

基于递推最小二乘的红外焦平面非均匀校正算法*

徐田华 赵亦工

(西安电子科技大学模式识别与智能控制研究所, 西安 710071)

摘 要 根据递推最小二乘和图像配准原理, 提出了基于递推最小二乘的红外焦平面非均匀校正算法(简称 ILS 算法), 有效降低算法的时间和空间复杂度, 使噪音图像的校正处理能够实时完成. ILS 算法具有噪音参量估计准确度高、收敛速度快和计算复杂度低等优点. 给出了算法的推导并用仿真数据对算法的有效性进行验证.

关键词 红外焦平面; 非均匀校正; 递推最小二乘

中图分类号 TN215 **文献标识码** A

0 引言

近几年中, 焦平面阵列 (Focal Plane Arrays - FPA) 传感器成为红外和可见光成像系统中最有发展前景的探测器件, 广泛应用于夜视系统、机载侦察和预警系统、天文成像系统、森林火警早期预警系统. 但由于制造工艺的限制, 焦平面阵列探测单元响应度不完全一致, 导致了叠加在图像上的空间噪音, 即固定图形噪音 (FPN), 严重影响了红外系统的成像质量和辐射测量准确度. 目前, 相继提出大量的红外焦平面阵列非均匀校正算法, 它们主要分为两大类: 第一类是基于黑体的非均匀校正技术^[1], 但其光学和机械结构复杂并受探测单元的非线性响应限制. 第二类是基于场景的非均匀校正技术, 它直接利用场景信息, 避免了黑体校正的缺点, 成为目前研究的方向. 如 Scribner D A 等提出了时域高通滤波算法^[2]和基于神经网络的非均匀校正算法 (NN)^[3]. Torres 等人提出了卡尔曼 (Kalman) 滤波校正算法^[4], Hayat 等提出了统计校正算法 (statistical algorithm)^[5]和图像配准的校正方法^[6]和国内学者提出的算法^[7~9].

本文根据递推最小二乘估计原理, 结合图像配准技术, 给出基于递推最小二乘的红外焦平面非均匀校正算法. 由于算法的递推特性, 降低了数据存储量, 节省了存储单元. 同时, 算法不需矩阵求逆运算, 仅由输入噪音图像完成固定图形噪音参量的序贯修正, 有效降低了算法的计算复杂性, 提高了算法的实时处理能力, 为算法的工程实用打下基础.

1 原理简述

1.1 算法框图

图 1 为非均匀校正算法结构框图, 整个算法流

程分为两部分: 第一部分由图像配准 (Image Registration) 和递推 LS 固定图形噪音参量估计 (Estimates of FPN by ILS) 两个模块构成, 完成校正后序列图像 (Corrected Image Sequences) 配准和固定噪音参量的递推估计. 第二部分由非均匀校正模块 (Nonuniformity Correction) 构成, 利用第一部分计算出的固定图形噪音参量完成后续输入噪音图像序列的校正, 处理后的图像作为校正图像输出. 图像配准模块计算相邻图像帧间的位移矢量, 利用运动补偿原理逐步逼近输入像素的真值. 递推最小二乘估计在前次参量估计的基础上, 将输入的噪音图像序列作为当前数据, 修正上次的固定图形噪音参量估计. 随着迭代次数的增加, 固定图形噪音参量逐步接近真值, 图像配准的准确度因此提高, 反过来促进递推最小二乘算法的固定噪音参量求解更为精确. 这样经一定的迭代次数后, 可以获得较为精确的参量估计和图像处理效果.

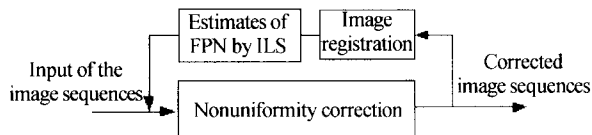


图 1 非均匀校正算法结构

Fig. 1 Framework of the nonuniformity correction algorithm

1.2 图像配准

本文采用相位相关 (Phase Correlation) 技术计算相邻图像帧间位移, 用于图像配准. 区别于传统的图像块匹配方法, 相位相关配准算法直接从两帧图像的相关相位中计算出相对位移, 加之采用二维快速傅立叶 (FFT) 变换, 有效降低算法的计算复杂性. 相位配准算法对于待配准的图像平均灰度变化不敏感, 适用于多谱图像的配准. 并且, 算法中相位相关函数的逆傅氏变换为冲击函数 δ , 有效提高配准准确度. 同时, 算法也适用于运动图像序列的大尺度位移估计. 下面简述相位相关配准的原理.

* 国家自然科学基金 (编号 6057215) 资助项目
Tel: 029-88201499 Email: xth_2002@sina.com
收稿日期: 2004-11-04

假设两帧相邻图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 间仅存在平移运动, 相应的水平和垂直位移分别为 x_0 和 y_0 , 即

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

根据傅立叶变换的平移特性

$$\hat{f}_2(u, v) = \hat{f}_1(u, v) \exp(-i(ux_0 + vy_0)) \quad (2)$$

式中 $\hat{f}_1(u, v)$ 和 $\hat{f}_2(u, v)$ 分别为图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的傅氏变换.

由式(1)、(2)得对应的归一化互功率谱表达式

$$\frac{\hat{f}_2(u, v) \hat{f}_1^*(u, v)}{|\hat{f}_1(u, v) \hat{f}_2^*(u, v)|} = \exp(-i(ux_0 + vy_0)) \quad (3)$$

这里 * 表示复共轭.

将式(3)作二维逆傅氏变换, 得

$$\Phi(x_0, y_0) = \text{IFFT} \left[\frac{\hat{f}_2(u, v) \hat{f}_1^*(u, v)}{|\hat{f}_1(u, v) \hat{f}_2^*(u, v)|} \right] =$$

$$\text{IFFT}(\exp(-i(ux_0 + vy_0))) = \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (4)$$

显然, 搜索相位相关函数 $\Phi(x_0, y_0)$, 其峰值对应的平面坐标 (x_0, y_0) , 即为相邻两帧图像间的位移.

1.3 递推最小二乘估计

由焦平面阵列探测单元的线性响应模型, 给出第 k 帧图像的数学模型

$$y_k(i, j) = a(i, j)x_k(i, j) + b(i, j) + n_k(i, j) \quad (5)$$

这里, (i, j) 表示第 k 帧图像中的像素位置, $a(i, j)$ 、 $b(i, j)$ 表示叠加在原始图像 $x_k(i, j)$ 上的乘性固定噪声和加性固定噪声. 由于固定噪声的缓变特性, 可以认为在一段时间内, 固定噪声数值保持不变. $n_k(i, j)$ 表示叠加在第 k 帧图像上的时域噪声, $y_k(i, j)$ 为探测器的输出. 由于算法对每个像素进行相同的运算, 为简便起见, 以下叙述中省略像素位置 (i, j) .

将式(5)写成观测矢量方程

$$y_k = H_k \theta + n_k \quad (6)$$

式中 $H_k = [x_k \ 1]$, $\theta = [a \ b]^T$.

设已经处理的图像帧数为 k 帧, 为叙述方便, 采用以下记号

$$r(k) = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_k \end{bmatrix} \quad H(k) = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_k \end{bmatrix} \quad n(k) = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

则观测方程为

$$r(k) = H(k)\theta + n(k) \quad (8)$$

由最小二乘递推算法, 得第 $k+1$ 次的固定图形噪声参量递推公式

$$\theta_{k+1}(r) = \theta_k(r) + K_{k+1}[r_{k+1} - H_{k+1}\theta_k(r)] \quad (9)$$

其中增益矩阵 K_{k+1}

$$K_{k+1} = P_{k+1} H_{k+1}^T \quad (10)$$

和 P_{k+1} 的递推公式

$$P_{k+1} = P_k - \frac{P_k H_{k+1}^T H_{k+1} P_k}{1 + H_{k+1} P_k H_{k+1}^T} \quad (11)$$

其中 $P_k = [H^T(k)H(k)]^{-1}$.

1.4 噪音图像的非均匀校正

设由第 k 步递推得到的固定噪声参量 $\theta_k = [a_k \ b_k]^T$, 联立式(6), 得到图像 x_k 的估计式为

$$\hat{x}_k = \frac{y_k - b_k}{a_k} \quad (12)$$

然后, 将校正后的图像再次经配准、最小二乘递推, 得到更为精确的固定图形噪声参量估计. 依次类推, 最终使参量估计趋近真值, 完成固定图形噪声污染图像的非均匀校正.

2 算法仿真结果分析

2.1 仿真数据的产生

利用已有的 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 红外序列图像, 通过加入模拟固定图形噪声参量, 形成算法测试仿真数据. 这里的图像尺寸为 250×160 , 所用的图像序列共 100 帧. 加入的加性固定图形噪声标准差为均值 0, 标准方差 10 的高斯白噪声, 乘性噪声均值为 1, 标准方差 0.1 的高斯白噪声.

2.2 仿真结果的评价指标

为了定量度量校正效果, 这里采用参量 ρ 来定义图像的光滑度 (roughness) 和均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error) 指标来度量算法的执行效果, 其定义参见文献[4].

2.3 算法的仿真流程和结果

整个算法流程为: 1) 输入图像由上一步求解的固定图形噪声参量进行非均匀校正, 输出为校正后图像; 2) 校正后图像反馈到图像配准模块, 求解与基准图像间的位移矢量; 3) 将此图像按求出的位移矢量与前面校正后的图像进行配准相加, 求解理想的图像像素灰度; 4) 利用线性拟和算法求解焦平面阵列的固定图形噪声参量; 5) 转步骤(1).

2.3.1 算法的运算平台和序列仿真图像的迭代处理结果

本算法基于 Matlab 软件进行仿真试验, 每帧图像的处理时间大约为 0.2 s, 为工程实际的需要, 将整个或部分算法嵌入可编程逻辑器件, 如 FPGA 中, 这样可以实现红外图像序列的实时校正. 为比较算法递推的效果, 图 2 给出红外噪音图像序列中不同图像帧对应的校正结果. 从图中可以看出, 随输入序列图像帧数的增加, 图像处理的主观效果逐渐增强. 并且图像处理质量的提高并不以牺牲空间

分辨率为代价. 这可以从序列图像中的运动点目标 (图中的白点) 的清晰度上得到验证. 这种处理效果

对于依赖空域处理的算法, 如基于神经网络的非均匀校正算法是难以实现的.

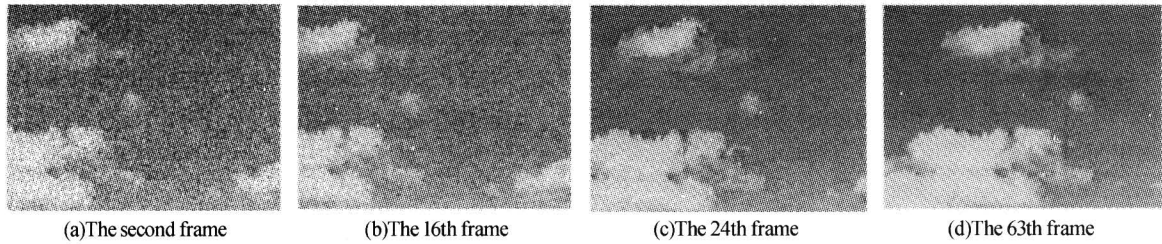


图 2 算法递推校正效果
Fig. 2 Results after the iterative correction algorithm

2.3.2 序列仿真图像处理结果对应的光滑度和 RMSE 曲线

为定量比较图像处理的效果, 图 3 给出序列噪声图像处理后的的光滑度 ρ 和 RMSE 参量随图像帧数 n 变化的曲线. 由图 3 可见, 参量 ρ 和 RMSE 随帧数 n 的增加而降低. 在前 40 帧, 参量下降的幅度较大, 当图像帧数达到 60 帧后, 光滑度参量 ρ 和 RMSE 参量处于稳定状态, 图像处理效果随输入的图像帧数变化不大, 算法处于收敛状态. 与基于神经网络校正算法、基于高通的校正算法、Kalman 滤波算法、统计算法等相比, 基于递推最小二乘的非均匀校正算法具有较快的收敛速度.

时处理具有重要意义, 这是算法能否实用的关键. 基于递推最小二乘的非均匀校正算法分为图像配准、固定图形噪声参量递推估计和噪声图像校正两部分, 现在分别对这两部分的运算量进行分析. 图像配准、固定图形噪声参量递推每步需要的乘法次数约 $x \cdot y \cdot (18 + 4m^2 \cdot \log_2^m)$, 加法次数约 $x \cdot y \cdot (17 + 12m^2 \cdot \log_2^m)$, 这里, m 为背景配准窗口大小, x, y 为输入图像的水平 and 垂直尺寸. 图像校正部分对应每一像素所需的运算量为 1 次减和 1 次除, 这样每帧图像需要的加法 $x \cdot y$, 乘法 $x \cdot y$ 次.

综上所述, 与基于图像配准的非均匀校正批处理算法相比, 最小二乘递推校正算法的运算量大约降低 Block 倍, 这里 Block 指一次处理的图像帧数, 典型值为 30 左右. 显然, 递推算法显著降低算法的时间复杂度. 并且, 递推最小二乘算法所需的存储空间大约为 6 帧图像, 与图像配准算法所需的 30 帧左右存储空间相比, 大大降低了算法的空间复杂度.

3 结论

本文给出基于递推最小二乘的红外焦平面非均匀校正算法, 解决了焦平面阵列校正算法普遍存在的计算复杂度高, 实时实现困难等问题. 算法具有固定图形噪声参量估计准确度高, 时间和空间复杂度低等优点, 使焦平面阵列校正算法的工程实际应用成为可能. 算法适用于场景作全局运动的场合, 对于包含运动目标场景的非均匀校正算法是下一步研究的重点和方向.

参考文献

- 1 Milton A F, Barone F R, Kruer M R : Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance. *Opt Eng*, 1985, **24**(5): 855~862
- 2 Scribner D A, Sarkay K A, Caldfield J T, et al. Nonuniformity correction for staring focal plane arrays using scene-based techniques. *SPIE*, 1990, **1308**: 224~233
- 3 Scribner D A, Sarkay K A, Kruer M K, et al. Adaptive

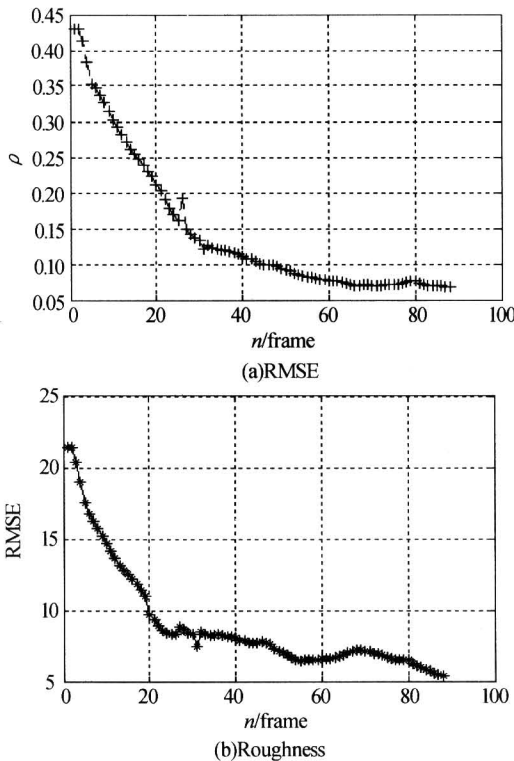


图 3 不同图像帧对应的 RMSE 和光滑度曲线
Fig. 3 The curve of RMSE and roughness corresponding to the different frame

2.3.3 算法性能分析

算法时间和空间复杂度对于红外序列图像的实

- nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks. *SPIE*, 1991, **1541**:100~109
- 4 Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays. *SPIE*, 2000, **4030**:196~205
- 5 Hayat M M, Torres S N, Armstrong E E, *et al.* Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays. *Applied Optics*, 1999, **38**(8):772~780
- 6 Hardie R C, Barnard K J, Bognar J G, *et al.* High-resolution image reconstruction from a sequence of rotated and translated frames and its application to an infrared imaging system. *Opt Eng*, 1998, **37**(2):247~260
- 7 周惠芯,殷世民,刘上乾,等. 红外焦平面器件盲元检测及补偿算法. *光子学报*, 2004, **33**(5):598~600
Zhou H X, Yin S M, Liu S Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):598~600
- 8 李奇,冯华君,徐之海. 自动对焦系统中图像非均采样试验的研究. *光子学报*, 2004, **33**(12):1499~1501
Li Q, Feng H J, Xu Z H. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12):1499~1501
- 9 拜丽萍,殷世民,刘上乾. 一种新的基于场景的红外焦平面阵列非均匀校正算法. *光子学报*, 2004, **33**(1):109~112
Bai L P, Yin S M, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):109~112

Iterative Least Square-Based Algorithm for Nonuniformity Correction of Infrared Focal Plane Arrays

Xu Tianhua, Zhao Yigong

Institute of Pattern Recognition and Intelligent Control, Xidian University, Xi'an 710071

Received date: 2004-11-04

Abstract Based on the iterative least square and image registration technology, the iterative least square based algorithm (ILS) for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays was presented, which greatly reduced the time and space complexity and made real-time realization of the image process possible. The ILS algorithm had the strength of accurate estimation of FPN, fast convergence rate and low computational complexity. The deduction of the algorithm has been presented and the effectiveness has been demonstrated by the simulation results.

Keywords Infrared focal plane; Nonuniformity correction; Iterative least square



Xu Tianhua was born in Shandong Province, in 1971. He received the B. S degree from Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China in 1993, and the M. S degree from Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, in 2001. Now he is a Ph. D. candidate for Pattern Recognition and Intelligent Control in Xidian University. His major interests are image processing and signal processing.