

基于改进粒子群算法的焊接机器人轨迹优化控制方法^①

许 曦^{②*} 熊禾根^{*} 陶 永^{③**} 谢先武^{*} 刘 辉^{**} 孙柏树^{***}

(^{*} 武汉科技大学机械自动化学院 武汉 430081)

(^{**} 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

(^{***} 西北工业集团有限公司 西安 710043)

摘 要 面向 6 自由度弧焊工业机器人的优化控制,对机器人的可达性、奇异性和避免碰撞等约束进行分析,提出约束条件来进行建模,建立了弧焊机器人的参数化运动学模型,在此基础上提出一种基于改进 PSO 优化算法的弧焊机器人轨迹优化控制方法,满足给定的约束条件,使得弧焊机器人在一定的机座位置优化焊接作业轨迹,以更加精确地完成焊接作业。最后,通过仿真和实验验证所提算法的有效性。

关键词 改进粒子群算法(IPSO), 轨迹优化, 弧焊机器人, 逆运行学模型

0 引 言

焊接机器人目前一直应用于生产制造中,例如,汽车零件焊接,零件加工和组装线等,具有高度的重复性,可靠性和灵巧性等优点。但对有复杂几何形状的工件,为了使机器人有效地对这些工件进行操作,机器人底座相对于工件的放置非常重要。由于所需的末端执行器轨迹被限制工作空间里,而基座位置固定的机器人由于有限的关节空间而容易发生奇异形位使得机器人与工件之间发生碰撞,为了解决以上问题,Caro 和 Dumas^[1]提出单目标优化的方法找到工件最佳位置的问题提高加工的质量标准。Ulrich 等^[2]提出了基于 A* 搜索算法的机器人自动路径算法生产方法,优化了机器人灵活性,生成了时间最优的轨迹。徐海黎^[3]等人使用免疫克隆算法来增强算法全局搜索能力,来优化机器人时间和能量。Vosniakos^[4]等人提出两种遗传算法(GAs)来对切削工件过程进行优化。Liu^[5]等人提出了一种基

于模糊加权的融合方法,对三种焊接模型进行了模拟,结果具有较好的鲁棒性。Lim^[6]提出使用 5 种自然启发的算法,即遗传算法(GA),微分进化(DE),人工蜂群(ABC),收费搜索系统(CSS)和粒子群优化(PSO)算法,同时优化三个问题,处理多个目标。Kaltsoukalas^[7]等人提出了一种智能搜索算法(网格搜索算法)来定义所需机器人操纵器端部执行器的位置和方位的路径,优化计算时间。Hernandez^[8]等人建立了远程操作多机器人协作平台(MRCP),规划了主副机器人处理相同任务的轨迹。赵亮^[9]等人分析了码垛机器人的运动学,使用加速度最优 T 型曲线控制的方法进行运动规划。刘永^[10]等人分析了带有变位机和龙门架的冗余机器人工作站,提出使用机器人关节角度绝对值最小的优化条件来寻找最优机器人基座位置。余阳^[11]等人提出基于混合遗传算法的轨迹规划方案通过最优时间规划机器人运动轨迹。Erdo^[12]等人提出优化循环时间条件的运动规划方法,应用于车门的焊接中。陈晓炬^[13]等人提出一种基于时间最优关节柔

① 科技部支撑计划(2015BAF01B03)和北京智能机器人与系统高精尖创新中心(2016IRS11)资助项目。
② 男,1992 年生,硕士生;研究方向:机器人控制;E-mail: xuxi19924736@sina.com
③ 通信作者,E-mail: taoy@buaa.edu.cn
(收稿日期:2017-11-24)

顺的二次轨迹规划方法。薛立卡^[14]等人使用 DTC-MPSO 算法对汽车白车身的焊接轨迹长度和能量进行优化。

目前针对该问题的研究大多是基于相似的目标函数,这些目标函数一般旨在实现时间最优的问题或机器人移动路径最短,能量消耗最少等来进行研究。此外,这些目标函数的几何、运动学和动力学等限制条件都比较简单。上述研究大多仅是对机械臂运动学的考虑,其路径规划任务以及机器人到工件的放置大多数是一例一案的问题。在考虑路径规划问题以及机器人到工件的放置问题时,缺乏一种通用的解决方案,在得到目标函数分析问题时也有着各种各样的约束条件,急需一种搜索机器人到工件放置的最佳控制方法。

关于应用要求的轨迹规划,目标函数、约束和其他性能指标取决于机器人和工件规格,本文使用一种改进的粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO),以确定执行所需的最佳机器人基准位置,从而得出机器人到工件的最佳位置以及相对于应用需求的轨迹规划,尤其是面对具有复杂轮廓的大型结构件,本文通过分析解决在这样的复杂工作区中找到一个适当的机器人到工件的放置方案。

首先,对焊接机器人应用的路径规划,包括关节的限制、角度,速度,以保障机器人精确的执行相关作业任务。同时,在弧焊作业过程中,为避免机器人与周围环境中的其他物体发生碰撞,对工业机器人实现焊接作业的精确路径规划,以保证弧焊机器人沿预定的连续可操纵性的轨迹进行运动。

1 弧焊机器人建模

焊接机器人的建模首先分析其运动学包括正运动学和逆运动学,最后在 ADAMS 中进行建模,如图 1 所示。

UR3 机器人的 D-H 参数如表 1 所示。

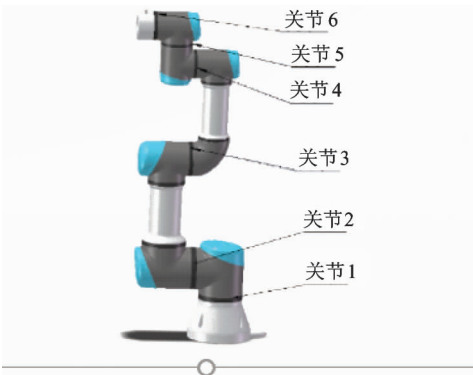


图 1 UR3 机器人

表 1 UR3 机器人的 D-H 参数

连杆号 i	连杆长度 α_i (mm)	连杆扭角 α_i (rad)	连杆距离 d_i (mm)	关节变量 θ_i (rad)
1	0	$\pi/2$	155	θ_1
2	-236	0	0	θ_2
3	-220	0	0	θ_3
4	0	$\pi/2$	107	θ_4
5	0	$-\pi/2$	83	θ_5
6	0	0	82	θ_6

1.1 焊接机器人正运动学分析

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

其中 $i = 1, 2, 3, \dots, 6$

根据连杆变换通式(1)和表 1 得到各个连杆的变换矩阵,将各个连杆变换矩阵相乘,求得到 UR3 的变换矩阵 T_6^0 。式中 ($c_i = \cos\theta_i$, $s_i = \sin\theta_i$, $c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, $s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$)

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_3 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_3 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^2 = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & s_4 & a_4 c_4 \\ s_4 & 0 & -c_4 & a_4 s_4 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & -s_5 & a_5 c_5 \\ s_5 & 0 & c_5 & a_5 s_5 \\ 0 & -1 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & a_6 c_6 \\ s_6 & c_6 & 0 & a_6 s_6 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6^0 = T_1^0(\theta_1) T_2^1(\theta_2) T_3^2(\theta_3) T_4^3(\theta_4) T_5^4(\theta_5) T_6^5(\theta_6) \quad (2)$$

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} n_y &= c_6(c_5 s_1 c_{234} - c_1 s_5) - s_6 c_1 s_{234} \\ n_x &= c_6(s_1 s_5 + c_5 c_1 c_{234}) - s_6 c_1 s_{234} \\ n_z &= c_5 c_6 s_{234} + c_{234} s_6 \\ o_x &= -s_6(c_5 c_1 c_{234} + s_1 s_5) - c_6 c_1 s_{234} \\ o_y &= -s_6(c_5 s_1 c_{234} - c_1 s_5) - c_6 s_1 s_{234} \\ o_z &= c_6 c_{234} - c_5 s_6 s_{234} \\ a_x &= -s_5 c_1 c_{234} + c_5 s_1 \\ a_y &= -s_5 s_1 c_{234} - c_1 c_5 \\ a_z &= -s_5 s_{234} \\ p_x &= d_5 c_1 s_{234} + d_4 s_1 + d_6(c_5 s_1 - s_5 c_1 c_{234}) \\ &\quad + a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_{234} \\ p_y &= d_5 s_1 s_{234} - d_4 c_1 - d_6(s_5 s_1 c_{234} + c_1 c_5) \\ &\quad + a_2 c_2 s_1 + a_3 s_1 c_{23} \\ p_z &= d_1 - d_5 c_{234} + a_2 s_2 - d_6 s_5 s_{234} \end{aligned}$$

建立固定的参考坐标系 S 在机器人底座位置, 建立末端工具坐标系 7 , 由 D-H 参数的建模得到:

$$T_7^S = T_0^S T_6^0 T_7^6 \quad (4)$$

式(4)描述了工具坐标系相对于固定坐标系的位姿。

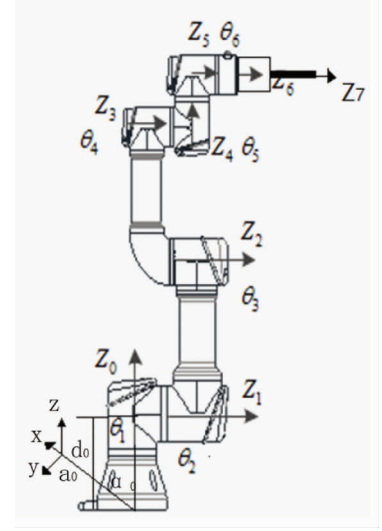


图2 焊接机器人坐标系

1.2 焊接机器人逆向运动学

将 UR3 机器人的运动方程写成:

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0T_1(\theta_1) {}^1T_2(\theta_2) {}^2T_3(\theta_3) {}^3T_4(\theta_4) {}^4T_5(\theta_5) {}^5T_6(\theta_6) \quad (5)$$

如果末端连杆的位姿已经给定, 即 n, o, a 和 p 是已知的, 则求关节变量的值称为运动反解这里运用的方法是用未知的连杆逆变换左乘式(5)^[15]

首先求解 θ_1 , 可用逆变换 ${}^0T^{-1}(\theta_1)$ 左乘式(5) 两边

$$\begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^1_6T \quad (6)$$

令式(6)两端的第2行第4列元素对应相等得:

$$-p_x s_1 + p_y c_1 = d_2 + d_3 \quad (7)$$

利用三角变换:

$$p_x = \rho \cos \phi; p_y = \rho \sin \phi \quad (8)$$

式中, $\rho = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$, $\phi = \text{Atan2}(p_x, p_y)$,

$$\text{Atan2}(p_y, p_x) = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right)。$$

将式(8)代入式(7),得

$$\theta_1 = \text{Atan2}(p_y, p_x) - \text{Atan2}\{(d_2 + d_3)^2, \pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - (d_2 + d_3)^2}\}$$

求解 θ_5 :

$$\text{同理得出 } -c_5 = c_1 a_y - s_1 a_x$$

$$\theta_5 = \arccos(s_1 a_x - c_1 a_y)$$

求解 θ_6 :

$$c_6 s_5 = c_1 n_y - s_1 n_x$$

$$\theta_6 = \arccos\left\{\frac{(c_1 n_y - s_1 n_x)}{s_5}\right\}$$

求解 θ_2 :

$$c_1 c_2 o_x + s_1 o_y c_2 - s_2 o_z = s_{34} c_6 - c_{34} c_5 s_6$$

$$\theta_2 = \text{Atan2}\left\{\left(c_1 o_x + s_1 o_y + c_5 c_6 \frac{c_1 a_x + s_1 a_y}{s_5} + c_6 \frac{a_z}{s_5}\right), \left(o_z - c_6 \frac{c_1 a_x + s_1 a_y}{s_5} + c_5 c_6 \frac{a_z}{s_5}\right)\right\}$$

$$\text{求解 } \theta_2: c_{34} s_5 = -c_1 s_2 a_x - s_1 s_2 a_y - c_2 a_z$$

$$s_3 a_3 - d_5 c_{34} = -c_1 s_2 p_x - s_1 s_2 p_y - c_2 p_z$$

$$\theta_3 = \arcsin\left(\frac{-c_1 s_2 p_x - s_1 s_2 p_y - c_2 p_z + d_5 \frac{c_1 c_2 a_z + s_1 c_2 a_y - s_2 a_z}{s_5}}{a_3}\right)$$

$$\theta_{234} = \text{Atan2}\{c_5 c_6 a_x - s_6 (c_1 n_x + s_1 o_x), c_5 c_6 (c_1 n_x + s_1 o_x) + s_6 a_x\}$$

$$\text{最后由 } \theta_4 = \theta_{234} - \theta_2 - \theta_3$$

$$\theta_4 = \arcsin\left(\frac{-a_z}{s_5}\right) - \text{Atan2}\left\{(c_1 o_x + s_1 o_y + c_5 c_6 \frac{c_1 a_x + s_1 a_y}{s_5} + c_6 \frac{a_z}{s_5}), (o_z - c_6 \frac{c_1 a_x + s_1 a_y}{s_5} + c_5 c_6 \frac{a_z}{s_5})\right\} - \arcsin\left(\frac{c_1 s_2 p_x - s_1 s_2 p_y - c_2 p_z + d_5 \frac{c_1 c_2 a_z + s_1 c_2 a_y - s_2 a_z}{s_5}}{a_3}\right)$$

1.3 焊接机器人雅可比矩阵

UR3 机器人的 6 个关节都是转动关节,所以 UR3 机器人的雅可比矩阵有 6 列。

由式(5)各个矩阵相乘得到式(9)矩阵:

$${}^1_6T = {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T {}^6T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^\tau J_{if} = \begin{bmatrix} (p \times n)z \\ (p \times o)z \\ (p \times a)z \end{bmatrix} \quad (\text{转动关节 } i) \quad (10)$$

$${}^\tau J_{ai} = \begin{bmatrix} n_z \\ o_z \\ a_z \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(9)中矩阵的元素再由式(10)利用微分变换法得到:

$${}^\tau J_i(q) = \begin{bmatrix} -n_x p_y + n_y p_x \\ -o_x p_y + o_y p_x \\ -a_x p_y + a_y p_x \\ n_z \\ o_z \\ a_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

则得到 ${}^\tau J(q)$ 的第一列 ${}^\tau J_1(q)$ 对应的变换矩阵:

$${}^\tau J_1(q) = \begin{bmatrix} {}^\tau J_{1x} \\ {}^\tau J_{1y} \\ {}^\tau J_{1z} \\ n_z \\ o_z \\ a_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

同理可以求得 ${}^\tau J_{1y}$ 和 ${}^\tau J_{1z}$ 等其他几列,UR3 机器人的雅可比矩阵最终求得:

$${}^\tau J(q) = [{}^\tau J_1 \quad {}^\tau J_2 \quad {}^\tau J_3 \quad {}^\tau J_4 \quad {}^\tau J_5 \quad {}^\tau J_6] \quad (14)$$

我们计算 UR3 机器人初始状态即各关节为 0、 $-\pi/2$ 、0、 $-\pi/2$ 、0、0 的雅可比矩阵:

$$J(q) = \begin{bmatrix} 0.1900 & -0.5390 & -0.3030 & -0.0830 & 0.0830 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

1.4 弧焊机器人奇异性

弧焊机器人应用的路径规划须满足角度、速度、力矩等关节的要求。同时,弧焊工业机器人应用过程面临奇异性问题,在其工作空间内,6 自由度机器

人可能在工作过程中产生奇异性问题,通常发生在肩关节、肘关节和腕关节的连接处。

机器人的雅可比依赖于形位 q , 关节空间的奇异形位 q 定义为机器人的 $6 \times N$ 的雅可比 $J(q)$ 的秩不是满秩的这些关节矢量 q , 即: $\text{Rank}(J(q)) < \min(6, n)$ 一般来说机器人的奇异形位有两种情况(1)边界奇异形位(2)内部奇异形位。一般都是由于两个关节的轴线或多个关节轴线重合造成的,发生这种情况就会使各个关节的运动相互抵消,不产生操作运动。机器人雅可比的奇异性定性描述机器人的运动灵巧性和运动性能。为了定量分析机器人的灵巧性和速度反解的精度,Yoshikawa 提出了可操作性指标,将雅可比与其转置矩阵的积的行列式定义为可操作度指标^[16]

$$W = \sqrt{\det[J(q), J^T(q)]}$$

(14)

当机器人自由度等于独立运动参数的数目即操作空间维数(m)时, $w = |\det(J(q))|$, 当雅可比处于奇异形位时, $\text{Rank}(J(q)) < m, w = 0$, 此时机器人可操作性为 0。

2 算法实现

在弧焊机器人工作站生产的过程中,找到最优的弧焊工业机器人基座放置坐标,在这个坐标上机器人工作可获得关节柔顺性、能量消耗最少、焊接效

果最优。分析实际中的情况例如去毛刺、焊接、打磨等应用场景,只需要 5 个关节基本动作。弧焊机器人路径规划的另一个挑战是避障问题,在弧焊作业过程中,机器人必须避免与周围环境中的其他物体发生碰撞。最后,在弧焊机器人工作站生产的过程中,尤其是焊接、切割、喷涂生产等,规划的路径必须保证机器人沿预定义轨迹行进,以免发生突然的变道。

例如平面焊接时,末端关节不需要旋转,因此机器人的最后一次旋转是多余的。结合以上限制条件和 UR3 机器人基本条件(见表 2)得到表 3。

避免碰撞的问题可以设定以下的约束:

$$d_{ij} \geq r_i; i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, \dots, n$$

d_{ij} 是关节的中心线的距离, r_i 和 r_j 分别是第 i 个对象和第 j 个工件的半径。

表 2 UR3 机器人性能指标

机器人手臂运动	活动范围	最快速度
底座	$\pm 360^\circ$	$\pm 180^\circ/\text{s}$
肩膀	$\pm 360^\circ$	$\pm 180^\circ/\text{s}$
手肘	$\pm 360^\circ$	$\pm 180^\circ/\text{s}$
手腕 1	$\pm 360^\circ$	$\pm 360^\circ/\text{s}$
手腕 2	$\pm 360^\circ$	$\pm 360^\circ/\text{s}$
手腕 3	$\pm 360^\circ$	$\pm 360^\circ/\text{s}$
工具(通常)	无限	1m/s 39.4 英寸/s

表 3 设定变量范围

变量	$\theta_0(^{\circ})$	$\alpha_0(^{\circ})$	$a_0(\text{mm})$	$d_0(\text{mm})$	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$\theta_3(^{\circ})$	$\theta_4(^{\circ})$	$\theta_5(^{\circ})$	$\theta_6(^{\circ})$
最小	0	0	-250	-250	-100	-100	-100	-100	-100	0
最大	360	360	250	250	100	100	100	100	100	1

设 A_6^7 是描述焊丝坐标系 7 到执行器坐标系 6 的位姿,描述焊丝坐标系到基坐标系的矩阵是 7_0T (如图 3)位姿矩阵有 4 个参数是已知的,所以对于一个已知的位姿就有 10 个未知参数。

最佳放置位置的目标函数可以描述将规定位姿模型的值与实际位姿模型给出的值相比较,可以计算出误差:

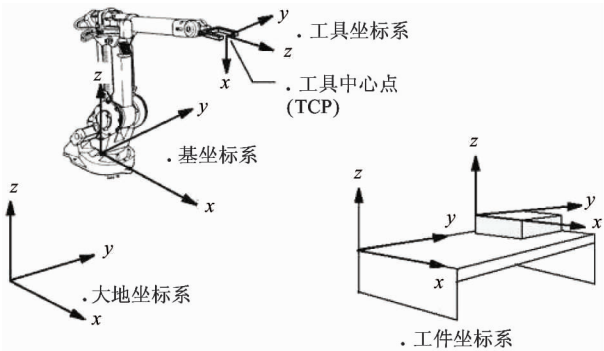


图 3 机器人各坐标系

$$f = f_1 + \alpha \times f_2 + \beta \times f_3 \tag{15}$$

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^3 (T_s^7(i, j))^2 + \sum_{j=1}^4 T_s^7(i, j)^2 \tag{16}$$

上式是焊丝坐标系的姿势和相应的规定姿势的偏差平方和之和, $T_s^7(i, j)$ 是焊丝坐标系位姿矩阵 (i, j) 的实际值, T_s^7 是指定的矩阵值, 根据表 3 得到。 N 是个数, 当目标函数最小时确定的矩阵位姿参数是最优参数。

$$f_2 = \sum_{k=1}^n (\frac{1}{w}) \tag{17}$$

上式是表述逆解平方和, n 是规定姿势的数量, w 是 1.4 节提出的可操作度, α, β 是权重因子用来调节第二、三项的占比。 J 是机器人的雅可比矩阵, 因为 UR3 机器人是 6 自由度不是冗余机械臂, 所以 w 可以简化为

$$w = \sqrt{\det(J \cdot J^T)} \tag{18}$$

限制碰撞可以被定义为:

$$f_3 = \max_{i=1}^6 (\max_{j=1}^n (\frac{r_i + r_j}{d_{ij}})) \tag{19}$$

在 Matlab 中进行算法的实现, 模拟焊接平面椭圆形焊缝(如图 4), 对于该问题, 基座相对工件放置的目标值往往有多个接近最优解, 因此目标解可以有多个, 所以在搜索中保留前 n 个目标优化解。使用 PSO 优化算法进行寻优, 粒子群算法的介绍这里就不赘述了, 算法流程图如图 5。

初始化粒子群后, 加载目标点, 为群中所有的粒子求解逆运动学, 更新目标函数值, 更新 PSO 算法的控制参数, 由于 PSO 中的粒子向自身历史最佳位置和领域或群体历史最佳位置聚集, 形成粒子种群

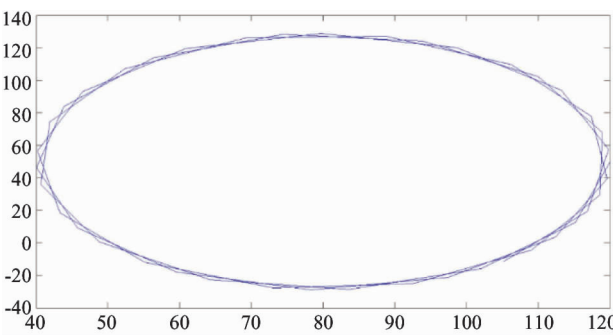


图 4 椭圆形焊缝的 Matlab 仿真图

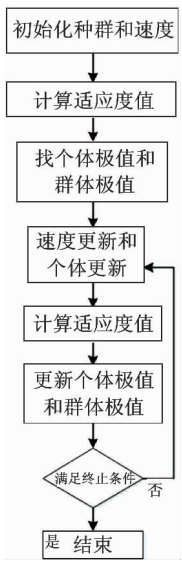


图 5 算法流程图

的快速趋同效应, 容易陷入局部极值、早熟收敛或停滞的现象, 改进的模拟退火 PSO 方法可以改善粒子群算法全局寻优能力, 根据式 (15) 编写适应度函数 m 文件来确定想要优化的函数 [gbest, fmin] 每个粒子代表一个潜在的角度, 粒子数 $n = 60$, 学习因子 $c_1 = c_2 = 2$, 动力常量 $\omega = 1.2$, 全局最优 $Fgbest(t) \leq 0.5$

如图 6, 迭代次数是 100 次, 模拟退火 PSO 算法刚运行时粒子在随机位置寻优, 很快就已经趋近于 0, 最终收敛。基于模拟退火的粒子群算法一边进化一边降温, 接受差解的概率变小, 提高了收敛能力, 遗传算法群体大小 50, 实数编码, 初始值范围 $[-200, 200]$, 使用轮盘赌选择, 遗传代数 100, 与模拟退火 PSO 算法适应度值进行比较, 可以看出模拟退火 PSO 收敛速度更快。

3 仿真与实验验证

在 Adams 中建立 UR3 的虚拟样机模型, 本实验先在 Solidworks 进行建模如图 1, 并将 UR3 模型保存为 parasolid 格式, 导入到 Adams 中即可进行约束与驱动的添加。如图 7, 导入到 Adams 后, 为了便于分析和添加驱动与约束, 需要对模型进行简化, 并添加属性材料等, 这样就可以分析机器人的运动学问题。

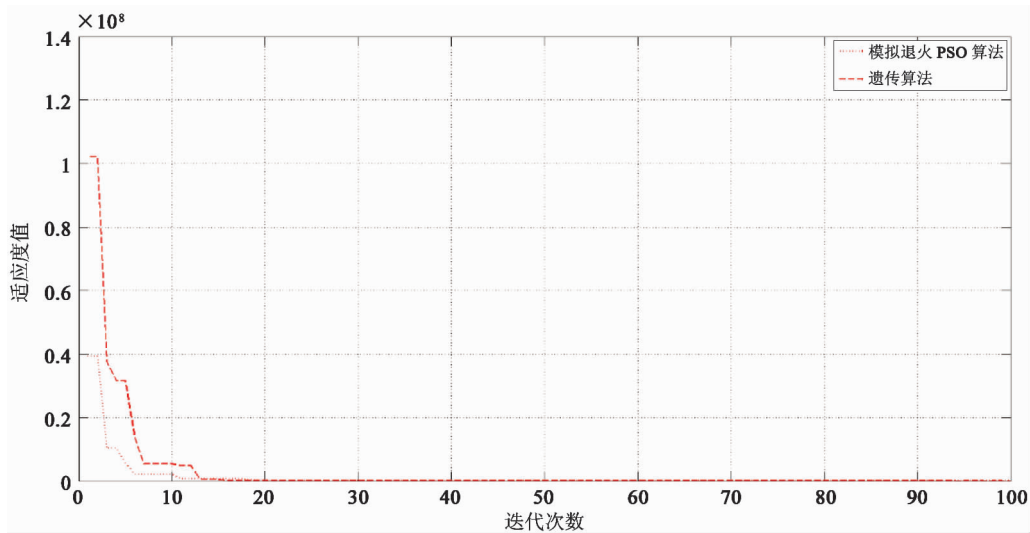


图 6 模拟退火 PSO 和遗传算法适应度值比较

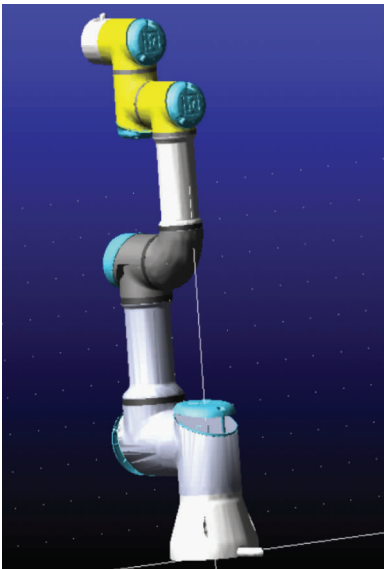


图 7 UR3 模型导入到 Adams 中

首先,找到优化前模拟焊接椭圆形焊缝,这个位置放置的远离基坐标系,在 UR3 机器人控制器里添加 10 个路点,让机器人走完这些路点,点与点之间的轨迹使用三次多项式插值法来进行轨迹规划^[17],在 Adams 中进行运动学仿真如图 8,对这次轨迹规划各关节的转动角度进行分析如图 9。

可以看见各关节的运动不顺滑,机器人在模拟焊接时出现了抖动,在这个随机位置工作机器人的工作效率很低,各关节角度变化范围 $[-150^{\circ}, 100^{\circ}]$ 。

根据算法求得的最优位姿矩阵来确定一个焊丝

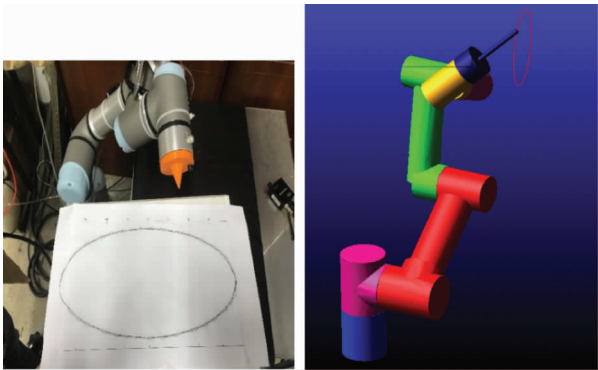


图 8 随机位置焊接图与仿真图

坐标系相对于基坐标系的位置,在这个位置进行焊接模拟实验如图 10,优化后的焊接模拟图如图 11。

仿真结果显示机器人各关节角度顺滑连续,同时角度的变化都在很小的范围内 $[-40^{\circ}, 40^{\circ}]$ 符合本文在表 3 设定的范围。

4 结 论

本文提出了一种对弧焊机器人最优位置坐标的 PSO 优化控制方法,该方法优化机器人工作的柔顺性,以实现机器人各关节曲线连续且平滑,提供了在焊接中的最佳位置,使用改进 PSO 优化算法改善了基本 PSO 优化算法后期搜索新区域能力不足的问题,加强了全局搜索能力;最后,在 Adams 中进行了仿真与实验,验证了该算法的有效性。

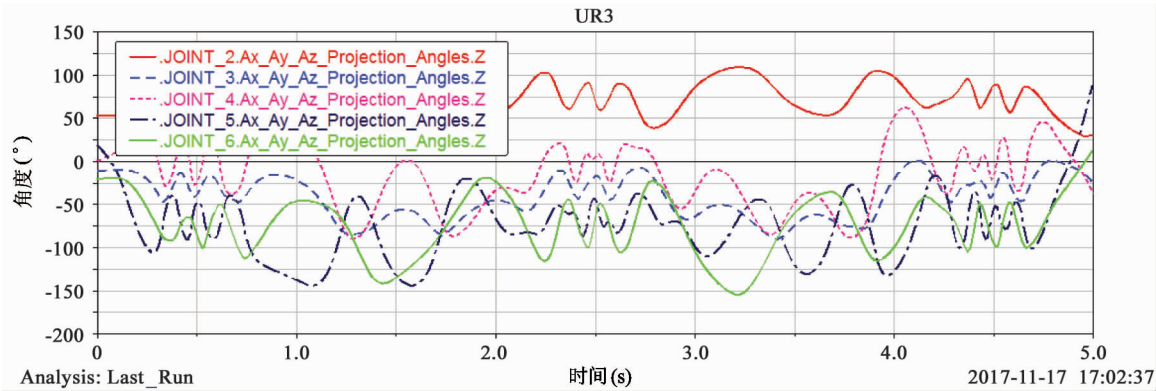


图 9 焊接过程仿真图

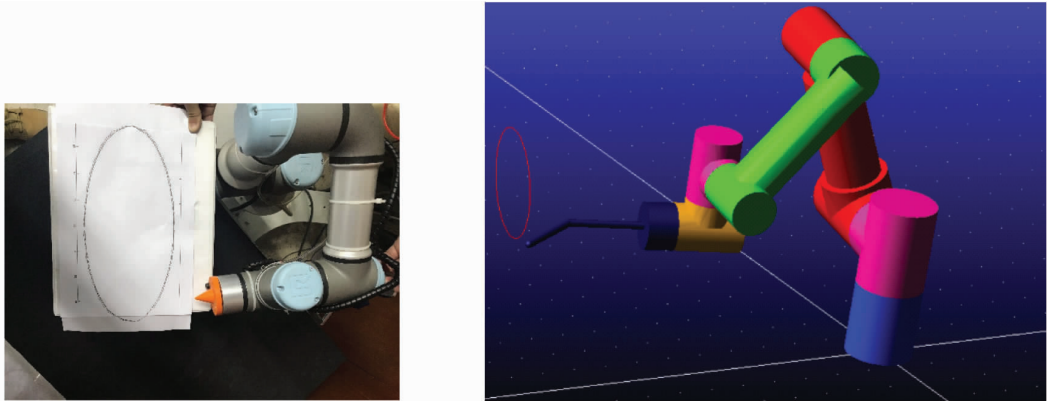


图 10 优化后的末端位置

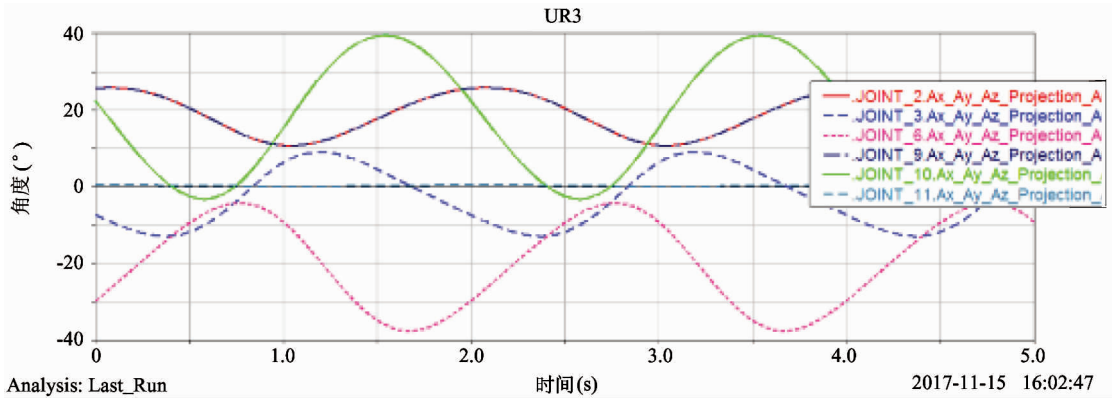


图 11 优化后的焊接模拟图

参考文献

[1] Caro S, Dumas C. Workpiece placement optimization in robotic-based manufacturing[C]. In: Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling Management and Control International Federation of Automatic Control, Saint Petersburg, Russia, 2013. 819-824

[2] Marco U, Lux G, Jurgensen L, et al. Automated and cy-
— 432 —

cle time optimized path planning for robot-based inspection systems[C]. In: Proceedings of the 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS), Garching, Germany, 2016. 377-382

[3] 徐海黎,解祥荣,庄健,等. 工业机器人的最优时间与最优能量轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46 (9):19-24

- [4] Christopher G, Vosniakos N, Matsas E. Improving feasibility of robotic milling through robot placement optimization[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, 26: 517-525
- [5] Liu Y K, Zhang Y M. Fusing machine algorithm with welder intelligence for adaptive welding robots[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 27: 18-25
- [6] Lim Z Y, Ponnambalam S G, Izui K. Multi-objective hybrid algorithms for layout optimization in multi-robot cellular manufacturing systems[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2017, 120:87-98
- [7] Kaltsoukalas K, Makris S, Chrysosolouris G. On generating the motion of industrial robot manipulators[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, 32:65-71
- [8] Hernansanz A, Casal A S, Amat J. A multi-robot cooperation strategy for dexterous task oriented teleoperation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 68(C): 156-172
- [9] 赵亮, 仲崇权, 郑飞翔. 一种机器人最优加速度轨迹规划算法研究[J]. 大连理工大学学报, 2017, 57(2): 178-182
- [10] 刘永, 王克鸿, 杨静宇. 冗余度弧焊机器人位置优化建模及算法[J]. 焊接学报, 2007, 28(11): 25-28
- [11] 余阳, 林明, 林永才. 基于混合遗传算法的工业机器人最优轨迹规划[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(4): 1574-1580
- [12] Erdo G, b Andras, Kovacs. Optimized joint motion planning for redundant industrial robots[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2016, 65(1): 451-454
- [13] 陈晓炬, 李辉, 吴献钢. 一种时间最优关节柔顺的码垛机器人运动规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(4): 18-25
- [14] 薛立卡, 王学武, 顾幸生. 基于 DTC-MOPSO 算法的焊接机器人路径规划[J]. 信息与控制, 2016, 45(6): 713-721
- [15] 马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 模块化协作机器人运动特性分析及动力学仿真研究[J]. 长春理工大学学报, 2017, 40(2): 64-69
- [16] Yoshikawa J. Manipulability of robotic mechanisms[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1987, 4(2): 3-9
- [17] 马睿, 胡晓兵, 殷国富, 等. 六关节工业机器人最短时间轨迹优化[J]. 机械设计与制造, 2014(4): 30-32

A trajectory optimization control method of welding robot based on improved particle swarm optimization

Xu Xi^{*}, Xiong Hegen^{*}, Tao Yong^{**}, Xie Xianwu^{*}, Liu Hui^{**}, Sun Baishu^{***}

(* School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430000)

(** School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

(***) Northwest Industry Group Co., Ltd., Xi'an, 710043)

Abstract

An optimization control method of six degree of freedom welding robot is proposed. The robot's accessibility, singularity and collision avoidance operation constraints are analyzed. The operational constraints of robot are proposed to build the model. The parametric kinematics model of arc welding robot is established. A new trajectory optimization control method based on improved PSO algorithm is proposed. The method satisfies the given constraints, so that the arc welding robot can optimize the welding operation track at a certain base position to finish the welding work more accurately. Finally, the validity of the proposed algorithm is verified by simulation and experiment.

Key words: improved particle swarm optimization, trajectory optimization, arc welding robot, inverse running mode