

· 康复工程与转化医学 ·

下肢外骨骼机器人辅助步行训练系统的研发及临床康复应用进展

吴涛 顾捷 李建华 邹政华

近 20 年来,康复机器人的研发和应用取得了突飞猛进的成就,机器人辅助技术作为医疗机器人的重要分支,已经成为国际机器人领域的研究热点。而将先进的机器人技术引入的康复机器人,可更充分地体现康复医学与机器人技术的完美结合^[1]。

目前,应用于步行功能训练的下肢外骨骼机器人可分为 2 类:一类主要用于提高下肢关键肌肌力和关节活动度等基础训练,如髌、膝、踝局部屈伸等力量训练;另一类主要被运用于患者行走的整体训练,以提高其步行时身体的稳定性和协调性^[2]。下肢外骨骼机器人越来越多地应用于辅助步行功能训练,患者通过穿戴下肢外骨骼康复机器人,可进行有效的步态训练,以达到促进神经系统功能恢复、提高步行和日常生活活动能力的目的。下肢外骨骼康复机器人辅助步行训练可以改善患者的步态是基于中枢模式发生器(central pattern generator,CPG)学说、神经系统可塑性与功能重组理论、“动力系统”学说及强制性主动使用等理论^[3]。目前,国内外市场上已有很多类型的外骨骼驱动下肢康复机器人被广泛应用于脑卒中、脊髓损伤等中枢神经系统损害的患者。本文就下肢外骨骼康复机器人的研发、结构特点以及临床康复应用综述如下。

下肢外骨骼康复机器人研发

一、下肢外骨骼康复机器人的研发背景

上世纪 90 年代初以来,国内、外许多机构相继利用机器人辅助技术对中枢神经损害患者进行了减重步行训练。减重步行辅助康复训练机器人一般是利用仿生外骨骼机械腿来带动患者下肢进行运动训练。瑞士 Hocoma 医疗器械公司最先推出此类产品,如 Lokomat 下肢康复机器人^[4],该机器人可辅助下肢运动功能障碍患者在活动平板上进行步行训练。国际上类似的产品还有 Altacro, Reo, Lokohelp 等下肢康复机器人^[5-6],该类机器人可通过机械手、外骨骼或者椭圆机结构踏板方式与患者大腿、小腿相连,使之协调摆动从而完成整个或部分的步态轨迹训练^[7]。

Krebs 教授^[8]2012 年提出机器人疗法 RT(robotic therapy)的概念,即康复机器人在辅助患者进行高强度重复性训练的同时还可提供反馈互动的虚拟治疗,引导患者完成特定的任务。

二、国产下肢外骨骼机器人所应遵循的研发思路

根据目前机器人的临床需求和现状,我们考虑并总结了其难以普及的核心问题:①价格昂贵,进口的机器人价格高配在 400 万左右,普通医院难以承受;②转移患者困难,需要数十分钟的转移时间,大大影响了治疗师的积极性;③软件全英文,维护成本过高,不能够进行急性期的步行训练等问题;④人机交互

性不够,患者的反馈少,虚拟现实画面粗糙甚至没有。针对上述问题,我们认为,下肢康复机器人研发的必要元素包括下列 6 项。

1. 设备的独立控制能力:机器人在辅助患者模拟正常人步行时的,应尽量接近正常步行轨迹和本体感觉,这需要至少髌膝踝关节的独立控制而不是简单的单关节被动运动。

2. 智能的反馈和友好的界面:机器人训练不应是枯燥的被动训练,而应采用虚拟现实技术达到人机交互的目的,通过与患者不断的沟通,实时显示患者所有步态参数和电生理参数,同时还可通过虚拟环境,让患者身临其境,促进其认知和本体感觉训练。

3. 设备的安全性:国家药监局已经明文将机器人纳入二类医疗器械进行管理,要求在系统的设计上应更加人性化,包括必要的软件限位、电气限位、机械限位装置、报警设备、安全开关、紧急停开等。

4. 设备的可靠性:目前,常规人工康复训练很难长时间地保证训练的质量和强度其被下肢外骨骼康复机器人所取代的主要因素。因此,确保下肢康复训练外骨骼可长时间安全稳定地运行是其控制系统设计的基本原则。这在系统驱动器、控制器的选择以及人机之间信息交互网络构建、控制软件的结构体系等方面必须加以考虑。国产的产品研发,更应采用国际化高可靠性的工艺流程和材料。

5. 设备的可扩展性、可升级性:随着医疗检测设备技术的不断发展,对于脑卒中和偏瘫患者康复训练的监护手段也越来越丰富。因此,无论在硬件平台的搭建还是软件构架的设计均应充分考虑控制系统将来的可扩展性。

6. 需要研发创新且没有专利风险的产品:国内研发的机器人,应该从技术上不能和国外产品有专利侵权。国内机器人技术发展很快,康复更是新兴的领域,不必完全抄袭国外的机器人。一味的相互抄袭也会损害康复器械的发展。

三、国产下肢外骨骼机器人的结构特点

经过研发、临床试用和不断改进,2013 年推出了中国第一款成熟且批量生产的下肢步态训练机器人(上海产)^[9-10]。

相较 2010 生产的原型机,图 1 中的下肢步态训练机器人在外观工艺上进行了大幅度的改进,零件也可进行标准化的批量生产;特别是在软件上,可为康复训练提供多种处方,并重新设计了患者的转移方式,增加了虚拟现实软件的沉浸性和交互性,利用传感器技术可谓患者提供各种有效的康复评价手段,其中包括患者的运动角度、步幅、步频、主动参与程度等^[9-10]。这款下肢步态训练机器人还可提供痉挛灵敏度检测和患者主动用力的力矩检测,在患者发生痉挛时能自动停止运动,在患者主动用力的时候可改变步长、步幅等步态参数,这些都是目前同类产品不具备的技术优势。另外,这款下肢步态训练机器人还可对急性期患者进行卧床步行固化训练。目前,国内已有许多临床研究对该设备的积累了不少经验^[9-12]。

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2014.012.019

作者单位:310016 杭州,浙江大学医学院附属邵逸夫医院康复医学科(吴涛、李建华);上海璟和技创机器人有限公司(顾捷、邹政华)

通信作者:李建华,Email:zjdxsyfkk@126.com

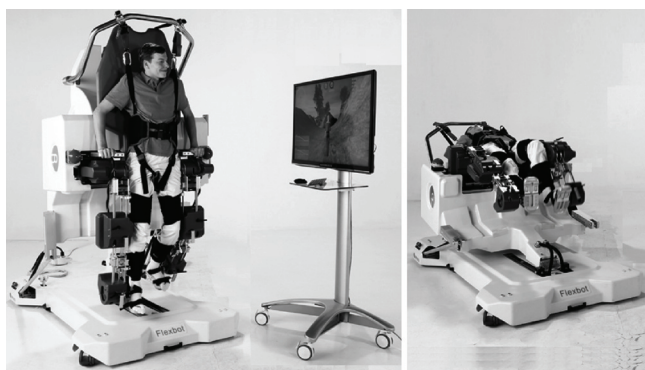


图1 下肢步态训练机器人

下肢外骨骼康复机器人的临床康复应用

目前,对于下肢机器人在脑卒中患者中的康复疗效仍存在争议,而国际上应用最广泛的下肢康复机器人是 Lokomat (Hocoma公司,瑞士)和 Autoambulator (Healthsouth/Motorika 公司,以色列)^[9]。Husemann^[13]等的研究发现,下肢康复机器人可改善患者的步态及体质;Westlake 等^[14]的也指出,机器人辅助步行训练可显著改善脑卒中患者的步速及患侧下肢支撑能力。上述 2 个研究均采用 4 周的训练时间,前者纳入了 30 例患者,而后者只包含了 16 例患者。Hidler 等^[15]的研究选取了 63 例病程≤6 个月的脑卒中患者,将其分为传统治疗组和 Lokomat 辅助训练组,分别于训练 12 次、24 次后以及训练结束后 3 个月进行随访,结果发现,传统治疗组患者的步速及步行距离均优于 Lokomat 辅助训练组。类似的报道也见于 Hornby 等^[16]的研究。之所以产生迥异的结论可能是由于训练方案或干预时间不同。如,Hornby 等的研究选取的脑卒中患者病程均>6 个月,且步行能力受损相对较轻(能以较慢的速度且无他人辅助下独自步行 10 m),即患者肢体功能尚可,发病时间较长,故此类患者通过机器人辅助步行训练获益就不如早期肢体功能较差的患者。

目前,国内有关下肢机器人在脑卒中患者的康复训练效果的报道比较一致。王伟等^[12]采用下肢康复机器人(德国 Lokohelp 系统)结合运动疗法对脑卒中患者下肢痉挛进行治疗,每次训练 30 min,每日 1 次,治疗前及治疗 4 周后分别进行 1 次评定,研究结果显示,下肢康复机器人结合运动疗法对脑卒中患者下肢肌痉挛有显著的改善作用,可提高患者下肢运动功能及生活自理能力。顾旭东等^[9-11]的课题组进行了一系列的研究,该研究随机选取了脑卒中患者 42 例,采用 Flexbot 2013 型(上海产)下肢机器人辅助步行训练 8 周后,患者的步速、步长及患侧肢体支撑能力较治疗前均显著改善,且疗效优于传统的康复治疗。

无论是脑卒中还是脊髓损伤患者,应用外骨骼助行腿进行步行训练的主要目的使患者以正常的步态进行训练,因此如何规划合理的步态训练就显得尤为重要。由于脑卒中和不完全性脊髓损伤患者下肢功能恢复的特殊性,一般需要两套步态训练方案,即早期的被动步态训练方案和恢复期的协同控制步态训练方案。对于病程早期患者,由于其肢体功能较差,需要进行被动的、预定的轨迹步行,适合采用位置控制方法^[17];随着下肢功能的恢复,会出现人机抵抗的不协调,这时就需要通过反馈模式

实时调整驱动力量,协同控制步态^[18]。步行训练中的主动性和互动性对于神经的可塑性和运动的控制非常重要,固定的被动步行模式不仅会使患者形成依赖,减少肌肉的活动性和新陈代谢,而且会限制下肢运动功能的进一步恢复。当患者能够更自由地驱动下肢时,需要在步行中实时捕捉其反肌肉活性的变化,通过持续传入的反馈来调整输出,实现按需辅助。这对重建大脑和脊髓的神经网络产生最理想的治疗效果具有积极的意义。

本课题组认为,对于下肢外骨骼康复机器人后期的应用和研发方向主要包括:①对于急性期卧床患者,方便迅速的转移仍然是一个长期需要研发的内容,以节省治疗师的操作时间,后续目标希望能控制在<3 min;②增加更多主动反馈控制和更多的评估数据,如髋关节的外展内收、踝关节的更多自由度控制、各种表面肌电、皮温血氧信号的集成等;③更大程度地调动患者的主动参与性,这需要加强虚拟现实场景,以增强患者对训练的兴趣。

结语

综上所述,下肢机器人辅助步行训练可通过不断地反复地循环模拟正常的步行生理周期和强化外周深浅感觉刺激输入来促进上运动神经元损害患者步行功能恢复。目前,用于步行功能训练的下肢外骨骼机器人在恢复下肢步行功能方面已显示出极大潜力,但依然存在一定缺陷和不足,譬如设备造价昂贵、训练中如何实现人机交互、实时反馈下进行步态康复训练等。

参考文献

- [1] Robinson CJ, Purucker MC, Faulkner LW. Design, control, and characterization of a Sliding Linear Investigative Platform for Analyzing Lower [J]. IEEE Trans Rehabil Eng, 1998, 6(3): 334-350.
- [2] 王一吉, 李建军. 下肢外骨骼机器人在重建不完全性脊髓损伤患者步行功能中的应用和研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2012, 18(1): 41-43.
- [3] Field-Fote EC. Combined use of body weight support, functional electric stimulation, and treadmill training to improve walking ability in individuals with chronic incomplete spinal cord injury[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2001, 82(6): 818-824.
- [4] Hidler JM, Wall AE. Alterations in muscle activation patterns during robotic-assisted walking[J]. Clin Biomech, 2005, 22(2): 184-193.
- [5] Hesse S. Locomotor therapy in neurorehabilitation [J]. NeuroRehabilitation, 2001, 16(1): 133-139.
- [6] Hesse S, Uhlenbrock D. A mechanized gait trainer for restoration of gait[J]. J Rehabil Res Dev, 2000, 37(6): 701-708.
- [7] Mantone J. Getting a leg up? Rehab patients get an assist from devices such as HealthSouth's AutoAmbulator, but the robots' clinical benefits are still in doubt[J]. Mod Healthc, 2006, 36(7): 58-60.
- [8] Krebs HI, Hogan N. Robotic therapy: the tipping point[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2012, 91(Suppl): S290-297.
- [9] 顾旭东, 吴华, 李建华. 下肢康复机器人系统结合减重平板训练对脑卒中偏瘫患者步行能力的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2011, 33(6): 447-450.
- [10] 李岩, 吴华, 姚云海. 下肢康复机器人系统和减重平板训练对脑卒中偏瘫患者步行能力及步态的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2012, 34(11): 810-813.
- [11] 李辉, 傅建明, 顾旭东. 下肢康复机器人训练联合心理干预对脑卒

- 中后抑郁及肢体功能恢复的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2013, 35(8):630-633.
- [12] 王伟, 李岩, 吴华. 下肢康复机器人训练对急性脑卒中患者下肢运动功能的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2013, 35(6):464-467.
- [13] 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):349-54.
- [14] Westlake KP, Patten C. Pilot study of Lokomat versus manual-assisted treadmill training for locomotor recovery post-stroke[J]. J Neuroeng Rehabil, 2009, 18(6):1-11.
- [15] 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.
- [16] Hornby TG, Campbell DD, Kahn JH, et al. Enhanced gait-related improvements after therapist- versus robotic-assisted locomotor training in subjects with chronic stroke: a randomized controlled study [J]. Stroke, 2008, 39(8):143-148.
- [17] Duschau-Wicke A, von Zitzewitz J, Caprez A, et al. Path control: a method for patient-cooperative robot-aided gait rehabilitation [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2010, 18(1):38-48.
- [18] Vallery H, van Asseldonk EH, Buss M, et al. Reference trajectory generation for rehabilitation robots: complementary limb motion estimation[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2009, 17(1):23-30.
- (修回日期:2014-11-09)
(本文编辑:阮仕衡)

· 外刊摘英 ·

Exercise to reduce surgery in subacromial pain

BACKGROUND AND OBJECTIVE While subacromial pain is common, there is no consensus concerning the ideal program for treating its symptoms. This study examined whether a specific exercise program can reduce surgical intervention for patients with rotator cuff tears.

METHODS Ninety-seven patients with clinical signs of subacromial pain, but not of major rotator cuff tear, were studied. All were on a waiting list for arthroscopic subacromial decompression surgery, and all had complained of lateral shoulder pain of at least six months' duration. At inclusion, all patients received a subacromial corticosteroid injection. The subjects were then randomized to one of two exercise programs. The treatment program performed eccentric exercises for the rotator cuff, along with a combination of concentric and eccentric exercises for the scapular stabilizers. The control program included six active movements for the neck and shoulder without any load or progression. The primary outcome measures were the Constant Murley (C-M) score and the decision to accept surgical intervention after treatment completion. Secondary outcomes included the Disability of the Arm, Shoulder and Hand Questionnaire, a visual analogue scale for pain and health related quality of life, assessed with the EuroQual instrument.

RESULTS Ninety-five patients were assessed at one-year follow-up. C-M scores revealed significant improvement between three months and one year. Similar findings were noted for all secondary outcomes. Significantly more patients in the control group than in the exercise group decided to undergo surgery following treatment completion (63% versus 24%).

CONCLUSION This study of patients scheduled for arthroscopic subacromial decompressive surgery found that an exercise program consisting of concentric and eccentric exercises with progressive loads can significantly reduce the incidence of surgery.

【摘自:Hallgren, H., et al. A specific exercise strategy reduced the need for surgery in subacromial pain patients. Br J Sports Med, 2014, 48(19):1431-1436.】

Carbohydrate gel before prolonged exercise

BACKGROUND AND OBJECTIVE Previous studies concerning carbohydrate ingestion prior to exercise have produced inconsistent results. This study compared the effects of carbohydrate gel ingestion at varying times before the onset of exercise.

METHODS Four trials, involving seven male triathletes, were conducted in random order, separated by seven days. These trials involved placebo ingestion immediately before exercise, carbohydrate ingestion immediately before exercise (C0), carbohydrate ingestion 45 minutes before exercise (C45) or carbohydrate ingestion 120 minutes before exercise (C120). The carbohydrate gel included maltodextrin 45 g, with a total caloric value of 180 kcal. The exercise protocol comprised 20 successive sets of four-minute bouts of exercise at up to 80% of VO2 max. Venous blood samples were collected every four minutes throughout the exercise.

RESULTS Blood glucose concentrations were higher in the C0 trial from 8-80 minutes than in the other trials ($P < 0.05$). The average rating of perceived exertion over 0 to 40 minutes were similar between the trials. However over 40 to 80 minutes of exercise the rate of perceived exertion was significantly lower in the C0 and the C120 trials than in the placebo trial.

CONCLUSION This study found that carbohydrate ingestion immediately before exercise results in higher glucose concentrations and lower perceived exertion over the final 40 minutes of exercise.

【摘自:Kohara, A. Carbohydrate gel ingestion immediately before prolonged exercise causes sustained higher glucose concentrations and lower fatigue. Inter J Sport Health Sci, 2014; 12: 24-30.】