

文章编号 1004-924X(2013)09-2388-07

行间转移大面阵 CCD 相机的 Smear 噪声实时去除

张 宇*, 张立国, 张星祥

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对面阵 CCD 成像过程中产生的 Smear 特有噪声,以行间转移面阵 CCD 为例,提出了利用行间转移面阵 CCD 暗像元区域提取 Smear 的方法。介绍了行间转移面阵 CCD 的工作原理以及 Smear 产生机理,分析了 Smear 噪声的组成,利用相关双采样,哑像元校正等方法消除了 Smear 中的 KTC 噪声及暗电流噪声。提出了基于中值的快速均值滤波方法,消除了光粒子散粒噪声。最后,利用差分方法将滤波后的 Smear 从原始图像数据中减除,并采用双三次插值对消除 Smear 后的图像区域进行补偿。设计了以现场可编程门阵列+数字信号处理器(FPGA+DSP)为核心处理器件的硬件实时处理系统,当相机工作在最高速工况 3 frame/s 时,系统可在 1.265 ms 内完成 Smear 提取及滤波,消除 Smear 后的图像区域灰度方差减小了 95.34%。经过成像实验验证,该系统集成度高,满足实时需要,彻底消除了 Smear 噪声。

关键词:Smear 噪声;CCD 相机;行间转移面阵 CCD;现场可编程门阵列+数字信号处理器;双三次插值

中图分类号:V447.3;TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132109.2388

Real-time elimination of Smear noise for large interline transfer area CCD camera

ZHANG Yu*, ZHANG Li-guo, ZHANG Xing-xiang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangyu004115@126.com

Abstract: For the peculiar Smear noise occurred in the area CCD imaging, a method to extract the Smear from the interline transfer CCD dark pixel region was proposed by taking an interline transfer area CCD for an example. The working principle of the area CCD was introduced, the creation reason of the Smear was analyzed and the composition of the Smear noise was discussed. Then, the KTC noise and the dark current noise of the Smear were filtered by using the Correction Double Sample (CDS) and the dumb pixel correction. The average filter method based on a middle value was proposed to eliminate the light shot noise. Finally, the Smear was eliminated from a original image by the subtract method, and the Smear image region was compensated by the triangle-based interpolation. A real-time hardware processing system was designed by using Field Programming Gate Array + Digital Signal Processor (FPGA + DSP) as the core processor. When the camera is working at the fastest working mode 3 frame/s, the Smear can be extract and filtered in 1.265 ms and the gradation variance of the image area has decreased to 95.34% by eliminating the Smear. With the imaging experiment

收稿日期:2013-02-28;修订日期:2013-04-01.

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20126016)

verification, the system has a high integration and real-time ability and the Smear noise is eliminated completely.

Key words: Smear; CCD camera; interline transfer area CCD; Field Programming Gate Array+Digital Signal Processor(FPGA+DSP); triangle-based interpolation

1 引言

随着空间对地观测技术的不断发展,大面阵 CCD 被广泛用于空间相机,而行间转移面阵 CCD 由于具有电子快门,因此控制灵活。另外,它还具有帧频高、光电转换效率高等优点,上述优点使其成为目前最为常用的成像器件。Smear 是行间转移面阵 CCD 的固有噪声,在拍摄对象中含有高亮度的点状或面状光源时常会出现 Smear 噪声,其表现为在高亮度光源部分上下方可见线状或带状的白色噪声。

目前,小尺寸行间转移面阵 CCD 在通常工作模式下能够较好地抑制 Smear 现象,但是对于一些高分辨率的大面阵行间转移面阵 CCD,当其工作在高帧频工况时,其感光面中高亮度区域的累积电荷在电荷读出时间内来不及完全转移到 CCD 垂直转移区,即会产生 Smear 现象。另外,一些大面阵行间转移 CCD 器件中,当垂直 CCD 的遮光 Al 薄膜有缺陷时,漏入的光线也会导致 Smear 现象^[1]。Smear 现象严重影响了图像的视觉效果,降低了空间对地观测性能。因此,必须采取有效措施消除 Smear 现象。通常可以通过减少 CCD 的曝光时间来降低高亮度区域的累积电荷,从而减小 Smear 的影响^[2]。但是空间相机的曝光时间是由飞行状态决定的,不能随意更改,否则会由于飞行速度与积分时间不匹配而产生模糊影像^[3]。针对 Smear 现象去除这一问题,孙瑾秋、姚睿等人提出了一种基于小波的 Smear 处理方法^[4-5],通过使用多层二维 Haar 小波分解,把 Smear 亮线分离到低频分量及高频垂直分量中分别进行 Smear 去除,之后重构出去除 Smear 的图像。黄宗福提出了一种基于统计方式的方法^[6],该方法通过对含有 Smear 效应的原始图像的灰度分布进行统计分析,自适应判定 Smear 效应的发生位置,进而将其去除。上述几种处理方法虽然能够较好地去除 Smear 噪声,但均需要对图像数据进行遍历性分析,处理实时性较差,同时遍历

性数据分析需要系统中增加容量很大的图像数据缓存单元,这也增加了系统设计的复杂度。

本文分析了行间转移面阵 CCD 中 Smear 产生的原因,提出了一种基于暗像元区域的快速提取 Smear 并将其去除的方法。同时分析了所提取 Smear 的噪声组成,针对不同噪声采取相应的去除措施;设计了满足实时处理的硬件系统和软件算法,能够在暗像元区域读出结束前提取 Smear 噪声;并完成滤波处理;用差分方法从原始图像中去除了 Smear 噪声,最后利用三次样条插值对去除 Smear 所在图像区域进行补偿,很好地消除了 Smear 的影响。

2 Smear 去除方法

2.1 Smear 噪声分析

Smear 是感光区域因亮度过高而泄露或累积的电荷所产生的一种伪信号。因此,Smear 本身具有 CCD 视频信号所具有的一切信号特征与噪声特性,其中主要噪声成分包括 KTC 噪声、暗电流噪声和光子散粒噪声等。消除 Smear 这种伪信号内包含的噪声是最终在图像中去除 Smear 噪声的必要工作,如果直接去除 Smear 噪声会使处理结果不精确,在图像中表现为退化现象,如一些附加的线状噪声或者带状噪声^[7-8]。

KTC 噪声即 CCD 的复位噪声^[9],它的产生是由于 CCD 的输出结构决定的。复位噪声通常产生于输出检测单元为浮置扩散放大器结构的 CCD 中。在本文中,可利用硬件系统中的相关双采样(CDS)电路消除 KTC 噪声,CDS 主要从 CCD 输出的模拟信号中提取出真正的视频信号。KTC 噪声既附着在 CCD 模拟信号中的参考电平上,也附着在 CCD 模拟信号中的信号电平上,所以采用 CDS 技术可以很好地滤除 KTC 噪声。

暗电流噪声来自水平 CCD 和垂直 CCD 产生的暗电流^[10]。对水平 CCD 两端的少量哑像元输出信号采样,在保证外部环境与积分时间相同的情况下,将 CCD 有效像元采样信号与哑像元采样

信号相减,可以消除暗电流噪声。

对于光子散粒噪声以及在图像产生过程中的一些其他随机噪声,均值滤波和中值滤波是两种非常有效的方法^[11],它们对不同的噪声有不同的去噪能力。中值滤波对脉冲噪声有较好地去噪能力,还能很好地保护边缘轮廓信息;而均值滤波对高斯噪声有较好地降噪作用。但是实际的图像中往往包含多种噪声的干扰,单纯的中值滤波或均值滤波均不能达到最好的去噪效果。因此,本文提出了基于中值的改进型均值滤波算法,既能较好地消除随机噪声对图像的影响,又能较好地保留图像的边缘轮廓信息。

2.2 Smear 去除方法软件设计

基于中值的改进型均值滤波算法思路为:首先以待处理数据为中心,开辟 3×3 的数据区域,对该区域的图像数据提取中值,然后求出该区域内像素灰度值与中值的差值的平方,将差值的平方作为阈值 T 。

3×3 数据区域中的各点权值的计算应满足:

①如果数据区内某点的值与数据区内提取出中值的差的平方 E_i 相差很小,其权值应非常大,反之则权值较小;②如果 E_i 大于阈值 T ,则权值由 E_i 决定,如果 E_i 小于阈值 T ,则权值由 T 决定。③权值应该归一化。

设含有噪声的图像为 g ,滤波输出为 f ,则

$$f(m,n) = \sum_{(i,j) \in S_{mn}} \omega(i,j)g(i,j). \quad (1)$$

权值 $\omega(i,j)$ 如(2)式所示:

$$\omega(i,j) = \frac{1}{1 + \max\{T_{mn}, (g(i,j) - M_{mn})^2\}} \cdot \frac{1}{\sum_{(i,j) \in S_{mn}} \frac{1}{1 + \max\{T_{mn}, (g(i,j) - M_{mn})^2\}}}. \quad (2)$$

式中, M_{mn} 为灰度中值,计算需要对 3×3 数据区域内像素数据做排序操作。排序过程是一个数据比较与交换的过程,要提高排序速度,满足系统的实时性要求,就要尽可能地减少数据之间的比较次数。以往的排序方法是冒泡排序法,对一个 $N \times N$ 的数据区域进行中值滤波需要进行 $n^2(n^2 - 1)/2$ 次比较运算,时间复杂度为 $O(n^4)$ 。当窗口很大时计算量很大,不利于实时性的实现。

本文采用快速中值滤波方法,算法步骤如下:

首先把模板数据 3 个列向量同时排序,进行流水操作,生成一个新的矩阵模板;然后使用 FP-

GA 内排序器件把新矩阵模板按照行向量进行重新排列组合,再生成第二个新矩阵模板;最后把最新生成的矩阵主对角线向量提取出来,再一次使用排序器件进行排序,取出中值。这个中值就是中值滤波所要得到的结果。

算法示意图如图 1 所示:

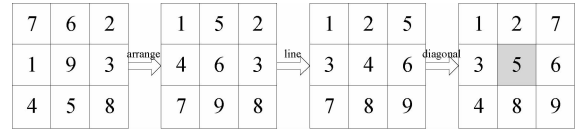


图 1 中值排序示意图

Fig. 1 Schematic diagram of median ranking

将所得的中值代入公式(2),并对 3×3 数据区域内的数据进行遍历计算,即得滤波最后结果。图 2 为经过滤波后的 Smear 曲线,滤波后效果明显。为后续消除 Smear 噪声做好了准备。

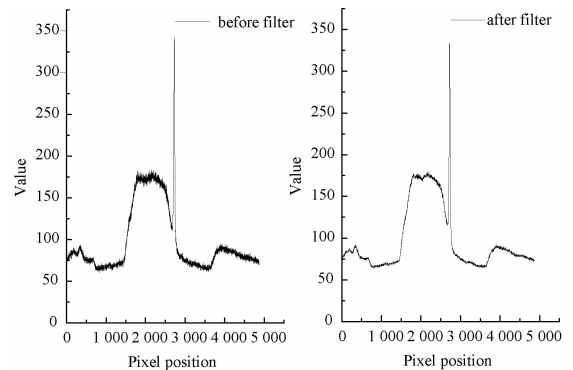


图 2 Smear 滤波结果

Fig. 2 Results of Smear filtering

将滤波后的 Smear 定义为 $y_p(j)$,按着同列相减的原则将 Smear 从有效图像数据中统一减去,该差分过程的数学描述为:

$$I_y(i,j) = I_x(i,j) - y_p(j). \quad (3)$$

式(3)中 $I_y(i,j)$ 和 $I_x(i,j)$ 代表去除 Smear 后的输出图像数据和原始输入图像数据。

完成差分计算后,需要对去除 Smear 后的图像区域进行补偿,来恢复损失的图像细节与亮度信息。本文采用双三次插值方法对去除 Smear 区域进行补偿。双三次插值能获得更平滑的图像边缘,且速度较快。取有 Smear 效应的像素所在列两侧各 N 列的像素值,用这些像素值作双三次插值,用插值计算值代替 Smear 效应对应位置的

像素灰度值。假设在 Smear 效应所在列两侧选取 4 个像素点 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 $(x_3,$

$y_3)$, 灰度值分别为 $I(x_0, y_0)$ 、 $I(x_1, y_1)$ 、 $I(x_2, y_2)$ 、 $I(x_3, y_3)$, 则三次插值函数如式(4)所示:

$$I(x, y) = l_0(x, y)I(x_0, y_0) + l_1(x, y)I(x_1, y_1) + l_2(x, y)I(x_2, y_2) + l_3(x, y)I(x_3, y_3)$$

$$l_0(x, y) = \frac{[(x, y) - (x_1, y_1)][(x, y) - (x_2, y_2)][(x, y) - (x_3, y_3)]}{[(x_0, y_0) - (x_1, y_1)][(x_0, y_0) - (x_2, y_2)][(x_0, y_0) - (x_3, y_3)]}$$

$$l_1(x, y) = \frac{[(x, y) - (x_0, y_0)][(x, y) - (x_2, y_2)][(x, y) - (x_3, y_3)]}{[(x_1, y_1) - (x_0, y_0)][(x_1, y_1) - (x_2, y_2)][(x_1, y_1) - (x_3, y_3)]}$$

$$l_2(x, y) = \frac{[(x, y) - (x_0, y_0)][(x, y) - (x_1, y_1)][(x, y) - (x_3, y_3)]}{[(x_2, y_2) - (x_0, y_0)][(x_2, y_2) - (x_1, y_1)][(x_2, y_2) - (x_3, y_3)]}$$

$$l_3(x, y) = \frac{[(x, y) - (x_0, y_0)][(x, y) - (x_1, y_1)][(x, y) - (x_2, y_2)]}{[(x_3, y_3) - (x_0, y_0)][(x_3, y_3) - (x_1, y_1)][(x_3, y_3) - (x_2, y_2)]}. \tag{4}$$

2.3 Smear 去除方法硬件设计

系统硬件组成如图 3 所示,包括光学镜头、CCD 成像器件、视频信号处理单元、FPGA+DSP 核心处理单元、显示单元。其中,CCD 采用 KO-DAK 公司的 KAI-16000 成像器件,为行间转移面阵 CCD,具有 $4\ 872\ \text{pixels} \times 3\ 248\ \text{pixels}$ 区域,包括 12 行暗像元区域,该 CCD 最高帧频可达 3 frame/s。实验发现该 CCD 在最高帧频工作成像过程中,存在较为明显的 Smear 现象。视频信号处理(VSP)单元采用 TI 公司生产的 VSP2230Y 集成芯片,该器件集成了相关双采样(CDS)电路、8 bit 可编程增益放大器(PGA)和 10 bit 分辨率的模/数转换器(ADC),最大采样频率可达 36 MHz,具有暗电平校正功能,可通过内部寄存器进行配置。VSP 单元可以有效消除 Smear 中的 KTC 噪声以及暗电流噪声。FPGA+DSP 核心处理单元具有 CCD 驱动时序信号产生、VSP 寄存器配置、暗像元区域图像数据缓存、Smear 滤波处理、Smear 噪声消除及图像双三次插值补偿、图像显示等功能。所拍摄场景经光学镜头和 CCD 输出模拟视频信号,该信号通过 VSP 输出图像数字信号;在 FPGA 内部开辟缓存空间,存储 9 行暗像元区域的

图像数据,然后在 DPS 内对 9 行暗像元数据进行基于中值的均值滤波,当 CCD 工作在最高速工况 3 frame/s 时,该过程仅需 1.265 ms。当 CCD 转移过程从暗像元区域进入有效像元区域时,按像素时钟将由 DPS 滤波处理过的 Smear 数据读入 FPGA,按差分方法消除并补偿图像数据,最后将图像数据送入显示单元进行显示。

3 实验结果及讨论

图 4 是利用本文系统室内成像的原始图片。场景中的定标灯泡作为一个高亮度点光源,在其图像上下方产生了 Smear 带来的白色线状噪声,而场景中日光灯的图像下方也产生了 Smear 带来的白色带状噪声。图 5 是直接图 4 中 Smear 噪声去除后的图片,在未作补偿的 Smear 对应位置产生了线状的图像退化。图 6 是经本文方法处理后的室内成像的还原图片。图 8 是外场成像原图,图 9 是经本文方法处理后的还原图片。

从以上实验可以看出,用本文方法图像还原的

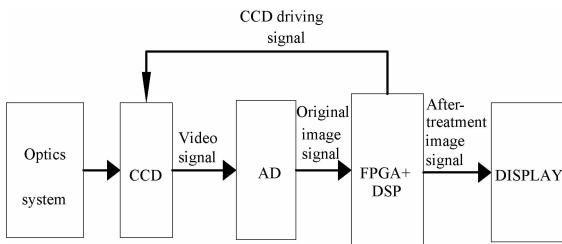


图 3 硬件系统组成框图

Fig. 3 Block diagram of hardware system

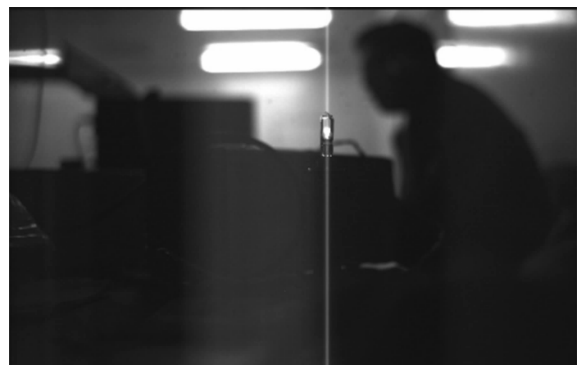


图 4 未去除 Smear 的原始图片

Fig. 4 Original picture without Smear removal

效果很好,除 Smear 外的其它噪声同样得到了有效抑制,从视觉角度观察,图片的 Smear 现象得到彻底消除,图像质量有了明显提高。如果从定量的角度对实验图片进行分析,同样可得出图像经处理后质量提高的结论。评价方法采用灰度方差的方法^[12]。

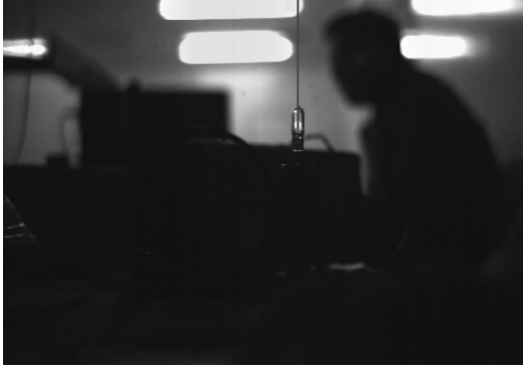


图 5 去除 Smear 后未经补偿处理的图片

Fig. 5 Picture without compensation after Smear removal

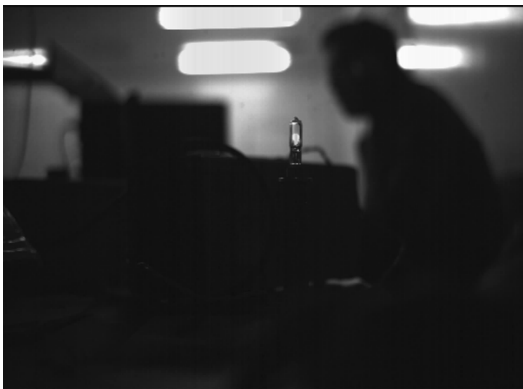


图 6 本文方法去除 Smear 并补偿处理后图片

Fig. 6 Picture compensated by using proposed method after Smear removal

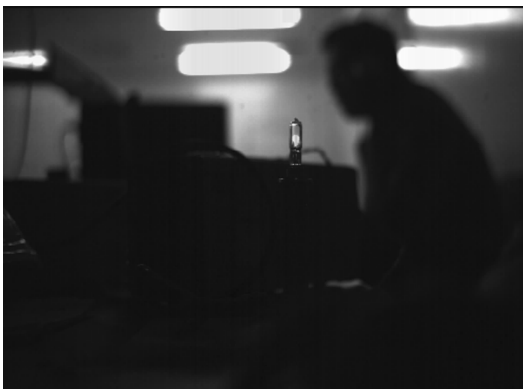


图 7 采用统计方法的 Smear 去除并补偿后图片

Fig. 7 Picture compensated by using Statistic method after Smear removal



图 8 外场成像 Smear 图片

Fig. 8 Field imaging picture with Smear



图 9 外场成像 Smear 消除图片

Fig. 9 Field imaging picture after Smear removal

灰度方差反应的是背景灰度起伏强度变化情况,灰度方差值越小表明灰度的起伏变化越小^[13]。当图像中存在 Smear 区域时,如果经处理后灰度方差值越小,则表示去除 Smear 效应越彻底。灰度方差计算公式如式(5)、式(6)所示,其中 I_i 表示图像的灰度值, \bar{I} 表示计算的灰度均值, σ 即为计算的灰度方差。

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^n I_i, \quad (5)$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2. \quad (6)$$

表 1 消除 Smear 效应量化评价结果

Tab. 1 Quantitative evaluation results of Smear removal effect

消除区域	灯管区域	点光源区域
评价方法	灰度方差	灰度方差
未处理	35.46	52.66
补偿前	2.24	32.75
补偿后	1.65	1.84

表 1 是对室内成像实验图片计算 Smear 区域灰度方差的结果。分别对场景中日光灯和点光源对应的图像区域进行计算。由于场景中点光源亮度远远高于日光灯亮度,图像中点光源对应的 Smear 区域数码值也远大于日光灯对应的 Smear 区域数码值,所以点光源区域未经过补偿的灰度方差要远大于日光灯区域未经过补偿的灰度方差。从计算结果中得出经过补偿后的图像灰度方差降低了 95.34%。可见本实时复原系统可以在保留背景内信息的基础上,很好地消除 Smear 噪声。

表 2 两种消除 Smear 方法的评价结果

Tab. 2 Evaluation results of two Smear removal methods

比较项目	本文方法	统计方法
灰度方差	1.65	3.94
耗时/ms	1.265	20
图像大小/pixel	4 872×3 248	1 024×1 024

为了验证本文方法的先进性,利用参考文献 6 中的基于统计灰度信息的 Smear 处理方法对室内成像图片进行处理,得到如图 7 所示图片。比较评价结果如表 2 所示。

通过比较可以看出本文方法在系统实时性与图像处理效果上,均优于传统的统计方法。

4 结 论

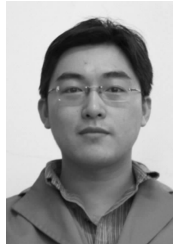
本文利用行间转移面阵 CCD 暗像元区域提取 Smear 噪声,以 FPGA+DSP 为核心处理器件,设计了满足实时性要求的 Smear 硬件消除系统。提出了适用于硬件系统的基于中值的快速均值滤波方法,消除了 Smear 内的多种噪声信号。实验显示,系统可保证在暗像元读出结束前完成 Smear 噪声的提取,满足实时处理的要求。通过对成像实验结果进行分析可知,消除 Smear 噪声后的图像灰度方差降低了 95.34%。本系统采用硬件实时处理方法,系统实时性好,适用于大多数行间转移面阵 CCD 相机。

参考文献:

- [1] 李同海,张德联,赵新亮. 行间转移型 CCD 相机的 Smear 现象研究[J]. 科学技术与工程,2008,8(14): 3924-3927.
LI T H, ZHANG D L, ZHAO X L. The study of the interline transfer CCD camera smear phenomenon [J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(14): 3924-3927. (in Chinese)
- [2] 关澈,王延杰. CCD 相机实时自动调光系统[J]. 光学精密工程,2008,16(2): 358-366.
GUAN CH, WANG Y J. Real time auto light control system of CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 358-366. (in Chinese)
- [3] 陈宇恒,周望,沈为民. 遥感成像中 CCD 拖影问题的处理[J]. 光学仪器,2007,29(6):22-29.
CHEN Y H, ZHOU W, SHEN W M. Disposal of smearing in CCD remote sensing [J]. *Optical Instrument*, 2007, 29(6):22-29. (in Chinese)
- [4] 孙瑾秋,周军,朱宇. 天文观测 CCD 相机中 Smear 效应的消除[J]. 光学精密工程,2011,19(10): 2527-2533.
SUN J Q, ZHOU J, ZHU Y. Smear removal of CCD camera in astronomic observation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10):2527-2533. (in Chinese)
- [5] 姚睿,张艳宁,孙瑾秋. 星图中基于小波变换的 CCD 传感器 Smear 现象消除方法[J]. 光子学报,2011,40(3):413-418.
YAO R, ZHANG Y N, SUN J Q. Smear removal algorithm of CCD imaging sensors based on wavelet transform in star-sky image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3):413-418. (in Chinese)
- [6] 黄宗福,王宏义,韩建涛,等. 天文全帧 CCD 图像拖尾的快速去除方法[J]. 信号处理,2010,26(4): 608-611.
HUANG Z F, WANG H Y, HAN J T, et al.. Quick method of removing smear in astronomical full-frame CCD image [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(4):608-611. (in Chinese)
- [7] 陶明慧,张星祥,张宇,等. KAI-2093 型面阵 CCD 多模式驱动时序设计[J]. 液晶与显示,2011,26(1): 105-109.
TAO M H, ZHANG X X, ZHANG Y, et al.. Design for area CCD KAI-2093 schedule generator with Multi-mode [J]. *Chinese Journal of Liquid*

- Crystals and Displays*, 2011, 26(1):105-109. (in Chinese)
- [8] HAN Y S, CHOI E, KANG M G. Smear removal algorithm using the optical black region for CCD imaging sensors [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(4):2287.
- [9] KAO W CH, HONG CH M, LI SH Y. Automatic sensor and mechanical shutter calibration for digital still cameras [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51(4):1060-1066.
- [10] 李云飞, 李敏杰, 司国良, 等. TDI-CCD 图像传感器的噪声分析与处理[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8):1196-1202.
LI Y F, LI M J, SI G L *et al.*. Noise analyzing and processing of TDI-CCD image sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1196-1202. (in Chinese)
- [11] 熊刚, 丁天怀, 王鹏. 应用属性距离加权平均滤波提高 CCD 光斑的亚像素定位精度[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5):1103-1109.
XIONG G, DING T H, WANG P. Improvement of sub-pixel location accuracy of light-spot on CCD with ADWA filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5):1103-1109. (in Chinese)
- [12] 姚军彩. 基于人眼对比度敏感视觉特性的图像质量评价方法[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(3):390-396.
YAO J C. Image quality assessment method based on contrast sensitivity characteristics of human vision system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3):390-396. (in Chinese)
- [13] 黄梅, 吴志勇, 梁敏华, 等. 暗背景下低灰度图像的实时增强[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(3):374-379.
HUANG M, WU ZH Y, LIANG M H, *et al.*. Real-time enhancement method of low gray image under dark background [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3):374-379. (in Chinese)

作者简介:



张宇(1981—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事 CCD 图像采集与处理方面的研究。E-mail: zhangyu004115@126.com



张星祥(1977—),男,云南大理人,副研究员,2000年于吉林工业大学机械学院获得学士学位,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光学测试和空间相机光机结构的研究。E-mail: zxx_jan@163.com



张立国(1961—),男,吉林长春人,研究员,研究生导师,主要从事空间光学遥感器研究。E-mail: zlgxx9@163.com