

基于机器视觉和改进 BOA 的食品分拣 机器人轨迹规划方法研究

崔 巍^{1,2,3} 袁 瑞^{1,2,3} 孙立涛^{1,2,3} 王 巍⁴

(1. 河北机电职业技术学院, 河北 邢台 054000; 2. 河北省机电装备智能感知与先进控制技术创新中心, 河北 邢台 054000; 3. 邢台市机电装备智能感知与智能控制技术创新中心, 河北 邢台 054000; 4. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038)

摘要: [目的]降低食品分拣过程中并联机器人的轨迹运行时间、能耗和运行冲击等。[方法]在分析 Delta 并联机器人食品分拣系统的基础上,提出一种用于 Delta 并联机器人轨迹优化的改进 4-3-3-4 插值法。以运行时间、能耗和冲击综合最优为目标构建模型优化 4-3-3-4 插值多项式关节系数,通过改进蝴蝶优化算法求解得到并联机器人运动轨迹的最优解,并验证其优越性。[结果]与常规方法相比,所提轨迹优化方法具有更好的运行效率和控制效果,规划轨迹更加平滑。在实际分拣中,分拣误差均小于 0.5 mm,分拣成功率为 99.60%,平均分拣时间为 0.620 s。[结论]通过对多项式插值法进行优化可以有效提高并联机器人轨迹规划的效率 and 稳定性。

关键词: 并联机器人; 轨迹规划; 蝴蝶优化算法; 4-3-3-4 插值法; 食品分拣

Research on trajectory planning method for food sorting robot based on machine vision and improved BOA

CUI Wei^{1,2,3} YUAN Rui^{1,2,3} SUN Litao^{1,2,3} WANG Wei⁴

(1. Hebei Institute of Mechanical and Electrical Technology, Xingtai, Hebei 054000, China; 2. Hebei Technical Innovation Center for Intelligent Sensing and Advanced Control of Mechanical and Electrical Equipment, Xingtai, Hebei 054000, China; 3. Xingtai Technical Innovation Center for Intelligent Sensing and Control of Mechanical and Electrical Equipment, Xingtai, Hebei 054000, China; 4. Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: [Objective] Reduce the trajectory running time, energy consumption, and operational impact of parallel robots during the food sorting process. [Methods] Based on the analysis of the Delta parallel robot food sorting system, an improved 4-3-3-4 interpolation method was proposed for trajectory optimization of the Delta parallel robot. Built a model to optimize the joint coefficients of the 4-3-3-4 interpolation polynomial with the goal of optimizing the running time, energy consumption, and impact. By improving the butterfly optimization algorithm, the optimal solution for the motion trajectory of the parallel robot was obtained and its superiority was verified. [Results] Compared with conventional methods, the proposed trajectory optimization method had better operational efficiency and control effects, with the more smoother of the planned trajectory. In actual sorting, the sorting error was less than 0.5 mm, the sorting success rate was 99.60%, and the average sorting time was 0.620 s. [Conclusion] Optimizing polynomial interpolation can effectively improve the efficiency and stability of trajectory planning for parallel robots.

Keywords: parallel robots; trajectory planning; butterfly optimization algorithm; 4-3-3-4 interpolation method; food sorting

Delta 并联机器人以高速性、准确性和稳定性等优点,被广泛应用于食品分拣等领域^[1-2]。为了提升机构的运行稳定性并降低残余振动,合理规划 Delta 并联机器人的运动轨迹显得尤为关键^[3-4]。目前,笛卡尔空间常用于描

述机器人末端执行器(如机械臂、抓取器等)的运动轨迹,其关节空间以关节为时间函数。徐岩^[5]、郭俊等^[6]对关节空间轨迹规划方法进行了研究,主要集中于多项式插值、B 样条插值等方法。姚学峰等^[7]提出了一种用于 Delta 机

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(编号:QN2022098);邢台市科学技术局项目(编号:2022ZC008)

通信作者: 崔巍(1983—),男,河北机电职业技术学院副教授,硕士。E-mail: cuiwsgfs13@126.com

收稿日期: 2024-06-11 **改回日期:** 2024-10-09

机器人轨迹规划的改进NURBS插值的方法,有效降低了分拣时间。杨化林等^[8]提出了一种Lamé曲线和改进粒子群算法的Delta机器人轨迹规划的方法,有效降低了分拣时间,而且规划曲线更加平滑。封燕芳等^[9]通过改进的蚁群优化算法优化Delta机械人轨迹,提高了番茄分拣成功率和效率。赵铁军等^[10]提出了一种用于Delta机器人轨迹规划的改进梯形加速度算法,该方法具有较高的分拣效率。以上方法可以完成Delta机器人的轨迹规划,但也存在规划曲线的平滑性和计算复杂度等问题,对轨迹规划算法的研究仍需进一步加强。

研究拟在分析Delta并联机器人食品分拣系统的基础上,提出一种用于Delta并联机器人轨迹优化的改进4-3-3-4插值法。以运行时间、能耗和冲击综合最优为目标构建模型优化4-3-3-4插值多项式关节系数,通过改进蝴蝶优化算法(butterfly optimization algorithm, BOA)求解并联机器人运动轨迹的最优解,并验证其优越性,旨在为提高食品生产自动化水平提供依据。

1 食品分拣系统

图1为Delta并联机器人食品分拣系统,主要包括上位机控制系统和下位机Delta并联机器人主体两部分。上位机负责整个系统的控制和管理,包括图像采集、处理、分析以及控制命令的生成和发送^[11-12]。通过图像采集系统获取目标食品的姿态和位置信息,是通过设置在传送带上的视觉采集装置实现的。同时,上位机通过编码器获取带式输送机的速度信息,这些信息对于精确控制Delta并联机器人进行食品分拣至关重要。下位机负责执行上位机发送的控制命令,完成实际的分拣任务。Delta并联机器人因其极高的移动速度能够快速、准确地将目标食品从传送带上分拣出来。整个系统的工作流程可以概括为:上位机通过图像采集和速度检测获取所需的信息,然后计算最佳的分拣策略,并通过下位机执行该策略,实现高效、准确的分拣^[13-14]。

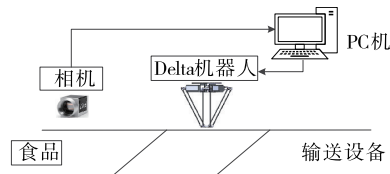


图1 系统结构

Figure 1 System structure

2 Delta并联机器人轨迹规划

2.1 4-3-3-4多项式插值法

Delta并联机器人在分拣空间内进行拾取、搬运、放置

的“门”字轨迹,实现从某点到另一点的抓取和放置操作^[15-16]。采用4-3-3-4多项式插值法规划运行轨迹,在“门”型轨迹中加入 h_4 ,4-3-3-4门形插值如图2所示。

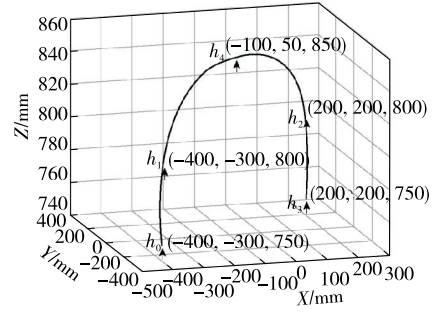


图2 4-3-3-4门形插值

Figure 2 4-3-3-4 gated interpolation

4-3-3-4次多项式插值函数构造为

$$\begin{cases} h_{j1}(t) = \alpha_{j14}t_1^4 + \alpha_{j13}t_1^3 + \alpha_{j12}t_1^2 + \alpha_{j11}t_1 + \alpha_{j10} \\ h_{j2}(t) = \alpha_{j23}t_2^3 + \alpha_{j22}t_2^2 + \alpha_{j21}t_2 + \alpha_{j20} \\ h_{j3}(t) = \alpha_{j33}t_3^3 + \alpha_{j32}t_3^2 + \alpha_{j31}t_3 + \alpha_{j30} \\ h_{j4}(t) = \alpha_{j44}t_4^4 + \alpha_{j43}t_4^3 + \alpha_{j42}t_4^2 + \alpha_{j41}t_4 + \alpha_{j40} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:

$\alpha_{j1i}, \alpha_{j2i}, \alpha_{j3i}, \alpha_{j4i}$ ——关节 j 不同段(1~4)的第 i 个系数;

$h_{j1}(t), h_{j2}(t), h_{j3}(t), h_{j4}(t)$ ——不同段(1~4)关于时间 t 的函数。

根据运动学方程可得到约束条件

$$\begin{cases} h_{j1}(0) = \beta_{j0} \\ h_{j1}^*(0) = 0 \\ h_{j1}^{**}(0) = 0 \\ h_{j2}(0) = h_{j1}(t_1) = \beta_{j1} \\ h_{j2}^*(0) = h_{j1}^*(t_1) \\ h_{j2}^{**}(0) = h_{j1}^{**}(t_1) \\ h_{j3}(0) = h_{j2}(t_2) = \beta_{j2} \\ h_{j3}^*(0) = h_{j2}^*(t_2) \\ h_{j3}^{**}(0) = h_{j2}^{**}(t_2) \\ h_{j3}(0) = h_{j2}(t_3) = \beta_{j3} \\ h_{j3}^*(0) = h_{j2}^*(t_3) \\ h_{j3}^{**}(0) = h_{j2}^{**}(t_3) \\ h_{j4}(0) = \beta_{j4} \\ h_{j4}^*(0) = 0 \\ h_{j4}^{**}(0) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中:

t_1, t_2, t_3, t_4 ——不同段(1~4)的运行时间, s;

$\beta_{j0}, \beta_{j1}, \beta_{j2}, \beta_{j3}$ ——关节 j 不同段(1~4)的驱动角度, rad。

将式(2)代入式(1)可得矩阵形式

$$A = \begin{bmatrix} t_1^4 & t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4t_1^3 & 3t_1^2 & 2t_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12t_1^2 & 6t_1 & 2 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_2^3 & t_2^2 & t_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3t_2^3 & 2t_2^2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6t_2 & 2 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_3^3 & t_3^2 & t_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3t_3^3 & 2t_3^2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6t_3 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_4^4 & t_4^3 & t_4^2 & t_4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4t_4^3 & 3t_4^2 & 2t_4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12t_4^2 & 6t_4 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} a = [\alpha_{j14} & \alpha_{j13} & \alpha_{j12} & \alpha_{j11} & \alpha_{j10} & \alpha_{j23} & \alpha_{j22} & \alpha_{j21} & \alpha_{j20} & \alpha_{j33} & \alpha_{j32} & \alpha_{j31} & \alpha_{j30} & \alpha_{j44} & \alpha_{j43} & \alpha_{j42} & \alpha_{j41} & \alpha_{j40}]^T \\ b = [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{j4} & 0 & 0 & \beta_{j0} & 0 & 0 & \beta_{j3} & \beta_{j2} & \beta_{j1}]^T \end{cases}, \quad (4)$$

$$a = A^{-1}b.$$

$$(5)$$

$$h_j(t), h_j^*(t), h_j^{**}(t), h_j^{***}(t) \text{——} t \text{时刻关节角速度位移}$$

(rad)、速度(rad/s)、加速度(rad/s²)和冲击量(rad/s³);

$M_j(t), F_j(t)$ —— t 时刻关节力矩(N·m)和载荷(kg);

$h_{\max}, v_{\max}, a_{\max}, J_{\max}, M_{\max}, F_{\max}$ ——关节位移(rad)、速度(rad/s)、加速度(rad/s²)、冲击量(rad/s³)、力矩(N·m)、载荷(kg)的最大值。

2.3 求解算法

BOA算法具有结构简单、控制参数少、时间复杂度低等优点,被广泛应用于模型求解。文中通过BOA算法求解目标模型,但算法全局搜索和局部搜索需要合理地平衡,否则算法可能会陷入局部最优或收敛性能下降^[19-20]。

(1) 混沌映射优化:通过混沌映射增强种群多样性,切比雪夫混沌映射初始种群如式(8)所示。

$$x_{k+1} = \cos[k \cos^{-1}(x_k)], \quad (8)$$

式中:

k ——映射次数。

(2) 动态权重优化:引入自适应权重 ω 提高算法局部寻优能力,如式(9)所示。

$$\omega_i = \frac{F_b - F_w}{F_i - F_w}, \quad (9)$$

式中:

F_i ——当前个体的适应度值;

F_b, F_w ——当前全局最优与最差适应度值。

(3) 全局搜索优化:引入动态调节参数 ϵ 提高全局搜索能力,如式(10)所示。

$$\epsilon = \text{betarnd} \times \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{t}{M}\right), \quad (10)$$

式中:

t ——当前迭代次数;

M ——最大迭代次数;

2.2 优化目标

并联机器人性能指标较多,以运行时间、能耗和冲击为目标用于4-3-3-4插补多项式关节系数的优化,目标函数为:

$$\begin{cases} C_1 = \sum_{i=1}^N t_i \\ C_2 = \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_i^2 dt} \\ C_3 = \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T J_i^2 dt} \end{cases}, \quad (6)$$

式中:

C_1, C_2, C_3 ——运动时间(s)、能耗(rad/s²)和冲击(rad/s³);

t_i, a_i, J_i ——第 i 段时间节点(s)、加速度(rad/s²)和冲击量(rad/s³);

T ——分拣一次的时间,s。

针对多目标优化问题,引入权重系数是一种常用的方法,用于平衡和评估不同目标之间的相对重要性^[17-18]。

Delta并联机器人平稳完成分拣作业,需要各关节轨迹相关参数满足一定的约束条件。文中对运行中的位移、速度、加速度、冲击量、力矩和载荷进行约束,如式(7)所示。

$$\begin{cases} |h_j(t)| \leq h_{\max} \\ |h_j^*(t)| \leq v_{\max} \\ |h_j^{**}(t)| \leq a_{\max} \\ |h_j^{***}(t)| \leq J_{\max} \\ |M_j(t)| \leq M_{\max} \\ |F_j(t)| \leq F_{\max} \end{cases}, \quad (7)$$

式中:

betarnd——呈 beta 分布的随机数。

调整后的全局搜索为

$$x_i^{t+1} = \omega x_i^t + [r^2 \cdot g_{\text{best}} - x_i^t + \epsilon(x_j^t - x_s^t)] \cdot f_i^t, \quad (11)$$

式中:

f_i^t ——迭代 t 次后蝴蝶 i 产生的香味浓度;

x_i^{t+1} ——迭代 $t+1$ 次后蝴蝶 i 的位置向量;

r ——随机数;

g_{best} ——当前迭代最优位置。

(4) 局部搜索优化:引入动态余弦概率加强局部搜索位置更新多样性,如式(12)所示。

$$p_i = \mu \times \cos\left(\text{rand} \times \frac{\pi}{2}\right), \quad (12)$$

式中:

μ ——调节系数, [0.85, 0.95];

rand——[0, 1]分布随机数;

p_i ——动态选择概率。

如果 $r_i < p_i$, 则根据式(11)进行位置更新, 否则根据式(13)进行位置更新。

$$x_i^{t+1} = \{1 + \Gamma \times \tan[\pi \times (\text{rand} - 0.5)]\} g_{\text{best}} + \frac{(\sqrt{5} - 1)(x_j^t - x_s^t) \times f_i^t}{2}, \quad (13)$$

式中:

Γ ——呈伽马分布的随机数。

4-3-3-4 多项式插值轨迹关节系数优化步骤为:

步骤 1: 对 BOA 参数进行初始化, 通过混沌映射初始化种群。

步骤 2: 对目标函数进行求解, 计算适应度值(全部个体)。

步骤 3: 确定适应度值最高的个体, 记录其位置和适应度值(该个体为后续迭代中的参考点)。

步骤 4: 如果 $r_i < p_i$, 则根据式(11)全局搜索, 否则根据式(13)进行局部搜索。

步骤 5: 判断是否满足结束条件, 满足输出最优解, 未满足转到步骤 2, 继续下一次迭代。

3 Delta 轨迹优化试验

3.1 参数设置

为了验证试验方法的优越性, PC 配备了酷睿 i5-13600 CPU, 拥有 5.0 GHz 的频率和 32 GB 的内存, Window 11 系统。试验平台参数见表 1, 算法参数见表 2。

表 1 试验平台参数

Table 1 Test platform parameters

试验目标	机器人(载重)	分拣速率	相机	动、静平台半径/mm	主、从动臂长度/mm	传送带速度可调	执行器吸盘式末端执行器	伺服电机松下 MSME20 2SGM
150 g 袋装面包	三轴 Delta 机器人 (1 kg)	可调	Basler 的 acA2500-14gc	65, 200	447, 1 100	速度可调	吸盘式末端执行器	松下 MSME20 2SGM
减速机	振动加速度传感器	角位移约束/rad	角速度约束/(rad·s ⁻¹)	角加速度约束/(rad·s ⁻²)	冲击量约束/(rad·s ⁻³)	力矩约束/(N·m)	载荷约束/kg	
42MM23A89P	ACC385H	1.92	3	9.5	20	21.6	1	

表 2 算法参数

Table 2 Algorithm parameters

参数	值	参数	值
最大迭代次数	100	转换概率	0.5
种群大小	50	幂指数	0.3
感知因子	0.01	目标权重(时间、能耗、冲击)	0.1, 0.2, 0.7

3.2 试验分析

为了验证所提方法的优越性, 以抓取点 h_0 坐标 (−400, −300, 750) mm、放置点 h_3 坐标 (200, 200, 750) mm、中间点 h_1 坐标 (−400, −300, 800) mm、中间点 h_2 坐标 (200, 200, 800) mm、中间点 h_4 坐标 (−100, 50, 850) mm 为例展开研究, 4-3-3-4 插值优化前后关节位置变化曲线如图 3 所示。

由图 3 可知, 轨迹优化前后的关节位移曲线形状相似, 整体变化趋势一致。优化前后机器人驱动关节轨迹的各相关参数满足运动学制约。优化后关节的旋转角度

曲线比优化前更平滑、连续和快速。

为了验证试验所提模型求解算法的优越性, 将试验中所提的改进蝴蝶优化算法与文献[7]改进遗传算法、文献[8]改进粒子群算法进行对比分析, 比较不同方法随迭代变化的收敛曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, 试验方法和文献[8]的收敛精度较高, 但试验方法的收敛速度更快。文献[7]在迭代 70 次左右收敛到最优值, 文献[8]在迭代 45 次左右收敛到最优值, 试验方法在迭代 22 次左右收敛到最优值。这是因为与文献[7]的遗传算法和文献[8]的粒子群算法相比, 试验所提 BOA 算法在参数调整、全局搜索能力、收敛速度、适应性以及与其他算法的结合性等方面具有一定的优势。

为了验证试验所提轨迹优化方法的性能, 在试验分选平台上进行 100 次试验, 比较不同方法(试验方法、文献[7]、文献[8])的分选平均误差, 将 Delta 并联机器人的平均速度分别设定为 80, 100, 120 次/min, 不同方法的分拣速度误差见表 3。

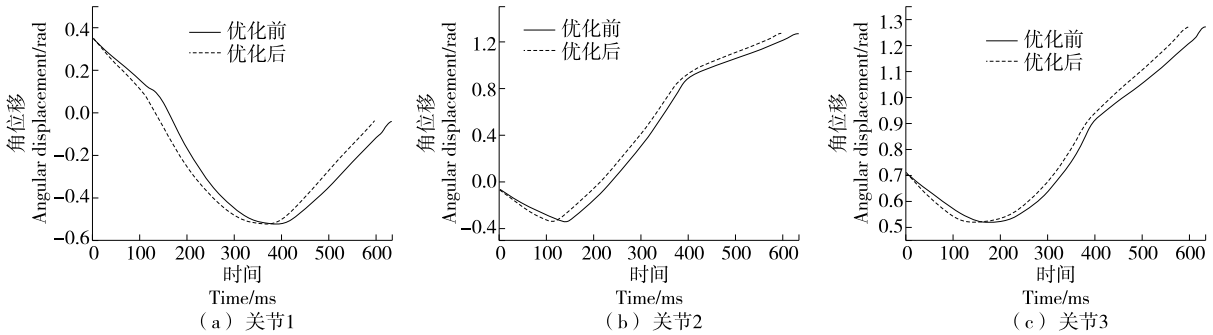


图3 4-3-3-4插值优化前后关节位置变化

Figure 3 4-3-3-4 interpolation optimization before and after changes in joint position

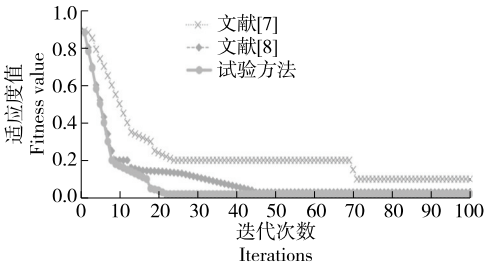


图4 不同方法随迭代变化的收敛曲线

Figure 4 Convergence curves of different methods with iterative changes

表3 不同方法的分拣速度误差

Table 3 Sorting speed error of different methods

分拣速度/ (次·min ⁻¹)	坐标	误差/mm		
		文献[7]	文献[8]	试验方法
80	X	0.5	0.3	0.2
	Y	0.5	0.4	0.2
	Z	0.5	0.4	0.3
100	X	0.5	0.4	0.2
	Y	0.6	0.5	0.3
	Z	0.8	0.6	0.3
120	X	1.0	0.9	0.5
	Y	0.8	0.7	0.5
	Z	0.9	0.8	0.5

由表3可知,试验方法、文献[7]和文献[8]均取得了较好的效果,误差均<1 mm,随着分拣速度的提高,分拣误差增大,但试验方法的分选误差均<0.5 mm,误差也最为稳定。这是因为试验所提优化方法综合考虑了运行时间、能耗和冲击,其综合性能最高。

为了进一步验证试验所提优化方法的优越性,将试验方法与文献[7]的NURBS曲线结合改进遗传算法和文献[8]的结合Lamé曲线和改进粒子群算法进行对比分析。将不同方法用于试验分拣平台进行分拣试验,传送装置速度设为100 mm/s,随机分布袋装面包500个,不同方法的食物分拣效果见表4。

表4 不同方法的食物分拣结果

Table 4 Different methods of food sorting results

方法	分拣成功率/%	平均分拣时间/s
文献[7]	96.60	0.645
文献[8]	98.00	0.630
试验方法	99.60	0.620

由表4可知,试验方法的分拣成功率为99.60%,平均分拣时间为0.620 s。与文献[7]和文献[8]相比,试验方法的分拣成功率分别提高了3.11%和1.63%,平均分拣时间分别降低了3.88%和1.59%。这是因为试验方法结合了4-3-3-4插值法与改进蝴蝶优化算法,提出的规划路径更短,运行更稳定,分选效率更高。

4 结论

试验提出了将4-3-3-4插值法与改进的蝴蝶优化算法相结合用于并联机器人轨迹优化。并联机器人以运行时间、能耗、冲击为目标优化4-3-3-4插值多项式关节系数,改进蝴蝶优化算法求解得到并联机器人运动轨迹的最优解。结果表明,试验所提轨迹优化方法规划曲线更加平滑、连续和快速。相比于常规方法,试验方法考虑的优化目标更加全面和求解方法性能更优,具有更短的规划路径、更小的分拣误差、更优的分拣成功率和分拣时间,综合性能最优。试验方法在试验分拣平台上取得了较好的效果,但仅研究了轨迹规划方法,后续可以结合轨迹跟踪方法(滑膜控制等)以实现更加高效和高精度的控制。

参考文献

[1] 刘现伟, 颜潭成, 徐彦伟, 等. 基于叠加摆线运动规律的Delta机器人轨迹规划[J]. 制造业自动化, 2021, 43(6): 88-94.
LIU X W, JIE T C, XU Y W, et al. Delta robot trajectory planning based on superimposed cycloidal motion laws[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(6): 88-94.
[2] 胡国喜, 王超, 刘宇珩. 基于改进光滑滑模阻抗控制的水果分拣机械人夹持机构控制方法[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 123-126.
HU G X, WANG C, LIU Y H. Control method of fruit sorting robot clamping mechanism based on improved smooth sliding

- mode impedance control[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 123-126.
- [3] 解则晓, 李斌, 任凭. 基于能量指标的 Delta 并联机器人拾放轨迹参数优化及验证[J]. 计算机集成计算系统, 2018, 24(12): 3 073-3 081.
- XIE Z S, LI B, REN P. Optimization and verification of Delta parallel robot pickup and release trajectory parameters based on energy index[J]. Computer Integrated Computing System, 2018, 24(12): 3 073-3 081.
- [4] 章鸿. Delta 快速分拣机器人轨迹优化算法研究[J]. 机械设计与制造, 2021, 12(6): 288-295.
- ZHANG H. Research on trajectory optimization algorithm of Delta rapid sorting robot[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021, 12(6): 288-295.
- [5] 徐岩. 基于改进引力搜索算法的高速并联机器人轨迹优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 82-86.
- XU Y. Trajectory optimization of high-speed parallel robots based on improved gravity search algorithm[J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 82-86.
- [6] 郭俊, 王新. 食品拾放的 3-PUU 并联机器人轨迹规划[J]. 食品工业, 2021, 42(2): 223-226.
- GUO J, WANG X. Trajectory planning of 3-PUU parallel robot for food picking and placing[J]. Food Industry, 2021, 42(2): 223-226.
- [7] 姚学峰, 李超. 基于改进 NURBS 曲线插补算法的食品分拣机器人轨迹规划[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 80-85.
- YAO X F, LI C. Trajectory planning of food sorting robots based on improved NURBS curve interpolation algorithm[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 80-85.
- [8] 杨化林, 钟岩, 姜沅政, 等. 基于时间与急动度最优的并联式采茶机器人轨迹规划混合策略[J]. 机械工程学报, 2022, 58(9): 62-70.
- YANG H L, ZHONG Y, JIANG Y Z, et al. Hybrid strategy for trajectory planning of parallel tea picking robot based on optimal time and urgency[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(9): 62-70.
- [9] 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. Trajectory planning of DELTA sorting robot for tomato production line based on improved door shaped trajectory[J]. Food & Machinery, 2023, 39(8): 71-75, 154.
- [10] 赵铁军, 王玲. 基于改进贪心算法的 DELTA 机器人分拣路径优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 12(12): 58-61, 66.
- ZHAO T J, WANG L. Optimization of DELTA robot sorting path based on improved greedy algorithm[J]. Combination Machine Tool and Automation Processing Technology, 2021, 12(12): 58-61, 66.
- [11] LI W, XIONG R. A hybrid visual servo control method for simultaneously controlling a nonholonomic mobile and a manipulator[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(2): 141-154.
- [12] 李光, 章晓峰, 杨加超, 等. 基于残差 BP 神经网络的 6 自由度机器人视觉标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 366-374.
- LI G, ZHANG X F, YANG J C, et al. Vision calibration of 6-DOF robot based on residual BP neural network[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 366-374.
- [13] 朱大昌, 盘意华, 杜宝林, 等. 一种并联机器人轨迹规划算法研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(5): 14-22.
- ZHU D C, PAN Y H, DU B L, et al. Research on a trajectory planning algorithm for parallel robots[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2023, 51(5): 14-22.
- [14] 伍经纹, 徐世许, 王鹏, 等. 基于 Adams 的三自由度 Delta 机械手的运动学仿真分析[J]. 软件, 2017, 38(6): 108-112.
- WU J W, XU S X, WANG P, et al. Kinematics simulation analysis of 3-DOF Delta manipulator based on Adams[J]. Software, 2017, 38(6): 108-112.
- [15] 张皓宇, 刘晓伟, 任川, 等. 并联机器人正运动学与 NURBS 轨迹规划[J]. 机械设计与制造, 2021, 12(4): 282-292.
- ZHANG H Y, LIU X W, REN C, et al. Forward kinematics and NURBS trajectory planning of parallel robot[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021, 12(4): 282-292.
- [16] 赵利平, 吴德刚. 基于小波与模糊相融合的苹果分级算法[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 142-145.
- ZHAO L P, WU D G. Apple grading algorithm based on Wavelet and fuzzy fusion[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 142-145.
- [17] 贺禹强, 刘故帅, 肖异瑶, 等. 基于改进 GA-PSO 混合算法的变电站选址优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 143-150.
- HE Y Q, LIU G S, XIAO Y Y, et al. Substation location optimization based on improved GA-PSO hybrid algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 143-150.
- [18] 朱光耀. 基于无标定视觉伺服的全向移动机械臂跟踪控制[J]. 电子测量技术, 2020, 43(23): 23-29.
- ZHU G Y. Tracking control of omnidirectional mobile manipulator based on uncalibrated visual servo[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(23): 23-29.
- [19] 王志中. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J]. 机械设计与制造, 2018, 12(1): 242-244.
- WANG Z Z. Research on mobile robot path planning based on improved ant colony algorithm[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2018, 12(1): 242-244.
- [20] 王曦, 王宗彦, 张宇廷, 等. 基于 NSGA-II 算法的并联机器人多目标轨迹规划[J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(12): 72-77.
- WANG X, WANG Z Y, ZHANG Y T, et al. Multi objective trajectory planning for parallel robots based on NSGA-II algorithm[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2022, 51(12): 72-77.