

文章编号: 1002-0446(2002)06-0545-05

dSPACE 快速控制原型在机器人控制中的应用*

沈悦明 陈启军

(同济大学信息与控制工程系 上海 200092)

摘 要: 本文介绍了 dSPACE 实时系统以及基于 dSPACE 的快速控制原型设计方法. 利用 dSPACE 系统构造了四自由度机器人快速控制原型并进行了轨迹跟踪方面的实验研究. 实验结果证明了本文系统及方法的有效性.

关键词: dSPACE; 快速控制原型; MATLAB; Simulink; RTW; RTI

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

dSPACE RAPID CONTROL PROTOTYPING AND IT'S APPLICATION IN ROBOT CONTROL

SHEN Yue-ming CHEN Qi-jun

(Department of Information and Control Engineering, Tongji University Shanghai 200092)

Abstract This paper presents the dSPACE real-time system and the design strategy on rapid control prototyping based on the dSPACE system. With the dSPACE system, a rapid control prototyping is designed for a manipulator which has four degrees of freedom. Experimental researches on trajectory tracking control are given which show the effectiveness of the system and the method.

Keywords: dSPACE, rapid control prototyping, MATLAB, simulink, RTW, RTI

1 引言(Introduction)

dSPACE 实时系统是由德国 dSPACE (digital Signal Processing And Control Engineering) 公司开发的一套基于 MATLAB/Simulink 的控制系统开发及测试平台, 它实现了和 MATLAB/Simulink 的完全无缝连接. dSPACE 实时系统拥有具有高速计算能力的硬件系统, 包括处理器、I/O 等, 还拥有方便易用的实现代码生成/下载和实验/调试的软件环境. 目前 dSPACE 系统在国外已广泛应用于机器人、航空航天、汽车、发动机、电力机车、驱动及工业控制等领域^[1,2], 但在国内文献中还未见相关应用的介绍.

当今社会, 市场对产品的需求呈多样性、快速性的趋势, 这就使企业的新品开发面临着多样性需求与快速开发之间的矛盾. 工程师总希望快速地建立控制对象及控制器模型, 并对整个控制系统进行多次离线的及在线的实验来验证控制系统软、硬件方案的可行性. 这个过程就称之为快速控制原型

(Rapid Control Prototyping RCP), RCP 的关键是代码的自动生成和下载, dSPACE 软、硬件系统为 RCP 提供了完美的解决方案.

本文介绍了基于 dSPACE 平台构建机器人快速控制原型的方法. 利用 dSPACE 系统构造了四自由度机器人快速控制原型, 实现了数据的下载、采集, 完成了模型参数的实时调节, 生成了机械手的运动轨迹及误差曲线图. 机器人连续轨迹跟踪的实验取得了满意的效果, 证明了本文系统及方法的有效性.

2 dSPACE 系统介绍(Introduction of the dSPACE system)

2.1 硬件系统

本实验室所采用的 dSPACE 系统硬件组成如图 1 所示. 其中 DS1003 是处理器板, 含有一片主频为 40MHz 的 DSP 芯片 TMS320C40, 局部与全局内存使得 DSP 的操作能做到零等待, 双端口 RAM 使得

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60005002).

收稿日期: 2002-07-04

主机与 DSP 之间可以快速通信; DS2002 是 A/D 转换板, 含两组独立的 16 位高速 A/D 转换器, 每组各含 16 路转换信道, 转换时间为 $5\mu\text{s}$; DS4003 提供了 96 条双向高速数字 I/O 口, 每 8 位为一组, 方向可编程; DS4001 除了含有 32 条与 DS4003 同样特性的数字 I/O 口外, 还含 5 个计数器/时钟电路, 可通过编程输出 4 路 PWM 信号; 所有这些板卡都通过 32 位 PHS 总线(Peripheral high-speed bus)相互连接。

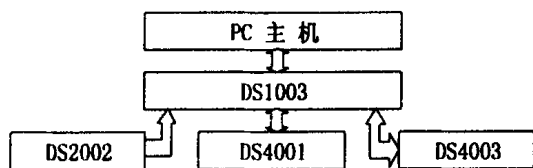


图 1 dSPACE 硬件系统

Fig. 1 dSPACE hardware system

dSPACE 系统的出发点是将实时系统和提供用户接口的系统完全分开. 处理器板和各种 I/O 板都有很高的运行速度, 它们之间通过 PHS 总线相连. PHS 总线是专门为实时应用而设计的, 它对 I/O 与处理器的通讯而言总是处于开放状态, 不存在其它多 CPU 总线系统中存在的等待时间或利用外部传输协议的总线系统所存在的内含软件问题, 因而可以保证 I/O 访问时间. dSPACE 板和主机之间的接口通过 ISA 总线或 Ethernet 完成. 通过将 dSPACE 处理器板上的全部内存映像到 PC 机内, 主机能够访问 dSPACE 处理器上的所有内存, 从而完成 dSPACE 实时硬件系统和 PC 机之间的数据传输. PC 机扮演智能终端的角色, 作为可视化的监控平台.

2.2 软件系统

2.2.1 代码生成及下载软件

(1) 代码的生成过程

代码的生成及下载可以自动完成也可手工完成. 将仿真模型或控制原型从离线仿真转到实时仿真或控制的最快捷方式就是用 Simulink. dSPACE 的实时接口库 RTI(Real-Time Interface) 允许通过方框图的方式来指定用户 I/O, RTI 与 MathWorks 的 RTW(Real-Time Workshop) 共同协作可自动生成 dSPACE 硬件所需的代码, 完成代码的生成和下载过程. 如果不想用 Simulink 完成控制器或仿真模型代码的生成, 用户可利用 dSPACE 提供的用于初始化和访问实时硬件系统的 C 函数库编写自己的 C 代码, 在调试器、编译器和下载软件的帮助下完成代

码的生成和下载.

(2) MATLAB/Simulink——控制设计平台

MATLAB 具有功能强大的数学分析与 2-D、3-D 图形绘制能力, Simulink 是一集成于 MATLAB 中的用于建模、分析和离线仿真的交互式环境, 具有用拖放指令方式建立方框图模型的图形用户接口. dSPACE 的框图库对 Simulink 库进行了扩展, 针对每一硬件的各种功能开发了相应的方框图模型, 利用这些框图无需写任何代码就能完成包括 I/O 接口及初始化过程的全部设置.

RTW 建立在 MATLAB 和 Simulink 基础上, 它针对 Simulink 中的每个方框图模型编写了相应的 C 代码并用标准的代码定义了模块之间的连接关系, 用户只需调整各个模型的参数就可以从 Simulink 的框图自动生成最终的 C 代码. 通过 RTW 可以在远程主机上实时运行 Simulink 模型, 还可以实现半实物仿真(Hardware in the loop HLP).

(3) RTI-从方框图自动生成代码并下载

RTI 是连接 dSPACE 实时系统与软件开发工具 MATLAB/Simulink 之纽带, 它通过扩展 RTW, 使其生成的代码能在 dSPACE 处理器板上运行, 实现了从 Simulink 模型到 dSPACE 实时硬件代码的无缝自动下载. 这使工程师能完全致力于实际设计过程, 并迅速完成设计的更改而不用手工编程. 通过 RTI 来实现控制原型与对象仿真实时代码的生成的一般步骤是: 首先用 Simulink 建立模型并进行离线仿真; 然后加入 dSPACE I/O, 将离线模型转为实时模型; 最后用 RTW 的“Build”命令生成代码并将其下载到实时硬件中运行.

2.2.2 测试软件

ControlDesk 是 dSPACE 开发的新一代集成化实验工具软件, 一旦控制器的开发及仿真模型用 MATLAB/Simulink 建立好, 再通过 RTI 实现并下载到实时硬件中, 就可用 ControlDesk 对运行过程进行监控. 利用它可以实现对实时硬件的图形化管理、用户虚拟仪表的轻松建立、变量的可视化管理、参数的可视化管理以及实验过程自动化.

用户还能利用 MLIB 和 MTRACE 在不中断实验的情况下从 MATLAB 直接访问 dSPACE 板上运行的应用程序变量. 这样就可以利用 MATLAB 强大的数字计算及图形能力进行顺序自动测试、数据记录、控制参数的优化及实验数据的分析.

在需要进行第三方测试、使用其它可视化工具或使用用户编写的主程序时, 可用 CLIB 完成主机与

控制器之间的交互操作. CLIB 包括一整套的 C 函数, 可在其它工具和实时硬件之间建立联系, 用来建立用户主接口, 完成各种处理器的控制功能, 访问处理器的内存.

3 机器人控制系统的实现 (Implementation of the robot control system)

3.1 系统构成

本文基于 dSPACE 快速控制原型设计了机器人控制系统. 机器人本体有四个自由度, 其中两个自由度实现大范围的运动, 两个自由度的激光振镜扫描系统实现小范围的精度调节, 该机器人也称为宏-微机器人^[3]. 机器人控制系统总体结构图如图 2, 其中 PC 主机负责完成控制算法的设计, 对在 dSPACE 实时硬件系统中运行的程序进行监控, 并进行其它数据处理工作如离线完成轨迹规划、运动学参数辨识、动力学参数辨识等; MATLAB/Simulink 负责搭建宏-微机器人快速控制原型, 完成控制算法的设计; RTI 与 RTW 协作自动将快速控制原型转化为可执行的 C 代码; Compiler 可将 C 代码编译并下载到 dSPACE 实时处理器 DS1003 中运行; MLIB 及 MTRACE 则负责主机与 DS1003 之间的数据交互, 便于实时监控 DS1003 上程序的运行.

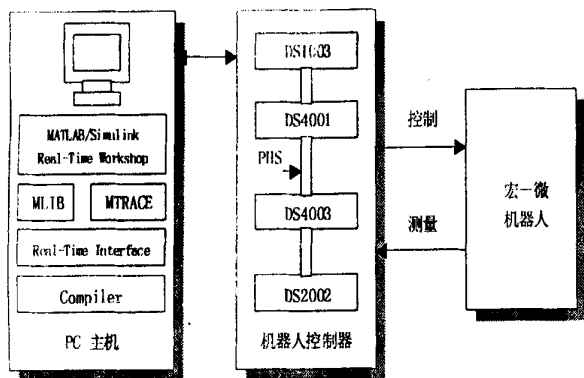


图 2 机器人控制系统总体结构

Fig. 2 Global structure of the robot control system

dSPACE 系统不仅可用作开发测试平台, 还可作为实际的高速高精度控制器, 当控制算法验证成功后 dSPACE 实时硬件系统可以脱离 PC 主机, 作为机器人控制器独立运行. 机器人关节测量与控制系统如图 3 所示, 宏机械手的关节位置测量选用 30 对极的多级旋转变压器, 测量电路输出为数字量, 分辨率达 $1/122880$ 转; 驱动电机选用最大力矩为 $20\text{N}\cdot\text{m}$ 的直流力矩电机, PWM 驱动. 微机械手的振镜位置测量采用小惯量的电容式位置传感器, 分辨率为

0.5×10^{-5} rad, 模拟量输出. DS4003 负责采集宏机械手关节位置信号和给微机械手振镜电机发出期望的位置信号; DS4001 负责发送 PWM 信号驱动宏机械手关节电机; DS2002 则采集微机械手位置信号.

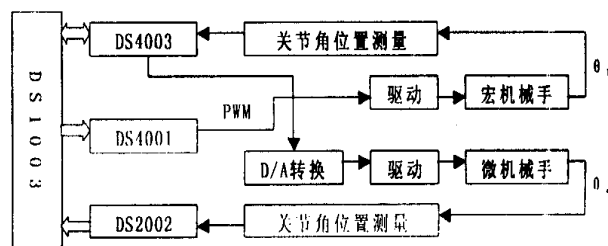


图 3 机器人关节测量与控制系统

Fig. 3 Control and measurement system of the manipulator joints

3.2 快速控制原型的实现

3.2.1 构建快速控制原型

dSPACE 公司为 dSPACE 实时硬件的不同资源设计了相应的方框图模型, 可象普通 Simulink 方框图模型一样使用. 在 Simulink 中拖动相应的方框图模型可快速搭建好机器人快速控制原型图, 以控制宏机械手一个关节为例的机器人快速控制原型如图 4(略).

“Input”模块负责提供期望的位置量, 机械手期望的轨迹由 PC 主机离线规划出来, 再由“Input”模块将数据从主机读入 dSPACE 系统. 如何从主机中取出包含在离线规划生成的数据文件中的数据并将其下载到 dSPACE 实时处理器是设计的一个难点, 实际设计时采用“data store write”和“data store read”模块在 dSPACE 实时处理器板上的内存中为数组变量 data 和单个变量 theta 开辟两块空间分别用于存储由“from workspace”模块读入的轨迹数据和每一采样时间点机械手关节位置的给定值. 为了让变量 theta 与数组 data 相关联还需要编写相应的 C 代码(见 3.2.2).

“Controller”模块是设计的核心, 这里我们仅采用 PID 控制, 如需要更加复杂的控制算法可利用 MATLAB 相关的专用工具箱(如控制系统工具箱、模糊逻辑工具箱、 μ -分析及综合工具箱等)来实现. 此外, 用户还可以借助 Simulink 提供的 S-Function 模块或借助 RTI 提供的 User-Code 功能用 C 代码编写自己的控制算法.

“Robot”模块由 dSPACE 的 RTI 提供的方框图形式的 I/O 模块搭建而成, 以控制宏机械手的一个关节为例, 可用“DS4003_IN16_B1_P1_G0”模块读

取实际关节位置量,用“DS4001PWM_B1”模块向关节电机发 PWM 驱动信号.如要修改某个模块的属性可用鼠标双击该模块并在弹出的对话框中设置相应的参数.

3.2.2 完善快速控制原型

虽然 RTW 与 RTI 可由 Simulink 方框图模型自动生成代码,但方框图毕竟不能实现全部控制功能.要实现内存变量间的通信、软件中断以及用户自己开发的新控制算法等功能,就需要手写 C 代码与自动生成的代码相结合,以完善快速控制原型. dSPACE 提供了两种手写 C 代码的方法:用 RTI 提供的 UserCode 功能或 Simulink 提供的 S-Function 模块.由于 S-Function 涉及许多用于实现特定功能的系统函数,对于一般 Simulink 用户来说较难理解,这里我们采用了比较好懂 UserCode 来进行编程.

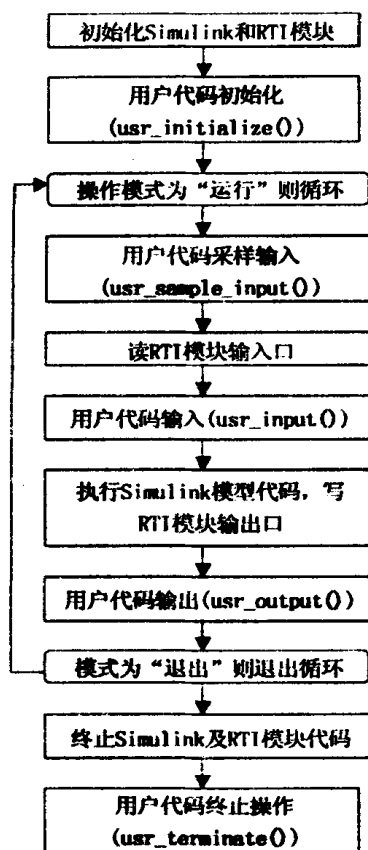


图 5 程序流程图

Fig. 5 Flow chart

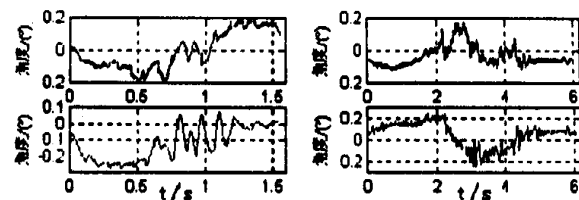
User_Code 为用户提供了五个接口函数,用户可在相应的函数体内填入代码,整个程序在 dSPACE 实时处理器中的运行过程如图 5. 在程序入口先进行 Simulink 及 RTI 模块的初始化,再进入用户程序初始化函数进行一些用户代码的初始化工作,然后在每个采样周期(本系统取 2ms 作为一个采

样周期)都执行一次循环体内的操作直到用户终止程序时才退出循环并执行程序出口函数.

4 运行及测试(Experiment)

快速控制原型不仅需要能够方便快捷的构建系统控制原型还需要及时准确的测量调试工具,以便及时发现问题并加以改进.当代码经过编译下载并在 dSPACE 实时处理器中运行时,可以用 dSPACE 提供的集成化调试软件平台 ControlDesk 实时的观察和调整控制参数. Control Desk 提供了类似 VB 的控件可以让用户定制自己的图形化监控接口并使其与欲监控的参数关联起来.还可以利用 MLib 和 MTRACE 编写 Matlab 的“.m”文件以读、写数据并存储于 PC 主机上和进一步的分析处理,如求误差、绘图等.而且这些软件工具只是通过内存映象访问实验过程中的各种参数及结果变量,不会产生对实验过程的中断,保证了系统的实时性.

让机器人以 0.5m/s 的速度跟踪长 0.5m 直线,以 0.25m/s 的速度跟踪直径为 0.25m 的圆,采用 PID 控制,图 6(a)、(b)给出了机器人跟踪直线和圆时宏机械手的关节误差,最大跟踪误差小于 0.2 度.对直线和圆的跟踪实验证明了本文系统及方法的有效性.



(a) 直线跟踪误差

(b) 圆跟踪误差

图 6 宏机械手关节误差

Fig. 6 Joint error of macro manipulator

5 结论(Conclusion)

基于本文的研究及实验可得如下结论:

(1) dSPACE 系统软、硬件均采用模块化设计方法,可靠性高.利用 dSPACE 提供的集成开发调试平台可以方便快捷的构建快速控制原型,完成控制系统的设计和调试.工程师不用或只需编写极少的程序代码就可用很短的时间完成以前需要编写大量代码来完成的工作,而且模型参数的修改、代码的生成及下载也非常方便,完全避免了过去的那种因为局部改动就要多花费几周甚至几个月的时间进行代码的修改和重新测试,大大节省了时间,提高了效率.

(2) dSPACE 系统与 MATLAB 实现了无缝连

接,使广大 MATLAB 用户可以轻松地掌握 dSPACE 的使用,从而方便地从非实时分析、设计过渡到实时的分析、设计。

(3) 机器人控制器的设计是一项比较复杂的工作,往往需要比较许多不同的控制算法并不断的调整控制参数。dSPACE 快速控制原型构造简单、调整方便,非常适合进行机器人控制算法的实验研究。

参考文献 (References)

- [1] Mark Milam, Richard M. Murray. A Testbed For Nonlinear Flight Control Techniques: The Caltech Ducted Fan. 1999 Conference on Control Applications, 1999. 22- 27
- [2] Kristen N. Jaax, Pierre-Henry Marbotl, Blake Hannaford.

Development of a Biomimetic Position Sensor for Robotic Kinesesthesia. Proc. IROS 2000, Takamatsu, Japan, Nov. 2000

- [3] 陈启军, 王月娟, 蒋平等. 宏-微机器人-概念、动态、控制及几点算法. 机器人, 1998. 7
- [4] dSPACE User Guide- Implementation Guide. dSPACE Inc., 2001
- [5] dSPACE User Guide- MATLAB-dSPACE Interface and Trace Library. dSPACE Inc, 2001
- [6] 程卫国等编. MATLAB5.3 精彩编程及高级应用. 机械工业出版社, 2000. 4

作者简介:

沈悦明 (1978-), 男, 工学硕士. 研究领域: 机器人控制与智能控制.

陈启军 (1966-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机器人控制与智能控制.

会议论文格式要求 * * 三黑居中 * *

李 实 * * 小四宋居中 * *

清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084 * * 小五宋居中 * *

lishi@sl000e.cs.tsinghua.edu.cn * * 小五宋居中 * *

摘 要 本规格为会议论文而定. 摘要置于姓名和单位之下, 居中, 宋体, 小五号字. 摘要的长度不超过 200 字, 且放在一个段落中. * * 小五宋居左 * *

关键词 关键词另起一段, 与摘要空一行, 字体和格式同摘要. * * 小五宋居左 * *

A Specification for Conference Theses

Li Shi

Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084

Lishi@sl000e.cs.tsinghua.edu.cn

Abstract The English part should be set in roman style, and the fonts of the title, author (including abstract and keywords) and affiliation information should be in 12- point, 10- point and 9- point respectively. The abstract may be up to 150- words long. Leave one blank line before the main text. This specification is the sample for theses, including fonts, margins, page size and print area.

Keywords Specifications, format.

1 引言 * * 四黑居左 * *

因为作者提交的论文将直接激光制版, 付梓印刷, 而不再录入排版, 所以务请作者按照本规格编排论文. 否则, 您的文章将很难付印.

2 版心说明 * * 四黑居左 * *

版心宽 145mm, 高 210mm, 上下左右居中. 如打印则将论文用激光打印机单面打印在高质量的 A4 空白纸上.

3 格式说明 * * 四黑居左 * *

3.1 标题 * * 小四黑居左 * * 文章标题用三黑, 居中, 前空两行, 姓名小四号, 宋体, 单位和通讯地址为小五宋体.

一级标题用阿拉伯数字 1, 2, 3, ..., 四黑居左.

二级标题前面冠之于一级标题, 用阿拉伯数字表示, 形如 3.1, 3.2, 3.3, ..., 小四, 黑体, 居左.

3.2 正文 正文一律用五宋; 每个自然段开始时缩进两个汉字; 正文中的数学表达式中的变量一律用斜体. 数学表达式中的数

符, 如 $\sin$, $\cos$, $\tan$, $\max$, $\min$, $\sum$, Π 等, 均用正体.

3.3 脚注 脚注 1 放在同一页的底部, 用六宋.

3.4 参考文献 参考文献的序号用 [1], [2], [3], ... 文献的著录格式为: (书) 作者姓名. 书名. 出版地: 出版社名, 年月 (后不加标点); (期刊) 作者姓名. 论文名. 期刊名. 卷号 (期号): 页码, 年月 (后不加标点). 如有多位作者, 作者名之间用逗号分开. 如有外文参考文献, 姓名缩写后的点应去掉. “参考文献”四个字居中, 五黑. 参考文献用小五号字, 宋体.

3.5 图表 图/表中字用小五宋, 图题 (小五宋) 在图的下方, 表题 (小五宋) 在表的上方, 图序/表序按本篇论文大排队: 图 1/表 1, 图 2/表 2, 等.

3.6 参考文献的引用 正文叙述中引用参考文献时, 平排; 非正式叙述时, 只在右上角表明出处, 如 Corbin [2] 指出 ...

3.7 页码 论文正面不要打页码, 如打印稿则请将页码用铅笔轻轻地标在页背面的右上角.

3.8 标点 要正确使用阿拉伯数字和标点符号, 如 1997 年等. 阿拉伯数字之间用逗号, 不用顿号, 如 1, 2, 3, ... 外文字母之间用逗号, 而不用顿号, 如 a, b, c, d, ... 等.

3.9 关于作者简介 在文章的最后, 可附一段作者简介, 内容包括姓名, 工作单位, 专业职称, 研究兴趣, 当前研究方向等, 获奖之类的内容请勿写在内. 简介长度不超过五行, 字体用小五宋, 作者简介四个字用五黑, 首行齐左.

参考文献 * * 五黑居中 * *

- [1] Zhang S. The related article I wrote. Some Fine Journal, 99(7): 1- 10, Jan. 1999
 - [2] Corbin J R. The Art of Distributed Applications: Programming Techniques for Remote Procedure Calls. New York: Springer-Verlag, 1991
 - [3] 汪成为, 高文, 王行人. 灵境 (虚拟现实) 技术的理论, 实现及应用. 北京: 清华大学出版社, 1996 * * 小五宋 * *
- 1 要有节制的使用脚注, 尽量不要把几个脚注放在一起, 脚注用六宋 * * 六宋 * *