

基于单帧红外场景的非均匀性校正算法研究

黄晨玲

(上海济物光电技术有限公司, 上海 201815)

摘要 本研究针对红外图像存在的非均匀性噪声, 研究中值直方图均衡化校正原理及其在工程应用中的优势。根据研究结果可知: 高斯权重参数的选取对校正结果具有重要的影响, 针对所用红外图像, 结合校正后图像效果和评价指标(粗糙度和图像非均匀性), 应选取高斯权重参数为 0.25, 校正后图像粗糙度降为 0.003(原图为 0.013), 图像非均匀性降为 0.516%(原图为 2.469%), 同时图像细节和清晰度较原图均有了很大程度的改善。

关键词 红外图像; 中值直方图均衡化; 非均匀性校正

中图分类号: TP3

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)06-0007-03

近些年, 红外成像技术不断进步, 红外成像系统已经被众多领域广泛使用, 伴随着各行各业与日俱增的发展需求, 人们对红外图像的质量要求也越来越高。现阶段红外成像系统大都采用焦平面阵列探测器来采集图像。在理想状态下, 探测器对均匀辐射源成像时所有像元输出理应一致, 但现阶段受技术水平等因素制约, 导致获取的红外图像存在非均匀性条纹噪声, 这些噪声的存在严重影响了图像的质量, 对后续处理形成阻碍。因此, 解决红外焦平面成像系统输出图像的非均匀性条纹噪声已经成为一项重要任务。

1 研究背景

在工程项目中, 一般用两种方法进行图像处理: 一种是加强硬件质量来提高图像质量, 如研究新材料和新工艺等; 另一种是对原始图像进行处理。前者可从根源上解决问题, 但是其存在研究时间长、投入资金高等缺点; 后者相比而言, 资金花费较低且不影响现阶段工程进度。因此, 对红外图像的非均匀性校正成为研究主流。

针对红外图像的非均匀性校正算法大致分为两类, 一类是基于定标^[1-2]的红外图像非均匀性校正, 其原理是利用均匀稳定的辐射源获取各像元的偏差信息, 从而得到非均匀性校正参数。但受探测器自身变化和环境影响, 需要不定期的更换校正系数, 并且随着遥感图像大幅宽、高动态范围等需求的提高, 使得存储在硬件系统中的参数也日益增多。另外一类是基于场景的算法, 这类算法是利用获取的场景图像信息进行校正, 相较于基于定标的方法, 场景类算法克服了探测器状态变化等问题, 且具有无需周期性更新参数等优点, 已成为当前主流研究, 这类算法主要包括基于统计的校正方法、基于帧间匹配的算法以及基

于神经网络的校正算法^[3]。本文从工程应用的角度出发, 研究利用中值直方图均衡化算法对红外图像非均匀性条纹噪声进行处理, 此算法不需要连续多帧运动的红外图像, 且具有操作简单, 耗时短、资源占用率低等优点。

2 基于中值直方图均衡化的校正算法

中值直方图均衡化起初是一种用来校正不同相机间增益差的算法, 以便比较两个相机间的图像^[4]。

非均匀性噪声在红外图像主要表现为竖状条纹噪声, 在理想状态下, 获取的红外图像, 其相邻列信息具有一定的近似性, 累计直方图也应趋于一致, 而不近似的部分就是需要校正的非均匀性噪声, 因此可以将此算法应用到校正红外图像相邻列响应差异中, 以达到校正竖状条纹噪声的目的^[5]。对红外图像的非均匀性校正其实是对图形中每一像元进行均衡化处理, 根据上述原理, 算法具体步骤如下:

第一步: 对于大小为 $M \times N$ 的红外图像 I , M 为图像行数, N 为图像列数, $I(i, j)$ 表示图像中行列的灰度值, $I(i, j) \in \{0, 1, \dots, L\}$, 图像 I 每列累积直方图为 H_j :

$$H_j(P) = \frac{1}{M} \sum_{r=0}^P \sum_{i=1}^M 1_{I(i,j)=r} \quad (1)$$

其中 P 依次取值为 $0, 1, \dots, L$, $H_j \in [0, 1]$ 。

第二步: 计算每列图像局部中值累积直方图:

$$\tilde{H}_j = \sum_{k \in (-n, \dots, n)} g(k) H_{k+1} \quad (2)$$

$$\tilde{H}_j^{-1} : [0, 1] \rightarrow \{0, 1, \dots, L\}$$

$$g(k) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{k^2}{2\sigma^2}}$$

其中: $g(k)$ 为标准差为 σ 的高斯权重参数, 窗口

大小为 $2n$, $n = \text{floor}(4\sigma)$ 。

高斯权重参数的选取一般利用手动法, 可以从一个较小的参数开始尝试, 然后参数值逐渐增大, 通过对比校正后图像视觉效果最终选取合适的高斯参数, 对同一探测器而言, 高斯权重参数仅需确定一次。

第三步: 根据第二步中局部中值累积直方图对每列数据进行处理, 灰度值 $O(i, j)$ 表示每一像元输出值。

$$O(i, j) = \tilde{H}_j^{-1}(H_j(I(i, j))) \quad (3)$$

可以看出, 中值直方图均衡化是对图像的每一列灰度值单独进行统计, 基于相邻列灰度累计直方图近似性, 利用高斯函数拟合出新的灰度累计直方图, 再对红外图像的每列数据进行映射变换, 从而达到减弱非均匀性条纹噪声的目的。

3 校正结果分析

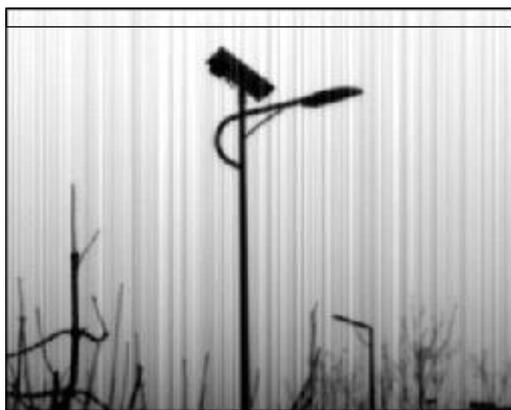
3.1 校正结果

本文所用的红外图像, 大小为 640×512 , 量化等级为 16bit。利用中值滤波算法进行盲元修复处理, 由

于收集包含真实非均匀性噪声的红外图像难度较高, 所以根据红外焦平面阵列工作原理, 对图像添加非均匀性噪声, 处理之后图像如图 1 (a) 所示 (以下简称原始图像), 原始图像存在明显的竖状非均匀性条纹噪声, 严重干扰了视觉效果, 图像整体偏暗, 对比度不明显, 部分细节淹没于噪声中, 无法准确进行判别。

根据章节 2 中原理对原始图像进行处理, 此算法中高斯权重参数是一个重要的输入, 为研究此参数对校正结果的影响以及选取合适的高斯权重参数, 本文依次输入高斯权重参数: 0.25 (1/4)、0.5 (2/4)、0.75 (3/4)、1 (4/4) 和 1.25 (5/4), 对于缺少相邻列数据的图像左右两侧可通过复制边缘列数据来进行填补, 高斯权重参数为 0.25 时, 校正图像如图 1 (b) 所示, 竖状非均匀性条纹噪声有所改善, 图像的细节更加清晰, 从局部放大图 1 (c)、图 1 (d) 来看, 对比度明显增强。

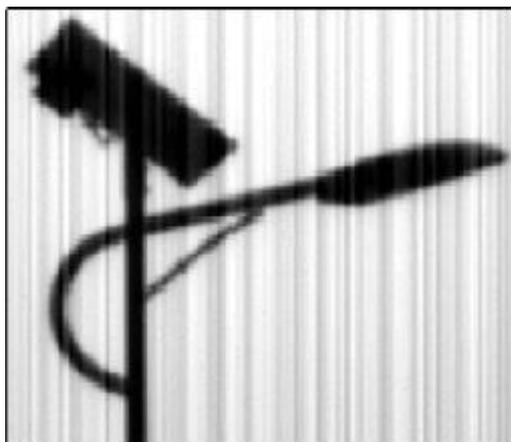
对于选取不同高斯权重参数对校正结果影响的研究具体见下一节。



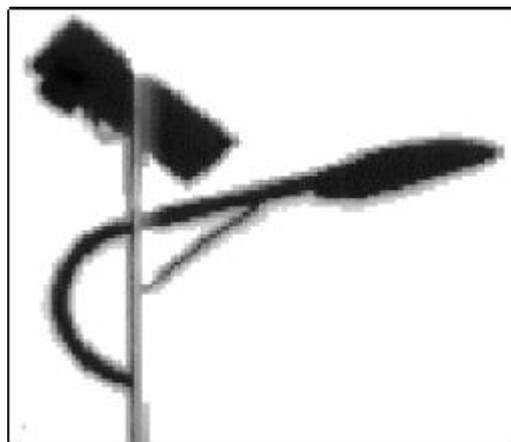
(a) 原始图像



(b) 均衡化后 ($\sigma=0.25$)



(c) 原始图像局部放大图



(d) 均衡化后 ($\sigma=0.25$) 局部放大图

图 1 处理前后图像对比图

3.2 结果分析

对于中值直方图均衡化算法的校正效果，本文将图像粗糙度和图像非均匀性作为评价指标来对校正结果进行衡量。

图像粗糙度 (Roughness) 是对图像性能的定量测量^[6]，利用该指标可以有效度量红外图像的平滑程度。中值直方图均衡化主要是对图像相邻列进行平滑处理，从而消除竖状非均匀性噪声，因此本文仅对图像水平方向粗糙度进行统计，公式 (4) 所示：

$$\rho(f) = \frac{\|h_1 * f\|_1}{\|f\|_1} \quad (4)$$

式中 ρ 为粗糙度， $h_1=[1, -1]$ 为水平模板， $\|f\|_1$ 为单帧红外图像 f 的 L_1 范数，(L_1 范数是单帧红外图像像素值总和)。上述公式中分子衡量水平方向上像素粗糙度，分母标准化能保持图像粗糙度在缩放前后保持一致^[7]。粗糙度值越小，表明图像列间差异越小，包含的非均匀性噪声越少。

非均匀性评价公式为相机有效像元响应率的均方根偏差与平均响应率的百分比，其数据源一般为使用均匀辐射源所获取的红外图像，用来评价探测器的非均匀性，如公式 (5) 所示：

$$UR = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i, j) - \bar{R}]^2} * 100\% \quad (5)$$

因此上述公式并不能直接用于场景丰富的外场图像，对于本文图像，选取图像上半部分目视较为均匀的景象来进行评价 (如图 1 (a) 中黑框部分所示)。

表 1 为校正前后图像粗糙度和非均匀性统计表，可以看出，原始图像的粗糙度为 0.013，对于中值直方图均衡化后的图像，当高斯权重参数为 0.25 时，粗糙度为 0.003，小于原始图像粗糙度；而随着高斯权重参数的增大，粗糙度也随之变大，当高斯权重参数大于 0.5 时，校正后图像的粗糙度大于原始图像的粗糙度，说明此时中值直方图均衡化对红外图像非均匀性校正效果开始起负面影响；原始图像的非均匀性为 2.469%，当高斯权重参数为 0.25 时，校正效果最好，非均匀性为 0.516%，随着高斯权重参数增大，校正后图像非均匀性也随之变大。由此可以看出，利用中值直方图均衡化算法对红外图像进行非均匀性校正时，选择合适的高斯权重参数对校正后图像效果起着至关重要的作用。对于本文所用红外图像，结合图像粗糙度和图像非均匀性这两个评价指标，高斯权重参数为 0.25 时，校正效果最好。

表 1 校正前后图像粗糙度和非均匀性统计表

原图	粗糙度	非均匀性 %
	0.013	2.469
	高斯权重参数 窗口尺寸	粗糙度 非均匀性 %
	0.25 1	0.003 0.516
中值直方图均衡化	0.5 2	0.015 1.185
	0.75 3	0.029 2.272
	1 4	0.036 2.768
	1.25 5	0.042 3.295

4 结论

本文根据章节 2 中阐述的原理对单帧红外图像进行非均匀性校正，从视觉图像和评价指标 (图像粗糙度和图像非均匀性) 两个方面进行比对，结果表明中值直方图均衡化对非均匀性条纹噪声有一定的改善作用。同时研究高斯权重参数的选取对图像校正结果的影响，对于本文所用红外图像，当高斯权重参数为 0.25 时，目视校正效果最好，此时图像粗糙度为 0.003 (原始图像为 0.013)，图像非均匀性为 0.516% (原始图像为 2.469%)，但随着高斯权重参数变大，算法对非均匀性条纹噪声的改善效果也逐渐降低。中值直方图均衡化后图像与原始图像对比，校正后图像明显具有对比度加强、细节清晰等优点，但同时出现局部过度增强现象。今后的研究为在此算法的基础上，对图像局部过度增强的情况进行优化。

参考文献：

- [1] 黄宇,张宝辉,吴杰,等.自适应多点定标非均匀性校正算法 [J]. 红外技术,2020,42(07):637-643.
- [2] 张涛.CMOS 非均匀性校正方法研究 [D]. 成都:电子科技大学,2021.
- [3] 王士伟.航天 CMOS 相机非均匀性校正技术研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2021.
- [4] 王坤.基于 FPGA 的红外图像采集与处理系统 [D]. 成都:电子科技大学,2021.
- [5] 同 [4].
- [6] 王查力.红外传感器建模及非均匀性校正技术研究 [D]. 成都:电子科技大学,2022.
- [7] 王杰.基于辐射通量的红外图像非均匀性校正方法研究 [D]. 北京:中国兵器科学研究院硕士学位论文,2021.