

基于速度修正项的机械臂避障路径规划

陈 钢, 叶佩昌, 贾庆轩, 孙汉旭

(北京邮电大学 自动化学院, 北京 100876)

摘 要: 针对机械臂运行过程中存在的碰撞问题, 提出一种基于速度修正项的机械臂避障路径规划方法. 利用B样条曲线进行机械臂关节空间规划, 使机械臂能够在特定时刻运行到指定构型. 在运行过程中, 利用碰撞检测算法实时计算机臂与障碍物的最小距离, 在碰撞即将发生时引入积分为零的避障速度修正项改变机械臂运行轨迹, 使得机械臂能够在实现障碍回避的同时, 保证其在特定时刻通过指定构型的要求. 仿真实验表明了所提出方法的正确性和有效性.

关键词: 机械臂; 避障路径规划; 速度修正项; B样条曲线

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Obstacle avoidance path planning of manipulator based on speed correction term

CHEN Gang, YE Pei-chang, JIA Qing-xuan, SUN Han-xu

(School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China. Correspondent: CHEN Gang, E-mail: buptcg@gmail.com)

Abstract: Aiming at the collision problem in the operation of manipulator, an obstacle avoidance path planning method based on the speed correction term is proposed. In the joint space of the manipulator, the path is planned by B-spline curve, so that the manipulator can reach given configuration at the particular moment. The collision detection algorithm is used to calculate the minimum distance between the manipulator and the obstacle during the whole operation process, and the speed correction term for obstacle avoidance is introduced to adjust the motion trajectory of the manipulator once the collision happens. Since the integration of the speed correction term is zero during the process of obstacle avoidance, the manipulator can reach given configuration at the particular moment after avoiding obstacle. Finally, the correctness and the effectiveness of the proposed method are verified by the simulation experiment.

Keywords: manipulator; obstacle avoidance path planning; speed correction term; B-spline curve

0 引 言

随着机械臂性能的提高, 其应用从制造业扩展到军事、医疗和太空探索等领域, 甚至能够代替人类进入危险环境中, 完成炸弹拆除、核工厂应急处置等高危任务. 此外, 在空间应用中机械臂不仅能够很好地实现舱体的捕获对接, 还能有效提高航天员舱外活动能力. 随着机械臂应用领域的扩展, 其工作环境也变得更加复杂, 机械臂与工作环境中的障碍物或待操作目标发生碰撞的可能性大大增加. 不可预期的碰撞不仅会导致任务无法完成, 严重情况下还会对机械臂系统和操作人员造成损害, 这使得机械臂的应用受到极

大限制. 因此, 开展机械臂避障路径规划的研究具有重要的意义.

针对机械臂避障路径规划方法, 国内外学者已经开展了深入研究, 并提出了行之有效的方法. Lazona-Perze^[1]提出了C-空间法, 将避障问题转化为在C空间无障碍区域内寻找连接初始点和目标点路径的问题, 该方法能够实现机械臂无碰撞路径规划, 但是对于运动障碍需要实时建立C空间, 所需计算量较大, 很难满足实时性要求. Khabit^[2]提出了人工势场法, 在障碍处定义一个排斥势场, 在目标点处定义一个吸引势场, 机械臂的运动由排斥势场和吸引势场的作用共

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2013-11-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61175080); 国家973计划项目(2013CB733000); 教育部高等学校博士学科专项科研基金项目(20120005120004).

作者简介: 陈钢(1982—), 男, 讲师, 博士, 从事空间机器人技术、机器人控制技术的研究; 孙汉旭(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 从事机器人技术等研究.

同决定,该方法对处理全局规划中的动态避障非常有效,但容易陷入局部最小点.近年来,启发式搜索算法也被应用到机械臂避障路径规划研究中.Tian等^[3]针对两自由度机械臂,利用遗传算法搜索无碰轨迹,同时以最小化关节位移作为优化目标,实现全局范围内的避障路径规划.贾庆轩等^[4]通过分析机械臂各杆件与障碍物发生碰撞的条件,进而求解机械臂的无碰撞自由工作空间,并利用A*算法进行无碰撞最优路径的搜索.然而,随着机械臂自由度的增多,启发式搜索算法所需计算量很大,不适合机械臂实时避障规划.此外,Mayorga等^[5]通过训练人工神经网络(ANN),得到了冗余度机械臂的逆解,并引入零空间向量实现避障,但该方法不具有普遍适用性.Sugie等^[6]利用非线性控制系统的反馈线性化提出了速度受限条件下机械臂的自主避障方法,并通过两连杆机械臂验证了该方法的有效性.Ashkan等^[7]建立了冗余度机械臂的预测控制非线性模型,可以使机械臂沿预定轨迹运动过程中不发生碰撞,但是建立非线性模型的控制方法计算量较大,不适用于动态规划.

某些复杂任务不仅要求机械臂某一时刻到达指定构型,而且要求在运行过程中与障碍物不发生碰撞.鉴于此,本文提出了基于速度修正项的机械臂避障路径规划方法.首先利用B样条曲线进行机械臂关节空间路径规划,通过设定B样条曲线的型值点使得机械臂能够在特定时刻到达指定构型;然后引入积分为零的避障速度修正项函数实现机械臂避障路径规划;最后通过仿真实验对所提出的避障路径规划算法进行验证.

1 基于B样条曲线的关节空间规划

由于B样条曲线具有分段连续、能够保证机械臂在特定时刻到达指定构型的优势,已广泛应用于机械臂路径规划中.考虑到实际应用过程中需要保证机械臂关节角速度和角加速度连续变化,采用四阶三次B样条曲线进行机械臂关节空间规划,其曲线方程^[8]为

$$\theta_i(u) = \frac{1}{6} [1 \ u \ u^2 \ u^3] \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{i-1} \\ C_i \\ C_{i+1} \\ C_{i+2} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: $\theta_i(u)$ 为连接第*i*个和第*i+1*个型值点的第*i*段B样条曲线, $u \in [0, 1]$ 为参数变量, C_{i-1} 、 C_i 、 C_{i+1} 、 C_{i+2} 为确定第*i*段B样条曲线方程所需的控制点坐标.

采用B样条曲线拟合关节运动轨迹时,通常给出

的是一系列型值点而非控制点坐标.机械臂关节空间B样条曲线规划的型值点和控制点具有相同的形式,可以分别用 $P = (t, q)$ 和 $C = (t, q)$ 进行描述,其中参数*t*和*q*分别为运行时刻和关节角度.由于机械臂需要在特定时刻到达指定构型,即要求构造的B样条曲线能够精确地通过每个型值点,为了得到满足任务需求的四阶三次B样条曲线方程,需要根据给定的型值点坐标*P*求解控制点*C*坐标,具体求解过程参见文献[8].

在求得控制点坐标后,可以由式(1)得到四阶三次B样条曲线方程.将控制点坐标拆分成分量形式,得到时刻分量和关节角度分量分别为

$$t_i(u) = \frac{1}{6} [1 \ u \ u^2 \ u^3] \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{i-1} \\ t_i \\ t_{i+1} \\ t_{i+2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$q_i(u) = \frac{1}{6} [1 \ u \ u^2 \ u^3] \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{i-1} \\ q_i \\ q_{i+1} \\ q_{i+2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

对式(2)和(3)中的参数*u*按照一定步长遍取0~1之间的值,可以得到曲线上每一点对应的时刻和相应关节角度,进而实现机械臂关节空间规划.

2 机械臂避障路径规划

为了使机械臂在特定时刻到达指定构型的同时能够实现障碍回避,本文提出了基于速度修正项的避障路径规划算法.该算法的总体思路是:利用四阶三次B样条曲线进行机械臂关节空间路径规划,通过设定B样条曲线的型值点使得机械臂能够在特定时刻到达指定构型;在机械臂运行过程中实时计算机臂与障碍物间的最小距离和碰撞关键点(机械臂上离障碍物最近点,可利用碰撞检测算法求得);根据计算所得的最小距离判断碰撞是否发生,若发生碰撞,则通过求解机械臂碰撞关键点速度,利用机械臂逆运动学得到关节角的避障速度;最后,在规划好的机械臂无障碍轨迹中引入速度修正项修改运行轨迹以实现避障.由于机械臂避障速度修正项在整个避障过程中积分为零,机械臂在完成障碍回避后仍能到达指定的构型.

2.1 避障速度修正项

避障速度修正项是机械臂实现避障路径规划的关键,要使机械臂在运行过程中能够同时满足避障和

在特定时刻到达指定构型的要求, 避障速度修正项需满足两个条件: 一方面能够使得机械臂偏离原来轨迹运动以实现避障; 另一方面在整个避障过程中积分为零以保证障碍回避完成后仍能到达指定构型. 由于关节空间 B 样条曲线规划得到的关节角是参数 u 的连续变化函数, 引入的避障速度修正项 $F(u)$ 也应该是参数 u 的函数. 引入 $F(u)$ 后的关节角方程为

$$\mathbf{q}_{ic}(u) = \mathbf{q}_i(u) + \mathbf{F}(u)\Delta uT. \quad (4)$$

其中: $\mathbf{q}_{ic}(u)$ 为引入避障速度修正项后的关节角度值; $\mathbf{q}_i(u)$ 为未引入避障修正项的机械臂关节角度值; Δu 为参数 u 变化的单位步长; T 为第 i 段 B 样条曲线的时间长度, 即第 i 个和第 $i+1$ 个型值点时刻分量的差值.

2.1.1 避障速度修正项设计

为了保证机械臂避障完成后能够在给定时刻回复至要求的构型, 需要避障速度修正项在整个避障过程中积分为零. 为此, 可以设计避障速度修正项为

$$\mathbf{F}(u) = \begin{cases} -F'(u), & u_a < u < u_a + U_a; \\ F'(u), & u_a + U_a < u < u_a + 2U_a; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$F'(u) = \dot{\mathbf{q}}_a \frac{\cos(2\pi(u - u_a)/U_a) - 1}{2},$$

U_a 为避障过程总时间的一半, u_a 为避障开始时刻, $\dot{\mathbf{q}}_a$ 为关节角避障速度. 假设 $u_a = 0$, $U_a = 0.2$, $\dot{\mathbf{q}}_a$ 的幅值为 1, 则避障速度修正项的曲线如图 1 所示.

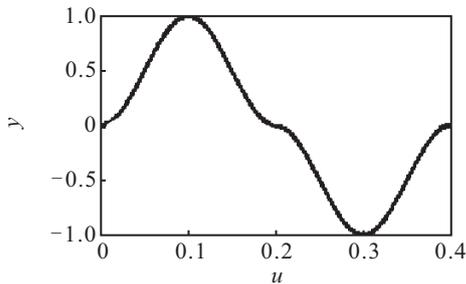


图 1 避障速度修正项曲线

由图 1 可见, 避障速度修正项在一次避障过程中积分为零, 即

$$\int_{u_a}^{u_a+2U_a} \mathbf{F}(u)du = 0,$$

因此, 可以保证机械臂在完成避障后仍然能够到达指定构型. 此外, 在避障开始和终止时刻, 修正项 $\mathbf{F}(u)$ 的导数为零, 可以确保机械臂关节角速度在引入修正项的过程中连续变化.

为了使机械臂在完成避障后仍能到达下一个指定构型, 避障总时间 $2U_a$ 的取值应该小于下一个型值点时刻减去避障开始时刻 u_a 的值, 并大于机械臂按照初始规划由避障开始时刻重新运动至非碰撞区域

的时间, 具体大小可根据障碍物模型进行调整.

2.1.2 关节角避障速度 $\dot{\mathbf{q}}_a$ 的求解

式 (5) 给出的避障速度修正项中, 关节角避障速度 $\dot{\mathbf{q}}_a$ 的求解应综合考虑机械臂当前构型和关键点避障速度 \mathbf{V} . 具体而言, 首先, 需要在笛卡尔空间内确定关键点避障速度 \mathbf{V} ; 然后, 求解机械臂当前构型对应的碰撞关键点雅可比矩阵 \mathbf{J}_m ; 最后, 利用逆运动学将笛卡尔空间的关键点避障速度 \mathbf{V} 映射到关节空间, 可得到关节角避障速度

$$\dot{\mathbf{q}}_a = \mathbf{J}_m^{\dagger} \mathbf{V}, \quad (6)$$

其中 \mathbf{J}_m^{\dagger} 为碰撞关键点雅可比矩阵 \mathbf{J}_m 的伪逆. 需要说明的是, 由于 $\dot{\mathbf{q}}_a$ 只包含基座到关键点之间的 m 个关节角, 在代入修正项 $\mathbf{F}(u)$ 时, 需将其余关节角速度设为 0, 保证向量 $\mathbf{F}(u)$ 的长度与 $\mathbf{q}_i(u)$ 相同. 由式 (6) 可以将关节角避障速度 $\dot{\mathbf{q}}_a$ 的求解转化为关键点避障速度 \mathbf{V} 的求解.

2.1.3 关键点避障速度 \mathbf{V} 的求解

关键点避障速度 \mathbf{V} 的求解应综合考虑机械臂关键点当前时刻的速度、障碍物信息等因素. 由碰撞关键点 P_0 到障碍物中心 O 的矢量 P_0O 和碰撞关键点 P_0 的当前速度矢量 \mathbf{V}_0 确定避障平面, 如图 2 所示. 图 2 中, r_s 为障碍物半径, R 和 R_{\min} 分别为设定的障碍回避阈值和最小安全距离. 在机械臂运动过程中, 若检测到关键点 P_0 到障碍物中心 O 的距离 $d \leq R$, 则机械臂开始进行避障; 若检测到 $d \leq R_{\min}$, 则机械臂停止运动.

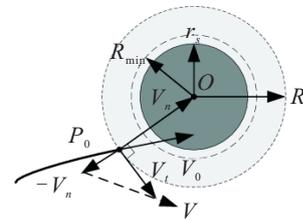


图 2 关键点避障速度

将图 2 中机械臂碰撞关键点的当前时刻速度 \mathbf{V}_0 分解为沿障碍物半径方向的速度分量 \mathbf{V}_n 和沿障碍物切线方向的速度分量 \mathbf{V}_t . 关键点避障速度 \mathbf{V} 的求解需要考虑两个要求: 一方面能够使碰撞关键点远离障碍物运动, 即避障速度 \mathbf{V} 具有远离障碍物运动的速度分量; 另一方面, 为了减小引入避障速度 \mathbf{V} 后关节角加速度的突变, 机械臂避障速度 \mathbf{V} 应保留切线方向速度 \mathbf{V}_t . 通过上述分析, 可以得到关键点避障速度 (方向如图 2 所示) 为

$$\mathbf{V} = \eta \frac{(\mathbf{V}_t - \mathbf{V}_n)}{|\mathbf{V}_t - \mathbf{V}_n|}, \quad (7)$$

其中 η 为避障速度的幅值, 其大小由机械臂碰撞检测关键点当前时刻的速度确定, 以减小避障过程因速度

大小造成的关节角加速度突变。

2.2 避障路径规划算法

为了实现机械臂避障路径规划, 基于上述原理设计避障路径规划算法如下。

Step 1: 输入机械臂各关节的型值点数目 n 和型值点坐标 $\mathbf{P}(t, q)$; 确定关节空间规划的单位步长 Δu 和规划总步数 $K = (n - 1)/\Delta u$; 初始化避障标志位 $\text{flag} = 0$ 。避障标志位 flag 为 0 表示机械臂未开始避障, 为 1 表示机械臂正在进行避障。

Step 2: 由型值点 \mathbf{P} 求解控制点 \mathbf{C} , 根据式 (2) 和 (3) 求出 B 样条曲线规划的关节角度变化曲线 $\theta(u) = (t(u), q(u))$ 。

Step 3: 根据求解的 B 样条曲线方程, 得到第 k 步各关节角度值 $q(k\Delta u)$ 和关节角速度值 $\dot{q}(k\Delta u)$ 。

Step 4: 判断避障标志位 flag 是否等于 0, 若是则转至 Step 5, 否则转至 Step 6。

Step 5: 调用碰撞检测算法计算机臂与障碍物最小距离和碰撞关键点坐标。若 $d > R$, 则机械臂按照初始规划继续运动, 转至 Step 7; 若 $R_{\min} < d \leq R$, 则更新机械臂根部到关键点的运动学方程, 求解关键点当前时刻的速度 $\dot{\mathbf{V}}_0$, 由式 (7) 求解关键点避障速度 $\dot{\mathbf{V}}$, 再根据式 (6) 求解相应的关节角避障速度 $\dot{\mathbf{q}}_a$, 修改避障标志位 $\text{flag} = 1$, 转至 Step 6; 若 $d \leq R_{\min}$, 则机械臂避障失败, 停止运动, 退出算法流程。

Step 6: 根据求解的关节角避障速度 $\dot{\mathbf{q}}_a$ 计算避障附加项 \mathbf{F}_a , 代入式 (4) 修改当前步机械臂关节角向量 \mathbf{q} 。判断避障总时间 $2U_a$ 是否完成, 若完成则修改避障标志位 $\text{flag} = 0$, 否则保持其值为 1。

Step 7: 判断当前步数 k 是否等于规划总步数 K , 若是, 则路径规划完成, 否则转至 Step 3 继续进行。

3 仿真实验

为了验证所提出的基于速度修正项的机械臂避障路径规划算法, 以七自由度机械臂为研究对象进行仿真验证。机械臂具体构型和 DH 参数分别如图 3 和表 1 所示。机械臂杆件均为圆柱体, 采用圆柱体包络模型简化, 简化圆柱半径均为 0.15 m, 障碍物采用半径为 0.5 m 的球体包络模型。

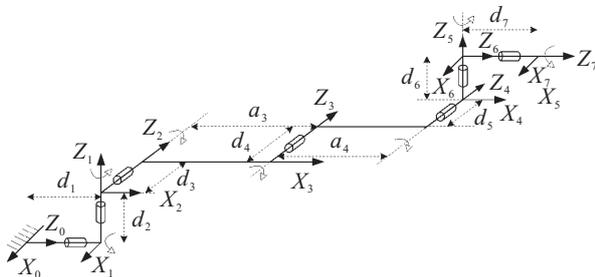


图 3 七自由度机械臂运动学模型

表 1 七自由度机械臂 DH 参数

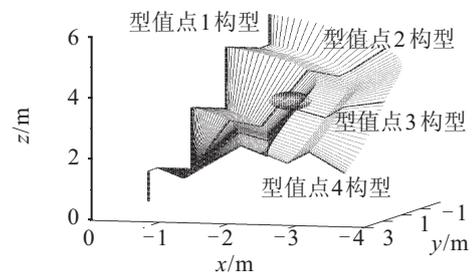
序号	$\theta_i / (^\circ)$	d_i / m	a_{i-1} / m	$\alpha_{i-1} / (^\circ)$
1	0	1	0	90
2	90	0.5	0	-90
3	0	0.5	4	0
4	0	1	4	0
5	0	0	0	90
6	-90	0.5	0	-90
7	0	1	0	0

针对具体研究对象, 在 Matlab 中进行数值仿真验证, 机械臂关节空间 B 样条曲线规划所需的各关节的型值点信息如表 2 所示。设定障碍物的位置为 $(-2.2 \text{ m}, 0.4 \text{ m}, 3.5 \text{ m})$, 避障总时间 $2U_a = 10 \text{ s}$, η 的取值为关键点检测到障碍物时刻速度 \mathbf{V}_0 的大小。

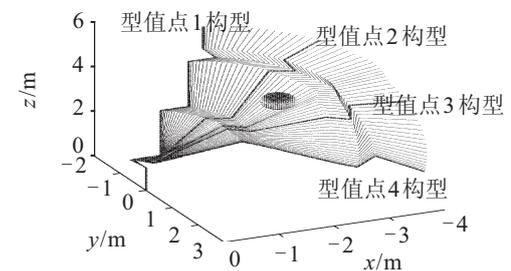
表 2 七自由度机械臂型值点

t/s	$\theta_1 / (^\circ)$	$\theta_2 / (^\circ)$	$\theta_3 / (^\circ)$	$\theta_4 / (^\circ)$	$\theta_5 / (^\circ)$	$\theta_6 / (^\circ)$	$\theta_7 / (^\circ)$
0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	20	10	-10	10	15	25
25	0	30	20	20	0	30	60
40	0	40	30	40	20	60	50

为了更好地表明所提出的避障算法的有效性, 在不引入避障路径规划算法情况下得到理想的机械臂构型变化轨迹, 如图 4(a) 所示。由图 4(a) 可见, 采用四阶三次 B 样条曲线能够使机械臂在给定时刻顺利通过各组指定构型, 但从型值点 2 构型至型值点 3 构型的运动过程中, 机械臂的杆件与障碍物发生了碰撞。图 4(b) 为采用所提出的避障路径规划算法进行避障的机械臂构型变化轨迹。由图 4(b) 可见, 机械臂检测到障碍物后, 构型发生改变, 顺利地实现了避障。同时, 机械臂避障后仍能在给定时刻通过型值点 3 和型值点 4 确定的指定构型。



(a) 引入避障算法前



(b) 引入避障算法后

图 4 机械臂构型变化曲线

图5为机械臂避障过程中各关节角度和角速度曲线. 由图5可见, 在避障过程中, 机械臂关节角和关节角速度连续变化, 能够满足机械臂的实际应用需求.

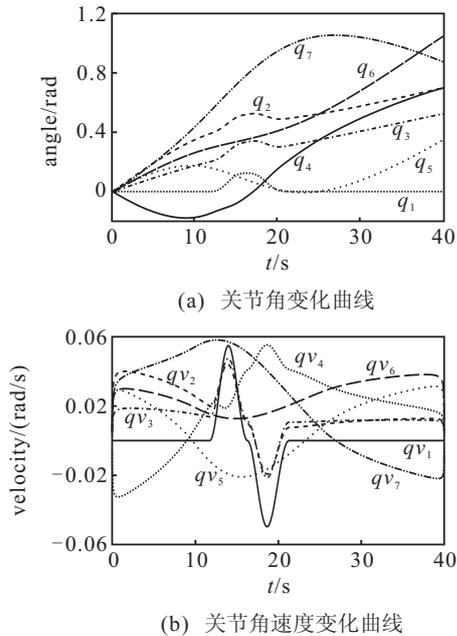


图5 关节运动学性能曲线

4 结 论

本文针对机械臂运动过程中可能与障碍物发生碰撞的问题, 提出了基于速度修正项的避障路径规划方法, 保证机械臂在特定时刻到达指定构型的前提下能够顺利实现障碍回避. 具体结果如下:

1) 利用B样条曲线实现了在特定时刻到达指定构型的任务需求, 进而通过引入关键点避障速度修正项使机械臂实现了障碍回避.

2) 所提出的避障路径规划算法对于冗余度机械臂和非冗余度机械臂均适用.

3) 与传统的搜索算法相比, 所提出的避障路径规划算法只需要在无障路径规划基础上进行关节速度修正, 计算量小, 运算速度快.

参考文献(References)

- [1] Lozano-Perea T. Spatial planning: A configuration space approach[J]. IEEE Trans on Computers, 1983, 32(2): 108-120.
- [2] Khabit O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. Int J of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
- [3] Tian L, Collins C. An efficient robot trajectory planning method using a genetic algorithm[J]. Mechatronics, 2004, 14(5): 455-470.
- [4] 贾庆轩, 陈钢, 孙汉旭, 等. 基于A*算法的空间机械臂避障路径规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 109-115. (Jia Q X, Chen G, Sun H X, et al. Study on path planing algorithm for space manipulator to avoid obstacle[J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 109-115.)
- [5] Mayorga R V, Aduthaya T C N. An artificial neural network approach for the obstacle avoidance of redundant robot manipulators[C]. Intelligent Robots and Systems. Nice: IEEE, 2008: 4184-4188.
- [6] Sugie T, Fujimoto K, Kito Y. Obstacle avoidance of manipulators with rate constraints[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2003, 19(1): 168-174.
- [7] Jasour Ashkan M, Farrokh Mohammad. Path tracking and obstacle avoidance for redundant robotic arms using fuzzy NMPC[C]. American Control Conf. Louis: IEEE, 2009: 1353-1358.
- [8] 王幼民, 徐蔚鸿. 机器人关节空间B样条轨迹优化设计[J]. 机电工程, 2000, 17(4): 57-60. (Wang Y M, Xu W H. B-splines optimun path planning for robot in joint coordinaes[J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2000, 17(4): 57-60.)

(责任编辑: 郑晓蕾)