

基于改进海狸算法的食品分拣机器人机械臂时间最优轨迹规划

王亚辉¹ 张国伟¹ 马倩² 黄丽芳³

(1. 晋中职业技术学院, 山西 晋中 030600; 2. 山西工程技术学院, 山西 阳泉 045000; 3. 中北大学, 山西 太原 030051)

摘要: [目的] 提高食品分拣机器人运行稳定性和时间最优轨迹规划求解效率。[方法] 提出一种基于改进海狸算法的食品分拣机器人时间最优轨迹规划方法。以 UR10e 分拣机器人六自由度机械臂为研究对象, 构建基于 4-5-4 多项式插值的时间最优约束优化模型; 引入自适应海狸种类划分、种群空间指向性进化和全局跳跃策略对海狸算法进行改进, 有效均衡算法全局探索广度和局部搜索精细, 并应用于机械臂关节轨迹规划优化模型; 利用 MATLAB 仿真平台和搭建鸡蛋分拣试验平台验证所提方法可行性。[结果] 所提方法可使运行时间降低 5.67%~10.49%, 试验平台测试结果与仿真结果误差在 2.0% 以下, 验证了真实环境下平稳运行的可行性。[结论] 所提方法能够较大幅度缩短食品分拣机器人轨迹运行时间。

关键词: 分拣机器人; 机械臂; 海狸算法; 轨迹规划; 时间最优

Time-optimal trajectory planning for food sorting robots based on an improved beaver algorithm

WANG Yahui¹ ZHANG Guowei¹ MA Qian² HUANG Lifang³

(1. Jinzhong Vocational and Technical College, Jinzhong, Shanxi 030600, China; 2. Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi 045000, China; 3. North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract: [Objective] To enhance the operational stability of food sorting robots and the efficiency of time-optimal trajectory planning. [Methods] A time-optimal trajectory planning method for food sorting robots based on an improved beaver algorithm (BA) is proposed. First, with the six-degree-of-freedom robotic arm of the sorting robot as the research object, a time-optimal constrained optimization model based on 4-5-4 polynomial interpolation is established. Secondly, the BA is improved by introducing adaptive beaver species classification, population spatial directional evolution, and global jump strategy, effectively balancing the global exploration breadth and local search fineness of the algorithm. The improved BA is then applied to the optimization model of robotic arm joint trajectory planning. Finally, the MATLAB simulation platform and a physical platform built for egg sorting are employed to verify the feasibility of the proposed method. [Results] The proposed method reduces the running time by 5.67%~10.49%, and the error between the test results of the experimental platform and the simulation results is below 2.0%, verifying the feasibility of stable operation in the real environment. [Conclusion] The proposed method can significantly reduce the trajectory running time of food sorting robots.

Keywords: sorting robot; mechanical arm; beaver algorithm; trajectory planning; optimal time

食品分拣机器人作为一种集成机械臂、传感器以及视觉识别技术的自动化装备, 具有分拣效率高、错误率低、适应强等特点^[1-2], 已成为现代食品生产的关键核心。

分拣机器人机械臂移动轨迹决定了系统的控制精度和运行稳定性, 基于时间最优的轨迹规划问题是当前研究的热点; 蒋金伟等^[3]采用改进浣熊优化算法对机械臂 3-

基金项目: 教育部信息化教指委数字化转型研究项目(编号:KT22122); 山西省教育厅教育改革与实践研究项目(编号:202403017)

通信作者: 王亚辉(1978—), 男, 晋中职业技术学院副教授, 硕士。E-mail: vbfsgluck@qq.com

收稿日期: 2026-01-20 **改回日期:** 2026-04-14

引用格式: 王亚辉, 张国伟, 马倩, 等. 基于改进海狸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, 2026, 42(4): 103-110.

Citation: WANG Yahui, ZHANG Guowei, MA Qian, et al. Time-optimal trajectory planning for food sorting robots based on an improved beaver algorithm[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 103-110.

5-3 混合多项式插值轨迹进行最优时间优化,机械臂运行时间缩短了 14.58%;田国富等^[4]利用高阶 NURBS 曲线构建机械臂关节轨迹,并采用改进的群智能算法优化求解,较大程度提高了机械臂工作效率;冉睿等^[5]提出了一种基于改进灰狼算法的机械臂轨迹规划方法,该方法采用贪婪策略提升灰狼算法收敛性能,减少了机械臂运行时间;马艳艳等^[6]采用五次多项式插值函数规划机械臂轨迹,使得机械臂能够按照预期精度平稳运行;郭北海等^[7]将改进鲸鱼优化算法与 3-5-3 多项式相结合,优化后的机械臂运行轨迹时间消耗比减少了 70.6%。大量研究成果证明了机械臂时间最优轨迹规划能够提升运行效率,而且“拟合曲线构建轨迹+群智能算法优化时间模型”的模式可以明显提高求解效率,为机械臂执行高重复性食品分拣任务提供了可靠的解决方案^[8],但也存在需要重点关注的问题:① 低次多项式插值存在加速度不连续、容易产生冲击的缺陷;高次多项式插值计算量大,易出现剧烈振荡;② 群智能算法还存在局部搜索能力弱、全局收敛精度不高等问题,影响了轨迹规划计算效率和运动平滑性。

为此,对六自由度食品分拣机器人机械臂轨迹规划问题进行研究,提出一种基于改进海狸算法的食品分拣机器人时间最优轨迹规划方法,采用 4-5-4 多项式插值函数构建机械臂关节运动轨迹,实现角位移、角速度、角加速度连续平稳运行;设计自适应海狸种类划分、种群空间指向性进化和全局跳跃策略,对海狸算法 (beaver algorithm, BA)^[9] 进行改进,并利用改进 BA 算法

(improved BA, IBA) 求解时间最优轨迹规划模型;利用 MATLAB 仿真平台和实验室搭建的试验平台验证所提方法理论的有效性和实际操作可行性,旨在为食品企业自动化生产提供可靠技术方案。

1 食品分拣机器人机械臂运动学模型

1.1 机械臂运动参数

食品分拣机器人机械臂往往需要沿着设定的轨迹运行,建立机械臂运动学模型是实现运动轨迹精确控制的基础^[10]。以 UR10e 协作机器人手臂为研究对象,为方便问题描述,定义基座为 0 号杆,对 6 个连杆按 1~6 的顺次编号,采用 Dengler-Hartenberg (D-H) 法^[11] 建立如图 1 所示的连杆坐标系,各关节 DH 参数如表 1 所示。

根据图 1、表 1,定义 D-H 中相邻连杆位姿变换矩阵 ${}^{i-1}T_i (i=1, \dots, 6)$, 联立 ${}^5T_6, {}^4T_5, {}^3T_4, {}^2T_3, {}^1T_2, {}^0T_1$ 可以得到机械臂末端相对于基坐标系的正运动学位姿变换矩阵 0T_6 。

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

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:

${}^{i-1}T_i$ ——相邻连杆位姿变换矩阵 ($i=1, \dots, 6$);

θ_i ——关节角度, rad;

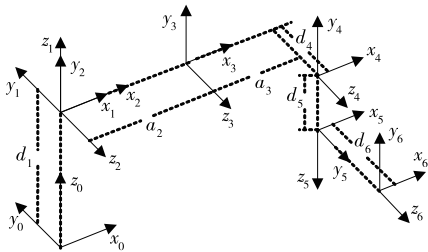


图 1 UR10e 机械臂模型和连杆坐标系

Figure 1 UR10e robotic arm model and link coordinate system

表 1 UR10e 机械臂 D-H 参数

Table 1 D-H Parameters of UR10e robotic arm

关节 (i)	连杆偏移量 (d_i)/mm	连杆长度 (a_i)/mm	扭转角 (α_i)/rad	关节角度 (θ_i)/rad	关节角范围/ rad	最大角速度/ (rad·s ⁻¹)	最大角加速度/ (rad·s ⁻²)
1	180.70	0	$\pi/2$	θ_1	$\pm 2\pi$	$\pm 2\pi/3$	$\pm 5\pi/6$
2	0	-612.70	0	θ_2	$\pm 2\pi$	$\pm 2\pi/3$	$\pm 5\pi/6$
3	0	-517.55	0	θ_3	$\pm 2\pi$	$\pm \pi$	$\pm \pi$
4	174.15	0	$\pi/2$	θ_4	$\pm 2\pi$	$\pm \pi$	$\pm \pi$
5	119.85	0	$-\pi/2$	θ_5	$\pm 2\pi$	$\pm \pi$	$\pm \pi$
6	116.55	0	0	θ_6	$\pm 2\pi$	$\pm \pi$	$\pm \pi$

d_i ——连杆偏移量, mm;
 a_i ——连杆长度, mm;
 α_i ——扭转角, rad;
 $R_{3 \times 3}$ ——旋转矩阵(参考文献[12]推导计算);
 P ——位置向量。

根据正运动学变换矩阵 0T_6 , 逆向递推得到机械臂关节角度, 该过程可能会得到多个关节角度解, 定义逆运动学关节角度限制范围, 剔除不可行解并选择最佳可行关节角度。

1.2 4-5-4多项式插值

合理的多项式插值阶数能够降低机械臂关节抖动和计算复杂度, 确保关节角速度、角加速度连续平稳。在参考大量多项式插值应用的基础上, 采用4-5-4多项式插值规划关节轨迹。假设已知机械臂的起点、终点以及两个路径点, 则第*i*个($i=1, \dots, 6$)关节的4-5-4多项式插值数学描述为:

$$\begin{cases} \theta_{i1}(t) = a_{i10} + a_{i11}t + a_{i12}t^2 + a_{i13}t^3 + a_{i14}t^4 \\ \theta_{i2}(t) = a_{i20} + a_{i21}t + a_{i22}t^2 + a_{i23}t^3 + a_{i24}t^4 + a_{i24}t^5 \\ \theta_{i3}(t) = a_{i30} + a_{i31}t + a_{i32}t^2 + a_{i33}t^3 + a_{i33}t^4 \end{cases}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \theta_{i1}(t_1) = \theta_{i2}(0), \theta_{i2}(t_2) = \theta_{i3}(0) \\ \dot{\theta}_{i1}(0) = 0, \dot{\theta}_{i1}(t_1) = \dot{\theta}_{i2}(0), \dot{\theta}_{i2}(t_2) = \dot{\theta}_{i3}(0), \dot{\theta}_{i3}(t_3) = 0, \\ \ddot{\theta}_{i1}(0) = 0, \ddot{\theta}_{i1}(t_1) = \ddot{\theta}_{i2}(0), \ddot{\theta}_{i2}(t_2) = \ddot{\theta}_{i3}(0), \ddot{\theta}_{i3}(t_3) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$\theta_{ij}(t)$ ——关节*i*对应第*j*($j=1, 2, 3$)阶段插值函数, rad;

a_{ijk} ——关节*i*对应第*j*阶段的第*k*项系数;

t_j ——第*j*阶段运行时间, s;

$\dot{\theta}_i$ ——关节*i*的角速度, rad/s;

$\ddot{\theta}_i$ ——关节*i*的角加速度, rad/s²。

式(3)给出了3个约束条件, 即各关节在起始点和到达终点时的速度、角速度和角加速度都为零, 中间路径点的速度、加速度保持连续。根据约束条件, 推导式(3)可得到4-5-4多项式系数, 进而得到6个关节运动学方程。

2 改进海狸算法(IBA)

BA是2025年才被提出的一种群智能启发式算法, BA模拟海狸群体协同作业生物学行为, 赋予海狸3种角色: 质检狸、开发狸和采伐狸, 不同属性的海狸采用不同的进化方式, 相互协作最终找到最优解。为进一步平衡全局探索广度和局部搜索精细度, 采用自适应海狸种类划分、种群空间指向性进化和全局跳跃策略对BA进行改进(BA基本原理不再赘述)。

2.1 自适应海狸种类划分

BA定义开发狸 X_K 、采伐狸 X_C 和质检狸 X_Z 的数量分别为 $2N/3$ 、 $N/6$ 、 $N/6$ (N 为种群规模), 是固定的, 影响了算法收敛速度和收敛精度。为此, 定义海狸种类自适应

划分策略: t 时刻, 按照海狸目标函数值优劣排序, 将前 $N_Z(t)$ 个划分为质检狸, 后 $N_K(t)$ 个划分为开发狸, 剩余 $N_C(t)$ 个采伐狸, 并根据式(4)~式(6)计算 $N_Z(t)$ 、 $N_K(t)$ 、 $N_C(t)$ 。

$$N_C(t) =$$

$$\left\lfloor N \times \left(\frac{\lambda_1 \times \left(\left(\sum f(X) \right) / N - f(X_b) \right)}{\left(f(X_w) - f(X_b) + \xi \right) \times (1 + t/T_{\max})} + \lambda_2 \right) \right\rfloor, \quad (4)$$

$$N_K(t) = \lfloor N_C(t) / 4 \rfloor, \quad (5)$$

$$N_Z(t) = N - N_C(t) - N_K(t), \quad (6)$$

式中:

$\lambda_1, \lambda_2, \xi$ ——常数, $\lambda_1 \in [0.1, 0.5]$, $\lambda_2 \in [0.05, 0.25]$, $\xi =$

0.0001;

$f(X)$ ——海狸 X 的目标函数值;

X_b ——当前最优解;

X_w ——当前最差解;

$T_{\max}$ ——最大迭代次数。

从式(4)~式(6)可知, IBA结合进化程度, 自适应调整不同种类海狸数量: 算法初期, 使用更多数量的开发狸在解空间内进行搜索探索, 利于算法提升收敛速度; 算法后期, 有更多的质检狸在局部空间内精细探索, 利于提高算法收敛精度。

2.2 种群空间指向性进化

BA定义 X_C 采用锦标赛的形式, 随机选择两个不同质检狸中目标函数值更优的作为学习对象, 这种更新策略忽略了种群个体空间位置属性, 具有一定的盲目性: 若被选中的质检狸距离自身很近, 则导致“进化程度”较小, 特别的, 当被选中的质检狸处于局部极值附近时, 很容易使算法陷入局部最优。为此, 定义种群空间指向性进化策略: t 时刻, 计算 X_C 与所有质检狸的空间距离 $D_{C,Z}$, 按照 $D_{C,Z}$ 从大到小的顺序排列质检狸; 随机选择前 $n(t)$ 个中的两个质检狸, 并以目标函数值更优的个体为学习对象。采伐狸 X_C 更新公式为:

$$\Delta_1 = \max \left(x_j^{\min}, x_{C,j} - \sin \left(\frac{f(X_C^Z)}{f(X_C)} \right) \times \frac{x_j^{\max} - x_j^{\min}}{10} \right),$$

$$\Delta_2 = \min \left(x_j^{\max}, x_{C,j} + \sin \left(\frac{f(X_C^Z)}{f(X_C)} \right) \times \frac{x_j^{\max} - x_j^{\min}}{10} \right), \quad (7)$$

$$x_{C,j}(\text{new}) = \Delta_1 + \varphi \times (\Delta_2 - \Delta_1), \quad (8)$$

$$n(t) = n'_Z \times (\omega \times (1 - t/T_{\max})), \quad (9)$$

式中:

$x_j^{\max}, x_j^{\min}$ ——解空间第*j*维度上、下限;

$x_{C,j}$ —— X_C 第*j*维大小;

X_C^Z —— X_C 按照种群空间指向性进化选择的学习对象;

$x_{C,j}(\text{new})$ ——更新后 X_C 第*j*维大小;

φ, ω ——比例系数, $\varphi = 0.15, \omega = 0.98$;

n'_z ——当前质检狸个数;

$n(t)$ ——当前采伐狸候选进化目标规模。

种群空间指向性进化策略使得采伐狸尽可能选择远离自己的质检狸为进化目标,增大了算法跳出局部极值的可能,而且结合进化程度,算法自适应调整采伐狸候选进化目标规模,利于算法加速收敛。

2.3 全局跳跃策略

BA 定义 X_z 选择 X_b 为学习对象,使得算法能够更快地向最优解靠拢,但是,随着迭代次数增加,种群多样性加速降低,不利于算法提高收敛精度。为此,定义全局跳跃策略:随机选择 X_z ,并依据式(10)进化更新。

$$X_z(\text{new}) = X_z + \chi \times r_1 \left((r_2 \times (2X_b - X_z) - X_z) - X_z \right), \quad (10)$$

式中:

χ ——加权系数, $\chi = 1.22$;

r_1, r_2 ——取值为 $[0, 1]$ 的随机数。

全局跳跃策略增加了种群多样性,即使在算法后期,IBA 仍能够在较大的空间搜索,使得算法收敛精度更高。为验证 IBA 收敛性能,利用 CEC2005 测试函数进行试验,对比算法为 BA、混合改进鲸鱼优化算法(HIWOA)^[13]和自适应乌鸦搜索算法(ACSA)^[14],图2给出了其中4种函

数的收敛曲线。

由图2可知,相比于BA、HIWOA、ACSA,IBA收敛精度更高、收敛速度更快。

2.4 IBA 优化时间最优轨迹规划模型

以时间最优为优化目标,构建如式(11)所示的关节轨迹规划模型。

$$f = \min(t_1 + t_2 + t_3) \quad \text{s.t.} \begin{cases} \theta_{i,\min} \leq \theta_i(t) \leq \theta_{i,\max} \\ |\dot{\theta}_i(t)| \leq \dot{\theta}_{i,\max} \\ |\ddot{\theta}_i(t)| \leq \ddot{\theta}_{i,\max} \end{cases}, \quad (11)$$

式中:

$\theta_{i,\max}, \theta_{i,\min}$ ——关节 i 的角度限制;

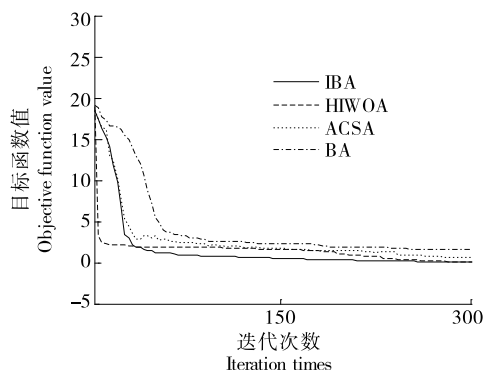
$\dot{\theta}_{i,\max}$ ——关节 i 的最大角速度, rad/s;

$\ddot{\theta}_{i,\max}$ ——关节 i 的最大角加速度, rad/s²。

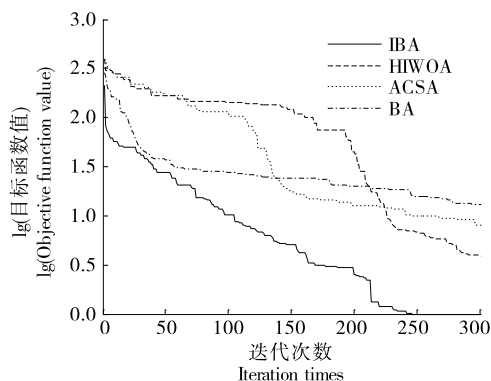
采用 IBA 对式(11)进行优化求解,确保机械臂在约束条件下,用最短时间完成轨迹。图3给出了 IBA 优化求解模型流程图。

3 仿真与试验验证

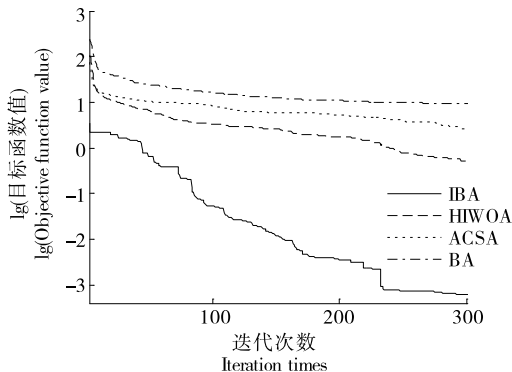
以某食品企业鸡蛋原材料分拣为应用场景,UR10e 机械臂末端配置工业真空鸡蛋吸盘,可一次性从蛋托中抓取30枚鸡蛋,并将抓取的鸡蛋移动放于传送带上的塑料框内,塑料框传送带具有抖动和弹性升降功能,确保机械臂



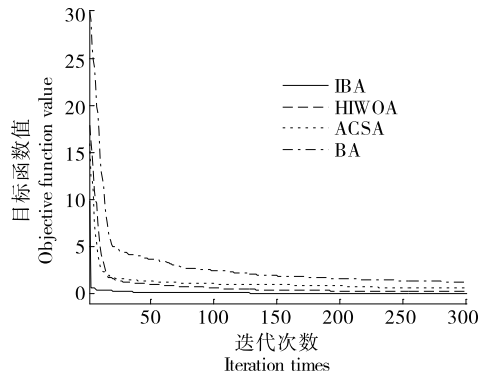
(a) 函数 1



(b) 函数 2



(c) 函数 3



(d) 函数 4

图2 函数收敛曲线

Figure 2 Convergence curve of the function

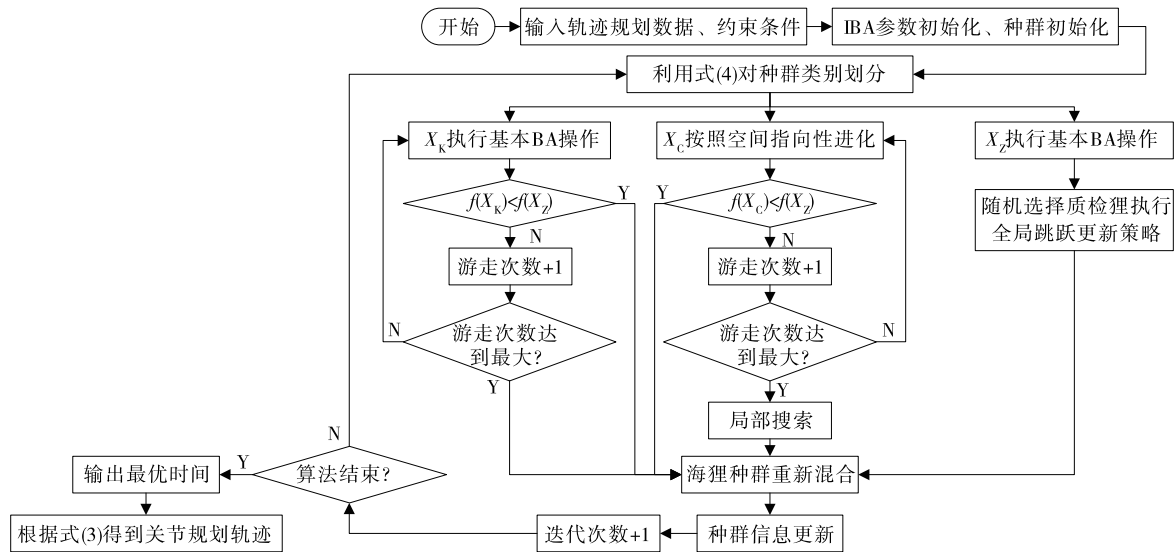


图3 IBA优化求解轨迹规划模型流程图

Figure 3 Flowchart of the trajectory planning model for IBA optimization solution

抓取来的鸡蛋能均匀平铺放置。搭建如图4所示的分拣试验平台,试验平台主要由示教器、主控制器、伺服控制系统、机械臂、工业真空鸡蛋吸盘组件等组成。试验时将参数输入示教器,主控制器结合输入插值点信息计算关节轨迹,并发送指令至伺服控制系统,实现对UR10e的精确控制。通过采集机械臂关节数据,可对比分析各关节实际角度、角速度、角加速度与MATLAB仿真数据的误差。

3.1 时间最优轨迹规划仿真

将机械臂底座放置于传送带的正上方,设置机械臂6关节在起点、终点及两个路径点的角度分别为 $(0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 、 $(0.31, -1.22, -1.17, 2.54, 1.67, 0.72)$ 、 $(-2.51,$

$-1.43, 0.74, 2.02, 0.37, 1.45)$ 、 $(0.17, -1.78, -2.20, 2.44, -1.57, 1.62)$ rad,使用MATLAB软件对UR10e机械臂关节时间最优轨迹规划进行仿真,相邻插值点初始运行时间为2 s。采用IBA优化求解时间最优轨迹规划模型,IBA有关参数为 $N=200$ 、 $T_{\max}=300$ 、 $\xi=0.0001$ 、 $\varphi=0.15$ 、 $\omega=0.98$ 、 $\chi=1.22$,分别选取HIWOA、ACSA、BA进行对比仿真,每种算法独立运行20次,表2给出了IBA、HIWOA、ACSA、BA对比结果,图5给出了IBA得到的6个关节角度、角速度和角加速度曲线。

从图5~图7和表2可以看出,IBA最优轨迹规划时间为3.614 s,相比于最初的降低了2.386 s,机械臂工作效率

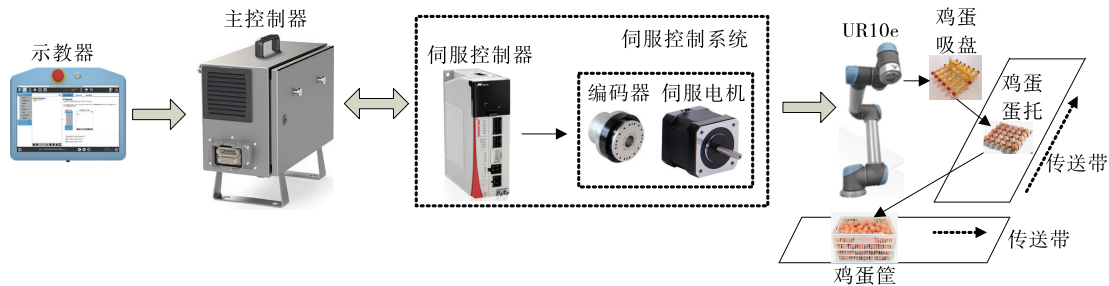


图4 机械臂轨迹规划验证试验平台

Figure 4 Physical platform for verifying the trajectory planning of the robotic arm

表2 IBA、HIWOA、ACSA、BA对比结果

Table 2 Comparison results of IBA, HIWOA, ACSA, and BA

算法	最优时间/s				平均时间/s	标准差	求解成功率/%
	t_1/s	t_2/s	t_3/s	总时间/s			
IBA	1.224	0.783	1.607	3.614	3.705	1.045×10^{-2}	98.12
HIWOA	1.318	0.766	1.748	3.832	3.948	3.664×10^{-2}	96.54
ACSA	1.402	0.804	1.709	3.915	4.139	2.973×10^{-2}	95.69
BA	1.667	0.942	1.836	4.445	4.806	4.607×10^{-2}	91.44

明显提升,得到的关节角度、角速度、角加速度能够满足约束条件,角度、角速度平滑、连续,角加速度处于较低水平,而且,相比于 HIWOA、ACSA、BA,IBA 得到的最优时间、平均时间、成功率更优,证明了基于改进海狸算法的食品分拣机器人时间最优轨迹规划方法的可行性。

3.2 实物平台验证与结果分析

为进一步论证所提方法的可行性,另将机械臂底座放置于传送带的左侧和右侧,共构建 3 条机械臂抓取鸡蛋规划轨迹,利用 MATLAB 软件进行仿真分析,并将数据导入试验平台。每条轨迹试验独立运行 10 次,分别选取文献[6]、文献[8]和文献[13]提出的轨迹规划方法进行对

比,图 8 给出了 IBA 得到的关节角度仿真数据与真实数据对比曲线图,表 3 给出了 4 种轨迹规划方法仿真数据与试验数据对比结果。

MATLAB 仿真结果表明,在满足各种约束条件下,IBA 能够有效缩短运行时间,机械臂整体运行平稳。与 HIWOA、ACSA 相比,IBA 得到的最优时间分别缩短了 5.67%, 7.69%, 平均时间分别缩短了 6.16%, 10.49%, 角度、角速度连续平滑,角加速度变化幅度较小。表明通过设计自适应海狸种类划分、种群空间指向性进化以及全局跳跃进化策略,均衡了 IBA 全局探索广度和局部搜索精细度,算法全局寻优能力更强,得到的机械臂轨迹时间

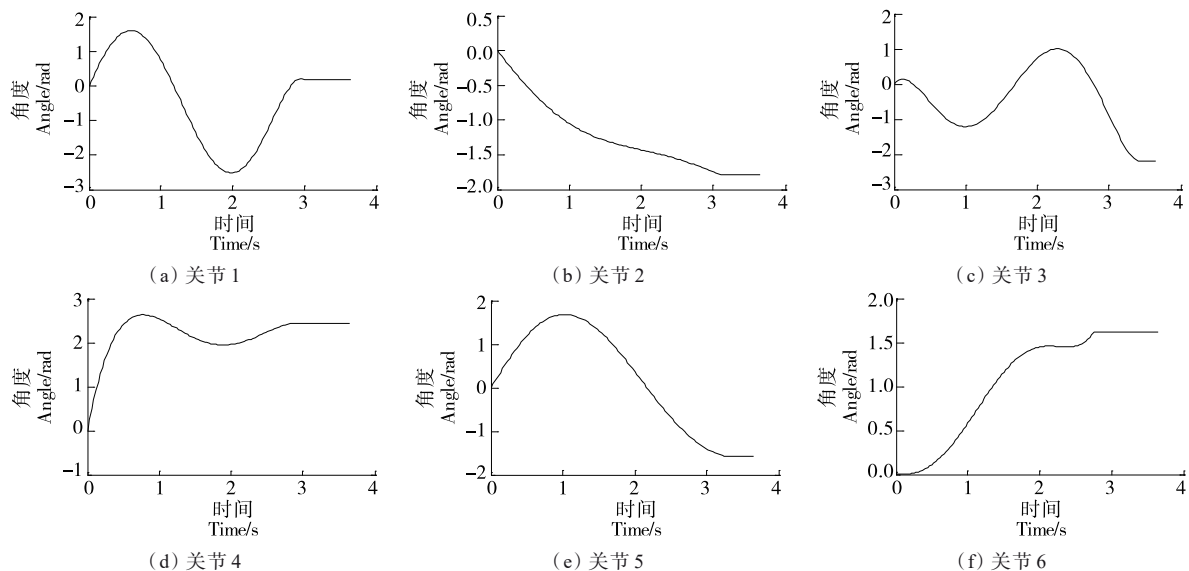


图 5 IBA 得到的 6 个关节角度曲线

Figure 5 Six joint angle curves obtained by IBA

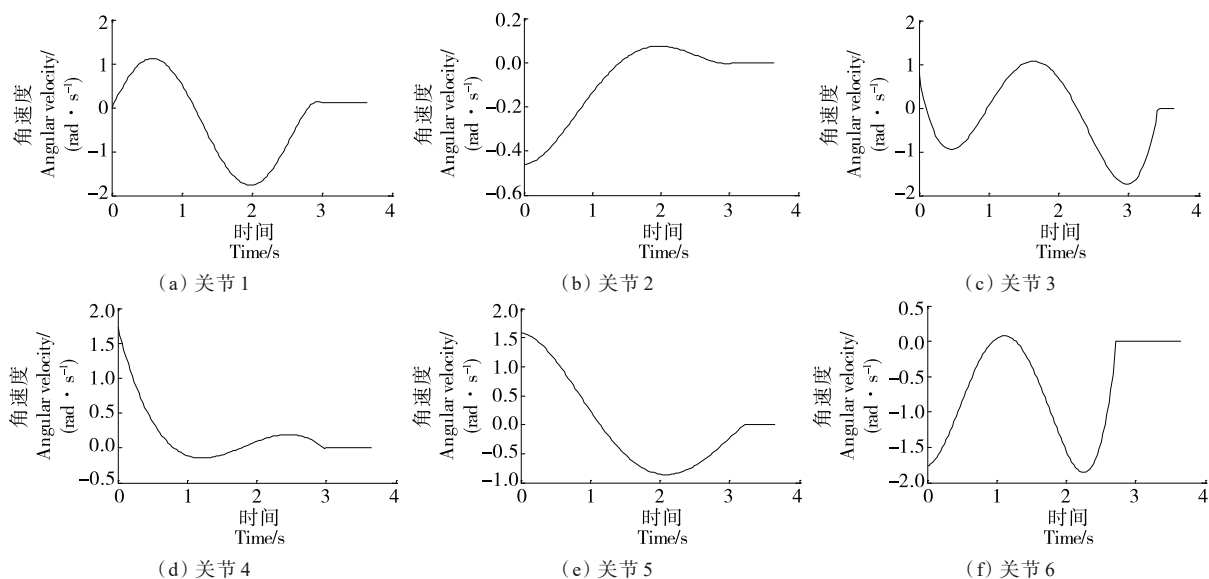


图 6 IBA 得到的 6 个关节角速度曲线

Figure 6 Six joint angular velocity curves obtained by IBA

更优,更适用于食品分拣机器人机械臂时间最优轨迹规划问题。

试验平台验证结果表明,所提机械臂轨迹规划方法可行且有效。去除噪声影响,所提算法得到的各关节角

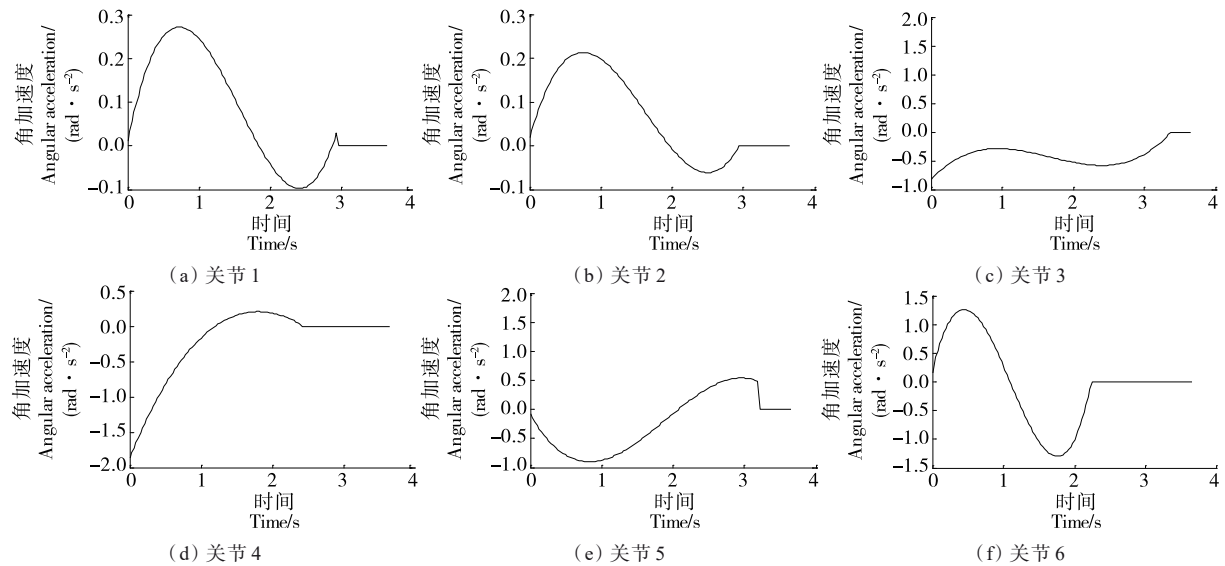


图 7 IBA 得到的 6 个关节角加速度曲线

Figure 7 Six joint angular acceleration curves obtained by IBA

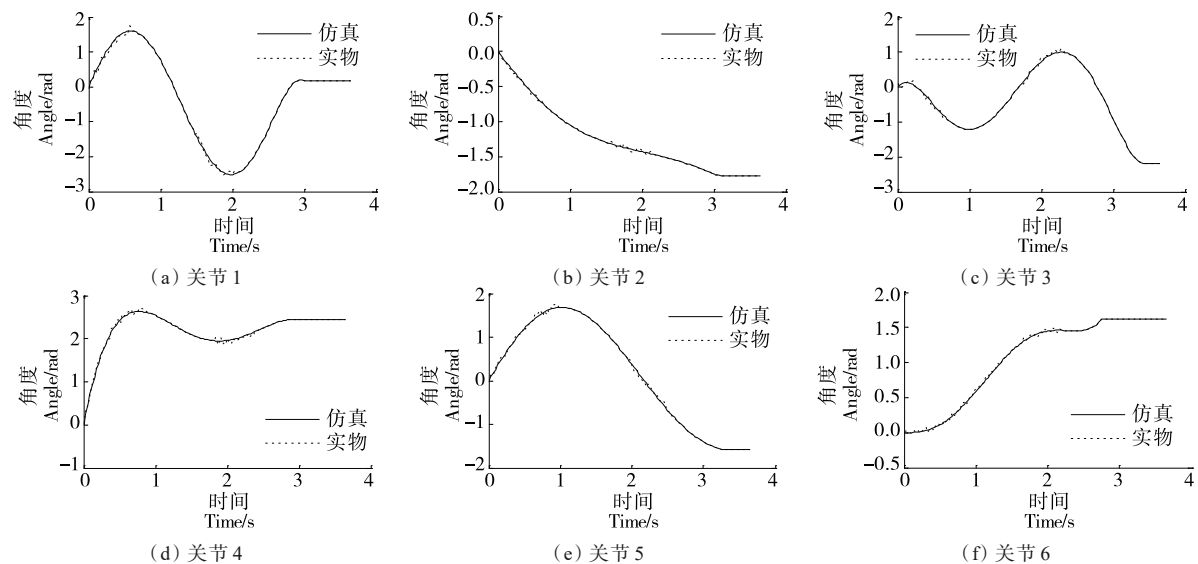


图 8 关节角度仿真数据与试验数据对比曲线

Figure 8 Comparison curves between the simulation data and the real data of joint angles

表 3 仿真数据与试验数据对比

Table 3 Comparison between simulation data and experimental data

方法	类别	轨迹 1		轨迹 2		轨迹 3		方法	类别	轨迹 1		轨迹 2		轨迹 3	
		最优时间	平均时间	最优时间	平均时间	最优时间	平均时间			最优时间	平均时间	最优时间	平均时间	最优时间	平均时间
IBA	仿真	3.614	3.705	4.058	4.146	4.832	4.904	文献[8]	仿真	3.819	4.183	4.378	4.506	5.218	5.407
	实物	3.707	3.852	4.104	4.213	4.911	5.042		实物	3.943	4.206	4.419	4.665	5.335	5.667
文献[6]	仿真	3.717	3.852	4.227	4.346	5.001	5.140	文献[13]	仿真	3.837	4.035	4.409	4.567	5.088	5.166
	实物	3.806	3.968	4.305	4.405	5.120	5.224		实物	4.042	4.183	4.617	4.742	5.183	5.307

度曲线仿真数据与试验数据高度拟合,3条规划轨迹的仿真数据与试验数据的最优时间与平均时间差异均低于2.0%,且与文献[6]、文献[8]和文献[13]提出的轨迹规划方法相比,试验平台测试最优时间分别缩短了0.099,0.236,0.272 s以上,平均时间分别缩短了0.116,0.265,0.262 s以上,进一步论证了所提方法的可行性和优越性。

4 结语

针对食品分拣机器人机械臂时间最优轨迹规划问题,提出了一种基于改进海狸算法的轨迹规划方法,采用仿真数据与试验数据验证方法有效性,并通过搭建试验平台验证了方法的有效性。试验数据表明,所提方法规划的机械臂轨迹能够满足各种约束条件,关节运行时间明显缩短,仿真数据与试验数据高度吻合,规划轨迹运行时间误差控制在2.0%以下。后续将进一步研究规避障碍物下的机械臂轨迹规划方法,以有效提升机械臂工作效率。

参考文献

- [1] 戈明辉,张俊,陆慧娟.基于机器视觉的食品外包装缺陷检测算法研究进展[J].食品与机械,2023,39(9):95-102,116.
GE M H, ZHANG J, LU H J. Research progress of food packaging defect detection based on machine vision[J]. Food & Machinery, 2023, 39(9): 95-102, 116.
- [2] 傅明娣,李忠,王倩茹,等.基于多目标优化的油茶果分选机器人轨迹规划方法研究[J].食品与机械,2023,39(10):105-111.
FU M D, LI Z, WANG Q R, et al. Research on trajectory planning method for *Camellia oleifera* fruit sorting robot based on multi-objective optimization[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 105-111.
- [3] 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.
- [4] 田国富,张毅.基于IMOGWO算法的机械臂多目标轨迹规划[J].组合机床与自动化加工技术,2024(9):15-19,24.
TIAN F G, ZHANG Y. Multi-objective trajectory planning of manipulators based on improved multi-objective grey wolf optimizer algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(9): 15-19, 24.
- [5] 冉睿,梁坤,梁科.基于改进灰狼算法的机械臂时间最优轨迹规划[J].组合机床与自动化加工技术,2025(12):21-26.
RAN R, LIANG K, LIANG K. Time optimal trajectory planning of manipulator based on improved grey wolf algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(12): 21-26.
- [6] 马艳艳,冯金芝.六自由度机械臂的搬运作业运动规划与仿真[J].包装工程,2025,46(23):206-211.
MA Y Y, FENG J Z. Motion planning and simulation of product handling operations for a 6-DOF manipulator[J]. Packaging Engineering, 2025, 46(23): 206-211.
- [7] 郭北涛,潘相润,张丽秀.基于改进鲸鱼优化算法的工业机器人轨迹规划[J].组合机床与自动化加工技术,2025(11):18-22.
GUO B T, PAN X R, ZHANG L X. Industrial robot trajectory planning based on improved whale optimization algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(11): 18-22.
- [8] 万琴,宁顺兴,李智,等.6DOF机械臂运动学分析与轨迹规划仿真[J].制造业自动化,2024,46(4):42-47.
WAN Q, NING S X, LI Z, et al. Kinematics analysis and trajectory planning simulation of 6DOF manipulator[J]. Manufacturing Automation, 2024, 46(4): 42-47.
- [9] 廖想,周安琪,刘珂,等.海狸算法:一种自然启发的元启发式算法[J].控制与决策,2025,40(3):1043-1049.
LIAO X, ZHOU A Q, LIU K, et al. Beaver algorithm: a nature-inspired metaheuristic algorithm[J]. Control and Decision, 2025, 40(3): 1043-1049.
- [10] 刘建林,黄海松,范青松,等.基于改进樽海鞘群算法的机械臂多目标轨迹规划研究[J].中国机械工程,2025,36(9):2047-2056.
LIU J L, HUANG H S, FAN Q S, et al. Multi-objective trajectory planning of manipulators based on improved SSA[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(9): 2047-2056.
- [11] 崔靖凯,王凯,范正奇,等.基于改进灰狼算法的冗余机械臂最优轨迹规划[J].控制与决策,2025,40(5):1457-1466.
CUI J K, WANG K, FAN Z Q, et al. Optimal trajectory planning of robotic manipulator based on improved grey wolf optimizer[J]. Control and Decision, 2025, 40(5): 1457-1466.
- [12] 高永新,刘俊毅,汪洋,等.增强型白鲸蝠融合算法机械臂插值轨迹优化方法[J].电子学报,2025,53(8):2915-2935.
GAO Y X, LIU J Y, WANG Y, et al. The enhanced whale manta ray fusion algorithm for robotic arm trajectory optimization method[J]. Acta Electronica Sinica, 2025, 53(8): 2915-2935.
- [13] 黄丽霞,李威,闫初宇,等.基于混合改进鲸鱼优化算法的食品搬运机器人轨迹规划[J].食品与机械,2025,41(12):99-107.
HUANG L X, LI W, YAN C Y, et al. Trajectory planning for food handling robots based on hybrid-improved whale optimization algorithm[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 99-107.
- [14] 何杰光,彭志平,崔得龙,等.基于种群多样性的自适应乌鸦搜索算法[J].浙江大学学报(工学版),2022,56(12):2426-2435.
HE J G, PENG Z P, CUI D L, et al. Adaptive crow search algorithm based on population diversity[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(12): 2426-2435.