

工业协作机器人研究热点及可视化分析

陆宁¹, 李娟¹, 金林轶²

(1. 西华大学 美术与设计学院, 成都 610039; 2. 拉夫堡大学设计与创意艺术学院, 拉夫堡 LE11 1TU)

摘要: **目的** 从学术文献的角度梳理、分析和归纳国内外工业协作机器人从 1996 年至 2022 年的研究发展历程、热点演化及研究趋势, 为研究和创新提供参考。**方法** 采用 CiteSpace 软件, 分别选取国际 Web of Science 核心合集数据库和中国知网 CNKI 数据库的文献样本, 对协作机器人的发文量时空分布、关键词共现、聚类和时间线等多类知识图谱进行可视化分析, 并从协作机器人的前沿技术、人-机-环交互、智能应用三个方面进行归纳阐述。**结论** 发文量及关键词聚类时间线表明, 国际、国内对协作机器人的研究历程均经历了萌芽期、探索期、快速发展期三个阶段; 关键词共现和聚类分析表明, 国际协作机器人的研究从聚焦技术转向关注人因方面, 国内研究目前还处在技术创新阶段, 而可靠的安全标准、直观的交互界面、人本的职业健康(人体工程学和人为因素)、共享的空间设计等也是未来值得关注的热点议题。

关键词: 协作机器人; CiteSpace; 研究热点; 可视化分析

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)04-0393-13

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.04.050

Research Hotspots and Visual Analysis of Industrial Collaborative Robot

LU Ning¹, LI Juan¹, JIN Lin-yi²

(1. School of Art and Design, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Design School, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, UK)

ABSTRACT: The work aims to comb, analyze and summarize the research and development history, hotspot evolution and research trends of industrial collaborative robots at home and abroad from 1996 to 2022 based on the perspective of academic literature, so as to provide reference for research and innovation. CiteSpace software was used to select literature samples from the Web of Science core collection database and the CNKI database and visualize the multi-type knowledge graphs such as the time-space distribution of publications on collaborative robot, key word co-occurrence, clustering and timeline. Summary and analysis were carried out from three aspects of cutting-edge technology of collaborative robot, human-machine-environment interaction, and intelligent applications. According to the publications and the timeline of key word clustering, the international and Chinese researches on collaborative robot have gone through three stages: the budding period, the exploration period, and the rapid development period. From key word co-occurrence and cluster analysis, the international research on collaborative robot has shifted from focusing on technology to focusing on human factors. The research in China is still in the stage of technological innovation, while reliable safety standards, intuitive interactive interfaces, human-oriented occupational health (ergonomics and human factors), shared space design, etc. are also hot topics worthy of attention in the future.

KEY WORDS: collaborative robot; CiteSpace; research hotspots; visual analysis

收稿日期: 2022-10-30

基金项目: 四川省哲学社会科学重点研究基地——现代设计与文化研究中心项目(MD22E024); 四川省哲学社会科学重点研究基地现代设计与文化研究中心项目(MD22E032)

作者简介: 陆宁(1984—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为人机工程及工业产品设计。

通信作者: 李娟(1985—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为信息交互及人机工程。

随着全球劳动力成本的不断增加,制造企业需要开发新技术以提高生产率。机器人技术的更新迭代,使人机协作显示出巨大潜力,协作机器人被广泛地应用在工业、物流、医疗、航空等领域。一方面,协作机器人与传统机器人相比更灵活、高效,它将工人从具有重复性或潜在风险的任务中解脱出来;另一方面,协作机器人多为轻量化设计,成本更低,占地面积更小,更容易集成到现有工作流程中。据国际机器人联合会(IFR)统计,2019年,协作机器人的安装量占工业机器人的4.8%,比2018年增长11%,预计到2030年,协作机器人的市值将超过118亿美元^[1]。工信部统计数据显示,2022年我国已成为全球最大的工业机器人市场^[2]。随着《中国制造2025》《“十四五”机器人产业发展规划》等政策的推进,机器人成为我国建设制造强国的重要领域之一^[3]。本研究聚焦工业制造环境中的协作机器人,通过文献计量法梳理1996年至2022年国内外协作机器人的研究文献,运用CiteSpace对国内外工业协作机器人文献量的时空分布、关键词共现、聚类和时间线进行可视化分析,为协作机器人的研究和创新提供参考。

1 工业协作机器人的定义与发展概述

1.1 协作机器人的定义

在国际工业机器人安全标准ISO 10218-1中,协作机器人(Collaborative Robot或Cobots)是指在协作区域内,可以与人进行直接交互的机器人。其中“协作区域”是指机器人和人可以同时作业的区域^[4]。一般来讲,协作机器人的结构包含机械臂、末端执行器、制动器、控制器等,简易结构如图1所示。与传统的工业机器人不同,协作机器人无需防护装置,可以与工人一起工作,协作机器人一般使用柔性材料,采用安全控制、力限制、传感器等设计,可以避免工人在作业时因误触而导致的受伤,或最大限度地减少接触时的不适感。除了安全特性外,协作机器人的设计更为灵活,末端执行器可以适配多种工具,简易的操控和编程程序,更低的成本,比传统机器人显示出更多优势^[5]。

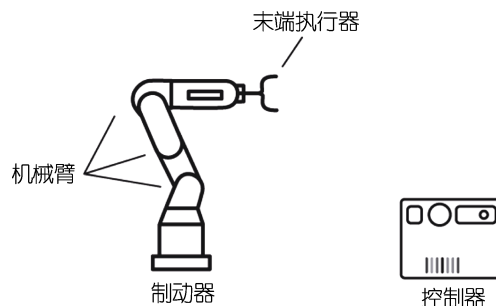


图1 协作机器人的简化结构^[6]
Fig.1 Simplified structure of collaborative robot^[6]

国际机器人联合会IFR根据人与机器人工作模式的不同,将人机协作方式分为以下五种:独立、共存、顺序合作、合作、响应式协作^[7],如图2所示。

第一种为独立模式,此时工人与机器人各自独立作业,机器人在安全围栏里操作,该模式并非真正的协作场景;第二种为共存模式,工人和无围栏的机器人一起工作,但不共享工作空间;第三种为顺序合作模式,工人和机器人共享一个工作空间,但在工作流程中的任意时刻只有一方出现在工作空间中;第四种为合作模式,工人和机器人在共享的工作空间中同时执行任务,但他们不会同时刻在同一产品或组件上工作;第五种为响应式协作模式,工人和机器人同时在同一组件上工作,机器人实时响应工人的动态。前三种工作模式在传统工业制造领域比较常见,机器人自动作业,或是在有限的指导下执行一系列重复、复杂的作业,在工作中需要安全围栏防护,不用考虑和工人的近距离互动。随着协作机器人的出现,机器人与工人直接、实时的协作模式,降低了工人重复枯燥的工作强度,提高了企业的生产效率,但对机器人系统、结构和安全标准等方面也提出了更高的要求。

1.2 协作机器人的发展概述

1996年西北大学的Colgate等^[9]首次发明了协作机器人。协作机器人是由通用汽车的原型发展起来的,通用汽车公司通过设计“智能协助装置”来实现物料搬运及汽车组装等作业,工人通过操控给装置提

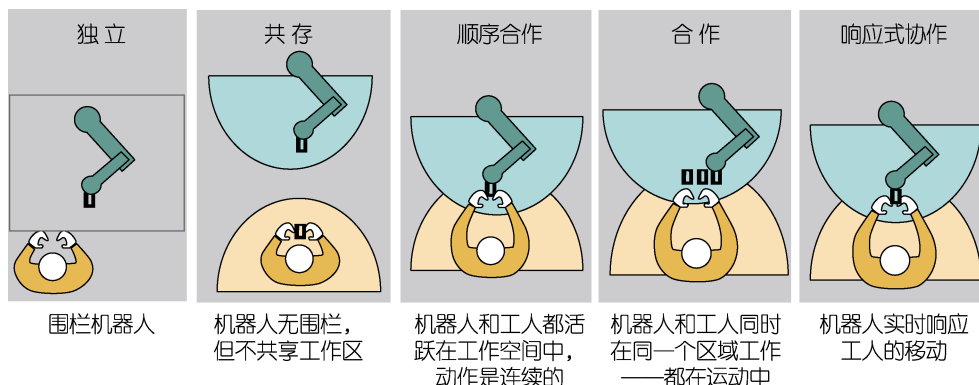


图2 人与机器人的协作模式^[8]
Fig.2 Human-robot collaboration model^[8]

供了原动力，这就是早期协作机器人的雏形^[10]。2005 年，随着旨在通过机器人技术助力中小企业提高生产力降低成本的欧盟项目的实施，协作机器人迎来了发展契机。协作机器人在不同行业均显示出独特的优势，越来越多的研究机构和企业开始研发协作机器

人^[11]。2016 年，国际标准化组织为了进一步规范协作机器人的运行系统和安全环境，发布了新的工业标准 ISOTS 15066-2016^[12]，以此推动了协作机器人的标准化生产。国际市场上主流协作机器人特征、应用场景及图例，如表 1 所示。

表 1 国际市场上主流协作机器人特征、应用场景及图例简介
Tab.1 Introduction to the characteristics, application scenarios and legends of mainstream collaborative robots in the international market

机器人/发布年份	公司/国家	特征	应用场景	部分产品图例
DLR-LWR III; 2003	Institute of Robotics and Mechatronics; 德国	单臂 7 自由度; 关节扭矩传 感器; 重 14 kg, 负载 14 kg 等	装配; 移动服务等	
DLR LWR 4; 2008	Kuka-DLR; 德国	单臂 7 自由度; 扭矩传感器 等	精细的组装; 复杂自动化 任务等	
UR3、UR5、UR10; 2015、 2008、2010	Universal Robots; 丹麦	单臂 6 自由度; 碰撞检测; 碰撞停止; 力矩传感器; 直 接编程速度降低等	打包; 码垛; 食品处理; 拾取和放置零件等	
Baxter; 2014	Rethink Robotics; 德国	双臂(7+7 自由度); 嵌入式 扭矩传感器; 视觉引导运动 和物体检测 等	取放; 五金冲压; 注塑、 吹塑成型; 打包等	
LBR iiwa; 2014	Kuka; 德国	单臂 7 轴; 接触检测; 碰撞 减速; 扭矩传感器等	机器照料; 码垛; 紧固; 测量等; 安装等	
YUMI(IRB14000); 2014	ABB; 瑞士	双臂 (每个 7 自由度); 无 碰撞路径; 轻臂、低负载等	手机; 电子及小零件装配 线等	
CR-35IA; 2015	FANUC; 日本	单臂六轴; 35 kg 有效载荷 等	零件组装、装配、金属加 工、包装等	
APAS; 2016	Bosch; 德国	非接触式触发传感器; 3D 立体相机; 二维单色相机等	取放; 打包; 机器照料等	
Franka Emika; 2017	Franka Emika; 德国	单臂七自由度; 应变式压力 传感器等	抓取、堵塞、插入和拧紧; 零件装配等	
UR e 系列 2018	Universal Robots; 丹麦	有效载荷最小 3 kg, 最高 16 kg; 多用途和多附件选 择; 安全限制等	组装; 插入; 搬运; 机器 照料抛光; 螺丝驱动等	
GoFa™ CRB 15000 2021	ABB 瑞士	增强与手臂侧界面的交互; TCP 速度 2.2 m/s; 有效载荷 5 kg 等	搬运; 机器照料; 组装; 拣选和包装; 螺丝驱动等	

我国的协作机器人发展相对较晚，2013 年，国家标准《工业机器人安全规范》GB11291-2-2013^[13]对协作机器人进行了明确定义，是指在规定的安全协作空间内，与人直接交互而设计的机器人，机器人与人在生产活动中可同时执行任务。该定义中强调了安全的协作空间，这与当时工人普遍对协作机器人的接受度不高有关，“安全”是协作机器人技术的重要标准之一。国内研究机构、大学和企业纷纷投入协作机

器人的研发工作，如 2014 年成立的哈工大机器人集团（后改名严格集团）、上海节卡机器人有限公司等紧跟国际趋势，开发出一系列协作机器人以满足不同作业场景的需求。2021 年，国内协作机器人在工业领域的应用占比超过 70%，并逐渐向服务领域延伸，其他领域如新能源领域的需求亦处于快速增长的态势。国内部分协作机器人特征、应用场景及图例，如表 2 所示。

表 2 国内部分协作机器人特征、应用场景及图例简介
Tab.2 Introduction to the characteristics, application scenarios and legends of mainstream collaborative robots in the Chinese market

机器人	公司/成立时间	特 征	应用场景	部分产品图例
HRG-C5E 等	严格集团(原哈工大机器人集团); 2014	碰撞检测和视觉监控; 复杂路径跟踪、顺滑倒角过渡; 重复定位精度 0.05 mm 等	自动化集成生产线、装配、拣选、焊接等	
JAKAZu7 系列等	上海节卡机器人有限公司; 2014	负载 7 kg, 工作半径 814 mm; 一体化关节设计; 图形化编程等	抛光打磨; 螺丝锁付; 包装; 喷涂; 焊接; 码垛等	
遨博海纳系列; i 系列等	遨博(北京)智能科技股份有限公司; 2015	3~20 kg 不同负载能力; 坐标定位、路径规划; 多种通讯方式等	自动化集成生产线、装配、拣选、焊接、打磨、喷涂等	
ELITE 六轴、七轴系列	苏州艾利特机器人有限公司; 2016	自主避障、自主路径规划、自主能耗评估、AR 交互等	3C 装配、智能物流分拣、医疗、教育、新零售等	
Elfin 系列	深圳大族机器人有限公司; 2017	双关节模块设计; 4/6 轴同轴结构; TCP 速度 2 m/s	自动化集成生产线、装配、拣选、焊接、打磨、喷涂等	

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

为保证数据来源的科学性和完整性，分别选取国际和国内权威数据库进行检索，国际期刊以 Web of Science（WOS）数据库的核心合集文献作为数据源，中文期刊以中国知网（CNKI）数据库的文献作为数据源。具体过程如下：在 WOS 核心数据库采用主题检索，主题词选择“Collaborative Robot*”或“Cobot*”（其中*代表该主题词的复数形式也在检索范围内）；在 CNKI 数据库中以主题词“协作机器人”或“人机协作”进行检索，文献时间设置为从协作机器人的发明年份 1996 年开始到 2022 年，分别筛选获得 WOS

数据库的样本文献 225 4 篇，CNKI 数据库的样本文献 464 篇，检索时间为 2022 年 10 月 15 日。

2.2 研究方法

随着数据挖掘、信息分析和图形渲染技术的发展，利用软件 CiteSpace 可对大量文献数据进行分析，通过数据可视化结果将知识单元或知识群间的网络、演化等隐含关系以图谱的形式直观展现出来^[14-15]。本研究采用 CiteSpace6.1.R2 版本软件，从国内外文献数据库中进行检索并筛选出协作机器人相关的研究文献，运用发文量分析、关键词共现分析、关键词时区图谱等方法，对国内、外期刊协作机器人研究的基本情况、发展脉络、研究重点进行梳理，并以可视化信息图谱的方式来反映该领域的热点及未来趋势。

3 工业协作机器人研究文献的时空分布

3.1 发文时间分布

将筛选出的文献数据导入 CiteSpace, 分别分析协作机器人研究文献的国际、国内年度发文量, 如图 3 所示, 蓝色和橙色曲线分别代表 WOS 核心数据库和 CNKI 数据库相关文献的年度分布, 整体呈现增长趋势。

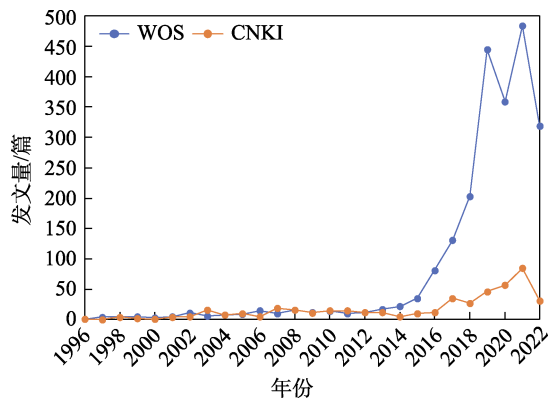


图 3 国际、国内协作机器人发文数量分布图
Fig.3 Distribution of publications on collaborative robot at home and abroad

在 WOS 中检索到主题为“协作机器人”的最早的文章于 1999 年发表在《Industrial robot》期刊上^[16], 作者是协作机器人的发明者 J. Edward Colgate 和 Michael Peshkin 教授, 该文章对协作机器人做了详细的定义。2015 年以前, 国际年发文量低于 10 篇, 表明此时对协作机器人的研究处于探索阶段。从 2016 年开始, 国际发文量开始缓慢增加, 到 2018 年达到 67 篇。从 2019 年开始, 国际发文量迅速增长, 年发文量超过 100 篇, 并于 2021 年达到顶峰 (310 篇)。CNKI 数据库发文趋势显示, 从 1996 年至今, 国内发文量均未超过 100 篇, 2016 年以前, 年发文量在 20 篇以下, 从 2017 年 (35 篇) 开始快速增长, 于 2021 达到峰值 (85 篇)。可以看出, 国内在协作机器人领域的研究发展较为缓慢, 但国际、国内发文量在 2021 年均达到最高值, 表明近两年越来越多的学者开始关注协作机器人的研究。

3.2 发文空间分布

统计各国协作机器人研究的产出总量发现, 美国、意大利、中国、德国、法国是该领域发文产出数量较多的国家, 中心性表示该国家在该领域研究中的影响力。如表 3 所示, 发文量最多的是美国 (338 篇), 其次是意大利 (292 篇), 中国的国际发文量排第三位 (212 篇)。中国的发文起始年为 2003 年, 中心性排名第三, 表明虽然中国在国际期刊上的发文时间较晚, 但依然具有一定影响力。美国的发文量与中心性均位居第一, 发文起始年为 1997 年, 表明美国最早开始研究协作机器人, 且在该领域的研究影响力位居榜首。

表 3 协作机器人研究发文量前 5 位的国家
Tab.3 Top 5 countries of publications on collaborative robots

序号	发文量/篇	中心性	起始年	国家
1	338	0.23	1997	美国
2	292	0.18	2008	意大利
3	212	0.19	2003	中国
4	197	0.05	2002	德国
5	180	0.21	2004	法国

进一步统计国内外协作机器人研究的发文机构, 如表 4 所示。国际发文前五位的机构分别为意大利米兰理工大学 (Polytechnic University of Milan)、葡萄牙科英布拉大学 (University of Coimbra)、意大利都灵理工大学 (Politecnico Torino)、南非夸祖鲁-纳塔尔大学 (University of KwaZulu-Natal) 和美国卡内基梅隆大学 (Carnegie Mellon University)。这五个机构均为大学, 其中米兰理工大学的发文量最高, 卡内基梅隆大学的发文数量虽然不是第一, 但发文中心性最高, 说明该机构在该研究领域具有重要的影响。

国内发文前五位的机构由大学和研究所组成, 分别为哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院、中国科学院大学、哈尔滨工业大学机器人研究所、中国科学院沈阳自动化研究所、中国科学院机器人与智能制造创新研究所。其中, 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院发文量最多, 但整体看来, 国内机构的发文量少于国际机构。

表 4 国内外协作机器人研究发文量前 5 位的研究机构
Tab.4 Top 5 research institutions of publications on collaborative robots at home and abroad

序号	国际机构发文情况			国内机构发文情况		
	机构	中心性	发文量/篇	机构	中心性	发文量/篇
1	Polytechnic University of Milan	0.02	44	哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院	0	12
2	University of Coimbra	0	37	中国科学院大学	0	8
3	Politecnico Torino	0.02	33	哈尔滨工业大学机器人研究所	0	7
4	University of KwaZulu-Natal	0	26	中国科学院沈阳自动化研究所	0	6
5	Carnegie Mellon University	0.16	24	中国科学院机器人与智能制造创新研究院	0	6

4 工业协作机器人研究热点演进及解读

4.1 关键词共现分析

关键词用于描述一个领域的核心内容,分析关键词共现可深入了解协作机器人领域研究的主要内容及热点。导入 WOS 样本文献并选择关键词共现,剪切方式选择 Pathfinder 和 Pruning the merged network,获得的关键词共现图谱中共有 696 个节点,1 120 条连线,密度为 0.004 6。图谱中节点的大小表示该词出现的频次,节点越大表明频次越高,节点的颜色代表时间,颜色越暖表示研究时间越近,颜色越冷表示研究时间越早。如图 4 所示,节点较大的关键词有协作机器人 (collaborative robotics)、人机协作 (human-

robot collaboration)、工业 4.0 (industry 4.0)、设计 (design)、人机交互 (human-robot interaction)、系统 (system)、任务分析 (task analysis) 等。这些关键词节点的内圈呈绿色,外圈呈红色,表示从早期到近期,都是国际学者重点关注的研究热词。

导入 CNKI 样本文献选择关键词共现,获得的关键词图谱中共有 390 个节点,570 条连线,密度为 0.007 5,如图 5 所示。其中节点较大的关键词有“人机协作、协作、机器人、多机器人”等,其中“人机协作”“机器人”的节点外圈呈红色,表明该关键词是近期国内学者的研究热点,而“协作”和“多机器人”节点中间呈灰色代表该关键词为早期的研究热点。而其他的关键词节点比较小且呈冷色,表示早期国内对协作机器人的研究还较为分散。

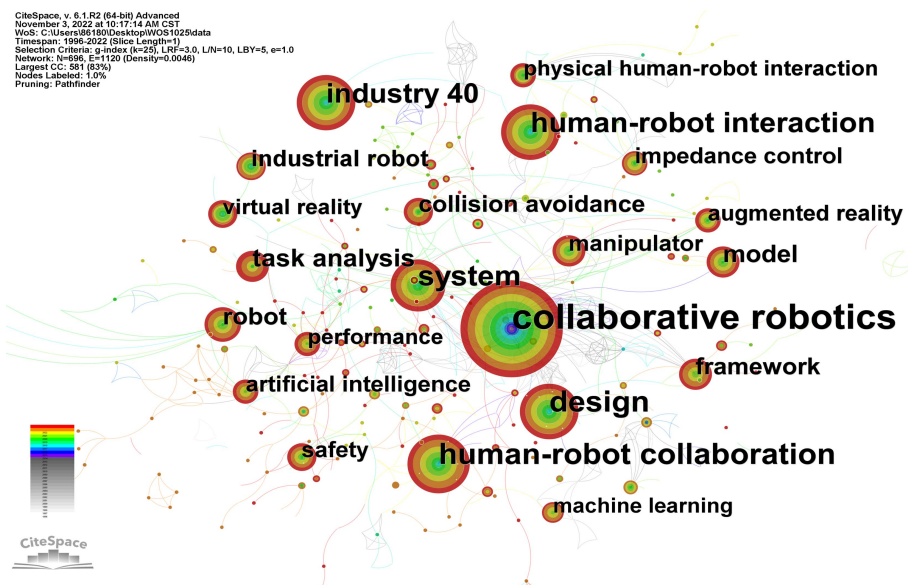


图 4 国际协作机器人研究关键词共现图谱

Fig.4 Key word co-occurrence map of international collaborative robot research

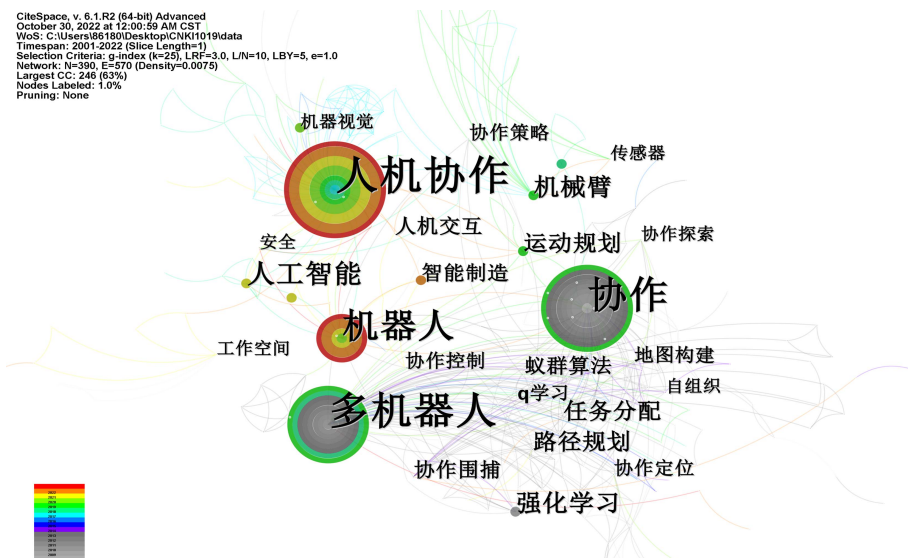


图 5 国内协作机器人研究关键词共现图谱

Fig.5 Key word co-occurrence map of collaborative robot research in China

对国际国内频次前 15 位的关键词进行统计, 如表 5 所示。在国际关键词词频中, 协作机器人 (collaborative robotics) 词频出现最高 (552 次), 其次是设计 (design) 和人机协作 (human-robot collaboration) (188 次), 除此之外为工业 4.0 (industry 4.0)、任务分析 (task analysis)、模型 (model)、结构 (framework)、碰撞避免 (collision avoidance)、安全 (safety)、机械臂 (manipulator) 等。表明国际上对于协作机器人的研究角度比较丰富, 从宏观的工业 4.0

层面到协作机器人设计、结构、人机交互、安全等微观层面。在国内关键词词频中, “人机协作” 词频出现最高 (59 次), 其次是多机器人 (49 次), 表明“协作机器人” 均为国际和国内研究的热点, 国内对多机器人协作方面研究较多, 同时在人工智能、机械臂、路径规划、人机交互、协作空间等方面也开展了一定的研究。除此之外, “人机协作 (human-robot collaboration)” 的频次在国际和国内的文献中均排名较前, 表明该主题词不仅是该领域的研究重点也是研究枢纽。

表 5 国内外协作机器人研究中英文关键词统计 (1996–2022)
Tab.5 Statistics of English key words in collaborative robot research at home and abroad (1996-2022)

序号	英文关键词统计			中文关键词统计		
	关键词	频次	中心性	关键词	频次	中心性
1	collaborative robotics	552	0.54	人机协作	59	0.33
2	design	188	0.11	多机器人	49	0.3
3	human-robot collaboration	188	0.16	协作	46	0.31
4	system	152	0.18	机器人	32	0.29
5	human-robot interaction	141	0.04	人工智能	13	0.03
6	industry 4.0	122	0	强化学习	10	0.07
7	task analysis	72	0.04	机械臂	10	0.08
8	model	68	0.01	运动规划	8	0.11
9	robot	63	0.04	路径规划	8	0.04
10	framework	56	0.11	任务分配	8	0.02
11	collision avoidance	55	0.02	协作空间	7	0
12	industrial robot	52	0.01	人机交互	6	0
13	safety	46	0	协作围捕	6	0.06
14	artificial intelligence	46	0.02	智能制造	6	0.01
15	manipulator	46	0.01	蚁群算法	6	0

4.2 关键词时间线图谱分析

关键词聚类就是领域特征明显、研究主题相似的关键词形成的网络集群, 以取值最高的特征词作为聚类编号和名称, 如 “#0、#1、#02……” 等。在关键词聚类图谱基础上, 以时间线图的方式进行呈现, 可以观察各关键词聚类按时间的演变过程。本研究通过关键词时间线图进一步呈现协作机器人领域研究的发展历程。

4.2.1 国际协作机器人研究时间线

用 CiteSpace 将 WOS 关键词聚类后进行时间线分析, 得到协作机器人关键词时间线图, 图谱右列表示的是聚类编号和名称, 图中聚类名称按热度进行排序, 顺序越往上, 热度越高; 从左往右的线条表示时间线, 线上的节点表示该聚类中的高频关键词, 节点越大, 热度越高。如图 6 所示, 该图谱共形成 18 个有效聚类, 其中最大的 5 个聚类分别为 #0 multi-agent system (多智能体系统)、#1 collaborative robots (协作机器人)、#2 robot programming (机器人编程)、#3 autonomous agents (自主代理)、#4 human-robot

collaboration (人机协作)。这 5 个聚类出现的时间集中在 2016 年至 2020 年, 表明这五个聚类是目前国际上的研究热点, 尤其是 #0 多智能体系统。从聚类时间线看, 国际上对协作机器人的研究可划分以下 3 个阶段:

1) 萌芽阶段 (1996—2006 年)。该阶段国际上研究的高频关键词主要有 collaborative robotics (协作机器人)、framework (结构)、coordination (协作)、admittance display (导纳显示) 等。其中关键词 collaborative robotics (协作机器人) 从 2000 年出现开始一直持续到了 2019 年, 这与当时协作机器人首次在国际亮相, 并在工业领域的投入应用有关。

2) 探索阶段 (2006—2015 年)。该阶段出现的高频关键词包括 dynamic control (动力控制)、localization (位置)、communication system interface (通讯系统接口)、closed-loop control (闭环控制)、augmented reality (增强现实)、virtual reality (虚拟现实) 等。此阶段在工业 4.0 的推动下, 出现了研究机器人技术的热潮, 如动力系统、定位系统、手臂关节运动、虚拟现实技术、增强现实技术等, 使用智能机器人和大力发展智能工厂是该阶段的特征。

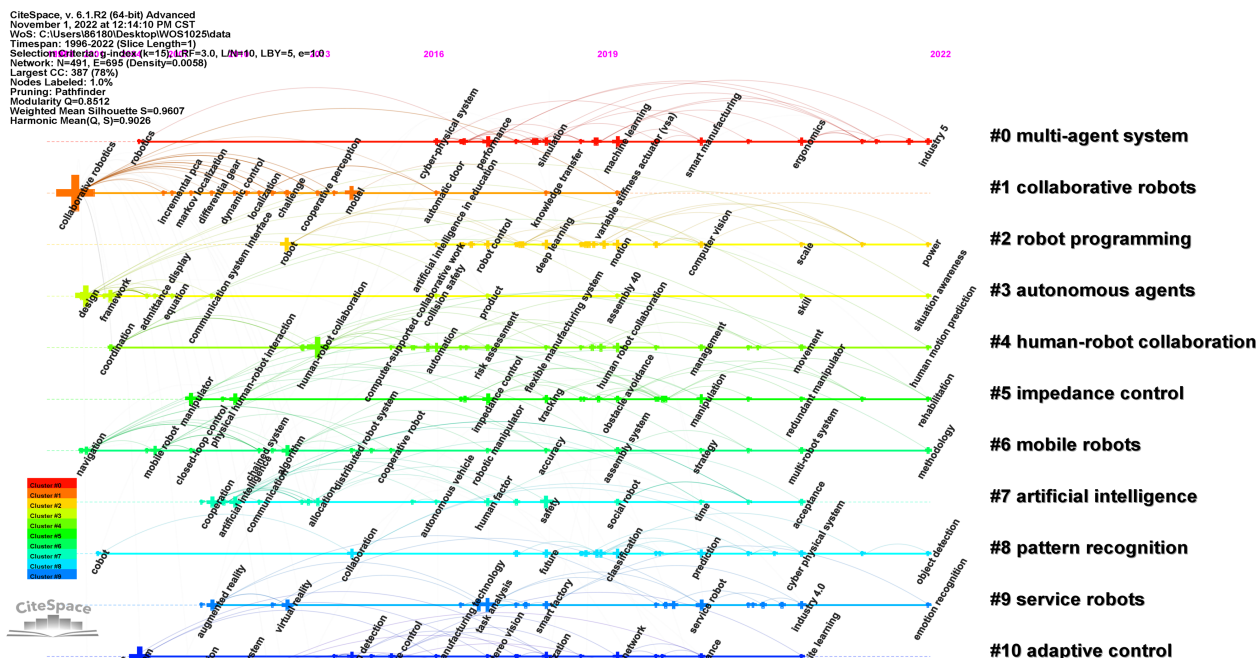


图6 国际协作机器人研究关键词时间图谱

Fig.6 Key word time map of international collaborative robot research

3) 快速成长阶段(2016年至今)。该阶段出现的高频关键词有 collision safety (碰撞安全)、impedance control (阻抗控制)、human factor (人的因素)、machine learning (机器学习)、smart manufacturing (智能制造)、ergonomics (人体工程学)等。该阶段对协作机器人技术的研究逐渐成熟,并逐渐转向人机协作、安全方面的研究;另一方面,国际学者们开始关注协作任务中工人的接受度、交互体验及舒适度,这正呼应了欧盟工业5.0中关注人本需求的理念,也反映出该领域未来的研究趋势。

4.2.2 国内协作机器人研究时间线

将 CNKI 关键词聚类后得到国内协作机器人关键词时间线图,系统显示由于2001年前的文献数据不足,默认从2001年开始统计。如图7所示,该网络共形成16个有效聚类,排名前5的聚类分别为:#0 协作、#1 人机协作、#2 机器人、#4 机械臂、#5 路径规划。从时间线上观察到,国内对人机协作的研究开始于2003年,对机械臂的研究始于2016年,相比于国外的研究历程来看,目前国内对该领域的研究

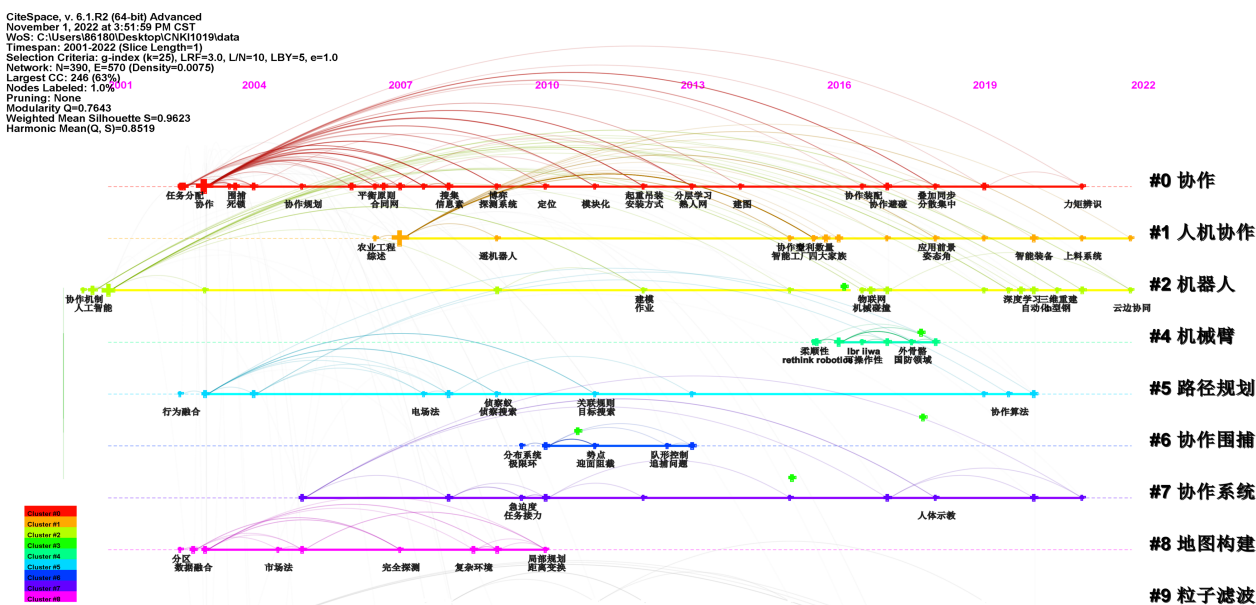


图7 国内协作机器人研究关键词时间图谱

Fig.7 Key word time map of collaborative robot research in China

正处于技术热潮阶段。国内对协作机器人的研究历程, 具体可以划分为以下 3 个阶段:

1) 萌芽阶段(2001—2008 年)。该阶段国内研究的高频关键词主要有协作机制、任务分配、协作、协作规划等。此阶段国内对于协作机器人没有标准的定义, 研究者更多关注多机器人的任务执行与协作机制方面。

2) 探索阶段(2009—2015 年)。该阶段国内研究的高频关键词主要有定位、探测系统、复杂环境、安装方式等。2013 年, 国家标准《工业机器人安全规范》GB11291-2-2013^[13]对协作机器人进行了明确定义, 国内研究者开始关注协作机器人的技术研发, 以及机器人在工厂装配作业时的定位系统、分布系统、安全控制等。

3) 成长阶段(2016 年至今)。该阶段国内研究的高频关键词主要有柔顺性、可操作性、机械碰撞、协作装配、协作算法等。随着国家政府陆续出台了一系列支持机器人技术创新、制造业改革的政策, 国内掀起了研究协作机器人的热潮, 重点聚焦技术创新方面, 对人因、安全交互、人体工程学等的研究比较少。

4.3 关键词聚类分析

为了进一步解读研究的热点内容, 选择聚类中高频词相关的文献进行分类解读。在聚类图中, 不同颜色的区域表示该聚类中的关键词首次出现的时间, 红色区域表示近期, 黄色区域出现日期早于红色区域, 依此类推。

4.3.1 国际协作机器人的关键词聚类分析

将 WOS 关键词数据导入 CiteSpace, 使用 Pathfinder 及 Pruning the merged network 剪枝, 获得该关键词聚类网络节点数为 491, 连线为 695 条, 网络的模块性为 0.851 2 (表明协作机器人研究领域在关键词聚类中有明确的定义), 轮廓值为 0.902 6。获得 10 个关键词聚类, 如图 8 所示, 根据相似的特征词属性进一步将其归纳为三大类:

1) 协作机器人前沿技术研究。该聚类由 #0 multi-agent system (多智能体系统)、#2 robot programming (机器人编程)、#3 autonomous agents (自主代理)、#5 impedance control (阻抗控制)、#8 pattern recognition (模式识别)、#9 task analysis (任务分析) 组成。具体包含了以下特征词: machine learning (机器学习)、vision system (视觉系统)、virtual reality (虚拟现实) 等。通过聚类后的关联文献发现, 国际学者对协作机器人的结构设计、软件系统、硬件系统等均开展了丰富的研究。如 Sadik 等^[17]提出一种智能控制解决方案, 优化人机协作时流水线调度问题。Tellaache 等^[18]利用语音和手势来实现车间里工人与机器人的自然交互; Alsamhi 等^[19]关注协作装配中机器学习和机器人通信的融合研究; Melchiorre 等^[20]

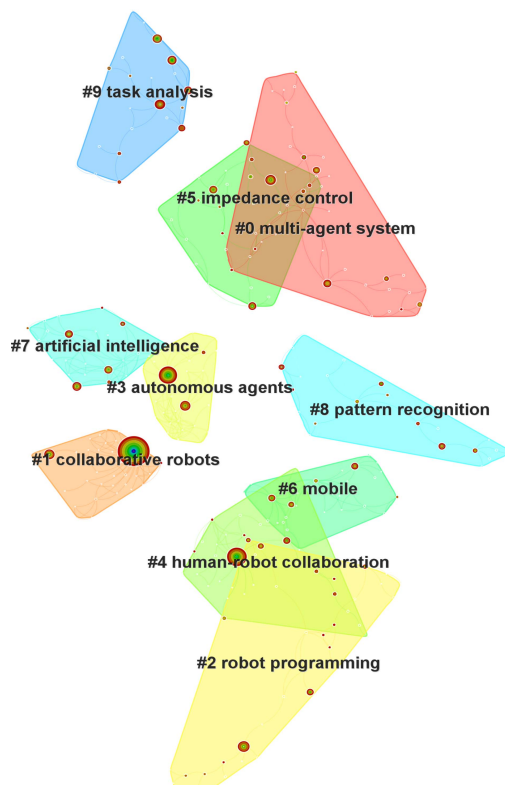


图 8 国际协作机器人的研究关键词聚类图谱
Fig.8 Key word clustering map of international collaborative robot research

开创出一种适用于基于视觉传感器的防撞系统; Yumbla 等^[21]采用图像处理技术完成机器人的线缆装配任务; Tannous 等^[22]利用触摸检测算法来检测人机协作焊接工作时的碰撞风险; Conti 等^[23]提出了一种以常识推理为指导的人机协作新系统, 用于制造任务的自动化。

2) 人-机-环交互研究。该聚类由 #1 collaborative robots (协作机器人)、#4 human-robot collaboration (人机协作) 组成。具体包含了以下特征词: safe physical human-robot interaction (安全物理人机交互系统)、risk assessment (风险评估)、collaboration space 协作空间等。通过分析聚类后的关联文献发现, 国际学者从不同领域进行协作机器人的研究, 如交互设计、人机工程学等。如 Michalos 等^[24]根据装配工艺的相关规范, 对装配工作站进行优化设计, 以保证人机协作的安全性; Malik 等^[25]将人机模拟与虚拟现实相结合用于工作空间设计中; Frijns 等^[26]提出了一套协作机器人设计指南, 该指南用于评估协作机器人用户界面设计的可用性问题; Chiurco 等^[27]基于深度学习和卷积神经网络来识别工人情绪, 探索智能工厂协作任务中的高级人机交互; Gualtieri 等^[28]研究如何开发和评估人机协作装配系统中的认知人体工程学设计指南。

3) 协作机器人应用研究。该聚类由 #6 mobile robots (移动机器人)、#7 artificial intelligence (人工

智能)组成。该聚类下的特征词有 navigation(导航)、rehabilitation(复原)等。分析聚类后的关联文献,学者 Matheson 等^[7]全面介绍了面向制造应用的协作机器人技术;Lins 等^[29]阐述了与工业环境中使用的智能制造、协作机器人和机器学习技术相关的定义、概念、标准和平台设计和趋势;Mukherjee 等^[30]回顾了机器学习方法及其在协作机器人背景下的工业应用;Maddikunta 等^[31]从不同行业从业者和研究人员的角度给出了工业 5.0 的新定义,并讨论了工业 5.0 的潜在应用及技术,如协作机器人、智能医疗、云制造等。

4.3.2 国内协作机器人关键词聚类分析

将 CNKI 关键词数据导入 CiteSpace,获得该关键词聚类网络节点数为 390,连线为 570,网络的模块性为 0.962 3,轮廓值为 0.851 9。将关键词数据进行聚类得到 12 个聚类,如图 9 所示,根据相似的特征词属性,进一步将其归纳为三大类。

1)协作机器人相关技术研究。该聚类由#0 协作、#5 路径规划、#6 协作围捕、#8 地图构建、#13 强化学习、#14 协作策略组成。国内学者从手势跟踪、仿真系统、任务分配、路径规划等方面对机器人协作任务展开了研究,其中多机器人协作研究是国内学者研究的重点。刘想德^[32]借助 Baxter 平台,对协作机器

人的构件、系统、通信机制、运动控制等进行了介绍;尹海斌^[33]利用柔性结构的动态控制减小协作机器人的能耗。刘利枚等^[34]提出了基于粒子群优化的多机器人协作定位方法以提高多机器人作业的精度;姚湘^[35]等着重研究基于深度图像检测的实时碰撞避免控制系统,有助于解决人机系统中的安全问题;费燕琼等^[36]设计了由四个基本模块组成的协作机器人应对复杂环境下的协作行为。

2)人-机-环交互研究。该聚类由#4 机械臂、#11 工作空间、#15 协作协调组成。陈满意等^[37]针对机械臂和障碍物提出了碰撞检测的方法,以提高协作机器人躲避路障的成功率。王宪伦等^[38]阐述了人机协作安全测量中,人体运动预测方法的研究状况;鲁可等^[39]依据机器人关节运动学相关原理,分析安全协作空间的相关问题;贾计东等^[40]围绕共融机器人结构设计、柔顺控制、环境感知、行为学习等层面,归纳了人机安全交互的实现方法。

3)人机协作下的智能生产研究。该聚类由#1 人机协作、#2 机器人、#7 协作系统组成。提取并分析每个聚类后的特征词,国内学者对航空装配、起重装配等作业任务开展研究,邹方^[41]针对飞机装配提出了人机协作安全标准,并肯定了协作机器人在智能制造业中的应用前景。

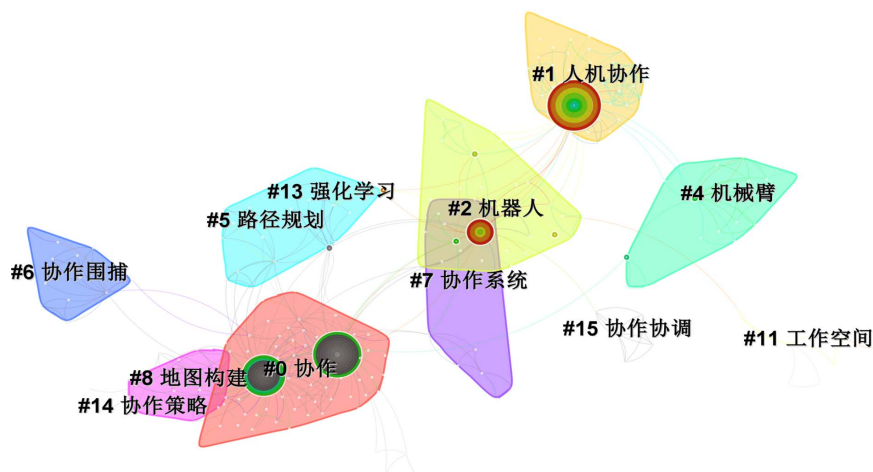


图 9 国内协作机器人研究关键词聚类图谱

Fig.9 Key word clustering map of collaborative robot research in China

5 结语

本研究通过梳理国内外工业协作机器人的研究文献,采用 CiteSpace 软件对发文量、发文机构进行统计分析,同时运用软件的关键词共现分析、聚类分析、时间线图谱等可视化手段,将 1996 年至 2022 年该领域的研究进程、研究热点及演化,通过可视化信息图表的形式展现出来。总结如下:

1)从研究的时间分布来看,国内外的协作机器人发文数量均呈上升趋势,2016 年国际国内发文量

均进入快速发展阶段,在 2021 年到达顶峰。从研究的空间分布来看,协作机器人已成为全球学术热点,美国作为发文量最多的国家,在该领域中发挥了重要的枢纽作用,中国在国际的发文量也位居前列,但仍需要跟踪国际热点积极创新。国内的研究机构如哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院、中国科学院大学等,对该领域的研究起了重要的支持作用,未来应加强国内外机构间的合作,继续保持对该领域的创新研究。

2)从研究历程来看,国际与国内对于协作机器人的研究都经历了萌芽期、探索期和快速发展期。国

际学者的探索协作机器人的时间较早,并在2006—2015年出现了技术研究热潮,从2016年开始,关注点转至研究协作机器人的人机交互、人因工程和安全空间等问题。国内对协作机器人的研究相对较晚,但快速进入研究成长阶段,一方面,国内学者积极吸取国际经验,推动了技术的创新;另一方面,国内中小企业的需求增长,政府一系列政策的支持,都推动了协作机器人研究的迅速发展。

3)从研究热点及演进来看,国际与国内共同热点词为“人机协作”。国际上在技术研究方面,侧重于结构设计、机器人编程、机器学习、视觉系统、虚拟现实、碰撞躲避等问题的研究;在人-机-环交互方面,从交互界面设计、高级人机交互、人体工程学等方面,研究工人的技术接受度和工作负荷;在应用研究方面,不少学者讨论了工业环境中使用的智能制造、协作机器人和机器学习技术相关的概念、标准和趋势,并结合工业5.0提出了未来协作机器人的发展方向。国内学者在协作机器人技术方面,侧重于多机器人协作、协作策略、柔性结构、定位机制等方面的研究;在人-机-环交互方面,针对机械臂的交互模式、安全距离、关节空间等方面开展了不同层面的研究;在智能生产方面,协作机器人不仅在航空、装备等行业具有重要作用,未来将拓展到服务、医疗、餐饮等其他非工业领域。

4)从未来研究趋势来看,协作机器人的研究发展迅速,研究内容呈现出机械、力学、通信、计算机、交互、设计、人因等学科交叉融合的趋势。国内研究目前正处在技术研究阶段,而可靠的安全标准、直观的交互界面、人本的职业健康(人体工程学和人为因素)、共享的空间设计等研究也是未来值得关注的热点议题。

需要指出的是本研究也存在一些不足,人工检索及文献本身的关键词归类都可能存在偏差,未来在后续研究中将继续关注协作机器人的发展方向,并追踪其在工业领域中的应用。

参考文献:

- [1] IFR. International Federation of Robotics[EB/OL]. (2022-10-9)[2022-10-25]. <https://ifr.org/free-downloads>.
- [2] 王政. 我国稳居全球第一大工业机器人市场——2021年产量比2015年增长10倍[N]. 人民日报, 2022-09-08(7).
WANG Zheng. China remains the World's Largest Industrial Robot Market - the Output in 2021 was 10 Times Higher than that in 2015[N] People's Daily, 2022-09-08(7).
- [3] 工信部. 十五部门联合印发《“十四五”机器人产业发展规划》[J]. 机器人技术与应用, 2022(1): 1.
GONG Xin-bu. The Tenth Five-Year Plan for the Development of Robot Industry was Jointly Issued by the Tenth Five-Year Plan[J]. Robot Technique and Application, 2022(1): 1.
- [4] ISO 10218-1: Robots and Robotic Devices—Safety Requirements for Industrial Robots – Part 1: Robots. Switzerland: International Organization for Standardization, 2011.
- [5] HENTOUT A, AOUACHE M, MAOUDJ A, et al. Human-Robot Interaction in Industrial Collaborative Robotics: A Literature Review of the Decade 2008-2017[J]. Advanced Robotics, 2019, 33(15-16): 764-799.
- [6] PARAL T. Robotics[M]. Smart Manufacturing. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd, 2022: 311-329.
- [7] MATHESON E, MINTO R, ZAMPIERI E G G, et al. Human-Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review[J]. Robotics, 2019, 8(4): 100.
- [8] CHANDRASEKARAN B, CONRAD J M. Human-Robot Collaboration: A Survey[C]//SoutheastCon. Fort Lauderdale, FL, USA. IEEE, 2015: 1-8.
- [9] WANNASUPHOPRASIT W, PESHKIN M A. Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators[J]. American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC, 1996, 58: 433-439.
- [10] AKELLA P, PESHKIN M, COLGATE E, et al. Cobots for the Automobile Assembly Line[C]//Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C). Detroit, MI, USA. IEEE, 2002: 728-733.
- [11] XU Tian, FAN Ji-zhuang, CHEN Yi-wen, et al. Dynamic Identification of the KUKA LBR Iiwa Robot with Retrieval of Physical Parameters Using Global Optimization[J]. IEEE Access, 2020, 8: 108018-108031.
- [12] Robots and robotic devices - Collaborative robots: ISO/TS 15066: 2016[S]. International Organization for Standardization [iso], 2016.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局中国标准化技术委员会. GB11291-2-2013 机器人与机器人装备—工业机器人的安全要求第2部分: 机器人系统与集成[S]. 北京: 中国标准化技术委员会, 2013.
China Standardization Technical Committee of the General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB11291-2-2013 Robots and Robotic Equipment - Safety Requirements for Industrial Robots Part 2: Robotic Systems and Integration[S]. Beijing: China Standardization Technical Committee, 2013.
- [14] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
CHEN Yue, CHEN Chao-mei, LIU Ze-yuan, et al. The Methodology Function of Cite Space Mapping Knowledge Domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253.
- [15] 陈亮, 韩月, 刘怀玉. 基于文献分析的服务机器人研

- 究综述[J]. 包装工程, 2021, 42(8): 12-19, 35.
- CHEN Liang, HAN Yue, LIU Huai-yu. Review on Service Robots Based on Bibliometric Analysis[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(8): 12-19, 35.
- [16] PESHKIN M, COLGATE J E. Cobots[J]. Industrial Robot: an International Journal, 1999, 26(5): 335-341.
- [17] SADIK A, URBAN B. Flow Shop Scheduling Problem and Solution in Cooperative Robotics—Case-Study: One Cobot in Cooperation with one Worker[J]. Future Internet, 2017, 9(3): 48.
- [18] TELLAECHE A, KILDAL J, MAURTUA I. A Flexible System for Gesture Based Human-Robot Interaction[J]. Procedia CIRP, 2018, 72: 57-62.
- [19] ALSAMHI S H, MA Ou, ANSARI M S. Convergence of Machine Learning and Robotics Communication in Collaborative Assembly: Mobility, Connectivity and Future Perspectives[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 98(3): 541-566.
- [20] MELCHIORRE M, SCIMMI L S, PASTORELLI S P, et al. Collision Avoidance Using Point Cloud Data Fusion from Multiple Depth Sensors: A Practical Approach[C]// 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT). Salerno, Italy. IEEE, 2019: 1-6.
- [21] YUMBLA F, ABEYABAS M, LUONG T, et al. Preliminary Connector Recognition System Based on Image Processing for Wire Harness Assembly Tasks[C]// 2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). New York: ACM, 2020: 1146-1150.
- [22] TANNOUS M, MIRAGLIA M, INGLESE F, et al. Haptic-Based Touch Detection for Collaborative Robots in Welding Applications[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 64: 101952.
- [23] CONTI C J, VARDE A S, WANG Wei-tian. Human-Robot Collaboration with Commonsense Reasoning in Smart Manufacturing Contexts[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2022, 19(3): 1784-1797.
- [24] MICHALOS G, MAKRIS S, TSAROUCHI P, et al. Design Considerations for Safe Human-Robot Collaborative Workplaces[J]. Procedia CIRP, 2015, 37: 248-253.
- [25] MALIK A 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.
- [26] FRIJNS H A, SCHMIDBAUER C. Design Guidelines for Collaborative Industrial Robot User Interfaces[C]// Human-Computer Interaction - INTERACT 2021: 18th IFIP TC 13 International Conference, Bari, Italy, August 30 - September 3, 2021, Proceedings, Part III. New York: ACM, 2021: 407-427.
- [27] CHIURCO A, FRANGELLA J, LONGO F, et al. Real-Time Detection of Worker's Emotions for Advanced Human-Robot Interaction during Collaborative Tasks in Smart Factories[J]. Procedia Computer Science, 2022, 200: 1875-1884.
- [28] GUALTIERI L, FRABONI F, DE MARCHI M, et al. Development and Evaluation of Design Guidelines for Cognitive Ergonomics in Human-Robot Collaborative Assembly Systems[J]. Applied Ergonomics, 2022, 104: 103807.
- [29] LINS R G, GIVIGI S N. Cooperative Robotics and Machine Learning for Smart Manufacturing: Platform Design and Trends within the Context of Industrial Internet of Things[J]. IEEE Access, 2021, 9: 95444-95455.
- [30] MUKHERJEE D, GUPTA K, CHANG L H, et al. A Survey of Robot Learning Strategies for Human-Robot Collaboration in Industrial Settings[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 73: 102231.
- [31] MADDIKUNTA P K R, PHAM Q V, B P, et al. Industry 5.0: A Survey on Enabling Technologies and Potential Applications[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 26: 100257.
- [32] 刘想德. 基于视觉引导的 Baxter 机器人运动控制研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2018, 30(4): 552-557.
- LIU Xiang-de. Research on Motion Control of Baxter Robot through the Vision Guidance[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2018, 30(4): 552-557.
- [33] 尹海斌. 刚柔耦合动力学——轻量化协作机器人设计与控制的力学基础——解读《机器人刚柔耦合动力学》[J]. 中国机械工程, 2018, 29(24): 3020-3023.
- YIN Hai-bin. Rigid-Flexible Coupling Dynamics—Mechanical Basis for Design and Control of Lightweight Cooperative Robots—Interpretation of Rigid-Flexible Coupling Dynamics of Robots[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(24): 3020-3023.
- [34] 刘利枚, 蔡自兴. 粒子群优化的多机器人协作定位方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(3): 682-687.
- LIU Li-mei, CAI Zi-xing. Multi-Robot Cooperative Localization Based on Particle Swarm Optimization[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(3): 682-687.
- [35] 姚湘, 徐平平, 王华君. 基于深度图像检测的机器人碰撞避免方案[J]. 控制工程, 2017, 24(7): 1514-1518.
- YAO Xiang, XU Ping-ping, WANG Hua-jun. Design of Robot Collision Avoidance Security Scheme Based on Depth Image Detection[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(7): 1514-1518.
- [36] 费燕琼, 朱越梁, 宋立博. 多模块式移动机器人系统的自组织协作行为[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(7): 990-994.
- FEI Yan-qiong, ZHU Yue-liang, SONG Li-bo. On Self-Organized Collaboration Behavior in Multi-Modular Mobile Robots[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong Uni-

- versity, 2011, 45(7): 990-994.
- [37] 陈满意, 张桥, 张弓, 等. 多障碍环境下机械臂避障路径规划[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(4): 990-998.
- CHEN Man-yi, ZHANG Qiao, ZHANG Gong, et al. Obstacle Avoidance Path Planning of Manipulator in Multiple Obstacles Environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(4): 990-998.
- [38] 王宪伦, 王天宇. 人机协作中人体运动预测方法研究综述[J]. 机床与液压, 2022, 50(12): 147-152.
- WANG Xian-lun, WANG Tian-yu. Research Progress of Human Motion Prediction Methods in Human Robot Collaboration[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(12): 147-152.
- [39] 鲁可, 曹毅, 李秀娟. 双臂机器人协作空间的解算[J]. 工程图学学报, 2009, 30(5): 39-43.
- LU Ke, CAO Yi, LI Xiu-juan. Cooperative Workspace of Dual-Arm Space Robot[J]. Journal of Engineering Graphics, 2009, 30(5): 39-43.
- [40] 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 the Safety of Human-Robot Interaction Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3): 16-30.
- [41] 邹方. 人机协作标准及应用动态研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(S2): 58-63, 76.
- ZOU Fang. Standard for Human-Robot Collaboration and Its Application Trend[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(S2): 58-63, 76.

责任编辑: 马梦遥

(上接第392页)

- [6] 侯晓乐, 栾妍. 全域旅游背景下新农村公共设施调研与分析——以燕郊镇苍头村为例[J]. 北极光, 2019(8): 76-77.
- HOU Xiao-le, LUAN Yan. Investigation and Analysis of Public Facilities in New Countryside under the Global Tourism Background—Taking Cangtou Village in Yan-jiao Town as an Example[J]. Borealis, 2019(8): 76-77.
- [7] 吴琨, 杨茂川, 盛容. 美丽乡村建设中的环境设施设计研究[J]. 艺术与设计(理论), 2016, 2(8): 71-73.
- WU Kun, YANG Mao-chuan, SHENG Rong. Research on the Environmental Facilities Design in the Beautiful Countryside Construction[J]. Art and Design, 2016, 2(8): 71-73.
- [8] 张战毅, 张雅鹏, 郝杰华. 新农村全民健身设施建设模式研究[J]. 运动, 2014(10): 134-135, 143.
- ZHANG Zhan-yi, ZHANG Ya-peng, HAO Jie-hua. Research on the Construction Mode of New National Fitness Facilities in Rural Areas[J]. Sport, 2014(10): 134-135, 143.
- [9] 张耀珑, 沈晨, 乔旭辉. 美丽乡村建设背景下农村住区公共空间的设计[J]. 山西建筑, 2016, 42(25): 9-10.
- ZHANG Yao-long, SHEN Chen, QIAO Xu-hui. Research on Designing Public Space of Rural Residential Area under the Background of Constructing Beautiful Countryside[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(25): 9-10.
- [10] 洪登华, 戴继勇, 云振宇, 等. 美丽乡村视角下农村生活基础设施标准体系构建探析[J]. 标准科学, 2016(5): 52-55.
- HONG Deng-hua, DAI Ji-yong, YUN Zhen-yu, et al. Analysis on the Establishment of Rural Infrastructure Standard System from the Perspective of Beautiful Villages[J]. Standard Science, 2016(5): 52-55.
- [11] 武丽娟. 美丽乡村建设背景下乡村公共空间的再生设计研究[J]. 艺术品鉴, 2020(6): 181-182.
- WU Li-juan. Research on the Regeneration Design of Rural Public Space under the Background of Beautiful Countryside Construction[J]. Appreciation, 2020(6): 181-182.
- [12] 张志华, 罗家. 生态视野下的公共设施设计研究[J]. 包装工程, 2014, 35(2): 51-53, 58.
- ZHANG Zhi-hua, LUO Jia. Public Facilities Design from Point View of Ecology[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(2): 51-53, 58.
- [13] 王丹丹. 美丽乡村公共服务设施的规划设计[J]. 工程建设, 2019, 51(5): 35-38.
- WANG Dan-dan. Planning and Design of Public Service Facilities for Beautiful Countryside[J]. Engineering Construction, 2019, 51(5): 35-38.

责任编辑: 马梦遥