

基于自适应移动窗口的 CMOS 图像非均匀性校正

王士伟^{1,2,3}, 张贵祥^{1,3*}, 徐伟^{1,3}, 吴永杰^{1,2,3}, 陶淑苹^{1,3}

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 100049;

³中国科学院天基动态快速光学成像技术重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 为保证航天遥感相机互补金属氧化物半导体 (CMOS) 图像传感器非均匀性校正的实时性, 降低图像的光响应非均匀度 (PRNU), 根据 COMS 图像传感器的结构特点, 提出了一种基于自适应移动窗口的 COMS 图像非均匀性校正方法。首先, 从工程应用角度出发, 采用可移动变步长窗口对图像进行分块, 使同一窗口内的多列像素共用一组校正参数。然后, 针对现有方法中线性拟合校正精度不足的问题, 基于 COMS 传感器的非线性响应特性用最小二乘法对响应曲线进行二阶拟合。实验结果表明, 本方法既能提升 COMS 图像的质量, 又能减少硬件系统的校正参数量。用本方法校正后的图像 PRNU 小于 1%, 相比线性拟合校正, 本方法的校正参数量减少了 23.7%。

关键词 图像处理; 可移动窗口; 非均匀性校正; 最小二乘法

中图分类号 TP751.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1401003

Adaptive Moving Window-Based Non-Uniformity Correction of CMOS Image

Wang Shiwei^{1,2,3}, Zhang Guixiang^{1,3*}, Xu Wei^{1,3}, Wu Yongjie^{1,2,3}, Tao Shuping^{1,3}

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Key Laboratory of Space-Based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract To ensure the real-time performance of the nonuniformity correction of the complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) image sensor in aerospace remote sensing cameras and reduce the photo response non-uniformity (PRNU) of the image, according to the structural characteristics of the CMOS image sensor, a CMOS image non-uniformity correction method based on an adaptive moving window is proposed in this study. First, from the perspective of engineering applications, a movable variable-step window is used to block the image so that multiple columns of pixels in the same window shared a set of correction parameters. Then, to solve the problem of insufficient linear fitting correction accuracy in existing methods, based on the nonlinear response characteristics of the CMOS sensor, the response curve is second-ordered by the least squares method. Experimental results show that the method can not only improve the quality of CMOS images but also reduce the number of correction parameters of the hardware system. The PRNU of the image corrected by the method is less than 1%. Compared with the linear fitting correction method, the number of correction parameters of the method is reduced by 23.7%.

Key words image processing; movable window; non-uniformity correction; least squares method

OCIS codes 100.2000; 110.4280; 120.0280

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2020-11-24; 录用日期: 2020-12-03

基金项目: 吉林省科技发展计划(20180201015GX)

通信作者: *zhang_gui_xiang@126.com

1 引言

航天光学遥感领域的遥感成像系统大多采用 CCD 图像传感器,原因是 CCD 的输出相对稳定且能很好地抑制噪声,成像质量较高。随着遥感技术的发展,CMOS 图像传感器具有的低功耗、低成本、高集成度、可控开窗、大面阵、高帧频等优点使其在成像模块的轻量化、低功耗、低成本设计方面得到了广泛的应用^[1]。

任何类型的图像传感器(CCD 或互补金属氧化物半导体 CMOS)都存在不同程度的非均匀性问题,如传感器像元对成像目标的响应不一致、加工工艺导致的像元大小误差以及探测器件中光学镀膜不均匀导致图像中出现条带噪声的问题^[2-3]。在实际场景中应用 CMOS 图像传感器时,大多需要用相应的非均匀性校正技术对图像进行校正。非均匀性校正技术也是降低固定模式噪声(FPN)、改善图像非均匀性的有效方法,其目的是使图像传感器所有光敏单元在相同辐照度下表现出完全相同的光电转换关系^[4]。殷世民等^[5]提出了一种基于分段线性插值和三次样条插值的非均匀性校正方法;黄英东等^[6]提出了一种基于改进多项式拟合的校正方法;朱瑞飞等^[7]根据红外探测器的理论响应模型,提出了一种基于 S 曲线拟合的校正方法。其中,S 型曲线校正对图像的非均匀性校正效果最好,但该方法相对复杂,硬件实现难度较大。两点校正法虽然易于实现,但对具有非线性响应特性的传感器校正效果不佳。分段线性校正的效果与分段区间的长度相关,分段区间越多,校正效果越好,但需要获得的参数也越多。对于实时性要求较高的校正,通常无法实现太多的区间分段,从而无法保证校正效果^[8]。

理想的校正方法是对传感器的每一个像元进行拟合计算,即每个像元都会得到一组对应的校正系数,计算的数据量较大,不利于硬件实现;且传统校正方法对非线性 CMOS 图像传感器的校正效果较差。因此,本文通过研究 CMOS 图像传感器的结构特点,提出了一种利于硬件实时处理的图像非均匀性校正方法。

2 非均匀性分析

2.1 非均匀性产生的原因及现象

非均匀性广泛存在于 CCD 和 CMOS 等图像传感器中,采用均匀光源照射且在完全理想的条件下,图像传感器各个像元的输出信号应该完全相同。但由于 CMOS 器件固有的结构特征,各列像元均具有独立的放大器,列放大器增益的非均匀性会导致

CMOS 图像传感器产生 FPN^[9]。科学级 CMOS 图像传感器大多采用列并行模数转换器(ADC)架构,其结构如图 1 所示^[10],其中,S/H 为采样保持电路。可以发现,CMOS 图像传感器的每一列像元均共用一个程控增益放大器(PGA)和 ADC。在制造过程中不能保证所有 PGA 和 ADC 的参数完全相同,导致列与列之间的噪声较大。在均匀辐照度下,像元的输出信号经 PGA 和 ADC 后,输出图像可能会出现列条纹,严重影响了传感器件的成像质量。

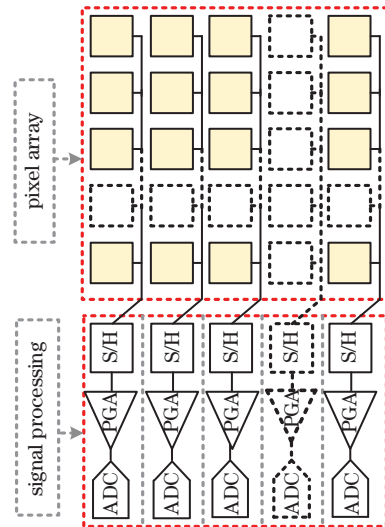


图 1 CMOS 图像传感器的结构

Fig. 1 Structure of the CMOS image sensor

图 2 为未校正的图像传感器在积分球均匀光照射下采集的图像,可以发现,图像存在明显的非均匀性条纹。非均匀性条纹噪声的特点是列灰度均值与列灰度方差的差异较大^[11],图 3(a)为图 2 的列灰度均值曲线。可以发现,某些列的灰度均值波动较大,且图像列与列之间存在明显差异。图 3(b)为列中的像元灰度曲线,可以发现,未处理图像列中的像元灰度值波动较小,行与行之间的差异也较小。

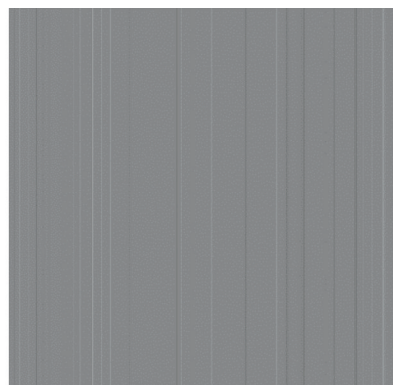


图 2 均匀光照下传感器采集的图像

Fig. 2 Image collected by the sensor under uniform illumination

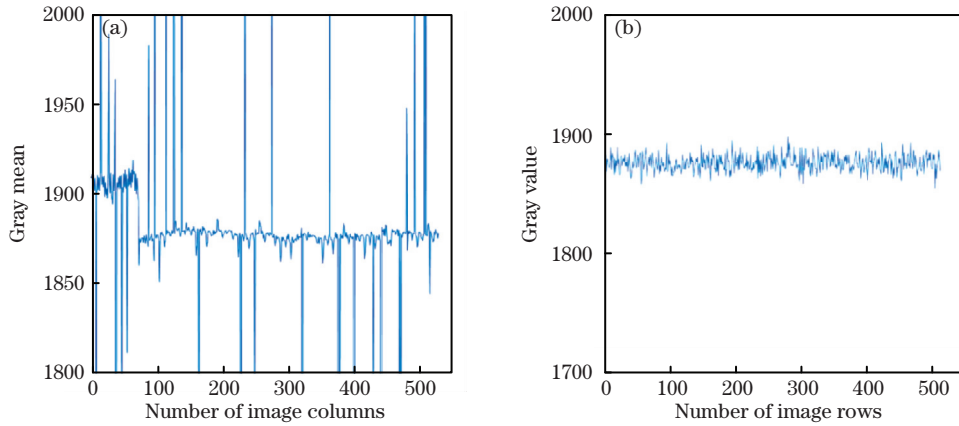


图 3 图像的灰度曲线。(a)列灰度均值曲线;(b)列中像元的灰度曲线

Fig. 3 Gray curve of the image. (a) Gray mean value curve of the column; (b) gray curve of the pixels in the column

2.2 评价指标

光电响应非均匀性(PRNU)是评价光电成像系统的重要指标,影响着最终图像数据的显示效果。通常采用积分球作为均匀光源测试 CMOS 图像非均匀性随辐照度的变化特性,积分球均匀光照图像的 PRNU 可表示为^[12]

$$V_{\text{PRNU}} = \frac{1}{X_{\text{avg}}} \sqrt{\frac{1}{PQ} \sum_{u=1}^P \sum_{v=1}^Q (X_{uv} - X_{\text{avg}})^2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, X_{avg} 为图像的灰度均值, X_{uv} 为像素(u, v)处的数字量化(DN)值,可表示遥感图像像元的亮度值, P 和 Q 分别为图像像素的长和宽。

3 自适应移动窗口的非均匀性校正方法

理想的图像校正方法是对每个像元进行校正,但随着传感器面阵及像元数的增多,校正参数的数量会大幅度增多,导致硬件系统在实时处理上面临巨大的挑战。根据图 1 中图像传感器的结构特点,对采集到的图像进行分析,结果表明,图像的非均匀性噪声主要存在于列间,而列中像元的灰度值差异较小。因此,根据传感器的结构特点、非均匀性产生的原因以及非均匀性噪声的特点对传统校正方法进行改进,通过不同宽度窗口估算阈值范围,并将图像的列灰度方差与阈值进行对比,完成对图像的分块处理,再根据图像的分块情况进行非均匀性校正。

3.1 自适应窗口分块处理

对图像的分析结果表明,非均匀性噪声并不是遍布整幅图像,在相邻多列图像甚至并不存在非均匀性噪声,不需要单独对其进行校正处理。因此,将多列图像划分为一个图像块,再对该图像块进行处

理。同时,用移动窗口方式对图像进行分块,以减少参数的存储量。

通过(1)式计算不同辐照度图像的 V_{PRNU} ,取 V_{PRNU} 值最大的图像得到最大阈值 T_{max} 和最小阈值 T_{min} ,再对该图像进行分块处理。初始窗口的宽度 W 应小于噪声周期,通过计算窗口内图像各列像素的灰度均值最大方差 V_{max} 与最小方差 V_{min} 判断窗口内的非均匀性,可表示为

$$V = (X_{\text{avg}}^j - X_{\text{avg}})^2, \quad (2)$$

$$V_{\text{max}} = \max[V_1, \dots, V_W], \quad (3)$$

$$V_{\text{min}} = \min[V_1, \dots, V_W], \quad (4)$$

式中, X_{avg}^j 为第 j 列图像的灰度均值。当窗口内的 V 较大时,表明窗口内图像的非均匀性较大,需减小窗口宽度,即 $V_{\text{max}} > T_{\text{max}}$ 或 $V_{\text{max}} - V_{\text{min}} > T_{\text{min}}$ 时,窗口宽度 $W = W - 1$;反之,当 $V_{\text{max}} < T_{\text{min}}$ 时,窗口宽度 $W = W + 1$;当 $T_{\text{min}} < V_{\text{max}} < T_{\text{max}}$ 或 $T_{\text{min}} < V_{\text{min}} < T_{\text{max}}$ 时,窗口宽度 $W = W$ 。循环上述操作,直至 V 的值在阈值区间内,将移动窗口从左至右滑过图像,对图像进行分块处理。

3.2 最大阈值 T_{max} 和最小阈值 T_{min}

合理的阈值应满足的条件:当窗口截取的图像非均匀性较大时,表明列与列之间的灰度值相差较大,需要通过阈值判断减小窗口宽度;反之,当窗口截取的图像非均匀性较小时,需要通过阈值判断增大窗口宽度。通过计算窗口内图像列灰度均值的方差 Z ,得到的阈值为^[13]

$$Z = \frac{1}{n - m} \sum_{j=m}^n (X_{\text{avg}}^j - X_{\text{avg}})^2, \quad (5)$$

式中, m, n 为窗口内的起始列与末尾列。

最大阈值 T_{max} 和最小阈值 T_{min} 的求取规则如下。

1) 根据(1)式计算不同辐照度图像的非均匀度

V_{PRNU} , 选取非均匀度最大的图像作为待分块图像, 以更好地划分图像, 保证分块的准确性。

2) 选取初始窗口宽度 $W = 16$, 将图像划分为 16 列的图像块; 根据(5)式求取各块图像列灰度均值方差中的最大值 Z_{\max_W} 和最小值 Z_{\min_W} 。

3) 由于最小窗口宽度 W_{\min} 应小于 W , 因此, 选取最小窗口宽度 $W_{\min} = 8$ 。将图像划分为 8 列的图像块, 根据(5)式得到方差最大值 $Z_{\max_{W_{\min}}}$ 。

4) 由于最大窗口宽度 W_{\max} 应大于 W 且小于图像总列数, 因此, 选取 W_{\max} 为总列数的 $1/2$ 。将图像进行分块, 根据(5)式求取各块图像列灰度均值方差中的最小值 $Z_{\min_{W_{\max}}}$ 。

5) 设置的最大阈值 T_{\max} 和最小阈值 T_{\min} 可表示为^[13]

$$\begin{aligned} T_{\max} &= (Z_{\max_{W_{\min}}} + Z_{\max_W}) / 2 \\ T_{\min} &= (Z_{\min_{W_{\max}}} + Z_{\min_W}) / 2 \end{aligned} \quad (6)$$

3.3 校正模型

为了了解图像传感器的光电响应特性, 选取合适的校正方法, 绘制了不同辐照度下 20 幅图像的光电响应曲线, 分别用两点法、最小二乘法一阶函数与最小二乘法二阶函数拟合块均值(Block mean)与图像均值(Image mean)的线性关系, 结果如图 4 所示。

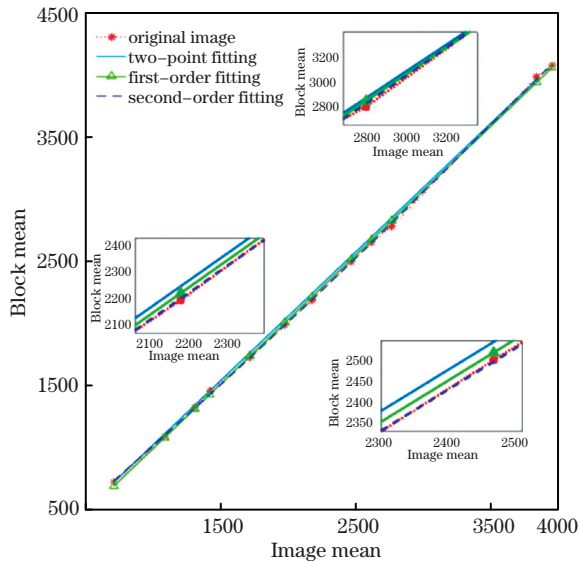


图 4 图像块的响应曲线

Fig. 4 Response curve of the image block

拟合结果表明, 两点法拟合的残差平方和 e 为 370.3498, 最小二乘法一阶函数拟合的残差平方和 e 为 278.1523, 最小二乘法二阶函数拟合的残差平方和 e 为 128.4633, 这表明二阶函数的拟合效果最佳, 可以有效提高非均匀性校正的精度。根据二阶

函数建立的非均匀性校正模型可表示为

$$X_{\text{avg}}(\varphi) = a_k X_k^2(\varphi) + b_k X_k(\varphi) + c_k, \quad (7)$$

式中, $X_{\text{avg}}(\varphi)$ 为在光照强度 φ 下的图像灰度均值, $X_k(\varphi)$ 为第 k 个图像块的灰度值均值, a_k 和 b_k 为第 k 个图像块的灰度值增益, c_k 为第 k 个图像块灰度值的偏移量。取 N 幅积分球均匀光照下不同辐照度的图像, 并求取对应的整幅图像灰度均值 x_i , 再根据图像的分块情况, 求取各图像相同块的灰度均值 y_i , 分别表示为 $(x_i, y_i) (i = 1, \dots, N)$ 。根据最小二乘法原理可得到

$$e = \sum_{i=1}^N (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)^2, \quad (8)$$

对(8)式中的 a, b, c 求偏导, 当 $\frac{\partial e}{\partial a} = 0, \frac{\partial e}{\partial b} = 0, \frac{\partial e}{\partial c} = 0$ 时, e 可以取最小值, 从而得到最佳拟合系数, 可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial e}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - ax_i^2 - bx_i - c) x_i^2 = 0 \\ \frac{\partial e}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - ax_i^2 - bx_i - c) x_i = 0 \\ \frac{\partial e}{\partial c} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - ax_i^2 - bx_i - c) = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

将(9)式中的线性方程转换为矩阵方程

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i & 1 \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum_{i=1}^N y_i x_i \\ \sum_{i=1}^N y_i x_i^2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

求取 k 组图像块的校正参数时, 可用增益 a_k 、 b_k 与偏移 c_k 组成增益与偏移矩阵, 将各图像块的实际响应与对应增益相乘, 再加上偏移量, 从而实现各图像块的非均匀性校正, 可表示为

$$\begin{bmatrix} X_k^2(\varphi) & X_k(\varphi) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_k \\ b_k \\ c_k \end{bmatrix} = X_{\text{avg}}(\varphi). \quad (11)$$

3.4 非均匀性校正的流程

本方法的流程图如图 5 所示, 具体步骤如下。

1) 求取最大阈值 T_{\max} 和最小阈值 T_{\min} 。选取初始窗口宽度 $W = 16$, 最小窗口宽度 $W_{\min} = 8$, 最大窗口宽度 $W_{\max} = 512$, 通过(5)式、(6)式求取阈值。

2) 根据阈值对图像进行分块处理: 首先, 以 $W = 16$ 的窗口宽度对图像进行采样, 通过(2)式~(4)式求

取 V_{max} 与 V_{min} ; 然后, 根据阈值判断确定图像块的宽度, 利用移动窗口遍历整幅图像, 完成分块处理。

3) 根据分块情况利用校正模型进行非均匀性校正。根据图 4 建立二阶拟合校正模型, 利用(7)式~(10)式求取校正参数, 再利用(11)式进行图像的非均匀性校正。

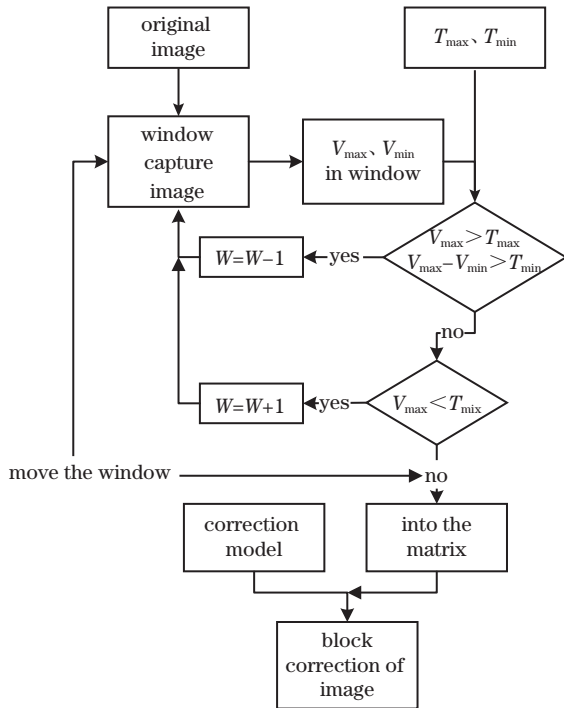


图 5 本方法的流程图

Fig. 5 Flow chart of our method

4 实验结果与分析

4.1 仿真分析

为了验证本方法的有效性及准确性, 用实验室积分球均匀光源进行图像采集, 采集原理如图 6 所示。采集的图像尺寸均为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 图像的灰度位数为 12 bits, 共选取 20 幅不同辐照度的灰度图像。从原始图像上截取尺寸为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 灰度均值为 709.8522 的图像, 用本方法校正前后的图像如图 7 所示。可以发现, 校正前图像具有明显的列条纹, 根据(1)式求得该图像的非均匀度高达 7.57%。经本方法校正后, 图像的非均匀度有明显降低, 仅为 0.93%。

对图 7 中的灰度值进行统计分析, 得到的对比

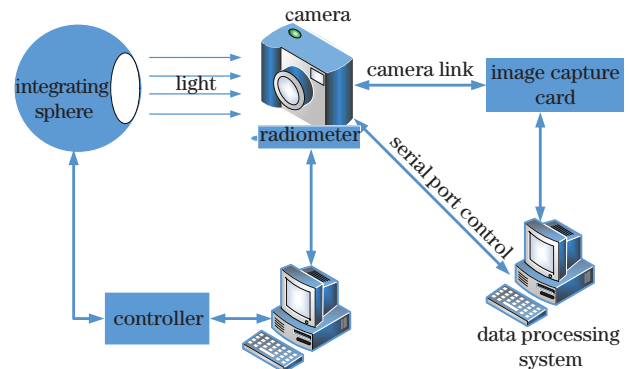


图 6 图像采集系统的原理

Fig. 6 Principle of the image acquisition system

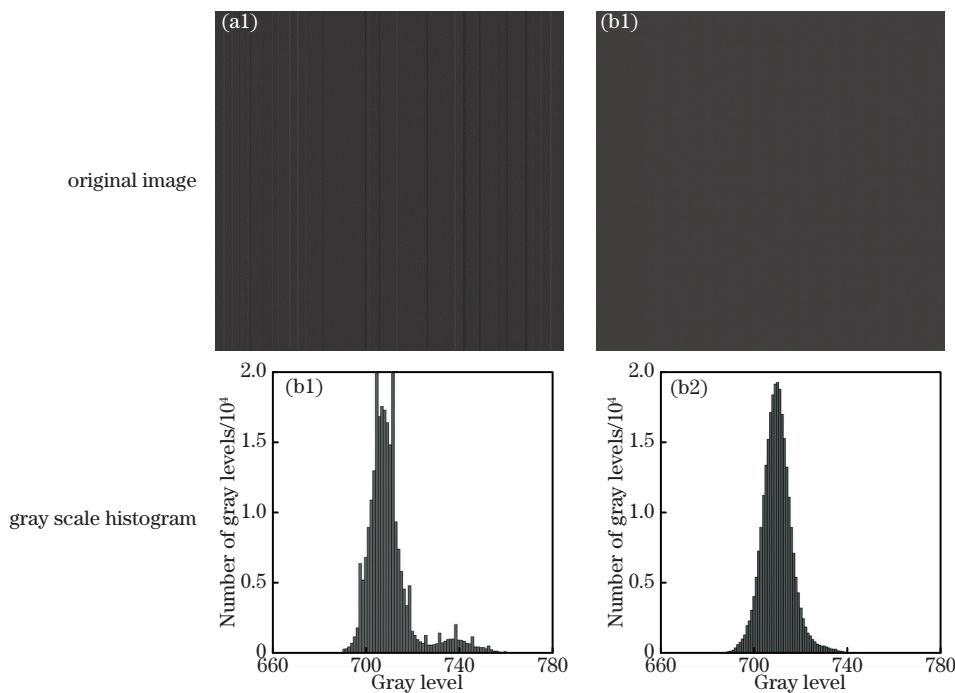


图 7 用本方法校正后的图像。(a)原始图像;(b)校正后的图像

Fig. 7 Image corrected by our method. (a) Original image; (b) corrected image

结果如图 8 所示。其中,横坐标表示统计的列数,纵坐标表示每列像元的灰度均值。计算得到,校正前的列灰度均值方差为 2.8475×10^3 ,

校正后的列灰度均值方差为 4.357,这表明校正后的图像灰度值相对稳定,条纹抑制效果较好。

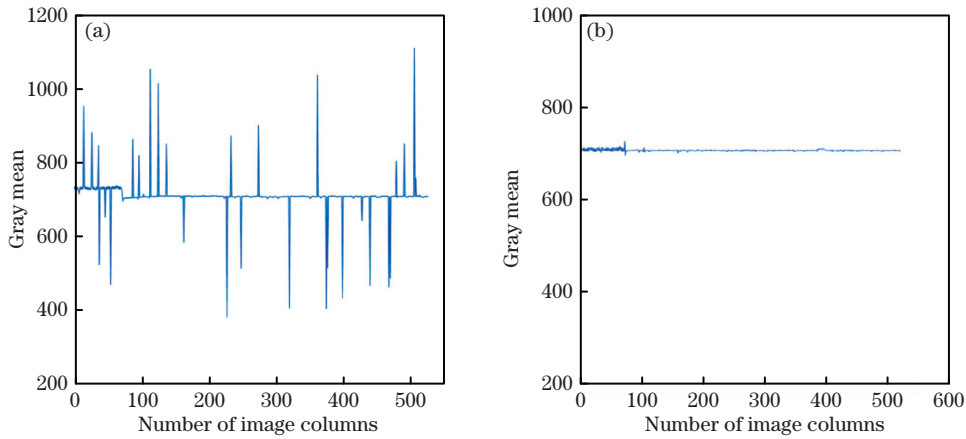


图 8 列灰度方差的统计结果。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 8 Statistic result of the column gray variance. (a) Before correction; (b) after correction

4.2 窗口宽度对校正效果的影响

为了进一步验证窗口宽度 W 对图像非均匀性校正的影响,分别取不同宽度的 W 进行测试,仿真结果如图 9 所示。表 1 为不同窗口宽度下的测试指标,可以发现,窗口宽度 W 对分块数的影响较大,且分块数随 W 的增大而减少。当窗口宽度为 64 时,分块数最少,为 514。当窗口宽度 W 大于 32 后,分块数基本不变。为减少分块处理中阈值判断的重复计算过程,实验取移动窗口的宽度为 16。

表 1 不同窗口宽度的测试指标

Table 1 Test indicators of different window widths

Window width	PRNU/%	Gray mean	Block
Original image	2.70	2462	none
$W=2$	0.44	2462	754
$W=4$	0.44	2462	607
$W=8$	0.44	2462	547
$W=16$	0.44	2462	521
$W=32$	0.44	2462	515
$W=64$	0.44	2642	514
$W=128$	0.44	2642	514

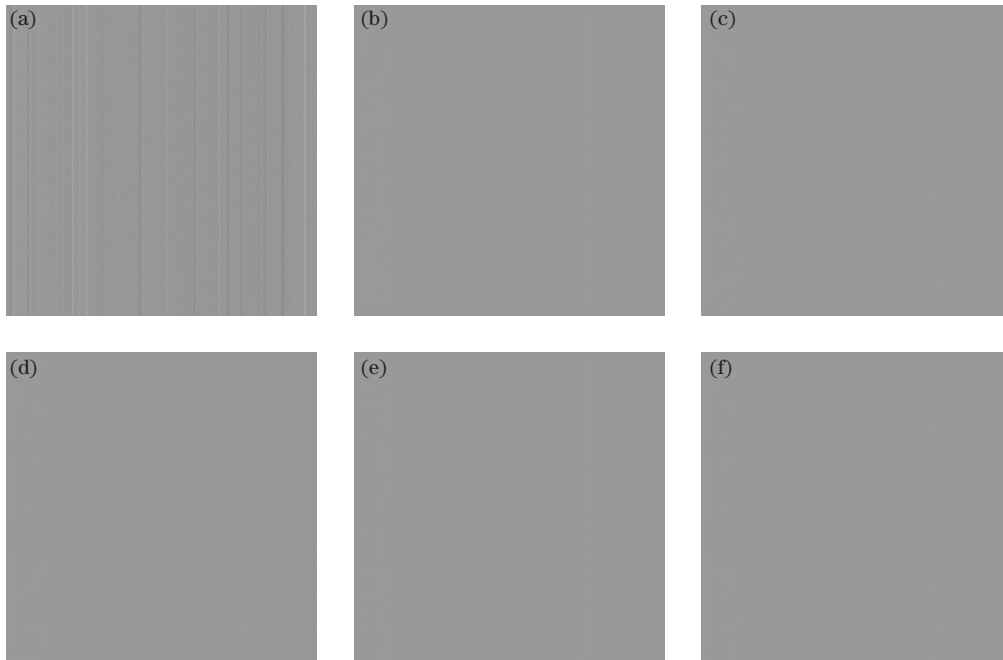


图 9 不同窗口宽度的校正结果。(a)原始图像;(b) $W=2$;(c) $W=4$;(d) $W=8$;(e) $W=16$;(f) $W=32$

Fig. 9 Correction results of different window widths. (a) Original image; (b) $W=2$; (c) $W=4$; (d) $W=8$; (e) $W=16$; (f) $W=32$

4.3 不同方法的校正效果

在积分球均匀光照下,分别用两点校正(TPC)法^[14]、最小二乘一阶拟合校正(LSFOFC)法^[4]和本方法对图 9(a)中的图像进行校正,校正后的图像及其灰度直方图如图 10 所示。可以发现,3 种方法均

能很好地消除条纹噪声,但相比其他两种方法,本方法校正后的图像灰度值分布更集中。通过(5)式计算得到 TPC 方法、LSFOFC 方法和本方法校正后的图像列均值方差分别为 765.9496、124.0002 和 29.3026。

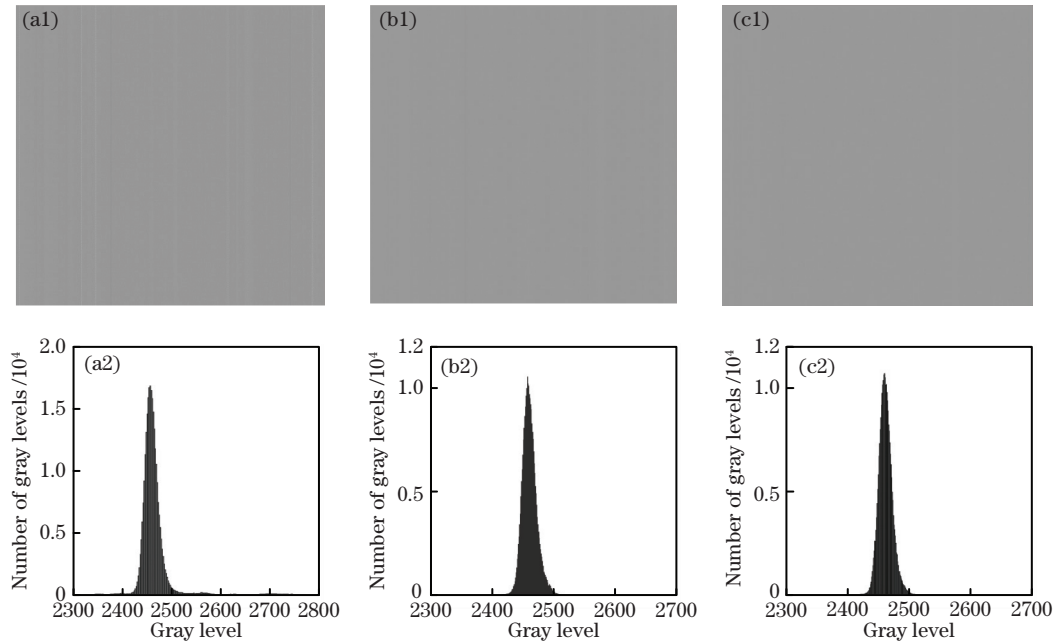


图 10 不同方法对图 9(a)的校正结果。(a) TPC 方法;(b) LSFOFC 方法;(c)本方法

Fig. 10 Correction results of the Fig. 9(a) by different methods. (a) TPC method; (b) LSFOFC method; (c) our method

为了进一步分析本方法的可行性,对比了上述 3 种校正方法对传感器采集图像 PRNU 的改善情况,结果如图 11 所示。可以发现,未校正前传感器采集的图像 PRNU 最高大于 7%,用 3 种方法校正后图像的 PRNU 值均降低到 2% 以下,且本方法校正后图像的 PRNU 值能降至 1% 以下,这表明本方法的校正效果更好。

间、获取时间和处理时间^[15],结果如表 2 所示。可以发现,TPC 方法求取校正参数所用的时间最短,LSFOFC 方法与本方法求取参数的时间相近;TPC 方法需要求取的参数最多,且相比 LSFOFC 方法,本方法的校正参数量减少了 23.7%。

表 2 不同校正方法的性能参数

Table 2 Performance parameters of different calibration methods

Method	Parameter acquisition time/s	Parameters	PRNU/%
TPC	3.981247	$2 \times 1024 \times 1024$	1.20
LSFOFC	17.846582	2×1024	0.59
Ours	16.969041	3×521	0.44

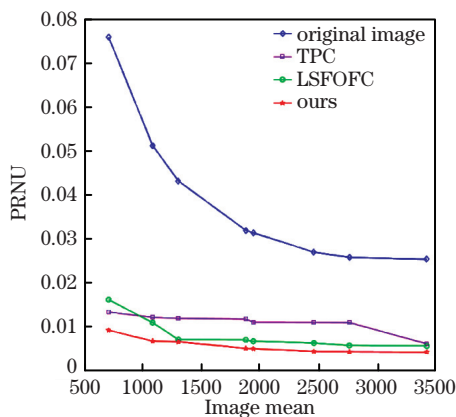


图 11 不同方法校正后图像的 PRNU

Fig. 11 PRNU of the image corrected by different methods

为了进一步评估上述 3 种校正方法的性能,以图 9(a)为例,对比了不同校正方法的参数存储空

由于 CMOS 图像传感器的响应特性受温度和环境变化的影响较小,不需要频繁更新校正参数,即不必用硬件实时获取参数,且参数获取工作可单独利用计算机软件进行^[16]。综上所述,相比 TPC 和 LSFOFC 方法,用本方法校正后图像的灰度分布、参数存储空间和校正效果均是最优的。

5 结 论

分析了 CMOS 图像中非均匀性噪声产生的根

本原因,并提出了一种基于自适应移动窗口的非均匀性校正方法。仿真结果表明,图像的非均匀性问题主要存在于图像列与列之间,因此,主要针对图像列间的非均匀性问题进行校正。通过选取不同宽度的窗口估算阈值范围,将图像的列灰度方差与阈值进行对比,完成图像的分块处理,并根据图像块进行非均匀性校正。仿真结果表明,本方法能有效地对非线性响应传感器进行非均匀性校正,将图像的 PRNU 值降低到 1% 以下,且校正参数量比 LSFOFC 方法减少了 23.7%,为硬件系统参数存储节省了空间,并解决了大面阵 CMOS 图像传感器成像系统实时校正的问题。

参 考 文 献

- [1] Qu H F, Wang X D, Lü B L. Non-uniformity correction of mutiple output area CCD image [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2012, 27(4): 569-572.
曲洪丰, 王晓东, 吕宝林. 多通道输出面阵 CCD 图像非均匀性校正 [J]. 液晶与显示, 2012, 27(4): 569-572.
- [2] Liu Y M. Hyperspectral image destriping based on adaptive unidirectional variation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091002.
刘亚梅. 基于自适应单向变分的高光谱图像去条带方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091002.
- [3] Yang Z W, Zheng L L, Wu Y, et al. An improved moment matching algorithm for non-uniform correction of hyperspectral images [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 082801.
杨赞伟, 郑亮亮, 吴勇, 等. 一种改进的矩匹配高光谱图像非均匀校正算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 082801.
- [4] Yan S Q. High dynamic image synthesis technology based on sCMOS[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
闫苏琪. 基于 sCMOS 的高动态范围图像合成技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [5] Yin S M, Liu S Q. The multi-point nonuniformity correction algorithms for IRFPA based on low order interpolation [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(6): 715-718.
殷世民, 刘上乾. 基于低次插值的红外焦平面器件非均匀性多点校正算法 [J]. 光子学报, 2002, 31(6): 715-718.
- [6] 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.
- [7] Zhu R F, Wang C, Wei Q, et al. Manufacture of nonuniformity correction system for infrared detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1669-1673.
朱瑞飞, 王超, 魏群, 等. 红外探测器非均匀性校正系统研制 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1669-1673.
- [8] Cheng W, Lü Q B, Zhao N. Non-uniformity correction of scientific CMOS image sensor based on FPGA [J]. Semiconductor Optoelectronics, 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.
- [9] Luo B, Yan L, Yang F X. Research of noise suppression for CMOS image sensor [C]//2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, March 13-14, 2010, Changsha, China. New York: IEEE Press, 2010: 1100-1103.
- [10] Li Q L. Research on key technologies of high speed CMOS image sensor chip [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
李全良. 高速 CMOS 图像传感器芯片的关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [11] Ju H H, Liu Z G, Jiang J J, et al. Removal of hyperspectral stripe noise using low-pass filtered residual images [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1228002.
鞠荟荟, 刘志刚, 姜江军, 等. 基于低通滤波残差图的高光谱条带噪声去除 [J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1228002.
- [12] Yang G P, Zhou X, Chen D, et al. Nonuniformity of CMOS image with double channels and column readout and its correction [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 2087-2093.
杨国鹏, 周欣, 陈东, 等. 两通道按列输出 CMOS 图像的非均匀性及校正方法 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 2087-2093.
- [13] Kang Y F, Wang S G, Han F F, et al. Destriping methods of CBERS-02C satellite image based on improved moment matching [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(12): 1582-1587.
康一飞, 王树根, 韩飞飞, 等. 资源一号 02C 影像条带噪声去除的改进矩匹配方法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(12): 1582-1587.
- [14] Cui H Z, Hu J Z. Two-level correction study for improvement in uniformity of IR images [J]. Laser &

Optronics Progress, 2005, 42(9): 32-34, 38.

崔洪州, 胡劲忠. 提高红外图像均匀性的两级校正技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(9): 32-34, 38.

- [15] Cai S, Bai X G, Qiao Y F. Summarize on the nonuniformity correction algorithms for IRFPA based on calibration [J]. Infrared Technology, 2007, 29(10): 589-592.

蔡盛, 柏旭光, 乔彦峰. 基于标定的 IRFPA 非均匀

性校正方法综述[J]. 红外技术, 2007, 29(10): 589-592.

- [16] Dong J T, Yang X L, Dong J, et al. Research on response nonuniformity correction of area CMOS image sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(4): 570-574, 578.

董建婷, 杨小乐, 董杰, 等. 面阵 CMOS 图像传感器响应非均匀性校正方法研究[J]. 半导体光电, 2012, 33(4): 570-574, 578.