

多自由度包装机器人人机交互控制方法

张玉兰, 杜羽

(许昌电气职业学院, 河南 许昌 461000)

摘要: **目的** 为了在人机交互内容和形式复杂度较高, 深度信息获取较为困难的背景下, 解决多自由度包装机器人控制存在的控制鲁棒性较差问题, 提出新的多自由度包装机器人人机交互控制方法。**方法** 利用 Kinect 传感器获取多自由度包装机器人信息, 并以此为基础, 通过信息熵方法计算人机交互复杂度, 构建相应的人机交互控制体系, 基于拉格朗日方程建立人机交互动力学模型, 完成多自由度包装机器人人机交互信息深度获取; 采用自适应模糊控制器控制多自由度包装机器人人机交互流程与界面, 实现多自由度包装机器人人机交互的控制。选择六自由度包装机器人为实验对象, 确定最佳自由参数, 进行人工交互控制仿真实验。**结果** 实验结果显示, 仿真实验中的多自由度包装机器人动作完成率平均值为 89.6%, 平均包装时间为 1.542 min, 控制鲁棒性较佳。**结论** 该控制方法大大提高了机器人控制的鲁棒性, 有效提升了包装机器人的包装效率。

关键词: 多自由度; 包装机器人; 人机交互; 运动控制

中图分类号: TB486; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)15-0239-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.15.030

Human-Computer Interaction Control Method for Multi-Degree of Freedom Packaging Robot

ZHANG Yu-lan, DU Yu

(Xuchang Electric Vocational College, Xuchang 461000, China)

ABSTRACT: In order to solve the problem of poor control robustness of multi degree of freedom packaging robot control under the background of high complexity of human-computer interaction content and form and difficult to obtain depth information, a new multi degree of freedom packaging robot human-computer interaction control method is proposed. The Kinect sensor is used to obtain the information of multi degree of freedom packaging robot. On this basis, the complexity of human-computer interaction is calculated by information entropy method, and the corresponding human-computer interaction control system is constructed. The dynamic model of human-computer interaction is established based on Lagrange equation, and the depth of human-computer interaction information of multi degree of freedom packaging robot is obtained; An adaptive fuzzy controller is used to control the human-computer interaction process and interface of multi degree of freedom packaging robot. The six degree of freedom packaging robot is selected as the experimental object to determine the optimal free parameters and carry out the simulation experiment of human interaction control. The experimental results show that the average action completion rate of the multi degree of freedom packaging robot is 89.6%, the average packaging time is 1.542 min, and the control robustness is better. The control method greatly improves the ro-

收稿日期: 2020-10-06

基金项目: 河南省职业院校创新发展行动计划(教高【2017】895号)

作者简介: 张玉兰(1983—), 女, 许昌电气职业学院讲师, 主要研究方向为机电一体化、数控、智能制造。

通信作者: 杜羽(1981—), 男, 许昌电气职业学院讲师, 主要研究方向为机电一体化、智能制造。

business of the robot control, and effectively improves the packaging efficiency of the packaging robot.

KEY WORDS: multi-degree of freedom; packaging robot; human-computer interaction; motion control

工业机器人技术逐步成熟,在电力电子、食品、医药、机械制造等多个领域得到了应用。根据国际机器人联合会公布的市场数据,近年来,全球机器人呈现井喷式增长趋势。目前,亚洲是一个工业发展迅速的地区。在我国“十二五”规划中,高端装备制造业的核心机器人产业已成为国家重点战略产业之一^[1],得到了政府的大力支持,工业机器人也迎来了良好的发展机遇,而机器人的发展也一直受到学者和专家的关注。

朱庆爽等^[2]在采用“DSP+FPGA+PC”架构的基础上,将 DSP 和 FPGA 作为运动控制器,完成控制系统的软硬件设计,并成功应用于自主设计的五自由度工业机器人,实现了注塑机的下料任务。王耀东等^[3]基于 CoDeSys 软件平台开发了一款机器人运动控制器,引入 D-H 参数,进行 ER50 机器人运动学建模,对控制器的示教模块、点动模块以及在线编程模块进行人机交互设计,实现了运动控制器在线示教、点动以及在线编程等功能,但是其人机交互形式与内容复杂。李筱等^[4]使用受限的自然语言来控制多机器人系统,利用词典将受控的自然语言转化为标准的 BML 命令,动态地添加机器人的能力和名字到词典中,指挥不同类型机器人组成的系统,满足指挥多机器人系统的需求,但是其难以获得包装机器人深度信息,控制有效性受限。

包装机器人是一种复杂、实用的机器人,是各学科交叉融合的产物。为了保护工人的健康和安全,采用包装机器人实现包装作业。包装机器人在工业制造生产线上可以代替人工完成各种技术任务,大大提高了产品的包装效率。较复杂的包装任务很难由包装机器人独立操作完成,需要人工参与和配合,这种操作模式称为人机交互,可以进一步提高包装机器人的智能化程度。如何实现包装机器人的人机交互控制已成为机器人发展领域的重点研究课题之一。

以往研究方法存在人机交互形式和内容繁杂、包装机器人信息获取等困难,影响多自由度包装机器人控制鲁棒性,故以多自由度包装机器人为对象,提出新的多自由度包装机器人人机交互控制方法,希望通过新方法的提出,有效改善现有方法存在的问题,为多自由度包装机器人的发展与应用提供更加有效的帮助。

1 多自由度包装机器人人机交互控制方法

1.1 多自由度包装机器人深度信息获取

利用 Kinect 传感器获取多自由度包装机器人深度信息,为后续人机交互复杂度计算提供数据支撑。

Kinect 传感器是一种结合多种感知技术的 3D 体感摄像机,其结构见图 1。



图 1 Kinect 传感器结构
Fig.1 Structure of Kinect sensor

如图 1 所示, Kinect 传感器能够通过动作识别等手段,利用 Kinect 传感器获取包装机器人深度信息,其包含微软 SDK 开发包和 OpenNI 运行库^[5],其中, OpenNI 运行库是一个跨平台、多语言的框架。

在实际应用中, OpenNI 运行库是物理设备与中间件的介质,其关键部件为生成器,也是采集包装机器人深度信息的核心部件,详细描述 OpenNI 数据生成器,具体见表 1。

表 1 OpenNI 数据生成器
Tab.1 OpenNI data generator

生成器	代码	注释
深度生成器	Depth Generator	产生深度视图对象, 获取深度图数据
图生成器	Map Generators	设置并控制输出模式
图像生成器	Image Generator	产生彩色视图对象, 获取彩色视图数据
用户生成器	User Generator	获取当前用户 质心位置
动作生成器	Action Generator	跟踪用户动作, 获取动作位置

为了获取精确的包装机器人深度信息,将 Kinect 传感器获取的深度图像通过校正技术转换为深度信息,具体校正过程如下所述。

深度图像像素点深度值对应实际距离计算式为:

$$d = K \tan \left(\frac{d_r}{2842.5} + 1.1863 \right) - O \quad (1)$$

式中: K, O 为参数,取值分别为 0.1237 与 0.0380; d_r 为像素点深度值。

深度图像与实际空间坐标点转换规则为:

$$\begin{cases} x = (i - c_x + \sigma_x) d / f_x \\ y = (j - c_y + \sigma_y) d / f_y \end{cases} \quad (2)$$

式中： (x,y) 为实际空间点坐标； (i,j) 为深度图像点坐标； (c_x,c_y) 为深度图像中心点； (σ_x,σ_y) 为 Kinect 传感器畸变参数； (f_x,f_y) 为比例参数。

通过上述过程获得多自由度包装机器人深度信息集合，记为 $R_{x,y}$ 。

1.2 人机交互复杂度计算

多自由度人机交互复杂度决定人机交互控制体系构建难易程度，也影响着人机交互控制效果。故基于上述获取的包装机器人深度信息，利用信息熵方法计算多自由度机器人人机交互复杂度，为后续人机交互控制体系构建提供依据^[6]，信息熵前置条件设定和计算过程如下所述。

依据人机交互复杂度计算需求^[7]，选取复杂度计算指标，包括任务因素、人为因素和人机交互因素。每种计算指标所处工作环境、流程等均不同，需要采用不同的度量方式，才能准确测量各个复杂度计算指标数值，计算指标数值变量的不确定性越大，熵也就越大。复杂度计算指标度量方式选取情况见表 2。

表 2 复杂度计算指标度量方式
Tab.2 Measurement method of complexity calculation index

一级计算指标	二级计算指标	度量方式
任务因素	任务逻辑复杂度	流程图一阶熵
	任务步骤规模复杂度	流程图二阶熵
人为因素	工程决策复杂度	水平图二阶熵
	知识层次复杂度	知识层次图二阶熵
人机交互因素	操作界面复杂度	数据结构信息图二阶熵

高信息度的信息熵较低，低信息度的信息熵则较高，因此将人机交互复杂度划分为 5 个级别，具体情况见表 3。

表 3 人机交互复杂度划分
Tab.3 Human-computer interaction complexity division

复杂度级别	复杂度	数值范围
r_1	非常复杂	(8,10]
r_2	复杂	(6,8]
r_3	一般复杂	(4,6]
r_4	不复杂	(2,4]
r_5	简单	(-∞,2]

由于信息熵是可以在衰减的过程中被测定出来，则人机交互复杂度计算式为：

$$r = \frac{1}{\sqrt{(\omega_1 H_{TLC})^2 + (\omega_2 H_{TSC})^2 + (\omega_3 H_{KLC})^2 + (\omega_4 H_{UIC})^2 + (\omega_5 H_{EDC})^2}} \tag{3}$$

式中： H_{TLC} ， H_{TSC} ， H_{KLC} ， H_{UIC} 和 H_{EDC} 分别为任务逻辑复杂度、任务步骤规模复杂度、工程决策复杂度、知识层次复杂度和操作界面复杂度； ω_1 ， ω_2 ， ω_3 ， ω_4 ， ω_5 分别为二级复杂度计算指标权重数值。

1.3 人机交互控制体系构建

依据上述人机交互复杂度计算结果，构建相应的人机交互控制体系，为最终包装机器人人机交互控制打下坚实的基础。

依据智能控制原理，将人机交互控制体系划分为 4 个层次，分别为感知执行层、控制层、规划层和监督层，每个层次具体功能如下所述。

- 1) 感知执行层。该层次主要功能为采集和处理作业环境参数、包装机器人导航定位数据、机器人状态参数等，同时将处理好的数据传输至控制层。
- 2) 控制层。该层次由智能行为单元、行为决策单元和协调单元构成。控制层主要功能为接收感知执行层数据，并以此为基础，对数据做出直接反应。
- 3) 规划层。该层次利用人机交互接口接收控制指令，同时对控制任务进行规划、分解与执行。
- 4) 监督层。该层次自主对多自由度包装机器人运行状态进行监督，通过监督数据对机器人能耗、故障等进行预测与报警，保障包装机器人的安全与稳定。

通过上述描述得知人机交互控制体系见图 2。

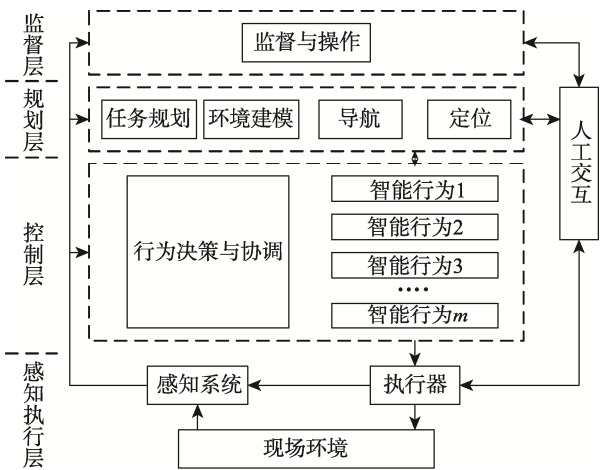


图 2 人机交互控制体系
Fig.2 Human-computer interaction control system

1.4 人机交互动力学建模

为了有效控制多自由度包装机器人，基于人机交互控制体系，利用拉格朗日方程对人机交互动力学进行建模，具体人机交互动力学模型构建过程如下所述。

拉格朗日方程表达式为:

$$F_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (4)$$

式中: F_i 为人机交互广义力矩; L 为拉格朗日函数; $\dot{q}_i$ 为机器人广义速度; q_i 为机器人动能与位能广义坐标。

依据式(1)对人机交互体系进行动力学分析, 表达式为:

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial E_k}{\partial x} + \frac{\partial E_p}{\partial x} \quad (5)$$

式中: E_k 为包装机器人总动能; $\dot{x}$ 为包装机器人广义信息; x 为包装机器人深度信息; E_p 为包装机器人总位能。

引入变量 θ 对式(5)进行微分处理, 得到人机交互动力学方程表达式为

$$\tau = D(\theta)\ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (6)$$

式中: τ 为包装机器人广义驱动力矩; $D(\theta)$ 为转动惯量矩阵; $\ddot{\theta}$ 为包装机器人运动角度; $H(\theta, \dot{\theta})$ 为科氏力相关矩阵; $G(\theta)$ 为广义重力矩阵。

1.5 人机交互控制实现

依据上述得到的人机交互动力学方程, 利用自适应模糊控制器控制多自由度包装机器人人机交互^[8-11]。

综合考虑工作人员参与程度、包装机器人运动状态以及环境干扰因素等, 利用人机交互力采样时刻差值描述工作人员行为意图, 数学语言表示为:

$$\begin{cases} P(F_R^T - F_R) > \varepsilon & \Delta x = 1 \\ P(F_R^T - F_R) \leq \varepsilon & \Delta x = 0 \\ P(F_R^T - F_R) < -\varepsilon & \Delta x = -1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: P 为包装机器人行为, 当 $P=1$ 时, 机器人做包装行为, 当 $P=-1$ 时, 机器人做休息行为; F_R^T 和 F_R 分别为前一时刻和当前时刻的人机交互力; ε 为固定阈值; Δx 为加减速运动标志量, $\Delta x=1$ 表示加速, $\Delta x=0$ 表示维持速度不变, $\Delta x=-1$ 表示减速^[12-13]。

依据式(7)对人机交互动力学方程(式(6))进行变换, 得到:

$$\ddot{\theta} = \frac{H(\theta, \dot{\theta})}{D(\theta)} \dot{\theta} - \frac{G(\theta)}{D(\theta)} + \frac{1}{D(\theta)} \cdot \tau \quad (8)$$

基于自适应模糊控制器控制多自由度包装机器人人机交互步骤如下所述。

1) 对变量 $\ddot{\theta}$ 定义 p_i 个模糊集合, 记为 $A_i (i=1, 2, \dots, p_i)$ 。

2) 利用 $\prod_{i=1}^n p_i$ 条模糊规则构造模糊体系 $\tilde{f}(x|\tilde{\theta})$, 基于乘积推理机, 计算模糊体系输出值为:

$$\tilde{f}(x|\tilde{\theta}) = \frac{\sum_{i=1}^{p_n} \bar{y}(\mu A_i)}{\sum_{i=1}^{p_n} \sum_{j=1}^{p_n} (\mu A_i)} \quad (9)$$

式中: $\bar{y}$ 为自由参数; μ 为模糊向量^[14-15]。

3) 利用自适应模糊控制器使多自由度包装机器人无限逼近 $\tilde{f}(x|\tilde{\theta})$, 即实现了多自由度包装机器人人机交互的控制。

基于上述步骤实现了多自由度包装机器人人机交互的控制, 为提升包装机器人应用效果提供更好的手段支撑。

2 仿真实验结果与分析

采用 Matlab 软件设计仿真实验, 以 Kaggle (<https://www.kaggle.com/datasets>) 中随机选取的某包装公司的包装机器人季度工作报告为数据来源, 验证提出方法人机交互控制性能, 具体实验过程如下所述。

2.1 实验对象选取

选取智能多自由度包装机器人作为实验对象, 其结构见图3。

实验对象参数设置情况见表4。

2.2 实验准备

为了保障实验的顺利进行, 对自适应模糊控制器中的最佳自由参数进行确定。通过测试得到自由参数与自适应模糊控制器控制精度关系曲线见图4。

如图4所示, 当自由参数 $\bar{y}$ 为 4.5 时, 自适应模糊控制器控制精度达到最大值 95%, 故确定最佳自由参数 $\bar{y}$ 数值为 4.5。

2.3 实验结果分析

依据上述实验准备情况进行仿真实验, 通过包装

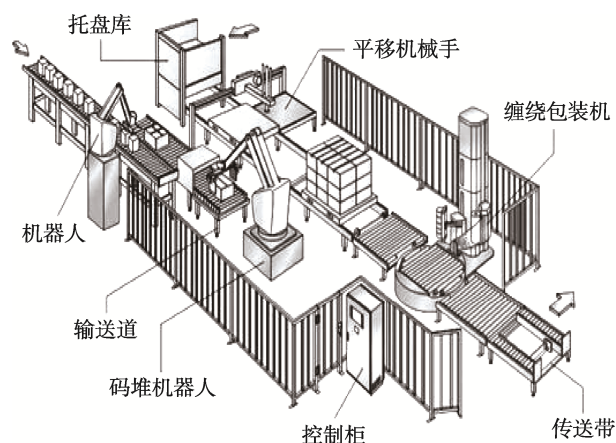


图3 实验对象结构

Fig.3 Experimental object structure

表 4 实验对象参数
Tab.4 Parameters of experimental objects

参数名称	数值	单位
自质量	180.4	kg
负载质量	50	kg
旋转角度	±360	度
最大速度	180	(°)/s
重复精度	±0.1	mm
自由度	6	旋转关节
控制器输入输出端口 1	10D1	端口/个
控制器输入输出端口 2	4A1	端口/个
控制器输入输出端口 3	2A0	端口/个
端口负载能力	1200	mA
噪声程度	低	
防护等级	IP54	
电气功耗	200	W
作业温度	0 ~ 50	℃
电源供应器	100 ~ 240	V(直流)

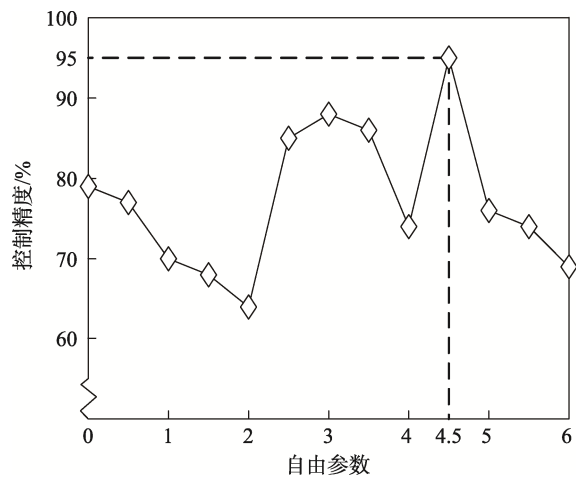


图 4 自由参数与自适应模糊控制器控制精度关系曲线
Fig.4 Schematic diagram of relationship between free parameters and control accuracy of adaptive fuzzy controller

机器人动作完成率和平均包装时间反映提出方法鲁棒性，具体实验结果分析过程如下所述。

2.3.1 包装机器人动作完成率分析

设置 5 套多自由度包装机器人动作，复杂级别分别为 r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 ，通过实验获得包装机器人动作完成率数据见表 5。

根据表 5 数据显示，随着人机交互复杂级别的增加，包装机器人动作完成率呈现下降的趋势。提出方法包装机器人动作完成率范围为 86% ~ 94%，平均完成率为 89.6%。

2.3.2 包装机器人平均包装时间分析

选取满足实验的 5 个待打包产品，通过实验获得

包装机器人平均包装时间数据见表 6。由表 6 可知，提出方法包装机器人平均包装时间范围为 1.02 ~ 2.01 min，远低于最高限值。

表 5 包装机器人动作完成率数据
Tab.5 Data table of action completion rate of packaging robot

动作序号	复杂级别	失败次数	基本完成	完成良好	完成率/%
1	r_1	3	9	38	94
2	r_2	4	8	38	92
3	r_3	6	16	28	88
4	r_4	6	15	29	88
5	r_5	7	20	23	86

表 6 包装机器人平均包装时间数据
Tab.6 Data table of average packaging time of packaging robot

待打包产品序号	平均包装时间/min	
	提出方法	最高限值
1	2.01	2.54
2	1.52	2.00
3	1.02	1.98
4	1.50	2.46
5	1.66	2.31
平均值	1.542	2.258

上述实验结果显示，文中提出方法包装机器人动作完成率平均值为 89.6%，平均包装时间为 1.542 min，满足现今产品包装需求，充分表明提出方法具备可行性。

3 结语

此研究提出了一种新的多自由度包装机器人人机交互控制方法，利用 Kinect 传感器获取多自由度包装机器人的深度信息，结合信息熵方法和拉格朗日方程，建立了人机交互动力学模型，并采用自适应模糊控制器控制多自由度包装机器人的人机交互界面，定性分析人机交互形式和内容，扩大包装机器人信息获取维度，提升控制有效性，进而提高了控制鲁棒性，极大地提升了包装机器人动作完成率，缩短了包装机器人平均包装时间，为多自由度包装机器人的研究与应用提供参考。

参考文献：

[1] 李连鹏，解伦，刘振宗，等. 基于人机交互的重载机

- 械臂控制方法[J]. 机器人, 2018, 40(4): 135—143.
- LI Lian-peng, XIE Lun, LIU Zhen-zong, et al. A Control Method for Heavy Load Manipulator Based on Man-Machine Interaction[J]. Robot, 2018, 40(4): 135—143.
- [2] 朱庆爽, 王平, 董登峰, 等. 五自由度工业机器人控制系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 182—186.
- ZHU Qing-shuang, WANG Ping, DONG Deng-feng, et al. Design of Control System for Five Degree of Freedom Industrial Robot[J]. Machine Building & Automation, 2018, 47(5): 182—186.
- [3] 王耀东, 徐建明, 徐胜华. 基于CoDeSys平台的六自由度工业机器人运动控制器设计[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(9): 103—107.
- WANG Yao-dong, XU Jian-ming, XU Sheng-hua. Design of 6 DOF Industrial Robot Motion Controller Based on CoDeSys Platform[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(9): 103—107.
- [4] 李筱, 韩冰心, 曾志文, 等. 用于多机器人的 BML 人机交互框架设计与实现[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(12): 2487—2493.
- LI Xiao, HAN Bing-xin, ZENG Zhi-wen, et al. Design and Implementation of Human-Robot Interaction Framework Based on BML for Multi-Ple Robots[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(12): 2487—2493.
- [5] 韩兴国, 陈海军, 崔立秀, 等. 三自由度机械臂增材制造装置及控制系统设计[J]. 重庆理工大学学报, 2020, 34(3): 97—103.
- HAN Xing-guo, CHEN Hai-jun, CUI Li-xiu, et al. Design of the 3-DOF Manipulator Additive Manufacturing Device and Control System[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2020, 34(3): 97—103.
- [6] 张冕, 黄颖, 梅海艺, 等. 基于 Kinect 的配电作业机器人智能人机交互方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48(5): 107—112.
- ZHANG Mian, HUANG Ying, MEI Hai-yi, et al. Intelligent Interaction Method for Power Distribution Robot Based on Kinect[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2018, 48(5): 107—112.
- [7] 张小栋, 陈江城, 尹贵. 下肢康复机器人肌电感知与人机交互控制方法[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(4): 649—657.
- ZHANG Xiao-dong, CHEN Jiang-cheng, YIN GUI. Electromyographic Sensing and Human-Computer Interaction Control Method for Lower Limb Rehabilitation Robot[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(4): 649—657.
- [8] 张辉, 王盼, 肖军浩, 等. 一种基于三维建图和虚拟现实的人机交互系统[J]. 控制与决策, 2018, 33(11): 58—65.
- ZHANG Hui, WANG Pan, XIAO Jun-hao, et al. A human-Robot Interaction System Based on 3D Mapping and Virtual Reality[J]. Control and Decision, 2018, 33(11): 58—65.
- [9] 罗朝辉, 李丽宏, 谭爽. 基于图像处理的机器人控制系统的研究设计[J]. 现代制造工程, 2018, 457(10): 65—71.
- LUO Chao-hui, LI Li-hong, TAN Shuang. Research and Design of Robot Control System Based on Image Processing[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018, 457(10): 65—71.
- [10] 郑振峰, 邱燕, 屈宝鹏, 等. 基于机器视觉的智能人机交互技术分析[J]. 时代农机, 2020, 47(1): 91—92.
- ZHENG Zhen-feng, QIU Yan, QU Bao-peng, et al. Analysis of Intelligent Human-Computer Interaction Technology Based on Machine Vision[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2020, 47(1): 91—92.
- [11] 张明, 周智, 周国鹏, 等. 一种自适应分段式电子膨胀阀控制策略研究[J]. 流体机械, 2020, 48(6): 14—19.
- ZHANG Ming, ZHOU Zhi, ZHOU Guo-peng, et al. A Self-Adaptive Segmented Control Strategy of Electronic Expansion Valve[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(6): 14—19.
- [12] 彭亮, 侯增广, 王晨, 等. 康复辅助机器人及其物理人机交互方法[J]. 自动化学报, 2018, 44(11): 2000—2010.
- PENG Liang, HOU Zeng-guang, WANG Chen, et al. Physical Interaction Methods for Rehabilitation and Assistive Robots[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11): 2000—2010.
- [13] 林安迪, 干旻峰, 葛涵, 等. 基于模糊模型参考学习控制的手术机器人人机交互[J]. 机器人, 2019, 41(4): 543—550.
- LIN An-di, GAN Min-feng, GE Han, et al. Human-Robot Interaction for Surgical Robot Based on Fuzzy Model Reference Learning Control[J]. Robot, 2019, 41(4): 543—550.
- [14] 王恒升, 任晋. 室内移动机器人人机交互的语义实现[J]. 计算机科学与探索, 2018, 12(10): 96—106.
- WANG Heng-sheng, REN Jin. Semantic Realization of Human Robot Interaction for Indoor Environments[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2018, 12(10): 96—106.
- [15] 屠尧, 朱爱斌, 宋纪元, 等. 下肢外骨骼康复机器人人机交互力自适应导纳控制[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(6): 9—16.
- TU Yao, ZHU Ai-bin, SONG Ji-yuan, et al. Adaptive Admittance Control of Man-Robot Interaction Force for Lower Limb Exoskeleton Rehabilitation Robot[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(6): 9—16.
- [16] 徐国政, 巩伟杰, 朱博, 等. 基于改进头姿估计方法的机器人轮椅交互控制[J]. 机器人, 2018, 40(6): 112—120.
- XU Guo-zheng, GONG Wei-jie, ZHU Bo, et al. Interactive Control of Robotic Wheelchair Based on an Improved Head Pose Estimation Method[J]. Robot, 2018, 40(6): 112—120.