

改进的基于神经网络的非均匀性校正算法

陈宝国^{1,2}, 张学峰², 牛英宇²

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072; 2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 提出了一种结合图像匹配和神经网络算法的焦平面阵列非均匀性校正算法。算法首先用最新的校正系数对图像进行非均匀性校正, 输出校正结果; 然后对相邻两帧图像进行匹配, 估计出相邻帧之间图像的运动量; 最后用神经网络算法分别对校正系数进行正向和反向自适应更新。采用图像匹配技术保证了校正系数更新时不会引起场景的模糊, 采用校正系数双向更新策略可以保证每帧都能对每个像元的系数至少进行一次更新, 与常用的神经网络校正算法相比, 降低了对场景统计特性的要求, 收敛速度较快。使用模拟添加噪声和采集的红外图像序列对算法进行仿真验证, 结果表明, 给出的算法校正效果优于常用的神经网络非均匀性校正算法。

关键词: 非均匀性校正; 神经网络; 图像匹配; 固定模式噪声; 红外焦平面阵列

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0574-05

Improved nonuniformity correction algorithm based on neural network

Chen Baoguo^{1,2}, Zhang Xuefeng², Niu Yingyu²

(1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xian 710072, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: An improved nonuniformity correction (NUC) algorithm combining image matching and neural network (NN) for infrared focal plane array sensors was presented. Firstly, nonuniformity of the FPA response was removed by NUC compensation. Then, motion parameters of the image were estimated by matching pairs of image frames. Finally, coefficients were adaptively updated according to bidirectional-renew strategy based on neural network. Image matching technique could effectively avoid faintness when coefficients were updating. Additionally, the bidirectional-renew strategy was used to guarantee coefficients of each pixel be calculated at least once when new image frame came. The new algorithm used image matching technique to get scene motion information, and used neural network for coefficients bidirectional-renew strategy. It had a lower statistical overhead on scenes and approached convergence more quickly than the often used neural network based NUC algorithms. A theoretical analysis was performed on a collection of infrared image frames to study the accuracy of the new NUC algorithm. It proves that it has higher-quality correction ability than simple neural network based NUC algorithm.

Key words: nonuniformity correction; neural network; image matching; fixed-pattern noise; infrared focal plane array

收稿日期: 2012-07-05; 修订日期: 2012-08-13

基金项目: 装备预先研究项目(61901020601)

作者简介: 陈宝国(1970-), 男, 研究员, 主要从事红外探测系统方面的研究。Email: chenbg@163.com

0 引言

红外焦平面阵列非均匀性产生的原因十分复杂,在生产时完全消除其非均匀性是不现实的,只有通过非均匀性校正来提高其性能。红外焦平面成像产品在出厂前一般都会对其进行定标校正,但产品交付后,由于探测器的时间漂移特性和使用环境的变化,图像中的非均匀性会逐渐增强,甚至严重到影响产品的使用。如果重新对产品进行定标校正,需要大量外部条件的支持,有时甚至是不现实的,此时采用基于场景的校正算法,就能完全依靠场景自身的信息,有效去除图像的非均匀性,改善图像质量。

目前国内外实验室正在研究的一些基于场景的自适应校正算法^[1],如 Kalman 滤波器法^[2]、轨迹跟踪法^[3]、代数算法^[4]等,都需要使用帧块的统计信息来获得有效的校正系数,算法的内存需求较多,计算较复杂,难以满足实时处理的要求。在实际应用中,自适应动态帧间校正的解决方案有更多的需求,其中的一个典型代表是基于神经网络的非均匀性校正算法^[5-6]。但常用的神经网络算法使用图像邻域信息来估计场景辐射真值,不可避免会引起场景的模糊。为避免图像模糊,引入了场景运动判断^[7],为使场景运动尽可能满足算法要求,研究了对场景形成主动控制的方法^[8],但这两种方法中场景运动信息都没有直接用于校正系数的更新。文中提出的采用图像匹配技术和校正系数双向更新策略的改进神经网络算法,使用场景运动信息估计场景辐射真值,有效避免了场景的模糊,且保留了神经网络算法完全使用帧间信息进行校正的优点,有很好的运用前景。

1 算法描述

神经网络方法是在充分研究了人眼的视网膜的视觉反映后提出的。它模拟了人视网膜对光线的调整反映,可以同时跟踪探测器的增益漂移和偏移漂移。整个算法是一个迭代过程,基本算法是一个两点校正算法,但是增加了一个隐含层,根据像元校正后的期望输出,对增益和偏移进行反馈修正。常用的神经网络算法的具体过程如下^[9]。

(1) 输入第 k 帧图像,对第 k 帧图像进行修正并输出:

$$Y_{ij} = G_{ij}X_{ij} + O_{ij} \quad (1)$$

式中: X_{ij} 为探测器单元 (i, j) 的实际输出值; G_{ij} 为该单元的增益系数; O_{ij} 为该单元的偏置系数; Y_{ij} 为该单元校正后的输出。

(2) 计算邻域平均值作为 (i, j) 点的真值:

$$\bar{Y}_{ij} = (Y_{i,j-1} + Y_{i,j+1} + Y_{i-1,j} + Y_{i+1,j}) / 4 \quad (2)$$

式中: \bar{Y}_{ij} 为校正后图像的四邻域均值,是校正后的期望输出。

(3) 计算误差函数:

$$F_{ij}(G_{ij}, O_{ij}) = (Y_{ij} - \bar{Y}_{ij})^2 \quad (3)$$

式中: F_{ij} 是输出值与期望输出之间的误差,它是增益系数和偏置系数的函数。

(4) 采用最速下降法,对每个像元的校正系数进行迭代更新:

$$G_{ij} = G_{ij} - \alpha \partial F_{ij} / \partial G_{ij} = G_{ij} - 2\alpha X_{ij}(Y_{ij} - \bar{Y}_{ij}) \quad (4)$$

$$O_{ij} = O_{ij} - \beta \partial F_{ij} / \partial O_{ij} = O_{ij} - 2\beta(Y_{ij} - \bar{Y}_{ij}) \quad (5)$$

式中: α 、 β 为神经网络的学习率。

(5) 回到第 1 步,对第 $k+1$ 帧进行操作。

上述算法的第 2 步采用邻域平均值作为校正后的期望输出,会引起图像的模糊。国内外研究中,针对这个问题提出了多种改进算法,其中常用的是根据图像邻域的标准差来自适应调整学习率^[9],在标准差较大的不均匀区域使用较小的学习率,在较均匀的区域使用较大的学习率,以减少模糊。

文中提出的非均匀性校正算法如下:首先对相邻两帧图像进行匹配,获取其在空间上的位移量;然后用相邻两帧图像中对应场景中同一点的像素值作为期望输出,对校正系数进行迭代更新,逐步逼近期望的校正系数。

文中提出的非均匀性校正算法分为 4 个模块,算法结构如图 1 所示。首先调用非均匀性校正模块对输入图像进行校正、输出;然后调用图像匹配模块对上一帧图像和当前帧图像进行匹配,获取图像之间的位移参数 (Tx, Ty) ;最后调用神经网络校正系数更新模块采用双向更新策略对校正系数进行迭代更新,同时调用盲元判定模块标定图像的盲元,修正后的校正系数和盲元列表将用于下一帧图像的校正。非均匀性校正模块使用实时更新增益系数和偏置系数,根据公式(1)对当前帧输入图像进行校正,同

时根据盲元判定模块输出的盲元列表对图像中的盲元进行替代。该模块与常用的两点校正法模块相同,文中不再赘述,下面对另外 3 个模块分别描述。

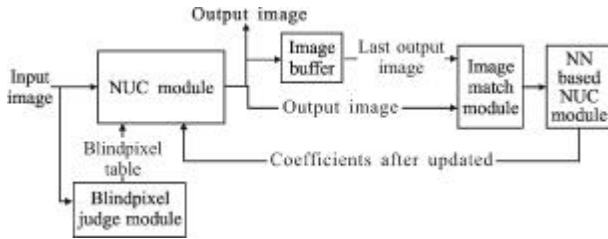


图 1 非均匀性校正算法结构框图

Fig.1 Block diagram of NUC algorithm

1.1 图像匹配模块

图像匹配模块的主要功能是对相邻两帧图像进行匹配,获取其在空间上的位移量。国内外对此进行了大量研究,提出了许多算法,文中采用了一种计算较为简单的图像匹配算法:首先使用 Harris 算子分别提取当前帧图像和上一帧图像的特征点;然后以特征点为中心取一定大小的区域作为特征点的特征区域,对当前帧图像的每一个特征点,从上一帧图像中搜索特征区域最匹配的特征点作为其匹配点,组成一组匹配点对;最后对所有匹配点用 RANSAC 方法剔除误匹配点对,对剩下的匹配点对用加权平均算法获取图像之间的运动参数 (Tx, Ty) 。文中算法中,特征区域的大小选择为 16×16 。

1.2 校正系数修正模块

在获取相邻两帧图像之间的运动参数后,即可获取场景中的同一点投影到焦平面上的位置对应关系,如图 2 所示,上一帧图像中的像元 (i, j) 对应当前帧

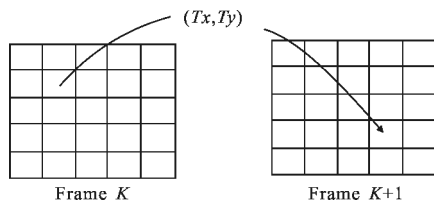


图 2 相邻帧图像像元对应关系

Fig.2 Pixel corresponding graph

图像的像元 $(i+Tx, j+Ty)$ 。校正系数修正分为两步:先以上一帧的像素灰度为期望值,对当前帧图像对应位置的校正系数进行修正;然后以当前帧的像素灰度值为期望值,对上一帧图像对应位置的校正系数进行修正。这种双向修正策略可以保证每次修正时,

都能对所有像素点进行至少一次修正,对两幅图像的重合部分可以进行两次修正,能加快收敛速度。

对第 $k+1$ 帧图像对应位置的校正系数进行更新时,由于 (Tx, Ty) 不一定为整数,采用双线性插值方法获取其期望输出:

$$Y_1 = aY_k(i-c, j-d) + (1-a)Y_k(i-c+1, j-d)$$

$$Y_2 = aY_k(i-c, j-d+1) + (1-a)Y_k(i-c+1, j-d+1)$$

$$\bar{Y}_{k+1}(i, j) = bY_1 + (1-b)Y_2 \quad (6)$$

式中: a, b 分别为 T_x, T_y 的小数部分; c, d 分别为 T_x, T_y 的整数部分; $Y_k(m, n)$ 为像元 (m, n) 第 k 帧校正后的输出; $\bar{Y}_{k+1}(i, j)$ 为第 $k+1$ 帧像元 (i, j) 的期望输出。求出像素的期望输出后,根据公式(3)~(5)即可实现对校正系数的正向更新。

对第 k 帧图像对应位置的校正系数进行更新时,同样采用双线性插值方法获取其期望输出:

$$Y_3 = (1-a)Y_{k+1}(i+c, j+d) + aY_{k+1}(i+c+1, j+d)$$

$$Y_4 = (1-a)Y_{k+1}(i+c, j+d+1) + aY_{k+1}(i+c+1, j+d+1)$$

$$\bar{Y}_k(i, j) = (1-b)Y_3 + bY_4 \quad (7)$$

式中各符号的意义与公式(6)中相同。求出像素的期望输出后,根据公式(3)~(5)即可实现对校正系数的反向更新。

1.3 盲元判定模块

在探测系统出厂时,会对盲元进行一次标定,将其剔除,但随着时间的推移和使用环境的变化,会产生一些新的疑似盲元,在运动的场景中,这些点一直是局部灰度极大或极小值点,从视觉效果上看就表现为一个个噪声点,但这些点随着使用环境的变化,数量和位置会发生改变,所以设计了一种可以实时获取盲元列表的盲元判定算法。

盲元判定算法为:如果一个像素为其 3×3 邻域内的最大值或最小值,且与其 8 邻域内像素的灰度均值差的绝对值大于 T ,则认为其为疑似盲元,并对其连续满足疑似盲元的帧数进行累加,作为其是盲元的置信度。如果像素有一帧不满足成为疑似盲元的条件,则将其盲元置信度减 5,直到其盲元置信度等于 0。如果一个像素的盲元置信度大于 20,则认为其为盲元,在图像中用相邻的不是盲元的像素的灰度均值进行替代。

由于此处盲元判定是为了避免孤立点影响目标识别和视觉效果,可以根据系统性能指标来确定灰

度阈值 T , 计算公式如下:

$$T = \Delta T \times \text{Noise} / \text{NETD} \times \alpha \quad (8)$$

式中: ΔT 为目标与背景的最小温差; NETD 为系统时域等效噪声温差; Noise 为系统时域噪声 (用灰度级表示); α 为调整系数, 文中取为 0.1, 计算得到灰度阈值为 20。

2 试验结果与分析

在 Micsoroft Visual C++6.0 环境下编程实现了文中算法, 对模拟的添加噪声的非均匀性图像和实际采集的图像进行了仿真试验, 并与参考文献[5]中提出的神经网络算法的校正结果进行了对比。其中生成模拟测试图像时, 是在一幅大范围场景图像中, 使探测系统按一定的轨迹运动, 然后截取视场内的场景生成图像序列以模拟场景的运动。

图 3 为在理想图像上添加固定花纹噪声后, 用

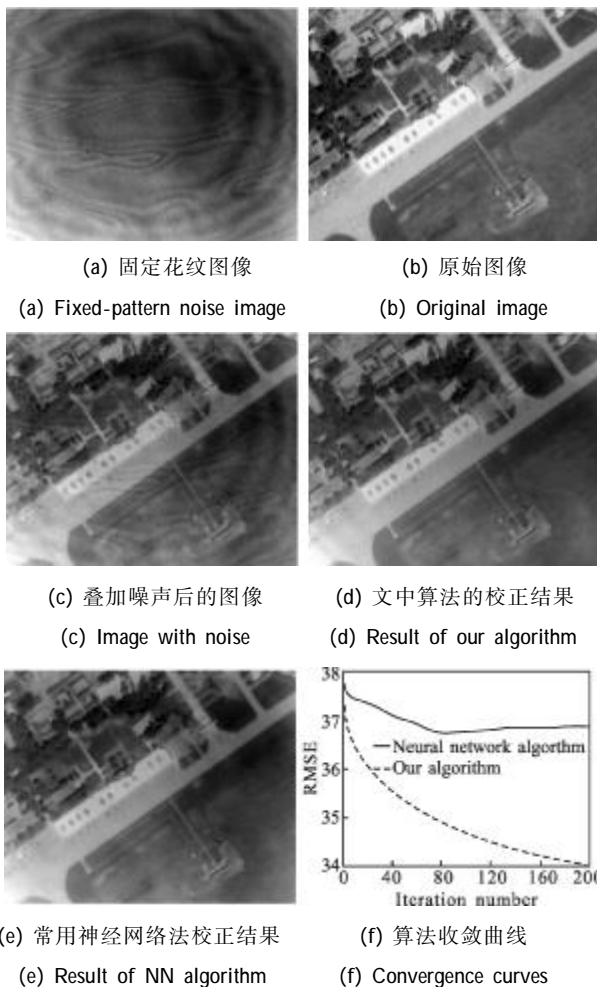


图 3 添加固定花纹噪声的校正结果
Fig.3 Correction result of fixed-pattern noise

文中算法和常用神经网络算法校正后的对比结果, 图 3(a)为叠加上去的固定花纹图像, 图 3(b)为未叠加噪声的原始图像, 图 3(c)为叠加噪声后的图像, 图 3(d)为文中算法运行 100 帧后的校正结果, 图 3(e)为常用神经网络法运行 100 帧后的校正结果, 对比图像右下方较为平坦的区域, 可以看出, 文中算法校正后的图像细节细腻, 常用神经网络法校正后的图像有明显低通滤波的痕迹, 细节变得模糊, 图 3(f)为两种算法的收敛曲线, ‘—’ 表示的是常用的神经网络法校正后的均方根误差 RMSE 随迭代次数的变化曲线, ‘---’ 表示的是文中算法校正后的均方根误差 RMSE 随迭代次数的变化曲线, 可以看出, 文中算法的收敛曲线要明显优于神经网络法。

图 4 为在没有明显非均匀性的图像上添加高斯随机噪声后, 用文中算法和常用神经网络算法校正

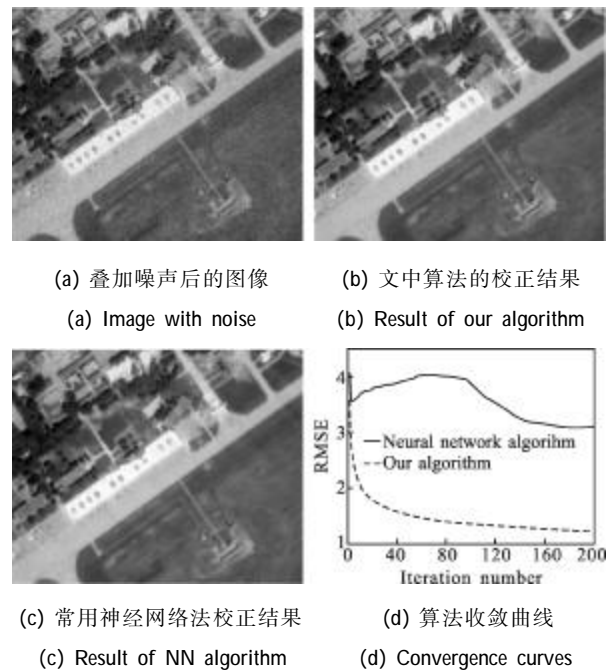
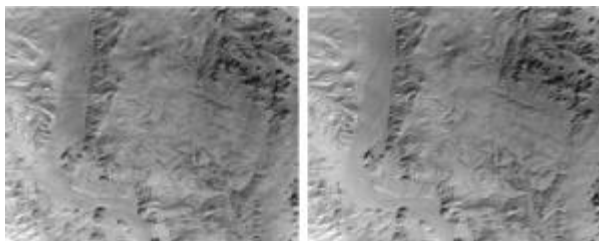


图 4 添加随机噪声干扰的校正结果
Fig.4 Correction result of random noise

后的对比结果, 图 4(a)为叠加噪声后的图像, 其原始图像与图 3(b)相同, 图 4(b)为文中算法运行 100 帧后的校正结果, 图 4(c)为常用神经网络法运行 100 帧后的校正结果, 同样可以看出, 文中算法校正后的图像保留了更多细节, 常用神经网络法校正后的图像细节损失较为严重, 图 3(d)为两种算法的收敛曲线, ‘—’ 表示的是常用神经网络法校正后的均方根误差 RMSE 随迭代次数的变化曲线, ‘---’ 表示

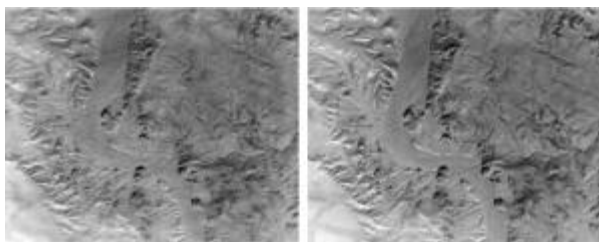
的是文中算法校正后的均方根误差 RMSE 随迭代次数的变化曲线,常用神经网络法其收敛曲线出现震荡,而文中算法的收敛曲线呈现单调下降趋势。

图 5 为对实际红外图像序列用文中算法进行校正的结果,图 5(a)为序列中第 100 帧的原始图像,图 5(b)为文中算法对第 100 帧图像校正后的结果,图 5(c)为序列中第 200 帧原始图像,图 5(d)为文中算法对第 200 帧图像校正后的结果。



(a) 第 100 帧原始图像 (b) 文中算法校正结果

(a) Original image of 100th frame (b) Result of our algorithm



(c) 第 200 帧原始图像 (d) 文中算法校正结果

(c) Original image of 200th frame (d) Result of our algorithm

图 5 实际红外图像序列的校正结果

Fig.5 Correction result of real infrared image

3 结论

文中提出了一种结合图像匹配技术和校正系数双向更新策略的改进神经网络非均匀性校正算法,并提出了一种可实时获取盲元列表的盲元判定算法,可用于去除由于探测器时间漂移特性和使用环境变化引入的非均匀性。与常用神经网络非均匀性校正算法相比,文中算法收敛速度快,对固定图案噪声和随机噪声都有较好的效果。通过对叠加固定图案噪声、叠加随机噪声和实际采集的红外图像序列的仿真实验,验证了文中算法校正效果优于常用神经网络算法,有很好的应用前景。

文中算法还存在以下需要进一步改进的地方:

场景过于简单时,由于找不到足够的特征来进行图像匹配,会导致无法获取图像的运动参数。在以后的研究中,将考虑增加图像场景复杂性判断和使用像素邻域的信息,以进一步提高算法的性能。

参考文献:

- [1] Li Qing. Study on adaptive nonuniformity correction algorithm for IRFPA based on imaging guidance condition [D]. Xi'an: Xidian University, 2006. (in Chinese)
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.
- [2] Torres Sergio N, Hayat Majeed M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays[J]. Optical Society of America, 2003, 20(3): 470-480.
- [3] Snyder D L, Angelisanti D, Smith W H, et al. Correction for nonuniformity flat-field response in focal plane arrays [C]//SPIE, 1996, 2827: 60-67.
- [4] Ratliff Bradley M, Hayat Majeed M, Scott Tyo J. Generalized algebraic scene-based nonuniformity [J]. Optical Society of America, 2005, 22(2): 239-249.
- [5] Torres Sergio N, Vera Esteban M, Reeves Rodrigo A, et al. Adaptive scene-based non-uniformity correction method for infrared-focal plane arrays[C]//SPIE, 2003, 5076: 130-139.
- [6] Li Qing, Liu Shangqian, Wang Bingjian, et al. New nonuniformity correction algorithm for IRFPA based on neural network [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 342-344. (in Chinese)
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.
- [7] Cai Shengbing, Duan Zhemin, Xu Jiadong. Scene-based nonuniformity correction method incorporating motion triggering[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(6): 941-944. (in Chinese)
蔡胜兵, 段哲民, 许家栋. 加入运动触发场景的非均匀性校正方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 941-944.
- [8] Zhang Hao, Liu Zhenguo, Hu XiaoMei, et al. Nonuniformity correction based on active movement control of scene [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 397-401. (in Chinese)
张昊, 刘振国, 胡晓梅, 等. 场景主动运动控制的非均匀性校正方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 397-401.