

中图分类号: TN215 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)09-1577-06

论文索引信息: 桑红石, 袁雅婧, 张天序. 基于运动指导的红外焦平面非均匀性校正方法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1577-1582

基于运动指导的红外焦平面非均匀性校正方法

桑红石, 袁雅婧, 张天序

(华中科技大学图像识别与人工智能研究所, 武汉 430074)

摘要: 针对红外焦平面阵列(IRFPA)非均匀性校正算法中基于场景类自适应校正算法存在的目标退化和伪像等问题, 提出一种新的基于运动检测指导的自适应校正算法。该算法首先通过预处理为实时校正准备背景帧图像和坏元模板, 接着根据前后两帧场景信息的运动方差, 自适应地调整迭代步长, 最后结合运动幅度更新增益校正系数, 对图像实施校正。以含有弱小目标的实际红外图像序列进行仿真的结果表明, 新算法有效地抑制了目标退化, 消除了伪像; 去除了固定图案噪声, 具有自适应性。

关键词: 红外焦平面阵列; 非均匀性; 自适应校正算法; 运动指导

Non-uniformity correction of infrared focal plane array based on motion guidance

Sang Hongshi, Yuan Yajing, Zhang Tianxu

(Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China)

Abstract: Aiming at solving the target fade-out and ghosting problems widely existed in the scene-based correction algorithms of infrared focal plane array (IRFPA), a new adaptive correction algorithm based on motion guidance is proposed. Firstly, a background image and bad-cell template is prepared for the real-time correction. Next, a variable iterative step instead of a constant step in the steepest descent method is employed and adaptively adjusted according to the temporal variance. Finally, the gain correction coefficients are updated under the direction of variable iterative step and motion information, and then the image is corrected by the updated coefficients. The experimental results using real IRFPA infrared images show that the developed algorithm can not only effectively solve ghosting problems and inhibit the target fade out, but also eliminate the fixed-pattern noise well.

Keywords: infrared focal plane array; non-uniformity; adaptive correction algorithm; motion guidance

0 引言

红外焦平面阵列(IRFPA)是现代红外成像系统的核心器件。尽管随着器件制作工艺的改进, 焦平面的非均匀性和无效像元有了较大改善, 但是离完

全解决问题还有很大距离, 仍然是当前红外焦平面阵列成像系统必须解决的首要问题。

目前已有的红外焦平面阵列非均匀性校正算法主要分为两大类: 一类是基于定标的校正方法, 另一类是基于场景的自适应校正方法。一般而言, 红外成像非均匀性表现为偏置和增益的偏差, 并且偏置

收稿日期: 2010-07-09; 改回日期: 2010-10-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736010)。

第一作者简介: 桑红石(1970—), 女, 副教授。2003年于华中科技大学图像识别与人工智能研究所获得博士学位, 主要从事数字图像处理, 嵌入式信息处理系统设计和数字集成电路设计方面的。E-mail: sanghs@gmail.com。

和增益参数会随成像器工作时间和环境温度的变化而变化。一次性通过定标类算法来计算校正参数并对图像进行校正的做法在成像器长时间工作,以及环境温度发生显著变化时,校正效果将显著降低。因此,有必要对成像器进行定时校正或者连续校正,基于场景类的自适应校正方法可以较好解决上述问题。通常,偏置引起的非均匀性通过定期采集空白图像进行校正,增益的漂移则可以通过基于场景的自适应迭代算法进行校正。但是目前基于场景的方法大都存在伪像(ghosting artifact,也称为“鬼影”)问题,如传统的神经网络校正算法(NN-NUC)^[1]。Narendra 等人^[2]在提出等统计量非均匀性校正方法时曾原则性地提出一种克服“鬼影”的简单方法,即在景物不变时停止校正系数的更新。Harris 等人^[3]将 Narendra 提出的方法加以实现,在更新环节设置一个阈值,当某个像素的变化超过该阈值时可以更新其校正系数,低于该阈值时则停止更新。刘会通等人^[4]分析了上述两种方法在处理上的缺陷,并提出基于运动取阈值校正方法存在的不足:1) 阈值不易确定;2) 空间噪声基本不变,不能校正——这里可以理解为固定图案噪声不易校正。Esteban 等人^[5]提出通过改变迭代步长的方法来消除伪像,迭

代系数与 3×3 邻域内的变化成反比。张小军等人^[6]也提到“如果场景长时间静止,则大多数基于场景的方法都将失效”。

纵观国内外场景类校正算法存在伪像问题的研究现状,大多数研究人员从场景的运动情况入手,但是仍然存在一些问题和难点没有解决:1) 运动检测的步骤过于复杂,难以达到实时性。2) 判断阈值不易确定。3) 基于运动检测类的校正方式,对基本不变的空间噪声不能校正。

针对以上问题,本文在传统神经网络方法的基础上,结合对场景运动情况的分析,提出一种新的基于运动指导的校正算法。实际的红外序列图像实验结果表明,该算法有效地抑制了目标退化,消除了伪像,具有自适应性。

1 基于运动检测指导的自适应校正算法

基于运动检测指导的自适应校正算法包括预处理、校正、迭代步长调整和增益校正系数更新四个环节,整体算法流程如图 1 所示。

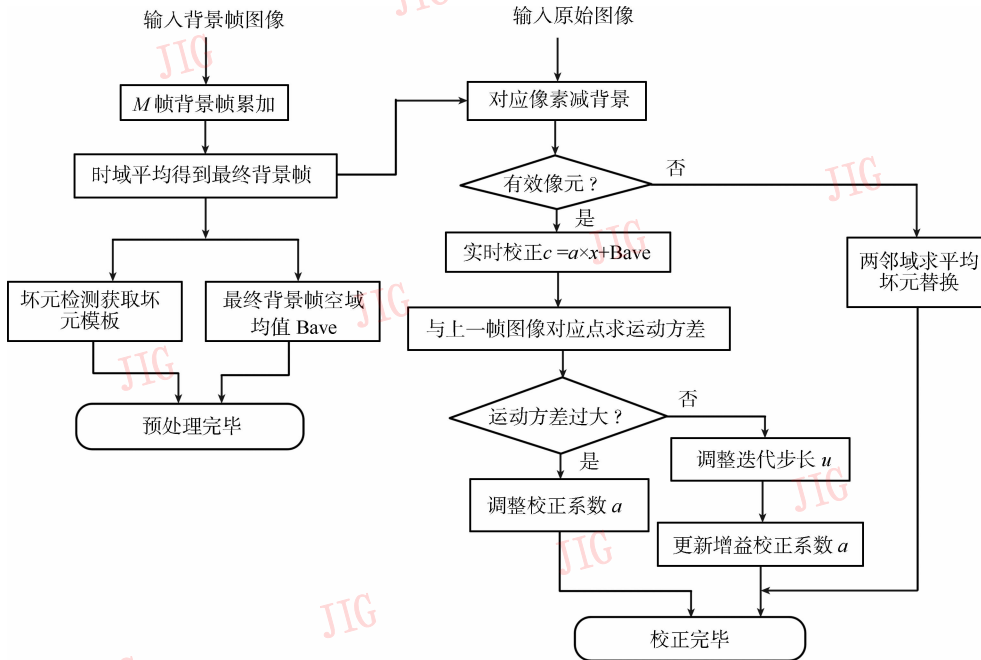


图 1 自适应校正新算法流程图

Fig. 1 The new adaptive correction algorithm flow chart

1.1 校正预处理环节

该环节只有在一个新的序列图开始校正之前,才需要执行。它主要为实时校正准备均匀辐照的背景帧和坏元模板。

首先,在实时校正前,盖上探测器的镜头盖子或者将探测器对着无目标的均匀场景成像若干帧^[7]。假设采集到均匀辐照的图像 M 帧,对这 M 帧图像进行时域平均,得到最终背景帧图像 $B(\phi_0)$, 其空间平均值为 $\bar{B}(\phi_0)$ 。接着,利用改进后的基于场景的动态无效像元检测算法结合背景帧 $B(\phi_0)$ 进行无效像元检测,将检测结果存放于坏元模板 BC 中,至此完成校正预处理工作。此处所使用的改进后的无效像元检测算法是在文献[8]的基础上对 x, y 方向分别统计 1 维线性外推算子,然后利用两个方向的信息综合判别无效像元,这样可以适应两相邻像素均为无效像元的情况。

1.2 校正环节

IRFPA 的非均匀性是由所有成像环节的不一致性共同作用的结果。由于这些非均匀性噪声空间频率主要成分是低频的,而 NN-NUC 校正方法本身呈现空间低通的频率特性,因此 NN-NUC 方法并不能有效地抑制低频空间噪声。文献[7]提出的一点定标与神经网络校正算法相结合的方法,虽然有效地去除了低频空间噪声,但是存在小目标退化问题。

新算法校正环节采用一点定标方法的思想去除低频的固定图案噪声。首先将带有非均匀性的第 n 帧原始图像的像素 (i, j) 的灰度值减去背景帧对应位置的灰度值 $B_{ij}(\phi_0)$, 即

$$X_{ij}^n(\phi) = N_{ij}^n(\phi) - B_{ij}(\phi_0) = G_{ij}^n(\phi - \phi_0) \quad (1)$$

则 $X_{ij}^n(\phi)$ 只与探测元的增益系数有关,其空间噪声仅由增益非均匀性导致。根据文献[9]对 IRFPA 所受空间噪声的空间分布性质的分析, $X_{ij}^n(\phi)$ 受到的空间噪声其高频成分已占较大比例,因此,对 $X_{ij}^n(\phi)$ 再利用增益系数进行校正,将能获得好的校正结果。其最终校正输出为

$$C_{ij}^n(\phi) = Y_{ij}^n(\phi) + \bar{B}(\phi_0) = a_{ij}^n \cdot X_{ij}^n(\phi) + \bar{B}(\phi_0) \quad (2)$$

1.3 迭代步长调整环节

NN-NUC 方法中之所以存在目标退化和伪像,主要是由于该方法对属于不同区域的信号能量采用统一的校正系数更新方法。在经过空间平均、时间迭代处理之后,不同区域的边缘能量不断发生扩散,

从而引起目标退化,同时原来目标静止位置的校正系数随着目标静止时间的增加而不断降低,当目标迅速移开时,在原目标静止位置的校正系数异常,使得校正后的信号在此位置出现比背景暗的伪像^[10]。为了解决 NN-NUC 中存在的这些问题,新算法将相邻两帧图像对应像素的时域方差(也被称为运动方差)作为运动信息来指导迭代步长的调整和增益校正系数的更新。

相邻两帧图像对应位置的时域方差越大,说明该位置的场景运动越充分。新算法中迭代步长的调整正比于时域方差,所以在场景运动充分时,增大迭代步长;在场景运动缓慢时,减小迭代步长,从而自适应地控制了校正系数的更新速度。调整方法如下。

假设校正后相邻两帧图像对应点时域方差 σ_{ij}^2 , 则有

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{(Y_{ij}^{n-1}(\phi) - \bar{Y}_{ij})^2 + (Y_{ij}^n(\phi) - \bar{Y}_{ij})^2}{2} \quad (3)$$

式中, $\bar{Y}_{ij} = \frac{(Y_{ij}^{n-1}(\phi) + Y_{ij}^n(\phi))}{2}$, $Y_{ij}^{n-1}(\phi)$ 为第 $n-1$ 帧图像 (i, j) 像元点的灰度值。将获得的时域方差和运动阈值 σ_T^2 进行比较,可以判断出该区域像素的运动情况。只有在像素处于正常运动范围内 ($\sigma_{ij}^2 < \sigma_T^2$) 时,才采用如下方式调整迭代步长

$$\mu_{ij}^n = \begin{cases} \mu_{\max} & \mu'_{ij} > \mu_{\max} \\ \mu'_{ij} & \mu'_{ij} \leq \mu_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mu'_{ij} = \sigma_{ij}^2 \times \mu_{\min}$, μ_{\max} 和 μ_{\min} 分别是在原始神经网络法中能够保证校正系数迅速收敛和缓慢收敛的迭代速度。

1.4 增益校正系数更新环节

新算法中增益校正系数的更新公式为

$$a_{ij}^{n+1} = \begin{cases} a_{ij}^n - 2\mu_{ij}^n X_{ij}^n(Y_{ij}^n - f_{ij}^n) & (i, j) \in \Theta \\ a_{ij}^0 & (i, j) \notin \Theta \end{cases} \quad (5)$$

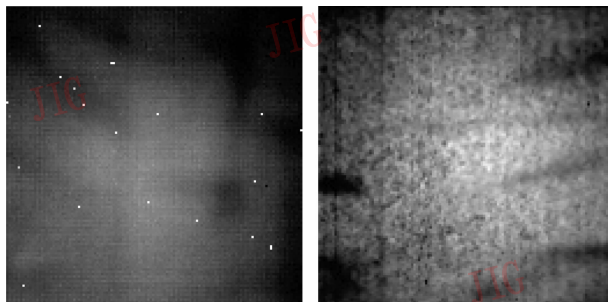
式中, $f_{ij}^n = \frac{(Y_{i+1,j}^n + Y_{i,j+1}^n + Y_{i-1,j}^n + Y_{i,j-1}^n)}{4}$, Θ 为所有处于正常运动范围 ($\sigma_{ij}^2 < \sigma_T^2$) 的像素点构成的集合。新算法中采用的这种分段更新增益系数的方法充分考虑了实际场景中的运动情况。在运动充分时加快校正系数的更新,而运动平缓时减慢校正系数的更新,甚至在场景静止时,停止校正系数的更新。

在此系数更新公式中,运动阈值 σ_T^2 的选取很重

要。如果阈值选取过大,上述更新公式将一直处于 $\sigma_{ij}^2 < \sigma_T^2$ 状态,不能有效地抑制目标退化和消除伪像;如果阈值选取过小,则公式一直处于 $\sigma_{ij}^2 > \sigma_T^2$ 状态,增益引起的非均匀性不能得到很好地校正。针对 14 bit 的红外序列图像,经过大量实验统计,阈值 σ_T^2 可以在一个较大范围内进行选取,但是最小值不能低于序列图像中相邻帧方差变化的最小值,最大值不能高于相邻帧方差变化的最大值,最佳取值范围为 $(0.5 \sim 1)\overline{B}(\phi_0)$ 。

2 实验与结论

为验证所提出的校正算法的有效性,选取 128×128 规格 LW MCT IRFPA 采集到的两组序列图像,序列 1 的场景为室外夜晚天空冷背景下的飞机弱小亮目标以及房屋和树木,该序列图像共有 823 帧;序列 2 则为 850 帧室内均匀背景下的拿着手机的人手。对两组序列图像分别采用原始神经网络、基于取阈值运动判断的神经网络、文献[7]的方法和新算法进行仿真实验。参数设置为 $\mu_{\max} = 2 \times 10^{-7}$, $\mu_{\min} = \frac{\mu_{\max}}{100}$ 。由于序列 1 图像灰度分布在 6 000 ~ 8 000 范围内,相邻帧灰度变化为 100,相邻帧灰度方差最大为 9 000。因此,进行序列 1 仿真时 σ_T^2 可在 100 ~ 9 000 范围内任意选值。下列实验中,对两组序列图均选取 $\sigma_T^2 = \frac{\overline{B}(\phi_0)}{2}$ 进行仿真实验。在序列图像获取前一个小时左右盖上镜头盖采集若干帧图像,并计算最终背景帧图像 $B(\phi_0)$ (如图 2 所示),空间均值 $\overline{B}(\phi_0)$ 和坏元模板 BC 。



(a) 序列1的背景帧图像 (b) 序列2的背景帧图像

图 2 背景帧图像

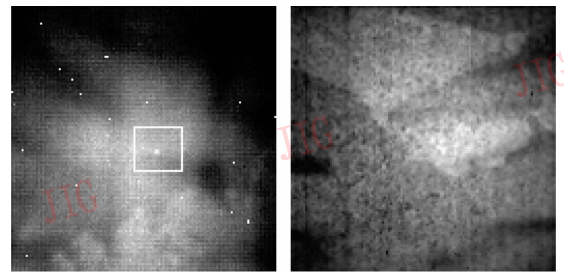
Fig. 2 The background frame

为了比较算法的收敛性,本文采用均方根误差

(RMSE)来衡量校正算法的收敛性能。第 n 帧图像的 RMSE 表示为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Y_{ij}^n - f_{ij}^n)^2}{(M \times N)}} \quad (6)$$

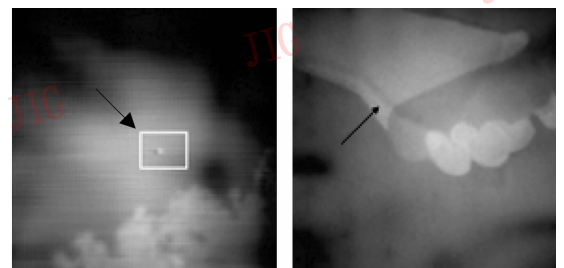
式中, M 和 N 分别代表图像的行、列值。结果表明,这 4 种算法几乎都在 300 帧左右才开始保持收敛。下面给出了 4 种校正算法分别对两组序列图像进行校正的结果图。图 3(a) 给出了序列 1 的第 441 帧原始图像,图 3(b) 为序列 2 的第 465 帧原始图像。图 4 是采用原始神经网络对图 3 中各个原始图像进行校正的结果。可明显发现,校正的效果并不好,在图中标注位置有明显的目标退化和伪像,而且存在大量的固定图案污染。利用基于取阈值的运动判断神经网络方法分别对原始图像进行校正,结果如图 5 所示。虽然该方法加入了运动判断,防止了小目标退化和伪像,但固定图案噪声没有被很好地去掉,且不同序列的运动判断阈值不同,需要人为选定。图 6 给出了使用文献[7]的方法获得的校正结果,该处理结果同样具有目标退化及伪像问题。新算法的校正结果如图 7 所示,从结果图中可以看出,本文提出的方法有效地去除了固定图案污染,防止了伪像的产生和目标的退化。



(a) (b)

图 3 原始红外图像

Fig. 3 The original infrared image



(a) (b)

图 4 采用原始神经网络方法的校正结果

Fig. 4 The corrected result of NN-NUC algorithm

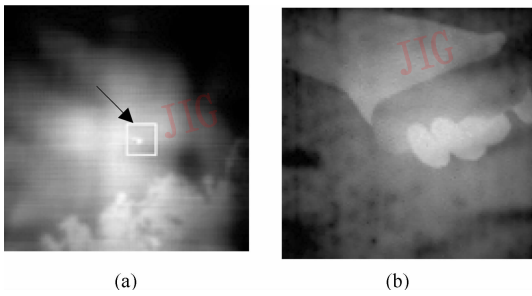


图5 基于取阈值的运动判断神经网络方法校正结果
Fig.5 The corrected result of NN-NUC algorithm based on the threshold from the motion judgment

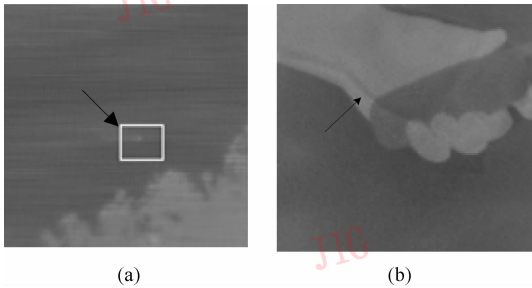


图6 具有预处理环节的原始神经网络校正结果
Fig.6 The corrected result of NN-NUC algorithm with the pre-correction processing

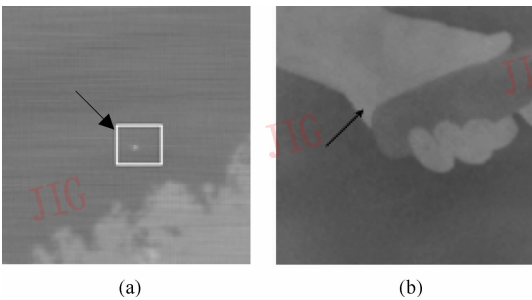


图7 本文自适应校正新算法流程图
Fig.7 The corrected result of the proposed algorithm

为了进一步对新算法的综合性能进行说明,表1给出了以上4种算法的性能比较。比较指标包括是否有目标退化现象、是否有伪像、单帧小目标信噪比、图像的粗糙程度、图像固定图案方法是否自适应和污染去除情况。

1)单帧小目标信噪比 dB 为

$$SNR = 20\lg\left(\frac{S - \mu_0}{\sigma_0}\right) \quad (7)$$

式中, S 为目标的亮度均值, μ_0 为背景均值, σ_0 为背景标准差。SNR 值越大代表小目标的信噪比越高,效果越好。

2)图像的粗糙程度计算公式为

$$\rho(f) = \frac{\|h_1 * f\|_1 + \|h_2 * f\|_1}{\|f\|_1} \quad (8)$$

式中, f 表示数字图像, $h_1 = [1, -1]$ 为水平模板, $h_2 = h_1^T$ 为垂直模板, $*$ 代表离散卷积, $\|\cdot\|_1$ 代表 L_1 范数。此指标可以在真实图像未知的情况下,通过计算固定噪声污染图像和校正后图像的粗糙度来评价算法的性能。其值越小越好。

由表1可见,提出的方法在几个性能指标比较中整体优于其他3种算法。校正后图像单帧小目标信噪比最大,几乎为原始神经网络方法的5倍,与在相同图像及归一化情况下,两点定标法(无目标退化)校正后图像单帧小目标信噪比 10.720 615 相当。此外,原始图像的图像粗糙程度为 0.188 735,而新算法校正结果图的粗糙度降低到了 0.038 841。因此,新算法有效地防止了目标退化,去除了伪像和固定图案污染。由于无须人为参与选择阈值及如传统方式的定标操作,提高了非均匀性校正的自适应性。

表1 4种算法的综合比较

Tab.1 Comparing the performance of four algorithms

比较指标	原始神经网络	基于取阈值运动判断神经网络	文献[7]方法	本文新算法
目标退化	有目标退化	无目标退化	有目标退化	无目标退化
伪像	有伪像	无伪像	有伪像	无伪像
单帧小目标信噪比/dB 图4(a)—图7(a)	2.218 986	7.495 334	4.534 070	10.103 00
图像的粗糙程度 图4(b)—图7(b)	0.074 650	0.064 259	0.042 169	0.038 841
方法自适应性	无须人为参与	需要人为调整判断运动与与否的阈值	无须人为参与	无须人为参与
固定图案污染去除情况	没去除	没去除	去除	去除

3 结 论

针对基于场景的校正算法中普遍存在目标退化和伪像的研究现状,提出一种新的包括4个环节的基于运动检测的自适应校正方法。采用实际采集到的两组红外序列图像进行实验,结果表明,新算法能够有效地抑制目标退化,消除伪像,图像粗糙程度降低,去除了大部分固定图案噪声;所采用的迭代步长阈值对于14 bit 红外图像具有广泛的适应性,无须人为参与,具有自适应性。

参考文献(References)

- [1] Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M R, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal-plane arrays using neural networks [C] // Proceedings of the SPIE Conference on Infrared Sensors, Detectors, Electronics, and Signal Processing, Bellingham, WA, United States; International Society for Optical Engineering, 1991; 100-109.
- [2] Narendra P M, Foss N A. Shutterless fixed pattern noise correction for infrared imaging arrays [C] // Proceedings of the SPIE Conference on Technical Issues in Focal Plane Development. Bellingham, Wash, USA; SPIE, 1981, 282: 44-51.
- [3] Harris J G, Chiang Y M. Minimizing the “ghosting” artifact in scene-based nonuniformity correction [C] // Proceedings of the SPIE Conference on Infrared Imaging Systems; Design, Analysis, Modeling, and Testing IX. Bellingham, WA, USA; International Society Optical Engineering, 1998, 3377: 106-113.
- [4] Liu Huitong, Ma Hongwei. An analysis of the “ghosting” artifact in adaptive nonuniformity correction [J]. Journal of Infrared Technology, 2003, 25(5): 30-32. [刘会通, 马红伟. 自适应非均匀性校正中“鬼影”问题的分析 [J]. 红外技术, 2003, 25(5): 30-32.]
- [5] Esteban Vera R, Sergio Torres I. Ghosting reduction in adaptive non-uniformity correction of infrared focal-plane array image sequences [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Image Processing. Los Alamitos, CA, USA; Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2003: 1001-1004.
- [6] Zhang Xiaojun, Zhao Yigong. New algorithm for non-uniformity correction of Infrared focal plane arrays based on neural network [J]. Journal of Infrared Technology, 2004, 26(2): 44-47. [张小军, 赵亦工. 基于神经网络的红外焦平面非均匀校正的新算法 [J]. 红外技术, 2004, 26(2): 44-47.]
- [7] Zhang Tianxu, Shi Yan, Cao Zhiguo. Study on the property of spatial frequency of non-uniformity noise in IRFPA and the improvement of spatial adaptive non-uniformity correction technique [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, 24(4): 255-260. [张天序, 石岩, 曹治国. 红外焦平面非均匀性噪声的空间频率特性及空间自适应非均匀性校正方法改进 [J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 255-260.]
- [8] Li Huaiqiong, Chen Qian, Gao Wenkun. Dynamic detection and compensation algorithm of defective pixels for IRFPA [J]. Journal of Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 192-196. [李怀琼, 陈钱, 高文昆. 红外焦平面阵列失效元动态检测与校正算法 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 192-196.]
- [9] Shi Yan. Study on the Image Pre-processing Method and System Software for Staring IR Imaging Information Processing System [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. [石岩. 凝视红外成像信息处理系统图像预处理方法与系统软件研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.]
- [10] Zhang Tianxu, Shi Yan. Eliminating the “ghosting” artifact and target fade-out in adaptive nonuniformity correction for IRFPA [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, 24(5): 335-340. [张天序, 石岩. 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法中目标退化与伪像的消除方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(5): 335-340.]