

文章编号 1004-924X(2014)02-0508-09

星上时间延迟积分 CCD 拼接相机图像的实时处理

宁永慧^{1,2*}, 郭永飞¹

(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. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:提出一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的时间延迟积分(TDI)CCD 图像实时处理方法以提高拼接成像系统输出图像的质量和视觉效果。首先,对 TDICCD 成像系统进行像元级非均匀性校正,去除像元响应差异、固定图形噪声和暗电流噪声;对图像进行了基于行极值的自适应中值滤波,去除了图像中的随机噪声和脉冲噪声。然后,对噪声处理后的图像进行图像增强,通过提取图像的低频和高频成分,实现图像细节信息的调整和对比度增强。最后,采用基于行的分段线性拉伸方式,提高图像的动态范围。设计了基于 FPGA 的 TDICCD 成像系统的图像实时校正处理结构,分析了算法占用的资源、算法计算误差和可靠性等指标。实验结果表明,提出的图像实时处理结构将图像输出信噪比均值由 48 db 提高到 52 db,图像非均匀性由 3.41%降低到 1.73%,图像的对比度显著增强,其动态范围提高了 6%。

关键词:时间延迟积分(TDI) CCD; CCD 相机; 实时处理; 图像增强; 自适应中值滤波

中图分类号:V447.3; TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142202.0508

Real-time image processing in TDICCD space mosaic camera

NING Yong-hui^{1,2*}, GUO Yong-fei¹

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

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

** Corresponding author, E-mail: way007@163.com*

Abstract: A real-time image processing method based on a Field Programming Gate Array(FPGA) was proposed for Time Delay Integral(TDI)CCD space mosaic camera to improve its imaging quality and visual effect. Firstly, the TDICCD imaging system was corrected in a non-uniformity mode by a pixel level, by which the fixed-pattern noise and dark current noise were eliminated. Then, an adaptive median filter based on the inline max-min values was proposed to eliminate the random noise and pulse noise. Furthermore, an image after denoising was enhanced in the TDICCD image. By extracting the low-frequency part and the high frequency part of the image, the detail adjustment and contrast enhancement of the image were implemented. Finally, a linear stretching method based on image line data divided was proposed to improve the dynamic range of the real-time imaging system. Moreover, a real-time image processing method for the TDICCD space mosaic camera based on FPGA was de-

收稿日期:2013-11-27; 修订日期:2013-12-28.

基金项目:中科院国防创新基金资助项目

signed, and the synthesized resources, algorithm errors and reliability in the FPGA were analyzed. The experimental results indicate that the average SNR of the imaging system has been improved from 48 db to 52 db, and the non-uniformity decreased from 3.41% to 1.73% within a TDICCD. The image contrast is enhanced greatly and the dynamic range is prompted by 6% in the self define criterion.

Key words: Time Delay Integration (TDI) CCD; CCD camera; real-time processing; image enhancement; self-adaptive median filter

1 引言

星上时间延迟积分 CCD (Time Delay Integration, TDICCD) 拼接成像系统促进了空间遥感向宽视场、高分辨的方向发展, TDICCD 拼接系统成像的问题也变得复杂多样。首先, 在不同的成像增益和偏置参数下, 基于像元校正方法^[1-4]去除拼接图像的固定图形噪声和暗电流噪声的校正参数不同; 第二, 图像中的脉冲噪声的比例增加; 第三, 由于系统工作频率的提高和 AD 转换精度的提高, 系统的热噪声、随机噪声均对图像产生影响。因此, 需要在图像处理过程中增加滤波^[5-9]操作。基于中值的自适应滤波器由于不改变图像的原有灰度, 对图像的模糊效应较小, 而被广泛采用。中值滤波能够很好地抑制图像中的脉冲噪声、随机噪声、单粒子噪声, 从而提高图像的信噪比。

TDICCD 拼接图像的大视场光照条件不均匀, 会导致图像的局部对比度较低, 图像中低灰度区域细节信息不明显; 图像的动态范围下降, 图像的视觉效果变差^[10-12]。因此, 这类图像的校正、增强和去噪极受关注。文献[1-4]对图像的非均匀性校正进行了讨论, 但是缺少对校正参数自适应调整的方案设计; 文献[5-9]实现了图像的中值滤波处理, 但根据噪声强度选择滤波窗口的设计不适合实时 TDICCD 成像系统图像处理, 同时, 这些方法处理的像素过多, 削弱了图像的细节信息; 文献[10-12]提出分段调整以及直方图加权的图像增强方式, 实现了图像的自适应增强, 但是基于图像的直方图统计方法计算复杂, 而局部直方图处理又会产生明显的块效应, 不适合 TDICCD 成像实时处理系统。

星上 TDICCD 拼接成像系统图像实时处理方法需要综合考虑资源、速度、可靠性等因素。因此, 一些复杂方法, 如频域自适应滤波、小波去噪、

基于统计特性和图像梯度的图像增强算法等均不适用。本文从工程实践的角度, 通过研究图像处理在空间域的相关实现方法, 在充分考虑算法的自适应性和可靠性的前提下, 实现了基于图像非均匀性校正、图像增强和图像去噪的星上 TDICCD 图像实时预处理功能。在工程中完成了 FPGA 算法的实现和实验室验证。

2 TDICCD 拼接图像实时预处理算法

TDICCD 空间拼接成像系统结构框图如图 1 所示。该系统采用 5 片具有 6 144 pixels 的 TDICCD 完成系统拼接, 每片 TDICCD 采用一片 FPGA 进行数据处理。图 1 中, 标号(1)表示宽幅成像条件下, 光照差异导致的图像局部对比度降低; 标号(2)表示 TDICCD 片间、通道间、像元间由于电路参数、TDICCD 特性、像元响应等不同所产生的像元非均匀性; 标号(3)表示放大电路噪声、热噪声和空间环境噪声造成的图像降质; 标号(4)表示 FPGA 内部图像实时处理的误差。下文将就这些问题逐项讨论。

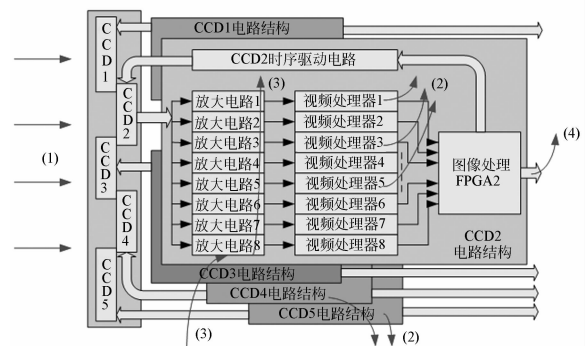


图 1 TDICCD 拼接相机结构框图

Fig. 1 Block diagram of TDICCD butting camera

2.1 图像非均匀性校正

图像非均匀性 (Photo Response Non-Uni-

formity, PRNU), 定义为 TDICCD 像元在 50% 饱和曝光量下的输出信号的均方差与均值之比, 如式(1)所示:

$$PRNU = \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \right] / \bar{X} \times 100\%, \quad (1)$$

其中: X_i 是第 i 个像元的输出码值; \bar{X} 表示图像像元的平均值; N 表示总像元个数。

成像非均匀性校正正在工程中主要采用基于辐射标定的方法。它通过标定片间和通道间视频处理器的增益和偏置参数, 以及像元响应的不一致性参数实现校正。TDICCD 像元校正采用线性模型完成。

TDICCD 通道内的像元校正方法如下: 首先, 获得同一照度下的像元响应值 a_i (i 表示第 i 个像元, j 表示第 j 次响应值)。取 100 组图像做平均处理 ($j \in [1, 100]$), 得到该照度下的像元响应均值 (\bar{a}_i, s_i); 获取 10 组不同照度下的像元响应均值 (\bar{a}_i, s_i) ($i \in [1, 10]$); 采用最小二乘法进行像元响应线性拟合:

$$a = m \times s + n,$$

其中: a 表示像元响应值; s 表示焦面照度; m 表示曲线斜率; n 表示曲线截距。像元响应曲线通过式(2)得出:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{10} \bar{a}_i \\ \sum_{i=1}^{10} (s_i, \bar{a}_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & \sum_{i=1}^{10} s_i \\ \sum_{i=1}^{10} s_i & \sum_{i=1}^{10} s_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \\ m \end{bmatrix}. \quad (2)$$

获得像元响应曲线 a_i 后, 设定标准的像元校正曲线 \bar{y} 。通过线性校正, 获取像元校正参数 (k_i, b_i) , 校正公式如式(3)所示:

$$\bar{y} = k_i a_i + b_i. \quad (3)$$

由于暗电流噪声的影响, 像元响应曲线不经过原点。因此, 当调节视频处理器的增益和偏置参数时, 需要修正像元校正参数。本文设计了基于线性模型的像元校正参数修正方法, 如式(4):

$$\begin{cases} k'_2 = k' \\ b'_2 = C_0 b'_1 + C_1 (k'_1 - 1) \\ C_0 = k_2 \\ C_1 = k_2 b_1 - k_1 b_2 \end{cases}, \quad (4)$$

其中: (k'_1, b'_1) 、 (k'_2, b'_2) 分别为修正前后的像元

校正参数; (k_1, b_1) 、 (k_2, b_2) 为修正前后的视频处理器增益偏置参数。

2.2 中值滤波算法

像元级图像校正虽然能有效去除图像的固定图形噪声和暗电流噪声, 但对脉冲随机噪声的抑制效果不明显。针对上述问题本文设计了基于行图像特征统计的自适应中值滤波算法, 用以去除图像中的随机噪声和脉冲噪声。为了降低中值滤波对图像的模糊效果, 本文采用 3×3 模板实现滤波。

基于行图像特征统计的自适应中值滤波算法如下: (1) 选择当前行图像像素灰度 $f(i, j)$ 的最大值 $\text{Max}(i, j)$ 和最小值 $\text{Min}(i, j)$; (2) 计算当前行图像像素“等效最大值”和“等效最小值”的像素个数, 记为 N_{\max} 和 N_{\min} 。“等效最大值”定义为当前行最大的 5 个灰度值; “等效最小值”定义为当前行最小的 5 个灰度值。数字“5”是根据噪声水平设定的。(3) 当 $N_{\min} + N_{\max} > Th$ 时, 判定当前行含有脉冲噪声点, 需进行滤波处理。其中: Th 表示判断阈值, 本文将 Th 设定为当前行像素个数的 0.3%。

当前行执行滤波时, 首先判断当前像素灰度是否在“等效最值”范围内, 若不在, 则保持当前值, 反之, 则采用邻域赋值的方法进行赋值操作。

根据相邻像素的相关性原理, 将四邻域内的一个非极值点赋给当前噪声点。这种方法可以最大程度地保持图像灰度的连续性, 在 FPGA 内部实现较为简单。当选择横向像素赋值时, 水平方向会有轻微的模糊效果。

该算法充分考虑了 TDICCD 图像数据以行为顺序进入 FPGA 进行实时处理的特点。同时, 对低密度的脉冲噪声和随机噪声具有很好的抑制作用。同时, 由于不需要对大量图像数据进行滤波操作, 因此保证了图像细节, 降低了图像的失真度。也避免了中值滤波和自适应中值滤波对图像的模糊现象。

2.3 图像实时锐化处理

图像锐化主要是基于同态滤波器的原理进行设计的。当一幅图像从物理过程产生时, 它的灰度值可由两部分组成: (1) 入射到观察场景的光源总量; (2) 场景中物体反射光的总量。本文分别称为照度分量 $L(x, y)$ 和反射分量 $r(x, y)$, 如式(5)所示:

$$\begin{cases} I(x,y)=L(x,y)r(x,y) \\ 0 < L(x,y) < \infty \\ 0 < r(x,y) < 1 \end{cases}, \quad (5)$$

其中:反射分量取决于成像物体的特性;照度分量取决于照射源。反射分量往往会引起突变,主要出现在不同物体的连接部分;而照度分量通常是空间域的慢变化,代表了图像中的均值和背景。通过控制照射分量和反射分量,减少低频(照度)的贡献,增加高频(反射)的贡献,达到图像增强的目的。工程实践中,通过二阶拉普拉斯算子获得图像的高频分量;通过 3×3 的均值滤波可以获得图像的照度分量;将二者进行线性组合,即可获得锐化增强的实时图像。

当图像中噪声水平较高时,采用均值滤波处理图像获得图像低频分量;否则,采用原始图像。基于上述策略,本文采用权值调整的均值滤波方法,通过程序控制中心像素的比重,自适应调整模糊度。滤波模板如图 2 所示。滤波模板系数设置主要是便于 FPGA 内部实现“移位/加”操作,并保证算法对噪声有一定的抑制作用。

$$\frac{1}{8+2^N} \times \begin{matrix} \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2^N & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

图 2 加强中心权值的均值滤波模板

Fig. 2 Mean filter template of enhanced central weighed median filter

基于二阶拉普拉斯算子的图像锐化模型的时域滤波表达式如式(6)所示:

$$\begin{aligned} \nabla^2 f(x,y) &= \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2} = \\ & f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + \\ & f(x,y-1) - 4f(x,y), \end{aligned} \quad (6)$$

模板如图 3(a)所示。考虑到图像对角线方向上的细节信息分量对图像高频分量的影响较大,采用扩展的 8 邻域模型,如图 3(b)所示。

为了提高图像的动态范围,并控制图像突变成成分在融合后图像中所占的比例。本文设计了式(7)的图像处理方法。该方法在图像预处理的基

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

1	1	1
1	-8	1
1	1	1

(a)4 邻域 Laplace 模板 (b)8 邻域 Laplace 模板
(a)Laplace model with 4-neighbourhood (b)Laplace model with 8-neighbourhood

图 3 基于 4/8 邻域的二阶 Laplace 算子模板

Fig. 3 Template of second-order Laplace operator based on 4/8 neighbourhood

础上进行融合处理,从而有效提高了图像的局部对比度。

$$f'(x,y) = A\bar{f}(x,y) \pm B \times \min(\nabla^2 f(x,y), Th). \quad (7)$$

本文设计的图像增强算法经过实验室评定,取 $A=0.95, B=0.75$ 。同时,对 $\nabla^2 f(x,y)$ 中的数值进行阈值处理,防止出现由图像锐化导致的图像灰度越界和视觉失真。通过对 $\nabla^2 f(x,y)$ 进行阈值限制,保证图像的整体动态范围不变。阈值 Th 的选择方法如式(8)所示, $[]$ 表示取整操作。

$$Th = \left\lceil \frac{(1-A) \times 2^N}{B} \right\rceil = \left\lceil \frac{0.05 \times 1024}{0.75} \right\rceil = \lceil 68.2 \rceil = 68. \quad (8)$$

2.4 图像拉伸

图像拉伸主要是为了扩展图像的动态范围。由于 FPGA 实时图像拉伸处理是基于单一行图像的,因此,本文设计了分段线性拉伸方法:在低灰度和高灰度区域向两侧微调,在中灰度区域保持。拉伸模型为线性模型,如式(9)所示。这种方法避免了像素合并,易于实现星上系统的实时图像处理。

为了保证相邻行图像之间的相关性,设定了每行图像允许拉伸的灰度宽度阈值。

本文设定图像的灰度等级划分采用平均分配的策略,即满足 $B=2A=2\max(i,j)/3$,其中: $a \leq 1, c \geq 1$ 。

$$s = \begin{cases} ax+k_1 & 0 < x < A \\ (x-A) + aA+k_1 & A \leq x < B \\ c(x-B) + aA+k_1 + (B-A) & B \leq \text{Max}(i,j) \end{cases}. \quad (9)$$

3 算法在 FPGA 平台上的实现

由于 FPGA 内部集成了大容量 RAM, 因此具有优秀的并行逻辑计算能力, 以及高速的流水线设计结构等特点。故本文采用了基于 FPGA 的 TDICCD 图像实时处理的设计方式, 完成了

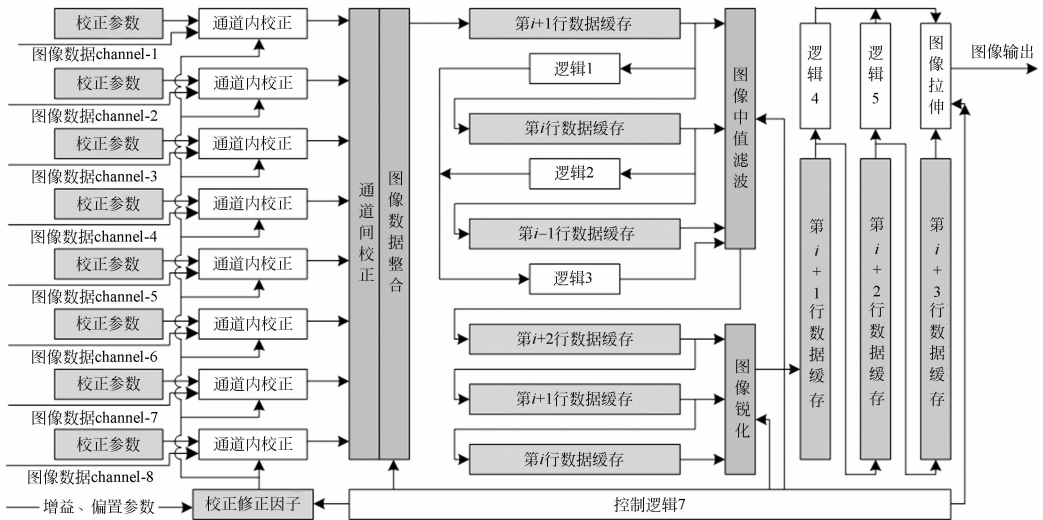


图 4 TDICCD 图像 FPGA 实时处理结构

Fig. 4 Real-time processing method of TDICCD based on FPGA

TDICCD 图像像元级校正参数初始化在 FPGA 内部 RAM 中实现。当图像进行像元校正时, 从 FPGA 内部 RAM 中读取当前像元的校正参数 (k_i, b_i)。

当 TDICCD 相机的增益、偏置参数发生变化时, 需要对像元校正参数进行修正。修正参数通过标定和计算, 在 RAM 中初始化。

TDICCD 图像预处理需要缓存图像, 提取图像行特征并进行运算。FPGA 采用双端口 Block-RAM 实现, 读写同时进行。

图像实时锐化模块中, 主要利用模板函数完成图像数据的计算。乘法操作采用数据移位的方式, 在图像邻域计算中, 采用交替迭代的方式, 即上一次的运算结果经过修正后得到下一次的运算结果, 这样, 可以减少运算时间和资源。各逻辑块的功能参见表 1。

在图像拉伸模块中, 由于限制了图像拉伸的幅度, 所以该方法对整体图像的对比度和动态范围影响不大。当图像整体效果偏暗或偏亮时, 不能显著提高系统的动态范围。该方法主要对图像对比度

TDICCD 的图像实时预处理功能。

3.1 算法结构流程

在星上 TDICCD 拼接系统中, 每片 TDICCD 图像数据均采用 8 路 10 bits 并行数据输入方式。每片 TDICCD 采用一片 FPGA 进行数据处理。图像实时处理的结构如图 4 所示。

实现微调, 优点是会造成像素灰度值合并, 可以更好地保持图像的细节信息, 同时, 由于扩展的灰度空间有限, 不会丢失行图像间的相关性。

表 1 逻辑模块功能一览表

Tab. 1 Functions of logic modules

逻辑块	模块功能
逻辑 1	提取当前行图像灰度的最大值和最小值;
逻辑 2	计算当前行“等效最大值”和“等效最小值”的数目;
逻辑 3	当 $N_{\min} + N_{\max} > Th$ 时, 给出当前行滤波标志信号, 信号长度为当前行数据输出时间长度;
逻辑 4	计算当前行图像灰度区间, 分成 3 段灰度区域; (拉伸前进行滤波处理, 抑制极值点影响)
逻辑 5	统计每段灰度空间的最大值和最小值;
逻辑 6	当像素灰度空间不足时, 采用“低灰度区段向下延展 5 个灰度、高灰度阶向上延展 5 个灰度”的策略; 否则保持;
逻辑 7	实现对各个模块的控制操作, 使系统的实际运行情况有确切的保障;

在工程实践中采用离散化分段相加的方式实现图像实时线性拉伸。具体方法如下,若当前分段允许被拉伸,则将当前灰度范围等分为 5 个区段(像元数右移 2 bits 为区段宽度),灰度级最低的区段调整 5 个灰度,以此类推。实验证明,当拉伸灰度空间变大后,TDICCD 行图像之间的相关性会被破坏,产生背景区域的行块效应。

3.2 算法占用 FPGA 资源情况分析

FPGA 内部资源是算法实现的最大保证。本文所述的 TDICCD 图像实时处理算法在型号为 XC2V6000 的 virtex2 系列 FPGA 中实现,内部的模块资源利用情况如表 2 所示(图像数据按每行 6 144 pixels 的 10 bits 量化;校正参数按 6 144 pixels 的 16 bits 量化;调整参数以 64 档×8 通道 16 bits 量化)。

在图像锐化和图像拉伸计算中,均采用了像素移位的方式,这就避免使用乘法器。从图像实时预处理算法的资源利用情况可以看出,该算法增加了 FPGA 内部 RAM 的使用资源,而对于大规模 FPGA 而言,这是能够实现的。算法最终的资源利用率如下:RAM:61/144(Block RAM);Slice:668/33 792;FF:1 350/67 584;全局时钟:2/16。

表 2 实时校正模块的 ISE 综合结果

Tab.2 ISE synthesis results of real-time correction module

模块	图像校正	图像中值滤波	图像锐化	图像拉伸
资源				
存储数据量/kbits	96+8	180	180	180
乘法器	11	0	0	0
Slice/个	232	35	126	147
18Kbits 块	7	18	18	18
RAM/个				

3.3 算法可靠性评估与误差分析

TDICCD 图像实时校正算法的各个环节可通过“逻辑 7”发送停止指令进行控制。

在像元校正中,像元校正参数设定为 0.99~1。标定错误的情况下,对图像灰度的最大影响深度为 10 个灰度级。

图像滤波仅对“等效最值”进行自适应滤波,就是当每行的“等效最值”数量低于阈值时,则进行修正。这样虽然会影响该部分图像的真实值,

但这种选择式滤波仍然可以保证相邻行图像信息的相关性,因此降低了对图像的影响。

图像锐化增强中,均值图像可以最大程度地保护邻域中心点灰度。锐化图像尽可能在提升细节和对比度的同时,降低其在输出图像中的比重,从而更好地保护了图像内容。

图像实时处理的误差分析都是基于理想图像进行的,而实际工程中,系统量化精度、噪声水平、光照条件等的限制,无法得到理想图像。由于对 TDICCD 进行实时图像处理是为了改善图像的视觉效果,故不能用原始图像码值的改变量来衡量算法误差。从实现过程角度分析,将基于辐射定标的像元校正误差限制在 3 个码值以内,图像锐化和图像拉伸的误差是以改变图像对比度和动态范围为基础的,主要依靠主观评价。

4 实验室成像效果与结果分析

该算法在星上 TDICCD 拼接成像系统原理样机中(实验室环境下)进行了实验验证。

图 5 显示了实验室环境下进行像元校正前后的单一模块的整体灰度对比(以验证均匀性提高水平)。图 5(a)中,三段灰度区域分别代表 3 片

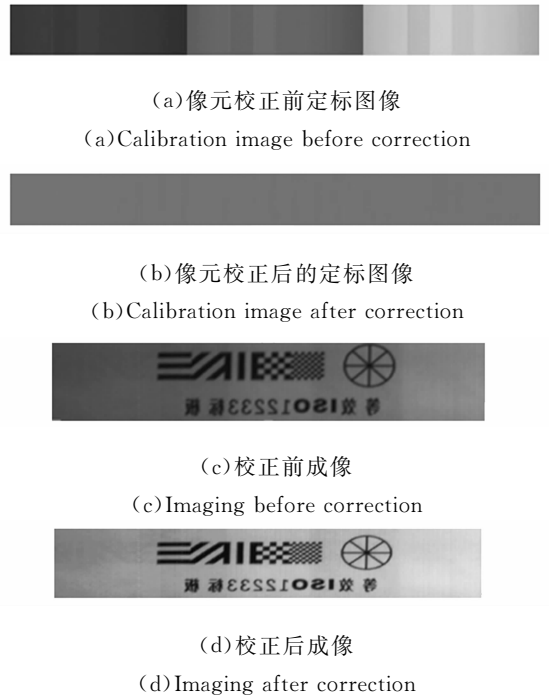


图 5 TDICCD 像元级非均匀性校正实例
Fig.5 Examples of pixel-level non-uniformity correction for TDICCD

TDICCD, 它们间的灰度差异通过调节视频处理器偏置获得。图 5(b) 是像元校正后的图像灰度图; 图 5(c) 和图 5(d) 为实际像元校正前后效果图。在图像的各个区段, 像元均匀性良好, 各通道间像元调整功能正常。

图 6 表示了图像中值滤波对系统脉冲噪声的滤波效果。由图 6 可以看出, 图像的脉冲噪声和图像斑点得到很好的滤除。



(a) 干扰后图像

(a) Image with pulse noise



(b) 滤波后图像

(b) Image after filtering

图 6 实时自适应滤波

Fig. 6 Real-time adaptive filtering



(a) 处理前图像

(a) Image before processing



(b) 处理后图像

Image after processing

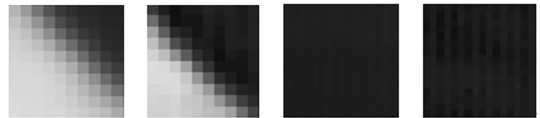
(c) 处理前图 (d) 处理后图 (e) 处理前图 (f) 处理后图
像边缘 像边缘 像背景 像背景(c) Image edge (d) Image edge (e) Image back- (f) Image back-
details details round round
before after details details
processing processing before after
processing processing

图 7 图像锐化的特征和细节

Fig. 7 Characteristics and details of image sharpening

图 7 表示了 TDICCD 实时图像锐化对图像对比度提升和细节的描述能力。图 7(a) 为原始图像, 图 7(b) 为锐化图像, 图 7(c), 图 7(e) 表示原始图像边缘和平坦区特征, 图 7(d), 图 7(f) 表示锐化后图像边缘和平坦区特征。由图 7 可以看出, 图像的边缘模糊像元数量和宽度明显减少, 图像平坦区像元对比度也有所提高。因此, 这种方式可以有效提高系统的调制传递函数 (MTF)。在保证图像细节信息的同时, 基于图像锐化的处理方法会使噪声增强, 因此, 在实际系统中, 要保证良好的信噪比。

通过计算 TDICCD 实时图像预处理前后的系统成像性能指标来定量评价图像的实时处理性能。对于非均匀性指标, 通过使用均匀光照射下的图像灰度均值代表图像实际灰度来计算灰度图像的信噪比, 如式 (10) 所示。动态范围如式 (11) 所示。其中: SNR 是通过均匀光图像进行多次测量获得的。\$\bar{f}(i, j)\$ 表示图像的均值; \$g(i, j)\$ 表示图像的实际值; \$M\$ 表示图像行数; \$N\$ 表示图像列数。动态范围是在实际成像中获得的, 其中: \$n'_{imax}\$ 表示校正后第 \$i\$ 行的最大灰度; \$n'_{imin}\$ 表示校正后第 \$i\$ 行的最小灰度, \$n_{imax}\$ 表示校正前第 \$i\$ 行的最大灰度, \$n_{imin}\$ 表示校正前第 \$i\$ 行的最小灰度。

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N \bar{f}(i, j)^2}{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [g(i, j) - \bar{f}(i, j)]^2}, \quad (10)$$

$$R_{DR} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{n'_{imax} - n'_{imin}}{n_{imax} - n_{imin}}. \quad (11)$$

表 3 列出了 TDICCD 图像实时处理前后的

表 3 图像实时校正前后的系统性能

Tab. 3 System performances of image before and after real-time correction

测试内容	测试项 (均值)		
	非均匀性 (PRNU)	信噪比 (dB) (SNR)	等效动态范围 (DR)
实时处理前	3.41%	48	1.00
实时处理后 (参数未修正)	1.83%	51.6	1.06
实时处理后 (参数修正后)	1.73%	52	

系统性能参数。其中:非均匀性表示通道内的非均匀性对比,包括像元校正参数调整前后的性能对比;信噪比和动态范围取多次测量的平均值。由表3可知,通道内的像元非均匀性由原来的3.41%降低到1.73%;通道间的像元非均匀性由原来的3.85%降低到1.88%。

5 结 论

本文针对 TDICCD 拼接成像系统在实时获取图像过程中存在的成像问题进行了分析讨论;设计了基于 FPGA 的星上自适应图像实时预处理方法。该方法将 TDICCD 的图像非均匀性校正、图像中值滤波、图像锐化增强,以及动态范围调整结合在一起。FPGA 内部的流水线结构和并

行逻辑保证了算法的实时性,而基于“移位/加”的运算逻辑,降低了该方法的运算误差,提高了该方法的可靠性。

原理样机验证表明,该方法能够有效降低图像的噪声水平,提升图像的局部对比度,对边缘有一定的锐化作用,同时提高了图像的动态范围。另外,该方法对 FPGA 资源占用率较低,可靠性和误差均在容许范围内。

定量实验结果表明,星上 TDICCD 成像系统图像实时处理结构将图像在典型环境下的输出信噪比由 48 db 提高到 52 db,图像非均匀性由 3.41%降低到 1.73%,动态范围平均提高了 6%,图像的对比度显著增强。该算法 FPGA 硬件可实现性较好,速度快,效率高,可以很好地满足工程要求。

参考文献:

- [1] 许文海,吴厚德.超高分辨率 CCD 成像系统的设计[J].光学精密工程,2012,20(7):1603-1610.
XU W H, WU H D. Design of ultra-high resolution CCD imaging systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1603-1610. (in Chinese)
- [2] 宁永慧,郭永飞. TDICCD 拼接相机的像元响应非均匀性校正方法[J].中国光学,2013,6(3):386-394.
NING Y H, GUO Y F. Correction of pixel response non-uniformity in TDICCD mosaic camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 386-394. (in Chinese)
- [3] 朱宏殷,郭永飞,司国良.多 TDICCD 拼接相机成像非均匀性实时校正的硬件实现[J].光学精密工程,2011,19(12):3034-3043.
ZHU H Y, GUO Y F, SI G L. Real-time correction of imaging non-uniformity for multi-TDICCD mosaic camera on hardware [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 3034-3043. (in Chinese)
- [4] 宁永慧,郭永飞,马天波.5/3 提升小波的 FPGA 动态 RAM 结构设计及其应用[J].液晶与显示,2013,28(6):927-932.
NING Y H, GUO Y F, MA T B. Architecture design of 5/3 lifting wavelet in FPGA with dynamic RAMs and its application [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(6): 927-

932. (in Chinese)

- [5] 李静,王军政,汪首坤,等.基于经验模式分解的 CCD 器件自适应非均匀性校正方法研究[J].光学学报,2010,30(7):2012-2017.
LI J, WANG J ZH, WANG SH K, *et al.*. CCD non-uniformity adaptive correction method based on empirical mode decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2012-2017. (in Chinese)
- [6] LIU C, SZELISKI R, KANG S B, *et al.*. Automatic estimation and removal of noise from a single image [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(2): 299-314.
- [7] 丁晓华,李由,于起峰. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用[J].光学学报,2008,28(1):99-104.
DING X H, LI Y, YU Q F. CCD noise calibration and its application in edge location [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 99-104. (in Chinese)
- [8] 张旭明,徐滨士,董世运.用于图像处理的自适应中值滤波[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(2):295-299.
ZHANG X M, XU B SH, D SH Y. Adaptive median filtering for image processing [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(2): 295-299. (in chinese)
- [9] 王博.高噪声率红外图像直方图加权滤波算法[J].红外与毫米波学报,2007,26(5):380-385.

- WANG B. Histogram weighted filtering for high-noise-ratio infrared images [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, 26(5): 380-385. (in Chinese)
- [10] 李怀琼, 陈钱, 隋修宝, 等. 基于灰度冗余的红外图像实时均衡技术[J]. *激光与红外*, 2006, 36(5): 409-503.
- LI H Q, CHEN Q, SUI X B, *et al.*. Infrared image real-time equalization algorithm based on ray-level redundancy [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(5): 409-503. (in chinese)
- [11] 黄粉平, 张玲, 郑恩让. 快速自适应滤波的图像增强方法[J]. *西安科技大学学报*, 2008, 28(4): 762-764.
- HUANG F P, ZHANG L, ZHENG E R. A method for image enhancement of fast adaptive filter [J]. *Journal of XI'AN University of Science and Technology*, 2008, 28(4): 762-764. (in Chinese)
- [12] 张懿, 刘旭, 李海峰. 自适应图像直方图均衡算法[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2007, 41(4): 630-634.
- ZHANG Y, LIU X, LI H F. Self-adaptive image histogram equalization algorithm [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2007, 41(4): 630-634. (in Chinese)

作者简介:



宁永慧(1982—),男,吉林东丰人,博士,助理研究员,2009年于中国科学院电子学研究所获得硕士学位,主要从事CCD光电成像技术的研究。E-mail: way007@163.co



郭永飞(1961—),男,山东人,研究员,博士生导师,1990年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电技术应用,CCD在计算机中的应用,嵌入式系统开发等方面的研究。E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)