

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2520058

基于改进 PSO 的艾灸机器人机械臂轨迹规划*

张怡豪^{1,2} 李跃忠^{1,2,3} 叶兰^{1,2}

(1. 东华理工大学电子与电气工程学院 南昌 330013; 2. 江西省康复辅具产业技术研究院 南昌 330013;
3. 南昌市脑机接口与智能康复装备重点实验室 南昌 330013)

摘要: 为提升艾灸机器人机械臂轨迹规划的效率和性能,对关节空间轨迹规划方法进行研究。提出了一种改进的粒子群算法,通过引入动态调整的惯性权重与学习因子,并结合 3-5-3 多项式插值法进行轨迹规划。利用 MATLAB 中的六轴机器人建立机械臂模型进行仿真实验,在仿真实验中,将该算法与标准粒子群算法进行比较,结果表明:改进算法规划出的各关节角位移、角速度及角加速度曲线连续平滑,无突变,起止速度为零,且全程速度与加速度均严格满足约束条件,未超过最大工作限值。同时,轨迹规划时间由 7 s 减少至 3.139 s,时间效率提升 55.16%,验证了所提算法在机械臂轨迹规划中的有效性与优越性。

关键词: 艾灸机器人;轨迹规划;改进粒子群算法;惯性权重;时间最优

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8050

Trajectory planning for the mechanical arm of the moxibustion robot based on the improved particle swarm optimization algorithm

Zhang Yihao^{1,2} Li Yuezhong^{1,2,3} Ye Lan^{1,2}

(1. School of Electronic and Electrical Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. Jiangxi Industrial Technology Research Institute of Rehabilitation Assistance, Nanchang 330013, China;
3. Nanchang Key Laboratory of Brain-Computer Interface and Intelligent Rehabilitation Equipment, Nanchang 330013, China)

Abstract: To enhance the efficiency and performance of trajectory planning for the robotic arm of a moxibustion robot, a study on joint space trajectory planning methods was conducted. An improved particle swarm optimization (PSO) algorithm was proposed, which incorporated dynamically adjusted inertia weights and learning factors, combined with 3-5-3 polynomial interpolation for trajectory planning. A six-axis robot model in MATLAB was used to establish the robotic arm model for simulation experiments. In the simulations, the proposed algorithm was compared with the standard PSO algorithm. The results showed that the joint angular displacement, angular velocity, and angular acceleration curves planned by the improved algorithm were continuous and smooth without abrupt changes. The initial and final velocities were zero, and the entire velocity and acceleration profiles strictly satisfied the constraints without exceeding the maximum operational limits. Meanwhile, the trajectory planning time was reduced from 7 s to 3.139 s, representing a 55.16% improvement in time efficiency. The results verify the effectiveness and superiority of the proposed algorithm in robotic arm trajectory planning.

Keywords: moxibustion robot; trajectory planning; improved particle swarm optimization algorithm; inertia weight; optimal timing

0 引言

近年来,为应对我国人口老龄化的趋势和满足人民对更高生活水平的追求,我国高度重视医疗康复设备的发展^[1]。艾灸作为中医常用疗法被广泛应用于许多疾病的防

治中,但是传统的艾灸治疗仍存在一些弊端,例如由于传统的艾灸疗法依靠医师的手工操作,其施灸过程重复性工作量大,会导致治疗过程较为繁琐,效率偏低。另一方面由于艾灸过程对穴位的准确度、艾草与施灸穴位之间的距离、艾灸的时间等因素要求过高,人工施灸无法保证艾灸的治疗

收稿日期:2025-10-17

* 基金项目:江西省自然科学基金(20242BAB20058)资助

效果,随着科技的发展,智能艾灸机器人应运而生。

目前已经有许多学者对智能艾灸机器人进行了研究,智能艾灸机器人通过自动化作业,能有效减轻人工操作的繁琐与劳动强度,显著提升工作效率。它在操作过程中运行稳定,可排除外界干扰,确保艾灸效果的稳定性和一致性。同时,机器人能最大限度减少人为因素影响,提升治疗安全性,并通过精准定位腧穴,保障艾灸的准确性与有效性。将机器人技术结合传统的艾灸手法实现机械臂的轨迹规划用来完成艾灸过程。

机械臂经常被用来完成各种复杂的任务,轨迹规划是机械臂运动控制的核心环节,直接影响运动性能。围绕机械臂的运行时间、路径质量等方面进行优化,可以在很大程度上提高机械臂的工作效率^[2]。崔靖凯等^[3]提出一种基于强化学习的灰狼算法以实现算法局部和全局搜索的自主平衡,完成了冗余机械臂的最优轨迹规划。黄成等^[4]提出一种基于混合蜜獾算法最优运动规划方法,实现了机械臂末端执行器运动路径最短及关节运动时间最优。刘金科等^[5]针对 USV 复杂障碍环境下全局路径规划问题,提出一种基于多策略优化黏菌算法的全局路径规划方法。相较于原始黏菌算法及其他对比算法,改进后的算法展现出较好的收敛精度与稳定性。蒋翱徽等^[6-7]分别提出了通过引入 Bernoulli 混沌映射、可变螺旋搜索策略、新型惯性权重和 Levy 飞行策略改进的蜣螂优化算法和加入了混沌序列和准反向学习策略的改进灰狼算法,并将其应用于无人机三维路径规划,取得了很好的效果。欧阳鹏等^[8]为更好地解决移动机器人路径规划问题,提出了一种基于自适应精英变异的改进天牛群算法(AEM-BSO),并将 AEM-BSO 应用于求解移动机器人全局路径,借助三次样条插值方法,对规划得出的全局路径节点进行平滑化处理,使路径更贴合实际运动需求。Liu 等^[9]提出了一种多机制改进灰狼优化算法,规划了更可行、更稳定的路径。Liu 等^[10]提出了一种基于动态自适应粒子群优化算法非常适合机械臂实时轨迹优化。

基于上述研究,本文提出一种改进的粒子群算法,通过对惯性权重和对学习因子的动态调整,实现对迭代进程和粒子分散程度的动态调整,用于优化机械臂关节空间轨迹。针对艾灸机械臂在艾灸过程中实现艾灸效果的问题,本文以机械臂运动学的约束条件为背景,建立了 PUMA560 机械臂的运动学模型作为研究对象,通过改进的粒子群算法和 3-5-3 多项式插值的方法对机械臂的关节空间进行轨迹规划,并且设计通过与标准的粒子群算法进行对照仿真实验验证了该算法的有效性。

1 改进粒子群算法原理

1.1 原始粒子群算法

粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)是一种进化计算技术(evolutionary computation, EC),1995

年由 Kennedy 等^[11]提出,参照鸟类的飞行空间,设计求解的问题的搜索空间,每个优化问题的解都是搜索空间中一只鸟,并将其称之为“粒子”。将寻找问题最优解的过程看作鸟类寻找食 i 物的过程,从而求解复杂的优化问题^[12]。

PSO 初始化为一群随机粒子(随机解),然后通过迭代来找到最优解。在每一次的迭代中,粒子通过跟踪两个极值(p_{best} 、 g_{best})来更新自己。在找到这两个最优值后,粒子通过下面的式(1)、(2)来更新自己的速度和位置^[12]。

$$v_i^{(t+1)} = v_i^{(t)} + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (p_{best} - x_i^{(t)}) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (g_{best} - x_i^{(t)}) \quad (1)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_i \quad (2)$$

上述公式即为 PSO 的标准形式,在上述公式中, $i = 1, 2, \dots, N$, 表示此群中粒子总数; c_1 和 c_2 为加速参数; v_i 是粒子的速度; $\text{rand}()$ 是介于(0,1)之间的随机数; $p_{best} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}), i = 1, 2, \dots, N$ 表示第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置称为个体极值; $g_{best} = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{iD}), i = 1, 2, \dots, N$ 表示整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置称为全局极值。

标准形式的 PSO 可以看作由 3 部分组成,分别是“惯性”部分、“自身认知”部分和“群体认知”部分。这 3 个部分分别反映了粒子维持自己已有速度的趋势;粒子逼近自身历史最佳位置的趋势;粒子逼近群体最佳或者邻域历史最佳位置的趋势。

式(1)中两个加速参数 c_1 和 c_2 的作用是为了保证群体种类的多样化,也称学习因子,该因子的最大作用可以促使粒子具有强大的向群体中最优个体的学习能力,且可以充分地进行自我总结,促使各个粒子都能向着自身的最优点逼近^[12]。

1.2 改进的粒子群优化算法

在粒子群算法中可以引入惯性权重 ω 保证算法有较好的收敛速度^[13],其进化过程为:

$$v_i^{(t+1)} = \omega \cdot v_i^{(t)} + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (p_{best} - x_i^{(t)}) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (g_{best} - x_i^{(t)}) \quad (3)$$

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot t}{T_{\max}} \quad (4)$$

上述公式也称为标准的粒子群算法,在该公式中, T_{\max} 表示最大迭代次数; ω_{\max} 表示最大惯性权重; ω_{\min} 表示最小惯性权重; t 表示当前迭代次数。一般取 $\omega_{\max} = 0.9, \omega_{\min} = 0.4$ 。

由于惯性权重 ω 是以算法的最大和当前迭代次数推导而来,使得权重存在例如不可逆性的问题。为解决这样的问题,需要引入动态惯性权重来获得更好的寻优结果。为降低算法陷入局部最优的风险,提升全局探索能力,对惯性权重的更新策略进行了改进。引入指数函数 $e^{-t/T_{\max}}$ 实现惯性权重的非线性动态调整,并在迭代后期结合贝塔分布随机数以增强搜索多样性。具体地,利用 MATLAB 中的

betarnd 函数生成随机扰动项,改进后的惯性权重计算公式为:

$$\omega = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) * e^{-t/t_{\max}} + \sigma * \text{betarnd}(p, q) \quad (5)$$

式中: t 是当前迭代次数; t_{\max} 是最大迭代次数; σ 为惯性调整因子,取 0.1; ω_{\max} 为初始惯性权重,取 0.9; ω_{\min} 为算法最大迭代次数时的惯性权重,取 0.4; $p = 1, q = 3$ 。

为平衡算法的全局探索与局部开发能力,设计一种非线性递减的惯性权重动态调整机制。该机制在迭代后期引入基于 Beta 分布的随机扰动,旨在增强算法前期的全局搜索能力,并加速后期的收敛速度。

在式(3)中加入自适应权重变化的 c_1 和 c_2 ^[14]。如式(6)所示,其中 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$ 表示动态学习因子; $f(t)$ 表示当前粒子的适应度值; f_{avg} 和 f_{\min} 分别表示当前粒子群的平均适应度值和最小适应度值; α 和 β 是介于(0,1)的常量。

$$\begin{cases} c_1(t) = \alpha \frac{f(t) - f_{\min}}{f_{\text{avg}} - f_{\min}} + \beta \\ c_2(t) = \alpha(1 - \frac{f(t) - f_{\min}}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}) + \beta \end{cases} \quad (6)$$

针对算法在迭代后期因种群多样性下降而易于陷入局部最优的问题,本文引入了差分进化操作以增强全局探索能力。具体而言,通过其变异与交叉操作对粒子位置进行更新,从而提升跳出局部最优解的概率。更新后的公式如式(7)所示。

$$\begin{cases} x_{r_1,j} + F(x_{r_2,j} - x_{r_3,j}), & \text{rand} < CR \\ x_{r_1,j}, & \text{rand} \geq CR \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x_{r_1,j}, x_{r_2,j}, x_{r_3,j}$ 分别是 3 个随机个体,且 $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$; F 称为缩放因子,取 0.5; CR 为交叉概率,取 0.1; rand 为 0~1 的随机数。当 rand 产生的随机数小于交叉概率时,用变异操作对粒子的位置进行更新;当 rand 产生的随机数大于交叉概率时,保持不变。

结合上述改进,该算法运算流程图如图 1 所示。

引入上述操作能有效维持种群多样性,显著增强算法的全局探索性能,从而帮助算法在迭代后期有效规避局部最优。

2 时间最优轨迹规划

2.1 3-5-3 多项式插值函数构造

为了保证机械臂关节轨迹的平滑过渡,满足位置、速度和加速度的连续性要求,需要对关节运行的角速度和加速度进行控制和规划^[15]。在机械臂轨迹规划中,三次与五次多项式插值是两种常用的控制方法,但各自存在一定的局限性。若单独采用三次多项式,会导致加速度不连续;而使用更高次多项式则可能引发龙格现象。为此,本文提出一种分段轨迹规划策略:在机械臂的加速与减速阶段采用三

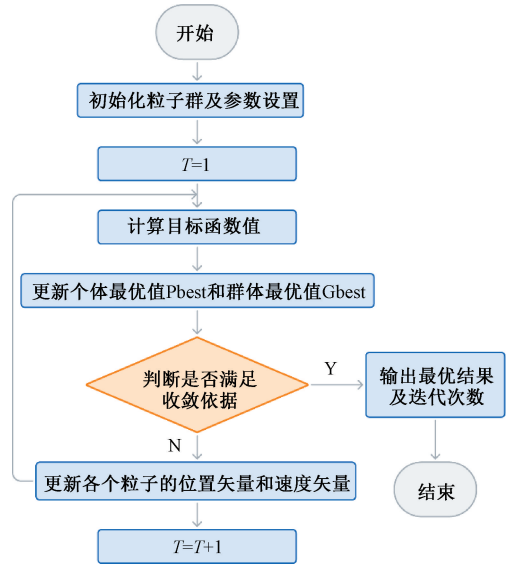


图 1 改进粒子群算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the improved particle swarm optimization algorithm

次多项式插值,以实现平滑启停,避免速度突变;在中间运动阶段则采用五次多项式,确保关节的位置、速度及加速度均保持连续。该混合方法兼顾了运动平滑性与控制稳定性。具体分段示意图如图 2 所示。

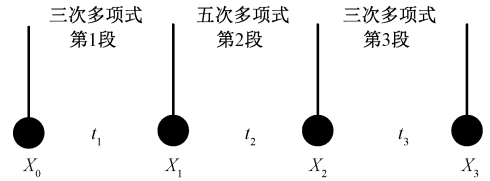


图 2 分段示意图

Fig. 2 Segmented schematic diagram

对于多项式函数插值,一阶导数表示角速度,二阶导数表示角加速度,3-5-3 多项式表达式^[16]为:

$$\begin{cases} \theta_{j1}(t) = a_{j13}t^3 + a_{j12}t^2 + a_{j11}t + a_{j10} \\ \theta_{j2}(t) = a_{j25}t^5 + a_{j24}t^4 + a_{j23}t^3 + a_{j22}t^2 + a_{j21}t + a_{j20} \\ \theta_{j3}(t) = a_{j33}t^3 + a_{j32}t^2 + a_{j31}t + a_{j30} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\theta_{j1}(t), \theta_{j2}(t), \theta_{j3}(t)$ 分别代表 3-5-3 样条多项式的轨迹; $a_{j10}, a_{j11}, a_{j12}, a_{j13}$ 为第 j 个关节轨迹第 1 段多项式的系数; $a_{j20}, a_{j21}, a_{j22}, a_{j23}, a_{j24}, a_{j25}$ 为第 j 个关节轨迹第 2 段多项式的系数; $a_{j30}, a_{j31}, a_{j32}, a_{j33}$ 为第 j 个关节轨迹第 3 段多项式的系数, t 为时间。多项式中的系数 a 可根据约束条件来求出,并根据约束条件和约束边界可求出矩阵 A ,由矩阵表达式可以看出约束条件和约束边界只与时间 t 有关^[17],系数 a 可由式(9)~(11)求得:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3t_1^3 & 2t_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6t_1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_2^5 & t_2^4 & t_2^3 & t_2^2 & t_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 5t_2^4 & 4t_2^3 & 3t_2^2 & 2t_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20t_2^3 & 12t_2^2 & 6t_2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_3^3 & t_3^2 & t_3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3t_3^2 & 2t_3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6t_3 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{\theta} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ x_{j3} \ 0 \ 0 \ x_{j0} \ 0 \ 0 \ x_{j2} \ x_{j1}]^T \tag{10}$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{A}^{-1}\boldsymbol{\theta} = [a_{j13} \ a_{j12} \ a_{j11} \ a_{j10} \ a_{j25} \ a_{j24} \ a_{j23} \ a_{j22} \ a_{j21} \ a_{j20} \ a_{j33} \ a_{j32} \ a_{j31} \ a_{j30}]^T \tag{11}$$

式(9)表示关节角的位移矩阵,其中 t_1 、 t_2 、 t_3 分别表示第 j 关节的3段多项式插值的时间;式(10)即系数 \mathbf{a} 的求解方程式; X_{j0} 、 X_{j1} 、 X_{j2} 、 X_{j3} 分别为第 j 个关节在4个插值点处的关节角度; t_1 、 t_2 、 t_3 分别为3段的插值时间。

2.2 构建目标函数

通过对机械臂各个关节运行时间的优化,来实现机械臂轨迹规划过程中对整体时间上的优化。为提升机械臂轨迹规划的计算效率,采用以下优化策略:在设定轨迹的起始点、插值点与终止点后,将各关节在插值点间的运动时间作为优化目标。通过将多项式系数视为决策变量,并将时间参数直接纳入搜索空间进行优化,可有效降低问题维度。该方法显著减少了计算负担,同时降低了粒子群算法的优化复杂度与求解难度。用粒子群算法对机器人末端的轨迹进行优化,这时的搜索空间维数为3,轨迹优化的最终目标是在满足动力学约束的条件下,所有关节运动的时间最短^[18],因此适应度函数就为:

$$f(t) = \min(t_{i1} + t_{i2} + t_{i3}) \tag{12}$$

$$s.t. \begin{cases} \max\{|v_{i1}|\} \leq v_{\max} \\ \max\{|v_{i2}|\} \leq v_{\max} \\ \max\{|v_{i3}|\} \leq v_{\max} \end{cases} \tag{13}$$

式(12)为机械臂执行运动时应满足的3个约束条件^[19], v_{ij} 和 v_{\max} 分别是第 i 个关节的实时速度和最大限制速度; t_{i1} 、 t_{i2} 、 t_{i3} 分别为第 i 个关节3段插值时间; j 指的是插值点的序号, $j=1,2,3,4$,一共4个插值点。

2.3 时间最优轨迹规划问题求解

为实现机械臂运动的时间最优控制,采用分层粒子群优化策略。首先,对各关节分别进行独立的时间最优轨迹规划;随后,将各关节优化结果集成,并基于粒子群算法对

系统整体轨迹进行协同优化,最终生成机械臂全局时间最优运动路径。轨迹优化的算法流程如图3所示。

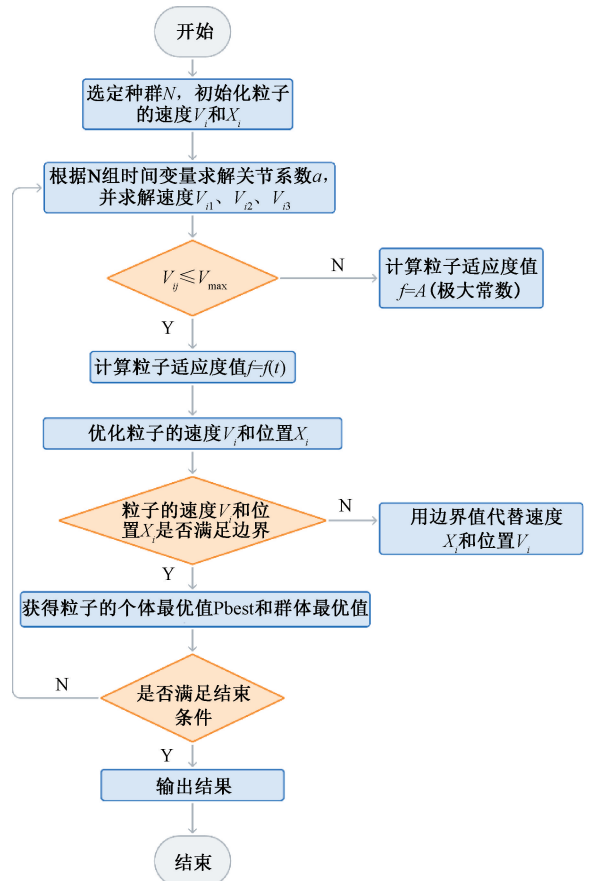


图 3 轨迹优化流程图

Fig. 3 Trajectory optimization flowchart

3 仿真结果分析

3.1 机械臂模型建立

作为艾灸机器人系统中的艾灸治疗执行机构,机器人的选择要考虑到应用场景、自由度和工作范围等几个方面。由于需要模拟人手的各种姿态和动作,需要选择具有六自由度的机器人此外,工作范围要求能够到达躺在床上任一位置;定位精度也是一个重要考量因素^[20]。因此本文研究使用 PUMA560 六轴机器人模型进行仿真实验分析,其机械臂的结构如图 4 所示,其对应的 D-H 参数模型如表 1 所示。

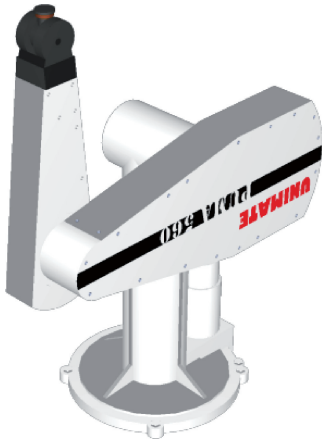


图 4 PUMA560 机械臂结构

Fig. 4 Structure of PUMA560 robotic arm

表 1 机械臂 D-H 参数

Table 1 Parameter of D-H for robotic arm

关节 i	关节角度 θ_i/rad	关节偏移 d_i/m	连杆长度 a_i/m	连杆转角 α_i/rad
1	θ_1	0	0	0
2	θ_2	0	0	$-\pi/2$
3	θ_3	0.149	0.432	0
4	θ_4	0.433	0	$-\pi/2$
5	θ_5	0	0	$\pi/2$
6	θ_6	0	0	$-\pi/2$

利用已知的各关节参数,在 MATLAB 软件中时候 D-H 参数法建立 PUMA560 机械臂模型,如图 5 所示^[21]。

3.2 仿真与实验结果分析

根据机械臂运行轨迹,初步选定起始点 X_0 (296.505, -251.400, 379.065)、插值点 X_1 (508.000, -110.500, 391.308)、插值点 X_2 (589.434, 145.763, 284.681)、插值点 X_3 (458.156, 430.521, -92.822)。机械臂末端笛卡尔空间插值点坐标如表 2 所示。通过 MATLAB 机器人工具箱 teach 函数求得各个关节坐标如表 3 所示。

将改进的粒子群算法、标准粒子群算法和标准鲸鱼算法在 MATLAB 软件中进行仿真比较,设置初始参数本别

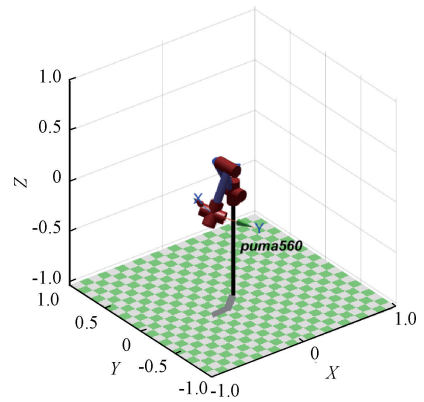


图 5 PUMA560 机械臂模型

Fig. 5 PUMA560 robotic arm model

表 2 机械臂末端笛卡尔空间插值点坐标

Table 2 The coordinates of the Cartesian space interpolation point at the end of the robotic arm

插值点	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标
X_0	296.505	-251.400	379.065
X_1	508.000	-110.500	291.308
X_2	589.434	145.763	284.681
X_3	458.156	430.521	-92.822

表 3 各关节角度

Table 3 Angles of each joint ($^\circ$)

关节 i	X_0 处 角度	X_1 处 角度	X_2 处 角度	X_3 处 角度
1	-30	0	30	60
2	0	-30	-45	-90
3	-90	-60	-45	-30
4	-60	-90	-60	-45
5	-120	-90	-45	-30
6	-30	-45	-60	-90

为: $N=20$; $\omega_{\max}=0.9$, $\omega_{\min}=0.4$; $T_{\max}=200$; $c_{1\max}=c_{2\max}=2$, $c_{1\min}=c_{2\min}=0.02$ 。由此可得到两种优化算法在各个关节中的适应度曲线(如图 6 所示)和改进粒子群算法优化后的各关节的三段插值时间(如表 4 所示)。

如图 6 所示,改进粒子群算法的优化性能较标准算法和标准鲸鱼算法都有显著提升。对比标准粒子群算法,以关节 1 为例,其适应度曲线显示:标准粒子群算法于 2.690 8 s 收敛,而改进粒子群算法仅需 1.298 2 s,适应度值降低 51.75%。其余关节的优化结果同样表明改进粒子群算法的优越性,关节 2~6 的收敛适应度值分别下降 8.52%、55.65%、16.82%、72.94% 和 95.52%,平均降幅达 49.72%。对比标准鲸鱼算法,关节 1~6 的收敛适应度值分别下降 51.37%、16.12%、49.82%、16.23%、64.76%、54.92%,平均降幅 42.20%。

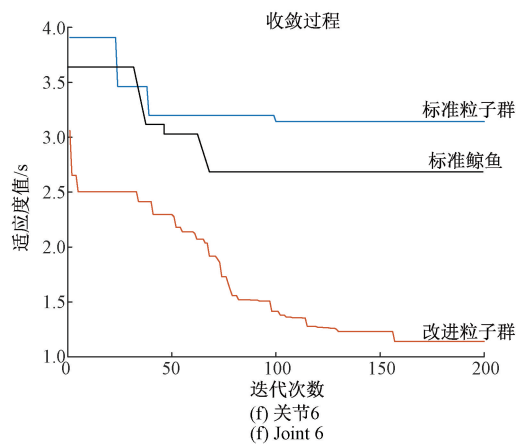
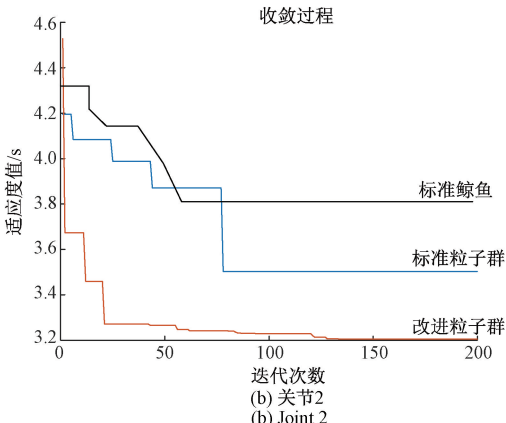
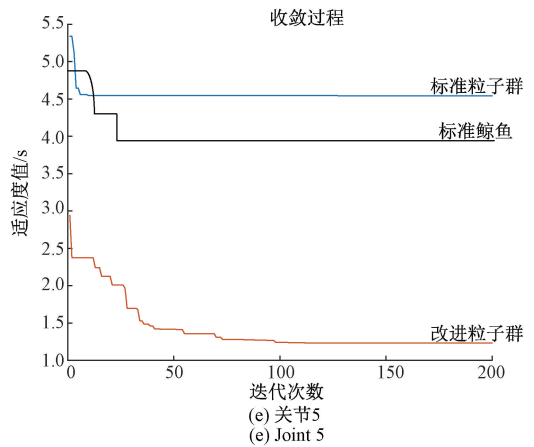
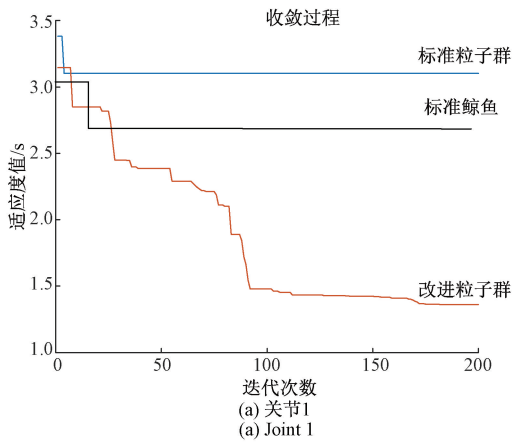


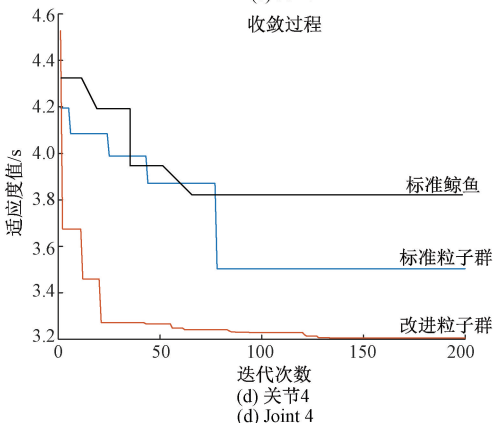
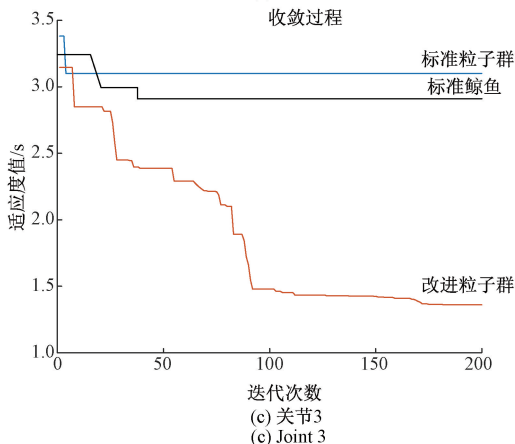
图 6 适应度变化曲线

Fig. 6 Fitness change curve

表 4 各关节最优插值时间

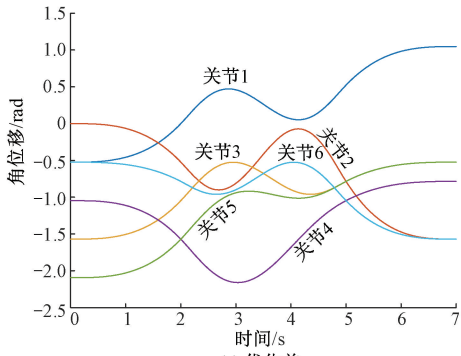
Table 4 Optimal interpolation time for each joint s

关节 i	第 1 段时间	第 2 段时间	第 3 段时间
1	0.987 0	1.174 6	1.964 4
2	0.987 0	1.164 8	1.974 2
3	0.987 0	1.164 8	1.974 2
4	0.987 0	1.164 8	1.974 2
5	0.987 0	1.174 6	1.964 4
6	0.987 0	1.174 6	1.964 4

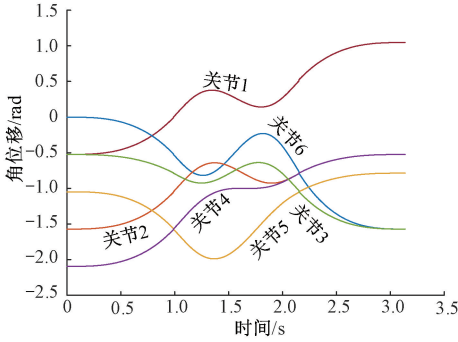


在收敛速度方面,改进粒子群算法亦表现出明显优势。例如关节 2 中,改进粒子群算法于第 22 次实现收敛,而标准粒子群算法和标准鲸鱼算法分别第 78 次和第 56 次实现收敛,显示出更快的寻优效率。综合分析表明,改进算法在优化精度与收敛速度两方面均优于标准算法。

为验证改进算法的实际效果,基于 MATLAB 平台对优化结果进行仿真,得到机械臂各关节的角位移、角速度及角加速度在优化前后的变化曲线(如图 7~9 所示)。仿真结果表明:未经优化时机械臂完成动作需 7 s,经改进粒子群算法优化后耗时仅 3.139 s,时间缩短 55.16%。进



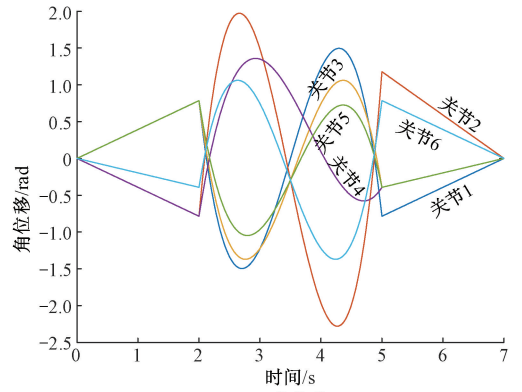
(a) Before optimization



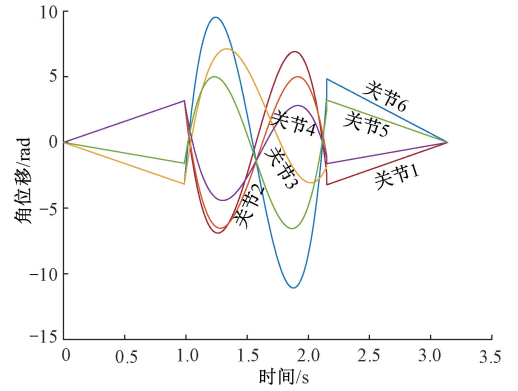
(b) After optimization

图 7 各关节角位移变化曲线

Fig. 7 Curves of angular displacement changes of each joint



(a) Before optimization



(b) After optimization

图 9 各关节角加速度变化曲线

Fig. 9 The variation curves of angular acceleration at each joint

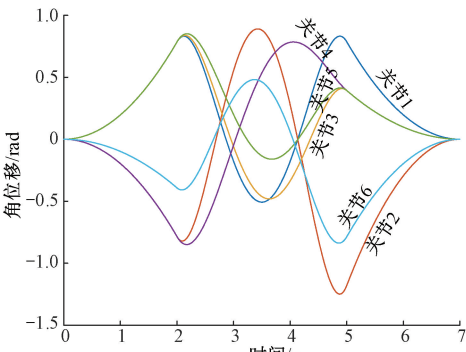
一步分析曲线可知,各关节运动轨迹平滑连续,无突变;运动过程起止速度为零,全程速度与加速度均严格限于各关节约束范围内,符合工程实际要求。

4 结 论

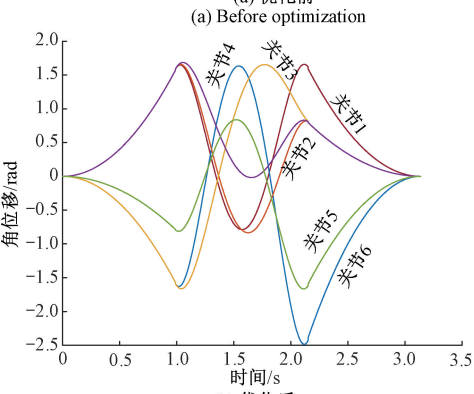
为保证艾灸机器人的作业稳定与效率,本研究以 PUMA560 机械臂为对象,提出一种融合 3-5-3 多项式插值与改进粒子群算法的轨迹规划方法。通过动态调整惯性权重与学习因子增强算法性能, MATLAB 仿真结果表明:各关节平均最小适应度值对比标准粒子群算法和标准鲸鱼算法分别下降 51.75% 和 42.20%, 轨迹规划时间由 7 s 缩短至 3.139 s, 整体耗时降低 55.16%, 验证了所提方法的有效性与优越性。在算法实时性方面上, 轨迹规划时间经缩短后提升了施灸过程中对各个穴位之间的反应速度, 提升了施灸过程中的准确性和稳定性。综上所述, 改进的粒子群算法可以应用于艾灸机械人机械臂的轨迹规划。

参考文献

- [1] 项鑫, 王乙. 中国人口老龄化现状、特点、原因及对策[J]. 中国老年学杂志, 2021, 41(18): 4149-4152.
- XIANG X, WANG Y. The current situation,



(a) Before optimization



(b) After optimization

图 8 各关节角速度变化曲线

Fig. 8 Curves of angular velocity changes at each joint

- characteristics, causes and countermeasures of population aging in China [J]. Chinese Journal of Gerontology, 2021, 41(18): 4149-4152.
- [2] 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.
GUO Y, LAI G. Review of joint space trajectory planning and optimization for industrial robot [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(2): 154-165.
- [3] 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 ZH Q, et al. Optimal trajectory planning of robotic manipulator based on improved grey wolf optimizer [J]. Control and Decision, 2025, 40(5): 1457-1466.
- [4] 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 CH, WANG T, XU J ZH. Optimal motion planning method of manipulator based on hybrid honey badger algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 234-247.
- [5] 刘金科, 梁作鹏, 蒲泽森, 等. 基于改进黏菌算法的无人船全局路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(9): 111-125.
LIU J K, LIANG Z P, PU Z S, et al. Enhanced slime mould algorithm-based global path planning for unmanned surface vehicles [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(9): 111-125.
- [6] 蒋翱徽, 刘文红. 基于改进蜣螂优化算法的无人机三维路径规划[J]. 电子测量技术, 2024, 47(13): 128-135.
JIANG AO H, LIU W H. Unmanned aerial vehicle three-dimensional path planning based on improved dung beetle optimization algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(13): 128-135.
- [7] 宋宇, 高岗, 梁超, 等. 基于多策略改进灰狼算法的无人机路径规划[J]. 电子测量技术, 2025, 48(1): 84-91.
SONG Y, GAO G, LIANG CH, et al. UAV path planning based on multi-strategy improved gray wolf algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(1): 84-91.
- [8] 欧阳鹏, 邝先验, 叶景贞. 基于改进天牛群算法和三次样条插值的路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(7): 259-268.
OUYANG P, KUANG X Y, YE J ZH. Path planning based on improved beetle swarm optimization algorithm and cubic spline interpolation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(7): 259-268.
- [9] LIU X Y, LI G Q, YANG H Y, et al. Agricultural UAV trajectory planning by incorporating multi-mechanism improved grey wolf optimization algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 233: 120946.
- [10] LIU J Q, LIU SH H, SONG M, et al. Time-optimal robotic arm trajectory planning for coating machinery based on a dynamic adaptive PSO algorithm [J]. Coatings, 2024, 15(1): 2.
- [11] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, 1995: 1942-1948.
- [12] GONG CH, ZHOU N R, XIA SH H, et al. Quantum particle swarm optimization algorithm based on diversity migration strategy [J]. Future Generation Computer Systems, 2024, 157: 445-458.
- [13] SHI Y H, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C]. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1998: 69-73.
- [14] WU N K, JIA D Y, LI Z Q, et al. Trajectory planning of robotic arm based on particle swarm optimization algorithm [J]. Applied Sciences, 2024, 14(18): 8234.
- [15] ÖZGE E, BEKIR A. Trajectory planning for a 6-axis robotic arm with particle swarm optimization algorithm [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 122: 106099.
- [16] 孙建华, 何丽, 王宏伟, 等. 采用改进白鹭群优化算法的机械臂时间最优轨迹规划[J]. 计算机科学与探索, 2025, 19(12): 3412-3428.
SUN J H, HE L, WANG H W, et al. Time-optimal trajectory planning for robotic arm using improved egret swarm optimization algorithm [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2025, 19(12): 3412-3428.
- [17] 石宪冈, 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 SH, MIAO H B, ZHANG W. Time optimal trajectory planning for 6-DOF manipulator based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(1): 20-25.
- [18] XIN J B, XU T, ZHU J H, et al. Long short-term memory-based multi-robot trajectory planning: Learn from MPCC and make it better [J]. Advanced Intelligent Systems, 2024, 6(9): 2300703.

- [19] LI C Y, XING H, QIN P B. Robotic arm trajectory planning based on improved slime mould algorithm[J]. Machines, 2025, 13(2): 79.
- [20] 刘鑫明. 智能艾灸机器人腧穴定位技术与艾灸装置研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2024.
- LIU X M. Research on intelligent moxibustion robot acupoint positioning technology and moxibustion device [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2024.
- [21] 张顺程, 郭亮, 姜爱民. 六自由度肩关节康复机器人设计与仿真[J]. 机床与液压, 2022, 50(5): 38-41.
- ZHANG SH CH, GUO L, JIANG AI M. Design and

simulation of 6-DOF shoulder rehabilitation robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(5): 38-41.

作者简介

张怡豪, 硕士研究生, 主要研究方向为工业机器人技术研究。

E-mail: zyh.student@qq.com

李跃忠(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: lyzh@ecut.edu.cn

叶兰, 博士, 副教授, 主要研究方向为机器人、控制理论以及机电一体化。

E-mail: yelan87@163.com