

基于估计方法的 CMOS 图像传感器列固定模式噪声校正方法

王 华,曹剑中,王华伟,郭惠楠,赵晓冬,刘广森

(中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119)

摘 要: CMOS 图像传感器的列固定模式噪声对图像质量的影响非常严重。在分析 CMOS 图像传感器固定模式噪声产生机理、噪声特性以及其在输出图像中的表现的基础上,提出了一种针对 CMOS 图像传感器中列固定模式噪声的校正方法。该方法利用 CMOS 图像采集系统对积分球发出的均匀平行光束进行多次采样并建模来对列固定模式噪声进行估计,然后将估计结果应用于 CMOS 图像硬件采集系统进行列固定模式噪声的校正,固定模式噪声的校正使用查找表方法实现。实验结果表明该方法可以有效消除列固定模式噪声,改善图像质量。

关键词: 列固定模式噪声; CMOS 图像传感器; 不均匀性; 估计方法

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1928-05

Column fixed pattern noise correction of the CMOS image sensor based on estimation method

Wang Hua, Cao Jianzhong, Wang Huawei, Guo Huinan, Zhao Xiaodong, Liu Guangsen

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: The column fixed pattern noise (CFPN) of the CMOS image sensors have severe influence on image quality. A column fixed pattern noise correction method for CMOS image sensors was proposed based on the analysis of emerge mechanism, noise characteristic and the behavior in the output image of the fixed pattern noise. It sampled the uniform and parallel light source which radiated from a integrating sphere more times use a CMOS image acquiring system and then estimated the column fixed pattern noise using these images. Then, the estimation result was used to correct the column fixed pattern noise in the CMOS image acquisition system. Experimental results show that with this method, the fixed pattern noise can be effectively reduced and the quality of the image can be increased.

Key words: column fixed pattern noise; CMOS image sensor; nonuniformity; estimation method

收稿日期:2012-11-17; 修订日期:2012-12-04

基金项目:中国科学院西部之光基金(Y129271213)

作者简介:王华(1985-),男,硕士,主要从事图像与视频信息处理方面的研究。Email:s09065@opt.cn

0 引言

随着晶体管制造工艺和 CMOS 图像传感器电路设计技术的发展, CMOS 图像传感器在成像性能上不断接近 CCD 图像传感器,在某些应用场合如低功耗、小体积、高抗辐射^[1]航天应用等甚至逐步替代了 CCD 图像传感器^[2-3]。但是 CMOS 图像传感器的噪声问题一直是 CMOS 图像传感器发展及应用的瓶颈。CMOS 图像传感器的噪声可以简单地分为两类:一类是固定模式噪声(fixed pattern noise, FPN),另一类是随机噪声(random noise)。其中 FPN 噪声对图像质量的影响远大于随机噪声对图像的影响。所以 CMOS 图像传感器固定模式噪声校正技术的研究是目前较为重要的一个研究方向。常用的 FPN 抑制方法是基于 CMOS 图像传感器电路新设计^[4],K Yunemeto 提出了一种 5T 像素结构并增加了相关双采样(CDS)电路^[5]来减小 FPN,虽然该方法可以有效抑制 CMOS 图像传感器的 FPN,但它同时会导致 CMOS 图像传感器工艺复杂度的增加,CMOS 图像传感器填充率降低等一系列新问题。也有一些学者提出采用低通滤波器或者邻域加权平均的方法来消除 CFPN,此算法具有一定的效果,邻域均值滤波在消除 FPN 的同时也可以对随机噪声进行平滑,提高图像的信噪比,但不足之处是此方法会丧失图像的高频信息,使得图像边缘细节模糊。还有学者提出基于神经网络^[6]的固定模式噪声校正算法,此方法在很大程度上可以消除 FPN 噪声,但是运算较为复杂。为此,文中提出了一种有效且简单可行的 CFPN 校正方法,该方法首先在计算机上完成对一组数据样本的计算,以得到图像序列的 CFPN 估计结果,然后将此估计结果直接应用于 CMOS 图像采集系统来消除 CFPN。文中首先介绍了 CMOS CFPN 产生的机理及其组成,接着提出了一种基于估计方法的 CFPN 校正方法,最后对该方法进行了实验并对实验结果进行了分析。

1 有源 CMOS 图像传感器的固定模式噪声

固定模式噪声通常用均匀光照条件下单个像素输出信号的变化表示。它产生的主要原因是由像素结构中的光电二极管的尺寸、掺杂浓度、生产过程中的沾污以及 MOS 场效应管的参数(V_T 、增益、沟道

宽度、长度等)的偏差等造成的。之所以称其为“固定”模式噪声,是因为对于给定的单个像素它是固定的,可是对于不同的像素它又是不同的。FPN 包括像素 FPN 和列 FPN,而像素 FPN 又包括失调 FPN 和增益 FPN 两部分。

图 1 所示为 Onsemi 公司的有源 CMOS 图像传感器 IBIS5-1300 的结构框图及其 4T 像素结构示意图。其中 M1、M2、M3 和光电二极管组成一个基本的像素结构, M4 是像素内放大器 M3 的负载,为同一列像素共用。Column amplifier 是列放大器, output amplifier 是模拟输出放大器。在图 1 所示的 IBIS5-1300 信号传输路径上不可避免地存在这两种 FPN。由于加工工艺等因素影响,各个像素中的光电二极管的响应灵敏度和晶体管 M1、M2 的阈值电压并不完全相同,导致在同一光照条件下,像素输出电压也不尽相同,这就是 FPN 的主要来源,它们在图像中表现为雪花点。CFPN 主要是由于不同列的列放大器内部晶体管阈值电压和自身偏置电压不同造成的^[7],它在图像中表现为垂直条纹,如图 2 所示。CFPN 随着图像传感器制造的完成在 CMOS 中确定下来,通

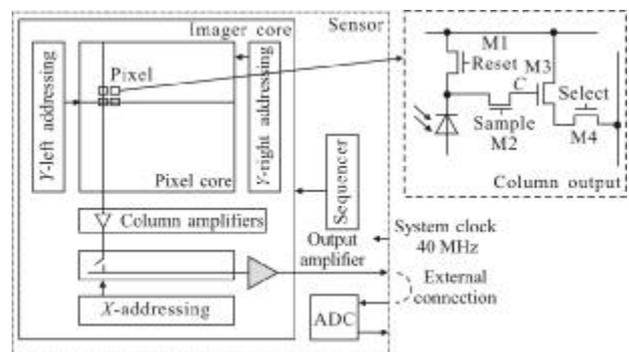


图 1 IBIS5-1300 图像传感器结构框图及 4T 像素结构图
Fig.1 Block diagram of IBIS5-1300 image sensor and the 4T pixel architecture

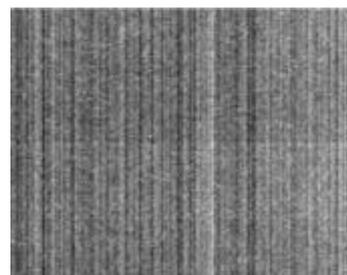


图 2 原始图像中存在的典型 CFPN
Fig.2 Typical CFPN in the raw image

过同一路径产生的 CFPN 是相同的^[8],不同列的 CFPN 是不同的。这两种 FPN 都会造成图像质量大幅度下降,但是对图像影响最为严重的还是人眼比较敏感的垂直条纹噪声。通常对 FPN 处理措施是通过相关双采样^[9]来降低 FPN,但是 ISIB5-1300 没有在像素内设计 CDS 电路来抑制 FPN,所以其 FPN 较为明显。

2 基于估计方法的 CFPN 校正方法

对于给定的 M×N 有源 CMOS 图像传感器,假定图像每一像素点在同一光辐射条件下的响应是不相关的,像素输出可以表示为:

$$y_{m,n}(t) = x_{m,n}(t) + \eta_{m,n}(t) + \chi_{m,n}(t) \quad (1)$$

式中: $x_{m,n}(t)$, $0 \leq m \leq M, 0 \leq n \leq N$ 表示曝光时间为 t 的图像的第 m 行第 n 列不含噪声像素灰度值, $\chi_{m,n}(t)$ 代表图像中除 CFPN 外的其他随机噪声值总和, $\eta_{m,n}(t)$ 为图像的 CFPN。假设 η 和 χ 分别为服从 $N(\mu_1, \sigma_1^2)$ 和 $N(\mu_2, \sigma_2^2)$ 的不相关变量。文中只考虑 CFPN 的校正,为此首先要估算 CFPN 然后将其从图像中去除,此过程可以表示为:

$$y_{m,n}'(t) = y_{m,n}(t) - \eta_{m,n}'(t) \quad (2)$$

式中: $y_{m,n}'(t)$ 为图像像素 $y_{m,n}(t)$ 去除 CFPN 后的近似像素值; $\eta_{m,n}'(t)$ 是完成估算过程对 CFPN $\eta_{m,n}(t)$ 的近似表示。

基于估计方法的 CFPN 校正方法必须保证 CFPN 估计结果 $\eta_{m,n}'(t)$ 的有效性和准确性,需要对成像系统进行多次采样。基于估计方法的 CFPN 校正系统结构框图如图 3 所示。

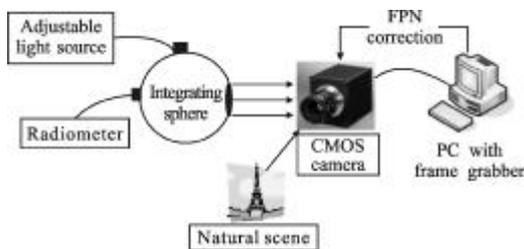


图 3 CFPN 校正系统结构框图

Fig.3 CFPN correction system block diagram

2.1 样本数据的获取

理想情况下,从积分球辐射的均匀平行光束通过透镜在 CMOS 图像传感器靶面成像后,理论上图

像在各像素点的灰度值是一致的。但是由于各种噪声的存在以及各像素点加工工艺之间的差异,造成各像素点的值不完全相同。在图 3 所示的 CFPN 校正系统中,只考虑 CFPN 对图像的影响,通过控制相机的曝光时间参数来获取一组相同曝光时间 T_e 、相同测试条件的图像序列。为表述方便,将采集的 K 幅图像序列记为: $Y_1(T_e), Y_2(T_e), \dots, Y_K(T_e)$, 这组图像就是进行 CFPN 校正所需的相互独立的数据样本。相应地,对于图像序列中任一图像 $Y_k(T_e)$, 公式(1)和公式(2)可以表示为:

$$Y_k(T_e) = X_k(T_e) + \eta(T_e) + \chi_k(T_e), 1 \leq k \leq K \quad (3)$$

$$Y_k'(T_e) = Y_k(T_e) - \eta'(T_e) \quad (4)$$

2.2 CFPN 估计及 CFPN 校正

对于样本中任一图像 $Y_k(T_e)$, 定义 $Y_k(C_1, C_2, \dots, C_N, T_e) = \text{mean}(Y_k(T_e))$ 为 $Y_k(T_e)$ 的列均值向量,特别地, C_n 为图像第 n 列的均值。为方便表示,记 $C = C_1, C_2, \dots, C_N$ 。则整个图像序列的列均值向量可以表示如下式所示:

$$Y(C, T_e) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Y_k(C, T_e) \quad (5)$$

由于图像中心能量较强,边缘部分能量相对较弱,所以 $Y(C, T_e)$ 表现为一条上下波动的折线与一条近似平滑曲线的叠加,如图 4 所示。这个上下波动的折线就是 CFPN,它服从均值为 μ_1 , 方差为 σ_1^2/K 的正态分布。

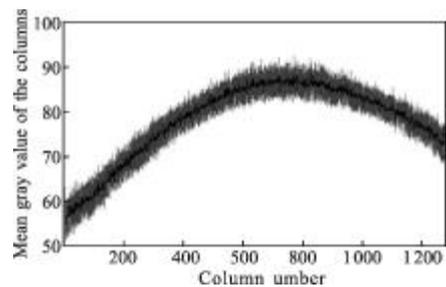


图 4 图像列平均灰度值

Fig.4 Mean gray value of the image columns

由此可以构造一个新的向量 $Y(C', T_e)$ 来表示这条不含 CFPN 的较为平滑的曲线,如图 5 所示。 $Y(C', T_e)$ 每一分量可以由下式得到:

$$C_n' = (C_{n-1} + C_n) / 2 \quad (6)$$

那么图像 $Y_k(T_e)$ 列均值向量与向量 $Y(C', T_e)$ 的差值向量可定义为:

$$D_k(C, T_e) = Y_k(C, T_e) - Y(C, T_e) \quad (7)$$

$$D(C, T_e) = \text{ceil} \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K D_k(C, T_e) \right) \quad (8)$$

式中:ceil 表示朝正无穷大方向取整。

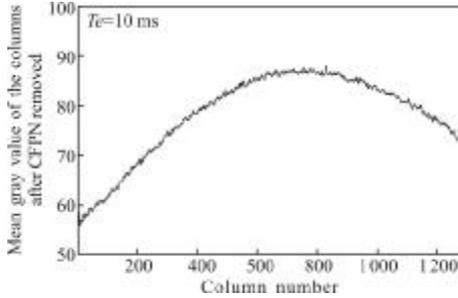


图 5 CFPN 校正后图像列平均灰度值

Fig.5 Mean gray value of the columns after CFPN removed

$D(C, T_e)$ 即为相机在曝光时间为 T_e 时图像的 CFPN 的估计结果,如图 6 所示。

$$\eta'(T_e) = D(C, T_e) \quad (9)$$

考虑到图像的灰度值范围(0-255),不能直接将公式(8)代入公式(2)进行 CFPN 校正,需要对校正过程进行约束,如下式所示:

$$y_{m,n}'(t) = \begin{cases} y_{m,n}(t) - \eta'_{m,n}(t), & \lambda_1 \leq y_{m,n}(t) \leq \lambda_2 \\ y_{m,n}(t), & y_{m,n}(t) < \lambda_1, y_{m,n}(t) > \lambda_2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: λ_1 和 λ_2 分别为校正过程中的下阈值和上阈值。

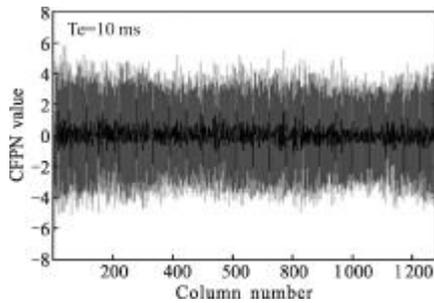


图 6 CFPN 估计结果

Fig.6 Estimation result of the CFPN

3 实验结果及分析

实验中采用Onsemi公司的有源 CMOS 图像传感器 IBIS5-1300 作为实验对象,依照图 3 所示系统进行图像采集并对 CFPN 进行估计。由于 CFPN 的估计过程运算量大,所以在 MATLAB 仿真环境下对 CFPN 进行估计。然后将估计结果直接应用于 CMOS 硬件成像系统进行 CFPN 校正,图像 CFPN 校正使用 VHDL 语言编写并在 FPGA 中使用查找表方法实现。

实验中采集的图像为 1280×1024,8 位灰度图像,图像样本长度 $K=100$ 。实验过程中将文中提出的 CFPN 校正算法与理想低通滤波算法和邻域均值滤波(4×4)算法进行比较,实验结果如图 7 和图 8 所示,为了便于对各种算法的 CFPN 校正结果进行评价,对局部图像细节进行突出显示。图 7 为曝光时间为 $T_e=10\text{ms}$ 的图像及其 CFPN 校正结果,图 8 为 $T_e=20\text{ms}$ 的图像及其 CFPN 校正结果。通过实验结果及其细节图可以发现理想低通滤波方法并不能完全消除 CFPN,而且会造成图像边缘细节信息丢失;邻域平均方法可以有效去除 CFPN,但是也会使图像边缘模糊。文中提出的 CFPN 校正方法处理效果明显,不会造成图像高频信息丢失,同时算法简单易行,在硬件系统上实现简单。由公式(6)可知,该方法中该操作过程相当于一个水平方向 2 邻域均值滤波器,该滤波器对像素 FPN 以及随机噪声等均具有一定程度的滤除效果。

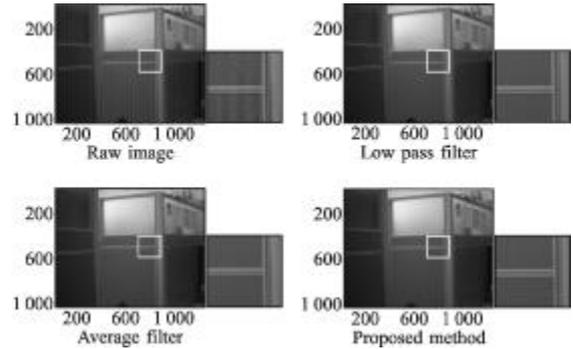


图 7 曝光时间 $T_e=10\text{ms}$ 的原始图像及使用不同方法进行 CFPN 校正后的结果

Fig.7 Raw image and CFPN correction results using different methods with exposure time $T_e=10\text{ms}$

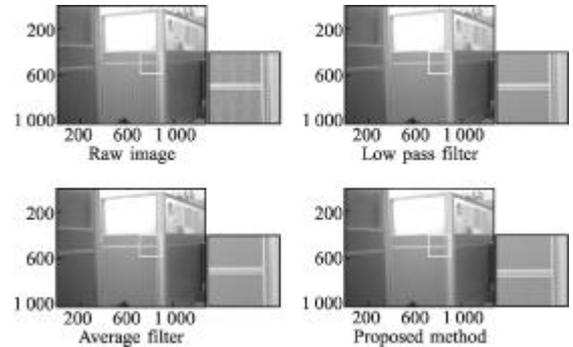


图 8 曝光时间 $T_e=20\text{ms}$ 的原始图像及使用不同方法进行 CFPN 校正后的结果

Fig.8 Raw image and CFPN correction results using different methods with exposure time $T_e=20\text{ms}$

4 结论

文中针对人眼比较敏感的列固定模式噪声,建立了一个列固定模式噪声估计模型,并将CFPN估计结果在该CMOS图像采集硬件系统中实现以去除列固定模式噪声。实验结果表明,与低通滤波和邻域均值滤波相比,该方法可以有效去除列固定模式噪声,并且不会造成图像边缘细节丢失。该方法CFPN估计结果硬件移植性强,在硬件系统中可以通过查找表的方法实现。但是随着使用时间增长、器件老化、使用环境变化等因素的影响,CMOS图像传感器的列固定模式噪声可能会随之发生未知变化,所以在后续工作中需要对系统进行自适应建模来消除列固定模式噪声。

参考文献:

- [1] Zhou Yanping, Wang Xiaoming, Chang Guolong, et al. Radiation experiment of CMOS image sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1270-1273. (in Chinese)
周彦平, 王小明, 常国龙, 等. CMOS图像传感器的辐射实验[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1270-1273.
- [2] Mendis S K, Kemeny S E, Gee R C, et al. CMOS active pixel image sensors for highly integrated imaging systems[J]. *IEEE J Solid State Circuits*, 1997, 32: 187-197.
- [3] Zarnowski T, Vogelsong T, Zarnowski J. Inexpensive image sensors challenge CCD supremacy[J]. *Photon Spectra*, 2000, 34: 88-192.
- [4] Xu Jianming, Buon Nguyen. CMOS image sensor based X-Ray detector noise characterization and its fixed pattern noise correction method [C]//*Medical Imaging 2011: Physics of Medical Imaging*, 2011, 7961.
- [5] O Yadid Pecht, R Etienne Cummings. CMOS imagers: from photo transduction to image processing Boston [D]. MA: Kluwer, 2004.
- [6] Chen Baoguo, Zhang Xuefeng, Niu Yingyu. Improved nonuniformity correction algorithm based on neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 574-578. (in Chinese)
陈宝国, 张学锋, 牛英宇. 改进的基于神经网络的非均匀性校正算法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 574-578.
- [7] Stephen O Otim, Bhaskar Choubey, Dileepan Joseph, et al. Characterization and simple fixed pattern noise correction in wide dynamic range "Logarithmic" imagers [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56: 1910-1916.
- [8] Jan Lukáš, Jessica Fridrich, Miroslav Goljan. Digital camera identification from sensor pattern noise[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2006, 1: 205-214.
- [9] Jiang Junwei, Zhao Yiqiang, Meng Fanzhong, et al. High performance readout integrated circuit for IR detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38 (5): 787-791. (in Chinese)
姜俊伟, 赵毅强, 孟范忠, 等. 红外探测器高性能读出电路的研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5): 787-791.