

# 星载拼接相机图像实时校正系统的研究

岳俊华<sup>1,2,3</sup>, 李 岩<sup>1</sup>, 张沛露<sup>1,2,3</sup>, 郭秀兰<sup>4</sup>

(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;

3.吉林建筑工程学院, 吉林 长春 130021; 4.吉林石油集团有限责任公司供电公司, 吉林 松原 138000)

**摘 要:** 为了实时对多 TDI-CCD 拼接后获得准确与高质量的大视场图像, 建立了多片 TDI-CCD 拼接相机像元实时校正系统。对该系统的图像拼接与灰度融合算法进行研究并对硬件实现方法加以介绍。对多片 TDI-CCD 拼接技术以及由此带来的图像错位与像元不均匀性进行了介绍, 采用输出缓存技术实现拼接 TDI-CCD 奇偶片输出图像配准, 应用比值平均法校正拼接片间的灰度不均匀性, 实现实时大视场拼接校正。并将整套算法在 Xilinx 公司的 Spartan 3 系列的 FPGA 平台上实现, 得以构成多 TDI-CCD 拼接校正系统。实验结果表明, 该系统可以自动对 3 片 2 048 像元的 TDI-CCD 拼接配准与灰度校正, 获得清晰的大视场图像, 满足系统实时性的要求。

**关键词:** 拼接相机; 图像配准; 图像融合; 实时处理

**中图分类号:** TP391

## Study on Real-time Correction System of Spaceborne Mosaic Camera

YUE Jun-Hua<sup>1,2,3</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, ZHANG Pei-Lu<sup>1,2,3</sup>, GUO Xiu-Lan<sup>4</sup>

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

Changchun 130033, China; 2.Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3.Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China;

4. Jilin Petroleum Corporation Power Supply Ltd., Songyuan 138000, China)

**Abstract:** In order to obtain accurate and high-quality images after multi-CCD mosaic, a real-time multi-CCD mosaic and correction system was established. Algorithms such as image mosaic and grey correction and the hardware implementation method were described. The technology of multi-CCD mosaic, the mistakes and the non-uniformity of multi-CCD mosaic were introduced. The image matching was realized by output buffer technology, the gray non-

uniformity of mosaic chips was corrected by ratio average method. A multi-TDI-CCD image mosaic correction system based on Xilinx Spartan 3 series FPGA was developed and the whole algorithm was implemented in this system. The test results showed that the system could automatically mosaic three TDI-CCD chip images of 2 048 pixels and met the real-time demand.

**Keywords:** image mosaic camera; image matching; image fusion; real-time processing

## 1 引言

随着遥感卫星应用技术的发展,宽视场相机已成为发展趋势。而大视场相机成像系统由 TDI-CCD 焦平面模块拼接构成。其中,TDI-CCD 是一种面阵结构、线阵输出的新型 CCD,具有多重级数延时积分的功能,在低照度情况下具有较好的成像性能<sup>[1]</sup>。当单片 TDI-CCD 的像元总长度不能满足相机成像的视场覆盖宽度时,采用多 TDI-CCD 分区域成像,然后进行多幅 TDI-CCD 图像拼接就成为一种现实的解决思路。TDI-CCD 拼接是 TDI-CCD 相机研制的一项专用技术,在遥感卫星成像技术方面应用十分灵活,可实现全景扫描的大视场传感器应用。对 TDI-CCD 进行拼接时,在借鉴 CCD 交错拼接技术的基础上,经过认真的技术分析和工艺编排,完成了视场拼接工作。交错拼接是常采用的一种拼接方法,如图 1 所示。

由于噪声、暗电流水平的差异等原因<sup>[2]</sup>,拼接的各

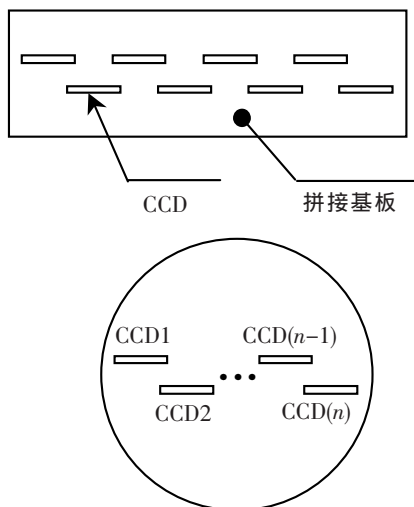


图 1 视场拼接示意图

片 TDI-CCD 输出的图像灰度变化并不一致,拼接后会产生 TDI-CCD 相片间的灰度不均匀性,从而导致多片图像拼接后残留有明显的拼接线、多片 TDI-CCD 拼接产生的图像在运动方向上 2 列错开一定位置的问题。3 片 TDI-CCD 的直接拼接图如图 2 所示。因此,如何实时解决 TDI-CCD 拼接的准确性与片间不均匀性、获得高质量的图片成为技术难点。要拼接出一幅效果较理想的图像,关键是图像匹配和图像融合。针对图像匹配,通过选取适当的图像匹配算法找到配准位置,为图像拼接打下良好的基础;针对图像融合,通过选取适当的图像融合算法进行图像灰度校正,可以使拼接的图像更加完善,保证图像的质量。



图 2 3 片 TDI-CCD 原始拼接图

为了获得高质量的交错拼接的 TDI-CCD 图像,必须解决所存在的 2 个问题: 1. 多片 TDI-CCD 拼接产生的图像在运动方向上 2 列错开一定位置的问题; 2. 由于噪声、暗电流水平的差异等原因,拼接的各片 TDI-CCD 输出的图像灰度变化不一致的问题<sup>[3]</sup>。为了实时解决这两个问题,需要找到一个高效的算法来完成拼接的准确性与 TDI-CCD 拼接片间的灰度不均匀性。

## 2 匹配算法设计

### 2.1 匹配算法分析

图像拼接作为图像研究方面的重点之一,国内外研究人员提出了很多拼接算法。图像拼接的质量主要依赖图像的配准程度,因此,图像的配准是拼接算法的核心和关键。根据图像匹配方法的不同,一般可以将图像拼接算法分为以下2个类型:1.基于区域相关的拼接算法;2.基于特征相关的拼接算法。

基于区域相关的拼接算法是最为传统和最普遍的算法,从待拼接图像的灰度值出发,对待配准图像中一块区域与参考图像中的相同尺寸的区域使用最小二乘法或者其它数学方法计算其灰度值的差异,对此差异比较后判断待拼接图像重叠区域的相似程度,由此得到待拼接图像重叠区域的范围和位置,从而实现图像拼接。也可以通过变换将图像由时域变换到频域,然后再进行配准。

基于特征的配准方法不是直接利用图像的像素值,而是通过像素导出图像的特征,然后以图像特征为标准,对图像重叠部分的对应特征区域进行搜索匹配,该类拼接算法有比较高的健壮性和鲁棒性。特征匹配的算法有交叉相关、距离变换、动态编程、结构匹配、链码相关等算法。

### 2.2 TDI-CCD 拼接配准

根据 TDI-CCD 拼接后位置固定的实际情况,可以采用如下方法进行图像位置配准:奇数片的 TDI-CCD 比偶数片的 TDI-CCD 在图像输出时快  $M$  行,这在 TDI-CCD 拼接配准时是固定的,换言之,偶数的 TDI-CCD 拼接片在输出第 1 行时,奇数的 TDI-CCD 拼接片已经开始输出第  $M+1$  行,这在 TDI-CCD 交错拼接完成后就已经是固定的。解决 TDI-CCD 拼接配准就按下述方法进行:把奇片前  $M$  行的像元信息存储在 1 个 RAM 中,在偶片输出第 1 行时,把 RAM 中所存储的 TDI-CCD 上奇片上的第 1 行数据与偶片第 1 行同时输出,这就可以得到

准确拼接配准的图片。在以后的成像过程中,就可以得到实时拼接配准的图片。这就需要在每个奇片 TDI-CCD 的电路中加入 1 个大容量的 RAM,这在硬件设计中会详细介绍。

## 3 融合算法设计

### 3.1 现有融合算法分析

图像融合是采用某种算法对 2 幅或多幅不同的源图像进行综合处理,最终形成 1 幅新的图像。根据融合处理所处的阶段不同,图像的融合处理通常可以在 3 个不同层次上进行像素级图像融合、特征级图像融合以及决策级图像融合<sup>[4]</sup>。像素级图像融合是在严格配准的条件下,对各传感器输出的图像信号直接进行信息的综合与分析。像素级图像融合是目前在实际中应用最广泛的图像融合方式,也是特征级图像融合和决策级图像融合的基础。本论文进行了像素级图像融合算法的研究。根据近年来国内外在图像融合领域的新研究成果,图像融合算法大致分为 4 类:基于彩色空间的算法(如 HIS 变换、伪彩色图像融合等)、基于数学统计学的算法(如加权、比值变换、乘积变换、高通滤波 HPF 的图像融合等)、基于多分辨率分析的算法(如金字塔算法、小波变换等)、智能图像融合方法(如基于神经网络、模糊理论的融合等)<sup>[5]</sup>。对融合算法的要求一般为能够最大限度地保留源图像中的重要信息,尽可能少地引入虚假信息,同时,算法必须具有可靠性、稳健性,能最大限度地抑制噪声或未精确配准带来的干扰。

综合各种常用算法的实际应用效果: HIS 变换容易扭曲原始的光谱特性,产生光谱退化现象;主成分替换法要求被替换和替换的数据之间有较强的相关性,通常情况下,这种条件并不成立; HPF 在对高分辨率波段影像滤波时滤掉了大部分的纹理信息;智能图像融合方法实现较为复杂,实际应用受到诸多限制;加权融合与比值融合算法简单,运算速度快,常应用于实时处理中。

### 3.2 比值平均校正算法

TDI-CCD 拼接图片输出数据非常大,而实时性处理又对时间的要求非常高,因此,必须找到一个高效算法来解决这一对矛盾。本文采用比值平均法解决这一问题:在定时时采用相同的光照条件下,设待校正灰度源图像为 image1 和 image2,设  $T_{ij}$  表示图像 1 上第  $i$  行、第  $j$  列像素的灰度值,  $N_{ij}$  表示图像 2 上第  $i$  行、第  $j$  列像素的灰度值,假设每片拼接的 TDI-CCD 输出的列数都是  $H$ ,则选取  $T_{i,H-1}$ 、 $T_{i,H}$ 、 $N_{i,1}$ 、 $N_{i,2}$  几个 2 片对接片关键像素点(如果每片只选 1 个点,存在像元是坏点的风险;而相邻的几个点描述的内容基本相似,太多的点会增加运算量,所以选取对接 2 片中的每片各 2 点可以较好地完成此算法),做如下运算得到综合比值  $M$ ,公式为:

$$M_i = (N_{i,1} + N_{i,2}) / (T_{i,H-1} + T_{i,H}) \quad (1)$$

取等间隔的  $x$  个  $M$ ,例如  $M_i, M_{i+10}, M_{i+20}, M_{i+30}, \dots$  取它们的平均值  $G$ ,

$$G = (M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_x) / x \quad (2)$$

这里的  $G$  就是两个相邻拼接片的校正系数。设  $G_i$  为第  $i+1$  片拼接片对第  $i$  片的灰度校正系数,则第  $i$  片灰度校正系数为  $P = G_1 G_2 G_3 \dots G_x$ ,这就得到整个拼接视场的各个拼接片的校正系数,第 1 片原样输出,第 2 片为  $P_2 = G_1$ ,第 3 片为  $P_3 = G_1 G_2$ ,第  $n$  片为  $P = G_1 G_2 G_3 \dots G_{i-1}$ 。则校正系数计算公式为:

$$P_n = P_{n-1} G_{i-1} \quad (3)$$

把得到的校正系数与 A/D 转换后的像元灰度相乘后作为输出信息输出,从而实现灰度的校正。

## 4 TDI-CCD 匹配与融合算法的硬件实现

对于线阵 TDI-CCD 拼接大视场图像校正实时系统,由于其像元数量大,扫描时间短,数据量大,因而对后续的处理系统提出了很高的要求。因此,如果采用软件实现的方法对线阵 TDI-CCD 进行逐点校正,虽然可以达到很高的准确度,但是实时处理需要开辟大量的缓存空间,采用多线程的方法进行校正处理和

图像处理的协调,增加了后续处理载荷。为此,应该采用硬件处理以满足校正算法实现的需要。该算法易于用硬件实时实现,我们设计的多 TDI-CCD 拼接大视场图像校正实时实现处理器采用 FPGA 的架构。FPGA 突破了以往逻辑资源与性能的限制,它最大的特点是结构灵活,有较强的通用性,适合模块化设计,从而能够提高算法效率,同时其开发周期较短,系统易于维护和扩展,适合实时信号处理。由于校正算法非常简单,因此采用 FPGA 来实现具有如下优点:1.可编程的特点可以适应各个 TDI-CCD 器件的校正参数灵活改变;2.丰富的逻辑资源可以满足校正算法及控制逻辑电路的实现<sup>[6]</sup>。

在硬件设计中,所有芯片的时序控制信号均由 FPGA 提供,FPGA 带有全数字化的延时锁相环,可以对时钟分频和倍频。TDI-CCD 读出信号经相应的处理电路,由 A/D 转换器转换成数字信号,奇数的 TDI-CCD 存入固定的行数到动态场存储 RAM 中,然后把相对应的行与偶数的 TDI-CCD 对应行同时输出到视频处理电路中,得到拼接后图像。对于校正系数的处理,把每片的同行的 1 与 2、2 047 与 2 048 分别存储起来,然后按算法公式(1)(2)(3)送入 FPGA 进行计算,计算得到的校正系数与相应输出像元相乘后输出,实现灰度校正。拼接校正算法硬件结构框图如图 3 所示。因为是实时处理系统,在设计电路时主要考虑的是速度与功耗问题,所以我们在选取芯片时尽量采用高速度、低功耗的芯片。

多 TDI-CCD 拼接大视场图像校正算法的实现采用 Xilinx 公司的 Spartan3 系列的 FPGA,此系列 I/O 管脚资源较多,内含 8 个独立嵌入式  $18 \times 18$  乘法器以及较多的数字时钟管理资源。在此硬件系统设计中,因为需要大容量的数据存储,针对 FPGA 中内部 Block RAM 有限的缺点,提出了将 FPGA 与外部 SRAM 相结合来改进设计。外部 RAM 选用 IS-SI-IS61LV25616AL,IS61LV25616AL 是 Integrated Silicon Solution 公司 (ISSI) 的一款容量为  $256 \text{ K} \times 16$  的且引脚功能完全兼容的 4 Mb 的异步 SRAM,可为



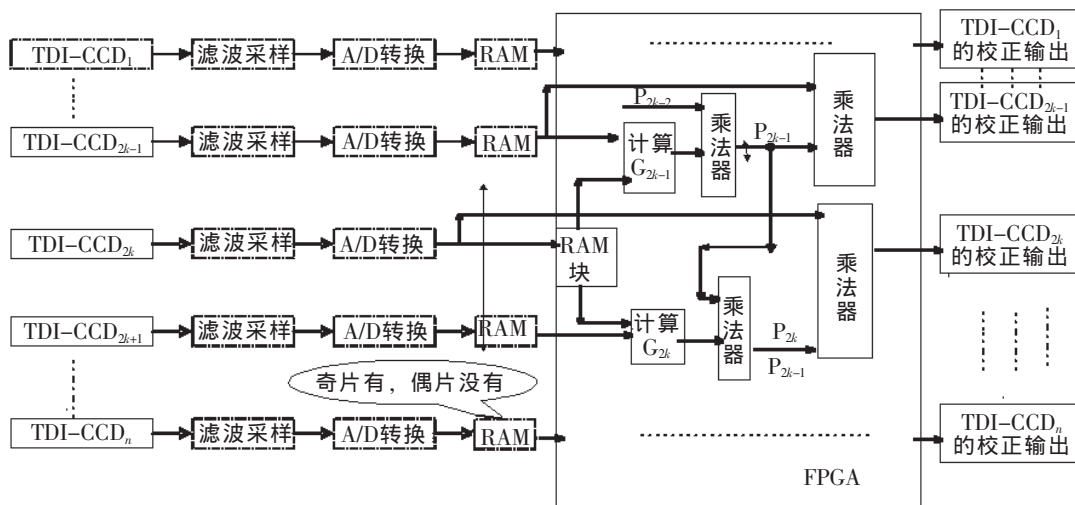


图3 拼接校正算法硬件结构框图

Xilinx 公司的 Spartan3 系列 FPGA 提供高性能的外围存储, 该器件由高性能 CMOS 技术制造而成, 具有高性能和低功耗的特性, 可满足系统设计要求。在整个系统中, 每个奇片加 1 片 S61LV25616AL, 即 S61LV25616AL 存储奇片输出的前 96 行数据, 当偶片输出第 1 行的同时输出 S61LV25616AL 中的相应奇片的第 1 行信息, 以此解决图像配准问题。按照公式 (1) (2) (3) 的算法设计, 在 FPGA 中实现实时校正算法只涉及 3 部分的运算: 加法运算、

除法运算与乘法运算。另外, 采用流水线的设计方案来增加处理能力。

## 5 实验结果与结论

本文设计的系统应用到 3 片 TDI-CCD 拼接系统中, 得到了良好的处理效果。图 4 (a) 为直接拼接得到的图像, 图 4 (b) 为拼接对准图, 图 4 (c) 为按比值平均法处理后得到的图像, 处理后图像中的灰度非均匀性得以改善。



(a) 原始3片TDI-CCD输出图



(b) 拼接对准图



(c) 比值平均法灰度校正图

图4 比值加权平均法实现

本文提出了一种利用 FPGA 的多 TDI-CCD 拼接大视场图像校正实时处理系统, 图像拼接对准及校正系数计算通过 RAM 与 FPGA 实现, 数据的带宽达 8 M。该系统特别适用于多 TDI-CCD 拼接大视场

图像实时信号处理。实验结果表明, 该系统能够很好地对准拼接图像及对拼接片间灰度的非均匀性进行校正。(No.4)

## 参考文献

- [1]刘亚侠,阮锦,郝志航. 线阵 TD I CCD 遥感相机非均匀性校正的研究[J]. 光学技术, 2003, 29 (6) : 749-751.
- [2]程万胜,赵杰等. CCD 像素响应非均匀的校正方法 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 314-318.
- [3]卢蓉,高昆,倪国强,等. 图像融合系统中多分辨实时处理策略的研究 [J]. 激光与红外, 2006, 36(11):1075 - 1078.
- [4]陈迎娟,张之江,张智强. CCD 像素响应不均匀性的校正方法 [J]. 光学 精密工程, 2004, 12(2) : 216-220.
- [5]郑瑞红,陈钱. 基于场景的红外图像非均匀校正算法的研究 [J]. 光电子技术, 2003, 23(4): 241-244.
- [6]徐树兴,王宝光,郑义忠. 线阵 CCD 平场校正及 FPGA 实现的研究 [J]. 宇航计测技术, 2007, 27(6): 34-37.

## 变更启事

因长春光机所门牌号变更, 因此《光机电信息》编辑部的通讯地址从2009年1月1日起也将随之变更为:

长春市东南湖大路3888号

特此通知!

《光机电信息》编辑部

2008年12月20日