

◆ 医疗场景 ◆

肢体康复机器人技术与发展趋势*

高学山¹, 刘开源¹, 赵鹏¹, 苗明达²

(1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081; 2. 江苏海洋大学机械工程学院, 江苏连云港 222005)

摘要: 脑卒中在医学上属于神经系统疾病, 会导致人体肢体运动障碍和大脑认知障碍。近年来, 智能肢体康复机器人在临床上得到广泛应用, 其能为患者提供有效的重复性康复训练, 帮助患者重塑受损神经, 改善大脑认知能力, 进而恢复肢体的运动功能。本文总结了国内外肢体康复机器人的研究现状, 根据作用部位的不同分别阐述了肢体康复机器人在脑卒中患者康复训练中的临床应用成果。数据证明, 肢体康复机器人相比传统康复治疗手段能达到更好的康复效果, 能够有效节省人力物力, 解决康复需求大、康复医师资源缺乏的问题。同时, 本文从结构设计、运动意图识别和控制策略 3 个方面分析了康复机器人的关键技术, 并且对其未来发展趋势进行展望。随着未来新型材料及人工智能技术的发展, 肢体康复机器人将朝着轻量化、多功能化和智能化等方向发展, 协助康复医师制定更规范的个性化训练方案。

关键词: 肢体康复机器人; 脑卒中; 运动障碍; 认知障碍; 人机交互

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2024)05-0823-10

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20241127.001

随着年龄增长, 人体神经系统容易发生损伤或者病变, 导致相应生理功能的缺失, 例如脑卒中等疾病。脑卒中是一种急性脑血管疾病, 是我国成年人致残、致死的首位病因^[1]。脑卒中患者主要集中在 50 岁以上人群, 其中枢神经系统会遭到破坏, 患者通常表现出偏瘫、患侧肢体肌力异常及智力障碍等症状。其中, 肢体运动障碍患者的比例高达 70%^[2], 大部分人最终都将失去独立运动能力。目前我国面临人口基数大和人口老龄化加剧的双重问题, 脑卒中疾病呈现增长态势, 康复医疗体系面临巨大挑战^[3]。

康复医学是 20 世纪 50 年代兴起的一门学科, 其研究内容主要为帮助运动障碍的患者恢复运动能力^[4]。具有肢体运动障碍的患者, 需要在日常生活中进行必要的运动训练^[5], 否则会引起肌肉萎缩和关节僵硬等症状, 长时间缺乏运动甚至会影响正常生活。因此, 针对患肢进行科学的、规则的康复训练对患者具有重大意义。

康复机器人能够帮助患者进行康复训练, 协助康复医师评估患者康复水平。康复机器人融合了康复医学和机器人学, 不仅能够为患者提供精准的、重复

收稿日期: 2024-04-28

修回日期: 2024-11-30

* 广西重点研发计划项目(桂科 AB22035006)资助。

【第一作者简介】

高学山(1966—), 男, 教授, 主要从事智能机器人技术研究, E-mail: xueshan.gao@bit.edu.cn.

【引用本文】

高学山, 刘开源, 赵鹏, 等. 肢体康复机器人技术与发展趋势[J]. 广西科学, 2024, 31(5): 823-832.

GAO X S, LIU K Y, ZHAO P, et al. Technology and Development Trends of Rehabilitation Robots for Limbs [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(5): 823-832.

的康复训练,而且还能保证康复训练的平稳性、安全性和有效性,弥补了传统康复训练人力消耗大、训练过程动作不稳定、不精准的缺点^[6]。康复机器人可以应用于医院和社区康复中心,代替康复治疗师帮助患者进行训练,减轻家庭和医疗专业人员的护理负担^[7],在医疗康复及养老领域有很大的需求前景。目前的肢体康复机器人种类繁多,训练方式多样,但普遍缺乏明确的规范化评估标准,康复效果难以通过直观的数据反馈给医生和患者。本文将根据国内外肢体康复机器人的研究现状和实际临床应用结果对肢体康复外骨骼机器人的关键技术进行分析,并对未来发展趋势进行展望。

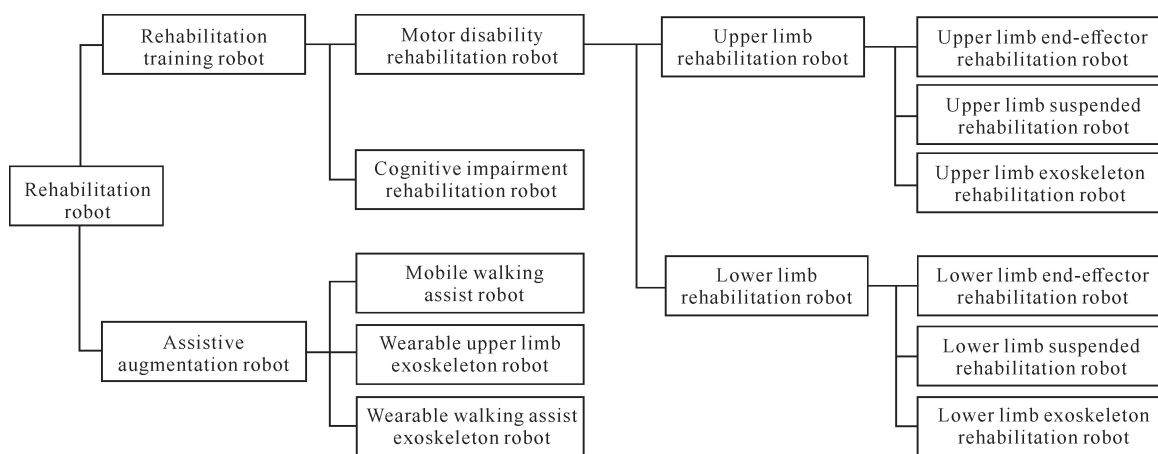


图1 康复机器人分类

Fig. 1 Classification of rehabilitation robots

1.1 上肢康复机器人

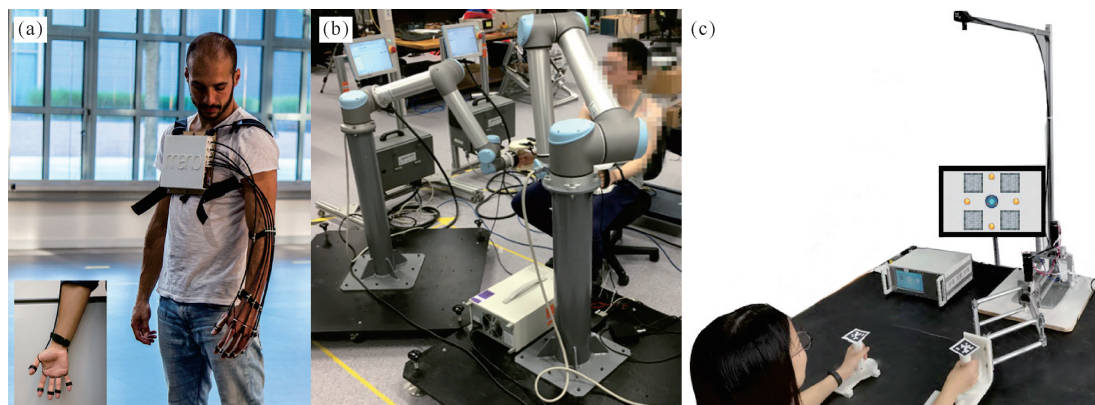
上肢康复机器人可为患者提供肩部、肘部及手部等上肢关节的运动训练,主要以末端驱动式和外骨骼式为主^[9],通过主动训练或被动训练增加患者的上肢肌力和关节灵活度。

2018年,Randazzo等^[10]研究了一种可穿戴的便携式手部外骨骼康复机器人Mano,如图2(a)所示,Mano康复机器人能够主动控制所有手指的屈伸,患者可以与周围环境进行自然的体感交互,辅助患者受损神经康复。该机器人具有功能性强、体积小、重量轻和穿戴舒适等优点,其系统的模块化使其可以满足不同康复需求的患者,如脑瘫、脑卒中或肌无力的患者。2019年,Sheng等^[11]开发了一种双边上肢康复机器人,如图2(b)所示,其主要由两个机械臂组成,通过自适应导纳控制器实现患侧肢体同步复制健侧

1 国内外发展现状

康复机器人可分为康复训练机器人和辅助增强机器人,如图1所示。康复训练机器人根据功能可以分为运动障碍康复机器人和认知障碍康复机器人两大类^[8],其中运动障碍康复机器人根据所训练的肢体可以分为上肢康复机器人和下肢康复机器人,具体可再分为末端驱动式、悬吊式和外骨骼式康复机器人。辅助增强机器人可分为移动式助行机器人、穿戴式上肢助力外骨骼机器人和穿戴式辅助行走外骨骼机器人。下面重点介绍康复训练机器人的国内外发展现状。

肢体的运动。同时,被动、主动和自主等训练模式,能够有效激活受损神经,促进患者运动功能的恢复。2021年,Shi等^[12]研制了一种柔性手部外骨骼机器人,通过穿戴者手部肌肉的肌电信号(EMG)对机器人进行驱动控制,实现手指的伸展或闭合。临床测试结果显示部分患者手部运动功能恢复良好,但是在手部重度痉挛的情况下对机器人驱动控制的难度较大。2022年,李会军等^[13]提出一种基于自适应按需辅助的上肢镜像控制策略,如图2(c)所示。在患肢稳定和不稳定两种状态下,该策略对比传统方法平均减小了56.9%的辅助力,能够补偿89%的干扰外力,患肢跟随健肢的位置精度提高了5.6%(传统训练方法平均位置精度为9.1%)。此控制策略有效提升了穿戴者康复训练的主动性,同时具有良好的抗干扰性,可满足患者镜像康复训练的要求。



(a) Mano rehabilitation robot; (b) Bilateral upper limb rehabilitation robot; (c) Upper limb rehabilitation robot.

图 2 不同类型的上肢康复机器人^[10,11,13]

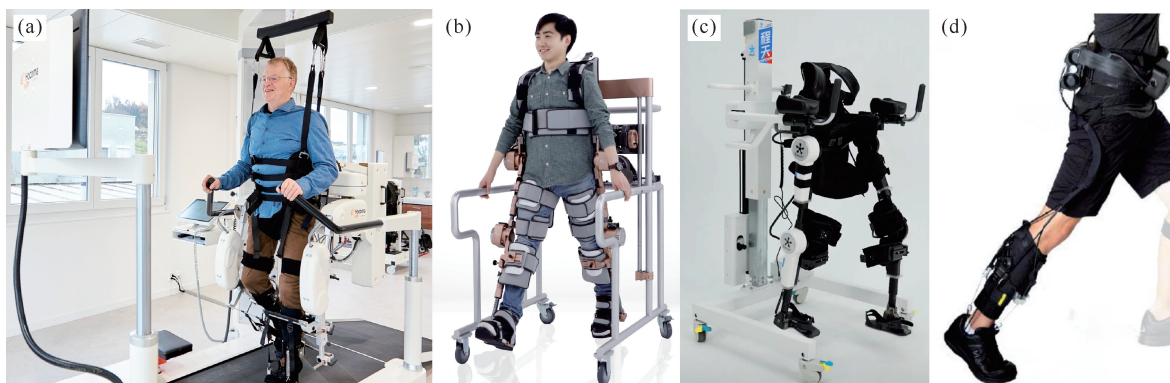
Fig. 2 Different types of upper limb rehabilitation robot^[10,11,13]

1.2 下肢康复机器人

下肢康复机器人为患者提供下肢及足踝的运动训练,主要以外骨骼康复机器人为主,通过被动训练或主动训练,辅助患者进行站立及行走等^[14],帮助患者维持平衡,纠正错误步态。

Lokomat 下肢外骨骼康复机器人^[15]是目前应用较多的步态训练型康复机器人,已经实现了产业化和商用化。如图 3(a)所示,训练时患者需穿戴减重服,智能减重控制系统能够根据患者的下肢负荷自动调整减重力度。此机器人具备尺寸可调节功能,包括盆骨宽度和大小腿杆的长度,能够适应不同患者的身体特征,提高了使用的舒适性,避免关节受到二次伤害。同时,它可为患者提供多种训练模式和个性化训练方案,包括被动训练和主动训练,能够根据使用感受调整步速和步长,从而增强患者的主动参与意识,帮助患者恢复下肢肌肉力量,改善其步态。2016 年成立的北京大艾机器人科技有限公司^[16]具有丰富的康

机器人研发经验,其在 2018 年研发的“艾康”和“艾动”两款机器人通过了原国家食品药品监督管理总局的注册认证,获得了上市批准。AiWalker 下肢外骨骼康复机器人如图 3(b)所示,能够满足各个年龄段患者的康复全周期使用需求。杭州程天科技发展有限公司^[17]是一家致力于外骨骼康复机器人等高科技康复辅具研发与应用的高新技术企业。2021 年,该公司研发了悠行 UGO 系列产品,成为国内首家获得神经康复国家药品监督管理局(NMPA)注册的项目,填补了国内空白。如图 3(c)所示,机器人整个系统采用移动支架与外骨骼相结合的方式,采取被动模式、主动模式和阻尼模式 3 种行走训练模式,可以保持患者穿戴训练过程中的安全性和稳定性能;其融入了 50 余个传感器,对环境、机器人和用户进行感知,实现了全方位的保护和智能化控制。Sloot 等^[18]提出了一种柔性外骨骼康复机器人,如图 3(d)所示,其比传统的刚性外骨骼康复机器人更轻便、更柔顺,



(a) Lokomat lower limb exoskeleton robot; (b) AiWalker lower limb exoskeleton robot; (c) UGO rehabilitation exoskeleton robot; (d) Flexible exoskeleton rehabilitation robot^[18].

图 3 不同类型的下肢康复机器人

Fig. 3 Different types of lower limb rehabilitation robot

适用于中风后踝关节功能受损的患者。它具有阻抗训练和主动训练两种模式,能够减少代偿性步态,为患者踝关节提供助力,降低患者的代谢水平,辅助患者从矢状面上改善踝关节的运动学状态,优化步态训练效果。

1.3 认知障碍康复机器人

在患有肢体运动障碍的同时,脑卒中等神经疾病患者通常会伴随着不同程度的认知障碍,认知障碍对患者的运动能力有很大的负面影响,因此患者在进行运动训练的同时也需要进行认知能力的训练^[19]。对运动能力和认知能力同步进行重塑,能够更加有效地帮助患者康复,早日恢复其正常的生活自理能力。Bassolino等^[20]对患有上肢运动障碍的脑卒中患者和脑瘫导致偏瘫的儿童进行康复治疗,在患者进行运动训练时,加入与动作相关的多模态刺激,以及视觉和听觉感知,能够提升患者对环境的感知能力,提高康复效果,因此认知障碍康复机器人可以作为脑卒中肢体运动障碍后遗症及儿童发育障碍等疾病治疗的手段。

2 关键技术

我国康复机器人研究起步较晚,但发展迅速。2016年10月国务院发布了《国务院关于加快发展康复辅助器具产业的若干意见》^[21],对我国康复辅助器具产业的发展作出全面部署,2017年6月科技部会同国家卫生和计划生育委员会等6部门发布了《“十三五”健康产业科技创新专项规划》^[22],重点加强人工智能等前沿技术在医疗康复环节的研究。2017年我国推出国内第一款商用的外骨骼机器人。2018年上海傅利叶智能科技有限公司研发的上肢康复机器人成为我国首次出口的康复机器人。如图4所示,在若干政策的推动下,自2018年以来我国康复机器人专利数量快速增长,表明康复机器人技术发展迅速,

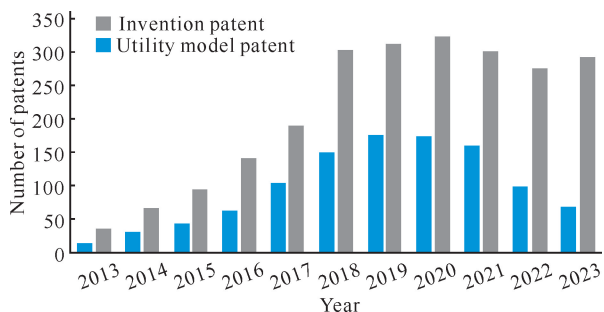


图4 2013—2023年国内康复机器人专利情况

Fig. 4 Number of patents about rehabilitation robots in China from 2013 to 2023

市场规模快速增长。

康复机器人研究过程的关键技术主要包括机械结构方面的轻量化技术、传感方面的人体运动意图识别技术和机器人运动控制技术。

2.1 轻量化技术

轻量化能够改善康复机器人的灵活度,提高患者穿着的舒适度和安全性,并且方便患者对机器人进行控制和携带。机器人轻量化主要从机器人的材料和结构两方面进行改进,在满足使用强度和刚度的要求下,材料方面可以使用新型材料如碳纤维^[23]、钛合金^[24]及铝合金^[25]等。碳纤维主要由碳元素组成,具有耐高温、耐摩擦以及耐腐蚀的优点,在纤维轴方向具有很高的强度和模量,且碳纤维的密度较小,因此碳纤维的比强度和比模量较高。钛合金是钛与多种其他金属制成的合金,其强度、耐腐蚀性及耐热性均较好,目前正在向着高强度、高韧度以及高模量的方向发展。铝合金是铝与其他金属制成的合金,属于轻金属材料,同时具有较高的比强度和比刚度,具有良好的塑性和可焊性,在机器人制造中有着广泛应用。结构方面可以对零件进行尺寸优化、形状优化及拓扑优化^[26],对板材的厚度、形状及截面进行参数优化,在均匀分布材料的设计空间中找到最佳的分布方案,得到最优结构,例如设计减重孔等实现康复机器人轻量化。

2.2 人体运动意图识别技术

目前,康复机器人对人体运动意图的识别主要通过识别物理信号和生物信号来实现。物理信号包括肢体位姿、足底压力、关节角度、角速度及角加速度等,通过力传感器^[27]、扭矩传感器、惯性传感器^[28]、位移传感器及柔性传感器等进行采集,近年来柔性传感器在手部康复机器人的应用上越来越广泛,结合手套能够实现更加精确的手部动作捕捉。采集的人机交互力、速度及加速度等信息,作为控制算法的输入对机器人下一个运动状态进行控制。通过患者肢体或头部佩戴特制的传感器采集人体表面肌电信号^[29]、脑电信号及眼电信号^[30]等生物信号,并建立数据库,利用模式识别、神经网络及支持向量机等算法建立分类预测模型,对人体运动意图进行预估。

物理信号相比于生物信号更加稳定,具有持续性和鲁棒性,但物理信号产生在人体运动发生之后,存在滞后性,影响人机交互的柔顺性。肌电和脑电等生物信号的产生先于人体运动,能更加实时直观地反映出人体各组织的活动状态,具有响应快的优点,但生

物信号频率较低、幅值较小、信噪比较低,容易受环境影响,鲁棒性较差。同时,由于不同患者神经损伤程度不同,导致不同患者间生物信号差异性较大,影响模型预测的准确性。多种信号的融合有助于康复机器人从不同维度获取人体状态信息^[31],提高对人体意图识别的准确率,从而使得人机配合更加柔顺密切,安全顺畅地完成运动动作。

2.3 机器人运动控制技术

比例-积分-微分(PID)控制是应用最为广泛的经典系统控制方法,由比例单元、积分单元和微分单元组成,控制模型简单,但由于无法在线实时调参,无法满足康复机器人这种非线性动态系统较高的控制精度要求,不能达到理想的控制效果,也不能保证控制系统的稳定性。很多控制系统在传统PID控制的基础上进行优化,进而达到更好的控制效果。例如,王佳冰等^[32]提出一种基于任意相角裕度法的PID控制系统,能够在不同情况下对PID控制器的参数进行调整,改进后的PID控制器在响应速度、抗干扰能力和灵敏度等方面都表现出更优秀的性能。但基于PID的控制方法不具备柔顺性,为提高使用者的舒适性,柔顺控制方法被广泛应用。

柔顺控制可分为基本柔顺控制、先进柔顺控制和智能柔顺控制。基本柔顺控制包括阻抗控制和导纳控制等。阻抗控制有基于位置和速度两种方式,通过传感器采集力信号并将其引至控制器,通过阻抗模型将力信号转换为位置修正量,结合期待位置得到需要的位置信号,再计算出每个电机的目标角度,实现位置控制,能够适应机械臂末端和环境之间的动态关系。Liu等^[33]提出一种阻抗调整控制策略,并在由气动人工肌肉(PAMs)驱动的上肢外骨骼康复机器人上进行实验验证,结果表明,阻抗控制能够使机械臂路径始终处于虚拟协调隧道内,提高患者的运动协调性,帮助患者进行肘关节和腕关节的主动训练,获得了良好的康复效果。导纳控制则是以位置控制为基础,实现对期望力矩的跟踪控制,其核心思想和阻抗控制相同,都是控制力与位置之间的关系。Li等^[34]针对下肢外骨骼提出了一种关节导纳控制方法,将穿戴者与外骨骼之间的相互作用转化为外骨骼的期望运动轨迹,根据外骨骼机械腿运动的导纳特性实现惯性补偿,在正常步态摆动频率下,患者与外骨骼关节角度的相对误差小于5%。阻抗控制和导纳控制易受环境噪声影响,并且不同穿戴者使用时,由于动力学模型不精确,导致控制系统性能变差,需要重新调

整控制器参数。Kou等^[35]开发了一种可变导纳控制策略来提高人机交互的舒适性,控制器主要由位置内环和导纳外环两个反馈回路组成,通过调节导纳参数来适应不同患者穿戴时的动力学差异,利用反步法收敛外骨骼关节位置误差,通过仿真和实验进行验证,结果表明控制器对髋关节和膝关节的位置跟踪误差小于4°,并且对人机交互力矩进行了约束,改善了人机阻抗明显等问题,提高了患者的穿戴舒适性。

先进柔顺控制包括自适应控制和鲁棒控制等。自适应控制能够在模型不精确的情况下,通过实时监测控制信号和反馈信号的误差,不断优化数学模型的参数从而对控制率进行自整定,使误差逐渐收敛到零,适应康复训练中机器人的动态特性。Esmacili等^[36]基于迭代滑动变量,给出了一种新型的基于数据的无模型自适应迭代学习积分终端滑模控制方法,仅通过系统的输入和输出实现参考跟踪。Peng等^[37]提出了一种鲁棒控制系统,将交互性能定义为一个由轨迹误差和力组成的代价函数,在导纳控制的基础上采用自适应法最小化代价函数,使外骨骼机器人在和环境进行交互时达到最优性能;另外,设计了一个包含逼近最优控制器的辅助系统,使机器人在轨迹跟踪过程中对内部系统的未知动态干扰具有鲁棒性,并通过实验验证了该控制器辅助系统的有效性。

智能柔顺控制包括模糊控制和基于神经网络控制等,在先进柔顺控制的基础上解决了动力学模型不精确等不确定性问题。模糊控制对机器人数学模型的精度要求较低,通过检测输入输出,对系统可能处于的状态进行推理判断,并做出适应性调整。但是单纯的模糊控制适应能力有限,而神经网络控制模型具有较强的学习能力和自适应性,能够通过学习来拟合系统的动力学模型,学习模型中未知的参数。由于肢体康复机器人系统属于一种强人机耦合的非线性动态系统,许多康复机器人采用多种不同的控制器构成其控制系统,进而改善一种控制方法单独使用时的不足。例如,Brahmi等^[38]基于对人体目标位置的估计,提出了一种鲁棒自适应阻抗控制系统,这种组合能够提高控制系统的可靠性,有效改善系统抖振问题,降低系统的动态不确定性,并且通过实验验证了该控制系统相较于其他传统控制系统的性能优势。Foroutannia等^[39]提出了一种由自适应模糊阻抗控制器和卷积神经网络组成的控制系统,自适应模糊阻抗控制器能够调节人体、机器人和环境之间的机械相互作用,处理内部控制参数的不确定性;卷积神经网络

络通过肌电传感器、惯性传感器、足底感应电阻、关节角度传感器及称重传感器采集信号,卷积核能够提取局部特征来处理信号的不确定性和噪声,实现快速高精度地检测用户的运动状态。Razzaghian^[40]提出了一种基于模糊神经网络补偿器的分数阶李雅普诺夫鲁棒控制系统,设计了有限时间分数阶非奇异快速终端滑模控制器,通过模糊神经网络算法来逼近人机耦合模型的不确定性和外部扰动,并进一步在上肢外骨骼机器人上进行实验,验证了该控制系统轨迹跟踪的有限时间收敛性和针对不确定性的鲁棒性。实验结果表明,在改变步行速度来增加不确定性的情况下,该控制系统仍然能够准确计算出机器人关节的扭矩,具有鲁棒性。

3 临床应用

目前世界各国已经进行了大量的康复机器人临床应用。如图5所示,上肢、下肢康复机器人的应用较为广泛,认知障碍康复机器人相关的研究和临床应用较少。本文以脑卒中患者为例,重点介绍肢体康复机器人在康复训练中的临床应用情况。

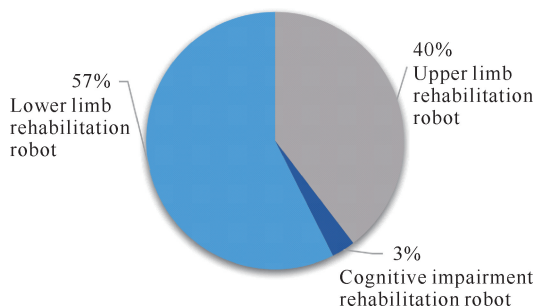


图5 康复训练机器人分布情况

Fig. 5 Distribution of rehabilitation training robots

3.1 上肢康复机器人应用

Ranzani等^[41]针对脑卒中后亚急性期手部功能受损的患者,采用神经认知结合机器人辅助手部进行功能康复训练,并将接受传统训练的患者设置为对照组,进行临床对照实验。在4周内分阶段进行了15次治疗,每次训练45 min,比较训练前后两组在Fugl-Meyer运动功能评估量表上肢部分(FMA-UE)得分变化。Fugl-Meyer运动功能评估量表是专门为中风偏瘫患者制定的运动功能评估方法,涵盖了运动、感觉、平衡、关节活动度和疼痛5个领域的内容。实验结果显示使用手部康复机器人的14名患者接受训练后在FMA-UE中得分分别提高了7.14、7.79和8.64分,传统治疗组的13名患者接受训练后在对应的评估项目上得分分别提高了6.85、7.31和8.08

分,这表明该机器人的辅助恢复能力高于传统治疗模式。荣积峰等^[42]将56例脑卒中患者随机分为对照组和观察组,对照组进行常规的康复治疗,观察组在此基础上增加了上肢康复机器人结合镜像治疗。在治疗前和治疗后4周分别采用FMA-UE、Wolf运动功能评价量表(WMFT)、功能独立性评定量表(FIM)和改良Barthel指数(BI)得分对患者进行康复评定,结果表明两组患者的FMA-UE、WMFT和改良BI得分相比于治疗前均有改善,并且上肢康复机器人结合镜像治疗患者的得分显著高于常规治疗组。赵德福等^[43]选取脑卒中后有认知障碍的59名患者,开展重复经颅磁刺激(rTMS)结合上肢康复机器人虚拟情景训练对脑卒中患者认知功能影响的研究:将59名患者随机分为3组,第1组进行常规认知训练治疗,第2组进行常规认知训练和rTMS治疗,第3组进行常规认知训练、rTMS治疗和上肢康复机器人联合训练。20d后对患者治疗后的蒙特利尔认知评估量表(MoCA)、上肢力反馈运动控制训练系统以及改良BI等指标进行评估,结果显示3组的MoCA和改良BI得分相比于治疗前显著提高,第2组和第3组的得分明显高于第1组,同时第3组的得分明显高于第2组,证明rTMS联合上肢康复机器人虚拟情景训练可显著改善脑卒中患者的认知功能。

3.2 下肢康复机器人应用

Mustafaoglu等^[44]将51名由中风导致下肢运动障碍的患者随机分配到3个组中,第1组接受传统治疗加Lokomat机器人辅助治疗的联合训练,第2组只接受传统治疗,第3组只接受Lokomat机器人辅助治疗。6周后对患者的改良BI、脑卒中专门化生活质量量表(SS-QOL)、6分钟步行测试(6-MWT)、爬楼梯测试(SCT)及Fugl-Meyer运动功能评估量表下肢部分(FMA-LE)得分等结果进行对比分析。结果显示3组患者在训练后各项统计学指标均有显著改善,相比于单独的传统治疗和单独的机器人辅助治疗,联合训练可以使中风患者的活动能力、日常生活能力和下肢运动能力得到最大提升。Li等^[45]在临床环境下对Welwalk机器人步态训练应用于偏瘫患者的康复有效性进行研究,将72例脑卒中患者分成两组进行对照实验,分别采用常规康复治疗 and Welwalk机器人进行步态康复训练,以功能独立性评定量表(FIM)为主要评估标准,检查步行能力的改善情况,同时记录患者从患有脑卒中到出院的持续时间。实验结果表明,使用Welwalk机器人的患者FIM-walk

评分改善程度明显高于对照组,平均步态训练周期为5周,证明 Welwalk 机器人步态训练对偏瘫患者步行能力康复的有效性。路芳等^[46]开展下肢康复机器人结合虚拟现实技术对脑卒中患者下肢运动功能的恢复作用的研究,将60例发病1至6个月的初发脑卒中偏瘫患者平均分为常规治疗组、下肢康复机器人组和虚拟现实机器人组,下肢康复机器人组和虚拟现实机器人组的患者在接受常规治疗的同时分别增加机器人康复训练和康复机器人联合虚拟现实技术治疗。3组患者在接受4周的治疗后通过 Berg 平衡量表(BBS)、FMA-LE、卒中患者运动功能评估量表(MAS)和功能性步行量表(FAC)进行康复水平的评定。实验结果表明3组患者的各项评分相比于治疗前均有提高,康复机器人组和虚拟现实机器人组的提高程度优于常规治疗组,并且虚拟现实机器人组的FMA-LE、MAS和FAC的评分在3组患者中显著提高,说明下肢康复机器人训练联合虚拟现实技术能够有效改善脑卒中患者的下肢运动能力、步行能力以及平衡能力。Taki等^[47]和Nolan等^[48]分别用HAL外骨骼机器人和Ekso机器人对处于急性期的脑卒中患者进行康复训练,结果表明外骨骼康复机器人对于处于急性期的脑卒中患者有更显著的康复效果。

临床实验表明康复机器人能够代替康复治疗师帮助患者进行运动障碍康复或认知障碍康复,并且采用两者结合的联合训练方法能够达到更好的康复效果。

4 未来趋势

4.1 轻量化

保障患者的安全是康复机器人研发的首要前提和核心要求。通过使用新型材料和优化零件结构可实现机器人结构的轻量化,改善患者的穿戴舒适性和机器人的系统稳定性,从而建立更完善的安全保障系统。随着计算机技术和集成技术的发展,传感器和控制单元将制作得更加小巧灵敏,控制系统也将趋于微型化,可从多方面减少由于机器人本身的重量和惯性给患者带来的负担和危险。

目前大部分肢体康复机器人采用的是刚性结构,具有体积大和质量大的缺点,并且由于不准确的运动学和动力学建模可能会给患者的训练带来阻碍,影响训练效果。近些年许多研究机构陆续将柔性材料和柔性驱动应用到康复机器人上,柔性结构质量轻,能够降低肢体末端的转动惯量,并且更容易适应不同穿

戴者间的差异性。对于没有完全失去运动能力的患者来说,柔性机器人穿戴更加便捷,使用舒适度更高。

4.2 多功能化

由于人体活动都是运动和认知相结合的,对患者进行肢体运动能力和大脑认知能力的同步训练能够帮助他们更快地恢复日常生活自理能力。目前大多数研究机构将研究重点放在运动功能康复类机器人上,能提供认知障碍康复功能的机器人较少。未来的康复机器人需要在进行运动功能康复的同时对患者的认知能力进行训练,才能够更好地刺激患者受损神经恢复,患者运动功能的恢复速度将有很大提升。

4.3 智能化

目前的康复机器人智能化程度还有待提高,患者在进行训练时较为被动,机器人不能很好地适应患者之间的差异性。未来康复机器人应满足不同患者的个性化需求,这对人机交互的要求很高,需要机器人具备更精确的人机交互能力。未来的康复机器人需要扩展信息采集渠道,结合物理信号和生物信号的优势,使机器人更加迅速准确地对患者的运动意图进行分析判断,提高患者在康复训练中的主动性,实现高效的人机配合。传感器技术的发展将使得采集的人体肌电和脑电信号数据更加精确,康复医师能够通过分析患者生物数据来评估患者的康复水平,进一步制定个性化的康复训练方案。

4.4 拟人化

许多患有运动障碍的患者内心比较封闭,不愿意与人交流,人工智能技术的发展将促进机器人逐渐拟人化。在训练的同时加入语音识别和情感感知等功能,在患者进行康复训练时提供一些陪伴和鼓励,营造一种积极轻松的氛围,更加容易激发患者和机器人配合的兴趣和积极性。重复枯燥的训练容易使患者感到疲劳,进而产生低落、焦虑等消极情绪,未来的康复机器人会更加注重为患者带来视觉和听觉的反馈。通过结合虚拟现实技术,让患者能够在类似游戏的康复中更加轻松地投入患肢的运动功能训练,同时刺激患者认知能力的恢复,进而提高患肢的康复效率。将视觉和听觉的反馈融入康复训练中能很大程度提高患者参加康复训练的积极性,对患者的心理健康产生很大的积极作用。

5 总结

近年来,尽管我国在肢体康复机器人领域发展迅速,取得了显著进展,但大部分研究成果仍处于实验

室研发阶段,面临许多待解决的问题。首先相关组织机构需要制定更多维的评估标准,建立肢体康复机器人实时安全监测及意外事件报警系统,进一步提高其安全性。其次是肢体外骨骼康复机器人能否根据不同患者的需求提供具有针对性的训练任务,满足患者的个性化需求,以及在主动康复训练模式下,如何提高患者的主动参与度,如何提高人的积极性进而加强脑神经重塑。随着人工智能技术、传感技术、虚拟现实技术及新型材料的发展,肢体康复机器人将变得更加轻量化、便携化、智能化和人性化,带给患者更好的舒适性、互动性和使用体验。在临床应用方面,未来应开展研究机构、高校实验室和医院多方面联合的临床试验,制定量化评估标准,推动肢体康复机器人的更新迭代。未来康复机器人的应用范围将不断扩大,在康复治疗和老年护理等领域发挥重要作用,并进一步带来经济效益和社会价值。

参考文献

- [1] 杨华. 卒中中偏瘫患者的康复护理研究[J]. 中国继续医学教育, 2014, 6(8): 81-82.
- [2] 王陇德. 《中国脑卒中防治报告 2019》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2020, 17(5): 272-280.
- [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] 潘淳, 胡阳秀. 国内外康复医学研究现状[J]. 齐齐哈尔医学院学报, 2014, 35(7): 1034-1035.
- [5] 禹建伟. 早期康复治疗对急性脑卒中运动功能恢复的作用[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2015, 18(8): 98-99.
- [6] 庞晨晨, 李瑞玲, 冯英璞. 康复机器人在脑卒中偏瘫康复中的应用研究进展[J]. 护理研究, 2019, 33(21): 3715-3719.
- [7] PLASCHKA C, SAWCHUCK D, ORR T, et al. Global policies on assistive robots for care of the elderly: a scoping review [J]. *International Journal of Healthcare*, 2019, 6(1): 63.
- [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(5): 606-619.
- [9] NIU C, CUI L, BAO Y. Advance on upper limb rehabilitation robot in neurorehabilitation [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2020, 35(8): 916-920.
- [10] RANDAZZO L, ITURRATE I, PERDIKIS S, et al. Mano: a wearable hand exoskeleton for activities of daily living and neurorehabilitation [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(1): 500-507.
- [11] SHENG B, XIE S, TANG L, et al. An industrial robot-based rehabilitation system for bilateral exercises [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 151282-151294.
- [12] SHI X Q, HEUNG H L, TANG Z Q, et al. Effects of a soft robotic hand for hand rehabilitation in chronic stroke survivors [J]. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 2021, 30(7): 105812.
- [13] 李会军, 胡珊珊, 宋爱国. 基于自适应按需辅助的上肢镜像控制策略[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(2): 437-445.
- [14] AAKASH N, PRAME A, KUMAR J S J. Recent advancements in robot assisted lower limb rehabilitation techniques [J]. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2020, 10(1): 61-68.
- [15] HUSEMANN B, MÜLLER F, KREWER C, et al. Effects of locomotion training with assistance of a robot-driven gait orthosis in hemiparetic patients after stroke: a randomized controlled pilot study [J]. *Stroke*, 2007, 38(2): 349-354.
- [16] 刘京运. 从马拉松到冬奥会, 大艾外骨骼机器人为残疾人创造更多可能[J]. 机器人产业, 2022(4): 35-39.
- [17] 杭州程天科技发展有限公司. 程天: 机器人助残重拾“步行梦”[J]. 信息化建设, 2023(7): 24-25.
- [18] SLOOT L, BAE J, BAKER L, et al. O 089: A soft robotic exosuit assisting the paretic ankle in patients post-stroke: effect on muscle activation during over-ground walking [J]. *Gait & Posture*, 2022, 95: 217-218.
- [19] CURUK E, GOYAL N, ARUIN A S. The effect of motor and cognitive tasks on gait in people with stroke [J]. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 2019, 28(11): 104330.
- [20] BASSOLINO M, SANDINI G, POZZO T. Activating the motor system through action observation: is this an efficient approach in adults and children? [J]. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 2015, 57(Suppl 2): 42-45.
- [21] 国务院. 国务院关于印发加快发展康复辅助器具产业的若干意见[EB/OL]. (2016-10-27)[2024-04-28]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2016-10/27/content_5125001.htm.
- [22] 科技部, 发展改革委, 工业和信息化部, 等. “十三五”健康产业科技创新专项规划: 国科发社[2017]149号[EB/OL]. (2017-06-14)[2024-04-28]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgnr/fgzc/gfxwj/gfxwj2017/201706/t20170614_133528.html.
- [23] ZIMMERMANN Y, FORINO A, RIENER R, et al. ANYexo: a versatile and dynamic upper-limb rehabili-

- tation robot [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(4):3649-3656.
- [24] 陈琳, 张学涛, 李浪, 等. 多位姿下肢康复机器人床身高度自动调整算法[J]. *中国康复理论与实践*, 2021, 27(11):1241-1246.
- [25] 王洁, 李健, 梁鹏, 等. 下肢外骨骼机器人机构设计及有限元分析[J]. *科技创新与应用*, 2023, 13(28):40-43.
- [26] GUO K, LU J, LIU C, et al. Development, research, optimization and experiment of exoskeleton robot for hand rehabilitation training [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(20):10580.
- [27] MAYETIN U, KUCUK S. A low cost 3-DOF force sensing unit design for wrist rehabilitation robots [J]. *Mechatronics*, 2021, 78:102623.
- [28] PASSON A, SCHAUER T, SEEL T. Inertial-robotic motion tracking in end-effector-based rehabilitation robots [J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2020, 7:554639.
- [29] FENG Y F, ZHONG M W, WANG X S, et al. Active triggering control of pneumatic rehabilitation gloves based on surface electromyography sensors [J]. *PeerJ Computer Science*, 2021, 7:e448.
- [30] CREA S, NANN M, TRIGILI E, et al. Feasibility and safety of shared EEG/EOG and vision-guided autonomous whole-arm exoskeleton control to perform activities of daily living [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):10823.
- [31] WANG H B, CHEN P, LI Y G, et al. New rehabilitation assessment method of the end-effector finger rehabilitation robot based on multi-sensor source [J]. *Healthcare*, 2021, 9(10):1251.
- [32] 王佳冰, 孟庆芳, 冯慧慧, 等. 基于人工智能的骨科护理用下肢训练康复系统设计[J]. *自动化与仪器仪表*, 2023(5):186-190.
- [33] LIU Q, LIU Y, LI Y, et al. Path planning and impedance control of a soft modular exoskeleton for coordinated upper limb rehabilitation [J]. *Frontiers in Neurobotics*, 2021, 15:745531.
- [34] LI F, WANG Q D, XIE H L, et al. Admittance control of four-link bionic knee exoskeleton with inertia compensation [J]. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, 2020, 27(3):891-897.
- [35] KOU J G, WANG Y X, CHEN Z L, et al. Flexible assistance strategy of lower limb rehabilitation exoskeleton based on admittance model [J]. *Science China Technological Sciences*, 2024, 67(3):823-834.
- [36] ESMAEILI B, MADANI S S, SALIM M, et al. Model-free adaptive iterative learning integral terminal sliding mode control of exoskeleton robots [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2015, 28:3120-3139.
- [37] PENG G, PHILIP CHEN C L, YANG C. Robust admittance control of optimized robot-environment interaction using reference adaptation [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2023, 34(9):5804-5815.
- [38] BRAHMI B, RAHMAN M H, SAAD M. Impedance learning adaptive super-twisting control of a robotic exoskeleton for physical human-robot interaction [J]. *IET Cyber-Systems and Robotics*, 2023, 5(1):e12077.
- [39] FOROUTANNIA A, AKBARZADEH-T M R, AKBARZADEH A, et al. Adaptive fuzzy impedance control of exoskeleton robots with electromyography-based convolutional neural networks for human intended trajectory estimation [J]. *Mechatronics*, 2023, 91:102952.
- [40] RAZZAGHIAN A. A fuzzy neural network-based fractional-order Lyapunov-based robust control strategy for exoskeleton robots; application in upper-limb rehabilitation [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2022, 193:567-583.
- [41] RANZANI R, LAMBERCY O, METZGER J C, et al. Neurocognitive robot-assisted rehabilitation of hand function; a randomized control trial on motor recovery in subacute stroke [J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2020, 17(1):115.
- [42] 荣积峰, 丁力, 张雯, 等. 康复机器人结合镜像疗法对脑卒中偏瘫患者上肢功能的效果[J]. *中国康复理论与实践*, 2019, 25(6):709-713.
- [43] 赵德福, 景俊, 方琪, 等. 重复经颅磁刺激结合上肢机器人虚拟情景训练对脑卒中患者认知功能的研究[J]. *中国康复*, 2020, 35(6):295-298.
- [44] MUSTAFAOGLU R, ERHAN B, YELDAN I, et al. Does robot-assisted gait training improve mobility, activities of daily living and quality of life in stroke? A single-blinded, randomized controlled trial [J]. *Acta Neurologica Belgica*, 2020, 120(2):335-344.
- [45] LI T, HIRANO S, TANABE S, et al. Robot-assisted gait training using welwalk in hemiparetic stroke patients; an effectiveness study with matched control [J]. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 2020, 29(12):105377.
- [46] 路芳, 朱琳, 宋为群. 下肢康复机器人联合虚拟现实技术对脑卒中患者下肢功能的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2018, 33(11):1301-1306.

- [47] TAKI S, IMURA T, IWAMOTO Y, et al. Effects of exoskeletal lower limb robot training on the activities of daily living in stroke patients; retrospective pre-post comparison using propensity score matched analysis [J]. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 2020, 29(10):105176.
- [48] NOLAN K J, KARUNAKARAN K K, CHERVIN K, et al. Robotic exoskeleton gait training during acute stroke inpatient rehabilitation [J]. *Frontiers in Neurobotics*, 2020, 14:581815.

Technology and Development Trends of Rehabilitation Robots for Limbs

GAO Xueshan¹, LIU Kaiyuan¹, ZHAO Peng¹, MIAO Mingda²

(1. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu, 222005, China)

Abstract: Stroke is classified as a neurological disorder that can lead to physical movement impairments and cognitive impairments in the brain. In recent years, intelligent rehabilitation robots for limbs have been widely used in clinical practice. They can provide patients with effective and repetitive rehabilitation training and help to reshape damaged nerves and improve the cognitive function, thereby restoring the physical movement of limbs. This article summarizes the current research status on rehabilitation robots for limbs both domestically and internationally. It discusses the clinical applications of these robots in the rehabilitation training of stroke patients based on the different areas of action. Experimental data demonstrate that rehabilitation robots for limbs achieve better outcomes than conventional treatment methods, effectively saving labor and material resources and addressing issues such as the high demand for rehabilitation and the shortage of rehabilitation professionals. Meanwhile, the key technologies of rehabilitation robots are analyzed from three aspects: structural design, movement intention recognition, and control strategies. Furthermore, the future development trends of these robots are prospected. With the development of new materials and artificial intelligence, rehabilitation robots for limbs will evolve towards being lightweight, multifunctional, and intelligent, assisting rehabilitation professionals in developing more standardized and personalized training programs.

Key words: rehabilitation robots for limbs; stroke; movement impairment; cognitive impairment; human-robot interaction

责任编辑:米慧芝,南旭



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

投稿系统网址:http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch