

DOI: 10.15886/j.cnki.hdxzbkb.2024030301

CSTR: 32403.14.hndk.2024030301

先进制造与装备



引用格式: 袁磊, 杨振超. 基于改进高尔夫优化算法的机械臂时间最优轨迹规划 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2025, 43(3): 282–288.

Citation: YUAN Lei, YANG Zhenchao. Time-optimal trajectory planning of manipulator based on the improved golf optimization algorithm[J]. Natural Science of Hainan University, 2025, 43(3): 282–288.

基于改进高尔夫优化算法的机械臂时间最优 轨迹规划

袁磊, 杨振超

(海南大学 机电工程学院, 海南 海口 570228)

摘要: 针对机械臂时间最优轨迹规划问题, 提出了一种基于改进高尔夫优化算法的机械臂轨迹优化方法。所提方法通过引入混沌映射和自适应权重因子来避免高尔夫算法陷入局部最优。将所提的改进高尔夫优化算法与多种不同算法进行仿真对比, 并选取基准测试函数进行验证, 结果表明: 所提算法有着更快的收敛速度和更高的寻优精度。将改进高尔夫优化算法应用到六自由度机械臂时间最优轨迹规划仿真分析中, 优化后机械臂轨迹运行时间由 10.00 s 减少到 6.04 s, 表明该算法可在保持轨迹稳定性的前提下, 有效地减少轨迹运行时间。

关键词: 机械臂; 轨迹规划; 时间最优; 改进高尔夫优化算法

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1004-1729(2025)03-0282-07

Time-optimal trajectory planning of manipulator based on the improved golf optimization algorithm

YUAN Lei, YANG Zhenchao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Addressing the time-optimal trajectory planning problem for manipulators, this paper proposes a trajectory optimization method based on an improved golf optimization algorithm. The chaotic mapping and adaptive weight factors were introduced to avoid getting stuck in local optimization. The simulation compare was performed to compare the proposed algorithm with the various different algorithms, the benchmark test functions were used for validating. The results indicated that the proposed algorithm has faster convergence speed and higher optimization accuracy than various different algorithms. The improved golf optimization algorithm was used to simulate the optimal trajectory planning of a 6-DOF manipulator. The proposed algorithm can reduce the trajectory running time from 10 seconds to 6.04 seconds, which suggested that the proposed algorithm can effectively reduce trajectory running time and maintain the stability of the trajectory.

Keywords: manipulator; trajectory planning; time optimization; the improved golf optimization algorithm

收稿日期: 2024-03-03

基金项目: 海南省自然科学基金项目(520RC535); 海南省高等学校教育教学改革研究项目(HnjgY2022-7)

作者简介: 袁磊 (1985—), 男, 湖北武汉人, 讲师, 研究方向: 机器人技术, E-mail: yuanlei20061106@126.com

0 引言

轨迹规划是工业机器人运动控制的关键环节,其性能对工业机器人工作效率、运动平稳性和能量消耗具有重大影响^[1]。六自由度机械臂是工业机器人的代表,基于此,对六自由度机械臂的轨迹规划进行研究极具意义。当前智能优化算法已成为解决轨迹规划问题的主流方法,如利用遗传算法、粒子群算法、萤火虫算法、鲸鱼算法和蜂群算法等解决机器人轨迹规划问题。时间最优轨迹规划是最热门的轨迹优化问题之一^[2-3]。朱世强等^[3]采用7次B样条曲线插值方法构造序列二次规划求解最优运行时间节点。李大为等^[4]利用改进的遗传算法对不同速度下的3-5-3多项式的插值时间进行优化。殷凤健等^[5]通过自适应遗传算法对运动轨迹进行时间最短优化。陈晗等^[6]以5-7-5多项式插值法作为轨迹规划的基础,并以运动角度、运动速度以及运动加速度作为约束,采用复合形法进行优化,得到满足运动要求的时间最优运动轨迹。李国洪等^[7]采用全局7次B样条曲线连接各相邻路径,并利用处罚函数处理各关节的运动学约束,最后通过聚类方法对遗传算子进行综合调控,既提高了算法的寻优效率,又保证了六关节运行时间同步。Ma等^[8]考虑了机械臂动力学和动力学约束,提出了一种基于凸优化的时间最优轨迹规划方法,结果表明:该方法能有效抑制加速度突变。赵业和等^[9]提出了一种多种群竞争策略用于改进松鼠搜索算法,该算法能有效提高机械臂在关节空间的轨迹规划效率。郭鑫鑫等^[10]利用改进变步长萤火虫算法对关节空间的3-5-3多项式插值进行优化,该方法使得机械臂运行时间更短,稳定性更高。袁旭华等^[11]通过优化搜索策略对传统蜂群算法进行了改进。李虎等^[12]利用分段多项式插值函数和改进的粒子群算法相结合,提高了算法的全局搜索能力和收敛速度。赵晶等^[13]提出了一种引入混沌映射、惯性权重和自适应阈值的改进鲸鱼算法,并将该算法应用于机械臂运动时间优化,取得了较好的效果。

高尔夫优化算法(golf optimization algorithm, GOA)由学者Montazeri等^[14]根据球员击打高尔夫球所采取的战术策略而提出的算法,该算法只需2个通用参数,具有计算速度快、寻优能力强等特点,但仍存在易于陷入局部最优的不足,因此提出了一种均衡全局与局部搜索能力的改进高尔夫优化算法。该算法能在满足机械臂运动约束条件下,实现对机械臂的时间最优轨迹规划。

1 时间最优轨迹规划问题描述

1.1 目标函数 机械臂从起始点到终止点需要经过 n 个路径点才能完成作业任务。机械臂运动到第 i 个路径点时的时间为 t_i ,每段轨迹之间的时间间隔为 $t_{i+1}-t_i$,机械臂运动的总时间为各段轨迹时间之和,将其定义为目标函数,即

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} T_i \quad (1)$$

式中: $T_i = t_{i+1} - t_i, i = 1, 2, 3, \dots, n-1$ 。

1.2 约束条件 将机械臂各关节的角速度 $\dot{\theta}_j(t)$ 和角加速度 $\ddot{\theta}_j(t)$ 设置为约束条件, j 表示机械臂关节号,则

$$\begin{cases} \forall t, & t \in (t_j, t_{j+1}) \\ |\dot{\theta}_j(t)| \leq \dot{\theta}_j^{\max}, & j = 1, \dots, N_j \\ |\ddot{\theta}_j(t)| \leq \ddot{\theta}_j^{\max}, & j = 1, \dots, N_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\dot{\theta}_j^{\max}, \ddot{\theta}_j^{\max}$ 分别表示机械臂各关节所能达到的最大角速度和最大角加速度; N_j 为关节数。

2 基于改进高尔夫优化算法的时间最优轨迹规划

高尔夫优化算法具有配置参数少、收敛速度快和准确率高等优点^[14],可有效地解决复杂的寻优问题,具有比遗传算法、粒子群算法和灰狼优化算法等更好的优化性能,但其存在初始种群分布不均匀和局部开发能力不平衡以及易陷入局部最优等缺点。通过引入混沌映射和自适应收敛因子^[5,13],提出一种收敛速度快、全局搜索能力强的改进高尔夫优化算法。

2.1 改进高尔夫优化算法

2.1.1 混沌映射 混沌具有均匀遍历性和随机性,引入混沌映射的算法会因随机值分布更加均匀继而增加了种群多样性,能够有效避免算法陷入局部最优。利用混沌映射策略改进高尔夫算法的初始化,其公式为

$$z(k+1) = \text{mod}(2z(k) + \text{rand}(1/N_h), 1) \tag{3}$$

式中: k 为映射次数; N_h 是混沌序列中粒子数量。

2.1.2 自适应收敛因子 收敛因子在设定的最大值和最小值之间自适应地改变,使得算法在前期进行全局搜索,在后期进行局部搜索,不仅提高了算法的局部搜索能力,而且提升了算法的收敛速度。受此启发引入一个自适应收敛因子 w ,该因子随着高尔夫球位置的迭代次数而变化。

$$w = 0.3\cos\left[\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{t_i}{\text{max_iterations}}\right)\right] \tag{4}$$

式中: t_i 为当前迭代次数; max_iterations 为最大迭代次数。

基于改进高尔夫优化算法的步骤如下:

步骤1 参数初始化,设定种群大小和最大迭代次数,计算目标函数。

步骤2 将初始化后的位置代入,搜索阶段计算并更新第 i 个种群的新状态。

步骤3 开发阶段计算并更新第 i 个种群的新状态。

步骤4 若达到种群最大值,则保留当前最优位置,继续下一步,反之则返回步骤2。

步骤5 若满足最大迭代次数,则适应度最小即为最优解,算法结束,否则返回步骤2。

基于改进高尔夫优化算法的时间最优轨迹规划流程图如图1所示。

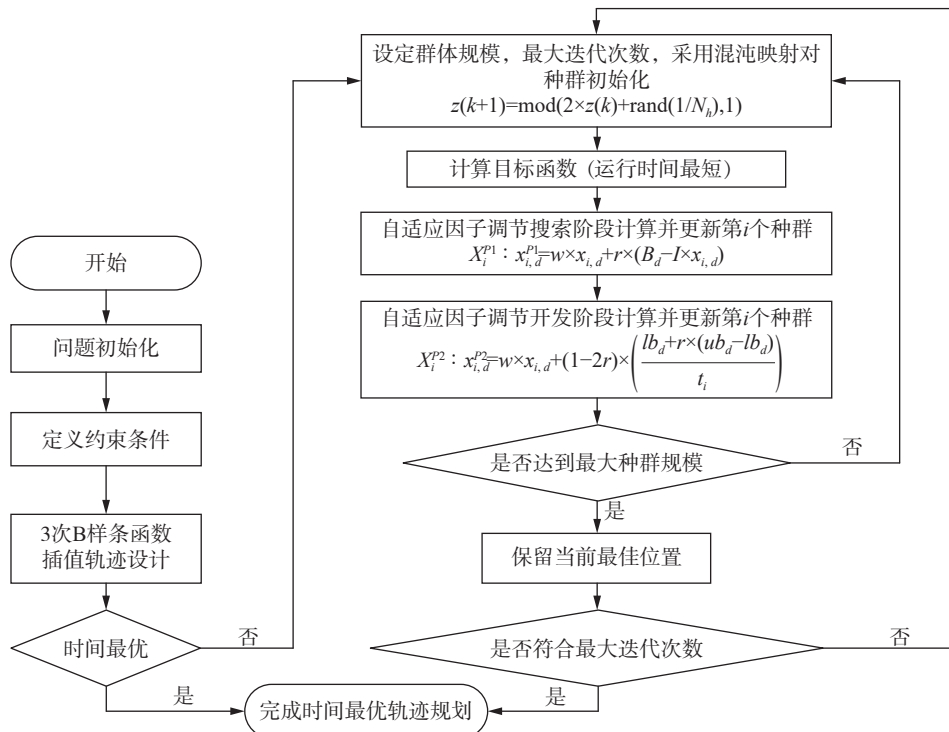


图1 基于改进高尔夫优化算法的时间最优轨迹规划流程

2.2 基准测试函数与结果分析 为了测试改进高尔夫算法的性能,选取单峰、多峰基准测试函数各3个进行验证,6个基准测试函数如表1所示。算法的参数设置如下:最大迭代次数为500次,空间维度为30维,种群规模为30个。与多种优化算法就6个单目标测试函数进行对比,各自运行30次,仿真结果性能指标对比如表2所示。其中,IGOA为改进高尔夫算法,GA是遗传算法,GOA是标准高尔夫算法,COA是浣熊优化算法,DBO是蜣螂优化算法。

表 1 基准测试函数

函数名	函数表达式	类型	定义域	理论最优值
Sphere Function	$f_1(x) = \sum_{i=1}^{30} x_i^2$	单峰	[-100, 100]	0
Schwefel's Problem 2.22	$f_2(x) = \sum_{i=1}^{30} x_i + \prod_{i=1}^{30} x_i $	单峰	[-10, 10]	0
Schwefel's Problem 2.21	$f_3(x) = \max_i \{ x_i , 1 < i < 30\}$	单峰	[-100, 100]	0
Generalized Rastrigin's Function	$f_4(x) = \sum_{i=1}^{30} [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10]$	多峰	[-5.12, 5.12]	0
Ackley's Function	$f_5(x) = -20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{30}\sum_{i=1}^{30} x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{30}\sum_{i=1}^{30} \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	多峰	[-32, 32]	0
Shekel's Foxholes Function	$f_6(x) = \left[\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^2 (x_i - a_{ij})^6} \right]^{-1}$	多峰	[-65.53, 65.53]	1

由表 2 可知, IGOA 相比于 GOA、COA、GA、DBO 更加接近理论值, 说明 IGOA 的寻优性能更稳定更好。

表 2 基准测试函数仿真结果性能指标对比

指标	算法	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
中位值	COA	0	1.539E-187	1.258E-188	0	4.441E-16	0.998
	DBO	1.726E-134	3.817E-67	1.596E-66	0	4.441E-16	0.998
	GOA	5.011E-296	1.729E-151	5.896E-145	0	4.441E-16	1.545
	GA	8.000 E-4	1.300E-03	2.100E-03	1.900E-05	1.320E-02	0.998
	IGOA	0	0	0	0	4.441E-16	1.002
平均值	COA	0	1.454E-182	2.509E-182	0	4.441E-16	0.998
	DBO	1.537E-94	2.192E-51	1.147E-53	0.561	4.441E-16	1.297
	GOA	1.566E-291	2.115E-148	1.221E-141	0	4.441E-16	2.729
	GA	2.257E-04	1.000 E-03	5.000E-03	5.793E-05	1.330E-02	1.194
	IGOA	0	0	0	0	4.441E-16	2.917
方差	COA	0	0	0	0	4.441E-16	6.633E-11
	DBO	8.418E-94	1.200E-50	6.275E-53	2.907	0	0.696
	GOA	0	8.277E-148	5.456E-141	0	0	2.437
	GA	7.366E-04	1.200E-03	5.500E-03	8.958E-05	1.130E-02	1.078
	IGOA	0	0	0	0	0	2.704

6 个测试函数应用多种算法求解后的适应度值变化如图 2 所示。

观察图 2a~f 可知: 收敛曲线下降趋势越明显说明收敛速度越快, 纵坐标值越小说明寻优精度越高。与其他算法相比, 本研究所提出的改进高尔夫算法 (IGOA) 的收敛速度高于 GOA、COA、GA、DBO, 同时还有更高的寻优精度, 说明改进高尔夫算法优于所对比的算法。

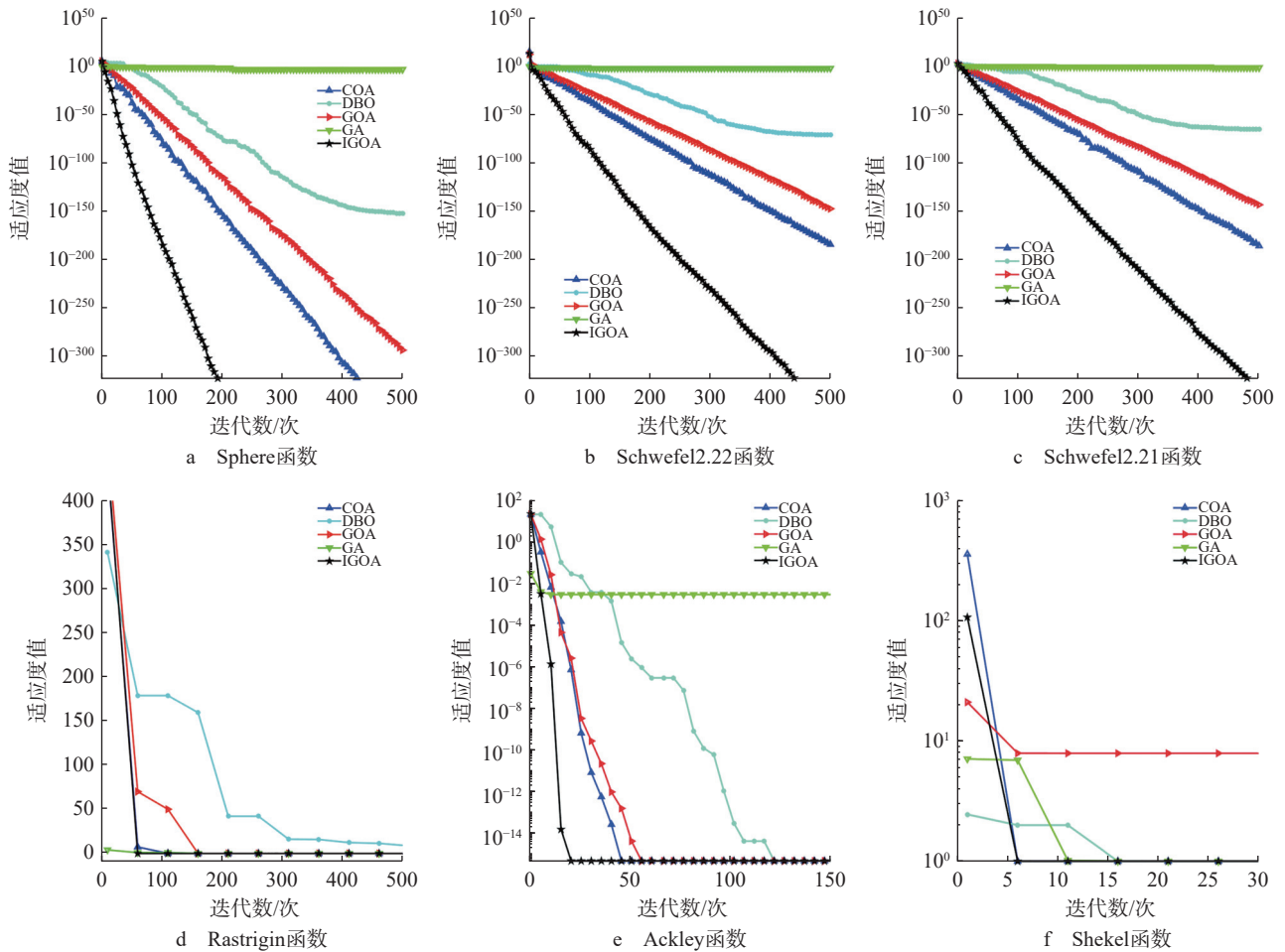


图2 测试函数应用多种算法求解函数的收敛曲线

3 机械臂时间最优轨迹优化与仿真

为了验证上述方法的正确性和有效性,以某六自由度机械臂为研究对象,采用改进D-H坐标法进行运动学建模,如图3所示。在仿真软件中采用3次B样条构造关节轨迹,利用改进高尔夫算法以时间最优为目标对关节轨迹进行优化。机械臂各关节插值点的位置信息如表3所示,其中, θ_1 至 θ_6 分别为关节1至关节6的位置信息。

分别采用遗传算法和改进高尔夫算法对3次B样条轨迹规划进行时间上的优化。其中,种群规模为30个,进化代数为300代,交叉算子为0.65,变异算子为0.15, T_1 至 T_5 分别为机械臂末端经过路径点1至路径点5的绝对时间,机械臂最大关节角速度和角加速度分别为 1.75 和 $3.14 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$,优化结果如表4所示。

在机械臂运动约束条件下对各个关节进行时间最优轨迹规划求解,其运动轨迹如图4所示。

由表4可知,经GA优化后关节轨迹的总运行时间由10.00 s减少到9.08 s,GA比未优化的优化效率平均提升9.20%,而经IGOA优化后关节轨迹的总运行时间由10.00 s减少到6.04 s,IGOA比GA的优化效率平均提升33.48%,说明IGOA的优化效果更好。由图4可知,经IGOA优化后关节轨迹的总运行时间由10.00 s减少到6.04 s,各个关节的角度和角速度曲线均光滑平顺,角加速度曲线连续无突变现象,进一步验证了该算法的有效性。

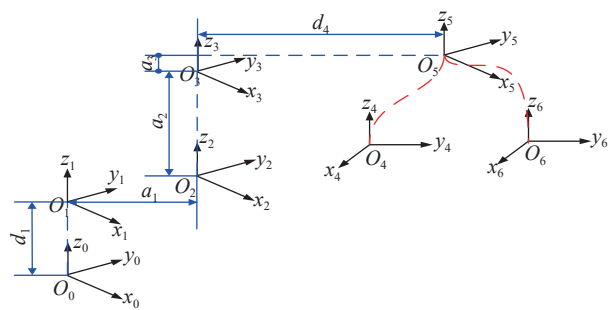


图3 机械臂的D-H坐标系

表 3 各个关节的位置信息

单位: rad

路径点	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
起始点	0.175	0.087	0.262	0.698	0.175	0.785
路径点1	1.047	1.047	0.524	-0.349	-0.698	2.793
路径点2	2.269	1.920	-0.785	0.175	-1.047	2.094
路径点3	1.745	0.349	-1.222	1.222	0.175	0.262
路径点4	-0.175	-1.745	-0.175	-0.175	0.873	-0.175
路径点5	-0.873	-0.524	0.524	0.524	-0.175	0.873

表 4 经遗传算法和改进高尔算法优化后的 3 次 B 样条各段轨迹时间

单位: s

各算法对应时间序列	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	总时间
未优化的初始序列	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	10.00
遗传算法时间序列	1.73	1.81	1.84	1.77	1.93	9.08
改进高尔算法时间序列	1.31	1.13	1.24	1.02	1.24	6.04

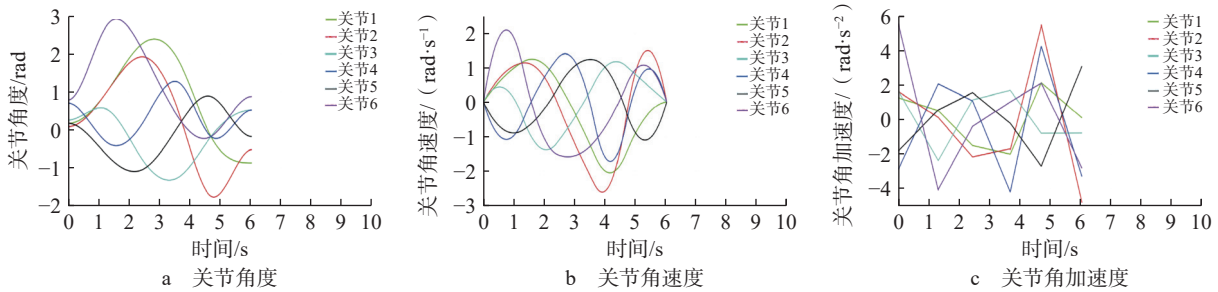


图 4 优化后 6 个关节角度、角速度和角加速度变化曲线

4 结 论

以机械臂时间最优轨迹规划问题为研究对象, 提出了一种改进高尔优化算法。通过对混沌映射策略及自适应权重进行合理匹配, 与多种优化算法就 6 个单目标测试函数进行对比, 测试结果表明: 改进高尔优化算法能得到更小的目标值且稳定性更好。将改进高尔算法应用到机械臂时间最短轨迹优化, 经优化后轨迹时间相对未优化明显缩短。轨迹仿真实验的结果表明: 速度曲线光滑平顺, 加速度曲线连续无突变现象, 从而验证了改进高尔算法在解决时间最优轨迹规划问题上的可行性和有效性。

参考文献:

[1] 龙樟, 李显涛, 帅涛, 等. 工业机器人轨迹规划研究现状综述 [J]. 机械科学与技术, 2021, 40(6): 853-862.
 LONG Z, LI X T, SHUAI T, et al. Review of research state of trajectory planning for industrial robots[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(6): 853-862.

[2] 孙晓军, 宋代平, 林敬周, 等. 风洞上攻角机器人轨迹规划算法研究与实现 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(16): 1963-1971.
 SUN X J, SONG D P, LIN J Z, et al. Research and implementation of trajectory planning algorithm for attacking robots on wind tunnel[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(16): 1963-1971.

[3] 朱世强, 刘松国, 王宣银, 等. 机械手时间最优脉动连续轨迹规划算法 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 47-52.
 ZHU S Q, LIU S G, WANG X Y, et al. Time-optimal and jerk-continuous trajectory planning algorithm for manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3): 47-52.

- [4] 李小为, 胡立坤, 曾宪金. 基于改进遗传算法的机器人时间最优轨迹规划 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(5): 1020-1026.
LI X W, HU L K, ZENG X J. Improved GA based time optimal trajectory planning for 6 DOF robot manipulators at different speeds[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2014, 39(5): 1020-1026.
- [5] 殷凤健, 梁庆华, 程旭, 等. 基于时间最优的机械臂关节空间轨迹规划算法 [J]. 机械设计与研究, 2017, 33(5): 12-15.
YIN F J, LIANG Q H, CHENG X, et al. Research on mechanical arm joint space trajectory planning algorithm based on optimal time[J]. Machine Design and Research, 2017, 33(5): 12-15.
- [6] 陈哈, 李林升. 基于复合形法的时间最优机械臂轨迹规划 [J]. 机械传动, 2019, 43(3): 72-75, 94.
CHEN H, LI L S. Trajectory planning of time optimal manipulator based on complex method[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(3): 72-75, 94.
- [7] 李国洪, 王远亮. 基于 B 样条和改进遗传算法的机器人时间最优轨迹规划 [J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(11): 215-223, 279.
LI G H, WANG Y L. Time-optimal trajectory planning of robots based on B-spline and improved genetic algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(11): 215-223, 279.
- [8] MA J W, GAO S, YAN H T, et al. A new approach to time-optimal trajectory planning with torque and jerk limits for robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021, 140: 103744.
- [9] 赵业和, 刘达新, 刘振宇, 等. 基于多种群竞争松鼠搜索算法的机械臂时间最优轨迹规划 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(12): 2321-2329, 2402.
ZHAO Y H, LIU D X, LIU Z Y, et al. Time-optimal trajectory planning of manipulator based on multi-group competition squirrel search algorithm[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(12): 2321-2329, 2402.
- [10] 郭鑫鑫, 薄瑞峰, 贾竣臣, 等. 基于改进萤火虫算法的机械臂时间最优轨迹规划 [J]. 机械设计与研究, 2021, 37(3): 55-59.
GUO X X, BO R F, JIA J C, et al. Time optimal trajectory planning of manipulator based on improved firefly algorithm[J]. Machine Design and Research, 2021, 37(3): 55-59.
- [11] 袁旭华, 刘羽, 林喜辉. 机械臂时间最优轨迹的样条曲线拟合与智能规划 [J]. 机械设计与制造, 2022, 379(9): 162-167.
YUAN X H, LIU Y, LIN X H. Spline curve fitting and intelligent planning of manipulator time-optimal trajectory[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022, 379(9): 162-167.
- [12] 李虎, 刘泓滨. 基于改进 PSO 算法的时间最优机械臂轨迹规划 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(1): 29-33.
LI H, LIU H B. Time optimal manipulator trajectory planning based on Improved particle swarm optimization algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(1): 29-33.
- [13] 赵晶, 祝锡晶, 孟小玲, 等. 改进鲸鱼优化算法在机械臂时间最优轨迹规划的应用 [J]. 机械科学与技术, 2023, 42(3): 388-395.
ZHAO J, ZHU X J, MENG X L, et al. Application of improved whale optimization algorithm in time-optimal trajectory planning of manipulator[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(3): 388-395.
- [14] MONTAZERI Z, NIKNAM T, AGHAEI J, et al. Golf optimization algorithm: a new game-based metaheuristic algorithm and its application to energy commitment problem considering resilience[J]. *Biomimetics*, 2023, 8(5): 386.

(责任编辑: 张秀梅, 英文编译: 王凤阳)