

基于CiteSpace的协作机器人研究进展与热点可视化分析

史晨晨

上海工程技术大学艺术设计学院, 上海

收稿日期: 2023年10月7日; 录用日期: 2023年12月14日; 发布日期: 2023年12月22日

摘要

总结协作机器人发展研究的热点领域, 探究其背后的影响因素, 预测协作机器人的发展趋势, 有助于后续的理论研究与实践探索。使用CiteSpace对中国知网数据库中2015年~2022年协作机器人领域的396篇学术期刊进行可视化科学计量分析得出: 对协作机器人的研究从2019年开始活跃, 研究主题多元化, 研究内容系统化; 协作机器人研究过程中, 作者与作者之间的协同研究较少; 但是跨学科合作联系较强; 研究机构主要在企业, 但是机构间的合作较少; 研究的主体多聚集在人机协作、碰撞检测、深度学习等三个方面; “智能制造”是协作机器人领域研究的前沿动态与发展趋势。

关键词

CiteSpace, CNKI数据库, 协作机器人, 研究展望

Progress of Research and Hotspot Visual Analysis of Collaborative Robot Based on CiteSpace

Chenchen Shi

School of Art and Design, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Oct. 7th, 2023; accepted: Dec. 14th, 2023; published: Dec. 22nd, 2023

Abstract

It is helpful to summarize the hot research areas of collaborative robot development, explore the influencing factors behind it, predict the development trend of collaborative robot, and fa-

cilitate the subsequent theoretical research and practical exploration. Using the CiteSpace visual scientific metrology analysis of 396 academic journals in the field of collaborative robotics from 2015 to 2022 in the CNKI database, the research on collaborative robotics has been active since 2019, with diverse research topics and systematic research content. During the study of collaborative robots, there are few collaborative studies between authors and authors. However, the interdisciplinary cooperation and connection is relatively strong. Research institutions are concentrated in enterprises, but less cooperation. The research subjects mainly focus on three aspects: human-machine collaboration, collision detection, and deep learning. "Intelligent manufacturing" is the frontier dynamic and development trend in the field of collaborative robotics.

Keywords

CiteSpace, CNKI Database, Collaborative Robot, Research Prospect

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着《“十四五”机器人产业发展规划》五项保障措施的推进，电子消费品市场蓬勃发展。随着我国技术工人受教育程度和生活成本的日渐提高，企业承担的人工成本随之增长，已经成为制约汽车零部件、3C (computer, communication, consumer electronics)以及机械加工等行业产能扩张的重要因素。为了解决这个问题，大量的机器人被引进工厂替代工作人员工作[1]。

自然界的人体具有优良的运动特性，因此人与人协作模式为人机协作模式提供了一个完美的参考。人机协作(Human-Robot Collaboration, HRC)指的是人类与机器人共享工作空间，一起作业的场景[2]。根据 ISO 10218-1: 2011 标准的定义，协作机器人是与人在确定的工作空间内，与人类直接合作的状态。在这样的作业模式下，操作人员与机器人在共同的作业空间、共享的作业内容过程中，协同工作的内容逐渐增多，操作人员与机器人的作业任务可以分开量化，提高生产效率。

以上，对协作机器人领域研究的重点以及其背后的影响因素进行分析总结，对协作机器人的接续发展具有重要意义。

2. 数据来源与研究方法

在本文中，数据库选用中国知网数据库，以“协作机器人”为关键词，文献的选取时间从 2015 年 1 月到 2022 年 12 月，在此期间，中国知网有 629 篇学术期刊，删去学科范围以及研究层次不相符的，最终共得到 396 篇文献。使用 CiteSpace 对得到的文献进行分析。

3. 协作机器人研究的基本特征

1) 总体发文量统计分析

从总体发文量(见图 1)来看，2015~2022 年协作机器人领域的研究整体呈上升趋势，发文数量连年递增。工业 5.0 时代，在以人为本的智能制造(简称人本智造)中，人机协作是关键，协作机器人的重要性不言而喻。因此，对协作机器人的研究将是一个热点与趋势。

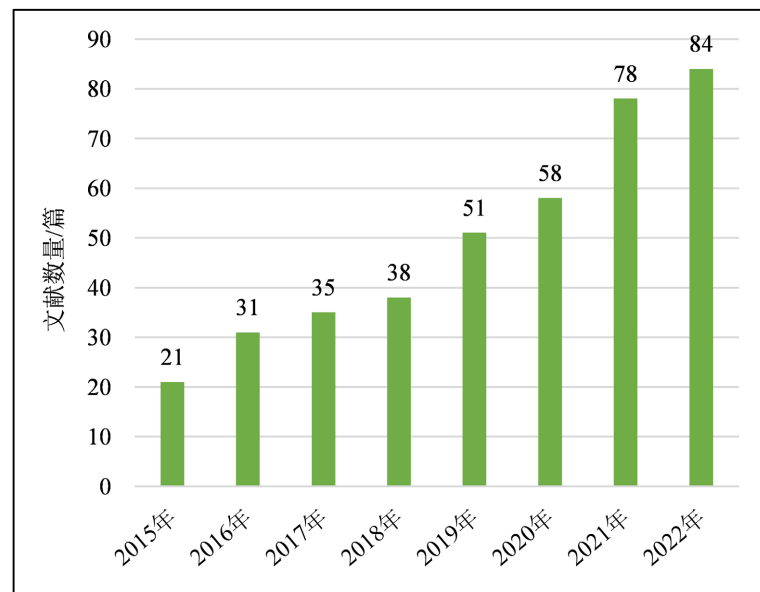


Figure 1. Volume and general trends in cobots from 2015 to 2022
图 1. 2015 年~2022 年协作机器人领域发文量及总体趋势

2) 主题发文量统计分析

根据研究主题的不同,使用定量分析法对 396 篇文献进行归类分析。从 2015 年至 2022 年的主题发文量(见图 2)显示,文献数量在 20 篇以上的主题有人机协作(47 篇)和碰撞检测(20 篇);数量在 10 到 20 篇这个区间的主题有阻抗控制(17 篇)和轨迹检测(11 篇);其他主题的发文章数都在 10 篇以下。由此可得,协作机器人领域研究的重点是人机协作、碰撞检测、阻抗控制和轨迹检测等,更深层次的研究将会进入到路径规划、动力学、运动学、机械臂、视觉引导等层面。

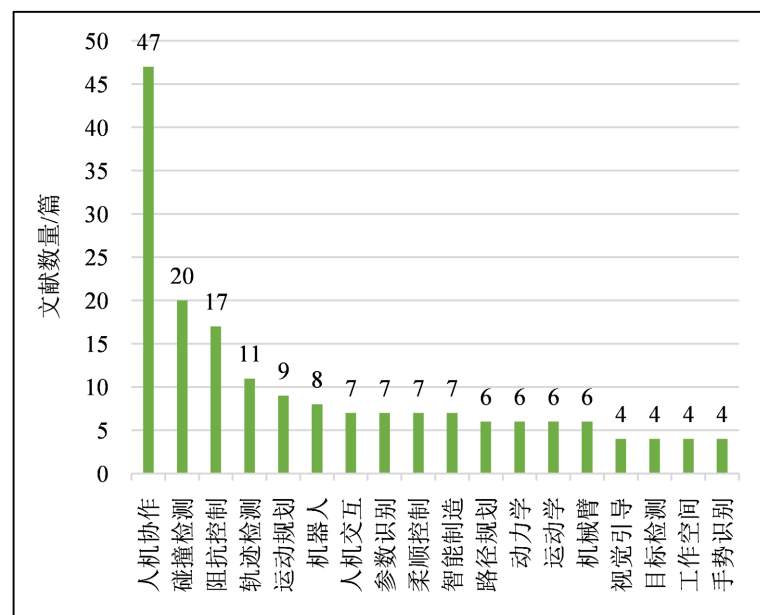


Figure 2. Theme post volume in cobots from 2015 to 2022
图 2. 2015 年~2022 年协作机器人领域主题发文量

通过 CiteSpace 对所选中的 396 篇文献的关键词进行可视化科学计量分析, 整理出 2015~2022 年协作机器人范畴的关键词共现图谱(见图 3)、关键词聚类图谱(见图 4)、文献高频关键词(见表 1)以及关键词聚类信息(见表 2)。关键词共现图谱中聚类网络的模块度 $Q = 0.7327$ 、平均轮廓值 $S = 0.8273$, 一般认为 $Q > 0.3$ 就意味着聚类结构明显, $S > 0.5$ 聚类就是合理的, $S > 0.7$ 就意味着聚类是令人信服的, 因此, 本文中分析的文献共引聚类集群性质突出, 具有较强的可研究性。[3]结合图表信息分析可得, “人机协作”这个关键词的相关强度与介数中心性最高, 这说明“人机协作”是专家学者的关注点; “碰撞检测”、“手势识别”、“阻抗控制”、“运动规划”等是协作机器人领域发展过程中更深层次的研究重点, 使协作机器人的研究从人机协作领域逐渐延伸到深度学习、协作空间、术前规划等更深层次的领域, 促进了研究体系的完善。

Table 1. Keywords in cobots research from 2015 to 2022

表 1. 2015 年~2022 年协作机器人领域关键词

关键词	起始时间	频次	中心性	连接度
人机协作	2015	47	0.34	38
碰撞检测	2017	20	0.19	20
阻抗控制	2018	17	0.07	12
轨迹规划	2020	11	0.03	7
运动规划	2018	9	0.04	13
机器人	2018	8	0.04	8
人机交互	2018	7	0.01	5
参数辨识	2018	7	0.01	5
柔顺控制	2020	7	0.01	4
路径规划	2020	6	0.03	8
动力学	2017	6	0.03	6
运动学	2017	6	0.02	6
机械臂	2015	6	0.03	5
导纳控制	2017	4	0.03	5
视觉引导	2018	4	0.02	3
手势识别	2018	4	0.02	5
机器视觉	2021	4	0.02	3
安全	2017	3	0.03	5
位姿估计	2020	3	0.02	6
灵活性	2017	3	0.02	4
协作空间	2017	2	0.04	5
双臂协调	2020	2	0.02	6

b) 协作机器人的路径规划

路径规划是指机器人从初始位姿向目标位姿移动的过程中，在广义的坐标范围内计算出一条无碰撞路径的过程。

桂林电子科技大学的侯晓玲对 Aubo-i5 型六自由度协作机器人，进行机器人的动力学、运动学计算，研究其轨迹规划算法，提出了一种基于人工势场法的渐进最优双向快速随机树算法用于该协作机器人的路径规划[6]。

广东工业大学的徐学使用三维传感器，建立了获取目标工件空间位姿和作业场景的离散化模型，基于优化的快速扩展随机树算法，完成了协作机器人在未知环境下动态避障及作业任务。提出了一种基于三维视觉的协作机器人环境感知和路径规划方法，识别、建模及规划平均总时间维持在 5 s 内，避障成功率超过 98% [7]。

c) 协作机器人在交互过程中的特征提取能力与深度学习能力

协作机器人在人、环境、协作机器人之间进行交互，特征提取能力是入门条件。

国防科技大学的怀智博针对具有时效性的深度学习任务，提出了模型并行和数据并行对深度学习推理进行优化的机制[8]。

大连理工大学的姜杰文使用 Python 开发语言，针对协作机器人进行装配作业的过程，搭建了一套手势语言库，完成了协作机器人在人机交互过程中手势识别部分的人机交互系统[9]。

2) 阶段性前沿研究领域分析

关键词的突现强度可体现出某一时间点内，产生了较大影响的热点话题，或者某一段时间内专家学者的聚焦内容。通过 CiteSpace 中的 Burstness 功能分析得到 1 个突现词(见图 5)。根据图 5 的 2015 年~2022 年协作机器人领域的突现词可知，“智能制造”这个方向作为协作机器人领域的研究热点持续时间长，影响范围广。

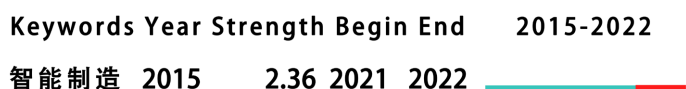


Figure 5. Emerging words in the field of cobots from 2015 to 2022

图 5. 2015 年~2022 年协作机器人领域的突现词

3) 研究主题演变与阶段划分

通过图 6 的 2015 年~2022 年协作机器人领域关键词聚类时间线图可知，各研究主题之间链接网络时间较为紧密，研究主题也在不断增多。最突出的网络节点为“碰撞检测”；聚类#0“碰撞检测”明显拥有高度集中的引用突发节点，聚类#4“手势识别”和#7“导纳控制”两个领域的发文量较少。图 7 显示 2015 年~2022 年的协作机器人领域关键词数量的走向，关键词数量的多少可以反映该段时间研究内容的丰富度，关键词的数量增长速度可以体现出这一时间段内协作机器人领域研究的活跃程度。

将时间线图谱和关键词数量放在一起来看，2015 年~2022 年协作机器人领域的发展进程可以归纳为三个阶段。

第一阶段(2015 年~2016 年)——协作机器人领域的初步发展。协作机器人领域在 2015 年~2016 年间的发文量较少，相对应的，关键词数量也较少，研究领域主要集中在“机械臂”“协作型”等。2015 年 5 月，国务院发布《中国制造 2025》指出，要加快新产品的研发，加速机器人标准化、模块化建设。我国机器人领域开始发展，此时深耕于协作机器人领域的专家学者还比较少，大家的目光更多的聚焦于汽车制造、智能工厂等领域。

CiteSpace, v. 6.1.R6 (64-bit) Advanced
 October 19, 2023 at 5:03:25 PM CST
 WoS: F:\cites\data
 Timespan: 2015-2022 (Slice Length=1)
 Selection Criteria: Top 50 per slice, LRF=3.0, L/N=10, LBY=5, e=1.0
 Network: N=469, E=679 (Density=0.0062)
 Largest CC: 256 (54%)
 Nodes Labeled: 1.0%
 Pruning: None
 Modularity Q=0.7825
 Weighted Mean Silhouette S=0.9346
 Harmonic Mean(Q, S)=0.8518

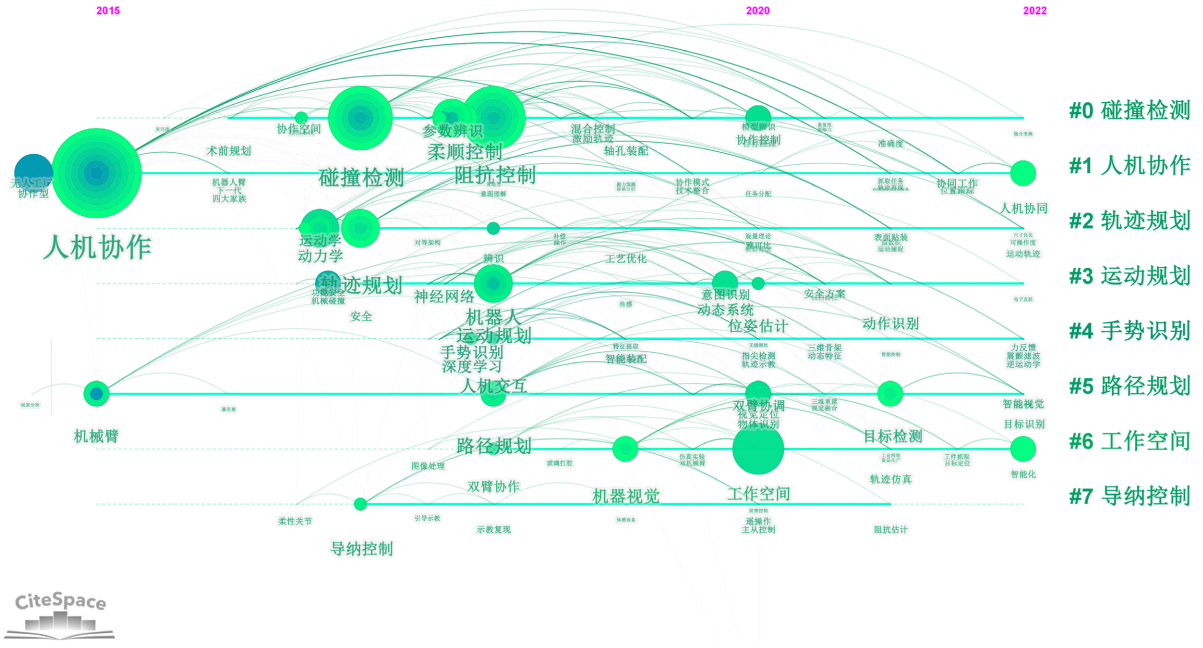


Figure 6. Keywords clustering time map of cobots research from 2015 to 2022
 图 6. 2015 年~2022 年协作机器人领域关键词聚类时间线图

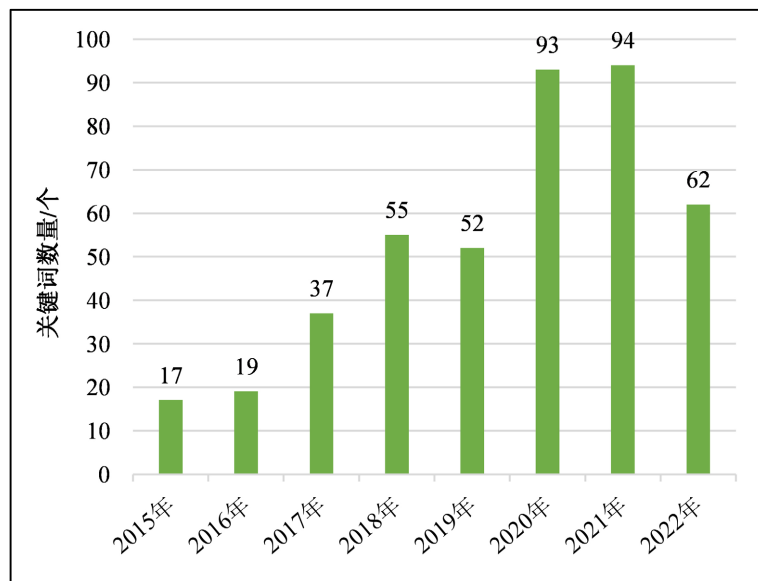


Figure 7. Number of keywords in the field of cobots from 2015 to 2022
 图 7. 2015 年~2022 年协作机器人领域关键词数量

第二阶段(2017~2019 年)——协作机器人领域的活跃发展。2019 年, 发文量增长幅度超 34.2%, 呈现加速上升态势; 关键词数量涨幅也较为明显, 协作机器人领域的研究重点及热点包括“人机协作”“阻

抗控制”“碰撞检测”“运动学”等。这一阶段不仅越来越多的人开始进入到协作机器人领域的研究，探索内容也进入到更深的领域，与其他学科研究之间的交流互动愈发紧密；研究领域的覆盖面开始扩展，学者们开始关注协作机器人的横向发展。

第三阶段(2020~2022年)——协作机器人领域快速上升。在此期间，协作机器人领域发文总量增速明显，关键词的数量也快速增长，研究呈现多元化，协作机器人领域的研究欣欣向荣，专家学者的研究关注重点逐渐转到“柔顺碰撞”“工作空间”“运动规划”“深度学习”“碰撞检测”“轨迹规划”等领域。此时研究方向也更加广泛，协作机器人开始出现具体到各行业应用的态势，例如制药行业、垃圾分拣、码垛机等。该阶段每年的发文量变化较大，关键词数量也急剧增长，这也说明这一时间的协作机器人范畴的研究横向发展，交叉学科、不同领域之间的交流愈发频繁，研究体系网络日趋完善。

5. 结论与展望

本文从中国知网数据库中选出 396 篇文献，通过 CiteSpace 对协作机器人领域从 2015 年~2022 年间相关研究的发展演变过程进行分析，总结该领域的研究热点，分析该领域的发展趋势，促进协作机器人领域发展框架的建设。结合协作机器人领域在 2015 年~2022 年的总体发文量以及关键词数量来看，协作机器人的发展经历了初步探索、活跃发展和快速上升三个阶段，发文量总体整体呈持续上升的趋势，研究领域也逐渐多元化；结合关键词共现和聚类分析，可以将协作机器人研究的热点领域总结划分为人机协作过程中的安全问题、协作机器人的路径规划、协作机器人在交互过程中的特征提取能力与深度学习能力等方向；突变词“智能制造”显示，“智能制造”是协作机器人研究的前沿动态也是发展趋势。协作机器人的发展应积极跟进市场发展航向，响应国家政策，服务国家战略，与其他学科广泛交流，要做到多领域发展，结合已经相对成熟的相关理论研究成果，不断优化创新，探寻更加科学和广泛的发展路径。

注 释

文中所有图片和表格均为作者自绘。

参考文献

- [1] 张建华. 面向人机协作的仿人柔性关节与安全碰撞技术[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [2] 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.
- [3] 刘大亮, 陈潇艺, 吴双琳, 等. 基于 CiteSpace 的景观再生研究进展与热点可视化分析[J]. 设计艺术研究: 2022, 12(5): 29-33.
- [4] 刘波, 王雯, 傅卫平, 等. 考虑协作机器人运动的操作者心理安全场模型的试验研究[J/OL]. 机械工程学报: 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20220926.1816.018>, 2022-11-29.
- [5] 朱德慰, 李志海, 吴镇炜. 基于异常行为监测的人机安全协作方法[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-16. <https://link.cnki.net/doi/10.13196/j.cims.2022.12.003>, 2022-11-30.
- [6] 侯晓玲. 六自由度协作机器人轨迹规划研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021. <https://doi.org/10.27049/d.cnki.ggldc.2021.000986>
- [7] 徐学. 协作机器人三维视觉环境感知与路径规划算法研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2021. <https://doi.org/10.27029/d.cnki.ggdgu.2021.001408>
- [8] 怀智博. 自组织云环境下的机器人深度学习推理技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 2020. <https://doi.org/10.27052/d.cnki.gzjgu.2020.000179>
- [9] 姜杰文. 基于手势识别的协作机器人人机交互系统设计[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019. <https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdlu.2019.002304>