

文章编号 1004-924X(2014)08-2205-09

面向目标检测的空间观测图像精确配准

沈同圣¹, 张 健^{2*}, 娄树理²

- (1. 中国国防科技信息中心, 北京 100142;
2. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要:针对空间目标检测对图像配准精度的要求, 本文组合 Fourier-Mellin 变换和加速鲁棒特征变换(SURF)算法来实现对空间观测图像的精确配准, 并研究了该配准算法所涉及的变换模型、特征提取、特征匹配和配准精度等问题。该算法首先利用 Fourier-Mellin 变换计算图像旋转角度的整数角, 根据整数角将待配准图像反向旋转; 然后利用 SURF 算法检测两幅图像的匹配特征点; 最后利用最小二乘方法计算旋转角度的浮点值和平移量, 而整数角与浮点角之和就是待配准图像的实际旋转角度。文中分析了 SURF 特征点检测与图像尺寸、DoH 响应阈值以及尺度空间层数之间的关系。实验结果表明: 提出的算法对图像旋转角度估计值的均方误差为 0.0077° , 50 组实拍图像中星点质心均方误差的平均值为 0.1353 pixel, 能够满足空间目标检测对图像配准的精度要求。

关键词:空间观测图像; 图像配准; Fourier-Mellin 变换; 加速鲁棒特征(SURF)算法; 配准精度

中图分类号: TP75; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142208.2205

Precise registration of space observation images for target detection

SHEN Tong-sheng¹, ZHANG Jian^{2*}, LOU Shu-li²

- (1. China Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100142, China;
 2. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)
- * Corresponding author, E-mail: i_am_zhangjian@163.com

Abstract: For the requirements of space target detection for image registration, an observation image registration algorithm based on Fourier-Mellin transform and Speed Up Robust Feature (SURF) transform was proposed. The transform model, feature detection, feature matching and the matching accuracy related to the algorithm were all discussed. Firstly, the Fourier-Mellin transform was used to calculate the rotation angle, the image to be matched was reversely rotated according to the integer angle of the image. Then, the SURF was used to detect the matching feature points between two images. Finally, the floating point rotation angle and offset were calculated with the least square method. The sum of integer angle and floating point angle is an actual rotation angle of the image to be matched. Furthermore, the relationships between SURF feature point detection and image size, DoH response threshold and scale space decompose layers were analyzed. The experimental results show that the

收稿日期: 2013-12-12; 修订日期: 2014-01-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61302008)

Root Mean Square Error (RMSE) of rotation angle estimation is 0.0077° , and the average value of RMSE of 50 groups of star centroids is 0.1353 pixel. The algorithm can meet the requirements of space target detection.

Key words: space observation image; image registration; Fourier-Mellin transform; Speed-up Robust Feature (SURF); registration accuracy

1 引言

图像配准可概括为像素在图像之间进行匹配。由于空间观测图像目标检测要求目标和恒星的质心定位精度均达到亚像素级水平,因此在检测之前必须对图像实施精确配准^[1-3]。空间观测图像配准所研究的内容就是在空间上将序列图像对准,以校正平移、旋转、缩放等因素。

基于特征点的图像配准引起了众多研究者的重视。Lowe^[4]提出了尺度不变特征变换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) 算法。SIFT 特征是图像的局部特征,对图像的旋转、尺度缩放和亮度变化均能保持不变。SIFT 对 LoG (Laplacian of Gaussian) 斑点检测方法进行了优化,用 DoG (Difference of Gaussian) 近似 LoG,同时, SIFT 算法还将斑点检测和特征矢量生成、特征匹配搜索等步骤完整地结合在一起。

SIFT 算法可应用于三维物体的识别^[5],地图匹配^[6]和目标的匹配定位^[7]。有学者利用 SIFT 特征点匹配的稳定性 and 准确性对序列图像中的目标进行分割检测^[8]。

如果说 SIFT 算法中使用 DoG 对 LoG 进行了简化,从而提高了特征点搜索速度,那么 Bay 等人提出的加速鲁棒特征^[9] (Speeded-Up Robust Feature, SURF) 算法则是对 DoH (Determination of Hessian) 的简化和近似。SURF 算法借鉴了 SIFT 的思想,将 DoH 中的高斯二阶微分模板进行了近似简化,使得模板只需要进行几个简单的加减法运算就能完成图像的滤波,并且运算量与滤波模板的尺寸无关。SURF 特征点同样具备对图像旋转和尺度缩放的不变性。在不降低性能的情况下, SURF 算法的速度比 SIFT 算法要快很多。

SURF 算法一经提出便得到了广泛应用,目前比较流行的配准方法为:首先利用经典 SURF

特征检测器分别提取参考图像和待配准图像中的特征点;然后有针对性地对原有特征点进行改进^[10-11];再通过随机 Kd 树算法对特征点进行匹配^[10,12],并且使用随机抽样一致性 (Random Sample Consensus, RANSAC) 算法剔除误匹配点对^[10-13];最后用最小二乘法估算出变换参数,实现两幅图像的配准。

基于变换域的图像配准中最常用的方法为 Fourier 变换。1994 年 Chen^[15] 等人提出了一种基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准方法。该方法假设一幅图像是参考图像经过旋转 (Rotation)、尺度缩放 (Scaling) 和平移 (Translation) 变换后的图像 (称这种变换为 RST 变换)。Fourier-Mellin 变换配准方法通过计算两幅图像功率谱的 Fourier 反变换所对应的峰值位置求得它们的相对平移;通过对图像幅度谱进行对数-极坐标 (log-polar) 变换,在对数-极坐标空间用类似于计算相对平移的方法求得相对旋转角度和尺度缩放因子。Fourier-Mellin 变换实现了满足 RST 变换关系的两幅图像之间的配准^[14]。

由于 Fourier-Mellin 变换处理 RST 变换较为便捷,因此多用于遥感图像的配准^[16-17]。另外,文献^[18]中还将 Fourier-Mellin 变换应用于重复轨道干涉 SAR 图像的配准当中。

用 Fourier-Mellin 变换进行图像旋转配准时,需要事先规定好角度的取值范围;如果仅在整数角度取值,当旋转角度为浮点值时,对角度的估计会有偏差;如果将角度的取值范围进一步细化,则势必增加计算量。

SURF 算法可以提取两幅待配准图像的匹配特征点,但当待配准图像的旋转角度较大时, SURF 算法提取本文观测图像匹配特征点的能力严重下降。

图 1 给出了利用 SURF 算法提取两幅观测图像特征点并进行匹配的结果。图 1 中左图是参考图像 $f_1(x, y)$, 右图是待配准图像 $f_2(x, y)$, f_2

(x, y) 由 $f_1(x, y)$ 逆时针旋转 35.6° 得到。图 1 中将匹配度最高的 20 对特征点用直线连在一起。由配准结果可以看出,这 20 对特征点都没有正确匹配。这说明当图像旋转角度较大时, SURF 特征点的匹配正确率严重下降。

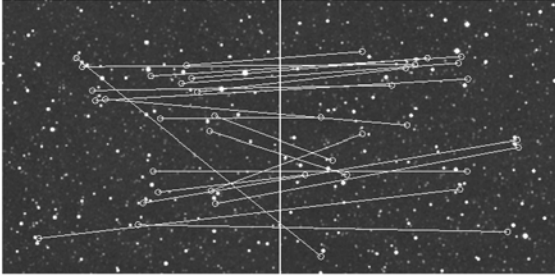


图 1 图像大角度旋转情况下 SURF 算法特征点检测匹配结果

Fig. 1 Feature matching results of SURF algorithm for image with large rotation angle

造成这一问题的主要原因在于观测图像中的星点均为圆斑状,且星点外的背景灰度均匀,缺乏纹理信息。

为解决上述问题,本文在图像预处理的基础上,配合使用 Fourier-Mellin 变换和 SURF 算法:首先利用 Fourier-Mellin 变换计算图像旋转角度的整数值;然后根据整数角度将待配准图像以图像中心为原点反向旋转;再利用 SURF 算法提取两幅图像的匹配特征点;最后利用最小二乘法计算旋转角度浮点值和平移量,整数角度与浮点角度之和就是图像的实际旋转角度。本文最后还分析了特征点选取与图像尺寸、DoH 响应阈值以及 SURF 尺度空间分解层数之间的关系。

2 图像预处理

首先对待配准的两幅图像进行预处理。通过观测得知,图像直方图的低灰度部分大都近似服从高斯分布,如图 2 所示。因此,估计该高斯分布参数,就是估计背景噪声的特性。本文采用局部直方图最小二乘曲线拟合的背景参数估计方法,能够避免恒星干扰,得到背景噪声的均值和标准差。

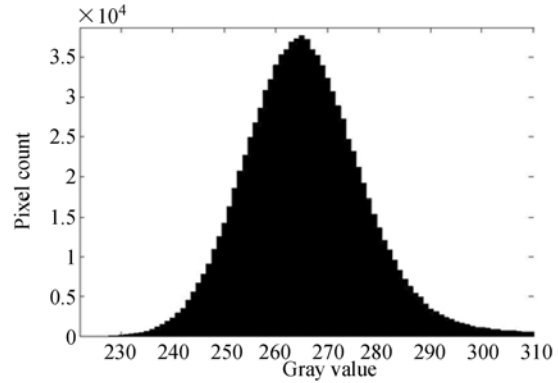


图 2 观测图像直方图低灰度区域

Fig. 2 Low gray level of histogram for observer image

2.1 基于局部直方图的噪声参数估计

局部直方图选取如图 3 所示,具体步骤如下:

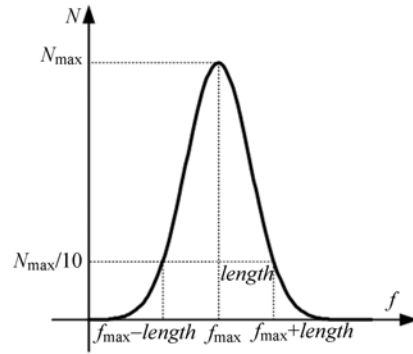


图 3 局部直方图选取示意图

Fig. 3 Sketch map of selecting for local histogram

(1) 找到整个直方图区域中的峰值点,记录峰值点的像素个数 N_{\max} , 以及对应的灰度值 f_{\max} 。

(2) 以 f_{\max} 为中心,向直方图右侧高灰度值区域进行搜索,记录所有个数大于 $T \times N_{\max}$ 像素的灰度值 (T 为阈值)。最右侧的截止灰度值设为 P_R , P_R 到 f_{\max} 的长度为 $length$, $P_R = f_{\max} + length$ 。再以 f_{\max} 为中心向直方图左侧低灰度值区域进行搜索,搜索直方图的长度为 $length$,最左侧的截止灰度值设为 P_L , $P_L = f_{\max} - length$ 。介于灰度区间 $[P_L, P_R]$ 内的直方图即为局部直方图,局部直方图各灰度值对应的像素数为 $[N(P_L), N(P_L+1), \dots, N(P_R)]$ 。

(3) 阈值 T 决定了局部直方图灰度区间的长度,本文取 $T = N_{\max}/10$ 。

图 3 的局部直方图可以用式(1)表示:

$$N(x) = N_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left\{-\frac{(x-\mu_n)^2}{2\sigma_n^2}\right\}, \quad (1)$$

其中: N_0 、 μ_n 、 σ_n 分别为局部直方图的峰值幅度、均值和标准差。对上式取自然对数得到:

$$\ln N(x) = \ln \frac{N_0}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} - \frac{1}{2\sigma_n^2}x^2 + \frac{\mu_n}{\sigma_n^2}x - \frac{\mu_n^2}{2\sigma_n^2}. \quad (2)$$

可根据最小二乘法求解式(2),最后求得背景噪声均值 μ_n 和标准差 σ_n 。

2.2 星图分割

为了减少高斯噪声的影响,对星图进行分割之前要利用大小为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 的空域模板对图像进行均值滤波。

假如空间观测相机的光学系统非常理想,目标所成像的面积小于 1 pixel ,则无法单纯通过算法将目标准确定位到亚像素量级。因此需对光学系统进行散焦处理,使得目标成像的尺寸最小为 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ ^[19]。根据这一结论,本文认为图像 f 中任一像素 (x, y) 的 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 邻域中的 4 个像素如果满足:

$$\frac{1}{4} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 f(x+i, y+j) > T, \quad (3)$$

则该 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 邻域内的 4 个像素都属于星象区域,需在图像中保留它们的灰度值。图像中除了星象区域外的其它像素都属于背景区域,将背景像素的灰度值全部置为 μ_n 。式(3)中阈值 $T = \mu_n + 2\sigma_n$ 。

通过本文分割方法处理后,能够突出恒星星象、抑制背景噪声和虚假目标,若不进行星图分割, SURF 算法对特征点检测的正确率要低于经过分割后的结果。

图 4 和图 5 分别给出了未经分割和分割之后 SURF 算法检测到的匹配程度最高的 20 对特征点,其中左图是参考图像,右图是 Fourier-Mellin 变换处理后的待配准图像。图中用直线将匹配特

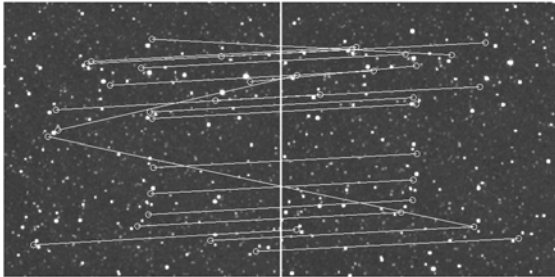


图 4 未经星图分割 SURF 特征点匹配结果

Fig. 4 Feature matching results without image segmentation

征点连在一起。从检测结果可以看出,未经分割时出现 3 对错误匹配的特征点,而分割之后 20 对特征点全部正确匹配。

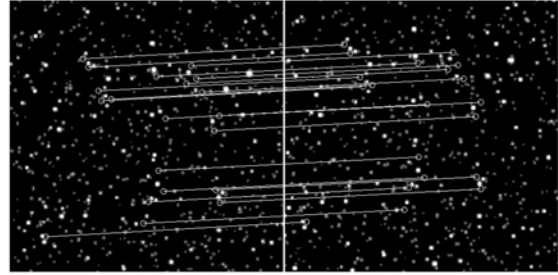


图 5 星图分割之后 SURF 特征点匹配结果

Fig. 5 Feature matching results after image segmentation

3 Fourier-Mellin 变换检测旋转角度

图像预处理之后首先利用 Fourier-Mellin 变换计算图像旋转角度的整数值 α 。Fourier-Mellin 的变换原理如下:

给定两幅图像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$, 其中 $f_1(x, y)$ 是参考图像, $f_2(x, y)$ 是 $f_1(x, y)$ 经过 RTS 变换后的待配准图像, 即:

$$f_2(x, y) = f_1[\sigma(x\cos\alpha + y\sin\alpha) - \Delta x, \sigma(-x\sin\alpha + y\cos\alpha) - \Delta y], \quad (4)$$

其中: α 和 σ 分别为旋转角度和缩放因子, 则 $f_2(x, y)$ 和 $f_1(x, y)$ 各自的频谱幅度 $|F_2(u, v)|$ 和 $|F_1(u, v)|$ 之间有如下关系:

$$|F_2(u, v)| = \frac{1}{\sigma^2} \left| F_1 \left[\frac{(u\cos\alpha + v\sin\alpha)}{\sigma}, \frac{(-u\sin\alpha + v\cos\alpha)}{\sigma} \right] \right|. \quad (5)$$

为将 $|F_2(u, v)|$ 和 $|F_1(u, v)|$ 从笛卡尔坐标系转换到极坐标系, 令

$$\rho = \sqrt{u^2 + v^2} \quad \theta = \arctan(v/u), \quad (6)$$

得到:

$$\begin{aligned} r_p(\theta, \rho) &= |F_1(\rho \cdot \cos\theta, \rho \cdot \sin\theta)| = |F_1(u, v)| \\ s_p(\theta, \rho) &= |F_2(\rho \cdot \cos\theta, \rho \cdot \sin\theta)| = |F_2(u, v)|, \end{aligned} \quad (7)$$

其中: ρ 和 θ 分别为极径和极角, $r_p(\theta, \rho)$ 和 $s_p(\theta, \rho)$ 分别为 F_1 和 F_2 在极坐标下的频谱幅度。式(5)在极坐标系下的形式由式(8)给出:

$$s_p(\theta, \rho) = \frac{1}{\sigma^2} r_p \left[\theta - \alpha, \frac{\rho}{\sigma} \right]. \quad (8)$$

从式(8)可以看出,频谱幅度仅与旋转角度 α 和缩放因子 σ 有关,与平移量无关。

式(8)在对数-极坐标系下的形式为

$$s_{p-l}(\theta, \lambda) = \frac{1}{\sigma^2} r_{p-l}(\theta - \alpha, \ln(\rho) - \ln(\sigma)). \quad (9)$$

由式(9)可知,在对数-极坐标系下,图像的旋转角度 θ 沿着角度轴平移 α , 则缩放系数沿着极径轴平移 $\ln(\sigma)$ 。对式(9)两端进行 Fourier 变换, 得到:

$$S_{p-l}(\omega, \eta) = \frac{R_{p-l}(\omega, \eta)}{\sigma^2} \exp(-2\pi j(\alpha\omega + \ln(\sigma)\eta)). \quad (10)$$

根据式(11)求 $S_{p-l}(\omega, \eta)$ 和 $R_{p-l}(\omega, \eta)$ 的互功率谱:

$$\frac{S_{p-l} \cdot R_{p-l}^*}{|S_{p-l} \cdot R_{p-l}^*|} = \exp(-2\pi j \cdot (\alpha\omega + \ln(\sigma) \cdot \eta)). \quad (11)$$

式(11)左侧互功率谱取最大值时,可求得旋转角度 α 和尺度缩放因子 σ 。应当注意到观测图像的全局运动服从刚体变换模型,即 $\sigma=1$ 。

图 6 给出了参考图像 $f_1(x, y)$ 和待配准图像 $f_2(x, y)$ 的互功率谱曲线, $f_2(x, y)$ 由 $f_1(x, y)$ 逆时针旋转 35.6° 得到。图 6 中曲线最大值处所对应的角度就是旋转角度的整数值 α 。

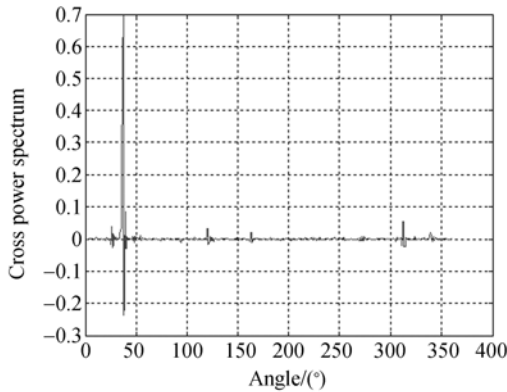


图 6 利用互功率谱图像估计旋转角度整数值

Fig. 6 Integer value estimation of image rotation angle by using cross power spectrum

为提高运算速度,在对数-极坐标系下角度轴为在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间以 2° 为间隔的 180 个整数角度值。当图像旋转角度为浮点值时,Fourier-Mellin 变换只提取图像旋转角度的整数值 α , 然后将待配准图像 $f_2(x, y)$ 反向旋转 α 后得到图像 $f_3(x, y)$ 。旋转过程的灰度插值采用三次样条插值法。

图像旋转角度的浮点值可进一步利用 SURF 算法计算。

4 SURF 算法检测特征点

得到图像 $f_3(x, y)$ 之后就可以利用 SURF 算法检测 $f_1(x, y)$ 与 $f_3(x, y)$ 之间的匹配特征点, 具体步骤包括:

(1) 建立积分图像。

(2) 对积分图像进行尺度空间分解,并在分解后的不同尺度积分图像上利用盒子积分求图像的 DoH 响应,构建不同尺度上的响应图像。

(3) 根据连续 3 个尺度上的响应图像,利用非极大值抑制方法初步确定特征点。

(4) 利用三维线性插值的方法精确定位特征点坐标。

(5) 利用扇形滑动窗口确定 SURF 特征点的主方向。

(6) 以特征点为中心,以主方向为参考方向,将边长为 20σ (σ 为特征点所在的尺度)的正方形区域进行旋转,使之与主方向对准。将该正方形区域划分为 4×4 的子区域,在每个子区域内沿主方向的水平和垂直方向分别计算 Haar 小波响应及其绝对值,然后累加,最终构造出 64 维的 SURF 描述符。

文献[20]认为,由于星图中星点特征的局部邻域为黑色星空,图像灰度几乎不变,缺乏纹理,因此局部特征描述符不能直接应用于星图匹配。该文跳过上述算法的步骤(1)至步骤(4),直接构造基于 SURF 描述符的星点描述符。该方法的核心是将所有星点均看作特征点,然后以每个星点为中心,以星点尺度分布因子为半径构造星点特征局部邻域,并计算主方向,最后构造星点描述符。文献[20]的方法存在 3 个不足:一是未利用到 SURF 多尺度分析的优势;二是当图像中恒星数量较多时,遍历所有恒星的计算量非常大;三是将恒星作为特征点,恒星质心的定位精度会直接影响配准精度。

本文利用实拍观测图像提取 SURF 特征点,图像尺寸为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$;图像位数为 16 Bits;参与配准的子图像的尺寸为 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$;DoH 响应阈值设为 10^{-8} ;将积分图像分解到尺度空间的第 2 层,一共得到 6 幅响应图

像。参考图像 $f_1(x, y)$ 和待配准图像 $f_3(x, y)$ 中检测到的 SURF 特征点的数量分别为 82 和 76。图 7 标注出了参考图像中与待配准图像匹配程度最高的 20 个 SURF 特征点, 其中圆形代表 SURF 特征点的邻域, 半径代表 SURF 特征点的主方向。

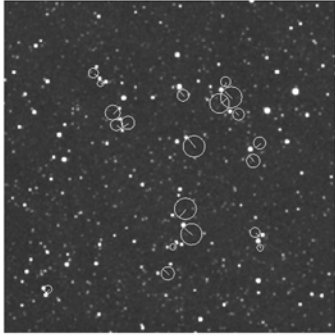


图 7 标准图像中匹配度最高的 20 个 SURF 特征点
Fig. 7 Best matching 20 features in standard image

图 8 给出了这 20 个特征点邻域尺寸分布的情况。

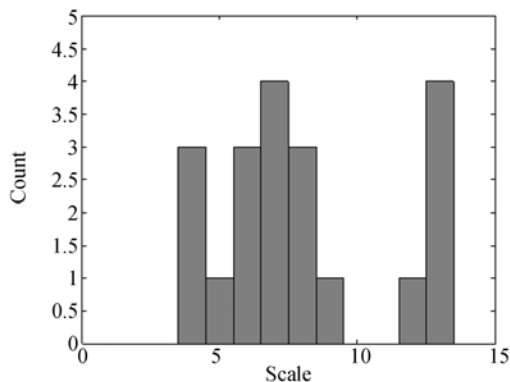


图 8 SURF 描述符邻域尺寸分布情况
Fig. 8 Neighborhood size distribution of SURF descriptor

通过实验, 本文认为可以将 SURF 局部特征描述符应用于空间观测图像配准。仔细研究图 7 发现, 观测图像中恒星的灰度差异较大, 有高亮的, 也有暗弱的, 而图像中 SURF 特征点的中心一般在图像背景区域, 邻域内不包含高亮的恒星区域, 特征点主方向朝向附近的某一颗高亮恒星, 这是本文 SURF 特征点与文献[20]中星点描述符的最大区别。另外, 图 10 表明了 SURF 描述符的邻域尺寸集中在 4~13 pixel 内, 要远远小于文献[20]中的 240 pixel。小的邻域尺寸可以减

少生成特征描述符所产生的计算量。

由于观测图像为刚体变换模型, 因此可以根据式(12)利用最小二乘法求解旋转角度的浮点值 β 和平移参数 (dx, dy) 。

$$\begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_N \\ y_1 & \cdots & y_N \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & dx \\ -\sin \beta & \cos \beta & dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1' & \cdots & x_N' \\ y_1' & \cdots & y_N' \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中: (x_i, y_i) 和 (x_i', y_i') 分别为参考图像 $f_1(x, y)$ 和待配准图像 $f_3(x, y)$ 中特征点的坐标; N 为匹配特征点对数。最终求得图像的旋转角度为 $\varphi = \alpha + \beta$; 平移参数为 (dx, dy) 。本文的图 5 就给出了 $f_1(x, y)$ 和 $f_3(x, y)$ 的 SURF 特征点检测结果。

5 实验结果

5.1 SURF 算法参数对特征点检测结果的影响

SURF 算法特征点检测结果与图像尺寸、DoH 响应阈值和尺度空间分解层数等因素均有关系。本文比较了不同 DoH 响应阈值下, 正确提取特征点个数和计算时间随子图像尺寸的变化情况。通过分析, 找到最佳的子图像尺寸、DoH 响应阈值和尺度空间分解层数。

本文算法的软件开发平台为 MATLAB 2008a; 操作系统为 Windows 7; 硬件环境为 Core i3 四核 CPU 2.5GHz, 内存为 4G 的 PC 电脑。

根据图 9 和图 10 可知, DoH 的响应阈值设为 10^{-7} 时检测到的正确特征点的个数过少, 不利

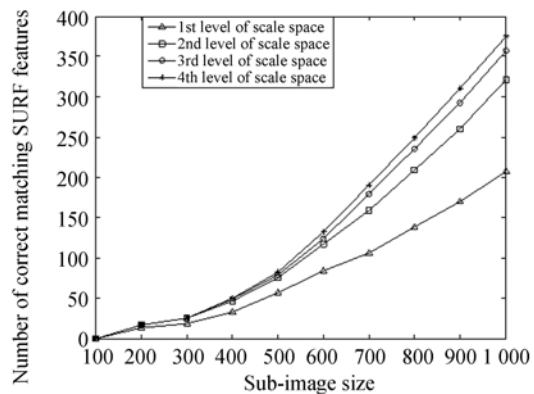


图 9 阈值为 10^{-8} 时正确匹配的特征点对数
Fig. 9 Number of correct matching feature pairs with threshold of 10^{-8}

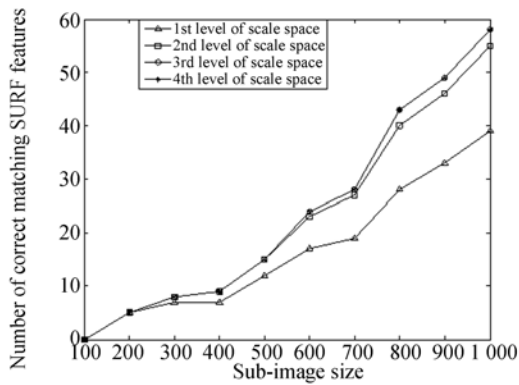


图 10 阈值为 10^{-7} 时正确匹配的特征点对数

Fig. 10 Number of correct matching feature pairs with threshold of 10^{-7}

于图像变换模型参数的求解。另外,根据图 9 可知,图像尺度空间分解到 2 层以上时正确匹配的特征点对数无明显增加。

根据图 11 和图 12 可知,子图像尺寸大于 $500 \text{ pixel} \times 500 \text{ pixel}$ 时,SURF 特征提取的匹配时间将超过 2 s。因此,本文将子图像尺寸限制在 $500 \text{ pixel} \times 500 \text{ pixel}$ 以内。

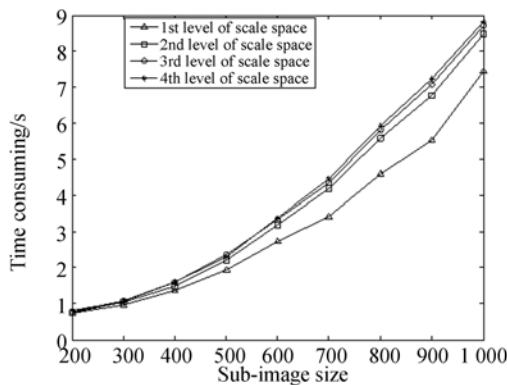


图 11 阈值为 10^{-8} 时算法耗时

Fig. 11 Time consuming with threshold of 10^{-8}

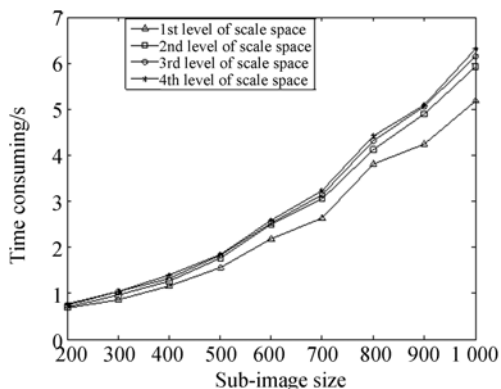


图 12 阈值为 10^{-7} 时算法耗时

Fig. 12 Time consuming with threshold of 10^{-7}

综上,本文将 SURF 算法的 DoH 响应阈值设为 10^{-8} ,将参与特征点检测的子图像尺寸设为 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$,图像尺度空间分解到第 2 层。

5.2 角度计算精度

本文采用仿真方法验证算法对旋转角度的计算精度。从 0° 到 90° 以 0.1° 步长对原始图像进行旋转,利用原始图像和旋转后的图像进行配准,计算旋转角度,结果如图 13 所示。图 13 中旋转角度的 RMSE(均方误差)为 0.0077° 。

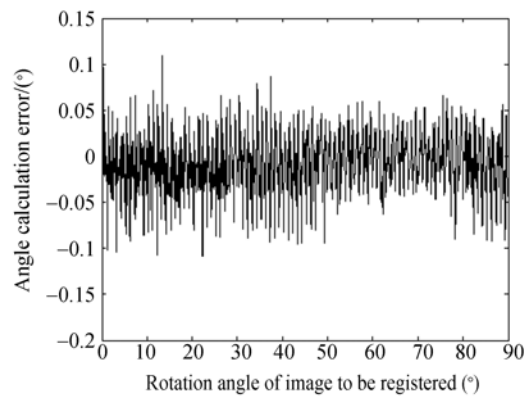


图 13 图像旋转角度计算误差曲线

Fig. 13 Error curves of image rotation angle

5.3 星象质心的配准精度

本文利用 RMSE 来检测算法对星点质心的配准精度。质心的 RMSE 定义如下^[21]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \| (x_i, y_i) - (x_i', y_i') \|^2 \right)}, \quad (13)$$

其中: N 为观测图像提取的星点个数; (x_i, y_i) 为参考图像中星点质心位置; (x_i', y_i') 为配准后图

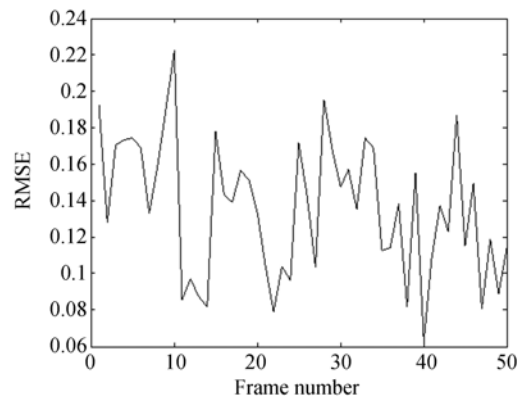


图 14 星象质心的 RMSE 曲线

Fig. 14 RMSE curve of star centroid

像中星点质心位置; $\| (x_i, y_i) - (x_i', y_i') \|$ 为两质心间的欧氏距离。本文星点质心计算采用一阶矩法, 实验中对 50 组图像进行配准, 计算 RMSE, 结果如图 14 所示。

由图 14 可知, 采用本文算法配准后, 观测图像中星点质心的 RMSE 最小达到 0.062 5 pixel, 均值为 0.135 3 pixel, 满足空间观测图像目标检测对配准精度的要求。利用文献[21]中的方法对本文图像进行处理, 星点质心的 RMSE 最小达到 0.449 6 pixel, 均值为 0.802 7 pixel, 因此可知, 本文配准算法的精度要高于文献[21]中的结果。

6 结 论

由于空间目标检测对图像配准精度要求较

高, 本文将 Fourier-Mellin 变换和 SURF 算法配合使用, 实现了观测图像的精确配准。本文首先利用 Fourier-Mellin 变换计算图像旋转角度的整数; 再利用 SURF 算法计算得到旋转角度的浮点值和平移量, 旋转角度整数与浮点值之和就是图像的实际旋转角度。实验结果表明, 本文算法对图像旋转角度估计值的均方误差为 0.007 7°, 50 组实拍图像中, 星点质心均方误差的平均值为 0.135 3 pixel, 精度能够满足空间目标检测的要求。通过进一步的实验分析得知, 针对 16 Bits 观测图像提取特征点时, SURF 算法的 DoH 响应阈值设为 10^{-8} , 子图像尺寸不大于 500 pixel×500 pixel, 图像的尺度空间分析进行到第 2 层比较合适。

参考文献:

- [1] CHU P L. Efficient detection of small moving objects [R]. Lexington, Massachusetts: Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- [2] POHLIG S C. Maximum likelihood detection of electro-optic moving targets [R]. Lexington, Massachusetts: Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [3] 张玉叶, 王春歆. 基于改进 DPA 的空间小目标检测算法[J]. 电子学报, 2010, 38 (3): 556-560.
ZHANG Y Y, WANG CH X. Space small targets detection based on improved DPA[J]. *Acta Electronica Sina*, 2010, 38 (3): 556-560. (in Chinese)
- [4] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [5] LOWE D G. Local feature view clustering for 3D object recognition [C]. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001, 1: 682-688.
- [6] 何敬, 李永树, 鲁恒, 等. 基于 SIFT 特征点的无人机影像拼接方法研究[J]. 光电工程, 2011, 38 (2): 122-126.
HE J, LI Y SH, HU H, *et al.*. Research of UAV aerial image mosaic based on SIFT[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(2):122-126. (in Chinese)
- [7] 傅卫平, 秦川, 刘佳, 等. 基于 SIFT 算法的图像目标匹配与定位[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32 (1): 163-169.
FU W P, QIN CH, LIU J, *et al.*. Matching and location of image object based on SIFT algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32 (1):163-169. (in Chinese)
- [8] 王梅, 屠大维, 周许超. SIFT 特征匹配和差分相乘融合的运动目标检测[J]. 光学精密工程, 2011, 19 (4): 892-899.
WANG M, TU D W, ZHOU X CH. Moving object detection by combining SIFT and differential multiplication[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (4): 892-899. (in Chinese)
- [9] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T. Speeded-up robust features (SURF)[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110 (3): 346-359.
- [10] 丁南南, 刘艳滢, 张叶, 等. 基于 SURF-DAISY 算法和随机 Kd 树的快速图像配准[J]. 光电子·激光, 2012, 23 (7): 1395-1402.
DING N N, LIU Y Y, ZHANG Y, *et al.*. Fast image registration based on SURF-DAISY algorithm and randomized Kd trees[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, 23 (7):1395-1402. (in Chinese)
- [11] 罗楠, 孙权森, 耿蕾蕾, 等. 一种扩展 SURF 描述符及其在遥感图像配准中的应用[J]. 测绘学报, 2013, 42 (3): 383-388.
LUO N, SUN Q SH, GENG L L, *et al.*. An ex-

- tended SURF descriptor and its application in remote sensing images registration[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42 (3): 383-388. (in Chinese)
- [12] 谢雨来,李醒飞,吕津玮,等. 基于 SURF 算法的水下图像实时配准方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22 (12): 2215-2220.
XIE Y L, LI X F, LV J W, *et al.*. Underwater images real-time registration method based on SURF[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010, 22 (12): 2215-2220. (in Chinese)
- [13] 高素青,谭勋军,黄承夏. 一种基于 SURF 的图像配准改进算法[J]. *解放军理工大学学报:自然科学版*, 2013, 14 (4): 373-376.
GAO S Q, TAN X J, HUANG CH X, *et al.*. Improved algorithm of image registration based on SURF[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2013, 14 (4): 373-376. (in Chinese)
- [14] REDDY B S, CHATTERJI B N. An FFT-based technique for translation, rotation and scale in variant image registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5 (8):1266-1271.
- [15] CHEN Q S, DEFRISE M, DECONINCK F. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(12): 1156-1168.
- [16] 王亮,刘蓉,张丽,等. 基于 Fourier-Mellin 变换的气象卫星光谱图像配准[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33 (3): 855-858.
WANG L, LIU R, ZHANG L, *et al.*. The meteorological satellite spectral image registration based on Fourier-Mellin Transform [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(3):855-858. (in Chinese)
- [17] 林卉,梁亮,杜培军,等. 利用 Fourier-Mellin 变换的遥感图像自动配准[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2012, 37(6):649-652.
LIN H, LIANG L, DU P J, *et al.*. Image registration based on Fourier-mellin Transform [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6):649-652. (in Chinese)
- [18] 石晓进,张云华. 基于 Fourier-Mellin 变换和相干系数法的重复轨道干涉 SAR 图像配准新方法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31 (4): 803-807.
SHI X J, ZHAGN Y H. A new image registration method for repeat-pass In SAR based on Fourier-Mellin Transformation and Correlation-Coefficient algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4):803-807. (in Chinese)
- [19] 翟优,曾峦,熊伟. 基于不变特征描述符实现星点匹配[J]. *光学精密工程*, 2012, 20 (11):2532-2539.
ZHAI Y, ZENG L, XIONG W. Star matching based on invariant feature descriptor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (11): 2532-2539. (in Chinese)
- [20] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers a-tutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2002, 38 (2): 587-599.
- [21] 焦继超,赵保军,唐林波. 一种基于非降采样 Contourlet 变换和 MLESAC 的星空图像配准算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32 (12): 2686-2690.
JIAO J CH, ZHAO B J, TANG L B. Space image registration algorithm based on nonsubsampling Contourlet transform and MLESAC[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32 (12): 2686-2690. (in Chinese)

作者简介:



张健(1979—),男,河南汝州人,博士研究生,工程师,2003年、2008年于海军航空工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事图像处理、空间目标检测识别方面的研究。E-mail: i_am_zhangjian@163.com



娄树理(1976—),男,山东蒙阴人,博士,讲师,1998年于山东师范大学获得学士学位,2004年、2011年于海军航空工程学院分别获得硕士、博士学位,主要从事光电制导、图像处理、红外图像生成等方面的研究。E-mail: shulilou@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)