

文章编号 : 1002-0446 (2005) 06-0517-04

四足仿生机器人嵌入式多关节伺服控制器的研究

孙立宁, 王鹏飞, 黄博

(哈尔滨工业大学机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 介绍了 DSP 芯片 TM S320LF2407 的原理, 开发了基于 CAN 总线的多关节伺服控制器. 针对四足仿生机器人关节控制的应用, 在 DSP 中采用流水线采样策略和带修正函数的自调整模糊控制规则, 有效地克服了机器人关节轨迹跟踪控制中耦合、力矩非线性等因素的影响. 控制驱动的集成化提高了移动机器人的速度和负载容量.

关键词: 伺服控制; 机器人; CAN 总线; 模糊

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Research on Embedded Multi-joint Servo Controller of Quadruped Bionic Robot

SUN Lining WANG Peng-fei HUANG Bo

(Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract The principle of DSP chip TM S320LF2407 is introduced and a multi-joint servo controller based on CAN bus is presented. In view of the application of quadruped bionic robot joint control, we adopt a stream line sampling strategy and the adaptive fuzzy control rules with modifiable function in DSP software. The experiment shows that these methods can effectively overcome such control defects as coupling, nonlinear moment, etc. in robot joint trajectory tracking control. The integration of control and driving increases the speed and load volume of mobile robots.

Keywords servo control; robot; CAN bus; fuzzy

1 引言 (Introduction)

在工程探险、反恐防爆、军事侦察机器人等方面, 人们已经清楚地体会到移动机器人作为移动机器人平台的优越性. 多运动方式四足仿生机器人采用四足两轮的结构作为应用的移动平台, 能很好地结合轮式机器人和足式机器人的优点, 根据不同的环境变换多种运动方式, 达到良好的运动灵活性和较高的移动速度的统一. 在进行多运动方式四足仿生机器人的研究过程中, 从系统规模、关节数量、工作环境、传感信息的传递等角度, 提出了以 CAN 总线为基础的嵌入式多运动方式四足仿生机器人分级控制系统的方案. 然而目前, 大多数运动控制器都是针对特定的控制算法而设计的, 封闭式控制结构使其应用范围受到极大的限制^[1]. 因此, 除常规运动控制器所具有的基本功能外, 我们将控制结构的开放性作为研究重点, 将关节非线性力矩控制算法直接嵌入

到底层电机控制中. 同时, 由于目前大功率高端伺服电机的控制与驱动产品体积、重量均较大, 且价格不菲. 四足仿生机器人周身 16 个主动关节, 共需 16 套 90W 电机、驱动器. 为减小自身尺寸和重量, 从而提高移动机器人速度和负载容量, 我们自行设计了基于 DSP 的嵌入式多电机的伺服控制与驱动单元, 并针对四足机器人负载力矩非线性的特点, 在多关节伺服控制器硬件上进行了位置环、电流环的设计, 在 DSP 中采用了流水线采样软件策略和带修正函数的自调整模糊控制规则.

2 多关节伺服控制器的硬件体系 (Hardware system of multi-joint servo controller)

2.1 总体结构

DSP 芯片 TM S320LF2407 具有快速性、支持多电机控制、功耗低等特点, 它包含独立的 6 对 16 位

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2004AA420110).

收稿日期: 2004-12-31

PWM 信号输出、2个正交编码脉冲电路、4个 16位通用定时器和 6个捕获单元,这些特性使其很适合作为多电机伺服控制器中央处理单元^[2,3]。LMD18200 是美国国家半导体公司(NS)推出的专用于运动控制的 H 桥组件。同一芯片上集成有 CMOS 控制电路和 DMOS 功率器件,峰值输出电流高达 6A,连续输出电流达 3A,工作电压高达 55V,还具有温度报警、过热、过流保护功能。同时,可以利用其特有的分流电路,通过限流电阻,形成电流闭环控制^[4]。LMD18200 的输入信号是 PWM 方式,通过改变 PWM 的占空比来改变电机转速,因此它刚好可以与 TM S320LF2407 的任意的 4路独立的 PWM 相配合,实现控制电路与驱动电路的集成。考虑到 TM S320LF240对码盘反馈信号的处理能力,我们使每片 TM S320LF2407 芯片控制 4片 LMD18200 组成一个控制单元。四足仿生机器人每条腿安装一块这样的单元,通过 4块相同的单元实现 16个电机的驱动。四足仿生机器人单腿驱动控制结构如图 1所示。

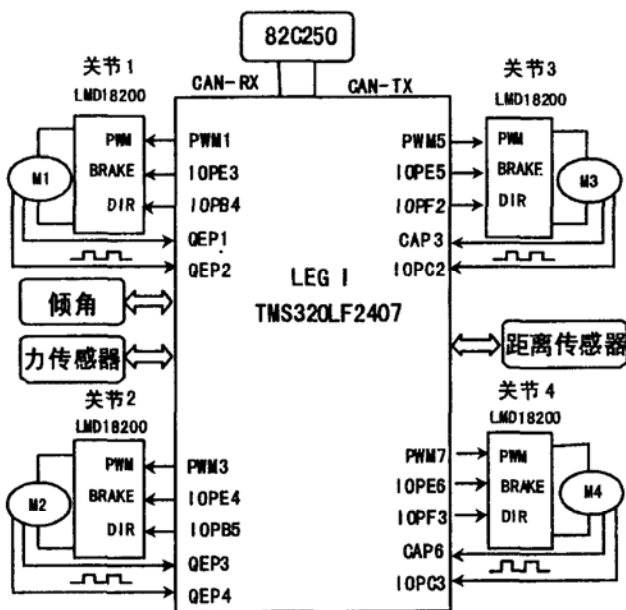


图 1 多关节伺服驱动控制结构图

Fig 1 Structure of multi-joint servo control and driving card

2.2 主控单元

DSP 芯片 TM S320LF2407 承担了大量的任务,主要技术指标如下:

- (1) 实现 1~4 关节独立或联动控制,与上位机采用 CAN 总线通讯;
- (2) 4路独立的 16位 PWM 输出方式, PWM 频率为 20kHz;
- (3) 速度梯形轨迹反馈控制及准梯形轨迹速度

切换。

DSP 芯片 TM S320LF2407 功能分配如下:控制单元 CPU 提供 4路启停信号,分别由 IOPE3-IOPE6 数字输入输出口来承担,4路方向电平信号,分别是 IOB4、IOB5、IOF2、IOF3 4路独立的 PWM 信号,分别是 PWM 1、PWM 3、PWM 5、PWM 7,将 IOA6、IOB0、IOB2、IOPE1 设定为基本功能方式。以上这些信号均提供给 LMD18200 驱动芯片。在反馈码盘信号的处理上,DSP 自带的两路正交编码脉冲处理模块分别连接两个电机的光电编码器以获得旋转位置和速率等信息。其余两个电机的光电编码信号分别通过软件和硬件结合、捕获中断和 IO 口协调检测处理的方法来实现。具体的实现方法为在软件中设置两个计数变量,启动 CAP3 和 CAP6 两个捕获中断,分别捕获剩余两路电机码盘信号的 A 路信号,在捕获中断发生时启动 IOPC2、IOPC3 数字输入输出口来查询两路电机码盘信号 B 的高低电平,根据电平的高低对软件计数变量进行加减计数,从而达到对另外两个电机的位置监测。DSP 的 4 个 16 位通用定时器在电路的控制中具有重要作用,其多种工作模式为软硬件协调工作提供了方便,定时器工作模式及寄存器设置如表 1。

表 1 定时器工作模式及寄存器设置

Table 1 Timer work mode and register setting

	工作模式	寄存器设置	功能
定时器 1	连续递增计数模式	T1CNT = 0 T1PR = 95 CM PR 1, 2, 3 = 48	为捕获 3 提供时基 电机 3 码盘检测 PWM 1, 3 5 时基
定时器 2	定向增减计数模式	T2CNT = 100Q T2PR = FFFF	电机 1 码盘检测
定时器 3	连续递增计数模式	T3CNT = 0 T3PR = 95 CM PR 4, 5, 6 = 48	为捕获 6 提供时基 电机 4 码盘检测 PWM 7 时基 采样周期中断
定时器 4	定向增减计数模式	T4CNT = 100Q T4PR = FFFF	电机 2 码盘检测

3 伺服控制器软件策略 (Software strategy for servo controller)

3.1 流水线采样策略

多关节伺服控制器的主控单元除了为驱动器提供 PWM、方向、起停信号外,更多的时间在接收 4 个电机的码盘位置反馈信号,并根据这些信号进行电机的伺服调速和位置控制。由于 4 个电机经常需要

同时运行, 如果采用同样的采样时间点, 然后再分别对每个电机进行伺服计算、调整 PWM 输出, 那么, 对最后一个电机的伺服控制必然是滞后的, 同时, 同一个电机的采样周期也无法精确保证, 从而直接影响后面算法所需样本的精确性. 本伺服控制器的主控单元将位置信号的采样周期等分成 4 份, 每个电机在每一份时间段的起点被采样, CPU 从当前采样时间点到下一个电机的采样时间点时间段内对当前电机进行闭环处理, 从而保证每次采样的位置信号与电机当前的位置保持一致, 同一个电机的采样周期保持不变. 流水线采样策略如图 2 所示.

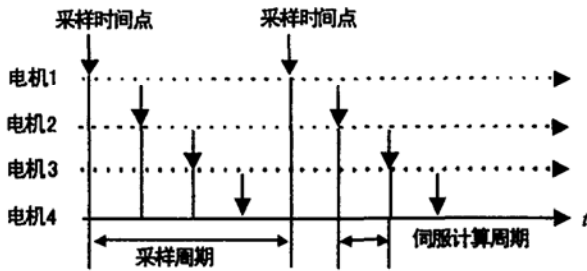


图 2 流水线采样策略示意图
Fig 2 Stream line sampling strategy

3 2 模糊伺服控制软件策略

作为一种步行机械, 四足机器人的行走流畅性直接取决于各个关节转速的配合程度. 然而, 研究发现四足机器人行走数学模型具有严重非线性、强耦合的特点, 并且包含有摩擦、负载变化等不确定因素. 根据直流电机转矩转速曲线, 该非线性负载对直流电机的转速有较大影响. 常规的 PID 负反馈控制对于解决线性定常系统的控制问题是很有效的, 对于非线性时变系统难以奏效. 模糊控制不依赖于对象数学模型且鲁棒性强, 将之用于机器人关节轨迹跟踪控制能有效地克服机器人关节轨迹跟踪控制中耦合、非线性、参数变化等因素的影响, 取得较好的效果^[5 6].

本系统采用一种带自调整函数的模糊控制规则, 模糊控制基本原理可由图 3 表示, 被控过程的解析描述的形式为:

$$u = u_0 + \Delta u \tag{1}$$

$$\Delta u = \begin{cases} < \alpha E > & |E| > E_m \\ < \alpha E + (1 - \alpha) EC > & E_w < |E| \leq E_m \\ < \alpha E + (1 - \alpha) EC + \beta \sum E > & |E| < E_w \end{cases} \tag{2}$$

式中 $\langle \rangle$ 为取整运算符, u 和 u_0 分别为模糊控制器的瞬态输出和稳态输出, α 为修正函数, β 为误差积分权重, E_m 及 E_w 是设定的阈值, 且 $E_m > E_w$.

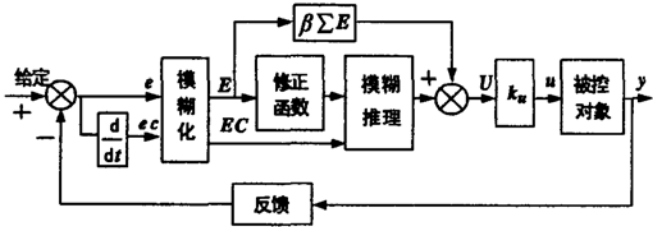


图 3 带修正函数的控制规则自高速模糊控制系统框图
Fig 3 Algorithm structure of fuzzy controller with modifiable function

在本系统中, 对位置误差 E , 位置误差变化 EC 和控制量 u 的论域定义如下:

$$\begin{aligned} \{E\} = \{EC\} = \{u\} \\ = \{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, \\ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\} \end{aligned} \tag{3}$$

控制策略是当误差较大时, 控制系统的主要任务是消除误差, 这时对误差在控制规则中的加权应大一些; 相反, 当误差较小时, 此时系统已接近稳态, 控制系统的主要任务是使系统尽快稳定, 为此必须减小超调, 这就要求在控制规则中误差变化起的作用大一些, 即对误差变化的加权大些.

为此, 建立的修正函数为:

$$\alpha = \frac{1}{7} (\alpha_s - \alpha_0) |E| + \alpha_0 \tag{4}$$

式中 $0 \leq \alpha_s \leq \alpha_0 \leq 1$, $\alpha \in [\alpha_0, \alpha_s]$. α_0 和 α_s 是在实验中确定的修正函数的取值范围.

上述控制规则的特点是修正函数 α 在 α_0 至 α_s 之间随着误差绝对值 $|E|$ 的大小呈线性变化. 显然, 这种自调整过程符合人在控制决策过程中的思维特点, 且非常易于由 DSP 程序实现.

3 3 普通 PID 控制器与模糊控制器的实验比较

实验用中型直流伺服电机的额定数据及主要参数如下:

- 额定功率 $P_N = 90 \text{ W}$
- 额定电压 $U_N = 48 \text{ V}$
- 空载转速 $n_0 = 3810 \text{ rpm}$
- 堵转转矩 $T_D = 493 \text{ mN} \cdot \text{m}$
- 最大连续转矩 $T_M = 112 \text{ mN} \cdot \text{m}$
- 最大连续电流 $I_M = 0.944 \text{ A}$
- 转矩常数 $K_T = 119 \text{ mN} \cdot \text{m} / \text{A}$

转速常数 $K_N = 80.6 \text{ rpm/V}$

转动惯量 $J_M = 62.8 \text{ gcm}^2$

电机内阻 $R = 11.5 \Omega$

电感 $L = 3.16 \text{ mH}$

电机自带减速器和编码器, 减速比 23:1, 编码器每转输出 500个脉冲, 4倍频后每转 2000个脉冲。

用此电机驱动机器人在负载变化最大的情况下进行两种控制方法的实验, 模糊控制器实验中确定 $\alpha_0 = 0.25$, $\alpha_s = 0.75$, $E_m = 5$, $E_w = 2$ PID控制器实验中 3个系数 $K_p = 80$, $K_i = 0.1$, $K_d = 20$ 机器人 4条腿做向上支撑动作, 此时 β 关节负载变化最大, 在此过程中定时采样左前腿 β 关节的码盘反馈信息, 采样周期 $50 \mu\text{s}$ 通过计算每个采样周期的码盘计数, 得到左前腿 β 关节的位置跟踪信息及速度跟踪信息. 通过实验结果可以看出, 负载连续变化时, 两种控制算法的稳态精度都较高, 超调较小. 但模糊控制比 PID 控制运动的速度时间曲线更平滑, 速度跟踪效果好, 提高了系统的鲁棒性和稳定性。

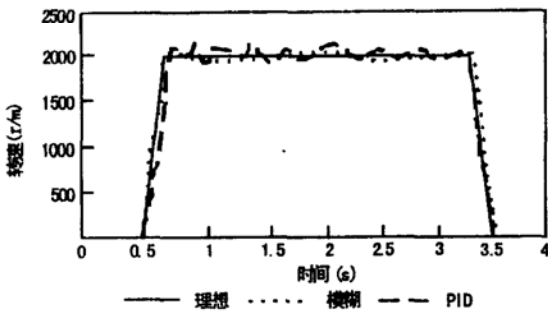


图 4 位置模式下梯形速度

Fig 4 Trapezoid velocity curve in position mode

4 结论 (Conclusion)

基于 CAN 总线的四足仿生机器人嵌入式多关节伺服控制器充分利用了软硬件功能, 有效地克服机器人关节轨迹跟踪控制中耦合、力矩非线性等因素的影响. 其体积小、重量轻、可以多电机同时驱动以及良好的 CAN 接口形式等优点为四足仿生机器人的设计提供了方便, 提高了移动机器人速度和负载容量。

参考文献 (References)

- [1] 董春, 徐文力. 仿人手臂动力学控制实验平台的设计与实现 [J]. 机器人, 2004, 26(1): 23-26
- [2] Xiao J Z, Dulinarta H. DSP solution for wall-climber micro-robot control using TMS320LF2407 chip [A]. Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2000, 1348-1351
- [3] Takahashi N, Ikeda T, Tagawa N. A high-sample-rate robot control system using a DSP based numerical calculation engine [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1989, 1168-1173
- [4] 林建伟. 电机驱动用 H 桥组件 LMD18200 的应用 [J]. 国外电子元件, 1998, (9): 10-12
- [5] 张筱磊, 李士勇. 实时修正函数模糊控制器组合优化设计 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(1): 8-12
- [6] Lin L R, Huang H P. DSP-based fuzzy control of a multifingered robot hand [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Systems for the 21st Century [C]. Piscataway, NJ USA: IEEE, 1995, 3672-3677.

作者简介:

孙立宁 (1964-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 微型机器人及仿生机器人.