DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.60098 [文章编号] 1003-5788(2023)10-0105-07

基于多目标优化的油茶果分选机器人轨迹规划方法研究

Research on trajectory planning method for *Camellia oleifera* fruit sorting robot based on multi-objective optimization

傅明娣[1] 李 忠[2] 王倩茹[3] 赵 飞[4]

FU Mingdi[1] *LI Zhong*[2] *WANG Qianru*[3] *ZHAO Fei*[4]

(1. 江苏省金湖中等专业学校,江苏 淮安 223001;2. 江苏联合职业技术学院常州刘国钧分院,江苏 常州 213000;3. 常州大学,江苏 常州 213164;4. 江苏科技大学,江苏 镇江 212100)

(1. *JiangsuJinhu Secondary Professional School*, *Huai'an*, *Jiangsu* 223001, *China*; 2. *Liu Guojun Branch*, *Jiangsu United Vocational and Technical College*, *Changzhou*, *Jiangsu* 213000, *China*; 3. *Changzhou University*, *Changzhou*, *Jiangsu* 213164, *China*; 4. *Jiangsu University of Science and Technology*, *Zhenjiang*, *Jiangsu* 212100, *China*)

摘要:目的:解决并联机器人食品分选过程中的运动平稳性差和精度等问题。**方法:**在分析三自由度食品分选机器人系统的基础上,提出将多项式插值法与改进的多目标粒子群算法相结合用于 Delta 机器人轨迹优化。以并联机器人运行时间最短、能耗最低、运动冲击最小为优化多目标,通过改进的多目标粒子群算法优化多项式插值法,并对其性能进行验证。**结果:**试验所提规划方法的规划轨迹相比于常规方法更平滑、更高效。在实际的油茶果分选中,准确率>99.00%,平均一次筛选时间为 0.620 s。**结论:**试验所提轨迹规划优化方法提高了油茶果分选机器人的分选效率、准确性和稳定性。

关键词:并联机器人;食品分选;轨迹规划;多项式插补法;多目标粒子群算法

Abstract: Objective: Solved the problems of poor motion stability and accuracy in the food sorting process of parallel robots. **Methods:** Based on the analysis of the three degree of freedom food sorting robot system, a method proposed which combined polynomial interpolation and improve multi-objective particle swarm optimization algorithm for Delta robot trajectory optimization. As a parallel robot, the optimization of the shortest operation time, lowest energy consumption, and minimal motion impact were taken as multiple objectives. The improved multi-objective particle swarm optimization algorithm was applied to optimize the polynomial interpolation method, and its performance was validated. **Results:** The planning trajectory of the proposed planning method in the experiment was smoother and more efficient compared to conventional methods. In the actual selection of *Camellia oleifera* fruits, the accuracy was > 99.00%, and the average screening time was 0.620 s. **Conclusion:** The trajectory planning optimization method proposed in the experiment has improved the sorting efficiency, accuracy, and stability of the *Camellia oleifera* fruit sorting robot.

Keywords: parallel robots; food sorting; trajectory planning; polynomial interpolation method; multi-objective particle swarm optimization algorithm

随着工业发展从自动化转向智能化以及中国制造 2025 国家政策背景下,工业机器人被广泛应用于各行各业[1]。Delta 并联机器人因高速、高精度、灵活等特点,在产品分选阶段发挥了重要作用,被广泛应用于食品等领域[2]。在实际应用中,为了提高机构的运行稳定性,减少残余振动,需要合理规划 Delta 并联机器人的运动轨迹,轨迹规划直接影响 Delta 并联机器人的动态性能[3]。

目前,有关 Delta 机器人轨道规划方法研究主要集中在多项式插值、B 样条曲线、Bezier 曲线等方面[4-6]。刘现伟等[7]针对现有 Delta 机器人规划曲线冲击大和平稳性不足等问题,提出了叠加摆线用于机器人轨迹规划;与

基金项目:江苏省自然科学基金项目(编号:22JS135107);江苏省教育教学改革研究课题(编号:ZYB530)

作者简介:傅明娣(1976—),女,江苏省金湖中等专业学校高级讲师,硕士。E-mail:fmd050115@126.com

收稿日期:2023-04-10 **改回日期:**2023-10-25

常规方法相比，所提方法的末端速度峰值降低了14.67%，规划轨迹更稳定，冲击更小。徐岩[8]针对 Delta 机器人食品分选过程中刚性冲击大、运动稳定性差等问题，将改进引力搜索算法用于多目标轨迹规划中，所提方法在一定程度上降低了刚性冲击力，提高了运行稳定性，一次分选的最短时间为 0.169 1 s。梅江平等[9]基于 3-4-5 次多项式运动规律，提出了以能耗优化为目标的 Delta 机器人轨道优化方法，与常规方法相比，能耗分别降低 12.70%和 13.93%。刘现伟等[10]针对现有 Delta 机器人分选曲线不平滑等问题，提出了合成运动用于机器人轨迹规划，所提方法的规划曲线更平滑自然，与优化前相比，加速度峰值大幅下降。以上方法虽然可以完成 Delta 机器人的轨迹规划，但在实际食品分选中效率和稳定性有待进一步提高。

研究拟以三自由度 Delta 食品分选机器人为研究目标，提出一种将多项式插值法与改进的多目标粒子群算法相结合用于 Delta 机器人轨迹优化方法；以并联机器人运行时间最短、能耗最小、运动冲击最小为优化目标，通过改进的多目标粒子群算法优化多项式插值法；并通过试验验证其性能的优越性，旨在降低 Delta 食品分选机器人的惯性力波动，实现更稳定和高效的分选。

1　系统概述

Delta 食品分选机器人主要由上位机控制系统和下位机分选机器人本体组成(图 1)。由于 Delta 机器人的移动速度非常快，视觉采集装置安装在带式输送机上，能提高分选效率，上位机通过图像采集系统获取目标食品的姿态、位置，通过编码器获取带式传送机的速度，经计算控制 Delta 分选机器人完成分选[11]。下位机主要由主控制器、伺服驱动器、伺服电机、减速器等组成，接收上位机命令并完成目标食品分选[12]。

Delta 机器人结构如图 2 所示。*OXYZ* 坐标系建立在静平台上，与静平台连接的为主动臂，主动臂与静态平台之间通过转动副连接，这 3 个转动副由安装在静平台上的电机驱动与各主动臂连接，下端与动平台连接，也称为从动臂。固定在动平台上的为执行器，可以根据实际需要实现不同的功能[13]。

2　轨迹优化方法

2.1　轨迹规划

机器人轨迹规划通常分为两类：关节空间和笛卡尔空间。前者以关节作为时间函数，后者以末端执行器运行路径作时间函数。试验主要对关节空间轨迹规划进行研究。并联机器人单次运行的轨迹仅为 4 个关键点：抓取点、放置点以及两个圆弧过渡的关键点，其运行高度无

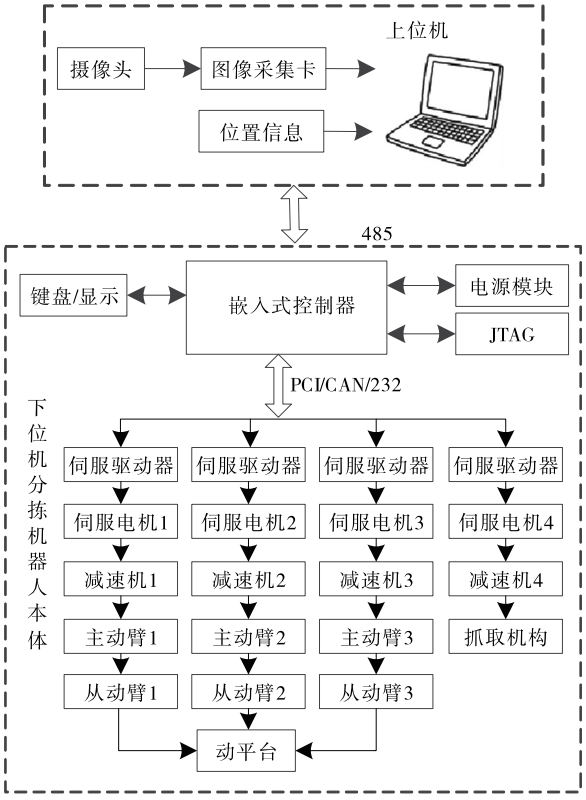


图 1　系统结构

Figure 1　System structure

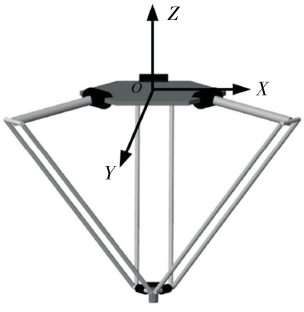


图 2　Delta 机器人结构

Figure 2　Delta robot structure

法控制，轨迹也无法控制[14]。为了降低机器人运行过程中的能耗，缩短运行时间，在“门”形轨迹中，增加搬运段的关键点 h_4，限制机器人的运行高度。“门”形轨迹分为 4 段：中间运行段分为 h_1h_4 段和 h_2h_4 段[15]。将 4 段的运行时间分别设定为 t_1、t_2、t_3、t_4。4-3-3-4 门形轨迹如图 3 所示。

4-3-3-4 次多项式插值函数构造如式(1)所示[16]。

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

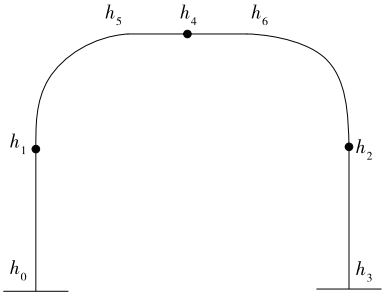


图 3　4-3-3-4 门形轨迹

Figure 3　4-3-3-4 gate shaped trajectory

式中:

α_{j1i}、α_{j2i}、α_{j3i}、α_{j4i}——关节 j 的轨迹一段、二段、三段、四段插值函数的第 i 个系数;

$h_{j1}(t)$、$h_{j2}(t)$、$h_{j3}(t)$、$h_{j4}(t)$——四段轨迹中,路径关于时间 t 的函数。

由于初始点速度和加速度为零,终止点速度和加速度为零,中间点速度和加速度连续,可得式(2)所示的约束[17]。

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

式中:

t_1、t_2、t_3、t_4——各关节四段多项式的运行时间,s;

β_{j0}、β_{j1}、β_{j2}、β_{j3}——相应位置的关节驱动角度,rad。

根据式(2),4-3-3-4 多项式插值法的矩阵构造形式如式(3)、式(4)所示[18]。

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

$$\boldsymbol{b}=[0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ \beta_{j4}\ \ 0\ \ 0\ \ \beta_{j0}\ \ 0\ \ 0\ \ \beta_{j3}\ \ \beta_{j2}\ \ \beta_{j1}]^T, \tag{4}$$

$$\boldsymbol{a}=[\alpha_{j14}\ \ \alpha_{j13}\ \ \alpha_{j12}\ \ \alpha_{j11}\ \ \alpha_{j10}\ \ \alpha_{j23}\ \ \alpha_{j22}\ \ \alpha_{j21}\ \ \alpha_{j20}\ \ \alpha_{j33}\ \ \alpha_{j32}\ \ \alpha_{j31}\ \ \alpha_{j30}\ \ \alpha_{j44}\ \ \alpha_{j43}\ \ \alpha_{j42}\ \ \alpha_{j41}\ \ \alpha_{j40}]^T。 \tag{5}$$

可得关系式:

$$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{b}。 \tag{6}$$

2.2　目标函数和约束

Delta 机器人的性能指标主要包括:工作效率、系统稳定性、承载能力、能耗和工作环境等。试验综合考虑了以最短运行时间、最低能耗、最小冲击为优化目标,目标函数如式(7)所示。

$$\begin{cases} T_1 = T = \sum_{i=1}^{N} t_i \\ E_2 = \sum_{i=1}^{N} \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a_i^2 \mathrm{d}t} \\ f_3 = \sum_{i=1}^{N} \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T J_i^2 \mathrm{d}t} \end{cases}, \tag{7}$$

式中:

T_1——运动时间，s；

E_2——运行中耗能衡量指标；

f_3——运行中冲击衡量指标；

T——单次分选时长，s；

t_i——第 i 个路径时间节点；

a_i、J_i——并联机器人在第 i 个路径点对应的加速度(rad/s²)和脉动冲击量(rad/s³)。

Delta 机器人在机械结构上存在限制约束，而且运动过程中关节位移、速度、加速度、力矩、载荷等也有一定的限制条件。因此，在考虑保持速度和加速度连续性的基础上，建立各自的约束项，约束轨迹规划的目标，如式(8)所示。

$$\begin{cases} |h_{ji}(t)| \leqslant h_{j\max} \\ |h_{ji}^{*}(t)| \leqslant h_{j\max}^{*} \\ |h_{ji}^{**}(t)| \leqslant h_{j\max}^{**} \\ |M_{ji}(t)| \leqslant M_{j\max} \\ |F_{ji}(t)| \leqslant F_{j\max} \end{cases}, \tag{8}$$

式中：

$h_{j\max}$、$h_{j\max}^{*}$、$h_{j\max}^{**}$——关节角速度位移(rad)、速度(rad/s)、加速度(rad/s²)限值；

$M_{j\max}$、$F_{j\max}$——最大力矩(N·mm)和最大载荷(N/mm²)。

2.3 多目标轨迹优化

为了实现规划轨迹多目标最优，通过改进的多目标粒子群算法优化多项式插值法。MOPSO 是一种基于群体智能方法的多目标优化算法。群体智能灵感受到生物集体行为的启发，如细菌繁殖、蚁群、鸟群等。MOPSO 算法作为单目标粒子群算法的延伸和发展，与之不同的主要有两点：① 对个体极值的更新过程，采用“非支配不更新”原则，即只有出现支配当前粒子的新粒子出现才进行个体极值的更新，否则不更新。② 对于全局极值的选择，采用自适应网格法计算 Archive 集粒子密度。

假设搜索空间为 N 维，粒子总数为 n，第 i 个粒子在 N 维空间中的位置为 x_i，飞行速度为 v_i，每个粒子由 3 个目标函数确定适应值，每个粒子的位置和速度根据式(9)和式(10)更新[19]。

$$v_{\mathrm{id}}^{k+1} = \omega v_{\mathrm{id}}^{k} + c_1 r_1 (p\mathrm{best}_{\mathrm{id}} - x_{\mathrm{id}}^{k}) + c_2 r_2 (g\mathrm{best} - x_{\mathrm{id}}^{k}), \tag{9}$$

$$x_{\mathrm{id}}^{k+1} k = x_{\mathrm{id}}^{k} + r v_{\mathrm{id}}^{k+1}, \tag{10}$$

式中：

c_1、c_2——自学习和社会学习系数；

r_1、r_2——[0,1]之间的随机数；

x_{id}^{k}、v_{id}^{k}——第 k 次迭代的位置(mm)和速度(mm/s)；

$p\mathrm{best}_{\mathrm{id}}$、$g\mathrm{best}$——种群进化过程的个体最优和全局最优；

ω——惯性权重；

r——约束系数。

将高斯变异的思想引入算法迭代过程中，保持种群多样性。在个体坐标更新过程中引入高斯变异，随着迭代过程变异动态变化[20]。

引入自适应参考点对外部档案进行维护，去除标准线最优解集中收敛最差个体，通过与设定档案容量进行比较，判断是否去除超额解[21]。

轨迹多目标优化步骤为：

(1) 初始化算法参数。获取非支配粒子，初始化这些粒子，通过外部档案进行保存，并计算粒子适应度。

(2) 对粒子局部和全局最优以及粒子位置进行更新。

(3) 通过高斯变异更新位置。

(4) 通过自适应参考点更新外部档案。

(5) 对停止条件进行判断(迭代次数或精度)，如果达到，则停止优化。

(6) 输出档案集粒子信息，即非劣化集。

图 4 为轨迹多目标优化流程。

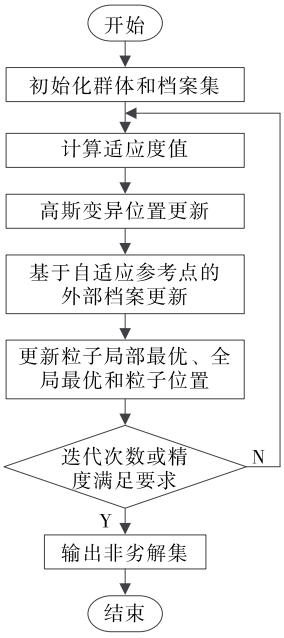


图 4 轨迹优化流程

Figure 4 Trajectory optimization process

3 试验结果与分析

3.1 试验参数

为了验证试验所提轨迹规划方法的优越性，采用三自由度 Delta 食品分选机器人轨迹规划进行试验验证。试验设备为华为 PC，操作系统为 Windows 11 64 位旗舰，CPU 为酷睿 i513600，5.0 GHz 频率，32 GB 内存。Delta 食品分选机器人参数见表 1。

表 1　食品分选机器人参数

Table 1　Food sorting robot parameters　　mm

静平台半径	动平台半径	主动臂长度	从动臂长度
200	65	447	1 100

考虑实际的运动条件,设定初始速度、终端速度 $v_0=v_f=0$ 和加速度 $a_0=a_f=0$。Delta 食品分选机器人实际规定各关节约束,位移 1.92 rad,速度 3 rad/s,加速度 9.5 rad/s^2,力矩 21.6 N·m,载荷 2 kg,算法参数见表 2。

Delta 机器人采用 TMS320F2812 控制器、伺服电机(日本三协的 MH751),图像采集使用 200 万像素视觉系统,光源为长条状 LED 光源,传送机编码器欧姆龙 E6B2,将食品油茶果作为分选目标。

3.2　试验结果分析

为了验证试验所提优化方法的可行性,在笛卡尔坐标系下的空间抓取点(−600,−150,−820) mm、放置点(40, 400, − 820) mm、中间点 1(− 600, − 150, −808) mm、中间点 2(− 600,400,750) mm、中间点 3(40,400,−808) mm 为例展开研究,关节参数见表 3。

表 2　算法参数

Table 2　Algorithm parameters

种群大小	学习因子	惯性权重	随机数	档案集大小	迭代次数	目标权重
100	[1,2]	[0.05,0.95]	(1,2)	100	50	0.4,0.3,0.3

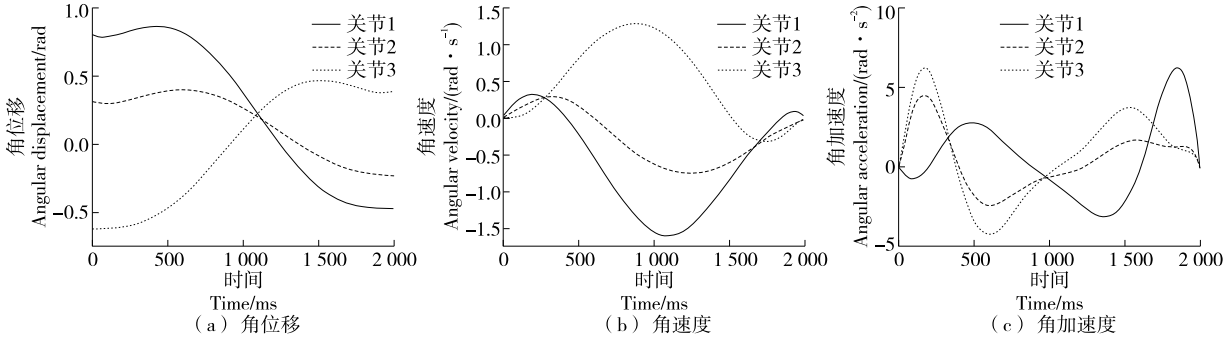
将优化前后插补方式得到的关节位移、速度和加速度曲线进行对比,4-3-3-4 插补方式得到的关节位移、角速度和加速度曲线如图 5 所示,优化的 4-3-3-4 插值方式得到的关节位移、角速度和加速度曲线如图 6 所示。

由图 5 和图 6 可知,改进后的 4-3-3-4 多项式插值法的角位移、速度和加速度曲线优于改进前的。相比于优化前,运行时间相同时,优化后 Delta 食品分选机器人轨迹更加平滑,系统运行时能耗更低,生产效率进一步提高。

表 3　关节参数

Table 3　Joint parameters

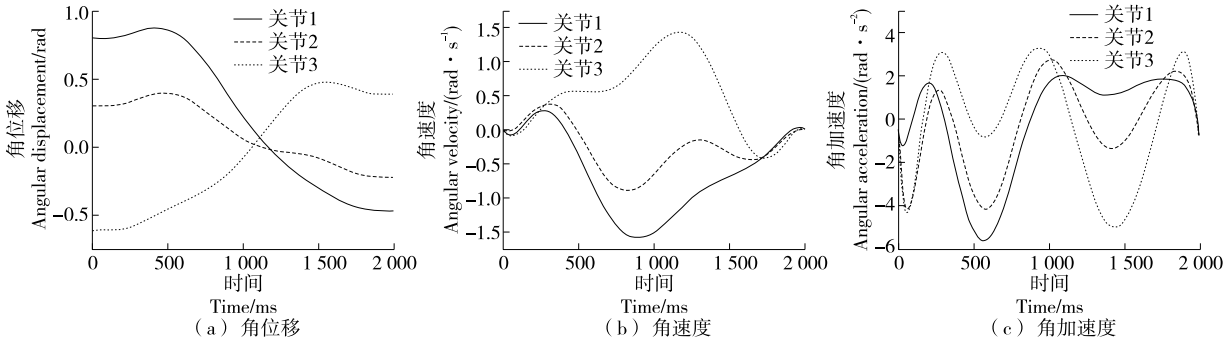
关节	角度/rad				
	起始点	中间点 1	中间点 2	中间点 3	放置点
1	0.012	−0.014	0.863	0.504	0.518
2	0.433	0.945	0.772	−0.459	−0.373
3	0.956	−0.464	0.784	−0.349	0.351



(a) 角位移　(b) 角速度　(c) 角加速度

图 5　4-3-3-4 插值方式关节角位移、角速度和角加速度变化曲线

Figure 5　4-3-3-4 interpolation method joint angular displacement, angular velocity, and angular acceleration variation curve



(a) 角位移　(b) 角速度　(c) 角加速度

图 6　改进的 4-3-3-4 插值方式关节角位移、角速度和角加速度变化曲线

Figure 6　Improved 4-3-3-4 interpolation method for joint angular displacement, angular velocity, and angular acceleration variation curve

为了验证试验所提轨迹规划方法的优越性，以食品油茶果为筛选目标，在搭建的分选系统平台上对试验方法与文献[22]方法进行对比分析，将 Delta 食品分选机器人以不同速度在设定轨迹上连续循环 1 000 次，通过比较实际位置与理论位置的差异测试其重复精度。分选速度分别设定为 60，80，100 次/min，不同速度的位置误差见表 4。

表 4 不同速度循环的位置误差

Table 4 Position error of different speed cycles

速度/（次·min^{-1}）	坐标轴	误差/mm	
		试验方法	文献[22]
60	X	0.2	0.3
	Y	0.2	0.4
	Z	0.3	0.4
80	X	0.2	0.5
	Y	0.5	0.6
	Z	0.5	0.8
100	X	0.6	1.0
	Y	0.8	0.8
	Z	0.8	0.9

由表 4 可知，试验方法的位置误差为 0.2～0.8 mm，文献[22]的为 0.3～1.0 mm，试验方法的位置误差更优，说明其具有更好的分选效果，验证了试验方法的优越性。

为进一步验证试验所提轨迹规划方法的优越性，将试验方法与文献[22]改进的 5 次 B 样条曲线关节轨迹规划方法进行对比，综合选择传送带速度为 80 mm/s，食品油茶果数量 2 000，随机分布。

由表 5 可知，试验方法相比文献[22]具有更高的分选成功率和更短的分选时间，试验方法的分选成功率为 99.50%，相比文献[22]的提高了 0.91%；试验方法的平均分选时间为 0.620 s，相比文献[22]的降低了 3.43%。这是因为试验以并联机器人运行时间最短、能耗最小、运动冲击最小为优化目标，通过改进的多目标粒子群算法优化 4-3-3-4 多项式插值法，规划路径运行时间更短，运行轨迹更平滑，能耗更低。

4 结论

试验提出了一种将多项式插值法与改进的多目标粒子群算法相结合用于 Delta 机器人的多目标轨迹规划方法。以三自由度 Delta 食品分选机器人为研究对象，采用 4-3-3-4 多项式插值法规划机器人的运动轨迹，以并联机器人运行时间最短、能耗最小、运动冲击最小为优化目标，通过改进的多目标粒子群算法优化多项式插值法，使其运动轨迹更平滑，无突变，具有更好的灵活性。当分选速度为 60～100 次/min 时，试验方法的位置误差为0.2～0.8 mm；与文献[22]相比具有更高的分选成功率和更短的分选时间，分选成功率提高了 0.91%，平均分选时间降低了 3.43%。虽然试验方法在三自由度 Delta 食品分选机器人轨迹规划中效果较好，但也存在一些不足，如仅对轨迹规划方法进行了研究，未对控制方法进行研究，后期将不断完善整个分选系统。

表 5 不同方法的分选试验结果

Table 5 Sorting test results using different methods

方法	传送带速度/（mm·s^{-1}）	油茶果数量	分选数量	平均分选时间/s	分选成功率/%
试验方法	80	2 000	1 990	0.620	99.50
文献[22]	80	2 000	1 972	0.642	98.60

参考文献

[1] 严培培. 面向非典型食品生产的高速机器人分拣系统设计[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 94-97.
YAN P P. Design of high speed robot sorting system for atypical food production[J]. Food & Machinery, 2016, 32(2): 94-97.

[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 onimproved smooth sliding mode impedance control[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 123-126.

[3] 张好剑, 苏婷婷, 吴少泓, 等. 基于改进遗传算法的并联机器人分拣路径优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(10): 93-99.
ZHANG H J, SU T T, WU S H, et al. Sorting path optimization of parallel robot based on improved genetic algorithm[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(10): 93-99.

[4] 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 trajectoryparameters based on energy index[J]. Computer Integrated Computing System, 2018, 24(12): 3 073-3 081.

[5] 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.

[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] 刘现伟, 颉潭成, 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.

[8] 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.

[9] 梅江平, 孙玉德, 贺莹, 等. 基于能耗最优的 4 自由度并联机器人轨迹优化[J]. 机械设计, 2018, 35(7): 82-86.
MEI J P, SUN Y D, HE Y, et al. Trajectory optimization of a 4-degree of freedom parallel robot based onoptimal energy consumption[J]. Mechanical Design, 2018, 35(7): 82-86.

[10] 刘现伟, 颉潭成, 徐彦伟, 等. 基于合成运动的 Delta 机器人轨迹规划[J]. 制造业自动化, 2021, 43(7): 19-23, 47.
LIU X W, JIE T C, XU Y W, et al. Delta robot trajectory planning based on synthetic motion[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(7): 19-23, 47.

[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] 史亚贝. 基于 DSP 的三自由度采摘机械手控制系统研究[J]. 农机化研究, 2022, 12(2): 34-38.
SHI Y B. Research on control system of 3-DOF picking manipulator based on DSP[J]. Agricultural Mechanization Research, 2022, 12(2): 34-38.

[13] 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 neuralnetwork[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 366-374.

[14] 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.

[15] 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-DOFDelta manipulator based on ADAMS[J]. Software, 2017, 38(6): 108-112.

[16] 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 parallelrobot[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021, 12(4): 282-292.

[17] 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.

[18] AZUMAYA C M, DAYS E L, VINSON P N, et al. Screening for AMPA receptor auxiliary subunit specific modulators[J]. PLoS One, 2017, 12(3): 1 523-1 538.

[19] 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 YY, et al. Substation location optimization based on improved GA-PSO hybrid algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 143-150.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

(上接第 92 页)

[17] 孔繁余, 何玉洋, 郑德, 等. 外啮合齿轮泵流量特性影响因素分析[J]. 排灌机械工程学报, 2014(2): 108-112.
KONG F Y, HE Y Y, ZHANG D, et al. Analysis of factors affecting flow characteristics of external gear pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014(2): 108-112.

[18] 李行, 董庆伟, 李阁强, 等. 高速高压圆弧螺旋齿轮泵径向力补偿方法研究[J]. 现代制造工程, 2022(5): 72-78.
LI H, DONG Q W, LI G Q, et al. Research on radial force compensation method of high-speed and high-pressure arc helical gear pump[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(5): 72-78.

[19] 刘坤, 徐雷, 杨波, 等. 啮合斜齿轮高压泵的 CFD 数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(4): 307-312.
LIU K, XU L, YANG B, et al. CFD numerical simulation of meshing helical gear high-pressure pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(4): 307-312.