

文章编号: 1672-8785(2013)06-0015-05

星敏感器地基评测系统的设计研究

梁国龙 何 昕 魏仲慧 何家维

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘 要: 为了能够方便、准确地评价星敏感器的成像质量, 设计了一款专门用于评价成像质量的图像采集系统。该系统基于 PCI 总线接口, 以 FPGA 作为核心控制逻辑, 用双 SRAM 的双缓存结构实现了图像数据的大量传输。在软件上采用多线程方法实现了图像的显示和存储, 并加入了图像评价模块, 从而精确检测出了星敏感器的工作性能。多次严格试验表明, 该系统工作稳定、可靠, 其采集的图像数据不失真。当系统运行在 16 位的情况下, 其峰值图像传输速率可达到 40 Mbps。

关键词: 星敏感器; PCI; 驱动; 信噪比; 视星等

中图分类号: TP3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.06.003

Design and Implementation of a Ground Evaluation System for Star Sensor Camera

LIANG Guo-long, HE Xin, WEI Zhong-hui, HE Jia-wei

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

Abstract: To evaluate the imaging quality of a star sensor camera easily and accurately, an image acquisition system for evaluating imaging quality is designed specially. Based on a PCI bus interface, the system takes a FPGA chip as its core control logic and implements the large mass transfer of image data by using a dual SRAM buffer structure. In software, it uses a multithread approach for image displaying and storage and adds in an image evaluating module. So, it can detect the performance of the star sensor camera accurately. Several rigorous test results show that the system can operate stably and reliably and the image data collected are distortionless. When running in the case of 16 bits, the system has its peak image transfer rate up to 40 Mbps.

Key words: star sensor; PCI; driver; SNR; visual magnitude

0 引言

星敏感器是一种以恒星作为参考点的三轴姿态精确测量装置, 在航空、航天以及地面测控领域均已得到非常广泛的应用^[1]。星敏感器的基本工作原理是, 通过光学系统将恒星星点投射到传感器靶面上, 然后通过传感器的光电转

换产生带有星点的图像序列, 并采用有效的目标提取方法实时提取图像中的星点; 根据图像中星点目标的相对位置关系, 用合适的恒星识别方法使之与星库中的星图相匹配; 匹配成功后就能识别出视场内的恒星, 再根据星敏感器的视轴指向、光学系统的焦距以及星点在图像

收稿日期: 2013-05-15

作者简介: 梁国龙 (1983-), 男, 吉林公主岭人, 博士, 主要从事数字图像处理方面的研究。

E-mail: lianggl_1984@sina.com

中的 x 、 y 坐标等因素, 就能够精确测算出星敏感器的实时三轴姿态。

实验室中设计的基于 CCD 传感器的星敏感器的帧频为 10 frames/s, 分辨率为 1024×1024 , 像素时钟为 20 MHz, 图像的像素位数为 12 bit。针对这套星敏感器, 本文自主研发了一种星敏感器评测系统。为了满足图像速率要求, 作为 PC 机的总线接口可以选择 PCI^[2] 总线和 USB 总线。但考虑到实时性和可靠性等因素, 本文系统采用 PCI 总线作为 PC 机的输入总线。该系统以地面为基准对所探测到的恒星图像进行采集、存储、提取星点及评定, 可精确得知星敏感器的探测能力。

1 硬件电路的设计原理

本文系统是一种基于 PCI 接口的图像采集与处理系统, 其前端由 base 模式的 Camera Link 接口^[3] 传输星敏感器的图像数据。当计算机启动后, 系统上电复位并进行一些初始化工作, 然后处于等待状态。计算机上的驱动程序通过 PCI 接口^[5] 检测硬件并实现与硬件系统的握手。当 PCI 驱动接收到底层硬件系统的触发信号后便告诉应用程序开始采集图像, 并通过 PCI 接口将数据传送至计算机内存, 最后在上位机上进行随后的图像输出显示或者存储。图 1 为整个硬件电路的原理框图。

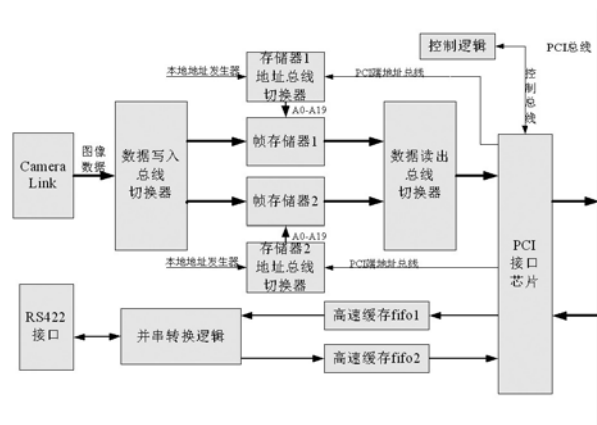


图 1 硬件电路的结构图

1.1 FPGA 控制逻辑

在硬件系统中, FPGA 是整个系统的核心。我们采用美国 ALTERA 公司生产的 Cyclone 系列

EP1C6Q240C8N 芯片。该芯片具有 185 个可用 IO 管脚、72 个 LVDS 通道和 2 路锁相环。由于这个系统需要 180 个 IO 管脚和 1 路锁相环链路, 在贴片的 FPGA 里面, 包括 ALTERA 公司和 XILINX 公司的产品, EP1C6Q240C8N 恰能满足要求。该 FPGA 芯片主要用于实现以下功能:

1.1.1 对双 SRAM 的双缓存控制

我们采用美国 Cypress 公司生产的 CY7C1061AV33 型 SRAM (16 位深度, $1 \text{ M} \times 16$ bits 容量)。如图 1 所示, 两片 SRAM 都与 FPGA 单独连接。FPGA 可通过数据、地址选择器来决定两片 SRAM 的操作。其运行原理是, 在把数据写入 SRAM1 时, 同时读出 SRAM2 中的数据到 PCI 接口; 同样, 在把数据写入 SRAM2 时, 同时读出 SRAM1 中的数据到 PCI 接口; 这里, 乒乓读写完全依照输入图像的帧信号进行, 并且要求 PCI 的读出速度要高于外接相机的写入速度。

1.1.2 内建 FIFO 的 IP 核和通讯数据流的逻辑控制传输

这里用 RS422 接口与外部系统进行通讯控制。如图 1 所示, 这里分为发送和接收两个 FIFO 模块。在发送端, 软件应用程序在底层驱动中用普通 IO 读写方式将数据写进 FIFO1, 然后在使能信号的控制下把 FIFO1 中的数据读出并进行并串转换, 把数据送到 RS422 接口; 在接收端, 系统实时等待接收数据; 当数据到来时, 立即将其转换成并行数据并存入 FIFO2, 然后通知应用程序取出 FIFO2 中的数据以进行通讯处理。

1.1.3 PCI9054^[4] 的主要控制逻辑时序

如图 2 所示, 这里 FPGA 处于从属状态, 一旦接收 PCI 的总线申请信号 L_{HOLD}, 就立刻把总线控制权交给 PCI。然后等待新的访问总线有效地址开始信号 ADS。当 ADS 信号低电平有效后, 即进行数据的有效传输, 直至 BLAST 低电平有效信号的到来。以 LW/R 作为读写使能信号, 高电平代表写, 低电平代表读; READY 低电平表示正在读写数据, 高电平表示完成数据读写。

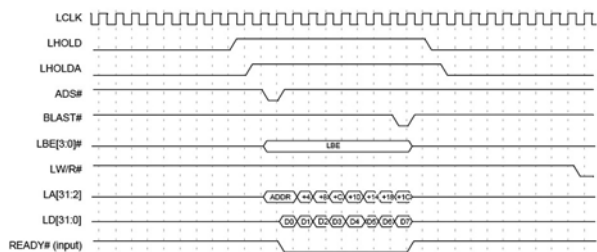


图 2 PCI9054 的控制时序

1.2 PCI 接口芯片

目前有很多可以实现 PCI 总线协议的成熟方法, 其中应用较多的有以下几种: 第一种方案是用 CPLD 或者 FPGA 芯片内部实现 PCI 的 IP 核, 其开发比较灵活, 但难度较大, 比较浪费时间, 而且也不能保证稳定性; 第二种方案是用 DSP 来实现, 现在市场上已经有几款带有 PCI 接口的 DSP 芯片, 但这些芯片的成本都比较高, 而且其资源浪费比较严重; 第三种方案就是采用专业的接口芯片, 这样不但可以轻松实现总线协议, 而且成本低廉, 适合于短期开发。本文系统基于时间和稳定性考虑, 采用 PLX 公司生产的 PCI9054^[4] 专业芯片来实现 PCI 总线协议。该芯片可以选择性地工作在 J 模式、C 模式和 M 模式。PCI9054 芯片支持主模式、从模式和 DMA 模式。本文系统的控制芯片工作在 C 模式, 在采集数据时工作在 DMA 模式, 控制通讯工作在从模式的普通 IO 读写模式。图 3 为 PCI9054 芯片的内部结构图。可以看出, 前端口是本地总线, 后端口是 PCI 总线, 可以方便、高效地实现协议转换。EEPROM 93LC56B 用于对 PCI9054 寄存器进行配置, PCI9054 内部有 6 种可编程 FIFO, 可以实现零等待突发传输以及本地总线与 PCI 总线之间的异步操作。

2 实验分析

图 4 为星敏感器评测系统^[6]的硬件实物图。该系统的试验平台需要一台奔腾 4 系列以上配置的 PC 机、一台星模拟器、一间杂光抑制较好的暗室以及其他配套测试设备若干。系统软件是在 Windows XP 系统环境下用 VC++^[7] 软件开发的。

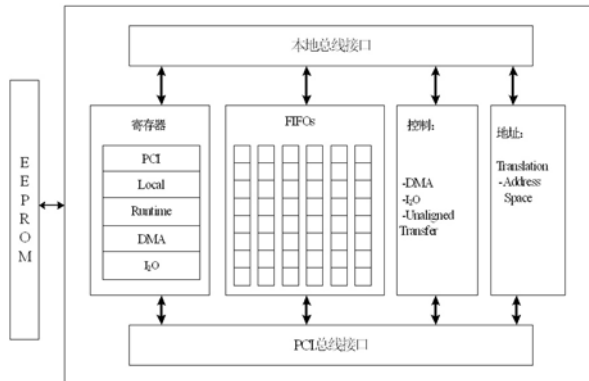


图 3 PCI9054 的内部结构图

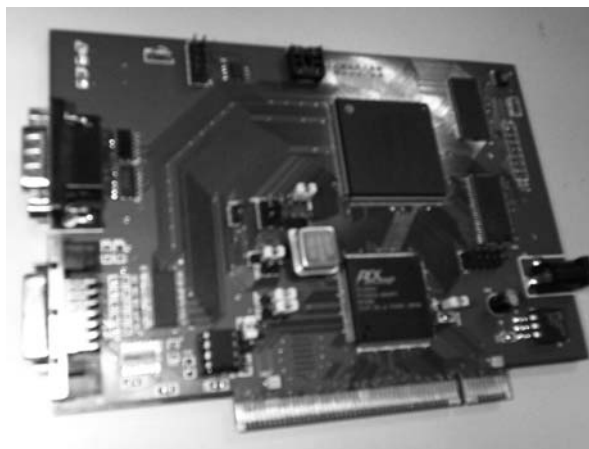


图 4 硬件电路系统

图 5 为相机控制软件的界面图。该软件负责实时控制相机的积分时间和增益等参数, 其数据流通过 PCI 总线到达主控 FPGA, 然后经并串转换通过 Camera Link 接口传输给星敏相机。星敏相机反馈回来的数据同样经过 FPGA 的串并转换, 然后由 PCI 实现软件读取。为了保证星敏通讯的可靠性, 我们采用图 6 所示的协议进行通讯。可以看出, 帧头用 7E 表示, 第二个字节是校验位, 下面是传输的数据个数, 帧尾用 E7 表示。

图 7 所示为图像采集软件平台。该软件负责对图像进行实时显示和存储。如图 7 所示, 软件右侧的控件用于设置图像分辨率、像素位数以及记录存储等。图像中间的亮点就是捕捉到的模拟星点。该星点是星敏感器在积分时间为 20 ms、增益参数为 400 的情况下捕获到的视 4 等



图 5 相机控制软件的界面图



图 6 控制通讯协议

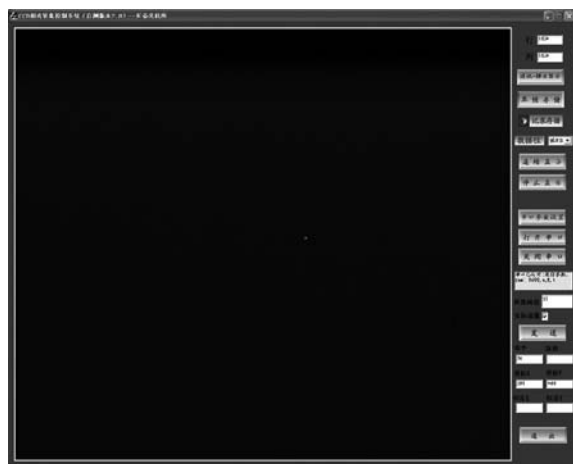


图 7 图像采集软件平台

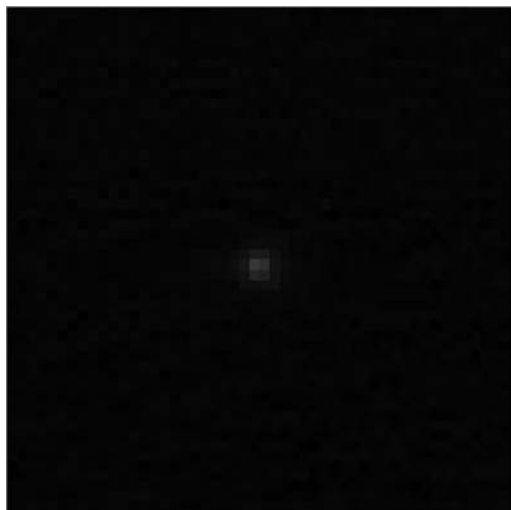


图 8 积分时间为 20 ms 的星点放大图

星。图 8 所示为将图像模拟星点目标放大后得到的结果。该目标含有 4 个有效像元，其最大灰度为 88。用于评价星图像的几个主要参数指标包括均值、方差、标准差、系统信噪比、峰值信噪比和直方图等。这里依据这几个指标作具体分析。

均值公式为

$$E(data) = \frac{\sum_{i=0}^{height-1} \sum_{j=0}^{width-1} data[i][j]}{height \times width} \quad (1)$$

方差公式为

$$D(data) = E(data^2) - [E(data)]^2 \quad (2)$$

标准差为

$$\sigma(data) = \sqrt{D(data)} \quad (3)$$

图像的信噪比为

$$SNR = \frac{\max(data)}{\sigma(noise)} \quad (4)$$

式中， $\sigma(noise)$ 为系统的标准差。噪声估计为

$$noise[i][j] =$$

$$\begin{cases} data[i+1][j] - data[i][j] & data[i+1][j] > data[i][j] \\ 0 & data[i+1][j] < data[i][j] \end{cases} \quad (5)$$

$\sigma(noise)$ 的计算方法同上。

系统的信噪比为

$$SNR_{sys} = \frac{2^n}{\sigma(noise)} \quad (6)$$

式中， n 为图像像素的位数。

利用该系统对实验室中的星敏感器进行试验数据采集。为了进行进一步分析和表达，我们以模拟星点为中心从采集的图像中截取 50×50 大小的图像并将其放大 7.4 倍。图 9 所示为在积分时间为 42 ms、增益为 400 的情况下拍摄到的中波视 4 等星，其最大灰度为 222。图 10 所示为

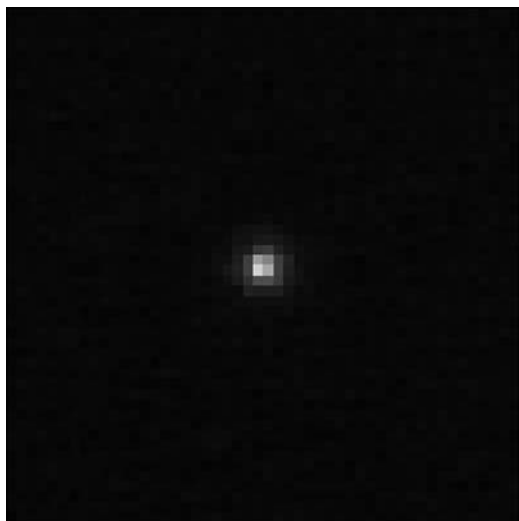


图 9 积分时间为 42 ms 时得到的 4 等星放大图

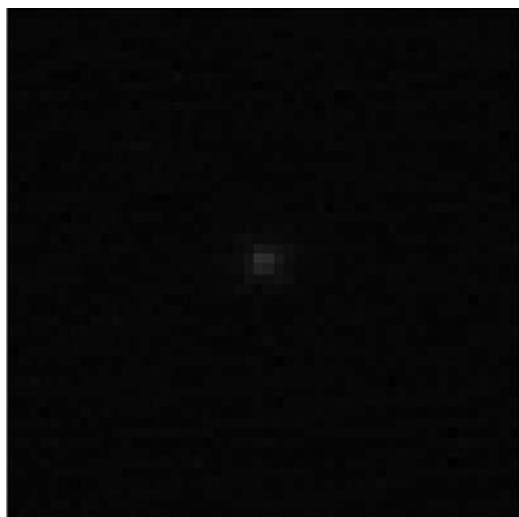


图 10 积分时间为 42 ms 时得到的 5 等星放大图

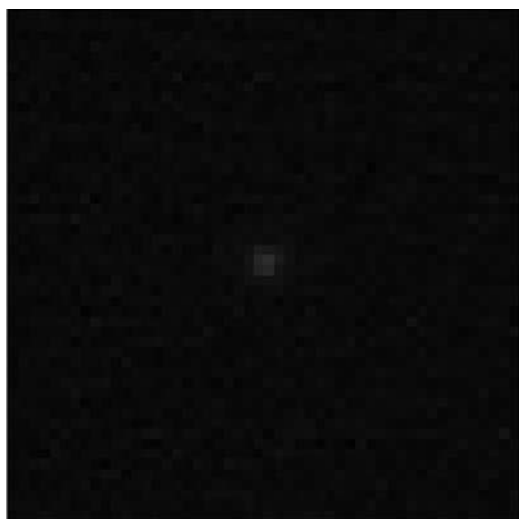


图 11 积分时间为 58 ms 时得到的 6 等星放大图

在积分时间为 42 ms、增益为 320 的情况下拍摄到的中波视 5 等星, 其最大灰度为 82。图 11 所示为在积分时间为 58 ms、增益为 320 的情况下拍摄到的中波视 6 等星, 其最大灰度为 75。

表 1 列出了针对 4 等、5 等和 6 等星图像分析计算出的均值和方差等相应参数信息。可以看出, 星图的噪声较大。通过分析可知, 首先星模拟器在试验前没有经过严格的定标; 其次, 试验暗室存在杂光的干扰; 还有就是, 实验室中的星敏感器在试验中没有经过制冷系统处理。如果以上三点能得到进一步修正的话, 那么图像就会变得更加完美。

表 1 本文系统获得的星等评价参数

评价参数	视星等		
	4	5	6
均值	13.141	10.437	17.812
方差	28.525	17.491	41.274
标准差	5.341	4.182	6.424
图像信噪比	67.496	31.567	33.398
系统信噪比	1245.032	1485.814	1036.109

3 结束语

硬件系统是以 FPGA 为核心, 通过 PCI 接口与上位机相连的。本文创新性地加入了通讯系统, 并通过 Camera Link 接口实现了通讯控制。该系统不仅可以实时采集星图像并对其进行实时存储, 而且还可以对相机等外围设备的参数进行设置。这在很大程度上增加了系统的实用性, 降低了系统成本, 使性价比得到明显提高。在软件方面, 图像数据用线程方式进行实时采集, 并用开辟多缓冲区的方式实现了图像的流水线显示和存储。CPU 利用率在 30 % 左右。本文针对这个星敏感器评价系统和成熟的图像采集系统做了大量的对比试验。表 2 列出了在与表 1 相同的条件下得到的测试结果。由各项参数可知, 该系统具有很小的误差。经过严格测试, 在 16 bit 数据总线的情况下, 图像采集的峰值速率可以达到 40 MB/s, 运行稳定可靠。以上指标表明, 该系统完全满足于星敏感器的试验检测。

(下转第 38 页)