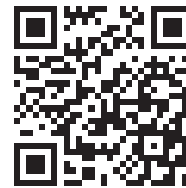


DOI:10.61189/218048jlbhdx

· 综述 ·

辅助康复外骨骼机器人研究现状及元宇宙赋能研究的展望

朱子睿¹, 王 源², 杨达伟^{2,3,4*}

1. 复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200438
2. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海 200032
3. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海 200032
4. 上海市呼吸病研究所, 上海 200032

[摘要] 随着生物医学工程技术的快速发展,辅助康复外骨骼机器人已成为康复医疗领域的研究热点。对此,从设计思路、工作原理、主要种类、技术设备、临床应用等方面总结目前国内外辅助康复外骨骼机器人的研究现状及科研进展。同时,意识到距其成熟仍任重道远,并考虑到物联网的发展、人工智能技术及元宇宙技术的兴起,尝试展望将其与康复医学领域有机结合,为辅助康复外骨骼机器人发展带来新契机。

[关键词] 辅助康复外骨骼机器人;元宇宙医学;物联网医学;研究现状;研究展望

[中图分类号] R 493 **[文献标志码]** A

Research status of assisted rehabilitation exoskeleton robots and future research prospects in this field enabled by the metaverse

ZHU Zirui¹, WANG Yuan², YANG Dawei^{2,3,4*}

1. School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200438, China
2. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital Fudan University, Shanghai 200032, China
3. Shanghai Engineer & Technology Research Center of Internet of Things for Respiratory Medicine, Shanghai 200032, China
4. Shanghai Respiratory Research Institution, Shanghai 200032, China

[Abstract] With the rapid development of biomedical engineering technology, assisted rehabilitation exoskeleton robots have emerged as a research hotspot in the field of rehabilitation medicine. We summarize the current research status and scientific progress of assisted rehabilitation exoskeleton robots both domestically and internationally, covering aspects such as design concepts, working principles, main types, technical equipment, and clinical applications. Simultaneously, recognizing that there is still a long journey ahead before they reach maturity, and considering the evolving Internet of Things, the emergence of artificial intelligence and metaverse technology, we explore the potential for integrating these technologies with rehabilitation medicine, thereby presenting new opportunities for the advancement of assisted rehabilitation exoskeleton robots.

[Key Words] assisted rehabilitation exoskeleton robot; metaverse in medicine; IOT in medicine; research status; research prospects

在中国乃至世界范围内,人口老龄化都已成为大势所趋。目前,我国残疾人口总数极大且不断攀升,其中有很大一部分是由于脑卒中等疾病导致肢体运动障碍,这些残疾患者对高效康复手段的需求极为迫切。而传统的康复训练方式以人力为主,费

时费力,且效率低下、效果不佳。随着智能机器人、物联网、人工智能等技术越发成熟,智能辅助康复外骨骼机器人已然成为最有前景的研究方向,吸引了大批生物学、医学、工程学、信息学领域的专家学者。近年来,该领域在机械结构设计、驱动系统研

[收稿日期] 2024-12-12

[接受日期] 2024-12-29

[基金项目] 上海市健康科普人才能力提升专项(青年英才)(JKKPYC-2023-A20),上海高校市级重点课程(FDSHZD202409),上海市科学技术委员会上海工程技术研究中心建设计划(20DZ2254400)。Supported by Project of Promoting Ability of Medical Science Popularization for Young Talents in Shanghai (JKKPYC-2023-A20), Shanghai Municipal Key Courses (FDSHZD202409), Fund of Shanghai Municipal Commission of Science and Technology (20DZ2254400)。

[作者简介] 朱子睿. E-mail: zrzh24@m.fudan.edu.cn

* 通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-64041990, E-mail: yang.dawei@zs-hospital.sh.cn

发、传感器应用以及控制算法优化等多方面均有显著突破,多种功能各异的辅助康复外骨骼机器人已进入临床试验或实际应用阶段,在帮助患者恢复肢体运动功能、提高生活自理能力方面展现出巨大潜力。即便如此,目前较为成熟的还是以机械传动为主的刚性外骨骼机器人,未来对新材料要求更高的柔性外骨骼机器人将成为研究热点。

辅助康复机器人是一个典型的跨学科交叉研究产物,涉及生物医学、自动化、控制、机械、信息、计算机等领域。现有的辅助康复外骨骼机器人仍存在一定局限性,如难以完全满足不同患者个体差异需求、训练场景相对单一等。最近蓬勃兴起的物联网工程和元宇宙技术与辅助康复外骨骼机器人的发展需求高度契合,或许能够在大数据、虚拟现实、全息影像、人机交互等方面为康复医学发展注入崭新动能,有望打破传统康复训练的诸多限制,开创出全新的康复模式与训练体系,为辅助康复外骨骼机器人的进一步发展提供广阔前景与无限可能。

1 辅助康复外骨骼机器人的设计思路

外骨骼是受到甲虫的启发,由钢铁框架构成并且可由人穿戴的一种仿生机械装置。它符合人体工程学和生物力学原理,深入研究人体肢体的解剖结构、运动范围和力学特性,确保外骨骼机器人的关节布局与人体关节相匹配,能够顺应人体运动,减少对人体的额外负担和不适。通过这种装置,可以为患者提供额外的保护,大幅度提升人体运动能力、防护能力和对复杂环境的适应能力。

1980 年, Yagn 提出一种外骨骼概念模型 Assisted-walking Device, 由与使用者腿部平行的长弓组成,可以帮助人们行走、跑步和跳跃。随着研究的不断深入,外骨骼被应用于工业生产、军事以及医疗康复等领域。相比于传统康复训练的依靠人力,外骨骼辅助康复训练效果更加稳定,重复性和运动效率高,节省了大量人力,能够满足大量患者同时治疗的需求,有助于脑卒中或肢体运动障碍患者高效恢复正常运动能力^[1]。

2 辅助康复外骨骼机器人的分类及工作原理

2.1 分类 辅助康复外骨骼机器人依据生产材料可以分为刚性和柔性(软体)两种。目前市场上刚性外骨骼占比更多,与之相比,柔性外骨骼由于灵活性、伸展性、柔韧性更好,其舒适性和训练效果更优。柔性外骨骼对材料、机械传动、生物兼容等方

面性能的要求远高于刚性外骨骼,是目前辅助康复外骨骼机器人转型升级的热门研究领域。

依据辅助训练的体位来分,辅助康复外骨骼机器人主要分为上肢和下肢两种。其中,下肢外骨骼机器人又分为坐卧式、末端牵引式、直立移动助行式、直立固定减重式和辅助起立式 5 种,分别对应不同的康复训练用途。

2.2 工作原理 辅助康复外骨骼机器人要求环境、穿戴者、机器人三者在相互作用中协调统一。其工作原理整体上由建模感知、结构设计、协同控制、交互优化 4 个模块组成^[2]。其中,建模感知要求机器人能够感知穿戴者的意图并与之交互,包括交互力矩的主动估计及反馈、步态相位与异常状态的识别等。结构设计要求机器人基于仿生设计,柔顺性高,不对穿戴者运动造成障碍。协同控制是辅助康复外骨骼机器人工作的核心,要求机器人与穿戴者能够运动协同,包括核心的关节交互刚度与阻抗控制算法,以制定适应人体当前运动的参数自调节策略。交互优化则要求机器人系统具备不同环境下的适应性与预测性,比如考量何种交互策略对于当前穿戴个体最优以及其能否适应穿戴者当前的运动状态。同时,机器人能够将康复训练效能量化评估并及时反馈给计算系统,指导下一步的策略制定。以此循环,可见 4 个工作步骤缺一不可,紧密关联以真正达到智能交互训练效果。

3 外骨骼康复机器人研究现状及临床应用

3.1 国内外康复机器人研究现状 从康复机器人相关论文发表趋势(图 1)来看,用于患者早期康复训练的固定式上下肢康复机器人、以功能恢复和以生活辅助为主的 3 种机器人的研究最多且应用最为广泛^[3],论文发表量逐年递增。近 10 年来,我国关于康复机器人的发文量已跃居世界第一,这可能与我国老龄化程度加剧,国家对智能化养老的重视程度提高相关。

近几年国内外对康复机器人的研究方向基本一致。其中,工程技术领域是最主要的研究方向,超过一半的研究集中在机器人、自动化、信息工程及计算机方向,甚至远超神经科学、康复、生理学等医学领域。这足以表明工程技术是实现康复机器人的重要软硬件基础。但国内对卒中患者康复的重视程度不及国际,其原因可能是国内更加重视康复机器人的应用,且我国的数学、通信及仪表仪器等方面目前仍处于技术攻坚阶段^[4]。未来,康复机器人技术必将取得可喜的突破,成为应对我国人口

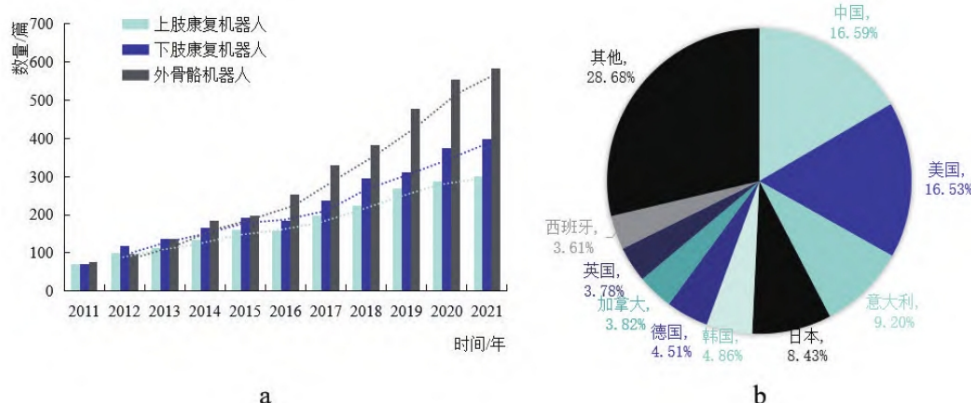


图1 国内外康复机器人相关论文发表情况

A:3种康复机器人相关论文发表趋势;B:各国康复机器人相关发文章量占比统计。数据来源于中国知网、Web of science、Medline、Springlink 和 ScienceDirect 数据库。

老龄化的关键。

从康复机器人相关专利申请趋势来看(图2),近10年,特别是疫情后,我国申请专利的速度持续快速攀升,最高超过国际专利申请总量的1/3,表明

康复机器人领域的诸多技术难点被我国科研人员逐步攻克,可以预见在不远的将来,国内康复机器人技术或将追平甚至赶超国际先进水平^[1]。

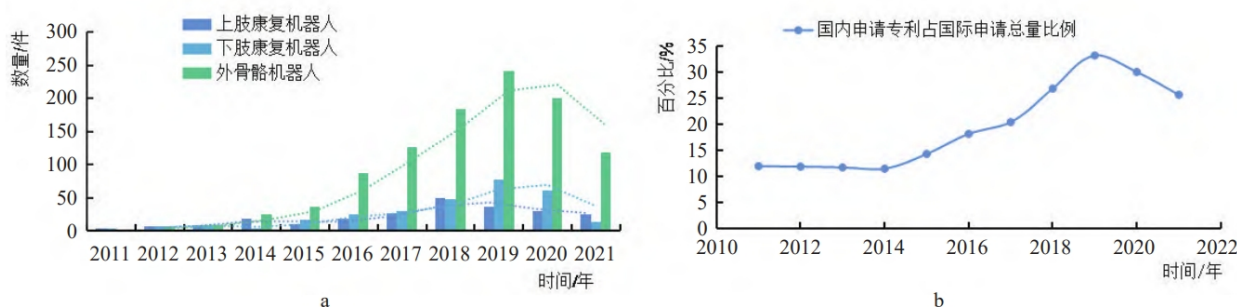


图2 国内康复机器人相关专利申请情况

A:3种类型康复机器人相关专利申请趋势;B:国内申请专利占国际申请总量比例年度趋势。

3.2 国内外康复机器人的临床应用 国外对外骨骼机器人的研发相对较早,基础较好,技术也比较成熟。美国加州 SuitX 公司研发出可穿戴下肢外骨骼机器人 Phoenix^[4],其采用了模块化的设计方案,穿脱和组装更为方便,且支持单独或自由组装使用;日本 Cyberdyne 公司研发 HAL 机器人^[4]具有生物意识控制和自主意识控制两个控制系统;以色列 ReWalk Robotics 公司研发的 ReWalk 外骨骼机器人^[4]可以通过计算机控制系统和传感技术判断使用者的行动意图,进一步控制外骨骼机器人,使其与人体协调完成康复训练。

我国在该领域的研究相比西方国家相对较晚,但近年来随着我国科技的飞速发展及需求单极大提升,我国外骨骼机器人技术奋起直追,已拥有良好的成果转化和应用投入。上海傅利叶智能科技

有限公司推出的 Fourier X2^[4]可穿戴下肢外骨骼机器人具有多传感融合技术、运动控制系统及动力单元可以智能分析使用者意图;哈尔滨工业大学研发的 HIT-LEX^[6]采用模块化设计和准拟人化结构,可以支撑患者在复杂的环境下负重行走;中国科学院深圳先进技术研究所研制的 Auto-LEE^[6]多达 10 个自由度,增加了 3 种步态算法,在融入多模态人机交互的基础上直接采用模块化结构概念,可以保持使用者再无辅助支撑情况下的行走平衡。

4 元宇宙技术赋能的康复机器人研究展望

4.1 元宇宙技术及物联网工程赋能未来医学 元宇宙概念的兴起离不开互联网和物联网技术的发展。简单来说,与传统医学相比,物联网医学最大的区别在于数字化和智能化。物联网医学通过感知、传

输和智能处理三大基本流程^[8],将多种传感器嵌入、装备至医疗设备中,并将物联网与现有互联网整合,实现医院、病人、医疗设备全时空互联互通。更进一步,在拥有更为强大的通信和算力的条件下,整合虚拟现实、增强现实、拓展现实、混合现实技术和人工智能技术^[5],搭建沉浸式交互式医学智能平台,便成为了元宇宙医学。

4.2 元宇宙虚拟现实技术赋能康复训练机器人 虚拟现实是元宇宙的核心特点,其主要基于运动控制神经通道重塑及运动再生学理论运用于康复机器人中,通过提供视、听、触觉等多感官反馈,充分刺激大脑的感觉运动中枢,促进神经细胞再生与修复。搭建元宇宙平台虚拟场景,通过主动、被动、助力、示教等训练模式,实现全周期康复治疗。同时,可以尝试将沉浸式交互游戏融入训练之中,实现运动控制训练和认知训练相结合,以较大的趣味性充分调动患者主动参与训练的积极性,快速提升患者运动及认知功能。虚拟训练场景应该具备运动功能定量评估、康复任务个性化设置及自适应调整、肌肉响应及力触觉实时反馈、三维运动空间智能反馈,以突破人体运动与行为高效建模,通过难度渐进的目标导向性训练和精确客观的评估数据分析,促进患者运动在学习的过程。此外,还可以将辅助康复外骨骼机器人与脑机接口结合,或通过物联网联通兼容各种医疗设备,共同协调配合助力患者快速且舒适地康复。虚拟现实还可以使康复医生实时与患者交流,模拟真实就医指导及训练场景,从而在高效的同时让患者拥有必要的安全感。

在运动障碍康复方面,要实现人机协同康复,必须具备康复训练与评估一体化技术^[8]。康复训练结果的好坏需要有一个客观的评价指标体系对其进行描述和量化,然后通过前后对比来告知患者已经完成的康复训练和下一步重点的康复方向,而这些都需要依赖于器械自动采集、反馈并分析数据的能力。目前,基于视觉反馈和力反馈的交互过程有了一定的发展^[8],但未来不可避免要向肌电、脑电等多模态生物信号转变,这将对传感与计算系统提出更高的要求。而在进行运动康复的同时,对患者进行认知障碍康复也是必要的,在这方面,则可以与当下迅速进步的人工智能技术结合,基于多模态信息的高鲁棒性人机交互技术,通过大语言模型、计算机视觉等对患者进行视听触多感官训练,从而达到与运动康复训练相配合,运动和认知同步康复的效果。

4.3 智能辅助系统与生机电技术赋能康复训练 面向运动功能障碍群体的智能辅助系统集仿生结构、无线传感、智能控制等技术于一体,同时融合机器人、模式识别、人机交互等技术,未来发展潜力巨大。其核心目的是通过生理电信号精确识别出人体的行为意图,依赖于多模态传感交互与控制方法。良好的康复与辅助系统,需要智能的感知和控制系统做为支撑。为了给患者创造一个安全、舒适、自然的康复训练或者辅助环境,机器人和患者之间的交互与控制不可或缺。感知系统不仅能够识别患者和机器人的当前状态,还能够帮助实现患者和机器人交互,既可以构成闭环控制系统,加强系统的控制精度,还能作为评估信号参与康复机器人性能的评估标定。优良的控制方法能够为患者创造安全舒适的训练环境,鼓励患者积极参与到康复训练中来,从而极大地提高康复训练效果^[9]。

康复机器人的信息感知及其控制大体上可以分为基于运动信号的感知控制以及基于生理信号的感知控制。基于运动信号的感知及其控制,主要是利用传感器采集当前患者肢体关节的运动状态,反馈给控制单元,形成相应的闭环控制系统,能够实现柔顺控制,极大加强了控制精度及准确性,有效防止二次损伤。而基于生理电信号的感知及其控制,是指康复机器人从患者身上获取相应的生理电信号,通过对信号的识别,判断出患者的运动意图,并以运动意图为依据设计控制器带动患者肢体进行康复训练^[9]。

复旦大学信息科学与工程学院秦亚杰教授课题组与复旦大学附属华山医院重症监护科等单位合作,多学科交叉成功研发的可穿戴多模态重症患者监护系统(图3~图4)。将不同设备的数据汇总到同一个平台上,简化医护人员的操作流程,以及减少信息冗余。该系统是集成脑功能、心肺功能、基础生命体征的一体化监测系统,结合创新芯片、柔性混合电子和人工智能等新技术,实现全面、精准、便捷的生理信号监测,可广泛应用于重症监护室床旁,并可以拓展到重症康复病房、康复医学中心等场所。

该系统采用自主研发的一系列关键信号采集芯片,包括多通道脑电信号采集模拟前端(analog front end, AFE)、数字化心电监测 SoC、无线供电的可编程电化学传感器接口芯片等。单芯片集成多种功能,使得整个穿戴系统体积更小、功耗更低、信号的抗干扰性更强,实现了低功耗可穿戴脑机接口、柔性智能心肺功能监测贴片和全柔性汗液组分

可穿戴健康感知芯片与系统：“专用芯片到系统、结合算法”的系统性研发能力与基础

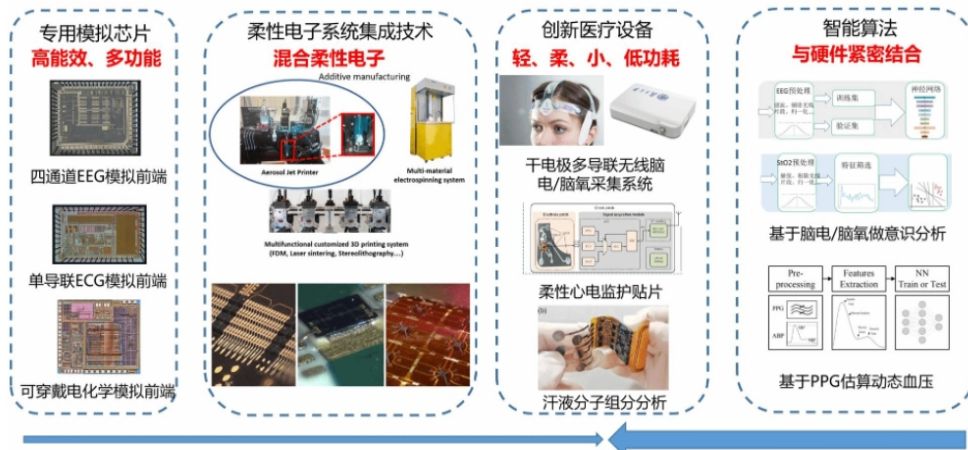


图3 可穿戴健康感知芯片与系统

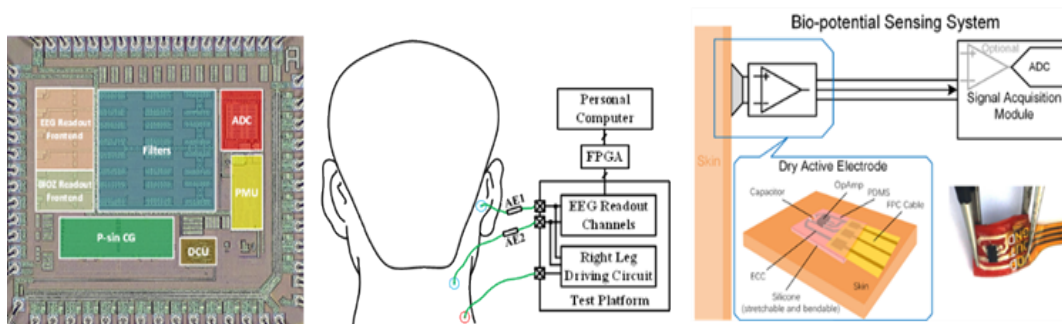


图4 生物智能传感芯片与系统

监测贴片。除此之外,课题组采用纤维、复合导电材料等新材料为传感前端,结合集成芯片,开发异构集成技术,使整个传感微系统更加轻量化、智能化,摸索出了一套柔性传感贴片的制备方案。相信随着技术不断突破,我们可以充分发挥可穿戴芯片的优势,发展轻量化、智能化的穿戴式监护系统,提高ICU患者的监测和护理水平,并有望拓展至辅助康复训练、家用睡眠监测和运动测评等大健康领域,具有广阔的应用前景。

4.4 人工智能技术赋能康复训练机器人 人工智能是计算机科学的一个重要分支,包含了机器学习、机器视觉等多个领域,应用于康复训练有助于分析建模的自动化、为患者制定个性化康复训练方案,为研制新型辅助康复外骨骼机器人提供了新思路^[3]。人工智能在深度学习迭代算法自调参数、处理大数据等方面有着极为强大的实力,近年来国家大力支持人工智能产业发展,将AI大模型应用于康复医学已然势在必行。其在自然语言处理、计算机视觉方面的优势与元宇宙虚拟技术和物联网技术有机结合,能够极大地提高康复机器人智能化和自适应水平。

将人工智能技术应用于康复训练机器人,可以采用表面肌电信号作为控制信号,利用神经网络理解患者运动意图,以驱动机械臂辅助患侧肢体实现特定的康复训练动作。人工智能技术通过对脑电信号的分类识别,以控制机器人进行训练。此外,可采用先进的SLAM算法叠加红外辅助对环境进行建模,实现自主行走、避障、漫游等功能。人工智能技术拥有环境感知自主学习等能力,可配合完成对老人的智能看护、语音交互、远程训练等工作^[3]。例如安徽爱博智能将人工智能应用于康复机器人产品,使之能够在多感官高灵敏度智能识别及大规模参数调整反馈下,对患者训练进行自适应调节,很好地展现了人工智能在辅助康复训练方面的巨大潜力。

5 小结

本文聚焦于当下康复外骨骼机器人领域的研究现状,呈现了辅助康复外骨骼机器人的发展背景、设计思路目前主要分类及工作原理。从技术角度来看,近年来,国内国际均在这一领域的发展迅速,康复外骨骼机器人的机械结构设计不断优化,

控制技术日益精进,人机交互技术也有诸多进展。在临床应用层面,康复训练邻域的创新产品层出不穷,已在帮助肢体功能障碍患者恢复运动能力、提高生活自理水平等方面展现出积极成效,但也存在诸如适配人群有限、设备成本偏高、训练模式相对单一等有待解决的问题。

元宇宙及物联网技术赋能康复外骨骼机器人必将造福无数残障人士。元宇宙凭借其独特的沉浸式体验、高度交互性以及虚拟现实融合等优势,有望为辅助康复外骨骼机器人带来全新变革。利用元宇宙、人机交互、人工智能强大的数据整合与分析功能,有望为每一位患者精准定制个性化康复方案,根据患者的康复进程、身体反馈等,实时调整外骨骼机器人的运行参数。此外,元宇宙还能打破空间限制,拓展康复训练的范围,让远程康复变得更加高效、便捷,为辅助康复外骨骼机器人在未来的发展描绘出一幅充满无限可能的蓝图,也为后续相关研究与实践提供了极具价值的参考方向。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 朱子睿、王源:撰写文章;杨达伟:修改文章。

参考文献

- [1] 戴一鸣,陈嘉琛,刘晨东,等.可穿戴柔性上肢外骨骼的研究进展与展望[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(8):1-16.
- [2] 张立新,白定群,白玉龙,等.下肢康复机器人临床应用专家共识[J].康复学报,2023,33(05):383-396.
- [3] 罗胜利,孟巧玲,喻洪流.我国康复机器人技术研究与应用概况[J].中国康复医学杂志,2023,38(12):1762-1768.
- [4] 韩稷钰,王衍鸿,万大千.下肢外骨骼康复机器人的研究进展及发展趋势[J].上海交通大学学报(医学版),2022,42(2):241-246.
- [5] 王开放,曹慧,邢蒙蒙,等.康复外骨骼机器人在肢体康复中的应用进展[J].机械传动,2022,46(4):10-21.
- [6] 白春学.物联网医学之我见[J].中国医院院长,2015(7):84-85.
- [7] 白春学.元宇宙医学之我见[J].中国医药导刊,2023,25(1):1-6.
- [8] 程洪,黄瑞,邱静,等.康复机器人及其临床应用综述[J].机器人,2021,43(05):606-619.
- [9] 侯增广,赵新刚,程龙,王启宁,王卫群.康复机器人与智能辅助系统的研究进展[J].自动化学报,2016,42(12):1765-1779.

引用本文

朱子睿,王源,杨达伟.辅助康复外骨骼机器人研究现状及元宇宙赋能研究的展望[J].元宇宙医学,2024,1(4):26-31.
ZHU Z R, WANG Y, YANG D W. Research status of assisted rehabilitation exoskeleton robots and future research prospects in this field enabled by the metaverse[J]. Metaverse Med, 2024, 1(4): 26-31.