

## 基于小波变换直方图规定的非均匀性校正算法

贺明<sup>1,2</sup>, 张天一<sup>2</sup>, 王亚弟<sup>1</sup>, 路建方<sup>2</sup>, 寇广<sup>1</sup>

- (1. 解放军信息工程大学 电子技术学院, 河南 郑州 450052;  
2. 防空兵学院 红外与成像制导技术实验室, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 为了实现红外探测器的自适应校正, 提出了一种基于小波变换的中值直方图规定非均匀性自适应校正方法。新算法利用正交小波变换分解图像, 分别统计分解后图像像素的时域直方图, 对像素邻域直方图进行排序得到中值, 利用中值直方图灰度映射得到校正图像, 最后把所有尺度校正后的图像反变换得到最终结果。实际应用证明, 与同类自适应非均匀校正算法相比, 该算法具有校正精度高、速度快的优点。

**关键词:** 直方图规定; 小波变换; 红外焦平面阵列; 自适应非均匀校正

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3481-05

## Non-uniformity correction algorithm based on wavelet transform histogram normalization

He Ming<sup>1,2</sup>, Zhang Tianyi<sup>2</sup>, Wang Yadi<sup>1</sup>, Lu Jianfang<sup>2</sup>, Kou Guang<sup>1</sup>

- (1. Institute of Information Science & Technology, Information Engineering University of the PLA, Zhengzhou 450052, China;  
2. Lab. for Infrared and Imaging Navigation Technologies, Air Defense Forces Academy, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** In order to realize infrared image adaptive correction, a method to adaptive correct the non-uniformity (NU) based on wavelet transform histogram normalization was introduced. The new algorithm used the orthogonal wavelet transform to analyze image, calculated the decomposition image histogram of the neighborhood elements of a single pixel, got median histogram by sorting pixels neighborhood histogram and completed decomposition image non-uniformity correction using the mean histogram normalization. Finally, a final result in all scales after the correction by using the inverse wavelet transform was obtained. According to the practical application, this algorithm has the advantage of fast convergence speed and high precision.

**Key words:** histogram normalization; wavelet transform; infrared focal plane arrays; adaptive non-uniformity correction;

收稿日期: 2013-04-07; 修订日期: 2013-05-08

基金项目: “十二五”国家支撑计划课题(2011BAD21B03)

作者简介: 贺明(1981-), 男, 博士生, 主要从事红外成像与识别系统方面的研究。Email: ming8797@gmail.com

导师简介: 王亚弟(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事红外成像和人工智能方面的研究。Email: yadiwi@vip.371.net

## 0 引言

红外探测器的非均匀性校正方法,目前应用的主要分为两种。一种是基于标准黑体源标定的校正方法,该方法原理简单,易于硬件实现集成,校正精度较高,可用于图像测温,缺点是这种方法校正时需要黑体源标定,操作使用设备比较繁琐。另一种是场景自适应校正方法<sup>[1-3]</sup>,这种方法直接利用场景信息进行自适应校正,不需要标准黑体源参考,也是目前研究的重点。但是这种方法的特点就是需要估计场景实际辐射值,常见的如时域高通滤波校正法、恒定常量统计校正法、神经网络校正法、代数场景校正法、运动补偿校正法等;这些算法都是假设目标相对于场景运动,利用各种信号处理方法把基本不变的非均匀性噪声(FPN)估计出来,再进行去除,但这些算法的前提是必须保证同一图像点要有充分多的探测单元在不同时间观察过,否则校正后会有“鬼影”。

文中提出一种小波变换中值直方图规定红外探测器自适应校正算法,突破传统自适应校正算法研究思路,引入中值直方图规定思想,对探测元邻域进行时域直方图中值规定,从而校正了由于焦平面非均匀性引起邻域像素灰度差异,达到了消除焦平面非均匀性目的。另外,为了多尺度、全方位地校正图像非均匀性,在中值直方图规定之前融合小波变换多尺度分解,对各个尺度分别校正,最后反变换得到结果,有效地校正了图像各个尺度的非均匀性。

## 1 基于小波变换直方图规定的非均匀性校正算法

### 1.1 红外探测器的概率模型

红外探测器响应的线性模型<sup>[4]</sup>可以表示为:

$$y=A_{ij}x+B_{ij}+v \quad (1)$$

式中: $y$ 为探测元输出灰度值; $x$ 为该探测元的输入辐射量; $A_{ij}$ 和 $B_{ij}$ 分别为第 $(i,j)$ 探测元的增益和偏置系数; $v$ 为高斯白噪声。假设红外探测器与成像场景保持随机的相对运动,那么输入辐射量也可以看作是随机,每个探测元接收辐射能的机会是均等的。考虑工程应用中很难做到探测器与成像场景一直保持随机运动,所以认为局部探测元组接受辐射能机会相等,定义其接受辐射量的密度是 $f(x)$ ,忽略高斯白

噪声的影响,由公式(1)可以得到探测元输出响应概率密度近似表达式为:

$$\rho_{ij}(y) \approx A_{ij}f(x) \quad (2)$$

式中: $\rho_{ij}(y)$ 为响应密度函数。从公式(2)可以看出,只要所有探测元输出的响应密度为同一个值,就可实现非均匀校正。

### 1.2 红外探测器的时域直方图

响应密度可以通过红外探测器的输出时域直方图来表征。第 $(i,j)$ 探测元的时域直方图被定义为一定时间内输出灰度值在响应灰度区间内出现的次数。其表达式为:

$$H=h_{ij}(y|t) \quad (3)$$

式中: $t$ 为观察时间; $h_{ij}(y|t)$ 为在 $t$ 时间内灰度 $y$ 出现的频数。如果 $t$ 较长,则它与 $\rho_{ij}(y)$ 存在如下关系为:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{h_{ij}(y|t)}{\int h_{ij}(y|t)dy} = \rho_{ij}(y) \quad (4)$$

因此直方图可以准确地反映响应密度 $\rho_{ij}(y)$ 。

### 1.3 单尺度的中值直方图规定非均匀校正算法

假设红外探测器成像的邻域像素灰度是连续的,那么图像相邻像素之间的差别在一定帧数平均后接近0,这意味着两个相邻像素在时域直方图几乎相等。根据这个假设,把单个探测元的响应密度规定化到邻域探测元响应密度的中值,从而实现非均匀校正。

定义:中值响应密度函数 $\rho_m(y)$ 为邻域探测元响应密度函数的平均值。

$$\rho_m(y) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \rho_{ij}(y) \quad (5)$$

设定探测元的中值直方图为 $h(y)$ :

$$h(y) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 h_{ij}(y) \quad (6)$$

可以证明

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{h(y)}{\int h(y)dy} = \rho(y) \quad (7)$$

因此中值响应密度对应于所有探测元响应值形成的直方图 $h(y)$ 。将中值直方图作为每个探测元 $(i,j)$ 的直方图,规定化后就完成了单尺度的非均匀校正。

利用上述算法在红外探测器成像机芯中实验,经单尺度中值直方图规定非均匀校正算法后发现,3×3左右统计窗口内图像较均匀,校正效果较明显。

但尺度大于统计窗口的图像非均匀性仍然较明显。分析原因是由于中值直方图规定算法只是统计了邻域内直方图中值,完成了单一尺度内的图像非均匀性校正,没有考虑到大于该尺度的非均匀性,而红外探测器成像后的非均匀性分布在多个方向和多个尺度,简单的单尺度算法仅仅校正了单一尺度的非均匀性。针对这个问题,文中融合小波变换进行多尺度中值直方图规定进行校正,利用小波把原始图像分解成各个方向多个尺度,分别对各个方向尺度的非均匀性进行校正,然后通过反复试验选取方向和尺度参数,可以有效地完成原始图像所有方向和尺度的非均匀性校正。

#### 1.4 基于正交小波的多尺度校正

通过多种类型的红外探测器的大量原始图像采样分析得出非均匀性几乎都分布在高频空间内,并且在高频空间的非均匀性呈现三种特性:灰度突变性、横竖方向性、斑块边界性。利用正交小波变换可以很好的分解出这三种特性的非均匀性噪声。

原始图像经二维正交小波变换分解之后,分别得到水平高频分量、垂直高频分量、对角高频分量和低频分量。通过采集红外探测器的大量原始数据试验后得出,经过三级正交小波分解可以完整的解析所有尺度的非均匀性,图 1 为带有 200°烙铁的原始图像和三级正交小波分解图,从左上角依次往右下角分别为各级的小波分量,可以看出红外探测器的大部分非均匀性都集中在高频区域。

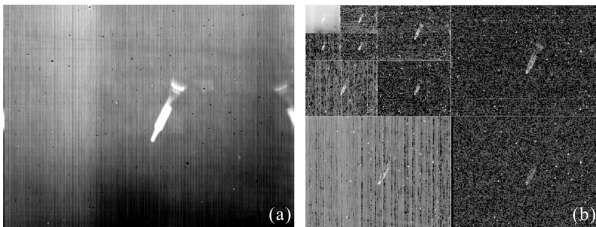


图 1 原始图像及小波变换

Fig.1 Original image and wavelet transform

具体分解公式如下:

$$S_{i,l}^j = \sum_{k,n} f_0(k-2i)f_0(m-2l)S_{k,m}^{j-1} \quad (8)$$

$$\alpha_{i,l}^j = \sum_{k,n} f_1(k-2i)f_0(m-2l)S_{k,m}^{j-1} \quad (9)$$

$$\beta_{i,l}^j = \sum_{k,n} f_0(k-2i)f_0(m-2l)S_{k,m}^{j-1} \quad (10)$$

$$\gamma_{i,l}^j = \sum_{k,n} f_1(k-2i)f_0(m-2l)S_{k,m}^{j-1} \quad (11)$$

$S_{i,l}^j$  为尺度空间尺度系数, $f_0$  和  $f_1$  分别为正交小波变换函数的低通滤波器和高通滤波器系数, $S_{i,l}^j$  反映了  $S_{i,l}^{j-1}$  2 个方向的低频分量,它对应于  $S_{i,l}^j$  在下一尺度上的边缘轮廓信息; $\alpha_{i,l}^j$  反映了  $S_{i,l}^{j-1}$  水平方向的高频成分和垂直方向的垂直分量;同理, $\beta_{i,l}^j$  反映了  $S_{i,l}^{j-1}$  垂直方向上的水平分量。 $\gamma_{i,l}^j$  反映了  $S_{i,l}^{j-1}$  对角方向上的对角线分量。

分别对分解后的系数进行单尺度的中值直方图规定非均匀校正算法,从而得到各个尺度校正后的子图像。将校正后的图像分别进行小波重构,反变换到空域,完成对原始红外图像的正交小波的多尺度中值直方图规定校正。

## 2 校正效果评价与实验

### 2.1 非均匀性评价指标

为了检测文中校正算法的校正效果,文中采用红外探测器非均匀性国标定义指标<sup>[4-5]</sup>:

$$U = \frac{1}{\bar{Y}(\varphi)} \sqrt{\frac{1}{pm} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m (Y_{ij}(\varphi) - \bar{Y}(\varphi))^2} \quad (12)$$

式中: $\bar{Y}(\varphi)$  为焦平面中所有像元对辐照度的平均响应值; $Y_{ij}(\varphi)$  为第  $(i,j)$  像元对辐照度的响应值; $p$  和  $m$  分别为图像水平和垂直方向上的像素数

### 2.2 实验结果与分析

为验证文中校正算法的性能,在自主研发的非制冷红外探测器成像仪(探测器多晶硅,镜头孔径 75 mm/F1.0,焦平面像素数 384×288,像元尺寸 25 μm,工作波段 8~14 μm,成像帧频为 50 帧/s)中采用文中算法试验。实验环境为北方春季夜晚(晴,温度 21 °C,相对湿度 36%,微风小于 3 级),目标场景是发电厂建筑带一半天空背景。

图 2 为 5 种不同校正算法的比较,所有自适应校正算法在 8 s 左右全部收敛,因此选取了该序列图中第 9 s 中的图像,代数校正、神经网络算法和单尺度的中值直方图规定非均匀校正算法在该图像都表现出了大尺度非均匀性残余现象。图 2(a)为校正前的原始图像;图 2(b)为现场两点定标校正结果。从图 2(b)中可以看出,此方法校正效果较好,由于计算精

度误差,图像中有一些校正的残余,导致图像呈现一定的固定噪声。图 2(c)为光流估计的代数校正算法<sup>[6]</sup>的校正结果,光流运动估计的幅度较小,对大尺度非均匀性校正较差,校正后表现较强的大尺度非均匀残余。图 2(d)为双边滤波的神经网络算法<sup>[7]</sup>校正结果。加入了双边滤波机制,各种目标边缘都受到了保护,缺点是只针对一种尺度的非均匀性,校正后大于校正尺度的非均匀性残余明显。图 2(e)为单尺度的中值直方图规定非均匀校正算法<sup>[8-9]</sup>校正结果。利用直方图规定对单个像元与邻域像素灰度偏差进行精确修正,不存在运算和估计精度问题,同样存在只针对单一尺度的非均匀性校正缺点。图 2(f)为文中校正算法处理结果,算法利用正交小波分解原始图

像,对分解后包含各个尺度的非均匀性进行中值直方图规定算法,最后把校正后的图像反变换,得到校正后图像目标细节突出,在各个尺度都看不到非均匀性残余。

通过对表 1 分析比较发现,两点校正算法简单,并且可以得到较好的校正精度,但该算法需要定标黑体,而且需要周期性的定标,操作不方便,自适应能力较差。光流估计的代数校正法和双边滤波的神经网络法可以良好地抑制单一尺度的非均匀性,对多尺度的非均匀性校正能力较弱,并且两者运算量较大,不易硬件实现。单尺度的中值直方图规定非均匀校正算法运算量较小,收敛速度较快,但同样存在单一尺度校正局限。文中算法能有效校正各个尺度的非均匀性,同时可以相对提高目标信噪比,起到增强图像的作用,另外在算法收敛所需帧数和时间方面(如图 3 所示)优于另外三种方法。

表 1 5 种算法综合性能比较

Tab.1 Comparison of performance of five algorithms

	U	Pixels compensation	Time to arrive convergence/s
Original image	0.735		
Two-point correction algorithm	0.32	Manual	0
Algebraic correction algorithm of optical flow	0.461	Automatically	6.7
Bilateral filter neural network algorithm	0.591	Automatically	5.54
Single-scale middle histogram normalization algorithm	0.537	Automatically	2.21
Algorithm presented in this paper	0.21	Automatically	2.21

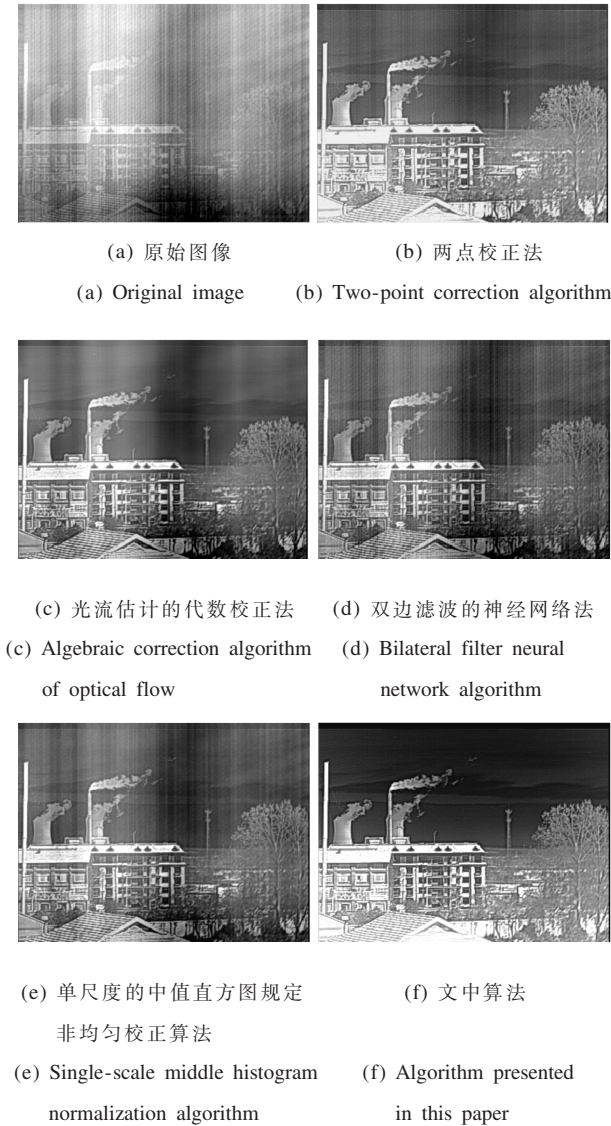


图 2 不同算法校正比较图

Fig.2 Comparison of different correction algorithms

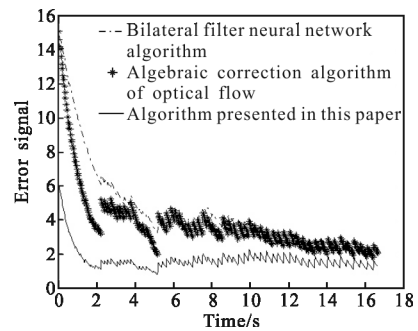


图 3 不同算法收敛效果对比

Fig.3 Comparison of the convergence of four adaptive algorithms



图 4 为利用文中算法在不同类型探测器的非制冷红外探测器成像仪中测试的效果,分别选取了不同场景的图像对比,文中算法表现出较强的适应能力。图 4(a)为多晶硅的非制冷红外探测器成像仪(像元尺寸  $35\ \mu\text{m}$ ,像素数  $384\times 288$ ,50 mm/F1 镜头)包含弱目标的原始图像;图 4(b)为校正后的图像,弱目标轮廓无退化,但是弱目标的微小细节有少许模糊,体现出文中算法对弱目标有一定的保护能力。图 4(c)为氧化钽的非制冷红外探测器成像仪(像元尺寸  $25\ \mu\text{m}$ ,像素数  $320\times 240$ ,75 mm/F1 镜头)包含运动飞机目标的原始图像;图 4(d)为校正后的图像,运动飞机目标无“鬼影”,天空背景干净,体现出文中算法对运动目标的适应性;图 4(e)为多晶硅的非制冷红外探测器成像仪(像元尺寸  $17\ \mu\text{m}$ ,像素数  $384\times 288$ ,57 mm/F0.8 镜头)包含人眼的原始图像;图 4(f)为校正后的图像,

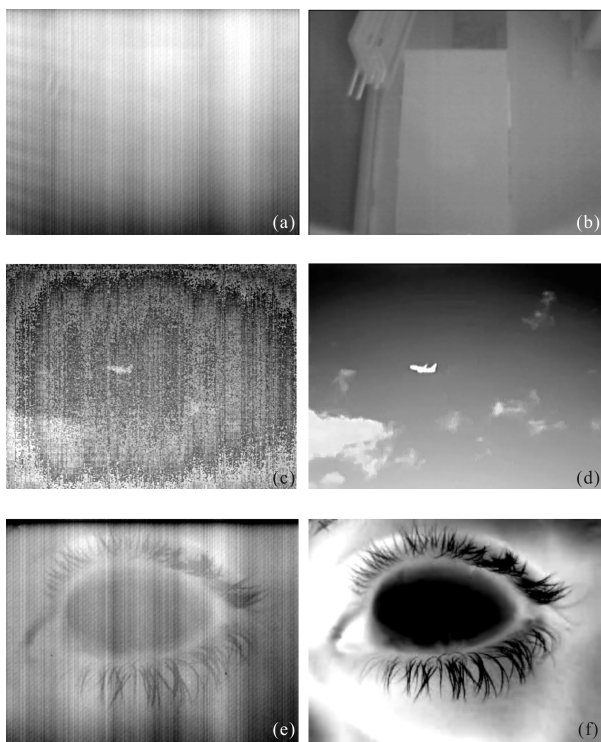


图 4 算法在不同场景下校正效果

Fig.4 Performance algorithms in different scene

眼球突显,并且眼睫毛细节清晰可辨,体现出文中算法对细节目标校正的分辨能力。通过文中算法在各个成像仪中实时精确实现,体现了文中算法较好硬件移植性。在具体实现中,考虑到非制冷红外探测器在较短时间内非均匀性保持不变,可以对焦平面的非均匀性进行分段校正,把算法中核心步骤小波变

换及直方图统计部分分解到多帧图像周期来实现,这样就既便于硬件实时实现,又达到了非均匀性校正精度要求。

### 3 结 论

文中从输入辐射和输出响应的概率密度函数的角度分析了红外探测器的非均匀性问题,并提出了基于小波变换的中值直方图规定的自适应非均匀校正算法。通过真实的红外图像数据和图像评价函数显示了其优越的校正特性。采用直方图统计场景信息是算法的特点,它可以直接反映概率密度函数的特性。加入小波多尺度分解是算法的突破点,通过正交小波变换使算法克服了单一非均匀性尺度限制,适于工程应用。

### 参考文献:

- [1] Seribner D A, Sakady K A. Nonuniformity correction for stating IR focal plane arrays using scene-based techniques[C] //Infrared Detectors and Focal Plane Arrays, SPIE, 1990, 1308: 224-233.
- [2] Scribner D A. Adaptive retina-like preprocessing for imaging detector drrays[C]//IEEE, 1993: 1955-1960.
- [3] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant statistics constraint[C]//IEEE, 1999, 8(2): 1148-1151.
- [4] Delon J. Midway image equalization [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2004, 21(2): 119-134.
- [5] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision, 1998: 839-846.
- [6] He Ming, Wang Xinsai. Algebraic nonuniformity correction algorithm based on multiscale optical flow [C]//SPIE, 2011, 8193: 45.
- [7] Su Fu, Sun Shaohua. Non-uniformity correction for IRFPA with image gradient-based neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 754-756. (in Chinese)
- [8] Niu Zhaodong, Wang Weihua, Jiang Weidong. Scene-based statistical algorithms for nonuniformity correction of infrared images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 261-265. (in Chinese)
- [9] Hou Hekun, Zhang Xin. Recent development of infrared focal plane arrays nonuniformity corection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 26(3): 5-10. (in Chinese)