

文章编号: 1000-6893(2003)01-0000-04

## 基于 PC/DSP 的 ICT 图像重建系统研究

周正干, 李和平, 路宏年

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

Research on PC/DSP2Based ICT Image Reconstruction System

ZHOU Zhenggan, LI Heiping, LU Hongnian

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘要:** 设计了一种基于 PC/DSP (Personal Computer/Digital Signal Processor) 的 ICT (Industrial Computed Tomography) 图像重建系统, 论述了整个系统的硬件组成和工作原理, 介绍了系统中 PCI 型 DSP 信号处理板的设备驱动程序的主要内容, 给出了整个系统的试验结果。结果表明: 该系统能有效缩短 ICT 图像重建的时间, 提高 ICT 检测的工作效率。

**关键词:** 数字信号处理; 计算机层析技术; 图像重建; 无损检测

**中图分类号:** TP391172 **文献标识码:** A

**Abstract:** To speed up ICT image reconstruction, a PC/DSP2based ICT image reconstruction system was designed. The hardware buildup and working principle of the system were introduced. Main contents of the device driver for PCI DSP signal processing board were discussed. Experimental result of ICT image reconstruction with the system was brought out. The experimental result indicated that, with the PC/DSP2based ICT image reconstruction system, the time needed for ICT image reconstruction can be reduced efficiently and the working efficiency of ICT inspection increased.

**Key words:** digital signal processing (DSP); industrial computed tomography (ICT); image reconstruction; nondestructive testing (NDT)

工业 CT (ICT, Industrial Computed Tomography) 是在无损状态得到被检试件某断层的二维灰度图像 (2D ICT) 或某个试件的三维灰度图像 (3D ICT), 它以图像的灰度来分辨被检试件内部的结构组成、装配情况、材质状况、有无缺陷、缺陷的性质和大小等<sup>[1]</sup>。国际无损检测界把 ICT 称为最先进的无损检测手段。进入 80 年代以来, 国际上主要的工业发达国家已把 X 射线 ICT 技术应用于航空、航天、国防、冶金、机械、石油、电力和地质等部门的 NDT & E (Nondestructive Testing and Evaluation), 我国 90 年代也逐步把 CT 技术应用于工业无损检测<sup>[2]</sup>。

ICT 设备能获得被测试件的内部灰度图像主要依靠反投影重建技术, 它是一个按照一定的算法对检测所得的投影数据进行数学运算处理的图像重建过程。图像重建的速度除与图像重建的方法有关外, 还与运行环境和软件有关<sup>[3]</sup>。为了提高 ICT 图像重建的速度, 人们对 ICT 图像重建算法的运行环境和软件进行了大量的研究。目前,

ICT 图像重建算法的运行环境主要有以下几种:

(1) 单台 PC (Personal Computer) 由于 ICT 图像重建需要进行大量的计算, 工作量比较大。以前, 由于 PC 的运算速度较低, 用单台 PC 来实现 ICT 图像重建需要较长的时间, 很难满足实际应用的需要。随着计算机技术的迅速发展, 计算机的运算速度大大提高, 使用单台 PC 来实现 ICT 图像重建又引起人们的重视。在对时间要求不太严格的情况下, 这种方法基本可以满足要求。

(2) 阵列处理器 (Array Processor) 阵列处理器指多个微处理器排成一个阵列且并行工作, 从而大大提高整个系统的运算速度。阵列处理器中所使用的微处理器可以是 DSP, 也可以是 Intel 80486 或其它微处理器等。

(3) 多台 PC 由多台 PC 组成一个局域网, 其中一台为服务器。当一组投影数据进入服务器后, 服务器按照一定的算法将这组投影数据分配到网络中的某台计算机, 这台计算机处理完该组投影数据后, 等待下一组投影数据的到来, 这个过程循环往复, 直到所有的投影数据全部处理完为止。服务器最后综合网络中各台计算机的图像重建结果, 形成一幅完整的 ICT 图像。

收稿日期: 20020602; 修订日期: 200207208

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50275008, 60172014)

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2003/01/0090/>

上述 3 种 ICT 图像重建算法的运行环境中, 第(2)种方法是国外商用二维 ICT(2D2ICT) 设备中常用的方法, 如美国 BIR 公司生产的 2D2ICT 设备就采用这种方法; 而第(3)种方法主要用来实现三维 ICT(3D2ICT) 中的图像重建, 如德国 Seifert 公司目前研究 3D2ICT 时采用的就是该方法<sup>[4]</sup>。由于国内 ICT 设备的研究工作才刚刚起步, 因此, ICT 图像重建还是用单台 PC 来实现。如前所述, 由于 ICT 扫描过程中要进行近百万次数据测量, 在图像重建过程中要进行几十亿次运算操作, 如此大的运算量用普通 PC 来完成, 耗费时间太长。为了迅速得到重建图像, 本文介绍一种基于 PC/DSP 的 ICT 图像重建运行环境, 以期提高 ICT 中图像重建的速度。

### 1 基于 PC/DSP 的 ICT 图像重建系统硬件设计

基于 PC/DSP 的 ICT 图像重建系统的硬件原理框图如图 1 所示。

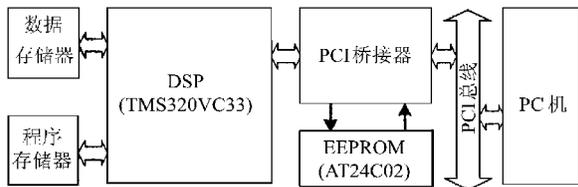


图 1 基于 PC/DSP 的 ICT 图像重建系统硬件原理框图

Fig1 A sketch of PC/DSP based ICT image reconstruction system

图 1 中, DSP 为 TI 公司的 TMS320VC33, 它是 3X 系列中性能最好的一类浮点型 DSP, 在晶振频率为 150 MHz 的情况下, 运算速度达到 75 MIPS。为了减少 DSP 与 PC 之间的数据传输时间, DSP 与 PC 之间的通信采用 PCI 总线方式。由于 DSP 使用的局部总线协议和 PCI 协议之间存在较大的差别, 所以需要使用 PCI 桥接器来实现数据在两种协议之间的相互转换, 本文选用的 PCI 桥接器为 CY7C09449PV2AC。

图中各模块的功能为: PC 从探测器模块获取投影数据, 将投影数据传送给 DSP 模块, 接收 DSP 模块处理后的结果, 显示并保存重建后的图像。DSP 模块接收投影数据, 然后运用图像重建算法对它进行处理, 最后将处理结果送给 PC。桥接器模块在 PC 与 DSP 系统之间建立起一座数据协议转换的/桥梁, 与它相连的 EEPROM 用来保存桥接器配置空间的数据, 以便在系统上电时桥接器能从其中读出配置数据标识自己。

用 PC/DSP 来实现 ICT 图像重建的关键是

如何协调 DSP 与 PC 之间的工作, 让它们共同完成图像重建。图 2 是 PC 和 DSP 共同工作实现 ICT 图像重建时的信号流示意图。

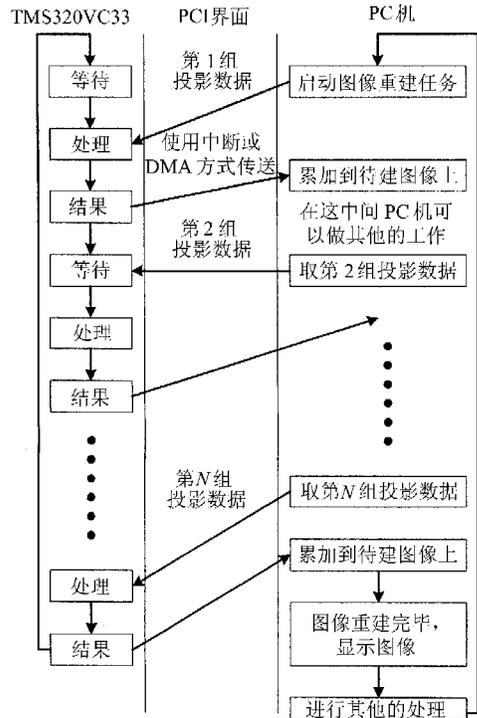


图 2 PC 与 DSP 之间的信号流图

Fig. 2 Diagram of information flow between PC and DSP

### 2 PCI 型 DSP 信号处理板设备驱动程序的设计

PC 与 DSP 之间有大量的数据需要传输, 它们是借助 PCI 桥接器这个中间/桥梁来进行通讯的。因此, 为了保证数据传输的正确性, 就必须保证 DSP 与 PC 能够可靠地操作 CY7C09449PV2AC。对 DSP 来说, 由于 CY7C09449PV2AC 是它的一个外设, 所以, 它访问桥接器比较容易; 对于 PC 来讲, 难点在于如何突破操作系统的限制。

为了保证系统的安全性、稳定性和可移植性, Windows 操作系统, 包括 Windows95/ 98、Windows NT 和 Windows 2000 等, 对应用程序访问底层的硬件资源进行了限制, 用户程序不能够直接操作底层的硬件设备, 只有设备驱动程序才能够突破操作系统的这种限制, 实现 PC 软件对 PCI 设备的访问。

PCI 设备驱动程序是操作系统的一部分, 它可以管理实际的数据传输和控制特定类型的物理设备操作, 包括开始和完成 I/O 操作、处理中断和执行设备要求的任何差错处理; 另外, 它为上层应用程序提供一个接口。于是, Win32 可以借助设备驱动程序间接操作硬件设备。根据实际需

要,本文设计的 PCI 设备驱动程序主要完成以下几个方面的工作:

(1) 建立物理地址到线性地址的映射  
CY7C09449PV2AC 的内部寄存器位于存储器空间,并且在物理上连续分布,所以,只要知道了这些存储器空间的基地址和偏移量,就能够完成对某个寄存器的访问。基地址属于物理地址范畴,而用户程序只能访问线性地址,所以需要建立基地址的物理地址到上层应用程序的线性地址的映射。实现上述工作的方法是:调用 `MmMa2pIoSpace()` 例程<sup>[5]</sup>获得基地址(物理地址)的内核模式虚拟地址;通过存储器描述符表(MDL, Memory Descriptor List),将内核模式虚拟地址映射到用户模式的线性地址空间。这样用户程序就能够访问桥接器内部的寄存器空间了。

(2) 设计即插即用(PnP, Plug and Play)功能  
PnP 是 Microsoft 公司为简化硬件安装和配置而设计的策略之一。当某 PCI 设备具有了 PnP 功能后,用户不必调整 DIP 开关或跳线器等,Windows 就可以完成该设备所有必要的设置工作。对于一个物理设备来说,Windows 一般会给它规定几种状态:设备不存在、正常工作状态、删除状态和停止状态等。实现 PnP 的关键是建立起设备所处的上述各个状态之间的状态转换图。某设备具有 PnP 功能后,当其在这几种状态中转换时,Windows 操作系统会自动向设备驱动发送相应的消息,设备驱动程序在相应的消息处理例程中会为设备分配各种资源或者卸载资源等。

(3) 响应 PCI 桥接器产生的中断信号  
为了保证 DSP 与 PC 之间实时地传输数据,减少不必要的等待时间,需要使用中断。当 DSP 将数据存入桥接器内部的共享存储器时,它会向 PC 发出一个中断请求信号,通知 PC 将数据取走;反之亦然。在设备驱动程序中,实现中断的主要过程为:从配置空间读出中断线寄存器中的中断级;调用 `IoConnectInterrupt()` 例程<sup>[5]</sup>将中断服务程序的入口地址写入到中断表中相应的位置;允许硬件发生中断。当发生硬件中断的时候,系统会自动调用中断服务程序。由于中断服务程序运行的中断级别比较高,所以它能够调用的内核函数十分有限,且优先级比它低的其它程序都被禁止。为了改善系统的性能,在中断服务程序中,只是查询中断源,如果确定中断是邮箱中断,则调用已经注册的延迟过程调用(DPC)例程。值得注意的是,在停止设备或者删除设备的时候,必须调用

`IoDisconnectInterrupt()` 例程<sup>[5]</sup>解除中断级与中断服务程序的连接关系。

(4) 实现 DMA 操作  
在 ICT 图像重建的过程中,PC 需要频繁地向 DSP 传送大量的投影数据;同时,DSP 也有大量的处理结果需要回传给 PC。如果采用一般的 I/O 传输机制,则不仅消耗双方大量的 CPU 时间,且可靠性和传输效率都较低;而 DMA 传输则不需要 CPU 的参与,能够实现快速的数据传输。本系统采用的 DMA 方式为基于包的主总线 DMA。因利用该方式传输数据时,数据直接在设备和用户空间缓冲区的锁定页之间传输,故其具有存储器资源利用效率高的优点。

### 3 试验结果

为了验证系统能否正常工作,利用某航空发动机叶片进行了相应的试验。试验中,使用直线形线阵探测器,探测器的每个探元成等距分布;采用第 3 代扫描方式,即旋转扫描。根据探测器的形式和扫描方式,本文采用等距射线扇束反投影重建算法。

试验条件:

0 探测器通道数为 512;

0 重建图像矩阵大小为 512 @ 512 像素;

0 360°范围内采样投影数为 360 幅。

图 3 是某型号航空发动机叶片某截面的正弦图。将它作为输入参数,输入到本文设计的 ICT 图像重建系统中,系统按照图 2 所示的流程完成图像重建工作,最后输出重建后的叶片某截面图如图 4 所示。将该图像与采用其他图像重建系统重建出来的图像进行比较,发现它们完全一样。由此可知,本文设计的系统能正确工作。

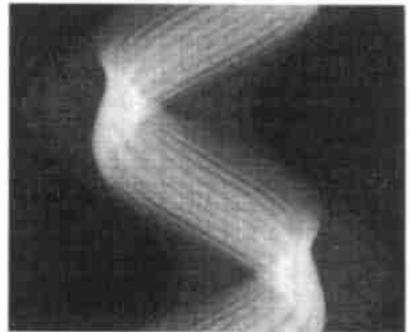


图 3 某型号航空发动机叶片某截面的正弦图

Fig 3 A sine map of some turbine blade's cross-section

通过试验比较发现,用快速 ICT 图像重建算法,当使用单台 PC 进行图像重建时,重建一幅

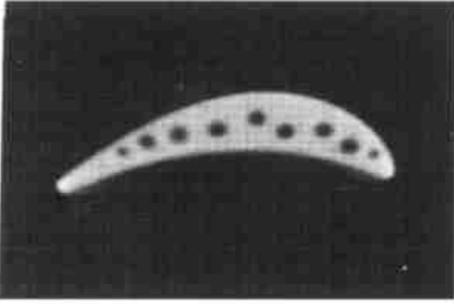


图 4 据图 3 进行重建后的叶片截面图像

Fig 4 An image of some turbine blade's crosssection reconstructed with Fig 3

512@512 像素矩阵大小的图像, 需要 80 秒左右; 而使用本文设计的系统, 则只需要 38 秒。由此可见, 使用 PC/DSP 实现 ICT 图像重建能有效缩短图像重建的时间, 提高 ICT 检测的工作效率。如果在 PCI 型 DSP 信号处理板中使用多个 DSP 并行处理, 同时扩展大容量的存储器, 则能更快地提高 ICT 图像重建的速度。

### 参 考 文 献

- [1] 刘德镇. 现代射线检测技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999. 240- 251.  
(Liu D Z. Modern radiology techniques[M]. Beijing: China Standard Press, 1999. 240- 251.)
- [2] 倪培君, 李旭东, 彭建中. 工业 CT 技术[J]. 无损检测, 1996, 18(6): 173- 176.  
(Ni P J, Li X D, Peng J Z. Industrial CT technique[J]. Nondestructive Testing, 1996, 18(6): 173- 176.)
- [3] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 22- 100.  
(Zhuang T G. The fundamentals of computed tomography and its algorithm[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992. 22- 100.)
- [4] Gondrom S, Maissl M, Schöpfer S, et al. Fast industrial

computed tomography and its applications [J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 59 (10): 141- 147.

- [5] Chris C 著. 孙义, 马莉波, 国雪飞, 等译. Windows WDM 设备驱动程序开发指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 20- 50.  
(Chris C. Writing windows WDM device drivers[M]. Beijing: China Machine Press, 2000. 20- 50.)
- [6] 李和平. 基于 DSP 的 ICT 图像重建系统研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.  
(Li H P. Research on DSP based ICT image reconstruction system[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002.)

### 作者简介:



周正干(1967- ), 男, 湖南湘潭人。分别于 1987 年和 1992 年在哈尔滨工业大学机械工程系获学士、博士学位, 现任北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授。主要研究方向有计算机测控技术和数字图像处理技术等。研制的电火花线切割机床系统曾获航天工业总公司科技进步二等奖, 在国内外公开发表学术论文 40 余篇。联系电话: 010282313466, 电子邮件: zzhenggan@me.buaa.edu.cn.



李和平(1976- ), 男, 湖南岳阳人, 2002 年 3 月毕业于北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 硕士, 现在中国科学院电子研究所工作, 主要从事数据采集与图像处理方面的研究工作。



路宏年(1941- ), 男, 辽宁黑山人。1964 年毕业于太原机械学院火箭、炮弹设计与制造技术专业。现任北京航空航天大学教授和博士生导师。研究方向: 多维信息探测、处理及无损检测技术。

(责任编辑: 蔡 斐)