

〈图像处理与仿真〉

基于局部直方图规定化的红外图像非均匀性校正

谭东杰，张 安

(西北工业大学电子信息学院，陕西 西安 710072)

摘要：非均匀性噪声严重影响着红外焦平面阵列的成像质量。针对条纹非均匀性问题，提出了一种基于局部直方图规定化的红外图像非均匀性校正算法。该算法对图像逐列进行处理，首先采用文中提出的加权折中直方图方法计算得到每一列图像的期望直方图，然后对当前图像列进行直方图规定化处理，最后遍历整幅图像实现非均匀性校正。实验结果表明，本文算法能够有效地抑制红外图像的条纹非均匀性噪声，同时较好地保留了图像的边缘轮廓信息。

关键词：非均匀性校正；红外图像；直方图规定化；高斯加权

中图分类号：TN911.73 文献标识码：A 文章编号：1001-8891(2013)06-0325-04

Non-uniformity Correction Based on Local Histogram Specification

TAN Dong-jie, ZHANG An

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The non-uniformity of infrared focal plane array (IRFPA) has serious effects on image qualities of infrared system. A new non-uniformity correction algorithm based on local histogram specification (LHS) is proposed. Firstly, connect each column of the image to a neuron, and compute a local expectation histogram with Gaussian weights. Then, specify the histogram of current column with the expectation histogram. Finally, correct the non-uniformity throughout the infrared image. The experimental results show that the new algorithm could effectively correct the non-uniformity of the infrared image as well as maintain the edge information.

Key words: non-uniformity correction, infrared image, histogram specification, gauss weighting

0 引言

红外焦平面阵列（IRFPA）成像具有高集成度、高可靠性、高帧频、高信噪比的特点，是当今红外探测成像系统发展的主要方向。但是，受到红外敏感器件、工艺条件、外界输入等综合因素的影响，IRFPA 每个探测元的输出响应度不完全一致，即存在非均匀性。非均匀性又称固定图案噪声（Fixed Patter Noise, FPN）或空间噪声（Spatial Noise），严重影响红外传感器的成像质量。因此，有必要通过合适的图像处理方法对红外图像进行非均匀性校正^[1]，从而提高红外成像系统的成像质量。

目前红外图像非均匀性校正方法按照校正系数的获取方式可以归为两大类^[2]：基于定标的校正方

法和基于场景的自适应校正方法。其中基于定标的校正方法包括：两点校正法、两点多段线性校正法以及多项式拟合法等^[1]。这类方法原理简单，易于硬件实现，实时性好。但受限于 IRFPA 响应漂移带来的校正误差，实际校正时需要进行周期性重复定标。基于场景的自适应校正方法主要有：基于神经网络的算法^[3-4]、基于卡尔曼滤波的方法^[5]、基于统计的方法^[6-7]、基于高通滤波的方法^[8]等。这类方法的校正系数来自于对场景的估计，在一定程度上克服了 IRFPA 响应漂移带来的校正误差，是目前算法研究与系统应用的重要研究方向。条纹非均匀性是红外图像非均匀性中比较常见的类型，含有条纹非均匀性噪声的红外图像中含有非常明显的横条纹和纵条纹噪声，严重影响 IRFPA 的成像质量。针对这

收稿日期：2013-04-15；修订日期：2013-05-05。

作者简介：谭东杰（1972-），男，河南淮阳县人，博士研究生，主要从事光学制导方面的研究工作。E-mail: tdj2011@sohu.com。

基金项目：中航产学研资助项目，编号：CXY2010BH02。

种条纹非均匀性问题，代表性的方法是神经网络校正法。该方法具有较好的自适应性和误差跟踪能力。但其也存在校正误差不易控制、图像边缘轮廓模糊等问题。

条纹非均匀性噪声具体表现为相比周围正常图像区域有明显反差的亮或暗的条纹。对红外图像进行非均匀性校正的目的就是要去除图像中的横、纵条纹噪声，使图像变的平滑且细节清晰。鉴于图像内容是连续的，因此图像相邻两列的统计差异很小，其直方图几乎是相同的。但是由于非均匀性噪声的存在，图像相邻两列的亮度差别较为显著，从而呈现出条纹非均匀性。

本文考虑到噪声的条纹特性，对图像逐列进行处理。在研究折中直方图的基础上，提出了能综合考虑当前列及周围六邻域列灰度信息的加权折中直方图方法。再结合直方图规定化方法，对图像每列进行处理，实现图像的条纹非均匀性校正。

1 局部直方图规定化非均匀性校正

1.1 直方图规定化

直方图规定化是生成具有指定直方图的图像处理方法。其基本原理如下：

令 r 和 z 分别表示输入图像和输出图像的灰度级。输入灰度级的概率密度函数 (probability density function, PDF) 为 $p_r(r)$, 输出灰度级的 PDF 为 $p_z(z)$ 。通过公式(1)求出具有均衡化概率 PDF 的灰度级 s :

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(w)dw \quad (1)$$

假设期望的输出图像的灰度级为 z , 具有指定的 PDF 为 $p_z(z)$, 则有:

$$H(z) = \int_0^z p_z(w)dw = s \quad (2)$$

$$z = H^{-1}(s) = H^{-1}[T(r)] \quad (3)$$

式中: H 为传递函数。因此, 只要找到 H^{-1} 就可以得到 PDF 为指定的 $p_r(r)$ 的输出级 z 。

1.2 折中直方图规定化

折中直方图思想最早由 JULIE DELON^[9]提出。用于对不同相机拍摄的相同场景的两幅光照不均的图像做灰度拉伸校正。其基本原理如图 1 所示。

设 I_1 、 I_2 为两幅数字图像, H_1 、 H_2 分别为 2 幅图的灰度直方图, 其中心点分别位于 m_1 、 m_2 , 最佳的折中直方图是中心点在 $(m_1+m_2)/2$ 处的两个直方图 H_1 、 H_2 的调和平均直方图 $H_{1/2}$, 而不是直接平均两个直方图得到的 H_3 。 $H_{1/2}$ 由公式(4)计算^[9]:

$$H_{1/2} = \left(\frac{H_1^{-1} + H_2^{-1}}{2} \right)^{-1} \quad (4)$$

式中: H_1^{-1} 和 H_2^{-1} 分别表示 I_1 、 I_2 两幅数字图像直方图逆变换操作。

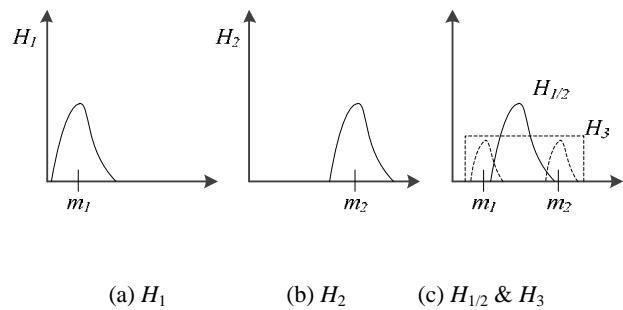


图 1 折中直方图

Fig.1 Midway image equalization

此方法可以用到任意数量的图像上, 由此可以求出期望的直方图, 再结合直方图规定化方法, 实现折中直方图规定化图像非均匀校正。

1.3 加权折中直方图规定化

在 1.2 节计算折中直方图时, 不同图像的灰度直方图具有相同的权值, 如公式(4)中所述, H_1^{-1} 和 H_2^{-1} 采用直接相加的方式。本文我们对图像进行分列处理, 在计算当前图像列及周围六邻域图像列的折中直方图时, 我们提出了加权折中直方图的方法。即采用加权的方式将当前图像列及其周围六邻域图像列的信息综合起来, 用公式(5)计算最终的期望直方图:

$$H_{i_E} = \left(\sum_{j=-3}^3 g(\sigma, j) \times H_{i+j}^{-1} \right)^{-1} / 7 \quad (5)$$

式中: H_{i_E} 为第 i 列图像的期望直方图; $H_{i+j}, j \in [-3, 3]$ 为原始图像中第 i 列及其周围六邻域列的灰度直方图; $g(\sigma, x)$ 为权值函数。本文采用了高斯函数, 如下所示:

$$g(\sigma, x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

式中: σ 为高斯函数标准差, x 为其它图像子列到当前图像子列的距离。

在此基础上, 结合直方图规定化方法, 实现加权折中直方图规定化图像非均匀校正。

1.4 局部直方图规定化非均匀校正

本文提出的局部直方图规定化非均匀校正方法的基本原理如图 2 所示。

具体实现步骤如下:

- 1) 将图像 I 按列分为 $I_1, I_2 \dots, I_n$, n 为图像宽度。
- 2) 假设当前列为 $I_i, i \in [1, n]$, 分别求出当前列周围邻域各列图像 $I_{i+j}, j \in [-3, 3]$ 的灰度直方图 H_{i+j} 。
- 3) 根据公式(5)求解当前列 I_i 所对应的加权期望直方图 $H_{i,E}$ 。
- 4) 根据期望直方图 $H_{i,E}$, 并利用直方图规定化方法, 对当前列进行直方图规定化, 得到非均匀性校正后的列图像 J_i 。
- 5) 重复步骤 2), 3), 4) 对图像每列进行非均匀性校正, 最终得到非均匀性校正后的图像 J 。

上述方法适用于去除纵条纹噪声, 对于横条纹噪声, 需要将图像顺时针旋转 90° , 重复上面步骤 1) ~5), 即可实现横条纹非均匀性校正。

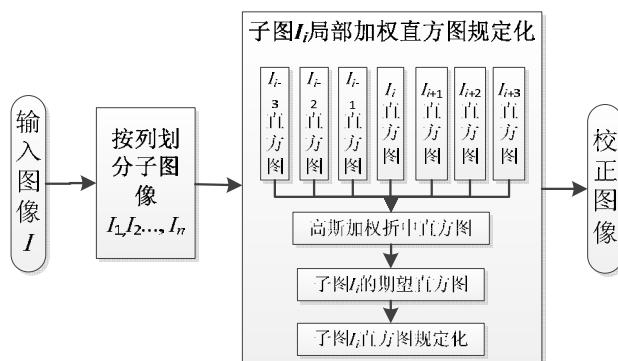


图 2 局部加权直方图规定化非均匀校正基本原理

Fig.2 The diagram of non-uniformity correction based on local weighting histogram specification

2 实验结果分析

2.1 实验结果

利用本文算法对 2 组真实红外图像序列进行非均匀性校正, 部分实验结果如图 3 所示。

其中图 3(a)为被条纹噪声污染的红外图像, 图 3(b)为校正后的结果图。可见, 本文算法可以有效地抑制横条纹和纵条纹噪声。

2.2 对比实验结果

为了进一步表明本文算法的有效性, 本节将其与其它几种典型的红外图像非均匀性校正方法进行对比, 包括卡尔曼滤波校正算法^[5]、基于场景统计的方法^[6]、恒定统计平均方法^[7]和高通滤波算法^[8]。实验对比结果如图 4 所示。程序运行环境为 Visual C ++ 6.0, 计算机配置为 Intel Pentium 1.80 GHz CPU, 1.00 GB RAM, 运行时间对比结果见表 1。本节从定性和定量两方面对这几种红外图像非均匀性校正算法进行分析:

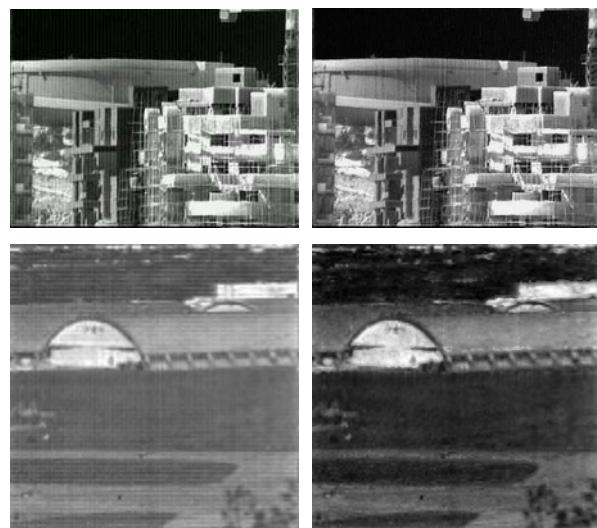
- 1) 定性分析: 图 4(a)可以看出原始红外图像中

存在明显的非均匀性条纹噪声; 图 4(b)表明经过卡尔曼滤波法校正后, 图像中大部分横向条纹噪声得到了较好的抑制, 但是仍残留有部分纵向条纹噪声, 同时图像的边缘也被模糊了; 图 4(c)表明基于场景统计的方法可以有效地抑制大部分条纹噪声, 但是在图像的右下方, 仍有一些纵向条纹噪声不能被很好的抑制; 图 4(d)表明基于恒定统计平均方法能够较好地去除图像中的条纹噪声, 但是经该方法处理后, 图像中引入了较多的其它噪声点; 图 4(e)表明高通滤波方法能够较好的抑制条纹噪声, 但是该方法造成图像部分边缘细节信息的丢失。从图 4(f)看出, 本文方法不仅能够较好地抑制非均匀性条纹噪声, 还能够较好地增强图像的对比度, 保留图像的边缘轮廓信息。

2) 定量分析: 本文采用图像粗糙度^[10]作为评价非均匀校正的客观指标, 图像粗糙度定义如下:

$$\rho(f) = \frac{\|h_1 * f\|_1 + \|h_2 * f\|_1}{\|f\|_1} \quad (7)$$

式中: f 表示数字图像; $h_1 = [1, -1]$ 为水平模板; $h_2 = [1, -1]^T$ 为垂直模板; $*$ 代表离散卷积; $\|\cdot\|_1$ 代表 L_1 范数。粗糙度数值越小, 表明非均匀性校正的效果越好。



(a) 原始图像 (b) 校正结果
图 3 本文非均匀性校正结果

Fig.3 Image non-uniformity correction results

定量分析对比结果见表 1。经过本文方法校正后图像的粗糙度最小, 即本文方法能够有效地抑制图像中的非均匀性条纹噪声。

通过定性和定量分析可以看出, 本文的方法能够有效地抑制红外图像中的条纹非均匀性噪声, 提高红外图像的质量。另一方面, 与其它几种方法不同, 本文方法是基于单帧图像处理的, 当图像序列

信息缺乏时，其它几种方法不再适用。由此可见，本文方法不仅可有效地消除红外图像非均匀性条纹噪声，并且不依赖于图像的序列信息，具有较广泛的适用性。

3 结论

本文提出了一种基于局部直方图规定化的红外图像非均匀性校正方法。在进行直方图规定化时提

出了2种改进方法，首先，针对条纹噪声的特点，采用列划分的方式对图像进行局部处理；其次，利用加权折中直方图均衡方法求取每列的期望直方图。本文方法是基于单帧图像处理的，不依赖图像序列信息。实验结果表明本文方法能够有效地抑制图像的条纹非均匀性噪声，同时能够提高图像的对比度，保留图像的边缘轮廓信息。

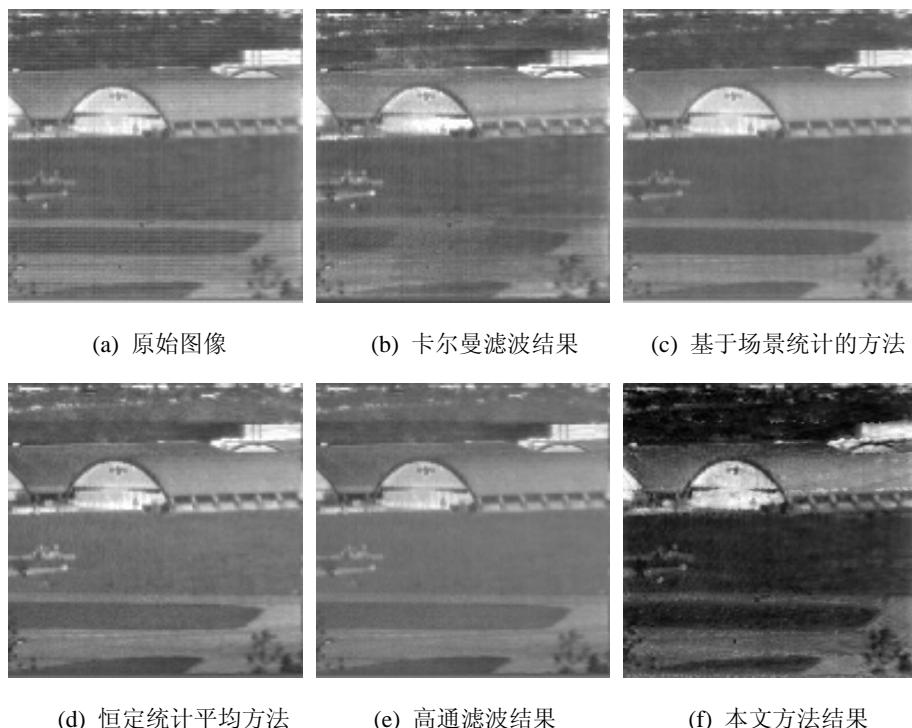


图4 校正结果比较 Fig.4 Comparison results

表1 图像粗糙度对比结果

Table 1 Image coarseness comparison results

图像	原始图像	卡尔曼滤波法	高通滤波方法	恒定统计平均方法	基于场景统计的方法	本文方法
粗糙度	0.17673	0.14738	0.10920	0.14283	0.12149	0.09387
计算时间		0.3409 s	0.0029 s	0.01136 s	0.01420 s	3.0 min

参考文献：

- [1] 陈锐, 谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术, 2002, 24(1): 1-3.
- [2] 杨正兴, 谈新权, 尚小冬. 基于场景的红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 光电子技术, 2003, 23(2): 135-138.
- [3] 李庆, 刘上乾, 王炳健, 等. 基于神经网络的IRFPA非均匀性校正新算法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 342-344.
- [4] 陈宝国, 樊养余, 张学峰, 等. 红外焦平面阵列非均匀性校正的改进神经网络算法[J]. 红外技术, 2012, 34(12): 690-694.
- [5] Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive non-uniformity correction in infrared focal plane arrays[J]. Optical Society of America, 2003, 20(3): 470-480.
- [6] 李庆. 基于成像制导状态的自适应IRFPA非均匀性校正技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [7] Russell C, Hardie, Frank Baxley, et al. Scene-based non-uniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm. *Optics Express*, 2009, 17(17): 14918-14933.
- [8] 刘缠牢, 谭立勋, 刘卫国, 等. 红外图像非均匀性校正高通滤波算法的改进[J]. 红外技术, 2006, 28(8): 439-442.
- [9] Delon J. Midway image equalization [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2004, 21(2): 119-134.
- [10] Hayat M M, Torres S N, Armstrong L E, et al. Statistical algorithm for non-uniformity correction in focal plane arrays [J]. *Appl. Opt.* 1999, 38(8): 772-780.