曲线如图 4 所示,对应的轨迹跟踪误差均方根与动态响应时间量化指标见表 4。

表 3 轨迹点

Table 3 Track points

轨迹点	坐标/mm	轨迹点	坐标/mm
1	-250, 180, -680	4	-250, -85, -650
2	-250, 180, -660	5	-20, -180, -660
3	-250, 85, -650	6	-20, -180, -680

由图 4 和表 4 可知,试验融合方法的轨迹跟踪误差均方根为 0.14 deg,较传统分数阶滑模控制(0.28 deg)降低 50.00%,这一提升源于四大理论的协同优化效应:反演控制通过递归分解策略,将 Delta 机器人 3 阶非线性动力学模型解耦为低阶子系统,避免了高阶系统控制设计的复杂耦合干扰。分数阶滑模面利用非整数阶导数的记忆特

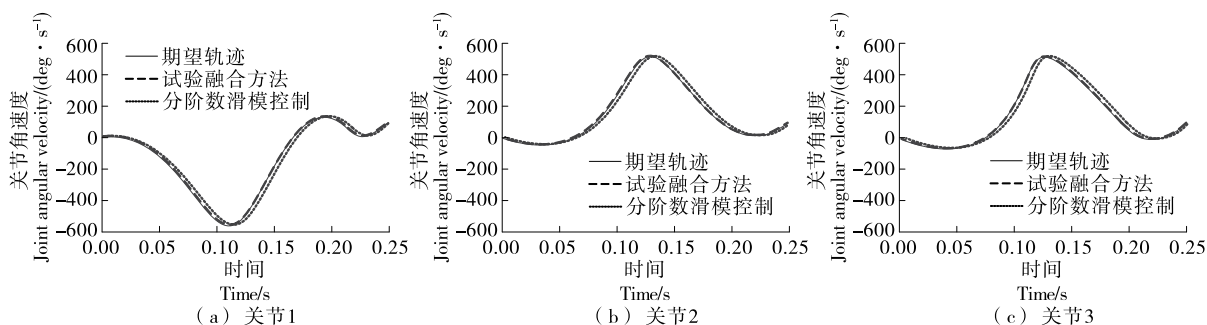


图4 优化前后角速度跟踪曲线

Figure 4 Angular velocity tracking curves before and after optimization

表4 优化前后轨迹跟踪误差和动态响应时间

Table 4 Trajectory tracking errors and dynamic response time before and after optimization

跟踪方法	轨迹跟踪误差均方根/deg	动态响应时间/ms
分数阶滑模控制	0.28	42.3
试验融合方法	0.14	28.7

性与灵活调节空间,平滑了控制信号切换过程。自适应律实时估计并补偿食品分拣场景中的物料质量波动、传送带振动等未知干扰,从根源上削弱了扰动对跟踪精度的影响。试验融合方法的动态响应时间较分数阶滑模控制的缩短32.1%,且无明显超调。这一优势得益于融合控

制框架对动态性能的针对性优化:反演控制的虚拟控制律与实际控制律形成层级化调节机制,确保角位置误差与角速度误差快速收敛。分数阶算子通过调节阶数平衡了响应速度与平稳性,避免了传统滑模控制快响应必伴随强抖振的矛盾,可匹配300次/min以上的高速分拣节奏,满足食品生产线高速分拣不损伤物料的工程需求。

为解决单一阶数设定缺乏说服力,验证适配性的问题,分数阶阶数选择依据:基于食品分拣场景负载特性(0.01~0.50 kg)与传送带速度(100~300 mm/s)约束,设计 $\alpha=0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ 5组阶数对比试验,以轨迹跟踪误差均方根与动态响应时间为评价指标,确定最优阶数为0.7,不同阶数对比试验见表5。

表5 不同分阶数对比试验

Table 5 Comparative experiment of different order numbers

阶数	轨迹跟踪误差均方根/deg	动态响应时间/ms	适配性评价
0.5	0.21	35.2	响应偏慢,高速分拣时动态滞后明显,适配低速场景
0.6	0.18	31.5	精度与响应均衡,但抗负载波动能力不足,曲奇分拣易掉落
0.7	0.14	28.7	精度最优、响应最快,抗抖振与负载适配性强,覆盖全速度梯度
0.8	0.16	29.3	接近0.7阶,但雪饼分拣时定位误差略增,易碎物料适配性下降
0.9	0.19	28.5	抖振加剧,高速时饮料分拣成功率降至95%以下,稳定性不足

由表5可知,当 $\alpha < 0.7$ 时,分数阶算子记忆特性过强,导致动态响应滞后,无法匹配高速分拣节奏。当 $\alpha > 0.7$ 时,算子调节灵活性下降,滑模控制抖振加剧,易造成易碎物料损伤与轻质物料掉落。当 $\alpha = 0.7$ 时,既能通过非整数阶导数的灵活调节空间平滑控制信号切换,削弱抖振,又能平衡轨迹跟踪精度与动态响应速度,同时适配0.01~0.50 kg负载范围与100~300 mm/s传送带速度,是最契合试验场景的分数阶阶数。

为全面验证试验融合方法优越性,选取工业机器人轨迹跟踪控制领域的两类典型先进方法作为对比基准:文献[9]提出的改进滑模控制(该方法通过动态增益调节优化滑模面切换特性,降低传统滑模控制抖振),以及文献[12]提出的基于奇异摄动理论的非线性混合控制(该方法通过分离系统快慢动力学特性,提升非线性系统的动态响应速

度)。试验采用相同的Delta机器人平台与轨迹规划参数,以轨迹跟踪误差均方根和动态响应时间为核心评价指标,对比分析3种方法的跟踪性能,结果见表6。

由表6可知,试验融合方法的轨迹跟踪误差均方根仅为0.14 deg,较文献[9]和文献[12]的分别降低66.7%,60.0%。试验方法的动态响应时间为28.7 ms,较文献[9]

表6 不同轨迹跟踪方法的跟踪性能

Table 6 Tracking performance of different trajectory tracking methods

跟踪方法	轨迹跟踪误差均方根/deg	动态响应时间/ms
文献[9]	0.42	36.8
文献[12]	0.35	31.2
试验融合方法	0.14	28.7

和文献[12]的分别缩短 22.0%, 8.0%。这是因为文献[9]侧重抗抖振、文献[12]侧重响应速度, 而试验融合方法的优势得益于各理论的优势互补, 反演控制解决高阶系统设计复杂度, 分数阶理论优化动态响应, 滑模控制保障鲁棒性, 自适应律补偿未知干扰, 形成了远超单一控制机制的综合性能, 证明了融合设计的科学性与先进性。

为进一步验证试验融合方法的实用性, 设计真实场景分拣对比试验。选取食品行业典型分拣对象(雪饼、曲奇饼干、瓶装饮料)作为试验样本, 每种样本各 1 000 件,

选取文献[9]改进滑模控制、文献[12]基于奇异摄动理论的非线性混合控制作为对比方法, 统一试验平台(Delta 机器人重复定位精度 ± 0.02 mm, 末端执行器为真空吸盘)、分拣流程(物料检测 \rightarrow 轨迹规划 \rightarrow 抓取 \rightarrow 投放)与评价标准, 设置传送带速度为 100 mm/s(低速)、200 mm/s(中速)、300 mm/s(高速)3 个梯度, 重点考核 X、Y、Z 轴平均定位误差、分拣成功率、平均分拣时间 3 项核心指标, 量化评估不同方法在实际应用中的综合性能, 试验结果见表 7。

表 7 不同跟踪方法的分拣效果

Table 7 Sorting effectiveness of different tracking methods

速度/ (mm·s ⁻¹)	样本	试验融合方法			文献[9]			文献[12]		
		平均误差/mm	分拣成功率/%	平均分拣时间/s	平均误差/mm	分拣成功率/%	平均分拣时间/s	平均误差/mm	分拣成功率/%	平均分拣时间/s
100	雪饼	0.1,0.1,0.2	99.2	0.68	0.2,0.2,0.3	96.8	0.82	0.3,0.4,0.4	97.5	0.75
	曲奇	0.1,0.1,0.2	99.0	0.76	0.2,0.2,0.3	95.3	0.80	0.3,0.3,0.4	96.7	0.79
	饮料	0.1,0.1,0.1	99.5	0.70	0.2,0.2,0.3	98.1	0.85	0.2,0.3,0.3	98.6	0.78
200	雪饼	0.1,0.1,0.2	98.5	0.45	0.4,0.3,0.5	92.5	0.58	0.3,0.3,0.4	94.2	0.52
	曲奇	0.2,0.1,0.2	98.8	0.43	0.4,0.4,0.5	90.7	0.56	0.4,0.4,0.4	93.1	0.50
	饮料	0.1,0.1,0.2	99.3	0.47	0.3,0.3,0.4	95.6	0.60	0.3,0.3,0.4	96.8	0.54
300	雪饼	0.2,0.2,0.3	97.6	0.32	0.6,0.5,0.7	85.3	0.42	0.4,0.5,0.6	89.7	0.38
	曲奇	0.2,0.2,0.3	97.0	0.30	0.6,0.6,0.7	82.1	0.40	0.5,0.5,0.6	87.5	0.36
	饮料	0.2,0.2,0.3	98.8	0.34	0.5,0.5,0.6	88.9	0.44	0.4,0.5,0.5	92.3	0.40

由表 7 可知, 不同传送带速度下, 试验方法的 X、Y、Z 轴平均定位误差均远低于两类对比方法。试验方法对雪饼的平均误差仅 0.1~0.3 mm, 较文献[9]和文献[12]的均降低 50% 以上。试验方法的分拣成功率在全工况下均保持 97% 以上, 其中瓶装饮料在高速工况下达 98.8%, 雪饼、曲奇饼干在低速工况下接近 99.5%。而对比方法的成功率随传送带速度的提升显著下降, 300 mm/s 时, 文献[9]的曲奇饼干分拣成功率仅 82.1% (主要因抖振导致物料掉落), 文献[12]的雪饼成功率为 89.7% (因动态滞后导致定位偏差过大)。试验方法的平均分拣时间在各速度梯度下均最短, 低速工况下, 较文献[9]和文献[12]的分别缩短 17%~21% 和 9%~12%; 高速工况下, 曲奇饼干的分拣时间仅 0.30 s, 较文献[9]和文献[12]的分别缩短 25.0%, 16.7%。文献[9]在低速下稳定性尚可, 但高速时抖振加剧, 定位误差与分拣失败率激增。文献[12]在中低速下响应较快, 但面对复杂物料(如轻质曲奇、易碎雪饼)时, 抗干扰能力不足, 成功率低于试验方法。而试验方法通过多理论融合设计, 实现了高精度、高可靠、高效率的三维平衡, 在低速精密分拣、中速稳定作业、高速高效生产 3 种工况下均表现优异, 且对不同特性物料(易碎、轻质、重载)的适配性更强, 综合应用价值远超两类对比方法, 具备广泛的推广应用前景。

4 结论

针对食品自动化生产中 Delta 机器人轨迹跟踪面临的负载波动干扰、动态响应滞后、跟踪精度不足等核心问题, 研究结合食品分拣场景的洁净、高效、精准需求, 提出了一种多方法融合的智能轨迹跟踪控制方法。试验结果表明, 所提方法的轨迹跟踪误差均方根仅为 0.14 deg, 较分数阶滑模控制、改进滑模控制和非线性混合控制降幅均达 50.0%; 对比文献[9]改进滑模控制、文献[12]非线性混合控制的降幅分别 66.7%, 60.0%。同时, 该方法动态响应时间缩短至 28.7 ms, 相较三类对比方法分别缩短 32.1%, 22.0%, 8.0%, 实现了高精度与高响应速度的协同优化。在真实场景分拣试验中, 试验方法对雪饼、曲奇、饮料等不同特性物料的分拣成功率均保持在 97% 以上, 高速工况下最短分拣时间仅 0.30 s, 定位误差控制在 0.1~0.3 mm, 且适配 0~300 mm/s 的传送带速度调节范围, 展现出优异的工况适应性与工程实用性。后续研究可进一步拓展多物料混合分拣场景下的轨迹自适应规划策略, 结合数字孪生技术构建虚拟平台, 实现控制参数的在线迭代优化, 进一步提升系统在极端工况下的鲁棒性与自适应能力。

参考文献

- [1] XU M Y, YUE M, GU Y, et al. Dynamic obstacle avoidance strategy for high-speed vehicles *via* constrained model predictive control and improved artificial potential field[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2025, 147(4): 041002.
- [2] VODOVOZOV V, LEHTLA M, RAUD Z, et al. Managing energy consumption of linear delta robots using neural network models[J]. *Energies*, 2024, 17(16): 4 081.
- [3] GUO T C, LI J B, ZHANG Y Z, et al. Study on trajectory optimization for a flexible parallel robot in tomato packaging[J]. *Agriculture*, 2024, 14(12): 2 274.
- [4] KHAN R, MALIK F M, RAZA A, et al. Comprehensive study of skid-steer wheeled mobile robots: development and challenges[J]. *Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application*, 2021, 48(1): 142-156.
- [5] 王国栋, 刘洋, 李绍松, 等. 基于轮胎状态刚度预测的极限工况路径跟踪控制研究[J]. *自动化学报*, 2022, 48(6): 1 590-1 600.
- WANG G D, LIU Y, LI S S, et al. Research on path tracking control under limit conditions based on tire state stiffness prediction[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(6): 1 590-1 600.
- [6] 古莹奎, 叶彪彪, 郭明健, 等. 基于改进RT-DETR的饼干包装外观缺陷快速检测[J]. *食品与机械*, 2025, 41(2): 234-241.
- GU Y K, YE B B, GUO M J, et al. Rapid detection method of biscuit packaging appearance defects based on improved RT-DETR[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(2): 234-241.
- [7] 郭彤颖, 叶相涛, 陈宇. 基于改进MOGWO算法的并联机器人轨迹优化[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2025(6): 20-25.
- GUO T Y, YE X T, CHEN Y. Trajectory optimization of parallel robot based on improved MOGWO algorithm[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2025(6): 20-25.
- [8] 傅明娣, 李忠, 王倩茹, 等. 基于改进DBO和多目标模型的食品分拣机器人分拣策略[J]. *食品与机械*, 2025, 41(3): 88-93.
- FU M D, LI Z, WANG Q R, et al. Sorting strategy of food sorting robot based on improved DBO and multi-objective model[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(3): 88-93.
- [9] 李文凯, 张寒莉, 储青. 三自由度并联机器人的轨迹跟踪滑模控制[J]. *智能计算机与应用*, 2024, 14(8): 48-53.
- LI W K, ZHANG H L, CHU Q. Trajectory tracking sliding mode control for a 3-DOF parallel robot[J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2024, 14(8): 48-53.
- [10] 杨磊, 李钦生, 张国政. 基于Udwadia-Kalaba方法的Delta机器人动力学建模及轨迹跟踪控制[J]. *兰州文理学院学报(自然科学版)*, 2025, 39(4): 56-63.
- YANG L, LI Q S, ZHANG G Z. Modeling and trajectory tracking control of delta robots based on udwadia-kalaba method[J]. *Journal of Lanzhou University of Arts and Science (Natural Sciences)*, 2025, 39(4): 56-63.
- [11] 李云峰, 王聪, 李玉琴. 多算法融合的并联食品分拣机器人轨迹跟踪控制方法[J]. *食品与机械*, 2024, 40(4): 72-77.
- LI Y F, WANG C, LI Y Q. Multi algorithm fusion based trajectory tracking control method for parallel food sorting robots[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(4): 72-77.
- [12] 商德勇, 黄云山, 黄欣怡, 等. 基于奇异摄动的刚柔耦合Delta机器人非线性混合控制[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(5): 95-106.
- SHANG D Y, HUANG Y S, HUANG X Y, et al. Nonlinear hybrid control of rigid flexible coupling delta robot based on singular perturbation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(5): 95-106.
- [13] SUN Y, NING H N, WANG H Y, et al. Trajectory tracking control design for 4WS vehicle based on particle swarm optimization and phase plane analysis[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(9): 3 664.
- [14] 商德勇, 潘焜, 索双富, 等. 基于旋量理论的Delta并联机器人误差分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2025, 65(7): 1 336-1 346.
- SHANG D Y, PAN Z, SUO S F, et al. Error analysis of Delta robots based on screw theory[J]. *J Tsinghua Univ (Sci& Technol)*, 2025, 65(7): 1 336-1 346.
- [15] HU X, WU H, SUN Q L, et al. Robot time optimal trajectory planning based on improved simplified particle swarm optimization algorithm[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 44 496-44 508.
- [16] 左国玉, 李宓, 郑榜贵. 基于改进自适应多目标粒子群算法的机械臂最优轨迹规划方法[J]. *实验技术与管理*, 2024, 41(3): 184-191.
- ZUO G Y, LI M, ZHENG B G. Optimal trajectory planning for robotic arms based on an improved adaptive multiobjective particle swarm algorithm[J]. *Experimental Technology and Management*, 2024, 41(3): 184-191.
- [17] 马梓竣, 张欣刚, 张树翠, 等. 轮式移动机器人的反演二次滑模优化轨迹跟踪控制策略研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(4): 597-606.
- MA Z J, ZHANG X G, ZHANG S C, et al. Research on trajectory tracking control strategy of backstepping optimized double sliding mode for wheeled mobile robot[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2024, 60(4): 597-606.
- [18] WANG S L, ZHANG B K, ZHOU J, et al. Time - jerk optimal trajectory planning for industrial robots with coupled interpolation function selection[J]. *Journal of Field Robotics*, 2024, 41(4): 917-941.
- [19] SHEN C, QI Y C, YUN L J, et al. DBY-Tobacco: a dual-branch model for non-tobacco related materials detection based on hyperspectral feature fusion[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1538051.
- [20] DONG P, FENG W H, WANG R, et al. Automatic classification and detection of faulty packaging using deep learning algorithms: a study for industrial applications[J]. *Intelligent Methods in Engineering Sciences*, 2024, 3(1): 13-21.