内嵌 ARM 核的 FPGA 技术在星敏感器中的应用

尹 娜 江 洁 张广军

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 介绍了内嵌先进精简指令集处理器 ARM(Advanced RISC Machine)核的现场可编程门阵列 FPGA(Field Programmable Gate Arrays)芯片 EPXA10 的内部结构及特点. 基于这种嵌入式技术,进行了互补金属氧化物半导体 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor)星敏感器图像驱动与实时星点定位算法的研究,并给出具体实现,包括用 EPXA10 的 FPGA 部分实现了 CMOS 图像传感器的驱动和对星图的预处理–阈值分割,用 EPXA10 的 ARM 部分完成了星图的星点定位算法——改进的 4 连通域成分贯序算法,基于 VC++语言实现了串口通讯程序以及图像显示程序. 最后给出了成功驱动 CMOS 图像传感器得到的清晰图像及星点定位结果,并将基于 ARM 得到的定位结果与基于 PC 机(Personal Computer)得到的定位结果进行了比较,结果完全正确. 采用内嵌 ARM 核的 FPGA 提高了整个系统的处理速度,减小了硬件电路设计的复杂性、体积和功耗.

关 键 词: 现场可编程门阵列; 内嵌先进精简指令集处理器; 星敏感器; 互补金属氧化物半导体驱动; 星点定位

中图分类号: V 448. 22

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)03-0341-05

Embedded ARM processor FPGA technology in star sensor

Yin Na Jiang Jie Zhang Guangjun

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

Abstract: An ARM(advanced RISC machine) embedded FPGA(field programmable gate arrays) chip - EPXA10 was introduced. A research of image acquisition and star position locating based on this technology were done and the accomplishment was achieved. The driving of the CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor transistor) image sensor and the pre-processing of the digital image were accomplished in FPGA part of the EPXA10. The star position locating algorithm was achieved in ARM part of the EPXA10. The programs of serial port communication and the image display were realized by Visual C++ language. The clear picture taken by the CMOS image sensor and the locating result were presented. By comparing the locating results of ARM and PC(personal computer), the result was accurate. The processing speed of the whole system is increased and the complexity, volume and power consumption of the circuit are reduced by adopting an ARM Embedded FPGA.

Key words: FPGA(field programmable gate arrays); embedded ARM(advanced RISC machine) processor; star sensor; CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor transistor) driving; star position locating

收稿日期: 2003-09-17

基金项目: 民用航天科技预研资助项目;航空基金资助项目(02I51019, 03I51004)

作者简介: 尹 娜(1973–),女,河北唐山人,硕士生, ann _ yinna@ sina. com. cn.

星敏感器是天文导航系统的主要设备,是一种高精度、高可靠性的姿态测量部件. 其工作原理为:图像传感器拍摄当前视场范围内的星空图像,图像经信号处理,提取星体的位置信息,并由星图识别算法在导航星库中找到观测星的对应匹配,最后利用这些匹配星对计算出星敏感器的三轴姿态[1].

自本世纪 70 年代开始,随着电荷耦合器件 CCD(Charge Coupled Device)技术的逐渐成熟,CCD 取代了早期的析像管在星敏感器中取得了非常成功的应用,但是采用 CCD 作为成像器件的星敏感器在体积、功耗以及集成度等方面很难顺应卫星小型化的发展趋势. 而互补金属氧化物半导体 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor)图像传感器,以其电源单一、功耗低、抗辐射性能好、动态范围宽、可以实现随机像素读取、无需专用驱动电路、器件集成度高(一般与信号转换和处理电路实现单片集成)[2]等特点,已经开始应用于星敏感器中.

美国加州理工大学的 JPL(Jet Propulsion Laboratory)实验室是最早从事星敏感器的开发研制工作的,而且率先应用 CMOS 图像传感器于星敏感器中. 目前他们研制的星敏感器的电路结构大致由图像传感器控制电路和运算电路构成,这 2 部分电路形成 2 个独立的电路系统[3]. 其中图像传感器控制电路系统主要由现场可编程门阵列 FPGA(Field Programmable Gate Arrays)构成,由 FPGA 实现图像传感器的驱动时序以及星图数据的存储控制;运算电路系统主要由精简指令集处理器 RISC(Reduced Instruction Set Computer)芯片构成,实现星体定位及星图识别算法等. FPGA 与 RISC 之间通过 I/O 协议进行通讯和数据的传递. 由于控制电路和运算电路由 2 块电路系统构成,使星敏感器的体积很难再减小,通讯速度也不容易进一步提高. 随着微型光机电系统 MOEMS(Micro-Optic-Elector-Mechanical-System)为代表的微米纳米技术的发展,使得纳型甚至皮型卫星的实现成为可能,用于卫星飞行定位的星敏感器也面临着小型化的要求. 本文正是以星敏感器的小型化为出发点,采用了集成度高的 CMOS 图像传感器作为成像器件,应用单片集成嵌入式处理器-先进精简指令集处理器 ARM(Advanced RISC Machine)核、存储器以及 FPGA 的器件 EPXA10 来实现 CMOS 的驱动以及实时星点定位算法. EPXA10 的应用减小了星敏感器硬件电路的体积和功耗,单片实现了 2 个电路系统的功能,同时 ARM 与 FPGA 之间的信息交换由外部通讯变成了内部总线上的数据传递,大大提高了数据传输速率,提高了星敏感器定位的实时性.

1 EPXA10 的内部结构

EPXA10 是 Altera 公司推出的嵌入式处理器芯片,应用可编程片上系统 SOPC(System On a Programmable Chip)技术,结合逻辑(FPGA)、存储(静态随机存储器 SRAM(Static Random Access Memory))及嵌入式处理器(ARM 核)于单片可编程逻辑器件上,实现了速度与编程能力的高度结合. EPXA10 的内部结构框图如图 1 所示. 芯片内部主要分为 2 部分:嵌入式处理器部分和 FPGA 部分[4].

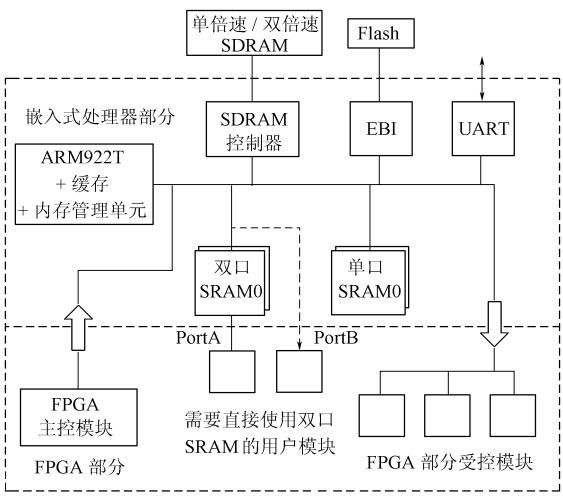

图 1 EPXA10 内部结构框图

嵌入式处理器部分主要集成了 ARM 核、SRAM、同步动态随机存储器 SDRAM(Synchronous Dynamic Random Access Memory)控制器、外部总线接口 EBI(Expansiond Bus Interface)以及串口通讯模块 UART(Universal Asynchronous Receiver).

ARM 核为 ARM 公司的 32 位高性能处理器 ARM922T,与普遍应用的 ARM7TDMI 相比,大大提高了工作频率,可达 200 MHz[5]. 在本文中用来实现星体定位算法.

EPXA10 片内集成了 SRAM 包括 256 kb 单口 SRAM 和128 kb双口 SRAM. 在本文中为了提高软件运行速度,用于存放星点定位算法要用到的星图中最亮的 1 000 个像素点的数据信息以及定位结果.

SDRAM 控制器可以外接容量高达 512 Mb 的单倍速 SDRAM 或 256 Mb 的双倍速 SDRAM,用作数据存储器,实时存放采集的星图数据信息.

EBI 接口,可外接 Flash memory 存储器,容量高达 128 Mb,用作程序存储器. 这些存储控制器大大简化了对片外存储器的控制,降低了设计难度.

嵌入式处理器部分还嵌入了串口通讯模块(UART),可以通过外接 RS232 接收发送器,方便地实现 ARM 与计算机的串行通讯,监视采集的星图以及星体定位结果.

EPXA10 片内 FPGA 部分具有 1 000 000 门可编程逻辑、3 Mbits 的内置 RAM 和 512 个可供用户使用的 I/O 管脚,最高工作频率可达 100 MHz. 在本文中主要用于实现 CMOS 驱动、数据接收、阈值分割 3 个控制模块,并实现了它们之间的并行工作,大大提高了硬件系统的工作速度.

嵌入式处理器部分和 FPGA 部分的通讯是通过内部先进的微处理控制器总线结构 AMBA(Advanced Microcontroller Bus Architecture) 和先进的高性能总线 AHB(Advanced High-performance Bus)来完成的,这 2 部分可以以不同的时钟频率工作,内部的时钟同步电路可以确保它们之间通讯的正确无误. ARM 和 FPGA 都可以通过内部 AHB 总线直接访问片内外存储器,这样不仅简化了通讯控制,同时也提高了接口速度. EPXA10 的高度集成化使速度与编程能力高度结合.

2　图像驱动与存储显示

EPXA10 在星敏感器中的应用大致为:CMOS 图像传感器经驱动模块驱动拍摄星空图像,图像传感器输出的图像数据经过数据接收模块存入片外 SDRAM 中,ARM 可以将这些图像数据经过串口传递给计算机进行星图的显示;同时图像传感器输出的图像数据经阈值分割模块对整帧图像数据进行扫描,做阈值分割,取出最亮的 1 000 个像素信息存入片内 SRAM 中,由 ARM 对这些像素进行聚类,分割出各个星体目标,然后细分定位,最后将结果传递给计算机,以便于验证.

本系统采用的 CMOS 图像传感器像素阵列为 1 024×1 024,每个像素 15 μm,片上集成了固定模式噪声(fixed pattern noise)校正电路、可编程的增益放大器和 10 位的模数转换器. 由于所采用的 CMOS 图像传感器的输入输出是晶体管-晶体管逻辑电路 TTL(Transistor-Transistor-Logic)电平,因此其时序控制信号可以由时序逻辑电路直接提供,本文采用 EPXA10 的 FPGA 部分进行驱动,因此驱动电路非常灵活方便.

图 2 为 EPXA10 FPGA 中 CMOS 驱动模块产生 CMOS 图像传感器行列控制信号的流程图. 其中,LD _ Y 为行选通信号,低有效;*S* 和 *R* 为内部放大器选通信号;RESET 为曝光时间设定信号;正确控制 LD _ Y,*S*,*R*,RESET 的时序,可以将地址线 A 上行地址指定的一行数据载入 CMOS 芯片的寄存器中;CAL 为场选通信号,用来在每帧图像的第一行开始时进行电平校正,所以它每帧图像出现一次; LD _ X 为列选通信号,上升沿载入列地址;CLK _ X 的上升沿将该列地址锁存;在下一个 CLK _ X 上升沿,输出放大器将重置电压和输出电压相减;再经过一个时钟,在 CLK _ ADC 的下降沿片内 A/D 转换器将模拟量转化成数字量输出. CLK _ ADC 表示 A/D 转换的时钟.

图 3、图 4 是图像驱动模块实现的 CMOS 行列

驱动时序,该时序符合CMOS图像传感器对驱动

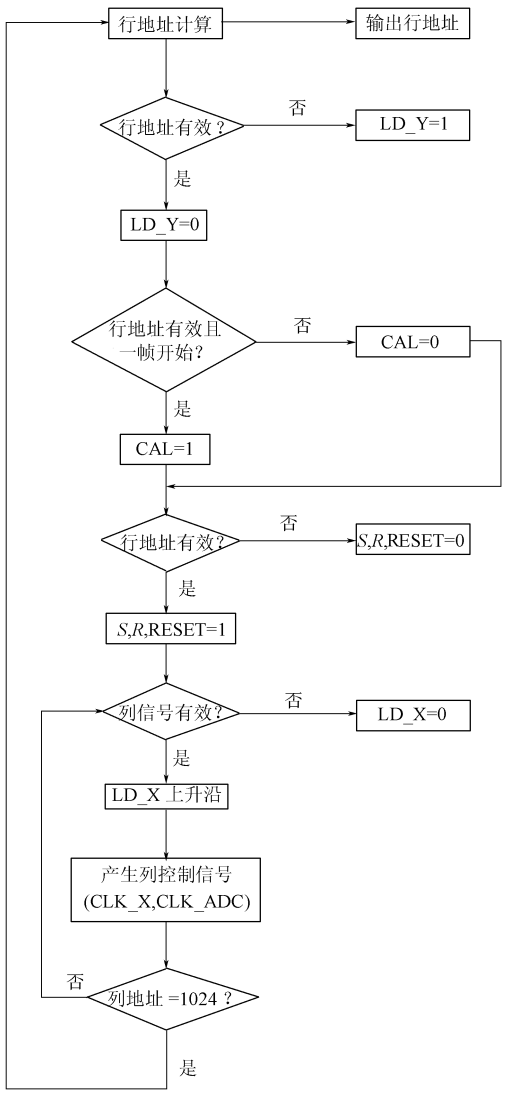

图 2　行列信号产生流程图

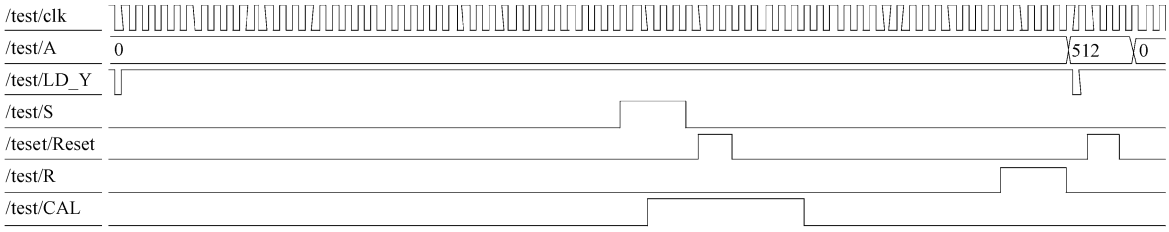

图 3 CMOS 图像传感器行、场同步时序以及曝光时间设定时序

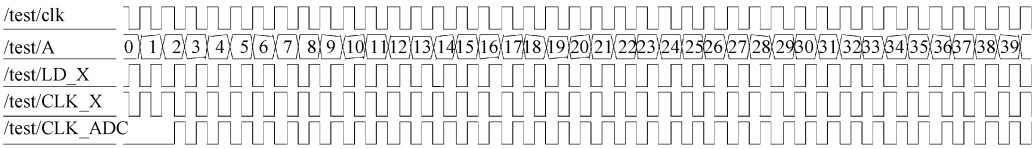

图 4 CMOS 图像传感器列同步时序

时序要求. 实验结果也说明对该 CMOS 芯片实现了正确的驱动,输出图像非常清晰.

图 5 为 FPGA 实现数据接收状态机的流程,状态机检测状态标志信号 flag,如果标志为 1,开始向片外 SDRAM 中传递一帧星图数据,数据的传递利用 AHB 总线的任意长增量突发(burst)传递. 每个时钟传递一个数据,直至传完一帧图像数据,这样可以实现以系统时钟的频率传递数据,加快了数据存储的速度.

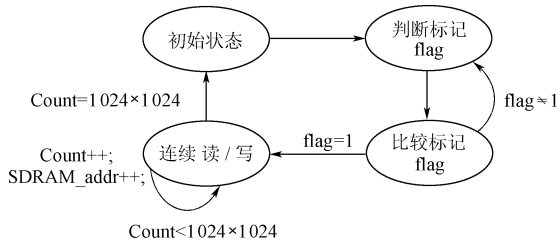

图 5 数据接收模块状态机

ARM 经 UART 模块将这些图像数据传递给计算机,要将数据转化成图像进行显示,需要编写基于 VC++语言的串口通讯程序以及图像显示程序,需要用到 Microsoft 公司提供的 MSComm 串行通讯控件以及创建设备无关位图类 CDib(Device-Independent Bitmap)进行位图处理.

3 实时星体定位算法及实现

星体图像定位分为以下 2 个过程:

1) 阈值分割[6]:目的是将星体目标和背景分离开;将单个星体目标与其它的星体目标分离开.

具体过程如下:从上到下从左到右扫描星图,将阈值大于某一阈值(经验值为 100)的最亮的大约 1 000 个像素点的灰度及坐标按扫描顺序存储在片内 SRAM 中,同时对同行的相邻的像素做同一标记(初步标记). 这个过程的实现需要在 FPGA 实现一个主要由比较器构成的阈值分割模块,由于逻辑简单,一个时钟就可以完成一个数据的处理,发挥了 FPGA 对大量数据作简单处理速度快的优势.

2) 细分定位算法:主要采用改进的 4 连通域成分贯序算法及质心法.

改进的 4 连通域成分贯序算法[7]的具体过程如下:扫描片内 SRAM 中的像素信息,如果第 $p1$ 个像素点存在同列、行向下相邻且标记不同的相关点 p_2,则更新 p_2 点的标记为两者最小值;从第一个像素点开始扫描,凡是与 p_2 点有相同标记的点,其标记均更新为上述最小值(合并等价标记).

质心法实际上就是计算阈值分割后图像的一阶矩,具体实现如下:

$$x_j = \frac{\sum_i x_i^* g_i}{\sum_i x_i} \qquad y_j = \frac{\sum_i y_i^* g_i}{\sum_i y_i}$$

其中,i 为所有标记相同的像素点;j 为星点数;x,y 为像素坐标;g 为像素灰度值;$\bar{x}$,$\bar{y}$ 为星体质心即星体位置.

上述算法是针对 ARM 用 C 语言编写的,体现了 ARM 软件编程灵活的特点. 具体实现如下:EPXA10 片内 SRAM 中的 N(N<1 000)个像素点的灰度、坐标以及标记信息,是以二维数组[n][i],$n \leqslant N$,$i \leqslant 4$ 的形式存放的. 其中,[n][1]为行号;[n][2]为列号;[n][3]为像素灰度值;[n][4]为标记信息. 扫描行列信息时只需要扫描数组中相应项,计算星体位置,就是求相同标记像素的位置灰度均值. 经过统计,在本系统视场范围(12°×12°)之内的星体个数(以观测 6 等星为准)少于 50 颗. 所以星体位置信息的数据量不超过 100 个,可以直接存放在片内 SRAM 中,操作非常方便.

4　实验及结果

图 6 是成功驱动 CMOS 图像传感器后拍摄到的景物图像,从图中可以看出拍摄到的图像是非常清晰的. 图 7 是拍摄到的模拟星图图像(反色后的图像). 本文分别基于 PC 机和基于 ARM 对上述星体定位算法进行了实现,表1为图7星体的2种定位实现的比较,结果完全一致,这表明了基于 ARM 的星体定位实现方法是完全正确的.



图 6　拍摄到的景物图像

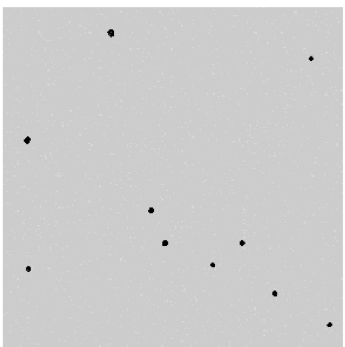

图 7　拍摄到的星图图像(反色后)

表 1　图 7 星点定位的结果

星体序号	PC 机计算结果		ARM 计算结果	
	x	*y*	*x*	*y*
1	63.81	987.58	63.81	987.58
2	158.27	824.03	158.27	824.03
3	232.94	76.23	232.94	76.23
4	243.01	635.45	243.01	635.45
5	311.81	488.97	311.81	488.97
6	313.22	723.31	313.22	723.31
7	409.90	448.77	409.90	448.77
8	624.39	75.44	624.39	75.44
9	873.61	931.15	873.61	931.15
10	944.12	324.89	944.12	324.89

5　结 束 语

本文介绍了星敏感器设计中的关键和基础性的工作——图像驱动和星点图像定位. 从实验结果可看出,对该器件的驱动是非常成功的,得到了清晰的图像. 在星点定位中,扫描整帧图像的同时进行星体图像的分割,减小了数据的传输量;由于采用内嵌 ARM 核的 FPGA 提高了整个系统的处理速度,实现了高的定位精度,同时减小了硬件电路设计的复杂性、体积和功耗. 由于 EPXA10 集成了先进的 ARM9 处理器以及高密度的 FPGA,所以该星敏感器在不增加体积和改进硬件电路的情况下,还可以实现更加复杂的软件算法和硬件控制逻辑设计,具有很强的系统扩展潜力,便于机载和纳型卫星的实现.

参考文献 (**References**)

[1] Liebe C C . Accuracy performance of star trackers: a tutorial[J] . IEEE Transactions on Aerospace and Elecronics Systems, 2002, 38(2) : 587 ~ 599

[2] Liebe C C, Dennison E W, Hancock B. Active pixcel sensor (APS) based star tracker[A]. In: Proceedings of IEEE Aerospace Conference [C]. Snowmass at Aspen CO: IEEE Comp Soc, 1998. 119 ~ 127

[3] Eisenman A R, Liebe C C, Zhu David . Multi-purpose active pixcel sensor (APS)-based microtracker[J]. SPIE, 1998, 3498: 248 ~ 254

[4] Altera Corporation. Excalibur devices hardware reference manual (Version 3.1) [EB/OL]. http://www. Altera. com, 2002-11/2003-11

[6] ARM Limited. ARM922T (rev 0) technical reference manual [EB/OL]. http://www. arm. com, 2000/2004-11

[7] 章毓晋. 图像分割[M]. 北京:科学出版社, 2001
Zhang Yujin. Image segmentation[M]. Beijing: Science Press, 2001(in Chinese)

[8] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2002
Jia Yunde. Machine vision[M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese)