

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.001

中国机器人产业现状与创新发展趋势综述

吴洪涛¹, 蒋天宇¹, 常天佐¹, 李耀²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 南京工程学院 应用技术学院, 江苏 南京 211167)

摘 要: 针对全球及中国机器人产业现状, 分析其面临的机遇与挑战。围绕当前机器人产业创新, 重点讨论了方法创新和本体结构创新的发展方向。方法创新是指虚拟样机技术通过数字仿真优化设计, 显著提高研发效率和精确性。结构创新是指通过串、并联机器人和仿生机器人提升机器人的精度、负载能力、灵活性和适应性, 从而推动机器人在多领域应用和发展。随着科学技术的进步和全球市场的持续拓展, 中国机器人产业将迎来更加广阔的发展前景。

关键词: 机器人技术; 创新发展; 方法创新; 结构创新

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)01-0001-06

Status and Innovative Development Trend of China's Robot Industry

WU Hongtao¹, JIANG Tianyu¹, CHANG Tianzuo¹, LI Yao²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Applied Technology, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: This paper reviews the current situation of the global and Chinese robotics industry, and analyzes the opportunities and challenges faced. With the focus on the current robot industry innovation, the development direction of method innovation and ontology structure innovation is discussed. In terms of method innovation, virtual prototyping technology significantly improves the efficiency and accuracy of research and development through digital simulation optimization design, while regarding structural innovation, series-parallel robots and bionic robots improve the accuracy, load capacity, flexibility and adaptability of robots, and promote the application and development of robots in many fields. Along with the further progress of technology and the continuous expansion of the global market, China's robot industry will embrace a broader development future.

Keywords: robot technology; innovative development; method innovation; structural innovation

0 引言

机器人是集机械、电子、控制、计算机、传感器、人工智能等多学科先进技术于一体的现代制造业重要的自动化装备。自 1959 年世界上第一台工业机器人问世以来, 机器人发展取得了巨大成就, 在制造业、服务业、医疗保健、国防和太空等各个领域被广泛应用。当前, 我国已经处于工业化的中后期并向工业化后期快速过渡的阶段, 传统的生产制造技术已经不能满足目前的生产要求, 急需加快科技创新和提升科技竞争力。2014 年 6 月习近平总书记在两院院士大会上谈到“机器人革命”, 人口红利将由机器红利取代, 2014 年成为中国机器人元年。2021 年, 工业和信息化部

印发了《“十四五”机器人产业发展规划》, 到 2025 年, 中国将成为全球机器人技术创新的策源地、高端制造的集聚地和集成应用的新高地, 工业机器人和服务机器人产业竞争力将显著提升。中国机器人产业的创新发展, 不仅是技术层面的革新, 更是产业结构、市场需求和政策导向相互作用的结果。政府的政策支持、资本的持续投入和技术研发的持续突破, 使得中国机器人行业在全球市场中占据了日益重要的地位。

尽管中国机器人产业取得了显著进展, 但仍面临着方法革新与结构升级的多重挑战。传统的样机开发过程往往面临高成本、高耗时的挑战, 制约了复杂系统的快速迭代和优化。通过方法创新引入全新工艺和先进方法, 能够显著提升设计与

第一作者简介: 吴洪涛(1962—), 男, 江苏宝应人, 教授, 博士生导师, 博士, 南京航空航天大学机电学院机械电子工程学科带头人之一, 研究方向为多体动力学与并联机器人, 主持国家和省部级以及企业合作项目 50 多项, 获中航工业公司科技进步二等奖等多项奖项。曾获中航工业公司“中国有突出贡献的博士学位获得者”荣誉称号, meehtwu@nuaa.edu.cn。

通讯作者简介: 李耀(1989—), 男, 山东临沂人, 讲师, 博士, 研究方向为智能机器人技术及应用, liyaokkx@njit.edu.cn。

制造的灵活性和精确性,为解决复杂工程问题提供了高效的解决方案。现代机器人不仅仅局限于工业制造领域,其应用逐渐扩展到医疗、服务、搜救等领域。这些领域的应用环境通常复杂且变化多端,要求机器人具有更高的灵活性、适应性和可靠性。结构创新作为突破现有技术瓶颈的关键策略,正在逐步受到广泛的关注。

1 机器人发展现状

1.1 全球机器人产业现状

据国际机器人联合会(IFR)于2023年发布的《2023年世界机器人报告》(world robotics 2023 report)数据^[1],2022年全球工业机器人销量达553 052台,同比增长5%,全球机器人市场持续扩大(图1)。2022年电子/电气行业对机器人的需求量最高,为15.7万台,同比增长9.8%;其次是汽车行业,销量为13.6万台,同比增长16.2%;之后依次是金属和机械制造行业、塑料和化学制品行业以及食品行业(图2)。

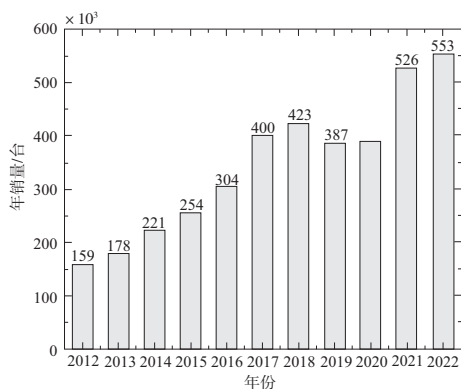


图1 2012-2022年全球工业机器人年销量

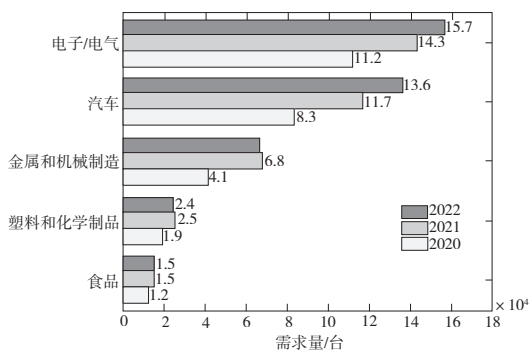


图2 2020-2022年主要行业领域的工业机器人需求量情况

全球机器人产业发展现状具有以下4个特点。

1) 技术创新推动行业发展。随着人工智能(AI)和机器学习技术的发展,机器人不再仅仅依

赖预设的程序,而是能够根据环境变化进行自我学习和决策^[2]。这种技术使得机器人能够在动态、不确定的环境中完成更加复杂的任务,具有更高的灵活性和智能化水平。计算机视觉^[3]、激光雷达^[4]、深度传感器^[5]等技术的突破,使得机器人能够精确感知周围环境并进行自主导航^[6]。多模态传感器技术融合又进一步提高了机器人的定位精度和决策能力^[7]。软体机器人和仿生学的应用使得机器人能够模仿生物的动作,具备更强的灵活性和适应性^[8]。这使得机器人能够进入狭小空间进行作业,甚至在复杂环境下执行任务,如搜索与救援、医疗手术等。

2) 产业应用领域多样化。目前,机器人主要应用于制造业,特别是在汽车、电子和消费品等行业的生产线中。随着技术的进步,机器人在精密制造、组装、质量检测等环节中也得到了广泛应用。协作机器人越来越多地应用于中小型企业,提高了生产效率和灵活性^[9]。随着技术的普及,机器人在家庭和服务行业的应用逐渐增多,如家用清洁机器人、教育机器人、医疗护理机器人等。这些服务机器人不仅提高了生活质量,也推动了新的产业模式的形成。

3) 跨国企业优势明显,大型企业发展全面。目前,跨国企业在核心零部件、整机、系统集成等机器人产业链的各个环节均有明显优势。在减速器领域,应用于工业关节机器人中的谐波减速器基本被日本哈默纳科一家公司垄断。在工业机器人整机领域,发那科、库卡、ABB、安川4大企业是全球市场的绝对强者。

4) 政策支持,政府引导。许多国家出台了相关政策以促进机器人产业的发展。中国提出“智能制造2025”战略,推动机器人和自动化技术的发展,政府通过财政补贴、税收减免等方式鼓励企业研发和应用机器人技术。日本、德国、美国等国家也出台了支持机器人产业发展的政策。

全球机器人产业的快速发展得益于技术创新、应用领域的拓展、跨国企业的技术优势以及政府的积极引导。未来,随着这些趋势的持续推进,机器人产业将在更多领域得到应用,行业竞争也将愈加激烈。

1.2 中国机器人产业现状

根据国际机器人协会统计,中国已经成为全球最大的工业机器人市场。2022年,中国工业机器人销量为290 258台,比2021年增长5%,如

图3所示。随着国内制造业的不断升级,尤其是汽车、电子、金属加工、食品饮料等行业对机器人需求的持续增长,国内对机器人需求预计将继续保持强劲增长态势。

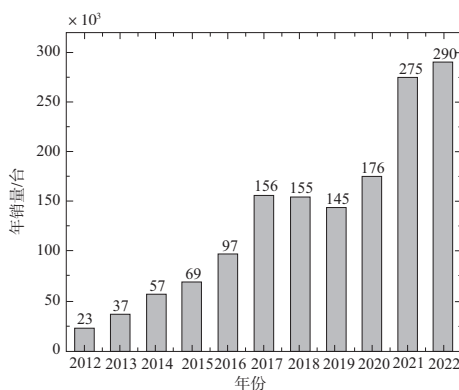


图3 2012-2022年中国工业机器人年销量

中国本土机器人企业在近年来取得了显著的进展,部分企业已经在全球市场中占有一席之地。通过自主研发、并购合作等方式,国内生产机器人企业在技术、产品、市场等方面逐步获得了竞争优势。如埃夫特、新松、库卡中国、工业富联等企业,逐步发展成为全球机器人领域的重要参与者。这些公司在工业机器人、服务机器人、协作机器人等领域的研发和应用中已处于国内领先地位。

2 机器人创新发展

随着现代科技的迅猛发展,传统制造业在应对复杂系统设计与性能优化时,正面临方法革新与结构升级的多重挑战。在这一背景下,方法创新和结构创新正逐步成为突破发展瓶颈的重要驱动力。

2.1 方法创新

随着计算机技术、互联网和人工智能技术的快速发展,用户的选择和需求也愈发多样化。相较于虚拟产品,传统制造业产品研发过程仍存在市场响应慢、研发周期长等问题,实体产品研发迭代劣势逐渐凸显。为解决上述问题,采用先进的数字化方法和工具是产品研发方法创新的重要途径。

虚拟样机技术是一种基于仿真与物理模型的虚拟现实技术,通过对机器人及其工作环境进行实时建模,创造一个数字化的虚拟副本,并通过与实际机器人系统的实时数据交换,进行模拟和优化^[10]。该技术能够大大缩短研发周期,降低成

本,提高设计的精确性与可行性。

虚拟样机技术为支持产品开发与制造的全生命周期提供了一种科学的研发方法,能够在不同阶段满足产品创新研发的需求。根据产品开发的不同阶段,虚拟样机可以分为以下4种类型:需求样机(用于需求论证)、概念样机(用于概念验证)、工程样机(用于详细设计)和最终样机(用于生产、装配与维护),如图4所示。这些虚拟样机的应用能够有效提升研发效率,降低成本,同时提高产品的可靠性与可制造性。

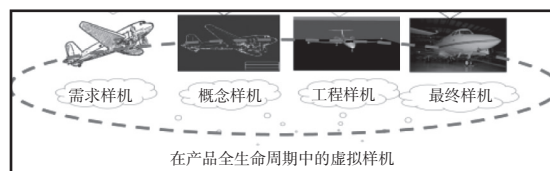


图4 虚拟样机技术

随着社会发展和科技进步,企业信息化技术显得愈发重要。企业信息化主要包括设计数字化、制造装备数字化、生产过程数字化、管理数字化和企业数字化等5个主要特征。虚拟样机技术是企业信息化的重要组成部分,它支持产品开发制造的全生命周期,是工业化和信息化融合的基础,能够为《中国制造2025》提供有力支撑。

在当前背景下,我国机器人产业的迅猛发展对虚拟样机技术提出了巨大的需求,推动了对这一技术的迫切要求。因此,大力发展机器人虚拟样机技术不仅是十分必要的,而且是非常及时的。通过研究与开发机器人虚拟样机系统,可以为机器人研究和先进制造技术提供一种全新的、高效且经济的解决手段。

2.2 结构创新

在机器人领域,结构创新是推动技术进步和应用拓展的重要驱动力。随着机器人技术向更高的智能化、柔性化、适应性方向发展,越来越多的新型机器人结构应运而生。

1) 串、并联机器人构型设计

串、并联机器人是机器人领域重要的研究方向。桁架机器人是经典的串联机器人,其结构简单,主要应用于大型工业生产中的搬运、装配等场景。并联机器人的发展始于低自由度结构的探索,2自由度并联机器人显示了并联结构在负载和运动精度上的显著优势,奠定了高自由度并联机器人的研究基础。3自由度平动并联机器人是多自由度并联的初步实践,进一步验证了并联结

构在多自由度运动中优异的动态性能和负载能力。随着自由度的增加,并联机器人的控制难度和运动学求解复杂度显著提高,这推动了相关算法和技术的革新,也为串并联机器人混合形式的发展奠定了基础。5 自由度并联机器人开始支持多维空间的复杂运动,能够适应更多的工业应用场景。6 自由度并联机器人的发展标志着并联技术的成熟,其实现了全方位自由度运动,具有极高的刚度和负载能力,广泛应用于飞机模拟器、震动测试台等高精度场景。机器人自由度设计如图 5 所示。

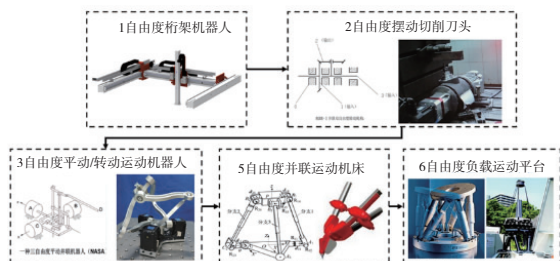


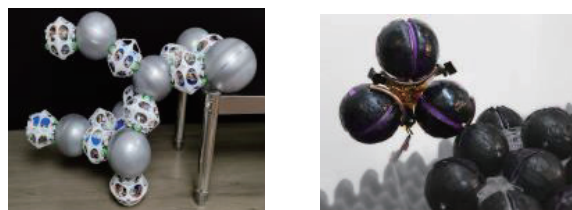
图 5 机器人自由度设计体现结构创新

2) 基于仿生驱动的机器人结构创新

与传统串并联机器人不同,模块化可重构机器人(MRR)是由多个独立模块组成的机器人系统。这些模块可以通过改变模块间的连接来重新配置成各种形状,以适应不同任务和环境^[11]。MRR 在复杂地形探索、复杂环境适应、障碍物克服、难以到达区域(如不平坦地面、沟壑、楼梯和水道)等方面表现出色。YANG 等^[12]提出了一种新型的两栖自重构机器人,结合模块化机器人的灵活性和两栖机器人的环境适应性,在水生环境中模块的负载能力增强,使得机器人系统能够实现更复杂的操作。同时,模块结构在水下能够承受相当于 3 m 水压的压力。TU 等^[13]提出了一种自由形态桁架节点结构化可重构机器人,由桁架模块和节点模块组成。自由形式的连接带来了对环境的良好适应性,能够实现越障、运输等操作。SWISSLER 等^[14]受细胞和群居昆虫构建的无定形结构启发,使用一种新颖的 3D 连续对接机制,能够在地板、墙壁和天花板上快速移动。模块化可重构机器人因其多功能性、容错性和高经济效益而在多种应用中展现出巨大潜力,如图 6 所示。

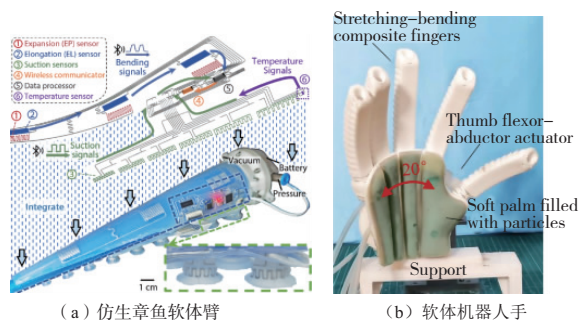
软体仿生机器人(SBR)是一种受自然界生物启发设计的机器人系统,其结构柔软、灵活,能够通过改变形状或运动模式来适应多种复杂环境。SBR 在狭窄空间穿越、复杂地形适应、生物医学应

用、精细操作以及其他传统刚性机器人难以胜任的任务(如管道内部巡检、人体内医疗操作和柔性抓取)等方面表现出色。XIE 等^[15]模仿章鱼软体臂的“弯曲传播”开发了一个电子集成的软体章鱼臂,其远端部分作为夹持器,能够处理弯曲、吸力和温度感应信息,即使在高度变形的工作状态下也能通过集成的可拉伸、基于液态金属的电路自主执行任务。REN 等^[16]设计了软体机器人手,该机器人手由柔性可弯曲的手背、可变刚度的手掌、融合拉伸和弯曲变形的手指以及拇指伸屈执行器组成,能够模仿人手背肌肉的肌肉延长,增加刚度,帮助手指弯曲,扩大抓取范围。仿生软体机器人如图 7 所示。



(a) 自由形态桁架节点结构化机器人 (b) 3D连续对接自攀爬机器人

图 6 模块化可重构机器人



(a) 仿生章鱼软体臂 (b) 软体机器人手

图 7 仿生软体机器人

传统的机器人通常由刚性材料和结构构成,刚度高、速度快,但灵活性和适应性差;软体机器人由柔软材料和结构制成,灵活性和适应性强,但其承载能力有限。张力结构机器人结合了刚性和柔性结构的优点,提供了一种全新的机器人结构设计思路。这种结构的创新在于其高灵活性、高顺应性和可调刚度,使其能够在复杂环境中表现出色。CHEN 等^[17]设计一种张拉整体结构的机器鱼,利用张拉整体关节的可变刚度和自然振动模式来模拟鱼的身体波动,简化了控制技术,机器鱼的游泳性能接近真实鱼类的表现。SABELHAUS 等^[18]提出了欠驱动轻型张拉机器人辅助脊柱,这是一种适用于 4 足机器人的 3 自由

度欠驱动张拉整体核心,通过调节电缆长度使脊柱弯曲并在其中使用驱动旋转锥体扭转。ABOURACHID 等^[19]提出了 1 个鸟颈机器人模型,该模型采用电缆驱动的多个堆叠张拉整体交叉杆机构,具有鸟类颈部的灵活性和动态性能,能够执行复杂任务。张拉机器人如图 8 所示。

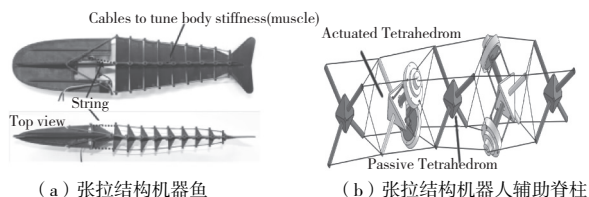


图 8 张拉机器人

3 中国机器人创新发展建议

3.1 加速推动各领域创新

1) 协同创新,加强产业链上下游的协同创新,促使研究机构、企业、政府等各方力量共同参与技术攻关,形成产业联盟,提升机器人产业的整体竞争力。通过跨界合作,推动工业、服务、医疗、农业等多领域的机器人技术整合,形成良好的协同效应。商业创新,机器人产业需要紧密结合市场需求,提升商业模式创新,拓展应用领域。例如,机器人在智能制造、物流、医疗等领域的广泛应用,既能推动产业发展,又能创造新的市场需求。在这一过程中,企业需加强产品的差异化,提供定制化服务,满足多元化的市场需求。

2) 方法创新与结构创新,在技术研发上,注重方法论创新,如引入虚拟样机、人工智能、云计算等新兴技术,推动机器人设计的智能化与自动化。在结构创新方面,推动机器人硬件与软件的深度融合,构建更加灵活、模块化的机器人系统架构,以适应不同生产环境的需求。

3) 服务创新与主体创新,提升机器人产业的服务能力,通过机器人技术推动企业服务模式的创新。主体创新不仅包括企业自主研发技术,还包括组织结构、管理模式创新,激发企业创新活力。

4) 应用创新与集成创新,推动机器人技术在传统产业的应用,促进机器人技术与传统生产工艺的深度融合,推动机器人技术在制造业、物流业、医疗、教育等领域的创新应用。同时,集成创新则是将机器人技术与各类相关技术(如大数据、人工智能、物联网等)进行集成,构建智能化的整体解决方案。

3.2 加强自主研发,利用国内市场优势

中国的机器人产业要想走向世界舞台,必须要充分依托国内庞大的市场需求,加速技术自主研发,尤其是在核心技术的突破上,不可依赖并寄希望于外部技术。加速机器人技术在传统产业中的应用,尤其是制造业、农业、医疗等行业,推动机器人与传统生产工艺的深度融合,提升生产效率和智能化水平。通过机器人技术的普及和应用,可以带动相关产业的现代化。针对核心技术(如机器人控制系统、精密减速器、传感器、动力系统)加大研发投入,打破目前在这些领域的技术瓶颈。中国要通过自主研发核心技术,提升产业链的技术水平,避免过度依赖外资和外部技术。中国的市场规模庞大,且面临着制造业升级的迫切需求,这是自主技术和产业得以孵化的天然土壤。企业可以通过国内市场的应用验证,不断优化技术,提升产品性能,最终实现核心技术的自主掌控。通过加强基础技术的研发和高端零部件制造能力,建设自主可控的机器人产业链,摆脱目前跨国公司全球价值链的控制,实现从设计、制造到服务全链条的自主掌控。

3.3 借鉴德国、日本和韩国的成功经历

近年来,随着《中国制造 2025》战略的提出,中国加强了对智能制造的推动,并借鉴了“德国工业 4.0”的经验。“德国工业 4.0”强调通过数字化、智能化和自动化提升制造业的整体效率和质量。中国在这一过程中积极推动机器人在智能制造中的应用,特别是在汽车、电子、家电等行业的生产线上。“德国工业 4.0”的核心理念是通过机器人与大数据、物联网、云计算等技术的结合,实现高度自动化和智能化。中国应当在这一过程中引入相关的智能制造理念,并结合本国的制造环境进行本地化创新。

3.4 借鉴国内外相关行业经验

华为通过自主研发、全球化布局以及与国内外企业的合作,实现了从技术引进到自主创新的转变。中国高铁的成功经验证明了自主创新与产业链协同的重要性。在高铁领域,中国通过引进技术并加大自主研发,逐步掌握了核心技术,实现了从技术引进到完全自主创新的转变。科大讯飞、百度、阿里巴巴等公司借鉴了国外服务机器人的经验,通过结合自身在人工智能、语音识别、机器视觉等领域的优势,推动了服务机器人技术的创新。科大讯飞的智能客服机器人,百度的

“DuerOS”智能语音平台,都展示了中国企业如何在服务机器人领域借鉴并超越国际同行。

4 结语

在中国机器人行业发展过程中,创新一直是推动产业进步的核心动力。随着技术的不断突破和市场需求的多元化,中国机器人产业逐步走向高端化、智能化和多样化。通过借鉴国际先进技术和经验,结合本国的实际需求,中国在工业机器人、服务机器人、智能制造等领域取得了显著的创新成果,推动了产业结构的优化和技术水平的提升。首先,在核心技术方面,中国机器人产业通过自主研发和技术引进相结合,成功突破了机器人控制系统、传感器、减速机关键技术瓶颈,逐步实现了从“跟随”到“领跑”的跨越。在此过程中,国内企业不仅加大了对基础研究的投入,还通过产学研合作促进了技术成果的转化和应用。其次,在产业链整合和应用场景拓展方面,中国借鉴了国外机器人产业发展的成功经验,推动了上下游产业的协同发展。从机器人制造到系统集成,再到人工智能、大数据等先进技术的融合,中国企业逐步建立了完善的产业生态体系。在应用领域,机器人技术不仅在传统的工业生产中得到了广泛应用,还在医疗、教育、农业等新兴行业中展现了巨大的潜力,进一步促进了产业的多元化发展。未来,随着技术的进步和全球市场的持续拓展,中国机器人产业将迎来更加广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] International Federation of Robotics. World Robotics 2023 Report [R]. Frankfurt:IFR Newsroom, 2023.
- [2] VERMESAN O, DIAZ N M. Intelligent edge-embedded technologies for digitising industry [M]. New York: River Publishers, 2022.
- [3] PÉREZL, RODRÍGUEZÍ, RODRÍGUEZN, et al. Robot guidance using machine vision techniques in industrial environments:a comparative review[J]. Sensors, 2016, 16(3):335.
- [4] HARLOW K, JANG H, BARFOOT T D, et al. A new wave in robotics: survey on recent MmWave radar applications in robotics [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2024, 40:4544-4560.
- [5] MANZI A, MOSCHETTI A, LIMOSANIR, et al. Enhancing activity recognition of self-localized robot through depthcamera and wearable sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(22):9324 - 9331.
- [6] SHAHNEWAZA, PANDEY A K. Color and depth sensing sensor technologies for robotics and machine vision[M]//Machine Vision and Navigation. Cham: Springer InternationalPublishing, 2019:59-86.
- [7] KOLAR P, BENAVIDEZP, JAMSHIDI M. Survey of datafusion techniques for laser and vision based sensor integration for autonomous navigation[J]. Sensors, 2020, 20(8):2180.
- [8] FEINBERG A W. Biological soft robotics [J]. Annual Review of Biomedical Engineering, 2015(17):243-265.
- [9] 张付德,王振勋. 协作机器人在汽车质量检测中的应用[J]. 汽车工艺师, 2023(11):18-21.
- [10] AHMAD MALIK A, MASOOD T, BILBERG A. Virtual reality in manufacturing: immersive and collaborative artificial - reality in design of human - robot workspace[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2020, 33(1):22-37.
- [11] LIANG G Q, WU D, TU Y X, et al. Decoding modular reconfigurable robots: a survey on mechanisms and design [J]. The International Journal of Robotics Research, 2024:02783649241283847.
- [12] YANG Z Y, ZHAO S K, HANK, et al. Design of a multi- environmentally adaptable modular self - reconfigurable robot [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(10):8627-8634.
- [13] TU Y X, LIANG G Q, LAM T L. FreeSN:a freeform strut-node structured modular self-reconfigurable robot - design and implementation [C]//2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2022:4239-4245.
- [14] SWISSLER P, RUBENSTEIN M. FireAnt3D:a 3D self-climbing robot towards non - latticed robotic self - assembly [C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2020:3340-3347.
- [15] XIE Z X, YUAN F Y, LIU JQ, et al. Octopus-inspired sensorized soft arm for environmental interaction[J]. Science Robotics, 2023, 8(84):eadh7852.
- [16] REN T, LIY J, LIU QY, et al. Novel bionic soft robotic hand with dexterous deformation and reliable grasping[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72:1-10.
- [17] CHEN B X, JIANGH Z. Swimming performance of a tensegrity robotic fish[J]. Soft Robotics, 2019, 6(4):520-531.
- [18] SABELHAUS A P, JI H, HYLTON P, et al. Mechanism design and simulation of the ULTRA spine:a tensegrity robot [C]//ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Boston, Massachusetts, USA: [s.n.], 2016.
- [19] ABOURACHID A, BÖHMER C, WENGER P, et al. Modelling, design and control of a bird neck using tensegrity mechanisms [C]. Montréal, Canada: ICRA' 2019 Worskhop on Tensegrity, 2019.

收稿日期:2024-12-30