

周视IRST系统运动目标检测算法的硬件实现

黄成章¹, 李哲²

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015; 2. 武警部队装备部装备项目管理中心, 北京 100161)

摘要:针对当前周视IRST系统对运动目标检测的需求,综合考虑系统硬件成本和系统实时处理能力需求,研究了基于帧间差分法的运动目标检测算法,并基于FPGA+DSP硬件处理平台,进行了算法的硬件实现与优化,实验结果表明,该信号处理系统检测性能优异,满足目前IRST系统对运动目标检测的应用需求。

关键词:图像处理;运动目标;检测;IRST

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.12.015

Implementation of moving target detection algorithms in IRST system

HUANG Cheng-zhang¹, LI Zhe²

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China; 2. Department of Equipment of PAP, Beijing 100161, China)

Abstract: In view of the requirement of moving target detection in current panoramic IRST system, a moving target detection algorithm that based on the inter-frame difference method is studied, while considering the hardware cost and real-time processing capability of the system. After that, the hardware implementation and optimization of the algorithm are carried out based on the hardware processing platform of FPGA + DSP. The experimental results show that the signal processing system has excellent detection performance and meets the application requirements of moving target detection in IRST system.

Keywords: image processing; moving target; detection; IRST

1 引言

周视IRST(Infrared search and track system)系统又称周视红外预警探测跟踪系统,它可以在方位360°范围内进行匀速扫描,对作用范围内的潜在威胁搜索、探测并进行跟踪。周视IRST系统,借助红外探测无可比拟的优势,如作用距离远、穿透能力强及全天候工作能力等,使其广泛应用于军事应用设备上,该系统可以应用在陆地、飞机、舰艇等多种平台,是现代化多层次、多方位战争中不可缺少的重要军用光电系统之一^[1-2]。

运动目标检测是计算机视觉领域研究的重点,涉及到图像处理、模式识别以及人工智能等多个领

域。对于光电搜索跟踪系统来说,精确实时地检测出运动目标,是进行后续目标跟踪、识别、威胁评估及威胁处置的前提,将直接影响光电探测系统的整体性能。

2 运动目标检测算法简介

目前,工程应用中常用运动目标检测算法,主要有光流法、背景差分法、帧间差分法^[3-5]等。光流法主要通过检测图像的光流变化来对运动目标进行检测,对于红外搜索跟踪系统来说,其帧间图像灰度变化比较大,对光流法的检测性能影响严重;背景差分法,其基本原理是利用当前帧图像与背景图像差分运算,在此基础上实现对运动目标检测的有效检测,

作者简介:黄成章(1985-),男,满族,硕士,工程师,研究方向为图像处理方向。E-mail: xyp0905@163.com

收稿日期:2019-03-06; **修订日期:**2019-03-30

但其最大的问题是如何对背景图像进行建模,此外,随着时间、环境的变化,还要对背景进行不断更新。相比前述算法,帧间差分法原理十分简单,通过将相邻帧图像进行差分,通过选取合适的阈值对差分结果进行分割,即可实现对运动目标的提取。对于周视红外搜索跟踪系统而言,由于在目标探测模式时,光电系统处于周期扫描状态,帧间差分需要基于此特点进行概念拓展,通过对当前扫描周期中的图像帧与上一个扫描周期的对应图像帧进行差分即可实现运动目标的检测。如图1所示,图中 T 为扫描周期, N 为一个扫描周期中图像的总帧数。

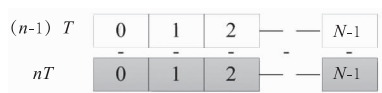


图1 周扫视频帧差示意图

Fig. 1 Frame difference block diagram

综上所述,帧差法原理简单,对运动目标检测效果明显,实时性较强,十分适合在硬件中进行实现,为了进一步提升算法的抗干扰能力,还需要基于目标的特征(面积、形状和速度等),对潜在目标进行关联,实现对潜在目标的准确告警,其基本原理如图2所示。

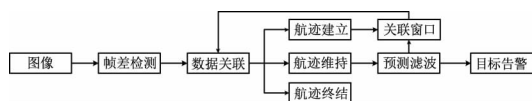


图2 算法原理

Fig. 2 Algorithm principle

图2中,借助基于帧差法的检测算法实现潜在目标与背景的分割,该部分算法可以借助FPGA强大的并行运算能力,提升系统的实时性能;后处理算法部分则可以借助DSP的强大数据处理能力,这样就可以充分利用FPGA与DSP的独特优势,实现高效实时运动目标检测算法的硬件实现。

3 硬件架构

系统采用一片TMS320C6455和一片Xilinx的V5系列FPGA组成,其硬件组成框图如图3所示,图中,FPGA外扩了CameraLink输入接口,图像数据可以从该接口中输入,DSP与FPGA之间通过GPIO、EMIFA和SRIO相连,因此,FPGA可以通过EMIFA或SRIO向DSP传输图像及中间处理结果,此外,FPGA和DSP均外扩了DDR2和FLASH,其中DDR2可以用于存储输入图像,FLASH用于固化应

用程序,外扩的RS422接口可以输出调试信息。

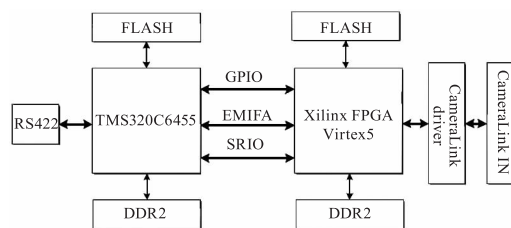


图3 硬件系统框图

Fig. 3 Hardware system block diagram

4 硬件实现

4.1 帧差法的FPGA硬件实现

由前面的内容可知,为了实现周视红外系统的帧差法,至少需要存储一个扫描周期的红外图像,为了方便FPGA的存储操作,并提升其存储实时性,采用乒乓缓存机制,对图像数据进行存储,而FPGA内部的存储资源无法满足如此巨大的数据存储需求,因此需要借助外部的DDR存储资源。FPGA内部算法流程如图4所示。

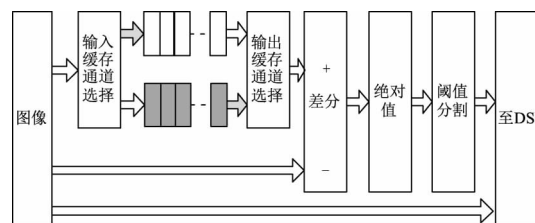


图4 FPGA内部算法框图

Fig. 4 Internal algorithm block diagram of FPGA

4.1.1 图像乒乓读写实现

从前述内容可知,由于需要借助DDR存储资源,因此需要实现对DDR控制器,为方便用户实现,Xilinx提供了相应的IP解决方案,Muti-Port Memory Controller-(MPMC)^[6]就是其中的一种,MPMC IP核采用全参数化设计,支持常SDRAM/DDR/DDR2/DDR3/LPDDR多种存储器,提供最多8个端口对存储器进行访问,并且这些端口是相互独立的,随时可以通过任意一个端口访问内存,为了适应嵌入式偏上系统的开发,该IP还提供一系列模块(如PIM, PLB及MIB等),以方便与PowerPC 405、PowerPC 440以及MicroBlaze处理器进行互联,此外为了适应视频处理应用的开发,该IP还支持一种称为VFBC(Video Frame Buffer Controller)的接口模块。

VFBC接口模式下,用户层采用独立的命令及读写控制异步FIFO信号实现对2维数据的读写操

作。对 VFBC 中 FIFO 的数据传输由命令接口信号控制,该命令由四个字构成,涉及数据的读/写模式、

传输 2D 数据的总数量、传输数据的起始地址等参数。其命令格式如表 1 所示:

表 1 VFBC 命令包格式
Tab. 1 VFBC command package format

命令包							
命令字 0		命令字 1		命令字 2		命令字 3	
31:15 保留位	14:0 水平尺寸	31 读/模式写	30:0 起始地址	31:24 保留位	23:0 垂直尺寸	31:24 保留位	23:0 水平跨度

在表 1 中,值得注意的是,水平尺寸、起始地址和水平跨度三个参数必须对其到 128 字节边界,即要求这些参数的[6:0]bit 位为 0。

下面采用该 IP 核实现对红外视频图像的读写控制仿真,该红外视频主要参数如下:

像素时钟:25 MHz
水平分辨率:640
垂直分辨率:512
数据位宽:16 bit
帧频:100 Hz

读写地址: 0×10000000 (乒乓地址) 0×20000000 (乒乓地址)

由上述参数可得:

水平尺寸: $640 \times 2 = 1280 = 0 \times 500$

读/写模式:1(读)0(写)

起始地址: 0×10000000 (乒乓地址) 0×20000000 (乒乓地址)

垂直尺寸: $512 - 1 = 511 = 0 \times 1FF$

水平跨度: $640 \times 2 = 1280 = 0 \times 500$

得到如下表 2 对乒乓地址进行同时读写的命令字。

表 2 读写命令包示例
Tab. 2 Read and write command package example

读(乒乓地址)命令包							
命令字 0		命令字 1		命令字 2		命令字 3	
31:15 保留位	14:0 水平尺寸	31 读/模式写	30:0 起始地址	31:24 保留位	23:0 垂直尺寸	31:24 保留位	23:0 水平跨度
$0 \times 0000_0500$		$0 \times 9000_0000$		$0 \times 0000_01FF$		$0 \times 0000_0500$	

写(乒乓地址)命令包							
命令字 0		命令字 1		命令字 2		命令字 3	
31:15 保留位	14:0 水平尺寸	31 读/模式写	30:0 起始地址	31:24 保留位	23:0 垂直尺寸	31:24 保留位	23:0 水平跨度
$0 \times 0000_0500$		$0 \times A000_0000$		$0 \times 0000_01FF$		$0 \times 0000_0500$	

将 360° 周视扫描图想象成一帧全景图像,则由于要采用乒乓读写操作,乒乓标志需要在每一个周视扫描周期完成后进行切换,该标志可以由扫描周同步信号通过 1 bit 计数器实现构造,从而实现前后两个扫描周期图像的乒乓存储操作。其时序图如下所示,图 5 中,VS 为帧同步信号,CS 为周视扫描周同步信号, PingPongFlag 为乒乓标志信号,Address 为乒乓读写地址。

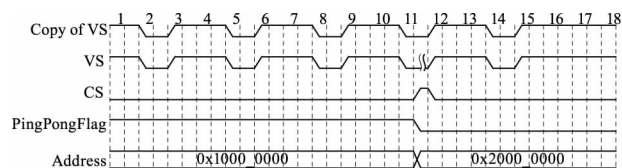


图 5 乒乓操作标志时序

Fig. 5 Table tennis operation mark timing

4.1.2 帧差法的硬件实现与验证

借助 MPMC 的 VFBC 操作接口,可以十分方便

地实现帧差法数据操作,这里唯一要注意的是根据图像同步信号和周扫描同步信号构造正确的 VFBC 操作接口信号及命令字,如图 6 为按照 1 周 100 帧图像(相关参数按照 4.1.1 所示参数构造),采用测试图像测试的帧差法,利用 chipscope 监测关键信号得到的时序结果。

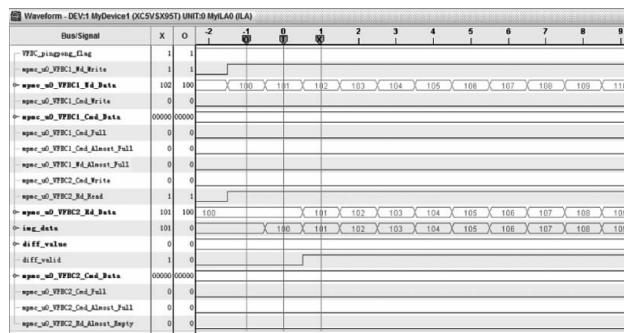


图6 chipscope 监测时序结果

Fig. 6 Chipscope monitoring sequential results

从图 6 中可以看出,帧差法实现中共有两个 VFBC 操作端口(VFBC1 和 VFBC2),其中 VFBC1 用于数据的乒乓写入,VFBC2 用于数据的乒乓读出,读出的数据与经过时序调整后的当前数据进行差分运算,从而实现图像的差分算法,由于采用的测试图像,前后两个周期对应帧数据相同,因此帧差结果 diff_value 为 0。

4.2 数据关联算法的 DSP 实现

在实际作战环境中,系统及环境干扰多种多样,如由于探测器自身的材料和工艺因素影响,实际成像中会出现盲闪元,对于盲元干扰,由于位置与灰度随时间不变,借助帧差算法可以轻松实现抑制,但闪元的干扰随时间随机变化,单纯的借助帧差法无法抑制,此外,来自空中云层、地面树叶等摆动的干扰,借助帧差法会将此类目标提取出来,从而形成干扰,对于这些干扰可以通过 Blob 分析算法和原始图像信息获取目标的灰度特征、几何特征等进行数据关联,采用二次判决,实现对此类干扰的抑制。数据关联算法的典型流程如图 7 所示。

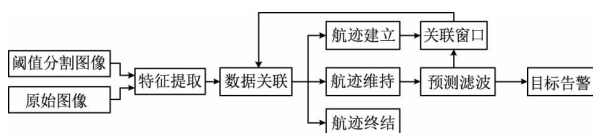


图7 目标数据关联流程

Fig. 7 Target data association process

在图 7 中,采用 Blob 分析算法从分割图像中获

取潜在目标的特征信息(如位置、面积、形心等),借助得到的目标位置信息可以得到目标的速度、加速度等运动特征,再根据位置信息索引原始图像得到目标的平均灰度等统计特征,通过分析威胁目标的典型特征范围,对这些特征进行综合关联,可以实现对干扰的有效抑制。值得注意的是,由于采用的周视搜索系统,进行帧差运算时是对前后两个扫描周期的对应帧进行的差分处理,扫描周期和目标运动角速度将影响进行数据关联的有效帧范围,对于一些快速目标,如果扫描周期较大,在前后两个扫描周期进行差分后可能出现跨帧的问题,需要综合目标的极限运动角速度进行综合考虑,建立数据关联的有效范围。

在 FPGA 完成帧差运算后,FPGA 将通过 SRIO 把分割后的二值图像及原始红外图像传输至 DSP,在二值图像数据传输完毕后发送 Doorbell 信号,如果系统处于目标搜索工作模式,DSP 在收到 Doorbell 信号后将进入中断处理,执行后处理流程,具体软件流程如图 8 所示。

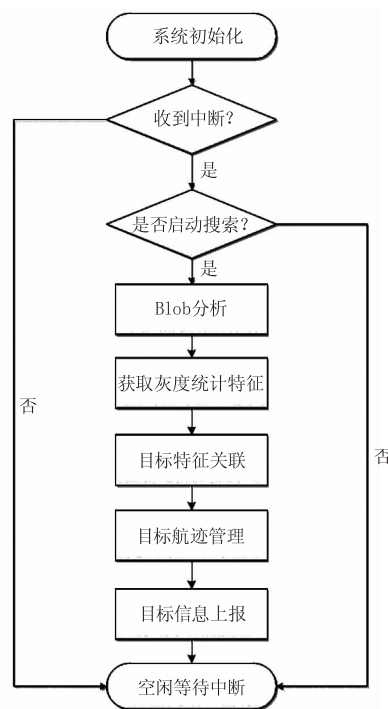


图8 DSP 数据处理流程

Fig. 8 DSP data processing flow

5 测试及实验结果

算法采用硬件实现后,将实际的数据接入信号处理平台,红外视频参数如前 4.1.1 节所述,由此可知,为了实现对数据的实时处理,每帧图像的处理时

间不能超过 10 ms,即具备大于 100 f/s 的处理能力。

本文方法中 FPGA 处理部分由于是并行实时处理,因此可以不考虑其处理延时;但 DSP 部分的程序将对整个系统的实时处理能力产生严重的影响,本文参考了文献[6]的多种 DSP 程序优化手段(例如使用编译器优化选项、借助硬件 Cache 等)对 DSP 进行了深入优化。使其达到了实时处理要求。表 3 在相同条件下对文献[6]方法和本文方法的处理时间消耗进行了详细对比。

表 3 检测性能对比

Tab.3 Comparison of image detection performance

算法	目标个数	图像缩放	平均检测时间/ms
文献[6]方法	5	是	8.322
本文方法	5	否	7.633

从表 3 可以看出,相同条件下本文方法在处理时间上虽然只提升了 8%,但不同的是,本文方法未对图像进行缩放处理,而是对全尺寸图像进行了处理,其优势在于不会对整个系统的作用距离和检测概率产生不利影响。

如图 9 所示为基于本文方法在实际系统中的实际的目标检测效果。

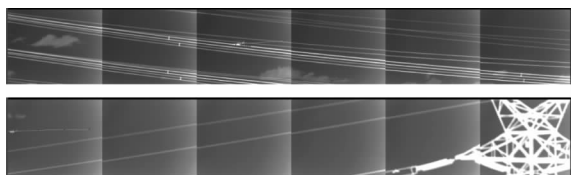


图 9 周视目标检测效果

Fig.9 Target detection effect

从图 9 中可以看出,本系统能够实时、准确地检测出复杂环境下的运动目标,借助数据关联技术实现了虚警的有效抑制,并对目标建立的运动轨迹,从而可以为后续的目标跟踪、识别等提供优良的检测效果。

6 结 论

本文设计了一种基于 FPGA 和 DSP 异构硬件平台的运动目标检测系统。采用帧间差分法检测出运动目标,通过数据关联技术进行虚警目标的抑制,实验结果表明本设计能够在虚警率满足使用要求的情况下,实时准确地检测到运动物体,但仍存在一些有

待改进的地方,例如,智能化程度有待进一步提高,后续工作可考虑引入自动阈值分割技术,减少对人的依赖,进一步提升系统的智能化程度,从而增强系统的响应速度。

参考文献:

- [1] SHU Jinlong, CHEN Liangyu, ZHU Zhenfu, et al. Current situation and development trend of infrared searching and tracking system of foreign[J]. Modern Defence Technology, 2003, 31(4): 47-51. (in Chinese)
舒金龙, 陈良瑜, 朱振幅, 等. 国外红外搜索跟踪系统的研制现状与发展趋势[J]. 现代防御技术, 2003, 31(4): 47-51.
- [2] HOU Zhiheng, CAO Yudong. Multi-object tracking of infrared warning system[J]. Electronic and Electro-optical Systems, 2005, (3): 21-22. (in Chinese)
侯志恒, 曹玉东. 红外警戒系统的多目标跟踪[J]. 光电系统, 2005, (3): 21-22.
- [3] LI Xiyang, NI Guoqiang. Optical flow computation of infrared images[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3): 189-206. (in Chinese)
李熙莹, 倪国强. 红外图像的光流计算[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 189-206.
- [4] FANG Shuai, XUE Fangzheng, XU Xinhe. Moving object detection based on self-adaptive background modeling[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(1): 159-161. (in Chinese)
方帅, 薛方正, 徐心和. 基于背景建模的动态目标检测算法的研究与仿真[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(1): 159-161.
- [5] LI Bing, LI Fanming, XIE Jiangying, et al. Infrared moving target detection based on frame difference method and adaptive threshold region growing[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(1): 156-159. (in Chinese)
李冰, 李范鸣, 谢江英, 等. 基于帧差法和自适应阈值区域生长的红外运动目标检测[J]. 半导体光电, 2017, 38(1): 156-159.
- [6] HUANG Chengzhang, ZHAO Jinbo, LI Jian. Research on optimization of IR warning algorithm in DSP system[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(7): 816-818. (in Chinese)
黄成章, 赵金博, 李剑. 红外告警算法在 DSP 上的优化技术研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(7): 816-818.