

DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90076

# 基于改进 NURBS 曲线插补算法的食品分拣机器人轨迹规划

Trajectory planning method of food sorting robot based on improved NURBS curve interpolation algorithm

姚学峰<sup>1</sup> 李超<sup>2</sup>

YAO Xue-feng<sup>1</sup> LI Chao<sup>2</sup>

(1. 沈阳职业技术学院, 辽宁 沈阳 110045; 2. 辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114051)

(1. *Shenyang Vocational and Technical College, Shenyang, Liaoning 110045, China;*

2. *Liaoning University of Science and Technology, Anshan, Liaoning 114051, China*)

**摘要:**目的:为了更好地规划食品分拣机器人的运动轨迹,降低其振动幅度,使食品分拣机器人能够高精度地完成任 务。方法:以 Delta 并联机器人为基础,结合 NURBS 曲线插补算法和改进的遗传算法,提出了一种以最优运动时间为目标的食品分拣机器人路径规划方法。采用改进遗传算法来优化 NURBS 曲线。通过仿真对优化前后进行对比分析,验证了该优化方法的可行性。结果:与优化前相比,所提的优化方法可以在一定程度上降低食品分拣机器人的运动时间,从优化前的 3 230 ms 降低到优化后的 3 070 ms。关节空间的机器人曲线也更加平滑,可以充分发挥并联机器人的性能。结论:该轨迹规划方法能有效提高食品分拣机器人的分拣稳定性和效率。

**关键词:**食品分拣机器人;路径规划;NURBS 插补算法;遗传算法;运动时间最优

**Abstract: Objective:** In order to better plan the motion trajectory of the food sorting robot, reduce its vibration amplitude, and enable the food sorting robot to complete the task with high precision. **Methods:** Based on the delta parallel robot, combined with NURBS curve interpolation algorithm and improved genetic algorithm, a path planning method of food sorting robot aiming at the optimal motion time was proposed. The NURBS curve was optimized by improved genetic algorithm. The feasibility of the optimization method was verified by the comparative analysis before and after optimization through simulation. **Results:** Compared with before optimization, the proposed optimization method can reduce the motion time of food sorting robot to a certain extent,

from 3 230 ms before optimization to 3 070 ms after optimization. The robot curve in joint space was also smoother, which can give full play to the performance of parallel robot. **Conclusion:** The trajectory planning method can effectively improve the sorting stability and efficiency of food sorting robot.

**Keywords:** food sorting robot; path planning; NURBS interpolation algorithm; genetic algorithm; optimal exercise time

随着工业 4.0 时代的来临,各国都着眼于制造业的转型升级,提高制造和自动化水平<sup>[1]</sup>。在包装、医药、食品等领域,大量的抓取和搬运需要反复进行。Delta 机器人以其高刚度、高运动速度、高承载比等优点在食品、医疗等轻工业中得到广泛应用<sup>[2]</sup>。为了实现 Delta 机器人的稳定高速运行,充分发挥其高速运行的性能特点,有必要在工作环境中进行轨迹规划,以实现机器人的轨迹最优。

目前,国内外研究人员对并联机器人的轨迹规划方法做了大量的研究,并取得了一些优秀的成果。常用的轨迹规划方法有多项式插值、B 样条曲线和 Bezier 曲线等<sup>[3]</sup>。韩基伟等<sup>[4]</sup>提出了一种基于过渡圆弧的 Delta 机器人运动轨迹规划方法。结果表明,该机器人运动稳定,无抖动缺陷,具有良好的动态特性。张浩宇等<sup>[5]</sup>提出了一种神经网络与 NURBS 算法相结合的轨迹规划方法。结果表明,该策略的迭代次数和执行时间相对较低,位置偏差控制在 0.01 mm 以内,方向偏差控制在 0.01° 以内。刘现伟等<sup>[6]</sup>提出了一种基于叠加摆线运动规律的 Delta 机器人运动轨迹规划方法。结果表明,该轨迹规划方法相比于传统方法运动更加平稳、运行效率更高。刘现伟等<sup>[7]</sup>提出了一种基于合成运动的 Delta 机器人运动轨迹规划方法。结果表明,基于合成运动的圆弧轨迹运动特性曲线比传统方法轨迹运动特性曲线更平滑、更自然,角

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(编号:20LN90102)

作者简介:姚学峰(1977—),男,沈阳职业技术学院副教授,硕士。

E-mail: yaoball@163.com

收稿日期:2021-11-25

加速度峰值和终端加速度峰值分别降低了 60% 和 80%。但上述研究也存在一些问题,如曲线连接不光滑、计算复杂等,需要进一步提高适应性。

研究针对 Delta 并联机器人的最优运动时间,拟提出一种基于 NURBS 插值算法和改进遗传算法的食品分拣机器人轨迹规划方法,并采用改进的遗传算法对 NURBS 样条曲线进行优化,通过仿真验证该方法的可行性,以期食品分拣机器人的研制提供一定的参考。

### 1 系统概述

图 1 所示高速并行食品分拣机器人的系统结构。系统主要由两部分组成:上位机系统和下位机系统。其中,下位机控制系统是 Delta 机器人的核心指令部分<sup>[8]</sup>。其主要功能是驱动机器人本体以稳定、协调、快速的方式完成既定的运动规划和抓取任务,满足工作要求。上位机系统的主要功能是可视化、模型分析、数据集成处理以及和下位机的信息交互。

食品分拣机器人的本体结构主要由三部分组成(见图 2):静平台、动平台和 3 个运动支链<sup>[9]</sup>。动、静平台通过运动支链链接,静平台由电机座和固定座组成。动平台安装执行器,主要完成物体抓取等操作。3 个运动支链

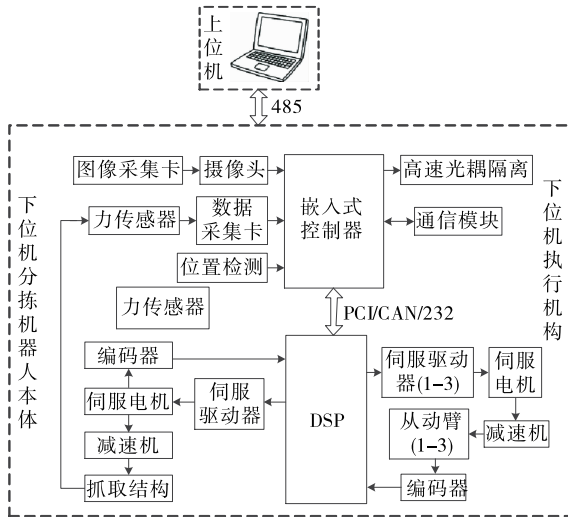


图 1 系统结构

Figure 1 System structure

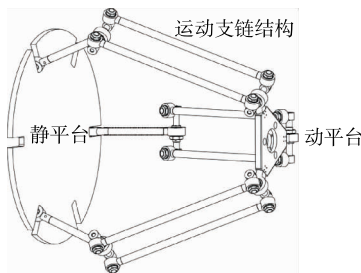


图 2 食品分拣机器人结构

Figure 2 Food sorting robot model

完成关节运动到空间位置的转换。

图 3 为机器人的简化模型。对运动支链进行简化,简化为  $L_A$  和  $L_B$ 。在动平台和静平台上,3 条支链的连接点以  $120^\circ$  均匀分布,分别对动平台和静平台进行简化,得到两个外圆半径为  $R, r$  的等边三角形机构。

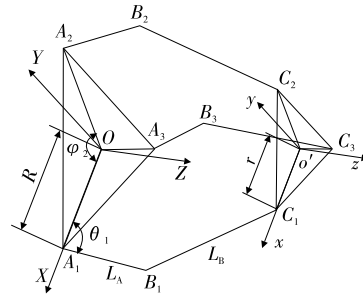


图 3 机器人简化模型

Figure 3 Food sorting robot model

简化后,在动、静平台上对右手坐标系进行建立,两个坐标系相互平行。静平台的坐标系用  $O-XYZ$  表示,  $OA_1$  为  $x$  轴的方向,动平台的坐标系用  $o'-xyz$  表示,  $o'C_1$  为  $x$  轴的方向,这两个坐标系始终相互平行。

### 2 轨迹规划

为了规划一条平滑的轨迹,并使任务时间最小化,提出了一种通过改进遗传算法来优化 NURBS 曲线。

#### 2.1 优化模型

2.1.1 目标函数 能耗和时间在 Delta 机器人轨迹优化中应用最为广泛,文中采用最小时间法,其优化函数如式(1)所示<sup>[10]</sup>。

$$T = \min \sum_{i=1}^{n-1} h_i, \tag{1}$$

式中:

$T$  —— 规划时间, ms;

$h_i$  —— 第  $i$  段曲线时间, ms;

$n$  —— 型值点数。

2.1.2 约束条件 文中考虑插值点处的速度约束,如式(2)所示<sup>[11]</sup>。

$$V(u_i) = \min \left\{ \frac{2}{T_s} \sqrt{\rho_i^2 - (\rho_i - h_{max})^2}, \sqrt{\rho_i A_{n,max}} \right\}, \tag{2}$$

式中:

$V_{max}$  —— 运行最大速度, mm/s;

$\rho_i$  —— 曲率半径, mm;

$h_{max}$  —— 弓高误差,  $\mu\text{m}$ ;

$A_{n,max}$  —— 法向加速度对速度的最大限值,  $\text{mm/s}^2$ ;

$T_s$  —— 插补周期, ms。

#### 2.2 NURBS 曲线插补算法

NURBS 作为通用数学描述方法,用于生成和表示曲线、曲面。NURBS 曲线的一般形式定义如式(3)所示<sup>[12]</sup>。

$$F(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}, u \in [0,1], \quad (3)$$

式中:

$u$  —— 曲线的控制变量,  $u \in [0,1]$ ;

$n$  —— 插值点数;

$k$  —— 插值基函数次幂;

$\omega_i$  —— 权值因子,  $\omega_1 > 0, \omega_n > 0$ , 其余均  $\geq 0$ ;

$N_{i,k}(u)$  —— 基函数。

节点向量选择如式(4)所示<sup>[13]</sup>。

$$U = [u_0, u_1, \dots, u_k, u_{k+1}, \dots, u_n, u_{n+1}, \dots, u_{n+k+1}] \quad (4)$$

其中仅规定开始节点向量和终止节点向量的选择。通常选取  $u_0 = u_1 = \dots = u_k = 0, u_{n+1} = \dots = u_{n+k+1} = 1$ , 有许多方法可以选择中间  $n - k$  个向量。

$N_{i,k}(u)$  基函数有许多表达式, 文中采用 deBoor-Cox 递归定义, 如式(5)所示<sup>[14]</sup>。

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \\ N_{i,1}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+1} - u_i} N_{i,0}(u) + \frac{u_{i+2} - u}{u_{i+2} - u_{i+1}} N_{i+1,0}(u) \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+k}} N_{i+1,k-1}(u) \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 插补过程用  $t$  表示  $u$ , 然后对坐标点  $\{F(t_0), F(t_1), \dots, F(t_n)\}$  进行计算。

插补是通过弦长直线来近似曲线, 实际插补是求  $\Delta u$  的过程, 可用式(3)和式(6)获得所有插补点  $F(u_i)$ <sup>[15]</sup>。

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u \quad (6)$$

如前所述, 插补可以被视为将  $u$  看作是  $t$  的映射。同时, 由于采用了离散控制系统, 得到了这种形式的离散形式。文中采用二阶泰勒方法。

将  $u$  关于  $t$  的函数在时刻  $t_i$  处展开, 如等式(7)所示<sup>[16]</sup>。

$$u(t) = u(t_i) + u'(t_i)(t - t_i) + \frac{u''(t_i)}{2!}(t - t_i)^2 + O(t - t_i)^3 \quad (7)$$

由于插值时间非常短, 因此省略余项  $O(t - t_i)^3$ , 且取  $t = t_{i+1}$ , 插补周期  $T_s = t_{i+1} - t_i$ 。将式(7)变换为如式(8)所示<sup>[17]</sup>。

$$u(t_{i+1}) = u(t_i) + u'(t_i)T_s + \frac{u''(t_i)}{2!}T_s^2 \quad (8)$$

插补的关键是求  $u$  对于  $t$  的一阶导数和二阶导数。如式(9)所示, 速度可被视为曲线长度对时间的导数<sup>[18]</sup>。

$$V(u) = \left\| \frac{dF(u)}{dt} \right\| = \left\| \frac{dF(u)}{du} \right\| \frac{du}{dt} \quad (9)$$

如果已知当前插值点  $u_i$ , 则可以获得下一个时刻插

值点的坐标  $u_{i+1}$ 。其中  $u_i = u(t_i), u_{i+1} = u(t_{i+1})$  表示离散点的坐标, 计算如式(10)所示<sup>[19]</sup>。

$$u_{i+1} = u_i + \frac{V(u)T_s}{\|F'(u)\|} - \frac{V^2(u)T_s^2[F'(u) \cdot F''(u)]}{2\|F'(u)\|^4} \quad (10)$$

基于二阶泰勒展开法插补算法流程图如图 4 所示。

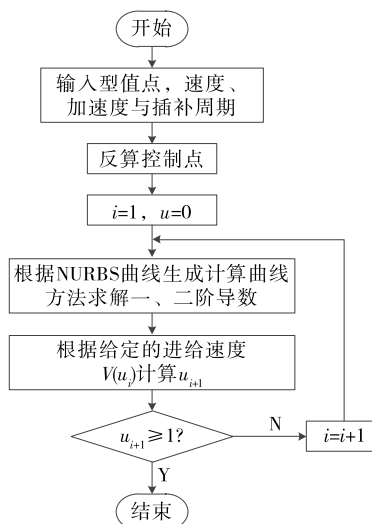


图 4 算法流程图

Figure 4 Algorithm flow chart

### 2.3 优化的 NURBS 曲线

为了规划一条平滑的轨迹并尽可能缩短完成任务所需的时间, 提出了一种通过改进遗传算法来优化 NURBS 曲线。文中采用一种改进的遗传算法来加速种群的进化, 可以取得更好的效果且降低运行时间。

2.3.1 初始化种群 初始种群分布要尽可能的均匀, 以覆盖所有类型的情况。这里, 使用累积弦长法根据式(11)生成初始种群<sup>[20]</sup>。

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_3 = 0 \\ u_{i+3} = u_{i+2} + \frac{\|P_i - P_{i-1}\| e_i}{\sum_{i=1}^{i-1} \|P_i - P_{i-1}\| e_i} \\ u_{n+3} = u_{n+4} = u_{n+5} = u_{n+6} = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$P_i$  —— 型值点;

$e_i$  —— 均匀递增的实数序列。

由式(11)可以得到种群的初始值, 分布也较为均匀。

2.3.2 优化交叉和变异概率 为了实现保留最优个体的目标, 需要遵守两个约束: ① 尽可能多地保留最优个体的基因来产生下一代, 确保优秀基因的遗传<sup>[21]</sup>; ② 优秀个体的变异概率要尽可能低, 以避免破坏优良基因<sup>[22]</sup>。为了满足上述两个条件, 对交叉和变异概率进行优化, 如式(12)和式(13)所示。

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f_{avg} - f'')}{f_{avg} - f_{min}}, f'' \leq f_{avg} \\ p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f_{avg} - f'')}{f_{max} - f_{min}}, f'' \leq f_{avg} \leq f' \\ p_{c1}, f'' \geq f_{avg} \end{cases} \quad (12)$$

$$p_m = \begin{cases} \frac{p_{m1}(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}}, f_{max} \geq f_{avg} \\ p_{m2}, f_{max} < f_{avg} \end{cases} \quad (13)$$

式中:

$p_{c1}$ 、 $p_{c2}$  —— 交叉概率;

$p_{m1}$ 、 $p_{m2}$  —— 变异概率;

$f_{max}$ 、 $f_{min}$  —— 种群个体的最大和最小适应度;

$f_{avg}$  —— 种群个体的平均适应度;

$f$  —— 变异个体的适应度;

$f'$ 、 $f''$  —— 选择个体中最大和最小适应度。

实现步骤:

步骤 1:对优化的问题进行描述,确定目的和适应度函数。

步骤 2:问题编码。选择适当的编码方法进行编码。

步骤 3:初始化。通过优化方式产生生成一个约定大小的种群。

步骤 4:计算适应度。计算群体中各染色体的适应度。

步骤 5:通过遗传操作(选择、交叉、变异),生成新的个体。

步骤 6:更新种群。将新产生的个体添加到种群中,并删除原个体以获得新的种群。

步骤 7:确定终止条件。新生成的种群用于确定是否满足预置的终止条件,满足则优化结束。否则,重复上述过程。优化算法流程图如图 5 所示。

### 3 仿真结果与分析

#### 3.1 仿真参数

为了评估所提规划方法的性能,验证所提方法的有效性,仿真设备为联想 PC,操作系统为 Windows 10 64 位旗舰,CPU 为 Intel I5 2450m,频率为 2.5 GHz,内存为 8 GB。利用仿真工具 MATLAB 完成仿真。如表 1 所示 NURBS 曲线参数(型值点和权值)。每个点的权重初始化为 1。

仿真过程中必须遵循一定的参数约束,具体参数约束情况如表 2 所示。

#### 3.2 仿真分析

采用改进遗传算法来优化 NURBS 曲线,对并联机器人进行轨迹规划仿真,并与改进后的 NURBS 曲线进行比较。通过插补点和权值产生 NURBS 曲线,采用二阶泰勒方法生成离散点信息,采用改进遗传算法优化 NURBS 曲线。不同规划算法的比较如图 6 所示。根据上述数据,

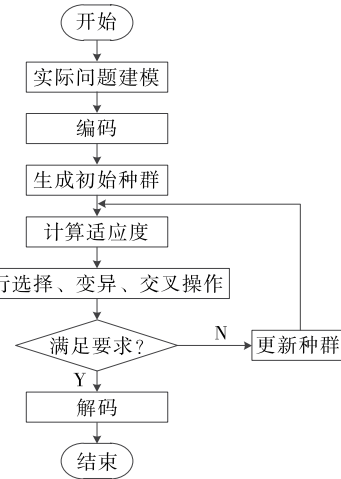


图 5 优化算法流程图

Figure 5 Flow chart of optimization algorithm

表 1 NUBRS 曲线参数

Table 1 NUBRS curve parameters

| 编号 | 型值点值               | 权值 |
|----|--------------------|----|
| 1  | (0,0,317.230 3)    | 1  |
| 2  | (40,56,317.230 3)  | 1  |
| 3  | (10,50,317.230 3)  | 1  |
| 4  | (0,68,317.230 3)   | 1  |
| 5  | (-10,50,317.230 3) | 1  |
| 6  | (-40,56,317.230 3) | 1  |
| 7  | (0,0,317.230 3)    | 1  |

表 2 约束情况

Table 2 Constraints

| 参数   | 符号        | 单位            | 数值  |
|------|-----------|---------------|-----|
| 进给速度 | $V_{max}$ | mm/s          | 100 |
| 弓高误差 | $h_{max}$ | $\mu\text{m}$ | 1   |
| 插补周期 | $T_s$     | ms            | 5   |

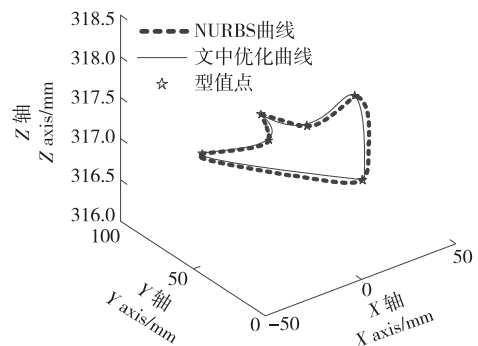


图 6 分拣机器人笛卡尔空间轨迹

Figure 6 Cartesian space trajectory of sorting robot

得到一条 NURBS 曲线,即图中的虚线。改进遗传算法优化的曲线为图中的实线。

从图 6 可以看出,优化前后的曲线都经过了类型值,

有效满足了笛卡尔空间的插补要求。优化后的规划轨迹更平滑、更短。通过运动学反解,将笛卡尔空间坐标信息转化为关节空间坐标信息。优化前关节空间曲线轨迹如图 7 所示。表 3 为通过型值点的时间(优化前)。图 8 为优化后关节空间曲线轨迹。表 4 为通过型值点的时间(优化后)。

由图 7 和图 8 可以看出,改进遗传算法优化后的关节空间机器人曲线比优化前的 NURBS 曲线更加平滑。由表 3 和表 4 可以看出,优化后机器人通过型值点的时间由 3 230 ms 降低到 3 070 ms,相比于优化前降低了

表 3 优化前关节型值点时间

Table 3 Joint type value point time before optimization

| 型值点 | 时间/s | 关节 1/(°) | 关节 2/(°) | 关节 3/(°) |
|-----|------|----------|----------|----------|
| 1   | 0.00 | 60.00    | 60.00    | 60.00    |
| 2   | 0.91 | 54.60    | 57.98    | 82.12    |
| 3   | 1.21 | 60.00    | 52.51    | 74.90    |
| 4   | 1.63 | 65.84    | 48.77    | 80.01    |
| 5   | 2.22 | 65.70    | 49.58    | 72.66    |
| 6   | 2.82 | 76.03    | 45.96    | 73.31    |
| 7   | 3.23 | 60.00    | 60.00    | 60.00    |

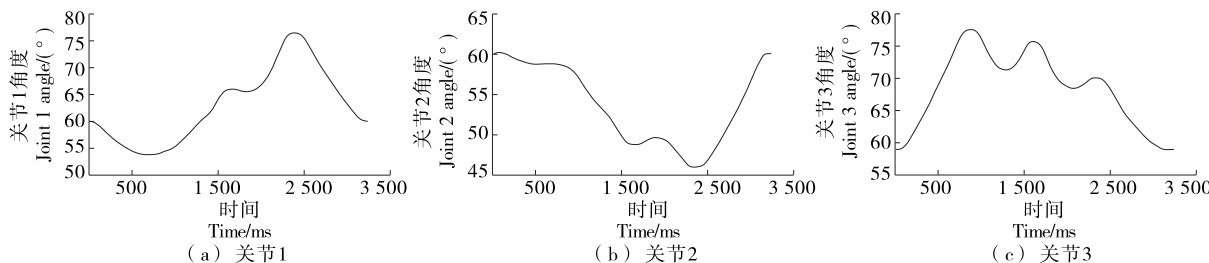


图 7 优化前分拣机器人关节空间角度变化

Figure 7 Changes of joint space angle of sorting robot before optimization

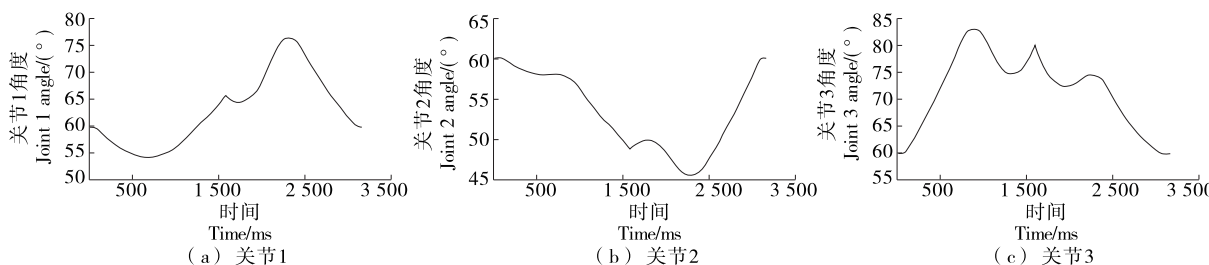


图 8 优化后分拣机器人关节空间角度变化

Figure 8 The joint space angle changes of the sorting robot after optimization

表 4 优化后关节型值点时间

Table 4 Optimized joint type value point time

| 型值点 | 时间/s | 关节 1/(°) | 关节 2/(°) | 关节 3/(°) |
|-----|------|----------|----------|----------|
| 1   | 0.00 | 60.00    | 60.00    | 60.00    |
| 2   | 0.85 | 54.60    | 57.98    | 82.12    |
| 3   | 1.11 | 60.00    | 52.51    | 74.90    |
| 4   | 1.55 | 65.84    | 48.77    | 80.01    |
| 5   | 2.10 | 65.70    | 49.58    | 72.66    |
| 6   | 2.75 | 76.03    | 45.96    | 73.31    |
| 7   | 3.07 | 60.00    | 60.00    | 60.00    |

160 ms,时间优化率提高了 5.0%左右。说明该轨迹规划方法可以有效地提高食品分拣机器人的稳定性和效率。

### 4 结论

文中以运行时间最优为目标,提出了一种结合 NURBS 插值算法和改进遗传算法的食品分拣机器人轨迹规划方法。采用改进的遗传算法优化 NURBS 曲线。结果表明,文中所提优化方法在关节空间的机器人曲线

比优化前更加平滑,运行时间从优化前的 3 230 ms 降低到优化后的 3 070 ms,在一定程度上提高了食品分拣机器人的稳定性和效率。文中食品分拣机器人的轨迹规划方法尚处于起步阶段,仅对轨迹规划方法进行仿真分析,后续将进行试验分析,不断提高轨迹规划方法的性能,完善食品分拣机器人系统。

### 参考文献

[1] 曾鹏, 万华森, 王一霖. 基于 Vanet 的无人驾驶动态路径规划算法研究[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(11): 2 055-2 062.  
 ZENG Peng, WAN Hua-sen, WANG Yi-lin. Research on unmanned dynamic path planning algorithm based on VANET[J]. Computer Engineering and Science, 2019, 41(11): 2 055-2 062.

[2] 彭晓燕, 谢浩, 黄晶. 无人驾驶汽车局部路径规划算法研究[J]. 农业装备与汽车工程, 2020, 42(1): 1-10.  
 PENG Xiao-yan, XIE Hao, HUANG Jing. Research on local path planning algorithm of driverless vehicle[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2020, 42(1): 1-10.

[3] 吴东林, 张玉华. 采摘机器人动态路径规划系统研究[J]. 农机

- 化研究, 2019, 12(6): 219-223.
- WU Dong-lin, ZHANG Yu-hua. Research on dynamic path planning system of picking robot[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2019, 12(6): 219-223.
- [4] 韩基伟, 孟钢钳. Delta 机构的装箱机器人的工作空间及轨迹规划[J]. *食品工业*, 2021, 42(3): 216-219.
- HAN Ji-wei, MENG Gang-tong. Workspace and trajectory planning of packing robot with delta mechanism[J]. *Food Industry*, 2021, 42(3): 216-219.
- [5] 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 Hao-yu, LIU Xiao-wei, REN Chuan, et al. Forward kinematics and NURBS trajectory planning of parallel robot[J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2021, 12(4): 282-292.
- [6] 刘现伟, 颀潭成, 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 Xian-wei, JIE Tan-cheng, XU Yan-wei, et al. Trajectory planning of delta robot based on superposition cycloid motion law[J]. *Manufacturing Automation Industry*, 2021, 43(6): 88-94.
- [7] 刘现伟, 颀潭成, 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 Xian-wei, JIE Tan-cheng, XU Yan-wei, et al. Trajectory planning of delta robot based on synthetic motion[J]. *Manufacturing Automation*, 2021, 43(7): 19-23, 47.
- [8] 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(3): 223-226.
- GUO Jun, WANG Xin. Trajectory planning of 3-PUU parallel robot for food picking and placing [J]. *Food Industry*, 2021, 42(3): 223-226.
- [9] 张蒙, 李亚娟, 邓重阳, 等. NURBS 曲线拟合的最小二乘渐迭代逼近优化算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2020, 32(4): 568-574.
- ZHANG Meng, LI Ya-juan, DENG Chong-yang, et al. Least squares asymptotic iterative approximation optimization algorithm for NURBS curve fitting[J]. *Journal of Computer Aided Design and Graphics*, 2020, 32(4): 568-574.
- [10] 乐英, 库巍, 卢艺, 等. 基于优化的六自由度工业机器人 NURBS 轨迹规划[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2017, 12(11): 41-43, 47.
- LE Ying, GU Wei, LU Yi, et al. NURBS trajectory planning of 6-DOF industrial robot based on optimization[J]. *Modular Machine Tools and Automatic Machining Technology*, 2017, 12(11): 41-43, 47.
- [11] 于文妍, 杨坤林. 四旋翼无人机串级模糊自适应 PID 控制系统设计[J]. *机械设计与制造*, 2019, 12(1): 227-231.
- YU Wen-yan, YANG Kun-lin. Design of cascade fuzzy adaptive PID control system for four rotor UAV[J]. *Mechanical Design & Manufacturing*, 2019, 12(1): 227-231.
- [12] 孔庆博, 袁亮, 蒋伟. 一种改进的工业机器人轨迹规划方法研究[J]. *机械传动*, 2019, 43(2): 30-36.
- KONG Qing-bo, YUAN Liang, JIANG Wei. An improved trajectory planning method for industrial robots[J]. *Mechanical Transmission*, 2019, 43(2): 30-36.
- [13] 孙瑛, 程文韬, 李公法, 等. 关节型机器人轨迹规划算法及轨迹规划研究现状[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2016, 13(28): 32-38.
- SUN Ying, CHENG Wen-tao, LI Gong-fa, et al. Research status of trajectory planning algorithm and trajectory planning for articulated robots[J]. *Journal of Yangtze University (Self Science Edition)*, 2016, 13(28): 32-38.
- [14] 郭瑞峰, 李岩鹤, 史世怀. 关节型码垛机器人轨迹规划及运动学研究[J]. *机械设计与制造*, 2017, 12(1): 76-82.
- GUO Rui-feng, LI Yan-he, SHI Shi-huai. Trajectory planning and kinematics of articulated palletizing robot[J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2017, 12(1): 76-82.
- [15] 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 Li-ping, WU De-gang. Apple grading algorithm based on Wavelet and fuzzy fusion[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(4): 142-145.
- [16] 项辉宇, 薛真, 冷崇杰, 等. 基于 Halcon 的苹果品质视觉检测试验研究[J]. *食品与机械*, 2016, 32(10): 123-126.
- XIANG Hui-yu, XUE Zhen, LENG Chong-jie, et al. Experimental study on visual inspection of apple quality based on Halcon[J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(10): 123-126.
- [17] JHA R, CHABLAT D, BARON L, et al. Workspace, joint space and singularities of a family of delta-like robot[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 127: 73-95.
- [18] HAO J L, XIE X L, BIAN G B, et al. Development and evaluation of a 7-DOF haptic interface[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 5(1): 261-269.
- [19] KERESZTES J C, GOODARZI M, SAEYS W. Real-time pixel based early apple bruise detection using short wave infrared hyperspectral imaging in combination with calibration and glare correction techniques[J]. *Food Control*, 2016, 66(1): 215-226.
- [20] 杨辰光, 李智军, 许扬. 机器人仿真与编程技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018: 45-49.
- YANG Chen-guang, LI Zhi-jun, XU Yang. Robot simulation and programming technology[M] Beijing: Tsinghua University Press, 2018: 45-49.
- [21] 杨欣潼, 张婷, 白丽平, 等. 社区居家养老服务的预约调度与路径规划问题研究: 基于改善蚁群算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(5): 1 212-1 224.
- YANG Xin-tong, ZHANG Ting, BAI Li-ping, et al. Research on appointment scheduling and path planning of community home care service: Based on improved ant colony algorithm[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2019, 39(5): 1 212-1 224.
- [22] 姚源果, 贺盛瑜. 基于交通大数据的农产品冷链物流配送路径优化研究[J]. *管理评论*, 2019, 31(4): 240-253.
- YAO Yuan-guo, HE Sheng-yu. Research on agricultural cold chain logistics distribution path optimization based on transportation big data[J]. *Management Review*, 2019, 31(4): 240-253.