

# 一种新的基于场景的红外焦平面阵列 非均匀性校正算法

拜丽萍 殷世民 刘上乾

(西安电子科技大学技术物理学院,西安 710071)

**摘要** 设计了基于小波变换去噪、序列图像配准、正交最小二乘拟合的基于场景的非均匀性校正算法,该算法不仅能适应红外焦平面阵列非(IRFPA)均匀性随时间和环境变化而发生缓慢变化的情况,而且对一般基于场景分析的校正算法中形成的校正虚像也有很好的抑制作用.模拟实验结果验证了其有效性和先进性.

**关键词** 红外焦平面阵列;非均匀性校正;小波;图像配准;正交二乘拟合

**中图分类号** TN215 **文献标识码** A

## 0 引言

红外焦平面阵列器件构成的红外成像系统具有灵敏度高、探测能力强、结构简单、帧频高等优点,是当今红外成像系统发展的主流方向.由于材料和工艺水平所限等原因,IRFPA 各阵元间响应的非均匀性较大,导致系统的温度分辨率(NEID)显著下降,严重影响了器件的成像质量,因此必须对 IRFPA 器件的非均匀性进行校正<sup>[1]</sup>.

本文首先给出图像配准算法,然后阐述基于序列图像配准的自适应非均匀性校正方法,及基于小波变换的杂波滤除算法和正交函数最小二乘拟合实现非均匀性校正,最后是仿真结果和结论.

## 1 图像配准算法

在后面的算法中,进行场景估计时,精确的配准

$$\begin{bmatrix} \sum_m \sum_n \left( \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial m} \right)^2 & \sum_m \sum_n \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial m} \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial n} \\ \sum_m \sum_n \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial m} \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial n} & \sum_m \sum_n \left( \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial n} \right)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_m \sum_n (f_k(m, n) - f_1(m_0, n_0)) \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial m} \\ \sum_m \sum_n (f_k(m, n) - f_1(m_0, n_0)) \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

写成矩阵形式为

$$\hat{j} \cdot S_k = V_k \quad (4)$$

式中  $S_k = [S_x \quad S_y]^T$ ,由式(3)和式(4)可求得配准矢量  $S_k$  的估计

$$\hat{S}_k = M^{-1} V_k \quad (5)$$

## 2 基于序列图像配准的自适应非均匀性校正

Hardie 提出了一种非均匀性校正的简单算法<sup>[1]</sup>,首先对原始帧序列进行配准,然后用基于运

是很重要的.本文采用文献[2]的图像精确配准算法,以便获得图像之间的位置关系.若选取第一帧图像为参考图像,则第  $k$  帧图像 Taylor 展开式的前 3 项近似表示为

$$f_k(m, n) = f_1(m_0, n_0) + (m - m_0) \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial m} + (n - n_0) \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial n} \quad (1)$$

设  $S_x = (m - m_0)$ ,  $S_y = (n - n_0)$  分别表示  $x$  和  $y$  方向的平移量,本文采用最佳匹配的原则,求解平移量,误差函数为

$$\frac{1}{MN} \sum_{m=n}^M \sum_n^N [f_k(m, n) - f_1(m_0, n_0) - S_x \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial m} - S_y \frac{\partial f_1(m_0, n_0)}{\partial n}]^2 \quad (2)$$

$M, N$  分别为  $x$  和  $y$  方向的像素个数,对式(2)关于  $S_x, S_y$  求偏导,并令偏导数为零

动补偿时域平均估计真实场景数据,最后用观察数据和估计的场景数据获得非均匀参量的估计,算法描述如下:

### 2.1 真实场景的估计

考虑一组不受探测器非均匀性影响的期望图像帧序列,设  $z_i(j)$  表示第  $i$  帧中的第  $j$  个像素值,  $N$  为给定的帧数,  $P$  为每帧的像素个数.对于第  $i$  帧中的第  $j$  个像素值,  $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq P$ ,观察像素值为

$$x_i(j) = a(j) z_i(j) + b(j) \quad (6)$$

式中变量  $a(j)$  代表第  $j$  个探测器的增益,  $b(j)$  为探测器偏置.假设这些增益和偏置在  $N$  帧序列期间对每个探测器为常量.

假设第一帧中每个理想像素值在帧序列中映射到一个特殊位置, 设  $t_{i,j,k}$  为  $z_i(j)$  出现在第  $k$  帧的空间索引, 由配准确定, 则

$$z_i(j) = z_k(t_{i,j,k}) \quad (7)$$

$i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, P, k=1, 2, \dots, N$ , 图 1 举例说明这种表示的用法.

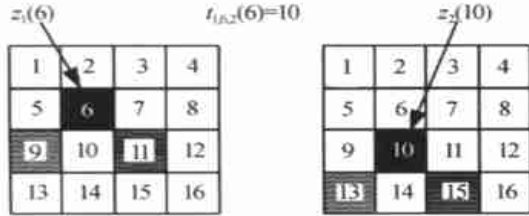


图 1 两帧图像的运动轨迹示意图. 阴影部分表示从第一帧运动到第二帧的真实场景值,  $z_2(10) = z_1(6)$

Fig. 1 Two frames showing an example of a motion trajectory. the shaded blocks represent true values which move from frame one to frame two.  $z_2(10) = z_1(6)$

设像素间探测器增益和偏置独立同分布, 不失一般性, 假设增益均值为 1, 偏置均值为 0. 这样, 观察值的均值就是期望的场景值:  $E\{x_i(j)\} = z_i(j)$ .

如果景物运动, 则通过独立的探测器, 我们可以获得同一场景大量的观察值, 在参量为高斯分布的情况下, 期望场景值的最大似然估计由采样均值估计给出<sup>[1]</sup>

$$\hat{z}_i(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_{i,j,k}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a(t_{i,j,k}) z_k(t_{i,j,k}) + b(t_{i,j,k}) \quad (8)$$

简化为

$$\hat{z}_i(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a(t_{i,j,k}) z_i(j) + b(t_{i,j,k}) \quad (9)$$

获得期望场景的估计值后, 即可进行非均匀性参量的估计. 通过估计自身的非均匀性参量, 可以获得比式(9)误差方差小的校正图像.

## 2.2 增益和偏置估计

给定由式(5)得到的场景估计和观察数据, 即可进行非均匀性校正参量  $a(j)$  和  $b(j)$  的估计. 将估计的场景值表示为期望值加上一个估计误差项

$$\hat{z}_i(j) = z_i(j) + \eta_i(j) \quad (10)$$

误差估计  $\eta_i(j)$  是零均值高斯随机变量, 结合最初的非均匀性模型(6), 可得

$$x_i(j) = a(j)[\hat{z}_i(j) - \eta_i(j)] + b(j) = a(j)\hat{z}_i(j) + b(j) - a(j)\eta_i(j) \quad (11)$$

为了表达方便, 定义  $n_i(j) \triangleq -a(j)\eta_i(j)$ , 重写  $x_i(j)$  的表达式为

$$x_i(j) = a(j)\hat{z}_i(j) + b(j) + n_i(j) \quad (12)$$

通过对每个探测器使用多帧, 可由式(12)获得一组等式. 通过观察数据和估计的期望数据的最小二乘拟合可以获得有用的实际解, 最小二乘解就是最小

化二次形式, 即

$$E(a_j) = \|x_j - Z_j a_j\|^2 = (x_j - Z_j a_j)^T (x_j - Z_j a_j) \quad (13)$$

式中  $x_j = [x_1(j), x_2(j), \dots, x_N(j)]^T$ ,  $a_j = [a(j), b(j)]^T$

$$Z_j = \begin{bmatrix} \hat{z}_1(j) & \hat{z}_2(j) & \dots & \hat{z}_N(j) \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

对向量  $a_j$  求微分, 并将结果置零, 就得到最小二乘解

$$\hat{a}_j = \text{arg min}_{a_j} (x_j - Z_j a_j)^T (x_j - Z_j a_j) = (Z_j^T Z_j)^{-1} Z_j^T x_j \quad (15)$$

其中  $\hat{a}_j = [\hat{a}(j), \hat{b}(j)]^T$ .

Hardie 算法的缺点是采用一般最小二乘法实现基于图像配准技术的非均匀性校正, 正规方程组的系数矩阵多是病态阵, 所求的解, 舍入误差很大, 进而所求最小二乘数据拟合误差较大, 校正结果不理想. 并且在非均匀性程度很高时, 由于无法对序列图像进行精确配准, 算法难以实现. 为了解决以上算法中的缺陷, 本文提出改进的新算法, 首先利用小波变换滤除杂波以降低非均匀性, 从而对序列图像进行精确配准, 然后利用正交函数最小二乘拟合, 不需要解大型联立方程组, 可避免正规方程组的病态性, 改进算法的校正流程如图 2 所示.

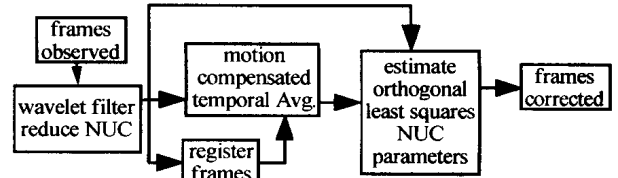


图 2 非均匀校正流程图

Fig. 2 Block diagram of the NUC algorithm

## 3 小波滤波降低非均匀性

当序列图像非均匀性程度很高时, 无法对其进行精确配准, Hardie 算法不适用. 为此本文首先用小波变换滤除杂波以降低非均匀性, 然后再按上述方法进行非均匀性校正. 信号的小波变换与噪声的小波变换在不同分辨率下呈现不同规律, 利用小波变换将信号分解到不同的频率段上, 找出感兴趣的频率成分, 再进行分析.

设  $\{V_j\}$  是一给定的多分辨率分析,  $\phi$  和  $\Psi$  分别是相应的尺度函数和小波函数,  $f \in \Psi_{J_1}$  ( $J_1$  为一确定整数), 则有分解<sup>[3,4]</sup>

$$f(x) = A_{J_1} f(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} C_{J_1, k} \phi_{J_1, k}(x) =$$

$$A_{J_2} f(x) + \sum_{j=J_1+1}^{J_2} D_j f(x) \quad (16)$$

式中

$$A_{J_1} f(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} C_{J_2, k} \phi_{J_2, k}(x) \quad (17)$$

$$Df(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} D_{j,k} \Psi_{j,k}(x) \quad (18)$$

而

$$\begin{aligned} C_{j+1} &= HC_j \\ D_{j+1} &= GC_j \end{aligned} \quad (j = J_1, J_1 + 1, \dots, J_2 - 1) \quad (19)$$

$Af$  称作  $f$  在  $2^j$  分辨率下的连续逼近,  $Df$  为  $f$  在  $s^j$  分辨率下的连续细节,  $C_j$  和  $D_j$  分别为在分辨率  $2^j$  下的离散逼近和离散细节.

#### 4 正交函数作曲线拟合

正交函数最小二乘拟合, 不需要解大型联立方程组, 可避免正规方程组的病态性. 对给定数据  $(x_i, f(x_i), \omega(x_i)), (i = 1, 2, \dots, m)$ , 在  $\text{span}\{\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_n\}$  上找一个函数  $y = s^*(x)$ , 使加权平方和

$$\|\delta\|_2^2 = \sum_{i=1}^m \omega(x_i) [s^*(x_i) - f(x_i)]^2 = \min(20)$$

式中  $s^*(x) = a_0^* \phi_0(x) + a_1^* \phi_1(x) + \dots + a_n^* \phi_n(x)$ , 求误差函数  $\phi(a_0, a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^m \omega(x_i) [\sum_{j=0}^n a_j \phi_j(x_i) - f(x_i)]^2$  的极小值点  $(a_0^*, a_1^*, \dots, a_n^*)$ , 得  $\sum_{j=0}^n a_j \sum_{i=1}^m \omega(x_i) \phi_j(x_i) \phi_k(x_i) = \sum_{i=1}^m \omega(x_i) f(x_i) \phi_k(x_i) \quad (k = 0, 1, \dots, n)$ , 它是  $n+1$  个未知数,  $n+1$  个方程组, 称为法方程式.

如果  $\{\phi_k\}_{k=0}^n$  是正交函数族, 则法方程式成为

$$\begin{bmatrix} (\phi_0, \phi_0) & & & \\ & (\phi_1, \phi_1) & & \\ & & \dots & \\ & & & (\phi_n, \phi_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f, \phi_0) \\ (f, \phi_1) \\ \dots \\ (f, \phi_n) \end{bmatrix}$$

$$\text{于是 } a_k^* = \frac{(f, \phi_k)}{(\phi, \phi_k)} = \frac{\sum_{i=1}^m \omega(x_i) f(x_i) \phi_k(x_i)}{\sum_{i=1}^m \omega(x_i) \phi_k(x_i) \phi_k(x_i)}$$

在点集  $\{x_i\}_{i=1}^m$  及权函数  $\omega(x_i) > 0 (i = 1, \dots, m)$ , 可构造正交函数  $\{p_k(x)\}_{k=0}^n$  如下<sup>[15]</sup>

$$p_0(x) = 1$$

$$p_1(x) = (x - \alpha_1) p_0(x)$$

$$p_{k+1}(x) = (x - \alpha_{k+1}) p_k(x) - \beta_k p_{k-1}(x) \quad (k = 1, 2, \dots, n-1)$$

$$\text{式中 } \alpha_{k+1} = \frac{(xp_k, p_k)}{(p_k, p_k)}$$

$$\beta_k = \frac{(p_k, p_k)}{(p_{k-1}, p_{k-1})}$$

#### 5 仿真结果

仿真结果如图 3 所示.

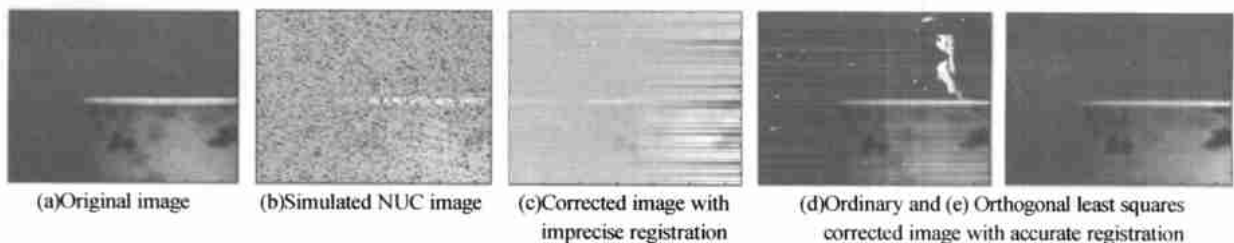


图 3 不同算法仿真结果图

Fig. 3 Simulated images with different algorithms

#### 6 结论

依据信号与噪声的小波变换在不同分辨率下呈现不同特点的规律, 应用多分辨率方法把信号分解到不同频带范围内, 低通滤波除杂波, 能够进行运动图像较为精确的配准, 得到理想的校正图像. 而且用正交函数作非均匀性参量拟合, 计算量小, 精度高, 能得到更为清晰的图像, 更适合工程应用.

#### 参考文献

- 1 Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E E, et al. Scene-based nonuniformity correction using video sequences and registration. *OSA Applied Optics*, 2000, **39**(8): 1241~1250
- 2 Kaltenbacher E, Hardie R C. High resolution infrared

reconstruction using multiple, low resolution, aliased frames. *SPIE*, 1996, **2751**: 142~152

- 3 Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(7): 674~693
- 4 姜光, 刘上乾. 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法研究. *红外与毫米波学报*, 2001, **20**(2): 93~96  
Jiang G, Liu S Q. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, **20**(2): 93~96
- 5 金一庆, 陈越. 数值方法. 北京: 机械工业出版社, 2000. 146~149  
Jin Y Q, Chen Y. *Numerical Methods*. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000. 146~149

## A New Scene-based Nonuniformity Correction Algorithm in IRFPA

Bai Liping , Yin Shimin , Liu Shangqian

*Department of Technical Physics , Xidian University , Xi 'an 710071*

Received date :2002- 10- 16

**Abstract** Based on the application of the wavelet filter ,video sequences and registration , orthogonal least squares , a new adaptive nonuniformity correction technique is discussed. With the scene estimates ,and the corresponding observed values through a given detector ,a orthogonal curve-fitting procedure is used to estimate the individual detector offset and gain coefficients . Its efficiency and superiority are clarified by simulation.

**Key words** IRFPA ;Nonuniformity correction ;Wavelet ;Image registration ;Orthogonal least squares



**Bai Liping** was born in 1973. In 1997 she was awarded a B. Eng. degree in computer application. Now she has been working towards the Ph. D. degree in physical electronics at Xidian University. Her research interests focus on the nonuniformity correction of IRFPA and IR image adaptive enhancement based on fuzzy logic.