

doi: 10.7690/bgzd.2015.05.014

人体下肢运动康复训练机器人的设计

张立娟¹, 姜世公^{1,2}, 崔登祺¹, 吕蕴琦¹, 刘羽白¹, 高学山^{1,2}, 赵军³, 张通³

(1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081; 2. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 3. 中国康复研究中心神经内科, 北京 100068)

摘要: 针对当今社会老人以及偏瘫患者的康复训练需求和智能化训练康复设备的不足, 分析了偏瘫患者的步态, 设计了一种辅助患者行走及康复的下肢康复训练机器人。控制系统以主芯片为核心, 集成了多个传感器、CAN 总线和伺服电机等, 通过人机交互系统能实时地实现自动向前、左右转弯、防超速、防摔倒等功能, 通过对移动系统进行运动学分析, 获得了运动规律, 并进行康复训练机器人样机实验。实验结果表明: 该系统操作简单, 可靠性高、实用性强, 在帮助患者快速康复的同时, 也可为康复设备的开发起到指导意义。

关键词: 偏瘫患者; 康复训练机器人; 人机交互系统

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A

Design of a Rehabilitation Robot for Human Lower Limb Training

Zhang Lijuan¹, Jiang Shigong^{1,2}, Cui Dengqi¹, LYU Yunqi¹, Liu Yubai¹, Gao Xueshan^{1,2}, Zhao Jun³, Zhang Tong³

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. State Key Laboratory of Robotics & System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Neurology Department, China Rehabilitation Research Center, Beijing 100068, China)

Abstract: According to the demand of rehabilitation training for the elderly or hemiplegia patients and the lack of intelligent training rehabilitation equipment, after analyzing the gait of patients, a new intelligent rehabilitation robot for the human lower limb movement is designed. This control system took the main chip as core, and integrate several tension sensors, CAN bus, and servo motor, etc. Through the human-computer interaction system, help the old man or hemiplegia patients automatically go forward, turn around, and prevent speeding, falling and other functions in real time. The kinematics analysis was carried out on the studied system, and the law of motion was described in details, and then, the rehabilitation robot prototype was tested. The experiment results indicated that the system has simple operation, high reliability and strong practicability. At the same time of helping patients with early rehabilitation, it also has an important significance for the development of rehabilitation equipment.

Keywords: hemiplegic patient; rehabilitation training robot; man-machine interactive system

0 引言

偏瘫主要表现为一侧上、下肢的肢体瘫痪, 可伴有半身感觉障碍失语失认失用以及视野缺损等状况^[1]。根据 2007 年的统计数据, 我国年龄超过 55 岁的人口占据 19.8%, 因而老人和偏瘫患者的康复和训练成为当前的焦点^[2]。目前的康复设备主要集中在轮椅、康复机械手和假肢等, 存在操作困难、运用不方便、价格高、康复效果差等缺点。因此, 研究和开发下肢训练康复机器人对提高患者生活质量, 减轻社会负担具有非常重要的意义。基于此, 笔者根据下肢康复训练机器人根据病人的需求, 综合了机器人学、机械学、生物医学、电子学和计算机学等知识, 实现帮助病人行走、转弯、防超速和防跌倒的功能, 长期的训练对提高神经康复临床治疗手段、增强中枢性运动功能障碍患者的步行能力

康复效果起了非常重要的作用^[3-4]。

1 系统总体设计

1.1 偏瘫患者步态分析

对于偏瘫患者等行动不方便的人, 其步态稳定性差, 耗能增加, 行动不对称, 行走路径倾斜。典型的偏瘫步态常表现为摆动期足下垂、内翻、髋关节外展外旋成划圈步态。中风偏瘫步态步宽加大, 步长、步幅缩短, 步频、步速降低。步长平均为 40 cm, 小于正常人的 50~70 cm, 行走速度 4.2~53.4 m/min。关节外展外旋成划圈步态, 步行周期可划分为: 双侧肢体支撑期、单侧肢体支撑期和摆动期^[5]。

1.2 康复训练机器人的机构设计

如图 1 和图 2 所示, 康复训练机器人主要由机器人主体、移动机构、平衡辅助扶手、辅助座垫、

收稿日期: 2015-03-10; 修回日期: 2015-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273344); 机器人技术与系统国家重点实验室开放基金(SKLRs-2011-ZD-06); 教育部高等学校博士点基金资助项目(20121101110011); 国家十二五科技支撑计划(2012BAI34B03-2); 中国博士后科学基金(2014M560895); 机器人技术与系统国家重点实验室开放基金(SKLRs-2013-MS-10)等项目支持。

作者简介: 张立娟(1990—), 女, 山东人, 硕士, 从事机械工程仿生机器人研究。

控制箱等组成，主要包括 2 个驱动轮，2 个从动轮，2 个拉力传感器，2 个动作行为传感器。

该示意图显示当患者从后侧进入辅助步行机器人，将手放在平衡辅助扶手即挡板处^[6]，开关打开后即可推动扶手，机器人就会自动前进。当病人需要转弯时，即可转动辅助扶手，机器人就会自动转弯。而当病人即将跌倒或者车超速时，机器人就会自动停止，这样可以防止病人跌倒，保护病人不受伤害。如图 2 中拉力传感器通过束缚带连接在患者腰部，当病人跌倒时，超出一定的拉力范围，机器人便自动停止。

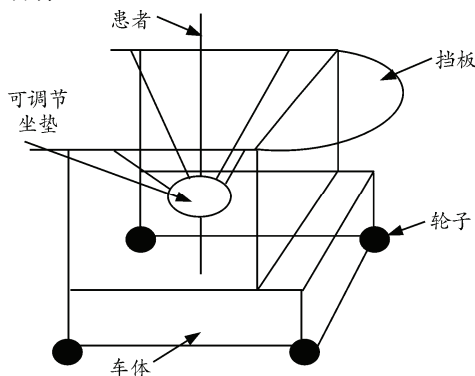


图 1 机构侧视图

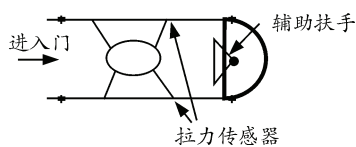


图 2 机构俯视图

笔者设计的机器人高度也是可以调整的，其调整变化范围为 1.0~1.2 m，患者可根据舒适程度进行调整，以便进行康复训练。具体如图 3 所示。

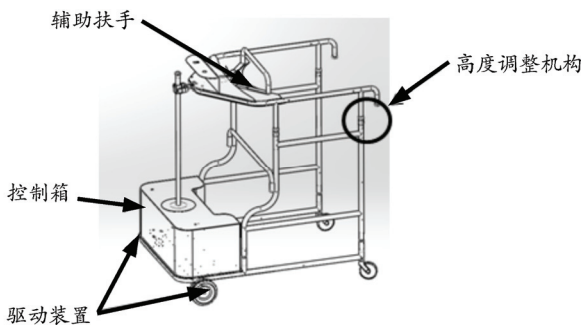


图 3 机构整体图

底座部分在整体中起到连接与支撑的作用，并且安装有驱动车轮运动的电机和驱动器等，是非常重要的部分。底座的设计要求主要是满足一定的承载能力。

1.3 人机交互系统

对于辅助行走系统，检测使用者行走的趋势是

一个非常重要的目标^[7]。而传感器的使用提供了一种有效而便捷的物理方式。人机交互系统主要由拉力传感器部分和动作行为传感器部分组成，实现了运动的稳定控制。

1.3.1 拉力传感器的选择与分布

如图 2 所示，机构上层两侧的扶手处分布有 2 个拉力传感器，连接在机器人车体和绑带之间，绑带连接在患者的腰部，病人行走时的拉力大小均由拉力传感器检测。当病人摔倒时，会很自然地坐在吊兜上，此时连接在吊兜上的拉力传感器上的拉力会突然增大，超出系统所设定的值，则车体会自动停止运动。这是一种通过拉力传感器来进行保护的措施，这种保护措施也容易被老人或者偏瘫患者熟知和接受。

1.3.2 动作行为传感器的选择与分布

机器人车体的下层机构中，如图 4，分布有 2 个动作行为传感器，分别连接在 2 个旋转轴的端面处。当患者向前推动辅助扶手时，就会使得直行动作传感器 2 旋转，从而通过控制系统驱动机器人自动向前行走。当患者左右转动辅助扶手时，转弯动作传感器 1 发生旋转，机器人实现左转或者右转。

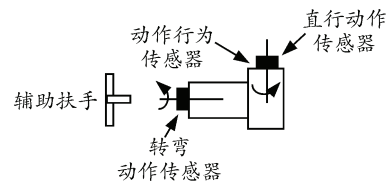


图 4 动作行为传感器

如图 5 所示，在运动过程中，当患者慢慢推动推杆时， S 为辅助扶手向前推动的距离。动作行为传感器的电压大小随推动的距离增大而增大，即 S 越小，传感器电压变化越大，则速度越快。

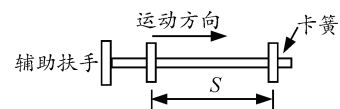


图 5 动作行为传感器的工作原理

使用者的运动行为信号传输如图 6 所示，电机转向相同且速度相等时，机器人前行；电机转向相反且速度相等时，机器人转弯。

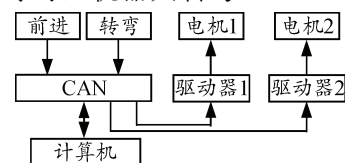


图 6 动作行为传感器工作框图

动作行为传感器在运动中起采集数据的作用，采集后的数据进行滤波再处理，继而再通过系统进行控制，继而实现变速前进，左转与右转的功能。

1.4 移动系统

该机器人移动系统由车轮构成，共有 4 个轮子，其中前 2 个轮子为驱动轮，后面 2 个轮为从动轮—万向轮。机器人行走模式分为向前直行、向右转弯和向左转弯 3 种模式。

通过电机的转向控制车轮的前进和后退，当 2 个驱动轮运动方向相同时，机器人实现自动前进的功能；当 2 个驱动轮运动方向相反时，机器人依靠速度差来实现方向的变换，即左转或者右转的功能，具体如图 7~图 9 所示，以人性化设计为出发点，驱动轮运动的速度可以根据患者行走的速度以及个人的舒适度进行调节。

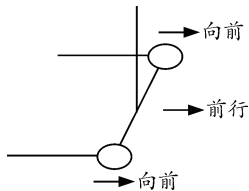


图 7 向前直行

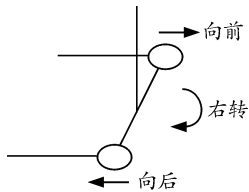


图 8 向右转弯

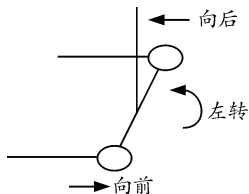


图 9 向左转弯

机器人轮子的速度是与传感器检测的力成正比的，即当推力增大时，轮子速度增大，当推力为零时，轮子速度也为零。定义作用在辅助扶手上的力为输入变量，直行的推力为 f_1 ，转弯的推力为 f_s ，如式 (1) 和式 (2) 所示：

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{K}_v \mathbf{F} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_v = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_s \end{bmatrix}$$

这里， \mathbf{v} 是每个驱动轮运动的速度， \mathbf{K}_v 是放大比例系数， \mathbf{F} 是施加在辅助扶手上的力。

2 机器人运动学分析

对于机器人的运动学^[8]，笔者分析了机器人移动机构中转角与两驱动轮运动速度等的关系，如图 10 所示，定义以下变量：

R 为驱动轮半径，m； D 为两驱动轮之间的距离，m； L 为质心到 y 轴距离，m； x_f 为机器人合成位移，m； x_r, x_l 为左右轮位移，m。

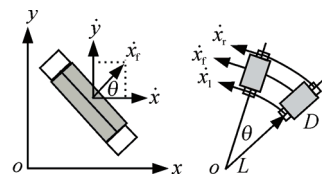


图 10 机器人运动学分析

康复机器人在运行过程中状态变量之间存在如下几何关系，如式 (3)~式 (6)：

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}_f \cos \theta \\ \dot{x}_f \sin \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} (l+D)\dot{\theta} = \dot{x}_r \\ (l+D/2)\dot{\theta} = \dot{x}_f \\ l\dot{\theta} = \dot{x}_l \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_f = \frac{\dot{x}_r + \dot{x}_l}{2} \\ \dot{\theta} = \frac{\dot{x}_r - \dot{x}_l}{D} \end{cases} \quad (5)$$

因此

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \frac{D}{R} \dot{\theta} \\ \frac{2\dot{x}_f}{R} \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\Theta} = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{pmatrix} \quad \mathbf{J} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

则

$$\boldsymbol{\Theta} = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{V} = \begin{pmatrix} D/2R & 1/R \\ -D/2R & 1/R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{x}_f \end{pmatrix} \quad (6)$$

通过进行动力学分析，获得了康复机器人的运动规律及其运动学模型，为控制系统的设计起到很大的作用。

3 控制系统

康复机器人的机械结构为系统开发提供了一个

良好的物理平台，而如何使机械本体实现预计的运动效果，控制显得十分重要。机器人控制系统硬件主要包括控制核心、传感系统、电动机驱动控制系统、供电系统、通信系统组成，整体结构如图 11。

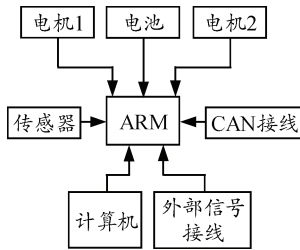


图 11 控制系统总体结构

1) 控制核心电路负责协调控制系统的各个部分。ARM 芯片功能强大、具有丰富的外设、具有高速运算能力，足以胜任机器人的各项控制任务。

2) 供电系统负责为整个机器人提供动力，包括电池、电压转换电路和驱动器等。

3) 传感器系统是机器人控制系统的关键部分，负责获取康复机器人速度、位移和拉力等信息，实时采集、检测和融合数据，为控制算法提供反馈。传感器系统由 2 个动作行为传感器、2 个拉力传感器、光电编码器以及相关处理电路组成。

4) 电机驱动控制系统负责 2 个主电机的驱动控制。机器人需要随时接收患者的动作指令，并将状态信息定期传输至计算机，以供进一步分析，这部分工作由通信系统来完成，采用的是串口无线通信方式。

5) 在通信过程中还采用了 CAN 通信模块以及数据采集模块。CAN 通讯模块由 ARM 芯片内自带的 CAN 控制器和 CAN 总线接收器组成。数据采集模块由 ARM 芯片自带的 ADC 转换模块、数字 I/O 模块和正交编码脉冲电路组成。

机器人控制系统总体工作流程如图 12 所示。

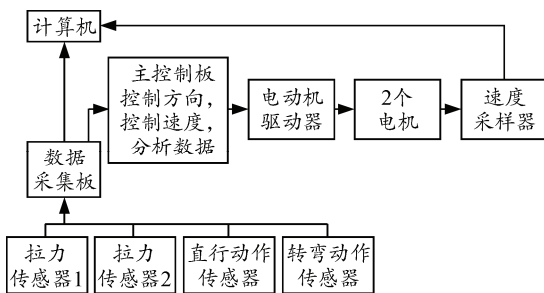


图 12 康复机器人控制示意图

4 下肢康复训练机器人试验样机

康复训练机器人的实际样机如图 13 所示，老人

或偏瘫患者在使用过程中可根据自己的身体状况自行调节速度、方向等。



图 13 康复训练机器人的实际样机

5 结论

笔者所研究的下肢运动康复训练机器人将智能辅助移动系统、虚拟控制系统有机地结合在一起，通过主芯片、拉力传感器、动作行为传感器和 CAN 总线等实现了康复机器人自动前行、自动转弯、防摔倒、防超速的功能，其中装置与人体运动之间的协调配合帮助偏瘫患者进行康复训练，偏瘫患者及老人也对样机进行了试验，证实了具有安全性能好、可靠性高、实用性强、易操作的特点，对于机器人康复设备的开发具有一定的参考价值和现实意义。

参考文献：

[1] 洪震, 丁玎, 江澄川. 神经流行病学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2011: 143-159.

[2] 孙立宁, 何富军, 杜志江. 辅助型康复机器人技术的研究与发展[J]. 机器人, 2006, 28(3): 355-360.

[3] 孟军. 神经促通技术对老年急性脑卒中下肢功能的影响[J]. 中国实用医药, 2010, 5(15): 248-249.

[4] 叶晓琴, 季林红, 谢雁鸣, 等. 康复训练机器人与传统中医康复方法相结合的探讨[J]. 中国康复医学杂志, 2010, 25(8): 781-784.

[5] 王桂茂, 齐瑞, 严隽陶. 中风偏瘫步态的生物力学及其运动学特征分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2007, 11(40): 8169-8172.

[6] Tang, A. Q. Cao, Motion control of walking assistant robot based on comfort. Industrial Robot[J]. An International Journal, 2012, 39(6): 564-579.

[7] Huang Jian, Di Pei, Sekiyama K, et al. Human-walking-intention-based Motion Control of an Omnidirectional-type Cane Robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 285-296.

[8] Shi Fei, Cao Qixin, Leng Chuntao, et al. Based on force sensing-controlled human-machine interaction system for walking assistant robot[C]. 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2010). 2010: 28-33.