

基于 DSP 的 GR-II 机器人控制器

阳小燕, 周国荣, 陈 新

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 在分析和研究 GR-II 教学机器人原控制器的基础上, 设计了一种能在机器人上研究、实现不同轨迹规划方法和控制算法的基于 DSP 的新型机器人控制器。该控制器以通用 PC 作为上位计算机, 用 6 个 DSP 对机器人 6 个关节运动进行插补计算和伺服控制, 采用高速 CAN 总线进行上位机与下位机之间的通讯, 实现上位机和下位机的双速率运行, 以适应复杂控制算法对计算时间和机器人运行性能与精度对高伺服频率的要求。同时, 通过软件设计在上位机进行运动学、动力学计算, 并据此修正下位机控制算法的 PID 参数, 实现动力学近似补偿。

关键词: 机器人; 控制器; DSP

中图分类号: TP242.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-9792(2001)04-0428-05

随着科学技术的不断发展, 人们对机器人控制的实时性和精度提出了越来越高的要求。同时, PC 机和集成芯片技术的飞速发展, 为各种复杂控制算法的实现提供了必要条件。而要提高机器人轨迹跟踪精度和实时控制性能, 必须提高伺服控制器的插补和伺服运算频率^[1]。GR-II 机器人作为教学和研究用机器人, 可实现一般的坐标变换、运算演示、写字画图等作业, 但不能满足高精度和高实时性的控制要求, 如控制精度和伺服频率低、电机速度不可调节, 机器人运动不平稳、存在抖动等。因此, 需要对 GR-II 机器人控制器进行改造。近年来, 数字信号处理器 (Digital Signal Processing, 即 DSP) 以其高速运算能力和丰富的片内功能, 在很多领域得到应用^[2,3], 如电机控制、谐波处理、语音数字化处理等。在此, 作者以 6 个高速数字信号处理器 TMS320F243 为核心构造 GR-II 机器人伺服控制器, 对该控制器的硬件结构、控制策略和实现方法进行研究。

1 GR-II 机器人及其控制系统结构

1.1 GR-II 机器人及运动学求解

该机器人主要由腰、大臂、小臂、腕俯仰、腕旋转 5 个关节和手爪 (具有开度控制) 组成, GR-II 机器人结构简图如图 1 所示。其中: OA 杆为腰, H_0 为高度, AB 杆为大臂; BC 杆为小臂; L_0 为长度; 手腕由 CD 、

DE 2 根杆构成, 长度分别为 L_1, L_2 。手腕旋转、手爪开和合不影响机器人终端坐标。机器人逆运动学求解一般采用代数法的分离变量法或半解析半几何法^[4]。由于 GR-II 机器人关节驱动电机均安装在基座上, 因此, 可采用纯几何法求解。

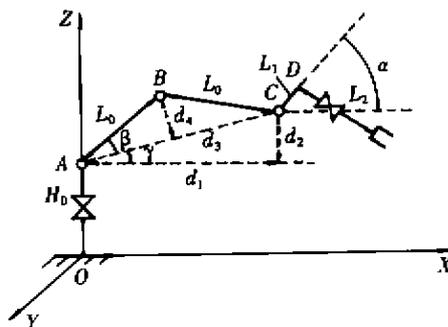


图 1 GR-II 机器人结构简图

手爪中心 $P(x, y, z)$ 在 X, Y 平面上的投影长度 R 为

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}$$

腕心的相关参数为

$$\begin{cases} d_1 = R - L_1 \sin \alpha + L_2 \cos \alpha, \\ d_2 = Z + L_1 \cos \alpha - L_2 \sin \alpha - H_0, \\ d_3 = \frac{1}{2} \sqrt{d_1^2 + d_2^2}, \\ d_4 = \sqrt{L_0^2 - d_3^2}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \beta = \arctan \frac{d_4}{d_3}, \\ \gamma = \arctan \frac{d_2}{d_1}, \\ \psi = \arctan \frac{|y|}{|x|}. \end{cases}$$

其中, $0 \leq \beta < \pi/2$.

确定角度 ζ 的条件:

当 $|d_1| < \epsilon$ 时, $\zeta = \pi/2$;

当 $d_2 > 0$ 且 $d_1 < 0$ 时, $\zeta = \pi - \gamma$;

当 $d_2 < 0$ 且 $d_1 < 0$ 时, $\zeta = \pi + \gamma$;

当 $d_2 < 0$ 且 $d_1 > 0$ 时, $\zeta = -\gamma$.

确定角度 ξ 的条件:

当 $|y| < \epsilon$ 时, $\xi = 0$;

当 $y > 0$ 且 $x < 0$ 时, $\xi = \pi - \psi$;

当 $y < 0$ 且 $x < 0$ 时, $\xi = \pi + \psi$;

当 $y < 0$ 且 $x > 0$ 时, $\xi = -\psi$.

由此可得各关节角度:

$$\theta = \alpha,$$

$$\eta = \zeta - \beta,$$

$$\delta = \beta + \zeta,$$

$$\lambda = \xi.$$

其中: θ, α 为手腕俯仰角; η 为小臂旋转角; δ 为大臂旋转角; λ 为腰关节旋转角; x, y, z, α 由上位机通过轨迹规划计算得出.

1.2 控制系统结构

GR-II 机器人采用两级控制结构, 整个控制系统分为监控计算机和伺服控制 2 个部分. 系统结构原理如图 2 所示.

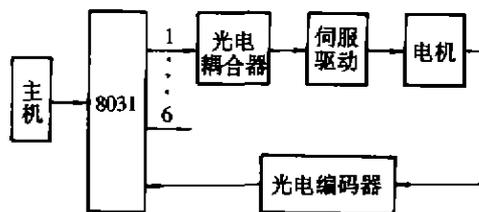


图2 原控制器结构图

1.2.1 监控计算机

采用通用 PC 进行机器人轨迹规划、运动学计算、人机通讯等操作. 对给定目标位置, 计算出各个关节的运动量, 通过 RS232 传送给单片机.

1.2.2 伺服控制部分

由单片机控制板和伺服驱动板 2 个部分组成.

单片机控制板由 1 片 8031 单片机作为伺服控制器的核心, 对 6 个关节进行伺服控制. 8031 单片机接收各关节位置给定后与光电编码器反馈脉冲数相比较计算出控制量, 经驱动电路将 $\pm 19\text{V}$ 直流电源直接加在电机上, 控制电机的运转和方向.

1.2.3 脉冲反馈信号的计数及方向判别的软件实现

采用每转 6 个脉冲的低精度光电编码器, 每个脉冲信号有 4 种状态: 00, 01, 10, 11, 将采集到的每 4 种状态信号规定为 1 个光码脉冲, 正转时特征码为 00101101, 反转时特征码为 00011110. 每次移位后取低 4 位来比较和识别, 正转识别码为 02H, 反转识别码为 08H, 并将正、反转脉冲在相应存储单元中增 1 计数.

1.2.4 GR-II 机器人存在的缺陷

GR-II 机器人的这种控制方法虽然在硬件实现上比较简单, 但在控制精度、实时计算等方面远远不能适应教学和控制算法研究的要求, 体现在:

a. GR-II 机器人的各关节控制电机是采用不可调速的全压运行方式, 由于机器人存在惯性而造成运动抖动和停车时过冲.

b. 光电编码盘每圈只有 6 个光码槽, 脉冲数太少而造成控制精度低.

c. 6 个电机的伺服控制和 12 路光电编码器脉冲信号处理都由 1 片 8031 单片机分时进行, 伺服速度太低, 导致机器人运动品质差.

2 基于 DSP 的机器人控制系统硬件组成

考虑到既要求在控制器上进行轨迹规划、运动学和动力学等控制算法的运算, 又要求机器人具有实时控制性能好、伺服控制精度高, 并且能在伺服控制器上进行控制优化, 因此, 需构造 1 个高性能的控制系统. 周学才等采用 1 个 DSP 控制 6 个关节的运动^[5,6], 但这不能构成并行伺服控制网络, 而且不适应下位机高伺服插补频率的要求. 作者在 GR-II 机器人控制器改造中采用两级计算机结构, 上位机采用通用 PC, 下位机采用 6 个 TI 公司生产的高速专用控制 DSP 构成 CAN 总线网络, 以高精度光电编码器进行 6 个关节的位置检测, 用电位器作为各关节复位信号传感器, 与原有的各关节伺服驱动部分一起构成基于 DSP 的新型机器人控制器. 系统硬件结构如图 3 所示.

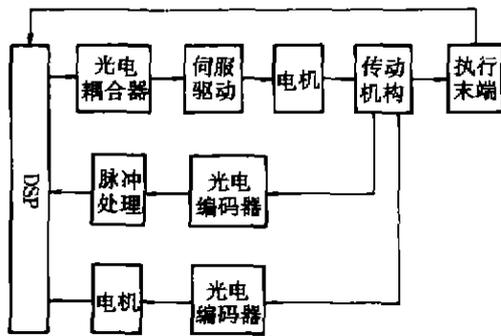


图 3 DSP 控制器结构图

TMS320F243 作为专用控制处理器,具有丰富的片内功能.其具有 544 字 \times 16 位片内双口 RAM;8K 字 \times 16 位片内 Flash;8 路比较/脉宽调制(PWM)通道;2 个 16 位通用定时计数器;3 个捕获单元(其中 2 个具有正交编码器脉冲接口能力);10 位 A/D 转换器;内嵌有 CAN 总线模块.同时,还具有如下特点:具有 VLIW 总线结构;四级流水线处理;指令执行速度为 20 MB/s,几乎所有的指令都在 50 ns 内完成.

2.1 反馈脉冲检测

采用高精度的光电编码器进行位置检测以提高控制精度,编码盘上有 1 000 个光码槽,两路正交的编码脉冲信号经 DSP 4 倍频后,电机每转将输出 4 000 个脉冲信号,这大大提高了机器人的控制精度.脉冲信号经滤波、整形、放大电路处理后,输入 DSP 正交解码器脉冲输入口对电机运动方向进行判别和对脉冲信号进行 4 倍频处理,由 T_2 构成的 16 位计数器对脉冲信号进行计数.

2.2 机器人精确复位

利用 A/D 口输入的电位器信号进行粗定位后,再由光电码盘的标定 C 脉冲来进行精确定位,标定 C 脉冲和极限位信号由捕获口和 NMI 口产生中断.

2.3 CAN 总线及通讯

在传统机器人控制中,大部分采用 RS232 或 RS485 进行通讯,但这种通讯方式速度慢,误码率高.在此控制器中采用 CAN 总线构成网络进行通讯,充分利用 TMS320F243 中 CAN 总线模块的功能,将 6 个下位机 DSP 组成 1 个 CAN 总线网络,上位机经 CAN 总线适配器与 CAN 总线相连,以实现数据的高速传输.CAN 总线网络结构如图 4 所示.

2.3.1 CAN 总线的特点

CAN 总线通讯可靠性高,平均误码率低于 10^{-11} ;传输速度高达 1 MB/s,距离可达 1 km;采用双绞线差分方式进行通讯,有很强的抗干扰能力.

2.3.2 CAN 总线适配器

主要由控制器、总线收发器、I/O 器件(双口 RAM)组成.采用 Philips 公司生产的 82C200 CAN 控制

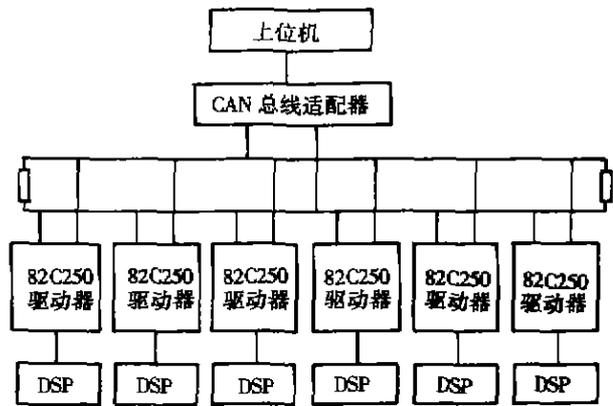


图 4 CAN 总线网络

器及配套的 82C250 CAN 收发器,采用 16K 双口 RAM 作为缓冲区.

2.3.3 DSP 片内 CAN 模块

CAN 物理总线的接口使用 82C250 驱动器芯片,采用 4 个输入缓存单元,2 个输出缓存单元.

2.3.4 CAN 总线通讯方式

由 CAN 总线适配器和 DSP 片内 CAN 模块自主通讯.采用地址位模式发送和接收数据.数据通讯格式为:下位机地址、下位机控制的当前段 PID 参数、关节运动量.

3 控制策略及其实现方法

3.1 动力学近似补偿

对机器人动力学补偿算法大都采用前馈补偿方法^[4,6],但实际应用比较困难.为此,作者在研究机器人动力学方程和 PID 控制模型的基础上,建立描述动力学参数和 PID 参数相关的控制算法,并采用分段修正 PID 参数的方法实现动力学近似补偿.

在实际控制过程中,上位机根据已建立的动力学参数和 PID 参数相关联的控制算法,以与位置给定速率相同的频率分段计算 PID 调节参数.计算过程中以逆运动学计算出的关节运动量作为分段计算的控制算法的自变量,计算得出 PID 调节参数,并与该关节的运动量给定同时传送给下位机.下位机接收信息后,首先修正当前段 PID 参数,然后再插补细分运动量.PID 参数由上位机传输位置速率进行更新,而在该段位置的插补细分中保持不变.

3.2 双速率控制

为了满足上位机对计算时间和下位机对高速伺服控制的要求,该控制器采用双速率控制策略.

根据研究的控制算法复杂程度和使用的上位机运算速度,确定上位机关节运动量及 PID 参数的给

定速率.由于 DSP 具有很高的运算速率,所以下位机伺服控制器中可以采用很高的伺服控制频率,以提高机器人的动力学性能和运行品质.

由于上位机承担轨迹规划、逆运动学方程求解以及动力学补偿等复杂的控制算法,因此,根据实际情况可以采用实时计算或离线计算的方法.采用离线计算时,预先将各关节运动参数按一定顺序存放在缓冲区,下位机可采用高速插补频率对运动量进行细分,完成对关节的伺服控制.

4 软件结构

在软件设计中,充分考虑通用 PC 和 DSP 各自的特点,采用模块化设计.在上位机上利用便利的开发环境,用高级语言实现复杂的控制算法;下位机利用并行的高速 DSP 完成轨迹插补细分,并通过修正 PID 控制参数进行动力学补偿,以实现高性能的轨迹跟踪控制.系统软件结构如图 5~7 所示.

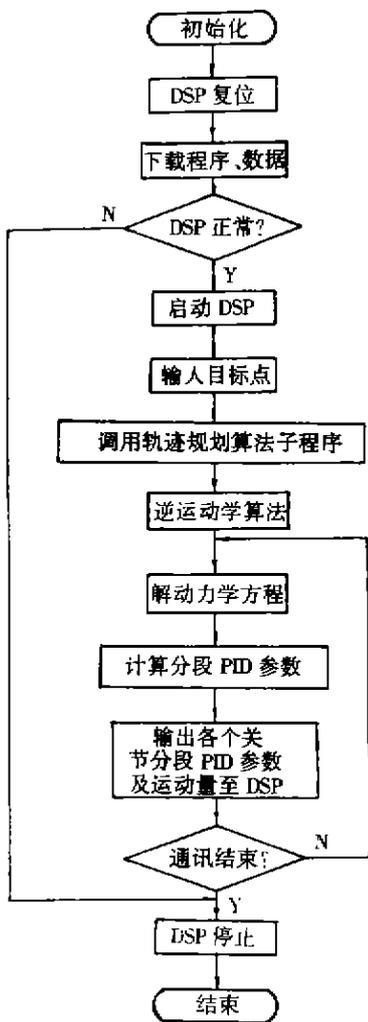


图 5 主控程序框图

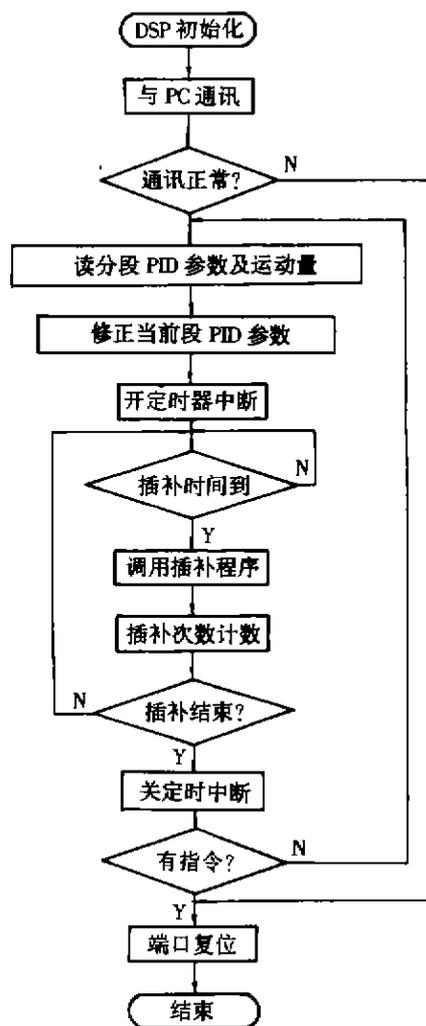


图 6 DSP 主程序框图

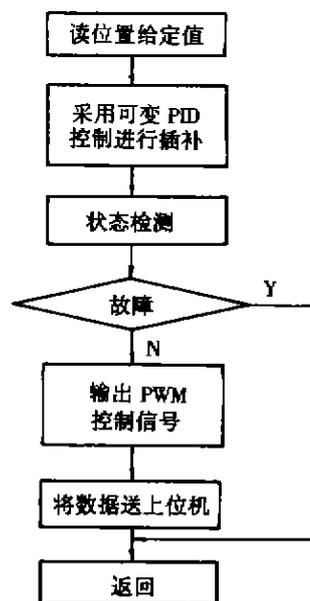


图 7 伺服中断程序框图

5 结 论

a. 提供了一个开放、实时、精确的机器人控制系统,可以在上位机上进行不同的轨迹规划和控制算法,在下位机上进行插补细分和控制优化等的研究和实现。

b. 为机器人动力学补偿提供了一种思路,即上位机根据建立的动力学参数与 PID 参数相关联的控制算法计算 PID 控制参数;下位机分段修正 PID 参数以实现动力学近似补偿。

c. 基于 CAN 总线的并型 DSP 的机器人控制器,使系统实现双速率运行,同时满足系统对计算时间和高伺服控制频率的要求。

参考文献:

- [1] Seraji H, Long M, Lee T S. Motion control of 7-DOF arms: the configuration control approach[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1993, 9(2): 125-139.
- [2] 夏泽中,雷江,曹健,等.一种基于 DSP 的高速运动控制模板设计及应用[J].电气自动化,2000,22(1):45-47.
- [3] 吴鑫,齐铂金,吴红杰.基于 CAN 总线的弧焊机器人控制系统的设计[J].制造业自动化,2000,22(7):44-46.
- [4] 吴瑞祥.机器人技术及其应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,1994:12-75.
- [5] 周学才,李卫平,李强.开放式机器人通用控制系统[J].机器人,1998,20(1):25-31.
- [6] 王耀南,余群明.工业机器人的模糊控制器设计[A].蔡自兴.智能机器人 98'研讨会论文集[C].中南工业大学学报(自然科学版),1998,29(专辑 1):399-402.

The research of GR- II robotic controller based on DSP

YANG Xiao-yan, ZHOU Guo-rong, CHEN Xin

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: On ground of analysis and research of the original controller of the GR-II pedagogic robot, the authors designed a new robotic controller based on DSP on which different track plans and control algorithms can be studied and realized. This controller takes universal PC as the supervisory-controlled computer, and six DSPs as controller's cores to interpolation-calculate and servo-control the six joints of the robot. It adopts high-speed CAN Bus to communicate and realize the two-stage controllers running at different speeds, and can fulfil the demands of the calculating-speed of complex control algorithms and the high servo-frequency of capacity and accuracy of robot coursing. At the same time, the inverse kinematics and dynamics analysis can be made on the supervisory-controlled computer by software design. It can amend the parameters PID of the control algorithm on the controller according to the dynamics to realize the dynamics compensation.

Key words: robot; controller; DSP