

基于改进灰狼优化算法的码垛机器人轨迹规划

曹飞虎¹ 陈桂¹ 周磊¹ 马宇臣¹ 倪浩¹ 徐衍丰¹
CAO Feihu CHEN Gui ZHOU Lei MA Yuchen NI Hao XU Yanfeng

摘要

运动时间是码垛机器人工作中的一项重要指标。为提高码垛机器人的运动效率，文章提出了一种以时间最优为目标的改进灰狼算法来完成轨迹优化。该算法通过使用 Circle 映射初始化种群，并设置非线性的收敛因子，以提高算法的求解精度、收敛速度和全局搜索能力。在建立运动学模型的基础上，以 3-5-3 多项式插值为例，完成了关节空间中的末端轨迹规划。随后，利用改进的灰狼优化算法对轨迹进行优化。通过 MATLAB 软件进行仿真试验，并将结果与未优化的灰狼算法和粒子群算法进行对比，结果显示，改进后的灰狼优化算法具有更快的收敛速度和更高的运动效率，优于其他两种算法。此外，各个关节的轨迹平稳连续，验证了该轨迹规划方法的有效性。

关键词

码垛机器人；时间最优；轨迹规划；改进灰狼优化算法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.02.007

0 引言

随着进出口贸易额度的稳步增长，物流行业中堆垛和搬运两项高强度、高风险的工作，对码垛机器人等相关设备的依赖越来越高。近年来，为提升仓库的管理效率，实现货物的高效码垛与存储，精确规划码垛机器人的运动轨迹至关重要。但并非易事，需要综合考虑机器人的动力学和运动学限制、运动空间的约束，以及任务的特定需求等诸多因素。

轨迹规划是机器人研究的重要领域，传统规划方法主要包括多项式插值和样条插值。Cahyono 等人^[1]研究以四自由度机械臂为对象，对比三次和五次多项式插值对机器人运动性能的影响。而 Bharadwaj 等人^[2]则利用三次 B 样条和极小化极大算法进行 PUMA560 的轨迹规划，实现了冲击值的最小化。

随着研究深入，智能优化算法因其强大的求解能力和计算速度，越来越多地应用于轨迹优化。这些算法与插值算法结合，可实现更优的轨迹规划^[3-4]。在这一背景下，Huc 等人^[5]研究了双臂系统的最优轨迹规划，使用遗传算法（GA）优化机械臂的运动过程。从控制器获取机器人关节扭矩的影响，并将其作为约束函数，成功获得了时间最优轨迹。Chen 等人^[6]研究了一种改进粒子群算法的轨迹规划方法。通过构建适应度函数，引入动态记忆因子策略，并使用了亚种群策略，成功避免了陷入局部最优，得到最优解。智能规划算法虽然表现力较强，但在处理复杂问题时容易陷入局部最优，且某些

问题的收敛速度可能较慢。因此，需要不断研究和改进这些算法，以更好地应对挑战。

灰狼优化（GWO）算法是一种元启发式算法，具有少量参数调节、结构简洁和自适应调节等优点，能够平衡局部与全局搜索。然而，GWO 算法易早熟收敛且可能陷入局部最优，需改进以提升搜索速度和精度。本文采用 3-5-3 多项式对 IRS-300 型工业机器人进行轨迹规划，目标是最短时间内提高工作效率。

1 机械臂运动学分析

1.1 机械臂基本结构与模型建立

本文中的码垛机器人是汇川技术公司制造的六轴 IRB300-3-60TS5 型号，主要用于分拣和码垛任务。如图 1 所示，机械臂由前 3 个关节（决定末端执行器位置）和后 3 个关节（决定末端执行器姿态）组成。



图 1 IRB300-3 机器人

1. 南京工程学院机械工程学院 江苏南京 211167

根据机器人学的连杆坐标系建立方法，为机械臂构建了相应的坐标系，具体结构和坐标系如图 2 所示。

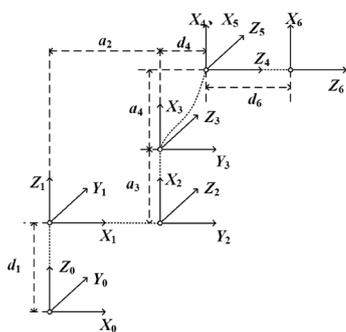


图 2 IRB300-3 机器人连杆坐标系

根据机器人用户手册，可获取机器人的 D-H 参数，如表 1 所示，利用 MATLAB 的机器人工具箱进行运动学建模和仿真，从而成功构建了码垛机器人的运动学仿真模型，如图 3 所示。

表 1 IRB300-3 机器人的 D-H 参数表

连杆 i	$\theta_i/^\circ$	d_i/mm	a_{i-1}/mm	$\alpha_{i-1}/^\circ$	$(\theta_{\min}, \theta_{\max})/^\circ$
1	θ_1	199.5	0	0	(-170, 170)
2	θ_2	0	50	-90	(-145, 78)
3	θ_3	0	285	0	(-71, 173)
4	θ_4	300	45	90	(-200, 200)
5	θ_5	0	0	-90	(-120, 120)
6	θ_6	80	0	90	(-360, 360)

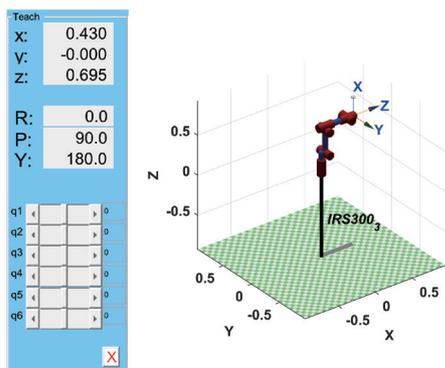


图 3 IRS300-3 机器人的仿真模型

1.2 机械臂运动学分析

机械臂运动学分析旨在研究机械臂在空间中的运动规律及其位置和姿态的变化。在轨迹规划过程中，需确定机器人从起始位置移动到目标位置的最优路径。为此，逆运动学分析用于确定各关节的移动方式以达到目标位置和姿态。同时，正运动学分析则用于预测和验证这些移动是否能够实现预期结果。

本文采用 D-H 参数法推导齐次变换矩阵，通过旋转和平移确定两个连杆之间的角度、距离等参数，从而得到其相对

关系。齐次变换矩阵的公式为：

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

基于机械臂的连杆坐标系，建立各关节的坐标系。根据 6 个关节的参数及相邻关节之间的平移和旋转关系，可得出 6 组齐次变换矩阵。依据矩阵乘法原则，最终得到机械臂末端执行器在笛卡尔空间的变换矩阵，公式为：

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

根据 D-H 参数表，代入相应数值进行计算，可以得到机械臂末端的位姿向量坐标及其位置描述。

逆运动学分析通过已知末端执行器的目标位置和姿态，求解所需的关节参数，实现从“任务空间”到“关节空间”的映射。由于其非线性且多解的特性，通常比正运动学复杂。逆运动学求解方法分为封闭解和数值解，其中封闭解可分为解析法和几何法。由于该机械臂后三轴平行，满足 Pieper 准则，存在封闭解。本文采用解析法有效解决了逆运动学问题，降低了计算复杂度。

2 改进灰狼算法

2.1 灰狼算法 GWO

灰狼优化算法 (GWO) 是一种元启发式优化算法，模拟灰狼的社会等级结构和狩猎行为进行优化求解。GWO 种群的社会等级分为 4 种类型：alpha、beta、delta 和 omega，如图 4 所示。

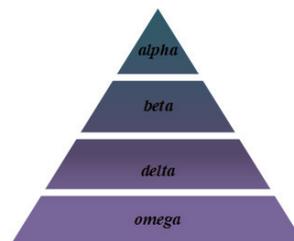


图 4 灰狼的等级制度 (统治力自上而下递减)

GWO 算法的核心在于模拟灰狼的狩猎行为，包括寻找猎物、包围猎物和攻击猎物 3 个步骤。在此过程中，每只灰狼通过个体运动、群体运动和随机运动更新其位置，以寻找最优解。个体位置更新的数学模型公式为：

$$\begin{aligned} D &= |C \cdot X_p(t) - X_i(t)|, \\ X_i(t+1) &= X_p(t) - A \cdot D, \\ A &= 2ar_1 - a, \\ C &= 2r_2, \\ a &= 2 - 2 \times \frac{t}{T} \end{aligned} \quad (3)$$

在迭代过程中, 收敛因子 a 随着迭代次数的增加从 2 线性减小至 0; 随机数 r_1 和 r_2 的取值范围为 $[0, 1]$ 。

在每次迭代中, 所有灰狼根据当前位置和适应度值更新位置, 通过互相协作和竞争推动种群向全局最优解进化, 公式为:

$$\begin{aligned} D_\alpha &= |C_1 \cdot X_\alpha(t) - X_i(t)|, \\ D_\beta &= |C_2 \cdot X_\beta(t) - X_i(t)|, \\ D_\delta &= |C_3 \cdot X_\delta(t) - X_i(t)|, \\ X_1 &= X_\alpha(t) - A_1 \cdot D_\alpha, \\ X_2 &= X_\beta(t) - A_2 \cdot D_\beta, \\ X_3 &= X_\delta(t) - A_3 \cdot D_\delta, \\ X_i(t+1) &= \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 算法优化 (IGWO)

2.2.1 引入 Circle 映射

灰狼位置初始化对搜索收敛速度有显著影响。在基础 GWO 中, 灰狼的初始位置是随机选取的, 可能导致分布不均, 影响求解质量。为解决这一问题, 本文引入了 Circle 混沌映射, 随机性、均匀性和有序性更优, 使初始种群在解空间内均匀分布, 从而提高算法的收敛速度和性能。

Circle 映射在搜索空间生成的混沌序列如式 (5) 所示, 其在空间的点分布如图 5 所示。

$$x_{i+1} = \text{mod} \left(x_i + b - \left(\frac{a}{2\pi} \right) \sin(2\pi x_k), 1 \right) \quad (5)$$

式中: a 、 b 为控制参数, 常用取值为 0.5 和 0.2; mod 为求余函数。混沌轨道状态值范围为 $(0, 1)$ 。

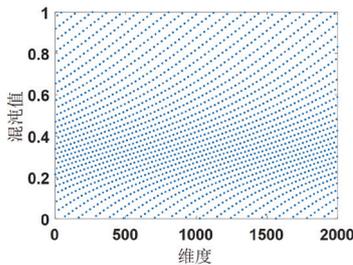


图 5 Circle 映射点分布图

2.2.2 收敛因子非线性更新

在传统 GWO 中, 收敛因子 a 随着迭代次数线性减小, 不利于全局寻优。收敛因子的变化直接影响算法的收敛速度和搜索能力。初期应加快 a 的下降速度以提高搜索速度; 中期减缓 a 的下降速度防止陷入局部最优; 后期保持 a 在较小值以增强局部搜索能力, 提升整体收敛性。为此, 本文引入了基于指数变化的收敛因子公式:

$$a = 2 \times e^{-\frac{t^2}{\text{iter}_{\max} \times \beta}} \quad (6)$$

式中: β 为缩放因子, 经过测试取值为 0.1; iter_{\max} 为最大迭代次数。

3 IGWO 在 3-5-3 轨迹规划中的运用

3.1 3-5-3 多项式插值轨迹规划

码垛机器人的工作流程包括定位并获取物品、将物品运送到预定地点以及返回起始位置准备下一次操作。本文在设定起点和终点的基础上, 设计了两个途经点用于避障或控制轨迹形状。综合考虑后, 采用 3-5-3 次多项式对路径进行规划, 整个运动路径由 3 段轨迹组成, 分别采用三次多项式、五次多项式和三次多项式插值规划。每段轨迹的运动时间分别为 $T_1(t_0 \sim t_1)$ 、 $T_2(t_1 \sim t_2)$ 和 $T_3(t_2 \sim t_f)$ 。具体的划分方式如图 6 所示。

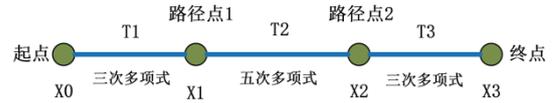


图 6 3-5-3 轨迹划分图

根据 4 个点的参数设置, 将关节角和时间写成位置函数 $\theta(t)$, 通过对位置函数进行一阶导数和二阶导数运算, 可以得到速度函数 $\dot{\theta}(t)$ 和加速度函数 $\ddot{\theta}(t)$, 公式分别为:

$$\begin{cases} \theta_1(t) = a_{13}t_1^3 + a_{12}t_1^2 + a_{11}t_1 + a_{10} \\ \dot{\theta}_1(t) = 3a_{13}t_1^2 + 2a_{12}t_1 + a_{11} \\ \ddot{\theta}_1(t) = 6a_{13}t_1 + 2a_{12} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \theta_2(t) = a_{25}t_2^5 + a_{24}t_2^4 + a_{23}t_2^3 + a_{22}t_2^2 + a_{21}t_2 + a_{20} \\ \dot{\theta}_2(t) = 5a_{25}t_2^4 + 4a_{24}t_2^3 + 3a_{23}t_2^2 + 2a_{22}t_2 + a_{21} \\ \ddot{\theta}_2(t) = 20a_{25}t_2^3 + 12a_{24}t_2^2 + 6a_{23}t_2 + 2a_{22} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \theta_3(t) = a_{33}t_3^3 + a_{32}t_3^2 + a_{31}t_3 + a_{30} \\ \dot{\theta}_3(t) = 3a_{33}t_3^2 + 2a_{32}t_3 + a_{31} \\ \ddot{\theta}_3(t) = 6a_{33}t_3 + 2a_{32} \end{cases} \quad (9)$$

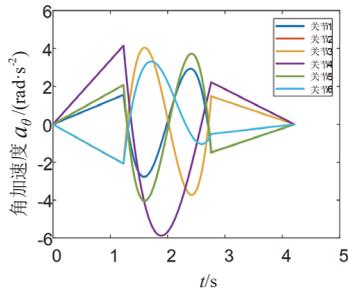
式中: $\theta_i(t)$ 、 $\dot{\theta}_i(t)$ 和 $\ddot{\theta}_i(t)$ 分别为每一段轨迹位置、速度和加速度随时间变化的函数 ($i=1, 2, 3$); $a_{j,k}$ ($j=1, 2, 3$; 阶次 $k=1, 2, 3, 4, 5$)。为确保轨迹函数的完整性, 设定了约束条件 (t_f 为每个时间段的末端), 公式分别为:

$$\begin{cases} \theta_1(t_f) = \theta_2(0), \theta_2(t_f) = \theta_3(0) \\ \dot{\theta}_1(t_f) = \dot{\theta}_2(0), \dot{\theta}_2(t_f) = \dot{\theta}_3(0) \\ \ddot{\theta}_1(t_f) = \ddot{\theta}_2(0), \ddot{\theta}_2(t_f) = \ddot{\theta}_3(0) \end{cases} \quad (10)$$

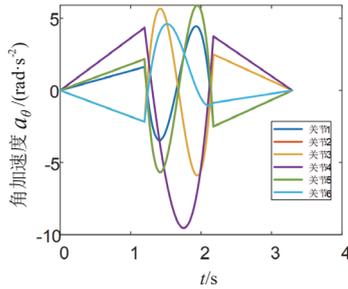
$$\begin{cases} \theta_1(0) = \theta_0, \theta_3(t_f) = \theta_f \\ \dot{\theta}_1(0) = 0, \dot{\theta}_3(t_f) = 0 \\ \ddot{\theta}_1(0) = 0, \ddot{\theta}_3(t_f) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式 (10) 确保路径末端与下一段路径起点在位置、速度和加速度上的连续性, 保证轨迹平滑。式 (11) 确保起始点和终点静止。添加约束后, 轨迹函数表达式分别为:

$$\begin{cases} a_{13}t_1^3 + a_{12}t_1^2 + a_{11}t_1 + a_{10} = a_{20} \\ a_{25}t_2^5 + a_{24}t_2^4 + a_{23}t_2^3 + a_{22}t_2^2 + a_{21}t_2 + a_{20} = a_{30} \\ 3a_{13}t_1^2 + 2a_{12}t_1 + a_{11} = a_{21} \\ 5a_{25}t_2^4 + 4a_{24}t_2^3 + 3a_{23}t_2^2 + 2a_{22}t_2 + a_{21} = a_{31} \\ 6a_{13}t_1 + 2a_{12} = 2a_{22} \\ 20a_{25}t_2^3 + 12a_{24}t_2^2 + 6a_{23}t_2 + 2a_{22} = 2a_{32} \end{cases} \quad (12)$$



(c) PSO 优化



(d) IGWO 优化

图 8 算法优化对比图

通过 3-5-3 次多项式插值, 得出各段路径的运动时间, 数据见表 3。对比分析表明, IGWO 算法在缩短时间周期和提升效率方面表现突出, 验证其优越性。

表 3 算法优化时间对比表

算法	路径段一 /s	路径段二 /s	路径段三 /s	总时间 /s
优化前	2	2	3	7
PSO	1.230 3	1.530 5	1.453 9	4.214 7
GWO	1.433 4	1.063 3	1.238 9	3.735 6
IGWO	1.200 8	0.977 1	1.120 6	3.298 6

通过对加速度曲线的对比分析发现, 关节的运动速度和加速度越大, 耗时越短, 在满足约束条件下, 各关节能完成动作, 选取最长时间作为路径段的动作时间。表 3 记录了 3 种算法在每段路径上的运动时间及总时间。对比结果显示, IGWO 优化后, 机械臂总运动时间为 3.299 s, 减少了 52.9%, 相比 GWO 算法提升 11.7%, 相比 PSO 算法提升 21.7%。

4 结论

本文以 IRB300-3-60TS5 六轴机器人作为研究对象, 旨在通过时间优化来提升码垛机器人运动过程中的轨迹规划效率。采用 Circle 映射初始化种群, 并设置非线性收敛因子以加快收敛速度, 提出了一种改进的灰狼优化算法进行轨迹优化。通过实验仿真与对比, 得到了更高效的关节轨迹。改进后的灰狼优化算法不仅有效提高了码垛机器人的作业效率, 还验证了其在轨迹规划中的优越性能。

参考文献:

- [1] CAHYONO G R, NURMAHALUDIN, SETIAWAN M F, et al. Comparison of 4 DOF arm robot for trajectory planning with 3rd and 5th polynomial orders[C/OL]//2022 11th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS). Piscataway: IEEE, 2022[2024-06-13].<https://ieeexplore.ieee.org/document/9902924>.
- [2] BHARADWAJ B G S, VAISHNAVI L, PURRAB D, et al. Application of Mini-Max method for trajectory planning of PUMA-560 using cubic B spline interpolation technique for jerk minimization[C/OL]//2021 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON). Piscataway: IEEE, 2021[2024-06-18].<https://ieeexplore.ieee.org/document/9645801>.
- [3] 郭勇, 赖广. 工业机器人关节空间轨迹规划及优化研究综述[J]. 机械传动, 2020, 44(2): 154-165.
- [4] 徐辉. 基于智能优化算法的移动机器人路径规划研究[D]. 福州: 福建理工学院, 2023.
- [5] HUE L T, ANH N P T. Planning the optimal trajectory for a dual-arm robot system using a genetic algorithm considering the controller[C/OL]//2022 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). Piscataway: IEEE, 2022[2024-05-25].<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9942975>.
- [6] CHEN X, HE J. Cooperative planning of dual arm robot based on improved particle swarm optimization[C/OL]//2021 IEEE 3rd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). Piscataway: IEEE, 2021[2024-03-29].<https://ieeexplore.ieee.org/document/9633525>.

【作者简介】

曹飞虎(1999—), 男, 江苏盐城人, 硕士, 研究方向: 运动控制与机器人技术。

陈桂(1973—), 女, 安徽旌德县人, 硕士, 教授, 研究方向: 运动控制技术。

马宇臣(2001—), 男, 江苏徐州人, 硕士, 研究方向: 运动控制与机器人技术。

徐衍丰(1999—), 男, 安徽滁州人, 硕士, 研究方向: 电机伺服控制。

倪浩(1999—), 男, 江苏徐州人, 硕士, 研究方向: 电机伺服控制。

(收稿日期: 2024-10-30)