

## 基于单调场景运动的复杂非均匀性校正

许轰烈<sup>1</sup>, 陈 钱<sup>1</sup>, 隋修宝<sup>1</sup>, 刘 宁<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094;  
2. 南京晓庄学院 物理与电子工程学院, 江苏 南京 210017)

**摘 要:** 在红外探测器中, 高频非均匀性主要表现为列或者行条纹, 而低频非均匀性则主要表现为片状。在实际应用中, 场景是沿着一个单调方向, 并且有不同的非均匀性出现。基于这样的考虑, 提出了一个基于场景的非均匀性校正技术, 不仅符合上述校正要求, 而且也实现了小型化、低功耗的实时硬件系统。通过为配准原则开发一种新的投影估计来解决问题, 同时在硬件系统上实现了这一技术。通过评价标准测试了这项技术的性能, 展示了在单调运动下系统非均匀性校正的实际效果。实验结果表明: 该算法具有校正精度高、收敛速度快的优点。

**关键词:** 投影估计; 单调运动; 基于场景; 非均匀性校正

**中图分类号:** TN219      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2014)09-3168-05

## Non-uniformity correction based on monotonous scene motion

Xu Honglie<sup>1</sup>, Chen Qian<sup>1</sup>, Sui Xiubao<sup>1</sup>, Liu Ning<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligence Sense, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. College of Physics and Electronics, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 210017, China)

**Abstract:** In the real IR detector, the high frequency non-uniformity is mostly expressed as the column or the row stripes and the low frequency non-uniformity is mostly expressed as the patchy pattern. In real application, the scene is towards one continuous monotonous direction and has different appearances of non-uniformity. Under this consideration, a scene-based non-uniformity correction technology was proposed, it not only fitted the situation mentioned above but also was realized on the small packaged, low power consumed real-time hardware system. These problems were solved by developing a new projection estimator for the registration with a criterion, and this algorithm was immigrated into a FPGA\_based hardware system. This system is fully engineered for some particular usage. The performance of the proposed technology was tested by the evaluation indexes, and it demonstrates the actual effect of correcting the non-uniformity under a monotonous motion on the system. According to the practical application, this algorithm has the advantage of the strong ability to eliminate the image degradation and fast convergence speed.

**Key words:** projection estimator; continuous monotonous motion; scene-based; non-uniformity correction

收稿日期: 2014-01-10; 修订日期: 2014-02-12

基金项目: 教育部博士点新教师基金(20113219120017); 中国博士后特别资助基金(2012T50478)

作者简介: 许轰烈(1986-), 男, 博士生, 主要从事红外成像系统图像处理方面的研究。Email: xhl1192008@hotmail.com

导师简介: 陈钱(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电探测与图像处理、光电信号处理与数字视频技术方面的研究。

Email: chenq@mail.njust.edu.cn

## 0 引言

近年来,基于场景的非均匀性算法发展迅速,例如时域高通滤波器非均匀性校正算法<sup>[1-2]</sup>,神经网络非均匀性校正算法<sup>[4-6]</sup>,恒定统计非均匀性校正算法<sup>[7-8]</sup>,基于图像配准的非均匀性校正算法<sup>[10]</sup>。所有上述提到的算法,都有他们各自的应用范围。例如,高通滤波器非均匀性校正算法,神经网络非均匀性校正算法和恒定统计非均匀性算法在高频非均匀性校正上表现良好<sup>[2,4,6-7]</sup>,但是在低频非均匀性校正上表现极差,更糟糕的是,当场景从静止到移动时,图像将出现鬼影<sup>[5,8]</sup>。图像配准非均匀性校正算法在上述的两种非均匀性校正上表现良好,但是它不能防止错误配准带来的致命问题,从而导致错误校正。直到今天,大部分非均匀性校正算法的研究还是停留在实验室阶段。没有报告显示它们可以在小型化低功耗实时硬件系统上实现。同时,大部分测试算法性能的图像是在预设的运动状态下获得的,这意味着,各个方向的场景运动是足够的。然而,在实际应用中,大部分场景具有高频和低频非均匀性,这意味着多帧积累的算法不能达到很好的校正效果。同时,场景运动一般是沿着某一单调方向的,所以使用配准作为内核的算法不能提供足够的运动信息。

在大部分情况下,红外热成像仪用于检测和跟踪远处的民用或者军用目标。根据这些应用,热成像仪拍摄的航拍图像,总是有以下两个主要缺陷:(1) 场景将会迅速切换,这意味着原始的校正参数不会持续有效,因此,非均匀性将会显现。(2) 在传输期间,场景的运动总是沿着某一单调方向的,而且传输的速度可能会因为目标的运动由慢到快甚至相反的变化。此时,如果新的非均匀性太强,那么由于没有位移,配准算法将不再工作。另一方面,如果使用多帧积累算法,由于传输速度问题,将出现鬼影。

在实际红外探测器中,高频非均匀性主要表现为列或者行条纹,而低频非均匀性主要表现为片状。他们同时存在于图像中。在文中,主要应用一种新的配准方法来校正它们。在描述算法之前,先关注系统的应用范围。飞机上的红外探测器在空中获取地面图像。在这个特殊情况下,所获取的图像有上述两个缺陷。同时,第二种缺陷更为明显。通常,飞机是沿着

某一单调方向飞行的,这意味着图像也是沿着相同的方向运动,而且只有这个方向,由于飞机的颠簸,会发生颤动。

在这样的考虑下,提出了一个基于场景的非均匀性校正技术,不仅符合上述情况,而且也实现了小型化、低功耗的实时硬件系统。现在,这项技术已经被应用于一个特定系统的特定应用。通过硬件系统测试了实时图像的算法效果。

## 1 基于场景的非均匀性校正算法

众所周知,非均匀性校正通过迭代增益和偏置系数来完成。其目的是开发一个能完全植入基于FPGA的硬件系统的算法,因为FPGA内部不能进行图像的二维傅里叶变换这样复杂的运算,所以传统的二维配准已经不再可行。开发了一种新的投影估计来简单地计算两个相邻图像相对位移的配准,然后以一定准则完成校正。下面,描述新的投影估计和添加的准则。

(1) 假设图像尺寸为 $M \times N$ ,图像在水平方向的投影 $p_x^i(j)$ 和垂直方向的投影 $p_x^i(i)$ , $x=1,2$ , $i,j$ 分别代表行、列像元坐标,定义为:

$$p_x^i(j) \triangleq \sum_{i=1}^M p_x(i,j) - \sum_{i=1, j=1}^{i=M, j=N} p_x(i,j) / M \quad (1)$$

$$p_x^i(i) \triangleq \sum_{j=1}^M p_x(i,j) - \sum_{i=1, j=1}^{i=M, j=N} p_x(i,j) / N \quad (2)$$

式中: $p_x(i,j)$ 为单个像素点的值。

(2) 在任何实时成像系统中,随时都会有新的信息进入视场。投影估计对于这些影响配准效果的新信息是敏感的。Stephen C. Cain设计了一个滑动窗口滤波器<sup>[11]</sup>,并把它加入到投影估计中,来使算法忽略新信息。发现这个滤波器的计算对于FPGA来说依然不堪重负,而且很难用硬件描述语言(HDL)实现。在这种情况下,使用一个正余弦固定窗口滤波器作为替代。事实证明,该滤波器比滑动窗口滤波器更稳定、重要的是,它更易于实现。正余弦窗口滤波器描述如下。

对于列投影:

$$p_x^i(j) = \begin{cases} p_x^i(j) \cdot \left( \frac{1 + \cos(\pi \cdot (\delta_{\text{row}} - 1 - j) / \delta_{\text{row}})}{2} \right), & j < \delta_{\text{row}} \\ p_x^i(j) \cdot \left( \frac{1 + \sin(\pi \cdot (\delta_{\text{row}} - 1 - j) / \delta_{\text{row}})}{2} \right), & j > N - \delta_{\text{row}} \end{cases} \quad (3)$$

对于行投影:

$$p_x^j(i) = \begin{cases} p_x^j(i) \cdot \left( \frac{1 + \cos(\pi \cdot (\delta_{\text{col}} - 1 - i) / \delta_{\text{col}})}{2} \right), & i < \delta_{\text{col}} \\ p_x^j(i) \cdot \left( \frac{1 + \sin(\pi \cdot (\delta_{\text{col}} - 1 - j) / \delta_{\text{col}})}{2} \right), & i > M - \delta_{\text{col}} \end{cases} \quad (4)$$

这里,  $\delta_{\text{row}}$  和  $\delta_{\text{col}}$  分别是在垂直和水平方向的最大位移。

(3) 需要相邻的两帧图像来确定相对位移。也就是说,需要接收两帧图像,然后把其中一帧  $\text{ref}$  设置为参考帧,另外一帧  $\text{cur}$  作为当前帧。用其投影估计来计算互相关矩阵:

$$\text{Cof}_{\text{row}} = \sum_{i=1, j=1}^{i=2\delta_{\text{row}}+1, j=N-2\delta_{\text{row}}+1} (\text{ref}_{\text{row}}(j+i-1) - \text{cur}_{\text{row}}(\delta_{\text{row}}+i))^2 \quad (5)$$

$$\begin{cases} p_{\text{out}}(i,j) = p(i,j); p_{\text{adj}}^{(i,j-1)} + p_{\text{adj}}^{(i,j+1)} + p_{\text{adj}}^{(i-1,j)} + p_{\text{adj}}^{(i+1,j)} = 0 \\ p_{\text{out}}(i,j) = \frac{p_{\text{adj}}^{(i,j-1)} \cdot p(i,j-1) + p_{\text{adj}}^{(i,j+1)} \cdot p(i,j+1) + p_{\text{adj}}^{(i-1,j)} \cdot p(i-1,j) + p_{\text{adj}}^{(i+1,j)} \cdot p(i+1,j)}{p_{\text{adj}}^{(i,j-1)} + p_{\text{adj}}^{(i,j+1)} + p_{\text{adj}}^{(i-1,j)} + p_{\text{adj}}^{(i+1,j)}}; \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $p_{\text{adj}}^{(i,j-1)}$  为  $p(i,j-1)$  和其周围的十字领域内的其他四个的差值;  $\text{TH}$  的范围为 0.4~0.6, 文中取值为 0.5。

通常,二维配准算法在相对位移计算之后,将对增益和偏置系数同时校正。但是根据航拍图像的应用要求,文中的算法将校正分成两部分:配准部分和准则部分。从方程可以看出,采用的准则将与投影估计一起工作从而完成校正。对于实时图像序列,投影估计会被高频非均匀性影响,从而导致效果不佳。采用的准则对于高频非均匀性的收敛速度快于低频非均匀性。一旦高频非均匀性削弱了,投影估计将准确地计算相邻帧的相对位移。然后低频非均匀性将在接下来的数帧中得到校正。学习速率是根据非均匀性等级设置的。

## 2 算法的性能分析和实际效果

在这一部分,将根据一些指标来分析算法的性能,然后在基于 FPGA 的实时硬件系统上验证这项技术的真实效果。

通过在硬件系统上使用这项技术来获得下一个图像序列。将红外热像仪放置在绕城市飞行的飞机上,使得图像序列沿着南方单调移动。很容易从序列中看出,图像有条纹状的高频非均匀性和片状的低频非均匀性。事实上,在热像仪大部分实际应

$$\text{Cof}_{\text{col}} = \sum_{i=1, j=1}^{i=2\delta_{\text{col}}+1, j=N-2\delta_{\text{col}}+1} (\text{ref}_{\text{col}}(j+i-1) - \text{cur}_{\text{col}}(\delta_{\text{col}}+i))^2 \quad (6)$$

一旦互相关矩阵确定了,可以通过选择这两个矩阵的最小值来获得相对位移:

$$d_{\text{row}} \triangleq \text{argmin}(\text{Cof}_{\text{row}}) \quad (7)$$

$$d_{\text{col}} \triangleq \text{argmin}(\text{Cof}_{\text{col}}) \quad (8)$$

在配准之后,讨论校正执行的准则。以一个  $3 \times 3$  窗口中的中心像素和相邻 4 个像素的值进行比较来调整原始图像为准则:

$$\begin{cases} p_{\text{adj}}^{(i,j-1)} = |p(i,j-1) - p(i,j)| < \text{TH} \\ p_{\text{adj}}^{(i,j+1)} = |p(i,j+1) - p(i,j)| < \text{TH} \\ p_{\text{adj}}^{(i-1,j)} = |p(i-1,j) - p(i,j)| < \text{TH} \\ p_{\text{adj}}^{(i+1,j)} = |p(i+1,j) - p(i,j)| < \text{TH} \end{cases} \quad (9)$$

用,都有上述的两种非均匀性。当算法工作时,会根据方程 10 的准则对输入图像进行调整。然后将计算原始图像和调整图像的误差,利用误差计算一次收敛时间。

$$\text{ERROR}_{\text{criterion}}(i,j) = P(i,j) - p_{\text{out}}(i,j) \quad (11)$$

$$\text{Gain}(i,j) = \text{Gain}_{\text{original}}(i,j) + \alpha_{\text{criterion}} \cdot \text{ERROR}_{\text{criterion}}(i,j) \cdot Y(i,j)$$

$$\text{Offset}(i,j) = \text{Offset}_{\text{original}}(i,j) + \alpha_{\text{criterion}} \cdot \text{ERROR}_{\text{criterion}}(i,j) \quad (12)$$

式中:  $\text{Gain}(i,j)$  和  $\text{Offset}(i,j)$  为校正系数;  $\alpha_{\text{criterion}}$  为学习速率;  $Y(i,j)$  为焦平面的输出信号。

如上所述,这个准则对于高频非均匀性来说,非常有效。经过一次收敛,投影估计将快速计算相邻帧的重叠区域来确定相对位移,从而进行第二次收敛<sup>[9]</sup>:

$$\mathbf{e}_n(i,j) = x_{n-1}(i-d_{\text{row}}, j-d_{\text{col}}) - X_n(i,j) \quad (13)$$

$$\text{Gain}_{n+1}(i,j) = \text{Gain}_n(i,j) + a_{\text{PE}} \cdot \mathbf{e}_n(i,j) \cdot Y_n(i,j)$$

$$\text{Offset}_{n+1}(i,j) = \text{Offset}_n(i,j) + a_{\text{PE}} \cdot \mathbf{e}_n(i,j) \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{e}_n(i,j)$  为相邻帧的误差矩阵,也被称为重叠区域;  $\text{Gain}(i,j)$  和  $\text{Offset}(i,j)$  为校正系数;  $a_{\text{PE}}$  是投影估计下的学习速率。

图 1 是由基于 EP2C20 系列 FPGA 为处理单元的硬件系统获得的图片。

可以看出,左侧图像具有明显的条纹状高频非均匀性和片状的低频非均匀性。右侧图像为算法校正后的图像。收敛步骤如上所述。为了和二维配准算法相比,对同一图像使用了文中算法和二维配准

算法。正如之前所预测的,如果只应用二维配准算法,很难发现序列的精确运动,而这将导致算法认为图像序列是静止的。两种算法的对比结果如表 1 所示。

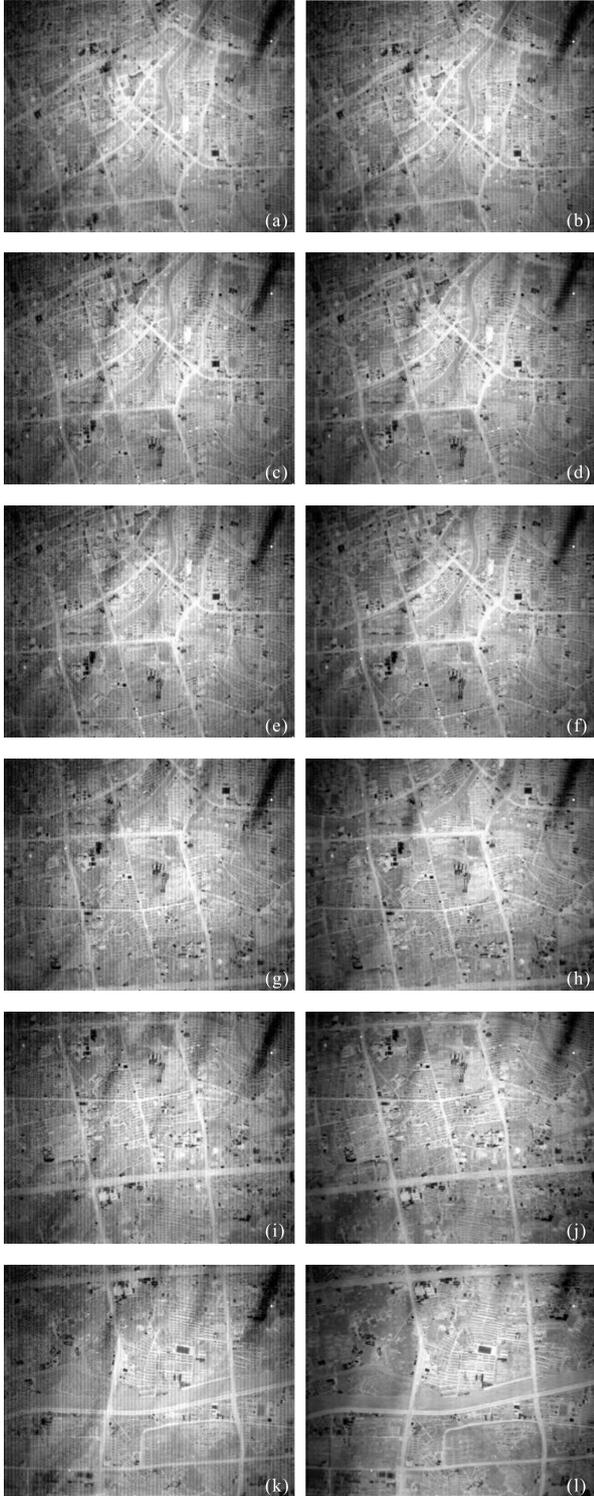


图 1 硬件系统的实时性能效果图

Fig.1 Hardware system real-time performance renderings

表 1 两种算法的对比

Tab.1 Comparison of two algorithms

Traditional 2D registration algorithm	No criteria projection estimates	Under guidelines for projection estimates
3,0	3,0	3,0
1,-1	1,-1	1,0
0,0	0,0	0,0
1,0	1,0	1,0
0,0	0,0	1,-1
2,0	2,0	2,1
2,0	2,0	2,0
2,0	2,0	3,0
2,0	2,0	3,0
0,0	0,0	0,0
4,0	4,0	5,0
4,0	4,0	5,0
6,0	6,0	6,0
6,0	6,0	6,0
6,0	6,0	6,0
4,0	4,0	4,1
4,0	4,0	5,-1
6,0	6,0	6,2
6,0	6,0	6,0
4,0	4,0	5,0
6,0	6,0	5,0
6,0	6,0	5,0
5,0	5,0	6,0
.....	.....	.....

表中,第一位代表的是像元左右的位移,第二位代表的是像元上下的位移。

经过数帧之后,条纹状高频非均匀性被校正了,只剩下了片状低频非均匀性。然后投影估计就可以大展身手,最终校正掉大部分的片状低频非均匀性。接下来,加入黑体来进行性能测试。首先,获取 4 幅不同温度下黑体的原始图像。然后,用两种不同算法获得的参数来校正图像,并计算非均匀性指数  $NU$ :

$$NU = \frac{DX}{AVG} \tag{15}$$

式中:  $DX$  是校正后的图像方差值;  $AVG$  是校正后图像的平均值。传统二维配准算法和该算法的对比如表 2 所示。

表 2 两种算法的非均匀性对比

Tab.2 Non-uniformity comparison of two algorithms

	Temperature 1	Temperature 2	Temperature 3	Temperature 4
Two-dimensional registration algorithm	8.479 6	10.956 6	13.526 0	16.719 9
Projection estimation algorithm	7.020 3	9.871 4	12.045 9	14.908 9

从温度 1 到温度 4, 黑体温度是逐渐增长的。可以看出, 温度 1 最适合图像序列。文中算法的非均匀性指数比二维配准的小, 也意味着文中的算法效果更好。

笔者也把根均方误差(RMSE)作为另一个评价指标。它也可以直观地评价非均匀性校正算法的性能。RMSE 的表达式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{i,j} (X(i,j) - \hat{X}(i,j))^2} \quad (16)$$

式中:  $X(i,j)$  为像素的校正值;  $\hat{X}(i,j)$  为像素校正后的均值;  $M, N$  为图像的大小。在一段清晰的图像序列上, 笔者模拟添加了类似片状的非均匀性。对图像序列使用该算法, 可以得到下面的 RMSE 测试值。

从图 2 可以看出, 在开始的数帧, 收敛速度比较快, 此时主要是高频非均匀性的校正。然后收敛速度变慢, 因为低频非均匀性的校正比较慢。在不校点或者两点的情况下, 从最开始面对黑体最原始的图像的 RMSE, 慢慢修正  $K$  和  $B$  参数, 使得 RMSE 值下降到指标值之内。如上所述, 收敛速度和学习速率有关。在测试期间, 把学习速率设置为 0.03。多帧之后, 非均匀性被校正到能接受的水平, 正如图 1 所示的最终结果。

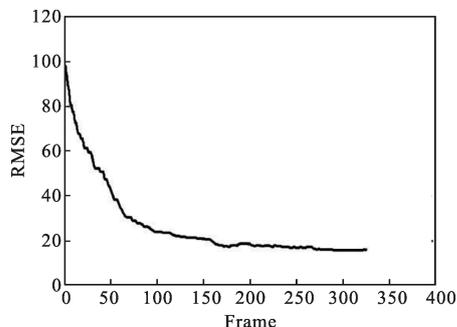


图 2 RMSE 测试值

Fig.2 RMSE test value

### 3 结论

文中提出了一种基于单调场景运动的复杂非均匀性校正算法。提出这个算法的原因是, 在红外热像仪的实际使用范围中, 使用者经常面对高频非均匀性和低频非均匀性这两大问题。文中的算法比多帧累积算法更有效, 同时, 相对于传统的二维配准算法, 文中的算法更容易计算, 可以在单一 FPGA 作为内核的硬件系统上实现。目前没有报告显示传统二维算法可以如此。当然, 文中的算法也存在一定的缺陷, 仍然有一些低频非均匀性残留。这是因为图像序列的运动几乎朝着一个单调方向, 而这将使得该区域的亮度很难转移到下一帧。在未来的工作中将继续研究, 争取解决这个问题。

### 参考文献:

- [1] Zuo C, Chen Q, Gu G H, et al. New temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter[J]. *Opt Rev*, 2011, 18: 197-202.
- [2] Qian W X, Chen Q, Gu G H. Space low-pass and temporal high-pass nonuniformity correction algorithm [J]. *Opt Rev*, 2010, 17: 24-29.
- [3] Xing Suxia, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 441-444. (in Chinese)
- [4] Scribner D A, Sarkady K A, Caulfield J, et al. Non-uniformity correction for staring focal plane arrays using scene-based techniques[C]//SPIE, 1990, 1308: 224-233.
- [5] Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks[C]//SPIE, 1991, 1541: 100-109.
- [6] Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays [J]. *Opt Soc*, 2003, 20: 470-480.
- [7] Harris J G, Chiang Yuming. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant -statistics constraint[J]. *IEEE*, 1999, 8: 1148-1151.
- [8] Harris J G, Chiang Y. Minimizing the 'ghosting' artifact in scene-based nonuniformity correction [C]//SPIE, 1998, 3377: 106-113.
- [9] Ren J L, Chen Q, Qian W X, et al. Efficient single image stripe nonuniformity correction method for infrared focal plane arrays[J]. *Opt Rev*, 2012, 19: 355-357.
- [10] Zuo C, Chen Q, Gu G H, et al. Scene-based nonuniformity correction algorithm based on interframe registration [J]. *Opt Soc*, 2011, 28: 1164-1176.
- [11] Cain S C, Hayat M M, Armstrong E E. Projection-based image registration in the presence of fixed-pattern noise [J]. *IEEE*, 2001, 10: 1860-1872.