

【专题：服务机器人及人机共融技术】

人机共融产品的开发与服务体系研究综述

张瑞秋, 韩威, 洪阳慧
(华南理工大学, 广州 510006)

摘要: **目的** 在新一代人机共融技术发展背景下, 通过分析和明确人机共融产品及其服务体系的特征与价值, 指出未来发展趋势, 为相关设计、技术与应用研究提供参考。**方法** 从人机共融的概念出发, 给出人机共融产品及其服务体系的定义; 收集并分析典型的人机共融产品和相关研究, 总结整理人机共融产品的关键特征和支撑技术; 探索人机共融产品的典型服务场景, 对相关研究现状进行综述。**结论** 指明了人机共融产品具有情境感知、自适应学习、自主决策的典型特征; 分析了人机共融产品的服务体系在不同场景中可以被赋予的价值; 预测了由技术驱动向设计驱动转化、由单品视角向服务体系视角转变的未来发展趋势。

关键词: 人机共融; 共融机器人; 服务体系; 服务场景

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)08-0001-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.08.001

Development and Service System of Man-machine Integration Products

ZHANG Rui-qiu, HAN Wei, HONG Yang-hui
(South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: In the context of the development of the new generation of man-machine integration technology, the characteristics and value of man-machine integration products and service system are analyzed and clarified, and the future development trend is pointed out, which can provide reference for relevant design, technology and application research. Based on the concept of man-machine integration, the definition of man-machine integration products and service system is given. Collect and analyze typical man-machine integration products and related researches, and summarize the key characteristics and supporting technologies of man-machine integration products. The typical service scenarios of man-machine integration products are explored and the relevant research status is summarized. This paper points out the typical characteristics of man-machine integration products, such as situational awareness, adaptive learning and autonomous decision-making. The value that the service system of man-machine integration product can be assigned in different scenarios is analyzed. The future development trend of the transformation from technology-driven to design-driven and from single product perspective to service system perspective is predicted.

KEY WORDS: man-machine integration; inclusive robot; service system; service scenario

人机共融是指在一定的空间内或协作区域内, 人与机器能够直接进行交互的方式。随着大数据、算法功能和物联网等技术的进步, 再加上最先进的人工智能技术的发展和深度学习, 机器人也开始了新的发展浪潮。人机共融技术的发展是新一代智能机器人的重

要任务。尽管我国在机器人的基本理论和关键技术上已取得了长足的进步, 但是机器人技术领域的原始研究成果仍然相对较少, 制约了我国机器人发展的技术瓶颈, 这一现状迫切需要突破, 因此, 有必要关注机器人技术的前沿技术, 关注新一代人机共融服务机器

收稿日期: 2021-01-05

基金项目: 2020 年广东省特色专业——工业设计

作者简介: 张瑞秋 (1972—), 男, 河南人, 博士, 华南理工大学教授, 主要研究方向为计算机辅助设计、交互设计。

通信作者: 洪阳慧 (1998—), 女, 安徽人, 华南理工大学硕士生, 主攻信息与交互设计。

人的基本理论和关键技术,积极探索高端制造、医疗康复和国家安全的主要需求。对于中国机器人技术和产业来说,实现源创新和突破具有重要的理论和工程意义。

1 人机共融产品及其服务体系概述

1.1 人机共融产品的定义

人机共融是指智能机器人与人类协同事物,相互影响并配合实现设定的目标或方案。它是一个集成了人工智能、混合智能感知、群智能和大数据智能认知等技术的智能技术集成系统,并融合了多学科领域。这是近年来的一项突破性发明和前沿发现^[1]。Klaus Schwab^[2]作为世界经济论坛创始人及执行主席曾提到,现实世界、数字世界和生物世界之间的界限,随着第四次工业革命的技术革新将集成和融合在一起,因此,制定和布局下一代机器人机器服务体系的发展战略已成为抢占世界技术制高点的必要措施。在“互联网+”环境中,智慧城市、智能交通、智能机器人将被广泛应用于智能技术中以构建新的集成系统,它将推动各个领域广泛应用的创新和集成。

1.2 人机共融产品的服务体系概述

在应对繁杂的应用场景时能否充分发挥机器人的价值,需要从系统的层面考量,而单一的机器人产品的应用范围将受到局限^[3]。下一代机器人可以被整合到人类正常的生产和生活中,与周围复杂的环境协调,并在同一个自然空间与人类合作和互动。这就是共融机器人,可以沟通与机器人合作,可以执行灵巧的操作,并在智能机器人之间具有智能决策能力。人机共融技术随着智能分析、高性能计算和低成本数据采集等技术的成熟,已经能将万物集成和互联到人们的日常生活中,因此由人机共融技术驱动下的创新,除了聚焦于机器人产品和系统的开发以外,更应该关注和创建能够满足用户需求的增值服务。这也是智能时代社会发展要以智能产品创新的服务体系为基础的必然趋势^[4]。

通过构建人机共融产品的服务系统,可以在其整个生命周期中将重点从包含人机的技术产品扩展到外围服务。人机共融产品的服务系统可以横向和纵向地延伸产业链,重构人、人机共融产品和信息、产业等其他相关要素之间的关系^[5]。服务系统的集成和全局优化可以有效地提高系统的自我意识、自我优化和自我组织能力。人机共融的服务系统能够更好地满足用户需求,创造更广泛和可持续的价值^[6]。Allmendinger G^[7]对构建智能产品服务体系的相关问题进行了研究,通过通用电气和IBM等公司做出的改变发现,仅仅提供服务是不够的,企业现在必须为产品本身提供“智能服务”,即建立智能意识和连接。Valencia A等人^[8]研究了智能产品服务体系(Smart PSSs)核心

组成要素,指出智能产品服务体系在市场上相对较新颖,并且可用的信息有限,还指出其可以帮助设计师为集成产品和服务这一新任务做好准备。他们探讨了智能产品服务体系对消费者和公司的潜在价值,并讨论了设计师在设计此类产品时可能面临的挑战,整合了产品的结构化、技术的智能化及服务的联结化等三个层面的组成要素。ME Porter和JE Heppelmann^[9]为智能互联网在制定战略和实现竞争优势中提供了一个框架。他们认为,产品不断变化的性质正在扰乱价值链,迫使公司重新考虑他们所做的一切,即如何构思、设计和采购产品,如何制造、操作和维修产品,以及如何构建和保护必要的IT基础架构。吴剑锋等人^[10]将运动康复产品与“互联网+”相结合,从生理健康产品的角度分析,他们认为,将人机共融扩展到态势感知和运动健康平台管理,这将成为未来开发运动健康产品的重要趋势。

2 人机共融产品关键特征与技术

2.1 共融机器人产品分析

共融机器人是指具有灵巧的结构、多源感知融合、灵活多样的控制,以及交互智能和自主性的机器人。它是可以在人一机一环境中共存、协作,并具有认知功能的机器人^[4]。传统的机器人被设计成代替人类完成任务的工具,而被设计成与人类合作的共融机器人,能够在同一环境中与人类协作共同完成任务^[11]。人与共融机器人之间的关系将不再仅仅是与传统机器人之间的两种主仆关系,即不再仅仅是一种替代的关系。这种共融式的机器人可以直接地融入到自然界和人们的日常生产与工作中,成为自然界和人们日常生活的组成部分^[12],因此,重新评估和审视机器人核心技术的设计、科学创新驱动和产业化发展的概念,深入地研究和开发新一代机器人理论技术和与其相关的服务系统十分重要。共融机器人能将人类的符号、学习、远见、自我调节和逻辑推理等能力,与机器的精度准确性、强度、重复能力、工作时间和环境耐受性相结合^[13]。共融机器人和传统机器人的区别见表1。

当前的智能工厂,操作员需要注视着复杂的过程以保证生产效率的提高。员工需要长时间持续完成原材料供应、搬运、存储和销售等工作,这种疲劳的工作形式有时会导致故障和事故。然而在共融机器人和物联网信息系统的总体布置下,一切都会井然有序,这种情况不同于传统的工业机器人产品线。员工可以轻松愉快地完成供应、制造和销售等工作,而且在症状的早期阶段通常可以消除故障或事故^[14]。

2.2 共融机器人产品的特征

早期机器人问世后,由于发生了众多涉及机器人参与的法律问题,所以产生了机器人会损害人类利

表 1 共融机器人和传统机器人的区别
Tab.1 The difference between inclusive robot and traditional robot

不同点	传统机器人	共融机器人
安全性	刚性本体非本质安全	能够确保本质安全
设计宗旨	替代在恶劣环境下工作的人员	在相同的物理环境中与人一起工作
与人类关系	使用与被使用、交互范围有限	朋友、伙伴、与人共融
与机器人关系	工序上的协作关系	同一工作之间的协作、配合
与环境关系	不能适应复杂多变的环境	能主动适应复杂多变的环境
智能化水平	没有达到智能化	可以自主行动，具有高度智能化

表 2 共融机器人的典型特征
Tab.2 Typical characteristics of inclusive robot

场景分析	发展内容	技术实现
与人共融	1. 更合理方便的人机交互方式； 2. 类人尺寸设计； 3. 筛选有效信息提供反馈； 4. 增强系统理解性和控制性； 5. 健全风险评估和安全保护系统	1. 语音等识别技术； 2. 基于传感器的环境识别技术； 3. 基于人工智能的智能学习，安全决策机制、先进的控制算法和感知
与机器人共融	1. 不同功能的简单机器人组成多机器人系统； 2. 不同情境的远程机器人相互合作	1. 不同机器人的信息共享； 2. 多机器人同步定位和映射
与环境共融	1. 实现自主路线规划和避障； 2. 自身行为的精准感知和异常修复	1. 多模态信息的融合建模； 2. 多模式传感系统

益、威胁社会安全、破坏环境等质疑，并且越来越多。其中，部分原因为人类无法将机器人视为共同完成任务的同伴，而将其作为重复机械劳动的工具。早期机器人体积的庞大及机械的操作程序，无法保障人类在与机器人在同一工作环境时的安全问题。除此之外，关于机器人伦理学的研究也在持续探讨中，人类担心机器人的发展会超过人类控制的范围，造成对社会伦理的巨大冲击^[15]。那么，共融机器人的出现将成为解决这一社会问题的方法之一。在工作场景中，共融机器人虽然不会完全完成人类的工作来代替人类，但是机器人和人类将在不同的感知、理解和决策水平上互为补充，以便互帮互助、相互配合，高效地完成在同一工作空间内的操作指令和任务。通过赋予机器人似人的感知、理解、观察能力，能给人带来更真实、亲切且富有情感的交互体验，也在与机器人的协作过程中使工作流程更高效和愉悦^[16]。共融机器人将来也会向情感机器人的趋向发展。与普通传统机器人相比，情感机器人具有更友好的界面交互、更高的智能效率、更灵活的行为响应、更自主的决策能力和更强的思维创造能力。此外，机器人将从协作工具演变为人类合作伙伴，可以敏锐地感知人类的情感变化，并在不确定性和可变性的环境中自主创新地行动^[17]。共融机器人的典型特征见表 2，总结了共融机器人在不同场景下的特征和技术实现支撑。

2.2.1 与人融合

机器人与人共融，能够让机器人逐步具备人类的

感知、学习、适应和决议计划能力。它可以结合人脑的逻辑思维和适应性，充分发挥机器人快速、精确等机械特性，形成机器人与人的互补优势。人机交互是机器人与人融合发展中的一大重要课题，不管是工业作业环境还是家庭生活环境，只有更合理、更方便的人机交互方式，才能使机器人将人、机器与环境融合在一起，更好地与人类交流与合作。共融机器人与人的交互方式不仅限于鼠标与键盘等简单的设备输入和示教操作，还可以包括语音识别、指纹识别，甚至是人眼的瞳孔识别，随着研究的深入，手势识别的交互方式也将成为操作机器人最便捷的方式^[18]。从人机工程学出发，人类生活环境中的物品都以人类身体的尺寸进行合理化设计，以保证人类使用和生活的最大舒适度。然后，如果想将机器人和人类融合在一起，让双方在相同的自然空间中更和谐地工作和生活，就必须设计出具有类似人类尺寸的机器人^[19]。例如，仿人机械臂的设计则可以人类身体尺寸为参照，以更经济合理的方式，帮助机器人與人实现共融。同时，具备和人类类似尺寸的机器人也更易引发人类的共识，使人更容易接受。

它的安全性在于机器人和人类处于同一自然空间内。机器人和人类是相互独立的，通过双向的方式与人类互动，以及与人类协调和互补。这将确保人员、机器和材料的安全，并扩大操作能力。例如，基于传感器的环境感知、意图识别技术，基于人工智能的认知学习、决策安全保证机制等^[20]。在复杂、不可预知的外界环境中，共融机器人可通过情境感知获取并筛

选外界有效信息,以适当的方式向用户提供适当的反馈,这一能力也有助于支持其完成相应的任务目标。人与机器人的共融,得益于态势感知、先进的控制算法,以及对用于共同创建人机关键工具的理解。Bellotti V 等人^[21]从人的角度探讨了语境感知系统应注意的语境定义问题,强调语境感知系统必须能够以一种高效和非突兀的方式服从用户。因此他们认为应用程序在体系结构上与控制其行为的感知和推断应隔离开来,提出了一个设计框架,旨在指导思考如何适应人类方面的环境。该框架提出了四个设计原则,支持系统行为的可理解性和人类用户的责任性,使用户明确系统感知的功能和所理解的内容。

在工业协作机器人应用快速发展的背景下,安全性成为实际生产中的首要问题和必要的强制性约束^[22]。为保证机器人与人在同一空间内紧密协调合作,这就要求人和机器人在人机对象增加接触时确保其安全。例如,机器人向人传递物品时,需要机器人与人与人之间保持一个合适的距离,以保证人的安全并且可以以一个舒适的臂姿去接受物体^[23]。除此之外,对于桌面式的人机协作,机器人需要自动执行安全策略,例如减速和紧急停止,以及确保操作员手部安全。其中,使用视觉技术的启动保护系统,可以在工作手和机器人末端执行器之间进行远程间隔,确保机器人在桌面协作过程中的安全性^[24]。LIU Zhi-hao 等人^[25]基于视觉传感器的机器人虚拟模型和人体骨架点数据,开发了包括动态风险评估和安全运动控制的原型系统。可知工作机器人的实时风险状态,在增强现实环境中使机器人周围的风险场可视化,确保人与机器人的安全协作。BDIWI M 等人^[26]开发了一种在与重载工业机器人进行不同级别的交互中确保人类安全的新战略要素。该方法将人与机器人交互(HRI)分为了四个层次。在每一个层次上,都开发并分析了各种安全功能。还开发了一种在交互过程中用于对危险进行分类的附加算法,能够在 HRI 平台上对建议的方法进行测试和分析。他们通过研究人与机器人协作系统的动态行为控制,提出了一个通用的动态行为控制框架,并在此基础上研究了单点人一机器人协作和多点人一机器人交互的交互控制策略。LIU Xing 等人^[27]通过典型的人一机器人协同操作场景,分析了不同人一机器人协同控制策略下角色冲突的原因,提出了将主动运动模仿和被动运动相结合的协同控制算法,以减少人一机器人协作过程中的冲突。并对于多任务交互,提出了从协作控制到安全控制的平稳任务转换策略,以提高任务切换过程中的安全性。

只有在保障人与机器人在同一自然工作空间安全的前提下,才可真正引入新型的“共融”模式,使共融机器人真正成为工作协作过程中的助手与伙伴。

2.2.2 与环境融合

当前,大多数工业机器人仅在单个环境中机械地

重复操作,而没有感知并适应复杂环境的能力。感知和通信是机器人与人、机器人与环境和机器人之间交流的重要基础。共融机器人可以知道如何在复杂多变的环境中自主规划路线并防止障碍物,并在变化的环境中保持有效的运行。

要实现机器人与环境的融合,机器人必须进行实时多模态信息的融合建模,进而实现自身运动行为的精准感知(Introspection)和异常修复策略的学习^[28]。CASTELLANO-QUERO M 等人^[29]提出了适用于移动机器人传感器建模的贝叶斯网络框架。它能够自然地表示传感器之间的复杂关系,整合异构知识来源,扣除感觉异常的存在,最后利用现有信息从这些异常中恢复。它允许对移动机器人进行任何类型的感官系统的表示,并在智能推理中应用。结果表明,与其他现有方法相比,其性能和精度更高,同时提高了整个感官系统的鲁棒性。TAO Zhang 等人^[30]研究了混合碰撞检测感知器,确保了融合装置和机器人的安全,避免了机器人在移动时有与周围环境碰撞的危险。通过仿真结果,证明了这种混合感知器比基于动态模型的传统检测方法更为有效,降低了机器人建模的复杂性。Sankhar Reddy 等人^[31]介绍了 2DxoPod 模块的特点,以及它相对于机器人领域开发的模块化机器人的优势,并利用集中式模式发生器,对蛇形机器人和四足机器人的协调结构进行了导航性能仿真。该机器人设计的核心是一种新颖的关节机构,能够模仿脊椎动物的运动,并提供两个正交和相互重合的自由度。

共融机器人需要适应复杂多变的环境,并且具有感知、理解和快速响应环境的能力。这就要求共融机器人具有多模式传感系统。

2.2.3 与机器人融合

目前,机器人还只能独立完成特定任务。例如,汽车生产线上会根据预编程的程序,在汽车生产线上划分不同类型机器人进行联合工作。共融机器人之间的集成和融合与这样的要求有着很大的不同。共融机器人需要机器人作为合作伙伴,通过协调和协作完成更复杂的任务。尽管这些是相同的程序,但是工作中机器人之间也需要协作与协调,并在出现故障时,团队整体依然能表现出良好的性能,这对机器人的感知、决策、控制、深度学习和协作能力有更高的要求^[32]。研究共融机器人与机器人的融合,就要研究如何高效协调地组织多机器人协作完成任务。

其中,将不同功能的多个简单机器人组成多机器人系统就是方法之一,即多机器人系统(Multi Robot System, MRS)^[32]。该系统可以更好地增强个人协作能力、决策能力和多机器人系统的智能水平。该系统相较于单个简单机器人,在系统可扩展性、鲁棒性、容错能力、可靠性、成本节约等多个方面都具备更大优势,可以解决单个机器人难以或不可能解决的问题。将共融机器人与机器人组成更注重群体智能协作

的多机器人系统，该系统在具有更大潜力同时，在不同的领域都更能发挥优势^[17]。

每个机器人都有独特的功能，除了将其组成多机器人系统协同完成作业外，如何使处于不同情境的远程机器人互相合作且高效完成任务也成为重要的研究方向。不同机器人之间的信息共享可以帮助机器人完成不同的任务，由此提高工作效率和降低成本。该交互平台能使机器人接收或发送指示。同时，互联网和用户也可以通过该平台与机器人共享知识，向机器人发送指令或从机器人接收帮助消息，以及通过该平台提供帮助^[33]。

随着人工智能的飞速发展，多机器人协作系统已被广泛应用于许多领域。Farinelli A 等人^[34]通过将多机器人巡逻问题作为任务分配问题，讨论了在线协调问题，并提出了两种解决方案技术：DTA-Greedy（一种基线贪婪方法）和基于顺序单项拍卖的 DTAP。并且在真实的仿真环境和真正的机器人平台上评估了该系统的性能。Goldhoorn A 等人^[35]介绍了两种不同的技术，用于协调多机器人团队进行搜索和跟踪人员。WANG HL 等人^[36]提出了一种创新的多机器人同步定位和映射（SLAM）方式，通过仿真和实验验证了勘探区域覆盖范围、物体标记和环闭性能的提高，这些性能适合在灾后杂乱环境中协助搜索和救援。WANG Z^[37]研究了多机器人任务分配问题与情感计算相结合这一前沿问题，他将认知智能与情商相结合，为了建立机器人意识的自我意识，提出了一种基于自我意识的情感机器人任务分配方法。该算法定义了情绪机器人的认知机制、环境检测机制和自我决定机制，因此具有自我意识的情绪机器人可以通过掌握有关自身和环境的信息做出自主决策。该任务分配算法在每个任务尺度上效率较好，随着机器人数量的增加，分配效率逐步提高。

2.3 人机共融产品的技术支撑

为了真正实现人机共融，让人与机器人可以更好地协调各自的优势，势必要在感知、控制、结构和功能上突破机器人当前的挑战和技术瓶颈，从四个方面总结了共融机器人的技术支撑，见表 3。

2.3.1 感知方面

共融机器人在感知方面，需要进一步改进以了解和理解环境和人类行为。感知是机器人在作业中保证

效率和安全的基础，也是实现人一机一环境系统和谐、共融的前提。为了能够在同一地点让人与机器人之间安全有效地合作，机器人必须应对每个不断变化的工作环境，自主地进行调整和适应，准确地感知并快速响应与之合作的人们和其他机器人的行为。由于共融机器人的适用场景不再是重复性高的机械式工作场合，所以对环境的动态感知与适应，以及对合作伙伴的行为理解与反馈，都将成为共融机器人必不可少的要求。感知技术的特定方面可以概括如下：标记帮助判断人类行为、非动态和动态环境的数学描述和理解、多维信息的融理解及仿生视觉认知等。此外，感知技术也和生物技术、认知科学、网络大数据等技术进行了深度的交叉融合，更有力地推动了人机共融产品的发展。

2.3.2 控制方面

在控制方面，人们一直在追求更为满意的人机交互体验。首先是创建符合人类自然行为的人机交互模式。键盘输入、机械操作等传统交互方式已无法满足高效轻松作业的任务需求，虹膜、掌纹、指纹、语音、面部、手势等人体特征识别技术的发展，也成为全新的人机交互研究的方向。其中语音交互、面部和手势识别等也早已广泛应用于各类智能产品及服务领域。在与机器人协作作业过程中，操作人员会关注作业的安全性和高效性，若能采用肢体直接交互方式，不仅这两项要求可得到保证，还可减少操作人员的工作，提高易用性^[18]。

其次，在交互体验上除了采用更简易便捷的交互方式外，共融机器人还被寄希望于赋予情感，为人类提供更优质的服务。共融机器人的研究涵盖了计算机图形学、语义符号学、用户体验，并涉及心理学、社会科学、语言学等多学科交叉^[18]。该情感计算系统也被称为人工情绪智能或情 AI，用于研究和开发如何识别、解释、处理和模拟人类情感，其应用范围甚广，包括健康、教育、服务等多个领域^[17]。通过该情感系统，可使机器人具备识别、感知和解释人类情绪状态的能力，在进行自我调整和适应后帮助人类高效、舒适地完成目标。不仅如此，在人类出现负面情绪和不良心理状况时，共融机器人还具备调节、安抚人类的能力。这种情感技术的进步使得共融机器人真正成为人类的伙伴，而不只是协同工作的助手。这类具备情感系统的机器人也已广泛应用于人类生活的各种场

表 3 共融机器人的技术支撑
Tab.3 Technical support of inclusive robot

技术支撑	内容	重要性
感知	适应复杂多变的环境，具备多模态感知功能	实现功能的基础，保证效率的前提
控制	更自然简便的交互形式，更优质的情感交互服务	安全高效，扩展应用场景
结构	加强仿人机器人在行为上的拟人化	使人产生共鸣，提高工作时配合度
功能	自主决策和自适应学习	高效完成目标且可胜任创造性工作

景,包括公共领域的服务型机器人、家庭生活中的陪伴型机器人、社会辅助型机器人,以及研究情感相互作用的研究型机器人等。

2.3.3 结构方面

在结构方面,人类一直致力于仿人机器人的研究。在工业制造领域经常会出现工业机器人或机械臂,因结构、功能等问题,无法适应复杂多模态的工作环境而出现作业困难或故障,这使得仿人机器人的研究越来越重要^[38]。为保证机器人能在不同环境下完成各种不同作业,有必要提高仿人机器人在行为上的拟人化,把人体结构的相关原理和运动规律运用到仿人机器人的研究中,以更简化的结构满足机器人的功能需求^[39]。同时,机器人拟人化的操作行为更容易使人产生共鸣,在任务协作过程中人和机器人可达到更高的配合度^[40]。

软体机器人(Soft Machines)的发展,也为共融机器人及其服务系统的结构发展夯实了基础^[41]。软体机器人由于其固有的高灵活性、良好的合规性、出色的适应性和安全的交互性,在医疗手术^[42]、幼儿教育^[43]、救援探索^[44]、可穿戴设备^[44]等领域具有巨大潜力,并且受到了越来越多的关注^[45-46]。

2.3.4 功能方面

在功能方面,共融机器人具有自适应学习和自我决策功能^[17]。自适应学习(Adaptive Learning),即共融机器人在执行复杂任务或与人互动的过程中,不断从环境中收集数据信息,或从用户的语音反馈中获取关键数据,并从用户主动查询和问询中获取情况,以便机器人自身学习和持续修正模型,提高其智能化水平,使服务机器人在正确检测目标的基础上保证整个过程的实时性,对检测结果做出快速响应^[47]。如何让机器人在复杂和动态的环境中进行自适应学习,更好地协作人们完成作业目标,是人与机器人在同一自然

空间下协作达到“共融”的关键。在自适应学习协作系统中引入情感因素,可以向沟通系统展示更好的协作技能并增加系统灵活性^[48]。另外,情感模型的融合还可以有效地感知机器人面对的多任务问题场景,从而改善机器人在复杂环境中的自主性和控制力^[49]。Ioanna Giorgi 等人^[50]使用人形社交机器人 NAO,实现了与老年用户的自然语言和非语言互动,通过自适应学习为他们的生活提供了人性化的帮助。NAO 使用可定制算法对代理进行了编程,从而帮助用户每天摄入药物;设置提醒,为自理能力较低的患者选择合适的药盒;帮助用户对抗孤独,通过教育保持他们的身心健康。

自主决策是共融机器人自主性(Autonomy)的一个重要体现,这意味着他们不会受到人为干预的影响,执行控制态度和奖励目标是通过自行确定的决定来确定的。共融机器人可以在无监督状态下执行任务以实现用户定义的目标,并可通过更具创造性、灵活性的工作,具有一定的自我管理与自我引导能力。机器人实现自主决策的能力就需要共融机器人把握、感知动态环境变化的因素,为实施自主决策提供依据。

3 典型服务应用场景

如今,随着人机共融硬件相关集成技术的全面成熟,共融机器人产品的性能已广泛扩展到了许多领域,在一些细分领域和任务上能够超越传统机器人,并发挥了重要的辅助作用。然而面对环境的复杂性、工作对象的复杂性、任务的复杂性及人机安全的复杂性,有必要建立新的“共融模型”。因此,根据不同领域和场景的需求,构建人机共融产品服务系统可以有效地突破传统机器人的限制和疆界。同时,它可以通过互补的方法与人结合,人们可以更好地理解机器人开发和获取的概念,并实现人机环境和协作工作的互补优势。人机共融技术典型应用场景见表 4。

表 4 人机共融技术典型应用场景
Tab.4 Typical application scenarios of man-machine integration technology

应用领域	用途	具体应用	优势
工业制造业	保证安全、供应、制造和销售,实现自动化,排除故障和事故	识别人类目标的概率分布,确定最佳目标及计划;基于云端的立体视觉和图像分析的自动化系统,满足制造公司中的日常工作自动化	高效、可重复、准确性高、作业流程井然有序
航空航天	利用高精度、短流程和高灵活性等制造特性协助航空任务	新一代航空产品智能化、协作化、柔性化;帮助宇航员完成空间站内外的设备维护、在轨加注等任务	制造效率高、作业状态检测能力强、作业规划准确度高、作业柔性和可拓展性较好
公共交通	规划出行路线、减少环境污染、评估事故风险	基于人机共融理念的智能船舶远程驾驶框架;建立人机共融的快速救援响应机制	节省出行时间、降低事故因素、自主紧急避险、提高事故救援效率
医疗和健康服务	医学成像、临床决策支持、语音录入病历、药物挖掘、健康和卫生管理	康复机器人辅助病人康复治疗,人工智能技术辅助病人看病和医生治疗;社交型机器人可陪伴特殊患者	降低人为失误率,节约劳动成本,受外界因素干扰的影响较小,易于统一管理

3.1 人机共融在工业制造业领域应用的前景

人机共融技术是工业和制造业中的半自动过程,即自动化混合。这是一个高效、重复、准确和高度智能的系统。特别是个性化服务和快速组织车间的高端行业,对共融机器人有很大的应用需求。在使用传统的工业机器人生产线的场景中,对于机器人工作空间的分析一般都基于机器人学中传统的灵活性指标,并没有考虑人的因素,这使得人与机器人协作工作时人的安全性无法得到完全的保障,而借助新一代的共融机器人,在物联网信息系统的总体安排下,一切都变得井然有序。员工能够轻松高效地工作,供应、制造和销售等流程都能实现智能化,在出现症状的早期阶段常常可以排除故障或事故。

在工业生产中,协作机器人通过人机共融技术能够在人机交互方式上进行创新与开发。以解决现有人机交互的单调、不便等问题,开发了用于协作机器人的手势识别人机交互系统,通过手势判断的方式控制机器人运动系统,以便机器人与人在同一工作空间更加便携地协作以完成装配任务。这一人机交互方式可改善传统工业机器人人机有效沟通能力差、人机协调能力不足等问题^[18]。

Pulikottil T B 等人^[51]提出了一种基于最大熵反向最优控制的方法,用于识别人类目标的概率分布,并打包成人-机器人共享工作空间协作的软件工具。该软件能分析人类目标与目标优先级约束,并能够确定最佳机器人目标及相对运动计划。所使用的方法是一种用于管理目标优先约束的算法,以及用于选择下一个机器人动作的部分可观察的马尔可夫决策过程(Partially Observable Markov Decision Process, POMDP)。该模型显示出机器人空闲时间的减少和人类满意度的提高。De Araujo P R M 等人^[52]开发了一种基于云端的立体视觉和图像分析的自动化系统,能够满足制造公司中的日常工作自动化。根据该方法,工件坐标系(Workpiece Coordinate System, WCS)计算机视觉系统算法可在云上运行一系列图像,检测模板及其参考元素。所有图像都在云上运行的自定义软件中处理,以将工件坐标系的位置直接返回到计算机数控(CNC)机器控制器中。Malik 等人^[53]探讨了使用数字孪生体(Digital Twin)通过工业案例和演示器,解决协作生产系统复杂性的可能问题。并且介绍和讨论了数字孪生在系统生命周期中的形式、构成要素和潜在优势,最后提出了今后在合作领域使用数字孪生体的研究和实践建议。

3.2 人机共融在航空航天领域应用的前景

随着机器人技术和航天技术的发展和进步,空间领域和航天领域对于智能机器人的需求也逐步扩大。针对新一代航空航天产品的制造,传统的机器人作业装备系统在装备协作化、智能化和柔性化等需求中的

劣势越来越明显。比如制造效率低、作业状态检测能力弱、作业规划准确度低、作业柔性和可拓展性较差等^[54],因此,共融机器人协作系统对于航空航天制造领域会更加高效。该系统具有更高的精度、更迅速的流程和更高的灵活制造特性,这些特性对加工技术和设备提出了更高的要求 and 新的挑战。Christian M 等人^[55]研究了如何提高工业铣削机器人绝对精度这一问题,他们提出了一种激光跟踪系统,在加工任务期间借助该系统,通过实时接口姿势数据可以在毫秒周期内获得,并用于计算机机器人的当前路径误差。

另外,对空间探索的深入必然需要大量人力资源的投入。由于宇航员在太空这样一个特殊的工作环境中活动,所以其任务受到一定限制,自身活动的风险较高。由智能机器人帮助宇航员完成舱外的任务和要求成为重要的研究方向。其次,太空活动由传统舱内的实验扩展到越来越多的出舱活动、出舱维修、在轨加注等任务,长期驻扎和繁重任务的要求对于宇航员的身体也是很大的考验^[56]。因此,由共融机器人协作宇航员在复杂的太空环境下工作会更加高效。比如,具有高度灵活性和动作协调性的类人机器人可以帮助宇航员完成空间站内外的设备维护,从而降低宇航员离开机舱的风险^[57]。

3.3 人机共融在公共交通领域应用的前景

我国的公共交通领域中,公共交通的比例车次在大多数城市较低,对于经济社会发展和人们的出行等实际需要而言仍需提高。通过人与共融机器人的协作和集成,以及使用智能公共交通设施,人们可以合理地规划出行路线,合理地连接铁路、航空、公路、地铁、公共汽车和其他多式联运,并且可以让人们在任何时候都能确定目标车辆到达车站所需的时间,减少不必要的等待。此外,使用大数据跟踪和预测车道上的交通和路线信息,可以为驾驶员和乘客提供足够的信息和安全保障。在紧急情况下,它们可以自主紧急避险,加快救援速度并减少事故后果的延误。所有这一切,都应依靠人类和共融机器人服务系统的协作和整合。

王远渊等人^[58]在分析智能船舶远程驾驶需求和场景的基础上,提出了基于人机共融理念的智能船舶远程驾驶框架。针对不同的远程驾驶模式,提出了技术等级和相关的关键技术。刘公绪^[59]系统地分析和回顾了共融机器人的导航问题和导航技术。他从信息融合的角度分析了通信系统,并介绍了相关的信息融合方法和机器人姿态估计方法。

3.4 人机共融在智能医疗与健康服务领域应用的前景

医疗健康是国家战略和全球关注的重点^[60]。近年来协作机器人在康复领域取得了很大的发展。在康复方面,机器人种类的范畴很广,其中还可细分为行动机器人、生活自理机器人、交流和学习机器人、远程

康复机器人和智慧医疗机器人等。生活自理机器人主要担任类似护工的工作,在生活中帮助患者完成穿衣、喂食、大小便等基本活动;交流和学习机器人具备医患沟通、心理辅导等功能;远程康复机器人则致力于配合患者康复训练、指导医疗等工作。尽管这类机器人通过细分有不同的使用场景,但是都需要有充分的语音识别和患者意图识别能力,特别需要有自我学习和自动知识更新的能力,使其能快速感知并判断患者的状态,同时获取外界信息并将有效信息反馈给患者。所有人体功能都与康复机器人的应用相关联,借助于人机共融服务系统不仅可以评价人体能力、辅助实现原本弱化或者丧失的人体功能,也可以通过反复应用,发挥功能训练的作用,实现功能康复的效果^[61]。

共融机器人在康复医疗领域的应用可以降低治疗中的人为失误率,节约劳动成本。共融机器人受外界因素干扰的影响较小,同时易于统一管理和质量控制,随着其感知、认知、决策、逻辑判断能力的提高,学习能力、适应能力得以突破,可在应用时自主进行治疗方案的更新与完善,并将生成的数据信息反馈给人类,以便康复专业人员收集患者状况信息,进一步调整康复方案和创造新的康复方法。

在健康服务领域,共融机器人除了作为康复机器人,辅助病人完成康复治疗,辅助人工智能技术融入医疗系统,辅助病人看病和医生治疗以外,专为陪伴设计的社交型机器人^[62]对于自闭症儿童^[63]和老年痴呆症患者更有特殊的功用。智能机器人可用于自闭症儿童的早期教育、治疗、陪伴和心理健康服务,人机共融的交互方式可减缓自闭症患者的社交恐惧感。机器人通过数据分析和与用户的长期互动,可感知用户的心理状态,并给予合适的反馈,满足用户的行为和心理需求。全面的机器人应具有与人类相同的理解、决策、判断和同情的能力,以及特征。这样,机器人就可以像一个真人一样地交流,以便完成正确的对话。只有这样,共融机器人才能在没有空间和服务的情况下满足人们的需求。共融机器人应具有与人类相同的理解、决策、判断和同情的能力和特征。这样才能在陪伴的服务领域中完成人类的要求并使其满意。在老年痴呆症的治疗方法上,陪伴则是不可或缺的一种方式,有效的陪伴可以减少患者的躁动行为,减少孤独感和增强社交参与度^[62]。然而,具有认知障碍的老年人对于智能产品和创新技术的接受度较低,因此更有必要完成机器人与人的智能融合,使共融机器人具备人类意图理解能力,能及时感知人的情绪变化并及时给予反馈。

在国内,养老机器人、助残机器人、康复医疗机器人、手术专用机器人等服务型机器人都有非常大的需求。除此之外,共融机器人在健康服务领域的应用,不应仅局限于某一固定的方式,也可通过新的创新技术在有需求的场景下为人类提供帮助。例如,在家庭

生活中,老年人常会有各种原因发生摔倒,导致骨折甚至于倒地不起,如没有及时检测这一情况的发生并呼救帮助,会带来难以预计的后果。因此某些智能家庭医生机器人能通过姿势识别技术检测人倒地的情况和时间,并发出呼救信号^[33]。王立坤^[64]设计了一款用于柔性关节外骨骼机器人,轻型下肢外骨骼机器人和重型下肢外骨骼机器人的控制系统,同时设计了稀疏高斯过程的交互模型和周期运动的中心模式发生器。他提出了一种下肢助力外骨骼机器人位置环的轨迹基元在线增强学习人机融合策略,进一步丰富了外骨骼机器人控制系统的人机共融策略。

4 趋势与挑战

4.1 从技术驱动转向设计驱动

人机共融现已成为未来技术社会发展的必然趋势,将来绝大多数的机器人产品及服务中都将有人机共融系统层面的元素集成其中。然而,当前机器人发展的水平还不足以实现共融技术的应用。以机器人作业场景为例,操作任务中机械臂的速度、准确性和负载能力还有待提升,机器人的移动性和可操作性的协调不佳,机器人的能量供应需求尚未满足,以及改进机器人的结构和驱动方式也是机器人发展的重要一步。此外,与共融机器人相比,当前机器人最为缺失的是自适应学习能力和自主决策能力,机器人无法根据多变的环境进行感知、决策和学习,无法与人交流共同完成作业。然而,从机器人及其服务系统中详细集成此应用程序,不仅基于设备的开发和现代化,而且还取决于培训和许多领域的共同发展。人机共融真正得以突破需要信息、机械、力学、医学、材料和心理学等不同领域专家发挥优势,共同合作。由于人机共融的应用场景范围大、涵盖面广,所以实现人机共融也将推动多领域的协调发展。

在追求和发展人机共融方面,高智能化是机器人不断创新和发展的主要技术需求。然而,当前的工业机器人还没有达到独立完成创新工作的能力,更无法在复杂多变的环境中与人协作。以当前的技术发展来看,机器人还面临着自然交互、人机安全、环境适应、复杂灵巧作业等多种挑战。实现机器人的高度智能,完成机器人与人的共融发展,还要依靠大数据与互联网、智能材料、仿生、微纳、3D 打印、柔性多体动力学、传感与控制技术等快速发展^[65]。

共融机器人涉及控制、知觉、沟通、理解、认知、学习、协作、安全,甚至道德、法律、心理学和情感方面等众多研究。共融机器人的发展所面临的问题,不是一个学科或一个领域就能解决的简单问题,若仅依靠技术进步是很难解决复杂社会中的复杂问题的,因此,设计指导能力和协调能力的提升,是未来推动人机共融产品研究的重要趋势。

4.2 从单一产品转向服务体系

当实现人机共融成为时代趋势, 智能物联网成为新型生产关系, 生产方式都将从单一系统转向综合服务体系。共融机器人的发展并非仅作为协助人类的助手, 而是能够真正突破人类极限, 使人类收获更多效益, 使社会发展更为高效。从“替代”到“共融”的重新定义, 从“产品”到“服务体系”的应用扩展, 人类看待人机共融技术的眼光早已不同, 其应用场景十分广泛, 涉及办公、家庭、娱乐、科技等。人类愈发期待人机共融技术对智能时代的价值提升的实现, 服务体系构建的快速响应。只有共同行动, 利用服务体系更好地将人与共融机器人结合起来, 并不断提高智能水平, 人机共融系统才能在各领域发挥优势, 驱动各领域的协同发展。

5 结语

本文通过收集并分析典型的人机共融产品和相关研究, 回顾机器人发展历程, 总结了共融机器人与人共融、与机器人共融、与环境共融的三大特征与优势; 针对当前共融机器人研究面临的技术难度和集成要求, 提出了对于人机共融产品及服务体系未来发展的期望与挑战; 探讨了在典型的应用场景下, 人机共融产品的价值与优势; 预测了未来技术转向未来开发中的设计管理的需求, 以及从单一产品角度到服务体系角度的需求。在新的智能化时代的构建下, 共融机器人的发展与广泛应用已然是大势所趋。不仅如此, 共融机器人及其服务系统的发展还会推动更多其他学科和技术的发展。一旦人机共融技术帮助人类突破了生理及心理的极限, 那么人机共融技术在各领域得以突破和飞跃已是指日可待。当下人机共融技术已成为国家为推动市场、发展经济、掌握资源而大力支持的研究方向, 目标就是建立起“人机的”命运共同体, 进入共融、共享、和谐和绿色智能时代。

参考文献:

- [1] 王朝立. 人机共融安全技术发展趋势展望[J]. 自动化仪表, 2020, 41(3): 1-5.
WANG Chao-li. Development Trend of Human-Computer Integrative Safety Technology[J]. Automation Instrumentation, 2020, 41(3): 1-5.
- [2] 克劳斯·施瓦布, 李菁. 第四次工业革命: 转型的力量[J]. 中国商界, 2016(8): 123.
SCHWAB K, LI Jing. The Fourth Industrial Revolution: the Power of Transformation[J]. China Business, 2016(8): 123.
- [3] 孙效华, 张义文, 侯璐, 等. 人工智能产品与服务体系研究综述[J]. 包装工程, 2020, 41(10): 49-61.
SUN Xiao-hua, ZHANG Yi-wen, HOU Lu, et al. A Review on Artificial Intelligence Product and Service System[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(10): 49-61.
- [4] LEE J, ABUALI M. Innovative Product Advanced Service Systems (I-PASS): Methodology, Tools, and Applications for Dominant Service Design[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52: 9-12.
- [5] 禹鑫焱, 王正安, 吴加鑫, 等. 满足不同交互任务的人机共融系统设计[J]. 自动化学报, 2021, 1(20): 1-12.
YU Xin-yan, WANG Zheng-an, WU Jia-xin, et al. Design of Human-Computer Co-integration System for Different Interactive Tasks[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 1(20): 1-12.
- [6] 郑茂宽. 智能产品服务生态系统理论与方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
ZHENG Mao-kuan. Theory and Method of Intelligent Product Service Ecosystem[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [7] GLEN A, RALPH L. Four Strategies for the Age of Smart Services[J]. Harvard Business Review, 2005, 83(10): 131-138.
- [8] VALENCIA A, MUGGE R, SCHOORMANS J P L, et al. The Design of Smart Product-Service Systems (PSSs): an Exploration of Design Characteristics[J]. International Journal of Design, 2015, 9(1): 13-28.
- [9] PORTER M E, HEPPELMANN J E J H B R. How Smart, Connected Products are Transforming Companies[J]. Harvard Business Review, 2015, 93(10): 96-114.
- [10] 吴剑锋, 林玉婷, 周震. “互联网+”运动健康产品设计发展研究[J]. 包装工程, 2017, 38(22): 16-9.
WU Jian-feng, LIN Yu-ting, ZHOU Zhen. Design and Development of “Internet+” Sports Health Products[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(22): 16-9.
- [11] GARCIA MUNIZ A S, VICENTE CUERVO M R J J O C P. Exploring Research Networks in Information and Communication Technologies for Energy Efficiency: an Empirical Analysis of the 7th Framework Programme [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 1133-1143.
- [12] LANDER E S J A J O F S. Response to the ANZFSS Council Statement on the President’s Council of Advisors on Science and Technology Report[J]. Australian Journal of Forensic Sciences, 2017, 49(4): 1-3.
- [13] 付丽丽. 下一代机器人或将“与人共融”中国如何抓机遇[J]. 智能机器人, 2018(2): 15.
FU Li-li. Design and Development of “Internet+” Sports Health Products[J]. Intelligent Robotics, 2018(2): 15.
- [14] 黄远灿. 共融机器人是智能制造的核心[N]. 中国电子报, 2017-09-22(1).
HUANG Yuan-can. Inclusive Robot is the Core of Intelligent Manufacturing[N]. China Electronic News, 2017-09-22(1).
- [15] 邵笑晨. 机器人技术发展的伦理问题研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
SHAO Xiao-chen. Ethical Issues of Robot Technology Development[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [16] 王毅. 基于仿人机器人的人机交互与合作研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
WANG Yi. Human-Computer Interaction and Coopera-

- tion Based on Humanoid Robot[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [17] 郭晓萍. 多情感机器人的情感建模和行为决策研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
GUO Xiao-ping. Emotion Modeling and Behavior Decision-making of Multi-emotion Robot[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [18] 姜杰文. 基于手势识别的协作机器人人机交互系统设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
JIANG Jie-wen. Human-Computer Interaction System for Collaborative Robot Based on Gesture Recognition[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [19] 宋春雨. 仿人机械臂构型综合与臂姿规划[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
SONG Chen-yu. Manipulator Configuration Synthesis and Manipulator Pose Planning[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.
- [20] 贾计东, 张明路. 人机安全交互技术研究进展及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2020, 56(3): 16-30.
JIA Ji-dong, ZHANG Ming-lu. Research Progress and Development Trend of Human-Machine Safety Interaction Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3): 16-30.
- [21] BELLOTTI V, EDWARDS K J H I. Intelligibility and Accountability: Human Considerations in Context-Aware Systems[J]. Human-Computer Interaction, 2009, 11(12): 193-212.
- [22] LASOTA P A, FONG T, SHAH J A J F, et al. A Survey of Methods for Safe Human-Robot Interaction[J]. Foundations and Trends in Robotics, 2017, 5(3): 261-349.
- [23] 赵磊. 仿人机器人上身运动规划及人机交互研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
ZHAO-Lei. Upper Body Motion Planning and Human-Computer Interaction of Humanoid Robot[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [24] 穆欣伟, 孙晋豪, 邹方. 人机协作视觉手部保护系统设计[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(2): 83-86.
MU Xin-wei, SUN Jin-hao, ZOU Fang. Design of Human-Machine Cooperative Visual Hand Protection System[J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(2): 83-86.
- [25] LIU Z, WANG X, CAI Y, et al. Dynamic Risk Assessment and Active Response Strategy for Industrial Human-Robot Collaboration[J]. Computers Industrial Engineering, 2020, 141: 106302.
- [26] BDIWI M, PFEIFER M, STERZING A J C A-M T. A New Strategy for Ensuring Human Safety During Various Levels of Interaction with Industrial Robots[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 94.
- [27] LIU X, GE S S, ZHAO F, et al. A Dynamic Behavior Control Framework for Physical Human-Robot Interaction[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 101(1).
- [28] 吴鸿敏. 非参数化贝叶斯模型的机器人多模态感知与学习[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
WU Hong-min. Robot Multi-modal Perception and Learning Based on Nonparametric Bayesian Model[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [29] CASTELLANO-QUERO M, FERNÁNDEZ JA, APPLICATIONS A G C J E S W. Improving Bayesian Inference Efficiency for Sensory Anomaly Detection and Recovery in Mobile Robots[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 163: 113755.
- [30] TAO Z, SONG Y, WU H, et al. Hybrid Collision Detection Perceptron of the Robot in the Fusion Application[J]. Fusion Engineering, 2020, 160: 111800.
- [31] CH S S R, ABHIMANYU, GODIYAL R, et al. 2DxoPod: a Modular Robot for Mimicking Locomotion in Vertebrates[J]. Journal of Intelligent Robotic Systems, 2021, 101(1): 1-16.
- [32] 李虎, 方宝富. 基于积极团队情感基调的情感机器人协作任务分配拍卖算法[J]. 计算机科学, 2020, 47(4): 169-177.
LI Hu, FANG Bao-fu. Auction Algorithm for Collaborative Task Assignment of Emotional Robots Based on Positive Team Emotional Key[J]. Computer Science, 2020, 47(4): 169-177.
- [33] 刘松. 面向移动服务机器人的部分特殊姿态识别及云应用扩展研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
LIU Song. Partial Special Attitude Recognition and Cloud Application Expansion for Mobile Service Robot[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [34] FARINELLI A, IOCCHI L, NARDI D J A R. Distributed on-line Dynamic Task Assignment for Multi-robot Patrolling[J]. Autonomous Robots, 2017, 41(6): 1321-1345.
- [35] GOLDHOORN A, ANA, ALQUEZAR, et al. Searching and Tracking People with Cooperative Mobile Robots[J]. Autonomous Robots, 2018, 42(2).
- [36] WANG H L, ZHANG C J, SONG Y, et al. Robot SLAM with Ad Hoc Wireless Network Adapted to Search and Rescue Environments[J]. 2018, 25(12): 3033-3051.
- [37] WANG Z, ZHU J, GUO X P, et al. Distributed Task Allocation Method Based on Self-awareness of Autonomous Robots[J]. Journal of Central South University, 2020, 76(10): 3033-3051.
- [38] 于佳圆. 基于 HMM 的仿人机器人运动模仿学习方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
YU Jia-yuan. Motion Imitation Learning Method of Humanoid Robot Based on HMM[D]. Beijing: Beijing Civil Engineering University, 2020.
- [39] 张续冲, 张瑞秋, 陈亮, 等. 仿人机械双臂的运动学建模及实验[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(6): 24-28.
ZHANG Xu-chong, ZHANG Rui-qiu, CHEN Liang, et al. Kinematics Modeling and Experiment of Humanoid Mechanical Duals[J]. Machine Design and Research, 2020, 36(6): 24-28.
- [40] 王春荣, 夏尔冬, 赵京, 等. 基于分级规划策略的拟人机械臂仿人运动规划算法研究[J]. 图学学报, 2018, 39(3): 553-561.
WANG Chun-rong, XIA Er-dong, ZHAO Jing, et al. Humanoid Motion Planning Algorithm of Humanoid Manipulator Based on Hierarchical Planning Strategy[J]. Chinese Journal of Graphics, 2018, 39(3): 553-561.
- [41] MORIN S A, SHEPHERD R F, KWOK S W, et al. Camouflage and Display for Soft Machines[J]. Science, 2014, 337(6096): 828.
- [42] MARK, RUNCIMAN, ARA, et al. Soft Robotics in Minimally Invasive Surgery[J]. Soft robotics, 2019, 2019,

- 6(4): 423-443.
- [43] EMILY, ROGERS, PANAGIOTIS, et al. Smart and Connected Actuated Mobile and Sensing Suit to Encourage Motion in Developmentally Delayed Infants[J]. *Journal of Medical Devices*, 2015, 9(3): 30914.
- [44] HAWKES E W, BLUMENSCHEN L H, GREER J D, et al. A Soft Robot that Navigates Its Environment through Growth[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(8): 3028.
- [45] 管清华, 孙健, 刘彦菊, 等. 气动软体机器人发展现状与趋势[J]. *中国科学(技术科)*, 2020, 50(7): 897-934. GUAN Qing-hua, SUN Jian, LIU Yan-ju, et al. Development Status and Tendency of Pneumatic Soft Robot [J]. *Science China (Technology Sciences)*, 2020, 50(7): 897-934.
- [46] 鲍官军, 张亚琪, 许宗贵, 等. 软体机器人气压驱动结构研究综述[J]. *高技术通讯*, 2019, 29(5): 467-479. BAO Guan-jun, ZHANG Ya-qi, XU Zong-gui, et al. Review on Pneumatic Drive Structure of Soft Robot[J]. *High Technology Communications*, 2019, 29(5): 467-479.
- [47] 夏伟杰, 张奇志, 周亚丽. 家庭服务机器人目标检测实验研究[J]. *中国仪器仪表*, 2020(6): 57-64. XIA Wei-jie, ZHANG Qi-zhi, ZHOU Ya-li. Experimental Research on Target Detection of Home Service Robot[J]. *Chinese Scientific Instrument*, 2020(6): 57-64.
- [48] BANIK S C, WATANABE K, HABIB M K, et al. An Emotion-Based Task Sharing Approach for A Cooperative Multiagent Robotic System[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation*, 2009.
- [49] DING Y, ZHU M, HE Y, et al. An Autonomous Task Allocation Method of the Multi-Robot System; Proceedings of the Control[C]. *Automation, Robotics and Vision*, 2006 ICARCV'06 9th International Conference on IEEE, 2007.
- [50] GIORGI I, WATSON C, PRATT C, et al. Designing Robot Verbal and Nonverbal Interactions in Socially Assistive Domain for Quality Ageing in Place[M]. *Human Centred Intelligent Systems*, 2021.
- [51] PULIKOTTIL T B, PELLEGRINELLI S, PEDROCCHI N. A Software Tool for Human-Robot Shared-Workspace Collaboration with Task Precedence Constraints[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 67: 102051.
- [52] DE ARAUJO P R M, LINS R G. Cloud-based Approach for Automatic CNC Workpiece Origin Localization Based on Image Analysis[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 68: 102090.
- [53] MALIK A A, BREM A. Digital Twins for Collaborative Robots: a Case Study In Human-Robot Interaction[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 68: 102092.
- [54] 田威, 焦嘉琛, 李波, 等. 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述[J]. *南京航空航天大学学报*, 2020, 52(3): 341-352. TIAN Wei, JIAO Jia-chen, LI Bo, et al. Summary of High Precision Operation Equipment and Technology for Aerospace Manufacturing Robot[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 52(3): 341-352.
- [55] CHRISTIAN M, CHRISTIAN S H, PHILIP K, et al. Real Time Pose Control of an Industrial Robotic System for Machining of Large Scale Components in Aerospace Industry Using Laser Tracker System[J]. *Sae International Journal of Aerospace*, 2017, 10(2): 2165.
- [56] 赫向阳. 七自由度仿人机械臂直接示教方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017. HE Xiang-yang. Direct Teaching Method of 7-DOF Humanoid Manipulator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [57] 刘世平, 赫向阳, 韩亮亮, 等. 机器人航天员冗余机械臂自运动优化[J]. *载人航天*, 2017, 23(2): 143-149. LIU Shi-ping, HE Xiang-yang, HAN Liang-liang, et al. Self-motion Optimization of Redundant Manipulator for Robot Astronaut[J]. *Manned Space*, 2017, 23(2): 143-149.
- [58] 王远渊, 刘佳伦, 马枫, 等. 智能船舶远程驾驶控制技术现状与趋势[J]. *中国舰船研究*, 2021(5): 1-14. WANG Yuan-yuan, LIU Jia-lun, MA Feng, et al. Research Status and Trend of Intelligent Ship Remote Navigation Control Technology[J]. *China Ship Research*, 2021(5): 1-14.
- [59] 刘公绪. 共融机器人导航技术综述[J]. *无线电工程*, 2020, 379(12): 5-13. LIU Gong-xu. Review of Integrated Robot Navigation Technology[J]. *Radio Engineering*, 2020, 379(12): 5-13.
- [60] 王云屏, 刘培龙, 杨洪伟, 等. 七个经合组织国家全球卫生战略比较研究[J]. *中国卫生政策研究*, 2014, 7(7): 9-16. WANG Yun-ping, LIU Bei-long, YANG Hong-wei, et al. A Comparative Study of Global Health Strategies in Seven OECD Countries[J]. *China Health Policy Studies*, 2014, 7(7): 9-16.
- [61] 励建安. 人机共融, 天人合一——关于康复机器人应用与发展的思考[J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35(8): 897-899. LI Jian-an. Human-machine Integration, the Unity of Man and Nature: Thinking about the Application and Development of Rehabilitation Robot[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2020, 35(8): 897-899.
- [62] Ke C, WQ L, TAN C K, et al. Changes in Technology Acceptance among Older People with Dementia: the Role of Social Robot Engagement[J]. *International Journal of Medical Informatics*, 2020, 141: 104241.
- [63] YANG J, WANG R, GUAN X, et al. AI-enabled Emotion-Aware Robot: the Fusion of Smart Clothing, Edge Clouds and Robotics[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 102: 701-709.
- [64] 王立坤. 下肢助力外骨骼机器人控制系统人机共融策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. WANG Li-kun. Human-Computer Integration Strategy of Control System of Lower Limb Assist Exoskeleton Robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [65] 刘辛军, 于靖军, 王国彪, 等. 机器人研究进展与科学挑战[J]. *中国科学基金*, 2016, 30(5): 425-431. LIU Xin-jun, YU Jing-jun, WANG Guo-biao, et al. Research Progress and Scientific Challenges of Robots[J]. *Science Foundation of China*, 2016, 30(5): 425-431.