

基于 DSP 的实时红外图像处理系统的设计

鲁剑锋^{1,2}

(1.中国科学院研究生院, 北京 100039; 2.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130032)

摘要: 红外焦平面成像系统是红外成像技术发展的趋势。红外传感器出来的原始信号, 由于信号的非均匀性, 信号噪声大以及弱小目标的红外信号的灰度级不明显, 所以, 提出了基于 DSP 的红外信号处理板, 采用两点温度定标的非均匀校正算法, 以及中值滤波, 直方图连续拉伸的算法, 来修正红外图像, 以达到满意的效果。

关键词: 数字信号处理器; 非均匀校正; 图像处理

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2008)增(红外)-0622-04

Design of real-time processing system for IR image tracking based on digital signal processor

LU Jian-feng^{1,2}

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130032, China)

Abstract: Imaging system of infrared focal plane arrays (IRFPA) is the development direction of infrared imaging system (IRIS) in future. Through analyzing basic laws about infrared radiation, the characteristic of infrared image is discussed in detail. The real-time system of infrared video tracker based on DSP is realized. The reason and characteristic of infrared non-uniformity are analyzed, and the algorithm of two points real-time non-uniformity corrections is realized in hardware platform. The result of correction is satisfying.

Key words: Digital signal processor; Nonuniformity correction; Image processing

0 引言

红外成像技术具有广阔的应用前景, 特别是在军事领域内的应用。红外焦平面成像系统是红外成像技术发展的趋势。

由于红外传感器输出的信号常常存在着非均匀性以及噪声大、噪声种类多, 所以造成红外信号的目标难以识别, 特别是灰度差小、所占像元少的目标, 就更加难以识别。因此, 红外信号实时的修正输出就成为了必不可少的环节。

随着数字信号处理器的不断的发展、进步, 基于数字信号处理器 (DSP) 和可编程器件 (FPGA) 的处理平台为更新、更快的算法的实现提供了可能, 从而为红外信号的实时修正输出奠定了良好的硬件平台。

通过两点温度定标的非均匀校正法, 以及基于中值滤波的滤波方法, 使得红外信号的质量有了很大的提高, 有效的解决了红外图像信号的非均匀性, 同时基本滤除了信号中的散粒噪声。基于 TI 的 TMS320C6416 数字信号处理器硬件平台, 为算

收稿日期: 2008-04-09

作者简介: 鲁剑锋 (1978-), 男, 吉林长春人, 硕士生, 主要从事数字图像处理、电视跟踪和自动目标识别技术的研究。Email: pc80586@sina.com

法的实时完成, 红外图像的实时输出提供了保证。

1 DSP 实时数字图像处理系统硬件的构成

采用了美国 TI 公司的高速数字信号处理器, 以 TMS320C416 为核心, 辅助现场可编程门阵列 FPGA^[8] 以及高速的视频 A/D, D/A 等器件构成了实时的高速数字图像处理系统。系统的具体原理框图如图 1。

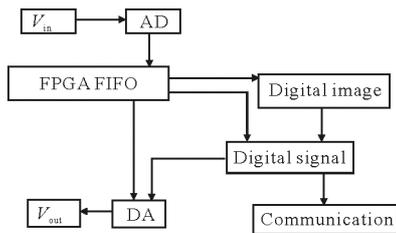


图 1 DSP 图像处理系统硬件原理框图

Fig.1 Hardware block diagram of DSP signal image processing system

这个数字图像处理系统的工作原理是, 由 CCD 给出的模拟视频信号, 经过时序产生及图像预处理部分, 通过高速视频 A/D (BT835) 将模拟信号转换为数字信号。同时分离出来的同步信号, 由 FPGA(EP2C20F256)地址发生器产生数字图像的存储地址, 这样, 在可选择的任意大小的范围内的图像数据依照地址发生器产生的地址依次存入图像存储器 (双口 RAM) 中。数字信号处理器 DSP 将图像存储器(双口 RAM)中的图像以 DMA 方式存在同步动态存储器 SDRAM 中。由 DSP 和 SDRAM 组成的数字处理单元在对图像数据进行处理后, 再将数据通过 FPGA 组成 FIFO 传递给高速的视频 D/A 芯片 (BT864), 转化成为模拟的视频信号, 用于输出。DSP 接有通讯单元, 通过 RS422 和 RS232 实现与上位机的数据交换过程。

该系统的主要特点是^[1]:

- (1) TMS320C6416 DSP 处理器, 处理能力可达 4800MIPS;
- (2) TMS320C6416 DSP 带 4 Banks \times 512 K \times 32 Bit 的 SDRAM, 时钟主频 166 MHz;
- (3) TMS320C6416 DSP 带 8MBIT FLASH ROM;
- (4) FPGA 组成的 FIFO, 用于图像的滤波, 边

缘等预处理工作;

- (5) 外部与同步串行设备接口;
- (6) 具有 JTAG 端口, 支持多处理器仿真器调试;
- (7) 低电平逻辑数字电路设计, 降低功耗;
- (8) 全面采用小型表贴封装器件, 减小 PCB 尺寸, 增强系统可靠性。

1.1 TMS320C6416 数字信号处理器

TMS320C6416 是美国德州仪器 (TI) 公司出品的 TMS320C6000 系列处理器的一种, 片内设计为修正的哈佛总线结构^[2-3]。这里所选用的 TMS320C6416GLZ, DSP 的时钟主频为 600 MHz, 即指令周期速度达到了 4 800 MIPS (兆条指令/S), 采用了 6 000 系列的超长指令字 (VILW) 结构, 每个时钟周期读取指令总字长为 256 位。TMS320C6416 采用片内的 PLL 电路对外部时钟进行倍频^[5], 在系统设计时采用 50 MHz 的晶振, 用片内的 PLL 电路 12 倍频。TMS320C6416 片内集成了 1M-BYTE 的 DATA RAM 和 PROGRAM RAM。

1.2 DSP 外扩设备

TMS320C6416 设有主机口(HPI), 访问片外存储器时必须通过外部存储器接口(EMIFA&EMIFB)^[3]。

EMIF 可以扩展的存储器包括^[10]:

- (1) Pipeline 结构的同步突发静态 RAM(SBRAM);
- (2) 同步动态 RAM (SDRAM);
- (3) 异步器件, 包括 SRRAM, FLASH, FIFO 等^[4]。

TMS320C6416 芯片的 EMIF 接口, 将 SBRAM 和 SDRAM 接口复用^[9], 因此, 只能外扩其一。在本系统中, 选用 SDRAM (HY57V653220B), 用作 DSP 的缓存, 接口采用 DSP 的无缝接口, 接口速度为 1/2CPU CLOCK。系统采用的为图像的 256 级灰度信号, 按照每场图像 768 \times 256 像素计算, 需要 256 K \times 8 bit, 因此, 系统 DSP 扩一片 SDRAM, 为 4 Banks \times 512 \times 32 bit, 占用 CE2 空间^[9]。

异步存储器接口选择用一片双口 RAM (IDT7132) 作为图像数据从 FPGA 到 DSP 的传输, IDT7132 为 2 K \times 8 bit, 由 DMA 控制寄存器把图像数据以 DMA 方式导入 DSP 中^[10]。

系统采用 1 片 FLASH (AM29LV160) 作为程序存储器, 存储 DSP 和 FPGA 的程序, 上电复位时将程序自举, 导入 DSP 和 FPGA 内。系统采用 MAP1

存储器映射方式, FLASH 闪存占用 DSP 的 EMIFB16 位接口空间, SDRAM 与双口 RAM 占用 DSP 的 EMIFA32 位接口空间。

2 两点温度定标非均匀校正算法的应用

一般意义上的非均匀性是指由探测器各阵列的红外响应度不一致而导致的像质降低。理论研究和实际应用都需要对红外图像的非均匀性做出准确的定义, 并采用合适的度量方法来反映非均匀性。从噪声的角度来看, 红外焦平面阵列的噪声等于瞬态噪声和空间噪声的总和。瞬态噪声是光子噪声、暗电流噪声及读出电路噪声共同作用的结果; 空间噪声是由红外焦平面阵列的非均匀性造成的, 有时也称为固有空间噪声。瞬态噪声可以通过求多次测量值平均值的方法来消除, 而固有空间噪声则不能通过求多次测量的平均来消除, 必须通过校正才能减小。一般制作探测器的材料不同, 其非均匀性严重程度也有所不同, 对于低量子效率材料红外焦平面阵列来说, 如肖特基势垒 PtSi 焦平面阵列的非均匀性可做到 $\leq 1\%$, 而量子效率高的化合物半导体材料, 如 HgCdTe 和 InSb, 其焦平面阵列非均匀性可能超过 2% , 也就是说, 探测器材料的量子效率越高, 则用其制作出来的红外焦平面阵列的非均匀性就越大^[6]。

不同的侧重点使得对于红外焦平面阵列传感器的非均匀性目前有多种的定义和度量方法, 下面介绍几种非均匀性 (NU) 的常用定义。

第一种定义: 在均匀辐射下, 焦平面阵列像元中灰度输出最大值 V_{omax} 与最小值 V_{omin} 之差同它们的和的百分比。

$$NU = \frac{V_{\text{omax}} - V_{\text{omin}}}{V_{\text{omax}} + V_{\text{omin}}} \times 100\% \quad (1)$$

第二种定义: 在均匀辐射下, 焦平面阵列像元中灰度输出最大值 V_{omax} 与灰度输出最小值 V_{omin} 之差同所有像元灰度输出平均值 V_{oavg} 的百分比值。

$$NU = \frac{V_{\text{omax}} - V_{\text{omin}}}{V_{\text{oavg}}} \times 100\% \quad (2)$$

第三种定义: 在均匀辐射下, 焦平面阵列像元灰度输出值的均方根偏差与灰度输出平均值 V_{oavg} 的百分比值。

$$NU = \frac{1}{V_{\text{oAVG}}} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_{\text{oAVG}})^2} \times 100\% \quad (3)$$

红外焦平面阵列的输出非均匀性是红外敏感元件 (探测器)、读出电路、半导体特性以及放大电路等各种因素综合影响的结果。

非均匀性校正技术总体上将它们分为两大类: 定标校正法和自适应校正法^[6]。定标校正法需要在校正之前定标, 即获取非均匀性校正的数据 (校正因子或校正后的视频信号); 在校正实现过程中读取这些数据或作相应的运算, 完成对非均匀性的校正。自适应校正法即基于场景非均匀性校正法, 如高通滤波器自适应校正方法、神经网络自适应校正方法等。

定标法比较简单可行, 但长时间工作需要重新定标; 自适应校正法不需要定标, 但数据运算量大, 因此, 现阶段自适应校正方法用于工程上还有很大的困难。

当假设在小范围工作温度内, 红外热像仪的响应为线性时, 可以采用一点校正法来校正其非均匀性。所谓一点校正法就是在一定辐射强度下, 把各个像元的输出信号校正为一致, 即在某一恒定光辐射下, 把不同像元的输出信号校正为某一信号 Y_1 、 Y_2 一般为某一个辐射强度下的全屏 $M \times N$ 个探测单元的输出灰度平均值, 按照线性关系有:

$$Y_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Y_{ij} / (M \times N) \quad (4)$$

$$Y'_{ij} = a_{ij} * Y_{ij} \quad (5)$$

$a_{ij} = Y_1 / Y_{ij}$ 是第 (i, j) 个像元的校正因子, Y_{ij} 和 Y'_{ij} 分别是校正前后第 (i, j) 像元的输出信号。

一点校正法仅能在某一光辐射强度下把各像元的输出信号校正为一致。离校正点越远, 校正后的残留非均匀性也越大。针对此项缺点, 一般可采用两点校正法来扩大它的校正范围^[7]。

假设红外探测器的响应是线性的, 且探测器的响应具有时间上的稳定性, 则利用两点校正法来对图像的非均匀性进行校正。

两点校正算法就是在红外热成像系统的光路中插入一温度可控的黑体, 利用各探测单元对两个不同辐照度下均匀黑体辐射的响应计算出校正参数。从而实现非均匀性校正。

选取两个辐射强度定标点 X_1 、 X_2 , 分别对红外焦平面阵列中所有 $M \times N$ 个探测单元的输出求平均, 如公式(6)和(7)所示 Y_1 、 Y_2 为两个辐射强度的全屏 $M \times N$ 个探测单元的输出灰度平均值。

$$Y_1 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Y_{ij}(X_1) / (M \times N) \quad (6)$$

$$Y_2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Y_{ij}(X_2) / (M \times N) \quad (7)$$

用 Y_1 、 Y_2 确定的直线作为校正直线, 则在任意辐射强度下第 $(i; j)$ 个探测单元校正前的输出值 Y_{ij} 与其校正后输出值 Y'_{ij} 之间的关系为:

$$Y'_{ij} = g_{ij} * Y_{ij} + o_{ij} \quad (8)$$

$$g_{ij} = \frac{(Y_2 - Y_1)}{Y_{ij}(X_2) - Y_{ij}(X_1)} \quad (9)$$

$$o_{ij} = Y_1 - \frac{Y_2 - Y_1}{Y_{ij}(X_2) - Y_{ij}(X_1)} Y_{ij}(X_1) \quad (10)$$

式中: g_{ij} 、 o_{ij} 分别为增益校正系数和偏置校正系数。

采用中波焦平面红外热像仪, 通过黑体辐射源(点燃的香烟), 利用 DSP 处理平台采集视频图像进行两点非均匀性校正, 将不同辐射强度下采集到的红外图像数据送到 DSP 平台内存中进行图像校正处理, 校正后的图像数据通过 D/A 变换转换为标准模拟视频信号后, 在监视器上进行显示。通过对校正前后图像效果的比较, 来验证两点校正算法的正确性。

图 1 表示利用两点温度定标法进行校正前、后的图像比较。图 2(a)为校正前的图像, (b)为校正后的图像。从校正结果可以看到: 校正后的图像非均匀性指标明显好于校正前的图像。通过图像及数据的对比可以看出利用两点温度定标法进行红外非均匀性校正可以显著改善图像质量。

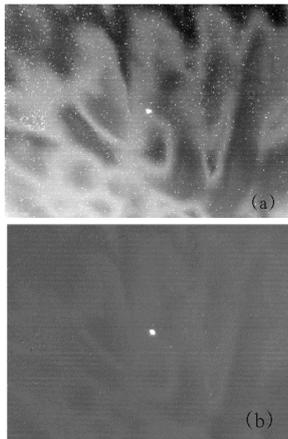


图 2 两点温度定标法校正前后的图像比较

Fig.2 Algorithm of two points real-time non-uniformity corrections

从时间上看, 使用本文的方法, 在 C6416 的处理系统中, 针对标准的 PAL 制式的视频信号, 处理像素数 640×280 的一帧红外图像, 需要时间为 14.3 ms, 可以达到 20 ms 的场频的实时性, 并且, 如果采用汇编语言, 调用 C6416 的特有的函数, 在处理的时间上还可以有很大的提高^[5]。通过实验可以看出, 本文的方法对于红外图像的实时校正, 具有一定的优势。

3 结 论

由高性能数字信号处理器 TMS320C6416 和可编程逻辑器件 FPGA 组成的实时图像处理系统, 实现了图像的采集, 实时的数据处理以及输出, 采用了在线编程技术, 利用 JTAG 对系统进行在线调试, 使系统具有很好的升级性能和扩展性能。采用贴片器件, 既减小了 PCB 板的尺寸, 又增强了系统的可靠性。经实验证明, 系统运算基于两点温度定标非均匀性校正的算法速度快、可靠性高, 实时性好, 在红外图像质量改善等方面有着很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 周建民. 可编程阵列逻辑PAL应用技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [2] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [3] 李方慧, 王飞, 何佩琨. TMS320C6000系列DSPs原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] 王念旭. DSP基础与应用系统设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [5] TMS320C6000 CPU and Instruction Set Reference Guide[Z]. 1999.
- [6] TMS320C6000 EMIF to External FIFO Interface[Z]. Texas Instruments Incorporated, 1999.
- [7] 戴逸民, 梁晓雯, 裴小平, 等. 基于DSP的现代电子系统设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [8] TMS320C6000 EMIF to External SDRAM/SGRAM Interface[Z]. Texas Instruments Incorporated, 1999.
- [9] 高兰香, 沈国土, 蔡继光, 等. 红外热像理论建模中的体效应研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36: 597-599.
- [10] 乔亚. 红外成像制导对抗技术研究[J]. 激光与红外, 2005, 12: 913-916.