

· 康复工程 ·

新型卧式下肢康复训练机器人机械系统设计

方涛涛¹ 韩建海^{1,3} 王会良¹ 尤爱民²

摘要

目的:面向长期卧床的脑卒中偏瘫患者和下肢行走功能虚弱的患者,研究一种卧式下肢康复训练机器人,帮助他们在床上完成下肢的日常康复训练。

方法:在对多种康复训练模式进行分析的基础上,本文设计了一种新型卧式四自由度下肢康复训练机器人。本文详细叙述了四自由度机械腿的机械结构设计和控制系统的构成,并制作出了实验样机。

结果:经过多模式重复实验,机器人动作平稳,正常人上机体验,下肢感觉舒适,关节活动角度与设定角度一致,能够很好地满足多种康复训练模式的要求满足人体关节运动需求。

结论:该卧式康复结构具有可行性,有助于脑卒中患者做下肢早期的康复训练,可以减轻康复治疗师的工作负担。

关键词 下肢;康复训练;机器人;康复训练模式;伺服系统;脑卒中

中图分类号:R496 文献标识码:A 文章编号:1001-1242(2013)-03-0246-05

New horizontal lower limb rehabilitative robot/FANG Taotao,HAN Jianhai,WANG Huiliang,et al//Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2013, 28(3): 246—250

Abstract

Objective: To develop a kind of robot which was geared to the needs of bedridden stroke patients as well as weak for walking patients and help them to accomplish rehabilitation daily training of their lower limbs in bed.

Method: On the basis of having analyzed multiple rehabilitation models, a kind of new horizontal lower limbs rehabilitative robot had been designed. The mechanical leg had four degrees of freedom and the composition of control system was studied in detail. The experimental prototype was performed.

Result: After pattern repeated tests,the following points could be authenticated:The robot moved stably and singularity-free. Healthy person felt comfortable during experience in the robot. The joint angle was consistent with being expected. So the structure could well meet the demand of variety rehabilitation modes.

Conclusion: The horizontal lower limb rehabilitation structure is feasible, and is helpful to do early rehabilitation exercise and reduce the work of physical therapists.

Author's address College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang,Henan Province,471003

Key word lower limb; rehabilitation training; robot; rehabilitation training mode; servo system; stroke

随着脑卒中的诊断治疗水平迅速提高,极大提高了患者的存活率,但仍有80%的存活者有不同程度的功能障碍^[1]。脑卒中偏瘫患者运动功能降低或缺失,并由此引发肌肉和神经元继发性改变,如果没有有效的治疗措施,将产生一系列临床后遗症,而有

些患者自行盲目的训练又易于陷入无效的刻板的协同运动模式,严重影响了患者的生存质量^[2]。医学理论和临床康复实践表明,运动康复训练对恢复中枢神经系统功能,防止肌肉萎缩有重要意义^[3]。近年来出现了一些新的脑卒中康复治疗方法,如:强制

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2013.03.012

1 河南科技大学机电工程学院,河南省洛阳市涧西区西苑路48号河南科技大学2001信箱,471003; 2 河南科技大学第一附属医院康复中心; 3 通讯作者

作者简介:方涛涛,男,硕士生; 收稿日期:2012-08-14

性运动疗法、减重步行、功能性电刺激、运动再学习、运动意想治疗、镜像治疗等。研究表明强制性运动疗法(constraint-induced movement therapy, CIMT)、减重步行及运动再学习方案在促进脑卒中偏瘫肢体运动功能恢复方面具有较好疗效^[4]。

传统的治疗方式既不能保证患者的康复效果,也不能满足社会需求,因此,将康复医学与机器人结合起来的康复机器人技术正逐渐成为国内外研究的热点^[5]。日本筑波大学Cybemica实验室研制出了系列下肢外骨骼机器人HAL(Hybrid Assistive Limb)用于协助步态紊乱的患者行走,它的工作原理是利用肌电信号在控制外骨骼运动^[6]。外骨骼机器人是一种可穿戴机器人,用以增强人的体能、实现瘫痪患者的康复训练及辅助人进行各种操作等^[7]。文中还提出了一种全方位移动机器人^[8],供那些下肢有一定行走能力的人使用。随着科技的进步,运动康复的实现手段正从传统的采用治疗师辅助患者进行运动

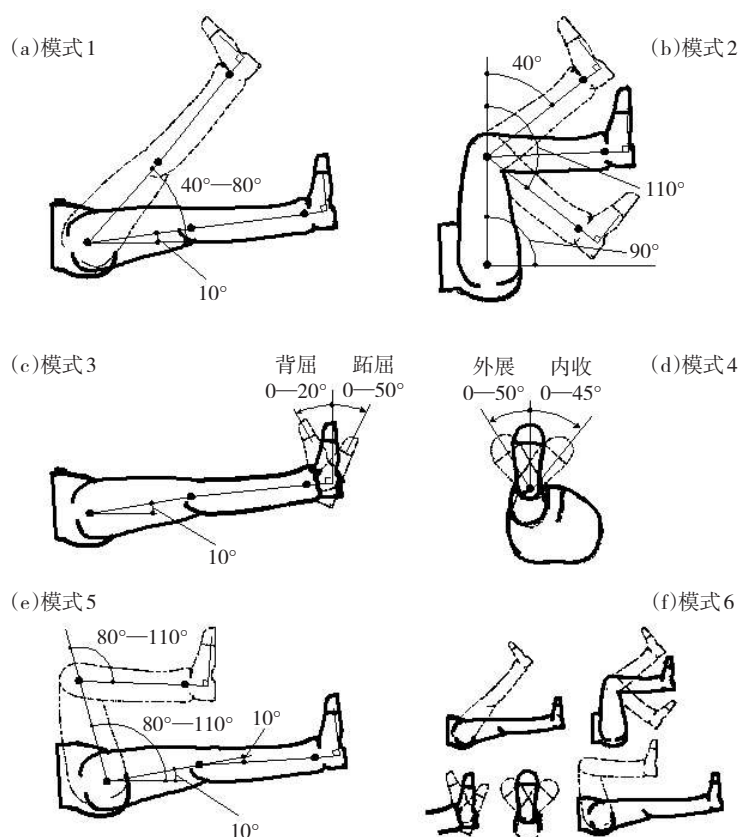
训练转变为采用各种康复器械甚至康复机器人帮助患者进行康复。本文主要面对下肢功能虚弱、长期卧床的患者,研究设计卧式下肢康复训练机器人,通过机器人机械腿来帮助患者在躺卧的情况下完成下肢的康复训练。

1 康复训练模式分析

卧式下肢康复训练机器人主要面对下肢力量虚弱站立困难患者,在躺卧的形式下,实现对患者下肢关节进行适度的被动性康复训练,保持关节的正常活动度,可以防止关节僵化挛缩变形,避免肌肉萎缩,恢复肢体运动功能。根据相关康复护理和中医推拿理论,结合机器人技术的特点总结出6种康复训练模式,如图1所示。

以下对图1中6种康复训练模式进行说明。髋关节角度定义为大腿轴线与身体冠状面之间的夹角,膝关节角度定义为小腿轴线与大腿轴线之间的

图1 六种康复训练模式



夹角。对于踝关节在矢状面内,绕额状轴运动,向前运动为背屈,向后运动为跖屈;在水平面上,绕小腿轴线运动,接近正中面为内收,远离正中面为外展。在实际康复训练中,要根据患者身体的具体情况,选择合适的运动角度。为了保证运动的柔顺性和舒适性,一般要求髋关节与膝关节初始角度在 10° 左右。

模式1:该模式主要训练髋关节,在膝关节与踝关节保持不动的前提下,尽可能的加大髋关节的运动角度,有助于疏通腿部筋络,促进血液循环。该模式下一般髋关节的最大活动范围在 40° — 80° 之间可任意调节。

模式2:该模式主要锻炼膝关节,在保持髋关节与踝关节不动的同时,适当减少或加大膝关节的最小或最大活动角度,有助于膝关节处韧带的拉伸,具有疏通经络的作用。该模式髋关节角度保持在 90° 左右,膝关节最大活动范围在 40° — 110° 之间可任意调节。

模式3:该模式主要锻炼踝关节的背屈和跖屈运动,使踝关节处的韧带和小腿肌肉得到拉伸,疏通脚部经络,促进踝关节处血液循环。踝关节背屈活动范围为 0° — 20° ,跖屈活动范围为 0° — 50° ,可根据需要任意调节。

模式4:该模式主要锻炼踝关节的内收和外展运动,同时带动整个下肢做内旋和外旋运动,有助于活动整个下肢的筋络,改善血液循环。内收活动范围为 0° — 45° ,踝关节外展活动范围为 0° — 50° ,可根据需要任意调节。

模式5:该模式同时训练髋关节与膝关节,使髋关节与膝关节同时屈曲到生理允许的最大角度,达到充分地活动关节和拉伸肌肉的作用。一般髋关节最大活动范围在 80° — 110° 之间,膝关节最大活动范围也在 80° — 110° 之间可任意调节。

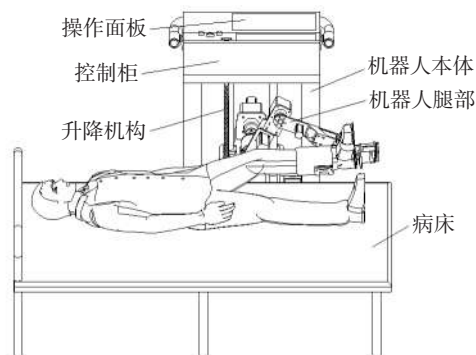
模式6:该模式是以上各个模式的综合,可以顺序执行以上5种模式,使患者的下肢得到全方位的综合锻炼。

2 卧式下肢康复训练机器人总体设计

根据上述康复训练模式的要求,满足不同身高的患者及不同高度病床的要求,同时便于治疗师进行操作,拟人化设计卧式下肢康复训练机器人。该

机器人主要由机械系统和控制系统两大部分组成。机械系统主要由机械本体和机器人腿部组成,腿部安装在机械本体上,可根据病床的高低由升降机构调节到合适的高度。控制系统由计算机、运动控制卡和液晶显示屏等组成,安装在控制柜内,见图2。

图2 机器人总体方案



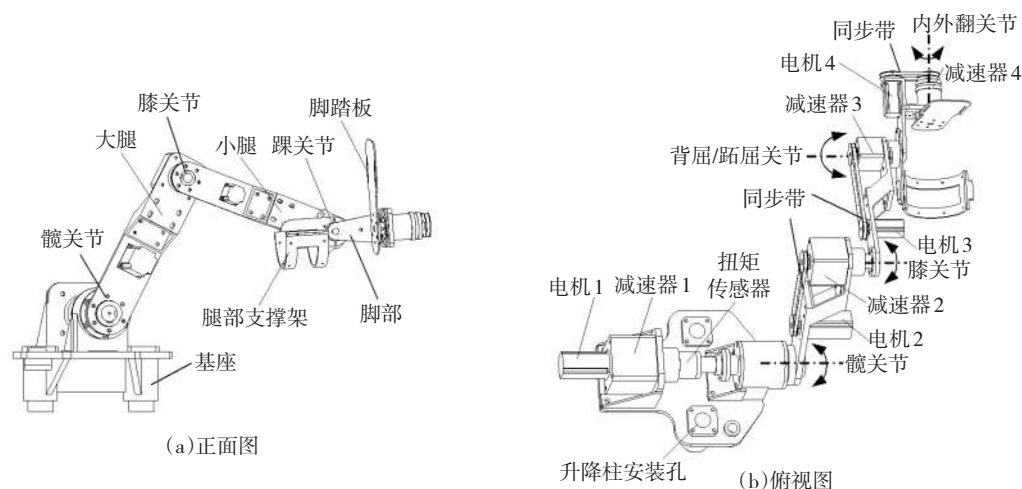
2.1 机器人腿部机构设计

机器人腿部是一种外骨骼机械机构,通过施加力的作用,改变患者下肢神经、肌肉系统功能特性的直接作用于患者的体外辅助助力装置。其作用是代替治疗师的手臂推动患者腿部做某种模式的康复训练运动。合理设计仿生机械腿,满足穿戴舒适、结构紧凑、操作灵活、柔软安全等要求,对卧式下肢训练康复机器人研究至关重要。

设计的机器人腿部机构由大腿、小腿和脚部三部分组成,共有髋关节、膝关节各1个,踝关节(跖屈/背屈和内收/外展)2个的四自由度,每个自由度都有一个交流伺服电机驱动,如图3所示,其中图(a)为机械腿部机构正面图,图(b)为机械腿部机构俯视图。在图3中,电机1与减速器1直连,安装在基座上,实现髋关节的旋转运动。为了降低重心和减小关节处的安装尺寸,后面三个电机与减速器的连接均采用带传动的连接方式。电机2通过带传动驱动减速器2旋转,实现膝关节的摆动。电机1与电机2的协调动作,完成对人体踝关节轴线在矢状面内的轨迹控制。

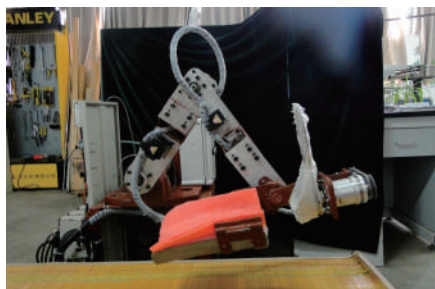
减速器3与减速器4十字交叉安装,电机3通过带传动驱动减速器3旋转,实现踝关节的跖屈/背屈运动,同时用来控制脚和小腿在运动过程中的姿态。电机4通过带传动驱动减速器4旋转,实现踝关

图3 四自由度机械腿部机构示意图



节的内收/外展运动,同时用来控制下肢的内旋和外旋运动。加工制作的实验样机如图4所示。

图4 加工制作的实验样机照片



2.2 系统工作原理

系统工作时,将患者的下肢小腿末端放着在腿部支撑架上,脚底板贴在脚踏板上,并用绷带分别固定。然后按照预先选定的康复训练模式,由电机驱动外骨骼机械腿运动,带动患者下肢按照一定的运动轨迹进行活动,达到康复锻炼下肢关节的目的。

在结构设计上,卧式下肢康复训练机器人适用于左右两腿。图3所示机构状态适用于患者左腿康复训练,当需要做右腿康复时,以大腿轴心到地面的垂线为对称轴,只需要控制电机将各个关节旋转到其相对位置,脚固定板旋转180°,将腿部支撑从支撑架上拔出,然后将另一端耳朵插入支撑架即可。另外,机器人工作时与人体有一定的相对位置要求,为适应不同高低的病床,本机器人的腿部基座安装

在两根竖直的导向柱上,可以根据需要通过丝杠调节其工作位置。

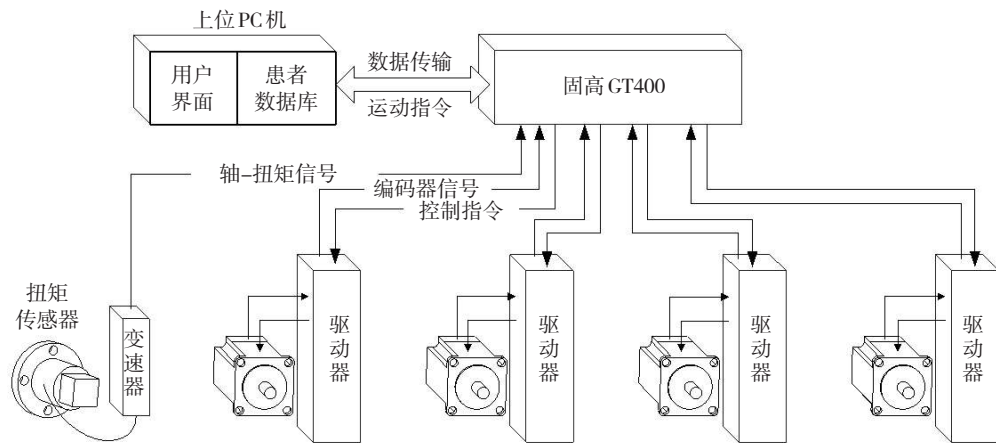
3 机器人控制系统

通过对外骨骼机械腿部的设计与分析,并对现行控制系统的比较分析,该机器人的控制系统采用了PC运动控制卡的上、下位机结构的开放式机器人控制系统设计方案,通过PCI总线实现两者之间的通讯,如图5所示。该控制系统将PC机的信息处理能力和开放式的特点与运动控制卡的运动轨迹控制能力有机地结合在一起,具有信息处理能力强,开放程度高,运动轨迹控制准确,通用性好的优点。

选用的GT-400(深圳固高科技公司)运动控制卡是一款能够输出脉冲和模拟量两种控制信号的高性能四轴运动控制卡,其核心部件为具有较高逻辑计算能力的FPGA模块和具有强大数字信号处理能力的DSP模块,4轴步进/伺服运动控制,带有8路A/D数据采集通道,单路最高采样频率为50kHz,另外包括56路数字I/O线(包括8路正负限位,4路零点触发,4路伺服报警等,可以有效防止因机器人动作异常而伤害患者)。通过模拟量数据采集转换通道,可以实时采集大腿轴扭矩传感器的扭矩信号。理疗师可以通过观察机器人大腿轴力矩变化,了解患者的康复情况,同时也可以判断机器人工作时是否用力过大,从而可以防止扭伤患者的情况发生。

电机是日本安川公司的一款通用型交流伺服电

图5 卧式下肢康复训练机器人控制系统硬件结构图



机,具有易控制、体积小、过载能力强等优点,其最高转速可达6000r/min,在其伺服驱动器三个闭环控制系统下,在其额定负载和转速内可较好地实现无级变速,配备的13位增量型光电编码器,其精度远远满足康复机器人的需求。

采用了电流、速度为内环,位置为外环的三层半闭环的机器人关节运动伺服系统,电流环、速度环分别使用驱动器内置的P和PI算法,位置环使用GT-400的PID和前馈控制算法。在vc++程序开发平台编写系统运动控制程序,通过调用运动控制卡函数库中专用程序指令,向运动控制卡发送运动指令,GT-400将运动指令转换成模拟量控制信号给驱动器,驱动器驱动电机按照预定的轨迹协调运动。

4 小结

卧式下肢康复训练机器人系统是一个高度集成的机电一体化系统,本文对整个系统的硬件配置及机械结构的设计分析做了详细说明,提出了一种新型的卧式下肢康复方式,充分体现了机器人与康复

医学结合这一理念,现在硬件平台已经搭建完毕,目前调试基本正常,符合预期目标。下一步将对本系统的柔性化控制进行深入的研究,最终达到人与机的完美结合。

参考文献

- [1] 王万利.脑卒中偏瘫患者接受系统康复护理干预对肢体运动功能及日常生活能力的影响[J].中国临床康复,2005,9(21):14—15.
- [2] 张丽霞,孟殿怀,沈光宇.康复训练及针灸对偏瘫早期患者下肢运动功能恢复的作用[J].中国康复医学杂志,2010,25(12):1179—1181.
- [3] 张立勋,李长胜,刘富强.多模式下肢康复训练机器人的设计与实验分析[J].中国康复医学杂志,2011,26(5):464—466.
- [4] 吴毅,吴军发.脑卒中康复干预的基础研究和临床研究[J].中国康复医学杂志,2011,26(8):701—703.
- [5] 孙洪颖,张立勋,王岚.卧式下肢康复机器人动力学建模及控制研究[J].中国康复医学杂志,2010,20(7):733—738.
- [6] 饶玲军,谢叻,朱小标.下肢外骨骼行走康复机器人研究与设计[J].机械设计与研究,2012,28(3):24—26.
- [7] 印松,殷跃红.下肢康复用并联式外骨骼膝关节的设计[J].高技术通讯,2009,19(8):839—843.
- [8] 杨俊友,白殿春,王硕玉.全方位轮式下肢康复训练机器人轨迹跟踪控制[J].机器人,2011,33(3):314—318.