

## 康复机器人系统的研究现状与展望

刘忠良<sup>1</sup>, 张坤<sup>1</sup>, 魏彦龙<sup>1</sup>, 张志远<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学第二医院康复医学科 吉林 长春 130041; 2. 吉林大学护理学院 吉林 长春 130021)

**摘要** 随着康复医学和机器人技术的不断发展, 康复机器人系统也顺应着临床需要而迎来发展新纪元。康复机器人系统凭借其自动化、可编程等特性, 可以很好地满足临床康复工作的需要, 同时可以有效整合肌电图、脑机接口、功能性电刺激等新型康复辅助技术, 进而有效提高临床康复效果。随着医工等多学科交叉合作的过程不断深化, 未来的康复机器人系统既需要强大的康复医学理论支撑, 又需契合临床康复需求, 这样才能同时保证机器人辅助康复的质量和效率。

**关键词** 康复医学; 机器人手术系统; 医工结合

**中图分类号** R496 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2023) 06-0497-10

## Present status and progress of rehabilitation robotic system

LIU Zhongliang<sup>1</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>, WEI Yanlong<sup>1</sup>, ZHANG Zhiyuan<sup>1,2</sup>

(1. Department of Rehabilitation, the Second Hospital of Jilin University, Changchun 130041, China; 2. School of Nursing, Jilin University, Changchun 130021, China)

**Abstract** With the continuous development of rehabilitation medicine and robotics, the rehabilitation robotic system has ushered in a new era of progress with the clinical needs. The rehabilitation robotic system can well meet the needs of clinical rehabilitation with its automation and programmability, and it can effectively integrate electromyography, brain-computer interface, functional electrical stimulation and other new rehabilitation-assisted technologies together, which is conducive to improve the clinical rehabilitation effect well. With the deepening of multidisciplinary cooperation between medicine and engineering, the future rehabilitation robotic system not only needs strong theoretical support of rehabilitation medicine, but also meets the needs of clinical rehabilitation, so as to ensure the quality and efficiency of robot-assisted rehabilitation.

**Key words** Rehabilitation medicine; Robotic surgical system; Combination of medicine and engineering

收稿日期: 2022-03-11 录用日期: 2022-09-28

Received Date: 2022-03-11 Accepted Date: 2022-09-28

基金项目: 吉林大学第二批本科“创新示范课程”建设项目(419050531034, 419051000052)

Foundation Item: The Second Construction Project of Jilin University for Undergraduate “Innovative Demonstration Course” (419050531034, 419051000052)

通讯作者: 张志远, Email: Z1810097959@163.com

Corresponding Author: ZHANG Zhiyuan, Email: Z1810097959@163.com

引用格式: 刘忠良, 张坤, 魏彦龙, 等. 康复机器人系统的研究现状与展望[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2023, 4(6): 497-506.

Citation: LIU Z L, ZHANG K, WEI Y L, et al. Present status and progress of rehabilitation robotic system[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2023, 4(6): 497-506.

康复机器人被定义为一种可编程的多功能机械手,通过可编程的运动驱动肢体、关节或其他部位的康复设备,辅助患者完成各项康复动作<sup>[1]</sup>。机器人辅助康复治疗是基于运动疗法和机器人技术的新型康复治疗方法,随着康复机器人的不断发展以及机器人辅助康复治疗的可行性和疗效逐渐被证实,康复机器人在临床中的应用越来越广泛。康复机器人系统具有训练动作标准、可重复、可编程以及康复训练强度高优势。在临床应用过程中,康复治疗师结合患者的特定康复需求,利用康复机器人系统将某些繁琐和劳动密集型的康复过程自动化,有效地减少了医生的体力负担,有助于康复治疗师将更多的精力应用于患者的功能性康复训练中。此外,康复机器人系统在临床康复中的应用还具有成本效益<sup>[2-3]</sup>,能够节省医疗支出,减少国家的医疗财政支出,但其成本效益和国家的具体医疗体制密切相关<sup>[4]</sup>。

目前,应用于临床的主要康复模式是治疗师与患者进行一对一的康复训练,由于医疗资源有限,治疗师的时间和精力需要合理分配给多位患者,因此单个患者的康复强度可能未达到其最大康复潜力的需求。Lang C E 等人<sup>[5]</sup>对脑卒中后临床康复训练强度进行了调查研究,结果发现临床中的康复训练强度远低于动物实验中所提示的可达到最大康复效果的训练强度。越来越多的研究表明,重复性、高强度的康复训练对促进大脑可塑性及运动功能的恢复有着巨大的帮助<sup>[6-8]</sup>。考克兰图书馆的一项综述中有中等质量的证据表明<sup>[9]</sup>,在常规治疗后额外提供至少 20 h 的重复性任务训练能够提高脑卒中患者上肢运动功能。此外,骨科康复等康复领域也需要机器人技术辅助人工进行某些被动康复训练,以达到更好的临床康复效果<sup>[10]</sup>。康复机器人系统凭借其可编程、自动化、康复训练强

度高等优势,可以很好地满足临床康复需求。本综述主要对国内外康复机器人系统的研究现状进行总结,并对康复机器人系统的未来发展趋势进行展望。

## 1 康复机器人系统发展历史

随着机器人技术的快速发展,康复机器人技术也逐步成熟并进入临床应用,但利用机器辅助临床康复的探索却可以追溯到很久以前。1910 年 Büdingen T<sup>[11]</sup> 在一项专利中首次提出利用电动马达辅助驱动心脏病患者,以支持和引导其进行步行康复训练。关节持续被动活动仪(Continuous Passive Motion, CPM)是第一个广泛应用于临床康复的机器人系统,基于骨科术后康复的持续被动活动理论,CPM 仪在临床应用中可沿着预定的运动轨迹驱动人体关节,并在一定关节活动范围内进行持续的匀速被动活动,最终通过机器辅助人工以达到最佳康复治疗效果。

1970 年第 1 台动力外骨骼康复机器人系统应用于脊髓损伤患者中,该系统通过气动、液压和电磁驱动外骨骼机械臂带动患者踝关节屈伸及髋关节的内收和外展<sup>[12]</sup>。1991 年第 1 个康复机器人系统被用于脑卒中患者的康复训练<sup>[13]</sup>,该系统在治疗过程中不直接接触患者,而是通过一个工业机械臂移动垫子至治疗师预定的位置,患者在重复移动自身肢体接触垫子的过程中达到康复效果。由于该系统对患者肢体无支持作用,因此只能应用于脑卒中后运动功能相对较好的患者。1995 年,麻省理工学院的 Hogan N 等人<sup>[14]</sup>发明了第 1 台交互式康复机器人系统,其能够提供安全、稳定、操作顺畅的多种训练模式(如被动、主动辅助、抗阻及去重力等),在训练过程中还能够记录肢体运动的多种运动学参

数。与此同时，以 Lokomat 为代表的下肢外骨骼式康复机器人系统及 The Gait Trainer 等末端牵引式康复机器人系统也逐渐成熟，并应用于临床研究中<sup>[15-16]</sup>。此后，随着各类康复机器人系统的有效性被越来越多的临床研究证实<sup>[17-20]</sup>，康复机器人辅助康复训练成为现实，康复机器人系统的发展也迎来“新纪元”。

## 2 康复机器人系统研究现状

21 世纪以来，各式各样的康复机器人系统相继面世，大致可分为末端牵引式、外骨骼式和可穿戴式等三类康复机器人系统。末端牵引式康复机器人安装简便，只需固定远端肢体，即可通过牵引肢体末端引导整个上肢或下肢进行康复训练，但由于其对肢体近端关节的控制有限，因此在训练过程中可能会导致异常的运动模式。相比之下，外骨骼式康复机器人的机械轴与患者的解剖轴对齐，可以精确控制患者单个关节的运动，进而最大限度地减少异常的姿势或运动。外骨骼式康复机器人的结构比末端牵引式康复机器人更复杂，因此其安装和操作过程也相对繁琐，同时外骨骼机器人的造价也相对昂贵，这在一定程度上限制了外骨骼康复机器人在国内临床康复治疗中的应用。可穿戴式康复机器人系统具有轻量、便携等特点，更加符合出院后康复和病房康复的需求，使机器人康复治疗在康复的各个场景和阶段都发挥了良好的康复疗效。而随着柔性可穿戴材料的发展，更加适合穿戴的软体康复机器人也逐步进入临床实践中。此外，联合肌电图、脑机接口和功能性电刺激等辅助技术的新型康复机器人系统也日益增多，且新型康复机器人系统相比于传统的康复机器人系统似乎有着更好的临床疗效，未来有望助力临床康复治疗实践。

## 2.1 上肢康复机器人系统

### 2.1.1 末端牵引式

目前，研究最多的末端牵引式上肢康复机器人系统为麻省理工学院开发的 MIT-MANUS<sup>[21]</sup>，其现已商业化为 InMotion 系列康复机器人系统，并被广泛应用于临床康复中。在采用该系统进行治疗时，患者将患肢放在与末端效应器（即手柄）相连的支撑装置中，通过手柄能够实时监测并反馈患者的力量大小和方向，并根据患者实际情况自动选择主动、被动、主动辅助等训练模式。InMotion 拥有 3 个自由度，能够全面训练上肢运动功能，兼顾肩关节、肘关节和腕关节的康复运动。此外，该康复机器人系统还带有视觉反馈系统，PC 屏幕上预先设定好的游戏或动画可以匹配患者肢体运动，并提供实时反馈，最大程度地激发患者康复训练的趣味性和积极性。《新英格兰医学杂志》进行的一项多中心随机对照研究表明<sup>[22]</sup>，与常规治疗相比，InMotion 上肢康复机器人系统对中重度慢性期脑卒中患者的运动功能有一定的提升作用。此外，有大量研究表明，康复机器人系统在提高脑卒中患者的肌力、肢体功能及日常生活活动能力（Activities of Daily Living, ADLs）等方面具有巨大潜力<sup>[23-24]</sup>。但《柳叶刀》进行的一项多中心随机对照研究将康复机器人系统辅助治疗、强化上肢训练和常规治疗进行了对比，结果显示 InMotion 上肢康复机器人系统辅助治疗虽然能够提高上肢运动功能，但对患者上肢的功能性活动及日常生活活动能力的提高有限，这提示未来康复机器人系统的开发应该重点考虑如何将肢体运动功能转化为日常的功能性活动，进而提高患者的生活质量<sup>[25]</sup>。

Bi-Manu-Track 上肢训练器是基于脑卒中后双侧训练理论开发的一个末端牵引式上肢康复

机器人系统，该系统使患肢可在健肢的辅助下实现前臂旋转及腕关节屈伸的康复训练，并根据临床实际情况灵活选择主动、被动、主动辅助等多种训练模式。一项临床随机对照研究使用 Bi-Manu-Track 上肢训练器进行辅助治疗，结果显示机器人辅助康复组在上肢运动功能和任务表现方面均优于常规治疗组<sup>[26]</sup>。另一项研究将 Bi-Manu-Track 和 InMotion 两种上肢康复机器人系统的疗效进行了对比，结果显示 InMotion 组的上肢 Fugl-Meyer 评分和近端改良 Ashworth 量表 (Modified Ashworth Scale, MAS) 优于 Bi-Manu-Track 组，提示 InMotion 可能在提升患者上肢运动表现方面更具有优势<sup>[27]</sup>。

由于手功能的精细性和复杂性，手功能康复机器人的研发是一个巨大的挑战。Amadeo 是目前市场上为数不多的末端牵引式手功能康复机器人，其由前臂槽和手指末端效应器组成，末端效应器使每个手指都可进行单独的屈伸运动。目前已有研究初步表明，Amadeo 手功能康复机器人在辅助临床脑卒中患者的手功能康复方面有一定的潜力<sup>[28]</sup>，未来需要更多的研究关注手功能康复机器人系统。

### 2.1.2 外骨骼式

Armeo Power 是目前世界上最先进的外骨骼式上肢康复机器人系统，其外骨骼机械臂可以根据患者的肩高和肢体长度进行调整，以全面包裹患者肢体。Armeo Power 拥有 7 个驱动轴，可以提供上肢大范围的三维平面运动，包括肩关节、腕关节各个方向的运动，以及肘关节、手掌的屈伸。在临床治疗过程中，治疗师可以根据患者的康复需求设定任意的个性化训练动作，患者在虚拟现实环境中完成各项模拟日常生活的游戏或活动，如球类游戏、迷宫游戏及各类厨房活动等。《柳叶刀》中一项利用 Armeo Power 外骨骼式上肢康复机器人系统进行的任务

导向性训练研究表明<sup>[29]</sup>，在 Armeo Power 辅助下进行的任务导向型训练是安全、可靠的，可以显著增强中风 6 个月以上中度至重度患者瘫痪上肢的运动功能。

## 2.2 下肢康复机器人系统

### 2.2.1 末端牵引式

G-EO 下肢康复机器人系统主要包括一个体重支撑系统，以及两个可以感知患者主观用力大小并沿着预定训练模式移动的踏板，目前其具备原地行走、平地行走、后退行走及上下楼梯等多种步行训练模式。一项针对 G-EO 的多中心回顾性研究表明<sup>[30]</sup>，接受 G-EO 辅助步行训练的患者在整体运动性能、步行耐力、平衡和协调能力、下肢肌肉力量甚至发生痉挛等方面均有显著改善。

线驱式骨盆辅助系统 (Tethered Pelvic Assist Device, TPAD) 是一项基于跑步机的下肢运动康复机器人系统，此下肢康复机器人系统由哥伦比亚大学人员开发，目前尚未上市。在步行周期的迈步相，TPAD 在骨盆处提供引导力，促进负荷或重量转移到瘫痪下肢。与其他基于跑步机的机器人系统不同，TPAD 是在步行的站立阶段于骨盆水平给予的一种水平引导力，患者的四肢保持自由状态，TPAD 不提供固定的、预设的下肢运动轨迹。在训练过程中，患者必须根据骨盆上力的大小和方向，主动控制和调整自己的姿势和步态，这种设计迫使患者自行解决自身步行过程中的运动问题。Bishop L 等人<sup>[31]</sup>将 TPAD 系统和视觉反馈联合用于脑卒中患者的步态训练，初步结果显示其能有效改善患者步行时的姿势对称性。

### 2.2.2 外骨骼式

Lokomat 下肢康复机器人系统由跑步机、动态体重支持系统、可调式机器人步态矫形器及

视觉反馈系统构成，主要用于下肢运动障碍患者的步行训练。跑步机可在安全、狭小的空间中模拟正常步行环境；动态体重支持系统让患者随着步行周期上下浮动，使步态更自然；可调式机器人步态矫形器有两个驱动器，用于驱动患者髋关节和膝关节进行步态训练，左右两条腿共4个自由度，踝关节则通过被动抬脚器实现辅助运动；视觉反馈系统可以使患者实时关注、调整自己的步行状态，增强患者康复训练的积极性和有效性。

考克兰图书馆的一项综述表明<sup>[32]</sup>，中风后接受康复机器人系统辅助步态训练结合物理治疗的患者比不接受这些设备辅助步态训练的患者更有可能实现独立行走。Baronchelli F 等人<sup>[33]</sup>进行的一项 Meta 分析也表明，用 Lokomat 下肢康复机器人进行辅助步行训练可以有效提升患者的平衡功能，甚至能起到和传统物理治疗相当的效果。但另一项多中心随机对照研究表明，单独使用 Lokomat 进行步行训练的效果不如常规步行训练<sup>[34]</sup>，常规步行训练的多样性使患者可以全方位恢复步行功能，而机器人步行训练系统目前尚不足以模拟自然环境状态下的步行。《新英格兰医学杂志》的一项研究<sup>[35]</sup>也提示，基于减重系统的跑步机步行训练效果不如康复治疗师提供的个性化步行训练。因此，想要最大程度恢复患者的步行功能，应该综合应用康复机器人系统在内的多个康复辅助技术。未来下肢康复机器人系统应结合步行训练的神经生理学基础，设计出更符合自然环境下步行状态的机器人系统，以适应患者的康复需求。

## 2.3 新型康复机器人系统

### 2.3.1 上肢可穿戴式康复机器人

MyoPro Motion-G 是一种非侵入性、轻量便携（约 2.3 kg）的可穿戴式上肢外骨骼康复设

备，可实时监测患者运动过程中肱二头肌、肱三头肌及前臂屈伸肌群的表面肌电信号，进而通过外骨骼驱动器辅助患者肘部的屈伸和手的抓放。Peters H T 等人<sup>[36]</sup>进行的一项研究表明，当穿戴 MyoPro Motion-G 进行作业活动时，患者手的灵活性和某些功能性任务的成绩显著提升，此外患者 Fugl-Meyer 评分的提升在统计学上远超过最小临床意义（Minimal Clinically Important Difference, MCID）。但由于 MyoPro Motion-G 需要由专门的康复工程师进行定制，其临床应用范围大大受限，因此如何将其设计成可根据个体差异进行调整的设备将是扩大其临床应用范围的关键所在。

### 2.3.2 下肢可穿戴式康复机器人

可穿戴式下肢康复机器人正在成为机器人步态康复的一项革命性技术，其具有多种应用潜力，包括早期步行康复、体育锻炼加强，以及在家庭和社区开展与步行相关的日常生活活动。此外，可穿戴式外骨骼设备还可以提高老年人等活动不便人群的独立行走能力，并可减少与久坐相关的继发性健康问题。目前，用于步态康复的可穿戴式下肢外骨骼设备仍处于开发的早期阶段，需要更多的随机对照试验来证明其临床疗效。

Ekso GT 是第 1 款经美国食品药品监督管理局（FDA）批准用于中风后康复的下肢可穿戴式外骨骼设备，这款设备包含一个为髋膝关节提供驱动力的可穿戴外骨骼组件以及一个包含电池和控制器的背包组件。目前使用 Ekso GT 进行的临床研究数量仍然有限，一项针对 23 例亚急性期和慢性期脑卒中患者进行的前瞻性前后对照研究表明<sup>[37]</sup>，Ekso GT 组患者治疗后的运动力指数、功能性步行量表、10 m 步行测试和 6 min 步行测试等步行功能相关指标均有显著改善。此外，还有研究表明利用 Ekso GT 进行步行训练可

以有效增强皮质脊髓兴奋性、感觉运动整合以及增强半球间和半球内神经连接<sup>[38]</sup>。Caliandro P 等人<sup>[39]</sup>利用功能性近红外光谱发现患者在 Ekso GT 步行训练期间前额叶皮层的代谢活动增强,提示患者在 Ekso GT 步行训练过程中注意力高度集中。以上结果均为 Ekso GT 在步行康复中的应用提供了生理学基础,但未来还需要大样本、设计良好的随机对照试验对下肢可穿戴式外骨骼机器人系统的临床疗效进行验证。

目前可穿戴式外骨骼机器人系统仍然是相对笨重的设备,通常需要临床工作人员额外监督,并配合其他辅助步行设备使用,这严重阻碍了可穿戴外骨骼设备在临床的推广应用。步态管理辅助系统(Stride Management Assist, SMA)是日本本田公司研发的一种轻量级外骨骼式下肢康复机器人,整个设备仅重 2.8 kg,其髋关节驱动器上配备的角度传感器可实时监测患者步行时双侧的髋关节运动范围,然后根据患者步行节律和双侧髋关节运动范围的对称性在步行过程中的特定情况下给予辅助力矩,以达到在自然状态下进行步行训练的效果。由于 SMA 下肢康复机器人只有髋关节的驱动力,无膝踝关节的支撑,因此其在临床中仅适用于一些下肢无严重痉挛,以及能独立站立且辅助步行一段距离的患者。Buesing C 和 Jayaraman A 等人<sup>[40-41]</sup>比较了 SMA 外骨骼机器人和传统的功能性步行训练的疗效,结果发现 SMA 组在步速、步长、步行耐力和空间对称性等步行变量及患肢股直肌的皮质脊髓兴奋性等方面有显著改善。

### 2.3.3 其他新型康复机器人

2.3.3.1 肌电和功能性电刺激联合的康复机器人系统:香港理工大学的团队研发了一种肌电信号联合外骨骼和功能性电刺激的综合性手功能康复机器人系统,该系统分为肌电采集分析、外骨骼驱动和功能性电刺激等 3 个模块<sup>[42]</sup>。临

床治疗过程中,当目标肌群的肌电信号强度达到预设阈值时,外骨骼联合功能性电刺激共同驱动肢体,并以与目标肌群肌电信号强度成正比的角速度驱动肢体运动。随后的临床研究表明,该综合性上肢康复机器人系统可以有效改善患手近、远端关节的自主运动和协调能力,其临床疗效可维持 3 个月以上<sup>[43]</sup>。此外,当该系统应用于整个上肢关节的康复治疗时,其能够有效地提升整个上肢的协调运动能力<sup>[44]</sup>。Huang Y H 等人<sup>[45]</sup>进行的一项随机对照试验表明,康复机器人联合功能性电刺激比单独的康复机器人在运动功能、协调性及痉挛缓解等方面均具有更好的临床疗效。

2.3.3.2 基于脑机接口的康复机器人系统:脑机接口式(Brain-Computer Interface, BCI)康复机器人系统是目前最前沿、最热门的康复机器人系统,主要基于脑卒中后的运动想象原理。BCI 式康复机器人系统通过脑-机接口获取、分析大脑的运动想象信号,并将其转化为控制命令,通过控制命令驱动康复机器人带动肢体运动。此外,大部分 BCI 式康复机器人系统还配有视觉反馈系统,将患者的运动想象重新建模并呈现在显示屏上,使患者的运动想象过程具象化,进而有效地提高了患者的中枢神经可塑性。Daly J J 等人<sup>[46]</sup>通过一项病例研究首次评估了 BCI 式康复机器人系统在脑卒中患者运动功能康复中的可行性。Frolov A A 等人<sup>[47]</sup>进行的一项多中心随机对照研究表明,脑电信号与外骨骼驱动未配对时的康复效果不如 BCI 驱动外骨骼设备的观察组,这提示 BCI 解码或许成为决定 BCI 式康复机器人疗效的关键因素。目前 BCI 式康复机器人的相关研究主要集中于脑卒中后运动功能中重度损伤的患者<sup>[48]</sup>,这是由于此类患者肢体随意运动较差,不适用强制疗法或重复性任务导向训练等传统康复治疗技术,而 BCI 式

康复机器人通过有效的运动想象直接激活中枢神经系统，同时辅以视觉和本体感觉反馈，不需要外周肌肉的主动收缩也可以达到中枢运动功能重塑的作用。

2.3.3.3 软体康复机器人系统：传统的外骨骼康复机器人由于其复杂的刚性系统，阻碍了人体关节的自然运动，降低了可穿戴性，从而导致其临床使用范围受限。康复机器人辅助训练对急性和亚急性期患者的临床疗效似乎好于慢性期<sup>[32]</sup>，但由于传统康复机器人系统体量大，故不易在病房中进行早期康复。近年来，随着纺织品、人造橡胶及人造肌腱等柔性材料的发展，具有安全、轻量、便携及不限制运动等优点的软体康复机器人也逐渐开始发展。软体康复机器人系统主要用于辅助手功能损伤较严重患者的日常生活活动，有大量研究<sup>[49-50]</sup>表明，患者穿戴软体康复机器人时比不穿戴时的功能活动表现有显著提升。此外，有研究将功能性电刺激和肌电图集成到软体康复机器人系统上，这种新型的软体康复机器人在经过专业人员指导后可以用于家庭自主康复，该研究招募了15例慢性脑卒中患者，经过该新型软体康复机器人系统辅助康复训练20次后，患者的上肢运动功能及痉挛程度均显著改善<sup>[51]</sup>。软体康复机器人系统使机器人康复技术用于家庭康复成为现实，也使机器人辅助技术更好地融入患者的日常生活，进一步提高患者的日常生活活动水平。

### 3 展望

未来的康复机器人系统必然会联合多种新型的康复辅助技术，最终实现综合康复。肌电驱动、脑电驱动、虚拟现实等一系列新型辅助技术的兴起使机器人康复逐步迈向疗效更佳的临床综合康复。与此同时，视觉、运动觉、听觉，甚至触觉刺激等多感官反馈使机器人康复形成

“中枢-外周-中枢”的闭环刺激，更加符合大脑的可塑性原理，功能性电刺激与康复机器人的完美融合也使外周辅助肢体运动的方式更加多元化。

此外，未来应该拓展目前临床中最常用的机器人康复训练模式，兼顾单侧和双侧训练模式，进而探索基于不同训练模式的康复机器人系统。双侧训练是基于大脑双侧半球协同运动控制的一种康复训练模式，目前临床上的康复机器人系统主要聚焦于单侧训练，但有研究表明，联合康复机器人等辅助设备的双侧训练同样能够有效促进脑卒中患者上肢运动功能的恢复<sup>[52]</sup>。Chen P M 等人<sup>[53]</sup>的研究也表明，在脑卒中患者上肢康复训练中，双侧训练模式具有较大的临床潜力，但目前的临床研究还不足以证明单侧训练和双侧训练孰优孰劣，因此未来应该着重研究不同训练模式的康复机器人系统的临床疗效。

在康复机器人系统的研发方面，未来应该注重研发的质量和效率。近年来，各康复机器人系统陆续进入市场，但一项研究表明<sup>[54]</sup>，纳入研究的30种上肢康复机器人系统中只有1/4通过了临床测试，多数设备被认为过于复杂且不适用于临床。许多康复机器人系统的研发主要受机器人技术发展的单向驱动，康复机器人研发团队与相关临床康复工作人员的沟通相对有限，因此康复机器人系统成功产业化并应用于临床康复的比例相对较低。未来康复机器人系统的研究应该着力于医工学科合作力度的加强，康复专家应该为机器人的研发提供核心的康复原理，而工学专家则应该基于康复原理设计出符合临床需要的康复机器人系统。最后，康复机器人系统可以精准量化康复治疗介入的强度和性质，并可以用患者运动的时间、次数、协调性和肌肉力量等客观指标衡量患者功能改

善的程度,通过此系统进行康复评估的意义重大。因此,未来康复机器人系统可以将评估和训练更好地整合起来,用康复评估指导康复训练,用康复训练量化康复评估,进而实现机器人辅助精准康复。

## 4 总结

康复机器人系统在当今智能医学大背景下迎来了快速发展,其能够很好地替代某些康复治疗过程中重复枯燥的体力劳动,使康复训练方案更加精准和丰富,同时可有效整合新兴的辅助技术用于临床康复。目前,已有大量循证医学证据表明机器人辅助康复治疗的可行性和有效性,这些临床证据为未来康复机器人系统的研发提供了重要的理论依据。

传统康复机器人系统的设计主要基于重复和自动化两个核心理念,根据不同的临床需求而诞生了外骨骼式、末端牵引式等康复机器人系统。随着中枢神经康复基础研究的进展,临床康复标准的提高以及康复机器人相关技术的不断进步,可穿戴式康复机器人、软体康复机器人以及整合肌电图和脑机接口等技术的新型康复机器人系统也迎来新的发展。未来康复机器人系统的研发必定是多学科交叉合作的过程,需要医学和工学共同确定康复机器人系统的运动模式、刺激强度和多感官输入类型,以提高机器人康复的质量和效率,最终研发出具有强大医学基础支撑,同时契合临床康复需求的康复机器人系统。

## 参考文献

- [1] Pignolo L. Robotics in neuro-rehabilitation[J]. *J Rehabil Med*, 2009, 41(12): 955–960.
- [2] Wagner T H, Lo A C, Peduzzi P, et al. An economic analysis of robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke[J]. *Stroke*, 2011, 42(9): 2630–2632.
- [3] Stefano M, Patrizia P, Mario A, et al. Robotic upper limb rehabilitation after acute stroke by nerebot: evaluation of treatment costs[J]. *Biomed Res Int*, 2014. DOI: 10.1155/2014/265634.
- [4] Winser S, Lee S H, Law H S, et al. Economic evaluations of physiotherapy interventions for neurological disorders: a systematic review[J]. *Disabil Rehabil*, 2020, 42(7): 892–901.
- [5] Lang C E, Macdonald J R, Reisman D S, et al. Observation of amounts of movement practice provided during stroke rehabilitation[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2009, 90(10): 1692–1698.
- [6] Mccabe J, Monkiewicz M, Holcomb J, et al. Comparison of robotics, functional electrical stimulation, and motor learning methods for treatment of persistent upper extremity dysfunction after stroke: a randomized controlled trial[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2015, 96(6): 981–990.
- [7] Ward N S, Brander F, Kelly K. Intensive upper limb neurorehabilitation in chronic stroke: outcomes from the Queen Square programme[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2019, 90(5): 498–506.
- [8] Cramer S C, Le V, Saver J L, et al. Intense arm rehabilitation therapy improves the modified rankin scale score: association between gains in impairment and function[J]. *Neurology*, 2021, 96(14): e1812–e1822.
- [9] Pollock A, Farmer S E, Brady M C, et al. Interventions for improving upper limb function after stroke[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2014, 2014(11): CD010820.
- [10] Liao C D, Tsao J Y, Huang S W, et al. Preoperative range of motion and applications of continuous passive motion predict outcomes after knee arthroplasty in patients with arthritis[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2019, 27(4): 1259–1269.
- [11] Büdingen T. Grundzüge der Ernährungsstörungen des Herzmuskels (Kardiodystrophien) und ihrer Behandlung mit Traubenzuckerinfusionen[J]. *DMW-Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 1919, 45(3): 64–67.
- [12] Vukobratovic M, Hristic D, Stojiljkovic Z. Development



- of active anthropomorphic exoskeletons[J]. *Med Biol Eng*, 1974, 12(1): 66–80.
- [13] Dijkers M P, deBear P C, Erlandson R P, et al. Patient and staff acceptance of robotic technology in occupational therapy: a pilot study[J]. *J Rehabil Res Dev*, 1991, 28(2): 33–44.
- [14] Hogan N, Krebs H I, Charnarong J, et al. Interactive robotic therapist: US5466213[P]. 1995–11–14.
- [15] Colombo G, Joerg M, Schreier R, et al. Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis[J]. *J Rehabil Res Dev*, 2000, 37(6): 693–700.
- [16] Hesse S, Uhlenbrock D. A mechanized gait trainer for restoration of gait[J]. *J Rehabil Res Dev*, 2000, 37(6): 701–708.
- [17] Aisen M L, Krebs H I, Hogan N, et al. The effect of robot-assisted therapy and rehabilitative training on motor recovery following stroke[J]. *Arch Neurol*, 1997, 54(4): 443–446.
- [18] Krebs H I, Hogan N, Aisen M L, et al. Robot-aided neurorehabilitation[J]. *IEEE Trans Rehabil Eng*, 1998, 6(1): 75–87.
- [19] Hesse S, Werner C, Bardeleben A, et al. Body weight-supported treadmill training after stroke[J]. *Curr Atheroscler Rep*, 2001, 3(4): 287–294.
- [20] Jezernik S, Colombo G, Keller T, et al. Robotic orthosis lokomat: a rehabilitation and research tool[J]. *Neuromodulation*, 2003, 6(2): 108–115.
- [21] Krebs H I, Ferraro M, Buerger S P, et al. Rehabilitation robotics: pilot trial of a spatial extension for MIT-Manus[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2004; 1(1): 5.
- [22] 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.
- [23] Mehrholz J, Pohl M, Platz T, et al. Electromechanical and robot-assisted arm training for improving activities of daily living, arm function, and arm muscle strength after stroke[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2015, 2015(11): CD006876.
- [24] Veerbeek J M, Langbroek-Amersfoort A C, van Wegen E E, et al. Effects of robot-assisted therapy for the upper limb after stroke[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2017, 31(2): 107–121.
- [25] 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.
- [26] Hsu H Y, Chiu H Y, Kuan T S, et al. Robotic-assisted therapy with bilateral practice improves task and motor performance in the upper extremities of chronic stroke patients: a randomised controlled trial[J]. *Aust Occup Ther J*, 2019, 66(5): 637–647.
- [27] Hung C S, Hsieh Y W, WU C Y, et al. Comparative assessment of two robot-assisted therapies for the upper extremity in people with chronic stroke[J]. *Am J Occup Ther*, 2019, 73(1): 7301205010p1–7301205010p9.
- [28] Orihuela-Espina F, Roldán G F, Sánchez-Villavicencio I, et al. Robot training for hand motor recovery in subacute stroke patients: a randomized controlled trial[J]. *J Hand Ther*, 2016, 29(1): 51–57.
- [29] 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[J]. *Lancet Neurol*, 2014, 13(2): 159–166.
- [30] Mazzoleni S, Focacci A, Franceschini M, et al. Robot-assisted end-effector-based gait training in chronic stroke patients: a multicentric uncontrolled observational retrospective clinical study[J]. *NeuroRehabilitation*, 2017, 40(4): 483–492.
- [31] Bishop L, Omofuma I, Stein J, et al. Treadmill-based locomotor training with robotic pelvic assist and visual feedback: a feasibility study[J]. *J Neurol Phys Ther*, 2020, 44(3): 205–213.
- [32] Mehrholz J, Thomas S, Kugler J, et al. Electromechanical-assisted training for walking after stroke[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2020, 10(10): CD006185.
- [33] Baronchelli F, Zucchella C, Serrao M, et al. The effect of robotic assisted gait training with lokomat<sup>®</sup> on balance control after stroke: systematic review and meta-analysis[J]. *Front Neurol*, 2021. DOI: 10.3389/fneur.2021.661815.
- [34] Hidler J, Nichols D, Pelliccio M, et al. Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2009, 23(1): 5–13.
- [35] Duncan P W, Sullivan K J, Behrman A L, et al. Body-

- weight-supported treadmill rehabilitation after stroke[J]. *N Engl J Med*, 2011, 364(21): 2026–2036.
- [36] Peters H T, Page S J, Persch A. Giving them a hand: wearing a myoelectric elbow-wrist-hand orthosis reduces upper extremity impairment in chronic stroke[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2017, 98(9): 1821–1827.
- [37] 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[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2017, 53(5): 676–684.
- [38] Calabrò R S, Naro A, Russo M, et al. Shaping neuroplasticity by using powered exoskeletons in patients with stroke: a randomized clinical trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2018, 15(1): 35.
- [39] Caliandro P, Molteni F, Simbolotti C, et al. Exoskeleton-assisted gait in chronic stroke: an EMG and functional near-infrared spectroscopy study of muscle activation patterns and prefrontal cortex activity[J]. *Clin Neurophysiol*, 2020, 131(8): 1775–1781.
- [40] Buesing C, Fisch G, O'donnell M, et al. Effects of a wearable exoskeleton stride management assist system (SMA<sup>®</sup>) on spatiotemporal gait characteristics in individuals after stroke: a randomized controlled trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2015. DOI: 10.1186/s12984-015-0062-0.
- [41] Jayaraman A, O'brien M K, Madhavan S, et al. Stride management assist exoskeleton vs functional gait training in stroke: a randomized trial[J]. *Neurology*, 2019, 92(3): e263–e273.
- [42] Rong W, Tong K Y, Hu X L, et al. Effects of electromyography-driven robot-aided hand training with neuromuscular electrical stimulation on hand control performance after chronic stroke[J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2015, 10(2): 149–159.
- [43] Nam C, Rong W, Li W, et al. The effects of upper-limb training assisted with an electromyography-driven neuromuscular electrical stimulation robotic hand on chronic stroke[J]. *Front Neurol*, 2017. DOI: 10.3389/fneur.2017.00679.
- [44] Rong W, Li W M, 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.
- [45] Huang Y H, Nam C Y, Li W M, et al. A comparison of the rehabilitation effectiveness of neuromuscular electrical stimulation robotic hand training and pure robotic hand training after stroke: a randomized controlled trial[J]. *Biomed Signal Process Control*, 2020. DOI: 10.1016/j.bspc.2019.101723.
- [46] Daly J J, Cheng R, Rogers J, et al. Feasibility of a new application of noninvasive Brain Computer Interface (BCI): a case study of training for recovery of volitional motor control after stroke[J]. *J Neurol Phys Ther*, 2009, 33(4): 203–211.
- [47] Frolov A A, Mokienko O, Lyukmanov R, et al. Post-stroke rehabilitation training with a motor-imagery-based brain-computer interface (BCI)-controlled hand exoskeleton: a randomized controlled multicenter trial[J]. *Front Neurosci*, 2017. DOI: 10.3389/fnins.2017.00400.
- [48] Baniqued P D E, Stanyer E C, Awais M, et al. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 15.
- [49] Correia C, Nuckols K, Wagner D, et al. Improving grasp function after spinal cord injury with a soft robotic glove[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28(6): 1407–1415.
- [50] Yurkewich A, Kozak I J, Hebert D, et al. Hand Extension Robot Orthosis (HERO) Grip Glove: enabling independence amongst persons with severe hand impairments after stroke[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020, 17(1): 33.
- [51] Nam C Y, Rong W, Li W M, et al. An exoneuromusculoskeleton for self-help upper limb rehabilitation after stroke[J]. *Soft Robot*, 2020, 9(1): 14–35.
- [52] Cauraugh J H, Kang N. Bimanual movements and chronic stroke rehabilitation: looking back and looking forward[J]. *Applied Sciences-basel*, 2021, 11(22): 10858.
- [53] Chen P M, Kwong P W H, Lai C K Y, et al. Comparison of bilateral and unilateral upper limb training in people with stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *PLoS One*, 2019, 14(5): e0216357.
- [54] Balasubramanian S, Klein J, Burdet E. Robot-assisted rehabilitation of hand function[J]. *Curr Opin Neurol*, 2010, 23(6): 661–670.