

· 康复医学工程 ·

一种新型辅助起立康复机器人的设计及逆运动学分析*

姜洪源¹ 马长波¹ 李姗姗¹

摘要 目的:为帮助截瘫患者完成站立功能,这里设计了一种新型的三自由度辅助起立康复机器人,可达到辅助人体起立的目的。**方法:**利用红外线光学测量法得到的实验数据进行逆运动学求解,再通过 ADAMS 对其位移、速度、加速度的特性进行分析。**结果:**仿真结果符合预期指标,验证了设计的合理性。**结论:**此康复设备的设计可为其他起立康复器械的实际应用和控制提供设计依据。

关键词 康复;起立;运动学;ADAMS 仿真;机器人

中图分类号:R496 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-1242(2009)-02-

起立是日常生活中很普通但是必须的一项活动,是人们进行其它活动的前提^[1]。老年人和下肢残疾者由于肢体疼痛、肌肉虚弱、运动控制功能的部分损失和关节的物理缺陷等不能完成这一动作。起立运动的困难会导致个体不能独立生活,被长期禁锢在床上或轮椅上,难以实现生活自理。随着老龄人口和各种事故、疾病导致下肢残疾患者的增多,尤其在汶川地震中导致肢残的人多达 5 万多,人们对医疗康复的要求越来越高^[2],辅助起立机器人越来越引起人们的重视。

目前国内所存在的辅助起立器械大都是基于被动原理的多功能电动起立床和附加有辅助起立功能的智能轮椅,还少有机构涉足辅助起立康复领域。本文所研究的辅助起立康复训练机器人是一个人机交互式系统,在设计时充分考虑了结构的合理性、舒适性和作为康复器械的清洁性,并可在位置控制和力控制两种模式下辅助人体完成起立动作。

1 机器人本体结构设计

1.1 设计要求

起立困难主要是由于下肢的关节力矩不足。研究表明,提升座椅的高度和加入上肢支撑都能极大的减小下肢关节力矩^[3]。起立动作过程中,下身重量要通过完好的躯干传递给上肢,但若完全依靠上肢来起立,长期下去会对上肢关节造成危害。通过方案的对比发现,人以跨骑的方式坐在机器人的终端即坐垫上,并辅以相应的上肢辅助支撑框,是一种稳定而有效的系统。因此本文所要设计的机器人结构要满足以下要求:①为使人体以自然的方式实现起立,要求结构不约束人的上肢和下肢,即在起立过程中人的上肢和下肢是自由的;②座椅的位置要在人的两腿之间,人体起立时两腿间距非常小,要求横梁的宽度有严格的限制;③提供上肢支撑框;④要使起立过程达到一定的速度和加速度;⑤作为康复机器人,应该保证无污染和清洁,则要求选用电机驱动方式;⑥要具有结构简单,质量轻、使用舒适的特点。

1.2 结构选择和设计

以起立过程中人体的臀部髋关节处为研究对象,起立和向前的动作导致身体重心的前移,此过程需要有向上的提升运动。因此系统至少有两个自由度。同时对下肢残疾者而言,座椅在起立过程中要始终保持水平,所以系统共有三个自由度。将机器人设计成跷跷板式可以实现人体的上肢和下肢有足够自由的空间,同时限制横梁的宽度,座椅为标准的自行

车坐垫,可以保证舒适度。机器人的 PRO/E 实体装配图,如图 1 所示;三个自由度的实现分别是:臀部的提升运动由电机 2 通过减速器驱动,通过齿轮和齿圈的啮合传动使横梁在径向平面内转动来实现。电机 1 驱动滚珠丝杆带动与螺母固连的滑块沿导轨作直线运动,坐垫通过铰链与滑块固连,实现臀部的前移,达到调节重心的目的。气缸 1 和气缸 2 的同步运动使坐垫以坐垫铰链的销轴处为回转中心在径向平面内转动,即气缸 1 的进气阀与气缸 2 的排气阀相连,气缸 2 的进气阀与气缸 1 排气阀相连,气缸 1 的进气量为汽缸 2 的排气量,气缸 2 的排气量为气缸 1 的进气量,两气缸的同步运动使运动过程中坐垫始终保持水平。

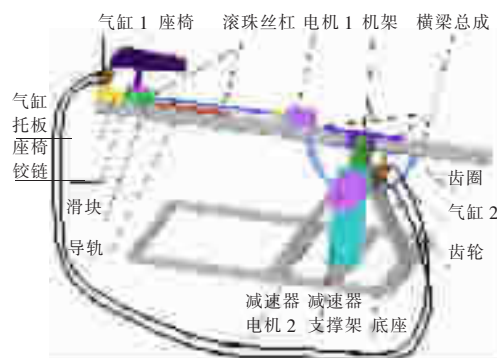


图 1 PRO/E 实体装配图

2 逆运动学仿真

2.1 人体起立轨迹

机器人逆运动学问题是已知机器人终端的位置、姿态、速度、加速度,求出能实现这些目标的关节变量的位置、速度和加速度^[4]。

假设在起立过程中,人体以矢状面为对称,两部分的运动是一致的。因此可以在平面内研究起立过程。当人以机器人辅助起立时,座椅处的运动轨迹与人的髋关节的运动轨迹是一致的。用健康人起立时髋关节处的运动轨迹做为机器人的参考轨迹^[4-5]。通过红外线光学测量法记录健康人起立过程中髋关节的各点位置,坐垫的初始高度与轮椅的高度大致相

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50575053)

1 哈尔滨工业大学机电工程学院,哈尔滨, 150001

作者简介:姜洪源,男,教授,博士

收稿日期:2008-09-01

同。综合考虑临床试验对象的代表性,图2为年龄24岁,身高174cm,体重77kg的健康男子的快速起立过程的髌关节处轨迹。通过和同样年龄、身高的下肢残疾者的实验数据对比,可知站立所需的辅助力矩大小。

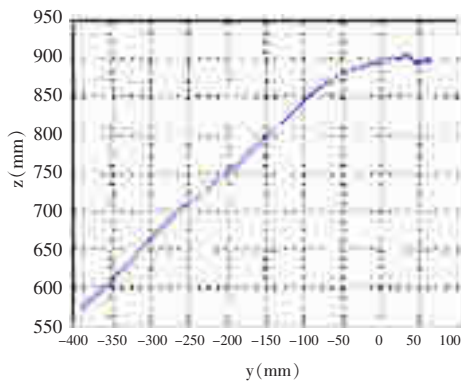


图2 髌关节处运动轨迹

2.2 运动学逆解

以人体额状轴方向为y轴,垂直轴方向为z轴,以脚后跟处为坐标原点,对轨迹进行逆运动学分析,如图3所示。

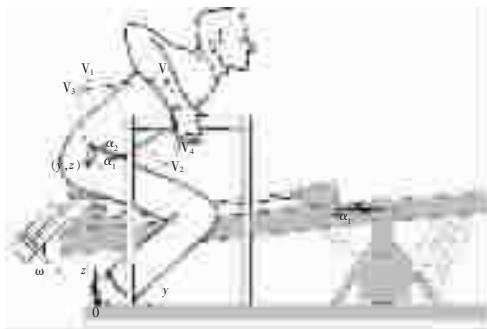


图3 起立过程示意图

v_1, v_2 为人体起立过程中髌关节处竖直向上和水平向前的速度,两速度的合成为 v 。 v_3 为坐垫处横梁转动的线速度, v_4 为坐垫沿导轨滑动的速度。横梁与水平方向的角度为 α_1 , α_2 为 v_2 与 v 之间的夹角,丝杠的导程为 ρ 。根据平行四边形法则进行速度的合成与分解,得:

$$\begin{cases} v_3(t) = v(t) \sin[\alpha_1(t) + \alpha_2(t)] \\ v_4(t) = v(t) \cos[\alpha_1(t) + \alpha_2(t)] \end{cases} \quad (1)$$

横梁以回转中心转动的角速度 ω , 则:

$$\omega \sqrt{y^2(t) + z^2(t)} = v_3(t) \quad (2)$$

横梁转过的角度:

$$\alpha_1 = \omega t$$

由图2知:
$$\alpha_2 = \arctan \frac{v_1(t)}{v_2(t)}$$

由上述公式可求得所需的两个电机的转速 ω_1, ω_2 :

$$\omega_1 = 200 \times \omega = \frac{200 v_3(t)}{\sqrt{y^2(t) + z^2(t)}} = \frac{200 v(t) \sin \left[\omega t + \arctan \frac{v_1(t)}{v_2(t)} \right]}{\sqrt{y^2(t) + z^2(t)}};$$

$$\omega_2 = v_4 / \rho = v(t) \cos \left[\theta_1(t) + \theta_2(t) \right] / \rho = v(t) \cos \left[\omega t + \arctan \frac{v_1(t)}{v_2(t)} \right] / \rho$$

用 simulink 模块求解 ω_1, ω_2 , 得到与时间 t 的关系曲线, 见图4所示。

2.3 ADAMS 仿真

ADAMS 软件是美国 MDI 公司开发的机械系统动力学仿真软件,它使用交互式图形环境和零件库、约束库、力库,创建完全参数化的机械系统几何模型,其求解器采用多刚体系统动力学理论中的拉格朗日方程方法,建立系统动力学方程,对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析,输出位移、速度、加速度和反作用力曲线^[6]。用 MECHPRO 软件可将 PRO/E 模型导入 ADAMS。简化起见,可将机器人各部分定义为刚体,底座与大地(ground)固连,对其它各部分施加约束副,在电机主轴、座椅铰链销轴和滑块处分别施加驱动。驱动以样条函数的形式输入,分别为: AKISPL (time, 0, SPLINE_1, 0), -AKISPL (time, 0, SPLINE_2, 0), -AKISPL (time, 0, SPLINE_3, 0)。

将仿真时间设定为实验室模型起立所需时间,图5为仿真过程截图,图6、图7为坐垫质心水平方向y、竖直方向z的位移,图8—11,分别为y、z方向的速度加速度曲线。

由上图各曲线可知,给定机器人终端某一参考轨迹,在位置控制模式下,它可以准确地实现预定的位移、速度和加速度,帮助人体完成站立动作。力控制模式下的仿真思路与此大致一致。

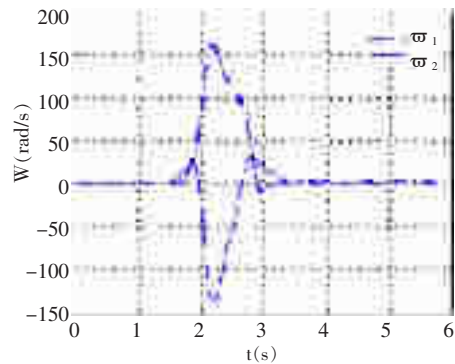


图4 电机转速曲线

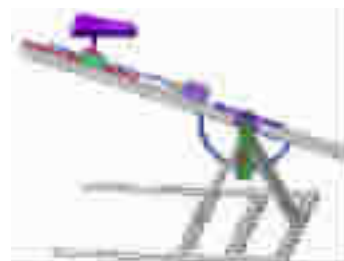


图5 在 t=2.4069s 时的机器人模型状态图

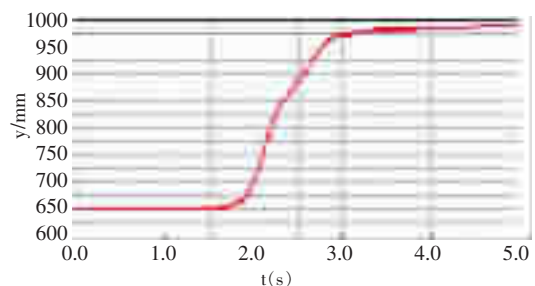


图6 y 方向位移

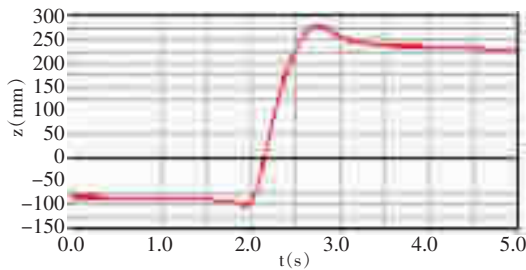


图7 z方向位移

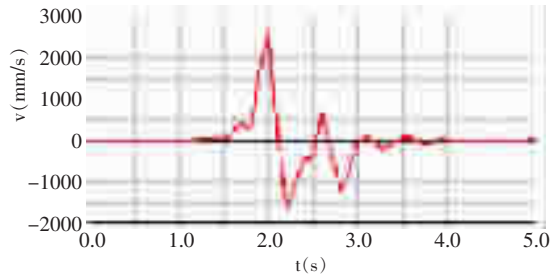


图9 y方向加速度

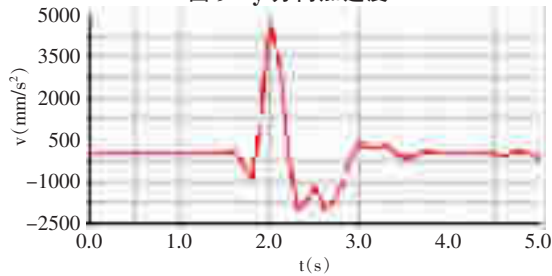


图11 z方向加速度

3 结论

本研究从人体起立运动的要求出发,设计了一种新型的三自由度起立康复机器人,采用人机交互的方式辅助下肢残疾者和老年人完成起立动作。通过逆运动学分析及对此的ADAMS仿真,在位置控制和力控制两种控制模式下,此起立康复机器人可以跟踪预定参考轨迹,为其他康复器械的控制

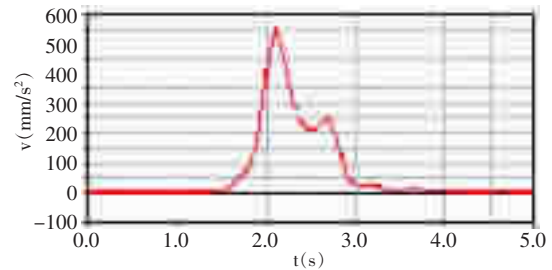


图8 y方向速度

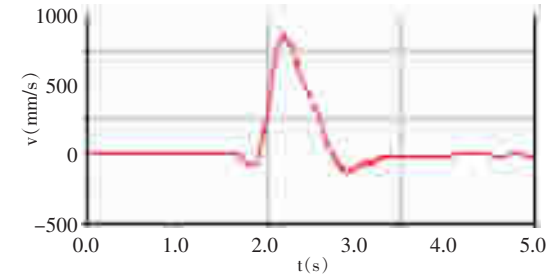


图10 z方向速度

提供了新的思路。

参考文献

- [1] Kamnik R, Bajd T Standing-up robot: an assistive rehabilitative device for training and assessment [J]. Journal of Medical Engineering & Technology, 2004, 28(2): 74—80.
- [2] 张付祥,付宜利,王树国.康复机器人研究进展[J].河北工业科技,2005, (3):101—104.
- [3] 蔡自兴. 机器人学 [M]. 第1版. 北京: 清华大学出版社, 2005. 97—105.
- [4] 程方,王人成,贾晓红,等.减重步行康复训练机器人研究进展[J].中国康复医学杂志,2008,23(4):366—368.
- [5] 程方,王人成,贾晓红,等.减重步行训练机器人步态规划方法的研究 [J]. 中国康复医学杂志,2008,23(10):916—918.
- [6] 陈立平,张云清,任卫群,等. 机械系统动力学分析及ADAMS应用教程 [M]. 北京: 清华大学出版社,2005.232—236.

(上接 161 页)

本研究中指标体系和审评细则是经过调查研究和反复论证、广泛征求专家意见的基础上形成的。在调查过程中,调查对象对调查指标的内容的理解没有不一致的情况,说明各指标符合专家和公众的共识和认同。因此,本指标体系的表面效度较好。

经过对北京市 10 个区县的问卷调查,按照指标审评细则评分,得到 10 个区县的评分值并进行排序。各区县得分、排序情况与康复管理专家访谈所了解到的各区县康复工作总体情况基本相符,说明康复管理性指标得到多数专家的认同,其内容效度较好。

参考文献

- [1] 国务院办公厅.转发卫生部等部门《关于进一步加强残疾人康复工作意见的通知》(国办发 [2002]41 号)[J]. 中国康复医学杂志,

2002,17(6):324—325.

- [2] 郭丽云,戴红,侯淑芬,等.残疾人“人人享有康复服务”评价指标体系的研究[J].中国康复医学杂志,2007,22(4):422—425.
- [3] 郭丽云,戴红,刘洋.残疾人康复服务评价指标研究进展[J].中国康复医学杂志,2007,22(5):562—565.
- [4] 沈艳红,常文虎,彭迎春.如何测量问卷的信度[J].中华医院管理杂志,2004,20:383—384.
- [5] 张文彤.SPSS11 统计分析教程(高级篇).北京:北京希望电子出版社, 2002.213—217.
- [6] 张力为. 信度的正用与误用 [M]. 北京体育大学学报, 2002,25:348—350.
- [7] 陆守曾, 主编. 医学统计学 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.219—222.
- [8] 张力为. 效度的正用与误用 [J]. 北京体育大学学报, 2002,25(4):493—496.
- [9] 孙振球,徐勇勇. 医学统计学 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2002.485—495.