

# 一种减重步行训练机器人的研制\*

陈 鹏<sup>1</sup> 刘启栋<sup>2</sup> 王人成<sup>1</sup> 贾晓红<sup>1</sup> 胡 伟<sup>1</sup>

## 摘要

**目的:**研制可用于患者进行减重步行康复训练的机器人。

**方法:**采用外骨骼机械腿和竖直随动支撑作为主要的机械结构,并设计了相应的控制系统。

**结果:**研制出了一台减重步行训练机器人样机,该机能提供主动、被动等多种训练模式,并能根据患者的体型进行相应的调整。

**结论:**测试实验初步说明了该机器人能满足临床训练的要求,为进一步的实验研究奠定了基础。

**关键词** 减重步行训练;机器人;机械结构;控制系统

中图分类号:R496,TP242 文献标识码:A 文章编号:1001-1242(2011)-09-0847-05

Development of a body weight-support gait training robot/CHEN Kun, LIU Qidong, WANG Rencheng, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2011, 26(9): 847-851

## Abstract

**Objective:**To develop a kind of robot for patients' body weight-support gait training.

**Method:**Two mechanical exoskeleton legs and a vertical slave support,as well as a control system were included in this robot.

**Result:**A robot prototype was developed, which was adjustable, could provide different training modes of active and passive movements and could be adjusted according to the patients' bodily form.

**Conclusion:**Preliminary tests show that this robot can meet the requirements of clinical training and provide the base for further study.

**Author's address** Division of Intelligent and Biomechanical System, State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing, 100084

**Key word** body weight-support gait training; robot;mechanical structure; control system

减重步行训练是20世纪80年代后期融合运动疗法和神经促进技术而出现的康复训练方法。它利用悬吊装置来减轻体重对患肢的负荷,使支撑能力不足的患者也能进行步行训练;医用跑台带动患者下意识地迈步,可以激活运动皮质和脊髓节律性运动中枢,促进行走功能的恢复。减重步行训练作为临床常用的治疗手段,被广泛应用于脑外伤、脑瘫、帕金森病等上下神经元性病变以及下肢骨折、关节成形术后、假肢安装者的康复训练。

减重步行训练一般以治疗师和患者“一对一”甚至“多对一”的方式进行,因而治疗师的工作量过大,难以保证训练时间和强度,由此出现了减重步行训练机器人,如瑞士的LOKOMAT<sup>[1]</sup>,美国HealthSouth公司推出的AutoAmbulator<sup>[2]</sup>等。本文研制出一台具有竖直随动支撑的用于患者减重步行训练机器人。

## 1 机器人机械结构

减重步行训练机器人的总体结构如图1所示,

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2011.09.012

\*基金项目:“863”计划资助项目(2008AA040203)

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; 2 国家康复辅具研究中心

作者简介:陈鹏,男,硕士研究生; 收稿日期:2010-06-30

下面重点介绍外骨骼机械腿、臀部支座、背臀支撑以及竖直随动支撑机构等组成部分。

### 1.1 外骨骼机械腿

外骨骼机械腿是减重步行训练机器人的执行机构,包括髌、膝驱动关节和肢体连接机构。根据人体的步态特征,保证在矢状面内机械腿与人体下肢有近似的结构和连接关系,将髌、膝关节近似为单轴关节,各由一个电机经谐波减速器直接驱动,将足部与小腿作为一个整体结构考虑。机械腿杆采用伸缩结构,以适应不同腿长的患者。

### 1.2 竖直随动支撑机构

该机构采用一个竖直升降支座和安装于支座上两根弹簧作为外骨骼机械腿的随动支撑;机械腿在竖直方向的位置靠电动推杆来调整,以适应不同身高的患者;支架上的两根弹簧则使机械腿能够随着使用者重心的上下起伏而同步上下波动,这也更接近于真实的步态模式。

### 1.3 臀部支座

臀部支座是机械腿与竖直随动支撑机构的连接部分,它主要用于调整机械腿两髌之间的距离,以适应不同腰围尺寸的患者。

### 1.4 背臀支撑机构

背臀支撑机构用来支撑患者的背部和臀部,出于安全性和舒适性的考虑,分别增加了一块背垫和臀垫;通过一个滑槽设计可以调整臀垫和背垫之间的距离。

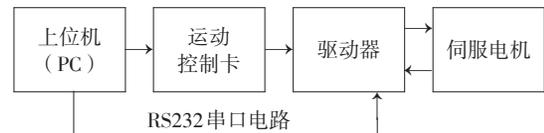
## 2 机器人控制系统

### 2.1 硬件组成

控制系统采用了如图2所示的“PC+运动控制

卡+驱动器+伺服电机”这种开放式控制系统结构。上位机(PC)负责对步态轨迹进行规划,运动控制卡根据上位机规划的步态轨迹给驱动器发送控制信号。驱动器根据该信号控制电机的转动,进而带动机械腿的运动。运动控制卡的核心由数字信号处理器和FPGA组成,可以实现高性能的控制计算。输出控制信号有脉冲量和模拟量可选,能方便实现伺服电机的位置、速度和力矩控制模式。电机驱动器能接收正反转脉冲、模拟电压等多种控制信号,并能实现精度较高的位置、速度和转矩控制。伺服电机自带绝对值型编码器,以完成对位置和速度的反馈。

图2 控制系统硬件连接示意图



### 2.2 控制算法

机器人在位置控制器的控制下实时跟踪该轨迹,以完成对人体步态的模拟。每个电机都由一个独立的驱动器来控制,是一个闭环系统,而4个电机之间则依靠协调控制算法来维持运动的协调性。控制算法流程是基于定时机制的连续脉冲输出控制。对左右腿采用的是相同的算法,在此仅以一条腿为例。上位机根据给定的步态轨迹数据点计算出当前所需运动的距离(角度),再根据定时器设定好的定时时间计算出发送控制脉冲的速度和加速度。电机驱动器接受指令后驱动电机的运动。协调控制算法是通过让运动稍快的机械腿在运动速度接近零的时候执行设定的等待时间,以消除积累的双腿运动误差来保证四个电机协调地运动。

### 2.3 控制系统软件

控制系统软件功能如图3所示,主要包括信息管理、训练参数设置、运动控制与状态监测、安全保护和报表管理5个部分。

**2.3.1 信息管理:**该模块负责对患者的个人信息进行管理,记录每个患者进行步态训练的参数信息,便于不同患者之间或是同一患者不同康复时期的步态信息的统计和对比分析。

**2.3.2 训练参数设置:**控制系统可以提供主动、被动

图1 减重步行训练机器人总体结构

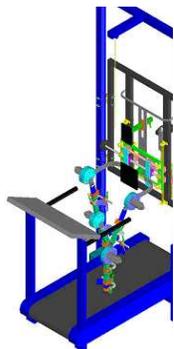
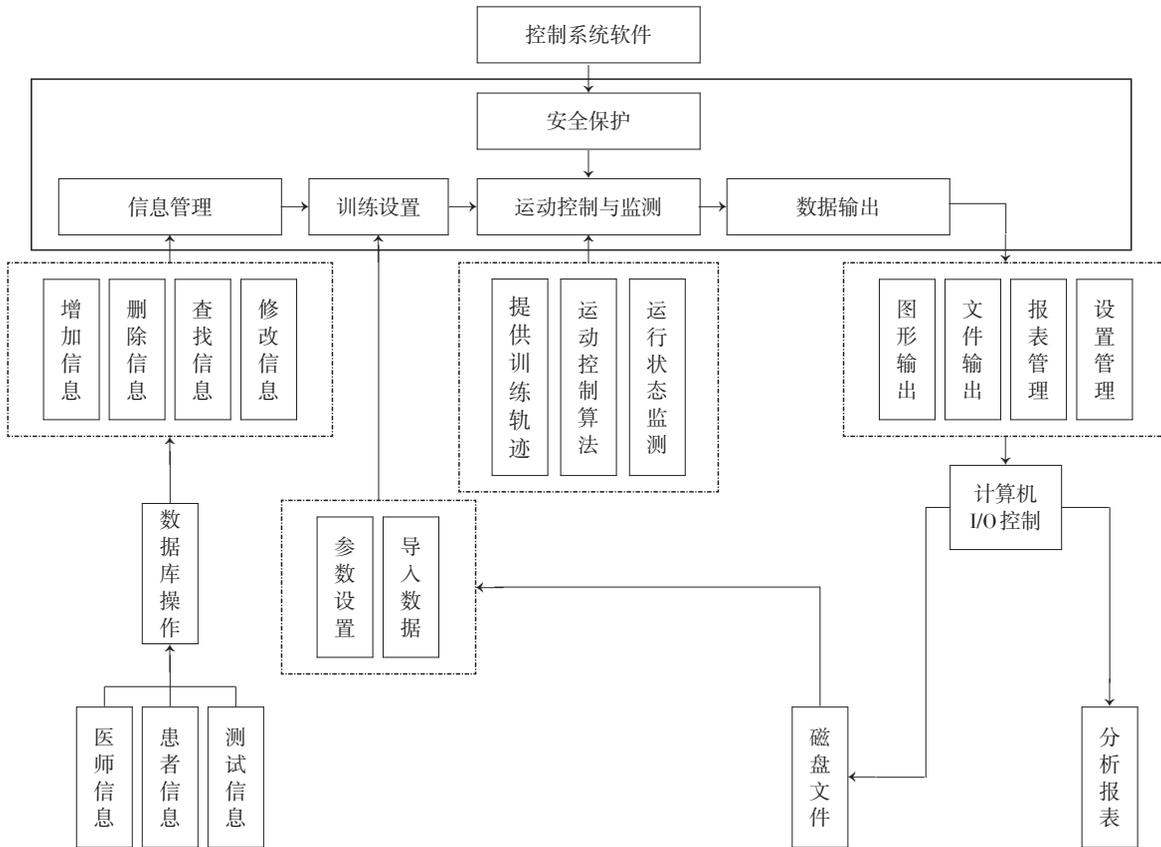


图3 软件功能图



等多种步行训练模式。由于患者在不同的康复阶段运动训练强度和幅度不同,因此参考步态轨迹的步频和步幅(步长)也不同。步频可以通过调整目标点的间隔时间来实现。为了满足患者对不同步长步态轨迹的要求,作者通过一种对给定参考步态轨迹进行参数建模得到其余步长步态轨迹的方法<sup>[3]</sup>,得到了10组不同步长的步态轨迹。以身高170cm的患者为例,根据患者的康复阶段以及设定的步频参数(快、中、慢),按照表1进行步态轨迹和相应的医用跑台速度的选择。

患者训练前首先进行参数设置,包括训练时间,步长和步频,以及与步速相匹配的电动跑台的速度等。参数设定完毕后会运行一个状态自检程序,以确定系统各个功能模块是否处于安全的工作状态。以上步骤完成后,系统便进入患者训练状态,根据给定的要求对患者进行步态训练。

**2.3.3 运动控制与状态监测:**运动控制模块主要负

表1 10组步态轨迹及相对应的医用跑台速度

步态组号	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01
步长(m)	0.7	0.62	0.55	0.48	0.42	0.35	0.28	0.2	0.13	0.07
快速(km/h)	2.5	2.3	2	1.8	1.5	1.3	1	0.8	0.5	0.3
中速(km/h)	1.7	1.6	1.4	1.2	1.1	0.9	0.7	0.5	0.4	0.2
慢速(km/h)	1.2	1.1	1	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1

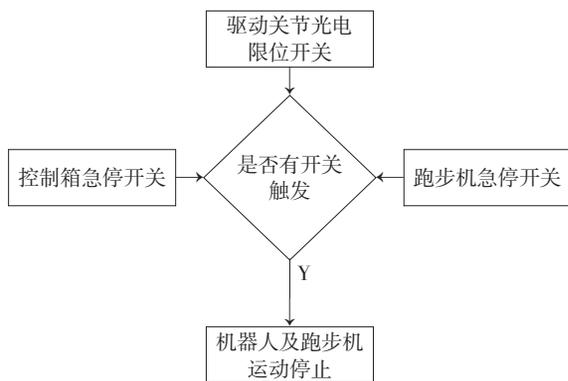
责运动控制算法的实现。

状态监测模块把系统的运行状态直观的显示在人机交互界面上,从中可以观测到患者训练的各项参数指标,如髋膝关节角度,跑步机速度,训练时间、进度等。另外,通过显示限位开关的安全指示灯的情况,还能监测系统是否运行在安全范围之内。

**2.3.4 安全保护:**减重步行训练机器人作为一种医疗设备,安全性显得尤为重要。本系统设置了三项安全保护措施:首先,通过在驱动关节上设置光电限位开关来限定一个安全的运动范围;其次,把电动跑台的控制系统与机器人的控制系统串联,通过跑步

机的安全急停开关就能控制系统的启停,方便患者的操作;最后,在人机交互平台附近的控制箱内也设置了一个急停开关,方便治疗师的操作。控制系统实时监测这三类开关,一旦有触发信号产生,机器人及跑步机的运动立即停止,安全控制流程图如图4所示。测试表明该三项保护措施有极高的灵敏度,能满足医疗设备对安全性的要求。

图4 安全保护流程



**2.3.5 报表管理:**训练完毕后可以生成患者步态训练的分析结果报表,对生成的报表进行预览和打印。

报表内容主要分为三部分:①患者基本信息,包括年龄、身高、体重、病史等;②步态训练参数,包括设定的步长、步频、步速,以及髋、膝关节的角度曲线等;③训练效果评价,主要由训练治疗师来填写完成,对患者的训练效果进行记录。

### 3 正常人主、被动步行训练实验

减重步行训练机器人样机如图5所示,为了初步检验机器人的临床适用性,进行了正常人的主、被动步行训练实验。

选择1名健康男性志愿者作为实验对象,职业为学生,年龄23岁,身高170cm,大腿长44cm,小腿长41cm,体重68kg。由一套二维步态分析系统记录下步行过程中的髋膝关节角度数据<sup>[4]</sup>。

#### 3.1 主动步行训练

受训练者以1.6km/h的速度行走,由步态分析系统记录下穿戴与不穿戴机械腿时的髋膝关节角度数据。结果如图6—7所示。从图中可以看出,主动训练时机械腿对受训练者的步态轨迹影响较大。从髋关节角度曲线来看,穿戴机械腿时,髋关节正向最大

图5 减重步行训练机器人样机



角度减小了18°,负向最大角度加大了5°,髋关节运动范围从30°减小到15°;从膝关节角度曲线来看,膝关节最大摆动角度减小了30°,膝关节摆动范围从55°减小到了27°。从步态周期来看,穿戴机械腿时,摆动期所占比例变大。在未穿戴情况下,摆动期约占步态周期的40%;而穿戴机械腿时摆动相增加到了约50%。这说明穿戴外骨骼机械腿会阻碍下肢的摆动。

由于机械腿的自重以及髋膝关节阻尼力矩的存在,主动步行训练实际上是阻尼训练,机械腿相当于加在人体下肢上的负载,这是导致图6—7中两曲线出现较大差异的主要原因。为了实现完全主动训练,可以让关节电机提供适当的助力以抵消机械腿作为负载的影响。

#### 3.2 被动步行训练

选择步长为0.7m的步态轨迹来进行被动步行训练实验,控制算法如2.2节所述。图8—9所示为受训练者在步速1.2km/h时的实验结果。本文中的

图6 穿戴与不穿戴机械腿时髋关节角度曲线

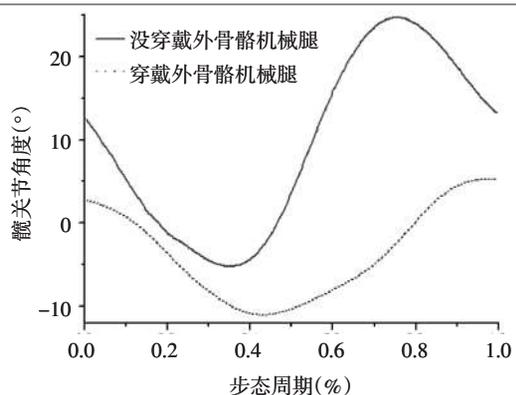


图7 穿戴与不穿戴机械腿时膝关节角度曲线

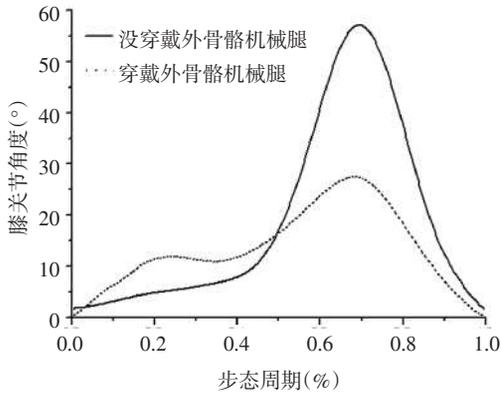
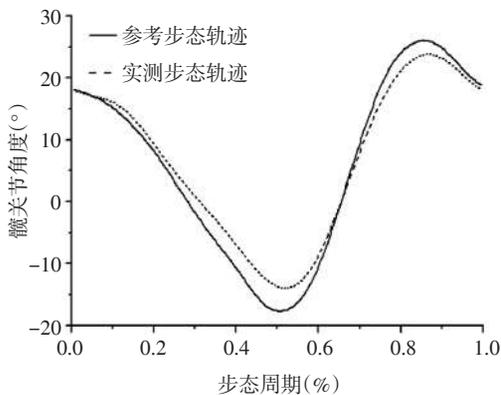


图8 被动步行训练髋关节角度曲线对比



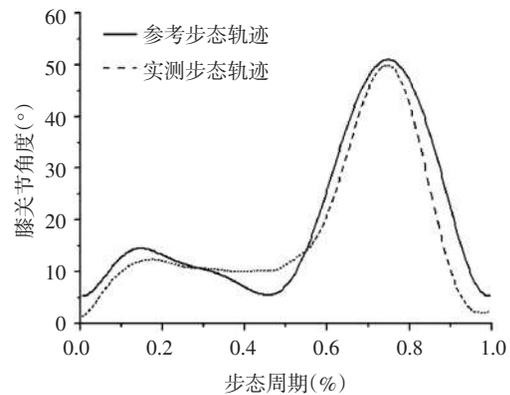
被动步行训练效果主要是通过机器人对参考步态轨迹的跟踪精度来衡量。从图中可以看出,髋关节角度的最大运动误差为 $3.7^{\circ}$ ,而膝关节角度为 $4.6^{\circ}$ 。由于人体下肢运动具有比较大的个体差异性,即使同一个人在不同时刻的步态轨迹都不尽相同,因此临床上认为髋、膝角度运动误差在关节运动范围的10%之内都是可以接受的。人体下肢关节的运动范围约为 $70^{\circ}$ 左右,从图8—9中可以看出,髋膝关节角度运动误差都未超过下肢关节运动范围的10%,且

参考步态轨迹和实测步态轨迹的有着良好的相似性,因而可以认为该机器人的步态轨迹跟踪精度能够满足被动步行训练的要求。

#### 4 结论

从系统功能的角度出发,介绍一种减重步行训练机器人的机械结构及控制系统。正常人步行训练实验结果表明,该机器人具有反向驱动性,能够进行主动步行训练;被动步行训练结果表明,机器人步态轨迹跟踪精度能够满足临床被动步行训练的要求。

图9 被动步行训练膝关节角度曲线对比



#### 参考文献

- [1] Colombo G, Joerg M, Schreier R, et al. Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis[J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2000, 37(6): 693—700.
- [2] <http://www.healthsouth.com>
- [3] 陈鹏,王爱明,刘启栋,等.减重步行康复机器人步态轨迹的参数化研究[C].第四届北京国际康复论文论文集.北京,2009:590—593.
- [4] 程方.下肢步态康复训练机器人原理样机研究[D].北京:清华大学,2008.