

基于接触力信息的穿戴型步行助力机器人研究^①

陈峰^{②*} 余永^{**} 葛运建^{**}

(*南通大学电气工程学院 南通 226019)

(**中科院合肥智能机械研究所 合肥 230031)

摘要 利用人-机交互信息对穿戴型下肢助力机器人(WPAL)进行了控制研究。通过对应于人体的三维运动在装置与人体下肢间适当配置测力点,根据各测力点感受到的人体运动时的多维力信息,完成了下肢运动预判。同时,基于接触力信息,提出了假想柔顺控制方法,该方法通过调节各测力点的假想质量、阻尼系数和弹性系数来减小人体感受到的运动强度,达到为人体下肢运动提供助力支持的目的。

关键词 助力机器人, 运动预判, 假想柔顺控制

0 引言

可穿戴型助力机器人的研究最早出现于美国^[1-3],其次是日本^[4-7]。美国主要从军事应用角度出发,麻省理工学院、SARCOS 研究公司和 Millennium Jet 等研究院校或公司先后获得美国国防高级研究计划局(DARPA)经费资助。而在日本,这项研究更具有商业化色彩。同时,英国^[8]、新加坡^[9]等国的研究人员也正在从事类似的研究工作。在我国,中科院合肥智能机械研究所^[10]在国家自然科学基金的资助下,率先对步行可穿戴型助力机器人进行了系统的研究。根据国外的研究成果或研究方案,穿戴型助力机器人根据助力对象的不同可分为两类:(1)直接式:直接给使用者提供力支持,如下肢助力、背部助力等,HAL、Wearable Walking Helper-1 便是此类助力机器人;(2)间接式:分担使用者的劳动负荷,诸如背负、搬运的重物等,从而达到减轻使用者劳动强度的目的,如 BLEEX、Power Assist Suit。本文研究的是一种可穿戴型下肢助力机器人(wearable power assist leg, WPAL),该机器人属于第一类。WPAL 采用人-机接触力作为人体下肢运动预判及控制策略的依据,即通过人-机运动时的多维力导向信息进行人体运动辨识及假想柔顺控制,穿戴方便。它与国外典型可穿戴型助力机器人不同,比如,HAL 将人体表面肌电信号作为人体运动的主要检测信息,并采用力矩控制方法,其不足表现为任何一次的

穿戴都会涉及到电极位置的重新确定,汗液、体温等因素也会影响每次测量的一致性;BLEEX 采用其动力学模型作为其控制策略并通过装置中内置的多种传感器(位置、速度、力等)提供相关信息,其外围尺寸相对较大。

1 助力机器人体系结构设计

1.1 自由度的确定

步行运动是最常见人体运动,即使是在移动的动作中,也属于自动化程度特别高的动作之列。在设计步行助力机械时,以完成步行的基本功能为前提,非完全仿生。就人体单腿而言,髋关节、膝关节和踝关节共有 7.5 个自由度。步行是高度自动化的运动,为了进行复杂协调动作,整个机器系统需要多个自由度。自由度的选择与所设计的机器人将要实现的功能和其应用对象密不可分,步行助力机器人采用拟人式结构,其髋关节、膝关节及踝关节具有相应于人体下肢各关节功能。步行助力机器人机械结构主要包括腰带、髋关节、大腿连杆、膝关节、小腿连杆以及金属脚底 6 个部分组成,所设计的步行助力机器人每支辅助机械腿上拥有 6 个自由度:髋关节 3 个;膝关节 1 个;踝关节 1 个(如表 1 所示)。另外,作为实验样机,充分考虑了一些参数的不确定性,如不同人的腰围大小及大小腿长短不相同,在设计腰带及大、小腿连杆时充分考虑了其可变性,即腰围、大、小腿长度适度可调。

^① 国家自然科学基金(60575054)和南通大学自然科学基金(07Z048,08R10)资助项目。
^② 男,1977年生,博士,讲师;研究方向:信息获取,特种机器人;联系人,E-mail:hardwk@163.com
 (收稿日期:2008-01-14)

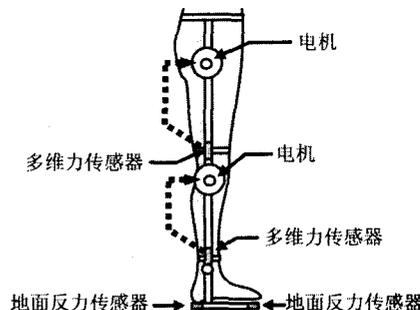
表 1 关节活动度值

关节名称	髋关节		膝关节		踝关节		拇趾跖趾关节			
	屈	由伸至屈	外展	内收	旋内	旋外	背屈	跖屈		
平均值(°)	120	10	45	30	45	45	20	50	45	70

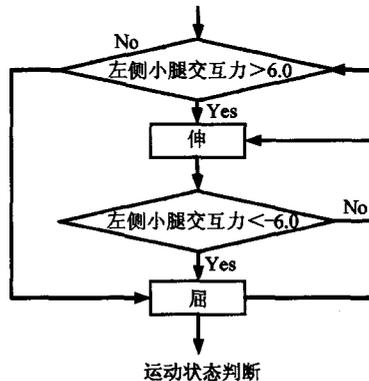
1.2 驱动关节确定

设计的步行助力机器人的单侧助力机械腿拥有 6 个自由度, 整个步行助力机器人共拥有 12 个自由度, 如果对每个自由度都进行驱动控制, 一方面增加能耗, 另一方面控制系统将会变得过于复杂。因此, 只针对那些与行走密切相关的活动自由度采用外部驱动模式。众所周知, 人在行走时, 髋关节的屈/伸运动和膝关节的屈/伸运动是保证人能正常行走的前提, 并且两者所消耗的能量最多, 踝关节的屈/伸运动对于行走的实现也很重要。但是, 由于踝关节处于助力机械腿的末端, 其所需能量较小, 因此, 在踝关节处不考虑驱动装置。另外, 髋关节的外展/内收有调整平衡功能, 旋内/旋外有改变行进方向之功能, 而两者所消耗能量相对较少, 而且为了改善行走的舒适性, 增加了拇趾跖趾活动关节。总之, 除为实现髋关节的屈/伸和膝关节的屈/伸运动功能而需要安装驱动装置外, 其余均不考虑使用外驱动装置。

机交互信息到使用者运动意图的推理(如图 1b 所示)。这样便舍弃了原有的高速摄影机、计算机-录像解析系统以及通过捆绑于人体上的肌电传感器用于检测人体运动信息的方法。同时, 还可以把具有多个自由度的机器人控制问题等效为几个独立的控制问题。另外, 地面反力传感器作为预留的设计部分, 将在今后的研究中, 与人-机间的交互传感器一同组成一个实时分析预判使用者运动意图的传感器感知网。



a. 测力点配置图



b. 小腿运动状态判断

图 1 人-机交互及人体运动预判

2 基于力信息的运动预判

步行助力机器人与使用者通过束带紧密结合在一起, 形成一个高度自动化的人-机一体化系统。首先, 系统要实时地获得使用者的运动信息, 并且不受空间方位的限制, 采用录像解析系统和光电运动检测系统显然不适合。另外, 由于表面肌电信号的检测受表面电极放置位置、皮下脂肪厚度、体温变化以及人体汗液等不确定因素的影响, 对于步行助力机器人而言, 任何一次的穿戴都会涉及到电极位置的重新粘贴, 这必然影响每次测量的一致性, 而且, 对于不同的使用者来说, 身体状况也存在差异, 这些都会影响系统的实际运行效果。因此, 采用一种简捷有效的运动信息检测系统是整体研究中的必要环节。

这里, 我们考虑对应于人体三维运动在装置和人体间适当地配置测力点(如图 1a 所示), 另外一侧的结构同样如此, 利用实验室在机器人传感器方面的研究成果, 根据各测力点感受到的人体运动时的多维力导向信息, 根据事先设定的参考值, 完成由人

3 助力机器人系统的综合与实验

可穿戴型助力机器人系统中所使用到的硬件部分主要包括伺服电机、伺服放大器、传感器组及计算机等基本模块组成。计算机是整个控制系统的核心, 其任务是完成人-机交互信息的采集、分析处理及最终决策信息的形成, 并完成控制命令的生成, 实现对助力机器腿的控制。

3.1 基于假想质量、假想弹性系数的模型分析

人在行走时,主要是通过髌关节及膝关节的屈/伸来实现其行走功能,因此人的双腿的摆动多分布于矢状面内。助力机器人的助力机器臂可以作为一个开式运动链,它是由一系列连杆通过转动关节串联而成的。开链的一端固定在腰带上,末端安装有特别制作的金属鞋底。其中髌关节及膝关节屈/伸运动由伺服电动机驱动,关节的相对运动导致连杆的运动,使助力臂完成类人的下肢步行动作。

步行助力机器人的最终运动是通过位于使用者与装置间的各测力点感受到的人体运动时的多维力信息来完成自主运动,不需要任何操纵台或外部控制设备。众所周知,当物体相互接触时必然发生一

些可能肉眼无法察觉的变化,而力最能说明物体间相互作用的程度。由于使用者与助力装置直接接触,因此,两者之间的交互信息是分析解决问题的一个途径。

人-机混合简化模型如图 2 所示,假设系统是刚性的,质量是 m , k 和 c 分别表示弹性系数和阻尼系数。图中所示的人体下肢与助力臂的模型中,忽略了由摩擦力和机械传动阻力引起的未知干扰,模型的运动方程为:

$$f = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (1)$$

式中: f —人-机交互力(N); m —质量(kg); x —位移(m); \dot{x} —速度(m/s); \ddot{x} —加速度(m/s²); k —弹性系数; c —阻尼系数。

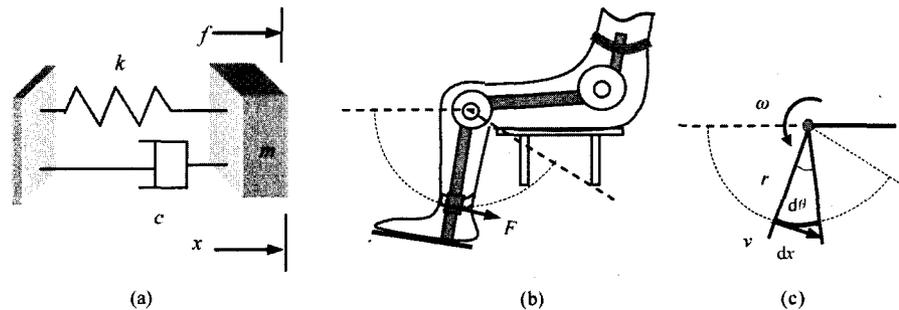


图 2 人-机简化模型及基本结构分解图

根据运动学及数字控制的相关知识,有以下等式成立:

$$\dot{x} = v_n, \quad \ddot{x} = \frac{v_{n+1} - v_n}{dt} \quad (2)$$

式(1)可表达如下:

$$f_n = m \frac{v_{n+1} - v_n}{dt} + cv_n + kdx_n \quad (3)$$

由于整个控制系统以一台 PC 机为核心,上式中的 dt 可以近似地认为是实际控制系统中的采样控制周期 T ,即 $dt = T$ 。因此有下式成立:

$$\begin{aligned} \omega_{n+1} &= \frac{T}{mr}(f_n - c\omega_n r - kr\omega_n T) + \omega_n \\ &= \frac{T}{mr}f_n + (1 - \frac{cT}{m} - \frac{kT^2}{m})\omega_n \end{aligned} \quad (4)$$

在上式中,除了外骨骼装置的重量外,人体下肢的重量也应考虑在其中,即把人体下肢是步行助力机器人系统的一部分。这样,式(4)可改写为

$$\begin{aligned} \omega_{n+1} &= \frac{T}{(m+M)r}(f_n - c\omega_n r - kr\omega_n T) + \omega_n \\ &= \frac{T}{(m+M)r}f_n + (1 - \frac{cT}{(m+M)} - \frac{kT^2}{(m+M)})\omega_n \\ &= \alpha f_n + \beta \omega_n \end{aligned} \quad (5)$$

式中:

$$\alpha = \frac{T}{(m+M)r}, \quad \beta = 1 - \frac{cT}{(m+M)} - \frac{kT^2}{(m+M)}$$

其中, m 和 M 分别对应连杆质量和相应的人体下肢段质量。式(5)所确立的力与角速度间的对应关系式是建立在假想质量、假想弹性系数和假想阻尼系数模型之上,它是形成系统伺服规则的重要依据。事实上,要准确获取模型中的人体下肢各段质量 m 、弹性系数 k 与阻尼系数 c 的值较为困难。为了完成助力的功能,系数 α 、 β 可通过试验比较的方法进行验证性选择。

3.2 实验结果

该实验是在没有脚底反力信息的情况下,利用人-机间的二维力传感器进行的人-机行走实验。除使用者手拿一个紧急停止按钮外,整个过程由计算机独立控制,无任何操纵杆或控制面板。图 3 是人-机混合系统控制框图。实验中,根据力的方向与速度方向的关系,我们把系统的每个往复运动分为过渡和助力两个阶段,通过改变系数 α 、 β , 针对膝关节即小腿助力进行实验,记录曲线如图 4 所示。由

图可以看出,对应不同的 α 、 β , 其过渡与助力阶段所占时间将发生变化,即助力百分比将发生改变。从实际角度考虑,希望助力阶段所占时间尽可能的长,从而将给使用者提供更多的力支持,如 5b 和 5d 图所示。由于系数 α 、 β 与使用者质量、人-机接触处的物理参数有关,要确定最优的 α 、 β 系数有待进一步探讨。到目前为止,我们仅仅根据人体质量等参数预估的方法事先确定几组系数,通过实验后选定其中一组。

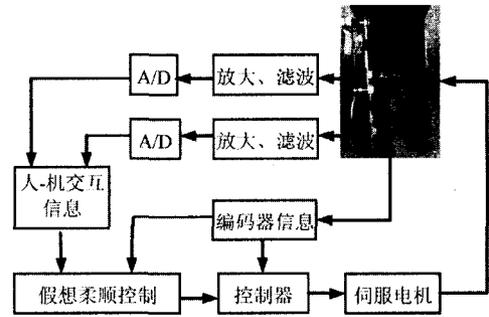


图3 系统控制框图

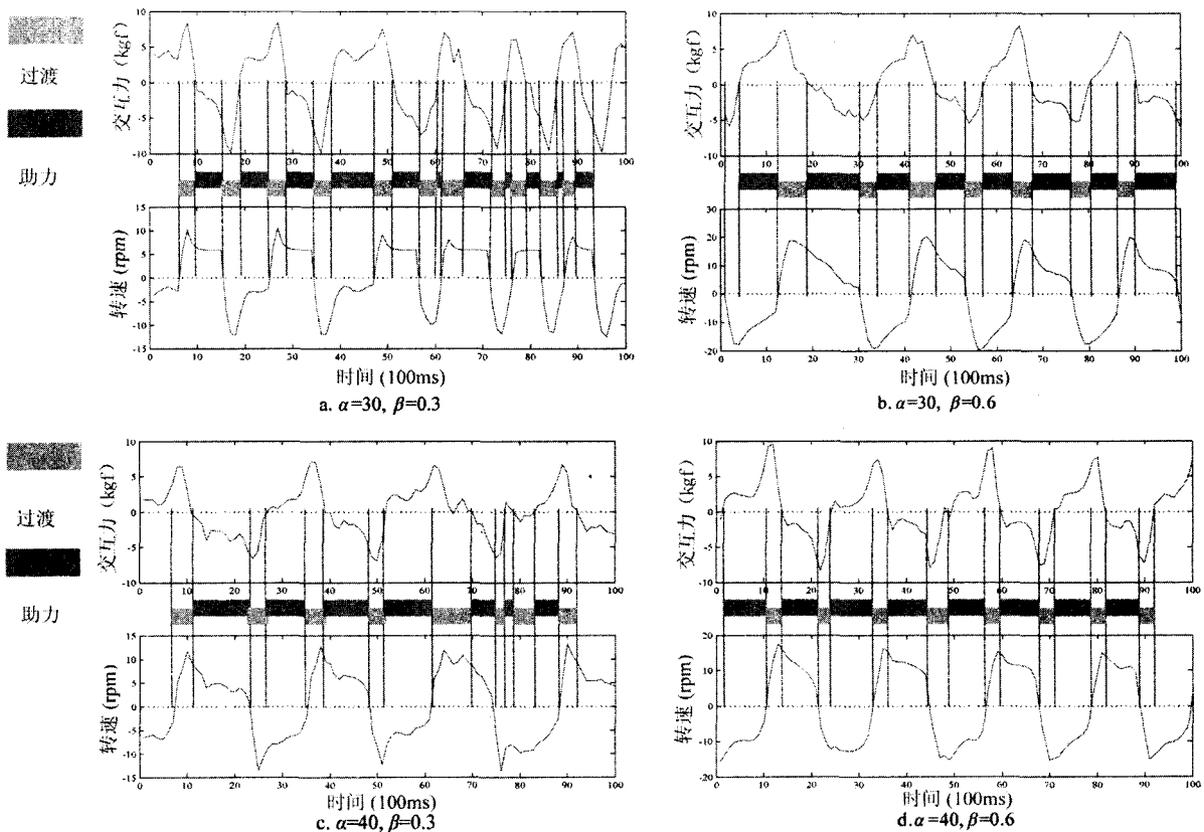


图4 响应曲线

实验也有不尽完善之处:首先,该装置是刚性体,而使用者是柔性体,助力装置与使用者通过金属腰带、大腿束带、小腿束带、金属脚底连在一起,行走过程中,装置与人体各段重心将在一定范围内作上下运动,将导致外骨骼助力装置与使用者下肢间产生一定的上下错位现象,由于传感器间耦合的存在,使得传感器的输出因运动而产生接触力变化;其次,传感器的零点飘移、重复性不理想等也影响实验的效果。

4 结论

利用传统的力矩补偿法(如 BLEEX、LEE)进行

步行运动过程中的助力支持,须对整个运动外骨骼的动力学进行计算,其线性解耦复杂,计算量大。通过提出的假想柔顺控制方法,可把多自由度的机器人控制问题转化为几个独立的控制问题。对于可穿戴型助力机器人来说,助力指标的确定是助力机器人重要性能指标之一。系统助力评测是对可穿戴型助力机器人性能的肯定,是对“助力”的认定。有待进一步分析助力比系数与假想柔顺控制方法中的系数 m 、 k 、 c 间的内在关系。

穿戴型助力机器人是一个崭新的研究领域,穿戴型助力机器人是模仿人体结构特点、运动和行为习惯的辅助机器人系统,仿生助力机器腿的推出有

赖于人体工程学和机器人研究技术的突破。在将来的研究中,不仅利用人-机运动时的人体和外骨骼肢架间交互信息,同时结合地面反力信息来共同预测人体的运动状态。可穿戴型助力机器人仍处于研制的初级阶段,在许多方面还有待改进,希望通过不断的努力,使其性能更加理想。

参考文献

- [1] Makinson B J. Research and development prototype for machine augmentation of human strength and endurance, hardiman I project: [General Electric Report S-71-1056]. Schenectady, NY, 1971
- [2] Pratt J E, Krupp B T, Morse C J. The roboknee: an exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, 2004. 2430-2435
- [3] Kazerooni H. Human augmentation and exoskeleton systems in Berkeley. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2007, 4(3): 575-605
- [4] Yamamoto K, Hyodo K, Ishi M, et al. Development of power assisting suit for assisting nurse labor. *JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 2002, 45(3): 703-711
- [5] NaKamura T, Saito K, Wang Z D, et al. Control of model-based wearable anti-gravity muscles support system for standing up motion. In: Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California, USA, 2005. 564-569
- [6] Hayashi T, Kawamoto H, Sankai Y. Control method of robot suit HAL working as operator's muscle using biological and dynamical information. In: Proceedings of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, 2005. 3455-3460
- [7] Ferris D P, Sawicki G S, Daley M A. A physiologist's perspective on robotic exoskeletons for human locomotion, *International Journal of Humanoid Robotics*, 2007, 4(3): 507-528
- [8] Nelson C, Milan B, Michael B, et al. Caldwell, joint motion control of a powered lower limb orthosis for rehabilitation. *International Journal of Automation and Computing*, 2006, 3(3): 271-281
- [9] Liu X P, Low K H, Yu H Y. Development of a lower extremity exoskeleton for human performance enhancement. In: Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, 2004. 3889-3894
- [10] Chen F, Yu Y, Ge Y J, et al. WPAL for enhancing human strength and endurance during walking. In: Proceedings of IEEE International Conference on Information Acquisition, Jeju City, Korea, 2007. 487-491
- [11] Yu Y, Daisuke Y, Showzow T, et al. Power assist system with power-damped operation information feedbacking. In: Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Sanya, China, 2007. 1709-1714
- [12] Jaydeep Roy, Whitcomb L. Adaptive force control of position/velocity controlled robots: theory and experiment. *IEEE Tansaction on Robotics and Automation*, 2002, 18(2): 121-137
- [13] M. 伍科布拉托维奇著, 马培荪译. 步行机器人和动力型假肢. 北京: 科学出版社, 1983

Study on wearable and walking power assist robots based on interaction force information

Chen Feng^{***}, Yu Yong^{**}, Ge Yunjian^{**}

(* School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019)

(** Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract

In this paper, a study on control of the wearable power assist leg (WPAL) is conducted using the information of human-robot interaction force. Through a configuring proper force measurement point corresponding to the three-dimensional motion between the WPAL and a user's legs, the user's movement intention of lower limb can be judged in advance based on the information of multi-dimensional force from the measurement point. Then, this paper proposes a strategy of pseudo-compliance control based on the human-robot interaction force between the assist walking exoskeleton and a user's legs, and with it, the coefficients of mass, damp and spring can be adjusted to reduce the felt walking intensity to provide power for users' legs.

Key words: power assist robot, movement pattern prejudgement, pseudo-compliance control