

仿人机器人分布式控制系统设计与实现

张占芳, 帅 梅, 魏 慧

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对 BHBIP-1 型双足步行机器人对控制系统的实时性和稳定性要求, 设计实现具有 3 层结构的分布式控制系统, 包括基于 PC104 的主控层、CAN 总线通信层和执行层, 给出上位机、关节位置伺服控制器的硬件及控制软件设计方案。样机调试结果表明, 该控制系统性能良好, 机器人行走过程稳定, 抗干扰能力强。

关键词: 仿人机器人; 分布式控制系统; PC104 总线; 数字信号处理芯片; CAN 总线

Design and Realization of Humanoid Robot Distributed Control System

ZHANG Zhan-fang, SHUAI Mei, WEI Hui

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

【Abstract】 Aiming at the real-time requirement of the biped robot BHBIP-1, this paper designs and realizes a three-layer humanoid robot distributed control system, including the master layer based on PC104, the CAN bus communication layer and execution layer. The design of hardware and control software of the host computer and joint position servo controller are given. Experimental result proves that the distributed control system fits for BHBIP-1 control environment and matches the requirements of walking stably.

【Key words】 humanoid robot; distributed control system; PC104 bus; Digital Signal Processing(DSP) chip; CAN bus

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.16.084

1 概述

双足行走是生物界难度最高的步行动作, 但具有其他步行结构所无法比拟的步行性能。仿人机器人对其结构和控制系统的要求不同于一般的工业机器人。因为它必须能够灵活行走, 以便随时走到需要的地方, 完成预先指定的工作。本田 P2 机器人的诞生使得仿人机器人成为当今世界科学技术的热点。研究一方面着重于仿人机器人结构上的改进, 另一方面进一步研究开发仿人机器人控制系统。控制系统是仿人机器人信息和控制的主体, 其设计的好坏决定了仿人机器人能否实现稳定行走和准确的行为控制^[1]。

为了增强仿人机器人控制系统的实时性和稳定性, 本文基于智能体的分层控制思想构建了仿人机器人分布式控制系统。它将整个控制系统分为主控层、通信层和执行层, 其中, 执行层又分为若干个智能体, 每个智能体作为通信层上的一个节点, 拥有独立的处理器、驱动器和传感器, 既增强了执行层的自治性, 又减轻了主控层的负担, 还可以预防异常情况的出现。

2 仿人机器人分布式控制系统总体结构

目前, 北京航空航天大学试制了 BHBIP-1 型仿人机器人的下肢, 高 80 cm, 重 15 kg, 共 15 个自由度, 其中, 左右踝关节各 2 个; 左右膝关节各 1 个; 左右髋关节各 3 个; 腰关节 3 个。从控制角度来看, BHBIP-1 型仿人机器人的控制系统是一个多输入、多输出、强耦合、非线性的复杂多轴控制系统。要实现仿人机器人的快速稳定行走, 首先要保证其控制系统能够实时地处理好各个子系统的任务, 实现各关节自由度的统一协调控制。

该仿人机器人样机如图 1 所示。

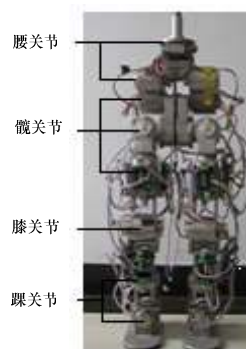


图 1 BHBIP-1 型仿人机器人样机

针对该机器人的实际结构构建出的分布式控制系统总体结构如图 2 所示, 其主要包括 3 个层次: 基于 PC104 的主控层, CAN 总线通信层, 执行层。具体如下:

(1) 主控层是整个控制系统的核心, 主要负责运动学计算、轨迹规划、综合决策以及人机交互界面管理等。通过获取陀螺仪、六维力传感器以及位置传感器等信息, 为整个控制系统提供控制目标。

(2) 通信层在控制系统中起到了桥梁作用, 它接收主控层所下发的控制目标, 将其转化为具体控制指令发送给执行层。由于仿人机器人关节很多, 主控层需要的控制信息量大, 因此对通信层有很高的可靠性和实时性要求。CAN 总线具有总线仲裁、错误检测、自动重发功能, 即便是在高达 1 Mb/s 的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775008)

作者简介: 张占芳(1985—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 仿人机器人控制系统; 帅 梅, 副教授、博士后; 魏 慧, 博士

收稿日期: 2011-01-11 **E-mail:** zzf20040342@163.com

传输速率下,也很少有数据信息丢失,而且能非常有效地支持分布式控制结构,满足仿人机器人对通信可靠性和实时性的要求。

(3)执行层负责完成仿人机器人的关节伺服控制以及信号采集等功能。它通过 CAN 总线接收来自控制层的控制命

令,并通过相关协议实现关机电机的驱动和控制,并将执行部分的状态信息实时地反馈到主控层。这些反馈信息包括通过位置传感器检测到的关节位置值、通过陀螺仪传感器检测到的系统姿态和通过六维力传感器检测到的地面反力。这些数据为下一周期的步态规划提供了输入信息。

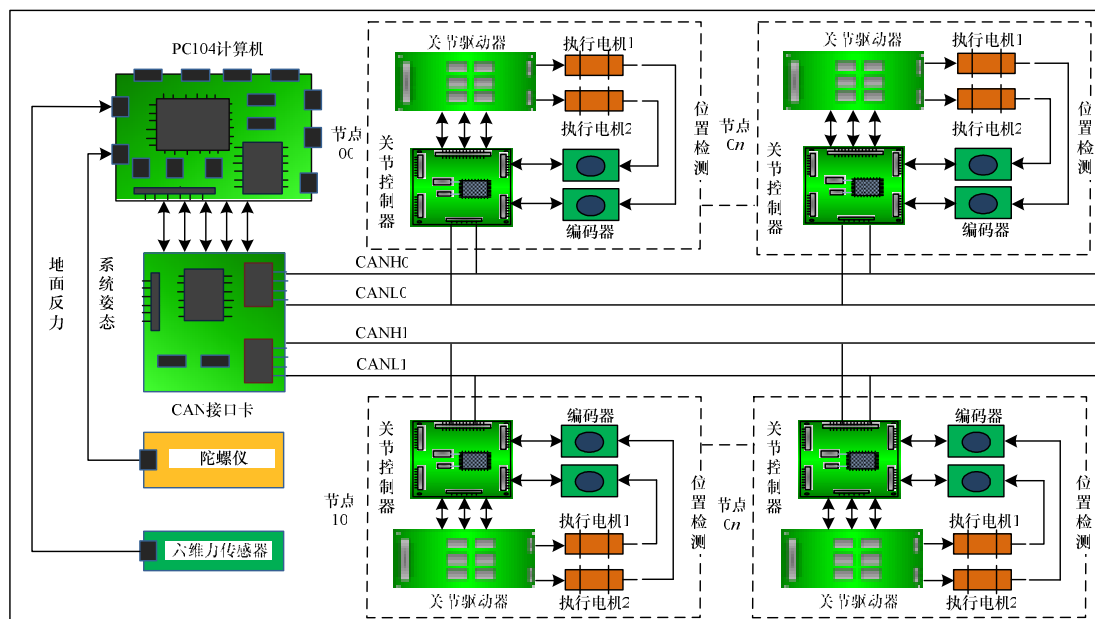


图 2 仿人机器人分布式控制系统结构

3 仿人机器人分布式控制系统设计

BHBIP-1 型仿人机器人的结构要求控制系统的集成度高、体积小,满足机构设计优化和任务规划所要求的体积功率比、重量功率比。硬件数量和连线应尽可能少,节点和总线距离应较近,通信线数量应尽可能少,以提高数据传送的准确性和可靠性,达到提高控制系统的稳定性、可靠性和降低故障发生率的目的。

3.1 基于 PC104 的主控层

由于仿人机器人控制的复杂性,主控层计算机需要实时处理各种信息,实现在线步态协调计算必须具备足够的计算能力。PC104 嵌入式计算机功能齐备、运算能力强、可扩展性好、抗震性极好、体积小,作为仿人机器人的控制系统有其独特的优势。主控层计算机采用研华的 PCM4380U,主频 1.4 GHz,支持 Windows 操作系统,因此,控制系统具有更强的适用性,使用标准控制语言可增强控制系统的可移植性。考虑到板卡之间的兼容性,主控层 CAN 模块采用研华公司 PC104 规范的双端口隔离 CAN 接口模块 PCM3680。本文基于 VC 的 Document/View 框架开发了仿人机器人控制台。其主窗口界面如图 3 所示。

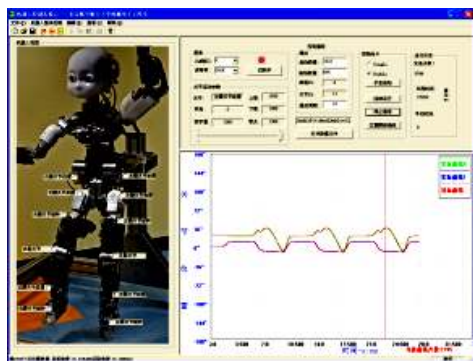


图 3 机器人控制台主窗口

控制台是一个标准的 Windows 程序,从上到下依次为标题栏、菜单栏、工具栏、机器人视图区、关节调试控制区、轨迹显示区和状态栏。其作为仿人机器人的总控制台,负责完成实验过程中的数据传输、数据处理、轨迹显示、人机信息交互等控制任务。按功能主要分为 5 个模块:(1)主控模块:负责 CAN 控制器的初始化、各个关节参数的配置等。(2)关节调试模块:完成通信测试、关节回零、步态执行等功能。(3)数据 I/O 模块:完成数据从硬盘文件读入内存和将数据从内存写入硬盘文件等数据维护工作。(4)轨迹显示模块:实时显示选择调试的关节目标轨迹和实际运行轨迹,以便实时观察机器人的运行状态。(5)CAN 通信模块:负责上位机与各个子系统控制模块的通信。

程序运行时会从 ini 文件中读取系统配置参数,完成系统的初始化。调试人员从视图区任意选择需要调试的关节,打开 CAN 端口,载入步态数据就可以进行单步或连续调试,并且可以实时观察关节跟踪情况,大大简化了多关节仿人机器人的关节位置跟踪调试工作。

Windows 操作系统是抢先式的多任务操作系统,为了更好地完成实时监控和通信功能,CAN 模块控制指令的发送和反馈信息的接收采用多线程编程技术完成。线程是操作系统分配 CPU 时间的基本实体,每个线程占用的 CPU 时间由系统分配,系统不停地在线程之间切换。进程中的线程共享进程的虚拟地址空间,可以访问进程的资源,处于并行执行状态。这使得 CAN 模块具有较少的资源消耗,提高了程序的运行效率。

3.2 CAN 总线通信层

PCM3680 具有 2 个可以独立操作的 CAN 接口,2 个 CAN 网络间是相互独立的,不存在干扰问题。采用 CAN 双主节点轮换通信网络来完成通信任务,可以有效缩短控制命令传输时间,最后统一发送步态执行帧,保证 2 个网络的同步性^[2]。

从严格意义上讲, PC104 计算机向 2 个 CAN 子网发送指令并不是同时的, 而是相差几个 CPU 周期, 本控制系统采用的 CPU 主频为 1.4 GHz, 应用程序中发送时间差 12 个 CPU 周期, 时间间隔约为 0.007 ns, 相对于 10 ms 的控制周期完全可以忽略不计。所以, 可以视 2 个网络间的统一执行帧发送指令是同步的。CAN 双子网通信时序如图 4 所示。

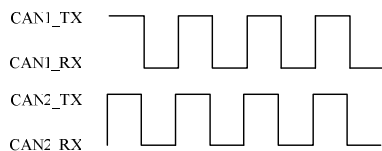


图4 CAN双子网通信时序

执行层关节控制器的主控芯片 TMS320F2812 集成了增强型控制局域网络(eCAN)总线通信接口。该接口与现行的 CAN2.0 标准接口完全兼容, 带有 32 个完全可配置的邮箱, 方便实现灵活稳定的通信接口。TMS320F2812 的 CAN 控制器为 CPU 提供完整的 CAN 协议, 减少了通信时 CPU 的开销。eCAN 模块结构如图 5 所示。

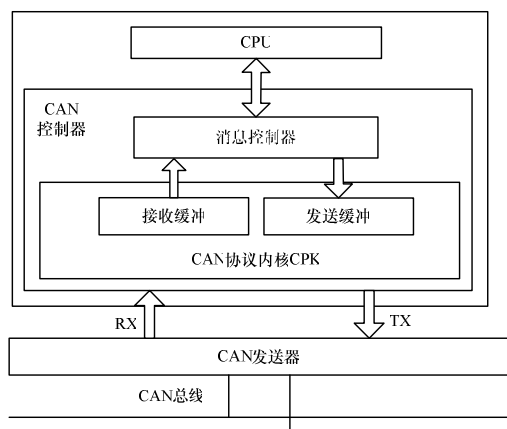


图5 eCAN模块结构

CAN 总线收发器采用的是 TI 公司生产的 3.3 V 芯片 SN65HVD230, 该芯片具有较强的抗干扰、导线交叉保护、掉电保护、过压、过热保护和宽工作范围等特点。CAN 网络的拓扑结构是“直线式”的, 2 个端点上都有 1 个大约 120 Ω 的终端电阻连接在 CAN_H 和 CAN_L 信号线上。总线两端使用单独的终端电阻, 可以防止以后网络改变时难以查找总线接头或 PCB 中的电阻。因为每个模块彼此之间相互隔离, 所以为了减小参考电位对 CAN 总线的影响, 参考电位在网络中只能有一个接地点, 否则会在 CAN_GND 线上形成地环流。

3.3 执行层

执行层的核心是关节电机的驱动和位置伺服控制。主处理器采用 TI 公司的 TMS320F2812 芯片。它是 TI 公司推出的一款专门用于电机控制的高性能、多功能、高性价比 32 位定点数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)芯片。具有以下特点: (1)运算速度快, 最高可在 150 MHz 主频下工作, 适用于复杂控制算法。(2)功耗低, 3.3 V 的 I/O 电源和 1.8 V 内核电源供电方式, 并有多种省电模式。(3)片内有 18×1 024×16 位 0 等待周期的片上 SRAM 和 128×1 024×16 位的片上 Flash。(4)多达 56 个独立编程的 GPIO 引脚。(5)片内集成 eCAN 模块, 方便 CAN 总线通信连接。(6)片上集成数字式电机控制所需要全部外围设备, 包括定时器、比较单元、死区单元、正交编码脉冲解码电路、ADC 和紧急事故 PWM 关断电

路。因此, 采用 TMS320F2812 设计仿人机器人关节控制器几乎不需要再扩展其他外围芯片即可方便地控制 2 个方波型三相无刷直流电动机, 有效减小了关节控制器的体积和功耗。

关节控制器主要包括主控电路模块、电机驱动模块和位置检测模块^[3], 其原理如图 6 所示。主控电路模块主要完成与主控计算机的双向通信、A/D 转换、PWM 信号产生、故障保护、电源电路实现及监测等功能; 电机驱动模块主要完成 PWM 信号放大和信号调理等功能; 位置检测模块主要负责电机位置信号的实时检测和速度计算。图 7 为关节控制器电路板实物图。

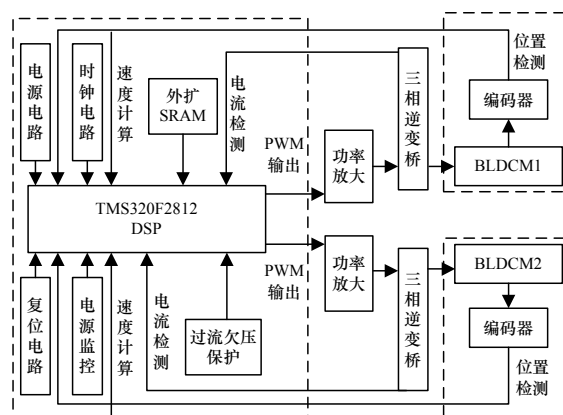


图6 关节控制器硬件框图



图7 关节控制器电路板

关节无刷直流电机采用电流、速度、位置三环控制, 控制原理如图 8 所示。

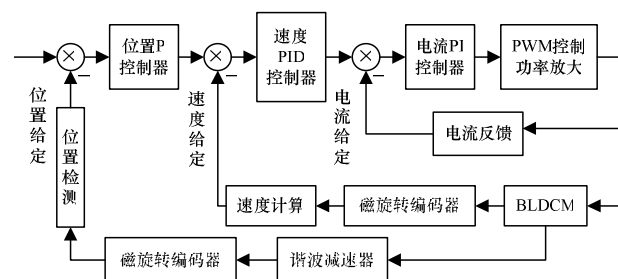


图8 关节无刷直流电机三环控制原理

电流环主要用来对电机的电磁转矩进行闭环控制, 确保提供合适的电磁转矩, 并能起到抗电源波动干扰的效果。电流环控制器为数字 PI 控制器, 积分环节采用了遇限削弱积分法, 很好地避免了由于电流波动较大而导致积分项饱和, 使积分失去调节作用的现象。

图 9 为电流环的阶跃响应曲线, 从图中可以看出, 电流波动范围较小^[4]。因为关节电机的力矩精度要求并不是很高, 所以对电流的调节精度要求并不是太高, 否则, 容易产生震荡。

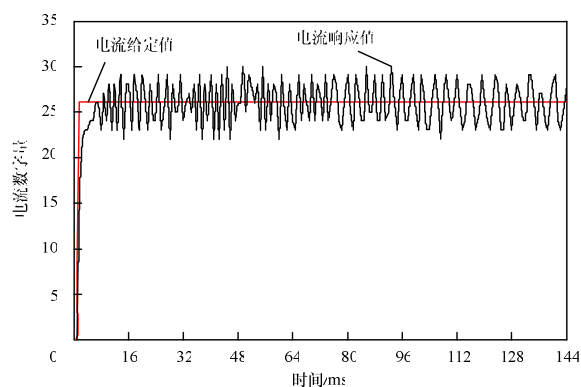


图9 电流阶跃响应曲线

速度环主要是对电机转速进行闭环控制,这样可以防止电机转速急剧变化造成的系统工作不稳定,增强了抗负载扰动能力。速度环增加的D环节是为了提高系统的响应能力,并采用不完全微分算法,从而很好地避免了高频信号对系统性能的影响。

如果采用捕获的霍尔信号计算电机的转速,每2次捕获中断计算一次电机转速,对于4对极电机,电机每转一周只会产生24个捕获中断,从而得到24个电机转速值。速度采样率计算公式如下:

$$f = \frac{q \cdot \xi \cdot \omega}{2\pi}$$

其中, f 是速度采样频率; q 是电机极对数; ω 是电机转速,单位为 rad/s; ξ 是霍尔捕获中断状态数。

图10和图11为采用编码器和霍尔传感器测试的速度曲线图及局部放大图。由图11中可知,当转速大约为0.5 rad/min即 $\omega = \pi/30$ 时,霍尔传感器测到的速度值为0。由式(1)可计算此时利用霍尔测试速度的速度采样率为0.2 Hz,即每隔5 s才能给出一个速度值,所以,出现了速度测试为0的情况。

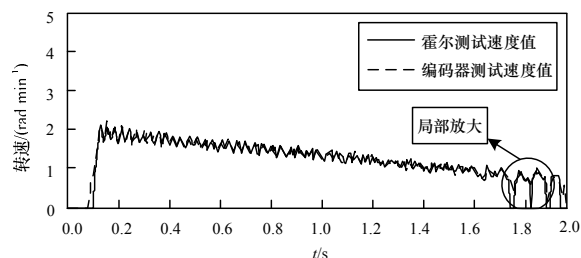


图10 霍尔和编码器测试速度曲线

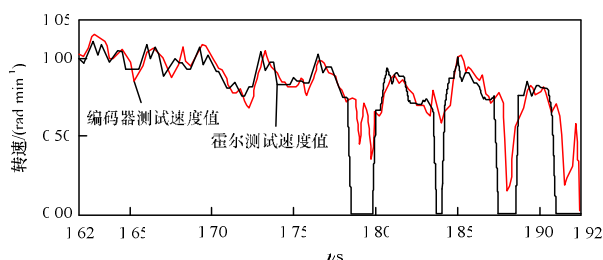


图11 测试速度曲线局部放大图

BHBIP-1 仿人机器人行走过程中常会出现这种低速的情况,软件中速度闭环控制频率约为833 Hz,采用霍尔测试速度不能满足控制要求。因此,在电机减速之前的速度输出轴上加了一个12位的磁旋转变编码器,直接测得电机的位置信号来计算速度。分辨率达到0.087°,完全可以满足控制要求。速度测试准确度及精度得到大幅提高,而且软件中不需要霍

尔捕获中断,大大减小了CPU开销,使速度环控制取得了很好的效果。

位置环处在三环控制的最外环,采用数字P控制器,保证机器人关节随目标位置的变化而变化,而且不允许出现超调现象,否则,关节动作会来回振荡,严重时可能会超出其机械运动范围,对机械部件造成不可恢复的损坏^[5]。

位置传感器AS5045的SSI接口与TMS320F2812的SPI接口相连,以同步串口方式输出反映电机绝对位置的12位数字量数据。图12给出了位置传感器安装方法。图13给出了关节电机位置闭环控制的详细流程。



图12 位置传感器安装示意图

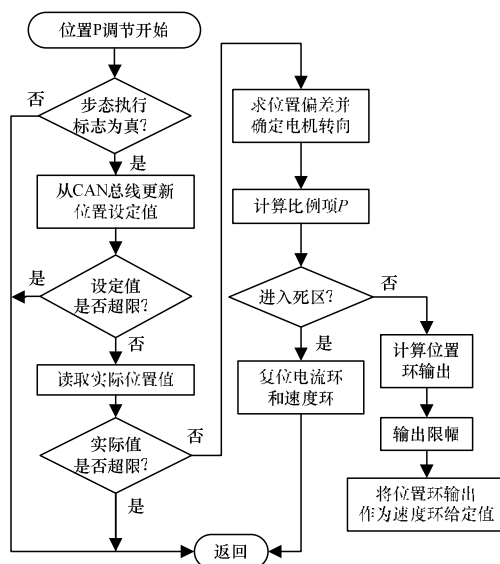


图13 关节电机位置闭环控制算法流程

4 样机调试结果

本文在BHBIP-1型仿人机器人样机上进行了关节位置跟踪实验,并进行了联调。实验结果显示,基于PC104的仿人机器人分布式关节控制系统具有良好的动态响应、精确的步态跟踪、无位置超调以及较小的稳态误差等动静态控制效果,满足了仿人机器人控制系统的性能指标要求。位置跟踪精度优于1°;具有快速的位置跟踪响应能力;无位置超调。图14给出本文设计的分布式控制系统应用在机器人上的行走实验结果,机器人行走过程稳定,而且抗干扰能力很强。

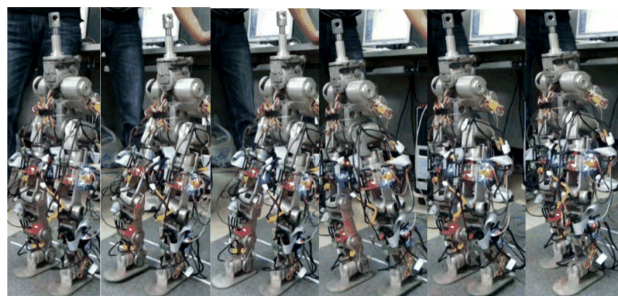


图14 BHBIP-1 仿人机器人行走过程

(下转第253页)