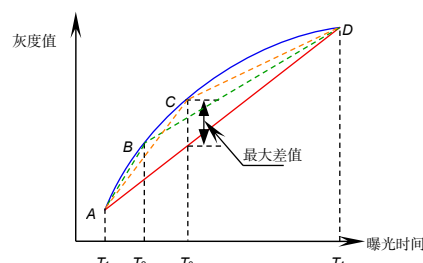


DOI: 10.12086/oe.2021.210036

基于自适应多点法的 sCMOS 实时非均匀性校正

张 涛^{1,2,3}, 李新阳^{1*}, 李剑峰², 徐 稚³¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;²电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 610054;³中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216

摘要: 为改善 sCMOS 读出电路工艺偏差导致的非均匀性问题, 本文提出了自适应多点非均匀性校正方法。算法首先以搜寻最小范数点、阈值比较的方式分别确定最优分段点的位置以及最佳分段数量, 然后再根据这些分段信息在各区间段分别进行两点校正。通过该自适应方法可有效改善传统多点法中由于分段参数选择不当导致的校正性能下降。同时, 为实现实时的非均匀性校正, 文中根据自适应多点法的算法特点, 提出了一种与之匹配的嵌入式数据串流校正方案, 可在不影响现有相机采集结构以及采集速率的情况下实现非均匀性的校正。

关键词: 非均匀性; 多点法; 自适应; 实时处理

中图分类号: TN36

文献标志码: A

张涛, 李新阳, 李剑峰, 等. 基于自适应多点法的 sCMOS 实时非均匀性校正[J]. 光电工程, 2021, 48(5): 210036
 Zhang T, Li X Y, Li J F, et al. sCMOS real-time nonuniformity correction based on adaptive multipoint method[J]. Opto-Electron Eng, 2021, 48(5): 210036

sCMOS real-time nonuniformity correction based on adaptive multipoint method

Zhang Tao^{1,2,3}, Li Xinyang^{1*}, Li Jianfeng², Xu Zhi³¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;²School of Optoelectronics Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;³Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China

Abstract: In order to improve the nonuniformity caused by the process bias of sCMOS readout circuit, an adaptive multipoint nonuniformity correction method is presented. The algorithm first determines the location of the optimal segment point and the optimal number of segments by searching for the minimum norm point and threshold comparison, then corrects two points in each interval segment according to the segment information. This adaptive method can effectively improve the correction performance of traditional multipoint methods, which is caused by improper selection of segment parameters. At the same time, in order to achieve real-time non-uniformity correction, a matching embedded data series correction scheme is proposed based on the algorithm characteristics of adaptive

收稿日期: 2021-01-26; 收到修改稿日期: 2021-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11573066); 云南省基础研究计划(2019FA001)

作者简介: 张涛(1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光电探测器设计, 信号处理方面的研究。E-mail: ztao@ynao.ac.cn

通信作者: 李新阳(1971-), 男, 博士, 研究员, 主要从事信号与信息处理的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

multipoint method, which can achieve non-uniformity correction without affecting the existing camera acquisition structure and acquisition rate.

Keywords: non-uniformity; multipoint; adaptive; real-time processing

1 引言

随着半导体工艺的发展, CMOS 图像传感器的性能得到了很大进步, 特别是同时融入了 CCD、CMOS 优势工艺的 sCMOS 图像传感器, 其不仅具备 CCD 的低噪声、高动态、高灵敏度的特点, 还具备 CMOS 高读出速率、高集成度、高性价比的特点。基于以上优势, sCMOS 在各科研领域迎来了广泛使用。稍显遗憾的是, sCMOS 在继承 CMOS 传统优点的同时, 也延续了 CMOS 的缺点, 即存在明显的非均匀性。CMOS 非均匀性的成因, 主要由于 CMOS 每一列像元共用一个列放大器所致, 如图 1 所示。

由于工艺的原因, 列放大器之间会存一定程度的放大倍率的偏差, 即便相同的输入信号也会得到不同的输出。在均匀光照下, 图像上会表现出明显的固定图形噪声, 如图 2 所示。sCMOS 在此问题上表现得更为明显, 严重影响其成像的效果。实际应用中为了提升 sCMOS 成像的质量大多会采用各种非均匀性校正方法来改善其成像质量。

非均匀校正的方法可分为两大类:

1) 基于定标的方法

典型的方法有两点校正法^[1-3]、分段校正法、多项式拟合法^[4-5]等。

2) 基于场景的方法

典型的方法有矩匹配法^[6]、时域高通滤波法^[7-10]、小波法^[11-13]、变分法^[14-17]、神经网络法^[18]、深度机器学习法^[19]等。

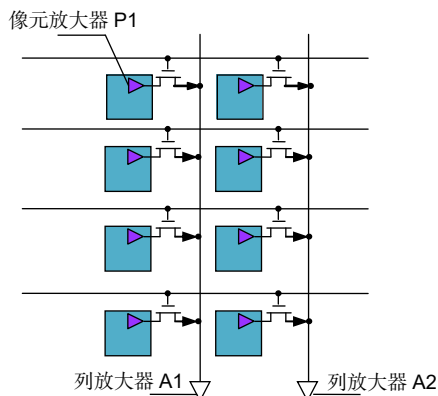


图 1 CMOS 读出结构

Fig. 1 CMOS readout architecture

在对非均匀性处理具有实时性要求的场景中, 基于定标的方法是较为简单有效的方法, 基于场景的方法尽管也能取得很好的效果, 但是由于计算量大实时性不佳, 不适合移植到硬件处理单元中。定标法中的多项式拟合法可以取得较好的效果, 但由于涉及的参数较多并且计算过程相对复杂, 一般不适合应用于嵌入式系统中。单点法计算最为简单, 但在偏离标定点稍远处会产生较大的误差。两点法计算过程简单, 且校正效果远优于单点法, 是目前研究最多的方法。例如, 2006 年徐文文等人^[20]将两点校正算法移植到 FPGA 中实现了非均匀性的实时校正。为改善两点法的温漂问题; 2011 年吕雷等人^[21]不仅在 FPGA 上实现了两点法, 还结合特殊的挡片结构周期性检测温漂情况, 动态更新校正参数, 进一步提高了两点法的稳定性。然而, 两点法要取得较好效果的前提是: 像元的光电响应曲线有较好的线性度, 以及像元参数不存在温漂和时漂。然而事实上 CMOS 或者 sCMOS 均存在一定程度上的非线性, 如图 3 所示。

为改善非线性导致的校正精度下降, 也有学者尝试在嵌入式中实现多项式校正, 例如, 2016 年程旺等人^[22]在 FPGA 上实现了基于二阶多项式的非均匀性校正; 2019 年夏侯耀涛等人^[23]提出了改进型的二阶多项式非均匀性校正方法, 以及该方法在 FPGA 上的实现方案。尽管多项式的方法的确可以提高校正精度, 但由于计算过程复杂, 不适合使用在对校正帧率有要求的应用中。相较于多项式法, 多点法兼具两点法的校

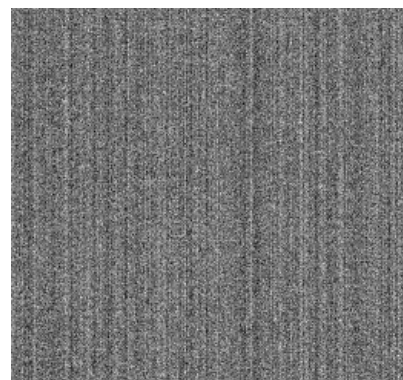


图 2 固定图形噪声

Fig. 2 Fixed pattern noise

正效率以及多项式法的校正精度, 在对校正精度和速率均有要求的工程应用中被广泛使用。原理上, 多点校正法是一种通过多个线性段来近似逼近曲线, 然后在各个线性段分别采用两点法将其校正到参考直线来实现非均匀性校正的方法。对于多点校正法来说, 不同分段点位置(如图 4 中的 T_2 , T_3)的选择以及分段数量的选择是非常关键的, 它直接影响着校正结果的好坏。

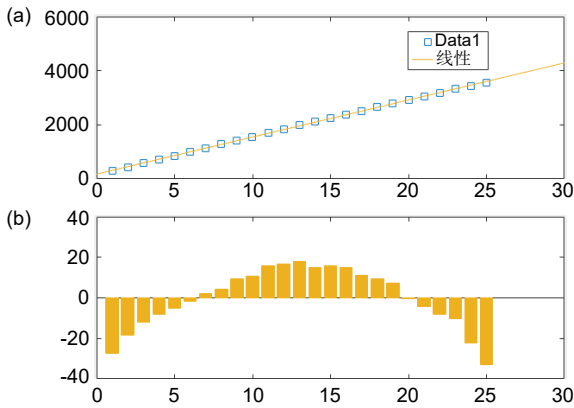


图 3 Andor Zyla sCMOS 相机非线性示意图。

(a) 纵坐标为灰度值; (b) 纵坐标为残差值。

横坐标都为曝光时间

Fig. 3 Nonlinear diagram of the Andor Zyla sCMOS camera. (a) The vertical coordinates are gray values; (b) The vertical coordinates are residual values. The horizontal coordinates are exposure times

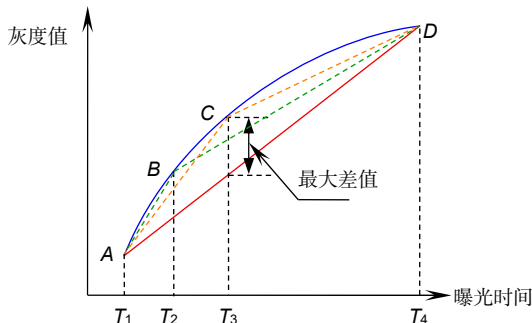


图 4 多点校正法示意图

Fig. 4 Multipoint correction diagram

2 算法

本文将采用一种自适应的方法来自动获取最优的分段点位置和分段数量, 具体的方法如下。

2.1 非均匀性校正

理论上来说, 描述两条曲线的相似程度可以通过二范数来描述, 即 $\Delta = \|P(T) - L(T)\|_2$, 其中 $P(T)$ 表示图 4 中的蓝色非线性曲线 $\widehat{AD}$, $L(T)$ 表示各个线性段, 例如黄色线性段: $\overline{AB} + \overline{BD}$ 或者绿色线性段

$\overline{AC} + \overline{CD}$ 。

2.2 分段点的选择

从数学上可以证明选择弧线 $\widehat{AD}$ 与弦 $\overline{AD}$ 之间最大值 $\max_{t=T_1:T_2} \{\text{abs}(\widehat{AD}(t) - \overline{AD}(t))\}$ 的时候所对应的时间点

T 作为分段点(例如图 4 中的 T_3 点)时, $\overline{AC} + \overline{CD}$ 与 $\widehat{AD}$ 之间有最小的范式距离 Δ 。基于上述原理, 可知 T_3 相较于 T_2 是更优的分段点。照此决策可完成第一个分段点的选择和第二个分段点的选择。使用相同的方法分别寻找 $\max_{t=T_1:T_3} \{\text{abs}(\widehat{AC}(t) - \overline{AC}(t))\}$ 和

$\max_{t=T_3:T_4} \{\text{abs}(\widehat{CD}(t) - \overline{CD}(t))\}$ 最大值所对应的分段点 T_5 、

T_6 , 然后再判断 $\text{abs}(\widehat{AC}(T_5) - \overline{AC}(T_5))$ 和 $\text{abs}(\widehat{CD}(T_6) - \overline{CD}(T_6))$ 两个数值谁更大, 进而选择 T_5 或者 T_6 作为第三个分段点。

2.3 分段数量的选择

上文描述了分段点的选择方法, 何时停止分段点的计算, 可通过阈值法的方式做出判断。具体流程如下: 首先计算 $\Delta_1 = \|P(T_1:T_{\text{end}}) - L(T_1:T_{\text{end}})\|_2$, 其中 $P(T_1:T_{\text{end}})$ 为弧线段, $L(T_1:T_{\text{end}})$ 为端点线段, 如图 4 中的 $\widehat{AD}$ 和 $\overline{AD}$ 。然后再计算 $\Delta_2 = \|P(T_1:T_{\text{end}}) - [L_1(T_1:T_a)L_2(T_a:T_b)\dots L_n(T_x:T_{\text{end}})]\|_2$, 其中的 L_n 为各子线段。如 $\Delta_2 < \Delta_1 \cdot T_{\text{thr}}$, 则停止分段点的搜寻, 其中 T_{thr} 为停止阈值, 可根据实际需求设置。

2.4 数据校正

在确定了各线性段以后, 需将各像元的各线性段分别校正到统一参考直线 $Y_{\text{ref}}(T)$ 上。统一参考直线可通过线性拟合多个全局平均灰度值 $Y(T)$ 来获得, 其中 $Y(T)$ 的定义如下:

$$Y(T) = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1:N, j=1:M} Y(i, j, T),$$

其中: $T \in [T_1, T_2, \dots, T_N]$, N, M 分别是相机靶面的垂直方向上的像元数以及水平方向上的像元数。 $Y(i, j, T)$ 为相机第 i 行, 第 j 列处的像元曝光 T 秒后的灰度值。各子线段向参考直线调整的过程使用两点校正法, 基本原理如图 5 所示。

将直线 $Y(i, j, T)$ 调整到 $Y_{\text{ref}}(T)$, 只需要对直线 $Y(i, j, T)$ 的斜率 G 和偏置量 B 做出调整, 如下:

$$Y_{\text{ref}}(T) = G \cdot Y(i, j, T) + B. \quad (1)$$

调整系数的计算式:

$$G = \frac{Y_{\text{ref}}(T_b) - Y_{\text{ref}}(T_a)}{Y(i, j, T_b) - Y(i, j, T_a)}, \quad (2)$$

$$B = \frac{Y_{\text{ref}}(T_a)Y(i, j, T_b) - Y_{\text{ref}}(T_b)Y(i, j, T_a)}{Y(i, j, T_b) - Y(i, j, T_a)}, \quad (3)$$

其中: $Y(i, j, T)$ 表示位于相机靶面第 i 行, 第 j 列位置处的像元在曝光 T 时的灰度值, $Y_{\text{ref}}(T)$ 为参考直线上曝光时间为 T 时的灰度值, 该直线是通过最小二乘法线性拟合各个曝光时间点的全局平均灰度值的方式得到。最后, 以类似的方法调整各个像元的各线性段到统一参考曲线。整个流程如图 6 所示。

2.5 性能测试

为了评价校正结果的优劣, 一般采用光电响应不均匀性 PRUN(photo response non-uniformity)来评

价:

$$N_{\text{non-uni}} = \frac{1}{\bar{I}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (I(i, j) - \bar{I})^2}{N \cdot M}}, \quad (4)$$

其中: (i, j) 为像元的行列位置, $I(i, j)$ 为 (i, j) 位置处像元的灰度值。 $\bar{I}$ 为所有像元的平均值。 N, M 为图像传感器有效靶面的像元行数和像元列数。

以下性能测试过程中试验环境参数为积分球光源电压为 7.8 V, 电流为 5.8 A(恒流源); 相机的曝光时间 90 ms。

图 7 为各种方法非均匀性曲线, 可以看出, 自适应多点法和均分多点法都可以取得很好的效果。由于

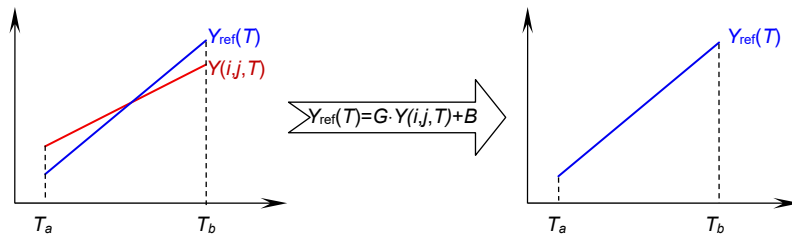


图 5 两点校正法原理

Fig. 5 Two point correction principle

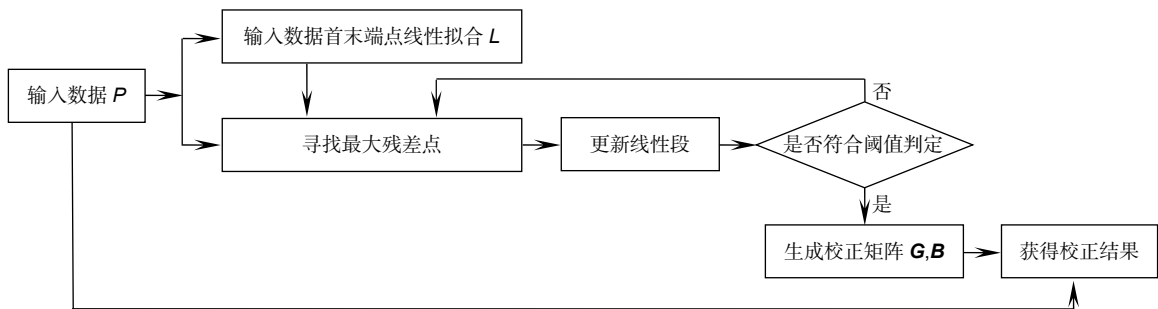


图 6 流程图

Fig. 6 Flow chart

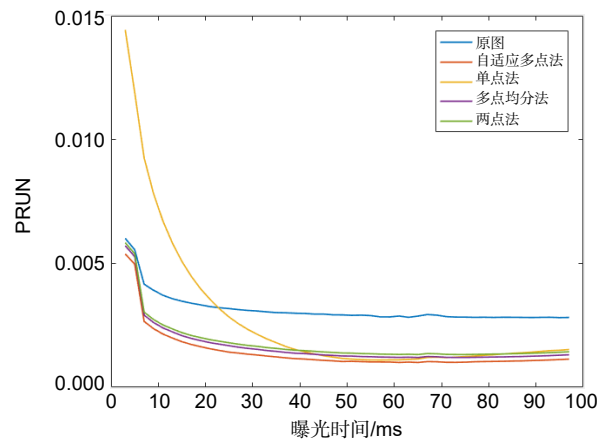


图 7 各种方法的非均匀性曲线

Fig. 7 Nonuniformity curves of various methods

自适应多点法选取的分段点更为合适, 因此从曲线的结果上来看自适应方法效果更优一些。单点法在前半段效果很差, 主要是由于我们为单点法选取的标定点是曝光时间为 50 ms 的地方, 曝光大于 50 ms 的地方光电响应曲线斜率较为近似, 因此此处校正效果相对较好。

图 8 为 90 ms 曝光时各方法校正结果, 噪声图像

经过单点法校正后依然有明显的非均匀性噪声。两点法校正后在条纹较宽的地方仍有少量噪声残留。经过均分多点法校正后(本试验采用的是 4 点均分)效果优于两点法, 但在局部地方仍有微弱噪声残留。经过自适应多点法校正后, 图像均匀一致, 视觉效果优于上述几种方法。图 9 列均值曲线, 可以发现, 由于非均匀性噪声的存在, 噪声图像的每列平均值发生剧烈震

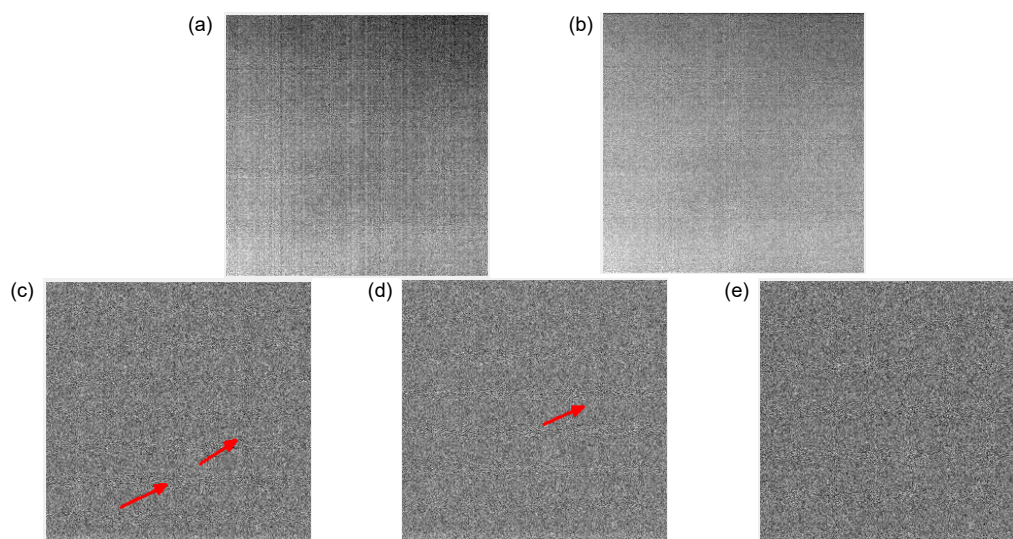


图 8 90 ms 曝光时各方法校正结果。

(a) 原图; (b) 单点校正; (c) 两点校正; (d) 均分多点校正; (e) 自适应多点校正

Fig. 8 Correction results of each method at 90 ms exposure. (a) Original image; (b) Single-point correction; (c) Two-point correction; (d) Equate multipoint correction; (e) Adaptive multipoint correction

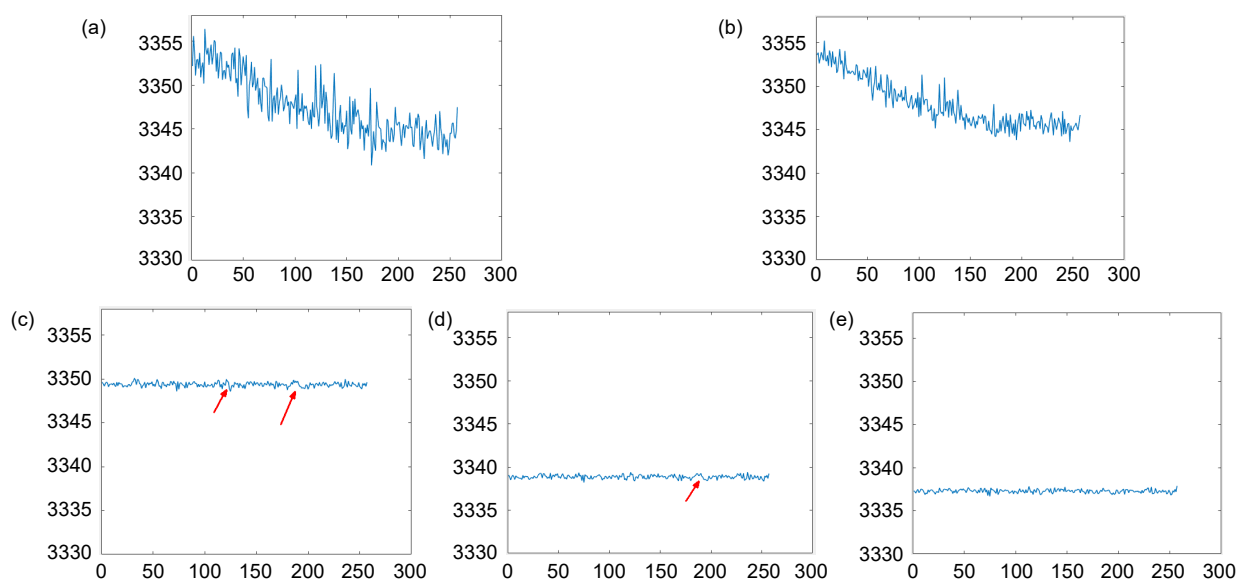


图 9 列均值曲线。x 横坐标为列编号, y 纵坐标为当前列的平均值。

(a) 原图; (b) 单点校正; (c) 两点校正; (d) 均分多点校正; (e) 自适应多点校正

Fig. 9 Column average value curve. The x-coordinate is the column number, and the y-coordinate is the average of the current column. (a) Original image; (b) Single-point correction;

(c) Two-point correction; (d) Equate multipoint correction; (e) Adaptive multipoint correction

荡, 经过单点法校正以后, 震荡的幅度得到抑制, 但图像依然不均匀, 列与列之间的幅值依然有很大的差异; 经过两点校正后不论是噪声波动的幅度以及列与列之间的幅值差异得到极大改善, 但在个别位置依然存在由于校正精度不高导致的小幅波动。经过 4 点均分校正后噪声起伏进一步降低, 但在个别位置依然存在校正精度不够的情况。经过自适应多点校正法(也是 4 个分段点)后, 可以看到列均值曲线均匀一致方面, 相对于其他方法有较好的改善效果。

3 硬件实现方案

对于相机的终端用户, 并不能去修改相机的内部设计。对于相机数据中的非均匀性改善只能通过软件后期处理或者基于硬件的实时处理的方式进行。软件后期处理的方式一般适用于对实时性没有要求的场景, 而那些对实时性要求较高的场景, 基于硬件的非均匀校正方式更为合适。本文硬件设计方案是: 将一个嵌入式硬件处理单元串连在相机与采集电脑之间,

在相机数据流过处理单元的时候完成非均匀性校正, 具体结构如图 10 所示。整个硬件系统的工作流程是: 图 10 中的 Andor 相机(分辨率 $2k \times 2k$, 帧率 100 帧/秒)通过其 CameraLink 数据接口输出数据, 在处理单元中首先转换来自相机的串行数据到并行数据然后在嵌入式单元中进行非均匀校正, 校正完成以后再次将结果数据转换成 CameraLink 接口数据输出到采集计算机。在这样的工作方式下, 嵌入式数据单元对于后面的相机数据采集系统来说是无感的, 对原来的采集软件和系统均无需做出调整。嵌入式处理单元的内部逻辑是: 经过第 2.4 节的介绍, 可以获取每个像元的数据校正矩阵 G , B , 由于采用的是多点校正法, 会存在一个像元拥有多个校正区间的情况, 需要判断当前的校正数据处于哪一个校正期间, 并且调用与该期间相对应的 G 和 B 。图 10 中的期间判断单元就是完成这一工作。时序逻辑单元根据期间判断单元的判断结果, 再结合行列的计数值就可以从增益矩阵和偏置矩阵中通过查表的方式获取合适的校正参数, 并在乘法器和加法器

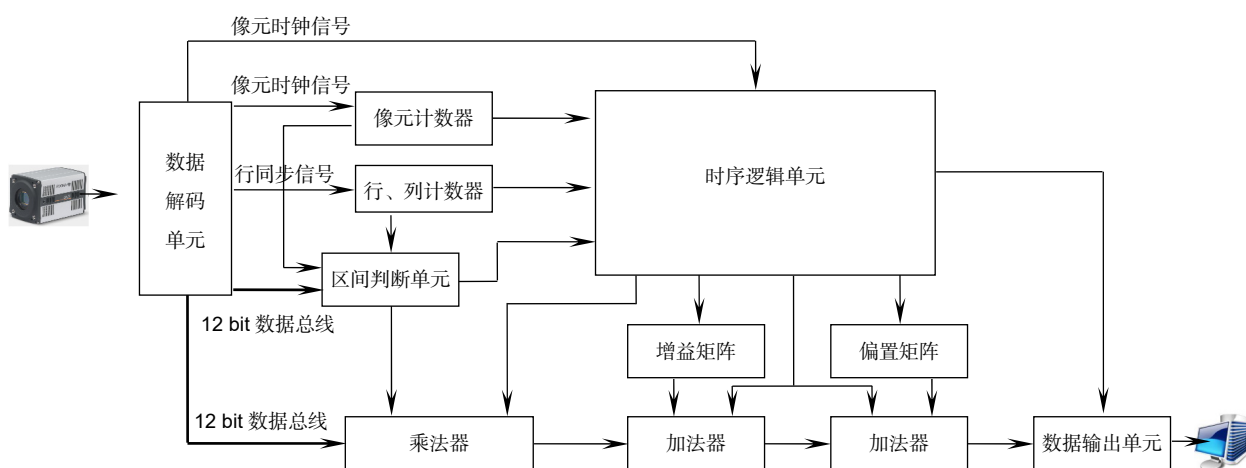


图 10 实时嵌入式处理单元结构图

Fig. 10 Structure diagram of the real-time embedded processing unit

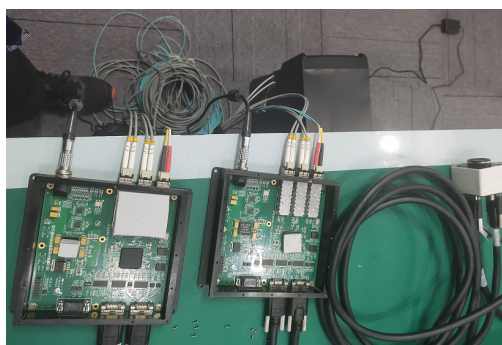


图 11 嵌入式处理单元实物

Fig. 11 Object of the embedded processing unit

的配合下实现 $Y_{\text{ref}}(T) = G \cdot Y(i, j, T) + B$ 的运算。尽管多点校正法相对于单点、两点法拥有更多的计算量, 但对本系统选用的 FPGA(ARTIX-7)完全可以提供足够的算力来完成实时校正。

4 结 论

通过自适应多点校正法, 不仅可以获取多点校正法的优点, 还可以避免因分段点选择不当导致的校正性能下降。经过实际测试, 该方法有效改善了 Andor Zyla 的 sCMOS 相机的均匀度, 均匀度从原有的 3‰ 提高到 1‰。然而, 在实验中发现, 随着相机的老化以及工作环境的变换会存在校正数据的失效问题, 为维持性能需要定期完成校正数据的更新, 这也是目前所有定标法需要面对的一大问题。接下来将尝试在嵌入式系统中添加温漂模型, 然后将相机传感器温度代入模型的方式来获取补偿量, 进而实现校正参数的动态修正, 以改善校正参数失效的问题。

参考文献

- [1] Han K L, He C F. A nonuniformity correction algorithm for IRFPAs based on two points and its realization by DSP[J]. *Infrared Technol*, 2007, **29**(9): 541–544.
韩开亮, 何春芳. 基于两点法的红外图像非均匀性校正算法及其 DSP 实现[J]. *红外技术*, 2007, **29**(9): 541–544.
- [2] Xing S, Zhang J, Sun L, et al. Two-point nonuniformity correction based on LMS[C]//*Infrared Components and Their Applications. International Society for Optics and Photonics*, 2005, **5640**: 130–136.
- [3] Wang H W, Ma C W, Cao J Z, et al. An adaptive two-point non-uniformity correction algorithm based on shutter and its implementation[C]//*Proceedings of 2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2013: 174–177.
- [4] Li Y X, Sun D X, Liu Y N. Polynomial fitting based on nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *Laser Infrared*, 2005, **35**(2): 104–107.
李言旭, 孙德新, 刘银年. 基于多项式拟合的红外焦平面非均匀性校正[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(2): 104–107.
- [5] Huang Y D, An J B. A nonuniformity correction algorithm for IRFPA based on improved polynomial fitting[J]. *Infrared*, 2011, **32**(3): 29–33.
黄英东, 安建波. 基于改进多项式拟合的红外焦平面非均匀性校正方法[J]. *红外*, 2011, **32**(3): 29–33.
- [6] Gadallah F L, Csillag F, Smith E J M. Destriping multisensor imagery with moment matching[J]. *Int J Remote Sens*, 2000, **21**(12): 2505–2511.
- [7] Qian R D, Zhao D, Zhou H X, et al. Non-uniformity correction algorithm based on weighted guided filter and temporal high-pass filter[J]. *Infrared Laser Eng*, 2018, **47**(12): 1204001.
钱润达, 赵东, 周慧鑫, 等. 基于加权引导滤波与时域高通滤波的非均匀性校正算法[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(12): 1204001.
- [8] Scribner D A, Sarkady K A, Caulfield J T, et al. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques[J]. *Proc SPIE*, 1990, **1308**: 224–233.
- [9] Zhang S, Zhou H X, Niu X X, et al. Temporal high-pass filter nonuniformity correction algorithm based on non-local means filter for infrared focal plane array[J]. *Acta Photon Sin*, 2014, **43**(1): 0110003.
张爽, 周慧鑫, 牛肖雪, 等. 基于非局部均值滤波与时域高通滤波的非均匀性校正算法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 0110003.
- [10] Li J, Qin H L, Yan X, et al. Temporal-spatial nonlinear filter based non-uniformity correction method for IR image sequence[J]. *Acta Photon Sin*, 2015, **44**(4): 0410001.
李佳, 秦翰林, 延翔, 等. 时空域非线性滤波红外序列图像非均匀性校正[J]. *光子学报*, 2015, **44**(4): 0410001.
- [11] Münch B, Trtik P, Marone F, et al. Stripe and ring artifact removal with combined wavelet—Fourier filtering[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(10): 8567–8591.
- [12] Pande-Chhetri R, Abd-Elrahman A. De-striping hyperspectral imagery using wavelet transform and adaptive frequency domain filtering[J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2011, **66**(5): 620–636.
- [13] Feng Q L, Gong J H. Destriping remotely sensed data using anisotropic diffusion in wavelet domain[C]//*Proceedings of 2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology*, 2014.
- [14] Vera E, Meza P, Torres S. Total variation approach for adaptive nonuniformity correction in focal-plane arrays[J]. *Opt Lett*, 2011, **36**(2): 172–174.
- [15] Bouali M, Ladjal S. Toward optimal destriping of MODIS data using a unidirectional variational model[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, **49**(8): 2924–2935.
- [16] Zhou G, Fang H Z, Yan L X, et al. Removal of stripe noise with spatially adaptive unidirectional total variation[J]. *Optik*, 2014, **125**(12): 2756–2762.
- [17] Liu H, Zhang Z L, Liu S Y, et al. Destriping algorithm with L0 sparsity prior for remote sensing images[C]//*Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Image Processing*, 2015.
- [18] Celedón N, Redlich R, Figueroa M. FPGA-based neural network for nonuniformity correction on infrared focal plane arrays[C]//*Proceedings of 2012 15th Euromicro Conference on Digital System Design*, 2012: 193–200.
- [19] Vera E, Torres S. Fast adaptive nonuniformity correction for infrared focal-plane array detectors[J]. *EURASIP J Adv Signal Process*, 2005, **2005**(13): 560759.
- [20] Xu W W, Zhou J Y, Tang Z L, et al. Synthesis and non-uniformity correction of TDI-CCD multi-tap's imaging[J]. *Semicond Optoelectron*, 2009, **30**(1): 153–155.
徐文文, 周建勇, 唐遵烈, 等. TDI-CCD 多抽头图像合成及非均匀性校正[J]. *半导体光电*, 2009, **30**(1): 153–155.
- [21] Lü L, Zhang X F. Real-time infrared image nonuniformity correction base on FPGA[J]. *Laser Infrared*, 2011, **41**(6): 641–643.
吕雷, 张学峰. 基于 FPGA 的红外图像实时非均匀性校正[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(6): 641–643.
- [22] Cheng W, Lv Q B, Zhao N. Non-uniformity correction of scientific CMOS image sensor based on FPGA[J]. *Semicond Optoelectron*, 2016, **37**(6): 873–875, 889.
程旺, 吕群波, 赵娜. 基于 FPGA 的科学级 CMOS 图像传感器非均匀性校正[J]. *半导体光电*, 2016, **37**(6): 873–875, 889.
- [23] Xiahou Y T, Wang W P, Huang T. The real-time non-uniformity correction method on multichannel CMOS images based on FPGA[J]. *Electron Des Eng*, 2019, **27**(1): 184–188.
夏侯耀涛, 王万平, 黄涛. 基于 FPGA 的 CMOS 图像实时非均匀性校正方法[J]. *电子设计工程*, 2019, **27**(1): 184–188.

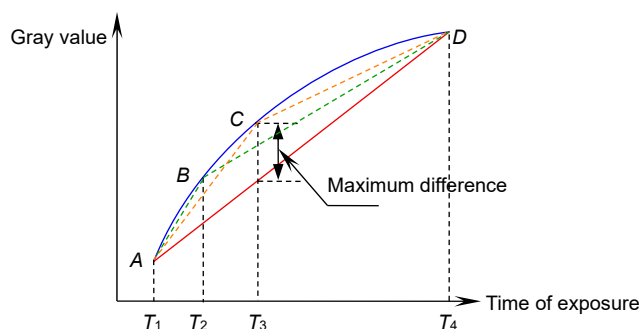
sCMOS real-time nonuniformity correction based on adaptive multipoint method

Zhang Tao^{1,2,3}, Li Xinyang^{1*}, Li Jianfeng², Xu Zhi³

¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²School of Optoelectronics Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

³Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China



Schematic diagram of the adaptive multipoint correction method

Overview: sCMOS is a photoelectric detection device widely used in scientific research field today. The parameter mismatch between the column amplifiers may occur due to its process, which leads to the nonuniformity problem. The methods for nonuniformity correction can be divided into scene-based and calibration-based methods. In the real-time application scenarios, the calibration-based multipoint nonuniformity correction method is widely used in engineering because of its simple calculation and high accuracy. However, the multipoint correction method has some difficulties in selecting the location and number of segments. The calibration-based adaptive multipoint correction method proposed in this paper can automatically obtain the optimal location and optimal number of segments by searching for the maximum error point and the number of segments closest to the accuracy threshold. This method can effectively avoid the degradation of the correction performance caused by improper selection of segment parameters in traditional multipoint methods. The basic principle is to search for the maximum error point between the non-linear photoelectric response curve of each pixel and the straight line composed of the first and last points as the basis for selecting the segment location, and to calculate the error accuracy of the segment as the basis for selecting the number of segments. After obtaining the segment points and the number of segments, the two-point method can be repeated for each linear segment to correct each segment straight line to the reference line, where the reference curve is obtained by fitting the global average point. Experimental results show that the sCMOS image processed by the adaptive multipoint correction method has better PRUN and more uniform and stable column mean curve than traditional single-point, two-point and average multipoint methods. For an image acquisition system where the acquisition software and the system structure are solidified, an embedded data series correction scheme is presented according to the characteristics of the adaptive multipoint method in order to achieve nonuniformity correction while maintaining the existing acquisition structure. By comparing the decoded data from the sCMOS camera with the lookup table, the offset and gain correction coefficients for the matching segment period and the corresponding period are determined. Subsequent multipliers and adders are used to correct the linear segment to the reference line using a two-point method. Finally, the corrected data is encoded and output in the original data format. With this scheme, a camera with a frame rate of 200 frames per second at the 2k×2k resolution used in the experiment can achieve real-time nonuniformity correction without changing the collection structure, acquisition rate and acquisition software of the existing camera.

Zhang T, Li X Y, Li J F, *et al.* sCMOS real-time nonuniformity correction based on adaptive multipoint method[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(5): 210036; DOI: 10.12086/oe.2021.210036

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11573066) and Yunnan Province Basic Research Plan (2019FA001)

* E-mail: xyli@ioe.ac.cn