

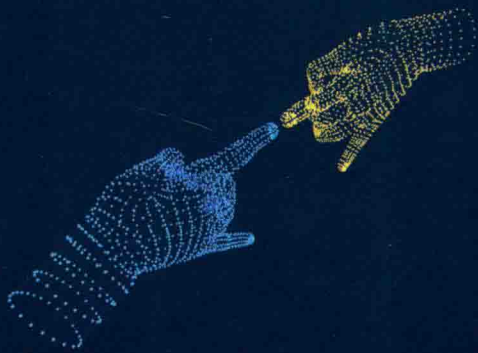
“十三五”国家重点图书出版规划项目  
湖北省公益学术著作出版专项资金资助项目  
智能制造与机器人理论及技术研究丛书



总主编 丁汉 孙容磊

# 多自由度并联康复机器人 及其人机交互控制

刘泉 艾青松 孟伟 陈昆◎编著



DUOZIYOU DU BINGLIAN KANGFU JIQIREN  
JI QI RENJI JIAOHU KONGZHI

非外借



华中科技大学出版社

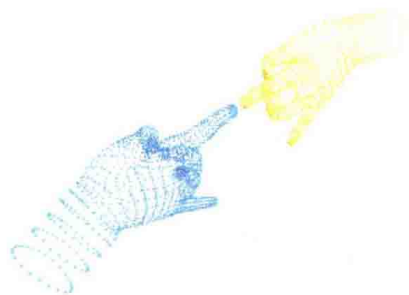
<http://press.hust.edu.cn>



“十三五”国家重点图书出版规划项目  
湖北省公益学术著作出版专项资金资助项目  
智能制造与机器人理论及技术研究丛书  
总主编 丁汉 孙容磊

# 多自由度并联康复机器人 及其人机交互控制

刘泉 艾青松 孟伟 陈昆◎编著



DUOZIYOU DU BINGLIAN KANGFU JIQIREN  
JI QI RENJI JIAOHU KONGZHI



华中科技大学出版社

<http://press.hust.edu.cn>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书面向“健康中国”战略,总结了研究团队近年来在多自由度并联康复机器人及其人机交互控制方面的重要研究进展和成果,充分阐述了多自由度康复机器人的背景、驱动、构型、控制系统和应用技术,综合探讨了康复机器人的驱动与传感技术、并联机构及康复机器人实例、下肢康复机器人的力反馈交互控制和肌电自主控制、基于生物信号的人机交互接口,以及气动脚踝康复机器人的柔顺控制和脑机协作控制,最后讨论了康复机器人在柔性外骨骼结构、可穿戴传感设备和以患者为中心的控制策略方面的发展趋势。

本书旨在为从事康复机器人科学和技术研究及产品开发的科技工作者、老师和学生提供有益的参考,可作为高职高专机械电子信息及相关专业基础课程的教材,也可供工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

多自由度并联康复机器人及其人机交互控制/刘泉等编著. —武汉:华中科技大学出版社, 2023. 1

(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)

ISBN 978-7-5680-8831-2

I. ①多… II. ①刘… III. ①康复训练-专用机器人-人-机系统-研究 IV. ①TP242.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 238101 号

## 多自由度并联康复机器人及其人机交互控制

DUOZIYOU DU BINGLIAN KANGFU JIQIREN JI QI RENJI JIAOHU KONGZHI

刘 泉 艾青松 孟 伟 陈 昆 编著

策划编辑:余伯仲

责任编辑:戢风平

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)  
武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话:(027)81321913  
邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:18.25

字 数:328千字

版 次:2023年1月第1版第1次印刷

定 价:168.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究



# 智能制造与机器人理论及技术研究丛书

## 专家委员会

**主任委员** 熊有伦（华中科技大学）

**委员**（按姓氏笔画排序）

卢秉恒（西安交通大学）      朱 荻（南京航空航天大学）      阮雪榆（上海交通大学）  
杨华勇（浙江大学）      张建伟（德国汉堡大学）      邵新宇（华中科技大学）  
林忠钦（上海交通大学）      蒋庄德（西安交通大学）      谭建荣（浙江大学）

## 顾问委员会

**主任委员** 李国民（佐治亚理工学院）

**委员**（按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）      王飞跃（中国科学院自动化研究所）  
王田苗（北京航空航天大学）      尹周平（华中科技大学）  
甘中学（宁波市智能制造产业研究院）      史铁林（华中科技大学）  
朱向阳（上海交通大学）      刘 宏（哈尔滨工业大学）  
孙立宁（苏州大学）      李 斌（华中科技大学）  
杨桂林（中国科学院宁波材料技术与工程研究所）      张 丹（北京交通大学）  
孟 光（上海航天技术研究院）      姜钟平（美国纽约大学）  
黄 田（天津大学）      黄明辉（中南大学）

## 编写委员会

**主任委员** 丁 汉（华中科技大学）      孙容磊（华中科技大学）

**委员**（按姓氏笔画排序）

王成恩（上海交通大学）      方勇纯（南开大学）      史玉升（华中科技大学）  
乔 红（中国科学院自动化研究所）      孙树栋（西北工业大学）      杜志江（哈尔滨工业大学）  
张定华（西北工业大学）      张宪民（华南理工大学）      范大鹏（国防科技大学）  
顾新建（浙江大学）      陶 波（华中科技大学）      韩建达（南开大学）  
蔺永诚（中南大学）      熊 刚（中国科学院自动化研究所）      熊振华（上海交通大学）

# 作者简介



▶ **刘泉** 工学博士，武汉理工大学信息学科首席教授，国家“万人计划”教学名师，“光纤传感与信息处理”全国高校黄大年式教师团队负责人，国家电子信息类专业教学指导委员会委员。主要从事信息处理、智能康复机器人等方向的研究工作。主持国家自然科学基金（重大）子项和面上项目，以及国家“两机”专项、国家重点研发计划项目、国家973和863计划项目的子项等多项国家级项目。曾获教育部技术发明奖一等奖、湖北省科技进步奖一等奖和湖北省技术发明奖二等奖各1项。获授权国家发明专利40余项，发表SCI收录论文80余篇，出版学术著作和教材9部。获得国家级教学成果奖二等奖1项、湖北省教学成果奖一等奖4项。



▶ **艾青松** 工学博士，教授、博士生导师，湖北大学副校长，兼任湖北省科协常委、中国人工智能学会智能机器人专业委员会委员、国际期刊*Cogent Engineering*高级编辑。主要从事医疗康复机器人、信号处理、新一代信息技术等领域的研究。主持承担国家重点研发计划课题1项、国家自然科学基金项目2项、国家高技术船舶专项子题1项、国家级军工项目1项。出版英文学术专著1部，在国内外学术期刊和国际会议上发表SCI/EI收录论文90余篇，包括ESI高被引论文1篇，获授权发明专利8项、实用新型专利4项。获卫星导航定位科技进步奖一等奖1项、教育部高等学校科研优秀成果奖科技进步奖二等奖1项、湖北省教学成果奖一等奖2项。

# 作者简介



▶ **孟伟** 工学博士，武汉理工大学信息工程学院副教授、博士生导师，英国利兹大学机器人学博士后，入选湖北省“青年拔尖人才培养计划”。主要从事柔性康复机器人、人机智能交互控制等方向的研究工作。主持承担国家自然科学基金面上项目、青年科学基金项目、国家重点研发计划子课题等纵向科研项目6项。出版学术著作4部，发表SCI/EI收录论文70余篇，ESI高被引论文2篇，获授权/申请发明专利15项。多次担任国际会议分会场主席、国际期刊编辑/客座编辑，做特邀主题/论文报告20余次。获湖北省教学成果奖一等奖1项、国际会议最佳论文奖2项，指导学生获得中国研究生电子设计竞赛全国一等奖等国家级奖励4项。



▶ **陈昆** 工学博士，武汉理工大学信息工程学院副教授、硕士生导师。主要研究方向包括生理信号处理、脑机接口、图像处理等。主持承担湖北省自然科学基金青年基金项目1项，参与了国家自然科学基金项目、中新国际合作项目、湖北省国际合作重点项目等多项课题的研究。在国内外学术期刊和国际会议上发表SCI/EI收录论文30余篇，获授权发明专利6项，获教育部高等学校科研优秀成果奖科技进步奖二等奖1项。



## 总序

近年来,“智能制造+共融机器人”特别引人注目,呈现出“万物感知、万物互联、万物智能”的时代特征。智能制造与共融机器人产业将成为优先发展的战略性新兴产业,也是中国制造 2049 创新驱动发展的巨大引擎。值得注意的是,智能汽车与无人机、水下机器人等一起所形成的规模宏大的共融机器人产业,将是今后 30 年各国争夺的战略高地,并将对世界经济发展、社会进步、战争形态产生重大影响。与之相关的制造科学和机器人学属于综合性学科,是联系和涵盖物质科学、信息科学、生命科学的大科学。与其他工程科学、技术科学一样,制造科学、机器人学也是将认识世界和改造世界融合为一体的大科学。20 世纪中叶,*Cybernetics* 与 *Engineering Cybernetics* 等专著的发表开创了工程科学的新纪元。21 世纪以来,制造科学、机器人学和人工智能等领域异常活跃,影响深远,是“智能制造+共融机器人”原始创新的源泉。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准智能制造和机器人的科技前沿,组织策划了本套“智能制造与机器人理论及技术研究丛书”。丛书涉及的内容十分广泛。热烈欢迎各位专家从不同的视野、不同的角度、不同的领域著书立说。选题要点包括但不限于:智能制造的各个环节,如研究、开发、设计、加工、成形和装配等;智能制造的各个学科领域,如智能控制、智能感知、智能装备、智能系统、智能物流和智能自动化等;各类机器人,如工业机器人、服务机器人、极端机器人、海陆空机器人、仿生/类生/拟人机器人、软体机器人和微纳机器人等的发展和应用;与机器人学有关的机构学与力学、机动性与操作性、运动规划与运动控制、智能驾驶与智能网联、人机交互与人机共融等;人工智能、认知科学、大数据、云制造、物联网和互联网等。

本套丛书将成为有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,青年科学家



本书是在研究团队多年科研实践的基础上撰写的,共分9章,第1章至第3章由刘泉和孟伟撰写,第4章至第7章由艾青松和孟伟撰写,第8章和第9章由刘泉和陈昆撰写。全书由刘泉统稿,艾青松校对。在本书撰写过程中,马力、廖杨喆、阳俊等团队教师,左洁、刘艾明、朱承祥、张从胜、周蕾、张亚楠和徐图等同学协助搜集整理了部分资料,在此一并致谢。

本书全面介绍了康复机器人的概念及其背景,深入探讨了面向下肢和脚踝康复的多自由度并联机器人理论基础和应用技术与系统,可以为该领域面向本科生、研究生的教学提供参考,也可作为相关企业工程技术人员的参考书。

作者  
2022年5月



# 目录

<b>第 1 章 康复机器人概述</b>	/1
1.1 绪论	/1
1.2 多自由度康复机器人	/3
1.2.1 多自由度康复机器人机构	/3
1.2.2 气动肌肉驱动的康复机器人	/9
1.3 康复机器人的控制	/13
1.3.1 机器人辅助康复训练模式	/13
1.3.2 康复机器人控制方法	/16
1.4 康复机器人关键技术分析	/28
1.5 本章小结	/30
本章参考文献	/30
<b>第 2 章 康复机器人的驱动与传感技术</b>	/45
2.1 康复机器人驱动技术	/45
2.1.1 刚性驱动器	/45
2.1.2 气动肌肉驱动器	/47
2.1.3 新型柔性驱动器	/48
2.2 康复机器人传感技术	/53
2.2.1 物理信息传感器	/53
2.2.2 生物信息传感器	/58
2.2.3 新型光纤传感器	/66
2.3 本章小结	/72
本章参考文献	/72
<b>第 3 章 并联机构及康复机器人实例</b>	/76
3.1 多自由度并联机构及其应用	/76



- 3.1.1 多自由度并联机器人 /76
- 3.1.2 并联机构在康复中的应用 /81
- 3.2 六自由度并联下肢康复机器人 /83
  - 3.2.1 六自由度并联机器人机构 /84
  - 3.2.2 下肢康复机器人运动学模型 /84
  - 3.2.3 下肢康复机器人动力学模型 /89
  - 3.2.4 下肢康复机器人系统集成 /91
- 3.3 二自由度并联脚踝康复机器人 /94
  - 3.3.1 二自由度并联机器人机构 /94
  - 3.3.2 脚踝康复机器人运动学模型 /97
  - 3.3.3 脚踝康复机器人动力学模型 /100
  - 3.3.4 脚踝康复机器人系统集成 /103
- 3.4 本章小结 /106
- 本章参考文献 /107
- 第4章 下肢康复机器人的力反馈交互控制 /111**
  - 4.1 下肢康复机器人力/位置混合控制 /111
    - 4.1.1 力/位置混合控制原理及结构 /111
    - 4.1.2 力/位置混合控制仿真平台 /114
    - 4.1.3 基于力的机器人辅助康复训练策略 /117
    - 4.1.4 机器人的力/位置混合控制实验 /119
  - 4.2 基于阻抗模型的康复机器人交互控制 /124
    - 4.2.1 阻抗模型及阻抗控制原理 /125
    - 4.2.2 康复机器人自适应阻抗控制 /127
    - 4.2.3 基于阻抗的虚拟管道按需辅助 /130
    - 4.2.4 实验结果及分析 /133
  - 4.3 本章小结 /139
  - 本章参考文献 /140
- 第5章 气动脚踝康复机器人的柔顺控制 /142**
  - 5.1 气动肌肉的柔顺性建模 /142
    - 5.1.1 气动肌肉的结构与工作原理 /142
    - 5.1.2 气动肌肉力-位移-气压模型 /144
    - 5.1.3 气动肌肉的变刚度模型 /145
  - 5.2 末端柔顺的脚踝康复机器人导纳控制 /147
    - 5.2.1 任务空间导纳控制原理及结构 /147

- 5.2.2 脚踝关节主动力矩模型 /149
- 5.2.3 机器人导纳控制器实现 /151
- 5.3 柔性脚踝康复机器人层级柔顺控制 /155
  - 5.3.1 基于自适应调节的层级柔顺控制 /155
  - 5.3.2 层级柔顺实验及结果分析 /157
- 5.4 本章小结 /163
- 本章参考文献 /164
- 第6章 基于生物信号的人机交互接口 /166**
  - 6.1 基于肌电信号的运动意图识别 /166
    - 6.1.1 肌电信号预处理与特征提取 /166
    - 6.1.2 下肢多源特征参数分析 /167
    - 6.1.3 基于多源信息的运动意图识别 /176
  - 6.2 神经肌肉模型及其控制接口 /181
    - 6.2.1 骨骼肌肉建模 /182
    - 6.2.2 参数辨识及模型验证 /186
    - 6.2.3 肌电驱动的机械臂自主控制 /193
  - 6.3 脑电信号及其识别 /196
    - 6.3.1 P300/SSVEP 信号及特征提取 /197
    - 6.3.2 P300/SSVEP 意图信号的识别 /200
    - 6.3.3 基于 SSVEP/P300 的脑机接口 /201
  - 6.4 本章小结 /207
  - 本章参考文献 /207
- 第7章 下肢康复机器人的肌电自主控制 /213**
  - 7.1 基于肌体状态的下肢康复机器人变阻抗控制 /213
    - 7.1.1 肌肉活动状态和肌力分析 /213
    - 7.1.2 适应肌体活动的变阻抗控制 /215
    - 7.1.3 实验结果及分析 /217
  - 7.2 动作意图主导的下肢康复机器人协作控制 /224
    - 7.2.1 患者肌体疲劳状态评估 /224
    - 7.2.2 疲劳避免自适应阻抗控制 /231
    - 7.2.3 患者主导的人-肌-机协作控制 /236
  - 7.3 本章小结 /242
  - 本章参考文献 /243



第 8 章	脚踝康复机器人的脑机协作控制	/245
8.1	基于运动想象脑电信号的意图识别	/245
8.1.1	运动想象脑电信号预处理	/245
8.1.2	基于脑网络的通道选择	/248
8.1.3	基于多域特征融合的运动想象分类	/250
8.2	基于运动想象的脚踝康复机器人协作控制	/255
8.2.1	基于运动想象的脑控机器人系统	/255
8.2.2	脚踝康复机器人的脑机协作控制	/258
8.2.3	实验结果及分析	/260
8.3	本章小结	/265
	本章参考文献	/265
第 9 章	总结与展望	/268
9.1	全书工作总结	/268
9.2	未来研究展望	/270
	本章参考文献	/272



# 第 1 章 康复机器人概述

## 1.1 绪论

数据表明当前世界范围内很多国家已逐渐步入老年型社会。联合国官方提供的统计数据显示,在 20 世纪 50 年代,全球范围内 60 岁以上的人口仅占世界人口的 8%。到 2009 年,这一比例已上升至 11%,预计到 2050 年,60 岁以上的人口比例将增加至 2009 年的两倍左右,达到 22%,其绝对数值将从 2009 年的 7.43 亿增加至 2050 年的 20 亿。亚洲以及拉丁美洲将是老年人比例增长最快的地区,2009 年老年人比例为 10%,2050 年将增至 24%<sup>[1]</sup>。截至 2017 年年底,我国 60 岁及以上老年人口有 2.41 亿,占总人口的 17.3%,到 2050 年,中国老年人口比例将达到峰值,60 岁以上人口将达到 5 亿。

同时,全球大约有 6.5 亿残疾人,约占世界总人口的 10%,其中 80% 的残疾人生活在发展中国家<sup>[2]</sup>。2013 年中国残疾人事业统计年鉴中的数据库简报显示,全国入库残疾人总数约为 8502 万人,其中肢体残疾人数为 2472 万人,约占入库残疾人总数的 29%<sup>[3]</sup>。随着年龄的增长和生理机能的衰退,老年人及残疾人的肢体灵活性不断下降,这在很大程度上对他们的日常生活造成了不便<sup>[4]</sup>。伴随着老龄化过程的生理衰退,老年人四肢的灵活性下降,而脑卒中、脊髓损伤也会引起运动障碍。另外,肢体可能由于多种原因而遭受损伤,例如运动不当造成肌肉拉伤与神经损伤、营养不良造成肌肉发育不健全、交通意外导致肢体损伤、脑卒中等急性病导致神经与肌体不协调,以及关节炎等累积性疾病导致肌体运动不便。人体运动神经和肌肉受损会引发多元的运动问题,如肌肉收缩紊乱、肌肉硬化以及感官不灵敏等,影响人类最基本的行动能力,给人们的日常工作和生活带来诸多不便和麻烦<sup>[5]</sup>。

肢体残疾人口的庞大基数以及老龄化趋势,使我国康复装备供应和康复临床的需求存在巨大缺口。一方面,医院康复医学科数量不足,康复科室供给和



康复装备供应不足;另一方面,为肢体残疾者提供康复训练的服务供给不足,服务供给和残疾者需求存在巨大缺口。根据残联统计,截至2014年年底,全国共有康复机构6914个,开展肢体残疾康复训练的服务机构达2181个,全国共对36.7万肢体残疾者实施康复训练,而我国肢体残疾者有2400多万人。近年来,人工康复资源紧缺、成本上升,老年人、残疾人和由其他原因造成肢体运动障碍人群的康复和辅助问题已成为一个亟待解决的重要社会问题<sup>[6]</sup>。

传统肢体功能障碍的康复治疗主要依赖于治疗师一对一的徒手训练,难以达到高强度、有针对性和重复性的康复训练要求,且康复治疗师人数严重缺乏,对康复训练效果的评价也多为主观评价,不能够实时监测治疗效果并优化康复策略<sup>[7]</sup>。通过人工或简单的医疗设备进行康复理疗,已经远远不能满足社会的康复需求,因此康复机器人技术应运而生并且成为机器人领域的研究热点<sup>[8]</sup>。将机器人技术应用于康复医疗领域,不仅可以将康复医师从繁重的训练任务中解放出来,减轻医疗人员的负担,而且可以帮助患者进行更加科学有效的康复训练,使患者的运动机能得到更好的恢复<sup>[9]</sup>,并可详细客观地记录训练过程中的运动数据,供医师评价康复训练的效果。康复机器人的研究对于提高康复效率、保证康复质量、降低人工劳动强度具有重要意义。

医疗康复机器人及其控制策略在过去十年内取得了重大的发展,与此同时,对于人体上肢康复机器人的研究起步较早,理论和技术相对成熟。如麻省理工学院的MIT-MANUS机器人<sup>[10]</sup>、苏黎世联邦理工学院的ARMin机器人<sup>[11]</sup>、加州大学欧文分校的Pneu-WREX机器人<sup>[12]</sup>等上肢康复机器人的研究已持续多年。由于人体下肢关节肌肉组织更为复杂、运动自由度差异大,且需考虑患者身体支撑和步态运动等因素,因此下肢康复机器人及其相关理论与技术的研究具有更大的难度。多自由度并联机器人设备具有结构简单、承载能力强、累计误差小等优点,能够适应不同人群的康复训练,对下肢康复的研究有着积极作用,其相关理论与技术的研究已引起越来越多研究者的注意<sup>[13]</sup>。

当前的医疗康复设备多采用电机驱动器。这类康复器械最大的缺点在于刚性驱动方式的柔顺性和安全性差,容易因施力或训练角度过大而对受伤肢体造成二次伤害<sup>[14]</sup>。气动肌肉由橡胶管和编织网构成,通过控制内部气压使橡胶管收缩来产生输出力,其运动方式和力/长度特性酷似生物肌肉<sup>[15]</sup>。相比于电机驱动型,气动柔性驱动型康复器最大的优点就在于其柔顺性和安全性好,这对受伤肢体的康复是至关重要的<sup>[16]</sup>。气动肌肉能以最接近人体肌肉运动的方式来驱动关节运动,其驱动的机器人柔顺性好且适合穿戴,因此作为辅助康复

设备的驱动器具有独特的优势。虽然气动肌肉的位置控制精度低于电机等刚性驱动器的,但在康复应用中位置精度可以折中,为患者提供安全、灵活的辅助才是最重要的<sup>[17]</sup>。

然而,当前的康复机器人及其控制方法在辅助患者训练时存在诸多不足。首先,就下肢康复机器人机构本身而言,传统的外骨骼式机器人不利于适应不同的患者,且在人机交互过程中存在一定的安全隐患。近年来端部式并联机构在下肢康复中应用广泛,其机构设计模型及控制方法值得进一步深入研究。其次,康复机器人是一个时变、强耦合和非线性的动力学系统,需提出高性能运动控制方法以提高机器人操作过程中的稳定性<sup>[18]</sup>。通过机器人的轨迹跟踪控制虽然可以辅助患者进行一定的运动训练,但患者一直处于被动康复状态,缺乏康复的主动性和协作性<sup>[19]</sup>。气动肌肉作为一种新型的气动元件,在机器人技术、医疗矫正技术方面有广阔的用途和应用前景<sup>[20]</sup>,开展面向下肢康复的气动肌肉驱动机器人及其控制方法的探索和研究,对我国未来开发新型柔性医疗康复机器人设备具有十分重要的借鉴意义和作用。

## 1.2 多自由度康复机器人

### 1.2.1 多自由度康复机器人机构

机械本体机构是机器人辅助康复系统的基础,其应满足结构简单、质量轻便、易于操作等基本要求。近年来,国内外开发了各种面向下肢康复的机器人机构。康复机器人按照其与人体接触的方式可分为外骨骼式机器人(exoskeleton)和端部式机器人(end-effector)两类。其中外骨骼式机器人通常可穿戴于患者肢体之上,机器人各关节作用于患者肢体不同部位,通过产生关节力或力矩带动患肢运动;端部式机器人则通过末端平台与患者肢体某一部位接触(如脚或手),由机器人控制末端平台带动患肢运动。就下肢康复而言,典型的外骨骼式机器人有 Lokomat<sup>[21]</sup>、BLEEX<sup>[22]</sup>和 LOPES<sup>[23, 24]</sup>等,而端部式机器人则有 Rutgers Ankle<sup>[25]</sup>、Haptic Walker<sup>[26]</sup>等。

根据机械设计特点和康复应用原理,外骨骼式机器人又可分为基于运动平板/跑步机(treadmill-based)的机器人和基于矫形器(orthosis-based)的机器人,端部式机器人则有基于踏板(footplate-based)的机器人和基于平台(platform-based)的机器人两种类型。表 1-1 所示为典型的下肢康复机器人比较分析。



表 1-1 典型的下肢康复机器人比较分析

类别	设备名称	研究单位	自由度	特征描述
基于运动平板/跑步机的外骨骼式机器人	Lokomat <sup>[21]</sup>	瑞士 Hocoma	双腿运动自由度,用于步态训练	适用于跑步机训练,具有身体重量支撑系统,通过束缚患者双腿在髋关节和膝关节提供辅助动力
	Lokohelp <sup>[27]</sup>	德国 Woodway & Lokohelp 研究组	双腿运动自由度,配置踏板用于步态训练	配合减重支持系统,适用于跑步机训练,可将跑步机的运动传递给患者进行跟踪训练
	LOPES <sup>[23,24]</sup>	荷兰特温特大学	每条腿上具有 3 个旋转自由度,用于跑步机上行走训练	每条腿包括 3 个驱动旋转关节,髋部 2 个自由度,膝部 1 个自由度,在跑步机上训练时与患者并行运动
	ALEX <sup>[28]</sup>	美国特拉华大学	为下肢的平移和旋转提供 7 个自由度	每条外骨骼机械腿在髋部和膝部具有驱动器,为患者跑步机上的行走提供辅助
下肢矫形器类外骨骼式机器人	AAFO <sup>[29]</sup>	美国麻省理工学院	用于脚踝关节的 2 个运动自由度	作为一种主动踝足关节矫形器机器人,采用新型驱动器,可贴合脚踝关节,可在矢状平面内运动
	KAFO <sup>[30]</sup>	美国密歇根大学	脚踝与膝关节矢状平面运动自由度	作为一种膝-踝-足关节矫形器机器人,采用气动肌肉驱动器,为脚踝和膝关节运动提供辅助
	HAL <sup>[31]</sup>	日本筑波大学和 Cyberdyne 公司	全身外骨骼机器人,包括上肢、下肢和躯干自由度	作为一种全身外骨骼式机器人设备,可用于康复或负重支撑,使用了肌电信号来映射患者运动意图
	BLEEX <sup>[22,32]</sup>	美国加州大学伯克利分校	每条腿的髋关节、膝关节和踝关节的 7 个运动自由度	是一对可穿戴的腿部外骨骼机器人,用于提高用户的行走能力,可辅助用户背负很大的重量

续表

类别	设备名称	研究单位	自由度	特征描述
基于踏板的端部式机器人	Gait Trainer GTI <sup>[33]</sup>	德国 Reha-Stim	具有两个踏板,用于脚部/步态运动	患者脚部可固定于踏板之上,通过控制踏板带动患者脚部,模拟人体站立和行走摆动时的运动
	Haptic Walker <sup>[26]</sup>	德国 Charité University Hospital	具有双脚任意运动的自由度	用于模拟不同的步态模式和行走速度,在每个踏板下配置力和力矩传感器来感知患者意图
	G-EO-Systems <sup>[34]</sup>	瑞士 Reha Technology AG	具有两个踏板,用于行走和爬行	作为一种端部式步态机器人,其踏板控制部分可以自由编程,可用于模拟行走或者上下台阶
基于平台的端部式机器人	Rutgers Ankle <sup>[25]</sup>	美国罗格斯大学	基于 Stewart 平台,提供踝足关节的 6 个自由度	可为患者脚踝提供 6 个自由度的运动,并结合虚拟现实提供辅助及阻力,后来扩展为双平台机器人
	ARBOT <sup>[35, 36]</sup>	意大利理工学院	在脚踝关节的背屈/跖屈和内翻/外翻方向具有 2 个自由度	作为一种用于脚踝康复的并联机器人平台,可使患者的脚部固定于动平台之上而进行训练,该机器人使用了定制化的线性驱动器
	Parallel Ankle robots <sup>[37, 38]</sup>	新西兰奥克兰大学	提供脚踝运动的 3 个自由度,通过四轴并联平台实现	面向可穿戴式脚踝康复设备,设计了一个由直流电机驱动的四轴机器人平台,以及一个由气动肌肉驱动的四轴并联机器人平台

### 1. 基于运动平板/跑步机的外骨骼式机器人

基于运动平板/跑步机的外骨骼式机器人通常包括一个身体减重支撑系统,穿戴于患者下肢,在患者于跑步机上进行行走训练时提供辅助。瑞士苏黎世 Hocoma 公司的 Lokomat 机器人如图 1-1(a)所示,是一种典型的基于跑步机和减