

包装机械手轨迹规划和控制系统设计

陈艳芳

(河源职业技术学院, 广东 河源 517000)

摘要: **目的** 为提高花卉类包装的自动化程度, 解决运动冲击、低执行率等问题, 以包装机械手为研究对象, 设计一种花卉包装机械手时间和冲击最优轨迹规划方法。**方法** 采用5次B样条插值函数实现关节曲线构建。采用改进遗传算法实现机械手运动过程优化, 不仅可以提高机械手执行效率, 而且能够确保其运行过程中不会出现冲击问题。通过改进罚函数和自适应交叉变异概率来解决不等式约束和局部最优问题。另外, 设计花卉包装机械手的运动控制系统, 包括基于STM32芯片的控制器以及触摸屏控制界面。**结果** 通过仿真和实验验证了所述方法的有效性, 结果表明包装机械手执行效率大约提高了10%, 抓取速度可以达到60次/min; 机械手抓取迅速、运转平稳, 并没有出现明显的冲击问题。**结论** 所述轨迹规划方法和控制系统可以提高包装机械手控制性能, 能够满足花卉包装、分拣要求。

关键词: 机械手; 轨迹规划; 遗传算法; 时间; 冲击; 优化

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)23-0236-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.23.033

Packaging Manipulator Trajectory Planning and Control System Design

CHEN Yan-fang

(Heyuan Polytechnic, Heyuan 517000, China)

ABSTRACT: The work aims to design an optimal trajectory planning method for time and impact of flower packaging manipulator with the packaging manipulator as the research object to improve the degree of automation of flower packaging and solve the problems of moving impact and low execution rate. The joint curve was constructed by using the quintic b-spline interpolation function. The improved genetic algorithm was used to optimize the manipulator's motion process, which could not only improve the efficiency of the manipulator but also ensure that there would be no impact during the operation. By improving penalty function and adaptive crossover and mutation probability, inequality constraints and local optimal problems were solved. In addition, the motion control system of the flower packaging manipulator was designed, including the controller based on STM32 chip and the touch screen control interface. Through simulation and experiment to verify the effectiveness of the method, the results showed that: the execution efficiency of the packaging manipulator was increased by about 10%. The grasping speed could reach 60 times/min. The manipulator grasped fast, worked smoothly without obvious impact problem. The trajectory planning method and control system can improve the control performance of the packaging manipulator and meet the requirements of flower packaging and sorting.

KEY WORDS: manipulator; trajectory planning; genetic algorithm; time; impact; Optimization

收稿日期: 2020-05-04

基金项目: 广东省科技厅重点项目(163-2019-XMZC-0009-02-0077); 广东省乡村振兴战略专项资金(粤科函资字【2019】1566号)

作者简介: 陈艳芳(1981—), 女, 硕士, 河源职业技术学院副教授, 主要研究方向为机械设计及其自动化。

一般情况下,多自由度机械臂优点比较多,例如:动作灵活、操作效率高、安全可靠、使用方便等,完全可以适应复杂恶劣的工作环境^[1-2]。机械臂的应用不仅可以降低劳动强度,而且还可以提高企业生产效率,因此其在相关工业领域的应用十分广泛^[3]。针对机械臂控制的研究比较多,其中运动轨迹规划是一个比较关键的控制领域。所谓最优轨迹规划就是以给定路径点为基础,在满足相关运动约束的前提下,设计一种经过所有路径点的最优轨迹。最优轨迹规划的目的在于确保机械臂快速平稳运行,同时避免运动参数的突变,如速度、加速度、加加速度等,这样能够减小运动冲击避免机械振动^[4-6]。黄伟等^[7]提出了一种基于多亲遗传算法的 B 样条轨迹规划,在处理机械手轨迹规划问题时避免了局部最优解问题。陆佳皓等^[8]为提高工业机械臂执行效率同时避免运动冲击、机械磨损等问题,提出了一种机械臂的最优时间-冲击轨迹规划方法。另外,机械臂主要由控制系统、驱动系统和执行机构组成。当前,包装机械手的主流控制器为 PLC 或嵌入式控制器,例如:基于 PLC 的气动机械手控制系统、基于 ARM 的机械手远程控制系统。对比而言,PLC 控制器具有可靠性高、易于编程、便于开发等优点;ARM 控制器则具有成本低、处理速度快、可扩展、可移植等优势^[9-11]。徐建明等^[12]基于 ARM 设计了机械手控制器和触摸屏界面,所设计运动控制系统操作方便,可实现机械手运动的示教、轨迹规划、速度规划和位置控制等功能。

文中以花卉包装机器人研究对象,采用 ARM 设计其运动控制系统同时提出一种最优时间-冲击轨

迹规划方法,通过仿真和实验验证所述方法和控制器的有效性。

1 花卉包装机器人

1.1 简介

花卉包装机器人可实现多类别花卉的分拣和包装,结构见图 1。从图 1 中可以看出,花卉包装机器人主要包括机械手控制系统、微型嵌入式设备、传感器系统、夹持器等,其中微型嵌入式设备为工业摄像头。在包装、分拣过程中,待包装花卉大多为常见品种,例如:蒲公英、菊花、向日葵、玫瑰、郁金香。对于包装流程,该包装机械手首先通过工业摄像头对待包装花卉进行实时拍照;然后结合花卉识别算法和识别规则通过推理实现花卉分类;将控制指令发送给机械手控制系统,结合规划路径驱动传感器系统和夹持器工作;按照包装工艺要求,完成不同种类花卉包装。整个流程涉及几个关键工序,如:花卉图像处理、花卉识别、路径规划等,每个步骤都至关重要^[13]。其中路径规划不仅决定运动过程的稳定性,而且直接影响系统执行效率,因此文中以轨迹规划为主要研究内容,进行重点论述。

1.2 运动控制系统

机械手控制系统基于 ARM Cortex-M3 系列 STM32 芯片进行设计,除主控制器外,还包括伺服系统、触摸屏、接口板等,系统构成见图 2。

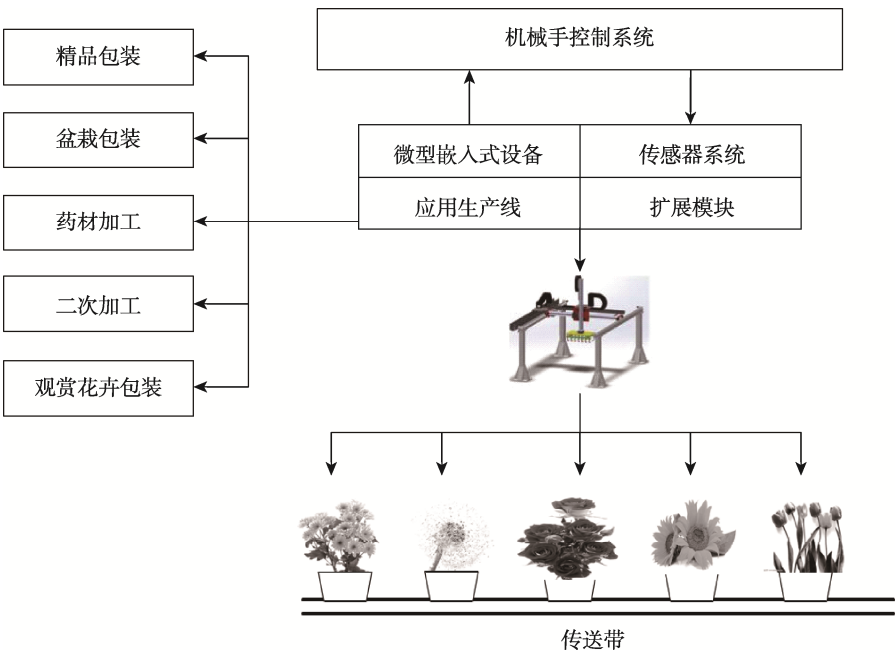


图 1 花卉包装机器人结构
Fig.1 Structure of flower packaging robot

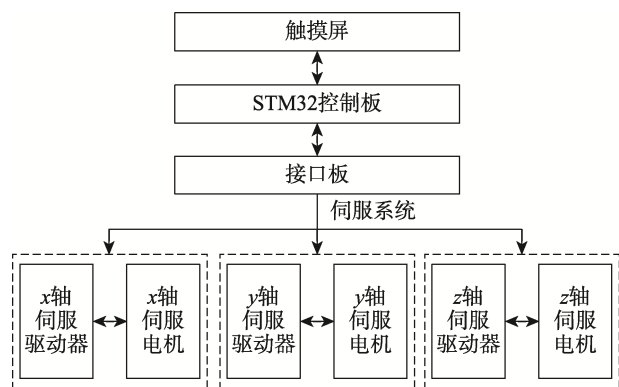


图2 机械手控制系统
Fig.2 Manipulator control system

STM32 控制板选用 STM32F103 芯片,其内核为 ARM Cortex-M3,最高工作频率可达 7 MHz,处理速度比较快,可实现单周期乘法和硬件除法。另外,STM32F103 芯片包含 8 个定时器,其中 2 个定时器为专用定时器,用于系统定时;其余 6 个定时器可用于脉冲的生成、计数。文中选用三轴空间直角坐标包装机械手,配置 3 个定时器生成伺服电机驱动脉冲;3 个定时器接收编码器反馈信号^[14]。

从图 2 可以看出,伺服系统包括伺服驱动器和伺服电机。伺服驱动器接收控制器发出的脉冲,以实现电机转向和转速控制,能够准确地调节机械手的运行速度和位移。文中选用台达 ASDA-AB 型伺服驱动器,性价比非常高。该驱动器支持速度模式、位置模式、扭矩模式等。根据控制需求,文中采用位置模式,将伺服驱动器和伺服电机相连接,通过减速器带动包装机械手运转。

接口板用于连接控制板和伺服控制系统,其主要作用是实现控制信号和驱动信号之间的隔离。通常情况下,接口板自带电源,控制信号经光耦隔离后变成驱动信号传送到伺服驱动器。同理,驱动信号经光耦隔离后可变成控制信号传送到控制板。接口板不仅能够实现电平转换,而且可以减少控制板和伺服系统之间的相互干扰。

触摸屏可以直观显示整个系统的各种参数,同时可直接修改工艺参数,可为用户提供比较好的人机交互界面。文中选用 DWIN_HMI 触摸屏,其内部包括处理器、电源模块、TFT 屏、存储模块和接口电路等。采用串口通信,控制板可将相关工况数据实时传输到触摸屏,用户根据控制要求实时调整控制参数并传输到控制板。

2 最优时间-冲击规划

轨迹规划是花卉包装机械手的一个关键问题,特别是时间优化和冲击优化,其中时间优化可以提高花卉包装效率,既可以确保新鲜花卉及时包装,又可以

降低企业成本;冲击优化可以确保花卉的完整性,避免断枝、掉花等。如果将机械手运动轨迹离散化处理,可得到位姿矩阵序列 T_i ,通过逆运动学分析得到机械手关节序列 $p_i=[p_{1,i}, p_{2,i}, \dots, p_{j,i}, \dots, p_{N,i}]^T$, $i=0, 1, 2, \dots, n$ 且 j 满足 $1 \leq j \leq N$,其中 N 为包装机械手关节数量; $p_{j,i}$ 为 t_i 时刻第 j 关节的位置。

包装机械手关节位置和时间节点之间关系可表示为:

$$Q = \{(p_i, t_i) | i = 0, 1, \dots, n\} \quad (1)$$

利用多项式或样条插值拟合上述节点序列,就可以得到关节轨迹曲线,可表示为:

$$\begin{cases} p_j = f_j(t), v_j = \dot{f}_j(t) \\ a_j = \ddot{f}_j(t), p_j = \ddot{f}_j(t) \\ p_{ji} = f_j(t_i) \\ |v_j(t)| \leq V_j \\ |a_j(t)| \leq A_j \\ |j_j(t)| \leq J_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_j 为速度最大值; A_j 为加速度最大值; J_j 为冲击最大值。

整体上来说,包装机械手关节运动时间和冲击问题是相互矛盾的,前者可以提高机械手的运行效率;后者可减小运动冲击力。轨迹规划目的是在保证跟踪精度的前提下,提高运行速度同时确保冲击无突变。目前,比较常用的时间最优轨迹规划方案就是采用多项式或 B 样条插值实现机械手关节运行时间的优化^[15]。大多数情况下,冲击问题仅作为约束条件,只能做到冲击有界,无法确保冲击不突变。另外,多项式插值局部不可控;3 次 B 样条曲线不能保证冲击曲线连续,容易导致冲击问题。为解决此问题,文中采用 5 次 B 样条曲线构建包装机械手个关节轨迹曲线,将运动时间和冲击作为优化指标,那么该机械手的多目标优化问题可以描述为:

$$\begin{cases} \min S(x) = \min[S_1(x), S_2(x), \dots, S_f(x)] \\ g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, p \\ h_k(x) = 0, k = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S_i(x)$ ($i = 1, 2, \dots, f$) 为目标函数; $g_j(x) \leq 0$ 为约束函数。为避免冲击,各关节轨迹曲线至少三阶几何连续,考虑到 k 次 B 样条曲线具有 C^{k+1} 连续的特性,因此要求 $k \geq 4$ 。文中采用 5 次 B 样条函数进行插值曲线构造。

3 基于改进遗传算法的最优轨迹规划

根据改进遗传算法,时间最优轨迹规划的约束条件可描述为:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^{m-1} h_i \\ \max |v_j(t)| \leq vm_j \quad j=1,2,\dots,n \\ \max |a_j(t)| \leq am_j \quad j=1,2,\dots,n \\ \max |j_j(t)| \leq jm_j \quad j=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (4)$$

式中: h_i 为第 i 段样条曲线耗时, 所以时间最优轨迹规划就是在约束条件下寻找一组 h_i ; $\min \sum_{i=1}^{m-1} h_i$ 为轨迹总耗时而且使得包装机器手的冲击最小。那么在最短时间内冲击最优的规划曲线可描述为:

$$\begin{cases} \min \sqrt{\sum_{j=1}^n \int_0^T (jerk_j^2(t)) dt} \\ T = \sum_{i=1}^{m-1} h_i \\ \max |v_j(t)| \leq vm_j \quad j=1,2,\dots,n \\ \max |a_j(t)| \leq am_j \quad j=1,2,\dots,n \\ \max |jerk_j(t)| \leq jm_j \quad j=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (5)$$

从式 (5) 可以看出, 最优时间-冲击规划问题是一个带约束条件的问题。遗传算法在处理相关优化问题时, 普遍使用罚函数法。虽然罚函数可以较好地处理最优时间-冲击规划问题, 但是收敛速度较慢, 因此文中提出了一种改进罚函数。

3.1 时间最优轨迹规划

1) 设定初始参数, 包括种群规模、选择和变异概率、迭代次数等。

2) 编码。根据遗传算法确定 $h_i (i=1,2,\dots,m-1)$ 和 $[t'_1(0), t''_1(0), t'''_1(0), t'_{m+1}(0), t''_{m+1}(0), t'''_{m+1}(0)]$, 那么遗传算法的个体可表示为 $X=[h_1 \ h_2 \ \dots \ h_{m-1} \ t'_1(0) \ t''_1(0) \ \dots \ t'''_{m+1}(1)]$ 。考虑到机器手轨迹的精度要求非常高, 所以选择实数编码。

3) 初始种群生成。在一定范围内, 产生固定数目的初始种群, 种群内个体需要满足相关约束条件。

4) 自适应度函数计算。计算自适应值, 然后判断其是否满足约束条件。根据式 (5), 通过转化可得式 (6)。

$$\begin{cases} \min f(X) = \sum_{i=1}^{m-1} h_i \\ g_j(X) = \max |v_j(t)| - vm_j \leq 0 \quad j=1,2,\dots,n \\ g_{j+n}(X) = \max |a_j(t)| - am_j \leq 0 \quad j=1,2,\dots,n \\ g_{j+2n}(X) = \max |jerk_j(t)| - jm_j \leq 0 \quad j=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (6)$$

可采用自适应罚函数处理式 (6) 中的不等式约束问题, 即对违反约束的个体进行惩罚, 罚函数可表示为:

$$p(X) = \sum_{i=1}^{3n} N_i \max \{0, g_i(X)\} \quad (7)$$

其中:

$$N_i = \frac{\max \{0, g_i(X)\}}{\sum_{i=1}^{3n} \max \{0, g_i(X)\}} \quad (8)$$

以种群个体为研究对象, 其适应度函数可描述为:

$$f_{\text{fitness}} = \frac{1}{f(X) + p(X)} \quad (9)$$

5) 选择。保存最优个体, 基于随机联赛策略选择个体, 将适应度较高的个体遗传到下一代。

6) 交叉和变异。假设交叉概率为 p_c , 定义一个范围在 $0 \sim 1$ 的随机数 q 。如果 $q > p_c$, 那么选择父代种群中两两配对的个体进行交叉, 否则不进行。

假设变异概率为 p_m , 文中选用非一致变异方式, 当前种群个体可用 X 表示, 那么变异后种群可以描述为:

$$X' = \begin{cases} X + r(X^u - X) \left(1 - \frac{g}{G}\right) & r < 0.5 \\ X - r(X^u - X^l) \left(1 - \frac{g}{G}\right)^c & r > 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

式中: X^u 为 X 上界; X^l 为 X 下界; r 为区间 $[0,1]$ 内随机数; g 为当前迭代次数; G 为最大迭代次数; c 为形状系数, 此处 $c=2$ 。

在循环执行过程中, 普通遗传算法往往会出现局部最优问题。为解决此问题, 文中采用改进遗传算法, 自适应生成交叉概率 p_c 以及变异概率 p_m , 即:

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f \geq f_{\text{avg}} \\ p_{c1} & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (11)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} \frac{f_{\max} - f'}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f' \geq f_{\text{avg}} \\ p_{m1} & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $f_{\max}$ 为最大适应度; f_{avg} 为平均适应度; f 为 2 个交叉个体中偏大适应度; f' 为变异个体适应度; p_{c1} 和 p_{c2} 为交叉概率参数; p_{m1} 和 p_{m2} 为变异概率参数。

7) 重复步骤 4—6, 直到完成遗传迭代次数。

3.2 冲击最优轨迹规划

定义时间最优轨迹规划和冲击最优轨迹规划满足以下关系:

$$[h'_1 \ h'_2 \ \dots \ h'_m] = \frac{[h_1 \ h_2 \ \dots \ h_m]}{\sum_{i=1}^m h_i} T_{\min} \quad (13)$$

式中: $T_{\min} = h_1 + h_2 + \dots + h_m$ 。通过式(13)调整上述初始种群、变异种群和交叉后种群就可以得到冲击最优轨迹规划。

4 仿真研究与分析

为验证所述轨迹规划方法的可行性和有效性,文中进行了相关仿真研究。以花卉包装机械手3个关节为研究对象,设定约束条件见表1。

一般情况下,机械手运动过程需要执行夹紧、提升、进给、下降、松开、回退等动作。如上所述,B样条曲线可单独处理每段曲线。文中将提升—进给—下降过程轨迹随机分成10段B样条曲线同时设定优化精度为0.001 s,在满足约束条件的前提下进行仿真

研究。10段曲线耗时初始值分别设置为0.21, 0.15, 0.24, 0.27, 0.19, 0.16, 0.13, 0.23, 0.15, 0.16 s,总耗时为1.89 s。仿真结果见表2。

从仿真结果可以看出,优化后3个关节的耗时分别为1.823, 1.699, 1.726 s。与设定值相比,耗时分别减少了0.067, 0.191, 0.164 s,基本实现了时间最优规划。

为进一步验证冲击最优规划,搭建了基于STM32的控制平台并移植所述轨迹规划算法,将其应用到花卉包装机械手中。通过具体实验验证包装机械手执行效率和冲击情况。实际结果表明,包装机械手执行效率大约提高10%,抓取速度可以达到60次/min。整个运行过程中,机械手抓取迅速、运转平稳,并没有出现明显的冲击问题。

表1 约束条件
Tab.1 Constraint condition

关节	角速度/(rad·s ⁻¹)	角加速度/(rad·s ⁻²)	角加加速度/(rad·s ⁻³)
1	100	1500	20 000
2	100	1500	20 000
3	100	1500	20 000

表2 仿真结果
Tab.2 Simulation results

关节	耗时/s									
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9	h_{10}
1	0.172	0.139	0.281	0.141	0.197	0.213	0.130	0.201	0.193	0.156
2	0.174	0.168	0.102	0.256	0.172	0.139	0.143	0.166	0.144	0.235
3	0.163	0.213	0.159	0.152	0.173	0.145	0.142	0.171	0.295	0.146

5 结语

以花卉包装机械手为研究对象,为提高其执行效率以及解决冲击问题,提出了一种时间和冲击最优的轨迹规划算法。基于STM32设计了其控制系统。文中着重论述了时间最优规划和冲击最优规划。通过仿真和实验研究发现,所述算法和控制系统能够提高机械手执行效率,机械手运行平稳并没有出现冲击等问题,能够满足花卉包装要求。

参考文献:

- [1] 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—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.
- [2] 刘松国,朱世强,吴文祥. 具有运动时间约束的机械手最优平滑轨迹规划[J]. 电机与控制学报,2009,13(6): 897—902.
LIU Song-guo, ZHU Shi-qiang, WU Wen-xiang. Smoothness-optimal Trajectory Planning Method with Constraint on Traveling Time for Manipulators[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(6): 897—902.
- [3] 梁赫西,黄晓东,周密. 七轴机械手最小能量直线轨迹算法优化[J]. 微型机与应用,2015,34(15): 1—4.
LIANG He-xi, HUANG Xiao-dong, ZHOU Mi. The Optimizing of Seven-axis Manipulator Minimum Energy Linear Trajectory Algorithm[J]. Microcomputer & Its Applications, 2015, 34(15): 1—4.
- [4] 岳晴晴. 六轴工业机器人轨迹规划的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学,2019: 32—40.
YUE Qing-qing. Study on Trajectory Planning of Six-axis Industrial Robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu Uni-

- versity of Science and Technology, 2019: 32—40.
- [5] 杜钊君, 吴怀宇, 韩涛, 等. 基于遗传算法的移动机械臂轨迹优化研究[J]. 机械设计与制造, 2013(5): 133—136.
DU Zhao-jun, WU Huai-yu, HAN Tao, et al. Research on Trajectory Optimization of Mobile Manipulator Based on Genetic Algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(5): 133—136.
- [6] 张斌. 基于多约束的机器人关节空间轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2011, 47(21): 1—6.
ZHANG Bin. Joint-space Trajectory Planning for Robots under Multiple Constraints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(21): 1—6.
- [7] 黄伟, 郑天江, 宁学涛, 等. 基于多亲遗传算法的B样条轨迹规划[J]. 制造业自动化, 2015, 37(7): 125—128.
HUANG Wei, ZHENG Tian-jiang, NING Xue-tao, et al. B-spline Trajectory Planning Based on Genetic Algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(7): 125—128.
- [8] 陆佳皓, 平雪良. 一种机械臂最优时间-冲击轨迹优化算法[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(10): 1548—1554.
LU Jia-hao, PING Xue-liang. Time-jerk-optimal Trajectory Planning Algorithm for Manipulators[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(10): 1548—1554.
- [9] 李小为, 胡立坤, 王琥. 速度约束下 PSO 的六自由度机械臂时间最优轨迹规划[J]. 智能系统学报, 2015, 10(3): 393—398.
LI Xiao-wei, HU Li-kun, WANG Hu. PSO-based Time Optimal Trajectory Planning for Six Degrees of Freedom Robot Manipulators with Speed Constraints[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2015, 10(3): 393—398.
- [10] 付荣, 居鹤华. 基于粒子群优化的时间最优机械臂轨迹规划算法[J]. 信息与控制, 2011, 40(6): 802—808.
FU Rong, JU He-hua. Time-optimal Trajectory Planning Algorithm for Manipulator Based on PSO[J]. Information and Control, 2011, 40(6): 802—808.
- [11] 向丹, 王文涛, 原健钟, 等. 基于 ARM 嵌入式的三维机械手远程控制系统设计[J]. 电子与封装, 2009, 9(6): 21—24.
XIANG Dan, WANG Wen-tao, YUAN Jian-zhong, et al. The Design of Tele-Manipulator System Based on ARM Embedded Internet[J]. Electronics & Packaging, 2009, 9(6): 21—24.
- [12] 徐建明, 张健, 吴世民, 等. 基于 ARM 的机械手运动控制系统设计[J]. 浙江工业大学学报, 2014, 42(3): 243—248.
XU Jian-ming, ZHANG Jian, WU Shi-min, et al. Design of Manipulator Motion Control System Based on ARM[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2014, 42(3): 243—248.
- [13] 程涛. 基于深度分离卷积神经网络的机器人花卉分拣系统[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2019: 10—35.
CHENG Tao. Robot Flower Sorting System Based on Deep Separation Convolutional Neural Network[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2019: 10—35.
- [14] 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.
MA Rui, HU Xiao-bing, YIN Guo-fu, et al. The Shortest Time Optimal Planning of 6-DOF Industrial Robot's Trajectory[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(4): 30—32.
- [15] 俞金钱. STM32 系列 ARM Cortex-M3 核微控制器开发与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 15—35.
YU Jin-qian. Development and Application of STM32 Series ARM Cortex-m3 Nuclear Micro-controller[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 15—35.