

基于假想柔顺控制的可穿戴型膝关节机器人的运动控制

谢兴旺^{1,2} 余永¹ 张强¹ 陈峰³ 朱旻¹ 葛运建¹

(1. 中国科学院 合肥智能机械研究所,安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 自动化系,安徽 合肥 230026; 3. 南通大学 电气工程学院,江苏 南通 226019)

摘要: 为了让膝关节机器人能够对外界作用力具有顺从的能力,提出一种基于作用力/速度的假想柔顺控制策略。通过获取膝关节机器人与人腿间的作用力信息来控制电机的转速和转动方向,从而为人的行走提供助力。采用 PID 控制算法实现对直流电机地准确控制,实验的结果表明假想柔顺控制策略和 PID 控制算法是有效的。

关键词: 膝关节机器人; 假想柔顺控制; 动力学建模; PID 控制; 表面肌电信号(sEMG)

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1006-2394(2011)08-0014-03

Motion Control of the Wearable Knee Robot Based on Pseudo-compliance Control

XIE Xing-wang^{1,2}, YU Yong¹, ZHANG Qiang¹, CHEN Feng³, ZHU Min¹, GE Yun-jian¹

(1. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Nanton University, Nanton 226019, China)

Abstract: In order to let the knee robot have the compliant ability to outside force, a pseudo-compliance control strange based on force/velocity is put forward. Through acquiring the acting force between the knee robot and the leg, the force is used to control the motor's speed and rotation direction, so the robot can offer power for person's walking. The precise control of the direct current motor is realized by Adopting PID algorithm. At the same time the experience results demonstrate that pseudo-compliance control strange and PID algorithm are effective.

Key words: knee robot; pseudo-compliance control; dynamical model; PID control; sEMG signals

0 引言

本文的研究工作主要由两部分组成,首先利用拉格朗日定理建立膝关节机器人的动力学方程;其次采用假想柔顺控制策略来控制电机地转动实现机器人的助力,采用表面肌电信号(sEMG)来评估助力效果。

1 膝关节机器人的基本设计

膝关节机器人的主要功能是为人的行走提供助力,因此人在行走时感觉比较轻松。膝关节机器人的结构图如图 1 所示。

膝关节机器人由五部分组成:机械装置、传感器、运动控制器、执行器以及电源。为了让膝关节机器人提供最好的助力效果,本文从机械部分和电机的控制部分进行了优化设计,主要体现在以下几个方面:

(1) 在保证机械装置有足够的强度条件下,机械

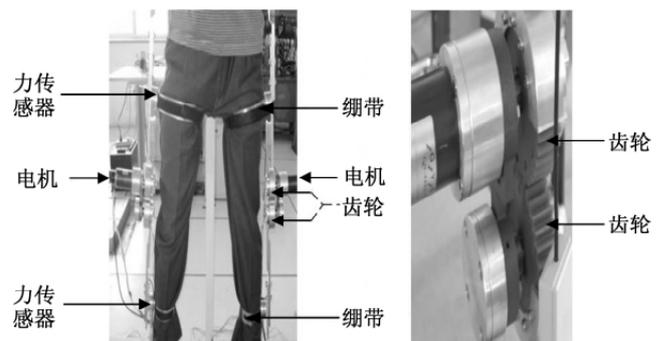


图 1 膝关节机器人的结构图

材料选用密度较小的铝合金,并且尽可能减少上下机架和横梁的尺寸,从而减轻整个机械装置的质量。

(2) 用两个尼龙齿轮代替钢材材料制作的齿轮,又进一步减轻了机械单元的质量。

(3) 采用假想柔顺控制策略,通过获取机器人和人腿部之间的力信息来判断人腿的空间姿态和运动意

收稿日期: 2011-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60875047),国家 863 计划项目(2008AA040202)

作者简介: 谢兴旺(1973—),男,硕士研究生,研究方向为智能机器人,信息获取与检测技术;余永,男,研究员。

图,从而控制电机转动为人的行走提供助力。

2 膝关节机器人的动力学建模与仿真

由于膝关节机器人通过绷带被绑定在人的腿上,可以将两者看作一个整体,将机器人的质量和转动惯量参数转移到人腿上,将整个人-机系统看作一个二连杆模型。

2.1 动力学建模

为了建立膝关节机器人的动力学模型,首先忽略机械装置各个转动部分的摩擦力以及齿轮啮合处的空隙;然后将各机械部分的质量集中在上下连杆的中心位置。膝关节机器人的简化模型如图 2 所示。其中: g 为重力加速度 (m/s^2); A, B 为上下连杆的端点; l_1, l_2 为上下连杆的长度 (m); m_1, m_2 为上下连杆的质量 (kg); m_3 为电机的质量 (kg); θ_1 为上连杆与 y 轴间的夹角 (rad); θ_2 为上连杆与下连杆间的夹角 (rad)。

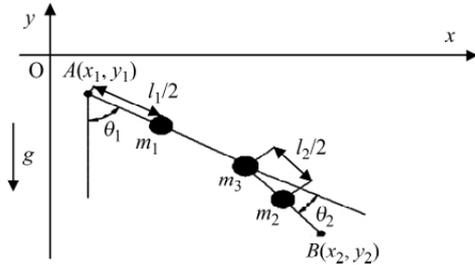


图 2 膝关节机器人的二连杆模型图

通常人的两条腿和膝关节机器人是左右对称的,因此只需要为其中一条腿建立动力学模型。考虑到人在正常行走时双脚支撑的时间相对于单脚支撑的时间短得多,为了简化建模,可以忽略双脚支撑的阶段。因此一条腿在步行的过程中只有两种状态,以左腿为例。首先左脚着地,右腿在空中摆动;接着右脚着地,左腿在空中摆动。如此周而复始人在地面上行走,如图 3 所示。

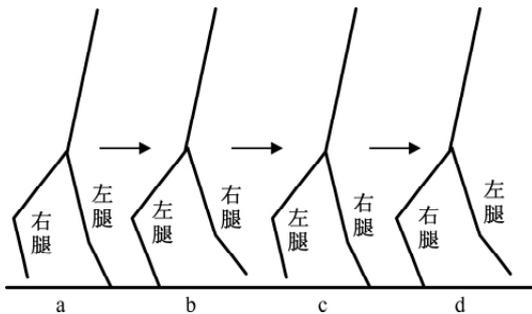


图 3 人行走时的步态循环的两个阶段

如图 2 所示,由拉格朗日定理得到:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{111} & D_{122} \\ D_{211} & D_{222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} D_{112} & D_{121} \\ D_{212} & D_{221} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\ddot{\theta}_i$ 为关节 i 的角加速度 (rad/s^2); $\dot{\theta}_i$ 为关节 i 的角速度 (rad/s) $i=1, 2$ 。

2.2 仿真实验

膝关节机器人的功能是为人的行走提供助力,以增强人的体力,为了验证动力学模型的准确性以及评估在不同行走速度下的助力效果,利用 ADAMS 软件对进行仿真。在仿真实验中不考虑各转动部分的摩擦力,结果如图 4 所示。

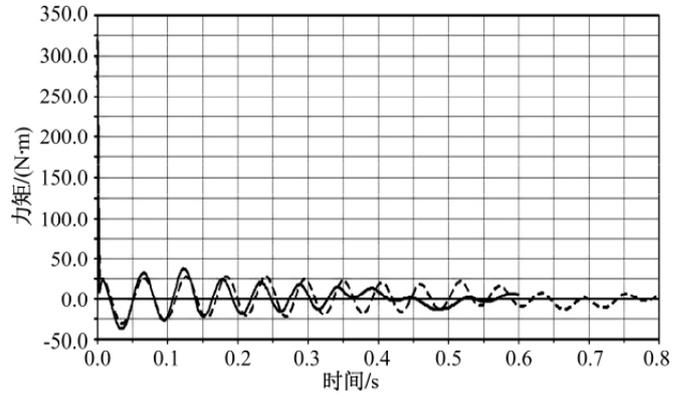


图 4 膝关节力矩曲线

仿真实验中,给膝关节设定两个速度值,一个为 $0.6 m/s$,对应图 4 中的虚线部分;另外一个为 $0.8 m/s$,对应图 4 中的实线部分。从图 4 可以看出,当膝关节的速度越大则机器人能够为人提供的助力越小,因为当电机的输出功率一定时,速度越大膝关节机器人自身消耗的功率就越大。如果忽略其摩擦力,上述两个功率之差就是膝关节机器人能够提供的最大助力。

3 膝关节机器人的运动控制

膝关节机器人运动控制的关键和难点在于:获取力信号后要力信号进行分析,判断人腿的空间姿态和运动意图,由力信息来求出膝关节的转动角速度,进而控制电机的转动方向和转速。另外要求膝关节机器人对人机间的相互作用力具有顺从的能力,假想柔顺控制正好可以解决这一难点。

3.1 假想柔顺控制策略

为了使得膝关节机器人的运动对人机间的相互作用力有良好的顺从性,即由所获取的力信号得到关节连杆和节点速度的大小和方向,假想柔顺控制可以实现这一目的。由式 (1) 可以得到下面的方程:

$$T = P \cdot \ddot{\theta} + I \cdot \dot{\theta} + M \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

式中: T 为作用在关节上面的力; P 、 I 、 M 分别为假想惯性系数、假想粘性系数和假想弹性系数。将式(2)离散化后得到式(3):

$$\omega_{n+1} = \frac{\Delta t}{P}(T_n - I \cdot \omega_n - M \cdot \Delta\theta_n) + \omega_n \quad (3)$$

又由角度和角速度之间的关系式得到:

$$\Delta\theta_n = \omega_n \cdot \Delta t \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中可得:

$$\begin{aligned} \omega_{n+1} &= \frac{\Delta t}{P}T_n - \left\{ \frac{\Delta t}{P} \cdot I + \frac{(\Delta t)^2}{P}M - 1 \right\} \cdot \omega_n \\ &= \alpha \cdot T_n - \beta \cdot \omega_n \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $\alpha = \frac{\Delta t}{P}$ $\beta = \frac{\Delta t}{P}I + \frac{(\Delta t)^2}{P}M - 1$ 。

式(5)就是所需要的假想柔顺控制的迭代方程式,由上一时刻的角速度 ω_n 和力 T_n 求出下一时刻的角速度 ω_{n+1} 。

3.2 PID 控制

由于 PID 控制算法结构简单,稳定性好,调试方便,因而得到广泛地应用。基于 PID 的电流速度双闭环控制是直流电机一种较好的调速控制算法。膝关节的速度控制采用经典的 PID 控制,整个系统的控制框图如图 5 所示。

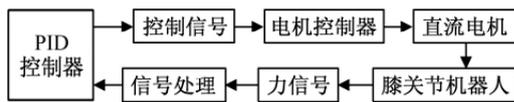


图 5 膝关节机器人系统的控制框图

3.2.1 增量式 PID 控制算法的原理

数字 PID 控制算法分为增量式 PID 控制算法和位置式 PID 控制算法,由于前者的计算量较小,本文采用增量式 PID 控制算法,以满足系统的实时性要求。

$$\begin{aligned} \Delta v(k) &= v(k) - v(k-1) \\ &= K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $v(k)$ 为第 k 次采样时的速度输出值; $e(k)$ 为第 k 次采样时的输入速度偏差值; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分和微分系数。

式(6)中的 $\Delta v(k)$ 可以由第 k 次采样计算得到速度的输出增量。

3.2.2 PID 控制参数的设计

当人行走时,电机需要频繁启动、加速和减速,为了尽可能减小电机的抖动对人腿可能造成地伤害以及影响到膝关节机器人的助力效果。在软件控制方面采用两组 PID 参数,即为人的步行速度设定一个阈值 v ,当测得的速度大于 v 时采用一组 PID 参数,反之则采用另外一组 PID 参数。

3.3 实验结果

表面肌电信号(sEMG)变化与肌肉活动状态及功能状态之间存在较好的关联,且 sEMG 信号的获取与分析具有实时性、客观性、敏感性及灵活性等特点,故 sEMG 信号分析常被用于人的肌肉工作相关性研究,如步态分析、肌肉活动状态及疲劳状态分析。有关的研究一致表明,各种肌肉负荷形式下肌肉收缩力或输出功率的变化与 sEMG 信号的振幅间存在着良好的线性关系。基于此可以利用 sEMG 来评估膝关节机器人的助力效果,具体的做法是在直角坐标系下计算 sEMG 信号所围成的封闭曲线的面积,该面积的大小与人肌肉输出功率成正比例关系。分别计算人在不穿机器人无助力和穿上机器人有助力两种情况下行走的 sEMG 曲线面积,就可以得到机器人的助力效果。

实验中间记录大腿股直肌的 sEMG 信号,分两步进行。首先人不穿机器人行走一步记录下 sEMG 信号,其次穿上机器人并且有助力记录下 sEMG 信号,图 6 是实验的结果。分别计算 sEMG 信号所围成的封闭曲线面积为:

不穿机器人无助力情况下: $S_n = 585.6465$; 穿上机器人有助力情况下: $S_y = 363.4165$; 助力效果评估: $1 - S_y/S_n = 1 - 363.4165/585.6465 = 0.3795 = 37.95\%$

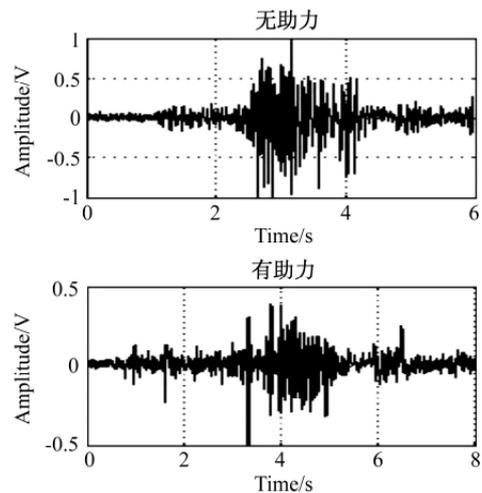


图 6 不穿机器人无助力和穿上机器人有助力情况下的 sEMG 信号图

4 结论

本文首先对膝关节机器人进行动力学建模,在得到一个准确而又实用的模型后,采用假想柔顺控制策略以及经典的 PID 控制算法来控制电机的转动方向和转速,以实现为穿戴者提供助力的目的。最后利用 sEMG 信号来评估机器人的助力效果,证明了假想柔顺控制策略和 PID 算法的有效性。

(下转第 19 页)

(7) IEEE Std 1671.6 - 2008 测试工作站信息

测试工作站信息的 XML schema 是 Test Station.Xsd, 用于显示所有与测试工作站相关的硬件、软件和文档。有助于特定自动测试系统的物理和电气描述。

(8) IEEE Std 1636.1 - 2007 测试结果信息

测试结果信息的 XML schema 是 TestResult.s.xsd, 提供用于数据收集的定义, 它源于对一个 UUT 在手动、半自动、全自动测试环境中的执行结果。

2.3 基于 ATML 的软件结构

基于 ATML 的软件结构分为应用层、编译层、配置层、驱动层四个层次, 如图 2 所示。其中应用层包括四个工具, 系统配置工具完成系统的配置工作, 即由 ATS 集成者针对某个具体的自动测试系统, 根据 IEEE 1671 的 XML schema 完成所有配置信息的描述, 以供运行时系统调用; 仪器驱动开发和测试工具完成面向信号仪器驱动的开发测试工作; 测试诊断工具由测试人员调用, 是整个软件的主体。测试人员通过分析被测对象得到测试策略, 再通过调用 IEEE 1641 定义的 TPL (Test Procedure Language) 完成测试, 软件会自动将测试结果输出成符合 IEEE1636 标准的 XML 形式, 并完成基于 IEEE 1232 的诊断过程, 为维修保障提供依据。

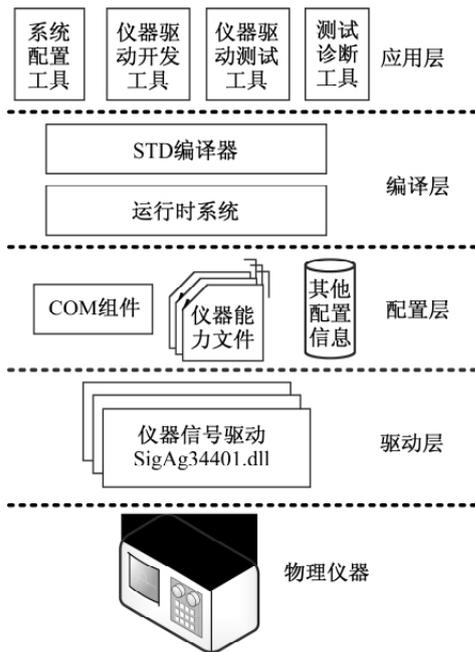


图 2 基于 ATML 的软件结构

编译层主要包括 STD 编译器和运行时系统。对于上层的 TPL 须由 STD 编译器转换成相应开发环境的载体语言, 运行时系统主要完成的是测试需求与测试资源的匹配以及测试仪器的具体调度工作, 这也是面向信号软件平台的主要技术难点。

配置层主要是一些供运行时系统调用的程序和文

档。其中 COM 组件是为实现远程调用而设计的; 仪器能力描述文件是对物理仪器具体功能, 以及性能指标的详细描述, 运行时系统就是通过分析仪器的能力描述文件来实现资源自动调度的。

驱动层即为系统中所有物理仪器的面向信号仪器驱动程序。它是在 VPP 或 IVI 驱动的基础上进行了包装, 这样就使得由 STD 编译器翻译的载体语言能够完成对物理仪器的具体控制。

3 结论

ATML 标准族的出现为面向信号自动测试系统地发展提供了新的机遇。通过标准的使用不仅可以实现所有测试信息的共享, 还能完成仪器可互换和 TPS 可移植, 提高了测试效率、降低了开发成本。但与此同时也有新的挑战, 目前国内地研究主要集中在理论研究的层次, 在具体工程中少有应用, 究其原因是对标准地理解还不够深入, 而且软件实现也存在众多技术难题, 这些都需要在日后的工作中不断克服, 但毋庸置疑的是利用 ATML 标准族建立的面向信号通用测试开发、诊断工具是具有巨大应用潜力的。

参考文献:

- [1] 钱锋, 孟晨. 面向信号的 ATS 软件体系结构研究[J]. 仪表技术, 2009(3): 56-58.
- [2] Chris Gorringer, Michael Seavey, Teresa Lopes. ATML and 'dot' Standards Status[C]. US: IEEE 2008.
- [3] Chris Gorringer, Mike Seavey, Teresa Lopes. ATML Completion Status[C]. US: IEEE 2010.
- [4] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 1641 - 2010 IEEE Standard for Signal and Test Definition[S]. Inc 2010.
- [5] 夏明飞, 薄煜明. 基于 STD 标准的 ATS 软件平台[J]. 计算机工程, 2010(6): 73-76. (郁菁编发)

(上接第 16 页)

参考文献:

- [1] 孙建, 余永, 葛运建, 等. 基于接触力信息的可穿戴型下肢助力机器人传感系统研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(12): 1432-1438.
- [2] 方郁. 可穿戴下肢助力机器人动力学建模及其控制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [3] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 郑建荣. ADAMS——虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [5] 舒怀林. 直流电动机 PID 神经网络双闭环控制系统[J]. 机电工程技术, 2005, 34(11): 17-19.
- [6] 季荣斌. 一种新型的门机控制系统[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (郁菁编发)