

码垛机器人的研究与应用现状

黄冰鹏¹, 林义忠¹, 杨中华², 邱永兵², 黄金稳²

(1.广西大学, 南宁 530004; 2.广西农业机械研究院, 南宁 530007)

摘要: **目的** 介绍码垛机器人的研究与应用现状。**方法** 通过对比分析国内外码垛机器人的发展, 指出国内码垛机器人产业存在的问题。**结果** 国内码垛机器人在核心技术、核心零部件等方面缺失严重, 机器人产业规模参差不齐, 并针对这些问题提出了解决策略。**结论** 国内码垛机器人技术与国外存在一定差距, 同时也有很大提升空间, 在国家《机器人产业“十三五”发展规划》的驱动下, 国内机器人技术必将日新月异。

关键词: 码垛机器人; 应用现状; 存在问题; 解决策略

中图分类号: TB486⁺.3; TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0082-06

Research and Application Situation of Palletizing Robots

HUANG Bing-peng¹, LIN Yi-zhong¹, YANG Zhong-hua², QIU Yong-bing², HUANG Jin-wen²

(1.Guangxi University, Nanning 530004, China;

2.Guangxi Agricultural Machinery Research Institute, Nanning 530007, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the research and application situation of palletizing robots. Through the comparative analysis on domestic and international development of palletizing robots, the existing problems of palletizing robots were pointed out. As domestic palletizing robots were severely short of core technology and core components, and the industry scale of robots was uneven, the solutions to these problems were proposed. Although there was a certain gap between the technologies of palletizing robots at home and abroad, there was much room for improvement of domestic palletizing robot technology. Driven by the national policy of the "13th Five-year Plan" for the Development Planning of Robot Industry, the domestic robot technology will change rapidly.

KEY WORDS: palletizing robot; application situation; existing problems; solution strategy

码垛机器人是集机械本体、计算机控制、传感技术、人工智能等多学科为一体的一种智能化技术装备^[1], 它能集成在生产线上的任意段, 实现产品的快速获取、搬运、装箱、堆垛、拆垛等作业^[2]。随着产业升级, 传统的人工码垛与机械式码垛已不适应工业发展, 高效、安全、稳定的码垛机器人成为最佳选择; 码垛机器人占用空间小, 只要把它放在合适的位置就可以同时负责多条生产线的码垛作业, 而且对于不同的负载, 只需要调整一下控制参数, 就能实现不同负载的码垛作业, 并且它的智能属性使工作变得简单高效^[3]。

1 国外码垛机器人的研究与应用现状

早在 1962 年, 美国在机械手等纯机械结构的基础上, 通过添加伺服机构与控制反馈等技术研发出世界上第 1 台工业机器人。随后, 日本从美国引进机器人技术并率先将它用于码垛作业; 瑞典 ABB 公司也在 1974 年研制了全球首台全电控式工业机器人 IRB6, 主要应用于物料的取放、搬运^[4]。在机器人格局上, 最有影响力的国家是美国与日本, 美国在机器人技术的综合研究水平上仍处于领先地位, 日本则在

收稿日期: 2016-06-17

基金项目: 广西科学研究与技术开发计划(桂科重 1598003-4)

作者简介: 黄冰鹏(1989—), 男, 广西大学硕士生, 主攻机电液一体化。

通讯作者: 林义忠(1964—), 男, 博士, 广西大学教授, 主要研究方向为工业机器人技术、机电计算机控制。

机器人的数量和种类上位居世界首位^[5]。纵观全球机器人产业发展历程,可总结为 3 种发展模式,即美国模式、欧洲模式和日本模式^[6-7]。当前活跃在国际市场上的机器人制造商主要有两大派系——日系与欧系,并且它们都实现了对控制器、伺服电机、减速机等核心零部件的完全自主化。总的来说,国外码垛机器人的特点为各品牌系列型号多、负载范围广、工作范围大、轴数集中、动作速度快。

在码垛机器人结构设计优化领域,目前国外已经研发出来的结构主要有以下 5 种:直角坐标型;圆柱坐标型;球坐标型;关节坐标型;SCARA 型^[8]。从整体结构上,又可分为串联型和并联型以及混联型。传统的码垛机器人主要采用串联机构,存在系统刚性差、运动耦合等问题,在高速、重载等方面的作业效果不理想;并联与混联机构的码垛机器人则可以弥补串联机构的不足。工况决定结构的布局,一个合理的结构也是控制系统等软件研发的前提,结构的合理性直接影响其动作速度与定位精度。结构的设计优化会贯穿整部机器人发展史,从最开始的尺寸优化到形状优化,再到现在的拓扑优化等;从传统的静态设计转到以现代设计方法为基础的动态设计。国外在这方面的理论成果很多,主要集中在优化算法的改进与实际问题的结合上。比如 Saravana 等以机构参数为优化变量,可操作性指标和关节力矩为优化目标,结合机器人变形和结构等约束条件,通过比较 3 种不同的算法来选择最合适的优化算法,得到了最佳杆件几何参数^[9]。Oral 和 Ider 通过有限元法建立了机器人刚柔耦合模型,然后以杆件变形为约束,整体质量最低为优化目标,进行了优化设计^[10],在此基础上,Kim 和 Krefft 又引入了全局静刚度作为优化目标,对机器人进行结构优化^[11-12]。

机器人运动规划包括路径规划与轨迹规划。不讨论避障问题,文中只讨论码垛机器人的轨迹规划。在码垛机器人轨迹规划方面,国外的许多学者根据实际工况与相关约束条件都提出了很多具有参考价值的算法。比如基于路径最优的轨迹规划^[13]、基于时间最优的轨迹规划^[14]、基于最小冲击的轨迹规划^[15-16]、基于能量最优的轨迹规划^[17-18];还有学者提出了基于上述 2 种或者多个约束条件的规划算法,如基于时间路径的轨迹规划^[19]、基于时间冲击的轨迹规划^[20]等。在码垛机器人实际调试过程中,很容易出现速度与加速度的超限问题,尤其是加速度对机器人的运动控制影响较大,因此合理的算法对提高机器人控制系统的整体性能有极其重要的作用。

目前机器人轨迹规划方式主要有关节空间轨迹规划和直角空间轨迹规划。关节空间轨迹规划主要有三次与五次多项式插值算法以及抛物线过渡的线性插值算法等;直角空间轨迹规划主要有直线和空间圆

弧轨迹规划算法。对于码垛机器人,一般采用的运动方式是点到点的运动方式(PTP),即只保证起点和终点的位姿正确,对中间轨迹没有严格限制,但在设定轨迹点时一定要进行边界点的判定,以保证轨迹点在码垛机器人的工作空间内。码垛机器人的轨迹描述见图 1。

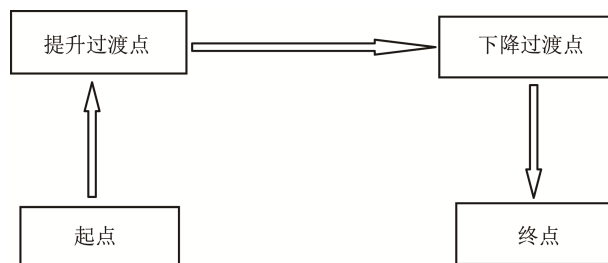


图 1 码垛机器人轨迹规划描述

Fig.1 Description of the trajectory planning of palletizing robot

国外已将码垛机器人广泛应用于包装、物流、食品等行业,可实现对食品、软硬包装袋等产品的装箱、搬运、码垛、拆垛等作业。KUKA 开发的 KRAGILUS 小型机器人,它的作用半径约 901 mm,具有高速、高精度等优势,能够在极短的周期内完成拣选、搬运、堆垛及卸载等任务,专用于高速、高负荷的食品包装等工业^[21]。FANUC 开发的 Robot M-410iB/160 智能码垛机器人,装备有视觉感测器,能够实现动态码放、精准重复定位,并且配有适应复杂装配作业的多轴手腕,灵活程度不亚于人类的手指,在分拣、贴标、插取、搬运等方面能实现流畅高效的作业^[22]。

2 国内码垛机器人研究与应用现状

我国工业机器人起步于 20 世纪 70 年代初,初期属于研究单位自行研究,受制于当时条件与市场需求,理论研究与应用发展都很缓慢;在经过国家“七五”、“八五”、“九五”机器人技术攻关和“863”计划的重点支持^[23]以及改革开放后的市场刺激下,国内码垛机器人技术得到迅速发展^[24-25]。在 20 世纪 90 年代末,我国建立了 7 个科研基地与 9 个机器人产业化基地,其中包括沈阳新松、哈工大的博实自动化等^[26]。整体来说,经过国内机器人研究团队的不懈努力,我国码垛机器人技术的研究、开发、应用都迈向了新的平台。

在国内码垛机器人结构设计优化领域,一般是以测绘国外同类产品为参考,然后再结合自身的实际要求来设计,在后期的优化处理中,一般用 CAE 分析软件对关键部位进行仿真分析,来验证是否满足工作要求。比如赵伟等用 CAE 分析软件对机器人大小臂进行静力学分析,然后对薄弱结构进行优化,取得了不错的效果^[27]。张宪民把固有频率作为约束条件,整

体质量作为优化目标,进行优化后的系统具有了更好的动态响应性能^[28]。在本体结构设计上,减速机作为码垛机器人核心部件,其成熟的研发技术被国外垄断,作为一个纯机械的精密部件,它的难点存在于设计、制造、装配等工艺上;我国基础工业底子薄,在尺寸及其公差与形位公差设计以及材料、热处理工艺、高精度机床等多个方面的技术还不足以支撑减速机的研发,这些都需要经验的累积来弥补我国基础工业的不足。

在码垛机器人轨迹规划方面,我国学者也做了大量研究,比如徐海黎等以机器人运动过程中的总动作时间与能量消耗的综合最优为目标,提出一种工业机器人的最优时间和最优能量轨迹规划^[29]。徐鹏飞、罗庆生等采用“4-3-4”法利用不同低阶多项式对各轨迹段进行插补,以实现流畅、连续、稳定自动码放货物的要求^[30]。段朋等针对码垛机器人调试麻烦的问题,提出了一种矢量调节轨迹曲线的方法,来设计码垛机器人的控制系统,以便能够快速有效地调节机器人的轨迹^[31]。曹波等为了提高机器人在码垛过程中的运动速度及其平稳性,以时间最短为优化目标,采用3次样条插补对机器人进行轨迹规划,以保证其速度与加速度的连续性;并在传统的PTP运动模式的基础上提出了一种基于时间最优的轨迹规划方法,对机器人整个工作过程进行再规划,经过试验,运动优化后的码垛速度得到大幅提高^[32]。

经过国内科研机构多年的技术攻关,我国已基本掌握了机器人本体的设计与制造及其装配工艺、控制系统的软硬件设计、机器人运动学与轨迹规划技术、传感技术等,并逐步形成了一套较完备的机器人理论体系^[33-46]。总的来说,国内机器人产业未成气候,虽然从20世纪80年代开始在高校和科研单位开展研究,但没有结合企业和市场同步发展,至今未形成有影响力的机器人产业;在研究机器人技术的同时,忽视了其核心零配件的并行研发,也无法根据实际应用要求对产品结构进行动态优化设计,限制了国产机器人在精度、稳定性等特性上的提升。在机器人应用方面,国产机器人的应用现状是严峻的,产业规模也参差不齐,在现行政策的催化下,只有少部分企业真正在做机器人技术与核心零部件开发,更多的企业则是在寻求政策的红利。

我国码垛机器人的应用现状可以说是整个国产机器人产业的一个缩影,因为码垛对机器人的速度、精度要求相对较低,这也成为国内众多机器人企业率先实现技术突破的领域之一,导致国产机器人企业主要扎堆于中低端市场且企业的核心技术匮乏。目前我国码垛机器人产业存在着三大问题,即技术空心化、应用低端化、市场边缘化。核心技术与创新能力的缺失,不可避免地促成应用市场“低端化”,被主流市场

“边缘化”^[47],这也是国产机器人产业的通病。在国外品牌的冲击下,国内市场份额已被国外占据了80%左右,国内机器人企业生存艰难,而且国内95%的企业采用购买国外核心零部件进行系统集成的发展模式,这导致国产机器人失“魂”^[48]。

3 国内码垛机器人发展策略

核心技术、核心零部件的欠缺导致国产机器人先天不足,这个问题首先应从国家层面去考虑,只有在国家的重点扶持、企业与科研单位的无缝对接下,并借鉴日本、德国等国的机器人产业发展史^[49-50],结合自身国情合理稳定地发展机器人技术。机器人属于人才密集、技术密集型装备,它需要很多基础工业与专业人才的支撑。在材料、芯片、机床、加工制造与热处理等重点的基础行业需要国家大量投入;引入能够结合国情解决实际问题的高级专业人才,培育具有“工匠素质”的专业技术人才,甚至可以开设机器人专业来培养专门人才;促进企业与科研单位深度合作,互相渗透,真正达到产学研一体化的反馈机制。此外,各科研单位或企业应适当进行开放性研究、信息共享,形成研究合力,避免产学研各自为战、标准混乱以及低水平重复性研究。码垛机器人核心零部件的突破关键在于基础工业的发展与人才的培养,否则国产码垛机器人只能是“空中楼阁”。

在核心技术开发上,应以国内行业顶尖科研机构与机器人龙头企业为主体率先突破机器人核心技术;坚持技术创新,突破国外机器人专利壁垒,形成差异化优势;鼓励高校与研究机构将实验室的科研成果转化出来,回馈到市场。此外,企业要发扬“工匠精神”,脚踏实地,对技术的追求持久专注。只有真正实现核心技术与核心零部件的国产化,突破国外设计模式,完善售后服务体系,才能在性能、成本等方面赢得国内市场的认可,为国产码垛机器人品牌打下基础。

4 结语

机器人是一种技术装备,对我国发展而言是一种长期的刚性需求。在国内,不管是产业升级还是劳动力短缺等都是不可逆的趋势。在今后发展中,需求会一直存在,关键在于攻克机器人技术难题,国产码垛机器人需要技术的沉淀,技术意味着中国创造的前提,在国家《机器人产业“十三五”发展规划》的驱动下,以码垛机器人为主的工业机器人产业将会蓬勃发展,助推我国的制造业转型升级。

参考文献:

- [1] 王彩玲,王亭岭,马景义,等.饲料工业码垛机器人

- 及配套生产线的设计[J]. 饲料工业, 2014(3): 12—15.
WANG Cai-ling, WANG Ting-ling, MA Jing-yi, et al. Design of Palletizing Robot in Feed Industrial and Its Supporting Production Line[J]. Feed Industry, 2014(3): 12—15.
- [2] 李晓刚, 刘晋浩. 码垛机器人的研究与应用现状、问题及对策[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 96—102.
LI Xiao-gang, LIU Jin-hao. Research and Application Situation, Problems and Solutions of Palletizing Robots[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 96—102.
- [3] RICHARD B. Robots Use Machine Vision and Other Smart Sensors to Aid Innovative Picking, Packing and Palletizing[J]. Industrial Robot, 2013, 40(6): 525—529.
- [4] 毕胜. 国内外工业机器人的发展现状[J]. 机械工程师, 2008(7): 10—13.
BI Sheng. Development Status of Domestic and Foreign Industrial Robots[J]. Mechanical Engineer, 2008 (7): 10—13.
- [5] 刘极峰. 机器人技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
LIU Ji-feng. Robot Technology Foundation[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [6] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014(9): 1—13.
WANG Tian-miao, TAO Yong. Research Status and Industrialization Development Strategy of Chinese Industrial Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014(9): 1—13.
- [7] 王亭岭, 王彩玲, 马景义, 等. 码垛机器人在饲料工业的研究及应用[J]. 饲料工业, 2013(11): 11—14.
WANG Ting-ling, WANG Cai-ling, MA Jing-yi, et al. Research and Prospects of Palletizing Robot in Feed Industry[J]. Feed Industry, 2013(11): 11—14.
- [8] 韩建海. 工业机器人[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
HAN Jian-hai. Industrial Robot[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009.
- [9] SARAVANAN R, RAMABALAN S, EBENEZER N G R, et al. Evolutionary Bi-criteria Optimum Design of Robots Based on Task Specifications[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(3): 386—406.
- [10] ORAL S, IDER S K. Optimum Design of High-speed Flexible Robotic Arms with Dynamic Behavior Constraints[J]. Computer Structure, 1997, 65(2): 255—264.
- [11] KIM H S, TSAI L W. Design Optimization of a Cartesian Parallel Manipulator[J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(1): 43—51.
- [12] KREFET M, HESSELBACH R. Elastodynamic Optimization of Parallel Kinematics[J]. IEEE International Conference on Automation Science & Engineering, 2006(1): 357—362.
- [13] CHETTIBI T, LEHTIHET H E, HADDAD M, et al. Minimum Cost Trajectory Planning for Industrial Robots[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2004, 23(4): 703—715.
- [14] COSTANTINESCU D, CROFT E A. Smooth and Time-optimal Trajectory Planning for Industrial Manipulators along Specified Paths[J]. Journal of Robotic Systems, 2000, 17(5): 233—249.
- [15] PIAZZI A, VISIOLI A. Global Minimum-jerk Trajectory Planning of Robot Manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(1): 140—149.
- [16] HAUNG Pan-feng, XU Yang-sheng, LIANG Bin. Global Minimum-jerk Trajectory Planning of Space Manipulator[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2006, 4(4): 405.
- [17] FIELD G, STEPANENKO Y. Iterative Dynamic Programming: an Approach to Minimum Energy Trajectory Planning for Robotic Manipulators[J]. IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1996(3): 2755—2760.
- [18] SHINTAKU E. Minimum Energy Trajectory for an Underwater Manipulator and Its Simple Planning Method by Using a Genetic Algorithm[J]. Advanced Robotics, 1998, 13(2): 115—138.
- [19] COSTANTINESCU D, CROFT E A. Smooth and Time-optimal Trajectory Planning for Industrial Manipulators along Specified Paths[J]. Journal of Robotic Systems, 2000, 17(5): 233—249.
- [20] MACFARLANE S, CROFT E A. Jerk-bounded Manipulator Trajectory Planning: Design for Real-time Applications[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(1): 42—52.
- [21] 国际金属加工网. 库卡智能机器人演绎高效工业包装 [EB/OL]. (2015-03-11)[2016-03-15]. <http://www.mmsonline.com.cn/info/236049.shtml>.
International Metalworking Network. Kuka Intelligent Robot Deduction Efficient Industrial Packaging[EB/OL]. (2015-03-11)[2016-03-15]. <http://www.mmsonline.com.cn/info/236049.shtml>.
- [22] 国际金属加工网. Fanuc 机器人揭开包装行业的完美风暴[EB/OL]. (2013-07-25)[2016-03-15]. <http://www.mmsonline.com.cn/info/224363.shtml>.
International Metalworking Network. Fanuc Robot Opened the Perfect Storm Packaging Industry[EB/OL]. (2013-07-25)[2016-03-15]. <http://www.mmsonline.com.cn/info/224363.shtml>.
- [23] 马颂德. 基础技术与队伍建设——863计划自动化领域智能机器人主题基础研究工作回顾[J]. 机器人技术与应用, 2001(5): 2—5.
MA Song-de. Basic Technical Research and Team Building: a Review of the Research Work on the Theme of Intelligent Robot in The Field of 863 Planning Automation[J]. Robot Technique and Application, 2001(5): 2—5.

- 2001(5): 2—5.
- [24] 骆敏舟, 方健, 赵江海. 工业机器人的技术发展及其应用[J]. 机械制造与自动化, 2015(1): 1—4.
LUO Min-zhou, FANG Jian, ZHAO Jiang-hai. The Development and the Application of the Industrial Robot Technology[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2015(1): 1—4.
- [25] 李金泉, 杨向东, 付铁. 码垛机器人机械结构与控制系统设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.
LI Jin-quan, YANG Xiang-dong, FU Tie. Palletizing Robot Mechanical Structure and Control System Design[M]. Beijing: Beijing Ligong University, 2011.
- [26] 佚名. “国家 863 计划智能机器人主题产业化基地”揭牌仪式在北京举行[J]. 机器人技术与应用, 1999(6): 12—13.
Anonymous. "National 863 Plan Intelligent Robot Theme Industrialization Base" Licensing Ceremony Was Held in Beijing[J]. Robot Technique and Application, 1999(6): 12—13.
- [27] 赵伟, 殷国富, 陈航, 等. 基于 SolidWorks 和 Ansys 的机器人手臂性能分析与优化设计[J]. 机器, 2009, 36(12): 48—50.
ZHAO Wei, YIN Guo-fu, CHEN Hang, et al. Property Analysis and Structure Optimization of Robotic Arm Based on SolidWorks and Ansys[J]. Machinery, 2009, 36(12): 48—50.
- [28] ZHANG Xian-min, SHEN Yun-wen, LIU Hong-zhao, et al. Optimal Design of Flexible Mechanisms with Frequency Constraints[J]. Mechanism & Machine Theory, 1995, 30(1): 131—139.
- [29] 徐海黎, 解样荣, 庄建, 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 Yang-rong, ZHUANG Jian, et al. Global Time-energy Optimal Planning of Industrial Robot Trajectories[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 19—25.
- [30] 徐鹏飞, 罗庆生, 韩宝玲, 等. 新型工业码垛机器人轨迹规划研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(5): 70—77.
XU Peng-fei, LUO qing-sheng, HAN Bao-ling, et al. Research on Trajectory Planning of New Industrial Palletizing Robot[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(5): 70—77.
- [31] 段朋, 何庆中, 王浦全, 等. 白酒包装线搬运机器人轨迹曲线研究[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 22—27.
DUAN Peng, HE Qing-zhong, WANG Pu-quan, et al. Trajectory Curve of The Liquor Packing Line Moving Robot[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 22—27.
- [32] 曹波, 曹其新, 童上高, 等. 基于时间最优的搬运机器人运动规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(7): 33—38.
CAO Bo, CAO Qi-xin, TONG Shang-gao, et al. The Motion Planning of Handling Robot Based on Time Optimal[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(7): 33—38.
- [33] 窦小红, 许有恒, 蒋正渠. 含有平行连杆的五自由度工业机器人动力学分析[J]. 上海交通大学学报, 1990(1): 40—47.
DOU Xiao-hong, XU You-heng, JIANG Zheng-qu. Dynamic Analysis of Five Degree of Freedom Industrial Robot with Parallel Link[J]. Journal of Shanghai jiaotong University, 1990(1): 40—47.
- [34] 徐德, 景奉水, 谭民. 基于 Linux 操作系统的开放式工业机器人实时控制研究[C]// 钱学森科学贡献暨学术思想研讨会论文集, 2001: 9.
XU De, JING Feng-shui, TAN Min. Research on Real Time Control of Open Industrial Robot Based on Linux Operating System[C]// Proceedings of the Symposium on Qian Xuesen's Scientific Contributions and Academic Thoughts, 2001: 9.
- [35] 王田苗. 国家 863 计划先进制造与自动化技术领域机器人技术主题发展战略的若干思考[J]. 机器人技术与应用, 2002(3): 2—7.
WANG Tian-miao. Some Thoughts on the Development Strategy of Robot Technology in the Field of Advanced Manufacturing and Automation Technology in the State 863 Plan[J]. Robot Technique and Application, 2002(3): 2—7.
- [36] 李瑞峰, 于殿勇, 高小辉, 等. 轻型机器人本体样机设计与开发[J]. 高技术通讯, 2002(8): 68—70.
LI Rui-feng, YU Dian-yong, GAO Xiao-hui, et al. Design and Development of Light-duty Robot Body[J]. Chinese High Technology Letters, 2002(8): 68—70.
- [37] 汤修映, 李伟, 张铁中, 等. 空间冗余度机器人动力学优化的虚拟仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2003(3): 121—123.
TANG Xiu-ying, LI Wei, ZHANG Tie-zhong, et al. Study on Virtual Simulation of Dynamic Optimization for Spatial Redundant Robots[J]. Machinery Design & Manufacture, 2003(3): 121—123.
- [38] 林义忠, 黄玉美, 程祥. 串联机器人诱导运动的研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(15): 1323—1326.
LIN Yi-zhong, HUANG Yu-mei, CHEN Xiang. Analysis and Research of Inductive Motion in Serial Robots[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(15): 1323—1326.
- [39] 刘蕾, 唐为义, 原所先. 基于 VC++ 与 PMAC 的机器人控制软件的开发[J]. 微计算机信息, 2008(5): 203—205.
LIU Lei, TANG Wei-yi, YUAN Suo-xian. Development of Robot Control Software Based on VC++ and PMAC[J]. Microcomputer Information, 2008(5): 203—205.
- [40] 林义忠, 陈远玲, 黄振锋. 基于压电电缆的移动机器人智能化安全传感器[J]. 传感技术学报, 2007(11): 2499—2503.
LIN Yi-zhong, CHEN Yuan-ling, HAUNG Zhen-feng.

- Intelligent Safety Sensor Based on Piezoelectric Cable for Mobile Robot[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007(11): 2499—2503.
- [41] 丁度坤, 谢存禧, 张铁, 等. 遗传算法在工业机器人控制中应用研究[J]. 机械设计与制造, 2009(3): 168—170.
DING Du-kun, XIE Cun-xi, ZHANG Tie, et al. Research of the Genetic Algorithm Applying in the Industry Robot Control[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(3): 168—170.
- [42] 陈华, 刘龙, 曹彤. 介入机器人运动学及轨迹规划研究[J]. 机电工程, 2014(6): 679—683.
CHEN Hua, LIU Long, CAO Tong. Study of Kinematics and Trajectory Planning for Intervention Robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014(6): 679—683.
- [43] 林义忠, 刘庆国, 徐俊, 等. 工业机器人离线编程系统研究现状与发展趋势[J]. 机电一体化, 2015(7): 8—10.
LIN Yi-zhong, LIU Qing-guo, XU Jun, et al. Research Status and Development Trend of Industrial Robot Off-line Programming System[J]. Mechatronics, 2015(7): 8—10.
- [44] 梁娟, 赵开新, 陈伟. 自适应神经模糊推理结合 PID 控制的并联机器人控制方法[J]. 计算机应用研究, 2016(12): 1—6.
LIANG Juan, ZHAO Kai-xin, CHEN Wei. Parallel Manipulator Control Method Base on Adaptive Network Fuzzy Inference System and PID Control[J]. Application Research of Computer, 2016(12): 1—6.
- [45] 赵金刚, 戈新生. 动态规划求解空间双臂机器人非完整运动最优控制问题[J]. 力学季刊, 2016(2): 1—9.
ZHAO Jin-gang, GE Xin-sheng. Dynamic Programming for Solving the Optimal Non-holonomic Motion Control Problem of the Bi-Arm Space Robot[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2016(2): 1—9.
- [46] 陈东青. 基于 PLC 与触摸屏的码垛工业机器人操作系统设计[J]. 包装工程, 2014, 35(23): 84—88.
CHEN Dong-qing. Design of Stacker Industrial Robot Operating System Based on PLC and Touch screen[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(23): 84—88.
- [47] 曲道奎. 中国机器人产业发展的机遇与挑战[J]. 科协论坛, 2015(12): 15—17.
QU Dao-kui. Opportunities and Challenges for The Development of China's Robot Industry[J]. Association Forum, 2015(12): 15—17.
- [48] 李素平, 陈曦. 机器之“魂”[J]. 装备制造, 2007(3): 58—62.
LI Su-ping, CHEN Xi. Machine "Soul"[J]. China Equipment, 2007(3): 58—62.
- [49] 陈爱珍. 日本工业机器人的发展历史及现状[J]. 机械工程师, 2008(7): 8—10.
CHEN Ai-zhen. Development History and Present Situation of Japanese Industrial Robots[J]. Mechanical Engineer, 2008(7): 8—10.
- [50] 丁纯, 李君扬. 德国“工业 4.0”: 内容、动因与前景及其启示[J]. 德国研究, 2014(4): 49—66.
DING Chun, LI Jun-yang. German "Industry 4": Content, Motivation and Prospect and Its Enlightenment[J]. Deutschland Studien, 2014(4): 49—66.