

· 中青年学者论坛 ·



方凡夫 海军军医大学(第二军医大学)第一附属医院康复医学科主任,副教授、副主任医师,医学博士。入选军队高层次科技创新人才、军队青年科技英才、上海市“春昇杯”医学创新人才、上海市“杏林新星”、上海申康医院发展中心研究型医师计划、海军军医大学(第二军医大学)“深蓝”人才工程等人才培养计划。兼任中国康复医学会康复工程与产业促进专业委员会常委、上海市生物医学工程学会康复工程专业委员会副主任委员、上海市医学会物理医学与康复学专科分会委员等学术职务。主要从事运动损伤、脑卒中临床康复和工程创新研究。主持国家重点研发计划课题、国家自然科学基金、军队后勤科研计划重点项目等20余项课题,取得多项原创性新技术、新器械研究成果。获军队医疗成果奖三等奖、上海市科技进步奖一等奖、中国康复医学会科学技术奖二等奖、上海市中西医结合科学技术奖二等奖等多项成果奖励。作为第一作者或通信作者发表论文60余篇,获得专利授权20项。荣立个人三等功3次。

DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230508

从临床视角看康复机器人应用与发展趋势

黄潇楠, 方凡夫*

海军军医大学(第二军医大学)第一附属医院康复医学科, 上海 200433

[摘要] 康复机器人是一种将机器人技术与医疗技术相结合、旨在协助运动功能障碍人群进行康复训练的设备,广泛应用于脑卒中、脊髓损伤等疾病的康复治疗。本文从临床视角总结了康复机器人的分类,分析了近年来康复机器人领域的临床应用现状。目前,康复机器人在脑卒中和脊髓损伤领域展现出积极意义,同时其与多项技术的融合创新也为它带来了更高的效率和准确性。在临床研究主导的发展趋势中,患者、康复治疗师、工程师和医师都发挥着关键作用。康复机器人在临床上的应用与推广仍面临许多挑战,也存在广阔的发展潜力。

[关键词] 康复机器人; 外骨骼; 脑卒中; 脊髓损伤; 运动障碍

[引用本文] 黄潇楠, 方凡夫. 从临床视角看康复机器人应用与发展趋势[J]. 海军军医大学学报, 2023, 44(12): 1385-1391. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230508.

Application and development trends of rehabilitation robots: from a clinical perspective

HUANG Xiaonan, FANG Fanfu*

Department of Rehabilitation Medicine, The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

[Abstract] Rehabilitation robot is a kind of device that combines robot technology with medical technology and is designed to assist rehabilitation training of individuals with impaired motor functions. It is widely used in the rehabilitation treatment of stroke, spinal cord injury, and other diseases. This paper summarizes the classification of rehabilitation robots from the clinical perspective, and analyzes the clinical application of rehabilitation robots in recent years. Currently, rehabilitation robots have shown promising outcomes in the fields of stroke and spinal cord injury, and their integration and innovation with various technologies have significantly enhanced their efficiency and precision. In the evolving landscape dominated by clinical research, patients, rehabilitation therapists, engineers, and physicians all play pivotal roles. The application and promotion of

[收稿日期] 2023-09-06

[接受日期] 2023-11-09

[基金项目] 军队高层次科技创新人才工程项目([2020]NQ06128),上海申康医院发展中心医企融合转化专项(SHDC2022CRD004),上海申康医院发展中心市级医院诊疗技术推广及优化管理项目(SHDC22023304)。Supported by Military High-Level Science and Technology Innovation Talent Project([2020]NQ06128), Medical Enterprise Integration and Transformation Project of Shanghai Hospital Development Center(SHDC2022CRD004), and Municipal Hospital Diagnosis and Treatment Technology Promotion and Optimization Management Project of Shanghai Hospital Development Center(SHDC22023304).

[作者简介] 黄潇楠, 硕士生. E-mail: 1301090492@qq.com

*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-31161952, E-mail: fangfanfu@126.com

rehabilitation robots in clinical practice still face many challenges, but also have great development potential.

[Key words] rehabilitation robots; exoskeletons; stroke; spinal cord injury; dyskinesia

[Citation] HUANG X, FANG F. Application and development trends of rehabilitation robots: from a clinical perspective[J]. Acad J Naval Med Univ, 2023, 44(12): 1385-1391. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20230508.

一项对全球康复服务需求进行评估的研究表明,全球约有 24.1 亿人在患病或受伤过程中的某个时刻需要康复服务,其中我国约有 4.6 亿人有此需求^[1]。随着人口老龄化加剧,我国康复医疗需求持续上升,康复专业人才的短缺成为制约我国康复行业发展的主要因素^[2-3]。在该背景下,康复机器人(rehabilitation robot, RR)的发展显得尤为重要。RR 是医工融合的重要成果,它将机器人技术与医疗技术相结合,旨在协助运动功能障碍人群进行康复训练,提供个性化的康复辅助服务,降低人力和时间成本。本文拟从临床视角分析 RR 领域的应用现状和发展趋势,为进一步研究和开发 RR、满足不断增长的康复需求提供思路。

1 RR 的概念和分类

RR 是一种专门设计用于进行康复治疗 and 康

复训练的机器人系统,通常在医疗机构中使用,以协助恢复患者的肌肉和关节功能、提高运动能力。它具备自动控制和编程功能,通过使用传感器、执行器和计算系统与患者进行交互。然而,这种设备目前尚没有规范的术语,主流医学平台 PubMed 也没有设立“rehabilitation robot”这一主题词。一些研究使用“机器人辅助(robot-assisted)”或“机器人干预(robot-mediated)”等词汇来描述类似设备^[4-5],但这些词汇未能充分描述出此类设备的独立性和智能性,不能准确体现其发展趋势。

“康复机器人(rehabilitation robot)”更能准确体现机器人的专业性、独立性和智能性,符合未来的发展趋势。因此,我们建议将“康复机器人(rehabilitation robot)”作为此类设备的术语。

根据结构、功能、治疗方式,RR 可以分为不同类型(表 1)^[5-7]。

表 1 康复机器人的类型^[5-7]

| 分类依据 | 类型 | 描述 |
|------|-------|---|
| 结构 | 悬挂式 | 康复机器人悬挂在患者身体部位上,通过机械臂或装置来辅助患者的运动 |
| | 末端驱动式 | 康复机器人直接作用于患者的肢体末端,帮助患者进行特定运动的训练和恢复 |
| | 外骨骼式 | 康复机器人通过传感器和执行器与人体骨骼相连接,辅助或增强患者的运动能力 |
| 功能 | 评估 | 康复机器人通过各种传感器对患者进行评估,并帮助医疗团队制定个性化的康复计划 |
| | 训练 | 康复机器人提供多样化的康复训练方法,根据患者需求进行个性化训练 |
| | 替代 | 康复机器人替代残疾人缺失的肢体,帮助他们回归正常的日常生活 |
| | 护理 | 康复机器人提供特定的护理功能,如协助患者进行日常生活中的活动(如进食、洗澡等) |
| | 增强 | 康复机器人用于增强健康人群的运动表现 |
| 治疗方式 | 主动 | 康复机器人主动提供力量和动作来辅助患者运动 |
| | 主动辅助 | 康复机器人根据患者的主动动作提供辅助性力量,帮助患者完成更复杂的动作 |
| | 被动 | 康复机器人完全控制运动,患者被动移动,适用于损伤早期的患者 |
| | 镜像 | 康复机器人通过感应患者健侧的运动,使患者受损肢体完成相同的运动 |
| | 纠正 | 康复机器人通过实时反馈和调整,帮助纠正患者不正确的运动模式 |
| | 抗阻 | 康复机器人提供阻力,帮助患者进行肌肉强化训练 |
| | 轨迹指引 | 当受试者偏离预定轨迹时,康复机器人对其进行指引 |

2 RR 的临床应用现状

采用文献计量学的方法对相关文献进行检索与分析。检索策略如下:在 Web of Science、WOS Core Collection 和 SCI-Expanded 数据库中使用关键词“TS=rehabilitation robot”进行检索,限定语种为英语,文献类型为“article”和“review”,时间范围为 2003 年 1 月 1 日至 2023 年 1 月 1 日。经

CiteSpace 排除重复文献后,获得 3 950 篇文献。关键词分析结果显示,脑卒中、外骨骼、辅助步行、减重支持和肢体功能等都是 RR 领域的研究热点,脑卒中和脊髓损伤是目前 RR 主要干预的疾病领域。下文将重点分析 RR 在脑卒中和脊髓损伤领域的临床应用情况。

2.1 RR 在脑卒中患者中的应用 尽管脑卒中仍为全球范围内第二大死因,但其致死率呈下降趋

势^[8]。这意味着更多的脑卒中后遗症患者存在康复需求。大脑在脑卒中后会经历一个重组过程,包括功能上相似但解剖结构不同的代偿途径的建立、突触生成的促进、树突形态的塑造及突触连接的加强等,这种适应性的神经重组与高强度的重复训练密切相关^[9]。RR恰好可以为患者提供这些训练服务,其能够高效持久地执行重复且乏味的治疗任务,减轻治疗师的负担。

2.1.1 上肢RR RR在脑卒中患者上肢治疗中的应用可以追溯到20世纪90年代^[5]。RR在脑卒中急性期应用的临床研究证据尚不充分,有限的证据表明在脑卒中急性期使用末端驱动式RR进行被动训练可以显著提高患者的上肢功能评分和日常生活活动能力(activity of daily living, ADL)^[5]。双侧RR上肢康复训练往往能取得比单侧更好的效果。Burgar等^[10]采用镜像运动康复机器人(mirror image movement enabler, MIME)对脑卒中急性期患者进行双侧上肢康复训练,结果表明MIME训练后患者肩肘功能的改善效果不亚于常规康复训练。Yuan等^[11]通过电生理学观察发现,双侧上肢RR康复可能会促进运动神经元募集,从而促进患侧上肢功能的恢复。这可能解释了MIME的基本原理。

对于慢性期脑卒中偏瘫患者,上肢被动RR的应用不能显著提高上肢功能评分或ADL,与常规康复训练相比没有优势^[12]。在中重度上肢功能受限的脑卒中患者中,与常规护理相比,上肢被动RR也不能明显改善患者的上肢功能^[4]。然而,带有主动辅助功能的RR可以显著改善慢性期脑卒中患者的上肢功能,它强调患者主动参与,以提升患者的主动运动功能^[5]。同时,主动辅助RR训练的累积时长对康复效果存在正向影响,训练时间超过15h对脑卒中患者的运动控制改善有即时效应,但是否有长期改善效果目前还缺乏证据支持^[13]。

大部分研究仅证明RR能改善脑卒中患者上肢活动度和肌力,但难以转化为对上肢整体ADL的改善^[12]。目前,基于肌电图的上肢外骨骼式RR研究较为深入,其优势在于无须在使用前对患肢进行建模,且肌电信号产生在肌肉收缩之前,有利于RR快速识别并做出反应策略^[14]。使用基于肌电图的上肢RR在改善上肢运动功能、减少肌痉挛方面具有较大的潜力^[15-16]。

2.1.2 下肢RR RR在脑卒中患者的下肢康复中扮

演了重要角色。其中,外骨骼式RR更常用于严重功能障碍的患者,而末端驱动式RR则在轻度功能障碍患者中应用广泛^[17]。一篇纳入36项临床试验、1472例参与者的系统综述表明,下肢RR虽然在训练结束后对急性期和恢复期脑卒中患者步行速度和距离的改善效果并未优于治疗师,但它能够显著提高患者独立行走的可能性,并且脑卒中后3个月内的患者可能比脑卒中后3个月以上的患者从下肢RR辅助步态训练中受益更多^[18]。Lee等^[19]将38例脑卒中6个月以内的患者随机分为对照组(接受常规康复治疗)和试验组(接受外骨骼式RR辅助康复结合常规康复治疗),研究结果表明试验组患者下肢力量、6min步行距离和生活质量的改善程度均优于对照组。一篇系统综述分析了末端驱动式下肢RR对急性期、亚急性期和慢性期脑卒中患者的康复效果,结果显示末端驱动式下肢RR对改善亚急性期脑卒中患者的步行速度更有效^[20]。

在脑卒中发生3个月后,仍有约20%的患者需使用轮椅、70%的患者存在步行速度缓慢,由于站立和摆动的不对称是这些患者步态的主要特征,所以重建平衡的步态成为康复计划的首要目标^[21]。适用于此阶段的机器人辅助步态训练(robot assisted gait training, RAGT)旨在通过特定的重复运动协调训练激活肌群协调性和神经可塑性,与自主神经相互作用,调节与校正脑卒中偏瘫患者的实时步态^[22]。RAGT主要分为2种:基于体重支撑跑步机的机器人辅助步态训练(body weight supported treadmill training-robot assisted gait training, BWSTT-RAGT)和地面机器人辅助步态训练(ground robot assisted gait training, GRAGT)。

BWSTT-RAGT主要由电机驱动的下肢外骨骼、医用跑步机和体重支持系统组成^[23]。对于亚急性期脑卒中患者,BWSTT-RAGT能够显著改善患者的平衡能力、地面步行速度和步行距离^[18]。与传统步态引导相比,心率储备引导的BWSTT-RAGT在改善活动水平方面更具优势^[24]。对于慢性期脑卒中患者,Yamamoto等^[25]通过分析既往发表的11项随机对照试验结果发现,与治疗师辅助训练相比,BWSTT-RAGT并没有表现出更好的步态功能改善效果。GRAGT相较于BWSTT-RAGT具有更广泛的应用场景,它不仅可以帮助脑卒中患者

进行地面步态训练和纠正,还能够训练患者卧-坐-站姿势的切换,增强肌肉协调性及两侧肢体协同性^[26]。GRAGT为患者提供了比传统行走更高强度、更多重复和更有任务导向的训练机会^[27]。

2.2 RR在脊髓损伤患者中的应用 脊髓损伤已成为全球关注的健康问题,每年有25万~50万人遭受脊髓损伤^[28]。不论损伤发生在哪个节段,下肢的运动和感觉障碍始终是脊髓损伤患者面临的问题,因此下肢RR在脊髓损伤患者中应用广泛。脊髓损伤带来的其他健康问题,如疼痛、痉挛、肠道、膀胱和性功能障碍等,也对康复进程构成挑战^[29]。

在过去几年里,GRAGT在脊髓损伤患者中的应用备受关注。将GRAGT应用在慢性脊髓损伤患者中能显著增加步幅、6 min步行距离和下肢力量^[30]。此外,GRAGT还可以增加脊髓损伤患者的平衡和躯干稳定性^[31]。GRAGT可根据个体的运动意图、肌力和步行稳定性提供个性化的训练方案^[32]。虽然BWSTT-RAGT也适用于脊髓损伤患者,但相对于GRAGT在肌肉激活、认知和ADL等的改善方面稍逊,且便携性不如GRAGT^[33]。不管是在完全性还是不完全性脊髓损伤患者中,GRAGT都能减轻下肢肌肉痉挛^[34]。然而,GRAGT的周期性训练并不能明显改善脊髓损伤患者常见的骨质疏松,且存在关节不稳和骨折的发生风险,同时其能否作为改善心血管功能的方法尚待确认^[31,35]。一项前瞻性、观察性研究表明,在直立时间与重力效应的共同影响下,GRAGT可能对一半以上脊髓损伤患者的肠道功能有一定改善作用^[36]。该研究结果很有临床意义,但仅纳入10例参与者,还需更多的科学验证和探索。

3 RR与新技术的融合创新及应用

在康复领域,RR与其他新技术的融合展现出广阔的前景,这些新技术包括表面肌电图(surface electromyography, sEMG)、肌骨超声(musculoskeletal ultrasound, MSKUS)、功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)、虚拟现实(virtual reality, VR)及脑机接口(brain computer interface, BCI)等。RR与新技术的融合创新为患者提供了更全面、精准的治疗策略。

sEMG能够将肌电信号反馈给RR,使RR识别患者的肌肉激活状态并帮助患者完成所需的训

练,因此基于sEMG的RR展现出比传统RR更卓越的效果^[15]。但sEMG只能识别肌肉的激活,无法捕捉肌肉的运动情况,导致在RR识别患者运动意图方面存在限制。MSKUS能够实时检测肌肉收缩情况,将sEMG与MSKUS相结合可以帮助RR更精确地识别患者的运动意图,更好地满足患者的康复需求,从而改善患者的生活质量^[37]。

FES通过将电脉冲传递至肌肉引起非自主收缩,促进患者瘫痪或虚弱肢体的运动。将FES与外骨骼式RR结合可以显著提升神经的募集能力,降低脑卒中偏瘫患者肌痉挛的风险,进而提高患者肌肉激活率、躯干平衡性和肢体间的协调性^[38-39]。

将VR与RR相结合后,患者能通过虚拟世界互动以完成训练任务,进而使其活动能力和ADL显著提升^[40]。两者结合对认知和注意力的提升也有明显益处^[41]。然而,目前并不能确定VR与RR结合的效果比常规康复疗法更有效,需进一步优化VR与RR的交互设计,以提高治疗效果和患者依从性^[42]。

BCI可以将大脑活动的电信号转化为外部设备的控制信号,从而驱动RR辅助患者完成其所期望的动作。BCI与外骨骼式RR的结合能够通过提供更精确的本体感觉反馈来促进受损神经的重组或代偿,从而改善患者的康复效果^[43]。植入型BCI通过记录局部场电位或单个和多个单位神经元细胞活动,实现对机械臂和手指的多功能和高维控制或对外周神经进行直接电刺激,相关产品研发已取得重要进展,但手术风险和异物反应不容忽视;非侵入性BCI临床可及性高,但从头骨表面记录脑电信号存在信息量低、对伪影的敏感性高等问题,由于脑电信号的低信噪比和非平稳性,目前BCI对于信号的成功识别率只有60%~80%,且有着很高的延迟,远远达不到参与日常辅助的水平^[44-45]。卷积神经网络等深度学习算法的嵌入及大量的训练和样本量的累积能够减少建模时间并减少驱动外骨骼的延迟^[46]。研究人员已在不断地优化算法以抑制伪影的干扰^[47]。BCI在临床中的全面推广应用仍需时间和数据的积累。

4 RR在临床研究主导下的发展趋势

4.1 康复治疗师和患者的角度:安全性、依从性、疗效 RR在医院环境下被证明是安全可行的,但

训练中也会出现一些不良事件,如擦伤和肌肉骨骼损伤等^[48]。RR的尺寸和适用性也受到关注,如瘫痪患者在使用柔性外骨骼时可能面临摔倒的风险;如果RR对患者状态的感知不够精准,可能还会误识别高肌张力状态而导致肌痉挛和患者恐惧的情况^[49]。使用RR后,患者可能会对其产生依赖,例如刚性外骨骼会按照预设步态模式行走,而非提供所需的辅助^[50]。此外,设备穿脱过程的便捷性对于提高患者和治疗师的依从性至关重要^[49]。

4.2 康复设备产业及研发者的角度:技术、费用、成本 康复产业的技术人员关注新技术的迭代与创新,如大数据、新型材料、3D打印、传感与控制、柔性可穿戴设备及仿生学等技术。在国家医疗保障局现今推行的疾病诊断相关分组(diagnosis-related groups, DRG)和病种分值付费(diagnosis-intervention packet, DIP)方式改革的背景下,治疗费用成为一个严峻的挑战^[37]。截至目前,国内很多地区对RR的治疗收费尚未统一与标准化,会影响实时记录、后期质控和推广评价。此外,早期的一些多中心研究发现RR的治疗花费与治疗师治疗相当,不具备经济效益^[4,12]。柔性外骨骼的成熟和普及将有望降低RR治疗的费用。

4.3 康复医师的角度:创新性、医学疗效、学术性 康复医师往往在临床案例的诊治过程中产生研发的动力与灵感,推动RR的创新。临床上所应用的大多数RR都是由康复医师及临床团队主导设计并参与研发,产品的医学疗效与过程数据的学术性都是值得关注的要点。在临床实践的平台,某种类的RR可以协同其他种类的康复技术、医疗设备或治疗理念在同一群体上实施,从而使疗效产生涟漪叠加的效果。

5 RR面临的挑战

尽管RR在临床康复领域取得了显著的进展,但仍面临许多挑战。(1)制定RR应用规范并提升其安全性是首要挑战。各级卫生机构需建立更全面的监测和不良事件报告系统,同时采用更多维度的RR安全性评价方法。(2)需要探索符合国家前瞻发展的RR收费体系。在新医改背景下,整个康复行业需追求创新,深入优化降低设备成本。同时,积极探索并准备将RR纳入国家集采体系。(3)需要权衡RR康复方案的标准化和

个性化。因为每个病例都展现出个性化需求,所以RR的发展需建立丰富的“处方库”。在具身智能、三维感知和多模态信息等新技术融合支撑下,未来RR的发展会推出更智能和个性化的应用系统。(4)应积极应对“拟人化”情感感知与“人形”机器人发展需求的不断进化。在机器人技术向“拟人化”“人形”发展的趋势下,RR必将会考虑融入情感感知与更高级人机交互融合的元素。BCI和sEMG一体化等新技术发展将在这一方面具有巨大的填补优势和发展潜力。(5)需要强调基于循证医学证据支持下RR的发展路线。随着更多、更高质量的多中心临床研究的开展,RR呈现出更深层次的临床意义与社会效益。在未来,RR将会越来越规范化、智能化、可穿戴化、可及化和个性化,助力康复治疗 and 医疗服务不断提升。

[参考文献]

- [1] CIEZA A, CAUSEY K, KAMENOV K, et al. Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease study 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019[J]. *Lancet*, 2020, 396(10267): 2006-2017. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)32340-0.
- [2] 刘向国,李佳佳,武继磊,等.北京市老年康复机构及康复医学人力资源现状研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2022, 37(7): 937-940. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2022.07.013.
- [3] CHEN X, GILES J, YAO Y, et al. The path to healthy ageing in China: a Peking University-Lancet Commission[J]. *Lancet*, 2022, 400(10367): 1967-2006. DOI: 10.1016/S0140-6736(22)01546-X.
- [4] RODGERS H, BOSOMWORTH H, KREBS H I, et al. Robot assisted training for the upper limb after stroke (RATULS): a multicentre randomised controlled trial[J]. *Lancet*, 2019, 394(10192): 51-62. DOI: 10.1016/S0140-6736(19)31055-4.
- [5] BASTERIS A, NIJENHUIS S M, STIENEN A H A, et al. Training modalities in robot-mediated upper limb rehabilitation in stroke: a framework for classification based on a systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2014, 11: 111. DOI: 10.1186/1743-0003-11-111.
- [6] 余灵,喻洪流. 上肢康复机器人研究进展[J]. *生物医学工程学进展*, 2020, 41(3): 134-138, 143. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1242.2020.03.003.
- [7] 杜妍辰,张鑫,喻洪流. 下肢康复机器人研究现状[J]. *生物医学工程学进展*, 2022, 43(2): 88-91. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1242.2022.02.007.
- [8] HANKEY G J. Stroke[J]. *Lancet*, 2017, 389(10069): 641-654. DOI: 10.1016/s0140-6736(16)30962-x.
- [9] ROSSINI P M, CALAUTTI C, PAURI F, et al. Post-

- stroke plastic reorganisation in the adult brain[J]. *Lancet Neurol*, 2003, 2(8): 493-502. DOI: 10.1016/S1474-4422(03)00485-X.
- [10] BURGAR C G, LUM P S, SCREMIN A M, et al. Robot-assisted upper-limb therapy in acute rehabilitation setting following stroke: Department of Veterans Affairs multisite clinical trial[J]. *J Rehabil Res Dev*, 2011, 48(4): 445-458. DOI: 10.1682/jrrd.2010.04.0062.
- [11] YUAN R, QIAO X, TANG C, et al. Effects of uni- vs. bilateral upper limb robot-assisted rehabilitation on motor function, activities of daily living, and electromyography in hemiplegic stroke: a single-blinded three-arm randomized controlled trial[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(8): 2950. DOI: 10.3390/jcm12082950.
- [12] LO A C, GUARINO P D, RICHARDS L G, et al. Robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke[J]. *N Engl J Med*, 2010, 362(19): 1772-1783. DOI: 10.1056/nejmoa0911341.
- [13] ZHANG L, JIA G, MA J, et al. Short and long-term effects of robot-assisted therapy on upper limb motor function and activity of daily living in patients post-stroke: a meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2022, 19(1): 76. DOI: 10.1186/s12984-022-01058-8.
- [14] JAKOB I, KOLLREIDER A, GERMANOTTA M, et al. Robotic and sensor technology for upper limb rehabilitation[J]. *PM&R*, 2018, 10(9): S189-S197. DOI: 10.1016/j.pmrj.2018.07.011.
- [15] HUO Y, WANG X, ZHAO W, et al. Effects of EMG-based robot for upper extremity rehabilitation on post-stroke patients: a systematic review and meta-analysis[J]. *Front Physiol*, 2023, 14: 1172958. DOI: 10.3389/fphys.2023.1172958.
- [16] RONG W, LI W, PANG M, et al. A Neuromuscular Electrical Stimulation (NMES) and robot hybrid system for multi-joint coordinated upper limb rehabilitation after stroke[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14(1): 34. DOI: 10.1186/s12984-017-0245-y.
- [17] CALABRÒ R S, CACCIOLA A, BERTÈ F, et al. Robotic gait rehabilitation and substitution devices in neurological disorders: where are we now?[J]. *Neurol Sci*, 2016, 37(4): 503-514. DOI: 10.1007/s10072-016-2474-4.
- [18] MEHRHOLZ J, THOMAS S, WERNER C, et al. Electromechanical-assisted training for walking after stroke[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2017, 5(5): CD006185. DOI: 10.1002/14651858.CD006185.pub4.
- [19] LEE Y H, KO L W, HSU C Y, et al. Therapeutic effects of robotic-exoskeleton-assisted gait rehabilitation and predictive factors of significant improvements in stroke patients: a randomized controlled trial[J]. *Bioengineering*, 2023, 10(5): 585. DOI: 10.3390/bioengineering10050585.
- [20] MARANESI E, RICCARDI G R, DI DONNA V, et al. Effectiveness of intervention based on end-effector gait trainer in older patients with stroke: a systematic review[J]. *J Am Med Dir Assoc*, 2020, 21(8): 1036-1044. DOI: 10.1016/j.jamda.2019.10.010.
- [21] JØRGENSEN H S, NAKAYAMA H, RAASCHOU H O, et al. Recovery of walking function in stroke patients: the Copenhagen Stroke Study[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 1995, 76(1): 27-32. DOI: 10.1016/S0003-9993(95)80038-7.
- [22] ARYA K N, PANDIAN S. Interlimb neural coupling: implications for poststroke hemiparesis[J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2014, 57(9/10): 696-713. DOI: 10.1016/j.rehab.2014.06.003.
- [23] OGINO T, KANATA Y, UEGAKI R, et al. Effects of gait exercise assist robot (GEAR) on subjects with chronic stroke: a randomized controlled pilot trial[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2020, 29(8): 104886. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.104886.
- [24] BAE Y H, KIM Y H, FONG S S M. Comparison of heart rate reserve-guided and ratings of perceived exertion-guided methods for high-intensity robot-assisted gait training in patients with chronic stroke: focused on the motor function and gait ability [J]. *Top Geriatr Rehabil*, 2016, 32(2): 119-126. DOI: 10.1097/tgr.0000000000000098.
- [25] YAMAMOTO R, SASAKI S, KUWAHARA W, et al. Effect of exoskeleton-assisted Body Weight-Supported Treadmill Training on gait function for patients with chronic stroke: a scoping review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2022, 19(1): 143. DOI: 10.1186/s12984-022-01111-6.
- [26] LI Y A, CHEN Z J, HE C, et al. Exoskeleton-assisted sit-to-stand training improves lower-limb function through modifications of muscle synergies in subacute stroke survivors[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2023, 31: 3095-3105. DOI: 10.1109/TNSRE.2023.3297737.
- [27] WINSTEIN C J, STEIN J, ARENA R, et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association[J]. *Stroke*, 2016, 47(6): e98-e169. DOI: 10.1161/STR.0000000000000098.
- [28] GBD 2016 Traumatic Brain Injury and Spinal Cord Injury Collaborators. Global, regional, and national burden of traumatic brain injury and spinal cord injury, 1990-2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016[J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18(1): 56-87. DOI: 10.1016/S1474-4422(18)30415-0.
- [29] ANDERSON K D. Targeting recovery: priorities of the spinal cord-injured population[J]. *J Neurotrauma*, 2004, 21(10): 1371-1383. DOI: 10.1089/neu.2004.21.1371.
- [30] TSAI C Y, DELGADO A D, WEINRAUCH W J, et al. Exoskeletal-assisted walking during acute inpatient rehabilitation leads to motor and functional improvement in persons with spinal cord injury: a pilot study[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2020, 101(4): 607-612. DOI: 10.1016/j.apmr.2019.11.010.

- [31] TAMBURELLA F, LORUSSO M, TRAMONTANO M, et al. Overground robotic training effects on walking and secondary health conditions in individuals with spinal cord injury: systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2022, 19(1): 27. DOI: 10.1186/s12984-022-01003-9.
- [32] SU D, HU Z, WU J, et al. Review of adaptive control for stroke lower limb exoskeleton rehabilitation robot based on motion intention recognition[J]. *Front Neurobot*, 2023, 17: 1186175. DOI: 10.3389/fnbot.2023.1186175.
- [33] ZHANG L, LIN F, SUN L, et al. Comparison of efficacy of lokomat and wearable exoskeleton-assisted gait training in people with spinal cord injury: a systematic review and network meta-analysis[J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 772660. DOI: 10.3389/fneur.2022.772660.
- [34] BAUNSGAARD C B, NISSEN U V, BRUST A K, et al. Exoskeleton gait training after spinal cord injury: an exploratory study on secondary health conditions[J]. *J Rehabil Med*, 2018, 50(9): 806-813. DOI: 10.2340/16501977-2372.
- [35] XIANG X N, ZONG H Y, OU Y, et al. Exoskeleton-assisted walking improves pulmonary function and walking parameters among individuals with spinal cord injury: a randomized controlled pilot study[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 86. DOI: 10.1186/s12984-021-00880-w.
- [36] CHUN A, ASSELIN P K, KNEZEVIC S, et al. Changes in bowel function following exoskeletal-assisted walking in persons with spinal cord injury: an observational pilot study[J]. *Spinal Cord*, 2020, 58(4): 459-466. DOI: 10.1038/s41393-019-0392-z.
- [37] SIVIY C, BAKER L M, QUINLIVAN B T, et al. Opportunities and challenges in the development of exoskeletons for locomotor assistance[J]. *Nat Biomed Eng*, 2023, 7(4): 456-472. DOI: 10.1038/s41551-022-00984-1.
- [38] LI L, HU C, LEUNG K W C, et al. Immediate effects of functional electrical stimulation-assisted cycling on the paretic muscles of patients with hemiparesis after stroke: evidence from electrical impedance myography[J]. *Front Aging Neurosci*, 2022, 14: 880221. DOI: 10.3389/fnagi.2022.880221.
- [39] HU C, WANG T, LEUNG K W C, et al. Muscle electrical impedance properties and activation alteration after functional electrical stimulation-assisted cycling training for chronic stroke survivors: a longitudinal pilot study[J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 746263. DOI: 10.3389/fneur.2021.746263.
- [40] FAREH R, ELSABE A, BAZIYAD M, et al. Will your next therapist be a robot? A review of the advancements in robotic upper extremity rehabilitation[J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23(11): 5054. DOI: 10.3390/s23115054.
- [41] KAYABINAR B, ALEMDAROĞLU-GÜRBÜZ İ, YILMAZ Ö. The effects of virtual reality augmented robot-assisted gait training on dual-task performance and functional measures in chronic stroke: a randomized controlled single-blind trial[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2021, 57(2): 227-237. DOI: 10.23736/S1973-9087.21.06441-8.
- [42] LAVER KE, LANGE B, GEORGE S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2017, 11(11): CD008349. DOI: 10.1002/14651858.CD008349.pub4.
- [43] FU J, CHEN S, SHU X, et al. Functional-oriented, portable brain-computer interface training for hand motor recovery after stroke: a randomized controlled study[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1146146. DOI: 10.3389/fnins.2023.1146146.
- [44] COLUCCI A, VERMEHREN M, CAVALLO A, et al. Brain-computer interface-controlled exoskeletons in clinical neurorehabilitation: ready or not?[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2022, 36(12): 747-756. DOI: 10.1177/15459683221138751.
- [45] SIMON C, BOLTON D A E, KENNEDY N C, et al. Challenges and opportunities for the future of brain-computer interface in neurorehabilitation[J]. *Front Neurosci*, 2021, 15: 699428. DOI: 10.3389/fnins.2021.699428.
- [46] DAI G, ZHOU J, HUANG J, et al. HS-CNN: a CNN with hybrid convolution scale for EEG motor imagery classification[J]. *J Neural Eng*, 2020, 17(1): 016025. DOI: 10.1088/1741-2552/ab405f.
- [47] HASLACHER D, NASR K, ROBINSON S E, et al. Stimulation artifact source separation (SASS) for assessing electric brain oscillations during transcranial alternating current stimulation (tACS)[J]. *Neuroimage*, 2021, 228: 117571. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2020.117571.
- [48] WRIGHT M A, HERZOG F, MAS-VINYALS A, et al. Multicentric investigation on the safety, feasibility and usability of the ABLE lower-limb robotic exoskeleton for individuals with spinal cord injury: a framework towards the standardisation of clinical evaluations[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2023, 20(1): 45. DOI: 10.1186/s12984-023-01165-0.
- [49] MORRIS L, DITEESAWAT R S, RAHMAN N, et al. The-state-of-the-art of soft robotics to assist mobility: a review of physiotherapist and patient identified limitations of current lower-limb exoskeletons and the potential soft-robotic solutions[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2023, 20(1): 18. DOI: 10.1186/s12984-022-01122-3.
- [50] VAUGHAN-GRAHAM J, BROOKS D, ROSE L, et al. Exoskeleton use in post-stroke gait rehabilitation: a qualitative study of the perspectives of persons post-stroke and physiotherapists[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020, 17(1): 123. DOI: 10.1186/s12984-020-00750-x.