

文章编号 1004-924X(2017)04-1009-10

红外焦平面阵列的盲元自适应快速校正

李凌霄, 冯华君*, 赵巨峰, 徐之海, 李 奇
(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:为实现红外焦平面阵列(IRFPA)盲元的自适应快速校正,本文设计了一种基于三梯度阈值检测的快速盲元校正方法。先通过优化 L0 范式的约束方程消除图中的非均匀条纹,排除干扰,再对水平、竖直和对角 3 个方向进行梯度阈值检测,找到盲元位置点,并与中值滤波结果进行点对点匹配,剔除误检测点,最后通过局部中值滤波完成盲元校正。依据盲元的缓变特性,通过合理更新盲元模板实现了单帧和序列图像的快速盲元校正。实验结果表明:相比于传统方法,本文方法的信噪比(SNR)和峰值信噪比(PSNR)提高了 10~14 dB,结构相似度指标(SSIM)提高了 0.01~0.02,对图像中的随机和连续盲元的校正效果都很好,同时运算速度得到了大大提升,在保证图像质量指标的情况下速度提升了 3~10 倍,可以在到实际红外系统中实现动态检测和实时处理。

关键词:盲元;红外焦平面阵列;三梯度阈值检测;局部中值滤波

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172504.1009

Adaptive and fast blind pixel correction of IRFPA

LI Ling-xiao, FENG Hua-jun*, ZHAO Ju-feng, XU Zhi-hai, LI Qi

(State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

* Corresponding author, E-mail: fenghj@zju.edu.cn

Abstract: A fast blind pixel correction method based on three-gradient threshold detection was designed in this paper, to achieve adaptive and fast blind pixel correction of the Infrared Focal Plane Array (IRFPA). First, a constraint equation through optimization of L0 paradigm was used to eliminate the interference of non-uniform stripe; then gradient threshold detection was respectively conducted in the horizontal, vertical and diagonal directions to find out the position of the blind pixel, thus through a point-to-point matching with the median filtering results to remove the inaccurate detecting point; finally, blind pixel correction was completed through local median filtering. In the process, reasonable updating of the blind pixel template, based on slow variation of blind pixel, was carried out to achieve fast blind pixel correction of single-frame and sequential images. The results show that compared with traditional method, signal-to-noise ratio (SNR) and peak signal-to-noise ratio (PSNR) achieved by using this proposed method is improved by 10~14dB, with the structured similarity (SSIM) index improved by 0.01~0.02; both random blind pixel and continuous blind pixel in the images can be effectively corrected, and the computing speed is dramatically improved, with a speed advantage of 3~10 times while ensuring the image quality. Hence, such proposed method can be used to achieve dynamic

收稿日期:2016-09-21;修订日期:2016-11-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61475135)

detection and real-time processing in actual infrared system.

Key words: Blind pixel; IRFPA; three-gradient threshold detection; local median filter

1 引言

红外焦平面阵列 (IRFPA) 是红外成像系统的核心部件,用于探测随温度变化的红外辐射能量。受外部环境、红外敏感元件、电路结构、半导体特性等各种因素的影响,IRFPA 输出的红外图像普遍存在横向(或竖向)的非均匀条纹与类似脉冲噪声的盲元噪点,严重影响成像质量,制约了系统温度分辨率的提高。盲元是 IRFPA 器件中响应过高或过低的探测单元^[1],根据其统计分布特性可将其分为固定盲元与随机盲元。前者主要源于探测器件与制造工艺的限制,表现为某些固定像元位置始终存在过高或过低的响应;而随机盲元则主要受环境温漂和器件工作状态的影响,其响应特性在一段时间与正常像元一致,在另一段时间又表现为盲元坏点,在时间上体现出“闪变”特性,在空间上位置也不断变化^[2]。为了提升图像质量,需要在前期对获取的红外图像进行盲元检测与补偿,以便保证后续的目标探测与识别。

目前,常用的盲元检测方法主要分为辐射定标法和场景检测法两类。辐射定标法是通过采集不同黑体温度下的均匀辐射图像,根据盲元和正常像元响应率、噪声特性等的差别将二者进行区分。针对该方法,周慧鑫^[3]等提出了一种基于双辐射参考源的盲元检测方法,利用辐射源在两个不同温度下采集的成像图像,通过设定双阈值实现盲元检测;根据均匀辐射图像有效像元的均值差(DOM)和标准差(STD)具有正态分布的特点,石岩^[4]等对定标图像进行特征直方图分解,通过估计有效像元 DOM 和 STD 的分布区间,从而得到判别盲元的分类准则;陈大川^[5]等在 IRFPA 盲元响应特性和相邻像元的相关性理论基础上,通过基于阈值+相邻像元检测和加窗中值滤波补偿算法,实现盲元的检测与校正。辐射定标法一般具有步骤简单、算法速度快和有利于硬件实现等优点,但它的局限性也非常明显,主要体现在:(1)为了采集黑体定标数据需要较长时间打断系统的正常工作;(2)仅适用于检测固定盲元,对于系统中随机响应产生的随机盲元无能为力;(3)定标操

作较繁琐,定标数据需要定期更新,系统免维护性较差。

由于辐射定标法存在固有缺陷,目前越来越多的研究人员致力于研究基于场景的盲元检测方法。场景检测法直接从获取图像入手,通过分析图像中盲元噪声特性,利用合适阈值或者视觉参数确定盲元位置,最后进行盲元校正。场景检测法不需要外界设备,能够同时校正成像系统中产生的固定盲元和随机盲元,具有更好的环境适应性,大大降低了系统维护成本。对于场景检测已取得很多研究成果,Cao^[6]等人利用局部中值滤波器,通过“ 3σ ”阈值检测确定盲元位置,再利用改进的纳高滤波模板对盲元点进行非线性补偿;Leng^[7]等人利用盲元与辐射场景的相关性较正常像元弱的特点,通过设置基于平均时域噪声的自适应阈值对盲元进行判定,再通过多帧图像的盲元匹配,剔除误矫正盲元,提高了检测精度;Wang^[8]等人通过对图像进行序列分析,利用相邻帧和当前帧正常像元的非线性插值数据对盲元进行补偿。此外,国内的一些研究机构如西安光机所、西安电子科技大学、西北工业大学和中国兵器第 208 研究所等也设计了相应的盲元检测与校正方法^[9-11],能在一定程度上减少盲元的影响。

本文在分析红外非均匀噪声和盲元响应特性的基础上,提出了一种基于三梯度阈值检测的快速校正算法,通过仿真图像与实际红外图像进行验证,证实了该方法的有效性。

2 IRFPA 盲元特性分析

2.1 盲元的定义与响应特性

IRFPA 中的盲元又称为无效像元,它的定义目前还没有通用标准。国际上通过将器件对黑体辐射的响应程度作为量化标准,将其分为过热像元与死像元两类。过热像元是像元噪声电压大于平均噪声电压 10 倍的响应像元,而死像元则是指像元响应率小于 1/10 平均响应率的像元。实验中采用一台 640×512 的制冷型近红外波段样机在不同辐射温度下对固定点处的盲元响应进行测试,响应曲线如图 1 所示。正常像元随辐射温度

的响应是近似线性增加的,反映为图中的曲线 2,而死像元和过热像元的响应则几乎不随辐射温度变化,始终保持较低和较高的响应,如曲线 1 和 3 所示。国际标准的测试方法是基于黑体辐射的,同时只适用于固定盲元的检测。在此基础上,文献[9]通过连续采集黑体定标数据,分析了各探测元的响应值,得出了随机盲元的响应特性。与固定盲元相比,随机盲元具有位置不固定和响应不固定的特点,特别是在辐射温度和积分时间发生变化时,因此它是盲元检测与校正的主要难点。

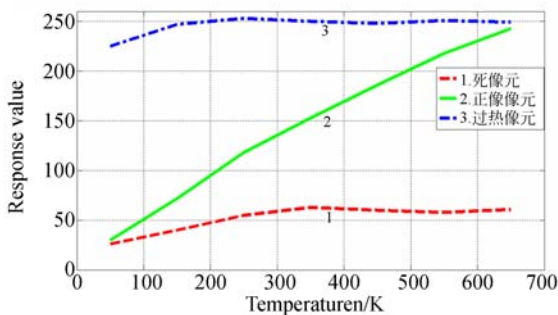


图 1 探测响应曲线

Fig.1 Detection response curves

2.2 盲元的视觉特性

盲元在视觉上表现为或明或暗的脉冲噪点,其中死像元表现为黑点或灰点,过热像元则表现为白亮点,而随机盲元则随着环境或系统状态的变化而不断改变,有时为黑白点,有时又为正常像元。图 2 为一幅典型的中波红外原始图像,图像大小为 320×240 。在该图中盲元主要体现为过热盲元和随机盲元,同时包含少量死像元,还存在横向的非均匀细条纹。对该图进行立体灰度变换,灰度范围归一化为 $[0,1]$,如图 3(彩图见期刊电子版)所示。可以看出大部分正常像元的灰度



图 2 含有盲元的典型红外图像

Fig.2 Typical IR image with blind pixel

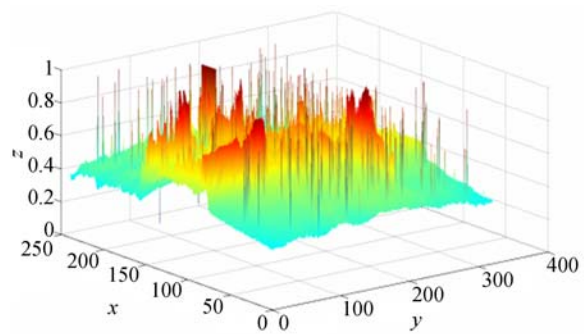


图 3 红外图像盲元的灰度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of blind pixel in IR image

集中在 $0.2 \sim 0.8$ 之间,且相邻像元的灰度值具有较大的相似性与连续性;而盲元的灰度响应则具有明显的孤立性和突兀性,在灰度变换图中有明显的毛刺现象,其灰度值与相邻像元具有明显的差异。

3 盲元检测与补偿方法

通过对盲元响应特性的分析可知,受不确定因素的影响,随机盲元必须采用基于场景的自适应检测方法。为了在校正盲元的同时保留图像细节,加快处理速度,本文提出一种联合非均匀条纹校正和三梯度阈值检测的校正方法,首先通过非

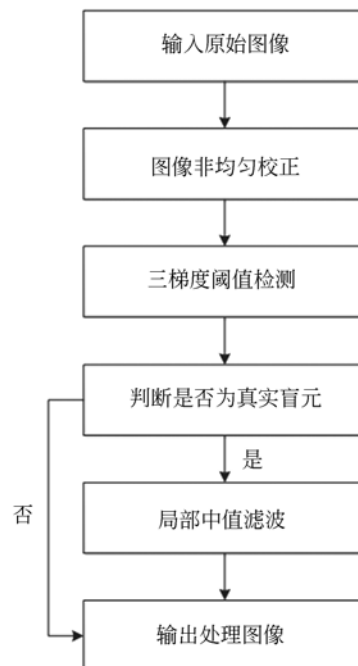


图 4 算法流程图

Fig.4 Flow chart of proposed algorithm

均匀预处理校正消除图像中的条纹和低频噪声,排除干扰,再根据盲元响应特性进行检测,确定盲元位置,最后对检测到的盲元进行局部中值滤波,完成盲元校正。总体流程如图 4 所示。

3.1 非均匀校正预处理方法

对于原始红外图像,除了有盲元噪点外,往往还存在由于器件响应不一致而产生的横向或竖向条纹。这些条纹的存在同样降低了成像质量,同时也增加了盲元误校正的可能,因此需要在盲元校正前先进行图像非均匀校正(Nonuniformity Correction; NUC),以方便后续处理。

假设 IRFPA 原始接收的辐射为 $X(i, j)$, $Y(i, j)$ 是经器件非均匀性校正后输出的结果,NUC 就是通过非均匀图像 $Y(i, j)$ 估计真实辐射图像 $X(i, j)$ 的过程,目的是使图像恢复均匀响应。NUC 模型可以用下式来表示:

$$X(i, j) = G(i, j) \cdot Y(i, j) + O(i, j), \quad (1)$$

其中 $G(i, j)$ 和 $O(i, j)$ 是 NUC 模型的增益和偏置,通过 NUC 算法可得到合适的增益和偏置,利用式(1)就可以获得校正后的结果。现有的 NUC 方法包括定标法和场景法两大类,其中场景法还分为针对单帧图像条纹的校正和针对序列图像条纹的校正两种情况。一般而言,单帧图像的非均匀校正是基于图像优化的方法。非均匀条纹的存在会使图像横向或纵向水平梯度的能量增加,因此可将非均匀校正转化为图像的最优化问题。具体为设置最小化梯度能量并将其作为目标函数,来求取最优的 G 和 O ,达到消除条纹的目的;而序列图像校正则是基于模型的方法,即根据式(1)设定一种约束形式,通过逐帧迭代优化增益与偏置,最后达到平滑而实现非均匀校正。

较为成熟的逐帧迭代方法有恒定统计法、神经网络法和时域高通滤波等^[12-15]。相较而言,单帧图像优化方法不需要大量的序列图像,适用性更好,计算效率更高。考虑到 L_0 最小化已成功应用于图像平滑^[16],本文利用单场景梯度约束最优化 NUC 方法^[17],约束图像垂直方向梯度能量并保持水平方向梯度能量,从而消除原始图像中的横向非均匀条纹。本文方法主要思路是一方面约束保真项,另一方面约束梯度以保证相对的平缓,从而在保留图像细节信息的同时实现噪声抑制。优化目标函数为:

$$\operatorname{argmin}_f \left\{ \sum_p (\partial_x f_p - \partial_x g_p)^2 + \lambda G(f) \right\}, \quad (2)$$

式中 f 和 g 分别是估计图像和观测图像, $G(f)$ 是任意像素 p 在垂直方向的 L_0 规整化项,即纵向梯度大小不为零的像素个数, p 是规整化参数。由于式(2)是 L_0 范式优化,需要引入参考变量进行近似,优化函数变化为:

$$\operatorname{argmin} \left\{ \sum_p ((\partial_x f_p - \partial_x g_p)^2 + J) + \lambda G(h) \right\},$$

式中 J 引入了 $\partial_y f_p$ 的参考变量 h_p ,表示在像素 p 处的纵向梯度,具体表示为:

$$J = \alpha (\partial_y f_p - h_p)^2, \quad (4)$$

这里 α 是控制 h_p 和 $\partial_y f_p$ 相似程度的参数。通过近似法,方程(3)的优化可以利用交替迭代优化 f 和 h 实现。最优图 f 的优化通过式(3)对 f 求偏导获得,在具体算法实现中,可运用快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)来进行加速, f 的解如下:

$$f = F^{-1} \left\{ \frac{F(\partial_x)^* F(\partial_x) F(g) + \alpha F(\partial_y)^* F(h)}{F(\partial_x)^* F(\partial_x) + \alpha F(\partial_y)^* F(\partial_y)} \right\}, \quad (5)$$

式中 F 代表 FFT 算子, $F(\cdot)^*$ 代表复共轭。矩阵之间的运算采用点对点相乘。

对于 h 的优化,构造惩罚函数:

$$J(h) = \frac{\lambda}{\alpha} G(h) + \sum_p (\partial_y f_p - h_p)^2, \quad (6)$$

为了加速算法, h 可单个像素计算,则对于任意像素 p , $J(h)$ 可改写为:

$$J(h) = \sum_p \left\{ (\partial_y f_p - h_p)^2 + \frac{\lambda}{\alpha} \Psi(|h_p|) \right\}, \quad (7)$$

式中 $\Psi(|h_p|)$ 是一个二值函数,如果 h_p 不为 0,则 $\Psi(|h_p|) = 1$,反之 $\Psi(|h_p|) = 0$ 。如此设定之后,通过单点运算可以得到每个像素 p 处的解 h_p :

$$h_p = \begin{cases} 0 & (\partial_y f_p)^2 \leq \frac{\lambda}{\alpha} \\ \partial_y f_p & \text{other} \end{cases}, \quad (8)$$

对于得到的观测图像 g ,利用式(5)和式(8)分别计算 f 和 h_p ,通过反复迭代计算,最终可得到非均匀校正后的图像,整体流程如图 5 所示。

图 5 中 t 为迭代次数。初始时令 $f_0 = g$ 并归一化,然后反复迭代直到收敛。通常迭代 10~20 次就足够,初始自适应参数 α_0 固定,为 2λ , μ 为伸缩比例系数, μ 设置为 4 可以得到较好的处理效果和算法效率。对于规整化系数 λ ,其取值一般

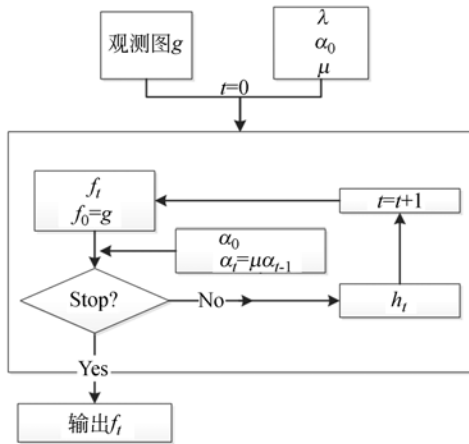


图 5 非均匀校正算法流程
Fig. 5 Flow chart of NUC algorithm

设定为 $[1 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-3}]$ 。对原始输入图像进行非均匀条纹校正后,再将校正后的图像作为盲元检测与校正的输入图,进行后续处理。

3.2 自适应盲元检测

从信号响应角度,可将非均匀校正后的红外图像看作理想图像(不含盲元)和盲元信号的叠加,对应模型为:

$$Y_B(i, j) = X_B(i, j) + B(i, j), \quad (9)$$

式中 $Y_B(i, j)$ 为经非均匀校正后的实际红外图像灰度, $X_B(i, j)$ 表示系统理想输入红外图像, $B(i, j)$ 表示对应位置的盲元信号。

显然,对于正常像元, $B(i, j) = 0$ 。当 $B(i, j) > 0$ 时,对应位置表现为亮盲元,当 $B(i, j) < 0$ 时,对应位置表现为暗盲元。由于盲元通常会表现出明显的脉冲性,因此对于实际系统,若 $Y_B(i, j)$ 与 $X_B(i, j)$ 可以在一定的灰度范围内相互转换,则同样认为该像元为正常像元,即满足下式:

$$|Y_B(i, j) - X_B(i, j)| \leq h, \quad (10)$$

式中 h 是正常像元的响应范围,超出此范围的响应即为盲元响应。

基于场景的盲元检测的关键就在于如何利用实际图像 Y_B 估计出理想图像 X_B 。由于 Y_B 与 X_B 具有很强的相似性,因此大多数盲元检测与校正方法最终都可以抽象为一个模板滤波模型,即通过一个背景预测模板来估计 X_B ,对应的模型为:

$$X_B(i, j) = \sum_{(m, n) \in T} w(m, n) \cdot Y_B(i + m, j + n), \quad (11)$$

式中 T 为滤波模板, w 为模板对应的权重矩阵,其包括各种线性和非线性滤波方法。

目前已形成的各类典型模板滤波方法,如中值滤波、最小均方滤波、数学形态学滤波以及小波变换等,大都是从全局角度对每个像元分别滤波,因此很容易对图像中的非盲元像素造成误校正,同时也降低了算法效率。考虑到盲元分布具有局部性和孤立性的特点,因此可以对式(11)进行改进:

$$X_B(i, j) = \sum_{(m, n) \in T} w(m, n) M(i + m, j + n) Y_B(i + m, j + n), \quad (12)$$

式中 M 是加入的盲元模板,当该点不是盲元时, $M(i, j) = 0$,此时对该点不进行处理;当该点是盲元时, $M(i, j) = 1$,此时则进行正常滤波。通过改进模型可以较好地对盲元进行处理,避免了非盲像元的误校正,提升了算法速度。

盲元检测的作用是获取盲元模板,因此它直接决定了盲元校正的精度。从上述分析可知,盲元与正常像元的主要区别有两点:一是盲元的位置分布往往离散,即相邻像元之间一般不会存在成片的盲元;二是盲元响应值与正常像元相比具有显著差异,它往往是一个局部极值(无论水平、垂直还是对角方向)。针对这两个特点,本文设计了一种基于三梯度方向的盲元检测算法。如图 6 所示,将每个像元与它水平、竖直和对角方向的像元进行绝对差分,并设定合适的判定阈值。3 个方向同时满足判定条件的点,则确定为盲元,记录其对应位置,反之则判定该点为正常像元。盲元位置可以通过矩阵运算很快计算出来。

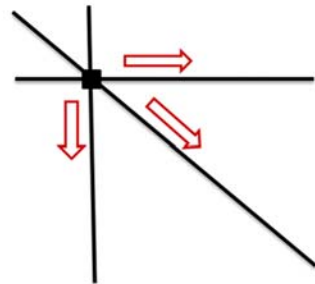


图 6 盲元检测示意图
Fig. 6 Demonstration of blind pixel detection

利用三梯度检测方法求出盲元检测模板 M ,算法的具体步骤为:

(1) 对于图像中的每个点 $Y_B(i, j)$, 分别计算其水平、竖直和对角方向的梯度绝对值 $Y_{BH}(i, j)$ 、 $Y_{BV}(i, j)$ 和 $Y_{BD}(i, j)$, 即:

$$\begin{aligned} Y_{BH}(i, j) &= |Y_B(i, j) - Y_B(i, j+1)| \\ Y_{BV}(i, j) &= |Y_B(i, j) - Y_B(i+1, j)| \\ Y_{BD}(i, j) &= |Y_B(i, j) - Y_B(i+1, j+1)| \end{aligned} \quad (13)$$

或表示为:

$$\begin{aligned} Y_{BH}(i, j) &= |Y_B(i, j) - Y_B(i, j-1)| \\ Y_{BV}(i, j) &= |Y_B(i, j) - Y_B(i-1, j)| \\ Y_{BD}(i, j) &= |Y_B(i, j) - Y_B(i-1, j-1)| \end{aligned} \quad (14)$$

(2) 求出各个方向梯度差分的最大值, 即:

$$\begin{aligned} G_H &= \text{Max}(Y_{BH}) \\ G_V &= \text{Max}(Y_{BV}), \\ G_D &= \text{Max}(Y_{BD}) \end{aligned} \quad (15)$$

(3) 将每个像元 3 个方向的绝对梯度分别与对应方向的最大梯度值进行阈值判断, 若大于阈值, 则将该方向的判定标志置为 1, 反之为 0。对应的表达式为:

$$\begin{aligned} F_k(i, j) &= \begin{cases} 1, Y_{Bk}(i, j) > Th \cdot G_k \\ 0, Y_{Bk}(i, j) \leq Th \cdot G_k \end{cases}, \\ F(i, j) &= F_H(i, j) \cdot F_V(i, j) \cdot F_D(i, j) \end{aligned} \quad (16)$$

式中 $F_k(i, j)$ 为 (i, j) 处对应 k 方向的判定值, k 为 3 个方向中的任意方向, Th 为设置的判定阈值。最终 (i, j) 处的盲元标志值由各方向分量连乘得到, 则盲元模板的值可表示为:

$$M(i, j) = \begin{cases} 1, F(i, j) = 1 \\ 0, F(i, j) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

为了进一步避免盲元误校正, 可将盲元检测结果与原图经中值滤波后的结果进行点对点匹配, 若检测点位置的像元与中值滤波后的像元灰度差异很大, 则说明该点确实是一个局部极值点, 可将其确定为盲元; 反之, 则说明该点并非是局部极值点, 需要将其剔除以避免误校正。通过以上步骤, 可得到最终的盲元模板, 完成盲元检测过程。

3.3 盲元校正算法

通过公式 (17) 求得盲元模板, 再利用公式 (18) 可对原始盲元图像进行校正, 校正公式为:

$$Y_C(i, j) = \begin{cases} Y_B(i, j), M(i, j) = 0 \\ \sum_{(m, n) \in T} w(m, n) \cdot Y_B(i+m, j+n), M(i, j) = 1 \end{cases} \quad (18)$$

式中 Y_C 为经过盲元校正后的红外图像。

利用公式 (18) 进行盲元校正时, 以检测到的每个盲元点为中心, 进行 3×3 邻域的局部中值滤波, 这样就可以对大部分孤立盲元进行校正。若图像中存在连续盲元块, 则需要多次盲元检测和校正, 连续盲元的校正步骤如下:

(1) 对原图进行盲元检测, 获得盲元模板 M , 遍历盲元模板, 若对应点为孤立盲元, 则利用式 (18) 进行校正, 若对应点有盲元连续, 则对该位置盲元暂不处理;

(2) 将已校正的盲元点视为正常像元, 将对应点位置坐标从 M 中剔除;

(3) 返回步骤 (1) 继续进行盲元检测和校正, 直至 M 中的所有点均被校正。

上述针对连续盲元的检测校正是通过多次计算对盲元从外至内进行层层修正, 一般而言 3~5 次计算就已足够。为了不失一般性, 在计算梯度绝对值时, 奇数次计算采用公式 (13), 偶数次计算则采用公式 (14), 这样还可以避免梯度差分随方向的影响, 提高检测的鲁棒性。

当对背景较复杂且场景不断变化的序列图像进行上述盲元补偿时, 图像中的细节边缘会造成较大干扰, 因此对每帧图像都进行单独的盲元检测反而会影检测精度。在景物辐射变化不大的情况下, 一定时间内成像系统所含的盲元数目和位置也不会发生剧烈变化。因此, 对于序列图像, 可每隔数十帧进行一次盲元检测, 中间帧则都采用之前的盲元检测结果直接校正, 直至重新更新盲元模板, 再采用更新后的模板对后续图像进行校正。通过该手段可对序列图像实现快速盲元校正。

4 实验结果及分析

为了验证以上算法的有效性, 采用本文方法对一台 320×240 的非制冷型中波红外相机采集的图像进行处理, 并与其它典型方法进行了对比。原始红外图像如图 7(a) 所示, 它同时含有非均匀条纹和盲元噪点。图 7(b) 是原图经 NUC 预处理后的结果, 图 7(c)~(e) 是对 (b) 分别采用参考文献 [6][9][10] 中方法对图 7(b) 处理得到的结果, 图 7(f) 是对 (b) 采用本文方法得到的校正结果。所有数据均调整到 $[0 \sim 255]$ 的灰度范围。

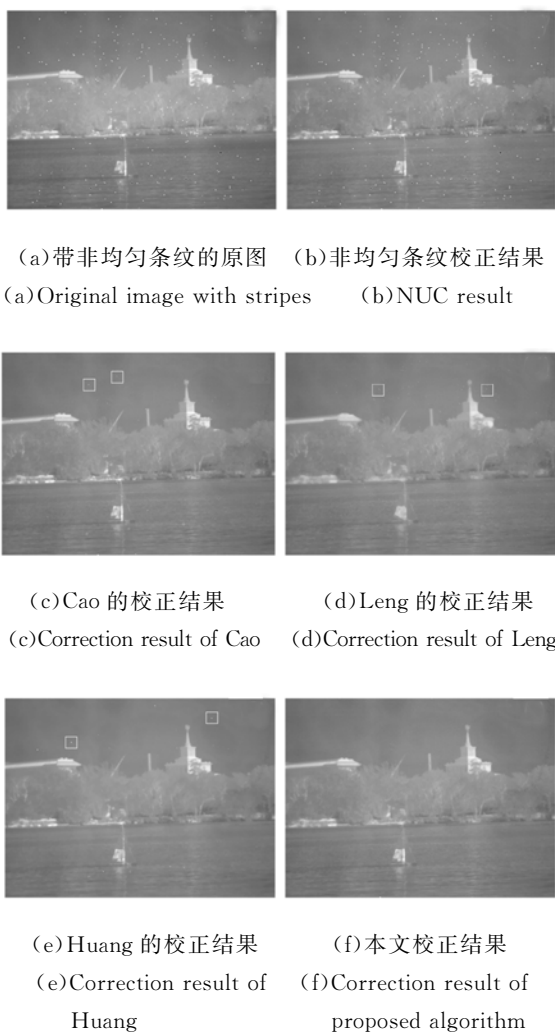


图 7 原图及其对应的校正效果

Fig. 7 Original IR image and correction results of different algorithms

从图 7 可以看到,与原图相比,经 NUC 预处理后,图(b)中的横向条纹得到了较为有效的抑制,而剩下的盲元噪点也得到一定的增强,有利于后续的盲元检测和校正。文献[6]采用的是基于“ 3σ ”阈值检测和纳高滤波的方法,由图 7(c)可知,文献[6]方法可以较好地校正图像中的孤立盲元,但对于连续的盲元区域则会出现漏检或残留,在校正图(局部方框中)中留有部分颗粒状的噪点;文献[9]是基于模糊中值的盲元检测与补偿方法,由图 7(d)可知,文献[9]方法虽然对固定盲元和随机盲元都进行了抑制,但由于隶属函数的设定并不精确,因此盲元校正的结果与理想值存在偏差,校正图(局部方框中)中存在一些细小的絮状噪声,同时,该方法也使图中一些强边缘和细节过渡平滑,降低了图像的清晰程度。文献[10]采

用自适应滤波方法,其结果如图 7(e)所示,可以看出处理后的图中(局部方框内)还明显存在部分盲元残留,这说明盲元检测并不彻底;通过本文方法得到的校正结果如图 7(f)所示,可以看到校正图中没有明显的盲元残留,且图中的细节边缘如树枝和房顶等也都保持了较好的清晰度,这说明该方法能有效消除 IRFPA 成像系统的各种盲元,提升图像质量。由于测试图像没有参考原图,对算法做客观评价较为困难。本文将各算法检测出的盲元个数近似作为实测图像的客观评价指标^[11],对应检测结果如表 1 所示,可以看出本文盲元检测方法检测出来的盲元个数高于其它对比方法,从而证实了该方法的有效性。

表 1 盲元检测结果统计

Tab. 1 Statistical results of blind pixel detection

盲元校正方法	文献[6]	文献[9]	文献[10]	本文方法
盲元检测个数	336	285	302	368
盲元率%	0.44	0.37	0.40	0.48

为了进一步对各盲元检测和校正算法进行客观比较,在一幅 640×480 的理想长波红外图像中随机加入不同程度的黑白噪点,用来仿真实际含有盲元的 IRFPA 成像系统。原始图像和仿真盲元图像分别如图 8(a)和(b)所示。



图 8 原始图像和仿真带噪图像

Fig. 8 Original and simulated noisy images

同样地,分别用几种算法对图 8(b)进行校正,得到的校正效果如图 9(a)~(d)所示。

以信噪比 SNR、峰值性噪比 PSNR 和结构相似度 SSIM 作为评价指标,在 Intel Core i5, 3.3GHz, 4 GB 内存的硬件资源下,用 Matlab 2010b 将图 9 中各算法的校正效果与原始理想图



(a) Cao 的结果 (b) Leng 的结果

(a)Correction result of Cao (b)Correction result of Leng



(c)Huang 的结果 (d)本文结果

(c)Correction result of Huang (d)Correction result of proposed algorithm

图 9 仿真图像不同盲元校正方法效果对比

Fig. 9 Comparison of blind pixel correction results of different methods on simulated image

像进行对比,并记录各算法所耗时间,得到评价结果如表 2 所示:

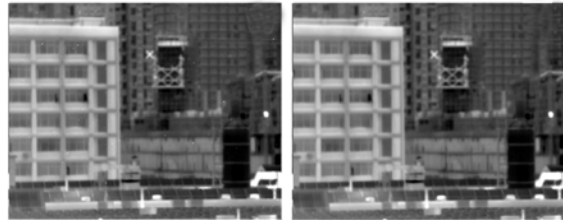
表 2 各算法校正效果对比

Tab. 2 Comparison of correction results of different methods

盲元校正方法	SNR/dB	PSNR/dB	SSIM	t/s
文献[6]的方法	35.592 9	59.729 4	0.999 7	10.362 2
文献[9]的方法	19.241 6	43.378 1	0.986 5	2.182 3
文献[10]的方法	23.488 3	47.624 8	0.978 3	3.303 4
本文方法	33.563 8	57.700 3	0.998 4	0.749 0

从表 2 可见,本文方法的 SNR 与 PSNR 比文献[9]和文献[10]算法分别提高了 14 dB 和 10 dB 左右,SSIM 值分别提升了 0.01 和 0.02,各项指标与文献[6]基本持平。但本文方法在处理速度上与其它算法相比具有显著优势,比文献[6]快 10 倍以上,是文献[9]和文献[10]算法的 3~5 倍。由于仿真图像中盲元数量相对较少且几乎没有连续盲元,因此文献[6]采用的算法各项指标都最好,但速度最慢。本文设计的盲元检测与校正方法,在保证处理效果与文献[6]基本一致的情况下,大大提高了算法的处理速度。通过程序移植,

已将该算法应用到红外热像仪的 FPGA 硬件平台上,可实现盲元的实时动态检测和校正,其处理前后效果如图 10(a)和 10(b)所示。



(a)盲元校正模块关闭 (b)盲元校正模块开启

(a) Module is turned off (b) Module is turned on

图 10 硬件平台盲元校正模块开启前后效果对比

Fig. 10 Comparison of results when blind pixel correction modules open and close in the hardware

FPGA 平台的图像处理帧率为 50 frame/s,由图 10 可知,在未开启盲元校正模块时,红外热像仪输出的图像存在明显的盲元,而当开启盲元校正模块后,图像中的盲元均得到有效校正,且图中其它细节信息也都得以充分保留,上述实验证实了该算法在实际应用中的效果和实时性能。

5 结 论

为了更好地实现 IRFPA 盲元校正,提高系统响应率和成像质量,本文分析比较了现有的各种盲元校正方法,根据盲元的响应特性提出了一种快速自适应的盲元检测与校正方法。先利用基于 L0 约束的 NUC 预处理方法消除图像中的非均匀条纹,在此基础上通过分析含有盲元场景图像的数学模型,设计了一种基于三梯度阈值的盲元检测与校正方法,并利用盲元的缓变特性实现了单帧图像和序列图像的盲元校正。实验仿真分析表明,相比于其它典型方法该方法的 SNR 和 PSNR 提高了 10~14dB,SSIM 提高了 0.01~0.02,单帧处理速度为 0.749 s,其可在保证校正效果的情况下具有 10 倍以上的速度优势。该方法简单可行,适应性强,可以在实际红外系统中应用。

参考文献:

- [1] 李怀琼,陈钱,高文昆. 红外焦平面阵列失效元动态检测与校正算法[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 192-196.
LI H Q, CHEN Q, GAO W K. Dynamic detection and compensation algorithm of defective pixels for IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 192-196. (in Chinese)
- [2] GHOSH S, MARSHALL I, FREITAS A. Autonomously detecting the defective pixels in an imaging sensor array using a robust statistical technique[C]. *Conference on Image Quality and System Performance V, San Jose, CA*, 2008.
- [3] 周慧鑫,魏亚姣,秦翰林,等. 采用双阈值的非制冷IRFPA盲元迭代检测算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 795-799.
ZHOU H X, WEI Y J, QIN H L, *et al.*. Blind-pixel iterative detection algorithm based on double threshold for uncooled IRFPA[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 795-799. (in Chinese)
- [4] 石岩,毛海岑,张天序,等. 一种新的基于特征直方图分解的红外焦平面阵列无效像元判别方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(2): 119-124.
SHI Y, MAO H C, ZHANG T X, *et al.*. New approach of IRFPA noneffective pixel discrimination based on pixel's characteristics histogram analysis [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(2): 119-124. (in Chinese)
- [5] 陈大川,刘缠牢,郑阳光. 红外焦平面阵列盲元检测及补偿算法[J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1215-1217.
CHEN D CH, LIU CH L, ZHEN Y G. Algorithm of blind pixels auto searching and compensation for IRFPA[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1215-1217. (in Chinese)
- [6] CAO Y, JIN W Q, LIU CH L, *et al.*. Scene-based bad pixel dynamic correction and evaluation for IRFPA device [C]. *Advances in Optoelectronics and Micro/Nano-Optics, IEEE*, 2010: 1-4.
- [7] LENG H B, ZHOU Z F, LIU W, *et al.*. New scene-based adaptive bad pixel detection algorithm for IRFPA [C]. *5th International Symposium on Photoelectric Detection and Imaging LISPOI Infrared Imaging and Applications, Beijing*, 2013.
- [8] WANG B J, LIU SH Q, LI Q, *et al.*. Blind-pixel correction algorithm for an infrared focal plane array based on moving scene analysis[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(3): 036401: 1-4.
- [9] 冷寒冰,宫振东,谢庆胜,等. 基于模糊中值的IRFPA自适应盲元检测与补偿[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 821-826.
LENG H B, GONG ZH D, XIE Q SH, *et al.*. Adaptive blind pixel detection and compensation for IRFPA based on fuzzy median filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 821-826. (in Chinese)
- [10] 黄曦,张建奇,刘德连. 红外图像盲元自适应检测及补偿算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 370-375.
HUANG X, ZHANG J Q, LIU D L. Algorithm of blind pixels adaptive detection and compensation for infrared image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 370-375. (in Chinese)
- [11] 张科,赵桂芳,崔瑞青,等. 一种提高红外焦平面阵列盲元检测精度的方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 453-456.
ZHANG K, ZHAO G F, CUI R Q, *et al.*. Method of improving bad pixel detection precision of IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 453-456. (in Chinese)
- [12] 曹扬,金伟其,刘崇亮,等. 红外焦平面阵列的自适应非均匀性校正及硬件实现[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2985-2991.
CAO Y, JIN W Q, LIU CH L, *et al.*. Adaptive nonuniformity correction and hardware implementation of IRFPA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2985-2991. (in Chinese)
- [13] 刘永进,朱红,赵亦工. 基于红外焦平面阵列读出结构的非均匀校正算法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 129-133.
LIU Y J, ZHU H, ZHAO Y G. Nonuniformity correction algorithm based on infrared focal plane

- array readout architecture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 129-133. (in Chinese)
- [14] WANG SH P. Stripe noise removal for infrared image by minimizing difference between columns [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 77: 58-64.
- [15] 代少升, 张天骐. 基于非线性响应的红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(4): 715-719.
- DAI SH SH, ZHANG T Q. Adaptive nonuniformity correction algorithm for IRFPA with nonlinear response[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 715-719. (in Chinese)
- [16] XU L, LU C W, JIA J Y. Image smoothing via L0 gradient minimization[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(6): 1-12.
- [17] ZHAO J F, ZHOU Q, CHEN Y T, *et al.*. Single image stripe nonuniformity correction with gradient-constrained optimization model for infrared focal plane arrays [J]. *Optics Communications*, 2014, 296: 47-52.

作者简介:



李凌霄(1991—),男,重庆人,博士研究生,2014年于重庆大学获得学士学位,现为浙江大学博士研究生,主要从事红外成像、图像处理等方面的研究。E-mail: lilingxiao1@126.com



冯华君(1963—),男,浙江余姚人,教授,博士生导师,1982年于浙江大学获得硕士学位,现为浙江大学光学成像工程研究所所长,主要从事成像系统、遥感等方面的研究。E-mail: fenghj@zju.edu.cn