

文章编号 1004-924X(2017)01-0217-07

异步 Binning 高帧频 CCD 相机的拖尾校正

刘璐*, 罗通顶, 李斌康, 杨少华, 严明
(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:一种基于异步时序驱动和 Binning 技术的高帧频成像技术在帧转移 CCD 相机上得到成功应用。为了抑制该 CCD 相机成像时产生的拖尾效应,基于该相机的高帧频连续成像原理,理论上分析了图像获取过程中拖尾产生的原因,给出了一套完整的消除拖尾的数值解析算法。该算法充分考虑了图像亮度变化对拖尾形成产生的影响,并对此进行了修正,已在异步 Binning CCD 相机上进行了实验验证。利用相机以 40 000 帧每秒的帧频获取 4 幅连续图像进行实验,实验结果表明,该算法可有效去除每幅图像的拖尾噪声,而且消除拖尾噪声后的图像区域的灰度方差得到明显降低,异步 Binning CCD 相机的成像质量得以提高。上述结果表明算法适用于高帧频相机的连续成像。

关键词:异步 Binning;高帧频相机;帧转移 CCD;拖尾校正

中图分类号:TN29 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172501.0217

Smear correction of asynchronous binning high frame rate CCD camera

LIU Lu*, LUO Tong-ding, LI Bin-kang, YANG Shao-hua, YAN Ming

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

* Corresponding author, E-mail: liulu@nint.ac.cn

Abstract: A high frame rate imaging technology based on asynchronous timing drive and Binning technology has been applied on frame transfer CCD camera successfully. The reason why smear noise occurs in image acquisition process has been analyzed theoretically and a complete set of numerical analytic algorithm for smear correction has been carried out to restraint the smear generated in the imaging of this CCD camera, according to its continuous imaging principle. The algorithm has fully taken the effects of consecutive frame exposures and changing intensity on smear into account and then amended them. Experimental verification has been conducted in asynchronous Binning camera. Results indicate that the camera can get 4 continuous images at a frame rate of 40 000 frames per second. The algorithm has effectively eliminated the smear noise of all images, making contribution to the remarkable decrease of the gradation variance in smear area and the improvement of asynchronous Binning CCD camera's imaging quality. The smear correction algorithm is applicable to continuous imaging of high frame rate camera.

Key words: asynchronous Binning; high frame rate camera; frame transfer CCD; smear correction

收稿日期:2016-06-15;修订日期:2016-08-10.

基金项目:国家自然科学基金支持项目(No. 11475138)

1 引言

高帧频 CCD (Charge Coupled Device) 相机在核探测、爆轰效应、高速碰撞等现代科学领域有着广泛的应用需求。由于电荷垂直转移和水平读出时间的限制, CCD 相机能够达到的最大帧频率是有限的, 往往只有几十帧每秒, 利用 CCD 获取高速图像通常可采用高速快门控制曝光时间的方法, 但是往往只能获取单帧图像。为了实现单台 CCD 相机一次获取多幅高速图像的目标, 本项目组在文献[1]中提出了一种基于异步时序驱动和垂直 Binning 相结合的高帧频图像获取方法, 该方法能够获取多幅数十微秒间隔的图像, 并在帧转移 CCD 相机上得到了成功应用, 但是该相机存在图像拖尾较严重的问题。对于帧转移型面阵 CCD 来说, 若电荷转移的过程中继续曝光, 则会产生拖尾 (smear) 现象^[2]。一般情况下, 当 CCD 的曝光时间远大于帧转移时间时, 拖尾现象可以忽略, 而当 CCD 的曝光时间与帧转移时间相当时, 拖尾现象造成的图像阴影则比较明显。

拖尾现象严重影响了图像的视觉效果, 通常在 CCD 芯片的成像区添加机械快门^[3-4]并控制系统在曝光结束后立刻关闭机械快门来消除, 也可以通过采用自动光圈^[5]的方式减小电荷转移时间内的曝光量来减弱拖尾现象, 但是这几种方法只能处理单帧静态图像。另外, 通过改变 CCD 图像传感器的结构^[6]或者是缩短帧转移时间^[7]也可以对拖尾现象进行抑制, 但是这两种方法需要从图像传感器和电路层面进行设计, 在实际应用中受到客观条件的限制。近些年来, 基于图像处理的拖尾处理方法越来越受到关注。孙瑾秋等人提出了一种基于背景估计的拖尾效应消除方法^[8], Gao Weiwei 等人通过对背景噪声进行核密度函数估计很好地消除了星空图像的拖尾现象^[9-10], Feng Weiwei 等人利用积分球对帧转移 CCD 相机成像进行校正并消除拖尾现象^[11], 但是这些方法也只适用于静态成像, 不能应用于高帧频 CCD 相机的连续成像。罗通顶针对参考文献[1]给出的高帧频 CCD 相机提出了一种可有效处理拖尾的迭代算法^[12], 但由于该算法并没有考虑到拖尾形成时图像亮度变化带来的影响, 而且迭代过程中对算法进行了近似处理, 从而降低了图像的拖

尾处理效果。

本文针对异步 Binning 高帧频 CCD 相机的成像原理, 分析了高帧频图像获取时拖尾产生的原因, 给出了一套完整的消除拖尾的数值解析算法。该算法同时考虑了前后两帧图像的亮度变化对拖尾产生的影响, 适用于高帧频相机的连续成像, 能够有效消除图像的拖尾效应, 提高了 CCD 相机的成像质量。

2 高帧频 CCD 相机的拖尾产生原理

在 CCD 器件进行光电转移时, 继续曝光从而使图像形成模糊的阴影, 即为拖尾现象, 这是 CCD 器件的固有特性。

图 1 以面阵帧转移 CCD 相机为例详细图解了连续曝光过程中拖尾产生的原理^[13-14]。其中帧转移面阵 CCD 可分为感光区、存储区和水平转移区 3 个部分, 灰色部分表示图像曝光后正在转移的电荷。在 CCD 曝光之后电荷进行转移时, 若继续进行曝光, 则正在转移电荷的感光区域将产生额外的电荷, 这些电荷会叠加到当前帧上, 而转移过电荷的感光区域产生的额外电荷则将叠加到下一帧图像上。对于 CCD 相机单帧成像来说, 其拖尾现象主要是由前一部分原因造成的, 即正在转移电荷的感光区域继续曝光叠加后产生的拖尾噪声。而对于连续成像的高帧频 CCD 相机来说, 输出的一帧图像拖尾噪声由两部分组成, 上一帧图像曝光遗留的电荷和当前帧转移时附加的电荷。

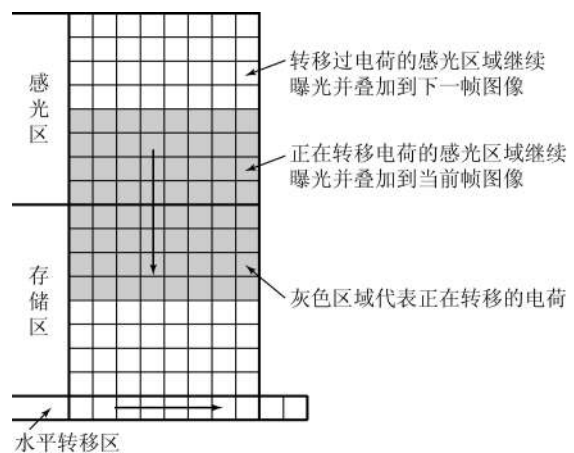


图 1 高帧频 CCD 拖尾产生示意图

Fig. 1 Sketch map for smear phenomena occurred in high frame rate CCD image sensor

3 拖尾校正算法

3.1 图像亮度变化时的拖尾表示

假设面阵 CCD 的像素数是 $M \times N$, 在定量分析图像的拖尾大小时, 若不考虑帧转移时图像亮度的变化, 则上一帧图像曝光遗留的电荷形成的拖尾噪声可表示为:

$$S_{i,j}^{k-1} = \frac{t_t}{t_e} \sum_{l=i+1}^M I_{l,j}^{k-1}, \quad (1)$$

其中: i, j 分别表示行坐标和列坐标, k 表示当前帧的序号, t_t 表示帧转移时间, t_e 表示曝光时间, $I_{i,j}^k$ 表示当前帧在坐标 (i, j) 位置处未叠加拖尾噪声的像素灰度值。

当前帧转移时附加的电荷形成的拖尾噪声可表示为:

$$S_{i,j}^k = \frac{t_t}{t_e} \sum_{l=i}^{i-1} I_{l,j}^k. \quad (2)$$

但是对于高帧频相机的连续曝光成像, 图像亮度也是连续变化的, 如图 2 所示。可以看出, 帧转移时间图像的亮度是逐渐变化的, 这样, 上一帧图像曝光遗留的电荷形成的拖尾与上一帧和当前帧图像都有关系, 当前帧转移时附加的电荷与当前帧和下一帧图像都有关系。

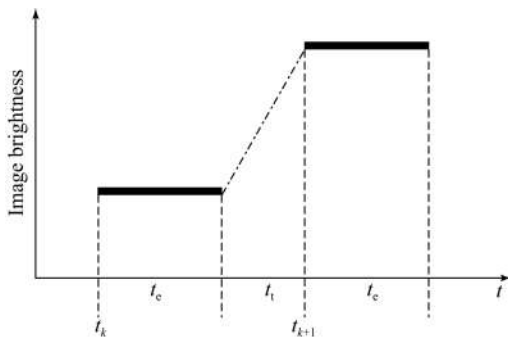


图 2 连续成像亮度变化示意图

Fig. 2 Sketch map for intensity changing between continuous images

为了便于分析, 将帧转移时间内的图像亮度变化视为线性变化。这样, 上一帧图像曝光遗留的电荷形成的拖尾噪声可表示为:

$$S_{i,j}^{k-1} = \frac{t_t}{t_e} \sum_{l=i+1}^M \left[\frac{i+M-l}{M} (I_{l,j}^k - I_{l,j}^{k-1}) + I_{l,j}^{k-1} \right]. \quad (3)$$

当前帧转移时附加的电荷形成的拖尾噪声可

表示为:

$$S_{i,j}^k = \frac{t_t}{t_e} \sum_{l=i}^{i-1} \left[\frac{i-l}{M} (I_{l,j}^{k+1} - I_{l,j}^k) + I_{l,j}^k \right]. \quad (4)$$

这样, CCD 曝光形成的图像灰度可表示为:

$$\hat{I}_{i,j}^k = I_{i,j}^k + S_{i,j}^{k-1} + S_{i,j}^k, \quad (5)$$

其中: $\hat{I}_{i,j}^k$ 表示当前帧在 (i, j) 处叠加了拖尾噪声的像素灰度值。

对于式(5)给出的拖尾效应的表示方法, 能够看出: 拖尾是同一列元素相互影响产生的, 而对不同列的元素则没有影响。这样, 可以将式(5)写成矩阵和列向量相乘的表达形式, 具体如下式表示:

$$\hat{\mathbf{I}}^k = \mathbf{A}\mathbf{I}^k + \mathbf{B}\mathbf{I}^{k-1} + \mathbf{C}\mathbf{I}^{k-1}, \quad (6)$$

其中: 向量 $\hat{\mathbf{I}}^k = [\hat{I}_{1,j}^k, \hat{I}_{2,j}^k, \dots, \hat{I}_{M-1,j}^k, \hat{I}_{M,j}^k]^T$, $\mathbf{I}^k = [I_{1,j}^k, I_{2,j}^k, \dots, I_{M-1,j}^k, I_{M,j}^k]^T$, $j=1, 2, \dots, N$,

假设常量 $\alpha = \frac{t_t}{t_e}$, 矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 和 \mathbf{C} 的表达式为:

$$\mathbf{A} = \alpha \times \begin{bmatrix} 1 & \frac{M-1}{M} & \dots & \frac{1}{M} \\ \frac{M-1}{M} & 1 & \dots & \frac{2}{M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{M} & \frac{2}{M} & \dots & 1 \end{bmatrix}_{M \times M},$$

$$\mathbf{B} = \alpha \times \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M} & \dots & \frac{M-1}{M} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{M-2}{M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{M \times M},$$

$$\mathbf{C} = \alpha \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{M-1}{M} & \frac{M-2}{M} & \dots & 0 \end{bmatrix}_{M \times M}.$$

3.2 Binning 模式下的图像拖尾校正

对于普通的 CCD 连续成像, 可通过式(6)消除拖尾现象的影响, 但是对于基于异步时序和 Binning 的高帧频成像方法, 还需要考虑 Binning 技术对拖尾的影响。Binning 技术实际上是把相邻的若干个像素点的电荷累积到一起输出, 以 4:1 Binning 为例, 输出的像素点灰度值 I_B^k 可表示:

$$I_{Bm}^k = I_{4m-3,j}^k + I_{4m-2,j}^k + I_{4m-1,j}^k + I_{4m,j}^k (j=1, 2, \dots, N). \quad (7)$$

同样以矩阵和列向量的形式可表示为:

$$\hat{\mathbf{I}}_{\text{B}} = \mathbf{D}\hat{\mathbf{I}}^k = \mathbf{D}\mathbf{A}\mathbf{I}^k + \mathbf{D}\mathbf{B}\mathbf{I}^{k-1} + \mathbf{D}\mathbf{C}\mathbf{I}^{k+1}, \quad (8)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}_{\frac{M}{4} \times M}$$

在式(8)中,左边 $\hat{\mathbf{I}}_{\text{B}}$ 表示 Binning 之后受拖尾噪声污染的图像灰度值,是已知的,大小为 $\frac{M}{4} \times N$;右边 \mathbf{I}^k 表示 Binning 之前不受拖尾噪声污染的图像灰度值,是未知的,大小为 $M \times N$ 。要想通过 $\hat{\mathbf{I}}_{\text{B}}$ 求取 \mathbf{I}^k 是不可能实现的,因为从方程的角度来说未知数的个数大于方程个数,具有不定解。而实际上需要的是 Binning 后的不受拖尾噪声污染的图像,因此要建立的是 $\hat{\mathbf{I}}_{\text{B}}$ 和 \mathbf{I}_{B} 之间的关系, \mathbf{I}_{B} 即为 Binning 后不受拖尾噪声污染的图像灰度值。具体表达式如下所示:

$$\hat{\mathbf{I}}_{\text{B}} = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{I}_{\text{B}} + \hat{\mathbf{B}}\mathbf{I}_{\text{B}}^{-1} + \hat{\mathbf{C}}\mathbf{I}_{\text{B}}^{+1}, \quad (9)$$

其中:矩阵 $\hat{\mathbf{A}}$ 、 $\hat{\mathbf{B}}$ 、 $\hat{\mathbf{C}}$ 分别是通过运算 $\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{D}\mathbf{A}/\mathbf{D}$ 、 $\hat{\mathbf{B}} = \mathbf{D}\mathbf{B}/\mathbf{D}$ 和 $\hat{\mathbf{C}} = \mathbf{D}\mathbf{C}/\mathbf{D}$ 得到的。矩阵 $\mathbf{D}\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{D}\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{D}\mathbf{C}$ 和矩阵 \mathbf{D} 的大小都为 $\frac{M}{4} \times M$,矩阵的秩都为 $\frac{M}{4}$,这样矩阵运算 $\mathbf{D}\mathbf{A}/\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{D}\mathbf{B}/\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{D}\mathbf{C}/\mathbf{D}$ 得到的都是 $\frac{M}{4} \times \frac{M}{4}$ 大小的矩阵。对于 4:1 Binning 来说,共有 4 个如式(9)所示的表达式,解这个表达式可以借用方程组的概念,将 \mathbf{I}_{B} 看成一个未知数,则总共有 4 个方程和 4 个未知数,方程是可解的,具体方法可以采用类似解线性方程组的迭代法,求取不受拖尾噪声污染的图像灰度值。

4 实验结果与分析

为了验证该算法对高帧频 CCD 相机连续成像拖尾噪声的有效性,本文以脉冲氙灯的发光过程作为成像目标进行拍摄,并利用本文算法对获取的图像进行处理。实验室用的脉冲氙灯的发光过程是一个持续百 μs 级的高速过程,本文用 PIN 二极管对氙灯的发光过程进行监测,得到 100 个 μs 内氙灯的发光强度变化曲线,如图 3 所示。可以看出在触发之后 15 个 μs 左右,氙灯发光强度达到峰值,然后缓慢衰减。本文用 1024×1024 分辨率的高感光度 EMCCD 相机,利用电子快门的方式曝光 5 ms,获得氙灯的整个发光图像,如

其中矩阵 \mathbf{D} 的大小为 $\frac{M}{4} \times M$,表达式为:

图 4 所示,由于图像分辨率高,能够清楚地看到氙灯的发光轮廓和细节。

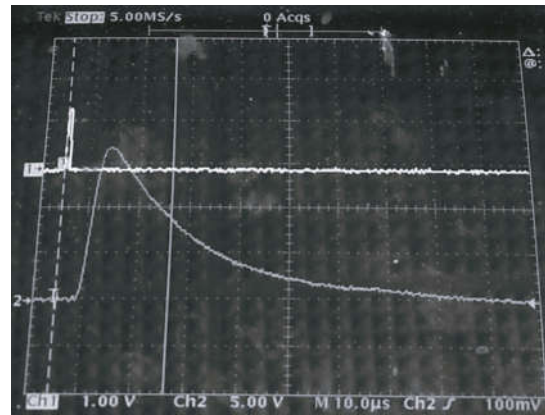


图 3 脉冲氙灯光强衰减曲线

Fig. 3 Light intensity attenuation curves of xenon lamp

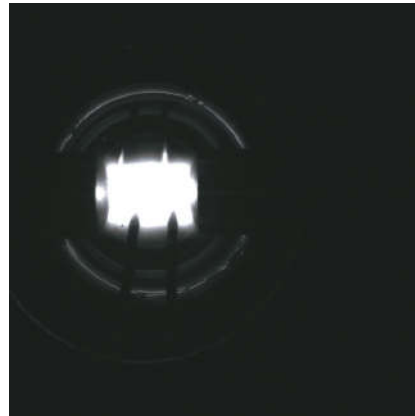


图 4 EMCCD 相机获取的脉冲氙灯完整发光图像

Fig. 4 Integrated luminescence image of xenon flash lamp acquired by EMCCD camera

接下来,采用异步 Binning 高帧频 CCD 相机对氙灯发光过程进行拍摄。相机采用的图像传感器为 e2v 的一款低分辨率 EMCCD 芯片 CCD60,全分辨率像素数为 128×128 ,图像垂直分辨率为 10 bit,采用异步 4:1 Binning 技术,相机的帧频率能够达到 40 000 frame/s,并能一次获取 4 幅图像,其中每帧图像的分辨率为 32×128 ,间隔时间为 $t_i = 25 \mu\text{s}$,曝光时间为 $t_e = 12.2 \mu\text{s}$,电荷转

移一行的时间为 $t_t = 0.1 \mu s$ 。图 5 是利用该相机获取到的 4 幅不同时间段的氙灯发光图像,由于每幅图像分辨率只有 32×128 ,为了与原氙灯发光图像更好地进行对比,通过线性插值方法将每幅图像的分辨率扩展到 128×128 。由图 5 可知,随着时间的增加,氙灯的亮度逐渐减弱,第一幅图像基本能够反映出氙灯的完整发光细节,而第 4 幅图像已经分辨不出氙灯的信息。由于图像的分辨率低,相比图 4 来说图像的细节并不是很清晰,

而且每幅图像的拖尾比较严重,极大地影响了图像质量。图 6 是采用本文算法进行拖尾处理的图像结果,能够看到图像中的拖尾阴影得到了有效消除,图像细节分辨能力得到明显改善。

为了验证本文算法的先进性,与参考文献 [11] 给出的迭代算法进行对比实验。图 7 是采用参考文献 [11] 算法的图像处理结果,通过对比能够直观地看到,本文算法的拖尾处理效果更好一些。

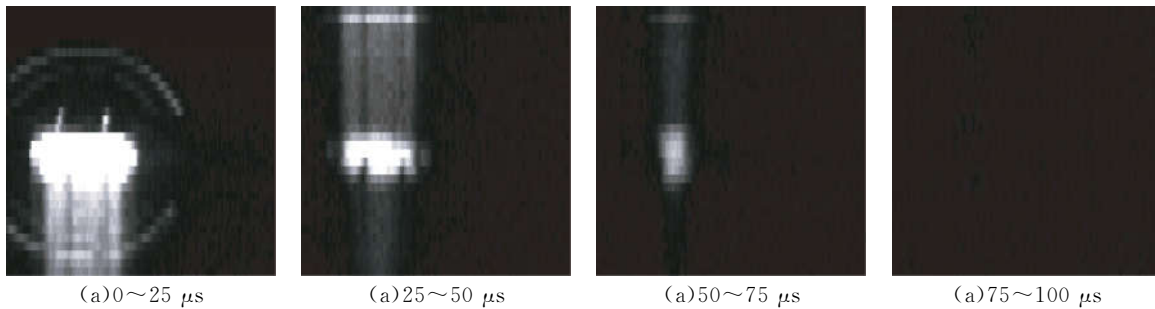


图 5 异步 Binning 高帧频 CCD 相机获取的氙灯发光图像
Fig. 5 Images of xenon flash lamp acquired by asynchronous binning CCD camera

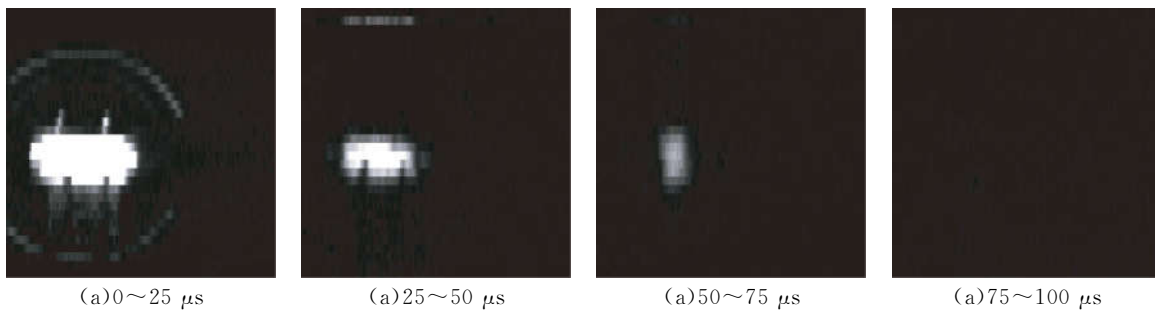


图 6 利用本文算法对氙灯发光图像拖尾校正的结果
Fig. 6 Smear correction of xenon flash lamp images with presented method

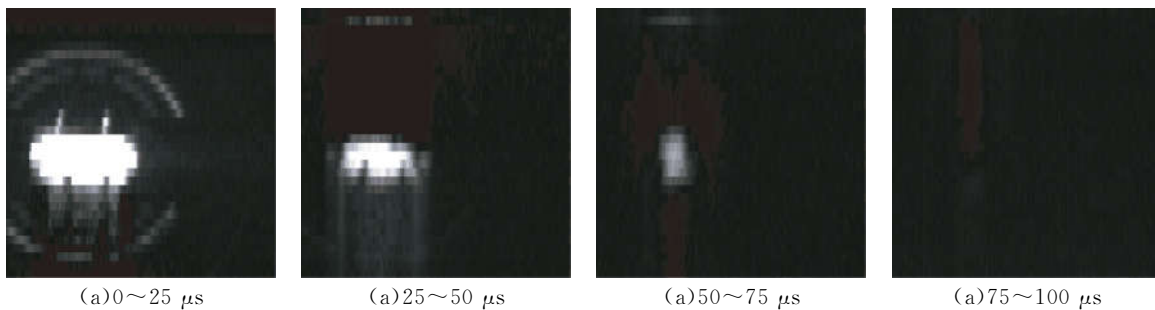


图 7 利用文献 [11] 算法对氙灯发光图像拖尾校正的结果
Fig. 7 Smear correction of xenon flash lamp images with method given by reference [11]

为了定量地对图像进行评价,本文采用灰度方差^[15]的概念来分析处理过的图像。灰度方差反应的是图像背景灰度起伏情况,灰度方差越小

表明灰度的起伏变化越小,也就说明算法对拖尾现象消除的越完全。灰度方差计算公式如式 (10)、式(11)所示,其中 I_i 表示图像的灰度值, σ

表示计算的灰度均值:

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^n I_i, \quad (10)$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2. \quad (11)$$

表 1 拖尾校正图像的灰度方差对比

Tab. 1 Comparison of gray variance of smear corrected images

图像时间段	未处理	文献 11 算法	本文算法
0~25 μs	4.13×10^3	776	540
25~50 μs	761	351	251
50~75 μs	91	60	52
75~100 μs	10	44	30

表 1 是对未处理以及处理过的氙灯发光图像计算拖尾阴影区域灰度方差的结果,从结果可以看出,除了第四幅图像灰度方差有所增大外,其他 3 幅图像的灰度方差均明显降低,这说明图像中

的拖尾噪声得到了明显抑制。而第四幅图像之所以灰度方差增大,是因为其灰度值太低,图像中基本不包含目标信息,目标图像更不存在拖尾,因此利用本文算法处理反而引入了噪声,所以这幅图像的处理数据可不作考虑。与参考文献[11]中给出的算法相比,由于考虑了帧转移时图像亮度变化的影响,本文算法的拖尾抑制效果要更优。

5 结 论

本文针对异步 Binning CCD 相机的高帧频成像原理,分析了连续成像过程中拖尾噪声的产生原理,在充分考虑拖尾形成时图像亮度变化带来的影响的基础上,提出了一套完整的消除拖尾的数值解析算法,并在异步 Binning 高帧频 CCD 相机上进行了实验验证。实验结果表明,该算法明显降低了异步 Binning 高帧频 CCD 相机获取图像中拖尾阴影区域的灰度方差,有效抑制了相机成像过程中的拖尾噪声。

参考文献:

- [1] LI B K, YANG SH H, GUO M A, *et al.*. Design of a very high frame rate camera based on an asynchronous CCD driving method [J]. *Chinese Physics C*, 2011, 35(6): 572-575.
- [2] 米本和也. CCD/CMOS 图像传感器的基础与应用 [M]. 陈蓉庭, 彭美柱译. 北京: 科学出版社, 2006.
KAZUYA Y. *The Basis of CCD/CMOS Image Sensors and Applications* [M]. CHEN R T, PENG M ZH. TRANSLATION. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(11): 2164-2171.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2164-2171. (in Chinese)
- [4] KAO W CH, HONG C M, LIN S Y. Automatic sensor and mechanical shutter calibration for digital still cameras[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51(4): 1060-1066.
- [5] 高建伟, 姚睿, 孙瑾秋, 等. 一种帧转移型 CCD 传感器 Smear 效应消除方法[J]. *中国体视学与图像分析*, 2010, 15(4): 394-398.
- [6] 钟四成, 程顺昌, 王晓强. CCD 抗晕结构的设计和制作[J]. *半导体光电*, 2011, 32(3): 313-316.
ZHONG S CH, CHENG SH CH, WANG X Q. Design and process of the CCD with anti-blooming structure [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, 32(3): 313-316. (in Chinese)
- [7] 陈剑武, 曹开钦, 孙德新, 等. 高帧频低拖尾帧转移 CCD 驱动技术[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0123001.
CHEN J W, CAO K Q, SUN D X, *et al.*. Driving techniques for high-frame-rate frame transfer CCDs with low smear [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0123001. (in Chinese)
- [8] 孙瑾秋, 周军, 朱宇, 等. 天文观测 CCD 相机中 Smear 效应的消除[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(10): 2526-2532.
SUN J Q, ZHOU J, ZHU Y, *et al.*. Smear removal of CCD camera in astronomic observation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2526-2532. (in Chinese)
- [9] GAO J W, ZHANG ZH, YAO R, *et al.*. A robust

- smear removal method for inter-frame charge-coupled devices star images [C]. 2011 7th International Conference on Natural Computation, 2011: 1805-1808.
- [10] GAO J W, ZHANG ZH, YAO R, *et al.*. Smear radiometric correction algorithm in star images based on kernel density estimation [J]. *SPIE*, 2011, 8194:819421.
- [11] FENG W W, CHEN L G. Smear correction of frame transfer CCD camera based on the integrating sphere [J]. *Optik*, 2013, 124: 1805-1807.
- [12] LUO T D, LI B K, GUO M A, *et al.*. Smear correction of high frame rate camera based on asynchronous CCD drive [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1680-1684.
- [13] CHEN Y H, ZHOU W, SHEN W M. The research of smearing elimination of remote sensing images [J]. *SPIE*, 2007, 6833: 68331W.
- [14] 韩采芹, 柳忠彬. 科学级帧转移型 CCD 相机拖影问题的处理[J]. *科学技术与工程*, 2009, 9(15): 4336-4338.
- HAN C Q, LIU ZH B. Disposal of smearing in scientific grade frame-transfer type CCD camera [J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(15): 4336-4338. (in Chinese)
- [15] 张宇, 张立国, 张星祥. 行间转移大面阵 CCD 相机的 Smear 噪声实时去除[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9): 2388-2394.
- ZHANG Y, ZHANG L G, ZHANG X X. Real-time elimination of smear noise for large interline transfer area CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2388-2394. (in Chinese)

作者简介:



刘璐(1990—),男,河南郸城人,硕士,助理工程师,2012年于清华大学获得学士学位,2015年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事高速成像方法、图像处理等方面的研究。
E-mail: liulu@nint.ac.cn



罗通顶(1984—),男,湖南邵阳人,博士研究生,工程师,2006年于南开大学获得学士学位,2009年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事高速成像技术、高速图像处理方面的研究。
E-mail: luotongding@nint.ac.cn