

综述

下肢康复机器人及其在脊髓损伤康复中应用的研究进展

Research of lower limb rehabilitation robot
and its application in spinal cord injury

潘 钰, 郝淑燕

(北京康复中心康复部 100144 北京市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2013.11.10

中图分类号: R496 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2013)-11-1010-05

步行障碍是脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)及其他神经系统损伤性疾患的主要表现, 步行能力的丧失严重影响患者的日常生活活动能力, 使患者的社会、职业、休闲娱乐活动参与能力不同程度下降。因此, 提高肌肉骨骼系统的运动控制、恢复步行功能是 SCI 康复的重要研究内容之一^[1]。近年来, 随着医学科技的发展, 下肢康复机器人逐渐应用于神经损伤如脑卒中、SCI 的康复治疗中, 笔者对下肢康复机器人及其在 SCI 康复中的应用现状和进展综述如下。

1 下肢康复机器人的分类

目前常用的下肢康复机器人按驱动方式可分为腿部驱动和足底驱动两种^[2]。腿部驱动机器人分为外骨骼式, 这种机器人的主要特点是具有类似人腿的仿生外骨骼结构, 使用时, 外骨骼机械腿穿戴在人体下肢上, 根据下肢关节在步态周期中的运动轨迹模拟正常步态, 机械腿的大、小腿分别带动患者大、小腿协调摆动, 完成步行动作。Lokomat 步态康复训练机器人是外骨骼式机器人的典型代表, 在临床应用较为广泛。Lokomat 于 1999 年研制成功, 由瑞士 HOCOMA 医疗器械公司与瑞士苏黎世 Balgrist 医学院康复中心合作推出, 是第一套能够辅助下肢运动障碍患者在医用跑台上自动进行减重步行训练的机器人, 主要由步态矫正器、体重支持系统和跑台组成。髋关节和膝关节受一个完整的外骨骼式结构驱动, 患者的髋关节和膝关节都受系统软件控制, 确保以预设的生理步态曲线进行训练。其驱动模式为电机驱动, 每条腿安装有两台电机, 分别驱动一套丝杠螺母机构, 通过丝杠转动推动机械腿摆动以完成步行。同时, 安装在机械腿关节处的传感器将机械腿关节的角度和驱动力等信息反馈给计算机控制软件以设置个体化步态模式和训练方案; 能够通过虚拟现实技术为患者提供反馈以提高患者参与训练的主动性。其缺点是减重系

统需通过胸部吊带固定到患者躯干, 机械腿在两侧及后面固定患者的髋部, 使髋部的自由度限定在垂直面, 从而限制了患者骨盆和髋部的转动、双下肢的自由度、重心转移及躯干的运动, 同时也减少了步行时保持姿势稳定及平衡所必需的某些自主肌肉活动需要^[3]。

足底驱动步态康复训练机器人通过驱动患者足部模拟步行过程中踝关节的运动轨迹来进行步态训练, 如 Haptic Walker, 通常与减重步行训练相结合。其主要结构是一对可按照一定轨迹运动的活动踏板。训练时, 患者站立在踏板上, 在它的带动下完成行走动作。此种机器人具有一套由电机、行星齿轮、曲柄机构和踏板组成的驱动系统, 能够产生一定规律的椭圆轨迹, 用以近似模拟步行时踝关节的运动轨迹。该系统可以根据患者需要提供主动、被动、阻尼等多种训练模式, 但无法模拟步行周期中的足底压力及髌膝关节的运动轨迹。2006 年美国 WOODWAY 公司推出了由 WOODWAY 医用电动跑台直接驱动的 LokoHelp 辅助步行训练装置。LokoHelp 安装有一个摩擦轮, 与跑台滑带接触从而获得动力, 无需驱动系统, 有效解决了训练步速与跑台滑带速度协调的问题, 成本也较其他下肢机器人低廉。但这种运动平板驱动的辅助步行训练装置的步态轨迹不能因人而异进行调整。

2 下肢康复机器人在步行训练中的作用

针对神经损伤后遗留的运动和步行障碍, 步行训练是一种重要的康复方法。有研究^[4]发现, 步行训练有效与否的关键在于是否能够重复性地模拟地面自然行走步态以及能否在训练过程中保持正确的本体感觉和外部感觉反馈。步行训练的方式多样, 如人工辅助地面行走训练、人工辅助运动平板训练及减重平板训练 (body weight supported treadmill training, BWSTT)、机器人辅助步行训练等。基于脑的可塑性原理, 医学上通常是通过进行重复的、特定任务的训练让患者进行足够的重复性活动从而使重组中的大脑皮质通过深刻的体验来学习和储存正确的运动模式。基于这种方法已取得良好的临床效果, 在过去 20 年里, BWSTT 已被引入神经康复治疗中。BWSTT 能使复杂的

第一作者简介: 女(1973-), 副主任医师, 康复医学博士, 研究方向: 脊髓损伤康复

电话: (010)58823335 E-mail: py10335@163.com

步态周期得以重复,可以明显提高神经康复患者的步行能力^[5,6]。BWSTT 在模拟行走训练时,使用减重吊带减少患者步行时下肢负重,借助于运动平板进行步行能力训练,治疗师给予人工辅助以稳定躯干,同时辅助双下肢保持接近正常步态的行走方式。这种方法尽管有效,但治疗时需要 2~3 个治疗师辅助,耗时耗力,无法保证重复的感觉输入的一致性,而且由于训练效果的神经生理机制并不明确,因此无法准确掌握训练参数以使训练效果最优化。为解决这些康复训练过程中出现的问题,需要安全、定量、有效及可重复训练的新技术,以提高康复效果,同时把治疗师从繁重的体力劳动中解放出来^[7,8]。

随着科技的发展,下肢康复机器人开始应用于神经康复中。研究认为下肢康复机器人可以改善中枢神经损伤患者的步行能力^[9,10],但与传统的人工辅助方法相比并无明显差异^[11],甚至有研究观察到其作用要差于传统的人工辅助 BWSTT^[3,12]。尽管尚无大样本随机对照研究证明机器人辅助减重运动平板训练优越于 BWSTT 及其他训练方法,但其在康复领域的应用有其明显的优势,包括:①在精确控制的环境下为患者提供安全、重复性的、高强度、较长时间的训练;②允许患者在病情稳定后尽早开始训练;③能及时提供足够的反馈信息,使患者发挥最大自主肌力,促进其运动习得能力;④部分机器人设备具有评价功能,能客观地评价患者的运动能力及恢复情况^[13,14]。

3 下肢康复机器人在 SCI 康复中的应用

下肢康复机器人在 SCI 康复领域中的应用主要集中于改善患者的步行能力。机器人辅助步行训练在过去 10 年中取得了突破性进展,机器人辅助装置在 SCI 康复中正逐渐取代人工辅助方法,然而关于其在神经功能恢复中的有效性仍不明确。

3.1 下肢康复机器人对 SCI 康复的作用

在 SCI 领域,关于机器人辅助步行训练的动物和临床研究取得了一定的进展。de Leon 等^[15]应用一种机器人装置训练脊髓完全性切断大鼠后肢行走,在减重平板行走的同时应用机器人对后肢踝关节处施加一个向下的力以增加站立相后肢负重,训练后摆动期后肢的功能明显改善。应用机器人模仿后肢摆动期运动轨迹进行训练后,大鼠的后肢迈步能力也得到明显改善。Nessler 等^[16]也进行了相似的试验,在胸髓中段切断的 SD 大鼠进行类似的训练后,同样得出了机器人训练提高了大鼠后肢肌力和步行能力的结果。这些研究结果为下肢机器人在人类 SCI 中的应用提供了一定的理论依据。

3.1.1 腿部驱动机器人在 SCI 康复中的作用 2001 年 Colombo 等^[17]首先将腿部驱动下肢康复机器人应用于 SCI 患者的康复治疗,并对比了人工辅助平板步行训练与机器人辅助步行训练在 2 例颈髓损伤患者应用的临床疗效,以股直肌、股二头肌、腓肠肌内侧头和胫前肌的肌电活动作为评价指标,发现 2 例患者的下肢肌肉肌电活动在训练后

均显著增加,步行能力改善,且 2 例患者并无明显差异,认为人工辅助步行训练和步行驱动装置辅助步行训练以相似的形式激活脊髓神经元,而步行驱动装置可以使治疗时间延长并减少治疗师的工作负担,可以作为人工训练的替代方法应用于 SCI 的步行训练中。其后有多位研究者探讨了下肢机器人对不同分期 SCI 患者的疗效,并证实了机器人辅助步行训练可以提高 SCI 患者步行功能的推论^[18-20]。

Moreh 等^[21]对 1 例脊髓减压术后患者进行了 3 个月的 Lokomat 机器人辅助训练,患者的 ASIA 分级由 C 级升到 D 级,脊髓独立性测量和 Berg 平衡量表评分均有提高。Lam 等^[22]认为,正确的步行相关传入反馈是步行运动恢复的关键,他们观察了 1 例陈旧性 T11 不完全 SCI 患者应用机器人进行下肢阻力运动对于步态恢复的作用,结果发现,患者训练后的步行速度、耐力等评价指标明显改善,同时下肢关节屈曲和足廓清能力改善。郭素梅等^[13]的研究也证实了 Lokomat 机器人辅助训练对于不完全性 SCI 患者下肢肌力和步行能力具有积极的改善作用。

有研究者对 Lokomat 机器人辅助步行训练与传统地面步行训练对不完全性 SCI 患者的疗效进行了比较,将 80 例发病 3~6 个月内的不完全性 SCI 患者随机分为两组,一组接受 Lokomat 机器人辅助步行训练,一组接受地面步行训练,两组均训练 40 次,主要评价指标为步速、脊髓损伤步行指数(WISCI II),结果显示,两组的平均步速无明显差异,但机器人辅助步行训练组的 WISCI II 评分较地面步行组明显提高,在步行辅助具及矫形器方面的需求较传统治疗组减少,认为机器人辅助训练可能通过更好地提高下肢肌力改善 SCI 患者的步行能力^[23]。

上述研究均肯定了机器人辅助步行训练在 SCI 运动功能恢复中的作用,但大多数研究为小样本研究,腿部驱动机器人对 SCI 的作用仍缺乏随机对照的多中心大样本研究结论支持。

3.1.2 足底驱动机器人在 SCI 康复中的作用 足底驱动机器人是放置在跑步机上的步态驱动设备,在一套由计算机控制的步态模拟控制系统的控制下,帮助患者模拟正常人的步行规律进行康复训练。其典型代表有 Gait trainer^[24]和 LokoHelp^[25]。有研究探讨了足底驱动机器人在神经康复中的应用^[26],但有关其在脊髓损伤应用中的报道较少,尚无大样本临床对照研究验证其临床疗效。

2008 年的一项研究^[25]探讨了 LokoHelp 应用于包括 SCI 在内的神经损伤患者的可行性,纳入的 6 例神经损伤患者分别为脑卒中 2 例、SCI 2 例、脑外伤 2 例,均进行为期 6 周、每次 20min 的 LokoHelp 辅助减重步行训练,结果显示,LokoHelp 辅助减重步行训练较人工训练更节省人力、更适用于严重的神经损伤患者,其舒适程度较减重步行训练为佳,所有患者在训练过程中均未产生不适。但该研究未对 LokoHelp 和人工辅助减重步行训练的效果进行对比。

Hornby 等^[27]对不完全性 SCI 患者应用腿部驱动机器

人和足底驱动机器人的动力学特征、肌电图和代谢反应等进行了研究,以人工辅助步行训练为对照,发现腿部驱动机器人的下肢动力学特征近似于正常步态模式,运动学变量一致性较高,而足底驱动机器人呈现出较大的髌膝屈曲,运动学变量一致性较差;二者的肌电图表现类似,但足底驱动机器人的耗氧量较外骨骼式机器人更大。

3.1.3 新型机器人在 SCI 康复中的作用 近年来,一些新型的康复机器人逐渐研发成功并开展了部分相关研究。Wu 等^[28]观察了一种电缆驱动机器人步行训练系统对不完全性 SCI 患者步行能力的影响,结果表明,电缆驱动步行训练系统可以提高下肢平板训练时的患者运动学表现和步行速度,而下肢运动轨迹无明显改变。其后,他们又探讨了电缆驱动机器人阻力平板训练在提高不完全性 SCI 患者步行功能中的作用^[29]。10 例陈旧性不完全性 SCI 患者被随机分为 2 组,1 组接受 4 周的辅助训练后再接受 4 周阻力训练,另一组以相反顺序训练。步行训练由电缆驱动机器人系统提供,允许患者在 BWSTT 时以自然步态的模式多自由度随意运动下肢,在步行的摆动期可以为患者提供可控的助力/阻力。在试验前及试验后 4 周和 8 周分别对患者进行评价,结果表明机器人辅助平板训练后患者的步行速度及平衡功能均有了明显改善,而抗阻和辅助训练的先后顺序对步行功能的改善无显著影响。研究认为电缆驱动的机器人抗阻训练可以与 BWSTT 结合应用,以提高不完全性 SCI 的地面步行能力,尤其是对于功能较好的 SCI 患者阻力训练更为有效。

Kubota 等^[30]探讨了一种新型的可穿戴式机器人对步行能力受限患者的康复效果。38 例步行能力受限的患者,其中包括 12 例卒中、8 例 SCI 和 4 例骨骼肌肉系统疾病患者及 14 例其他疾病所致步行受限者,所有患者接受每周 2 次、每次 90min 的可穿戴式机器人训练,共持续 8 周。采用 10m 步行速度和站起-走 (Timed Up & Go, TUG) 测试及 Berg 量表在治疗前后评价患者的平衡和步行能力。研究发现,在 32 例完成训练的患者中,10m 步行检测结果显示患者步行速度、步数及步行节奏明显改善。但 TUG 和 Berg 测试尽管有改善,但无统计学意义。研究认为,这种新型可穿戴式机器人临床使用安全有效,可以提高步行障碍患者的步行能力。

3.2 下肢康复机器人训练对 SCI 患者运动学的影响

机器人辅助训练已成为神经康复治疗技术的一部分,治疗效果得到了研究的支持。然而,尚不明确机器人训练是否会对肌肉正常激活模式造成影响。有研究者认为肌电图可以定量评估下肢肌肉的募集和激活模式在机器人治疗后的改变^[31]。Hidler 等^[32]探讨了腿部驱动式下肢康复机器人训练时时下肢主要肌肉激活模式的变化,比较步行周期的每个阶段人工平板训练及机器人辅助训练时时肌肉激活方式的变化。研究结果发现,肌肉激活模式的空间和时间参数在两种不同的步行训练中明显不同。机器人步行训练时摆动期股四头肌和腓绳肌的激活较人工训练明

显增强,而在步行周期的大部分时间踝背屈和跖屈肌的激活较人工训练均明显下降。研究认为机器人辅助步行限制了下肢自由度及骨盆的运动,导致行走过程中自然的肌肉激活模式发生了变化,研究结果为机器人的进一步改进提供了依据。Israel 等^[33]也对机器人辅助平板步行训练与人工辅助平板训练时的能量消耗及下肢肌肉激活模式进行了比较,结果发现,机器人辅助行走时代谢消耗及摆动期髌屈肌的肌电活动较人工辅助明显下降。也有研究发现,应用 Lokomat 机器人进行为期 4 周的辅助步行训练可以明显降低踝关节痉挛和肌肉的僵硬,踝关节背屈肌和跖屈肌的最大等长收缩值也明显提高^[34]。

3.3 下肢康复机器人在 SCI 领域训练模式的拓展

患者病情的个性化和复杂性要求机器人能够实时检测患者与机器人之间的相互作用力,在患者主动能力不足时提供更大的辅助,而在患者有能力完成动作时,适当减小辅助甚至施加阻力,以便充分发挥患者残存的功能^[35]。Lam 等^[22,36]在机器人辅助训练时在摆动期对下肢屈肌通过 Lokomat 机器人施加速度依赖性阻力,研究发现,当应用机器人在行走时施加速度依赖性阻力时,摆动期膝屈肌活性较负重行走时明显增加,从而认为可以通过额外的本体感觉输入来增加摆动期屈肌的活性以改善步行能力。

有研究发现,在患者与机器人互动模式下,患者表现出更多的时间、空间动力学参数的变异、力矩交互作用的下降、心率的下降及更多的肌肉活动,认为患者与机器人的互动可以提高不完全性 SCI 患者的运动学表现^[37,38]。Schück 等^[38]应用一种被称为综合弹性路径控制模式的训练方法对 2 例脑卒中患者和 2 例 SCI 患者进行步行训练,这是一种患者共同参与的训练模式,患者在训练时更积极主动,1 例患者训练后步行速度明显增加。说明这种模式可以克服机器人训练单一、机械的缺点,允许患者在机器人训练时以更积极、主动、更符合自然行走模式和下肢多自由度特点的方式训练,可以在临床推广应用。

神经损伤后复杂的生理病理机制和多因素参与的康复预后,使得探索联合应用康复治疗方案越来越成为康复医学研究领域的热点和趋势^[39]。另外机器人的功能尚在不断的改进和开发中,单一的机器人辅助训练很难达到满意的临床效果,因此越来越多的研究者开始探讨机器人训练联合其他康复治疗对 SCI 的疗效。

有研究者制作了脊髓损伤大鼠模型,并发现应用机器人驱动硬膜外电刺激较单纯硬膜外刺激对大鼠运动功能的改善更明显。这一发现提示,机器人训练与其他形式的康复治疗相结合可能是未来康复的趋势^[40]。Niu 等^[41]探讨了 Lokomat 训练对不完全性 SCI 患者步行速度的影响,同时探讨抗痉挛药物对 Lokomat 训练的辅助作用,29 例伴有踝关节高张力性痉挛的 SCI 患者参与了试验,其中一半患者仅接受单纯的机器人辅助步行训练,另一半患者接受机器人辅助步行训练+替扎尼定治疗。根据步行速度高低每组患者又区分为低速和高速两个亚组,采用 10m 步行

速度在治疗前、治疗后 1、2、4 周评价患者的步行速度。机器人组步行速度在高速患者步行能力测试中改善, 机器人+替扎尼定组无论高速和低速患者步行能力均改善, 但低速患者改善更明显。说明 Lokomat 训练可以提高 SCI 患者的步行速度, 联合抗痉挛药物如替扎尼定可以提高 Lokomat 训练的效果。

4 下肢康复机器人在 SCI 康复中应用的局限性

尽管许多研究证实了下肢康复机器人辅助步行训练对于改善 SCI 患者步行能力的作用, 然而, 不可否认的是, 机器人发展到今天, 仍有其临床应用的局限性。(1) 机器人辅助步态训练容易使患者依靠设备的被动引导而趋于被动, 从而影响其自主肌力的发挥; (2) 考虑安全的需要及减少操作的复杂性, 机器人训练限制了步行过程中下肢的自由度, 如外骨骼式机器人的机械腿在两侧及后面固定患者的髋部, 使髋部和骨盆的自由度限定在垂直面, 不但限制了患者髋部的转动、双下肢的重心转移及躯干的运动, 同时也减少了步行时为保持姿势稳定及平衡所必需的某些自主肌肉活动的需要^[3]; (3) 缺少大样本、多中心的随机对照研究验证机器人辅助步行训练的临床疗效; (4) 缺少人机互动、训练模式较单一, 助力施加在步行周期的全过程中无法根据阶段需求而变化等。近年来, 以 Lokomat 为代表的外骨骼式机器人已经开发出了多样化的运动模式, 可在步行周期中分阶段为患者施加助力或阻力。另外, 机器人的训练速度、引导力及髋、膝关节角度调节不适当会影响机械腿与运动平板的同步性, 仍需要治疗师适当的辅助训练指导, 尤其是矫正下肢的关节力线、力矩, 根据每个患者的运动能力进行个性化最佳参数设置, 使其与正常步行周期接近, 以达到最优化效果^[25]。

综上所述, 下肢康复机器人在 SCI 中的应用已取得了一定进展, 相较于其他人工辅助步行训练有其独特的优势, 具有广泛的临床应用前景。但目前的研究均为小样本或非随机对照研究, 功能评价方法也较为落后, 其临床效果仍需大样本、多中心随机对照进一步验证。另外, 目前下肢康复机器人在临床应用中仍有其局限性, 机器人的功能仍在不断的改进和开发中, 相信随着科学技术的进展, 下肢康复机器人的应用及机理研究将会越来越深入。

5 参考文献

- Schwartz I, Meiner Z. The influence of locomotor treatment using robotic body-weight-supported treadmill training on rehabilitation outcome of patients suffering from neurological disorders[J]. Harefuah, 2013, 152(3): 166-171.
- Sale P, Franceschini M, Waldner A, et al. Use of the robot assisted gait therapy in rehabilitation of patients with stroke and spinal cord injury[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2012, 48(1): 111-121.
- Hornby TG, Campbell DD, Kahn JH, et al. Enhanced gait-re-

lated improvements after therapist-versus robotic-assisted locomotor training in subjects with chronic stroke: a randomized controlled study[J]. Stroke, 2008, 39(6): 1786-1792.

- Barbeau H. Locomotor training in neurorehabilitation: emerging rehabilitation concepts[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2003, 17(1): 3-11.
- Dietz V, Harkema SJ. Locomotor activity in spinal cord injured persons[J]. J Appl Physiol, 2004, 96(5): 1954-1960.
- Yen SC, Schmit BD, Landry JM, et al. Locomotor adaptation to resistance during treadmill training transfers to overground walking in human SCI[J]. Exp Brain Res, 2012, 216(3): 473-482.
- Galvez JA, Reinkensmeyer DJ. Robotics for gait training after spinal cord injury[J]. Top Spinal Cord Inj Rehabil, 2006, 11(2): 18-33.
- Winchester P, Querry R. Robotic orthoses for body weight-supported treadmill training[J]. Phys Med Rehabil Clin N Am, 2006, 17(1): 159-172.
- Pohl M, Werner C, Holzgraefe M, et al. Repetitive locomotor training and physiotherapy improve walking and basic activities of daily living after stroke: a single-blind, randomized multicentre trial[J]. Clin Rehabil, 2007, 21(1): 17-27.
- Westlake K, Patten C. Pilot study of Lokomat versus manual-assisted treadmill training for locomotor recovery post-stroke [J]. J Neuroeng Rehabil, 2009, 6(1): 18-20.
- Fisher S, Lucas L, Thrasher TA. Robot-assisted gait training for patients with hemiparesis due to stroke [J]. Top Stroke Rehabil, 2011, 18(3): 269-276.
- 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.
- 郭素梅, 李建民, 吴庆文, 等. 机器人步态训练对不完全性脊髓损伤患者肌肉及步行功能的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2012, 27(4): 360-363.
- Hussain S, Xie SQ, Liu G. Robot assisted treadmill training: mechanisms and training strategies[J]. Med Eng Phys, 2011, 33(5): 527-533.
- de Leon RD, Kubasak MD, Phelps PE, et al. Using robotics to teach the spinal cord to walk [J]. Brain Res Brain Res Rev, 2002, 40(1-3): 267-273.
- Nessler JA, Minakata K, Sharp K, et al. Robot-assisted hindlimb extension increases the probability of swing initiation during treadmill walking by spinal cord contused rats[J]. J Neurosci Methods, 2007, 159(1): 66-77.
- Colombo G, Wirz M, Dietz V. Driven gait orthosis for improvement of locomotor training in paraplegic patients [J]. Spinal Cord, 2001, 39(5): 252-255.
- Bishop L, Stein J, Wong CK. Robot-aided gait training in an individual with chronic spinal cord injury: a case study [J]. J Neurol Phys Ther, 2012, 36(3): 138-143.

19. Wirz M, Bastiaenen C, de Bie R, et al. Effectiveness of automated locomotor training in patients with acute incomplete spinal cord injury: a randomized controlled multicenter trial [J]. *BMC Neurol*, 2011, 11(1): 60–65.
20. Schwartz I, Sajina A, Neeb M, et al. Locomotor training using a robotic device in patients with subacute spinal cord injury[J]. *Spinal Cord*, 2011, 49(10): 1062–1067.
21. Moreh E, Meiner Z, Neeb M, et al. Spinal decompression sickness presenting as partial Brown-Sequard syndrome and treated with robotic-assisted body-weight support treadmill training[J]. *J Rehabil Med*, 2009, 41(1): 88–89.
22. Lam T, Pahl K, Krassioukov A, et al. Using robot-applied resistance to augment body-weight-supported treadmill training in an individual with incomplete spinal cord injury [J]. *Phys Ther*, 2011, 91(1): 143–151.
23. Alcobendas-Maestro M, Esclarín-Ruz A, Casado-López RM, et al. Lokomat robotic-assisted versus overground training within 3 to 6 months of incomplete spinal cord lesion: randomized controlled trial[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2012, 26(9): 1058–1063.
24. Hesse S, Uhlenbrock D. A mechanized gait trainer for restoration of gait[J]. *J Rehabil Res Dev*, 2000, 37(6): 701–708.
25. Freivogel S, Mehrholz J, Husak-Sotomayor T, et al. Gait training with the newly developed 'LokoHelp'-system is feasible for non-ambulatory patients after stroke, spinal cord and brain injury: a feasibility study[J]. *Brain Inj*, 2008, 22 (7–8): 625–632.
26. Skvortsova VI, Ivanova GE, Kovrazhkina EA, et al. The use of a robot-assisted Gait Trainer GT1 in patients in the acute period of cerebral stroke: a pilot study[J]. *Zh Nevrol Psikhiatr Im S S Korsakova*, 2008, Suppl 23: 28–34.
27. Hornby TG, Kinnaird CR, Holleran CL, et al. Kinematic, muscular, and metabolic responses during exoskeletal-, elliptical-, or therapist-assisted stepping in people with incomplete spinal cord injury[J]. *Phys Ther*, 2012, 92(10): 1278–1291.
28. Wu M, Hornby TG, Landry JM, et al. A cable-driven locomotor training system for restoration of gait in human SCI[J]. *Gait Posture*, 2011, 33(2): 256–260.
29. Wu M, Landry JM, Schmit BD, et al. Robotic resistance treadmill training improves locomotor function in human spinal cord injury: a pilot study[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2012, 93(5): 782–789.
30. Kubota S, Nakata Y, Eguchi K, et al. Feasibility of rehabilitation training with a newly developed wearable robot for patients with limited mobility [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2013, 94(6): 1080–1087.
31. Wang P, Low KH, McGregor AH, et al. Detection of abnormal muscle activations during walking following spinal cord injury(SCI)[J]. *Res Dev Disabil*, 2013, 34(4): 1226–1235.
32. Hidler JM, Wall AE. Alterations in muscle activation patterns during robotic-assisted walking[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2005, 20(2): 184–193.
33. Israel JF, Campbell DD, Kahn JH, et al. Metabolic costs and muscle activity patterns during robotic-and therapist-assisted treadmill walking in individuals with incomplete spinal cord injury[J]. *Phys Ther*, 2006, 86(11): 1466–1478.
34. Mirbagheri MM, Ness LL, Patel C, et al. The effects of robotic-assisted Locomotor training on spasticity and volitional control[J]. *Phys Ther*, 2006, 86(11): 1466–1478.
35. del-Ama AJ, Moreno JC, Gil-Agudo A, et al. Online assessment of human-robot interaction for hybrid control of walking[J]. *Sensors(Basel)*, 2012, 12(1): 215–225.
36. Lam T, Wirz M, Lünenburger L, et al. Swing phase resistance enhances flexor muscle activity during treadmill locomotion in incomplete spinal cord injury [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2008, 22(5): 438–446.
37. Duschau-Wicke A, Caprez A, Riener R. Patient-cooperative control increases active participation of individuals with SCI during robot-aided gait training [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2010, 7(1): 43–56.
38. Schück A, Labruyère R, Vallery H, et al. Feasibility and effects of patient-cooperative robot-aided gait training applied in a 4-week pilot trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2012, 9(1): 31–45.
39. Dietz V, Grillner S, Trepp A, et al. Changes in spinal reflex and locomotor activity after a complete spinal cord injury: a common mechanism[J]. *Brain*, 2009, 132(8): 2196–2205.
40. Hsieh FH, Giszter SF. Robot-driven spinal epidural stimulation compared with conventional stimulation in adult spinalized rats [C]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. Boston: 2011. 5807–5810.
41. Niu X, Varoqui D, Kindig M, et al. The effect of robot-assisted locomotor training on walking speed [C]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. San Diego: 2012. 3858–3861.

(收稿日期:2013-05-16 修回日期:2013-06-21)

(本文编辑 卢庆霞)