

基于 FPGA + DSP 的红外弱小目标检测与跟踪系统设计

李飞飞^{1,2}, 刘伟宁¹, 孙海江^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:为了以更快的速度完成对红外弱小目标的检测与跟踪任务,将图像的预处理电路放在 FPGA 里实现,通过完成 Top-hat 算法使后续 DSP 的处理大大减轻任务,使其在有限的时间内能够完成更多的运算,这在很大程度上保证了系统的实时性。实验证明,此红外图像处理系统的实时性更高,检测与跟踪效果更好。

关键词:现场可编程门阵列;数字信号处理器;红外图像;高帽

中图分类号:TP391

文献标识码:B

Design of Detecting and Tracking Infrared Dim Objects System Based on FPGA + DSP

LI Fei-fei^{1,2}, LIU Wei-ning¹, SUN Hai-jiang^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to complete the task of detecting and tracking infrared dim objects much faster, the paper introduces an effective hardware design. Image pre-processing is completed by implementing Top-hat arithmetic in FPGA, which mitigates the DSPs' task greatly, so, it is able to do more operations in the limited time, and the system's real-time requirement can be fulfilled better. When the image processing system is used to detect and track the infrared dim objects, it comes good result.

Key words: FPGA; DSPs; infrared image; Top-hat

1 前言

红外弱小目标的检测与跟踪技术一直是图像处理中的热点与难点。红外图像成像特点是目标小而模糊,即目标占像素点数少,信噪比低。又由于小目标缺乏足够的形状特征,故在研究问题时主要考虑目标的灰度信息。红外传感器等获得的小目标图像,背景中除了存在空间不相关的噪声外,主要是大面积缓慢变化的低频成分,例如飞机在云层中飞行,作为背景的云层本身灰度不仅变化缓慢,而且具有一定的相关性。小目标灰度值比背景高,且与背景不相关。

数学形态学中的 Top-hat 算子能检测出图像中的亮斑,这与目标的统计分布特征一致,因此可以采用此算子来进行红外目标的检测。由于 Top-hat 算

法虽然运算数据量大,但其在运算过程中不需要图像的统计特性,也不需要寄存大量的中间数据,且运算简单,重复性强,因此非常适合于由硬件实现。现场可编程门阵列(FPGA)编程灵活,修改方便,且特别适用于流水线方式和并行方式的数据处理。适于做运算量大,但运算相对简单的数据处理。近些年来,FPGA 的处理速度不断提高,且内部的存储 RAM 也不断增多,一些中高端产品可以用来做 Top-hat 算法,完成图像预处理。

Top-hat 算法处理之后的图像,背景均匀且有若干候选目标信号。为了剔除虚假目标,提高检测精

作者简介:李飞飞(1983-),男,硕士研究生,研究方向为数字图像处理。E-mail: flyingqiutian@163.com

收稿日期:2008-09-19

度,还应该利用序列图像中目标运动的连续性和轨迹的一致性,进行多帧确认,筛选出真正的目标。此后续的检测与跟踪算法较为复杂,对芯片的处理速度和处理性能要求较高,在实际的工程应用中,要求检测跟踪系统能够达到实时性。因此可以采用擅长于做复杂运算的高速 DSPs (数字信号处理器)来完成。TI 公司的 TMS320C6000 系列 DSPs,运算速度快,最高时钟频率达到 1GHz 以上,可以在一个时钟周期内完成多个操作,实现并行处理,其在处理复杂算法方面很有优势^[1]。

因此,由 FPGA + DSP 组成的红外图像处理系统能够完成红外小目标的检测与跟踪任务,在工程实践中有着重要意义。

2 硬件实现电路

2.1 电路总体结构

本系统的硬件电路框图如图 1 所示。其主要功能模块由图像采集模块、图像预处理模块、图像检测跟踪模块和图像显示模块组成。

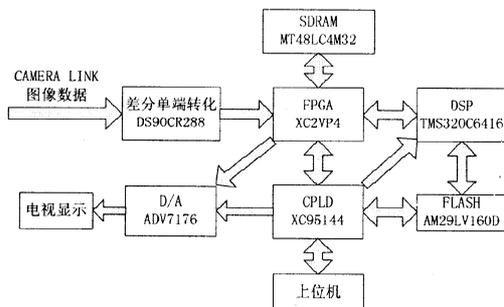


图 1 硬件系统电路框图

2.2 图像采集模块

系统所需的 CAMERA LINK 图像数据由长峰公司生产的中波红外凝视热像仪 KM320 - J01 得到。图像数据格式为 320 × 240,像素时钟为 15MHz,帧频设定为 50Hz。CAMERA LINK 差分信号经过差分单端转换芯片 DS90CR288 转换为 TTL 信号后送给 FPGA。转换后的信号包括 14bit 的图像数据信号 D [13:0],行同步信号 HS,帧同步信号 FS,数据有效信号 DVAL。

2.3 基于 FPGA 的图像预处理模块和显示模块

本系统中的图像预处理模块和显示模块由 FPGA 来实现,由于其任务繁重,因此选用 XILINX 的高性能产品 XC2VP4。注意到 Virtex2Pro4 内部有:6700 多个 Logic cell 和 3000 多个 CLB,28 个 18kbit 的 SelectRAM-II,丰富的 Logic cell 和 CLB 可以用来实现组合和时序逻辑,特别是其中的 SelectRAM-II 实质上是位宽为 32bit 的双端口 RAM,可以用来配

置成高达 28 个 FIFO^[2]。可见,其充足的资源完全可以满足本系统的需求。FPGA 内部的电路结构如图 2 所示。

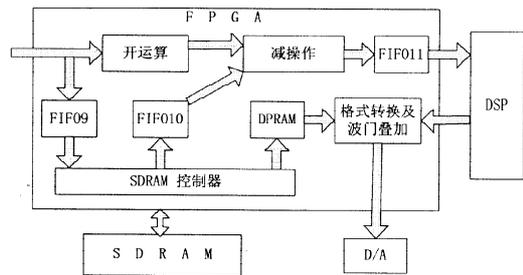


图 2 FPGA 内部电路结构

1) 图像预处理模块。在进行图像预处理时,由于在后续运算中需要用到原始图像数据,这就必须对原始图像进行储存,而 FPGA 内部没有足够的空间来存储这些图像数据,所以需要在 FPGA 外围扩展存储器。考虑到 SDRAM 作为存储芯片具有价格低廉、读写速度快的优点,这里选用 Micron 公司的 MT48LC4M32 SDRAM,4 × 1M × 32bit,最高频率 166MHz。在对 SDRAM 进行读写操作时,需要精确控制其读写时序。这里,用 FPGA 实现了 SDRAM 控制器,负责 SDRAM 的读写操作。SDRAM 控制器的设计中,状态设置为读状态、写状态、空闲状态、自刷新状态四个状态,预充电操作在读写之后自动进行。操作中使用 BL = 4 的突发读写模式,频率 100MHz。由于相机给出的原始图像数据一行为 320 个 14bit 数据,而所用 SDRAM 一行可存储 256 个 32bit 数据,所以将图像数据扩展成 16bit 进行存储,低两位补零。那么,SDRAM 的一行中最多可以存储 256 × 32/320 × 16 = 1.6 行的原始图像数据,但是为了方便以后按行读取,采取在 SDRAM 的一行中存储 1 行图像数据的方案。

FPGA 进行图像预处理的操作主要是完成 Top-hat 变换。Top-hat 变换定义为:

$$\text{hat}(f) = f - f \circ s \tag{1}$$

其中, $f \circ s$ 的开运算定义为^[3]:

$$f \circ s = (f \ominus s) \oplus s \tag{2}$$

由于图像目标较小,这里选结构元素 S 为 5 × 5 的正方形结构,根据腐蚀、膨胀运算的分配性和交换性,结构元素可以分解为一个 1 × 5 和一个 5 × 1 的结构元素分别做腐蚀和膨胀。FPGA 中开运算的电路结构如图 3 所示。考虑到其中 FIFO 的稳定性,在 ISE 里构建 FIFO 时,没有使用其 IP 核直接生成 FIFO,而是采用了由 SelectRAM-II 生成 FIFO 的方法,更有实用性。如果直接用 5 × 5 的结构元素处理

后的图像边缘将会丢失,因此在对每帧图像边缘的两行和两列进行腐蚀、膨胀之前应先复制边缘的行列图像再进行腐蚀、膨胀操作。

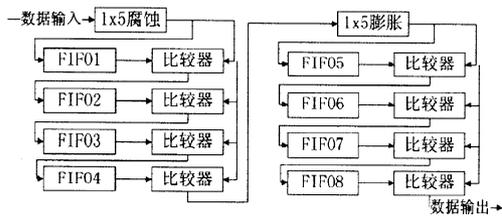


图3 FPGA内开运算的实现

图像数据进入FPGA后,复制成两路,一路进行开运算,一路由FPGA控制存储进SDRAM中。待若干行图像运行开运算结束时,FPGA从SDRAM中读出相应的原始图像,然后和开运算之后的图像相减,便完成了Top-hat算法。Top-hat算法处理之后的图像,背景均匀且有若干候选目标信号。此图像数据将送给DSP进行进一步的目标检测。

2)显示模块。此系统采用电视显示,为标准的PAL-D格式,有效像素 720×576 ,隔行扫描,帧频25Hz。而相机给出的有效图像数据格式为 320×240 ,逐行扫描,帧频50Hz。因此如果要全屏幕实时显示图像,就要进行格式转换。格式转换功能在FPGA里完成,有行列扩充和扫描格式转换。

行列扩充的公式如下:

$$\begin{cases} x^* = 2x + x/4 \\ y^* = 2y + 2y/5 \end{cases} \quad (3)$$

对于每一行里的像素点,每个像素都读取两次,且每四个像素再多读取一个像素,完成列扩充;对于每行像素都读取两次,且每五行再多读取两行,完成行扩充。进行扫描格式转换时,在一帧图像数据里,FPGA从SDRAM中读数时按照隔行方式读取,先读奇行,再读偶行,便可完成逐行到隔行的转换。并且,在读取时,每两帧读取一帧,帧频可以符合电视扫描的帧频。这样就完成了图像格式转换。

之后,FPGA根据DSP给出的脱靶量,按一定的规律以亮点代替某些有效像素,便可完成目标图像的波门叠加。由于红外目标较小,这里选择叠加窗口为 10×10 。FPGA将这些数字信号输出给D/A转换芯片ADV7176,转换后的模拟信号送给电视即可进行实时显示。

2.3 基于DSP的目标检测和跟踪模块

DSP选用TI公司的TMS320C6416。它是定点DSP,峰值处理能力为8000MIPS(1GHz),最大寻址能力为4GByte。TMS320C6416内部的二级

缓存L2容量多达1MB,而一帧图像大小约为0.15MB,所以它有足够的空间来缓存运算中的图像数据。

DSP的EDMA控制器将FPGA处理后的图像通过EMIF接口传输存储至二级缓存空间L2。在运行DSP中的检测跟踪算法时,可以直接从L2空间高速读取数据进行处理。待DSP处理完图像数据,得到最终的脱靶量时,产生内部中断,触发EDMA控制器将脱靶量输出给FPGA。

DSP内的算法流程是这样的:①自适应阈值检测。在 5×5 窗口内对图像数据求均值,然后和中心点值做差,将差和之前设定好的阈值做比较。如果小于阈值就认为是背景,如果大于阈值就认为是目标,然后记录目标图像的坐标值。最后将一定范围内(50×50)目标图像的横、竖坐标分别求平均,得到的是若干个候选目标图像的重心坐标 (x, y) 。②多帧确认。进行多帧确认时,选择帧为5帧,如果5帧内的目标坐标都在一定的半径范围内(50×50),那么可以确认这个点就是真正的目标,应该把此目标在第五帧的坐标值送给FPGA。这样就完成了目标点的检测。③实时跟踪。在跟踪时,DSP不需要再对整幅图像运行检测算法,而是依据上一帧的目标图像的坐标值,在一定的窗口内进行搜索。图像窗口的设定依据不同的图像有所差别,此系统中设置为 30×30 。检测算法和之前一样,但是检测范围大大缩小,并且也不用再进行多帧确认,因此得到目标点的时间也大大减少,可以达到实时跟踪。

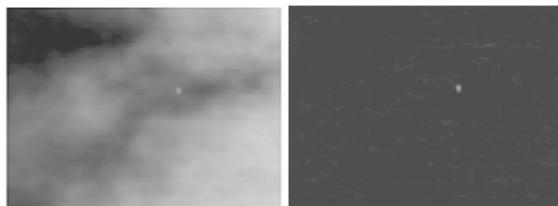
2.4 CPLD的作用

本系统同时也选用了Xilinx公司的CPLD产品XC95144,其功能有三:①通过I²C总线配置ADV7176。系统初始化时,CPLD通过修改ADV7176的内部寄存器,设置其工作状态。②Slave Serial方式配置FPGA。本系统配置FPGA时采用Slave Serial配置方式,CPLD在配置FPGA时实现译码功能,DSP作为配置的主控芯片。采用此配置方法可以将FPGA和DSP的程序共同存入FLASH中,减小了电路板面积。③与FPGA进行通信,根据实际情况,在必要时将所得图像数据传送给上位机。

3 实验结果

在本系统接上红外相机进行实验时,图4给出了实验效果图,图像由CPLD传送给上位机得到。从初始化到完成检测,需要5至6帧图像的时间,大

致 100ms。而在进行跟踪算法时,只需要 15ms 即可准确跟踪到目标图像,完全符合实时性的要求。



(a)原始图像 (b)Top-hat 处理后的图像



(c)最终的跟踪结果图像

图4 系统实验效果图

4 结 语

随着红外成像技术应用的日益广泛,相应地对

红外视频处理技术实时性的要求将越来越高。基于 DSP + FPGA 结构的信号处理系统是红外视频处理系统发展的一个重要方向。本系统针对红外弱小目标的检测和跟踪,通过用 FPGA 实现 Top-hat 算法进行图像预处理,大大减轻了后续 DSP 的处理任务,使其有更大能力来完成目标的检测和跟踪任务。本系统在工程实践中,取得了较好的检测、跟踪效果。

参考文献:

- [1] 任丽香,马淑芬,李方慧. TMS320C6000 系列 DSPs 的原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000:8-9.
- [2] Xilinx Corporation. Virtex-II Pro and Virtex-II Pro X FPGA User Guide [M]. Xilinx Corporation, 2007-11: 123-141.
- [3] Rafael C. Gonzalez, Richard E Woods, Steven L Eddins. Digital image processing using MATLAB [M]. 阮秋琦,译. 北京:电子工业出版社,2006:276-280.

现代科技 光电信息 内容丰富 开卷有益

敬请订阅《**激光与红外**》杂志(月刊)

《激光与红外》杂志是中国光学光电子行业协会、电子工业激光与红外专业情报网、中国电子学会量子电子学与光电子学分会的联合刊物,国内外公开发行人。报道以激光与红外为重点的光电子技术及应用领域的科技进步、新技术成果等。主要栏目有:综述与评论、激光技术、红外技术、光电材料器件、光学元件与材料、光纤技术、图像与信号处理、市场动态、企业介绍、行业概况等。是国内本专业创刊最早的刊物之一。本刊为中国科技论文统计源期刊、中文核心期刊,并被“中国期刊网”、“中国科技期刊(光盘版)”、“万方数字化科技期刊群”、“中文科技期刊数据库”和美国 CA、中国台湾华艺等数据库全文收录。

本刊为月刊,大 16 开本,2009 年每期定价 16 元,全年定价 192 元。

订阅办法:可在全国各地邮局订阅,邮发代号 2-312。也可直接向本刊编辑部订阅。汇款方式:开户行:中国工商银行北京市望京支行营业部,帐号:0200003509089113201,户名:《激光与红外》杂志社;邮局汇款请寄:北京 8511 信箱,激光与红外杂志社收,邮编:100015。

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告

通信地址:北京市 8511 信箱《激光与红外》杂志社

邮编:100015

电话:010-84321112

传真:010-64387667

E-mail:paper@laser-infrared.com jgyhw@ncrileo.com.cn