

基于改进遗传算法的包装机器人轨迹规划

贾超广¹, 肖海霞², 胡广新¹

(1. 郑州升达经贸管理学院, 郑州 451191; 2. 河南工程学院, 郑州 451191)

摘要: **目的** 为了提高包装生产效率, 提升直角坐标机器人的稳定性、可靠性和运动精度, 避免机器人出现速度、加速度突变, 对机器人运动轨迹进行规划。**方法** 首先分析直角坐标机器人的工作原理, 在此基础上采用三次均匀 B 样条曲线对机器人关节轨迹进行逼近, 给出一种基于改进遗传算法的最优时间 B 样条轨迹规划方法。根据功能需求, 设计一种基于 ARM 和 FPGA 的控制系统。**结果** 仿真结果表明, 机器人各个关节抵达节点的用时最短, 运行耗时能够缩减 39% 以上, 验证了算法的有效性。**结论** 所述控制系统和方法能够满足包装码垛的要求, 可提高包装效率。

关键词: 直角坐标机器人; 遗传算法; 轨迹规划; B 样条曲线

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)15-0183-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.028

Packaging Robot Trajectory Planning Based on Improved Genetic Algorithm

JIA Chao-guang¹, XIAO Hai-xia², HU Guang-xin¹

(1. ZhengZhou Shengda University of Economics, Business & Management, Zhengzhou 451191, China;
2. Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the production efficiency of package, elevate the stability, reliability and motion precision of the Cartesian coordinate robot, and plan the motion trajectory of the robot to avoid the sudden change of the robot's speed and acceleration. Firstly, the working principle of the Cartesian coordinate robot was analyzed. On the basis of this, cubic uniform B-spline curve was used to achieve the robot joint trajectory approximation. An optimal time B-spline trajectory planning method based on improved genetic algorithm was given. According to functional requirements, a control system based on ARM and FPGA was designed. The simulation results showed that, the robot joints reached the node with the shortest time, and the operation time could be reduced by 39%, and the effectiveness of the algorithm was verified. The proposed control system and method can meet the requirements of packaging and stacking, which can improve packaging efficiency.

KEY WORDS: Cartesian coordinate robot; genetic algorithm; trajectory planning; B-spline curve

随着自动化水平的不断提高, 包装和搬运生产线对智能化的要求日益提高, 在一定程度上加速了机器人的发展^[1-5]。当前工业机器人已遍布诸多行业, 例如食品饮料、化工、物流仓储、机械制造等, 已然成为自动化生产过程中不可或缺的设备^[6-7]。特别是直角坐标机器人, 其在称量包装和食品包装等领域的应用十分广泛, 可根据不同机构针对性编程, 具有运动简单、自由度多、可重复设计、承载能力强等特点。

对于直角坐标机器人控制系统, 本质上是一种多轴同步运动控制系统。目前该控制系统大体可以分为 3 类: PC 控制、PLC 控制以及微处理器控制^[8-10]。

其中 PC 控制主要以 PC 机作为核心, 可实现人机交互处理、系统运行状态显示、控制指令发送、反馈信号监控等; 运动控制器主要负责与伺服系统进行数据交换以及相关信号的输入、输出; 不过该控制系统受硬件因素影响, 开发周期相对较长。基于 PLC 的控制系统一般包括电源模块、CPU、运动控制模块和 I/O 模块等, 该类控制系统抗干扰能力强、开发难度小, 但是存在通用性不足、设计不够灵活等问题^[11-15]。相比而言, 基于微处理器的控制系统具有成本低、运算速度快、复杂算法同样能够实现等优点, 而且可根据不同需求进行针对性设计。

收稿日期: 2018-03-28

作者简介: 贾超广 (1978—), 男, 硕士, 郑州升达经贸管理学院副教授, 主要研究方向为智能机器人控制。

文中以包装搬运用直角坐标机器人为研究对象,重点讨论其轨迹规划方法并利用先进精简指令微处理器 (ARM) 和现场可编程门阵列 (FPGA) 设计其控制系统;利用三次均匀 B 样条曲线拟合关节轨迹;通过改进遗传算法实现运行时间优化。

1 包装直角坐标机器人

1.1 工作原理

文中所述包装码垛直角坐标机器人具有 4 个自由度,可实现机械抓手沿 x 轴、 y 轴和 z 轴的水平移动以及绕 z 轴的旋转运动。包装码垛过程要求机器人能够快速准确地进行物料抓取以及码放,同时要求在码放过程中不能出现加速度突变,以避免抖振现象发生。

直角坐标机器人本体结构见图 1。机器人运动由 4 个伺服电机驱动完成;主控制系统利用一系列高精度脉冲实现电机的精准控制,进而保证机器人运动的准确性。系统运行过程中,当物料检测传感器有信号且被上位机捕获后,控制器操控机器人末端机械抓手夹紧物料。同时 z 轴伺服电机通过齿轮齿条结构带动抓手垂直向上或向下移动。在 z 轴的移动过程中, x 轴和 y 轴电机进行插补同步运动,确保将物料送至目标点上方。 z 轴的上下限位位置由接近开关决定。

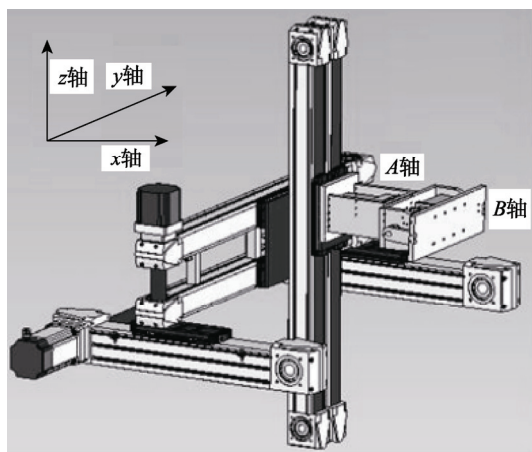


图 1 直角坐标机器人本体结构
Fig.1 Cartesian coordinates robot body structure

1.2 控制系统

包装直角坐标机器人控制系统主要包括轨迹示教模块和主控制模块,可实现机器人在线示教以及运动轨迹规划等功能。示教模式主要利用操纵器内部的示教按钮向主控制模块发送运转指令;主控制模块驱动伺服电机使直角坐标机器人末端到达指定示教点,并将该点坐标记录、存储到数据寄存器中,以进行示教再现。所谓示教再现就是主控制模块根据示教过程所保存的示教信息进行路径轨迹规划,通过脉冲个数

和脉冲频率实现 4 个伺服电机的同步控制同时经过示教点。控制系统工作流程见图 2。

主控制模块以 ARM 和 FPGA 作为控制核心,其中 ARM 主要负责传感器信号采集、上位机通信以及故障检测等;FPGA 则主要实现运动控制,如机器人路径轨迹规划、伺服脉冲数量和脉冲频率确定、伺服电机变速控制等。示教模块以 ARM 作为控制核心,负责人机界面以及向主控制模块发送相关指令。

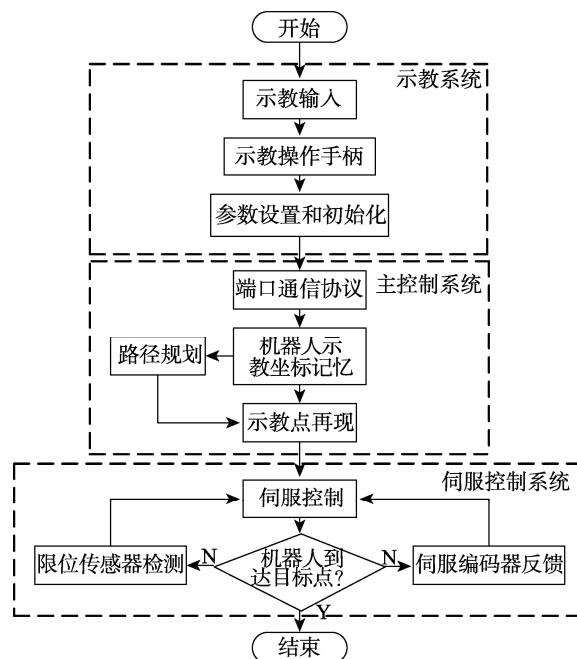


图 2 控制系统工作流程
Fig.2 Control system working process

2 三次均匀 B 样条曲线

定义 B 样条曲线第 i 段的表达式为:

$$\theta_i(u) = X_0(u)V_{i-1} + X_1(u)V_i + X_2(u)V_{i+1} + X_3(u)V_{i+2} \quad (1)$$

式中: u 为参数且 $0 \leq u \leq 1$; $X_i(u)$ 为系数多项式; $\theta_i(u)$ 为 B 样条曲线第 i 段上任一点的点矢量; $V_{i-1}, V_i, V_{i+1}, V_{i+2}$ 分别为 B 样条曲线第 i 段的控制点。考虑到曲线连续性,相邻的 2 段曲线 $\theta_i(u)$ 和 $\theta_{i+1}(u)$ 分别在 $u=0$ 以及 $u=1$ 处满足条件:

$$\theta_i(1) = \theta_{i+1}(0) \quad (2)$$

结合式 (1) 和式 (2) 可得:

$$\begin{cases} X_0(1) = X_3(0) = 0, X_1(1) = X_0(0) \\ X_2(1) = X_1(0), X_3(1) = X_2(0) \end{cases} \quad (3)$$

同理,相邻曲线段在连接点处斜率和曲率相等,满足连续性约束条件为:

$$\dot{\theta}_i(1) = \dot{\theta}_{i+1}(0), \quad \ddot{\theta}_i(1) = \ddot{\theta}_{i+1}(0) \quad (4)$$

由此可得 8 个约束条件:

$$\begin{cases} \dot{X}_0(1) = \dot{X}_3(0) = 0, \dot{X}_1(1) = \dot{X}_0(0) \\ \dot{X}_2(1) = \dot{X}_1(0) = 0, \dot{X}_3(1) = \dot{X}_2(0) \\ \ddot{X}_0(1) = \ddot{X}_3(0) = 0, \ddot{X}_1(1) = \ddot{X}_0(0) \\ \ddot{X}_2(1) = \ddot{X}_1(0) = 0, \ddot{X}_3(1) = \ddot{X}_2(0) \end{cases} \quad (5)$$

另外，还需满足坐标变换不变性，即：

$$X_0(u) + X_1(u) + X_2(u) + X_3(u) = 1 \quad (6)$$

假定 $X_i(u)$ 为三次多项式，通过上述条件可得其所有系数。根据函数对称性，则有：

$$\begin{cases} X_0(u) = X_3(1-u) \\ X_1(u) = X_2(1-u) \\ X_2(u) = a_{20}u^3 + a_{21}u^2 + a_{22}u + a_{23} \\ X_3(u) = a_{30}u^3 + a_{31}u^2 + a_{32}u + a_{33} \end{cases} \quad (7)$$

式中： a_{20} 等为计算中间变量。根据式 (3)，可以得到：

$$\begin{cases} a_{23} = a_{30} \\ a_{22} = a_{21} = 3a_{30} \\ a_{31} = a_{32} = a_{33} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

同时根据对称性，则有 $a_{20} = -3a_{30}$, $a_{30} = 1/6$ ，如此可求得：

$$\begin{cases} X_0(u) = (1-u)^3/6 \\ X_1(u) = u^3/2 - u^2 + 2/3 \\ X_2(u) = -u^3/2 + u^2/2 + u/2 + 1/6 \\ X_3(u) = u^3/6 \end{cases} \quad (9)$$

3 改进遗传算法

3.1 基本原理

虽然遗传算法在众多工程领域彰显了良好的性能，但是仍然存在收敛速度慢、容易早熟等问题。为此，文中在选择算子、交叉算子、变异算子等几个方面进行改进，以提高算法的搜索精度、收敛速度以及局部寻优能力。

选择算子通过适应度函数对个体优劣进行评价，根据适应度按照一定原则，从父代中选择适应度好的个体遗传给下一代，淘汰适应度低的个体，使种群向最优解的方向靠近。采用概率保留法和最优保存策略相结合的方法，既保证了种群个体收敛性又保证了种群多样性。首先计算群体的平均适应度 f_{avg} 以及个体 x_i 的适应度 f_i ，如果：

$$f_i > f_{avg} \quad (10)$$

则 x_i 保留，否则存在：

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^M f_i} \quad (11)$$

式中： M 为适应度小于 f_{avg} 的个体数量； P_i 为个体 x_i 的适应度与群体适应度之和的比值。这样生成一个随机数 r , $0 < r < 1$ ，如果 $P_i > r$ 则 x_i 保留；否则将其淘汰。

对于交叉算子，个体适应度小于种群平均适应度时，为保持种群个体多样性，加快个体更新，使用较大的交叉概率；个体适应度大于种群平均适应度时，个体集中在最优解附近，如果依然使用大的交叉概率，可能会降低适应度高的个体在群体中的比例，延缓收敛速度，为提高算法的收敛速度，应采用较小的交叉概率。综合以上因素，文中采用自适应的交叉算子，以个体适应度作为判断依据，交叉概率随着适应度的变化而变化。

$$P_c = \begin{cases} P_{c2} - \frac{(P_{c2} - P_{c1})(f_{avg} - f_{cm})}{f_{avg} - f_{min}} & f_{cm} \leq f_{avg} \\ P_{c3} - \frac{(P_{c3} - P_{c2})(f_{max} - f_{cm})}{f_{max} - f_{avg}} & f_{cm} > f_{avg} \end{cases} \quad (12)$$

式中： f_{max} 为种群中个体最大适应度； f_{min} 为种群中最小适应度； f_{cm} 为 2 个交叉个体中较大的适应度； P_{c1} , P_{c2} , P_{c3} 均为交叉概率。

对于变异算子的改进主要考虑：个体适应度小于种群平均适应度时，使用大的变异概率，增加产生优良个体的概率；个体适应度大于种群平均适应度时，使用小的变异概率，增加算法的收敛速度。染色体高位变异，产生的新个体与原个体差异较大；染色体低位变异，产生的新个体与原来个体差异较小。对适应度小于种群平均适应度的个体，进行高位变异，增强个体在搜索空间的扩散；对适应度大于种群平均适应度个体，进行低位变异，提高算法局部寻优能力。综合考虑上述因素，变异概率 P_m 可表示为：

$$P_m = \begin{cases} P_{m1}, & f_i \leq f_{avg} \\ P_{m2} - \frac{(P_{m2} - P_{m1})(f_{max} - f_i)}{f_{max} - f_{avg}}, & f_i > f_{avg} \end{cases} \quad (13)$$

式中： P_{m1} , P_{m2} 均为变异概率。

3.2 全局寻优算法

从本质上讲，机器人轨迹优化的目标就是降低工作耗时或耗能。文中以工作时间最短为优化指标进行说明，即：

$$t = \min \sum_{i=1}^{m-1} h_i \quad (14)$$

式中： t 为整条 B 样条曲线所需总时间； $h_1, h_2, \dots, h_{m-1}$ 分别为每段 B 样条曲线所需时间。文中选取 $h_1, h_2, \dots, h_{m-1}$ 作为设计变量。根据 B 样条曲线的特性，整个 B 样条曲线所需时间的优化问题可转换为各小段 B 样条曲线所需时间 h_i 的优化问题。

基于改进遗传算法对轨迹进行全局寻优的过程

如下所述。

1) 选用实数编码完成问题所有可能解的编码, 即种群个体。所谓可能解是指机器人沿每段 B 样条运动耗时的定义域。

2) 初始种群生成。在时间间隔 h_i 的取值范围内, 生成一定数量的初始种群。

3) 种群个体适应度函数。

种群个体的适应值可根据式 (15) 进行分配。

$$f = \begin{cases} \frac{1}{h_i} & \text{如果满足约束条件} \\ \frac{1}{h_i^{\max}} & \text{否则} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $h_i^{\max}$ 为时间间隔 h_i 可取的最大值。对于不符合约束的个体, 此种分配方式也能使其具有最小的适应度值。

4) 根据式 (10) 和式 (11) 进行种群个体选择。

5) 根据式 (12) 交叉算子和式 (13) 变异算子进行遗传运算。

6) 生成新一代种群, 并判断是否满足优化指标; 若满足则停止运算; 如不满足则重复步骤 3) —5)。

3 算法验证与分析

为验证所述轨迹优化算法的可行性以及有效性, 文中进行了仿真验证并比较了几种算法, 包括: 方法 1, 即 3 次均匀 B 样条曲线轨迹规划; 方法 2, 即 3 次均匀 B 样条曲线轨迹规划与传统遗传算法相结合; 方法 3, 即 3 次均匀 B 样条曲线轨迹规划与文中所述改进遗传算法相结合。通过对比 3 种方法下关节运动所需时间评估所述算法的性能。给定关节节点数值见表 1。

表 1 关节节点数值
Tab.1 Joint node number

节点	路径点 1	路径点 2	路径点 3	路径点 4	路径点 5	路径点 6	路径点 7	路径点 8
关节 1	10	55	70	125	105	95	-15	-55
关节 2	15	20	25	-50	-60	-75	-15	5
关节 3	40	175	195	115	10	-15	95	45

根据文献[16], 运动学约束条件见表 2。

上述仿真结果可以看出: 在满足机器人关节运动学约束的前提下, 基于 B 样条曲线得到的轨迹, 前 3 个关节运行时间分别为: 14.095, 13.405, 13.638 s; 基于传统遗传算法的 B 样条曲线得到的轨迹, 前 3 个关节运行时间分别为: 11.0161, 9.4329, 10.2716 s; 基于改进遗传算法的 B 样条曲线得到的轨迹, 前 3 个关节运行时间分别为: 7.0012, 7.698, 8.2976 s。通过时间对比可以得出结论: 基于文中所述优化算法, 机器人各关节空间运行耗时明显小于其他 2 种方法, 缩减幅度最大为 50%, 最小为 39.2%。基本实现时间最短的

优化目标。

表 2 运动学约束条件
Tab.2 Kinematic constraints

关节	运动学约束			
	$\dot{\theta} /$ ($^{\circ}$ ·s $^{-1}$)	$\ddot{\theta} /$ ($^{\circ}$ ·s $^{-1}$)	$\ddot{\theta} /$ ($^{\circ}$ ·s $^{-1}$)	$\tau /$ (N·m)
1	90	35	50	400
2	85	30	50	400
3	90	65	45	400

最优时间计算结果见表 3。

表 3 计算结果
Tab.3 The calculation results

关节		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	总时间
关节 1	方法 1	2.370	1.217	1.494	2.423	1.758	2.282	2.951	14.095
	方法 2	1.9086	1.0953	2.2548	1.0796	1.7998	1.0243	1.8537	11.0161
	方法 3	1.9076	1.9066	1.6038	0.3864	0.7984	0.3512	0.8572	7.0012
关节 2	方法 1	2.138	0.824	1.508	2.779	0.901	2.727	2.528	13.405
	方法 2	1.0423	1.5308	1.1019	0.7325	0.8421	1.2034	2.9799	9.4329
	方法 3	1.037	1.4318	0.7616	0.155	0.8688	0.4564	2.9874	7.698
关节 3	方法 1	2.335	0.956	1.513	2.926	1.104	2.618	2.186	13.638
	方法 2	2.4217	1.1086	1.0227	1.0831	1.2972	2.0493	1.2890	10.2716
	方法 3	2.5216	1.2086	0.6182	0.3892	1.2298	1.0396	1.2906	8.2976

s

4 结语

包装和搬运行业发展十分迅速,对包装搬运机器人的要求越来越高。文中以包装搬运用直角坐标机器人为研究对象,重点在以下几方面展开研究。

1) 采用 ARM 和 FPGA 设计了其控制系统,包括示教模块、主控制模块以及伺服控制模块等。

2) 以运行时间最少为优化目标,基于改进遗传算法设计了相应轨迹规划方法;仿真结果表明,所述方法能够较大幅度地缩减关节运行耗时,具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张树刚, 赵佳. 基于 S 型曲线的包装堆垛机器人轨迹规划[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 136—140.
ZHANG Shu-gang, ZHAO Jia. Trajectory Planning of Packaging Palletizing Robot Based on S-curve[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 136—140.
- [3] 李坤全, 邵凤翔. 全自动包装码垛机器人控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2017(4): 259—262.
LI Kun-quan, SHAO Feng-xiang. Design of Fully Automatic Packaging Palletizing Robot Control System[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(4): 259—262.
- [4] 焦恩璋, 杜荣. 工业机器人分拣技术的实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(2): 84—87.
JIAO En-zhang, DU Rong. Realization of Sorting Technology on Industrial Robot[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2010(2): 84—87.
- [5] 孙玥, 魏欣. 基于 ARM 的嵌入式包装搬运机器人控制系统设计[J]. 包装工程, 2017, 38(23): 172—176.
SUN Yue, WEI Xin. Design of Control System for Embedded Packaging and Handling Robot Based on ARM[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(23): 172—176.
- [6] 杜巧连, 陈旭辉, 舒柏和. 一种改进的机器人轨迹规划方法[J]. 机械设计, 2017, 34(3): 31—35.
DU Qiao-lian, CHEN Xu-hui, SHU Bai-he. An Improved Study of Robot Trajectory Planning Method[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(3): 31—35.
- [7] 赵伟, 李响, 郭爱华, 等. 工业机器人码垛线的设计[J]. 制造业自动化, 2011, 33(10): 117—120.
ZHAO Wei, LI Xiang, GUO Ai-hua, et al. The Design of Industrial Robot Palletizing System[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(10): 117—120.
- [8] 徐海黎, 解祥荣, 庄键, 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—25.
XU Hai-li, XIE Xiang-rong, ZHUANG Jian, et al. Global Time-energy Optimal Planning of Industrial Robot Trajectories[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 19—25.
- [9] 王占军, 赵玉刚, 刘新玉. 码垛机器人结构设计与模态分析[J]. 机械设计与制造, 2014(8): 164—166.
WANG Zhan-jun, ZHAO Yu-gang, LIU Xin-yu. Structural Design and Modal Analysis of Palletizing Robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(8): 147—149.
- [10] 孟庆宽, 张漫, 仇瑞承, 等. 基于改进遗传算法的农机具视觉导航线检测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 39—46.
MENG Qing-kuan, ZHANG Man, QIU Rui-cheng, et al. Navigation Line Detection for Farm Machinery Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 39—46.
- [11] HADDAD M, KHALIL W, LEHTIHET H E. Trajectory Planning of Unicycle Mobile Robots with a Trapezoidal-velocity Constraint[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(5): 954—962.
- [12] CHEN C S, CHEN L Y. Cross-coupling Position Command Shaping Control in a Multi-axis Motion System[J]. Mechatronics, 2011, 21: 625—632.
- [13] 吴昊, 张艳芳, 郑江花, 等. 基于 PLC 的控制系统在机器人码垛搬运中的应用[J]. 山东科学, 2011, 24(6): 80—83.
WU Hao, ZHANG Yan-fang, ZHENG Jiang-hua, et al. Application of a PLC Based Control System in Robot Palletizing[J]. Shandong Science, 2011, 24(6): 80—83.
- [14] ZHAO D, LI S, ZHU Q. Adaptive Synchronised Tracking Control for Multiple Robotic Manipulators with Uncertain Kinematics and Dynamics[J]. International Journal of Systems Science, 2016, 47(4): 791—804.
- [15] SUN W, PATIL S, ALTEROVITZ R. High-frequency Replanning under Uncertainty Using Parallel Sampling Based Motion Planning[J]. Robotics IEEE Transactions on Robot, 2015, 31(1): 104—116.
- [16] 庞飞. 工业机器人二次最优轨迹规划算法研究[D]. 哈尔滨: 东北大学, 2014.
PANG Fei. Research on Quadratic Optimal Trajectory Planning Algorithm for Industrial Robot[D]. Harbin: Northeastern University, 2014.