文章编号: 1001-4322(2013)03-0603-04

基于特征分解的红外焦平面非均匀性校正算法

贺 明1.2, 王亚弟2, 王新赛1, 路建方1, 徐华亮1, 朱玉娜2

(1. 防空兵学院 红外与成像制导技术实验室,郑州 4500521; 2. 信息工程大学 电子技术学院,郑州 450052)

摘 要: 针对目前红外焦平面自适应场景校正算法工程应用的局限,提出了一种基于红外焦平面非均匀 性特征分解的场景校正算法。分析了红外焦平面非性匀性构成因素,把其中的高频部分分解成盲点、斑块、行 列非均匀性等,把缓慢变化的低频部分分解成梯度渐变非均匀性;分别对各类非均匀性采用不同的校正算法; 合并校正结果,得到校正后的图像。实验结果表明,该算法校正精度高、收敛速度快、抑止目标退化能力强,适 合工程应用。

关键词:	红外焦平面;	非均匀性;	特征分	解;	校正算法
中图分类·	号: TN219	文献杨	示志码:	А	doi:10.3788/HPLPB20132503.0603

红外焦平面阵列存在的非均匀性严重影响了系统的成像质量,现有的校正方法主要分为两大类。一类是 基于定标的校正方法^[1-3],该类方法原理简洁,硬件易于实现,校正精度高,但这类方法实际校正时需要参考源 进行标定,设备装置相对复杂。另一类是基于场景的方法^[4-5],它直接利用每帧图像的场景信息进行非均匀校 正,克服了第一类方法的不足,因此是目前研究的焦点。但在这类技术中绝大部分算法都需要估计真实场景 值。本文提出了一种基于红外焦平面非均匀性组成特征分解的算法,利用红外焦平面探测器的非均匀性形成 特点,分解非均匀性的组成特征,对异常响应点采取自动补偿,对行列非均匀性采用直方图中值均衡,对低频梯 度噪声采用多尺度的时域低通滤波,最后合成特征图像完成校正。算法中不需要任何运动补偿或累加计算。 校正后没有任何"鬼影"等影响。该方法具有实时性强、计算复杂度低等优点,非常适合工程应用。

1 红外焦平面非均匀性组成特征分解

红外焦平面的非均匀性主要是由乘性的增益和加性的偏置组成,通过大量统计发现,影响 焦平面非均匀性的主要是由偏置决定,并且随 着工作时间和环境温度的变化,偏置在不停地 改变,因此只需对偏置不停地预测补偿,在场景 不断运动的情况下就可以得到很好的效果。结 合基础的偏置值,通过大量实验可以把减去基 础偏置值后的变化的非均匀性分解成异常响应 点、行、列非均匀性、低频梯度非均匀性几类的 组合。其中行、列和低频梯度非均匀性几类的 组合。真中行、列和低频梯度非均匀性几类的 组合。周丰均匀性。同样他们包含加性和乘 性部分。图1所示为焦平面非均匀性包含的特 征。



Fig.1 Character contained in non-uniformity of IRFPA 图 1 红外焦平面非均匀性包含的特征

采用图像特征分解,把不断变化的偏置非均匀性转化为加性部分,则成像模型为

 $Y_k(i,j) = X_k(i,j) + c_k(i,j) + l_k(i,j) - b_k(i,j)$

(1)

式中: $Y_k(i,j)$ 为输出图像; $X_k(i,j)$ 为原始图像; $c_k(i,j)$ 和 $l_k(i,j)$ 分别为分解后的行、列非均匀性和低频梯 度非均匀性; $b_k(i,j)$ 为高斯噪声。通过式(1)我们进行非均匀性的校正只需要对每帧焦平面的图像特征分解, 然后用原始图像减去这两个特征值即可。

^{*} 收稿日期:2012-06-20; 修订日期:2012-08-14

作者简介:贺 明(1981-),男,博士研究生,讲师,主要从事红外成像与目标识别的科研工作; ming8797@gmail.com。

2 基于非均匀性特征分解的校正算法

针对以上对焦平面非均匀性的特征分解的详细描述,提出基于非均匀性特征分解的校正算法。算法分为 四步(如图2所示):第一步是非均匀性特征分解预处理,原始图像减去基础偏置得到需要特征分解的图像;第 二步是异常响应点或簇补偿,分解预处理后的图像进行异常响应点或簇补偿,其中包括盲点,使用事先计算得 到这些点的坐标和实时检测异常响应点两种手段来检测异常响应点或簇,通过这两种方式可以完全补偿异常 响应点或簇;第三步是行列非均匀性校正,对补偿后的图像行、列非均匀性校正,使用直方图中值均衡校正行和 列的非均匀性^[4];第四步是低频梯度非均匀性校正,采用多尺度的时域低通滤波算法估计低频梯度非均匀性, 然后实时地去除得到最终校正后的图像。



Fig. 2 Processing flow of algorithm 图 2 算法处理流程

2.1 行、列非均匀性校正

首先我们假设红外焦平面成像的像素间灰度是连续的,那么单幅红外图像中相邻列之间的差别在统计意 义上是很小的,这意味着两个相邻直方图几乎是相等的。根据这个假设,我们对红外图像列进行中值化直方图 均衡,使成像的连续图像列直方图相等。这样就完成了单帧红外图像的行或列的非均匀性校正。算法如下:

(1)计算单帧红外图像的每一列 c_i 的累积直方图 H_i;

(2)对每一列 c_i ,采用高斯权重 $\phi = \phi_\sigma$ (标准差为 σ),计算临近列的直方图

$$\widetilde{H}_{\mathrm{mid}}^{-1}(i) = \sum_{j \in (-N, \cdots, N)} \phi(j) H_{i+j}^{-1}$$
(2)

(3)将每列 c_i 的直方图指定为中值化直方图 $\widetilde{H}_{mid}(i)$ 。

由于每个红外焦平面的非均匀性不同。因此高斯权重标准差σ的选择仅仅取决于单个探测器,和观察目标无关。对于每一个红外焦平面只需要修订一次便可以长期使用。我们针对单幅图像进行的非均匀校正并不 受运动或者场景变化的影响,因此这就避免了"鬼影"以及由于校正参数随着时间漂移而产生的任何问题。

2.2 低频梯度非均匀性校正

低频梯度非均匀性校正,必须要考虑其中混杂着目标及场景图像,因此我们采用多尺度的低通滤波器,传 统的时序低通滤波只是在像素点上做时间的低通滤波,没有考虑到图像像素的空间相关性,我们针对低频梯度 非均匀性在空间分布上低频的特点,在图像空间采用多尺度滤波,避免了滤除有效的目标信息

$$f_{n+1} = (1 - \frac{1}{m})f_n + \frac{1}{m}\sum_{n=1}^N w_n [g_{n+1}(x, y) * I_n(x, y)]$$
(3)

式中: *f*_{n+1} 是滤波输出; *g*_{n+1}(*x*,*y*) 是图像灰度值; * 表示卷积运算; *I*_n(*x*,*y*) 是空间滤波函数,其中, *N* 是尺度 因子的个数; *w* 为第*n* 个尺度因子的加权系数。通过对不同尺度因子滤波后的结果进行加权平均,可以使得不 同的尺度因子的低频非均匀性相互补充,从而获得更好估计非均匀性噪声,最后用原始图像减去这个噪声完成 校正过程,同时在低频非均匀校正中能够消除成像阴影,增强了图像的细节。

3 算法校正效果评价与实验

3.1 非均匀性校正效果评价方法

为了检测本文校正算法的校正效果,本文采用目标信噪比定义指标,目标信噪比计算公式

$$R_{\rm SN} = 20 \lg(\frac{s - u_0}{\sigma_0}) \tag{4}$$

式中:R_{sN}为小目标信噪比,单位为dB;s是目标的亮度均值或者峰值;u。为背景均值;σ。为背景标准差。

3.2 红外焦平面阵列验证实验

为了验证本文提出的算法的有效性,在法国 ULIS 公司的非制冷红外焦平面中测试,探测器型号 UL03162,无 TEC,非均匀性会随着焦平面温度变化不断的变化。我们在自主设计的后续处理电路中,试验本 文算法的有效性,图 3 为五种算法校正效果比较图。其中图 3(a)为校正前的原始图像;图 3(b)为现场两点定 标校正结果。从图 3(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 3(c)为光流估计的代数校正算法^[8]的校正结果,天空中的边缘较弱的云层由 于光流估计精度,导致一些云层边缘的退化。图 3(d)为边缘指导的神经网络算法^[7]校正结果,可以看出由于 利用了边缘信息指导系数更新,飞机目标边缘保持完好,但是边缘不突出的云层退化严重。图 3(e)为双边滤 波的神经网络算法^[6]校正结果。由于加入了双边滤波机制,各种目标边缘都受到了保护,但是由于非均匀性估 计精度,整体有一定程度的边缘退化。图 3(f)为本文算法校正结果,该算法对非均匀性分解后的特征进行分 别校正,不存在运算和估计等精度问题,对于高频细节进行了有效保护,校正后图像目标细节突出,信噪比高。



(a) original image



(d) edge detection neural network algorithm



(b) two-point correction algorithm



(e) bilateral filter neural network algorithm
 Fig. 3 Results of five different correction algorithms
 图 3 五种算法校正效果



(c) algebraic correction algorithm of optical flow



(f) algorithm presented in this paper

表1 五种校正算法性能比较

Table 1 Performance comparion of five algorithms

	$R_{ m SN}/{ m dB}$	degradation	pixel compensation	time to achieve convergence/s
two-point correction algorithm	14.11	none	manually	0
algebraic correction algorithm of optical flow	15.42	little	automatically	6.7
edge detection neural network algorithm	15.49	little	automatically	10.48
bilateral filter neural network algorithm	14.76	little	automatically	8.12
algorithm presented in this paper	13.16	none	automatically	2.34

通过分析表1发现,两点校正算法简单,并且可以得到较好的校正精度,无目标退化现象,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边缘指导的神经网络法可以良好地抑制强目标的弱化,但是对于如天空云层类似的弱目标存在不同程度的图像退化,并且两者运算量较大,不易硬件实现。本文算法运算量较小,收敛速度较快,但所有图像中目标都存在轻微的退化现象。本文算法能有效抑制各种目标退化,同时可以相对提高目标信噪比,另外在算法收敛所需帧数和时间方面优于另外三种方法。

4 结 论

红外焦平面阵列非线性及响应特性漂移是目前红外焦平面阵列非均匀性校正技术中面临的一个难题,目前一般基于场景的非均匀性校正算法虽能在一定程度上消除响应特性漂移的影响,但它们都是基于场景运动基础上的校正,当场景静止或者运动缓慢时,就会出现过度校正,导致"鬼影",本文分解焦平面的非均匀性噪声,而后,对分解后的各种特征采取不同的算法处理,最后再结合从而完成校正。通过在 ULIS 的探测器实验表明,该方法可以有效地补偿焦平面的非均匀性漂移,并且计算简单,便于实时并行处理,突破了场景校正的实用性限制。对于其他类型的非制冷探测器和制冷型探测器,需要在后续工作中继续验证。

参考文献:

- [1] Rossi A, Diani M. A technique for ghosting artifacts removal in scene-based methods for non-uniformity correction in IR systems[C]//Proc of SPIE. 2009, 7481(25):812-814.
- [2] 周慧鑫,拜丽萍,秦翰林.基于自适应滤波的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J].强激光与粒子束, 2009, **21**(11):1611-1614. (Zhou Huixing, Bai Liping, Qin Hanlin. Non-uniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays based on adaptive-filter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11):1611-1614)
- [3] Zuo C, Chen Q, Sui X. Scene-based nonuniformity correction algorithm based on interframe registration[J]. Opt Soc Am A, 2011, 28: 1164-1176.
- [4] Hardie R, Baxley F, Brys B. Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(17) :14918-14933.
- [5] Owen A, Williams M. Resistor array infrared projector nonuniformity correction: search for performance improvement IV[C]//Proc of SPIE. 2009, 7301:1117-1119.
- [6] Jonah C, Snorrason M S. Improving scene-based non-uniformity correction for infrared images using frequency domain processing[C]//Proc of SPIE. 2009, **7299**:119-129.
- [7] Laveigne J, Franks G. LWIR NUC using an uncooled microbolometer camera[C]//SPIE Conference Series. 2010, 7663;3206-3213.
- [8] HE Ming, Wang Xinsai. Algebraic nonuniformity correction algorithm based on multiscale optical flow[C]//Proc of SPIE. 2011:819345.
- [9] Rossi A. Bilateral filter-based adaptive nonuniformity correction or infrared focal-plane array systems
 [J]. Optical Engineering, 2010, 49: 057003.

Non-uniformity correction algorithm based on image decomposition

He Ming^{1,2}, Wang Yadi², Wang Xinsai¹, Lu Jianfang¹, Xu Hualiang¹, Zhu Yuna²

Laboratory for Infrared and Imaging Navigation Technologies, Air Defense Forces Academy, Zhengzhou 450052, China;
 Institute of Information Science and Technology, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: A nonuniformity correction algorithm based on image decomposition of nonuniformity in IRFPA was proposed, for the engineering application limitations of traditional adaptive nonuniformity for IRFPA. After analysis of the constructing factor of nonuniformity, the algorithm decomposes the high-frequency part of nonuniformity into bright pixels, row and column nonunniformity, and the low-frequency part of nonuniformity into gradient nonunifority, and then corrects every kind of nonunifority using a special algorithm, and completes the correction by combination. The algorithm was tested in a infrared imaging system and compared with other adaptive non-uniformity correction algorithms. According to the analysis of simulation results, this algorithm has the advantage of strong ability to eliminate the target fade-out, fast convergence speed and high precision.

Key words: infrared focal plane arrays; nonunifority; image decomposition; correction algorithm