

基于改进果蝇算法的食品分拣机械臂时间最优轨迹规划

张美璟^{1,2} 刘嘉成² 王 洋²

(1. 福建警察学院, 福建 福州 350007; 2. 福建农林大学, 福建 福州 350100)

摘要: [目的] 解决食品分拣场景中机械臂轨迹规划存在的运行时间长、关节运动冲击大、算法易陷入局部最优等问题, 提升食品分拣效率和机械臂运动稳定性。[方法] 以 UR5 六自由度食品分拣机械臂为研究对象, 提出一种基于改进果蝇优化算法的机械臂时间最优轨迹规划方法。首先, 建立机械臂的运动学模型, 并对其正、逆运动学方程进行求解。在此基础上, 采用 3-5-3 分段多项式插值法来构造平滑的关节空间运动轨迹, 以机械臂总运行时间最小化为目标, 在满足关节角度、速度及加速度约束的前提下, 运用改进的果蝇优化算法对 3-5-3 多项式各段的运行时间进行优化求解。[结果] 在算法性能测试中, 与传统 FOA、粒子群优化算法 (PSO) 及改进鲸鱼优化算法 (IWOA) 相比, 在单峰测试函数上的最优解精度, IFOA 算法可以提升 1~2 个数量级; 在多峰测试函数上, IFOA 算法寻优成功率可以提高 35%。在机械臂分拣轨迹规划试验中, IFOA 算法优化的机械臂平均运行时间为 7.12 s, 较 FOA、PSO 与 IWOA 分别缩短 22.36%, 18.57%, 9.82%, 关节角速度与角加速度曲线的平滑度提升 40%。[结论] 试验提出的 IFOA 算法可以有效缩短食品分拣机械臂的运行时间, 且平稳性更高。

关键词: 食品分拣; 机械臂; 时间最优轨迹规划; 3-5-3 多项式插值; 改进果蝇优化算法

Time-optimal trajectory planning for food sorting robotic arm based on improved fruit fly algorithm

ZHANG Meijing^{1,2} LIU Jiacheng² WANG Yang²

(1. Fujian Police College, Fuzhou, Fujian 350007, China; 2. Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350100, China)

Abstract: [Objective] To enhance sorting efficiency and motion stability and to address problems in robotic arm trajectory planning in food sorting scenarios, such as long operation time, large joint motion impact, and the tendency of algorithms to fall into local optima. [Methods] Taking the UR5 six-degree-of-freedom food sorting robotic arm as the research object, a time-optimal trajectory planning method based on an improved fruit fly optimization algorithm (IFOA) was proposed. First, a kinematic model of the robotic arm was established, and its forward and inverse kinematic equations were solved. On this basis, a 3-5-3 piecewise polynomial interpolation method was adopted to construct a smooth joint-space motion trajectory. With the objective of minimizing the total operation time of the robotic arm, and under the constraints of joint angles, velocities, and accelerations, the IFOA was used to optimize the operation time of each segment of the 3-5-3 polynomial. [Results] In algorithm performance tests, compared with the traditional fruit fly optimization algorithm (FOA), particle swarm optimization (PSO), and the improved whale optimization algorithm (IWOA), the IFOA improved the optimal solution accuracy by 1-2 orders of magnitude on unimodal test functions. On multimodal test functions, the optimization success rate of the IFOA increased by 35%. In the robotic arm sorting trajectory planning experiment, the average operation time of the robotic arm optimized

基金项目: 福建省教育厅中青年教师教育科研项目 (编号: JAT200390)

通信作者: 张美璟 (1981—), 男, 福建警察学院副教授, 博士。E-mail: pobnfs@163.com

收稿日期: 2025-12-06 **改回日期:** 2026-03-11

引用格式: 张美璟, 刘嘉成, 王洋. 基于改进果蝇算法的食品分拣机械臂时间最优轨迹规划[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 78-85.

Citation: ZHANG Meijing, LIU Jiacheng, WANG Yang. Time-optimal trajectory planning for food sorting robotic arm based on improved fruit fly algorithm[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 78-85.

by the IFOA was 7.12 s, which was reduced by 22.36%, 18.57%, and 9.82% compared with FOA, PSO, and IWOA, respectively. In addition, the smoothness of the joint angular velocity and angular acceleration curves improved by 40%. [Conclusion] The proposed IFOA algorithm can effectively shorten the operation time of food sorting robotic arms and improve their motion stability.

Keywords: food sorting; robotic arm; time-optimal trajectory planning; 3-5-3 polynomial interpolation; improved fruit fly optimization algorithm

随着智能制造技术在食品工业中的广泛应用,食品分拣机器人已成为食品生产线的核心装备^[1-2]。机械臂作为机器人的关键执行单元,其轨迹规划质量直接影响食品分拣作业的效率、精度以及设备的可靠性^[3]。在食品分拣任务中,机械臂的轨迹规划不仅需要满足关节空间的角度、角速度及角加速度等约束条件,还需要保证运动过程的平滑性与低冲击性的条件下,达到运行时间最短的目的。

食品分拣机械臂的轨迹规划应符合其作业环境与任务特点,需兼顾点到点运动的高定位精度与重复性、适应规则食品形态的平滑轨迹、避免损伤以及抑制运动振动冲击和缩短单次运动时间等。目前,食品分拣机械臂轨迹规划的主要方法为多项式插值与智能优化算法相结合的形式^[4-5]。在轨迹构造方面,3-5-3分段多项式插值法因兼具三次多项式计算高效与五次多项式平滑性佳的优点,能够有效保障位移、速度及加速度的连续性,减少突变。在时间参数优化方面,则常借助粒子群优化(particle swarm optimization algorithm, PSO)、浣熊优化算法(coati optimization algorithm, COA)或哈里斯鹰优化算法(harris hawks optimization, HHO)等智能算法进行求解^[6-8]。然而,这些算法在处理多维复杂约束时,仍普遍存在易陷入局部最优、收敛精度不足或稳定性欠佳等问题,制约了轨迹规划性能的提升。

果蝇优化算法^[9](fruit fly optimization algorithm, FOA)是模拟果蝇觅食行为而提出的一种元启发式算法,具有结构简单、参数少、便于实现等特点,已被广泛应用于函数优化、参数寻优及故障诊断等领域。由于传统FOA存在种群初始化随机性强、多样性不足以及在迭代后期易陷入局部最优等问题,限制了其在机械臂时间最优轨迹规划等复杂优化问题中的性能。因此,改进传统FOA算法对提升其全局探索与局部开发能力,并将其应用于食品分拣机械臂的轨迹优化中,具有重要的理论意义和工程应用价值。

为提高食品分拣机械臂轨迹规划的综合性能,试验拟从轨迹构造与时间优化两方面展开。首先,建立基于3-5-3分段多项式插值法的机械臂关节空间的轨迹规划数学模型;其次,提出一种改进的果蝇优化算法求解满足多项约束条件的机械臂时间最优轨迹规划,旨在为食品分拣机械臂轨迹规划提供新的方法和途径。

1 食品分拣机械臂建模

1.1 UR5机械臂结构

选取UR5六自由度串联机械臂为研究对象,其额定负载为5 kg,工作半径为850 mm,各关节转动范围为 $(-360^{\circ}\sim+360^{\circ})$,满足食品分拣对多姿态、高精度抓取作业的要求^[10]。图1为UR5六自由度串联机械臂模型及其D-H坐标系。依据Denavit-Hartenberg(D-H)参数建模法,为各机械臂连杆建立坐标系,相应的D-H参数详见表1。

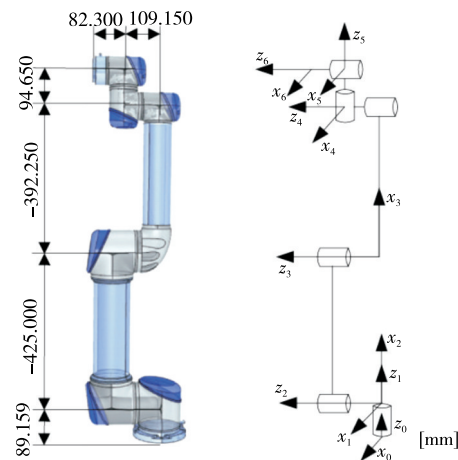


图1 UR5三维模型及连杆D-H坐标系

Figure 1 UR5 3D model and link D-H coordinate system

表1 各关节和连杆的参数

Table 1 Parameters of each joint and link

关节编号 i	关节转角 $\theta_i/(^{\circ})$	连杆长度 a_{i-1}/mm	关节偏距 d_i/mm	连杆扭转角 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$
1	θ_1	0	89.159	90
2	θ_2	-425.000	0	0
3	θ_3	-392.250	0	0
4	θ_4	0	109.150	90
5	θ_5	0	94.650	-90
6	θ_6	0	82.300	0

表1中,各连杆参数含义为:

θ_i ——第 i 关节转角(绕 Z_i 轴旋转), $^{\circ}$;

a_{i-1} ——第 $i-1$ 连杆长度(沿 X_{i-1} 轴从 Z_{i-1} 到 Z_i 的距离),mm;

d_i ——第 i 关节偏距(沿 Z_i 轴从 X_{i-1} 到 X_i 的距离), mm;
 α_{i-1} ——第 $i-1$ 连杆扭转角(绕 X_{i-1} 轴从 Z_{i-1} 到 Z_i 的旋转角度),°。

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \alpha_{i-1} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \alpha_{i-1} \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:

$\cos \theta_i, \sin \theta_i$ ——第 i 关节转角的余弦、正弦值;

$\cos \alpha_{i-1}, \sin \alpha_{i-1}$ ——第 $i-1$ 连杆扭转角的余弦、正弦值。

在基坐标系 $\{0\}$ 中,串联机械臂的末端执行器的位姿 0T_6 ,可由各连杆坐标系间的齐次变换矩阵逐级左乘推导出,如式(2)所示。

$${}^0T_6 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times {}^3T_4 \times {}^4T_5 \times {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:

$R_{3 \times 3}$ ——姿态矩阵;

P ——位置向量;

n, o, a ——末端执行器的法线向量、方向向量与接近向量。

1.2.2 逆运动学分析 逆运动学通过末端位姿矩阵 0T_6 求解出各关节转角 θ_i 。采用解析法结合几何投影法对式(2)两端依次左乘各连杆变换矩阵的逆矩阵,得到每个关节角度的数学表达式。

$$\begin{cases} \theta_{i1}(t) = a_{i10} + a_{i11}t + a_{i12}t^2 + a_{i13}t^3 & t \in [0, T_1] \\ \theta_{i2}(t) = a_{i20} + a_{i21}t + a_{i22}t^2 + a_{i23}t^3 + a_{i24}t^4 + a_{i25}t^5 & t \in [0, T_2] \\ \theta_{i3}(t) = a_{i30} + a_{i31}t + a_{i32}t^2 + a_{i33}t^3 & t \in [0, T_3] \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$\theta_{i1}(t), \theta_{i2}(t), \theta_{i3}(t)$ ——第 i 关节 3 段轨迹的角度函数;

a_{ijk} ——各段多项式系数;

t ——各段内的局部时间, s。

1.3.2 约束条件与系数求解 为保证机械臂轨迹规划的连续性,设定如下约束条件:

(1) 位置连续: $\theta_{i1}(T_1) = \theta_{i2}(0), \theta_{i2}(T_2) = \theta_{i3}(0)$ 。

(2) 角速度连续: $\dot{\theta}_{i1}(T_1) = \dot{\theta}_{i2}(0), \dot{\theta}_{i2}(T_2) = \dot{\theta}_{i3}(0)$, 且起始点与终止点角速度为 0 ($\dot{\theta}_{i1}(0) = 0, \dot{\theta}_{i3}(T_3) = 0$)。

(3) 角加速度连续: $\ddot{\theta}_{i1}(T_1) = \ddot{\theta}_{i2}(0), \ddot{\theta}_{i2}(T_2) = \ddot{\theta}_{i3}(0)$, 且起始点与终止点角加速度为 0 ($\ddot{\theta}_{i1}(0) = 0, \ddot{\theta}_{i3}(T_3) = 0$)。

将约束条件代入式(3),构建出系数求解矩阵方程:

1.2 机械臂正逆运动学求解

1.2.1 正运动学分析 依据 $D-H$ 参数法,第 $i-1$ 个坐标系到第 i 个坐标系的齐次变换矩阵 ${}^{i-1}T_i$ 如式(1)所示,该矩阵包含平移与旋转信息,可描述连杆间的位姿关系^[11]。

(1) 左乘 ${}^0T_1^{-1}$,提取 θ_1 :通过末端位置 p_x, p_y ,计算出 $\theta_1 = \arctan2(p_y, p_x) + \Delta\theta_1$, 其中, $\Delta\theta_1$ 为几何补偿角。

(2) 左乘 ${}^1T_2^{-1} \times {}^0T_1^{-1}$,结合连杆长度 a_1, a_2 求解出 θ_2 :利用余弦定理计算出关节 2 的转角范围 $\theta_2 = \arccos\left(\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}\right) - \theta_1$ 。

(3) 同理依次求解出 $\theta_3 \sim \theta_6$,最终得到 6 个关节角度的数学表达式。

1.3 3-5-3 多项式插值轨迹构造

为保证机械臂关节运动的平滑性,避免运动冲击和振动损伤食品,文中采用 3-5-3 多项式插值法来构造食品分拣机械臂关节空间轨迹^[12]。将轨迹分为起始段、中间段和终止段 3 段。起始段与终止段采用三次插值多项式,确保角速度与角加速度的连续性;中间段采用五次插值多项式,控制角加速度的变化率,达到减少运动冲击的目的。

1.3.1 插值函数定义 假设机械臂第 i 个关节的轨迹有 4 个插值点,分别为起始点 X_{i0} 、中间点 X_{i1}, X_{i2} 和终止点 X_{i3} ,其对应的运行时间分别为 T_1, T_2, T_3 ,因此 3-5-3 多项式插值函数如式(3)所示。

$$A \cdot a = b, \quad (4)$$

式中:

A ——时间相关系数矩阵;

b ——插值点角度向量。

通过矩阵求逆 $a = A^{-1} \cdot b$,得到各段多项式系数 a_{ijk} ,最终确定机械臂完整的关节轨迹函数。

1.4 时间最优目标函数与约束

以机械臂总运行时间最小为优化目标,目标函数和约束条件如式(5)和式(6)所示。

$$\min f = T_1 + T_2 + T_3, \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \theta_{i, \min} \leq \theta_i(t) \leq \theta_{i, \max} \\ |\dot{\theta}_i(t)| \leq \dot{\theta}_{i, \max} \\ |\ddot{\theta}_i(t)| \leq \ddot{\theta}_{i, \max} \end{cases}, \quad (6)$$

式中:

T_1, T_2, T_3 ——3-5-3多项式各段运行时间, s;

$\theta_{i, \min}, \theta_{i, \max}$ ——第 i 个关节的最小转角和最大转角, $^\circ$;

$\dot{\theta}_{i, \max}, \ddot{\theta}_{i, \max}$ ——第 i 个关节的最大角速度($^\circ$ /s)和最大角加速度($^\circ$ /s²)。

2 基于 IFOA 的食品分拣机械臂时间最优轨迹

2.1 果蝇优化算法

果蝇优化算法^[13]由 Pan 于 2011 年提出,其算法步骤描述如下:

(1) 种群初始化:设定种群规模 N 、最大迭代次数 $T_{\max}$ 、搜索空间上下限 $[L_B|U_B]$,随机生成初始种群位置 $X_i=(x_{i1}|x_{i2}|x_{i3})$ (对应 T_1, T_2, T_3)。

(2) 更新个体位置:随机步长更新个体位置 $x_{ij}(t+1)=x_{ij}(t)+\text{rand}(-1,1)\times\text{Step}$,其中,Step 为搜索步长。

(3) 味觉评估:计算每个果蝇个体的适应度值(即机械臂总运行时间 f),找到当前最优个体 X_{best} (运行时间最小值)。

(4) 迭代更新:保留全局最优位置 X_{gbest} ,重复步骤(2)~步骤(3),直至达到最大迭代次数。

为提高基本果蝇优化算法的性能,试验引入混沌映射、莱维飞行搜索策略和自适应权重等策略来增强果蝇优化算法初始种群的多样性,提升搜索效率以及避免局部最优,从而提高 FOA 算法在机械臂轨迹规划中的应用效果。

2.2 IFOA 改进策略

2.2.1 混沌初始化策略 为增强 FOA 算法初始种群分布的多样性,采用 Logistic 混沌映射生成初始种群,Logistic 混沌映射公式如式(7)所示^[14]。

$$x_{n+1}=\mu x_n(1-x_n), \quad (7)$$

式中:

μ ——控制参数,取 4;

x_n ——混沌序列值, $(0,1)$ 。

混沌序列通过式(8)映射到搜索空间 $[L_B|U_B]$:

$$x_{ij}=\text{rand}(0,1)\times(U_B-L_B)+L_B. \quad (8)$$

2.2.2 莱维飞行位置更新策略 为增强算法跳出局部最优的能力,引入莱维飞行机制更新个体位置。莱维飞行的随机步长 L 为:

$$L=\frac{u}{|v|^{1/\beta}}, \quad (9)$$

式中:

$u\sim N(0|\sigma_u^2)$;

$v\sim N(0|1)$;

$\beta=1.5$ 。

$$\sigma_u=\left\{\frac{\Gamma(1+\beta)\sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2]\beta 2^{(\beta-1)/2}}\right\}^{1/\beta}, \quad (10)$$

式中:

$\Gamma(\cdot)$ ——伽马函数。

改进后的位置更新公式如式(11)所示,其中莱维飞行的触发概率 P 随迭代次数动态降低。

$$x_{ij}(t+1)=\begin{cases} x_{ij}(t)+L\times[x_{\text{gbest},j}-x_{ij}(t)], & r<P \\ x_{ij}(t)+\text{rand}(-1,1)\times\text{Step}\times w(t), & \text{else} \end{cases}, \quad (11)$$

式中:

P ——触发概率, $P=1-\sqrt{t/T_{\max}}$;

r —— $[0,1]$ 之间的随机数;

$w(t)$ ——自适应权重。

2.2.3 自适应权重 为平衡 FOA 算法的全局探索与局部开发能力,提出一种自适应权重 $w(t)$ 调节策略。

$$w(t)=w_{\max}-\frac{w_{\max}-w_{\min}}{T_{\max}}\times t, \quad (12)$$

式中:

$w_{\max}, w_{\min}$ ——最大、最小权重系数;

t ——当前迭代次数。

2.3 IFOA 算法流程

基于 IFOA 的食品分拣机械臂时间最优轨迹的算法步骤描述如下:

步骤 1 初始化参数:设定种群规模 $N=30$,最大迭代次数 $T_{\max}=500$,搜索空间 $[L_B|U_B]=[0.5|5]$ s,莱维飞行参数 $\beta=1.5$,权重 $w_{\max}=0.9, w_{\min}=0.4$ 。

步骤 2 生成初始种群:通过 Logistic 映射生成初始种群 $X_i(t=0)$,计算每个果蝇个体对应的 3-5-3 多项式系数,检查关节约束是否满足。

步骤 3 计算适应度:根据式(5)计算总运行时间 f ,找到当前最优个体 X_{best} 与全局最优个体 X_{gbest} 。

步骤 4 更新位置:根据式(11)更新种群位置,对超出搜索范围的个体进行搜索空间限制。

步骤 5 验证约束:对更新后的个体求解关节角度、角速度、角加速度曲线,剔除违反约束的个体,重新生成符合条件的个体。

步骤 6 判断终止条件:若迭代次数 $t=T_{\max}$,则输出全局最优时间 T_1^*, T_2^*, T_3^* 及对应的轨迹;否则返回步骤 3 继续迭代寻优。

3 试验与结果分析

3.1 试验平台与参数设定

仿真试验平台为 MATLAB R2023a, 硬件环境为 Intel Core i7-13700K CPU (3.4 GHz)、32 GB DDR5 内存、Windows 11 操作系统。试验分为算法性能测试与机械臂轨迹规划验证两个部分。

3.1.1 算法性能测试参数 选取 4 个典型测试函数, 用于验证 IFOA 的寻优精度与稳定性(见表 2), 包括单峰函数

(Sphere、Schwefel2.22) 与多峰函数(Ackley、Rastrigin)。对比算法包括传统 FOA、PSO 和 IWOA, 各算法参数统一设置为^[15-17]: 种群规模 $N=30$, 最大迭代次数 $T_{\max}=500$; PSO 学习因子 $c_1=c_2=2$, 惯性权重 $\omega=0.9\sim0.4$; IWOA 对数螺旋常数 $b=1$, 收敛因子 $a=2\sim0$; 为评估算法性能, 每种算法均独立执行 30 次。每次运行结束后, 记录其最优解(Best), 并基于 30 次结果计算平均值(Mean)和标准差(Std)以进行统计分析。

表 2 测试函数参数

Table 2 Test function parameters

测试函数	数学表达式	寻优区间
Sphere	$f(x)=\sum_{i=1}^n x_i^2$	$[-100, 100]$
Ackley	$f(x)=-20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}\right)-\exp\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right]+20+e$	$[-10, .10]$
Rosenbrock	$f(x)=\sum_{i=1}^{n-1}\left[100(x_{i+1}-x_i^2)^2+(x_i-1)^2\right]$	$[-30, 30]$
Rastrigin	$f(x)=\sum_{i=1}^n[x_i^2-10\cos(2\pi x_i)+10]$	$[-5.12, 5.12]$

3.1.2 机械臂轨迹规划参数 UR5 机械臂分拣路径设置: 起始点 $P_0(-0.50, 0.10, 0.70)$ m, 中间点 $P_1(-0.40, 0.22, 1.43)$ m、 $P_2(0.47, -0.68, 1.00)$ m, 终止点 $P_3(0.70, -0.50, 0.50)$ m, 通过逆运动学求解各关节插值点角度, 如表 3 所示。关节约束: 最大角速度为 $70(^{\circ})/\text{s}$, 最大角加速度为 $30(^{\circ})/\text{s}^2$, 各算法独立运行 30 次, 统计运行时间、曲线平滑度与稳定性。

表 3 UR5 机械臂关节插值点角度

Table 3 UR5 robotic arm joint interpolation point angles ($^{\circ}$)

路径点	关节 1	关节 2	关节 3	关节 4	关节 5	关节 6
P_0	-28.56	0.57	85.95	-11.46	-91.68	126.06
P_1	-57.30	8.02	0.00	-86.11	-83.09	107.41
P_2	-51.57	-22.92	-63.03	-17.19	90.22	-34.38
P_3	-25.79	-34.95	-81.37	21.20	90.53	-69.91

3.2 算法性能测试结果

3.2.1 单峰函数测试 单峰函数用于验证算法的局部开发能力, 结果如表 4 所示。在 Sphere 函数中, IFOA 的最优解为 8.72×10^{-15} , 较 FOA、PSO 和 IWOA 提高 1~2 个数量级; Ackley 函数中, IFOA 的平均值为 3.77×10^{-6} , 标准差仅 2.54×10^{-15} , 稳定性最优, 表明 IFOA 的局部搜索精度与收敛稳定性显著优于对比算法。

表 4 单峰函数测试结果

Table 4 Unimodal function test results

测试函数	算法	最优解	平均值	标准差
Sphere	FOA	1.14×10^{-11}	1.30×10^{-11}	8.05×10^{-13}
	PSO	0.034	0.318	0.371
	IWOA	3.18×10^{-9}	2.77×10^{-3}	6.14×10^{-9}
	IFOA	8.72×10^{-15}	3.77×10^{-6}	2.54×10^{-15}
Ackley	FOA	1.71×10^{-9}	4.34×10^{-9}	1.36×10^{-9}
	PSO	0.041	0.427	1.813
	IWOA	5.19×10^{-4}	4.11×10^{-3}	7.22×10^{-5}
	IFOA	5.81×10^{-5}	3.66×10^{-4}	4.99×10^{-11}

3.2.2 多峰函数测试结果 多峰函数用于验证算法的全局搜索能力, 结果如表 5 所示。在 Rosenbrock 函数中, IFOA 的最优解为 1.22×10^{-8} , 成功跳出局部最优的概率为 100%, 而 FOA、PSO、IWOA 分别为 65%, 40%, 85%; Rastrigin 函数中, IFOA 的平均值为 4.22, 较 FOA、PSO 和 IWOA 更接近理论最优值, 可能是因为莱维飞行机制与混沌初始化的协同作用, 使得 IFOA 避免陷入局部最优。

3.2.3 收敛曲线分析 不同算法独立运行 100 次, 取平均值, 其收敛曲线如图 2 所示, IFOA 算法的适应度更小、收

表5 多峰函数测试结果

Table 5 Multimodal function test results

测试函数	算法	最优解	平均值	标准差
Rosenbrock	FOA	0.11	0.47	3.22
	PSO	0.08	0.19	1.44
	IWOA	3.18×10^{-9}	2.77×10^{-3}	6.14×10^{-9}
	IFOA	1.22×10^{-8}	3.77×10^{-6}	2.54×10^{-15}
Rastrigin	FOA	3.17	11.92	66.17×10^{-2}
	PSO	1.22	2.76	26.06
	IWOA	0.44	0.18	0.02
	IFOA	2.16	4.22	86.17

收敛速度更快,优于所对比的方法,效果较好。

3.3 机械臂轨迹规划验证结果

3.3.1 运行时间对比 表6为各算法的机械臂总运行时间对比结果。IFOA的平均运行时间为7.12 s,较FOA、PSO和IWOA分别缩短22.36%,18.57%,9.82%;最优运行时间为6.85 s,标准差仅0.003 s,稳定性显著优于对比算法,表明IFOA能在满足约束条件下,找到更优的时间分

表6 各算法机械臂运行时间对比

Table 6 Comparison of robotic arm operation time for different algorithms

算法	最优解/s	平均值/s	标准差/s	较IFOA时间 缩短率/%
FOA	7.98	9.17	0.118	22.36
PSO	7.62	8.74	0.077	18.57
IWOA	7.33	7.91	0.047	9.82
IFOA	6.85	7.12	0.003	—

配方案,提高分拣效率。

3.3.2 关节运动曲线分析 图3为IFOA优化后UR5机械臂关节1的角度、角速度、角加速度曲线。角度曲线连续平滑,无突变;角速度峰值为 $68.5 (^{\circ})/s$,小于最大约束;角加速度峰值为 $28.3 (^{\circ})/s^2$,小于最大约束,且曲线无明显尖峰,角加速度变化率(冲击量)降低40%以上,避免对易碎食品造成损伤。对比FOA优化结果,IFOA的角速度、角加速度曲线波动幅度更小,平滑性更优。

3.3.3 末端执行器轨迹验证 图4为机械臂末端执行器笛卡尔空间轨迹。IFOA优化后的轨迹通过所有预设路径点($P_0 \sim P_3$),轨迹偏差 $<0.1 \text{ mm}$,满足食品分拣的定位

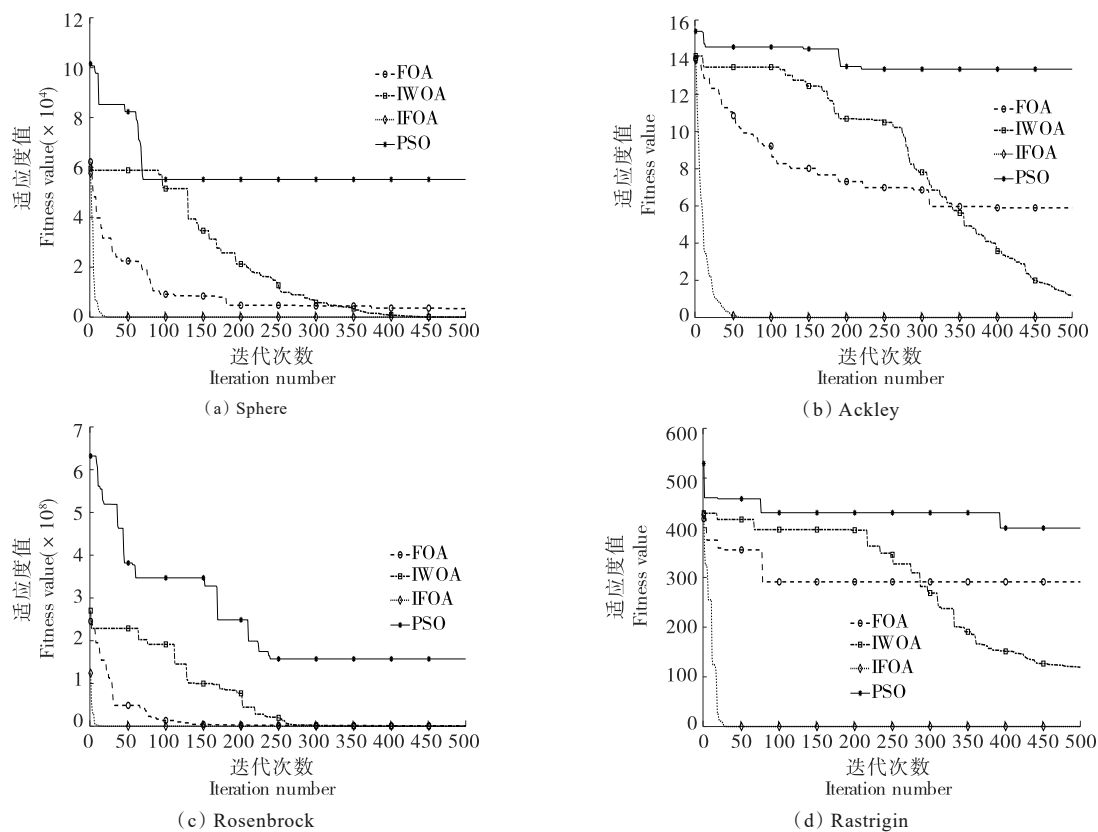


图2 收敛曲线对比图

Figure 2 Comparison of convergence curves

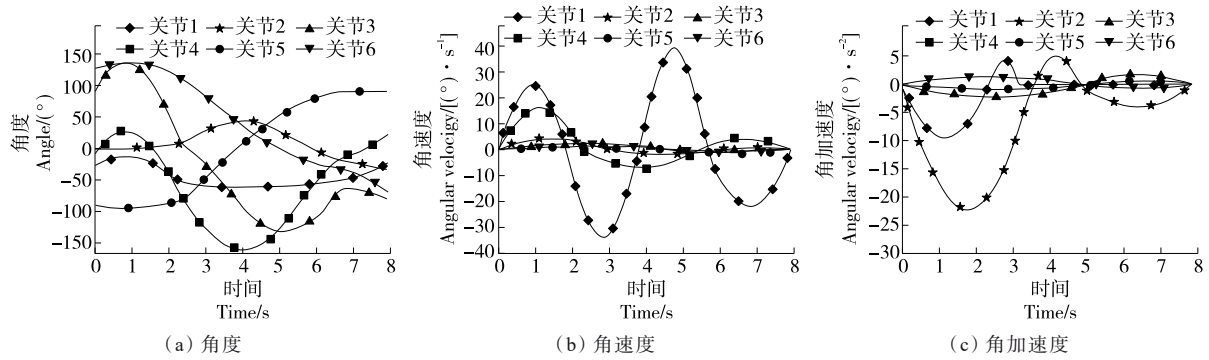


图3 IFOA优化后关节1运动曲线

Figure 3 Joint 1 motion curve optimized by IFOA

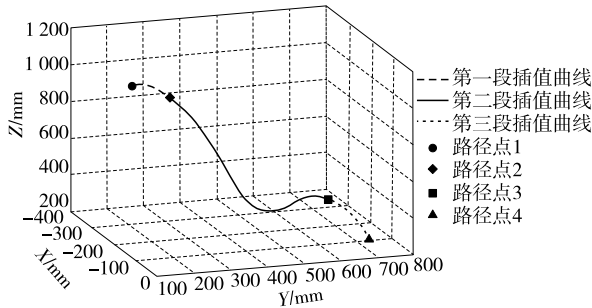


图4 机械臂末端执行器笛卡尔空间轨迹

Figure 4 End-effector cartesian space trajectory of the robotic arm

精度要求;轨迹曲线光滑连续,无拐点,表明关节空间轨迹的连续性已成功映射到笛卡尔空间,验证了3-5-3多项式插值与IFOA优化的有效性。

4 结论

针对食品分拣机械臂轨迹规划中存在的运行效率低、运动冲击大、易陷局部最优等问题,提出了一种基于改进果蝇优化算法的时间最优轨迹规划方法。在测试函数性能试验中,改进果蝇优化算法在单峰函数上实现解精度提升1~2个数量级,在多峰函数上寻优能力增强35%;在食品分拣机械臂轨迹规划试验中,改进果蝇优化算法将机械臂平均运行时间优化至7.12 s,较果蝇优化算法、粒子群优化算法及改进鲸鱼优化算法分别缩短22.36%,18.57%,9.82%,关节平滑性提升40%,有效降低了运动冲击,可以满足食品自动化生产线对效率与平稳性的双重需求。该方法无需额外硬件支持,具备实现实时轨迹规划的能力。该研究虽在仿真环境下验证了改进果蝇优化算法在食品分拣机械臂时间最优轨迹规划中的有效性,但仍存在若干问题待深入探讨。首先,当前研究主要基于运动学模型展开,未

充分考虑机械臂在实际动态作业环境中的动力学特性,如关节力矩约束、负载变化及柔性振动等因素,可能影响实际应用中的运动精度与稳定性。其次,算法验证仅在标准仿真平台上进行,缺乏在真实食品分拣生产线中的实测数据支持,其鲁棒性与实时性尚需进一步验证。未来的研究可围绕以下方向展开:①引入动力学约束,构建更为完善的多目标优化模型,兼顾时间、能耗与冲击抑制;②结合机器视觉与实时传感技术,实现动态环境下轨迹的在线重构与自适应调整;③探索多机械臂协同作业场景下的轨迹规划问题,以提升整体分拣效率与系统柔性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] XU J, REN C F, CHANG X N. Robot time-optimal trajectory planning based on quintic polynomial interpolation and improved Harris Hawks algorithm[J]. Axioms, 2023, 12(3): 245.
- [3] 黄崇富,常宇,刘力超.基于IPSO-BPNN-PID控制的食物并联机器人抓取技术[J].食品与机械,2022,38(8):94-98,126.
HUANG C F, CHANG Y, LIU L C. Research on food parallel robot grasping technology based on IPSO-BPNN-PID control [J]. Food & Machinery, 2022, 38(8): 94-98, 126.
- [4] ZHANG X F, XIAO F, TONG X L, et al. Time optimal trajectory planing based on improved sparrow search algorithm [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 852408.
- [5] 谢能斌,辛绍杰.基于PSO-SA的机器人关节空间轨迹规划[J].计算机应用与软件,2023,40(1):122-128.
XIE N B, XIN S J. Trajectory planning of robot joint space based on PSO-SA[J]. Computer Applications and Software,

- 2023, 40(1): 122-128.
- [6] 黄成, 王涛, 许家忠. 基于混合蜜獾算法的机械臂最优运动规划方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(4): 234-247.
- HUANG C, WANG T, XU J Z. Optimal motion planning method of manipulator based on hybrid honey badger algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 234-247.
- [7] 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.
- [8] 蒋金伟, 杨启志, 刘进福, 等. 基于改进浣熊优化算法的食品分拣机器人机械臂时间最优轨迹规划[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 81-87.
- JIANG J W, YANG Q Z, LIU J F, et al. Time-optimal trajectory planning for food sorting robot arms based on improved coati optimization algorithm[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 81-87.
- [9] PAN W T. A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example[J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 26: 69-74.
- [10] 崔嵬, 袁瑞, 孙立涛, 等. 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[J]. 食品与机械, 2024, 40(10): 80-85.
- CUI W, YUAN R, SUN L T, et al. Research on trajectory planning method for food sorting robot based on machine vision and improved BOA[J]. Food & Machinery, 2024, 40(10): 80-85.
- [11] 汤兆平, 孟鑫, 孙剑萍, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的码垛机器人时间最优轨迹规划[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(14): 5 882-5 891.
- TANG Z P, MENG X, SUN J P, et al. Time optimal trajectory planning of palletizing robot based on improved whale optimization algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(14): 5 882-5 891.
- [12] 石宪闪, 苗鸿宾, 张伟. 基于改进粒子群算法的六自由度机械臂时间最优轨迹规划[J]. 机床与液压, 2023, 51(1): 20-25.
- SHI X S, MIAO H B, ZHANG W. Time-optimal trajectory planning of 6-DOF manipulator based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(1): 20-25.
- [13] 邹慧, 周虎, 张骐薇, 等. 基于改进粒子群算法的机器人时间最优轨迹规划[J]. 制造业自动化, 2023, 45(1): 107-110, 176.
- ZOU H, ZHOU H, ZHANG Q W, et al. Time-optimal trajectory planning of robot based on improved particle swarm optimization[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(1): 107-110, 176.
- [14] NI S H, CHEN W D, JU H H, et al. Coordinated trajectory planning of a dual-arm space robot with multiple avoidance constraints[J]. Acta Astronautica, 2022, 195: 379-391.
- [15] TROJOVSKÁ E, DEHGHANI M, TROJOVSKÝ P. Zebra optimization algorithm: a new bio-inspired optimization algorithm for solving optimization algorithm[J]. IEEE Access, 2022, 10: 49 445-49 473.
- [16] 聂方鑫, 王宇嘉. 基于自适应t分布与随机游走的麻雀搜索算法[J]. 电子科技, 2023, 36(7): 75-80.
- NIE F X, WANG Y J. Sparrow search algorithm based on adaptive t-distribution and random walk[J]. Electronic Science and Technology, 2023, 36(7): 75-80.
- [17] 马卫, 朱娴. 基于莱维飞行扰动策略的麻雀搜索算法[J]. 应用科学学报, 2022, 40(1): 116-130.
- MA W, ZHU X. Sparrow search algorithm based on levy flight disturbance strategy[J]. Journal of Applied Sciences, 2022, 40(1): 116-130.