

一种基于六次多项式轨迹规划的机械臂避障算法

马宇豪^{1,2}, 梁雁冰¹

(1.西安光学精密机械研究所 光电跟踪与测量技术研究室, 陕西 西安 710119);
(2.中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要:针对机械臂避障轨迹规划的一系列需求,提出了一种基于六次多项式轨迹规划的机械臂避障算法。首先,采用六次多项式对机械臂轨迹进行规划。设曲线方程中六次项系数为待定参数,通过调整参数,改变曲线形状,使机械臂绕过障碍物的同时优化轨迹的性能指标,从而将机械臂避障轨迹规划问题转化为约束条件下的多目标优化问题;其次,综合碰撞检测结果、运动学指标,通过加权系数法建立适应度函数;最后,通过遗传算法进行优化,在关节空间中规划出一条无碰撞,同时运动学、轨迹长度、转动角度等要求一起协同优化的理想运动轨迹。此外,通过MATLAB对该算法进行了仿真实验验证,结果表明,该方法能够有效地规划出满足机械臂性能要求的无障碍运动轨迹。

关键词:机械臂;避障;轨迹规划;六次多项式;遗传算法

中图分类号:TP241 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2020)02-0392-09

近年来,机械臂技术快速发展,被广泛应用于医疗、制造、航天等各个领域^[1]。而机械臂被应用的各种多变工作环境中,障碍物位置和大小各有不同。要想实现机械臂在复杂环境中的自动控制,机械臂避障轨迹规划的研究必不可少。出于安全、节能、稳定、高效的考虑,机械臂避障轨迹规划必须满足以下要求^[2]:①机械臂全局避障,而非末端一点;②机械臂各关节速度、加速度连续;③各关节角运动量总和最小;④机械臂末端轨迹长度最短。

现有的机械臂避障轨迹规划的研究很多。Dong和Du^[3]通过机械臂工作空间密度计算有多个障碍物的复杂环境中的无碰撞路径,并通过仿真验证了该方法的可行性;Liu等^[4]提出了一种基于圆柱包围盒模型的机械臂避障算法,该方法以圆柱包围盒模型作为碰撞检测手段,通过分段描述理想轨迹,将分段轨迹的中间点设为参数,通过参数优化,达到避障的目的;Ismail等^[5]将动态规划算法应用于缆索串联机械臂,在保证执行器缆索张力有界的

前提下,寻找最短最快的避障路径。此外,还有经典的人工势场法^[6],快速随机搜索树算法(RRT)^[7]、概率路线图法(PRM)^[8]等基于图搜索的方法。但能同时兼顾机械臂避障轨迹规划和运动学性能优化的研究还较少,Chen等^[9]采用分段描述机械臂轨迹,并通过优化各段轨迹中间点选取的方法,实现避障的同时提高机械臂运动学性能,但机械臂在运动过程中需要在中间点停顿,不符合实际应用需求。

针对机械臂避障轨迹规划特殊需求,本文提出了一种基于六次多项式轨迹规划的机械臂避障算法(six-order polynomial obstacle avoidance,SDPOA),该方法能在避开障碍物的前提下,最大限度地优化机械臂运动轨迹的性能,达到安全、节能、稳定、高效的目的。

结合智能优化算法,机械臂的避障规划问题可以转化为约束条件下的多目标优化问题。根据机械臂避障轨迹规划的要求,本文中,约束条件设为:机械臂不与障碍物发生碰撞和各关节角速度、角加速

收稿日期:2019-02-25

作者简介:马宇豪(1992—),西安光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事六关节机械臂建模分析及避障轨迹规划算法与机械臂轨迹跟踪控制算法研究。

度连续;目标函数为:机械臂末端轨迹长度和各关节转动角度。据此,SDPOA 算法设计如下:

1) 碰撞检测。通过简化模型,将机械臂与障碍物 2 个实体间干涉或碰撞的计算转化为连杆线段与障碍物位置关系的判断。

2) 轨迹规划。通过六次多项式对机械臂的轨迹进行关节空间规划,得到机械臂各关节角速度、角加速度连续的轨迹。然后设六次项系数为可调参数,通过调整该参数,改变轨迹形状,在绕过障碍物的前提下优化轨迹的性能指标。

3) 参数优化。根据碰撞检测结果、机械臂末端轨迹长度和各关节转动角度,通过加权系数法建立适应度函数,并通过遗传算法进行优化,得出最优可调参数,在关节空间中规划出一条无碰撞同时运动学、轨迹长度、转动角度等要求一起协同优化的理想运动轨迹。

接下来,本文将从模型简化、碰撞检测方法、关节空间轨迹规划、遗传优化方案 4 个方面对 SDPOA 算法进行说明,并通过 MATLAB 进行仿真实验验证。

1 模型简化

首先,对机械臂建模。为了不失一般性且计算简单,本文选择了一种较为理想的两连杆六自由度串联机械臂,并命名为 SDPOA 机械臂。机械臂连杆坐标系如图 1 所示,该机械臂由 1 个腰关节,2 个肩关节,3 个腕关节组成。其中,第二关节和第三关节的关节轴线平行,四、五、六关节的关节轴线相互垂直且交于一点。采用 D-H (denavit-hartenberg) 法对机械臂建模,D-H 参数如表 1 所示。理论上,本文的算法可以推广到任意结构的串联机械臂上。

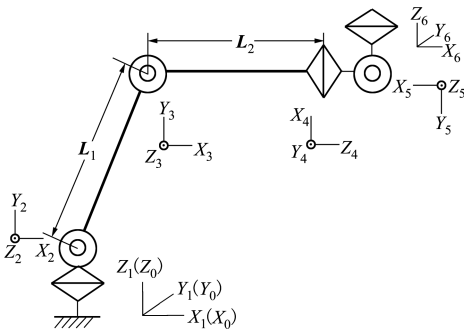


图 1 SDPOA 机械臂连杆坐标系

表 1 SDPOA 机械臂 D-H 参数表

关节	θ/rad	d/cm	a/cm	α/rad
1	θ_1	0	0	$\pi/2$
2	θ_2	0	L_1	0
3	θ_3	0	L_2	0
4	θ_4	0	0	$\pi/2$
5	θ_5	0	0	$\pi/2$
6	θ_6	0	0	0

其次,需要对障碍物进行描述。由于障碍物的形状的不确定性,很难对所有的障碍物建立准确的数学模型。本文采用球面对障碍物进行包络,当机械臂不与球面发生碰撞,就一定不会和障碍物发生碰撞,如图 2,其中灰色部分为障碍物,以 O 为球心, R_0 为半径的球面为包络面。

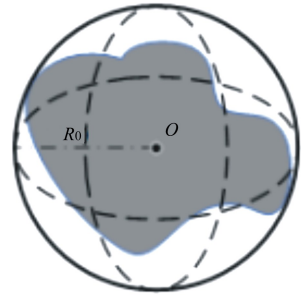


图 2 障碍物球形包络面示意图

2 碰撞检测方案

在简化模型的基础上,将机械臂与障碍物 2 个实体间的碰撞转化为连杆直线段与球心的位置关系判断。如图 3 所示,机械臂连杆的最大径向半径记为 R_l ,障碍物半径记为 R_0 。障碍物圆心到连杆直线的距离为 d , P 为球心到连杆直线段垂线的垂足。下面给出碰撞检测的具体计算过程。

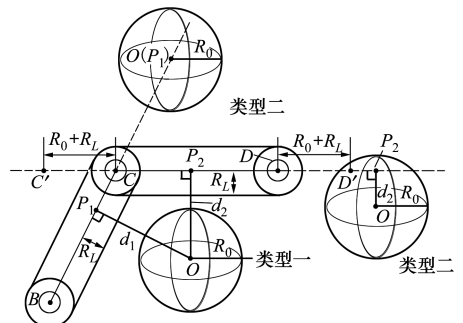


图 3 障碍物与连杆位置关系示意图

首先,结合 D-H 参数,通过齐次坐标变换的方法,可以建立各连杆直线段的数学模型如下

$$\begin{cases} T_A = \text{Rotz}(\theta_1)\text{Trans}(0,0,d_1)\text{Trans}(a_1,0,0)\text{Rotx}(\alpha_1) \\ T_B = T_A\text{Rotz}(\theta_2)\text{Trans}(0,0,d_2)\text{Trans}(a_2,0,0)\text{Rotx}(\alpha_2) \\ T_C = T_B\text{Rotz}(\theta_3)\text{Trans}(0,0,d_3)\text{Trans}(a_3,0,0)\text{Rotx}(\alpha_3) \\ T_D = T_C\text{Rotz}(\theta_4)\text{Trans}(0,0,d_4)\text{Trans}(a_4,0,0)\text{Rotx}(\alpha_4) \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_A, T_B, T_C, T_D 分别表示第一、二、三、四关节处的齐次位姿变换矩阵; B, C, D 点的坐标分别为 $B = [x_b, y_b, z_b] = [T_B(1,4), T_B(2,4), T_B(3,4)]$, $C = [x_c, y_c, z_c] = [T_C(1,4), T_C(2,4), T_C(3,4)]$, $D = [x_d, y_d, z_d] = [T_D(1,4), T_D(2,4), T_D(3,4)]$, 则直线 BC 和直线 CD 方程如下所示

$$\begin{cases} BC: \begin{cases} x = (x_c - x_b)t + x_b \\ y = (y_c - y_b)t + y_b \\ z = (z_c - z_b)t + z_b \end{cases} \\ CD: \begin{cases} x = (x_d - x_c)t + x_c \\ y = (y_d - y_c)t + y_c \\ z = (z_d - z_c)t + z_c \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

记障碍物圆心坐标为 $O = [x_o, y_o, z_o]$, 垂足 P 的坐标 $P = [x_p, y_p, z_p]$ 。先求 P_2 的坐标。由于垂足 P_2 在连杆直线 CD 上, P_2 坐标满足直线方程

$$\begin{cases} x_p = (x_d - x_c)t + x_c \\ y_p = (y_d - y_c)t + y_c \\ z_p = (z_d - z_c)t + z_c \end{cases} \quad (3)$$

且 OP_2 与 CD 垂直, 因此有

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OP_2} \cdot \overrightarrow{CD} = 0 \Rightarrow & (x_d - x_c)(x_o - x_p) + \\ & (y_d - y_c)(y_o - y_p) + (z_d - z_c)(z_o - z_p) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

联立(3)式和(4)式, 解得

$$t = \frac{(x_d - x_c)(x_o - x_c) + (y_d - y_c)(y_o - y_c) + (z_d - z_c)(z_o - z_c)}{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2 + (z_d - z_c)^2} \quad (5)$$

将 t 带入(3)式中, 即可求得 $P_2 = [x_{p_2}, y_{p_2}, z_{p_2}]$ 。则障碍物到连杆线段的距离 d_2 为

$$d_2 = \sqrt{(x_o - x_{p_2})^2 + (y_o - y_{p_2})^2 + (z_o - z_{p_2})^2} \quad (6)$$

然后, 定义安全距离 $S = R_L + R_O$ 。如图 3, 将连杆 CD 两端延长 S , 记为 $C'D'$, 根据垂足 P_2 是否在 $C'D'$ 上, 将障碍物与连杆的位置关系分成 2 种类型

讨论。

当满足 $d_2 \geq S$ 时, 对于 2 种类型, 机械臂连杆 CD 都一定不会与障碍物发生碰撞; 当满足 $d_2 < S$ 时, 需要进一步判断是否会出现类型二的情况。计算垂足 P_2 到连杆线段端点 C, D 的距离

$$\begin{aligned} d_{CP_2} &= \sqrt{(x_c - x_{p_2})^2 + (y_c - y_{p_2})^2 + (z_c - z_{p_2})^2} \\ d_{DP_2} &= \sqrt{(x_d - x_{p_2})^2 + (y_d - y_{p_2})^2 + (z_d - z_{p_2})^2} \end{aligned} \quad (7)$$

当满足 $d_{CP_2} \geq S, d_{DP_2} \geq S$ 且 $|d_{CP_2} - d_{DP_2}| = L_2$ 时, 此时, 垂足 P_2 不在 $C'D'$ 上, 机械臂连杆 L_2 (线段 CD) 也不会与障碍物发生碰撞。

障碍物与连杆 L_1 (线段 BC) 的碰撞检测和障碍物与连杆 L_2 (线段 CD) 的碰撞检测计算方法同理。当机械臂在运动过程中, 障碍物与 2 个连杆均不发生碰撞时, 则实现机械臂避障。

3 轨迹规划

本文采用关节空间规划的方法对机械臂进行轨迹规划。目前, 较为常用的机械臂关节空间规划方法是五次多项式规划^[10-12]。用该方法, 根据机械臂始末的位置、速度、加速度 6 个边界条件, 可以求出五次多项式的 6 个参数, 进而得出唯一的速度、加速度连续的轨迹。但由于其唯一性, 当路径上出现障碍物时, 机械臂将会与障碍物碰撞。Chen 等^[9]提出通过设定中间点, 利用五次多项式分段规划运动轨迹, 可以成功绕过障碍物, 但分段规划使机械臂在运动过程中需要停止后再启动, 运动过程不连续, 且在相同时间内完成需要更大的速度和加速度, 不符合实际需求。故本文采用六次多项式来进行轨迹规划, 通过调整六次项系数, 改变轨迹形状, 达到绕过障碍物的目的。六次多项式的函数表达式如下所示

$$\theta_i = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 + c_4t^4 + c_5t^5 + Kt^6 \quad (8)$$

式中: K 为可调参数; 由于本文的研究对象是六自由度机械臂, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]$ 为 6 维向量, θ_{1-6} 分别对应 6 个关节角, 相应地, $K = [K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6]$ 也为 6 维向量, K_{1-6} 分别对应 6 个关节轨迹曲线方程的六次项系数。当研究对象为其他自由度的机械臂时, 改变 K 维数即可。假设机械臂各关节在初始时刻 t_0 和终止时刻 t_f 的角度、角速度、角加速度分别为 $\theta_0, \dot{\theta}_0, \ddot{\theta}_0$ 和 $\theta_f, \dot{\theta}_f, \ddot{\theta}_f$ 。以上述 6 个量作为边界条件, 带入公式(8)中, 并求导可得出

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_0 = c_0 \\ \theta(t_f) = \theta_f = c_0 + c_1 t_f + c_2 t_f^2 + c_3 t_f^3 + c_4 t_f^4 + c_5 t_f^5 + K t_f^6 \\ \dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0 = c_1 \\ \dot{\theta}(t_f) = \dot{\theta}_f = c_1 + 2c_2 t_f + 3c_3 t_f^2 + 4c_4 t_f^3 + 5c_5 t_f^4 + 6K t_f^5 \\ \ddot{\theta}(0) = \ddot{\theta}_0 = 2c_2 \\ \ddot{\theta}(t_f) = \ddot{\theta}_f = 2c_2 + 6c_3 t_f + 12c_4 t_f^2 + 20c_5 t_f^3 + 30K t_f^4 \end{cases} \quad (9)$$

当给定参数 \mathbf{K} 时,即可由公式(9)解出待定系数 $c_0 \sim c_5$,进而规划出各关节角度、角速度和角加速度均连续的运动轨迹。

4 遗传优化方案

在SDPOA算法中,需要选择一种方法来优化 \mathbf{K} 的选择,使得机械臂在安全避开障碍物的前提下,达到节能、高效的目的。针对此类问题的智能优化算法有很多种,例如遗传算法^[1]和蚁群算法^[13]、模拟退火算法^[14]、粒子群算法^[15]等。遗传算法已被证明在求解高维非线性问题时有很好的稳定性和鲁棒性。本算法中的目标函数是高维度的非线性函数,故选用遗传算法进行优化计算。

4.1 遗传算法

遗传算法属于进化算法的一种,它通过模仿自然界的选择与遗传的机理来寻找最优解。遗传算法流程如下:首先,在优化对象的取值范围内选择一些个体并对其进行编码,构成初始种群,然后,计算每个个体的适应度,通过轮盘赌等方法选择出一些适应度高的个体作为亲本,并使其进行交叉、变异产生子代。最后,用子代中适应度高的个体代替父代中适应度低的个体,产生新的种群。以此流程循环进行,直到达到终止条件,选出合适的优化对象。本文中,优化对象为六次多项式系数 \mathbf{K} ,由于当 \mathbf{K} 值过大或过小时,轨迹曲线瞬时变化率过大,容易导致机械臂关节力矩超限,本文将 K_i 的取值范围设为 $[-500, 500]$,实际应用中可根据机械臂动力学指标调整 \mathbf{K} 的取值范围。

4.2 适应度函数

出于节能、高效的考虑,在SDPOA算法中,优化的目的是在机械臂全局避障的同时,减少不必要的运动。为此,在轨迹规划时,应使机械臂末端轨迹长度最短且各关节转动角度总和最小。故综合各关节

角度变化总量 f_Q ,末端执行器运动轨迹长度 f_L 和碰撞检测结果 f_{CO} 构建适应度函数进行轨迹优化。采用插值法可以将高次多项式规划出的轨迹分成 n 小段, f_q 表示机械臂在相邻插值点之间 6 个关节角度变化量之和,该值累加等于各关节角的变化总量 f_Q , f_L 表示机械臂末端执行器在相邻插值点之间的移动距离,该值的累加近似等于末端执行器运动轨迹总长度 f_L ,通过公式(10)和公式(11)计算可以求出 f_Q 和 f_L 。

$$f_Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^6 (|\theta_{i+1,j} - \theta_{i,j}|) \quad (10)$$

$$f_L = \sum_{i=1}^n \sqrt{(p_{i+1,x} - p_{i,x})^2 + (p_{i+1,y} - p_{i,y})^2 + (p_{i+1,z} - p_{i,z})^2} \quad (11)$$

由于通过遗传算法优化是求适应度函数的最小值,适应度函数设置为如下形式

$$f_k = -\frac{f_{CO}}{\eta_1 f_Q + \eta_2 f_L} \quad (12)$$

式中, f_{CO} 由上文中的碰撞检测结果得出。当机械臂不与障碍物发生碰撞时, $f_{CO} = 1, f_k < 0$; 相反,当发生碰撞时, $f_{CO} = 0, f_k = 0$,故无碰撞时的适应度总是小于有碰撞时的适应度,从而在进行优化过程中,会使碰撞发生的 \mathbf{K} 值直接被筛除。又由于 f_Q 和 f_L 的量纲不同,数量级相差很大,为保证关节角度变化和末端轨迹长度对适应度函数有相同量级的影响,设置权重因子 $\eta_1 = 1$ 和 $\eta_2 = 0.01$ 。此外,本文仅考虑了运动学因素,关于动力学性能,可以对进行机械臂动力学分析,在适应度函数中,增加各关节力矩是否超限的判断。

4.3 SDPOA 算法遗传优化流程

本文通过采用遗传算法对SDPOA算法中参数优化的流程如图4所示,首先,对机械臂、障碍物进行建模和表示,同时,由遗传算法生成函数产生初始种群 \mathbf{K} ,然后通过计算碰撞检测结果 f_{CO} 、各关节角的变化总量 f_Q 和末端执行器运动轨迹总长度 f_L ,进而求出适应度 f_k ,通过遗传算法选择、交叉、变异、替换得到子代,多次迭代进化后达到终止条件,找出使适应度最小的最优参数 \mathbf{K} ,最后,带入六次多项式中得到最优的运动轨迹。

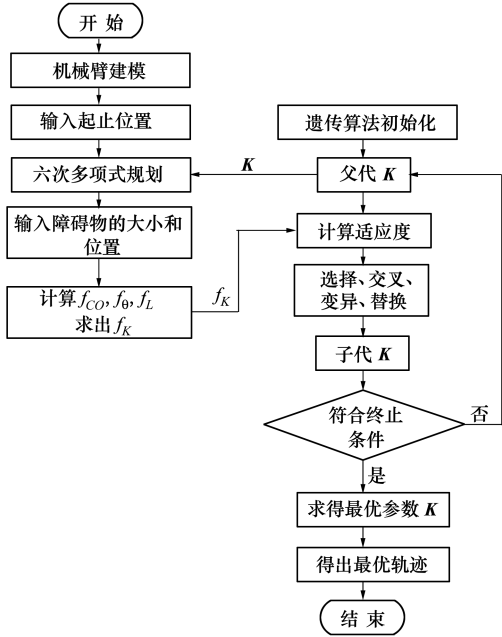


图 4 SDPOA 算法遗传优化流程图

5 仿真实验验证

本文通过 MATLAB Robotics Toolbox (version 10.1) 和 optimtool 工具箱来对基于六次多项式的机械臂避障算法进行仿真实验验证。用于仿真实验的计算机环境:处理器 Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU@ 2.60 GHz 2.29 GHz, 内存: 12 GB, 操作系统: 64 位 win10 系统。

首先,通过 MATLAB Robotics Toolbox (version

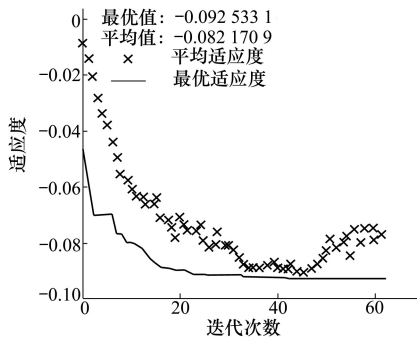


图 5 遗传迭代过程中适应度最优值和平均值变化过程

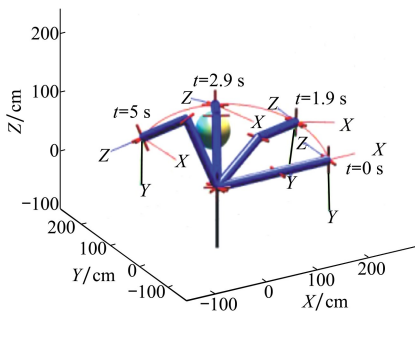


图 6 单障碍物 (\$S = 30\$ cm) 机械臂避障运动过程示意图

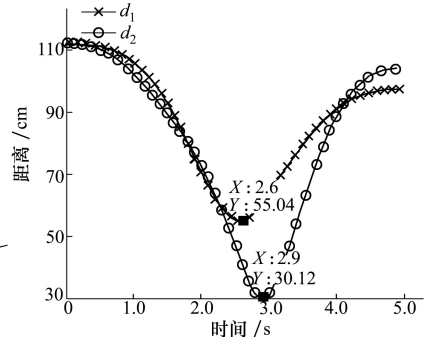


图 7 两连杆距离障碍物 (\$S = 30\$ cm) 中心的距离变化过程

两连杆距离障碍物中心的距离变化过程如图 7 所示, 曲线 d_1, d_2 分别表示连杆 L_1, L_2 与障碍物中心

10.1) 建立机器人模型。设置机械臂 SDPOA 连杆长度 $L_1 = 120$ cm, $L_2 = 100$ cm, 机械臂连杆的最大径向半径记为 $R_L = 5$ cm, 机械臂初始位置 $\theta_0 = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$, 目标位置 $\theta_f = [2\pi/3, \pi/3, -\pi/2, 0, \pi/2, \pi/4]$ 。当机械臂的始末位置是在笛卡尔坐标系中给出的, 可以通过运动学逆运算, 转化为对应关节角度的形式。此外, 设机械臂运行时间为 5 s, 插值点个数为 50, 即每段插值点间的运行时间为 0.1 s。$$$

其次, optimtool 工具箱配置如下: 求解程序 ga-Genetic Algorithm; 变量 K ; 定义域 $[-500, -500, -500, -500]$ 至 $[500, 500, 500, 500]$; 种群规模: 200; 选择函数: 轮盘赌算法; 杂交概率: 0.8; 终止条件: 迟滞代数 20, 精度 10^{-5} , 即当适应度的值连续 20 代变化小于 10^{-5} , 停止迭代。并依据公式 (12) 编写适应度函数。

5.1 SDPOA 算法与分段轨迹规划避障方法对比

设障碍物中心坐标为 $O = [50, 100, 50]$, 障碍物半径为 $R_o = 25$ cm, 则安全距离为 $S = R_o + R_L = 30$ cm。$$

首先, 采用本文提出的 SDPOA 算法进行机械臂避障轨迹规划。

遗传迭代过程中适应度最优值和平均值变化过程如图 5 所示。经过 62 代迭代, 得出最优参数 $K = [14.726, -13.114, 6.863, 0, -0.746, 4.125]$, 适应度 $f_k = -0.0925$, 关节转动总量 $f_{\theta} = 6.5464$ rad, 机械臂末端位移总量 $f_L = 361.1936$ cm。程序运行时间为 34 min。机械臂避障运动过程如图 6 所示, 其中圆弧为机械臂末端运动轨迹。

的距离。机械臂的运动过程中, 连杆 L_1 距离障碍物的最小距离 $d_1 = 55.04$ cm $> S$, 连杆 L_2 距离障碍物的

最小距离 $d_2 = 30.12 \text{ cm} > S$ 。因此,机械臂在运动过程中,不会与障碍物发生碰撞。

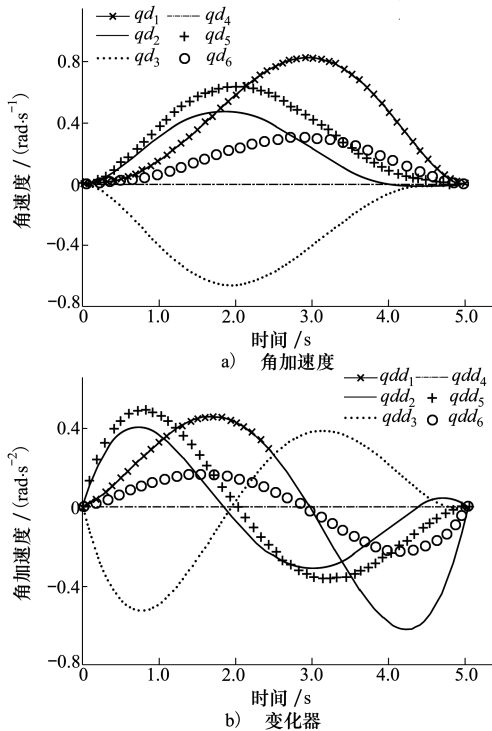


图 8 机械臂在运动过程中角速度

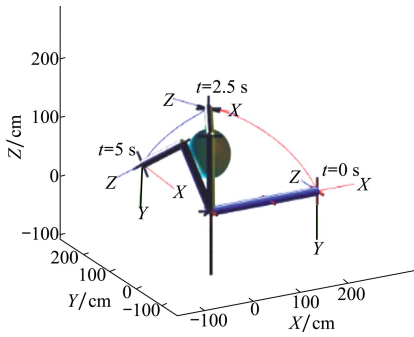


图 9 分段规划法机械臂避障运动过程示意图

中间点处各关节的角度 θ_{1-6} 、角速度 $\dot{\theta}_{1-6}$ 、角加速度 $\ddot{\theta}_{1-6}$ 一共 18 个参数,需要优化更多的参数,寻找最优解将更困难,计算成本和优化时间也将成倍增加。而本文提出的 SDPOA 算法只需要优化 K_{1-6} 一共 6 个参数就可以实现机械臂通过连续运动来避开障碍物,得到速度、角加速度连续,轨迹长度、转动角度协同优化的轨迹。

接下来,通过对不同位置情形、不同大小的单障碍物和多个障碍物的情况进行仿真,进一步验证算

法机械臂在运行过程中的各关节角速度、角加速度变化过程如图 8 所示,各关节角速度、角加速度曲线均连续。由此,规划出一条无碰撞同时运动学、轨迹长度、转动角度等要求一起协同优化的理想运动轨迹。

然后,采用文献[9]中提出的通过分段轨迹规划完成机械臂避障的方法进行仿真对比,该用五次多项式进行分段轨迹规划,再通过优化分段中间点位置的选取,来完成避障。为了使前后两段轨迹的速度和加速度连续,将中间点处各关节的速度、加速度均置零。通过遗传迭代,优化出中间点位置对应关节角为 $\theta = [1.110 \ 0, 1.272 \ 5, -1.135 \ 3, 0, 0.545 \ 5, 0.443 \ 9]$,可以实现避障的目的。机械臂避障运动过程如图 9 所示,其中 $t = 0 \sim 2.5 \text{ s}$ 之间的曲线为机械臂末端运动轨迹的第一段, $t = 2.5 \sim 5 \text{ s}$ 之间的曲线为机械臂末端运动轨迹的第二段。

通过该方法,机械臂在运行过程中的各关节角速度、角加速度变化过程见图 10,机械臂在运动过程中各关节速度会在中间点处降为 0,然后再启动。为此,可以考虑尝试连同中间点处各关节的角速度和角加速度一同优化,使机械臂在运动过程中速度不用降到零,从而解决上述问题,但是这样需要优化

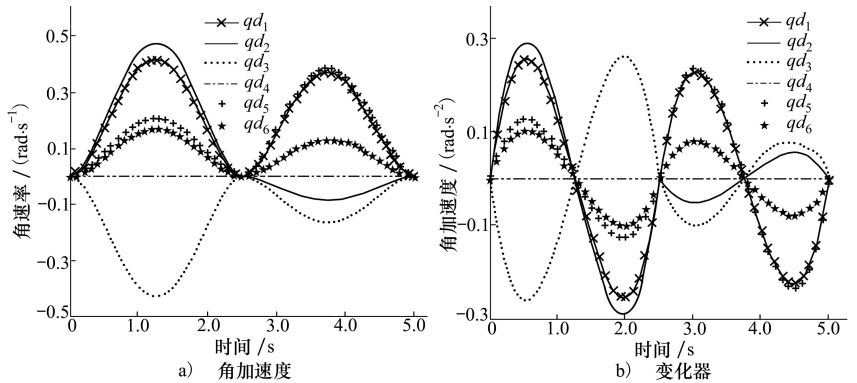


图 10 分段规划法机械臂在运动过程中角速度

法的正确性。

5.2 应用 SDPOA 算法避开不同位置类型、大小的单障碍物

其他条件不变,障碍物圆心位置设为 $O = [50, 200, 50]$,障碍物半径增大至 $R_o = 55 \text{ cm}$,则安全距离为 $S = R_o + R_L = 60 \text{ cm}$ 。

遗传迭代过程中适应度最优值和平均值变化过程如图 11 所示。经过 77 代迭代,得出最优参数 $K = [0.012, 20.001, -0.03, 0, 2.13, 1.33]$,适应度 $f_k =$

-0.115 9, 关节转动总量 $f_Q = 6.546 4 \text{ rad}$, 机械臂末端位移总量 $f_L = 308.171 3 \text{ cm}$ 。程序运行时间为 44 min。机械臂避障运动过程如图 12 所示, 其中圆弧为机械臂末端运动轨迹。

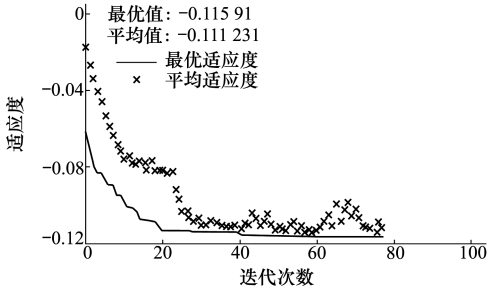


图 11 遗传迭代过程中适应度最优值和平均值变化过程

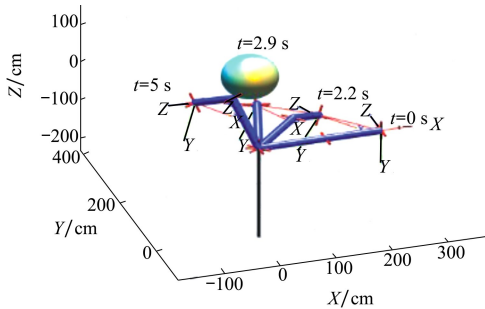


图 12 单障碍物 ($S=60 \text{ cm}$) 机械臂避障轨迹示意图

两连杆距离单障碍物中心的距离和垂足 P_2 与连杆 L_1 端点 B, C 距离变化过程见图 13, 曲线 d_1, d_2

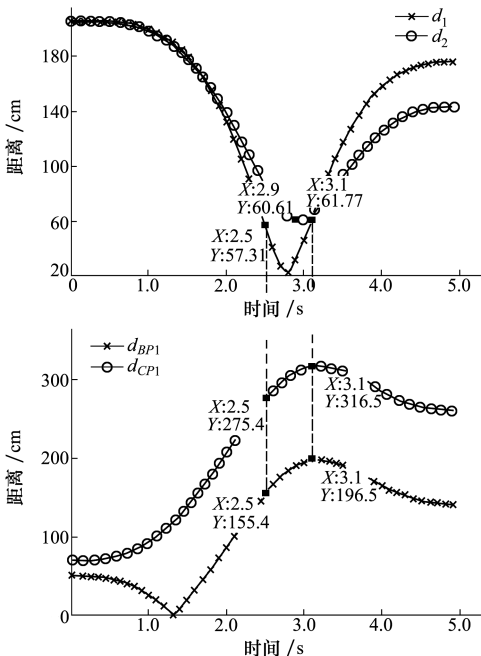


图 13 两连杆距离单障碍物 ($S=60 \text{ cm}$) 中心的距离和垂足 P_2 与连杆 L_1 端点 B, C 距离变化过程

分别表示连杆 L_1, L_2 与障碍物中心的距离, 曲线 d_{BP_1}, d_{CP_1} 分别表示垂足 P_1 到点 B, C 距离的距离。机械臂的运动过程中, 连杆 L_2 距离障碍物的最小距离 $d_1 = 60.61 \text{ cm} > S$, 故连杆 L_2 不会与障碍物发生碰撞; 而连杆 L_1 到障碍物的距离 d_2 在 $t=2.5 \sim 3.1 \text{ s}$ 之间小于安全距离, 但这段时间内满足 $d_{BP_1} > S, d_{CP_1} > S$ 且 $|d_{CP_1} - d_{BP_1}| = L_1 = 120 \text{ cm}$, 即出现类型二的情况, 故连杆 L_1 也不会与障碍物发生碰撞。因此, 机械臂在运动过程中, 均不会与障碍物发生碰撞。此外, 机械臂各关节角速度和角加速度均连续。

实验结果表明, 对于不同位置类型、不同大小的障碍物, SDPOA 算法也可以规划出能够避开障碍物且角速度和角加速度均连续的轨迹。

5.3 应用 SDPOA 算法避开多个障碍物

设 2 个障碍物的中心坐标分别为 $O_1 = [10, 100, 70], O_2 = [150, 50, 30]$, 障碍物半径分别为 $R_{O_1} = 45 \text{ cm}, R_{O_2} = 35 \text{ cm}$, 安全距离分别为 $S_1 = R_{O_1} + R_L = 50 \text{ cm}, S_2 = R_{O_2} + R_L = 40 \text{ cm}$ 。

遗传迭代过程中适应度最优值和平均值变化过程见图 14。经过 43 代迭代, 得出最优参数 $K = [-25.389, 47.599, -51.198, 0, 2.049, -1.892]$, 适应度 $f_k = -0.095 4$, 关节转动总量 $f_\theta = 6.189 7 \text{ rad}$, 机械臂末端位移总量 $f_L = 429.251 3 \text{ cm}$ 。优化迭代耗时运行时间为 31 min。机械臂避障运动过程见图 15, 其中圆弧为机械臂末端运动轨迹。

两连杆分别距离 2 个障碍物中心的距离变化过程见图 16, 其中, 曲线 d_{11} 和 d_{12} 分别表示障碍物 1 到连杆 L_1 和 L_2 的距离变化过程, 曲线 d_{21} 和 d_{22} 表示障碍物 2 到连杆 L_1 和 L_2 的距离变化过程。机械臂运动轨迹上的所有插值点中, 连杆 L_1 距离障碍物 1 的最小距离为 $d_{11} = 54.91 \text{ cm} > S_1$, 连杆 L_2 距离障碍物 1 的最小距离为 $d_{12} = 50.24 \text{ cm} > S_1$, 连杆 L_1 距离障碍物 2 的最小距离为 $d_{21} = 52.19 \text{ cm} > S_2$, 连杆 L_2 距离障碍物 2 的最小距离为 $d_{22} = 49.24 \text{ cm} > S_2$ 。连杆到障碍物的距离均大于对应的安全距离, 因此, 机械臂在运行过程中, 不会与障碍物发生碰撞。此外, 机械臂各关节角速度和角加速度均连续。

以上仿真实验结果表明, 对于有多个障碍物的情况, SDPOA 算法依然有效。

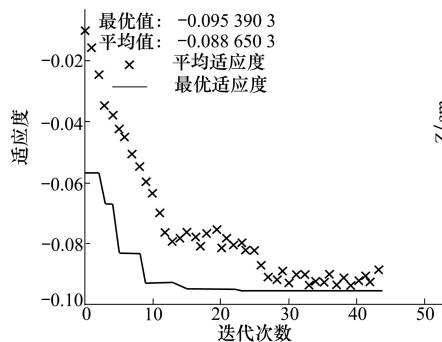


图 14 遗传迭代过程中适应度最优值和平均值变化过程

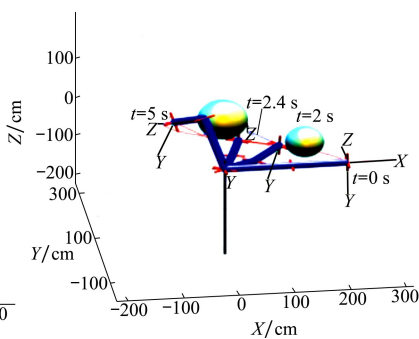


图 15 双障碍物机械臂避障轨迹示意图

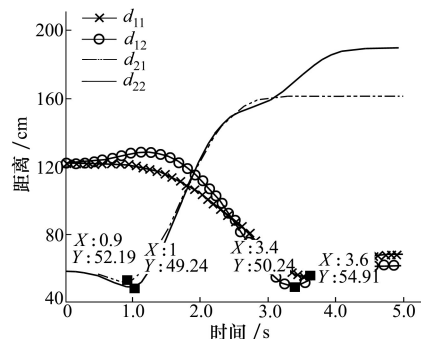


图 16 两连杆分别距离 2 个障碍物中心的距离变化过程

6 结 论

本文提出了一种新的基于六次多项式轨迹规划的机械臂避障方法,该方法由碰撞检测、轨迹规划、参数遗传优化三部分组成,能够使机械臂在避开障碍物的同时提高运动效率,进而安全、节能、稳定、高效的工作。通过 MATLAB 仿真,对比分析了 SDPOA 算法优势,只需要优化 6 个参数就可以实现机械臂连续运动来避开障碍物,得到速度、角加速度连续,轨迹长度、转动角度协同优化的轨迹;并通过对不同位置类型、不同大小的单障碍物和多个障碍物的情况进行仿真,进一步验证算法的正确性。理论上,

SDPOA 算法可以被扩展到任意自由度的串联机械臂的避障轨迹规划中,能够实现各类串联机械臂在复杂环境中的多障碍物避障。

需要说明的是,通过遗传算法优化得到参数 K 不一定是最优解,可以通过增加初始种群数量、改变迭代终止条件等方法提高参数 K 的质量,但过分的追求最优解会大大增加计算时间,而相应的运动轨迹性能指标不会有太大提升,因此在实际工程应用中,过分追求 K 的最优解,意义不大。此外,本文中采用 MATLAB 编写的程序运行时间较长,后续可以考虑通过用 C 语言编写程序或通过结合其他优化算法加快程序运行速度。

参考文献:

- [1] 蔡鹤皋. 机器人将是 21 世纪技术发展的热点[J]. 中国机械工程, 2000(1): 67-69
CAI Hegao. Robot Will be a Hot Spot of Technological Development in the Twenty First Century[J]. China Mechanical Engineering, 2000(1): 67-69 (in Chinese)
- [2] 祁若龙, 周维佳, 王铁军. 一种基于遗传算法的空间机械臂避障轨迹规划方法[J]. 机器人, 2014, 36(3): 263-270
QI Ruolong, ZHOU Weijia, WANG Tiejun. An Obstacle Avoidance Trajectory Planning Scheme for Space Manipulators Based on Genetic Algorithm[J]. Robot, 2014, 36(3): 263-270 (in Chinese)
- [3] DONG H, DU Z J. Obstacle Avoidance Path Planning of Planar Redundant Manipulators Using Workspace Density[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2015, 12: 9
- [4] LIU J, LIU R, SHEN X, et al. Research on Obstacle Avoidance of Space Manipulators Based on Cylindrical Bounding Box Model[C]//2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, 2018: 1926-1931
- [5] ISMAIL M, LAHOUAR S, ROMDHANE L. Collision-Free and Dynamically Feasible Trajectory of a Hybrid Cable-Serial Robot with Two Passive Links[J]. Robot Auton Syst, 2016, 80: 24-33
- [6] ADELI Hossein, TABRIZI M H N, MAZLOOMIAN Alborz, et al. Path Planning for Mobile Robots Using Iterative Artificial Potential Field Method[J]. International Journal of Computer Science Issue, 2011, 8(44): 28-32
- [7] VERAS Lgdo, MEDEIROS Fil, GUIMARAES Lnf. Rapidly Exploring Random Tree with a Sampling Method Based on Sukharev Grids and Convex Vertices of Safety Hulls of Obstacles[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(1):

1-19

- [8] PARK B, CHUN W K. Efficient Environment Representation for Mobile Robot Path Planning Using CVT-PRM with Halton sampling[J]. Electronics Letters, 2012, 48(22): 1397-1399
- [9] CHEN Zhuo, SU Weihua, LI Bin, et al. An Intermediate Point Obstacle Avoidance Algorithm for Serial Robot[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(5): 1-15
- [10] 孙玥, 魏欣. 基于五次多项式的码垛机器人轨迹规划[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 159-163
SUN Yue, WEI Xin. Trajectory Planning of Palletizing Robot Based on Quintic Polynomial[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 159-163 (in Chinese)
- [11] TANG Hong, LI Liangzhi, XIAO Nanfeng. Smooth Sensor Motion Planning for Robotic Cyber Physical Social Sensing[J]. Sensors, 2017, 17(2): 393
- [12] ZHANG Wenjia, SHANG Weiwei, ZHANG Bin, et al. Stiffness-Based Trajectory Planning of a 6-DOF Cable-Driven Parallel Manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(21): 3999-4011
- [13] REN Weide, SUN Wenxin. Application of an Improved Ant Colony Algorithm in TSP Problem Solving[J]. Chemical Engineering Transactions, 2016, 51: 73-378
- [14] FRANZIN A, STUTZLE T. Revisiting Simulated Annealing: a Component-Based Analysis[J]. Computers & Operations Research, 2019, 104: 191-206
- [15] 方群, 徐青. 基于改进粒子群算法的无人机三维航迹规划[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(1): 66-73
FANG Qun, XU Qing. 3D Route Planning for UAV Based on Improved PSO Algorithm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(1): 66-73 (in Chinese)

An Obstacle Avoidance Algorithm for Manipulators Based on Six-Order Polynomial Trajectory Planning

MA Yuhao^{1,2}, LIANG Yanbing¹

(1. Laboratory of Precision Physical Quantity Measurement, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an 710119, China; 2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at a series of requirements of obstacle avoidance trajectory planning of manipulators, a new algorithm based on six-order polynomial trajectory planning is proposed. Firstly, the six-order polynomial is used for the trajectory planning of the manipulator. Assuming that the coefficients of the sixth order term in the curve equation are undetermined parameters, by adjusting these parameters, the shape of the curve can be changed to make manipulators avoid the obstacle and to optimize performance indicators of the trajectory simultaneously. Thus, the obstacle avoidance trajectory planning of manipulators is transformed into a multi-objective optimization problem. Secondly, combining collision detection results and kinematics indexes, a fitness function is defined by the weighting coefficient method. At last, an ideal collision-free trajectory that is collaborative optimized in kinematics, trajectory length and rotation angle is planned in the joint space through genetic algorithm optimization. Additionally, the algorithm is validated by simulation experiments with MATLAB, the results show that the method of this study can effectively plan obstacle-free trajectories satisfying the performance requirements of the manipulator.

Keywords: manipulator; obstacle avoidance; trajectory planning; six-order polynomial; genetic algorithm