

# 协作机器人技术与产业分析

范玫杉, 刘 嘉, 马伟佳

(工业和信息化部产业发展促进中心, 北京 100017)

**摘要:** 随着制造业向智能化、柔性化方向转型, 协作机器人作为一种能够与人类共同工作的机器人系统, 受到广泛关注和应用。对协作机器人技术与产业发展情况进行综述和分析。回顾协作机器人的发展历程, 突出其在现代工业和服务领域的重要性; 分析协作机器人的技术发展, 包括规划与控制、多模感知技术、机器人技能学习与决策本质安全与人机协作等方面; 结合国内外产业发展情况的比较分析, 展望技术与产业发展趋势, 为协作机器人领域的研究和发展提供参考和启示。

**关键词:** 协作机器人; 智能化; 人机协作; 制造业

**中图分类号:** TP242.6; F752.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)11-0282-07

近年来, 中国陆续出台《“十四五”机器人产业发展规划》《“机器人+”应用行动实施方案》等机器人产业发展相关政策, 大力推动协作机器人的研发创新和产业化应用。在工业 4.0 时代的背景下, 随着工业自动化和人工智能技术的迅速发展, 协作机器人作为一种新兴的智能制造装备, 以其灵活、高效、安全的特点<sup>[1]</sup>, 为工业生产和服务领域带来了革命性的变革, 正在逐渐成为工业生产和服务领域的重要助力。

协作机器人, 就是具备多模感知能力, 并且具备与新一代人工智能融合接口的新型机器人作业系统。它们可以通过多模态数据融合, 实现环境的动态感知、识别, 并且通过强化学习<sup>[2]</sup>、深度学习、迁移学习等机器人学习方法, 实现从简单技能的自我训练, 到复杂技能的自主生成。协作机器人的概念最早可以追溯到 20 世纪 90 年代<sup>[3]</sup>, 当时的研究主要集中在提高机器人的安全性和交互能力上。2000 年代初, 随着全球制造业对提高生产效率和灵活性的需求增加, 协作机器人开始进入工业生产领域, 早期的工业应用包括简单的装配、搬运和包装等任务。随着传感器技术、控制算法和人机交互技术的不断突破, 协作机器人技术才真正进入了实用化阶段。现今, 协作机器人不仅在传统制造业中广泛应用, 还在诸如医疗保健、仓储物流、服务辅助、研究教育等领域展现出广阔的应用前景, 成为推动

产业升级和社会进步的重要力量。目前, 国内外学术界对于协作机器人的研究主要集中在协作机器人规划与控制技术、多模感知技术、机器人操作技能学习与决策等方面, 大量研究成果不断涌现, 为协作机器人的进一步发展提供了重要支持。

本文主要从协作机器人的技术特点、产业概况、技术与产业发展趋势等方面进行总结分析, 期望能够为相关领域的研究人员提供有益的参考和借鉴, 从而推动协作机器人技术和产业的进一步发展。

## 1 协作机器人技术分析

协作机器人, 作为智能制造和自动化技术的前沿产品, 集成了建模与控制技术、路径规划以及感知技术等多个高度复杂的技术领域。这些技术的融合与发展, 不断推动协作机器人的性能向着更高的目标迈进, 为各行各业带来了革命性的变化和和价值。协作机器人技术框架如图 1 所示。



图 1 协作机器人技术框架

收稿日期: 2024-05-24

**作者简介:** 范玫杉(1982—), 女, 山西孝义人, 工程师, 研究方向为科研项目管理; 刘嘉(1974—), 女, 河南郑州人, 教授级高级工程师, 研究方向为科研项目管理; 通信作者马伟佳(1981—), 男, 黑龙江肇源人, 副研究员, 研究方向科研项目管理。

## 1.1 协作机器人规划与控制技术

协作机器人运动规划与控制技术是协作机器人完成操作与任务的技术基石。协作机器人的规划技术主要分为路径规划和轨迹规划两大类。路径规划的核心任务是确定一条从起点到终点的路径,确保机器人在移动过程中既安全又高效,且不会与任何障碍物发生碰撞。快速扩展随机树(rapidly exploring random tree, RRT)算法是路径规划中广泛使用的基础算法,它是一种单次查询算法,能够节省路径图的预先构建时间。刘建宇和范平清<sup>[4]</sup>设计了一种基于 RRT\*-connect 算法,使用梯度下降保证路径平滑并基于目标偏置策略加速算法的收敛。Cao 等<sup>[5]</sup>加入目标重力对提出的算法进行加速,并联合遗传算法等技术进一步优化路径。但这两种优化算法计算效率较低,高频率规划困难。Wei 和 Ren<sup>[6]</sup>针对在动态和非结构化环境中与人类协作的机器人的运动规划挑战,基于 RRT 算法进行了优化,采用以目标为驱动节点扩展策略,优化了采样过程,从而显著提高了路径规划的速度和效率。轨迹规划的概念是通过算法设计一个时间-轨迹的序列,这个序列能够确定机器人关节和末端的状态,机器人的系统基于这个序列展开控制。常见的轨迹规划方法包括关节空间轨迹规划、笛卡尔空间轨迹规划等,具体包括三次多项式方法、五次多项式方法、S-曲线方法、样条法、时间最优方法等。三次、五次及多次多项式插值轨迹规划方法是较早采用的机器人规划方法,这类方法具有较小的计算复杂度,但其生成的轨迹较真实的估计差异较大<sup>[7]</sup>。Alessandro 和 Vanni<sup>[8]</sup>基于三次样条差值方法进行机器人轨迹规划方法的研究,所提出的方法具有约束少、运算快的特点,但也因为规划轨迹的抖动特性增加了机器人的磨损。样条曲线法是较多项式插值法有所增加的轨迹规划方法,但随着机器人硬件算力的提高,这类方法在平滑性方面的优势使之越来越受到研究者的青睐。近些年,机器人轨迹规划的精度和稳定性进一步提高,研究者们进一步提出了 B 样条曲线插值轨迹规划方法、优化的五次 B 样条插值方法,并实现了高阶连续的运动轨迹<sup>[9]</sup>。

协作机器人的控制技术是确保机器人能够精确跟踪预定轨迹的关键。PID(proportional integral derivative)控制方法是控制领域中一种常用的经典控制方法,也是机器人领域中较为常用的方法,但这种方法比较适合轨迹控制精度要求较低、机器人

负载较小且机器人运行速度较慢的应用场景。对于目前机器人常用部署环境,如轨迹复杂且对速度要求严格的协同搬运场景、轨迹精度要求较高的焊接场景等精细操作场景中,PID 控制方法往往难以满足。针对这些精细化操作场景,基于动力学的机器人控制方法及相关动力学参数辨识、状态估计等方法变得越来越受关注。常用的基于动力学的机器人控制方法包括计算力矩控制、最优控制、鲁棒控制、柔顺控制、自适应控制、滑模变结构控制以及自适应鲁棒控制<sup>[10]</sup>等多种策略。上述常用的基于动力学的机器人控制方法中,计算力矩控制方法、最优控制方法在处理动力学参数变化、环境干扰及操作负载变化等系统内外部变化方面具有较差的适应性。针对这种情况,鲁棒控制在控制系统设计时对系统不确定性和环境扰动进行了考虑和应对,这也使得该方法具有稳态跟踪误差等控制性能<sup>[11]</sup>。自适应控制考虑了系统参数的变化,通过实时识别系统参数以对控制器参数进行动态优化。滑模变结构控制在系统触及滑模面时,能显著增强对干扰的抵抗能力,但同时也可能引发系统的振荡现象。在较新的机器人控制研究中,Zhu 等<sup>[12]</sup>提出自适应鲁棒控制策略,所提的方法具有较好瞬态和稳态控制性能,并对于系统和环境中的各种不确定性干扰有较好的适应性。

## 1.2 多模感知技术

协作机器人与环境的物理交互控制要求其具有多种感知能力。通过不同的传感器采集多种模态信息,协作机器人能够全面且准确地感知本体和外界环境的变化。这种多模感知技术使机器人能够综合考虑不同感知模态的信息,准确地识别障碍物、测量距离和形状,这使得机器人能够作出恰当的反应,确保其在与环境的互动中既安全又高效。

协作机器人配备的传感器可分为接触式和非接触式两种类型。在常规操作中,这些机器人主要通过非接触式传感器如摄像头和激光雷达,来收集工作空间的环境数据。对于需要直接物理接触的任务,如抓取或装配,机器人则依赖接触式传感器来实现精确的人机协作。机器人视觉领域的研究目前正处于高速发展阶段,高效的算法设计正在帮助弥补硬件性能的不足。桑海峰和田秋洋<sup>[13]</sup>利用 Kinect 相机获取人体关节点,并提出快速动作识别算法,从而识别人类动作,完成人机交互功能。Tsuji 和 Kohama<sup>[14]</sup>提出了在机器人末端安装飞行时间(time of flight, ToF)传感器,用于感知机器人

与周边物体的距离,保证人机安全。Ren等<sup>[15]</sup>利用扭矩传感器进行碰撞检测,以保证人机协作的安全。Maric等<sup>[16]</sup>提出一种机器人打磨方法,利用配备了扭矩传感器/力传感器的机器人,检测打磨工具与零件间的力和扭矩,完成复杂形状的零件表面精细打磨。张秀丽和韩春燕<sup>[17]</sup>设计了一款可穿戴式触觉检测设备,可以有效地检测协作机器人碰撞。此外,为了降低成本,某些机器人设计中省略了额外的扭矩传感器。柯显信等<sup>[18]</sup>建立多传感器系统进行机器人的定位,选用红外传感器、声音传感器和双目视觉传感器3种传感器。结合3种传感器的优势,可以发挥更好的识别与定位效果。

事实上,单一模态的感知总存在各种局限,因此,多模态感知技术通过将来自不同传感器的数据进行整合和分析,从而实现对机器人周围环境的全面感知和理解。在当前的研究中,学者们致力于开发各种多传感器融合算法,以应对复杂多变的工作环境,并提高机器人的感知精度和决策能力。Sloth和Iturrate<sup>[19]</sup>使用触觉与本体觉估计接触点位置与法线方向,用于机器人的手指操作。黄兆基等<sup>[20]</sup>利用视触觉模态信息融合实现了高效的机器人抓取滑动检测。付天宇等<sup>[21]</sup>设计了力位混合协同控制器,将本体与力的感知用于机器人协同缝制。这些多传感器融合感知技术的研究不仅提高了协作机器人的感知能力,还拓展了其在各个领域的应用潜力。

### 1.3 机器人操作技能学习与决策

机器人操作技能学习与决策<sup>[22-24]</sup>是机器人领域的重要研究方向,旨在使机器人能够通过学习和决策来执行各种任务。该领域涵盖了多个学科领域,包括机器学习、人工智能、控制论和计算机视觉。基于模型的方法具有精确的感知、建模和控制,往往能够实现高效的机器人操作任务,如轴孔装配。通过利用视觉信息调整对准位姿和对轴孔之间的接触状态进行建模,可以得到非接触式混合控制策略机器人的适用性条件<sup>[25]</sup>。此外,基于数据的方法常用于解决机器人操作任务。融合了图像、力和深度信息的深度强化学习在装配任务中表现出了优异的性能<sup>[26]</sup>。此外,强化学习可以获得一组可微的滤波器<sup>[27]</sup>,可以从失败的装配尝试中利用触觉感知运动轨迹,有效地缓解位置不确定性。利用分层强化学习可以将任务分解为高层任务和低层任务<sup>[28-29]</sup>,高层任务用来生成高层控制策略,低层任务用来生成低层控制策略,通过高层策略的输出

选择合适的低层策略。此外,通过融合多源异构数据的产品数字孪生建模方法以及基于知识推理的机器人装配作业过程数字孪生建模方法<sup>[30]</sup>,可以实现机器人装配任务的快速规划和仿真验证,从而进一步提升机器人装配任务规划的自主性和效率。针对稀疏奖励下的复杂任务学习,以及其在机器人操作技能学习中的应用,基于元生成内在奖励框架<sup>[31]</sup>被用来将复杂任务分解为多个子任务,并对这些子任务进行能力评价。并且引入了一个生成内在奖励模块,将智能体在探索中获得状态的新颖性作为内在奖励。这样的内在奖励与环境奖励共同指导智能体完成对环境的探索和特定任务的学习。近年来,迁移学习可以帮助机器人将已学习的技能迁移到新任务上,并能够更快地适应新任务,这对于机器人在不同场景下灵活应对具有重要意义。未来的机器人将具备更强的自主学习和自适应机制,能够根据环境变化和任务需求自主调整学习策略和操作行为。

### 1.4 本质安全与人机协作

“安全与协作”是未来机器人发展的重要方向。协作机器人具有安全、开放、高效的特点<sup>[32]</sup>,旨在与人类共同工作完成某项任务,在完成任务的过程中通过柔顺控制、碰撞检测、人机意图识别等方法,提高生产任务的安全性与灵活性,从而大幅提高生产效率。

文献<sup>[33]</sup>划分了3种协同安全的方法:①通过技术手段实现机器人的功率和力量的值在某一个安全范围内;②利用现有的各种外部传感器如3D相机系统、接近觉传感器等来检测未来可能发生的接触并提前给出动作规划,避免碰撞的发生;③在协作机器人执行任务的过程中,通过使用调节机器人的动作来避免未来可能发生的碰撞或危险。文献<sup>[34]</sup>将操作人员与机器人之间的关系等效为线性弹簧阻尼模型,操作人员与机器人之间的距离越大,弹簧阻尼施加在协作机器人上的阻力就越小,反之则越大。Jin等<sup>[35]</sup>提出了一种迁移强化学习与柔顺控制结合的协同控制策略,通过动作分割技术实现了力控制输出的动作与迁移强化学习输出的动作在时间上对齐,以强化学习策略为主,柔顺控制策略作为安全调节的保障,提升了协作机器人在装配过程中的柔顺性与安全性。此外,协作机器人另一大优势是利用机器人对人类的意图推理与识别实现人机的协同控制。在实际生产生活中,复杂任务的人机物协同操作需求下存在传感器反

馈信息与人类意图偏见的问题,此时利用基于视觉、操作指令、触觉等多模态大模型的人类意图理解与高层语义表征方法,通过考虑协作机器人等的操作性能与指令格式,让不同的协作机器人能够根据输入的操作指令进行分工合作,实现对复杂任务的自动解析与分配。Yohanan<sup>[36]</sup>通过大量研究发现,在人与机器人协同作业的过程中,触觉这一模态是最为直接与高效的交互方式,通过触觉直接实现深度的接触与交互在人机协作中具有重要的意义。此外,交互情景的再现也是人机协同作业研究的一个重要方向。利用触觉感知学习,机器人能够学习人的引导,并完成情景再现,这在示教编程中是一个典型应用。由于机器人具备反向驱动能力和弹性关节的被动柔顺性,即使是非专业人员也可以通过拖动机器人来示教复杂的运动任务,无需专业编程技能,从而大大提高了生产效率。

## 2 协作机器人产业分析

### 2.1 国际产业发展情况

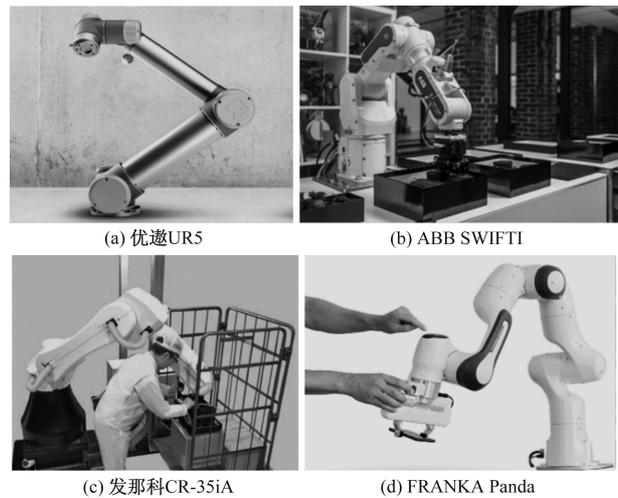
目前,推出协作机器人的厂商在全球已超过50家。2022年,全球协作机器人市场规模增长17.2%,达到9.54亿美元;出货量增长21.9%,达到37780台。最具代表性的生产协作机器人的企业包括优傲、ABB、发那科、库卡、安川等知名企业<sup>[37]</sup>。

其中,优傲公司推出的UR5[图2(a)]六轴协作机器人是首款具有协作概念的商用机器人,并在随后更新迭代出UR20、UR30,其在大幅度提高了协作机器人有效负载的同时,保留了优傲机器人一直以来的灵活易用性、安全等特点,同时保证了高精度,其重复精度为 $\pm 0.05$  mm,在点胶、焊接等高精度场景中表现出色。

ABB继发布YuMi<sup>[38]</sup>双臂协作机器人和单臂协作机器人之后,新推出了GoFa系列和SWIFTI[图2(b)]系列<sup>[39]</sup>。GoFa有多种载荷选择和95 cm的臂展,可用于物品搬运、包装和螺钉安装等。SWIFTI<sup>[40]</sup>系列协作机器人将工业级速度与协作安全性提升至新高度,通过实时检测人与机器人之间的距离来调整其速度,以确保对人类没有伤害。

发那科推出的六轴协作机器人CR-35iA[图2(c)],被称为协作机器人中的“绿巨人”<sup>[41]</sup>,有效负载35 kg,内置IRVision视觉系统,具有意外接触停止功能。发那科随后进行了轻量化产品补充,陆续推出了CR系列以及CRX系列。KINOVA公司推出JACO2、Gen3协作机器人,在扶残助老、家庭服务

中得到了良好的应用。Franka Emika推出的Panda[图2(d)]协作机械臂可以在复杂环境下实现精确碰撞检测,在安全协作方面性能优越<sup>[42]</sup>。

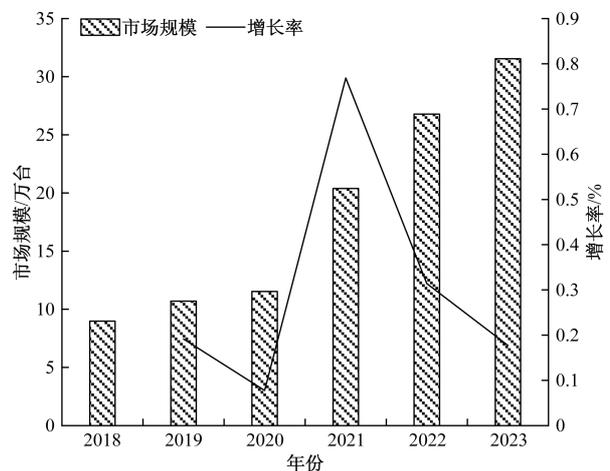


图片来源:优傲、发那科、FRANKA、ABB机器人官网

图2 国外协作机器人

### 2.2 国内产业发展情况

中国作为全球最大的协作机器人市场,在协作机器人核心技术领域常年深耕,技术竞争力强,市场占有率高,目前已形成完整的协作机器人产业链,具备从上游核心零部件到中游本体制造再到下游系统集成与应用的全产业链自主生产与配套能力。目前人机协作已列入《智能制造2025》和《新一代人工智能发展规划》重点支持研究计划<sup>[43]</sup>,多重利好政策加持下,协作机器人行业迎来更大的发展契机,中国协作机器人销量快速增加,2022年协作机器人销量超过1.9万台,同比增长23.5%。中国协作机器人市场规模及增长率如图3所示。



数据来源:高工产研机器人研究所(GGIID),2023年3月

图3 中国协作机器人市场规模及增长率

沈阳新松(SIASUN)于2015年推出了七轴协作机器人[图4(a)],支持拖动示教、碰撞检测、视觉识别等功能。遨博智能科技有限公司于同年推出了一款轻型协作机器人 AUBO-i5,自重24 kg,安全性极高,操作简单灵活。该机器人实现了操作系统、控制系统和关键部件的全部国产化<sup>[44]</sup>。珞石机器人推出了新一代 xMate 系列七自由度柔性协作机器人[图4(b)],具有高灵敏度感知,支持拖动示教、精准力控,在高端制造和辅助医疗行业具有良好的应用前景。艾利特公司发布了全新的 CS 系列协作机器人[图4(c)],提供了可视化的交互界面的模块化的编程方式。上海节卡机器人推出 All-in-one 系列[图4(d)],Zu 系列和 JAKA-C 系列共融协作机器人<sup>[45]</sup>,深度融合了视觉信息和六维力控信息,该公司的无线示教和图形化编程技术已成为行业标准。Elephant Robotics 发布了世界上最小的6轴机器人手臂 myCobot,具有良好的可用性和安全性,而且噪声低。



图片来源:新松、珞石、艾利特、节卡机器人官网

图4 国内协作机器人

与发达国家相比,尽管中国在协作机器人领域的研究起步较晚,但近年来,国内协作机器人推出了许多性能不逊于国际知名品牌的新产品,技术也取得了显著突破。在国内协作机器人市场领域,国产的协作机器人品牌占据了超七成的市场份额,部分协作机器人产品甚至销往国外。但是,国内协作机器人仍存在某些不足,如产品同质化程度高、稳定性差,并且直驱电机、力矩传感器等核心零部件匮乏等。

### 3 技术与产业发展趋势

#### 3.1 技术发展趋势

(1)由感知智能向具身智能转变。随着深度学

习和强化学习等人工智能技术的不断成熟,借助先进的传感器技术,协作机器人将更加智能化,能够实现更加精准的环境多模态感知和人类复杂意图理解,根据环境变化和任务要求进行复杂的决策、自主学习和环境适应。

(2)作业方式由简单作业向以拟人灵巧作业为特征的精细技能型作业转变。目前机器人存在灵活性不足、软能力弱、与最先进的信息技术融合深度不足等问题,导致机器人无法完成人类所期望的复杂灵巧作业任务。未来机器人将具备更好的结构灵巧性、具备类人技能学习和智能增殖、与新一代信息技术深度融合,帮助/替代人类完成更多灵巧性工作。

(3)人机关系由物理空间隔离向物理与信息双向交互的人机共融转变。未来协作机器人将更加注重人机交互的友好性和效率性。采用更先进的传感器技术和自然语言处理、手势识别、面部表情解析等技术,研究多源异构信息融合方法,使机器人更安全地进行物理接触,更准确地理解人类意图,实现人机自然的物理与信息交互。

#### 3.2 产业发展趋势

(1)品类丰富化与边界模糊化。随着协作机器人向高负载、高精度、高柔性等方向发展,导致协作机器人与传统工业机器人之间的界限变得模糊,品类丰富化与边界模糊化的趋势愈发明显。同时,市场需求不断多样化和个性化,协作机器人的应用领域从传统的制造业拓展到医疗辅助、物流仓储、家庭护理等更广泛的领域。企业将提供定制化的协作机器人解决方案,以满足不同行业和用户的需求,包括功能、外形、工作场景等方面的定制化。

(2)拓展协作机器人非传统行业的应用。除了传统的汽车行业、机械加工行业、3C 电子行业等工业场景的应用外,协作机器人还在非工业场景正在实现更广泛应用,如医疗健康行业、餐饮行业、农业以及新零售行业等,在手术按摩、咖啡拉花、果蔬采摘等技能操作上实现更深层次的应用。

(3)产业链生态标准化与完善化。为了应对市场需求的多样性,行业标准和开放生态的建设将成为重要趋势。通过标准化,促进不同厂商和设备之间的兼容和互操作;通过构建开放生态,鼓励更多的创新和协作,推动协作机器人产业生态健康发展。

### 4 结论

通过上述对协作机器人技术特点、产业发展情况和发展趋势的分析,得到以下结论。

(1)中国在协作机器人的技术积累、市场应用、产业规模和成本效益方面迅速发展,表现出强大的市场潜力和应用扩展能力,但是在产品稳定性与一致性等方面尚存在不足。未来,随着全球协作机器人技术的不断进步和国际合作的加深,中外在协作机器人领域的差异有望逐渐缩小。

(2)协作机器人从传统行业向非传统行业快速渗透。随着新消费、新零售、新餐饮等商业业态兴起,催生了更加多元化的机器人研发与应用需求,将有力推动协作机器人应用领域与场景的进一步拓展。由于具有安全易用、灵活智能等先天优势,协作机器人也打破了传统机器人应用场景的边界,从工业制造向商业服务、医疗健康、科研教育、农业养殖等领域快速拓展,在越来越多的场景中得到落地。

(3)协作机器人正迅速向更高的智能化和自主性发展。大模型技术使得机器人能够利用大规模数据进行深度学习和理解,从而更好地感知和解释环境,实现更加智能化的行为。具身智能技术使得机器人能够更好地理解人类的动作、语言和意图,从而更加自然地与人类进行交互和协作。这些技术的结合使得协作机器人能够更加灵活、智能地应对不同的工作场景和任务要求,为人类提供更加高效、便捷的工作支持和协作体验。

### 参考文献

- [1] 崔朝宇,伍国梁. 协作机器人性能标准研究与发展趋势[J]. 品牌与标准化, 2024(1): 51-53, 57.
- [2] YING K C, CHEN C Y, WANG L X. Fuzzy Q-Learning interaction controller design for collaborative robot[J]. *Cobot*, 2022, 11: 1-21.
- [3] 李丁丁,石秀敏,邓三鹏,等. 协作机器人产业技术与发展趋势综述[J]. 装备制造技术, 2021(8): 73-76.
- [4] 刘建宇,范平清. 基于改进的 RRT\*-connect 算法机械臂路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(6): 274-278.
- [5] CAO X, ZOU X, JIA C, et al. RRT-based path planning for an intelligent litchi-picking manipulator[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 156: 105-118.
- [6] WEI K, REN B. A method on dynamic path planning for robotic manipulator autonomous obstacle avoidance based on an improved RRT algorithm[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 571.
- [7] DUDITZA F, DIACONESCU D, GOGU G. Structural and geometrical systematization of spatial positioning kinematic chains employed in industrial robots[M]. Boston, MA: Springer, 1987.
- [8] ALESSANDRO G, VANNI Z. A technique for time-jerk optimal planning of robot trajectories[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2008, 24(3): 415-426.
- [9] LI Y, TIAN H, CHETWYND D G. An approach for smooth trajectory planning of high-speed pick-and-place-parallel robots using quintic B-splines[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2018, 126: 479-490.
- [10] 刘镇震. 协作机器人动力学建模与控制[D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- [11] CHEN Y H. Fuzzy dynamical system approach to the observer design of uncertain systems[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2010, 224(5): 509-520.
- [12] ZHU X, TAO G, YAO B, et al. Adaptive robust posture control of parallel manipulator driven by pneumatic muscles with redundancy[J]. *Automatica*, 2006, 39(16): 764-769.
- [13] 桑海峰,田秋洋. 面向人机交互的快速人体动作识别系统[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(6): 101-107, 167.
- [14] TSUJI S, KOHAMA T. A general-purpose safety light curtain using ToF sensor for end effector on human collaborative robot[J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2020, 15(12): 1868-1874.
- [15] REN T, DONG Y, WU D, et al. Collision detection and identification for robot manipulators based on extended state observer[J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 79: 144-153.
- [16] MARIC B, MUTKA A, ORSAG M. Collaborative human robot framework for delicate sanding of complex shape surfaces[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 2848-2855.
- [17] 张秀丽,韩春燕. 协作机器人触觉传感装置的设计与碰撞实验[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(4): 88-95.
- [18] 柯显信,张文朕,杨阳,等. 仿人机器人多传感器定位系统[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(7): 1247-1252.
- [19] SLOTH C, ITURRATE I. Simultaneous contact point and surface normal estimation during soft finger contact[C]//20th International Conference on Advanced Robotics(ICAR). Ljubljana, Slovenia: IEEE, 2021: 19-25.
- [20] 黄兆基,高军礼,唐兆年,等. 基于注意力机制和视触融合的机器人抓取滑动检测[J]. 信息与控制, 2024(2): 191-198.
- [21] 付天宇,李凤鸣,崔涛,等. 基于视觉/力觉的机器人协同缝制系统[J]. 机器人, 2022, 44(3): 352-360.
- [22] 刘乃军,鲁涛,蔡莹皓,等. 机器人操作技能学习方法综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(3): 458-470.
- [23] 秦方博,徐德. 机器人操作技能模型综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(8): 1401-1418.
- [24] 宋越杰,马陈昊,孟子晗,等. 基于逆强化学习与行为树的机械臂复杂操作技能学习方法[J]. 现代电子技术,

- 2024, 47(7): 133-139.
- [25] XU J, LIU K, PEI Y, et al. A noncontact control strategy for circular peg-in-hole assembly guided by the 6-DoF robot based on hybrid vision[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2022, 71: 3509815.
- [26] LEE M A, ZHU Y K, ZACHARES P, et al. Making sense of vision and touch; learning multimodal representations for contact-rich tasks[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2020, 36(3): 582-596.
- [27] ZACHARES P A, LEE M A, LIAN W, et al. Interpreting contact interactions to overcome failure in robot assembly tasks[C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Xi'an: IEEE, 2021: 3410-3417.
- [28] HOU Z, YANG W, CHEN R, et al. A hierarchical compliance based contextual policy search for robotic manipulation tasks with multiple objectives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(4): 5444-5455.
- [29] FUNK N, MENZENBACH S, CHALVATZAKI G, et al. Graph-based reinforcement learning meets mixed integer programs: an application to 3D robot assembly discovery[C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Kyoto: IEEE, 2022: 10215-10222.
- [30] 刘达新, 王科, 刘振宇, 等. 基于数据融合与知识推理的机器人装配单元数字孪生建模方法研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(5): 36-50.
- [31] 吴培良, 渠有源, 李瑶, 等. 基于元生成内在奖励的机器人操作技能学习方法[J]. *计量学报*, 2023, 44(6): 923-930.
- [32] 李轲昕. 节卡机器人: 以协作机器人推进渐次自动化[J]. *机器人产业*, 2023(3): 42-44.
- [33] MICHALOS G, MAKRIS S, TSAROUCI P, et al. Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 37: 248-253.
- [34] VEMULA B, MATTHIAS B, AHMAD A. A design metric for safety assessment of industrial robot design suitable for power-and force-limited collaborative operation[J]. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2018, 2(2): 226-234.
- [35] JIN L, MEN Y, SONG R, et al. Robot skill generalization; feature-selected adaptation transfer for peg-in-hole assembly[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(3): 2748-2757.
- [36] YOHANAN S J. The haptic creature: social human-robot interaction through affective touch[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 2012.
- [37] 2023 world robotics report[R]. Frankfurt: International Federation of Robotics, 2023.
- [38] MICHALÍK R, JANOTA A, GREGOR M, et al. Human robot motion control application with artificial intelligence for a cooperating Yumi robot [J]. *Electronics*, 2021, 10(16): 1976.
- [39] ZHANG A. Collaborative robots-enabling SMEs to automate in post-pandemic world[C]//*ISR Europe 2022. 54th International Symposium on Robotics*. Munich: VDE, 2022: 1-7.
- [40] HUANG S, GAO M, LIU L, et al. Collision detection for cobots; a back-input compensation approach [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(6): 4951-4962.
- [41] 刘洋, 孙恺. 协作机器人的研究现状与与技术发展分析[J]. *北方工业大学学报*, 2017, 29(2): 76-85.
- [42] 黄海丰, 刘培森, 李擎, 等. 协作机器人智能控制与人机交互研究综述[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(4): 780-791.
- [43] HE W, LI Z J, CHEN C L P. A survey of human-centered intelligent robots; issues and challenges [J]. *IEEE/CAA J Autom Sin*, 2017, 4(4): 602.
- [44] 周鹏云. 遨博智能: 做强中国协作机器人[J]. *中关村*, 2021(4): 58-59.
- [45] 玑微. 节卡发布 C 系列协作机器人[J]. *机器人技术与应用*, 2021(2): 14.

## Collaborative Robotics Technology and Industry Analysis

FAN Meishan, LIU Jia, MA Weijia

(Industry Development and Promotion Center Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Beijing 100017, China)

**Abstract:** As the manufacturing industry transforms towards intelligence and flexibility, collaborative robots, a robotic system that can work alongside humans have received widespread attention and application. An overview and analysis of the technological and industrial development of collaborative robots was provided. The development history of collaborative robots was reviewed, highlighting their importance in modern industrial and service sectors. Besides, the technological advancements of collaborative robots were analyzed, including planning and control, multimode sensing technology, robot skill learning and decision making idntrinsically safe and human-machine collaboration. Through a comparative analysis of industrial development both domestically and internationally, the trends in technology and industry development were forecasted, providing references and insights for the research and development in the field of collaborative robots.

**Keywords:** collaborative robot; intelligence; human-computer collaboration; manufacturing