

# 基于线特征直方图的 SAR 图像预匹配算法

张慧慧 林 伟 吕全义  
(西北工业大学理学院 西安 710129)

**摘 要** 同一场景下的合成孔径雷达(SAR 图像)的灰度特性由于相关噪声的影响及成像条件不同,可能存在很大差异,使得直接运用基于特征的图像匹配方法难于实现 SAR 图像高精度的配准。针对此问题,提出了一种 SAR 图像的预匹配方法,即运用占优的线特征信息,通过统计分析寻找出待匹配图像的角度和尺度变化,实现图像的预匹配。实验结果表明,该算法可以有效、精确地寻找出图像前后的角度和尺度变化。进而相比于传统直接基于特征配准图像的方法,经该算法预匹配处理后的图像再基于特征匹配时,其配准精度和效率都有很大的提高。

**关键词** SAR 图像, 占优线特征, 直方图, 预匹配

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

## SAR Image Matching Pretreatment Algorithm Based on Line Feature Histogram

ZHANG Hui-hui LIN Wei LV Quan-yi

(School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract** Due to the speckle noise and imaging conditions, there are great differences between the gray-level-statistics of synthetic aperture radar(SAR) images in the same scene, which makes it difficult for SAR images to realize high-precision registration based on direct application of image features. To solve the problem, we proposed a matching pretreatment algorithm to determine the angle and scale changes of the images by using the statistical analysis of the main line feature information, which can realize matching pretreatment of the images. Experimental results indicate that the algorithm can effectively and accurately find the angle and scale changes of both before and after images change. And while compared to the traditional method of image registration based on direct application of image features, the accuracy and efficiency of the SAR images which are matched by our matching pretreatment algorithm registration are greatly improved.

**Keywords** SAR image, Main line feature, Histogram, Matching pretreatment

## 1 引言

合成孔径雷达(SAR)图像的配准技术是将不同时段、不同视角或不同传感器下的同一场景的两幅或多幅 SAR 图像叠加的过程,即通过寻找一种空间变换,使两幅图像中代表同一目标的对应点达到空间位置的一致。SAR 图像配准是在遥感图像处理过程如变化检测、目标识别、图像融合等任务中先期要解决的重要问题,其配准结果直接影响后续图像处理的效果。

目前,图像配准算法大致可分为两类:基于像素灰度值配准<sup>[1]</sup>和基于图像几何特征配准<sup>[2-4]</sup>。对不同的 SAR 图像及应用领域,适用的配准方法可能有很大差别,所以根据图像特点和应用角度找出适合的配准方法,是解决图像配准问题的基础。SAR 图像一般都含有大量的斑点噪声且几何结构变化较大<sup>[5]</sup>,如果直接运用基于特征匹配的方法对图像进行配准,会造成配准速度慢且精度低。为了克服这一缺点,本文提出一种新的统计图像线特征<sup>[6,7]</sup>信息量的直方图预匹配算法,以实现图像的预匹配,使图像在空间角度和尺度上达到一

致。实验结果表明预匹配后的 SAR 图像再基于特征匹配时,匹配速度和精度都有很大的提高。该预匹配算法有以下两个特点:一方面是线特征信息的使用,减小了配准过程对灰度差异的敏感性,克服了仅利用灰度统计信息提取的特征点机械地遵从局部灰度变化而与实际情况不符,以及同名点由于图像局部灰度差异而难以匹配这两个影响 SAR 图像配准效果的主要缺点;另一方面,利用直方图的统计特性,统计出图中线特征占优部分的角度和尺度,即以直方图峰值变化代表图像全局变化,不仅避免了由于 SAR 图像斑点噪声影响造成的伪特征的干扰,且减少了计算量,提高了运算速度。

本文首先对线元特征进行筛选并构建线特征直方图,接着提出了图像直方图<sup>[8,9]</sup>匹配算法,最后进行了实验分析。

## 2 构建线元特征直方图

在对不同时间和条件下获取的两幅图像进行配准时,由于成像条件的差异、拍摄时间和季节变化、拍摄场地地物的变化等因素会造成图像空间位置的改变,提取的图像特征也会有差异。图 1 中基准图像(a)是汶川地震前拍摄的照片,地貌

到稿日期:2012-06-05 返修日期:2012-10-11 本文受国家自然科学基金(10926197,60972150),西北工业大学基础研究基金(JC201053)资助。  
张慧慧(1987-),女,硕士生,主要研究方向为统计建模与遥感图像,E-mail: huihuizhangluoyang@163.com;林伟(1965-),女,副教授,硕士生导师,主要研究方向为非线性时间序列分析与遥感图像信息处理;吕全义(1963-),女,副教授,硕士生导师,主要研究方向为数值计算方法。

特征主要为山脉,将其旋转 $5^\circ$ 并尺度扩大1.2倍后得到的图1(b)作为待配准图像。图1(c)和图1(d)分别为对图1(a)和图1(b)提取线特征的图像。可以看到,图1中的(c)和(d)变化前后提取的线特征在数量、长度及其与正方向所成的角度大小上都出现了一定的变化。但是由于线特征对旋转、尺度、平移有很好的仿射不变性,由图1(c)、图1(d)可以看到,两幅图像中很大一部分线特征(如一些较长的线,线特征明显区域的直线)是相似的,且由图1也可以观察到图1(c)和图1(d)中部分线特征的角度及长度的变化与图1(a)和图1(b)图像旋转角度和尺度变化也有一定的相似性。根据这种相似性,本文提出基于线特征的直方图匹配算法来估计图像的角度和尺度变化,即利用直方图统计出与图像变化相似的直线(也叫占优直线)的信息量来匹配图像。

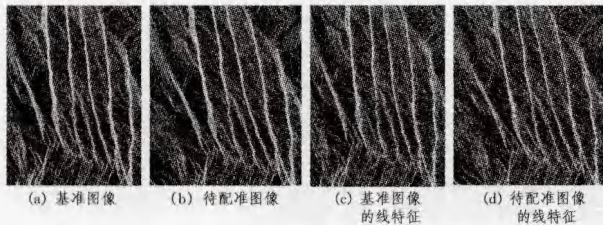


图1 模板图像

## 2.1 线特征的筛选

本节先对变化前后两幅图像的线特征进行筛选,筛选出上文分析的与图像变化相似的线特征,即占优直线集合,具体方法如下:

首先,假设变化前的图像 $I$ 含有 $M$ 条直线,变化后的图像 $J$ 含有 $N$ 条直线,其直线集合分别用 $\Omega_a$ 和 $\Omega_b$ 表示,即:

$$\Omega_a = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}$$

$$\Omega_b = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$$

其次,建立度量准则:由于要筛选出与图像变化在角度和尺度上相似的直线,因此运用线特征的角度 $\theta$ 和长度 $d$ 来构建度量准则(如式(1)所示),其中 $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 为权重(是一个常数)。

$$R_{ij} = \rho_1 \log(d(a_i)/d(b_j))$$

$$A_{ij} = \rho_2 [\theta(a_i) - \theta(b_j)] \quad (1)$$

$$(i=1, \dots, M; j=1 \dots N)$$

最后,筛选出占优直线集合 $L_a$ 和 $L_b$ ;即如果图像 $I$ 中直线 $a_m$ 和图像 $J$ 中直线 $b_n$ 所求得的 $R_{mn}$ 值和 $A_{mn}$ 值都在式(1)中的最值邻域时, $a_m$ 和 $b_n$ 即为占优直线。

## 2.2 建立统计直方图

当同一区域的成像条件发生变化时,虽然在感观上图像发生了很大的变化,但它所对应的直方图在形态上的变化却不会很大。所以本节利用直方图的方法统计出图像线特征信息量,寻找线特征与图像变化的相似性。对上节筛选的占优直线集合 $L$ 建立直方图,步骤如下:

(1)计算集合 $L$ 中所有直线的长度 $d$ 和直线在 $x$ 正方向所成的角度 $\theta$ 。记 $L_a$ 和 $L_b$ 中直线长度和角度分别为 $d(a_i)$ 、 $d(b_j)$ 和 $\theta(a_i)$ 、 $\theta(b_j)$ ;

(2)将两幅图中所求的 $\theta$ 取整,并将 $\theta$ 相同的直线的长度 $d$ 叠加,这样每个 $\theta$ 都会有一个对应量级 $h(\theta)$ 。记 $L_a$ 和 $L_b$ 中 $\theta$ 的量级为 $ha(\theta)$ 和 $hb(\theta)$ 。

(3)构建统计直方图 $H$ ,横坐标为 $\theta$ ,纵坐标为 $h(\theta)$ 。其中 $h(\theta)$ 取极大值时对应的 $\theta$ 为图像中直线占优的角度。

我们利用以上方法建立了占优直线集合 $L$ 的直方图(见图2)。首先由图2可以观察到两个直方图极大量级分布的规律有一定的相似性;其次,对比图1和图2,可观察到图1中两幅图像在角度和尺度上变化不大,对应图2中两幅图像的直方图在最大量级及其对应的角度差别也不大;最后,用以上方法对原直线集合 $\Omega$ 建立直方图(见图3),再对比图1—图3可知,经过本节方法筛选后的占优直线建立的直方图(见图2)比未经筛选的直线建立的直方图(见图3)更能体现出两幅原图像(见图1)的变化规律。

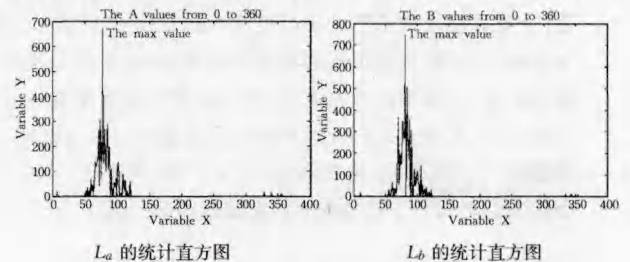


图2 筛选后占优线特征统计直方图

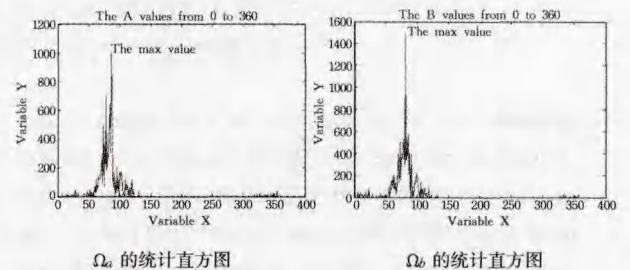


图3 未经筛选的线特征统计直方图

本节算法能够筛选出代表图像变化的占优直线集合,并且可知经过筛选后得到的直线集合统计的信息量更能体现出图像的变化。

## 3 统计占优的直线预匹配算法

根据上节两个直方图统计线特征信息和它们与图像变化的相似性和规律性,本文提出以下图像的直方图匹配算法来估计图像角度和尺度变化:

(1)首先,对两幅图像的直方图 $H$ 进行搜索,寻找直线的占优角度及其对应量级,记录每间隔 $k^\circ$ 量级最大的角度 $\theta_k$ 及其对应量级 $h(\theta_k)$ ,以统计出图像 $I$ 和图像 $J$ 的一维局部量级极大值矩阵,记为 $hI(\theta_i)$ 和 $hJ(\theta_j)$ ,其矩阵长度分别设为 $lI$ 和 $lJ$ 。

(2)求一维尺度度量矩阵 $s$ ,其值 $s(t) = hI(\theta_i)/hJ(\theta_j)$  ( $0 < t \leq lI * lJ$ )。

(3)用 $s$ 的元素对 $L_b$ 中的量级 $hb(\theta)$ 进行修正,得到 $L_b$ 中 $\theta$ 新的量级 $shb(\theta)$ 。

(4)将旋转角从 $1^\circ \sim 360^\circ$ 遍历一遍,选取使 $L_a$ 和 $L_b$ 中的量级重合比例最大的那一个角 $\theta_1$ ,和此时修正量级 $L_b$ 的 $s_1$ ,即式(2)中 $T$ 最小时 $\theta$ 和 $s$ 的取值。

$$T = \sum_{\theta=0}^{359} \sum_{m=1}^{360} |ha(m+\theta) - shb(m)| \quad (2)$$

(5)再次对两幅图像的直方图 $H$ 进行搜索,选取使 $ha(\theta)$ 和 $hb(\theta)$ 最大时对应角度的差 $\theta_2$ 和量级比 $s_2$ ,即式(3)中 $ha(\theta)$ 和 $hb(\theta)$ 最大时 $\theta$ 和 $s$ 的取值。

$$s_2 = hb(\theta_n)/ha(\theta_m) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \theta_n - \theta_m \quad (0 \leq m, n \leq ta, tb)$$

(6)最后根据  $\theta_1$  和  $\theta_2$  估计图像旋转角度  $\theta$ , 根据  $s_1$  和  $s_2$  估计图像的尺度变化  $s$ 。

#### 4 实验分析

为了验证本文算法的有效性, 本节实验分为两部分: 第一部分, 为了验证本文算法能够较准确地找到图像的尺度和角度变化, 将有一定尺度和角度变化的模板 SAR 图作为实验数据, 利用本文方法来确定图像尺度和角度的变化(结果见表 1)。第二部分, 为了证明运用本文方法预匹配后的图像再基于特征匹配时其精度和效率都将得到很大提高, 将 3 对实时图作为实验数据, 分别对预匹配后和未预匹配图像用 SURF 算法来计算其特征匹配点对。

实验 1 为验证本文算法的可行性, 将两幅汶川地震前图像进行变换得到的模板图作为实验数据, 利用本文算法估计其变化并与其真实变化进行对比(见表 1)。其中表 1 中序号 1—6 是对图 1 中基准图像(a)做变换后所得的模板图结果, 序号 7—12 是对图 4 中基准图(a)做变换后的实验结果。

表 1 模板图实验结果

序号	图像的真实变化		筛选后线特征数		实验结果	
	旋转变化	尺度变化	变化前图像	变化后图像	旋转变化	尺度变化
1	10	1	98	76	10	1.01
2	30	1	83	69	33	1
3	0	0.8	102	96	0	0.79
4	0	0.5	84	61	1	0.42
5	30	0.5	73	54	32	0.39
6	5	1.2	175	230	5	1.28
7	8	1	157	312	8	1.16
8	75	1	120	204	72	1.01
9	0	1.1	123	138	0	1.095
10	0	0.3	86	56	3	0.196
11	8	0.9	157	194	8	0.9395
12	75	0.3	77	51	69	0.21

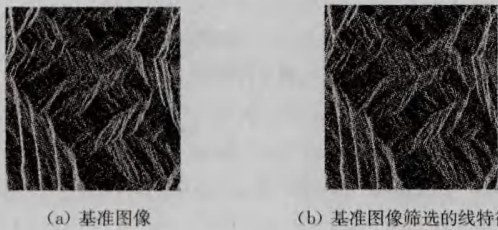


图 4 模板图

由表 1 结果可以看到, 本文算法对只有角度变化(见序号 1, 2, 7, 8)和只有尺度变化较小(见序号 3, 9)的图像有很好的效果; 又由序号(6, 11)知该算法对较小尺度和角度变化的图像效果良好, 序号(4, 5, 10, 12)说明该算法对大尺度变化的图像能够较准确地找到角度变化, 但不能很准确地确定尺度变化。

通过实验 1 结果(见表 1)可知, 该算法对小尺度和任意角度变化的图像有一定的可行性, 但是对于大尺度变化的图像其结果不是十分准确。

实验 2 为验证本文算法的实用性, 利用本文算法对 3 对高分辨率的 SAR 进行预匹配, 即先使其角度和尺度达到空间一致, 然后用一种快速鲁棒特征(Speeded Up Robust Features, SURF)算法对图像进行特征匹配, 并与不进行预匹配处理的图像匹配结果做对比。SURF 是一种新的局部不变特

征算法, 它的本质是对 SFIT 算子的改进。文献[10, 11]介绍了 SURF 算法, 它采用 64 维向量描述特征点对图像进行匹配, 算法速度快, 完全满足实时性要求, 但其稳定性和时间复杂度不足, 对成像复杂且含有大量斑点噪声的 SAR 图像匹配精度不高。

图 5(a)和图 5(b)是对陕西某地区图像同一时段不同角度拍摄的照片, 其地貌特征为河流和农田, 图 5(c)为图 5(b)中待配准图像角度旋转  $110^\circ$ 、尺度变化为 1.1 倍后得到的预匹配后图像; 图 5(d)为对原图直接运用 SURF 算法提取的特征图像; 图 5(e)为先利用本文算法预匹配修正后图像提取的 SURF 特征。由图 5(d)可以看到对前后角度变化很大的两幅图像直接提取特征时, 提取的特征点不但少而且可以看到误配点很多, 而图 5(e)先对图像进行尺度和角度纠正后, 其提取的特征点对多且多数为正确匹配点对(结果见表 2); 图 5(f)是利用 RANSAC 算法对图 5(e)中特征点筛选后图像配准的结果。

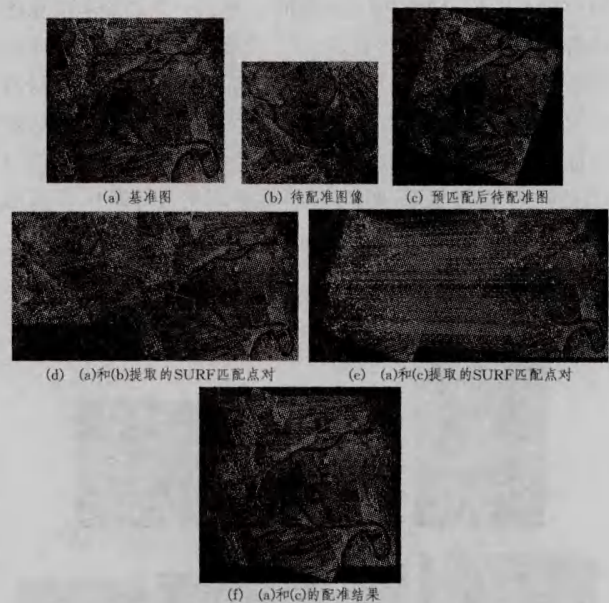


图 5 实验 2 中同一时段实时图匹配结果图

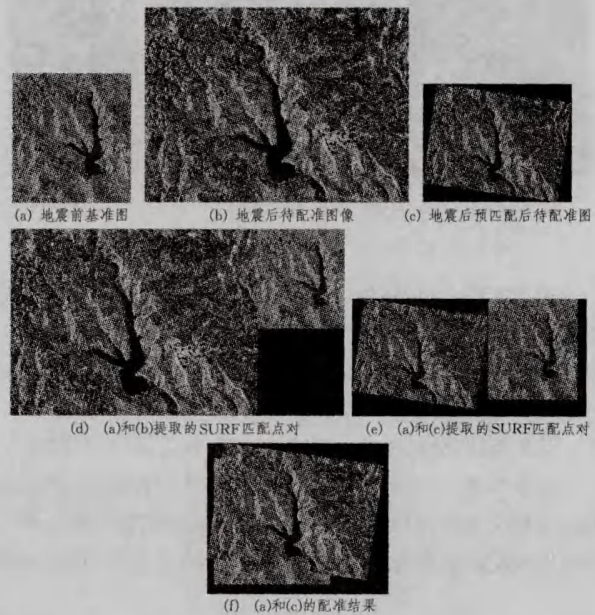


图 6 实验 2 中不同时段汶川地震实时图匹配结果图

图 6(a)和图 6(b)是汶川地震前后两幅图像,由图可直观地看到两幅图像变化不大,图 6(c)是图 6(b)中待配准图像角度旋转  $8^\circ$ 、尺度变化为 0.5 倍后得到的地震后预匹配后图像;由图像可直观地看到经过角度和尺度纠正后,图 6(e)中寻找到的匹配特征明显比图 6(d)中的多(见表 2);图 6(f)为预匹配处理后的图像利用正确匹配的点特征拟合仿射矩阵得到的配准的结果图。

表 2 RANSAC 算法筛选的正确匹配特征点对数

图像	直接运用 SURF 算法的点特征匹配		预匹配处理后的运用 SURF 算法的点特征匹配	
	全部特征点对	正确点对	全部特征点对	正确点对
图 5	73	11	468	326
图 6	11	6	76	68
图 7	34	6	675	168

图 7(a)和图 7(b)是同一时段不同角度、不同尺度拍摄的照片,由此可以直观地看到两幅图像的尺度和角度相差很大,图 7(b)与图 7(a)的部分区域相同。图 7(c)是利用本文算法将图 7(b)中图像的角度旋转  $250^\circ$ 、尺度扩大 3 倍后的预匹配图像,图 7(d)和图 7(e)为分别对预匹配前后的图像提取的 SURF 点对特征,由图 7(d)和图 7(e)对比可知预匹配后的点对特征比未匹配前提取的点对特征多且精确(见表 2)。图 7(f)是根据预匹配后图像图 7(e)中的点对用 RANSAC 筛选的正确匹配点对拟合的仿射矩阵得到的配准结果图。

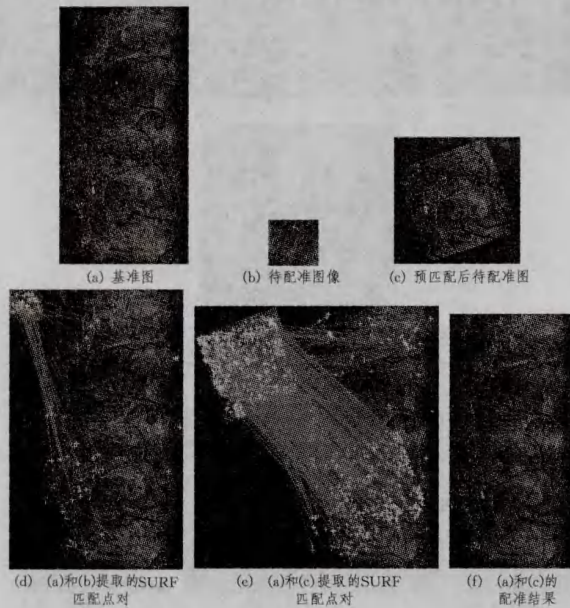


图 7 实验 2 中大尺度变化的实时图匹配结果图

通过实验 2 结果(见表 2)可以看出,经过预匹配处理后的图像不但提取了更多的特征点且由 RANSAC 筛选后的正确匹配率也得到了提高,并且配准结果良好,说明本文算法有一定的实用性。

综上所述,分析实验 1、2 综合可得:首先,由表 1(序号 3, 6, 9)和表 2(图 5, 图 6 结果)可以看到,对于尺度变化  $< 0.5$  和角度变化任意的图像,本文算法能够正确对其预匹配且预匹配后图像配准效果良好;其次,由表 2(图 5, 7 结果)可以看到

与未预匹配图像相比,对于大角度变化的图像,经过预匹配后图像提取的特征点对更多且更易配准;最后,由表 1(序号 4, 5, 10, 12)和表 2(图 7 结果)可以得到,虽然本文算法不能十分准确地确定大尺度变化图像的尺度,但是与未预匹配图像对比,经过本文算法预匹配后图像仍然能够提高配准精度。

**结束语** 本文提出一种基于线特征的图像预匹配算法,并结合 SURF 算法对 SAR 图像实现最终配准。一方面,该算法通过利用筛选的占优线特征信息量,能有效避免 SAR 图像由于斑点噪声影响造成的伪特征的干扰;另一方面,经该算法预匹配处理后再基于特征去配准图像,解决了直接基于 SURF 特征匹配 SAR 图像时的稳定性和时间复杂度不足的问题。且由实验 2 结果知,预匹配后可以寻找到更多的匹配点对,这样本文算法可以进一步拓展到一些非线性变化图像的配准,即根据多个点对拟合图像间的非线性变换去配准图像;总之,从大量实验结果可以看出,基于线特征的预匹配算法具有一定的可行性和广泛实用性。

## 参考文献

- [1] 李强,张钺.一种基于图像灰度的快速匹配算法[J].软件学报,2006,17(2):216-222
- [2] Huang Yang, Liu Jin-shuo, Tu Mei-sheng, et al. Research on CUDA-based SIFT Registration of SAR Image[C]//The 2011 Fourth International Symposium on PAAP. Tianjin, China: IEEE, 2011: 100-104
- [3] Bellavia F, Tegolo D, Valenti C. Improving Harris corner selection strategy[J]. IET Computer Vision, 2011, 5(2): 87-96
- [4] Liu Zhao-xia, An Ju-bai, Jing Yu. A Simple and Robust Feature Point Matching Algorithm Based on Restricted Spatial Order Constraints for Aerial Image registration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 2012, 50(2): 514-527
- [5] 王光新,林有明,张送保. SAR 图像数据稀疏性分析及在特征增强中的应用[J]. 计算机科学, 2011, 38(2): 267-270
- [6] Park S H, Lee K M, Lee S U K. A Line Feature Matching Technique Based on an Eigenvector Approach[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 77(3): 263-283
- [7] Bin Mei. Line Feature Recognition Based on Differential Projection Transform[C]//Information Engineering and Computer Science. Wuhan, China: IEEE, 2009: 1-4
- [8] 冯桂,卢健,林宗坚. 图像直方图不变特征在影像匹配定位中的应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(2): 146-148
- [9] Wang Wen-hao, Chen Yung-chang. Image registration by control points pairing using the invariant properties of line segments [J]. Pattern Recognition Letters, 1997, 18(3): 269-281
- [10] Bay H, Tuytelaars T, Van Gool L. Speeded-Up Roubst Feature (SURF)[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359
- [11] Bay H, Tuytelaars T, Van Gool L. SURF: Speeded-Up Roubst Feature[C]//Computer Vision-ECCV. Graz, Austria: Springer Berlin, 2006: 404-417