

· 康复医学工程 ·

减重步行康复训练机器人研究进展*

程 方¹ 王人成¹ 贾晓红¹ 张济川¹

近年来减重步行训练 (partial body weight support treadmill training, PBWSTT) 在临床上的应用越开越广泛,它主要是用减重吊带使患者步行时下肢负重减少,借助于运动平板进行步行能力训练^[1-2]。在训练时一般需要两名治疗师,一名帮助患者腿摆动、支撑期患足跟着地,防止支撑期膝过伸。另一名帮助患者进行身体重心转移、髌伸展、骨盆旋转,并保持患者躯干的直立。自 20 世纪 90 年代初以来,国内外多家研究机构利用机器人技术相继开展了代替治疗师辅助患者自动完成减重步行康复训练的设备。利用这种康复训练机器人进行步行康复训练,不仅减轻了治疗师的工作强度,而且步行训练参数重复性好,时相指标可以准确设定,能够有效加快康复进程,提高疗效^[3-4]。

减重步行康复训练机器人按动力输入方式可分为腿部驱动和足底驱动两种类型。腿部驱动减重步行康复训练机器人通过牵引患者大腿和小腿协调摆动完成腿部步行动作;足底驱动减重步行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行训练。按动力源的不同,减重步行康复训练机器人又可以分为电机驱动、液压驱动和气压驱动,电机驱动因体积紧凑,操作与维护简单方便,而被广泛采用。此外,还有一种由运动平板直接驱动一个机构带动患者小腿屈曲的辅助步行训练装置。

1 腿部驱动减重步行康复训练机器人

腿部驱动减重步行康复训练机器人又可以分为仿生外骨骼机械腿和牵引机械手两种结构形式。

1.1 仿生外骨骼机械腿

外骨骼机械腿的主要特点是具有类似人腿的仿生外骨骼结构,有大腿、小腿、髌、膝、踝关节等。使用时,外骨骼机械腿穿戴在人体下肢上,机械腿的大、小腿分别带动患者大、小腿摆动,完成步行动作。

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 步行康复训练机器人是这一类设计的典型代表(图 1)。LOKOMAT 于 1999 年研制成功,2001 年推向市场,并在随后的几年中日臻完善。LOKOMAT 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产品^[5]。

LOKOMAT 采用电机驱动,每条腿安装有两台电机。电机安装在机械腿的腰部机架和腿大腿杆上,分别驱动一套丝杠螺母机构,通过丝杠转动推动机械腿大腿和小腿摆动,完成步行动作。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控制计算机。LOKOMAT 的优点是:①患者的训练状态能够被监测,评价和引导;②能够根据患者个体不同提供相应的步态模式和训练方案;③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。



图 1 LOKOMAT 步行康复训练机器人

比利时布鲁塞尔 Vrije 大学开展了一项称为使用可调式康复训练机器人的运动训练 (automated locomotion training using an actuated compliant robotic orthosis, ALTACRO^[6]) 的研究计划(图 2)。ALTACRO 采用了气囊型人造肌肉作为驱动装置,通过充、放气来实现气囊膨胀缩短或收缩伸长,类似于人体肌肉的作用机制。人造肌肉缩短或伸长,带动外骨骼式机械腿的大、小腿摆动,从而牵引患者肢体完成步行动作。这一设计更接近人腿真实的运动形式,具有重量轻,输出力大,有一定柔度等优点。

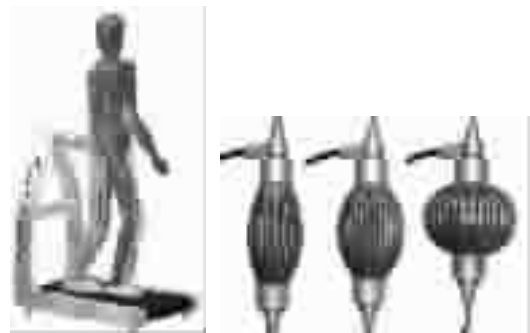


图 2 ALTACRO 步行康复训练机器人及其气囊型人造肌肉

清华大学精密仪器系康复工程研究中心在国家自然科学基金和国家科技支撑计划支持下正在研究 (gait rehabilitation training system, GRTS) 步行康复训练机器人(图 3)。GRTS 采用关节直接驱动方式,电机驱动器直接安装于机械腿髌、膝关节处,通过控制髌和膝电机的协调转动完成步行动作。GRTS 具有结构简单紧凑,屈曲角度大等优点。但是髌、膝关节处驱动器的轴、径向尺寸较大。

1.2 牵引式机械手

牵引式机械手的特点是采用多个机械手分别与患者大腿和小腿相连,使它们协调摆动,完成步行动作。牵引式机械

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50575122);国家科技支撑计划资助项目(2006BA122B03)

1 清华大学摩擦学国家重点实验室智能与生物机械分室,北京,100084

作者简介:程方,男,硕士研究生

收稿日期:2007-09-13

手与外骨骼机械腿的工作原理相同,但牵引式机械手接近于理疗师的手来牵引患者下肢进行训练,并且训练设备无需全部穿戴在患者身上。

2002年 美国 HEALTHSOUTH 公司推出了 AutoAmbulator 牵引式机械臂步行康复训练机器人^[7](图4),该系统由两套电机驱动的二自由度机械手在计算机控制下分别牵引患者大腿和小腿完成步行动作。与 LOKOMAT 相

似,AutoAmbulator 也能实时监测患者训练的各项数据,同时评估和引导患者的训练状态。

此外美国加州大学洛杉矶分校也提出了 ARMS 步行康复训练机器人的设计方案(图5)。ARMS 由四个机械手组成,分别与患者下肢大、小腿相连。气缸驱动机械臂在计算机的控制下协调伸长或缩短,牵引患者下肢摆动完成步行动作。



图3 清华大学 GRTS 步行康复训练机器人



图4 AutoAmbulator 步行康复训练机器人



图5 ARMS 步行康复训练机器人

2 活动踏板式减重步行康复训练机器人

活动踏板型减重步行康复训练机器人是对由活动踏板牵引患者脚部,通过保证踝关节的运动轨迹与正常步态的踝关节运动轨迹相吻合来进行步行训练的康复训练系统的总称,通常与减重步行训练相结合。它的主要结构是一对可按照一定轨迹运动的踏板。训练时,患者站立在踏板上,在它的带动下完成行走动作。

最早推出活动踏板式步行康复训练机器人的是德国柏林自由大学,图6是他们1996年研制的机械步态训练器(mechanical gait training, MGT)型步行康复训练机器人^[8-9]。该系统具有一套由电机、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。

在 MGT 的基础上,Stefan Hesse 等在德国弗朗霍菲尔(Fraunhofer)研究所采用最新的机器人技术、计算机技术和虚拟现实技术开发了 Haptic Walker 步行康复训练机器人(图7)^[10-12]。Haptic Walker 的机械部分是一套可编程控制踏板,

它可以提供各种可能的足部运动轨迹。可编程控制踏板由两个完全对称但相互独立的机械臂组成,踏板安装在机械臂顶部。机械臂安装在直线导轨上,由一个直线电机驱动。踏板水平方向的位置由直线电机控制,竖直方向的位置由安装在机械臂三个关节处的电机控制。各部分协调配合可以模拟出任意步态的运动轨迹。该系统通过位置控制能为训练者提供平地、上下楼梯等多种训练场景;同时还能通过动力学控制模拟水泥地、沙地、玻璃地等不同路面环境的力学特性;此外通过虚拟现实技术为患者提供不同的虚拟步行场景,以提高训练者兴趣,增加训练的主动性。

图8是哈尔滨工程大学机电工程学院研制的步行康复训练机器人(lower limbs rehabilitative robot, LLRR)^[13-14],其设计与 MGT 型步行康复训练机器人相似。它由走步状态控制系统、脚部姿态控制系统、框架、导轨等组成。走步状态控制系统主要由主动曲柄、连杆、脚踏板和滑轮组成。主动曲柄由直流伺服电机驱动,患者脚部随活动踏板一起做被动运动,形成一个椭圆轨迹,产生与正常人行走轨迹相近的运动轨迹,同时由于脚跟随踏板运动,患者的小腿和大腿处于相应



图6 MGT 型步行康复训练机器人



图7 Haptic Walker 步行康复训练机器人

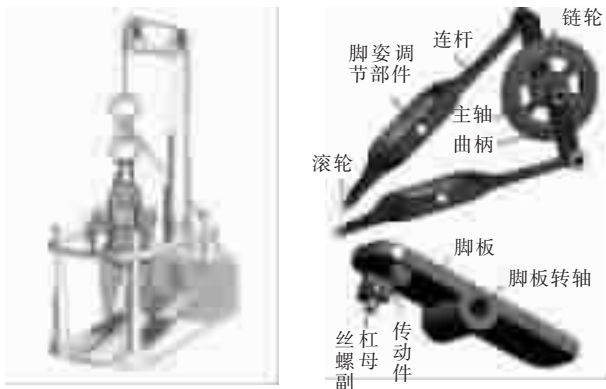


图 8 LLRR 步行康复训练机器人及其控制组件

的运动状态。步速通过控制电机的转速来调整,步幅则通过改变主动曲柄的工作半径来调节。脚的姿态控制系统是由直线伺服机构实现的,通过控制踏板绕踏板轴回转运动的角度,来模拟正常人走路时踝关节的姿态变化。

图 9—10 是日本 Tsukuba 大学虚拟现实研究室推出的 GaitMaster 的步行康复训练机器人^[5]。GaitMaster-1 是全方位型,由两个踏板组成,每个踏板由 3 个液压缸支撑组成 3 自由度并联机构,能够拟合任意方向的轨迹,模拟任意方向的步态。GaitMaster-2 是直线型,也由两个踏板组成,每个踏板安装在升降台上,升降台安装在直线导轨上,由直流电机驱动,具有 2 自由度,能够模拟直线方向的步行轨迹。GaitMaster 同样能够为患者提供平地、上下坡、上下楼梯等多种步行训练模式。



图 9 GaitMaster-1 全方位型



图 10 GaitMaster-2 直线型

3 运动平板驱动的辅助步行训练装置

图 11 是美国 WOODWAY 公司于 2006 年推出的由 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,驱动链条带动人腿摆动。链条安装在一个轨道上,因此人腿的摆动轨迹与轨道一致。两腿相位相差 180°。



图 11 LOKOHELP 辅助步行训练装置

这种独特的设计,使 LOKOHELP 无需驱动系统,整体结构大为简化。同时,由于动力是由摩擦轮从跑台获得,相当于由跑台来驱动,从而有效地解决了训练步速与跑台滑带速度协调的问题。尽管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,但是比步行康复训练机器人的结构简单,成本低廉,也是具有一定市场前景的。

参考文献

- [1] 王彤. 减重步行训练在康复医学中的应用 [J]. 现代康复, 2001, 15:26—28.
- [2] 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.
- [3] Hornby TG, Zemon DH, Campbell D. Robotic-assisted, body-weight-supported treadmill training in individuals following motor incomplete spinal cord injury[J]. Physical Therapy, 2005, 85(1):52—66.
- [4] 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.
- [5] http://www.hocoma.ch/web/en/products/prd_lokomat.html[OL]
- [6] <http://altaero.vub.ac.be/>[OL]
- [7] http://www.healthsouth.com/what_we_do/inpatient_rehabilitation/rehabilitation_technology/autoAmbulator.asp[OL]
- [8] Stefan Hesse. A mechanized gait trainer for restoration of gait [J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2000, 37(6):701—708.
- [9] Stefan Hesse. Locomotor therapy in neurorehabilitation[J]. NeuroRehabilitation, 2001, 16:133—139.
- [10] Schmidt H, Stefan Hesse, Rolf Bernhardt, et al. HapticWalker—a novel haptic foot device [J]. ACM Transactions on Applied Perception, 2005, 2(2):166—180.
- [11] Schmidt H, Sorowka D, Hesse S, et al. Development of a robotic walking simulator for gait rehabilitation [J]. Biomed Tech, 2003, 48(10): 281—286.
- [12] <http://userpage.fu-berlin.de/~hsch/HapticWalker/HapticWalker.html>[OL]
- [13] 张晓超, 张立勋, 颜庆. 一种新型三自由度下肢康复训练机器人步态机构运动分析及仿真[J]. 自动化技术与应用, 2005, 24(3): 32—35.
- [14] 夏昊昕, 张立勋, 王岚. 下肢康复训练机器人 [J]. 应用科技, 2004, 31(2):3—7.
- [15] http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/gaitmaster/gaitmaster_e.html[OL]