

基于双边滤波器的红外图像条纹噪声消除算法

王书朋, 高 腾

(西安科技大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 提出了一种新的消除红外图像中条纹噪声的方法。由于红外焦平面阵列中每列读出电路的偏置电压不同, 导致红外图像中有明显的条纹状噪声。分析了读出电路偏置电压不均匀对红外成像的影响, 提出了利用双边滤波器估计读出电路偏置电压的方法, 并使用估计的偏置电压校正红外图像。基于实际红外图像的实验结果表明, 提出的算法能够显著地消除红外图像中的条纹噪声。

关键词: 红外图像; 条纹噪声; 固定模式噪声; 红外焦平面阵列

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2014)09-0728-04

Destriping Method for Infrared Image Based on Bilateral Filter

WANG Shu-peng, GAO Teng

(Communication and Information Engineering College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: This paper introduces a novel approach to eliminate stripe noise in infrared images. The differences between bias voltages in column readout circuit of infrared focal plane arrays result in strong stripe noise. This paper analyzes the influence of the column voltage bias on the readout signal and presents the approach to estimate the voltage biases using Bilateral filter. Then, infrared images are corrected by the estimated biases. The effectiveness of the method is shown according to the experimental results on real infrared images.

Key words: infrared image, stripe noise, fixed pattern noise, infrared focal plane array (IRFPA)

0 引言

红外传感器能够将红外光转换为电信号, 是红外成像设备的核心器件。基于红外焦平面阵列 (infrared focal plane array, IRFPA) 的红外传感器因为具有体积小、成本低、灵敏度高等特点, 是红外传感器的主流发展方向^[1]。但是, 由于当前的工艺水平还无法做到使 IRFPA 上的各传感器具有相同的响应特性^[2], 因此不同传感器对相同的红外辐射会产生不同的响应, 导致红外图像中包含大量噪声, 称为固定模式噪声。非均匀校正方法^[3-4]可以消除传感器间的差异, 但是由于传感器的响应特性会随时间缓慢变化, 因此必须在使用过程中不断地校正。

一种常用的非均匀校正方法是采用温度场均匀的参考场景校正传感器的响应参数, 使各传感器的输出相同。这种方法虽然可以获得较好的效果, 但是校正过程需要中断摄像机的正常拍摄。为了避免这一问题, Harris 等^[5]和 Hayat 等^[6]提出了利用摄像机正常工

作时捕获的图像序列和信号处理手段, 进行实时校正的方法。他们假设输入的红外辐射为独立同分布的随机变量, 通过参数估计的方法计算传感器的增益和偏置电压。基于相似的思想, Torres 等^[7]认为各传感器输入的红外辐射应该具有相同的取值范围, 并提出了一种称为 Constant Range 的校正方法。Ratliff 等^[8]提出了一种基于代数运算的非均匀校正方法, 其主要优点是并不依赖于场景的多样性假设。Torres 和 Hayat^[9]将非均匀校正问题看作是参数估计问题, 利用 Kalman 滤波估计传感器的增益和偏置电压。Pezoa^[10]采用一组 Kalman 滤波器依据各自的动态模型估计增益和偏置, 最后将各滤波器的估计值加权, 求得最终的估计结果。

实际上, 在红外图像中除了由于传感器的差异造成的固定模式噪声, 还存在另外一种条纹噪声, 它是由于 IRFPA 中读出电路的不同而造成的^[11]。因为 IRFPA 上位于不同列的传感器采用不同的读出电路, 读出电路偏置电压的差异会在红外图像上产生明暗

收稿日期: 2014-03-21; 修订日期: 2014-05-12。

作者简介: 王书朋 (1975-), 男, 江苏常熟人, 副教授, 从事图像处理方面的研究, E-mail: wang.shupeng@163.com。

基金项目: 陕西省自然科学基金项目, 编号: 2011JQ8037; 陕西省教育厅科研计划项目, 编号: 11JK1019。

相间的条纹, 即条纹噪声。虽然条纹噪声与固定模式都属于非均匀噪声, 但是其产生机理并不相同, 利用上述非均匀校正方法并不能消除条纹噪声^[12]。基于标定的校正方法不能实时更新参数, 需要假设在连续2次标定之间的很长一段时间内参数不变, 而列偏置电压则变化较快。基于场景的校正方法虽然可以实时更新参数, 但是也带来了两个问题: 1) 这类算法需要很长时间的图像序列算法才能收敛。2) 使用长时间的图像序列可能导致“伪影”现象, 即将前面的图像显示在后面的图像上。本文针对这一问题, 提出了一种基于单帧图像的竖条纹消除算法, 通过对单帧图像的分析, 估计每列读出电路的偏置电压并消除条纹噪声, 可获得良好的去除条纹噪声的效果。

1 条纹噪声模型

非均匀校正算法通常采用线性模型描述固定模式噪声问题^[11], 将图像中像素 (i, j) 的值 $z(i, j)$ 表示为:

$$z(i, j) = A(i, j)x(i, j) + B(i, j) + v(i, j) \quad (1)$$

式中: $A(i, j)$ 和 $B(i, j)$ 分别为第 (i, j) 个传感器的增益和偏置; $x(i, j)$ 是传感器捕获的入射红外辐射; $v(i, j)$ 表示电子噪声; 增益 $A(i, j)$ 表示固定模式噪声中的乘性分量; 偏置分量 $B(i, j)$ 表示固定模式噪声中的加性分量。增益和偏置变化非常缓慢, 因此称为固定模式噪声。非均匀校正算法可以有效地消除固定模式噪声, 但并不能消除随机噪声。通常认为随机噪声服从高斯分布, 因此可利用图像滤波的方法消除。

上述模型并没有表示读出电路的差异对输出信号的影响。根据条纹噪声产生的机理, 本文假设:

1) 列读出电路偏置电压可建模为未知随机变量, 且同一列的像素具有相同的偏置。

2) 红外焦平面阵列中不同列的读出电路偏置电压相互独立。

根据以上假设, 传感器的响应模型可以表示为:

$$z(i, j) = x(i, j) + b(j) + v(i, j) \quad (2)$$

式中: $z(i, j)$ 表示像素 (i, j) 的值; $b(j)$ 表示第 j 列读出电路的偏置电压; $x(i, j)$ 表示红外传感器对入射红外辐射的实际响应。这个模型中并没有考虑传感器的增益和偏置, 本文假设它们已经通过非均匀校正算法被消除。

2 条纹噪声消除方法

基于上一节中给出的传感器响应模型, 提出一种利用双边滤波器估计列读出电路偏置电压的方法, 并通过校正列偏置电压消除条纹噪声。

2.1 双边滤波器 (bilateral filter) 原理

滤波器是消除噪声干扰, 估计信号真值的有效方

法。假设干扰服从均值为零的高斯分布, 且信号具有低频特性, 滤波器通过对邻域信号的加权平均, 可以获得对原始信号的可靠估计。这类滤波器表示为

$$g(x) = k_s^{-1}(x) \int_{-\infty}^{+\infty} f(\gamma) h_s(\|\gamma - x\|) d\gamma \quad (3)$$

式中: 核函数 $h_s(\|\gamma - x\|)$ 是单调递减函数, $k_s(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_s(\|\gamma - x\|) d\gamma$ 为归一化系数。

但是当函数快速变化时, 根据空间距离设置权值往往会造成过度平滑, 产生较大的估计误差。双边滤波器^[14]的主要思想是将传统滤波器在空间域上的加权平均操作同时应用到函数的值域, 即在计算邻域平均值时, 不仅根据空间距离分配权值, 同时也要考虑函数值的相似程度。函数值越相似, 分配的权值就越大。由于权值与函数值有关, 因此双边滤波器是一种非线性滤波器, 表示为:

$$g(x) = k_s^{-1}(x) \int_{-\infty}^{+\infty} f(\gamma) h_s(\|\gamma - x\|) h_r(\|f(\gamma) - f(x)\|) d\gamma \quad (4)$$

双边滤波器的权值由空间权值 $h_s(\|\gamma - x\|)$ 和值域权值 $h_r(\|f(\gamma) - f(x)\|)$ 两部分组成。当 $f(x)$ 变化缓慢时, 相邻函数值是近似的, 因此值域权值近似为1, 通过平均可以消除不相关的噪声。当 $f(x)$ 快速变化时, 在邻域内函数值也相差非常大, 因此 $h_r(\|f(\gamma) - f(x)\|)$ 会产生非常小的权值, 避免了过度平滑。

2.2 条纹噪声估计

对于红外图像而言, 列偏置电压 $b(j)$ 可以看作是一种随机噪声, 且不同列的偏置电压相互独立。由于偏置电压作用于图像中同一列的所有像素上, 因此造成明显的条纹状噪声。要消除图像中的条纹噪声, 首先需要估计出 $b(j)$ 。对于同一列像素, $b(j)$ 可以看作常数。因此, 图像的列平均可以表示为:

$$E_c[z(i, j)] = E_c[x(i, j)] + E_c[b(j)] + E_c[v(i, j)] = \sum_i x(i, j) + b(j) + \sum_i v(i, j) \quad (5)$$

假设噪声 $v(i, j)$ 的均值为零, 则

$$Z_c(j) = x_c(j) + b(j) \quad (6)$$

式中: $Z_c(j)$ 表示红外图像的列平均; $x_c(j)$ 表示真实的红外响应列平均。一般来说, 红外图像的像素灰度值在空间上是缓慢变化的, 但是在图像边缘处也会产生快速的变化。为了估计列偏置电压 $b(j)$, 首先采用双边滤波器对 $Z_c(j)$ 进行滤波, 得到 $x_c(j)$ 的估计:

$$\hat{x}_c(j) = \frac{1}{k_j} \sum_k h_s(\|k - j\|) h_r(\|z_c(k) - z_c(j)\|) z_c(k) \quad (7)$$

式中: $k_j = \sum_k h_s(\|k - j\|) h_r(\|z_c(k) - z_c(j)\|)$ 。根据 \hat{x}_c , 可得到偏置电压的估计:

$$\hat{b}(j) = z_c(j) - \hat{x}_c(j) \quad (8)$$

从红外图像 $z_c(j)$ 中减去偏置电压 $\hat{b}(j)$ ，可得到恢复的原始图像 $\hat{x}(i, j)$ ：

$$\hat{x}(i, j) = z(i, j) - \hat{b}(j) \quad (9)$$

3 实验及结果分析

为了验证本文提出算法的有效性，本文使用非制冷中波红外摄像头采集的红外图像进行了实验。实验中使用的红外图像尺寸为 384×288 ，已经过两点校正。从图像中可以看出，两点校正虽然可以消除大部分固定模式噪声，但是并不能消除条纹噪声。在实验中，为了说明本文提出算法的性能，比较了两种方法，一种是本文提出的方法，一种是利用高斯平滑滤波的去噪方法。实验中滤波器的核函数 $h_s(\cdot)$ 和 $h_r(\cdot)$ 均采用方差 $\sigma^2=2$ 的高斯函数。

图 1(a) 中为经过两点校正后的红外图像，有明显的条纹噪声。从图 1 的结果看，两种去噪方法都能有效消除条纹噪声，说明本文建立的噪声模型是合理的，根据列平均消除条纹噪声的方法是有效的。图 1(d) 比较了去噪前和去噪后图像的列平均。从图中可以看出，在第 360 列附近由于图像中有明显的边缘，列平



(a) 原始图像 (a) Original infrared image



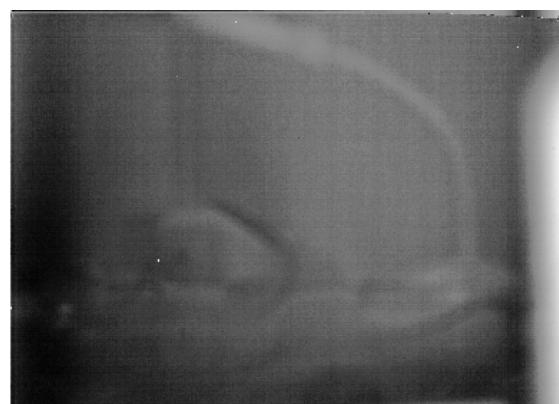
(c) 使用平滑滤波的结果 (c) Result using the smoothing filter

图 1 条纹噪声消除结果

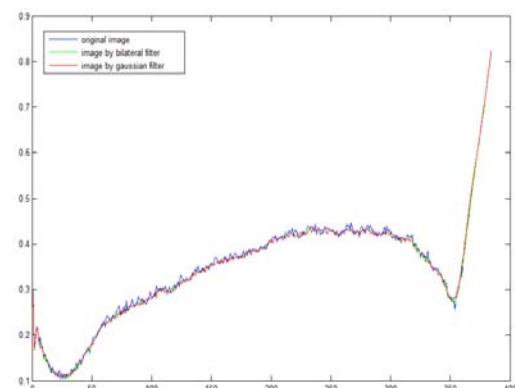
均发生了快速的变化，使用双边滤波器可以更好地跟随信号的变化，避免误差。在图 2 中，第 266 列和 324 列附近，采用高斯平滑滤波器的去噪算法产生了较大的估计误差，在去噪后的图像中造成了明显的伪迹。而本文提出的方法避免了这样的问题。

4 总结

本文提出了一种新的消除红外图像中条纹噪声的方法。考虑到条纹噪声是由于红外焦平面阵列读出电路偏置电压的不均匀性造成的，本文通过设计关于偏置电压的观测模型，利用双边滤波器估计出各列的偏置电压，然后将其从图像中消除。由于双边滤波器能够跟随信号的快速变化，避免了在图像高对比度边缘处产生估计误差，造成伪迹。通过对实际红外图像的实验，验证了本文算法的效果。实验结果表明，本文算法能够更好地消除红外图像中的条纹噪声。但是，实验中也发现本算法具有一定的局限性，即当图像中包含明暗对比非常强的物体时，由于偏置电压的估计误差可能会造成伪迹（如图 2(b) 中 304 列处），这也是后续工作需要重点解决的问题。



(b) 本文算法结果 (b) Result using the proposed method



(d) 列平均比较 (d) Comparison between column averages

Fig.1 Destriping results

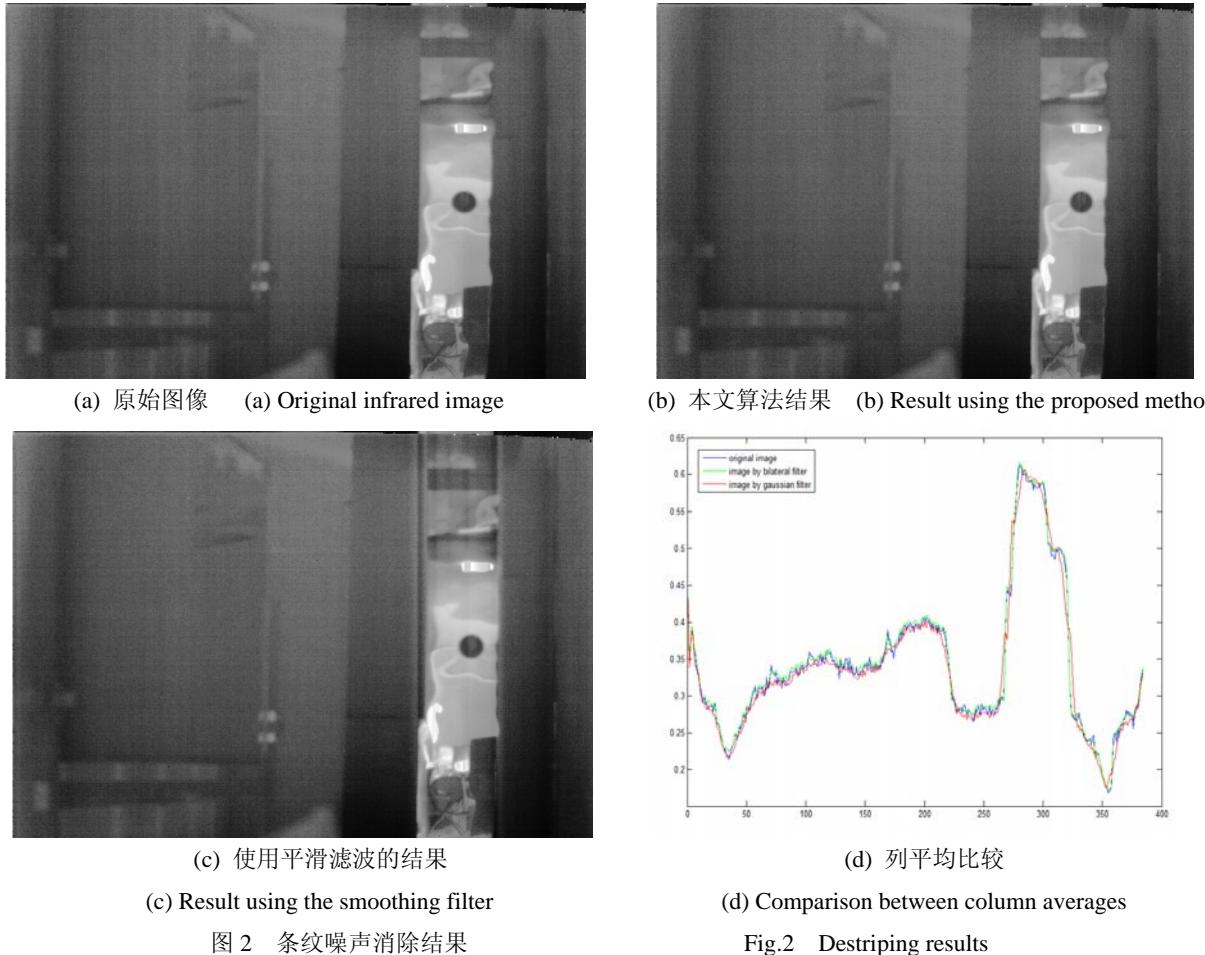


图2 条纹噪声消除结果

参考文献:

- [1] Martin C S, Torres S N, Pezoa J E. Statistical recursive filtering for offset nonuniformity estimation in infrared focal-plane-array sensors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2008, **51**(6):564-571.
- [2] 任建乐, 陈钱, 钱惟贤. 基于配准的红外焦平面阵列条纹非均匀性校正[J]. 红外与毫米波学报, 2011, **30**(6): 499-502.
- [3] 张雪峰, 陈宝国, 樊养余, 等. 基于场景的红外非均匀性校正算法对比研究[J]. 红外技术, 2013, **35**(9): 560-566.
- [4] H. Zhou, S. Liu, D. Wang, et al. Solution for the nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**: 2928-2932.
- [5] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction using constant average statistics constraint: analog and digital implementations[C]//Proceeding of SPIE, 1997: 895-905.
- [6] Hayat M M, Torres S N, Armstrong E, et al. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal plane arrays[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**: 772-780.
- [7] Torres S N, Reeves R A, Hayat M M. Scene-based nonuniformity correction method using constant-range: performance and analysis[C]//Proceedings of 6th world multiconference on systemics, cybernetics and informatics, Orlando, FL, USA, 2002: 224-229.
- [8] Ratliff B M, Hayat M M, Hardie R C. An algebraic algorithm for nonuniformity correction in focal plane arrays[J]. *the Optical Society of America A*, 2002, **19**: 1739-1747.
- [9] Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays[J]. *The Optical Society of America A*, 2003, **20**: 470-480.
- [10] Pezoa J E, Hayat M M, Torres S N, et al. Multimodel kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared sensors[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2006, **23**: 1282-1291.
- [11] 隋修宝, 陈钱, 顾国华. 红外图像条纹噪声消除方法(英文)[J]. 红外与毫米波学报, 2012, **31**(2): 106-112.
- [12] Tendero Y, Gilles J, Landeau S, et al. Efficient single image nonuniformity correction algorithm[C]//Proceedings of SPIE, Bellingham, WA, 2010.
- [13] Nocedal J, Wright S J. *Numerical Optimization*[M]. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [14] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 1998: 839-846.