

# 下肢外骨骼康复机器人的研究与进展\*\*

王大千, 徐义明, 白跃宏

## Research and development of lower extremity rehabilitation exoskeletons

Wan Da-qian, Xu Yi-ming, Bai Yue-hong

### Abstract

**BACKGROUND:** How to improve the daily activity of patients with central nervous system injury caused by cerebrovascular diseases is the problem to be solved in rehabilitation medicine. The development of lower extremity rehabilitation exoskeletons may solve it.

**OBJECTIVE:** To review the research and development of lower extremity rehabilitation exoskeletons in order to design and develop them.

**METHODS:** An online search of literatures published between January 1990 to December 2008 of lower extremity rehabilitation exoskeletons was performed in PubMed database (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/PubMed>) and Wanfang database (<http://www.wanfangdata.com.cn>) with the key words of "exoskeletons robots, central nerve damage, passive rehabilitation training, the man-machine integration interaction interface" in English and in Chinese. The repetitive studies were excluded.

**RESULTS AND CONCLUSION:** Totally 26 articles were chosen to summarize. There are amount of studies on rehabilitation exoskeletons. However, if small volume, light, low power consumption, high power output can be solved in the rehabilitation exoskeletons, while they also have the abilities of fast response, low inertia, high precision and high security, the maximum response function of lower limb of nerve damage patients may be achieved.

Wan DQ, Xu YM, Bai YH. Research and development of lower extremity rehabilitation exoskeletons. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2011;15(52): 9855-9858. [<http://www.crter.cn> <http://en.zglckf.com>]

### 摘要

背景: 如何提高脑血管疾病所致中枢神经系统损伤患者的日常活动能力是康复医学亟待解决的问题, 而外骨骼康复机器人的发展为解决这一问题提供了可能。

目的: 回顾下肢外骨骼康复机器人的研究进展, 对下肢外骨骼康复机器人的设计与开发提出新的展望。

方法: 由第一作者检索 1990/2008 PubMed 数据库 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/PubMed>) 及万方数据库 (<http://www.wanfangdata.com.cn>) 有关医用下肢外骨骼康复机器人的文献, 英文检索词为 "exoskeletons robot, central nerve damage, passive rehabilitation training, the man-machine integration interaction interface", 中文检索词为 "外骨骼机器人, 中枢神经损伤, 主被动康复训练, 人机一体化交互接口"。排除重复性研究。

结果与结论: 共纳入 26 篇文献归纳总结。外骨骼康复机器人研究报道较多, 但如能解决体积小、轻便、低功耗、大功率输出等问题, 同时具有响应快、低惯性、高精度和高安全性等性能, 必将使神经损伤患者下肢功能最大化地恢复成为可能。

关键词: 外骨骼机器人; 中枢神经损伤; 主被动康复训练; 人机一体化交互接口; 表面肌电信号

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2011.52.038

王大千, 徐义明, 白跃宏. 下肢外骨骼康复机器人的研究与进展[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(52):9855-9858. [<http://www.crter.org> <http://cn.zglckf.com>]

## 0 引言

外骨骼是指为生物提供保护和支持的坚硬外部结构。外骨骼机器人是指具有可穿戴的坚硬的外部结构的机器人。外骨骼机器人最先起步于军事领域, 军人通过穿戴外骨骼机器人提高其军事作战能力, 穿戴者可携带更多的武器装备, 提高防护水平, 同时可克服任何障碍, 长时间高速前进, 不会产生疲劳感。随着科学技术的发展, 外骨骼机器人已逐步应用于康复医学领域。它是近年来发展起来的一种新的针对运动神经系统损伤的康复治疗技术<sup>[1]</sup>。患者通过穿戴外骨骼康复机器人, 不但可以进行有效的功能康复训练, 而且可以通过自身肌电信号

控制帮助患者早期下地行走, 达到促进中枢神经恢复、提高生活质量的目的。

外骨骼康复机器人作为国际机器人领域的一个研究热点, 其研制涵盖了康复医学、生物力学、机械学、电子学、材料学、计算机科学以及机器人学等诸多领域。近年来康复机器人的研究主要集中在康复机械手、医院机器人系统、智能轮椅、假肢和康复治疗机器人等几个方面<sup>[2]</sup>。而传统机械学、传感技术、生物医学、智能控制技术、计算机技术及新材料、新能源技术的发展明显促进了外骨骼康复机器人技术的高速发展<sup>[3]</sup>。

本文结合国内外文献对外骨骼康复机器人研制的关键技术和临床应用最新研究进展综述如下。

Department of Rehabilitation Medicine, the Sixth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200233, China

Wan Da-qian★, Studying for master's degree, the Sixth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200233, China  
wdqwdq1986@126.com

Supported by: Cross Foundation Major Project of Engineering and Medicine of Shanghai Jiao Tong University, No. YG2010ZD101\*

Received: 2011-05-23  
Accepted: 2011-07-18

上海交通大学附属第六人民医院康复医学科, 上海市 200233

王大千★, 男, 1986年生, 黑龙江省哈尔滨市人, 汉族, 上海交通大学医学院在读硕士, 主要从事神经系统损伤康复治疗的研究。  
wdqwdq1986@126.com

中图分类号: R318  
文献标识码: A  
文章编号: 1673-8225 (2011)52-09855-04

收稿日期: 2011-05-23  
修回日期: 2011-07-18  
(20110428010/G·L)

## 1 资料和方法

**1.1 资料来源** 由第一作者检索 1990/2008 PubMed 数据库(<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/PubMed>)及万方数据库(<http://www.wanfangdata.com.cn>)。英文检索词为“exoskeletons robot, central nerve damage, passive rehabilitation training, the man-machine integration interaction interface”, 中文检索词为“外骨骼机器人, 中枢神经损伤, 主被动康复训练, 人机一体化交互接口”。检索文献量总计 47 篇。

**1.2 纳入标准** ①文章所述内容为医用下肢外骨骼康复机器人。②同一领域选择近期发表或在权威杂志上发表的文章。

**1.3 排除标准** 重复性研究。

**1.4 数据的提取** 计算机初检得到 47 篇文献, 阅读标题和摘要进行初筛, 排除因研究目的与本文无关及内容重复的研究 21 篇, 共保留其中的 26 篇归纳总结。

**1.5 质量评估** 符合纳入标准的 26 篇文献中, 文献[1-13]探讨了外骨骼康复机器人研制的关键技术, 文献[14-21]探讨了平板减重训练对步态的影响, 文献[22-24]探讨了能源与动力技术及人工智能系统对机器人的影响, 文献[25-26]探讨了外骨骼康复机器人未来的发展趋势。

## 2 结果

### 2.1 外骨骼康复机器人研制关键技术

**2.1.1 人机一体化交互接口(表面肌电信号)** 人机一体化交互接口是指人与机械系统之间的信息交互方式, 机器人是典型的人-机交互系统。机器通过检测表面肌电信号(surface electromyogram, sEMG)来了解使用者的情况, 人也是根据机器人的运动情况对自己进行调整, 而机器是通过人机交互接口来了解人的情况, 从而确定机器的运动, 人也是通过人机交互接口来了解机器的运行情况。在正常生理状况下, 人体肌肉收缩是伴随着电位信号的产生, 肌肉信号产生 sEMG 来完成一个简单或复杂的动作<sup>[4]</sup>。而这简单或复杂运动又离不开控制系统, 有关机器人的控制和运动系统的研究进展国内外已有部分文献报道。如韩国 Sogang 大学的 Intelligent Walking Assistive Robot, 在控制方面, 他们采用类似于 sEMG 的肌纤维收缩信号, 利用绑在大腿和小腿上的气囊内气体的变化测得压力变化<sup>[5]</sup>。而在人体下肢自由摆动, 即肌纤维不收缩时, 则利用关节处的电位计式角度传感器的信号变化触发驱动器的动作。传感器信号的融合和处理是通过便携式计算机中的模糊控制来实现的。该机器人由两个部分组成: 外骨骼和手推车。所有

的驱动元件, 包括电池和马达, 以及控制器等较重的周边设备都布置在手推车中, 这样既减轻操作者的负担, 又保证了行走平衡。而哈尔滨工程大学研制的康复机器人<sup>[6]</sup>, 引入 sEMG 实现人机交互。根据患者意图实现康复训练动作, 由于脑卒中患者多为单侧受损, 其利用健侧 sEMG 驱动康复机器人辅助患者的患侧肢体进行康复训练。这有助于保持患者正确的运动感觉, 同时提供了一个较好的人机交互接口。但是 sEMG 信号容易被电磁噪声干扰, 而且为了精确测量, sEMG 需要用特殊的胶粘接在皮肤表面, 因而 sEMG 被认为不适合在人们的日常生活中作为操作外骨骼装置的接口<sup>[7]</sup>。

**2.1.2 平板减重与步态分析** 平板康复训练可以显著改善脊髓损伤和脑损伤造成的下肢长期瘫痪, 其功能性步行评定及站立平衡功能训练比传统康复治疗前后有显著的改善, 脑血管病脑卒中偏瘫患者早期在传统的康复治疗基础上应用减重步行训练, 能更大程度提高下肢运动功能、步行能力及日常生活能力<sup>[8]</sup>。瑞士的联邦技术大学、Hocoma AG 公司和德国神经康复训练中心分别开发了外骨骼系统 Locomat 和 Hapticwalker。这些系统结合活动平板训练模式, 改变传统卒中或者截瘫患者人工康复训练模式, 减轻了治疗师的工作强度, 保证了康复训练的质量, 提高了训练效果。Locomat 系统中还加入了人工智能系统, 不仅帮助患者进行标准步态康复训练, 还可以根据不同患者对标准步态抵触情况实时修正步态, 实现人机之间的协调康复训练。随着科学技术的进步, 平板减重训练完美应用于下肢外骨骼康复机器人对神经损伤患者的肌肉力量和运动协调性恢复训练有着极大地帮助。人类步态是一种典型的重复性功能运动, 减重平板训练为脊髓损伤患者或脑卒中患者的康复训练起到了很好的作用<sup>[9]</sup>。研究表明, 减重平板训练可以改善患者的下肢肌力及运动协调性<sup>[10-11]</sup>。尤其对于轻度偏瘫患者, 减重平板训练可以显著改善患者的平衡能力、步行速度、步长和双腿支撑站立时间, 促进下肢运动功能恢复<sup>[12]</sup>。

但是减重平板康复训练有一定的局限性; 首先需要至少 3 个康复师相互配合。其次训练时间较少, 达不到最佳治疗效果所必需的时间。第三, 传统减重活动平板训练步态模式不可重复并没有对患者进行直接反馈。而现在的康复机器人, 如瑞士 HOCOMA 医疗器械公司与瑞士苏黎士 Balgrist 医学院康复中心合作推出的 Lokomat 步态康复训练机器人可增加训练的可重复性。康复机器人可以延长训练时间, 减少人力成本, 一个治疗师可以同时操作几个机器。另外, 可以协助治疗师时刻掌握康复治疗情况、准确为患者功能训练提供相匹配的治疗<sup>[13]</sup>。

**2.1.3 能源与动力技术** 在各种类型的机器人研究中, 能源问题是必须面对的一个重要问题, 由于电池容量、

体积以及技术上的限制, 很难对下肢外骨骼提供持久的能源。例如日本研制的 P3 型机器人, 体质量 130 kg, 电池质量达 30 kg, 而其活动 25 min 后, 电量即被耗尽。为了提高下肢外骨骼机器人的待机时间, 各个国家都在努力研制用于下肢外骨骼机器人的有效能源与驱动技术。Kazerooni 等<sup>[14]</sup>尝试制造了一种气动控制装置, 用气动力来为外骨骼机器人提供能源, Goldfarb 等<sup>[15]</sup>设计的流体推进式能源推动器作为驱动能源。这两种能源都可以产生较大的驱动力, 满足作为下肢外骨骼康复机器人的能源需要。但是, 如何解决其体积过大, 驱动力大小不易掌控等问题, 还需要进一步研究。

## 2.2 临床应用研究

**2.2.1 国外研究现状** 日本处于领先地位, 日本筑波大学 Cybernics Lab 开发的 HAL-5(Hybrid Assistive Limb) 技术比较成熟, 已经开始应用于临床, 它可以协助步态紊乱的患者行走和增强人体负重行走能力。它采用角度传感器、肌电信号传感器和地面接触力传感器等设备来获得外骨骼和操作者的状态信息, 同时拥有混合控制系统, 包括控制身体姿态的自动控制器以及舒适助力控制器等, 保证了外骨骼关节运动与人体下肢肌肉运动的一致性。其设计符合人体工程动力学, 该产品的舒适度达到了较为理想的水平, 但其负重能力有限<sup>[16-18]</sup>, 美国加州大学伯克利分校机器人和人体工程实验室研制出美军“伯克利下肢外骨骼” BLEEX(Berkeley Lower Extremity Exoskeleton)其先进性在于可以明显减轻肌体负重<sup>[19-20]</sup>, 可以帮助患者在使用较小肌力的同时负担人体负重最大值数倍的质量。美国一家公司以 HULC 外骨骼模型为基础, 开发了 eLegs 外骨骼系统将于 2011 年应用于部分康复中心, 可能在 2013 年上市销售。

以上研究主要分为两个方向: 一个是利用电压或电流等电信号刺激神经肌肉, 使丧失神经控制的肌肉产生收缩, 达到康复治疗和功能重建的目的; 另一个是利用分离的肌群电信号(肌电信号)控制康复器械, 使其能够具有与肢体相同的对外界刺激的反应能力和对脑神经信号的识别和处理能力, 模拟肢体动作, 实现肢体的康复治疗。

**2.2.2 国内研究现状** 目前, 国内康复医疗设备自动化程度较高的设备大多数为进口, 随着国家“十二五规划”的实施及国家有关战略性新兴产业规划的制定, 康复设备的国产化已成必然趋势。通过外骨骼康复机器人基础性关键技术研究, 开发了基于 sEMG 和终板电位信号的适合下肢残疾或偏瘫患者使用的外骨骼康复机器人。以增强其活动能力, 满足不同路况下行走、跑步, 体位变换以及佩戴舒适、装卸方便的要求。

在国内, 针对外骨骼技术的研究虽然处于起步阶段, 但起点高, 发展比较迅速。哈尔滨工程大学开展了外骨骼式上肢康复机器人的研究, 浙江大学研究的助力

外骨骼腿<sup>[21]</sup>, 它利用液压驱动作为动力来源, 能够提供大能量以支持较大重物。中科院合肥智能机械研究所等相关科研机构, 正在开展外骨骼技术相关研究工作。上海交通大学机器人研究所和上海交通大学附属第六人民医院康复医学科正在合作开发研制下肢外骨骼康复机器人, 其产品已进入临床调试和试用阶段。他不仅具有坚强舒适的外骨骼固定、减重系统, 而且还具有利用健侧肌电信号带动患侧肢体运动、促进神经功能恢复的功能, 同时还可助力兼做主、被动肢体的康复训练及行走训练等功能。

## 2.3 发展展望

**2.3.1 新型材料应用于康复机器人** 外骨骼需要具有良好的可穿戴性, 因此外骨骼机器人的机械结构和自由度分布应与人体运动关节结构和自由度相匹配, 同时还可非常方便地根据不同穿戴者的体形和身材进行调节。碳纤维、稀土永磁等新型材料以其轻便, 且具有足够的强度和韧性, 同时不会影响穿戴者的健康等特点将逐渐被应用到康复机器人领域<sup>[22]</sup>。外骨骼机器人的驱动器应满足体积小、轻便、低功耗、大功率输出等要求, 同时具有响应快、低惯性、高精度和高安全性等性能。

**2.3.2 人机智能系统控制新技术应用于康复机器人** 要实现整个外骨骼系统的控制, 需要快速的信息传感技术以获取所需的控制信息, 并对多信息进行高效快速融合, 发出控制指令<sup>[23]</sup>。需要尖端的人机耦合接口技术, 实现操作者和外骨骼机械之间的数据和信息互动, 在感知层和执行层分别实现人和机器的统一。需要研究基于“人机一体化”思想的控制策略<sup>[24]</sup>, 研究人的智慧在整个控制系统中的作用, 充分考虑人在整个控制环中的影响, 建立全新的人机智能系统控制理论。建立人与外骨骼之间任务的合理分配规则研究, 根据人和外骨骼各自的优势, 进行任务分配。

**2.3.3 康复医学专家系统的建立与应用** 在外骨骼智能控制系统中, 应充分发挥康复医学专家的作用<sup>[25]</sup>。要使患者身体得到较快康复, 需不断学习和总结现有的康复知识, 并充分利用现有的临床及专家的经验, 通过对重复性功能运动对改善神经损伤患者的肌力和运动协调性、患者康复受益程度的临床研究, 结合计算机处理技术将康复理论与临床经验相结合, 归纳、整理形成康复医学专家系统知识库。对患者的康复效果进行实时定量评估, 在大量临床实践的基础上探索训练参数与康复治疗效果的关系, 为机器人辅助运动功能康复和建立有效的评估机制提供理论支持。

## 3 讨论

下肢外骨骼康复机器人对患者肢体运动功能的恢复和提高起到了非常重要的作用。康复机器人作为一种

自动化的设备,可以帮助患者进行科学而有效的康复训练,使患者的运动功能得到更大化的恢复<sup>[26]</sup>。随着机器人技术、机电工程、微能源技术、微驱动技术、材料技术和控制技术等学科的发展,外骨骼康复机器人研究关键技术必将实现突破,可使神经损伤患者下肢功能最大化地恢复成为可能。

#### 4 参考文献

- [1] Colombo R, Pisano F, Micera S, et al. Robotic techniques for upper limb evaluation and rehabilitation of stroke patients. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2005;13(3):311-324.
- [2] 谢欲晓,白伟,张羽.下肢康复训练机器人的研究现状与趋势[J].*中国医疗器械信息*,2010,16(2):5-8,56.
- [3] 丁敏,李建民,吴庆文,等.下肢步态康复机器人:研究进展及临床应用[J].*中国组织工程研究与临床康复*,2010,14(35):6604-6607.
- [4] Sabut SK, Lenka PK, Kumar R, et al. Effect of functional electrical stimulation on the effort and walking speed, surface electromyography activity, and metabolic responses in stroke subjects. *J Electromyogr Kinesiol*. 2010;20(6):1170-1177.
- [5] Kyoungheul K, Masayoshi T. Flexible Joint Actuator for Patient's Rehabilitation Device. 16th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication. Korea:Jeju, August 26-29, 2007:1179-1184.
- [6] 王东岩,李庆玲,杜志江,等.外骨骼式上肢康复机器人及其控制方法研究[J].*哈尔滨工程大学学报*,2007,28(9):1008-1013.
- [7] 赵彦峻,徐诚,张景柱,等.人体下肢外骨骼关键技术分析与研究[J].*机械设计*,2008,25(10):1-4.
- [8] 杜巨豹,宋为群,王茂斌.减重步行训练在卒中后偏瘫康复中的应用[J].*中国脑血管病杂志*,2006,3(8):361-364.
- [9] Laufer Y, Dickstein R, Chefez Y, et al. The effect of treadmill training on the ambulation of stroke survivors in the early stages of rehabilitation: A randomized study. *J Rehabil Res Dev*. 2001; 38(1):69-78.
- [10] Wirz M, Zemon DH, Rupp R, et al. Effectiveness of automated locomotor training in patients with chronic incomplete spinal cord injury: A multicenter trial. *Arch Phys Med Rehabil*. 2005;86(4): 672-680.
- [11] Mayr A, Luenenburger L, Quirinbach E, et al. First experiences with the Lokomat in patients with severe traumatic brain injury. *Brain Inj*. 2003;17(1):46-47.
- [12] Da Cunha IT Jr, Lim PA, Qureshy H, et al. Gait outcomes after acute stroke rehabilitation with supported treadmill ambulation training: A randomized controlled pilot study. *Arch Phys Med Rehabil*. 2002;83(9):1258-1265.
- [13] Laufer Y, Dickstein R, Chefez Y, et al. The effect of treadmill training on the ambulation of stroke survivors in the early stages of rehabilitation: A randomized study. *J Rehabil Res Dev*. 2001; 38(1):69-78.
- [14] Kazerooni H. Pneumatic force control for robotic systems. In: *IEEE International Conference on mechatronics*, Istanbul, Turkey, 2004:231-236.
- [15] Goldfarb M, Barth EJ, Gogola MA, et al. Design and energetic characterization of a liquid-propellant-powered actuator for self-powered robots. *Mechatronic*. 2003;8(2):79-87.
- [16] Kawamote H, Sankai Y. Power assist method based On phase sequence driven by interaction between human and robot suit. In: 13th IEEE international workshop on robot and human interactive communication. Kurashiki, Okaym, Japan, 2004:491-496.
- [17] Kawamote H, Sankai Y. Comfortable power assist control method for walking aid by HAL-3[C]. In: *Systems, Man and Cybernetics, IEEE international Conference*, 2002:6-9.
- [18] Kawamoto H, Kanbe S, Sankai Y. Power assist method for HAL-3 estimating operators intention based on motion information[C]. In: *Robot and Human Interactive Communication*, Millbrae. USA, 2003:67-72.
- [19] Dhu A, Kazerooni H, Zoss A. On the biomimetic design of the berkeley lower extremity exoskeleton. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona. Spain, 2005:4345-4352.
- [20] Kazerooni H. The human power amplifier technology at the university of california Berkeley. *Rob Auton Syst*. 1996;19:179-87.
- [21] Yand CJ, Niu B, Chen Y. Adaptive neuro-fuzzy control based development of a wearable exoskeleton leg for human walking power augmentation[C]. In: *proceedings of the 2005 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics Monterey, California. USA. 2005:2457-2463.*
- [22] Zhou F, Wu Z, Wang M, et al. Structure and mechanical properties of pincers of lobster (*Procambarus clarkii*) and crab (*Eriocheir Sinensis*). *J Mech Behav Biomed Mater*. 2010;3(6):454-463.
- [23] Yang Y, Wang R, Jia X, et al. Progress in the study on synergetic control principle of human upper extremity and related issues. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi*. 2003;20(4):738-741.
- [24] Markham HC, Brewer BR. Development of a skin for intuitive interaction with an assistive robot. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2009;59:69-72.
- [25] Suri P, Rainville J, Kalichman L, et al. Does this older adult with lower extremity pain have the clinical syndrome of lumbar spinal stenosis? *JAMA*. 2010; 304(23):2628-2636.
- [26] 张立勋,颜庆,杨勇,等.下肢康复训练机器人AVR单片机控制系统[J].*机械与电子*,2004,22(10):52-55.

**基金资助:** 上海交通大学医(理)工交叉重大课题基金资助项目(YG2010ZD101)。

**关于作者:** 万大千和白跃宏构思并设计本综述,分析并解析数据,所有作者共同起草,经白跃宏审核,万大千对本文负责。

**利益冲突:** 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

**伦理批准:** 无涉及伦理冲突的内容。

**此问题的已知信息:** 探讨了人机一体化交互接口应用于康复机器人,以及平板减重技术与步态分析在康复过程中的应用。

**本综述增加的新信息:** 建立新型材料、人机智能系统控制新技术及康复医学专家系统应用于下肢外骨骼康复机器人。

**临床应用的意义:** 下肢外骨骼康复机器人对患者肢体运动功能的回复和提高起到了非常重要的作用。康复机器人作为一种自动化的设备,可以帮助患者进行科学而有效的康复训练,使患者的运动功能得到更大化的恢复,是临床上有效的康复手段。