

图像存储与实时显示系统设计与实现*

刘岩俊

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 针对大面阵 CCD 摄像机需要实时无压缩记录的要求,在分析了数字视频的信号特点和 SCSI 系统数据传输过程的基础上,提出了利用 FPGA 将图像数据分路处理:一路原始图像数据经 SCSI 控制器以 DMA 方式直接写入 SCSI 磁盘阵列;另一路图像数据经过 FPGA 处理后由 PCI 接口进入计算机内存实时显示的设计方案。直接访问磁盘空间的存储方案指出了传统存储方案的不足,使用 DMA 技术解决该问题。并分析了 SCSI 磁盘访问时间,以及数据块大小对磁盘存储速度的影响。由于原始图像数据没有使用 PCI 接口,而是直接访问 SCSI 磁盘,其存储速度得到了很大提高,达到高速存储目的。实验结果表明,使用改进的存储方式,在输入图像分辨率为 $2K \times 2K$,工作频率为 25 f/s 时,SCSI 速度存储速度达到 1 200 Mb/s,存储系统工作稳定,可靠,很好地满足工程需求。

关键词: 信息光学;无压缩存储;SCSI 磁盘阵列;RAID0;实时显示

中图分类号: TN915 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.604

Design and implement of image storage and real time display system

Liu Yanjun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to meet the storage speed of real time none compressed large area CCD camera, after analysis the character of digital signal and SCSI data transmission procedure, a method is presented which produce two image data by using FPGA, one of image data are written to SCSI disk array on DMA mode by SCSI controller, the other image data are send to memory by PCI interface and real-time display. The insufficient of traditional storage scheme is pointed, and the DMA technology solves this question. The access time of SCSI disk and the effect of storage speed by size of data block are analysis. Because of the nature image data don't pass the PCI interface the storage speed improves very much, this method meets the requirement of large capacity image record and real-time display. Experiments results show that the system works under by a $2K \times 2K$ image with 25 f/s, the storage speed reaches 1 200 Mb/s, the system works stable and correct results make this method very ascendant in practical application.

Keywords: information optics; uncompressed storage; SCSI disk array; RAID 0; real-time display

1 引言

近些年,随着 CCD 等图像传感器的快速发展,其分辨率、动态范围、灵敏度、光谱响应等方面的性能不断提高,已经被广泛应用到测量领域^[1-2]。同时由于国防科技的快速发展,靶场测量走向了高精度、高速、实时动态可见的方向,靶场光学测量设备越来越多地搭载超高速数字图像传感器以^[3-4]适应目标特性。大面阵 CCD 相机由于其分辨率高,在很多靶场特殊要求的场合下使用。但是由于其数据传输率大,对存储速

度提出了很高要求。

目前,一般的存储方案是基于高性能计算机体系结构,把 PCI 局部总线的数据采集卡与基于 PCI-SCSI 桥的 SCSI 硬盘阵列相结合^[5-6]。但是,这种结构一次存储使用再次 PCI 总线,处理速度的上限为 PCI 总线传输速度的一半,而且由于操作系统的非实时性原因,其处理速度还会有所下降^[7-8]。不能满足 1 200 Mb/s 的数据传输率。为使存储速度达到要求,针对以上方式进行了改进。提出了数字图像数据直接经过 DMA 方式进入 SCSI 磁盘的存储方式,不经过 PCI 总线。这

收稿日期:2014-10

* 基金项目:国家 863 计划(2009AA8080603)资助项目

样其处理速度就可以满足要求。对几种存储方式进行了比较,并对影响存储速度的原因进行了分析。

根据实际项目的使用要求,基于 Windows 底层技术开发与 SCSI 磁盘存储技术,通过计算机 PCI 总线通信,存储过程不需要通过计算机 CPU 处理,通过 DMA 通道直接对数据进行高速读写,达到高速存储目的。实现了基于 Camera link 接口双 BASE 模式的图像存储与控制。

2 系统组成、基本结构

2.1 系统组成

传统方式是利用上位机资源,在 PCI 局部总线上接入 PCI-SCSI 适配卡,再使用 PCI 数据采集卡,原始图像数据从 PCI 数据采集卡再通过内存,写入大容量的 SCSI 存储设备。其数据流向图如图 1 所示^[9-10]。从数据流向图中可以看出,数据在进入 SCSI 磁盘阵列前,要经过再次 PCI 总线^[11-12]。

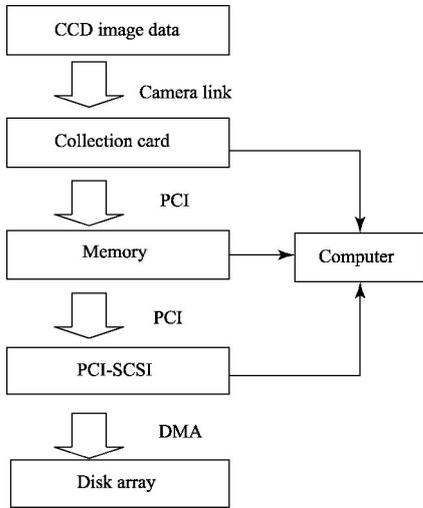


图 1 传统方式的数据流方向

2.2 存储方式的改进

传统的数据采集方式,图像数据由采集卡采集后,通过内存然后通过 DMA 方式,由 SCSI 控制器向 SCSI 磁盘阵列写数据。因为数据从采集卡进入内存时要经过一次数据总线,当数据从内存进入 SCSI 控制器时,还要经过一次数据总线,这样相当于对同一图像数据经过 2 次数据总线操作,由于计算机 PC 总线操作速度的限制,其速度不会达到太高。目前国内最高速度达到 51 MB/s。针对这是问题,设计了以下方法:图像数据直接由采集卡通过 SCSI 控制器向 SCSI 磁盘阵列中写数据,不通过总线这一速度“瓶颈”。大大提高了数据存储速度。改进后的图像数据流方向如图 2 所示。

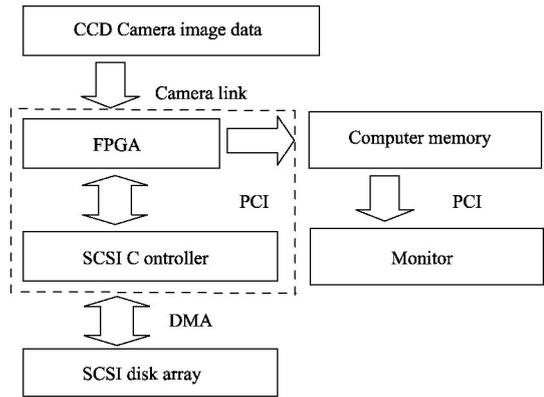


图 2 图像数据流向

对于大容量实时数字图像存储,存储时间和存储速度是主要的技术指标,但存储介质的持续数据传输率是最重要的技术指标。方案是 12 位黑白数字图像,图像分辨率为 $2\ 048 \times 2\ 048$, 帧频率为 30 f/s。其数据传输率为 1 200 Mb/s。根据要求,对硬件设备的数据传输能力进行分析,以设计存储方案。

IDE(integrated device electronics)硬盘的瞬时传输速率和总线瞬时传输速率已经超过 133 MB/s,但其持续数据传输率远远达不到 133 MB/s。

SCSI(small computer system interface)硬盘由于其工作时使用 DMA 工作方式,而且 SCSI 接口硬盘的特点是在标识硬盘区时使用了线性的概念,这样使 SCSI 磁盘访问时间最小^[3,6-10]。由于 SCSI 磁盘的写操作顺序是由外道向内道进行,外道的磁盘寻址时间要小于内道的寻址时间,所以随着写操作的进行,SCSI 磁盘阵列的写速度是减小的。实验测得 10 000 r/min,Seagate 磁盘的最大存储速度为 76.6 MB/s,最小存储速度为 37.5 MB/s。

RAID(redundant array of inexpensive disks)使用并行数据处理方式,提高了磁盘的持续数据传输率。

在分析了 IDE、SCSI、RAID 存储技术之后,提出使用 RAID 0 技术的 SCSI 磁盘存储方案。

2.3 实时显示方案

为了在存储过程中实时监控系统的工作情况,对图像存储内容的实时显示是很有必要的。由于 CCD 摄像机工作时的数据传输率达到 1 200 Mb/s,而 PCI 总线的持续传输达不到 1 200 Mb/s,所以要把图像数据全部送到显示缓冲区是不能实现的,针对这个问题,设计了一种隔行与隔像素显示的方法,把分辨率 $1\ 024 \times 1\ 024$ 的图像数据以 30 f/s 的速度送到显示缓冲区。如图 2 所示,数据流向控制在 FPGA 内完成,图像数据进入 FPGA 后分为 2 路:一路原始图像数据以 DMA 方式通过 SCSI 控制器写入磁盘阵列;另一路图像数据(经过抽行与抽像素处理)通过 PCI 接口送到显示缓冲区,这样到显示缓冲区的持续数据传输率为 30 MB/s,计算机完全有能力达到要求。实验证明系统在完成图像数据存储工作的同时,稳定地进行实时显示。

3 SCSI 硬盘存储速度分析

3.1 SCSI 硬盘存储速度分析

系统实验的参数为 2048×2048 的面阵 CCD, 数据长度为 12 bit, 帧频为 25 f/s, 其数据传输率达到 1 200 Mb/s, 使用 Camera link 接口。SCSI 磁盘使用希捷 ST373207LC 磁盘。

使用 SCSI 总线进行数据传输的过程是通过 SCSI 总线 I/O 操作进行申请, 一般经过:

- 1) BUS FREE 总线空闲;
- 2) ARBITRATION 总线仲裁;
- 3) SELECT;
- 4) MESSAGE OUT;
- 5) COMMAND;
- 6) DATA;
- 7) STATUS;
- 8) MESSAGE IN;
- 9) BUS FREE。

任何时候, SCSI 总线只能处于一个确定的总线阶段, 阶段之间前后关联是受到严格限制的。

总线空闲阶段是 BUY 和 SEL 信号处于无效状态达 400 ns 延迟后, 就进入总线空闲阶段。

总线仲裁延迟为 $2.4 \mu\text{s}$, 总线释放延迟 $0.8 \mu\text{s}$, 总线调整延迟 $0.4 \mu\text{s}$, 总线设置延迟 $1.8 \mu\text{s}$ 。

$$T_{arb} = T_{仲裁延迟} + T_{释放延迟} + T_{调整延迟} + T_{设置延迟} =$$

$$2.4 + 0.8 + 0.4 + 1.8 = 5.4 \mu\text{s} \quad (1)$$

启动器获得总线使用权之后, 可以进行总线选择阶段。启动器会建立与目标器之间的连接, 当启动器释放 BUY 信号, 而目标器使 BUY 信号有效时, 表示选择阶段已经结束, 可以进入消息阶段; 如果目标器没有对启动器做出反应, 表示选择阶段没有结束, 而要进入总线空闲阶段, 重新进入选择阶段。 T_{sel} , 总线选择阶段的最大延时为 200 ms。

消息阶段目标器接收几个字节的信息, 这些信息包括 SCSI 总线协议。一般情况下为 2 个字节:

$$T_{msg} = \frac{2}{V_{cable} \times 1024^2} \quad (2)$$

命令阶段:

$$T_{cmd} = \frac{1}{V_{cable} \times 1024^2} \quad (3)$$

数据传输时间 T_{tra} 。一次传输的数据块大小为 S_{block} (KB), 总线的数据传输率为 V_{cable} (MB/s), 则数据传输时间为:

$$T_{tra} = \frac{S_{block}}{V_{cable} \times 1024} \quad (4)$$

状态阶段, 传输一个字节的的信息:

$$T_{sta} = \frac{1}{V_{cable} \times 1024^2} \quad (5)$$

所以完成一次 I/O 操作的时间为:

$$T_{total} = T_{arb} + T_{sel} + T_{msg} + T_{cmd} + T_{tra} + T_{sta} = T_{arb} + T_{sel} + \left[\frac{4 + (1024 \times S_{block})}{V_{cable} \times 1024^2} \right] \quad (6)$$

系统使用的 SCSI 总线协议为 SCSI160 总线协议, SCSI 总线的理论传输速度为 158.9 MB/s。

由公式可以看出, 完成一次数据传输的时间与数据块大小有直接的关系, 所以分析数据块大小对磁盘存储速度的影响。

理论上, 数据块越大传输速度越高。但 SCSI 协议中对数据块大小有一定限制的。对不同数据块大小的最大写入速度进行实验, 其结果如表 1 所示。可以看出, 随着数据块的增大, 其最大写入速度明显增加。由于相机的分辨率为 2048×2048 , 数据长度为 8 bit, 每帧数据为 4M, 所以合适的数据块大小为 4 096 K。

表 1 数据块与存储速度的关系

	数据块大小/KB	最大写速度/MB · s ⁻¹
1	128	0.89
2	256	120.5
3	512	171.9
4	1 024	218.7
5	2 048	253.2
6	4 096	267.3
7	8 192	274.9

3.2 存储操作时间分析

SCSI 数据写操作由以下几个步骤完成。首先由 SCSI 总线完成 I/O 操作请求, 其过程与 SCSI 总线操作分析过程一致; 然后进入硬盘操作过程, SCSI 磁盘操作由 3 部分组成: 循道时间、旋转延时、数据传输时间。ST373207LC 磁盘的寻道时间为最大值为 2 ms; 旋转延时最大值为 3 ms。数据传输时间由数据传输率决定, 其数据传输率为 59~118 MB/s。

对于 n 帧图像数据, 如果使用一个磁盘其过程为顺序传输所示。其完成一次 I/O 操作后, 进行数据传输, 然后再进行另一次 I/O 操作, 其时间为:

$$T(s) = nT_{total} + n(T_s + T_l + T_w) \quad (7)$$

其存储速度为:

$$V_{SCSI} = \frac{1}{(T_{total} + (5 \times 10^{-3} + \frac{1}{S_{disk}}))} \quad (8)$$

理论值为 67.5~43.1 MB/s。

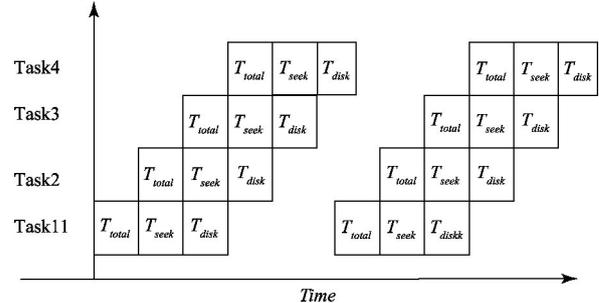


图 3 RAID0 模式的数据传输模式

当使用 RAID 0 模式的磁盘阵列时,其传输过程如图 3 所示。其中 T_{total} 是 I/O 操作时间和总线操作时间, T_{seek} 是寻道时间和旋转延时时间, T_{disk} 是磁盘传输时间这时,完成一次 I/O 操作后,进行数据传输,在数据传输的过程中进行下一次 I/O 操作,其时间为:

$$T_{raid}(s) = nT_{total} + (T_s + T_l + T_w) \quad (9)$$

其存储速度为:

$$V_{raid} = \frac{n}{T_{total} + (5 \times 10^{-3} + \frac{1}{S_{disk}})} \quad (10)$$

理论值为 271.2~170.2 MB/s。

实验测得 1 块磁盘的磁盘速度为 66.7~37.5 MB/s。实验测得 4 块磁盘组成的磁盘阵列的存储速度为 267.3~150.0 MB/s。实验验证如图 4 所示。初期速度不发生变化是由于 SCSI 控制器的处理速度已经达到最大值。

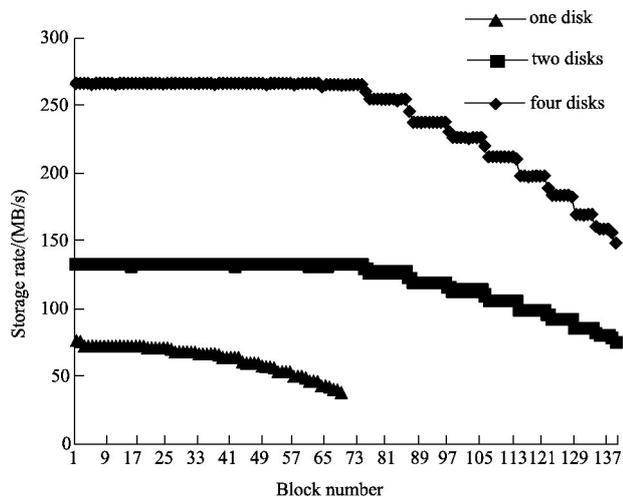


图 4 磁盘个数与存储速度的关系

使用改进后的方式,对由不同个数的 SCSI 磁盘按 RAID0 模式组成的磁盘阵列存储速度进行了实验,其结果如图 3 所示,在数据块初期,其速度不发生变化是由于 SCSI 控制器的处理速度已经达到最大值。随着组成磁盘阵列的磁盘数量的增加,磁盘阵列的连续存储速度也是增加的。实验证明:由 4 块磁盘组成的磁盘阵列的数据率最大值为 266 MB/s,最小值为 150 MB/s,达到了系统的设计要求。

4 结 论

为了对方案的功能进行检验,设计了以下检验方法:使用 FPGA 模拟大面阵 CCD 摄像机输出方式的目标发生器产生分辨率为 2048×2048 ,数据长度为 12 位,帧频为 25 f/s 的图像数据。

如图 5 所示 SCSI 磁盘阵列实物,其中蓝灯表示正在进行读写操作。如图 6 所示读写测量的整体环境。



图 5 SCSI 磁盘阵列实物



图 6 测试环境实物

4.1 丢帧检验

目标发生器在每帧图像数据中叠加连续的目标信息,可以根据叠加信息检测图像存储时是否丢帧。通过实验表明:可以连续存储 10 000 帧数据以上,没有丢帧和串帧现象发生。如图 7 所示,图中的白色目标点分别在连续的图像中。为了说明问题,现在把它们合成一幅图像。

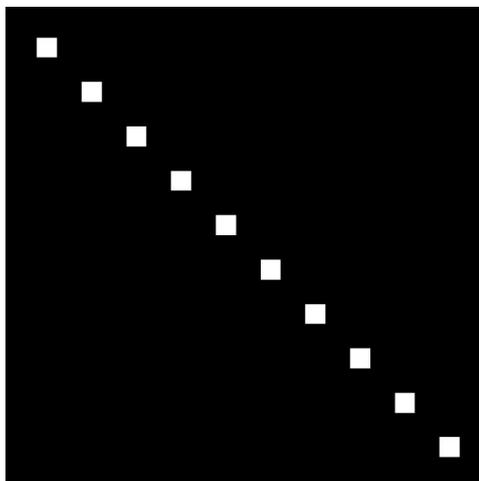


图 7 丢帧检验图像

4.2 串位检验

目标发生器产生灰度连续变化的图像,由于每个像素之间只差一个灰度值,可以对存储的图像数据进行串位检测。通过实验表明,对于分辨率 2048×2048 ,12 位图像数据,没有串位现象发生。图 8 是分辨率为 256×256 灰度图像,是实际图像的 $1/64$ 。

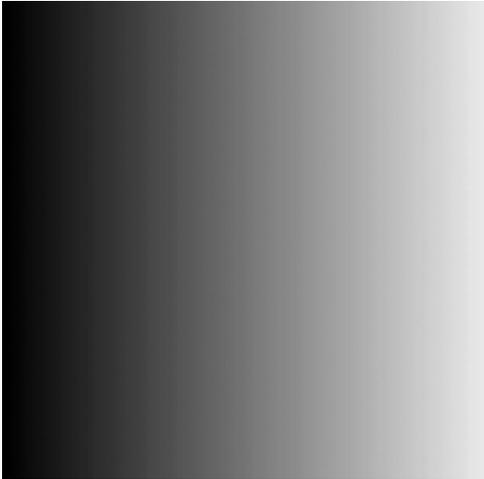


图 8 灰度图像

5 结 论

根据 SCSI 磁盘阵列存储特点,提出了新的设计方案,其创新点在于:

1) 直接以 DMA 方式使用 SCSI 控制器向 SCSI 磁盘阵列写数据的方式。

2) 经 FPGA 处理的图像数据经过 PCI 接口用于实时显示,满足了显示功能。

本存储方案经过实际的反复测试,对于分辨率为 2048×2048 ,数据长度为 8 位,帧频为 30 f/s,数据速率传输达到 1 200 Mb/s 的黑白数字图像,该方案能够无丢帧完成图像存储任务,并且进行实时显示,工作稳定正常。

参考文献

- [1] 刘岩俊. 嵌入式 DSP 图像处理系统设计与实践[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(9): 11-14.
- [2] 张涛, 乔彦峰, 李雪雷, 等. 基于 64 位操作系统的超高速视频存储系统[J]. 液晶与显示, 2011, 26(4): 505-509.
- [3] 王跃飞, 侯亮, 刘菲. 基于 FPGA 的汽车 CAN 网络实时管理系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(8): 721-728.
- [4] 张旭东, 李文龙, 胡良梅, 等. 基于 PMD 相机的特征跟踪位姿测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7): 640-646.
- [5] 王俊伟, 韩松. 基于 uPP 接口的嵌入式 SAR 数据记录技术研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(8): 84-88.
- [6] 阙清贤, 谭怀亮. 基于 InfiniBand 的 RAID 存储系统设计[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(11): 2730-2733.
- [7] 程俊, 李晓琼, 韩杰. 一种基于图像实时反馈的红外探测器光学调校系统[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 296-303.
- [8] 刘志强, 王丽芳, 蒋泽军. 一种 SCSI 目标器设计与评估[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(1): 217-219.
- [9] 温东新, 高清娥, 张展. 基于 SCSI 的存储系统评测平台设计与实现[J]. 计算机工程, 2012, 38(5): 47-49.
- [10] 兰春光, 刘航, 田玉基. 工程化光纤光栅液体压力传感器的研制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 2153-2160.
- [11] 张立保, 丘兵昌. 基于快速方向预测的高分辨率遥感影像压缩[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2095-2102.
- [12] 李晶, 袁峰, 胡英辉. 基于多点合作目标的多线阵 CCD 空间物体姿态测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1635-1641.

作者简介

刘岩俊, 1978 年出生, 学士学位, 副研究员。主要研究方向为光电测量设备, 数字图像处理等。

E-mail: liuyanjun@ciomp.ac.cn