

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2026.60050

多算法融合的并联食品分拣机器人 末端控制方法研究

何 青¹ 吴田峰² 赵旖旎³

(1. 西南交通大学希望学院, 四川 成都 610400; 2. 昌吉学院, 新疆 昌吉 831100;

3. 四川大学锦江学院, 四川 眉山 620860)

摘要: [目的] 解决现有并联食品分拣机器人末端控制中存在的轨迹跟踪精度低、动态响应滞后、外部扰动适应性差, 难以满足食品分拣高速、高精度作业需求等问题。[方法] 基于 DELTA 并联机器人的食品分拣系统, 设计融合改进鲸鱼优化算法、自适应模糊控制和非奇异快速终端滑模控制的末端控制策略。通过自适应模糊控制实时调整输出增益, 提高控制器跟踪精度。通过改进鲸鱼优化算法优化算法搜索策略, 对整个控制器的滑模面关键参数进行全局寻优, 解决传统参数手动调节导致的响应速度慢、动态特性差的问题。结合非奇异快速终端滑模控制的有限时间收敛特性, 进一步增强系统抗扰动能力。通过搭建试验平台进行对比试验, 验证所提控制方法的优越性。[结果] 与现有控制方法相比, 所提多算法融合控制方法的轨迹跟踪误差降低 40% 以上, 运行时间缩短 30% 以上。在实际分拣中, 100, 200 mm/s 传送速度下, 分拣成功率分别达到 99.70%, 98.70%, 较现有方法提升 4.30%~12.50%, 抗扰动鲁棒性显著优于对比方法。[结论] 所提多算法融合控制方法能够有效解决并联食品分拣机器人末端控制精度低、响应慢、抗扰动能力弱的问题, 显著提升机器人的动态响应特性和分拣作业性能, 可满足食品分拣行业高速、高精度、高稳定性的作业需求。

关键词: DELTA 并联机器人; 末端控制; 鲸鱼优化算法; 自适应模糊控制; 非奇异快速终端滑模控制

Terminal control method of parallel food sorting robot with multi-algorithm fusion

HE Qing¹ WU Tianfeng² ZHAO Yini³

(1. Hope College, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610400, China; 2. Changji University, Changji, Xinjiang 831100, China; 3. Jinjiang College, Sichuan University, Meishan, Sichuan 620860, China)

Abstract: [Objective] To address the problems of low trajectory tracking accuracy, delayed dynamic response, poor adaptability to external disturbances, and difficulty in meeting the requirements of high-speed and high-precision food sorting in existing end control of parallel food sorting robots. [Methods] A food sorting system based on a DELTA parallel robot was developed, and an end-effector control strategy integrating an improved whale optimization algorithm, adaptive fuzzy control, and nonsingular fast terminal sliding mode control was designed. Adaptive fuzzy control was used to adjust the output gain in real time to enhance controller tracking accuracy. The improved whale optimization algorithm was employed to optimize the search strategy and globally optimize key sliding mode surface parameters of the controller, addressing the problems of slow response and poor dynamic performance caused by traditional manual parameter tuning. By combining the finite-time convergence characteristics of nonsingular fast terminal sliding mode control, the system's disturbance rejection capability was further enhanced. Comparative experiments were conducted on an experimental platform to verify the superiority of the proposed control method. [Results] Compared with existing control methods, the proposed multi-algorithm fusion control method reduced

基金项目: 国家统计局统计信息技术与数据挖掘重点开放实验室开放课题(编号:SDL202520)

通信作者: 何青(1984—), 女, 西南交通大学希望学院副教授, 硕士。E-mail: heqsmart@sohu.com

收稿日期: 2026-02-20 **改回日期:** 2026-05-18

引用格式: 何青, 吴田峰, 赵旖旎. 多算法融合的并联食品分拣机器人末端控制方法研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(6): 75-82.

Citation: HE Qing, WU Tianfeng, ZHAO Yini. Terminal control method of parallel food sorting robot with multi-algorithm fusion[J]. Food & Machinery, 2026, 42(6): 75-82.

trajectory tracking error by more than 40% and shortened running time by more than 30%. In practical sorting tests, at conveying speeds of 100 and 200 mm/s, the sorting success rates reached 99.70% and 98.70%, respectively, representing an improvement of 4.30%~12.50% over existing methods. The anti-disturbance robustness was significantly better than that of the comparison methods. [Conclusion] The proposed multi-algorithm fusion control method can effectively solve the problems of low end-effector control accuracy, slow response, and weak disturbance rejection in parallel food sorting robots, significantly improving dynamic response performance and sorting efficiency, and meeting the requirements of high-speed, high-precision, and high-stability operations in the food sorting industry.

Keywords: DELTA parallel robot; end-effector control; whale optimization algorithm; adaptive fuzzy control; nonsingular fast terminal sliding mode control

随着食品加工行业的自动化、智能化升级,食品分拣作为生产流程中的关键环节,其作业效率、分拣精度直接决定了食品生产的整体质量与经济效益^[1-2]。DELTA 并联机器人凭借结构紧凑和运动灵活等,被广泛应用于食品分拣场景,可实现对不同形状和质量食品的快速抓取与分拣作业。末端执行器作为 DELTA 并联分拣机器人与食品直接作用的核心部件,其控制性能直接影响分拣精度、响应速度及作业稳定性,因此,研发高效、稳定的末端控制方法,成为提升并联食品分拣机器人作业性能的关键^[3-4]。

目前,国内外研究人员对并联食品分拣机器人末端控制方法进行了较为深入的研究,主要集中在滑模控制、PID 控制、模糊控制等^[5-6]。但在实际食品分拣作业中,受食品质量波动、分拣冲击、机械摩擦等外部扰动影响,现有控制方法存在明显局限性:轨迹跟踪精度难以满足高速分拣需求,动态响应滞后易导致分拣错位,抗扰动能力弱会造成跟踪精度不稳定等,严重制约了并联食品分拣机器人在高速、高精度分拣场景中的应用^[7-8]。黄子豪等^[9]针对现有末端控制存在的精度低和外部扰动适应性差,提出结合扩张状态观测器和自适应滑模控制方法的末端控制。通过观测器实时补偿系统总扰动并结合自适应滑模控制律提升轨迹跟踪性能。结果表明,该方法能够有效削弱扰动影响,提高视觉伺服系统的定位精度与鲁棒性。米钺朴等^[10]面向 3-RPS 并联机器人高精度轨迹控制需求,将扩张状态观测器与固定时间滑模控制相结合,设计了具有固定时间收敛特性的鲁棒控制器。结果表明,该方法可加快系统响应速度,增强对模型参数摄动与外界干扰的抑制能力,实现更优的轨迹跟踪效果。刘永兴等^[11]针对并联机器人在加工工况下易产生振动、影响运动平稳性的问题,研究了面向作业过程的振动抑制策略,通过优化控制结构与阻尼补偿方式减小末端振动。结果表明,该方法能够有效降低振动幅值,提升系统运行稳定性与定位精度。李文凯等^[12]针对三自由度并联机器人传统滑模控制存在抖振与跟踪精度有限的问题,设计了面向轨迹跟踪的滑模控制器,通过改进趋近律与滑模面优化控制性能。结果表明,该方法能够减小跟踪误差,提升系统动态响应速度与控制精度。但现有文献末端控制方法普遍存在轨迹跟踪精度低、动态响应滞后、抗扰动能力弱等问题。非奇异终端滑模控制作为一种新型滑模

控制方法,凭借有限时间收敛特性,可有效提升系统响应速度,避免传统滑模控制的奇异问题,在机器人控制领域得到广泛应用。鲸鱼优化算法作为一种新型智能优化算法,具有搜索速度快、全局寻优能力强的优势,可有效解决控制器参数手动调节效率低、优化效果差的问题。将多种算法融合,结合各算法的优势互补,成为提升并联机器人末端控制性能的重要研究方向。

基于此,试验拟以 DELTA 并联机器人为研究对象,结合食品分拣高速、高精度的作业需求,提出一种末端控制方法,融合改进鲸鱼优化算法(improved whale optimization algorithm, IWOA)、自适应模糊控制(adaptive fuzzy control, AFC)和非奇异终端滑模控制(non-singular fast terminal sliding mode control, NFTSMC)。通过搭建试验平台开展对比试验,验证所提控制方法的优越性,为并联食品分拣机器人末端控制提供理论支撑与工程参考。

1 基于 DELTA 的食品分拣系统概述

基于 DELTA 并联机器人的食品分拣系统,是将机器视觉检测与高速运动控制深度融合的自动化解决方案,其结构如图 1 所示,主要由计算机、图像采集卡、DELTA 并联机器人、控制柜、CCD 相机、光电编码器和传送带等模块协同构成^[13-14]。DELTA 并联机器人凭借其闭环结构和轻质臂杆,具备远超串联机器人的运动速度与定位精度,可在毫秒级内完成对高速传送带上食品的抓取与

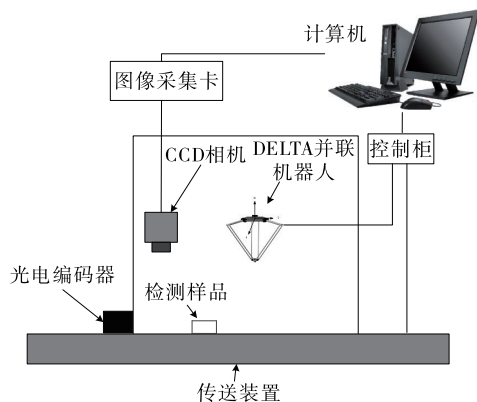


图 1 基于 DELTA 的食品分拣系统

Figure 1 Food sorting system based on DELTA

分拣,完美匹配食品行业高效生产节拍。CCD相机与图像采集卡组成的视觉单元,可对食品外观、大小、缺陷等特征进行非接触式识别,避免物理接触造成的食品损伤,同时满足多品类、多规格的柔性分拣要求。光电编码器实时采集传送带速度与位置信号,为系统提供动态坐标基准,使DELTA机器人能够精准追踪运动中的目标,大幅提升分拣效率与准确率。计算机作为核心决策单元,负责视觉算法处理、运动轨迹规划与任务调度,控制柜则执行底层运动控制指令,两者协同实现从感知—决策—执行的全流程自动化闭环,保障系统稳定可靠运行。

2 基于DELTA的食品分拣机器人末端控制方法

DELTA并联机器人在高速食品分拣作业中,易受模型不确定性、食品质量波动、机械摩擦及外部冲击扰动影响,难以满足高速、高精度分拣要求。NFTSMC具有有限时间收敛、无奇异点、鲁棒性强的优势,AFC可实时补偿不确定性扰动,IWOA能够对控制器关键参数进行全局最优寻优,避免人工调参的盲目性与局限性^[15-16]。为此,试验提出IWOA优化的AFC-NFTSMC融合控制方法,实现高精度、快响应、强抗扰的末端控制。

2.1 非奇异快速终端滑模控制方法

为实现DELTA并联机器人末端的高精度轨迹跟踪,首先建立机器人单关节动力学模型,以此为基础设计非奇异快速终端滑模控制器,解决传统滑模控制存在的奇异点问题与收敛速度不足的缺陷,为后续多算法融合控制奠定基础。DELTA并联机器人的运动特性主要由其关节动力学特性决定,考虑到食品分拣作业中机器人各关节运动具有较强的独立性,且单关节动力学模型可有效反映系统核心动态特性,因此首先建立DELTA并联机器人单关节动力学模型,如式(1)所示^[17]。

$$M(q)q'' + C(q, q')q' + G(q) = \tau + d, \quad (1)$$

式中:

q, q', q'' ——机器人关节角的位置(rad)、速度(rad/s)与加速度(rad/s²);

$M(q)$ ——机器人关节惯性矩阵,kg·m²;

$C(q, q')$ ——科氏/离心力项,kg·m²/s;

$G(q)$ ——重力项,N·m;

τ ——控制器输出的关节控制力矩,N·m;

d ——系统集中扰动项,N·m。

轨迹跟踪精度是衡量DELTA并联机器人食品分拣性能的核心指标,为精准描述机器人末端实际运动轨迹与期望轨迹的偏差,定义轨迹跟踪误差及误差导数如式(2)所示。

$$\begin{cases} e(t) = q_d(t) - q(t) \\ e^*(t) = q_d^*(t) - q^*(t) \end{cases}, \quad (2)$$

式中:

$q_d(t), q_d^*(t)$ ——机器人关节角的期望位置(rad)与期望速度(rad/s);

$q(t), q^*(t)$ ——机器人关节角的实际位置(rad)与实际速度(rad/s);

$e(t)$ ——位置跟踪误差,rad;

$e^*(t)$ ——速度跟踪误差,rad/s。

滑模面的设计直接决定滑模控制器的控制性能,传统终端滑模控制虽能实现误差的有限时间收敛,但在某些工况下会出现奇异点,导致控制器失效,无法满足食品分拣的连续作业需求。为此,试验提出NFTSMC,既保留终端滑模有限时间收敛的优势,又彻底避免奇异点问题,如式(3)所示^[18]。

$$s = e^* + \lambda_1 e + \lambda_2 e^{\alpha_1} + \lambda_3 e^{*\alpha_2}, \quad (3)$$

式中:

s ——非奇异快速终端滑模面变量;

e, e^* ——位置跟踪误差(rad)与速度跟踪误差(rad/s);

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ——滑模面增益参数(收敛速度、权重、动态特性);

α_1 ——位置误差项的幂次参数;

α_2 ——速度误差项的幂次参数。

结合DELTA并联机器人单关节动力学模型,通过移项、整理可推导得到非奇异快速终端滑模控制律。首先由动力学模型变形得到 $q'' = M^{-1}(\tau + d - Cq' - G)$,代入加速度误差 $e'' = q_d'' - q''$,再结合滑模面导数与快速趋近律 $s' = -\eta s - k \operatorname{sgn}(s)$,最终联立可得控制律如式(4)所示。

$$\tau = M(q)(q_d'' + \lambda_1 e' + \lambda_2 \alpha_1 e^{\alpha_1-1} e' + \eta s + k \operatorname{sgn}(s)) + C(q, q')q' + G(q), \quad (4)$$

式中:

η, k ——趋近律参数;

q_d'' ——机器人关节角的期望加速度,rad/s²。

NFTSMC结构如图2所示。

但该控制方法的滑模面增益与趋近律参数均为固定值,无法根据系统扰动的变化实时调整。在食品分拣实际作业中,存在食品质量波动、分拣冲击、机械摩擦变化等复杂外部扰动,固定增益的控制器难以实时补偿扰动带来的影响,导致系统鲁棒性不足,轨迹跟踪精度难以进一步提升,无法完全满足食品分拣高速、高精度的作业需求。因此,需引入自适应机制与智能优化算法,对该控制方法进行改进,提升其抗扰动能力与控制精度。

2.2 自适应模糊非奇异快速终端滑模控制方法

针对NFTSMC固定参数难以适应食品分拣复杂扰动、鲁棒性不足的问题,设计了AFC-NFTSMC控制器^[19]。AFC的核心是通过模糊逻辑系统在线逼近系统总扰动,无需精确建立扰动模型,即可根据系统运行状态实时调

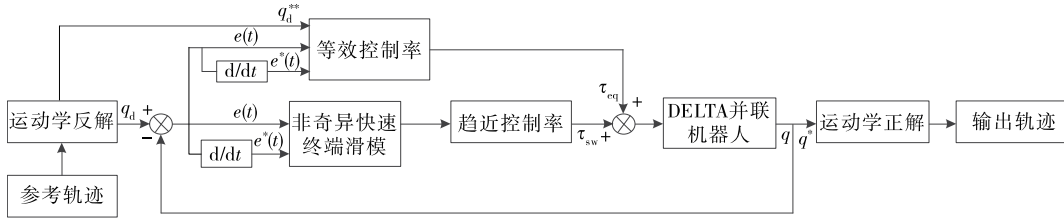


图 2 NFTSMC 结构

Figure 2 NFTSMC structure

整补偿量,有效解决固定参数控制器难以应对复杂扰动的缺陷。结合 DELTA 并联机器人单关节动力学模型,系统总扰动可表示为 $\Delta = d + \Delta M q^{**} + \Delta C q^* + \Delta G$, 其中 ΔM 、 ΔC 、 ΔG 分别为惯性矩阵、科氏/离心力项、重力项的参数摄动,此类扰动具有随机性、不确定性,难以通过传统方法精准补偿。

引入自适应模糊扰动逼近项 $\hat{\Delta}$, 得到 AFC-NFTSMC 控制律如式(5)所示。

$$\tau = M(q)(q_d^{**} + \lambda_1 e^* + \lambda_2 \alpha_1 e^{\alpha_1 - 1} e^* + \eta s + k \operatorname{sgn}(s)) + C(q, q^*)q^* + G(q) - \hat{\Delta}, \quad (5)$$

式中:

$\hat{\Delta}$ ——自适应模糊扰动逼近项。

该控制器的工作原理为:通过 NFTSMC 的有限时间收敛特性,快速轨迹跟踪和抑制抖振。同时, AFC 实时采集轨迹跟踪误差 e 与误差导数 e^* , 在线逼近系统总扰动 Δ , 自适应律根据滑模面变量 s 实时调整模糊系统权重向量 θ , 使扰动逼近值 $\hat{\Delta}$ 不断趋近于实际扰动 Δ , 通过控制律中的扰动补偿项,抵消扰动对系统的影响,从而提升系统的抗扰动能力与轨迹跟踪精度。AFC-NFTSMC 结构如图 3 所示。

AFC-NFTSMC 控制器中,滑模面参数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 α_1 、 α_2 , 自适应参数 γ 仍需人工整定,人工调参不仅效率低,且难以兼顾系统的动态响应、稳态精度与抗扰动能力,易出现参数搭配不合理导致的控制性能下降问题。因此,需引入智能优化算法,对控制器关键参数进行全局寻优,进一步提升控制性能。

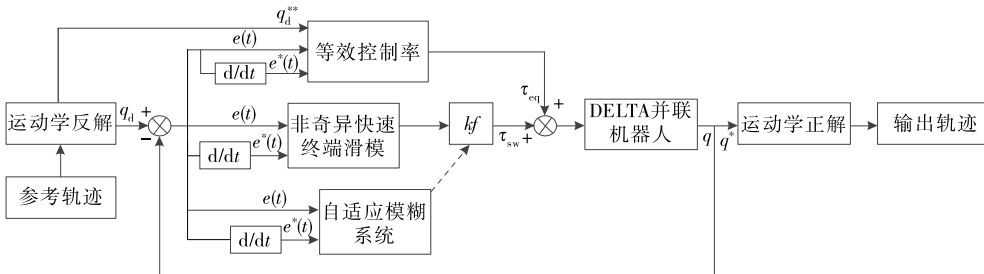


图 3 AFC-NFTSMC 结构

Figure 3 AFC-NFTSMC structure

2.3 改进鲸鱼算法优化的自适应模糊非奇异快速终端滑模控制方法

为解决 AFC-NFTSMC 关键参数人工整定效率低、优化效果差的问题,引入 IWOA 对控制器核心参数进行全局最优寻优,构建 IWOA 优化的 AFC-NFTSMC 融合控制方法(IWOA-AFC-NFTSMC)。该融合方法结合了 IWOA 的全局寻优能力、AFC 的扰动补偿能力与 NFTSMC 的有限时间收敛能力,实现 DELTA 并联机器人末端的高精度、快响应、强抗扰控制,完全满足食品分拣高速、高精度、高稳定性的作业需求。

鲸鱼优化算法(WOA)是一种基于座头鲸狩猎行为的智能优化算法,具有搜索速度快、参数设置少、全局寻优能力强的优势,但传统 WOA 存在后期收敛速度慢、易陷

入局部最优的缺陷,难以满足控制器参数高精度寻优的需求^[20-21]。为此,对传统 WOA 进行改进,主要优化方向如下:

(1) 改进收敛因子:将传统 WOA 的线性收敛因子改为非线性收敛因子,表达式如式(6)所示,使算法前期具有较强的全局搜索能力,后期具有较强的局部开发能力,兼顾寻优速度与寻优精度

$$a = 2 - \frac{2d \sin(\pi d / 2D)}{D}, \quad (6)$$

式中:

d ——当前迭代次数;

D ——最大迭代次数;

a ——收敛因子,取值范围为 $[0, 2]$, 随迭代次数非线性递减。

(2) 引入自适应权重:在鲸鱼算法的位置更新公式中引入自适应权重 ω ,根据当前迭代次数动态调整权重值,表达式如式(7)所示,避免算法后期陷入局部最优,提升寻优精度。

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min})d/D, \quad (7)$$

式中:

ω ——自适应权重;

$\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ ——权重的最大值与最小值。

考虑到食品分拣作业中,轨迹跟踪误差的累积效应直接影响分拣精度与稳定性,选取时间均方误差(ITAE)作为最小目标函数,如式(8)所示。

$$I_{\text{TAE}} = \int_0^T t |e(t)| dt, \quad (8)$$

式中:

I_{TAE} ——时间加权绝对误差积分(ITAE)指标;

T ——寻优时间,s;

t ——当前时刻,s。

IWOA-AFC-NFTSMC融合控制方法的实现流程:

步骤1:初始化改进鲸鱼算法参数,包括种群规模、最大迭代次数、自适应权重范围、待优化参数范围等。

步骤2:随机生成初始参数种群,将每个种群个体作为自适应模糊非奇异快速终端滑模控制器的一组参数,代入DELTA并联机器人动力学模型,进行轨迹跟踪,计算每个个体的适应度值。

步骤3:记录当前种群中的最优个体(适应度值最小),更新改进鲸鱼算法的收敛因子与自适应权重,按照改进后的位置更新策略,迭代更新种群中每个个体的参数。

步骤4:重复步骤2和3,直至达到最大迭代次数,输出最优参数组合。

步骤5:将最优参数代入自适应模糊非奇异快速终端滑模控制律,得到改进鲸鱼算法优化后的融合控制律。

步骤6:将融合控制律应用于DELTA并联机器人末端控制,实时采集轨迹跟踪误差与误差导数,通过自适应律在线调整模糊系统权重,通过滑模控制实现轨迹快速跟踪,完成食品分拣作业。

IWOA-AFC-NFTSMC流程图如图4所示。

3 基于DELTA的食品分拣机器人末端控制试验

3.1 参数设置

为验证所提IWOA-AFC-NFTSMC融合控制方法在DELTA并联机器人食品分拣作业中的控制性能,以100 mL规格小盒酸奶为分拣目标,搭建了DELTA食品分拣机器人末端控制试验平台。试验目标:小盒酸奶,规格100 mL/盒,质量 (120 ± 5) g,尺寸60 mm×40 mm×80 mm;机器人:阿童木D3W-800-P1型,天津阿童木机器

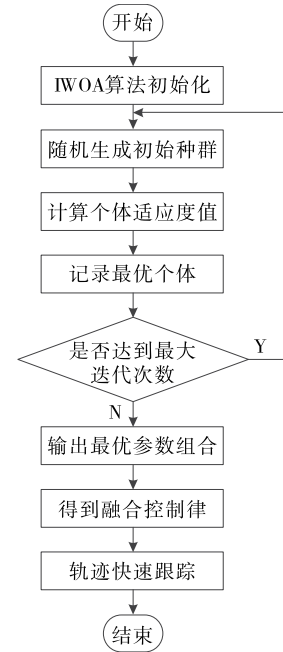


图4 IWOA-AFC-NFTSMC流程

Figure 4 IWOA-AFC-NFTSMC process

人股份有限公司;相机:VQ-1300G-M120型,韩国Vieworks株式会社;编码器:EC50W10-H6PR-1000型,宜科(天津)电子有限公司;减速器:CSF-17-50-2UH型,哈默纳科(上海)商贸有限公司;伺服电机:MS1H1-10B30CB型,深圳市汇川技术股份有限公司;驱动器:SD100-1000型,苏州伟创电气科技股份有限公司。IWOA-AFC-NFTSMC算法的核心参数取值与优化范围如表1所示。IWOA-AFC-NFTSMC算法参数分为IWOA寻优基础参数、待优化核心参数(滑模面+自适应参数)两类,参数选择需遵循先定范围、再寻最优、最后验证的三层逻辑,兼顾算法寻优效率、控制器性能与食品分拣工程实际。为全面量化IWOA-AFC-NFTSMC方法的控制性能,试验选取轨迹跟踪误差和响应时间。轨迹跟踪误差:包括末端位置跟踪误差(rad)与速度跟踪误差(rad/s),其中位置跟踪误差取机器人末端执行器实际位置与期望分拣位置距离均值,速度跟踪误差取关节速度实际值与期望值的绝对误差均值,该指标直接反映分拣位置精度。运行时间:迭代寻优直至收敛到控制器最优参数组合的总耗时。

3.2 试验分析

为了验证所提IWOA参数寻优方法的优越性,将其与粒子群优化算法(PSO)、传统鲸鱼优化算法(WOA)进行对比分析,所有对比试验均采用文中相同的试验环境与参数设置,确保对比的公平性与有效性。对比试验的核心目的是验证IWOA在控制器核心参数寻优过程中,相较于PSO、传统WOA,在寻优精度、收敛速度及全局寻优能力上的优势,进一步佐证所提IWOA-AFC-NFTSMC

表 1 算法的核心参数取值与优化范围

Table 1 Core parameter values and optimization ranges of the algorithm

参数	数值	参数	数值
种群大小	30	滑模面增益 1	[0.5, 5.0]
最大迭代次数	100	滑模面增益 2	[0.1, 3.0]
惯性权重	[0.4, 0.9]	滑模面增益 3	[0.1, 3.0]
权重衰减系数	0.1	位置误差幂次	(1.0, 2.0)
趋近律参数 η	0.5	速度误差幂次	(0.0, 1.0)
趋近律参数 k	0.8	自适应鲁棒增益系数	[1.0, 10.0]

融合控制方法的合理性与优越性,3 种算法的寻优目标函数均统一 ITAE(rad·s)。不同方法迭代曲线如图 5 所示。

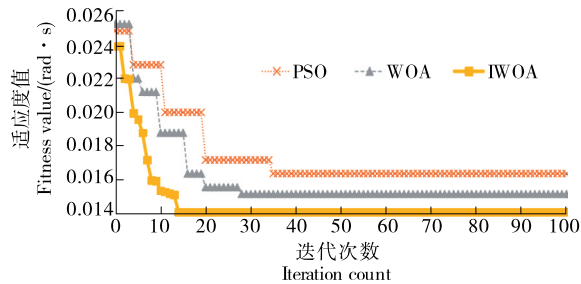


图 5 不同方法的迭代曲线

Figure 5 Iterative curves of different methods

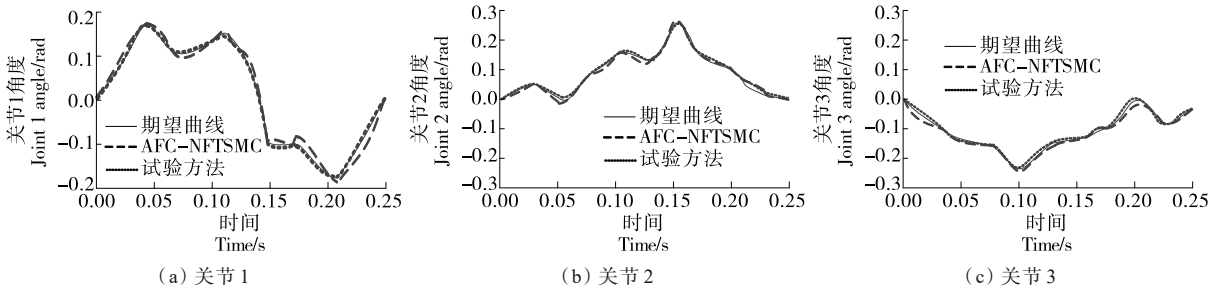


图 6 不同方法 3 个关节轨迹跟踪曲线

Figure 6 Three joint trajectory tracking curves using different methods

表 2 不同方法的轨迹跟踪效果

Table 2 Trajectory tracking effects of different methods

方法	位置跟踪误差/rad	速度跟踪误差/(rad·s ⁻¹)	运行时间/ms
AFC-NFTSMC	0.006 2	0.021 5	75
试验方法	0.002 8	0.009 7	45

由图 6 和表 2 可以看出,两种方法均能实现对期望轨迹的跟踪,但试验方法的实际轨迹与期望轨迹贴合度更高,跟踪偏差更小,且关节运动过渡更平滑。所提 IWOA-AFC-NFTSMC 融合控制方法在轨迹跟踪性能上全面优于

由图 5 可以看出,PSO 算法收敛速度较慢,迭代后期 ITAE 值下降趋于平缓,迭代 35 次趋近于 0.016 5,易陷入局部最优。传统 WOA 算法收敛速度优于 PSO,迭代 29 次趋近于 0.015 2,寻优精度与稳定性不足。而所提 IWOA 算法凭借改进的非线性收敛因子与自适应权重策略,迭代初期曲线快速下降,收敛速度最快,迭代 14 次趋近于 0.014 0,迭代末期适应度值最小且无明显波动,表明其能快速找到全局最优参数组合,寻优精度与稳定性均优于 PSO 与传统 WOA 算法。

为验证所提 IWOA-AFC-NFTSMC 融合控制方法在 DELTA 并联机器人食品分拣轨迹跟踪中的实际控制性能,开展对比试验,将其与 AFC-NFTSMC 控制方法进行对比分析。试验参数与轨迹规划方案设置:试验总时间设定为 0.25 s,试验步长为 0.001 s,该参数设置可精准捕捉机器人关节运动的动态响应过程,确保轨迹跟踪误差数据的准确性与完整性。轨迹规划采用五次均匀 B 样条曲线(关节空间),用于为 DELTA 机器人 3 个关节规划平滑、连续的期望运动轨迹。分拣作业的起始点与目标点坐标设定:起始点坐标为 (0.3, 0, 0.1) m,目标点坐标为 (0.6, 0.2, 0.1) m,两点均处于 DELTA 机器人 300~800 mm 的工作半径范围内,贴合食品分拣生产线的实际作业路径,模拟酸奶从传送带分拣至指定料箱的完整运动过程。不同方法 3 个关节轨迹跟踪曲线如图 6 所示。不同方法的轨迹跟踪效果如表 2 所示。

AF-NFTSMC 方法。相较于 AFC-NFTSMC 方法,试验方法的末端位置跟踪误差由 0.006 2 rad 降至 0.002 8 rad,降低了 54.84%。关节速度跟踪误差由 0.021 5 rad/s 降至 0.009 7 rad/s,降低了 54.88%。运行时间由 45 ms 缩短至 75 ms,缩短了 40.00%。

为进一步验证所提 IWOA-AFC-NFTSMC 融合控制方法在 DELTA 并联机器人食品分拣作业中的实际控制性能,在相同试验环境与轨迹规划方案下,将其与文献[9](结合扩张状态观测器和自适应滑模控制方法)、文献[10](结合扩张状态观测器与固定时间滑模控制方法)所提方法进行对比分析。试验总时间为 0.25 s,步长为

0.001 s,采用五次均匀B样条曲线规划固定点分拣期望轨迹,不同方法轨迹跟踪的实际效果如表3所示。

由表3可以看出,所提IWOA-AFC-NFTSMC融合控制方法在位置跟踪精度、速度跟踪平稳性与动态响应速度上均显著优于文献[9]和文献[10]所提方法,相较于文献[9]所提方法,试验方法的位置跟踪误差、速度跟踪误差分别降低62.7%,58.0%,运行时间缩短47.06%。相较于文献[10]所提方法,试验方法的位置跟踪误差、速度跟踪误差分别降低45.1%,42.3%,响应时间缩短33.82%。

为进一步验证所提IWOA-AFC-NFTSMC融合控制方法在DELTA并联机器人实际食品分拣中的优越性,在不同输送速度工况下开展对比试验,将其与文献[9](结合扩张状态观测器和自适应滑模控制方法)、文献[10](结合扩张状态观测器与固定时间滑模控制方法)所提

表3 不同方法轨迹跟踪的实际效果

Table 3 Actual effects of different trajectory tracking methods

方法	位置跟踪误差/rad	速度跟踪误差/(rad·s ⁻¹)	运行时间/ms
文献[9]	0.007 5	0.023 1	85
文献[10]	0.005 1	0.016 8	68
试验方法	0.002 8	0.009 7	45

方法进行对比分析。试验模拟高速分拣生产线场景,分别设定输送速度100,200 mm/s,单次试验输送食品(小盒酸奶)总数为1 000个,记录各方法在不同速度下的分拣食品数与分拣成功率,不同方法的分拣效果如表4所示。

表4 不同方法的分拣效果

Table 4 Sorting effectiveness of different methods

方法	传送速度 100 mm/s			传送速度 200 mm/s		
	传送数	分拣数	分拣成功率/%	传送数	分拣数	分拣成功率/%
文献[9]	1 000	924	92.40	1 000	862	86.20
文献[10]	1 000	954	95.40	1 000	915	91.50
试验方法	1 000	997	99.70	1 000	987	98.70

由表4可以看出,在两种输送速度下,所提IWOA-AFC-NFTSMC融合控制方法的分拣成功率均显著高于文献[9]和文献[10]所提方法。在100 mm/s传送速度下,试验方法分拣成功率达到99.70%,分别较文献[9]和文献[10]提高了7.30和4.30个百分点。在200 mm/s高速传送工况下,试验方法分拣成功率仍保持98.70%,分别较文献[9]和文献[10]提高了12.50和7.20个百分点。随着传送速度提升,文献[9]和文献[10]所提方法的分拣成功率均出现明显下降,而试验方法仅下降1.00个百分点,表现出更强的速度适应性与抗扰动鲁棒性。试验结果表明,所提IWOA-AFC-NFTSMC融合控制方法能够显著提升DELTA并联机器人在高速、动态食品分拣中的稳定性与可靠性,满足实际生产线高效、高精度分拣需求。

4 结论

针对DELTA并联机器人食品分拣作业中,传统末端控制方法存在轨迹跟踪精度低、动态响应滞后、抗外部扰动能力弱,难以适配高速、高精度分拣需求的问题,试验以100 mL小盒酸奶为分拣目标,开展多算法融合的末端控制方法研究,结合理论分析与试验验证,得出以下结论:

(1) 试验所提IWOA-AFC-NFTSMC融合控制方法,有效整合了IWOA的全局寻优能力、AFC的扰动补偿能力与NFTSMC的有限时间收敛能力,成功解决了DELTA

并联机器人末端控制精度低、响应慢、抗扰动能力弱的核心问题,显著提升了机器人的分拣精度、响应速度与运行稳定性。

(2) 与文献[9]和文献[10]所提方法相比,融合控制方法在轨迹跟踪性能与实际分拣效果上均表现出显著优势,具备更强的速度适应性与抗扰动鲁棒性,能够适配实际生产线的高速、动态分拣工况,为食品分拣的高效、可靠运行提供了切实可行的技术方案。

未来研究可进一步优化改进鲸鱼算法的寻优效率,缩短算法运行时间。同时,结合机器视觉的实时识别精度,实现多品类、多规格食品的柔性分拣控制,进一步拓展该控制方法的应用范围。

参考文献

- [1] 孙德源,王军义,徐志刚,等.基于分数阶导纳与逆动力学鲁棒控制的并联机器人人机协作[J]. 机器人, 2024, 46(6): 725-731.
- [2] SUN D Y, WANG J Y, XU Z G, et al. Human-robot collaboration of parallel robots based on fractional admittance and inverse dynamic robust control[J]. Robot, 2024, 46(6): 725-731.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [4] 封燕芳, 吴必瑞, 赵倩. 基于改进门字形轨迹的番茄生产线 DELTA 分选机器人轨迹规划[J]. 食品与机械, 2023, 39(8): 71-75, 154.
- FENG Y F, WU B R, ZHAO Q. A trajectory planning method for DELTA sorting robot in tomato production line based on improved gate shaped trajectory[J]. Food & Machinery, 2023, 39(8): 71-75, 154.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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] XIONG J, GUO P H, LI J Y. Multi-objective multi-variable large-size fan aerodynamic optimization by using multi-model ensemble optimization algorithm[J]. Journal of Thermal Science, 2024, 33(3): 914-930.
- [9] 黄子豪, 高国琴. 基于 ESO 的分拣并联机器人无标定视觉伺服自适应滑模控制[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(10): 76-80, 90.
- HUANG Z H, GAO G Q. ESO based uncalibrated visual servo adaptive sliding mode control for sorting parallel robot[J]. Automation & Instrumentation, 2024, 39(10): 76-80, 90.
- [10] 米钊朴, 李壮举, 赵伟, 等. 基于扩张状态观测器的 3-RPS 并联机器人固定时间滑模控制[J]. 机电工程, 2025, 42(11): 2 189-2 200.
- MI Y P, LI Z J, ZHAO W, et al. Fixed-time sliding mode control for 3-RPS parallel robot based on extended state observer[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2025, 42(11): 2 189-2 200.
- [11] 刘永兴, 桂方志, 王强. 面向加工的并联机器人振动控制策略研究[J]. 机床与液压, 2025, 53(11): 90-98.
- LIU Y X, GUI F Z, WANG Q. Research on vibration control strategy of parallel robot for processing[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53(11): 90-98.
- [12] 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.
- [13] 杨磊, 李钦生, 张国政. 基于 Udawadia-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 udawadia-kalaba method[J]. Journal of Lanzhou University of Arts and Science (Natural Sciences), 2025, 39(4): 56-63.
- [14] 张海峰, 何其臻, 陈巧红, 等. 3-P(RR-RRR)SR 运动冗余并联机器人动力学系统分解建模与控制[J]. 机械工程学报, 2025, 61(17): 66-79.
- ZANG H F, HE Q Z, CHEN Q H, et al. 3-P(RR-RRR)SR kinematic redundant parallel robot dynamics decomposition modeling and control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(17): 66-79.
- [15] 万薇, 卜莹雪, 王祥, 等. 基于改进 ResNet 模型的食品新鲜度识别方法[J]. 食品与机械, 2023, 39(9): 123-127.
- WAN W, BU Y X, WANG X, et al. Food freshness recognition method based on improved ResNet model[J]. Food & Machinery, 2023, 39(9): 123-127.
- [16] YIN J N, JIANG P, YAO R. Pose optimization of the FAST feed support system based on the new feed cabin mechanism [J]. Science China-Physics, Mechanics & Astronomy, 2023, 66(3): 182-191.
- [17] 程欢, 邓立营. 煤矿巷道七自由度喷浆机器人轨迹规划与跟踪控制[J]. 工矿自动化, 2024, 50(1): 115-121.
- CHENG H, DENG L Y. Trajectory planning and tracking control of a seven degree of freedom shotcrete robot in coal mine roadway[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(1): 115-121.
- [18] 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.
- [19] SHI K, YANG L Y, WU Z T, et al. Multi-robot dynamic path planning with priority based on simulated annealing[J]. Journal of the Franklin Institute, 2025, 362(1): 1-12.
- [20] 朱银锋, 张成浩, 方继根, 等. 高空立面条件下绳驱动并联机器人控制研究[J]. 重庆科技大学学报(自然科学版), 2025, 27(2): 99-108.
- ZHU Y F, ZHANG C H, FANG J G, et al. On the control of rope-driven parallel robot under high altitude elevation conditions[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 27(2): 99-108.
- [21] 余志鹏, 任凭. 六自由度悬索并联机器人的滑模定点控制[J]. 机械设计与制造, 2025(8): 112-118.
- YU Z P, REN P. Sliding mode set-point control of a six-DOF cable-suspended parallel robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2025(8): 112-118.