

文章编号: 1002-0446(2004)01-0022-05

仿人手臂动力学控制实验平台的设计与实现*

董春¹, 徐文立¹, 杨耕¹, 孙立宁², 李瑞峰²

(1. 清华大学自动化系, 北京 100084; 2. 哈尔滨工业大学机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 研制了一种新型的可编程运动控制器. 在实现多轴协调运动控制的同时, 该控制器还具有控制结构可重定义及支持仿真软件 MATLAB 的特点. 在此基础上, 设计了仿人手臂动力学控制实验平台, 并通过实验验证了其实现高级控制算法的能力.

关键词: 运动控制器; MATLAB; 仿人手臂; 实验平台

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

DESIGN AND REALIZATION OF A DYNAMICS CONTROL EXPERIMENT PLATFORM FOR AN ANTHROPOMORPHIC MANIPULATOR

DONG Chun¹, XU Wen-li¹, YANG Geng¹, SUN Li-ning², LI Ri-feng²

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Robot Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To implement coordinated multi-axis motion control, a programmable motion controller has been developed. The controller has re-definable control structure and supports the simulation software MATLAB. Based on it, a dynamics control experiment platform for a 7-DOF anthropomorphic manipulator has been constructed, and several experiments have been done to illustrate the power of the platform to implement many advanced control algorithms.

Keywords: motion controller; MATLAB; anthropomorphic manipulator; experiment platform

1 引言 (Introduction)

受硬件实现手段的限制, 关节式工业机器人大多采用 PID 控制. 随着机器人应用领域的不断拓展, 对机器人的动力学性能的要求越来越高, 简单的 PID 控制已很难满足高性能指标的要求, 如何提高机器人的动力学性能已成为机器人技术的研究重点. 从机器人技术的发展现状看, 大量的研究工作都集中在控制方法上, 而且已经涉及控制科学的各个方面, 这又对作为动力学控制方法实现手段的机器人控制器提出了更高的要求.

目前, 工业机器人的控制器大多采用 PC + 运动控制器的结构^[1, 2], 其中, 运动控制器可以独立完成一些简单的控制算法, 而复杂的控制算法的实现往往需要上位机配合. 由于系统机器总线能力及通信时滞等因素的限制, 这种硬件实现手段往往会造成控制算法无法达到其应有的控制效果. 因此, 在原有

工作的基础上^[3], 我们首先研制了一种新型运动控制器, 旨在为多种控制算法提供必要的软硬件支持. 在此基础上, 开发了仿人手臂动力学控制实验平台. 利用 MATLAB 的支持, 该平台可以很方便地用于动力学控制方法的研究.

2 运动控制器 (Motion controller)

高性能运动控制器大多是利用 DSP (Digital Signal Processor) 及 FPGA (Field Programmable Gate Arrays) 实现多个伺服电机的协调控制, 即利用 DSP 提供的软硬件资源以及 FPGA 的高集成度, 使被控电机具有希望的运行轨迹及静态、动态性能. 目前, Delta Tau Data Systems 公司研制的 Turbo PMAC/PMAC2 型运动控制器以 DSP56002 为核心, 采用 PID + 前馈的控制算法, 可同时控制 8 个轴的运动, 单轴伺服采样周期可高达 30 微秒; Tech80 公司研制的 SpiiPlus 型运动控制器在 PID + 速度、加速度前馈的结构中加入了二

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (863 - 512 - 02 - 00 - 95); 中国博士后科学基金资助项目 (2003033123).
收稿日期: 2003 - 04 - 25

阶低通滤波器,用来抑制系统的低频振荡;文献[4]给出一种基于 DSP 的鲁棒控制设计方案,通过摩擦补偿及扰动的观测来改善系统的动态跟踪性能;文献[5]采用 TI 公司的 TMS320C31 实现了机械臂的自适应控制。

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的范围受到极大的限制^[6~8]。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。

2.1 技术指标

我们的主要目标是研制基于 ISA 总线及 CAN 总线的可编程运动控制器,同时开发 DOS、Windows 及 Windows NT 的支持软件,为此确定如下技术指标。

- (1) 可实现 1 - 4 轴独立或联动控制,与上位机通讯采用 ISA 总线或 CAN 总线;
- (2) 默认控制算法为 PID 或 PIVFF;
- (3) 可选的梯形 S 形两种运动轨迹及电子齿轮功能;
- (4) 输出方式为 16 位 DAC 或 10 位 PWM 方式, PWM 频率为 24KHz;
- (5) 具有完成电机伺服控制的辅助接口,如伺服放大器报警和伺服使能接口;
- (6) 开发基于 DOS、Windows 及 Windows NT 3 种操作系统平台的运动控制器调试软件,同时开发 Microsoft

C++ 的函数库、Visual C++ 的动态链接库。

除以上基本功能外,针对目前运动控制技术存在的问题,课题将研究重点放在以下两个方面:

(1) 控制算法可重定义 关节型机器人的动力学方程是一组复杂非线性强耦合的二阶微分方程,简单的关节独立控制方法很难达到理想的控制效果,而实现高级的控制算法的传统办法是上位机辅之以运动控制器。由于上位机总线能力及通信时滞的限制,这种控制器的控制效果往往不够理想。因此,除常规的 PID+前馈的控制算法外,该运动控制器应从硬件上支持软件可选择的控制结构,由运动控制器独立实现高级的控制算法,并将伺服采样周期限制在 30μs 以下。

(2) 支持 MATLAB/SIMULINK 传统的动力学控制方法是借助于仿真软件对控制算法进行研究,然后通过编程实现。这一反复的过程往往需要较长的时间。因此,我们的目标是运动控制器直接支持 MATLAB/SIMULINK,将仿真通过的算法经由 ISA 总线或 CAN 总线下载至运动控制器,并很快可以看到其实际控制效果,这将大大缩短调试周期。

2.2 硬件设计

本控制器的设计采用不同于常规的 DSP + FPGA 结构,其基本思想如下(参见图 1):

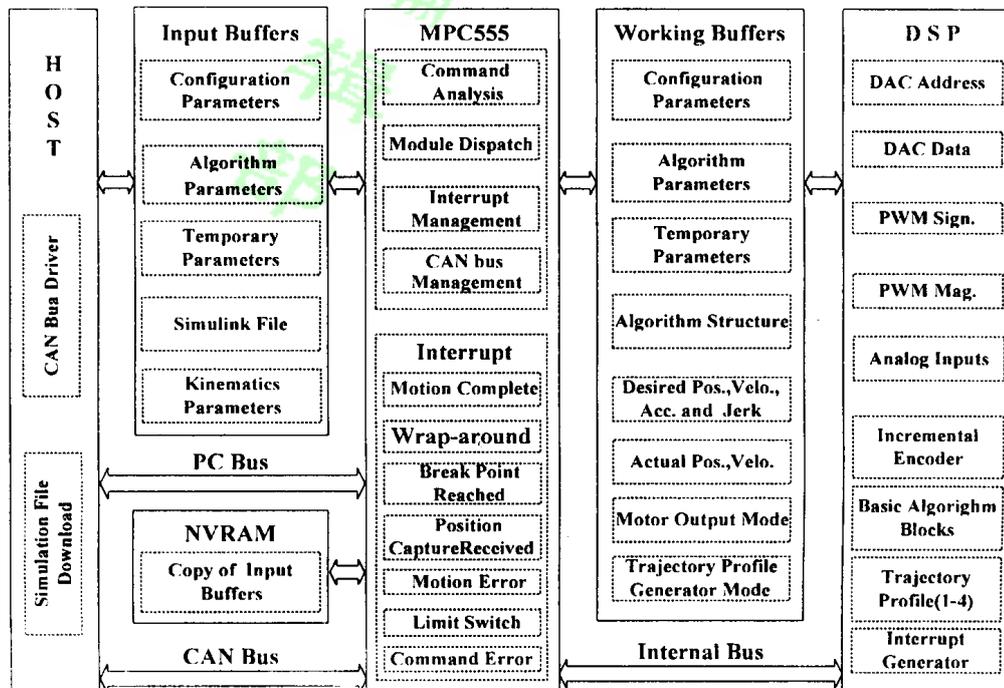


图 1 运动控制器的基本原理
Fig.1 Basic principle of the motion controller

(1) 为实现对 SIMULINK 算法的支持,采用高性能的单片机 MPC555LFCZP40 (RISC 结构、内置 CAN2.0B 控制器,40 MHz 主频)对其控制结构进行解析及重构。

(2) 为保证伺服采样周期,采用由单片机对 DSP(TMS320C31 40 MHz 主频)的功能模块进行调度的方式实现控制算法。

(3) 支持分散控制、集中控制两种结构,控制器与上位机的通信采用高速双口 RAM 或 CAN 总线;与伺服驱动器连接采用 DAC 方式或 PWM 方式。

(4) 控制器内部的数据传输采用高速双口 RAM (IDT7026) 以保证较高的伺服采样周期;采用 FPGA (EPM7256S),提高系统集成度及其可靠性。

2.3 软件设计

整个系统的软件可分为上位机程序、单片机程序及 DSP 程序三个部分。

(1) 上位机程序 以 MATLAB 为平台,主要完成调试界面的生成、仿真文件的特征提取、CAN 总线的驱动以及文件的下载。在运动控制器运行的过程中,上位机程序还可在线监视各轴的响应过程,手动更改某些控制参数以及干预控制器的运行。运行结束后,还可用 MATLAB 的命令将运行曲线存储和打印,以便事后分析。

(2) 单片机程序 实现对上位机下载文件的解释、CAN 总线的驱动、模块的调度、中断的管理以及运动控制器的启动和停止过程的管理和当前运行状态参数的回送。此外,该程序还负责初始运行环境(包括默认的控制结构及运行轨迹的加载、NVRAM 的数据备份及加载)的建立。

(3) DSP 程序 实现运行轨迹的生成、控制算法基本模块的定义、单片机硬中断的生成、码盘数据的读取、二级缓存数据的更新以及输出模式的选择。此外,为方便系统的调试,还开发基于 DOS、Windows 及 Windows NT 三种操作系统平台的运动控制器调试软件。同时开发 Microsoft C++ 的函数库、Visual C++ 的动态链接库,避免了系统进一步开发过程中对可编程运动控制器硬件结构的依赖。

2.4 单轴轨迹规划性能测试

为测试运动控制器的轨迹规划能力,分别采用位置控制模式的梯形轨迹、位置控制模式的 S 曲线轨迹及速度控制模式的梯形轨迹进行了实验。实验中,测试系统选用 SZ-2000 型直流伺服电机(额定转数 1400 转/分,编码器线数 2000 脉冲/转)、自制的 PWM 功率放大器和 Pentium III866 计算机。控制算

法均采用运动控制器默认的 PIVFF 算法,其参数设置参见表 1。

表 1 实验参数的设置

Table 1 Settings of the experiment parameters

工作方式	动力学控制参数				运动学控制参数		
	K_p	K_i	K_d	K_{off}	a_{max} (r/s^2)	J (r/s^3)	v_{max} (r/min)
位置模式 (梯形曲线)	63	6	92	80	50	—	500
位置模式 (S 曲线)	30	4	50	50	50	40	300
速度模式 (梯形曲线)	23	4	30	50	40	—	500

图 2 ~ 图 4 分别给出了该项测试的速度、位置及位置误差的实测结果。从实测的结果可以看出,运动控制器满足了设计指标的要求,即实现了梯形及 S 形轨迹规划。

3 动力学控制实验平台 (Dynamic control experiment platform)

仿人手臂为七自由度冗余度机械臂,其中肩部三个关节,肘部一个关节,腕部三个关节。关节的驱动选用 NIKKI DENSO 公司生产的 NA50-20NAM 型伺服电机(额定转数 3000 转/分,伪绝对编码器线数 4096 脉冲/转)。伺服放大器也是该公司生产的 NPSA ZMTA-210A 型驱动器。该驱动器具有位置控制、速度控制及力矩控制三种工作模式。这里,我们将其设置为力矩控制模式。通过两套运动控制器,实现七个轴的位置伺服控制。

该实验平台选用两台工业控制计算机,分别用作运动学控制及动力学控制。运动学控制的研究内容主要包括冗余度机器人正运动学、逆运动学及关节优化。动力学控制的研究内容是利用运动控制器可重定义的控制结构,主要从自适应控制及鲁棒控制的角度研究进一步改善机器人动力学性能的可行控制方法。两台计算机与两套运动控制之间通过 CAN 总线连接,构成分散式控制系统 (decentralized control system)。整个系统的构成如图 5 所示。

4 动力学控制实验 (Dynamic control experiment)

通过两组比较实验对动力学实验平台进行测试。实验中采用相同的控制算法,即 PI + 速度及加速度前馈(参见图 6)。此外,在电流环给定端加入一个补偿量,该补偿量是通过机械臂当前的动力学参

数计算出来的,用于削弱关节间的耦合作用.限于篇幅,这里并不给出其具体描述.两组实验不同之处仅

在于一组是由上位机实现补偿算法,另一组是控制算法,全部由运动控制器独立实现.

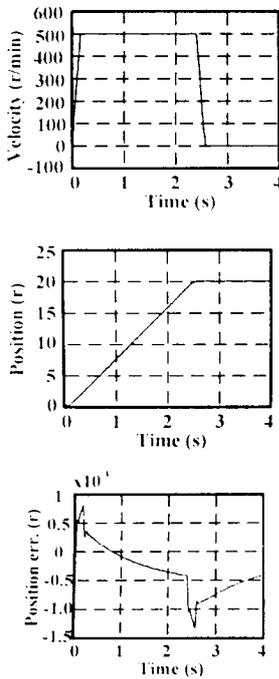


图 2 位置模式下的梯形轨迹
Fig.2 Trapezoid track in position mode

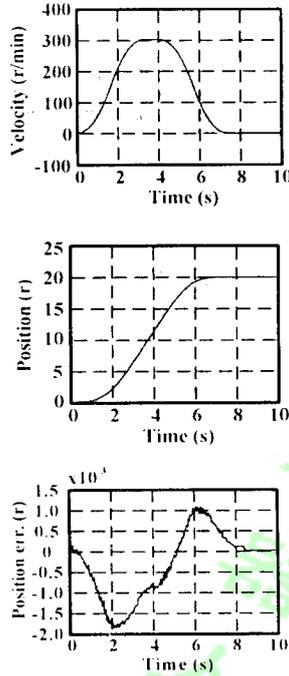


图 3 位置模式下的 S 形轨迹
Fig.3 S-curve track in position mode

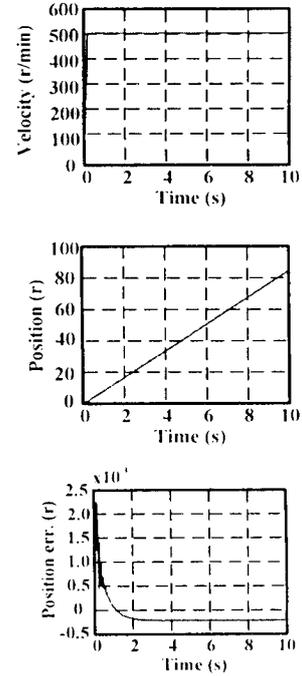


图 4 速度模式下的梯形轨迹
Fig.4 Trapezoid track in velocity mode

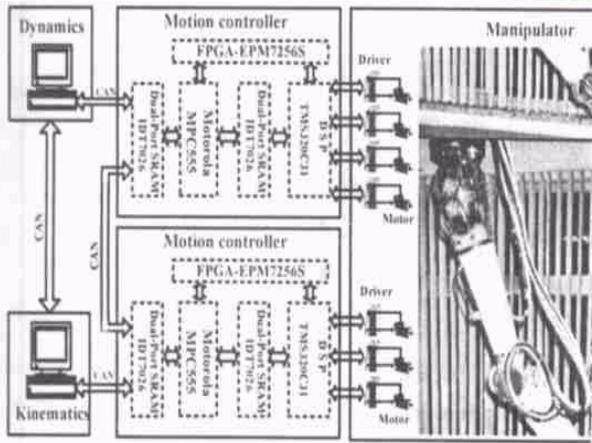


图 5 仿人手臂动力学实验平台

Fig.5 Dynamic experiment platform for the anthropomorphic arm

首先,在 SIMULINK 下生成图 6 所示的仿真文件,并以文件名 simulation-file.m 存储.然后用脚本文件编辑器生成下列文件:

```
[ Kine matics parameters ]
Trajectory Profile = T; // 梯形轨迹
Desired velocity = 1000; // 希望速度
Desired acceleration = 1000; // 希望加速度
Maximum position err = 65335; // 允许误差
```

```
Action = all axes ; //有效范围
Update ; // 立即生效
[ Dynamics parameters ]
Define Theta , Ref , Amp , Encoder ; //形参定义
Load "Simulation-file .m" ; //加载文件
Action = all axes ; //作用范围
Update ; // 立即生效
End .
```

仿真文件分别定义了各轴希望轨迹及动力学控制算法.运行 download 命令将该文件处理后通过 CAN 总线下载至运动控制器,其中定义的运动学及动力学控制算法将会由运动控制器自动完成,而仿人手臂的运动学相关部分由另一台计算机实现(参见图 5),这样大大地简化了动力学调试的过程.

图 7 和图 8 分别给出肩部 PITCH 关节在两种实现方法下对正弦给定信号 $\theta_r = 20^\circ \sin(0.8 \pi t)$ 的实际跟踪曲线.正弦给定信号由负责运动学的计算机来产生,该机还同时产生用作其它关节的正弦给定信号,用以强调关节间耦合作用对肩部 PITCH 关节的影响.图中,位置误差曲线为单轴轨迹规划后的目标轨迹与实际值之差.

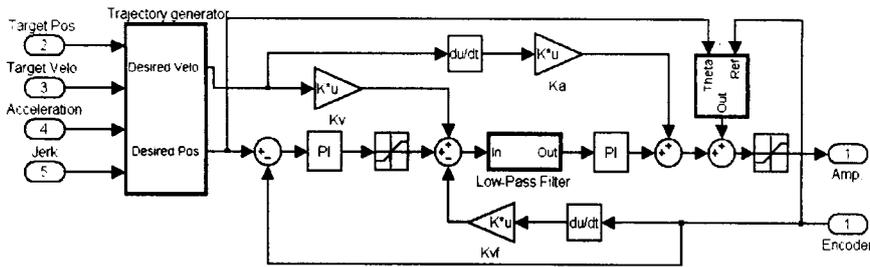


图 6 由 SIMULINK 生成的仿真文件

Fig.6 Simulation file in SIMULINK

实验结果表明:在相同的条件下,由运动控制器独立实现控制算法,其跟踪效果明显优于由上位机配合实现的跟踪效果.该实验同时也验证了运动控制器控制算法的可定义性及对 SIMULINK 的支持,实现了最初的设计思想.

5 结论 (Conclusion)

为研制仿人手臂动力学控制实验平台,首先成功地开发了一种新型运动控制器.与常规的运动控制器相比,该控制器具有如下特点:

- (1) 可重定义的控制结构使之可独立实现多种

高级控制算法,为动力学控制方法的研究提供了极大的灵活性.

- (2) 对 MATLAB/SIMULINK 的支持,使控制算法的仿真与实验紧密地结合起来,大大地缩短控制算法的开发周期.

在此基础上,开发了仿人手臂动力学实验平台,通过功能性实验进一步验证了运动控制器的有效性.除进行仿人手臂动力学控制方法研究外,该实验平台还可用于自动控制理论专业学生开发和验证各种控制算法.

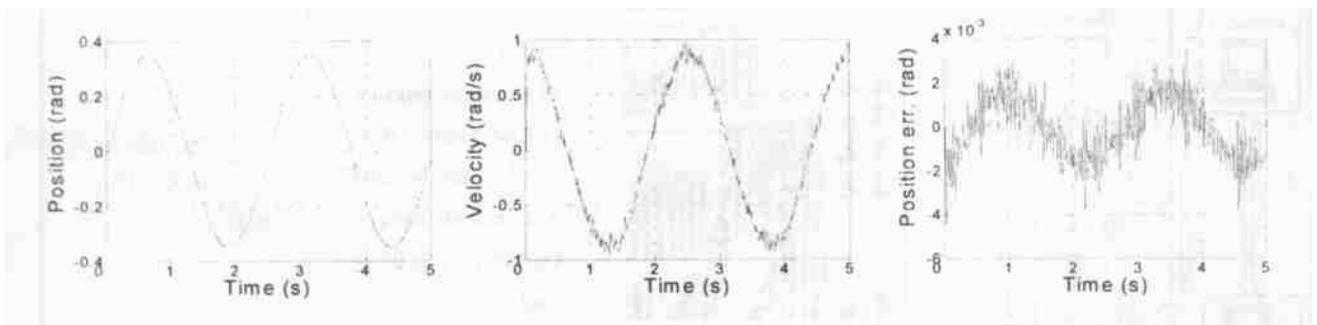


图 7 上位机配合实现的正弦跟踪效果

Fig.7 Sine-tracking with support of host

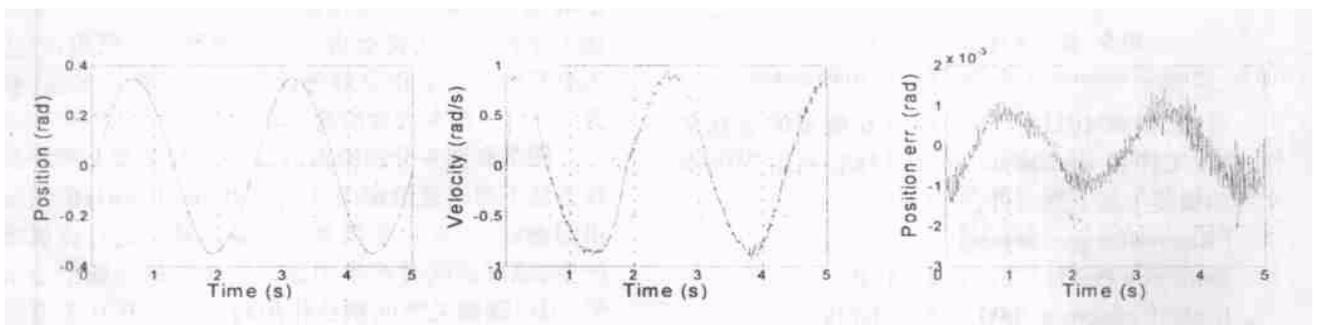


图 8 运动控制器独立实现的正弦跟踪效果

Fig.8 Sine-tracking implemented by motion controller independently

(下转第 31 页)