

## 多点标定的自适应非均匀性校正方法

张红辉<sup>1,2</sup>, 罗海波<sup>1,3,4</sup>, 余新荣<sup>5</sup>, 丁庆海<sup>6</sup>

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;  
4. 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;  
5. 中航工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 江西 南昌 330024;  
6. 空军装备研究院总体所, 北京 100076)

**摘要:** 为了实现对红外焦平面阵列(IRFPA)获取图像的实时高精度非均匀校正, 提出了一种基于多点标定的自适应非均匀性校正算法, 该算法假定在环境温度变化时, 校正后输出图像数据的差值与已标定的数据存在线性关系, 对其进行分块并配对, 采用最小二乘法, 以平方和最小为准则, 自适应修正校正系数, 以达到实时调整非均匀校正的校正系数, 对环境温度变化引起的非均匀性进行补偿的目的。实验结果表明, 该方法既提高了非均匀性校正的精度又能满足实时性要求, 可广泛应用于光电火控、红外成像制导等对实时性和成像质量均有较高要求的应用场合。

**关键词:** 红外图像非均匀校正; 自适应调节; 残余非均匀性

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3651-04

## Adaptive non-uniformity correction algorithm based on multi-point correction

Zhang Honghui<sup>1,2</sup>, Luo Haibo<sup>1,3,4</sup>, Yu Xinrong<sup>5</sup>, Ding Qinghai<sup>6</sup>

- (1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;  
4. Key Laboratory of Image Understanding and Computer Vision, Shenyang 110016, China;  
5. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Corporation LTD, Nanchang 330024, China;  
6. Research Institute of General Development and Demonstration of Equipment, Equipment of Air Force, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to realize the IRFPA non-uniformity (NU) correction with fast convergence speed and high precision, a new method to correct the non-uniformity in infrared images was introduced. The new algorithm took into account a linear equation between the excursion and corrected data along with the variation of the application surrounding temperature, adaptive correction factor according to the principle of least square. According to the practical application, this algorithm has the advantage of the strong ability to eliminate image degradation, fast convergence speed and high precision. This can meet the need

收稿日期: 2014-03-10; 修订日期: 2014-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(51005229)

作者简介: 张红辉(1978-), 男, 博士生, 主要从事图像处理与模式识别方面的研究。Email: zhanghonghui@163.com

导师简介: 罗海波(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事图像处理与模式识别方面的研究。Email: luohb@sia.cn

of project practicality in the field of fire control of optics and electrics, infrared imaging seeking.

Key words: IR non-uniformity correction; adaptive moderate ability; NU

## 0 引言

红外焦平面阵列 (IRFPA) 器件是红外凝视成像系统的核心器件, 由于制造工艺的原因, 普遍存在非均匀性问题<sup>[1-2]</sup>, 导致红外系统的成像质量严重下降<sup>[3]</sup>。

非均匀性校正算法存在校正实时性和精度之间的矛盾, 到目前为止, 该矛盾仍然没有得到有效解决。因此, 红外图像实时非均匀校正算法一直是红外图像处理领域的一个重要研究方向。目前红外图像非均匀校正算法主要有基于离线标定的方法和基于实时场景的方法两大类。基于离线标定的校正方法需要通过两幅或多幅黑体源图像来计算 IRFPA 每个探测元的增益和偏移, 典型的有两点校正和多点分段校正, 标定后短期内能保持较高的校正精度<sup>[4]</sup>, 但随着时间的推移和环境温度等因素的改变, 由于 IRFPA 特性存在漂移, 校正精度有劣化的趋势, 校正后的残差会逐渐扩大, 导致成像质量下降。在应用中为保证较高的校正精度, 需要定期对其进行标定; 基于场景的校正方法直接利用每帧图像的场景信息进行非均匀校正, 不需对 IRFPA 定标, 校正系数可通过连续学习更新, 典型的有 Scribner 等提出的基于神经网络的非均匀校正算法和 Hardie 等提出的基于运动补偿时域平均的校正算法。但此类算法需估计运动场景, 精度差, 校正时计算量大, 实时实现困难。文中详细阐述了基于多点环境温度补偿的非均匀性校正技术及实施程序; 分别用定性和定量的方法评估了文中方法的校正效果及校正精度, 并与常用的校正方法进行了比较分析, 最后进行了总结。

## 1 基于标定的 IRFPA 非均匀校正算法

红外探测器的响应是辐射功率的单调递增函数, 响应强度与单位受光面积  $A_D$ 、立体角  $d\Omega$ 、量子效率  $\eta$ 、光谱范围和积分时间  $\tau$  有关, 表示如下:

$$E = A_D \times d\Omega \times \eta \times \tau \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda, T) d\lambda \quad (1)$$

考虑环境温度的影响, 将探测器接收的能量分为目标辐射  $\varepsilon_b E_b$  和环境辐射  $\varepsilon_s E_s$  两部分:

$$E = A_D \times d\Omega \times \eta \times \tau \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_b \phi_b(\lambda, T_b) + \varepsilon_s \phi_s(\lambda, T_s) d\lambda \quad (2)$$

上式表明, IRFPA 成像不仅与目标辐射源温度  $T_b$  有关, 还受环境温度  $T_s$  影响<sup>[5]</sup>。因此校正时应考虑环境温度对非均匀性的影响。

在 IRFPA 定标校正的方法中, 两点校正方法最具代表性, 它是一种线性校正算法, 假设 IRFPA 的响应输出和红外辐射量呈线性关系<sup>[6]</sup>:

$$Y(i, j) = GX(i, j) + O \quad (3)$$

式中:  $i, j$  表示像素点在 IRFPA 上的位置;  $X(i, j)$  表示在一定周期内接收的辐射量;  $Y(i, j)$  为探测器经过校正后的输出信号;  $G$  为增益系数;  $O$  为偏移系数。在实际应用中, 非均匀校正后输出可表示为:

$$Y = G(X - O) \quad (4)$$

式中:  $Y$  为校正后输出;  $G$  为增益系数;  $X$  为辐照度输出;  $O$  为偏移系数。

为解决两点校正动态范围小、精度低的缺点, 在系统的全动态范围内, 将定标数据划分为若干区间, 在各区间内按两点校正进行校正, 最终逼近实际的响应曲线。该方法称为多点分段直线校正法, 见图 1。

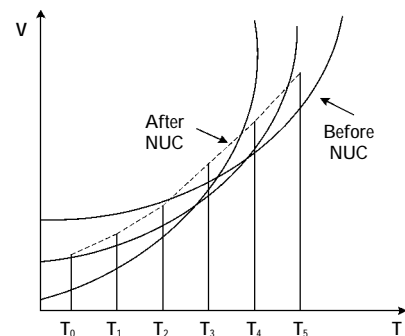


图 1 多点分段直线校正

Fig.1 Multi-point correction

## 2 基于标定的自适应非均匀性校正方法

对已采用多点分段直线校正法的 IRFPA, 设某段环境温度为  $T_1$  时, 其增益系数为  $G_1$ , 偏移系数为  $O_1$ , 环境温度为  $T_2$  时, 其增益系数为  $G_2$ , 偏移系数为  $O_2$ , 此增益和偏移参数可以根据温度定标的方法得到。当环境温度逐渐从  $T_1$  变化到  $T_2$  时, 其探测器输出整体发生漂移, 非均匀性变差。文中假定探测器随温度变化产生的漂移与环境温度的变化成线性关

系,并对增益和偏移系数进行线性模型替代,即:

$$G' = G_1 + \frac{(G_2 - G_1)(T - T_1)}{T_2 - T_1}$$

$$O' = M_1 O_1 + M_2 O_2 + C \quad (5)$$

式中:  $M_1$ 、 $M_2$  和  $C$  为偏移的修正系数,  $M_1$  是偏移  $O_1$  的权重系数,  $M_2$  是偏移  $O_2$  的权重系数。

目标辐射通过内置的标定系数进行校正,采集环境温度变化时的多帧响应信号  $f(x_i)$ ,计算校正后的图像统计特性,得到图像的一组统计数据。然后利用这组统计数据 and 原始图像校正数据获取每个像元的图像误差信息。帧间图像的差值为环境辐射变化所引起的非均匀性。根据最小二乘原理,求  $\psi^*$  使得:

$$\|f - \psi^*\|_2^2 = \sum [f(x_i) - \psi^*(x_i)]^2 \rho_i = \min_{\psi \in \phi} \|f - \psi\|_2^2 \quad (6)$$

算法具体实现过程如下:

首先将 IRFPA 按  $64 \times 64$  分为多个子块,为减少灰度不连续现象影响,分块时把原图像交叉切分,相邻子块之间有一半面积重叠在一起;在各子块中据上述公式得到偏移系数和增益系数。则公式(4)变为:

$$Y = G'(X - M_1 O_1 - M_2 O_2 - C) \quad (7)$$

在每块校正后的  $Y$  数据中,搜索相邻范围内灰度差值小于规定阈值的像素对,则相邻像素的输出差异表示为:

$$E = G'(a)(X(a) - M_1 O_1(a) - M_2 O_2(a) - C) - G'(b)(X(b) - M_1 O_1(b) - M_2 O_2(b) - C) \quad (8)$$

为简化表达式,将部分参数进行替换,令:

$$A_1 = G'(a)X(a) - G'(b)X(b)$$

$$A_2 = G'(a)O_1(a) - G'(b)O_1(b)$$

$$A_3 = G'(a)O_2(a) - G'(b)O_2(b)$$

$$A_4 = G'(a) - G'(b) \quad (9)$$

则将公式(8)替换并对所有像素进行平方求和:

$$\sum E^2 = \sum A_1^2 + M_1^2 \sum A_2^2 + M_2^2 \sum A_3^2 + C^2 \sum A_4^2 - 2M_1 \sum A_1 A_2 - 2M_2 \sum A_1 A_3 - 2C \sum A_1 A_4 + 2M_1 M_2 \sum A_2 A_3 + 2CM_1 \sum A_2 A_4 + 2CM_2 \sum A_3 A_4 \quad (10)$$

在满足  $\sum E^2$  最小的情况下,像素间的非均匀性降到最小,计算出相关系数。采用最小二乘法计算得到实时的子块偏移系数。求校正系数的过程如下。

对  $M_1$  求偏导:

$$M_1 \sum A_2^2 - \sum A_1 A_2 + M_2 \sum A_2 A_3 + C \sum A_2 A_4 = 0 \quad (11)$$

对  $M_2$  求偏导:

$$M_2 \sum A_3^2 - \sum A_1 A_3 + M_1 \sum A_2 A_3 + C \sum A_3 A_4 = 0 \quad (12)$$

对  $C$  求偏导:

$$C \sum A_4^2 - \sum A_1 A_4 + M_1 \sum A_2 A_4 + M_2 \sum A_3 A_4 = 0 \quad (13)$$

解方程得到  $M_1$ 、 $M_2$  和  $C$ ,从而得到实时的偏移和增益系数并进行校正。

对各子块偏移修正系数进行调整,凡是有多个子块相重叠覆盖的部分就取子块的最小偏移修正系数作为该部分的调整系数;根据调整后的增益系数和偏移系数,对图像进行非均匀性校正计算;对校正后图像数据进行直方图统计后进行线性映射后输出。

### 3 仿真及结果分析

为对文中发表算法的综合性能进行评估,将其与现有代表性算法从图像质量、残余非均匀性和运算时间三方面进行比较。图 2-4 分别是多点分段、神经网络、自适应多点校正的成像效果。由图可知,多点分段可以校正 IRFPA 严重的非均匀性,使目标图像成像清晰;但当环境温度变化时,辐射噪声和条纹状固定图像噪声不能消除,影响成像质量<sup>[9]</sup>。神经网络法可以消除条纹状固定图像噪声,但对辐射噪声的抑制效果欠佳,而文中方法可消除因场景温度环境变化的响应漂移噪声和读出电路导致的竖条纹状固定图像噪声,获得清晰度更佳的红外图像。



图 2 多点分段校正图像

Fig.2 Multi-point correction image



图 3 神经网络校正图像

Fig.3 Neural network correction image

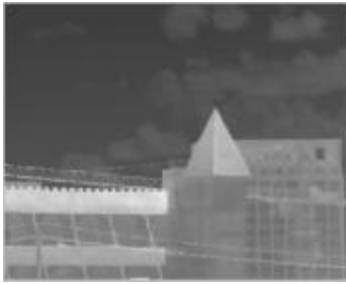


图 4 自适应多点校正图像

Fig.4 AMP-NUC image

从残余非均匀性和运算时间评价,对辐射均匀的黑体进行非均匀性测试。从非均匀性计算结果和校正后的图像数据生成的图形效果两个方面进行比较,结果如图 5~7 所示。

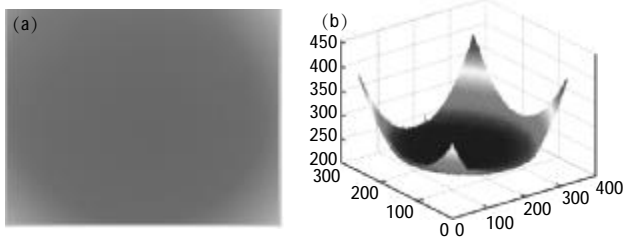


图 5 多点分段校正图像及非均匀性

Fig.5 Blackbody multi-point correction image and non-uniformity

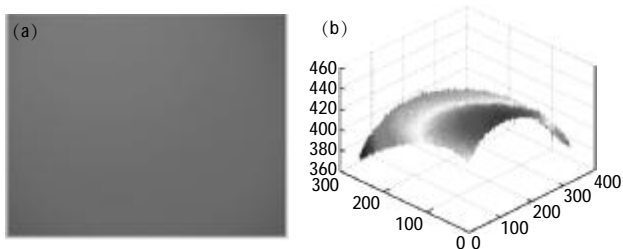


图 6 神经网络法校正图像及非均匀性

Fig.6 Neural network correction image and non-uniformity

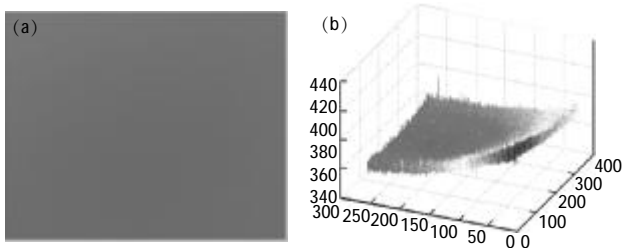


图 7 自适应多点校正图像及非均匀性

Fig.7 ATC-NUC image and non-uniformity

从图 5~7 可知,当定标环境与使用环境不同时,经多点分段校正和神经网络校正算法校正后的图像非均匀性残差增强,影响成像图像的质量,而文中算法可以降低因环境变化导致的非均匀性。各校正方法的残余非均匀性和运算时间测试如表 1 所示。

表 1 几种校正技术残余非均匀性测试结果

Tab.1 Vestige non-uniformity result of several NUC technologies

	MP-NUC	NN-NUC	AMP-NUC
NU	0.5%	0.3%	0.089%
Time/ms·field <sup>-1</sup>	0.43	12.94	2.23

## 4 结束语

为了兼顾环境温度变化自适应 IRFPA 非均匀校正算法的实时性和精度,文中提出了一种基于多点标定的自适应非均匀校正算法,该算法对环境温度的变化实时作出响应,补偿了环境温度变化所引起的非均匀性。实验结果表明:该方法继承了标定法实时性的优点,有效提高了非均匀性校正的精度。

## 参考文献:

- [1] Qu Huiming, Chen Qian. Surrounding temperature compensation for infrared focal plane arrays non-uniformity correction[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2328-2332. (in Chinese)
- [2] He Ming, Wang Yadi, Wang Xinsai, et al. Non-uniformity correction algorithm based on midway histogram equalization in single infrared image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2550-2553. (in Chinese)
- [3] Wen Peizhi, Shi Zelin, Yu Haibin. A method for detecting IR target in natural background based on wavelet transform and morphology [J]. *Information and Control*, 2004, 33(1): 107-111. (in Chinese)
- [4] Duan Dong, Sha Shengchun. Non-uniformity rectification methods of IRFPA detector radiation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2621-2624. (in Chinese)
- [5] Bai Junqi, Chen Qian, Qian Weixian, et al. Non-uniformity correction for infrared focal plane arrays based on environmental temperature [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2010, 29(1): 49-52. (in Chinese)
- [6] Lou Bo, Zhang Feng, Song Liquan, et al. Improved neural network nonuniformity correction technique for IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 300-303. (in Chinese)
- [7] Liu Shirong, Zhu Weitao, Yang Fan, et al. Multi-feature fusion based particle filter algorithm for object tracking[J]. *Information and Control*, 2012, 41(6): 752-759. (in Chinese)
- [8] Liu Yongjin, Zhang Guohua. Application of digital total variation filter to nonuniformity correction in infrared image sequences[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2216-2221. (in Chinese)