

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201304038

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20130603.1601.001.html>

一种 SAR 图像稳健特征点提取方法

许可乐,唐涛,蒋咏梅

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:针对合成孔径雷达(SAR)图像自动配准问题,提出了一种新的 SAR 图像特征点提取方法.先对 SAR 图像灰度值进行对数变换处理,将乘性噪声转化为加性噪声,然后利用 Gabor 滤波器取代高斯滤波器建立尺度空间,使 SAR 图像在低尺度仍较好地保留细节,增加了提取特征点数目,并设置了对比度双门限,有效地抑制了伪特征点,从而提高 SAR 图像配准的精度和速度.实验结果表明,SAR 图像稳健特征点提取方法是有效的.

关键词:SAR;图像配准;特征提取;SIFT;Gabor 滤波器

中图分类号: TP751.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2013)04-0287-05

中文引用格式:许可乐,唐涛,蒋咏梅.一种新的 SAR 图像稳健特征点提取方法[J]. 智能系统学报, 2013, 8(4): 287-291.

英文引用格式:XU Kele, TANG Tao, JIANG Yongmei. A stable feature point extraction approach for SAR image registration[J].

CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(4): 287-291.

A stable feature point extraction approach for SAR image registration

XU Kele, TANG Tao, JIANG Yongmei

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the automatic registration of a synthetic aperture radar(SAR) image, we propose a feature point extraction approach. First, by examining the logarithmic transform for the grey level of the SAR image, it was discovered that the multiplicative noise can be transformed into the additional noise. Then the scale space of the image was constructed by substituting multi-scale Gabor filter for Gaussian filter, which reveals the SAR image still has details better in a low scale, and increases the number of extracted feature points. Further, the double thresholds for contrast ratio are set up to discard the false feature point effectively, thereby increasing the precision and speed of SAR image registration. The results of the experiments demonstrate the applicability of approach to find feature points for stable SAR image registration.

Keywords: SAR; image registration; feature extraction; SIFT; Gabor filter

图像配准是指依据一些相似性度量,决定图像间的变换参数,使从不同传感器、不同视角、不同时间获取的同一场景的 2 幅或多幅图像变换到同一坐标系,并在像素层上得到最佳匹配的过程.近年来,利用稳定的特征描述子匹配成为图像配准领域研究的热点和难点之一,特别是 Lowe 利用尺度不变特征转换(scale-invariant feature transform, SIFT)方法提取的图像特征被成功应用于光学图像配准领域,并得到广泛认可^[1].

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)图像配准与光学图像的配准既有相通之处,又有自身的一些特点.整体而言,相对于光学图像,SAR 图像中同名特征点的自动提取更加困难.首先,由于 SAR 图像的信噪比远低于光学图像,导致 SAR 图像中的特征点自动提取存在困难,特别是其固有的斑点噪声严重影响特征点的提取性能,冗余、错误的伪特征点的存在也严重影响了后续特征点的匹配工作,一旦特征点失配,形成错误的同名点,则图像配准基本失效^[2-3].另外,由于待配准的 SAR 图像往往比较大,如果直接应用 SIFT 方法提取 SAR 图像的

特征进行图像配准,精度和时效性往往都较差。

以往 SAR 图像对 SIFT 算法的改进方法都存在以下 2 个问题:1)跳过 SIFT 差分尺度空间的第 1 阶尺度,提取特征点数目较少;2)存在相当数量的误匹配。针对上述 2 个问题,本文基于多尺度 Gabor 滤波器组及对比度双门限特征点精化(Gabor-SIFT)方法,提出了一种新的 SAR 图像特征点提取方法,实验结果的分析与比较验证了算法的有效性。

1 SIFT 简介

SIFT 包含 3 个主要步骤:特征提取、特征描述和特征匹配。首先在高斯差分尺度空间中进行极值检测,以初步确定关键点位置和所在尺度。在每个候选特征点所在位置,通过泰勒展开确定关键点的精确位置和尺度。剔除低对比度的关键点和不稳定的边缘响应点(因为 DoG 算子会产生较强的边缘响应),以增强匹配稳定性和提高抗噪声能力。利用关键点邻域像素的梯度方向分布特性为每个关键点指定方向参数,使算子具备旋转不变性,并利用联合邻域信息生成 SIFT 特征向量。最后采用关键点特征向量的欧式距离作为 2 幅图像中关键点的相似性判定度量。

为了将 SIFT 算子更好地应用于 SAR 图像特征提取,很多学者提出了改进方法。Ke^[4]在假设提取的图像特征服从 Gaussian 分布的情况下,利用核主成分分析(principal component analysis, PCA)的方法对 SIFT 特征降维构建了 PCA-SIFT 描述子,实现了特征的快速匹配。Li^[5]对 SIFT 特征的尺度和方向进行限制,提出一种新的描述子 SR-SIFT,实现了遥感图像的稳健配准,然而其算法复杂度较高。Delponte 将 SIFT 方法和奇异值分解方法(singular value decomposition, SVD)结合,把图像的谱信息融入到匹配过程中,利用 SIFT 特征描述子的欧式距离构建相似矩阵,此方法比直接利用点坐标之间的欧式距离匹配更稳健,但对于视觉和尺度差别较大的图像,结果不是很理想^[6-7]。Schwind^[8]提出 SIFT-Octave 算法(scale invariant feature transform-octave, SIFT-OCT),该算法在特征点的提取时跳过尺度空间第一阶尺度,以保证提取特征点的精确度和降低特征点提取的时间复杂度,其余过程与 SIFT 相同。但该算法特征点提取个数较少。

为了克服 SIFT-OCT 算法特征点提取数目较少的问题,Wang 提出 BFSIFT 算法,该算法通过双边滤波器(bilateral filter)建立各向异性的尺度空间,然后基于双组配合策略和随机抽样一致算法(random sample con-

sensus, RANSAC)算法进行特征匹配,该算法的特征点提取数目较 SIFT-OCT 有所增加^[9]。

2 Gabor-SIFT 特征点提取算法

2.1 多尺度 Gabor 滤波器组

SIFT 算子是在 Gaussian 滤波基础上创建 Gaussian 差分尺度空间。但是目前此类方法所选用的高斯微分核函数主要针对的是 Blob 模型的特征点,无法对图像频域信息进行方向选择,经常会遗失部分频域内的方向信息,导致其适应性降低。Gabor 滤波器成为描述视觉信号接收场响应模型的一个强有力的工具,具有时域和频域的联合最佳分辨率,并且较好地模拟了人类视觉系统的视觉感受特性^[10]。空间域 Gabor 函数可以写成:

$$g(x, y) = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma_x\sigma_y}} \exp\left(-\left(\frac{x_r^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y_r^2}{2\sigma_y^2}\right)\right) \exp(j2\pi f_0 x_r). \quad (1)$$

由于目标图像对不同尺度、不同角度的 Gabor 响应不同,因此,如果目标特征在原始尺度具有一定的可区分性,对图像进行多尺度分析,可以有效提高目标的识别率。增加多个尺度的信息可以丰富目标特征,但是持续增大尺度,会使不同目标的差异变小,而且太多的尺度也会给计算增加负担。在本文后续实验中,尺度层数选为 $O=3$,且 x 坐标变化尺度、 y 坐标变化尺度选取相同。Gabor 函数对整个频谱的选择特性与 DoG 算子一样,但进行了方向划分。实验结果将会表明,多尺度 Gabor 滤波器组相对 Gaussian 滤波器具有更好的细节保持特性,将多尺度 Gabor 滤波器取代传统 Gaussian 滤波器会增加特征点提取数目。

2.2 评估准则

由于不同 SAR 系统的成像视角、范围及时间都有变化,因此它们获取的同一地区的图像内容会有差异,很难基于这些图像来定量评估特征点检测与匹配算法的性能。通常的做法是对某一原始图像进行仿射等几何变换以及照度变换来获得多幅测试图像。本文比较特征点的重复率,在找到原始图像 a 与测试图像 b 间的匹配点对集合 R 的重复率就表示正确匹配的点对个数 N_R 与特征点提取个数的比值,其中提取特征点的数目为待配准 2 幅图像中特征点的数目中较小的一个,下文实验结果中表意相同^[10]。

$$\gamma = \frac{R}{\min(|\{(x_a, y_a)\}|, |\{(x_b, y_b)\}|)}. \quad (2)$$

式中: $|\cdot|$ 为集合的样本数。

2.3 对数变换

乘法模型是建模和分析 SAR 图像的常用模型。

乘积模型认为,在一定的条件下,雷达回波是斑点噪声和后向散射这 2 个随机过程共同作用的结果. SAR 图像被建模为 2 个独立随机变量 R 和 u 的乘积, R 为建模区域的后向散射, u 为建模图像的斑点,则:

$$Z = R \cdot u.$$

(3)

两边同时取自然对数,则式(3)变为

$$\ln(Z) = \ln(R) + \ln(u).$$

(4)

为了验证 SAR 图像灰度值作对数变换对特征点数目以及正确匹配点的影响,本文分别选取多幅不同波段、不同分辨率和不同极化方式的 SAR 图像进行特征点提取数目和正确匹配点对数目的比较.为了使实验结果具有更好的对比说明性,以大小为 750×515,不同波段、不同分辨率和不同极化方式的特征点提取进行实验,表 1、2 为实验对比果.

表 1 灰度值对数变换前后特征点提取数目

Table 1 Number of the feature points extracted before and after the logarithmic transformation

比较方式	不同波段	不同分辨率	不同极化方式
2 幅图像取对数提取特征点数目	8 417	2 859	10 691
2 幅图像不取对数提取特征点数目	6 472	2 198	7 852

表 2 灰度值对数变换前后正确匹配点对数目

Table 2 Number of the correct-matched feature points extracted before and after the logarithmic transformation

比较方式	不同波段	不同分辨率	不同极化方式
取对数正确匹配点对数目	2 045	549	549
不取对数正确匹配点对数目	1 720	530	342

实验结果表明,在对 SAR 图像进行 SIFT 特征提取之前进行对数变换能够有效地提高特征点提取数目和正确匹配点对的数目.分析其原因为:SAR 图像的噪声模型为乘性噪声模型,对图像取对数变换能够在数学意义上将乘性噪声转化成加性噪声,SIFT 算子中通过拟和三维二次函数以精确确定关键点的位置和尺度,同时剔除低对比度的关键点和不稳定的边缘响应点的步骤都提高了算子对加性噪声的抗干扰能力.以下实验都是基于对 SAR 图像进行对数变换的基础上进行的.

2.4 基于对比度双门限的候选特征点优化

由于 SAR 图像中存在严重的斑点噪声现象,直

接用基于 Gabor 滤波器建立的尺度空间提取候选的特征点依然存在着一定数量的伪特征点.为了得到稳定的特征点,仅删除 Gabor 差分尺度空间中响应值低的点和删除边缘效应是不够的.针对 SAR 图像,本文采用抑制伪特征点的方法.

删除低对比度的特征点的同时剔除对比度过高的特征点,这样可以很好地抑制伪特征点.针对 SAR 图像对比度上限的选择,选取了不同场景(如森林、海洋、草地等)下,不同波段的 SAR 图像进行了配准实验.实验结果表明,在对比度上限取 4.2 时,重复率取值相对较大,本文在实验中对对比度上限选为 4.26.表 3 为不同波段、不同分辨率、不同极化方式下重复率变化情况.

表 3 不同波段、不同分辨率、不同极化方式下重复率变化

Table 3 Repeatability in different bands, different resolutions, and different polarization modes

比较方式	门限					
	4	5	10	20	30	40
不同波段	0.77	0.94	0.88	0.64	0.46	0.42
不同分辨率	0.75	0.96	0.82	0.67	0.56	0.52
不同极化方式	0.73	0.95	0.82	0.77	0.66	0.62

2.5 Gabor-SIFT 算法流程

为了更加清晰地阐述本文算法,给出本文算法流程图,如图 1.

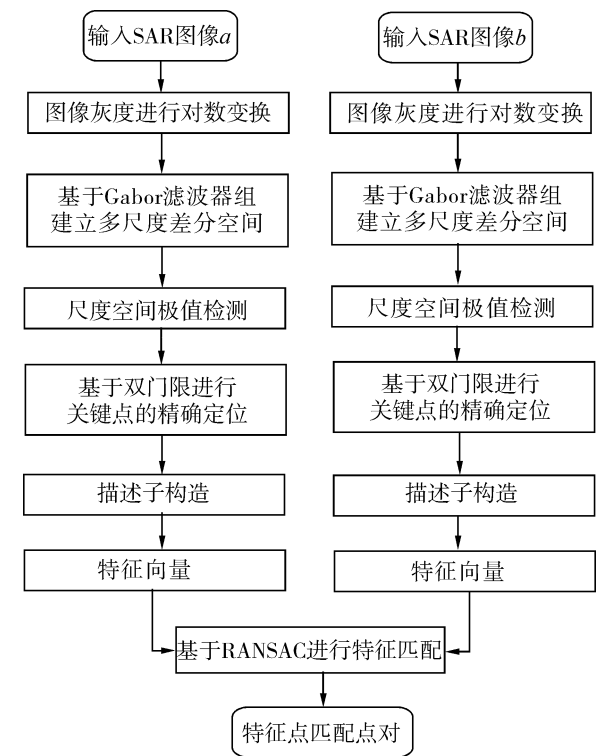


图 1 Gabor-SIFT 算法流程

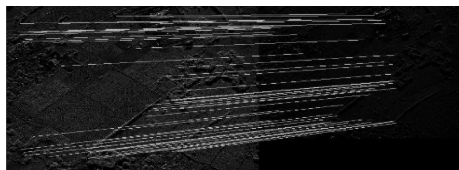
Fig. 1 Flow chart of Gabor-SIFT

3 实验结果及分析

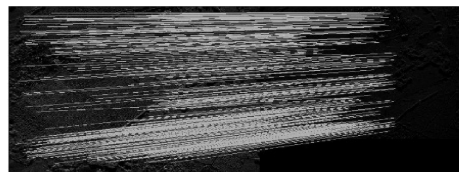
实验利用不同波段、不同分辨率及不同极化方式下的实测数据,对本文所提 Gabor-SIFT 算法进行性能的评估。

3.1 不同波段特征点提取与匹配结果

图 2 中 2 幅不同波段的 SAR 图像用于本算法特征点提取的测试,图 2(a)为 X 波段,图 2(b)为 C 波段.X 波段的图像大小为 750×515,C 波段图像大小为600×412,表 4 为本文所述算法(Gabor-SIFT)与文献[9]所述方法及直接用 Gabor 滤波器进行滤波、再进行 SIFT 特征提取的特征点检测数目及匹配时间的比较。



(a) BFSIFT 特征点提取与匹配结果



(b) Gabor-SIFT 特征点提取与匹配结果

图 2 不同波段下特征点提取与匹配结果

Fig. 2 Results of the feature points extraction and match in different bands

表 4 不同波段正确匹配点对数目与特征点数目提取结果
Table 4 Number of correct-match points and result of feature points extraction in different band

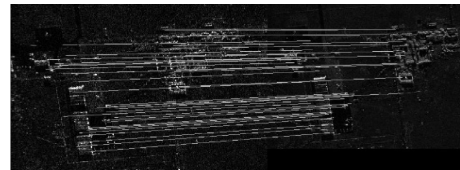
方法	正确匹配点对数目/提取特征点数目				
	第 0 阶	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	总计
BFSIFT	—	71/ 1 253	22/324	4/56	97/ 1 633
Gabor-SIFT	106/ 4 706	73/320	25/88	5/19	209/ 5 115

从表 4 分析可知,无论是特征点提取的数目还是正确匹配对数目,本文所述方法比直接应用多度 Gabor 滤波器与 SIFT 算子直接方法,或是 BFSIFT 算法都有较大幅度的提高.但由于 BFSIFT 跳过尺度空间第 1 阶尺度进行,所以本文所述算法在时间复杂度比 BFSIFT 略高.在一般情况下,尺度空间中往往在第 1 阶尺度包含信息最多,为了保证提取足够多的特征点数目,本文建议不宜跳过第 1 阶尺度。

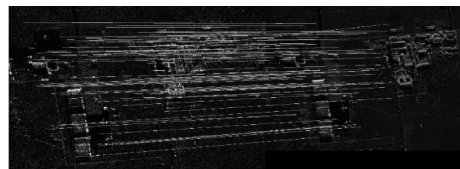
3.2 不同分辨率特征点提取与匹配结果

图 3(a)为 BFSIFT 特征点提取与匹配结果图像,分辨率为3 m×3 m;图 3(b)为 Gabor-SIFT 特征

点提取与匹配结果图像,分辨率为 1 m×1 m.结果表明,本文所述方法在不同分辨率下,无论在特征点提取数目上,还是在正确匹配点对数目上较 BFSIFT 算法均有较大提高.与不同波段下相同,本文所述方法在时效性上略差.此外,在图像大小相差不大的情况下,不同分辨率下,不同波段、不同极化方式特征点数目明显减少.表 5 为不同分辨率下正确匹配点对数目与特征点数目提取结果及特征提取时间。



(a) BFSIFT 特征点提取与匹配结果



(b) 本文所述方法特征点提取与匹配结果

图 3 不同分辨率下特征点提取与匹配结果

Fig. 3 Results of the feature points extraction and match in different resolutions

表 5 不同分辨率正确匹配点对数目与特征点数目提取结果及特征提取时间对比

Table 5 Number of correct-match points, result of feature points extraction and the time consumed in different resolutions

参数	BFSIFT	本文方法
正确匹配点对数目/特征点数目	42/1 508	98/5 312
特征提取时间/s	9.615	12.674

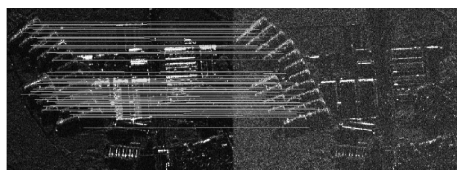
3.3 不同极化方式特征点提取与匹配结果

图 4(a)的极化方式为 HH,为 BFSIFT 特征点提取与匹配结果,图 4(b)的极化方式为 HV,为本文所述方法特征点提取与匹配结果.结果表明不同极化方式下,本文所述方法较 BFSIFT 除在时间复杂度外的各项指标均有所提高,尤其是正确匹配对数目,如表 6。

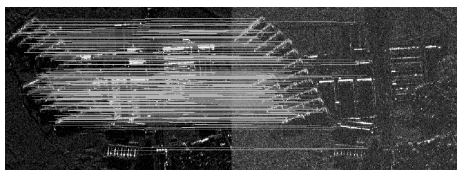
表 6 不同极化方式正确匹配点对数目与特征点数目提取结果及特征提取时间对比

Table 6 Number of correct-match points, result of feature points extraction and the time consumed in different polarization modes

参数	BFSIFT	本文方法
正确匹配点对数/特征点数目	133/4 691	549/10 568
特征提取时间/s	10.265	19.654



(a) BFSIFT 特征点提取与匹配结果



(b) 本文所述方法特征点提取与匹配结果

图4 不同极化方式下特征点提取与匹配结果

Fig.4 Results of the feature points extraction and match in different polarization modes

在 SAR 图像几何畸变较大的情况下,相当数量的正确匹配对数目对配准结果有直接影响,因此在不同极化方式下本文算法优于 BFSIFT 算法。

4 结 论

为了改进 SIFT 算子应用到 SAR 图像中的特征点提取数目较少和存在一定数量的误匹配点对的问题,本文相对 BFSIFT 算法,在提取特征点数量性、准确性上均有较大提高。理论分析及实验证明可以得出以下结论:

1)多尺度 Gabor 滤波器相比 Gaussian 滤波器更好地保持 SAR 图像细节,从而会令尺度空间的特征点提取数目显著增加。

2)对 SAR 图像灰度值进行对数变换,能够有效地增加特征点提取数目和正确匹配点个数。

3)在图像大小相差不大的情况下,不同分辨率、不同波段、不同极化方式下特征点数目明显减少。此外,选取的都是不同条件下大场景的 SAR 图像进行特征点提取与匹配,仍没有很好解决在小场景的 SAR 图像(例如 MASTAR 数据库图像切片)进行特征点提取与匹配问题,这也有待进一步深入研究。

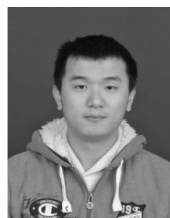
参考文献:

- [1]LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [2]XIONG B, CHEN J M, KUANG G, et al. Estimation of the repeat-pass ALOS PALSAR interferometric baseline through

direct least square ellipse fitting[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(9): 1-8.

- [3]SURI S, REINARTZ P. Mutual-information-based registration of TerraSAR-X and Ikonos imagery in urban areas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 939-949.
- [4]KE Y, SUKTHANKAR R. PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors[C]//Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC, USA, 2004: 1980-1987.
- [5]LI Q L, WANG G Y, LIU J G, et al. Robust scale-invariant feature matching for remote sensing image registration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 287-291.
- [6]PALENICHKA R M, ZAREMBA M B. Automatic extraction of control points for the registration of optical satellite and LiDAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(7): 2864-2879.
- [7]LU G, YAN Y, KOU Y, et al. Image registration based on criteria of feature point pair mutual information[J]. IET Image Process, 2011, 5(6): 560-566.
- [8]SCHWIND P, SURİ S, REINARTZ P, et al. Applicability of the SIFT operator for geometrical SAR image registration[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(8): 1959-1980.
- [9]WANG Shanhu, YOU Hongjian, FU Kun. BFSIFT: a novel method to find feature matches for SAR image registration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(4): 649-653.
- [10]雷琳,王壮,栗毅. 基于多尺度 Gabor 滤波器组的不变特征点提取新方法[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2314-2319.
- LEI Lin, WANG Zhuang, SU Yi. A new invariant feature detector based on multi-scale Gabor filter bank[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2314-2319.
- [11]LIU Li, FIEGUTH P. Texture classification from random features[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 10(5): 1109-1120.
- [12]DUAN C, MENG X, TU C, et al. How to make local image features more efficient and distinctive[J]. IET Computer Vision, 2008, 2(3): 98-102.

作者简介:



许可乐,男,1990年生,硕士研究生,主要研究方向为图像处理。