

# 一种基于 LTS-HD 测度的低信噪比图像鲁棒配准方法

赖睿<sup>1,2</sup>, 刘上乾<sup>2</sup>, 杨银堂<sup>1</sup>, 李跃进<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学 微电子学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 针对图像传感器的固有噪声严重影响现有图像配准算法精度和可靠性的现状, 提出了一种对低信噪比图像的鲁棒配准方法. 通过采用区域多向灰度差阈值抑制的特征点提取技术和基于 LTS-HD (Least Trimmed Square Hausdorff Distance) 测度的特征点集匹配方法来获取待配准图像间的仿射变换参数以实现配准, 对噪声干扰和场景变换具有良好的适应性

**关键词:** Hausdorff 距离; LTS-HD 测度; 固定模式噪声; 图像配准

**中图分类号:** TN911.73    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-2400(2006)06-0902-05

## A LTS-HD measure based robust registration approach to low SNR images

LAI Rui<sup>1,2</sup>, LIU Shang-qian<sup>2</sup>, YANG Yin-tang<sup>1</sup>, LI Yue-jin<sup>1</sup>

(1. School of Microelectronics, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. School of Technical Physics, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Since inherent noise of image sensors influences the precision and reliability of numerous existing image registration algorithms severely, a robust registration approach to low SNR images is presented. By using the technique of the regional multi-direction gray difference threshold to extract feature points, and then adopting least trimmed square Hausdorff distance (LTS-HD) measure based point set matching method to acquire parameters of the affine transform, the algorithm realizes the registration of images to be registered. Experimental results indicate that the method has the preferable adaptability for noise disturbance and scene change.

**Key Words:** Hausdorff distance; LTS-HD measure; fixed pattern noise; image registration

图像配准是指将取自相同或不同传感器的两幅含有相同场景或目标的图像进行几何对准的过程. 现有的图像配准方法可分为基于图像灰度信息<sup>[1]</sup>和基于图像特征<sup>[2]</sup>两类, 然而, 无论哪一类算法都会受到图像传感器固有噪声的严重影响. 图像传感器固有噪声主要包括瞬态噪声和固定模式噪声, 其中由光子探测噪声、暗电流以及读出电路噪声等组成的瞬态噪声是一种时变的随机噪声, 而由探测器各探测元响应不一致所引起的固定模式噪声(非均匀性)则是一种非时变的空间噪声, 它会产生一个固定的背景叠加于图像之上, 从而改变待配准图像所携带的原始结构信息. 因此, 相对于瞬态噪声而言, 固定模式噪声会在更大程度上致使配准算法出现较大误差甚至失效. 针对这一问题, 多数配准算法通过预处理减小固定模式噪声来保证算法的有效性<sup>[3]</sup>, 但此类算法运算复杂, 且依赖于预处理过程的去噪效果, 健壮性不足, 加之部分基于场景的非均匀性校正算法本身还以对原始图像序列的精确配准为前提<sup>[4]</sup>, 因此, 有必要研究一种能在探测器固有噪声(尤其是固定模式噪声)环境下对具有场景变换的待配准图像实施配准的有效方法.

笔者提出了一种基于图像特征的低信噪比图像鲁棒配准方法, 在利用抗噪声的区域多向灰度差阈值抑制技术准确提取图像特征点的基础上, 采用容错性较强的 LTS-HD (Least Trimmed Square Hausdorff

Distance) 点集匹配方法寻求合适的仿射变换参数实现配准.

## 1 特征点提取

特征提取是基于图像特征的配准方法的基础. 典型的特征点提取策略多是基于特征点应处于具有较大灰度变化区域中心的原则, 即通过对图像中的每个像素点作水平、垂直及对角 4 个方向的相关运算来确定特征点<sup>[5]</sup>, 这类算法计算量大且对噪声敏感. 此后, 管业鹏等人提出了一种计算简便并能容忍噪声干扰的图像特征点提取算法<sup>[6]</sup>, 然而, 该算法只在一个固定方向上抽取特征点, 不能保证每一个特征点都反映目标结构信息. 另外, 该算法处理窗口的最佳尺寸在 3~10 之间, 因此, 用该方法提取的图像特征点集较大, 势必会增加后续点集匹配过程的计算量.

鉴于此, 笔者提出了一种基于区域多向灰度差阈值抑制技术的特征点提取策略, 具体过程如下:

(1) 将图像划分成  $A \times B$  个互不重叠的区块  $W_{a,b}$ , 并将每个区块划分成  $P \times Q$  个互不重叠大小为  $n \times n$  的处理窗  $W_{p,q}$ .

(2) 假设某处理窗  $W_{p,q}$  的中心位于像素点  $(i, j)$ , 分别沿窗的中心行、中心列及左右对角线抽取除中心点外的点与中心点作差, 则各向灰度差可分别表示为

$$H_k = f_{p,q}(i, j+k) - f_{p,q}(i, j), \quad (1)$$

$$V_k = f_{p,q}(i+k, j) - f_{p,q}(i, j), \quad (2)$$

$$L_k = f_{p,q}(i+k, j-k) - f_{p,q}(i, j), \quad (3)$$

$$R_k = f_{p,q}(i+k, j+k) - f_{p,q}(i, j), \quad (4)$$

其中  $k = \pm 1, 2, \dots, m$ , 而  $m = (n-1)/2$ .

(3) 根据噪声强度, 设定合适的阈值门限  $T$  (一般取值在 30~70 之间, 噪声强度越大阈值越高), 并将在处理窗  $W_{p,q}$  中各向灰度差值大于阈值的最小灰度值点确定为候选特征点

$$f_{p,q}(i', j') = \min_{i, j \in W_{p,q}} \{f_{p,q}(i, j) \mid (V_k \geq T) \cup (H_k \geq T) \cup (R_k \geq T) \cup (L_k \geq T)\}. \quad (5)$$

(4) 在每个区块的候选特征点中, 选取灰度值最小的点作为最终特征点

$$f(i_F, j_F) = \min_{1 \leq p \leq P, 1 \leq q \leq Q} (f_{p,q}(i', j')). \quad (6)$$

## 2 仿射变换模型

仿射变换是一种线性变换, 可用于场景图或简单/复杂背景下扩展目标的配准. 设参考帧图像  $R$  和当前帧图像  $C$  之间满足仿射变换关系, 则两帧中对应点  $R(x, y)$  和  $C(x', y')$  的 6 参数映射关系为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $a_{11} = a_{22} = \cos \theta$ ,  $a_{12} = -a_{21} = \sin \theta$ ,  $b_x = \Delta x$ ,  $b_y = \Delta y$ , 而  $\theta, \Delta x, \Delta y$  又分别为当前帧图像  $C$  相对于参考帧图像  $R$  的旋转角和平移量.

在工程应用中, 由图像采集平台的倾斜、平移运动所引起的参考帧和当前帧之间的剪切变换可以由上述的 6 参数仿射变换模型予以近似.

## 3 LTS-HD 测度

Hausdorff 距离 (HD) 是定义有限点集间距离的一种方式, 也是测度点集间相似程度的一种标准. 假设有平面上的两个点集  $I$  和  $M$ , 则它们之间的 Hausdorff 距离定义为

$$H(M, I) = \max(h^f(M, I), h^r(I, M)), \quad (8)$$

其中  $h^f(M, I)$  和  $h^r(I, M)$  分别表示前向距离和后向距离,

$$h^f(M, I) = \max_{\alpha_M \in M} \min_{\beta_I \in I} \|\alpha_M - \beta_I\|, \quad h^r(I, M) = \max_{\beta_I \in I} \min_{\alpha_M \in M} \|\beta_I - \alpha_M\|,$$

上式中  $\|\cdot\|$  在此处限定为平面上的  $L_2$  范数。

由于 HD 仅限于度量两个相似点集间的距离, 当有新的场景/目标(外点)或强噪声引入一些不匹配的扰点时, 则会出现较大的 HD, 此时就无法再用 HD 准确衡量点集间的相似度. 鉴于此, Huttenlocher 等人提出了通过排序选取特定距离, 减小扰点和外点影响的部分 Hausdorff 距离(P-HD)<sup>[7]</sup>, Dubuisson 等人提出了基于距离平均的 M-HD<sup>[8]</sup>, 而 Sim 等人在结合 P-HD 和 M-HD 的基础上提出了抗干扰性能更好的 LTS-HD<sup>[9]</sup>, 其前向距离表示为

$$h_{LTS}^f(M, I) = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \|\alpha_M - \beta_I\|_k, \quad \alpha_M \in M, \beta_I \in I, \quad (9)$$

式中  $L = f \times N_A$ ,  $f \in [0, 1]$ ,  $N_A$  和  $L$  分别表示点集间前向距离个数和用于平均距离计算的点集大小,  $\|\alpha_M - \beta_I\|_1 \leq \dots \leq \|\alpha_M - \beta_I\|_k \leq \dots \leq \|\alpha_M - \beta_I\|_L$  则表示从小到大排序的  $L$  个前向距离, 由此, 相应的 LTS-HD 可表示为

$$H_{LTS}(M, I) = \max(h_{LTS}^f(M, I), h_{LTS}^r(I, M)). \quad (10)$$

## 4 基于 LTS-HD 测度的图像鲁棒配准方法

笔者提出了一种基于特征点的配准算法, 该算法在准确提取图像特征点的基础上, 利用基于相似度评价的 LTS-HD 准则搜寻能使特征点集达到最佳匹配的仿射变换参数. 由于所采用的 6 参数仿射变换模型中的参数  $(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, b_x, b_y)$  实质上可由  $(\theta, b_x, b_y)$  惟一确定, 因此, 图像配准即是确定  $(\theta, b_x, b_y)$  的过程, 具体实现方法如下:

步骤 1 利用第 1 节提出的基于区域多向灰度差阈值抑制技术的特征点提取策略分别从参考帧和当前帧图像中提取特征点集.

步骤 2 确定特征点集间仿射变换参数搜索范围的上限  $S_{upper}(\hat{\theta}, \hat{b}_x, \hat{b}_y)$  和下限  $S_{lower}(\check{\theta}, \check{b}_x, \check{b}_y)$  以及相应的搜索步长  $P(\Delta\theta, \Delta b_x, \Delta b_y)$ .

步骤 3 令  $b_x = b_y = 0$ , 以  $\theta$  为起点,  $\Delta\theta$  为搜索步长将参考帧图像的特征点集  $f_R$  通过式(7)映射成新点集  $f_R'$ , 然后计算每步产生的新点集  $f_R'$  与当前帧的特征点集  $f_C$  之间的 LTS-HD, 并将每一步的 LTS-HD 与已存 LTS-HD 值比较, 如果较已存值小, 则用该步 LTS-HD 值和搜索步数  $\lambda$  取代已存值, 重复上述过程直至整个搜索过程结束, 最终保留下来的  $\lambda$  即是取得最小 LTS-HD 值时的搜索步数, 此时, 当前帧相对于参考帧的旋转角可表示为  $\theta = \check{\theta} + \lambda\Delta\theta$ .

步骤 4 取  $\theta = -\check{\theta} - \lambda\Delta\theta, b_x = b_y = 0$ , 再次利用式(7)对当前帧图像的特征点集  $f_C$  作仿射变换, 得到新点集  $f_C'$ , 此时, 新点集  $f_C'$  与  $f_R$  之间便只存在平移关系.

步骤 5 以  $(\check{b}_x, \check{b}_y)$  为起始点, 分别以步长  $\Delta b_x, \Delta b_y$  将点集  $f_R$  平移得到新的点集  $f_R''$ , 依次求取点集  $f_C'$  与  $f_R''$  之间的 LTS-HD, 并将每一步的 LTS-HD 与已存 LTS-HD 值比较, 如果较已存值小, 则用该步的 LTS-HD 值和相应的行、列向搜索步数  $\mu, \eta$  取代已存值, 重复上述过程直至整个搜索过程结束, 最终保留下来的  $\mu, \eta$  即是 LTS-HD 取得最小值时对应的行、列向搜索步数, 此时, 当前帧相对于参考帧的平移量可表示为  $b_x = \check{b}_x + \mu\Delta b_x, b_y = \check{b}_y + \eta\Delta b_y$ .

至此,  $\theta, b_x, b_y$  3 个参数都已确定, 配准完成.

## 5 仿真实验

从标准 LENA 图像中分别截取两幅相对平移量为(15, 14)的  $128 \times 128$  大小图像, 如图 1(a)和(b), 并进行如下实验.

首先, 为了测试旋转量搜索过程的抗噪声性能, 依照图像探测器线性响应模型<sup>[10]</sup>对图 1(a)和图 1(b)旋转  $3^\circ, 6^\circ, 9^\circ$  后的图像(图 1(c)为(b)旋转  $9^\circ$  的图像)分别加入同等强度由固定模式噪声和瞬态高斯噪声组成

的固有噪声,并由此得到 PSNR 为 25.62 dB 的 3 组待配准图像.此后,分别取  $A = B = 6, P = Q = 3$ , 处理窗尺寸  $n = 7$ , 阈值  $T = 40, f = 0.7$ , 利用第 2 节提出的特征点提取方法分别从 3 组待配准图像中提取特征点(如图 1(d)和(e)中白色“+”所示).运用第 4 节第 3 步所述方法在  $[0^\circ, 10^\circ]$  范围以  $1^\circ$  为步长分别搜索 3 组待配准图像间的相对旋转角  $\theta$ , 其搜索过程的 LTS-HD 曲线如图 2(a) 所示.接下来,在更强的固有噪声环境下(PSNR 为 19.72 dB),置阈值  $T = 60$  重复上述搜索过程求取旋转角,其搜索过程相应的 LTS-HD 曲线如图 2(b) 所示.可见,在两种噪声环境下 LTS-HD 曲线的最小值点都恰好对应待配准图像间的相对旋转角  $\theta$ .

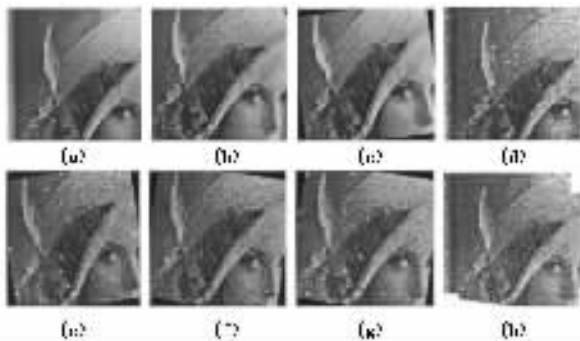


图 1 图像配准过程

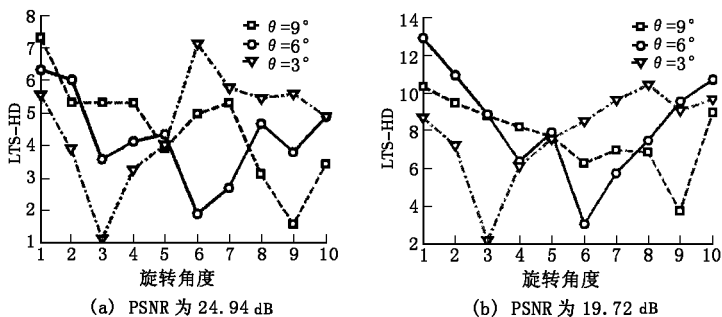


图 2 不同噪声环境下旋转角搜索过程 LTS-HD 曲线

在完成相对旋转角搜索的基础上,将 3 组待配准图像中当前帧的特征点集沿反向旋转  $\theta$  度(即令  $\theta = -\hat{\theta} - \lambda\Delta\theta, b_x = b_y = 0$ , 依次将  $f_c$  中各点代入式(7)求得新的点集  $f_c$ , 如图 1(g) 中白色“+”所示),此时,每组待配准图像特征点集间就只存在平移关系了(如图 1(d)和(g)).而后,重置阈值  $f = 0.8$ , 分别对 3 组待配准特征点集运用第 4 节第 5 步所述的平移量搜索方法在  $\hat{b}_x = \hat{b}_y = 55, \tilde{b}_x = \tilde{b}_y = 25$  的范围内以  $\Delta b_x = \Delta b_y = 1$  为步长搜索点集间的平移量,当 PSNR 为 19.72 dB 时,其搜索过程的 LTS-HD 曲面如图 3 所示.从图中可以看出, LTS-HD 曲面的最小值点恰好落在  $b_x = 15, b_y = 14$  的位置,正好对应当前帧相对于参考帧的平移量.最终,利用上述过程估计出的仿射变换参数对参考帧和当前帧进行镶嵌,结果如图 1(h) 所示.

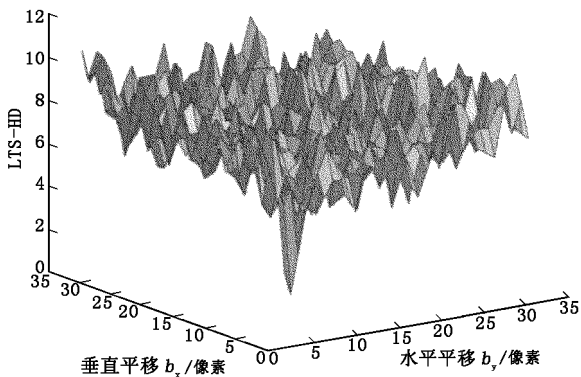


图 3 平移量搜索过程的 LTS-HD 曲面

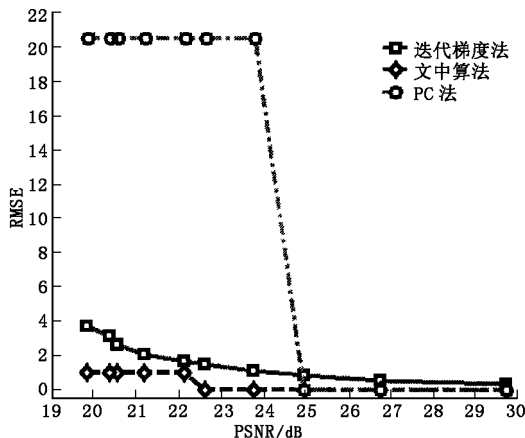


图 4 几种配准算法的 PSNR-RMSE 曲线

依次在 10 种不同的 PSNR 环境下对待配准图像分别采用迭代梯度法<sup>[11]</sup>、相位相关(PC)法<sup>[12]</sup>以及笔者提出的算法进行配准实验,并通过 RMSE 来量化比较各种算法,与实验结果相应的 PSNR-RMSE 曲线如图 4 所示.由图 4 可见,在同等 PSNR 条件下,笔者提出算法的配准误差最小.此外,随着 PSNR 的降低,笔者提出算法相对于其他两种算法在配准精度上的优势会愈加明显.

为了验证笔者提出的算法在对受噪声污染的真实场景图像配准时的有效性,从美国空军多功能光电传感器实验室用带非均匀性的 FLIR 系统拍摄的 $128 \times 128$  大小的赖特帕特森空军基地红外视频中抽取两帧图像对本算法进行测试. 首先,分别取  $A = B = 6, P = Q = 3$ , 处理窗尺寸  $n = 7$ , 阈值  $T = 50$ , 利用特征点提取方法从两帧图像中分别提取出 36 个特征点, 如图 5(a) 和 (b) 中的白色

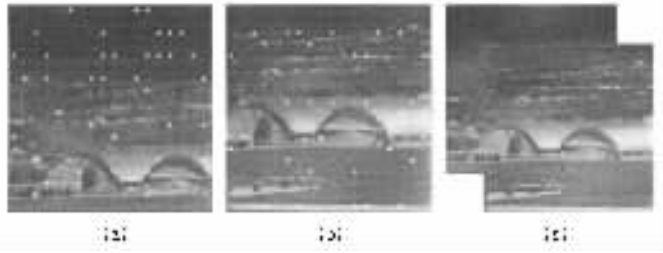


图 5 真实场景红外图像配准实验结果

“+”. 而后,令阈值  $f = 0.7$ , 并利用 LTS-HD 测度对特征点集进行匹配,得到待配准图像间的 3 个仿射变换参数分别为  $\theta = 0, b_x = 32, b_y = 28$ , 最后,利用上述参数对两幅图像进行镶嵌,结果如图 5(c) 所示. 由此可见,笔者提出的算法能有效地对两幅受噪声干扰并有大规模变化的真实图像实施配准.

## 6 结束语

从特征点提取和匹配两个关键环节入手,提出了一种能在探测器固有噪声(尤其是固定模式噪声)环境下对具有场景变换的待配准图像实施配准的方法. 该方法一方面在特征点提取环节利用区域灰度差阈值限制了噪声对特征点提取过程的影响,另一方面,在对特征点集进行配准的过程中引入具有良好容错性能的 LTS-HD 测度,使得由噪声或场景变换所产生的扰点或外点不被纳入特征点集间的相似度计算,因此,该算法对探测器固有噪声干扰和场景变换不敏感.

### 参考文献:

- [1] Zhu Yangming, Cochoff S M. Likelihood Maximization Approach to Image Registration[J]. IEEE Trans Image Processing, 2002, 11(12): 1417-1425.
- [2] Alhichri H S, Kamel M. Image Registration Using Virtual Circles and Edge Direction[A]. IEEE 16th Int Conf on Pattern Recognition; Vol 2[C]. Quebec: IEEE, 2002. 969-972.
- [3] Armstrong E, Hayat M M, Hardie R C, et al. Nonuniformity Correction for Improved Registration and High-resolution Image Reconstruction in IR Imagery[A]. Proc SPIE on Applications of Digital Image Processing XXII; Vol 3808[C]. Denver: SPIE, 1999. 150-161.
- [4] Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E, et al. Scene Based Nonuniformity Correction Using Video Sequences and Registration[J]. Appl Opt, 2000, 39(8): 1241-1250.
- [5] Yan Yaoping, Wang Yangli, Lu Zhaoyang, et al. Motion Estimation and Compensation Based on Feature Points[J]. Journal of Xidian University, 1998, 25(2): 142-145.
- [6] 管业鹏, 董林凤. 二维图象特征点快速提取算法[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(12): 1296-1301.
- [7] Huttenlocher D P, Klanderman G A, Rucklidge W J. Comparing Images Using the Hausdorff Distance[J]. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1993, 15(9): 850-863.
- [8] Dubuisson M P, Jain A K. A Modified Hausdorff Distance for Object Matching[A]. IEEE 12th Int Conf on Pattern Recognition; Vol 1[C]. Jerusalem: IEEE, 1994. 566-568.
- [9] Sim D G, Kwon O K, Park R H. Object Matching Algorithms Using Robust Hausdorff Distance Measures[J]. IEEE Trans Image Processing, 1999, 8(3): 425-429.
- [10] Holst G C. CCD Arrays, Cameras and Displays [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1996.
- [11] Alam M S, Bognar J G, Hardie R C, et al. High-resolution Infrared Image Reconstruction Using Multiple Randomly Shifted Low-resolution Aliased Frames [A]. SPIE Proc on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing VIII; Vol 3063[C]. Winter Park: SPIE, 1997. 102-112.
- [12] Kuglin C D, Hines D C. The Phase Correlation Image Alignment Method[A]. Proc Int Conf on Cybernetics and Society [C]. San Francisco: IEEE, 1975. 163-165.