

# 康复机器人领域 10 年研究热点：基于 Web of Science 数据库的文献计量学分析

<https://doi.org/10.12307/2022.486>

薛夏利<sup>1</sup>, 邓钟义<sup>1</sup>, 孙君志<sup>1</sup>, 李宁<sup>1</sup>, 任文博<sup>2</sup>, 周凌<sup>2</sup>, 合焯<sup>3</sup>

投稿日期: 2021-01-18

采用日期: 2021-02-27

修回日期: 2021-08-20

在线日期: 2021-09-28

中图分类号:

R459.9; R496; R318

文章编号:

2095-4344(2022)14-02214-09

文献标识码: B

## 文章快速阅读:

### 文章特点一

△运用 CiteSpace 软件以可视化形式对康复机器人领域相关文献的发量、国家、机构、作者、关键词及关键文献进行分析,以期更直观地洞察该领域研究的现状、热点和前沿,为更多的研究人员提供新的思路 and 把握研究方向。

### 检索:

近 10 年 Web of Science 数据库 SCIE 核心数据合集发表的康复机器人相关研究。

### 分析结果:

近 10 年关于神经康复、脑机接口、虚拟现实、柔性可穿戴式、任务分析和外骨骼类的康复机器人研究越来越引起人们的关注,是康复机器人研究的前沿领域,代表着未来的研究发展趋势。

## 文题释义:

**康复机器人:** 是康复医学和机器人技术的完美结合,融合了人工智能、生物力学、信息科学、康复医学等学科知识,利用智能仿生技术辅助患者完成肢体训练,达到康复治疗的目的。

**CiteSpace 软件:** CiteSpace 可视化分析软件是一个 Java 应用程序,它可以生成基于参考文献引用的共被引网络,以揭示特定研究领域的结构,支持通过书目数据库中的知识发现进行视觉探索。

## 摘要

**背景:** 由于传统的康复训练方法对慢性损伤患者的功能恢复效果有限,康复机器人在慢性损伤的康复训练中正在得到越来越多的研究和应用。

**目的:** 解析和追踪近 10 年康复机器人领域相关研究的热点和前沿,为未来研究提供一定指导。

**方法:** 计算机检索 2010–2020 年在 Web of Science 数据库 SCIE 核心数据合集发表的康复机器人相关研究,检索条件为“TS=(rehabilitation robot OR rehabilitation robotics)”。运用 CiteSpace 5.7 可视化软件,从高影响力国家/地区、作者、高频关键词及突现词等方面解析康复机器人研究的热点与前沿。

**结果与结论:** ①最终纳入 3 194 篇文献,近年来康复机器人的研究热度一直持续不减,相关文献年发表量呈现稳定增长的趋势,美国发文量位居首位,中国紧跟其后;②美国西北大学以发文量 161 篇位居机构第一位;瑞士苏黎世大学教授 Riener R 以发文量 48 篇位居作者第一位;③研究形成了 9 个具有代表性的关键词聚类,并随时间推移呈现研究重点和方向的转变趋势;④近 10 年研究热点主要集中在康复机器人的智能控制、任务分析与学习、性能和可靠性、康复机器人人机交互方式如何通过机器智能与生物智能的融合,实现机器人与人的自然、精准交互等方面;⑤目前,康复机器人在上肢和神经损伤领域的应用最广泛,关于脑机接口、虚拟现实、柔性可穿戴式、任务分析和外骨骼类的康复机器人研究越来越引起人们的关注,是近年来康复机器人研究的前沿和热点领域,代表着未来的研究发展趋势,是今后研究可以参考的方向。未来康复机器人领域的研究应着重关注以下方面:一是关注患者功能需求,提高生活质量;二是加强多学科交叉合作,构建区域国家合作网络。

**关键词:** 康复机器人; 外骨骼; 脑机接口; 虚拟现实; CiteSpace; 热点与前沿; 文献计量学; 可视化分析

## Hot spots and frontiers of rehabilitation robot research in recent 10 years: a bibliometric analysis based on the Web of Science database

Xue Xiali<sup>1</sup>, Deng Zhongyi<sup>1</sup>, Sun Junzhi<sup>1</sup>, Li Ning<sup>1</sup>, Ren Wenbo<sup>2</sup>, Zhou Ling<sup>2</sup>, He Ye<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Sports Medicine and Health, <sup>2</sup>School of Sports Medicine and Health, Chengdu Sport University, Chengdu 610041, Sichuan Province, China; <sup>3</sup>State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Xue Xiali, Master candidate, Institute of Sports Medicine and Health, Chengdu Sport University, Chengdu 610041, Sichuan Province, China

**Corresponding author:** Li Ning, Associate professor, Institute of Sports Medicine and Health, Chengdu Sport University, Chengdu 610041, Sichuan Province, China

成都体育学院, <sup>1</sup>运动医学与健康研究所, <sup>2</sup>运动医学与健康学院, 四川省成都市 610041; <sup>3</sup>重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆市 400044

第一作者: 薛夏利, 男, 1996 年生, 河南省周口市人, 汉族, 成都体育学院在读硕士, 主要从事运动康复研究。

通讯作者: 李宁, 博士, 副教授, 成都体育学院运动医学与健康研究所, 四川省成都市 610041

<https://orcid.org/0000-0003-0727-6459> (薛夏利)

基金资助: 国家重点研发计划 (2018YFF0300604); 运动医学四川省重点实验室 (2021-A002), 项目负责人: 李宁

引用本文: 薛夏利, 邓钟义, 孙君志, 李宁, 任文博, 周凌, 合焯. 康复机器人领域 10 年研究热点: 基于 Web of Science 数据库的文献计量学分析 [J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(14):2214-2222.



## Abstract

**BACKGROUND:** Traditional rehabilitation training has limited potential to improve functional recovery from chronic injuries. Increasing attentions have been paid to the application of rehabilitation robots in rehabilitation training of chronic injuries.

**OBJECTIVE:** To analyze and track the hot spots and frontiers of related research in the field of rehabilitation robot in the past 10 years, thereby providing some guidance for future research.

**METHODS:** The literatures regarding rehabilitation robots published from 2010 to 2020 were retrieved in the Web of Science core database by computer. Search strategy was TS=(rehabilitation robot OR rehabilitation robotics). CiteSpace 5.7 visualization software was used to analyze the hot spots and frontiers of rehabilitation robot research from the aspects of high-influence countries/regions, institutions, authors, high-frequency keywords and burst words.

**RESULTS AND CONCLUSION:** A total of 3 194 literatures were included. In recent years, the research on rehabilitation robots has been growing steadily. The number of relevant literatures published annually shows a steady increase trend. The number of articles published by the United States ranks first, followed by China. Northwestern University in the United States ranks first with 161 articles published. Professor Riener R, from the University of Zurich, Switzerland, has published 48 articles, ranking the first among the authors. Nine representative keyword clusters have formed, and the research emphasis and direction change over time. In recent 10 years, the relevant research focuses on intelligent control of rehabilitation robots, task analysis and learning, performance and reliability, and how to realize the natural and accurate interaction between robot and human through the integration of machine intelligence and biological intelligence. At present, rehabilitation robots are the most widely used in the field of upper limb and nerve injuries, and the interest in brain-machine interface, virtual reality, flexible wearable, task analysis and the exoskeletons has increased in the research of rehabilitation robot, which are the frontiers and hot issues in recent years, representing the development trend of future studies, and referring to the future research direction. Future research in the field of rehabilitation robots should focus on the following aspects: First, focus on the functional needs of patients to improve the quality of life. Secondly, strengthen multidisciplinary cooperation and build a cooperation network among regional countries.

**Key words:** rehabilitation robot; exoskeleton; brain-computer interface; virtual reality; CiteSpace; hot spots and frontiers; bibliometrics; visual analysis

**Funding:** the National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFF0300604; Sichuan Provincial Key Laboratory of Sports Medicine, No. 2021-A002 (to LN)

**How to cite this article:** XUE XL, DENG ZY, SUN JZ, LI N, REN WB, ZHOU L, HE Y. Hot spots and frontiers of rehabilitation robot research in recent 10 years: a bibliometric analysis based on the Web of Science database. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2022;26(14):2214-2222.

## 0 引言 Introduction

近年来,随着人工智能和机器人技术的不断发展,功能康复及辅助训练机器人逐渐成为世界各国临床康复治疗的重要技术手段之一,受到国际社会的高度重视,并得到了日新月异的发展<sup>[1-2]</sup>。康复机器人最早起源于工程学的研究领域,是康复医学和机器人技术的完美结合,弥补了传统康复治疗方法难以保证康复训练的高强度、耐力的持久性以及训练效果规范性的不足。按照功能分类,康复机器人主要分为全身式康复、上肢和下肢康复机器人3种类型<sup>[3-8]</sup>。当前应用最多的是针对慢性损伤康复的功能性康复机器人,主要应用于脑卒中、脑瘫、脊髓损伤、截瘫、创伤性脑损伤和肢体损伤等慢性患者,由于传统的康复训练方法对慢性损伤的功能恢复效果有限,康复机器人在慢性损伤的康复训练中正得到越来越多的研究和应用<sup>[9-13]</sup>。

自1997年麻省理工学院的开创性研究Manus以来,研发康复机器人的实验室迅速增加,康复机器人的研究进展颇丰。据国外研究显示,康复机器人每年给医疗系统带来的经济效益超过50亿美元,同时对于患者个人的生活质量以及社会都产生了积极的影响<sup>[14-16]</sup>。随着科技水平与医疗技术的发展,中国国产康复机器人的发展亦是显著,部分企业的代表性产品已取得了多项海外医疗器械认证<sup>[17]</sup>。中国康复机器人技术领域发展迅速,并显示出广阔的前景,但与发达国家仍有一定的差距,仍有很大的进步空间。全面了解康复机器人的研究热点与前沿有助于提升中国科研工作者在康复机器人领域的科研能力,同时可有助于布局中国康复机器人医疗产业的未来发展。

CiteSpace可视化分析软件是一个Java应用程序,通过渐进的知识领域可视化方法,可以直观地绘制出被引用次数最多且至关重要的文档,知识领域内的专业领域以及研究主题,以检测和可视化科学文献中的趋势和模式。循证

医学实践中的关键步骤是找到有关临床问题的最佳可用证据,而可视化分析技术和基于证据的医学中开发的传统方法相结合则可以简化任务<sup>[18-21]</sup>。通过查阅数据库发现2010年后康复机器人领域的研究显著增加,但是目前国内外还没有对该领域的可视化分析研究,因此文章以Web of Science核心数据库2010-2020年间收录的康复机器人相关文献作为研究对象<sup>[22]</sup>,运用CiteSpace可视化软件,从高影响力国家/地区、作者、高频关键词以及突变术语等方面,对国际康复机器人研究领域的热点与前沿进行解析和追踪,以期为康复机器人的研究及相关学科的发展提供一定的参考和借鉴。

## 1 资料和方法 Data and methods

**1.1 文献来源和检索策略** 计算机检索Web of Science数据库核心数据合集,检索条件为“TS=(rehabilitation robot OR rehabilitation robotics)”,时间跨度设为2010-2020年。最后检索日期为2021-01-10。Article是经过同行评审的期刊论文,具有良好的权威性和代表性,为保证高质量的可视化结果,在此次研究中,文献类型限制为“Article”,语言类型设置为“English”。排除会议摘要、信件、综述、新闻、期刊评论等文献类型。

**1.2 文献筛查** 由2位评价者对文献进行独立阅读,首先根据文章标题与摘要进行初步筛选,然后再根据纳入、排除标准进行再次筛查,筛查结束后,如有争议,则通过第3位评价者共同通读全文与讨论,最终决定取舍。

**1.3 研究工具** CiteSpace 5.7可视化软件根据文章中第一作者信息确定文献中的信息关系,主要包括国别、作者、关键词、研究机构等方面。在CiteSpace 5.7可视化软件参数设置中,将时间跨度设置为2010-12-31/2020-12-31,时间分度设置为1年,阈值项选择“Top N”,设为50,重

点选择有代表性的前 50 篇论文进行系统的综述分析, 选择“Pathfinder”作为剪切连接方式简化网络结构, 突出重要特征。对于节点类型, 选择国家(地区)、作者、被引作者和关键词进行共现分析, 并绘制可视化图谱。并运用 CiteSpace 突现词检测功能探寻关键词激增变化率, 生成高强度突变率的关键词排序表。在可视化图谱中, 不同的节点代表着各种元素, 如作者、国家和关键词等, 而节点的大小则反映了出版物的数量或频度, 节点之间的连接表示合作、共现或共被引等关系<sup>[23]</sup>。

## 2 结果 Results

共检索到 3 651 篇文献, 运用 Citespace 软件对导入文献进行去重, 为保证文献题目和主要内容都与康复机器人相关, 同时对文献进行二次阅读题目和摘要进行复筛排除不相关文献, 最终纳入 3 194 篇文献。

**2.1 发文量分析** 2010-12-03/2020-12-31 间国际康复机器人领域发文量共计 3 142 篇, 呈稳步增长趋势。2020 年发文量是 2010 年的 5.7 倍, 反映出国际学术界对于康复机器人的关注越来越广泛, 见图 1。

**2.2 地域分析** 共有 78 个国家/地区为康复机器人研究做出贡献, 见表 1, 其中美国发文最多, 为 819 篇; 中国位居第二, 发文 603 篇; 第三是意大利, 发文 444 篇。共有 2 605 个机构发表了康复机器人相关研究, 其中最高产的是 Northwestern University(西北大学, 美国), 发文量为 161 篇; 第二位的是 University of Tsukuba(筑波大学, 日本), 发文 133 篇; 第三的是 University of Maryland(马里兰大学, 美国), 发文 81 篇, 见表 1。

表 1 | Web of Science 数据库 2010-2020 年康复机器人研究文献高产国家及机构影响力

Table 1 | Influences of countries and institutions with high yield of publications regarding rehabilitation robot from 2010 to 2020 included in the Web of Science

排名	国家	发文量(篇)	中心性	机构	发文量(篇)
1	美国	819	0.26	Northwestern Univ	161
2	中国	603	0.08	Univ Tsukuba	133
3	意大利	444	0.15	Univ Maryland	81
4	日本	221	0.06	Scuola Super Sant Anna	81
5	英国	208	0.15	Univ Auckland	80
6	韩国	187	0.03	Chang Gung Univ	80
7	德国	181	0.17	Natl Univ Singapore	79
8	加拿大	180	0.15	MIT	76
9	瑞士	177	0.07	Columbia Univ	75
10	西班牙	159	0.4	Univ Twente	61

研究国家可视化提示, 中心度排名前 3 的分别是 SPAIN(西班牙)0.4、USA(美国)0.26 和 GERMANY(德国)0.17, 这 3 个国家均与其他各国建立了良好的研究合作关系。国家/地区合作共现图谱见图 2。

**2.3 基于研究机构合作共现的研究热点分析** 通过研究机构合作共现分析, 使用 Citespace 软件绘制出康复机器人研究机构合作共现的研究热点视图, 共生成 411 个节点, 616 条

连接, 拓扑网络的密度为 0.007 3。研究机构可视化提示, 中心度排名前 3 的分别是 Scuola Super Sant Anna(比萨圣安娜高等学校, 0.24)、Northwestern Univ(西北大学, 0.23)和 MIT(麻省理工学院, 0.12), 这 3 个机构均与其他机构建立了良好的研究合作关系。比萨市圣安娜高等学校仿生机器人研究院成立于 2011 年, 经过近 10 年的发展, 已在国际康复机器人研究中处于领先地位, 重点开发仿生机器人、智能系统以及微电子技术研发与创新; 2020 年西北大学的研究人员开发出首个类似于生命的材料, 可以充当软机器人, 能以人类的速度行走, 捡起物体并将其运输到新的位置, 引起国际学术界的轰动; 麻省理工学院作为较早进入辅助康复机器人研究的机构, 研发出了适应于各类损伤类型的康复机器人, 在国际上有较高的盛名和权威。由图可以看出, 国际上研发水平较高的机构间合作密切, 为康复机器人的发展做出了卓越的贡献, 见图 3。

**2.4 高影响力作者及合作关系分析** 在作者合作关系图谱中, Riener R 教授以绝对的优势, 占据该领域的领头地位, 但与其他发文量较高的作者无合作关系, 其他几位高影响力作者间合作关系相对较密切。高影响力作者多进行频繁密切的交流合作, 才能更好地推动国际康复机器人研究的发展。根据普赖斯定律<sup>[24]</sup>, 在同一主题中, 半数的论文为一群高生产能力作者所撰, 这一作者集合的数量上约等于全部作者总数的平方根。在 3 194 篇文献中, 共有 9 163 位作者, 其中, 前 93 位作者就完成了 50% 的论文数量, 符合普赖斯定律。说明已经形成了康复机器人领域的核心作者群, 即关注这些作者的研究方向可以更好的了解康复机器人发展的前沿与趋势, 见图 4。

**2.5 高被引文献分析** 在检索到的 3 194 条文献中, 文献总被引频次为 47 224 次, 前 3 名来源期刊分别是《LANCET》(柳叶刀)、《NEJM》(新英格兰医学杂志)、《ROBOT AUTON SYST》(机器人和自主系统杂志)。但综合被引用频次、比例, 文章质量均有待进一步提升。且高被引文献的发表时间均较早, 可能是新的高质量的文献发表时间较晚, 导致被引频次相对较低。第一的文章是脑卒中治疗的指南, 康复实践的新疗法虚拟现实、机器人治疗等正在被越来越多的应用到临床中; 第二、三篇介绍了康复机器人及软式手套在脑卒中患者的实际应用效果。可见, 康复机器人不仅有指南规范, 针对脑卒中开展的新技术、新材料仍在不断发展进步, 学术界仍然充满了活力。排名前 10 的高被引文献见表 2。

**2.6 基于关键词共现的研究热点分析** 通过关键词共现分析, 将频次大于 150 次的高频关键词(20 个)进行统计排序。排在前 3 位的高频关键词为“rehabilitation”(1 276 次)、“stroke”(940 次)、“design”(471 次); 中心度排在前 3 的高频关键词为“robot”(0.15)、“walking”(0.15)、“movement”(0.15), 这些高频关键词代表了近 10 年学者们的关注重点, 表明康复、脑卒中和移动角度的研究和治疗措施已成为目前研究的热点, 见表 3。

表 2 | Web of Science 数据库 2010–2020 年康复机器人研究高被引文献  
Table 2 | Highly cited references regarding rehabilitation robots from 2010 to 2020 in the Web of Science

排名	文献标题	发表时间	被引频次	来源期刊	影响因子
1	Stroke Care 2: Stroke rehabilitation <sup>[25]</sup>	2011	952	LANCET	60.392
2	Robot-Assisted Therapy for Long-Term Upper-Limb Impairment after Stroke <sup>[26]</sup>	2010	704	NEJM	74.699
3	Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation <sup>[27]</sup>	2014	485	ROBOT AUTON SYST	2.825
4	The ReWalk Powered Exoskeleton to Restore Ambulatory Function to Individuals with Thoracic-Level Motor-Complete Spinal Cord Injury <sup>[28]</sup>	2012	346	AM J PHYS MED REHAB	1.838
5	Getting Neurorehabilitation Right: What Can Be Learned From Animal Models? <sup>[29]</sup>	2012	281	NEUROREHAB NEURAL RE	3.982
6	Tactile-Direction-Sensitive and Stretchable Electronic Skins Based on Human-Skin-Inspired Interlocked Microstructures <sup>[30]</sup>	2014	279	ACS NANO	14.588
7	An EMG-Based Control for an Upper-Limb Power-Assist Exoskeleton Robot <sup>[31]</sup>	2012	249	IEEE T SYST MAN CY B	9.309
8	Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial <sup>[32]</sup>	2014	237	LANCET NEUROL	28.755
9	Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle-foot rehabilitation <sup>[33]</sup>	2014	213	BIOINSPIR BIOMIM	2.952
10	Current Hand Exoskeleton Technologies for Rehabilitation and Assistive Engineering <sup>[34]</sup>	2012	212	INT J PRECIS ENG MAN	1.378

表 3 | Web of Science 数据库 2010–2020 年康复机器人研究高频关键词 (频次 >150)

Table 3 | High-frequency keywords of rehabilitation robot research from 2010 to 2020 in the Web of Science (frequency > 150)

排名	关键词	频次	中心度	排名	关键词	频次	中心度
1	rehabilitation	1 276	0.14	11	gait	309	0.09
2	stroke	940	0.13	12	system	289	0.06
3	design	471	0.1	13	arm	274	0.06
4	recovery	469	0.12	14	upper limb	256	0.11
5	exoskeleton	434	0.11	15	movement	238	0.15
6	robot	418	0.15	16	spinal cord injury	217	0.08
7	therapy	373	0.1	17	performance	198	0.15
8	walking	345	0.15	18	reliability	189	0.08
9	rehabilitation robotics	326	0.11	19	impairment	167	0.09
10	robotics	316	0.06	20	upper extremity	163	0.05

使用 CiteSpace 软件绘制出康复机器人研究高频关键词热点视图, 共生成 130 个节点, 145 条连接, 拓扑网络的密度为 0.017 3, 见图 5。

2.7 基于关键词聚类研究热点及前沿分析 运用 CiteSpace 对关键词进行聚类分析, 采用经典的 LLR 算法, 共得到 9 个聚类群, 分别为: #0 walking、#1 stroke、#2 brain-computer interface、#3 stroke、#4 electromyography、#5 proprioception、#6 task analysis、#7 soft actuators、#8 soft robotics, 见图 6。以 Timeline view 显示聚类关键词的时间动态变化。从 2010 年康复机器人、脑卒中、外骨骼、机器人的稳定性、脑卒中康复、脊髓损伤、神经康复、肌肉运动学习、虚拟现实等关键词得到广泛关注, 其中, 康复机器人与脑血管意外、外骨骼机器人、自适应控制和触觉手康复关系研究的热度 2011 年开始出现; 康复机器人与脑机接口、上肢康复和 Meta 分析研究的热度 2014 年开始出现; 康复机器人与上肢康复和 Meta

分析的关系研究热度持续到 2019 年; 2019–2020 年, 机器人传感系统、致动器、气动人工肌肉、任务分析、可穿戴式机器人和柔性机器人等成为新的词汇。国际学术界对康复机器人相关研究热点的关注, 反映了对康复机器人发展的极大关注。预测未来将围绕康复机器人与机器人传感系统、可穿戴式机器人和柔性机器人继续深入研究。关键词时间动态演变情况见图 7。

2.8 基于相关文献共被引聚类分析 通过文献共被引聚类分析, 使用 Citespace 软件绘制出康复机器人研究文献共被引图谱, 以最低被引次数为 15 次进行绘制, 共生成 10 个聚类, 134 个节点, 219 条连接, 拓扑网络的密度为 0.024 6。图中不同的圆圈颜色代表不同的聚类; 圆圈的数量代表的是分析参考文献的多少; 圆圈的大小代表每篇参考文献的共被引频率, 圆圈越大共被引频率越高; 紫色的外圈代表中介中心性, 外圈越大中心性越高。相互连接的两点代表两篇文献同时被另一篇论文所引用。连线的长短代表了 2 篇参考文献的相关性, 相关性越强连线越短。中心度排在前三的高被引文献为“Lo AC, 2010<sup>[35]</sup>”(0.88)、“Maciejasz P, 2014<sup>[36]</sup>”(0.68)、“Klamroth-Marganska V2014<sup>[32]</sup>”(0.45), 第一篇介绍了对于脑卒中后长期上肢损伤的患者, 机器人辅助疗法可明显改善上肢运动; 第二篇总结了现有的上肢康复机器人治疗方案, 对各种康复机器人系统中实施的技术解决方案进行了全面列表比较; 第三篇评估了使用外骨骼机器人训练与传统疗法对于脑卒中患者上肢功能恢复疗效的比较。由此可见, 康复机器人在脑卒中患者上肢功能康复的应用十分广泛, 同时从侧面反映了脑卒中上肢功能康复是当前的热点研究领域, 见图 8。

2.9 基于突现词检测算法的研究前沿分析 运用 CiteSpace 突现词探测功能, 共探测到 108 个突现词。在被引文献频次最高的 25 个关键词中, 有 16 个突现词的突现周期均集中在 2010–2015 年。突现强度最大的是“arm”上肢(8); 其次是“motor control”机电控制(7.13); 排在第三位的是“hemiparetic patient”脑卒中患者(6.13)。而近 5 年来突现强度较大的关键词包括: “modulation”调制(2015–2016)、“computer interface”计算机接口(2015–2017)、“treadmill therapy”跑步机治疗(2016–2017)、“series elastic actuator”系列弹性致动器(2017–2020)、“prosthetics and exoskeleton”假肢和外骨骼(2018–2020), 见图 9。系列弹性致动器主要应用于下肢动力假肢<sup>[37]</sup>。麻省理工学院在设计和制造动力假体方面研发出的仿生脚踝就属于此。关节可以模仿正常关节运动、补偿缺失肌肉的功能, 将重量从其他肢体上移开, 使得被截肢者可以依赖假肢运动, 且该假肢适用于任何接触表面。外骨骼在最近几年特别流行, 它在军事、医疗、民用等领域具有巨大的市场和前景。外骨骼机器人是一种特殊类型的康复机器人, 主要用于辅助行走。目前, 用于脑卒中康复的机器人外骨骼可以为用户提供一致的、高剂量的运动重复以及平衡和稳定性, 因此受到了医疗人员及患者的青睐。

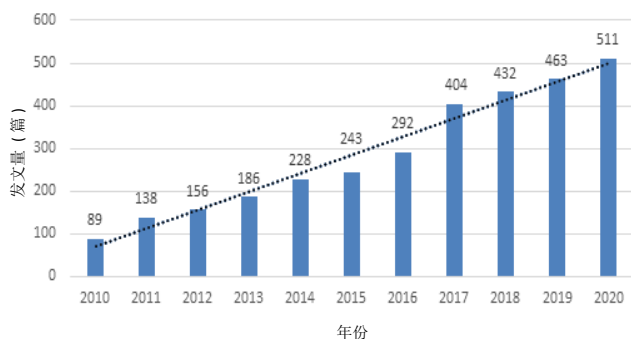
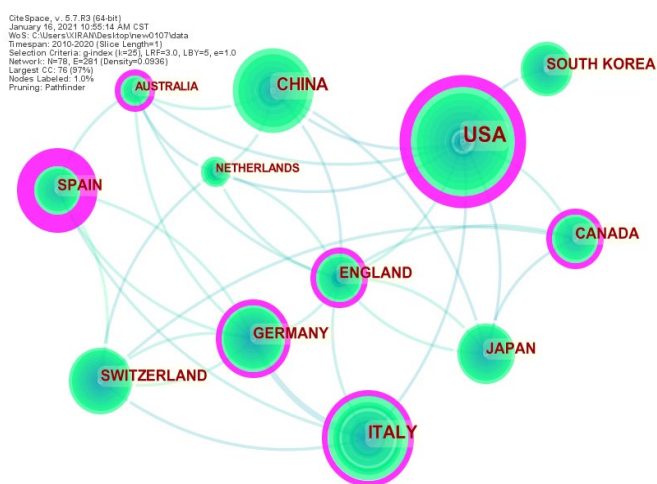


图 1 | Web of Science 数据库 2010–2020 年康复机器人研究领域发文量趋势图

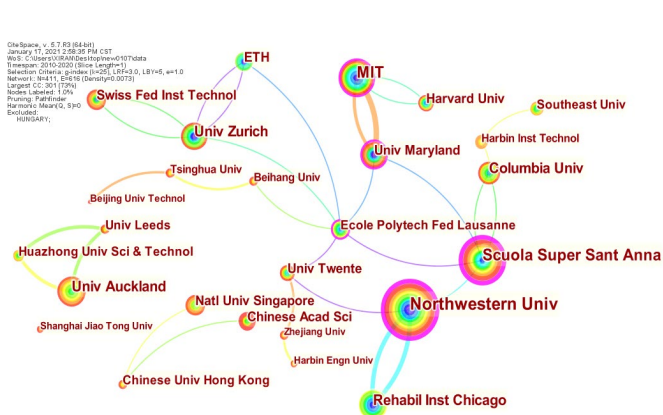
Figure 1 | Trend chart of the number of research papers regarding rehabilitation robots published from 2010 to 2020 included in the Web of Science



图注：圆圈越大代表发文量越高；紫色外圈越粗代表中心度越高

图 2 | Web of Science 数据库 2010–2020 年康复机器人研究领域国家 / 地区合作共现图谱

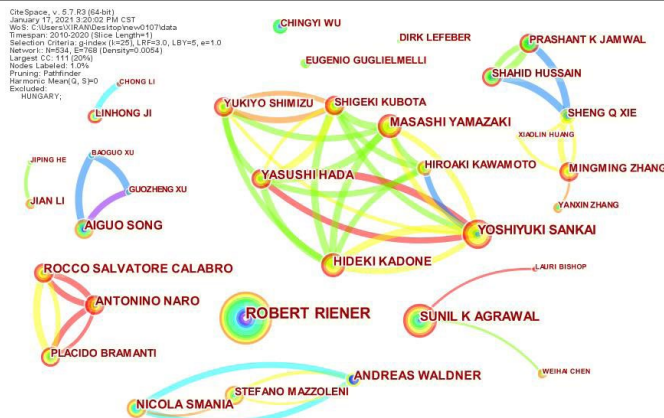
Figure 2 | Co-occurrence map of country/region cooperation in the field of rehabilitation robots from 2010 to 2020 included in the Web of Science



图注：图中圆圈代表研究结果；符号越大越粗代表研究机构频次越高；紫色外圈越粗代表中心度越高；线条是指机构之间的联系

图 3 | Web of Science 数据库 2010–2020 年康复机器人研究领域机构共现图谱

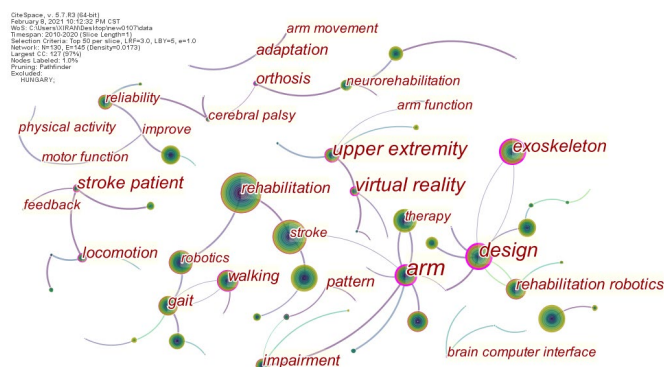
Figure 3 | Co-occurrence map of research institutions in the field of rehabilitation robots from 2010 to 2020 included in the Web of Science



图注：圆圈越大表示出现次数越多；线条是指作者间的联系，线条越粗代表联系越密切

图 4 | Web of Science 数据库 2010–2020 年康复机器人研究领域作者及合作关系图谱

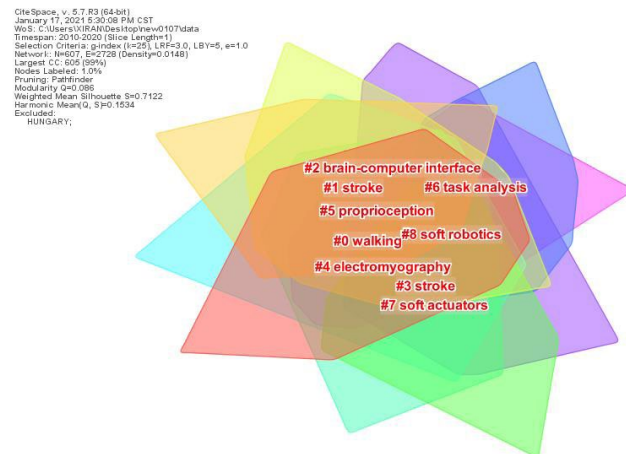
Figure 4 | Graph of authors and partnerships in the field of rehabilitation robots from 2010 to 2020 included in the Web of Science



图注：图中圆圈代表关键词，圆圈越粗代表关键词频次越高，紫色外圈越粗代表中心度越高；线条是指关键词之间的联系，线条越粗代表联系越密切

图 5 | Web of Science 数据库 2010–2020 年康复机器人研究领域高频关键词共现图谱

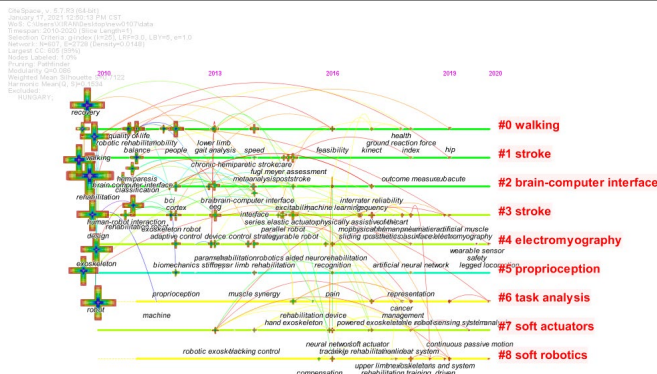
Figure 5 | Co-occurrence map of high-frequency keywords in the field of rehabilitation robots from 2010 to 2020 included in the Web of Science



图注：运用 CiteSpace 对关键词进行聚类分析，采用经典的 LLR 算法，共得到 9 个聚类群

图 6 | Web of Science 数据库 2010–2020 年康复机器人研究领域关键词聚类图谱

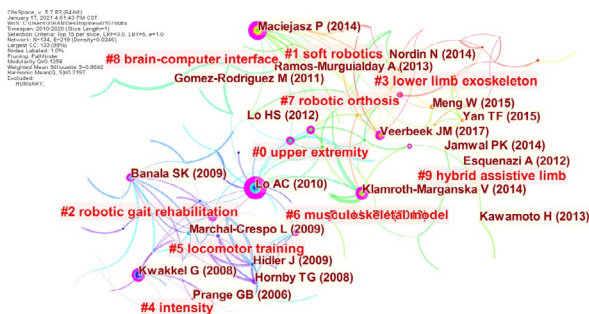
Figure 6 | Keyword clustering map in the field of rehabilitation robots from 2010 to 2020 included in the Web of Science



图注：2019-2020年，机器人传感系统、致动器、气动人工肌肉、任务分析、可穿戴式机器人和柔性机器人等成为新的词汇

图7 | Web of Science 数据库 2010-2020 年康复机器人研究领域关键词时间动态演变情况

Figure 7 | Dynamic evolution of keywords in the field of rehabilitation robots from 2010 to 2020 included in the Web of Science



图注：图中不同的圆圈颜色代表不同的聚类，圆圈的数量代表的是分析参考文献的多少，圆圈的大小代表每篇参考文献的共被引频率，圆圈越大，共被引频率越高；紫色的外圈代表中介中心性，外圈越大中心性越高；相互连接的2点代表2篇文献同时被另一篇论文所引用，连线的长短代表了2篇参考文献的相关性，相关性越强连线越短

图8 | Web of Science 数据库 2010-2020 年康复机器人研究领域文献共被引图谱

Figure 8 | Co-citation map of literatures in the field of rehabilitation robots from 2010 to 2020 included in the Web of Science

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2010 - 2020
arm	2010	8	2010	2011	█
motor control	2010	7.13	2010	2014	█
hemiparetic patient	2010	6.13	2010	2014	█
body weight support	2010	5.14	2010	2012	█
arm movement	2010	5.11	2010	2013	█
upper limb	2010	4.37	2010	2011	█
locomotor	2010	4.33	2010	2015	█
robotics	2010	5.91	2011	2012	█
reaching movement	2010	4.85	2011	2013	█
weight supported treadmill	2010	4.31	2011	2013	█
intensity	2010	4.24	2011	2014	█
physical therapy	2010	5.07	2012	2014	█
locomotion	2010	4.69	2012	2013	█
paraplegic patient	2010	4.33	2012	2015	█
synergy	2010	4.23	2012	2013	█
strategy	2010	5.71	2013	2014	█
proprioception	2010	4.58	2014	2016	█
modulation	2010	6.34	2015	2016	█
computer interface	2010	4.66	2015	2017	█
treadmill therapy	2010	4.2	2016	2017	█
series elastic actuator	2010	5.09	2017	2020	█
prosthetics and exoskeleton	2010	4.83	2018	2020	█
wearable robotics	2010	4.57	2018	2020	█

图注：近5年来突变强度较大的关键词包括：“modulation”调制(2015-2016)、“computer interface”计算机接口(2015-2017)、“treadmill therapy”跑步机治疗(2016-2017)、“series elastic actuator”系列弹性致动器(2017-2020)、“prosthetics and exoskeleton”假肢和外骨骼(2018-2020)

图9 | Web of Science 数据库 2010-2020 年国际康复机器人研究突现词排序

Figure 9 | Ranking of burst words in the field of rehabilitation robots from 2010 to 2020 included in the Web of Science

### 3 讨论 Discussion

3.1 康复机器人的国际研究现状 康复机器人研究可以追溯到20世纪60年代，由于设计和资金等问题，发展相对较缓慢，20世纪80年代是康复机器人研究的初级阶段，美国和英国处于领先水平，20世纪90年代以后康复机器人的研究进入了全面发展的时期。从1987年，英国人迈克研制出 Handy I 康复机器人样机，到1989年美国麻省理工学院开发出了第一台用于康复治疗的临床试验机器人，再到2020年马斯克汇报脑机接口最新研究成果：硬币大小芯片植入猪脑，可实时读取猪脑信息；有实际功能的设备植入手术机器人，能够完成开颅、植入感受器并进行黏合等所有步骤<sup>[38-39]</sup>。伴随着多学科持续的交叉融合发展，科研工作者在康复机器人领域的探索一路向前，可以预见，人机共融的美好愿景在不久的将来定会实现。

3.2 康复机器人研究热点国家(地区)、机构和作者 总体来看，国际康复机器人领域相关研究发文量呈现逐年稳定增长，且主要集中在康复医学、生物医学工程和神经科学类别，说明康复机器人的研究在医学领域中比较热门。美国、中国和意大利等国家为主要的科研输出国。美国关于康复机器人的发文最多，中国紧跟其后。中国是唯一来自发展中国家的国家，显示了过去10年来中国在康复机器人领域的巨大进步，并起到了重要的作用。在机构合作方面，中国机构与国际合作的有东南大学与美国西北大学、华中科技大学与新西兰奥克兰大学、北京航空航天大学与瑞士洛桑联邦理工大学和哈尔滨工业大学与哥伦比亚大学等均获得了良好的合作关系。其中，东南大学与美国西北大学在2003年就开始了科研合作，通过将力反馈遥操作机器人技术用于脑卒中患者的康复医疗领域，进行康复机器人技术的研究。与国外机构的合作加深了中国科研工作者对康复机器人的认识，对机电一体化、力的反馈控制在康复机器人方面的学习与实践有了全新的思考。

在高产作者中，瑞士苏黎世大学教授 Riener R 以48篇的发文量位居第一，Riener R 教授及其团队的主要研究方向为脊髓损伤和脑卒中的步态康复训练、康复机器人与虚拟现实等方面<sup>[40-44]</sup>，其团队不仅研发新型医疗康复机器人，还对机器人的工作机制进行了详细的研究。在辅助康复机器人中的传感器融合技术方面，研发的传感器与康复机器人联合应用极大地改善了残疾人的生活质量。值得注意的是，是来自中国东南大学的宋爱国教授，以发文量18篇排在第八位。宋爱国教授的研究方向为康复机器人技术、医疗机器人技术、脑-机接口与脑机融合技术等方面，其团队在基于多模式反馈、适应性任务训练水平和安全动作决策机制的新型康复机器人训练系统和半自主机器人手臂与混合脑-脑机接口的装置等方面取得了较好的成果<sup>[45-48]</sup>。同时也证明了中国的学者在康复机器人领域的研究正在向国际靠拢与接轨，甚至在未来赶超国外。

3.3 康复机器人领域研究热点、前沿与趋势 被引情况是反映研究热点的重要指标之一，通过对被引频次及中心性较高

的文献进行阅读、分析,可以了解到康复机器人研究领域关注度较高的一些研究成果,以揭示康复机器人研究中令人关注的领域<sup>[49]</sup>。对被引用较高的前10条文献进行阅读分析,结果表明脑卒中、脊髓损伤、截瘫、上肢功能康复、神经可塑性、致动器技术、柔性机器人手套等在康复机器人研究领域的某个阶段受到了研究者的广泛关注。这些被高引用论文的研究热点有助于确定康复机器人研究的主要热点。其中包括:LO等<sup>[35]</sup>在新英格兰杂志上发表的关于康复机器人辅助治疗卒中后6个月或更长时间的127例中重度上肢功能障碍的多中心随机对照试验中,证实了与常规护理或强化治疗相比,对于卒中后上肢长期缺陷的患者,与常规治疗相比,康复机器人辅助治疗在36周内显著改善了结果。POLYGERINOS等<sup>[27]</sup>在软式康复机器人手套用于联合支持和帮助家庭康复的研究设计中,新的便携式辅助软式康复机器人手套可以增强手康复的个人功能性抓握功能;与现有的设备相比,这款柔软的机器人手套因为其便携携带包和开放式手掌设计有潜力增加使用者的自由度和独立性。ESQUENAZI等<sup>[28]</sup>在ReWalk动力外骨骼康复机器人恢复因脊髓损伤而导致截瘫的人执行常规功能方面的安全性和性能的研究中发现,通过训练后,所有受试者在使用ReWalk的情况下都能够独立地行走,而无需人工协助,平均距离和速度明显改善。可以看出,在高被引文献中,主要研究的方向均和康复机器人的研发、设计与应用密切相关。当前,中国被引用的论文数量较少,分析原因可能是许多研究的发表晚于其他国家。具有较高中心度和频率的关键词代表了一段时间内的研究热点。对热门关键词进行分析发现,康复机器人领域的研究主要集中在康复、脑卒中、设计、外骨骼机器人、上肢、步态、脊髓损伤、性能和可靠性方面。这些研究热点在高被引文献中也得到了呈现,说明这些热点在过去以及未来的一段时间内将继续保持一定的热度,通过对关键词聚类分析发现聚合程度较高,聚合程度越高说明研究间的同质性越好<sup>[50]</sup>。在最近10年中,脑卒中的上肢功能康复是研究的一个热点,随着新技术和设备的快速增长,现在有许多不同康复机器人训练设备设计用来移动或辅助手臂的移动。在所采用的技术和所提供的治疗方面,不同设备提供的治疗类型均存在显著差异。在系统综述中,越来越多的证据表明,康复机器人训练能有益于卒中后手臂功能的恢复<sup>[51]</sup>。康复机器人人机交互(Human-Robot Interaction, HRI)方式如何通过机器智能与生物智能的融合,实现机器人与人的自然、精准交互,也是当前康复机器人研究的热点之一。

突现词代表某段时间内经常被引用的关键字,从而指示前沿特征和趋势。结合关键词的时间动态演变和Burst突现分析,可以对康复机器人的研究领域、研究发展及未来研究趋势形成一个大的把握。通过对突现词的分析,发现2014年之后的前5个突现词是:调制、计算机接口、跑步机治疗、系列弹性致动器、假肢和外骨骼。调制是指对康复机器人信号和程序的调节与控制,即实现精准康复的目的。计算机接

口指的是目前比较流行的脑机接口技术,它提供了一种新的辅助策略,主用于开发由脑机接口控制的肢体或假肢,旨在恢复严重瘫痪患者的活动能力。一项基于脑机接口的步态协调的长期培训在截瘫患者中诱导部分神经系统恢复的研究发现,脑机接口的应用从一种新型的辅助技术升级,以通过使用脑控假体来帮助患者恢复活动能力,升级为一种能够诱导局部脑机接口的新的神经康复疗法<sup>[52-53]</sup>,这是最初的脑机接口研究并未预料到的临床潜力。跑步机治疗主要指的是下肢康复机器人,类似于在跑步机上完成的治疗。Lokomat下肢康复机器人就属于跑步机治疗类型中典型的悬挂减重站立式康复机器人,结合跑步机平台完成运动<sup>[54-55]</sup>。系列致动器是指在控制系统中,能将控制信号转换成具有推动被控系统之动力装置,是康复机器人动力研发与设计部分的核心。假肢和外骨骼机器人的研究当前比较热门,由于机电系统的机械设计和控制算法的快速发展,外骨骼设备已经得到了显著的发展,但仍然局限于较大的身体区域,比如上肢和下肢。由于手部外骨骼的体积小、触觉感知能力强等特点,其在手部生物力学、神经生理学、康复、致动器和传感器、人体与机器人的物理交互以及人体工程学等诸多技术领域仍面临诸多挑战。

SALMINGER等<sup>[56]</sup>在上肢假肢替换中表示,最近几年中,上肢截肢者的假肢替换经历了不同的发展。新的神经外科手术概念的使用极大地改善了控制策略,尤其是对于高位截肢者。模式识别领域的技术创新可以直观地控制多功能机电假肢,极大改善截肢患者的日常生活能力。尽管机电假肢在技术上取得了进步,但电动假肢仍然是截肢者的普遍选择,部分原因是它们提供了自然的感官优势。与没有触觉反馈相比,触觉反馈提高了辨别准确性,因此,解决触觉反馈可以更好地普及假肢的应用范围<sup>[57]</sup>。MOLTENI等<sup>[58]</sup>研究可穿戴动力外骨骼进行地面步行训练在亚急性和慢性脑卒中患者中的可行性和临床效果中发现,使用可穿戴外骨骼动力机器人进行12次地面步态训练可显著改善亚急性和慢性脑卒中后患者的下肢运动功能。NOLAN等<sup>[59]</sup>的研究发现外骨骼机器人可以在脑卒中急性住院患者康复期间提供至关重要的高效率任务训练,并有助于早期康复。作者认为外骨骼在神经表现设计的应用范围将延伸到肢体修复领域以外,将人类带入一个全新领域,彻底重新定义外骨骼机器人的潜能。在未来,设计者们将实现把神经系统延伸到强大的外骨骼,让人们能够通过思维操控和感知它们。医学康复领域越来越倾向于自然、准确的人机交互。近年来,随着个性化的AI任务分析、机器学习、机电交互、智能控制等技术与机器人结合应用到康复医学领域,康复机器人“治疗师”将成为未来康复治疗领域的主力军:“智能外骨骼”机器人作为人类助力,可穿戴式“智能骨骼外骨骼”机器人能够帮助严重肢体功能障碍的老年人、偏瘫及脊髓损伤患者正常行走,并可帮助人类维持平衡功能、增加力量,实现“人机共融,人机合一”<sup>[3]</sup>。脑机接口的“意念控制”从科幻小说走向现实,帮助受损肢体的运动、感觉功能恢复正常。2020年,麻省理工学院技术评



论发表了德埃尔切大学 Eduardo Fernandez 教授在脑机接口方面的一个重大突破——电子人工眼，为全盲患者带来了光明<sup>[60]</sup>。这些仅仅是康复机器人研究成果中的冰山一角，随着国际康复机器人研究的不断深入，在不久的将来，将会涌现出更多新型实用的医疗康复机器人用于患者的治疗，为患者功能康复，重返家庭、工作和社会带来希望。

以人机智能和人机交互的结合为代表的技术突破，使人与机器的结合越来越紧密。在人机交互技术和方法的帮助下，将人的智能和机器智能相结合，优势互补，协同工作，将在医疗康复领域孕育出重大的理论创新和技术突破。脑机接口的未来应用将非常广泛，如何在人和机器之间建立高宽带数据连接的能力，也是当前国际康复机器人研究的一个重要趋势。目前，肢体功能康复机器人还不能提供直观的触觉神经反馈功能，患者只能依靠视觉反馈来判断要抓物体的大小等感官信息，如何实现感官信息的精确神经反馈，还需要进一步的研究。如何帮助患者实现康复的目标，使康复机器人具有情感特征，让患者得到愉快的体验设计，是未来康复机器人发展的挑战和趋势。关于康复机器人技术及系统的研发和应用，中国与欧美等发达国家仍有一定的差距，为了提高康复机器人系统的性能，需要掌握康复机器人的关键核心技术，机电信息感知与控制技术、力反馈控制技术、关节角度与力矩控制技术和空间运动检测技术等<sup>[1]</sup>。特别是这些技术在脑机接口、虚拟现实、机器人传感系统、致动器、气动人工肌肉和可穿戴式柔性机器人等方面的研究，只有这样才能更好地促进康复机器人的发展，从而满足中国未来国民卫生服务的需求。

**3.4 康复机器人存在的问题及挑战** 近年来，康复机器人领域取得了丰硕的科研成果，但由于是跨多学科合作的技术研究，在实际研发过程中仍面临着诸多挑战性问题。诸如：①安全问题，康复机器人的首要问题是安全，这是帮助患者进行康复训练的最基本要求，在以后的研发中应针对性地解决安全问题。②智能控制与人机工效学问题，目前，机器仿生人的运动能量消耗远比单纯的骨骼肌肉运动要高很多，可穿戴式外骨骼机器人操作流程一般较为复杂、自重较大等使得康复训练难度加大，而精细程度方面要差很多，也是目前亟待解决的问题。③人机界面设计是一个具有挑战性的问题。人机界面是人与计算机之间传递和交换信息的媒介和对话窗口，良好的人机界面是提高康复机器人工作效率的关键，康复机器人人机界面的可用性设计还存在许多问题，如患者在训练过程中的主观感受和生理反应不能及时感知，特别是视感知方面，都需要不断的优化和学习。现有康复机器人普遍缺少触觉反馈，建议研究各类传感器，增强康复机器人同人体的交互。④多学科合作交流问题，由于康复机器人并非所有的技术部件都开发得足够好，或设计得足以用于日常生活和户外应用，因此需要大量的合作工作和利用来自医疗技术、生物力学、工程和产品开发的资源。⑤价格问题，目前的康复机器人价格较昂贵，对普通家庭负担较大。建议以后的研

究可寻找性价比高的材料，实现康复机器人真正普及到需要的患者中。

**3.5 研究的局限性** 此次研究只纳入了 Web of Science 数据库 SCIE 核心数据合集发表的康复机器人相关研究，且文章类型为英文文献，可能忽略了康复机器人领域在其他语言方面的高质量文献，在文献检索方面存在一定的局限性。在进行聚类分析时，不同类别的内容可能会存在一定的交叉重叠现象。此外，文献共被引频次与时间相关，近几年发表的文章可能因为发表时间较短，共被引频次总合相对偏低，造成研究结果与实际情况之间存在差异。由于算法的不同，在运用 CiteSpace 生成可视化图谱的过程中，时间分区、阈值及裁剪方式暂无标准化的设置流程，可能会造成一定的偏倚。

**结论：**文章首次基于 Web of Science 数据库，运用 CiteSpace 软件从多个角度对国际上康复机器人近 10 年的研究进行了文献计量及可视化分析，相对科学、直观地展现了康复机器人近 10 年的研究概况。通过可视化分析发现，国际康复机器人领域研究处于高速发展阶段，以康复机器人为主题的相关文献不断涌现，呈现稳定增长的趋势。目前，康复机器人在上肢和神经损伤领域的应用最广泛，关于脑机接口、虚拟现实、柔性可穿戴式、任务分析和外骨骼类的康复机器人研究越来越引起人们的关注，是近年来康复机器人研究的前沿和热点领域，代表着未来的研究发展趋势，是今后研究可以参考的方向。未来康复机器人领域的研究应着重关注以下方面：一是关注患者功能需求，提高生活质量；二是加强多学科交叉合作，构建区域国家合作网络。

**作者贡献：**薛夏利进行构思设计与写作，薛夏利、邓钟义、周凌负责资料收集、分析总结和校对，任文博、孙君志提供 Citespace 软件技术支持，合烨负责项目指导，通讯作者李宁负责整体指导与论文审核。

**利益冲突：**文章的全部作者声明，在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

**经费支持：**该文章接受了“国家重点研发计划(2018YFF0300604)”及“运动医学四川省重点实验室(2021-A002)”的资助。所有作者声明，经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

**写作指南：**该研究遵守国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。

**文章查重：**文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。

**文章外审：**文章经小同行外审专家双盲外审，同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

**文章版权：**文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

**开放获取声明：**这是一篇开放获取文章，根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享 4.0”条款，在合理引用的情况下，允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展，同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献，并为之建立索引，用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

## 4 参考文献 References

- [1] 李光林, 郑悦, 吴新宇, 等. 医疗康复机器人研究进展及趋势 [J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 793-802.
- [2] 林书, 胡虹, 万仑, 等. 骨科机器人辅助经皮椎体后凸成形治疗多节段脊柱转移瘤 [J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(33): 5249-5254.
- [3] 喻洪流. 康复机器人: 未来十大远景展望 [J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(8): 900-902.
- [4] 王秋惠, 魏玉坤, 刘力蒙. 康复机器人研究与应用进展 [J]. 包装工程, 2018, 39(18): 83-89.
- [5] 李宏伟, 张韬, 冯焱娟, 等. 外骨骼下肢康复机器人在脑卒中康复中的应用进展 [J]. 中国康复理论与实践, 2017, 23(7): 788-791.



- [6] RODGERS H, BOSOMWORTH H, KREBS HI, et al. Robot assisted training for the upper limb after stroke (RATULS): a multicentre randomised controlled trial. *Lancet*. 2019;394(10192):51-62.
- [7] BERNHARDT J, MEHRHOLZ J. Robotic-assisted training after stroke: RATULS advances science. *Lancet*. 2019;394(10192):6-8.
- [8] 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.
- [9] MEHRHOLZ J, HÄDRICH A, PLATZ T, et al. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving generic activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*. 2012;(6):Cd006876.
- [10] NAM KY, KIM HJ, KWON BS, et al. Robot-assisted gait training (Lokomat) improves walking function and activity in people with spinal cord injury: a systematic review. *J Neuroeng Rehabil*. 2017;14(1):24.
- [11] LEFMANN S, RUSSO R, HILLIER S. The effectiveness of robotic-assisted gait training for paediatric gait disorders: systematic review. *J Neuroeng Rehabil*. 2017;14(1):1.
- [12] KREBS HI, VOLPE BT. Rehabilitation robotics. *Handb Clin Neurol*. 2013;110:283-294.
- [13] KIM WS, CHO S, KU J, et al. Clinical Application of Virtual Reality for Upper Limb Motor Rehabilitation in Stroke: Review of Technologies and Clinical Evidence. *J Clin Med*. 2020;9(10):3369.
- [14] GORGEY AS. Robotic exoskeletons: The current pros and cons. *World J Orthop*. 2018;9(9):112-119.
- [15] MEKKI M, DELGADO AD, FRY A, et al. Robotic Rehabilitation and Spinal Cord Injury: a Narrative Review. *Neurotherapeutics*. 2018;15(3):604-617.
- [16] STOLLER O, DE BRUIN ED, SCHINDELHOLZ M, et al. Efficacy of Feedback-Controlled Robotics-Assisted Treadmill Exercise to Improve Cardiovascular Fitness Early After Stroke: A Randomized Controlled Pilot Trial. *J Neurol Phys Ther*. 2015;39(3):156-165.
- [17] 牛传欣, 崔立军, 鲍勇, 等. 上肢康复机器人用于神经康复的研究进展 [J]. *中国康复医学杂志*, 2020,35(8):916-920.
- [18] 李文惠, 柳国斌. 国际糖尿病足研究知识图谱: 基于 CiteSpace 的文献可视化分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2021,25(20):3178-3184.
- [19] 王梦婷, 古艳萍, 任文博, 等. 运动干预功能障碍人群血流限制训练的文献热点可视化分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2021,25(8):1264-1269.
- [20] LI XJ, LI CY, BAI D, et al. Insights into stem cell therapy for diabetic retinopathy: a bibliometric and visual analysis. *Neural Regen Res*. 2021;16(1):172-178.
- [21] SUN W, HUANG P, SONG H, et al. Bibliometric analysis of acute pancreatitis in Web of Science database based on CiteSpace software. *Medicine(Baltimore)*. 2020;99(49):e23208.
- [22] VAN HEDEL HJA, SEVERINI G, SCARTON A, et al. Advanced Robotic Therapy Integrated Centers (ARTIC): an international collaboration facilitating the application of rehabilitation technologies. *J Neuroeng Rehabil*. 2018;15(1):30.
- [23] PING X. Study of international anticancer research trends via co-word and document co-citation visualization analysis. *Scientometrics*. 2015;105(1):611-622.
- [24] 张敏, 沈雪乐. 国际知识发现研究领域核心作者群成熟度分析 [J]. *情报杂志*, 2014,33(8):111-116+122.
- [25] LANGHORNE PP, BERNHARDT PJ, KWAKKEL G. Stroke Care 2: Stroke rehabilitation. *The Lancet*. 2011;377(9778):1693-1702.
- [26] LO AC, GUARINO PD, RICHARDS LG, et al. Robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. *N Engl J Med*. 2010;362(19):1772-1783.
- [27] POLYGERINOS P, WANG Z, GALLOWAY KC, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2014;73(C):135-143.
- [28] ESQUENAZI A, TALATY M, PACKEL A, et al. The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury. *Am J Phys Med Rehabil*. 2012;91(11):911-921.
- [29] KRAKAUER JW, CARMICHAEL ST, CORBETT D, et al. Getting neurorehabilitation right: what can be learned from animal models?. *Neurorehabil Neural Repair*. 2012;26(8):923-931.
- [30] PARK J, LEE Y, HONG J, et al. Tactile-direction-sensitive and stretchable electronic skins based on human-skin-inspired interlocked microstructures. *ACS Nano*. 2014; 8(12): 12020-12029.
- [31] KIGUCHI K, HAYASHI Y. An EMG-Based Control for an Upper-Limb Power-Assist Exoskeleton Robot. *IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern*. 2012;42(4):1064-1071.
- [32] KLAMROTH-MARGANSKA V, BLANCO J, CAMPEN K, et al. Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial. *Lancet Neurol*. 2014;13(2):159-166.
- [33] PARK YL, CHEN BR, PÉREZ-ARANCIBIA NO, et al. Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle-foot rehabilitation. *Bioinspir Biomim*. 2014;9(1):016007.
- [34] HEO P, GU GM, LEE SJ, et al. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*. 2012;13(5):807-824.
- [35] LO AC, GUARINO PD, RICHARDS LG, et al. Robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. *N Engl J Med*. 2010;362(19):1772-1783.
- [36] MACIEJASZ P, ESCHWEILER J, GERLACH-HAHN K, et al. A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil*. 2014;11:3.
- [37] GRABOWSKI AM, D'ANDREA S. Effects of a powered ankle-foot prosthesis on kinetic loading of the unaffected leg during level-ground walking. *J Neuroeng Rehabil*. 2013;10:49.
- [38] MUSK E. An Integrated Brain-Machine Interface Platform With Thousands of Channels. *J Med Internet Res*. 2019;21(10):e16194.
- [39] PISARCHIK AN, MAKSIMENKO VA, HRAMOV AE. From Novel Technology to Novel Applications: Comment on "An Integrated Brain-Machine Interface Platform With Thousands of Channels" by Elon Musk and Neuralink. *J Med Internet Res*. 2019;21(10):e16356.
- [40] NOVAK D, RIENER R. Sensor Fusion in Assistive and Rehabilitation Robotics. *Sensors (Basel)*. 2020;20(18):5235.
- [41] HAUFE FL, SCHMIDT K, DUARTE JE, et al. Activity-based training with the Myosuit: a safety and feasibility study across diverse gait disorders. *J Neuroeng Rehabil*. 2020;17(1):135.
- [42] VALERO-CUEVAS FJ, KLAMROTH-MARGANSKA V, WINSTEIN CJ, et al. Robot-assisted and conventional therapies produce distinct rehabilitative trends in stroke survivors. *J Neuroeng Rehabil*. 2016;13(1):92.
- [43] GUIDALI M, KELLER U, KLAMROTH-MARGANSKA V, et al. Estimating the patient's contribution during robot-assisted therapy. *J Rehabil Res Dev*. 2013;50(3):379-394.
- [44] JUST F, ÖZEN Ö, TORTORA S, et al. Human arm weight compensation in rehabilitation robotics: efficacy of three distinct methods. *J Neuroeng Rehabil*. 2020;17(1):13.
- [45] ZENG H, SHEN Y, HU X, et al. Semi-Autonomous Robotic Arm Reaching With Hybrid Gaze-Brain Machine Interface. *Front Neurobot*. 2019;13:111.
- [46] PAN L, ZHAO L, SONG A, et al. A Novel Robot-Aided Upper Limb Rehabilitation Training System Based on Multimodal Feedback. *Front Robot AI*. 2019;6:102.
- [47] PAN L, SONG A, DUAN S, et al. Patient-Centered Robot-Aided Passive Neurorehabilitation Exercise Based on Safety-Motion Decision-Making Mechanism. *Biomed Res Int*. 2017;2017:4185939.
- [48] PAN L, SONG A, WANG S, et al. Experimental Study on Upper-Limb Rehabilitation Training of Stroke Patients Based on Adaptive Task Level: A Preliminary Study. *Biomed Res Int*. 2019;2019:2742595.
- [49] 陈悦, 宋超, 周京生, 等. 文献计量学视角下的论文被引频次影响因素研究——兼评使用与被引之间关系 [J]. *情报杂志*, 2019,38(4):96-104.
- [50] 杨晗, 李涓, 徐桂兴, 等. 国际近 15 年太极拳研究的文献计量及可视化分析 [J]. *中国康复医学杂志*, 2020,35(3):327-332.
- [51] MEHRHOLZ J, POLLOCK A, POHL M, et al. Systematic review with network meta-analysis of randomized controlled trials of robotic-assisted arm training for improving activities of daily living and upper limb function after stroke. *J Neuroeng Rehabil*. 2020;17(1):83.
- [52] DOWNEY JE, BRANE L, GAUNT RA, et al. Motor cortical activity changes during neuroprosthetic-controlled object interaction. *Sci Rep*. 2017;7(1):16947.
- [53] DONATI AR, SHOKUR S, MORYA E, et al. Long-Term Training with a Brain-Machine Interface-Based Gait Protocol Induces Partial Neurological Recovery in Paraplegic Patients. *Sci Rep*. 2016;6:30383.
- [54] SCHICKETMUELLER A, LAMPRECHT J, HOFMANN M, et al. Gait Event Detection for Stroke Patients during Robot-Assisted Gait Training. *Sensors (Basel)*. 2020;20(12):3399.
- [55] SHI T, TIAN Y, SUN Z, et al. A New Projected Active Set Conjugate Gradient Approach for Taylor-Type Model Predictive Control: Application to Lower Limb Rehabilitation Robots With Passive and Active Rehabilitation. *Front Neurobot*. 2020;14:559048.
- [56] SALMINGER S, MAYER JA, STURMA A, et al. [Exoprosthetic Replacement of the Upper Extremity]. *Z Orthop Unfall*. 2016;154(4):411-424.
- [57] THOMAS N, UNG G, MCGARVEY C, et al. Comparison of vibrotactile and joint-torque feedback in a myoelectric upper-limb prosthesis. *J Neuroeng Rehabil*. 2019;16(1):70.
- [58] MOLTENI F, GASPERINI G, GAFFURI M, et al. Wearable robotic exoskeleton for overground gait training in sub-acute and chronic hemiparetic stroke patients: preliminary results. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2017;53(5):676-684.
- [59] NOLAN KJ, KARUNAKARAN KK, CHERVIN K, et al. Robotic Exoskeleton Gait Training During Acute Stroke Inpatient Rehabilitation. *Front Neurobot*. 2020;14:581815.
- [60] ZHANG X, CHAN FK, PARTHASARATHY T, et al. Modeling and simulation of complex dynamic musculoskeletal architectures. *Nat Commun*. 2019;10(1):4825.