

SIFT与粗差别除算法相结合的机载SAR影像匹配研究

姜文聪¹, 张继贤¹, 程春泉¹, 梁勇²

(1. 中国测绘科学研究院, 北京 100830; 2. 山东农业大学信息科学与工程学院, 泰安 271000)

摘要: SAR影像匹配是SAR数据处理的重要环节,但是,SAR影像匹配成功率、正确率及精度较低。通过SAR影像匹配,建立SAR匹配像对,对雷达立体观察和立体测量有重要的意义。在机载SAR影像匹配中,应用SIFT算法,获得较稳定的特征,并结合2D单应变换的RANSAC算法剔除误匹配点对;选取三组不同类别的机载SAR影像数据,利用SIFT和粗差别除相结合的算法,通过VC++和OpenCV编程,提取出特征稳定且均匀分布的同名点对,完成机载SAR影像匹配实验。结果表明,对于含有人工建筑物的机载SAR影像,SIFT算法可有效地提取大量稳定的匹配点对,其正确率高;对于含有自然植被的机载SAR影像,SIFT算法可有效地提取较多稳定的匹配点对,其正确率较高;由于SIFT算法实质上是基于局部灰度匹配的算法,对于纹理信息缺乏的机载SAR影像,只可提取少量稳定的匹配点对,其正确率相对前两者较低。总体而言,在机载SAR影像中SIFT算法能够提取到稳定的匹配点对,并结合基于2D单应变换的RANSAC算法,可有效剔除误匹配点对,提高匹配正确率及精度。

关键词: SIFT算法; 2D单应变换的RANSAC算法; 机载SAR影像; 匹配

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00440

1 引言

由于SAR影像特殊的成像机理,导致SAR影像匹配的成功率、正确率及精度较低,SAR影像匹配成为SAR影像应用的技术难点之一^[1]。主流的影像匹配算法包括区域的匹配方法和特征的匹配方法。区域的匹配方法在低信噪比条件下难以满足SAR影像匹配的要求。特征的匹配方法对SAR影像进行匹配是一个较好的选择^[2]。SIFT特征是图像的局部特征,其对旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变,对视角变化、仿射变换、噪声也保持一定程度的稳定性^[3-5]。但SIFT匹配后仍存在误匹配点对,影响了SAR匹配点对的精度。

因此,本文采用SIFT算法提取稳定的特征点进行机载SAR影像匹配,并结合2D单应变换的RANSAC算法剔除误匹配点对,以提高匹配点对的精度。选取3组不同类别的机载SAR影像数据,利用SIFT和粗差别除相结合的算法,通过VC++和OpenCV编程,提取出特征稳定且均匀分布的同名点对,完成机载SAR影像匹配实验。结果表明,在

机载SAR影像中SIFT算法能够提取到稳定的匹配点对,并结合2D单应变换RANSAC算法,有效剔除误匹配点对,提高匹配正确率及精度。

2 SIFT算法匹配

2.1 建立高斯金字塔影像和高斯差分金字塔影像

为获取更多的特征点,可事先将原始影像放大一倍。然后建立octvl阶,每阶有intvl+2层的高斯金字塔影像。尺度空间金字塔第一阶的第一层高斯卷积核为 σ ;剩余每一层的高斯卷积核均是前一层高斯卷积核的 k 倍, $k=2^{1/8}$;剩余每一阶的影像原型均由其前一阶的倒数第二层影像下采样得到,重复进行该过程,即得到高斯尺度空间影像。相邻尺度的高斯金字塔影像两两间进行差分运算得到高斯差分金字塔影像^[6]。通过建立高斯差分金字塔影像,可以减弱斑点噪声对机载SAR影像的影响。

2.2 检测高斯差分尺度空间极值点

高斯差分金字塔建成后,在尺度空间中计算极

收稿日期: 2012-10-15; 修回日期: 2013-01-04.

基金项目: 国家“863”计划课题(2011AA120401); 国家自然科学基金项目(41071237)。

作者简介: 姜文聪(1987-),女,山东省泰安市人,硕士生,主要从事SAR影像匹配等方面的研究。

E-mail: wenconghappy@163.com

值。将待检测的影像的每个像元点与它同尺度的8个相邻点和上下相邻尺度对应的 2×9 个点(共26个点)比较。如果待检测的点是极大值或极小值,则该点为候选特征点^[7]。

2.3 精确定位关键点位置及去除不稳定的点

对高斯差分金字塔 $D(x,y,\sigma)$ 进行牛顿迭代,如果该点尺度空间坐标的偏移量 $\hat{X}(\hat{x},\hat{y},\hat{\sigma})$ 的3个分量中任何一个大于0.5,则改变特征点的位置,并重新计算极值,循环此过程,直至3个分量全部小于0.5,精确得到极值点的位置和尺度(达到亚像元精度)。同时,在DOG影像中,将其灰度值归一化到(0,1)之间,把对比度低 $|D(X)| < 0.03$ 的极值点去掉。由于DOG算子会产生较强的边缘响应,要去除不稳定的边缘点,以增强匹配稳定性,提高抗噪声能力^[8]。通过一个 2×2 的Hessian矩阵 H ,求出特征点的主曲率;设定一个阈值 γ (取 $\gamma = 10$),若 $\frac{\text{tr}(H)^2}{\text{Det}(H)} > \frac{(\gamma+1)^2}{\gamma^2}$,则该点为不稳定的边缘点,将其滤掉^[9]。

2.4 确定关键点主方向

在高斯金字塔影像 $L(x,y)$ 中,先计算出像元点 (x,y) 处梯度的模值 $m(x,y)$ 和方向 $\theta(x,y)$;然后利用直方图统计以关键点为中心的邻域窗口内像元的梯度方向,从而确定关键点的主方向。邻域窗口内每个像元的梯度用一个箭头表示,箭头方向表示梯度方向,长度表示梯度幅值;越靠近关键点的像元,其梯度方向贡献就越大,即高斯加权值就越大。梯度直方图(范围 $0 \sim 360^\circ$)共有36个柱,每 10° 一个柱;直方图峰值代表关键点处邻域梯度的主方向,即关键点处的主方向,并通过抛物线拟合以精确确定峰值位置;若存在另外一个相当于主峰值80%能量的峰值时,则将这个方向作为关键点的辅方向,以增强匹配的鲁棒性^[10]。

2.5 生成特征描述符

影像特征点检测完成后,每个特征点具有位置 (x,y) 、尺度 σ 和方向 θ 这3个信息。要将坐标轴旋转到特征点的主方向,以确保特征点的旋转不变性。

以关键点为中心,取 16×16 的窗口,在每一个 4×4 的小块上,计算每个像元的梯度方向,利用梯度方向直方图统计并绘制每个梯度方向的累加值,形

成一个种子点;使用 $16(4 \times 4)$ 个种子点描述每个关键点,最终形成128维(16×8)SIFT特征向量,以增强匹配的稳健性^[11]。去除尺度变化、旋转等几何因素的影响以后,要将SIFT特征向量的长度归一化,去除光照变化的影响。为减少梯度值变化较大的影响,将128维中所有大于0.2的元素赋值为0.2,并重新进行归一化。

2.6 SIFT特征匹配

建立K-D树,依次查找参考影像的每个特征点在待匹配影像的特征描述的K-D树上的最近邻,次近邻特征点。在使用K-D树查找最近邻时,限定了最大查找次数,能有效控制查找时间;并使用了优先级队列搜索顺序进行搜索,从而大大提高了效率。

两幅影像中的SIFT特征向量生成后,采用关键点SIFT特征向量的欧氏距离作为两幅影像中关键点匹配的相似性测度^[12]。若最近邻距离与次近邻距离的比值小于某个阈值,则为匹配点对。降低此阈值,SIFT匹配点数目将会减少,但更加稳定。

3 基于2D单应变换的RANSAC算法剔除误匹配点对

RANSAC(Random Sample Consensus),随机抽样一致算法是一种鲁棒性的参数估计方法,实质上就是一个反复测试、不断迭代的过程^[13]。利用RANSAC算法得到稳健的参数模型,实际上是一个迭代的不断寻求更优的、包含更多支持内点的模型参数的过程。

3.1 RANSAC算法剔除误匹配点对的模型——2D单应变换

将2D单应变换作为RANSAC算法剔除误匹配点对的模型,即从一个平面上的特征点到另外一平面上的特征点的射影关系,反映为射影矩阵 H 。利用两影像中的至少4对匹配点,计算出包含8个自由度的 3×3 矩阵 H 。

3.2 RANSAC算法的基本思想

从SIFT匹配同名点对中随机抽取 M 组抽样,每一组抽样数据至少包含4对匹配点;利用 M 组抽样中匹配点对,分别估算出2D单应变换矩阵 H 的参数初始值;再根据匹配点对间的误差,计算出每

一组2D单应变换矩阵H参数初始值所对应的内点和外点;统计每一组参数初始值的内点数,内点数目越大,模型参数越好。

4 机载SAR影像匹配技术流程

本文采用SIFT与2D单应变换的RANSAC算法来匹配机载SAR影像,详细步骤如图1、图2所示。

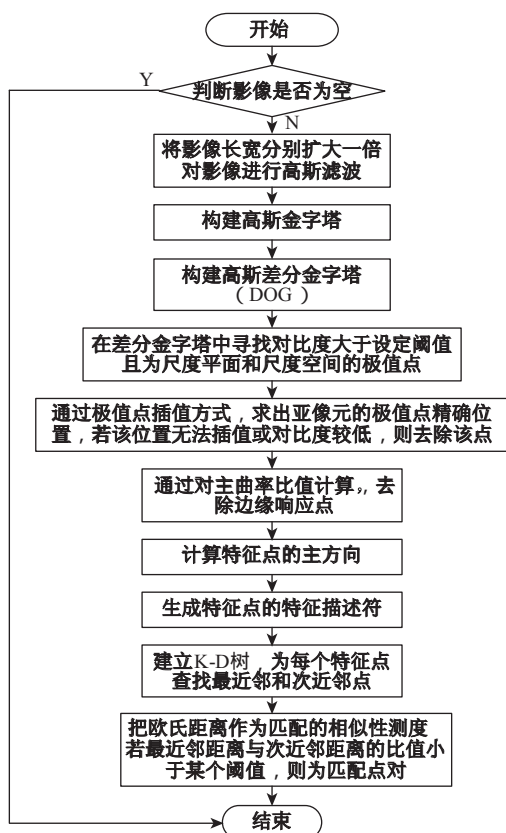


图1 SIFT匹配流程图

Fig.1 Flow chart of SIFT matching

5 实验结果与分析

以往机载SAR影像匹配的研究对象大都是截取了同一种地物的区域做实验,而本文分别采用了3种不同地物的机载SAR数据做实验,在含有人工建筑物、含有自然植被及纹理信息缺乏的机载SAR影像中,从不同角度说明SIFT算法可有效地提取稳定的匹配点对,其正确率高,即使是在纹理信息缺乏的区域,在实际中也可实现整景SAR影像间重叠区域的匹配。

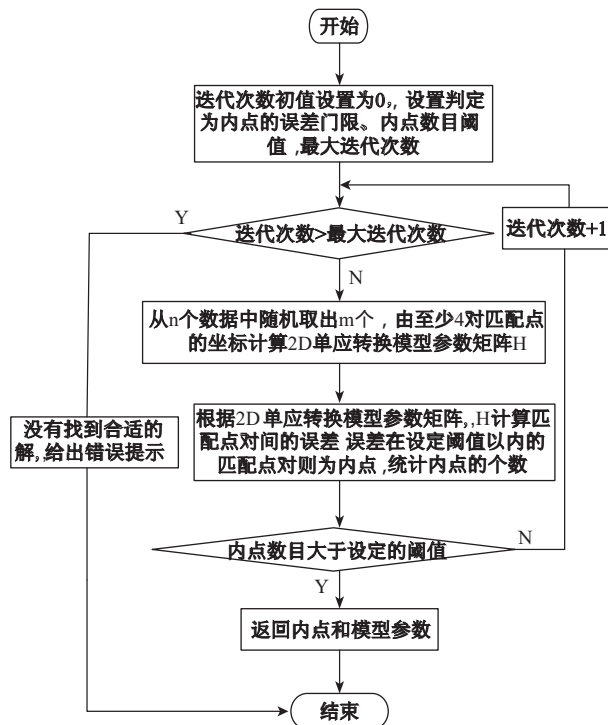


图2 基于2D单应变换的RANSAC剔除算法流程图

Fig.2 Flow chart of RANSAC algorithm based on 2D homography transform

本文实验数据为2011年6月23日获取的河南省登封地区的机载SAR影像对,其分辨率为0.5m,波段为X波段,所选用的机载SAR影像对是位于同一条带的相邻影像。

在该机载SAR影像对中,分别选取3组不同类别的代表区域,把含有人工建筑物的SAR影像、自然植被的SAR影像及纹理信息缺乏的SAR影像作为实验的研究对象,使用VC++和OpenCV工具编程,提取出特征稳定且均匀分布的同名点对,完成机载SAR影像数据的匹配与粗差剔除相结合的实验。

5.1 第一组数据(含有人工建筑物的机载SAR影像)

在该机载SAR影像对中,截取600×600大小的数据进行实验;生成4134个SIFT特征描述符;总共提取687个SIFT匹配点对。为了易于观察,使用彩色直线连接匹配点对,如图3所示,SIFT匹配点对连线方向基本一致,匹配结果较好,只有少数匹配点对存在粗差;剔除误匹配点对后,如图4所示,正确匹配点对有678个;如图5所示,粗差剔除后的SIFT匹配点对连线方向保持一致,因此,提高了匹

配点对正确率。

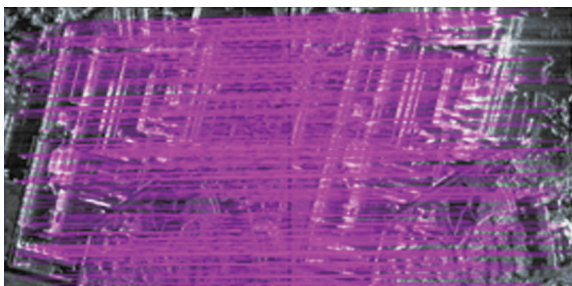


图3 SIFT 匹配点对连线图

Fig.3 Diagram of SIFT matching points connection, data group 1

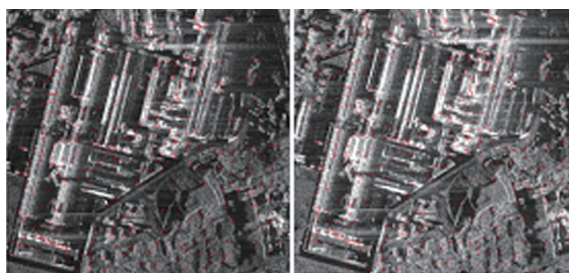


图4 粗差别除后的匹配点对

Fig.4 The matching points after the elimination, data group 1

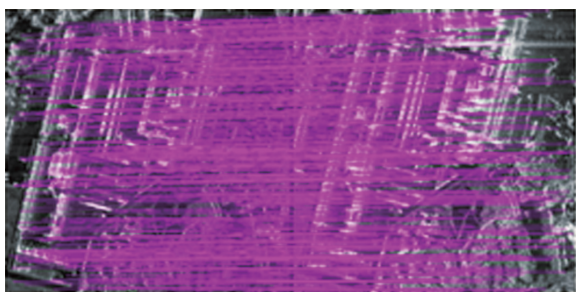


图5 粗差别除后的SIFT 匹配点对连线图

Fig.5 Diagram of SIFT matching points connection after the elimination, data group 1

5.2 第二组数据(含有自然植被的机载SAR影像)

在该机载SAR影像对中,截取 450×450 大小的数据进行实验;生成2821个SIFT特征描述符;提取273个SIFT匹配点对。为了易于观察,使用彩色直线连接匹配点对,如图6所示SIFT匹配点对连线方向基本一致,只有少数匹配点对存在粗差;剔除误匹配点对后,正确匹配点对有265个(图7);如图8所示,粗差别除后的SIFT匹配点对连线方向保持一致,因此,提高匹配点对的正确率。

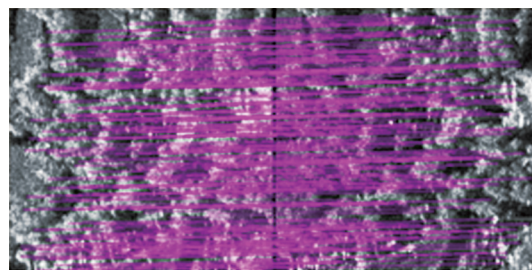


图6 SIFT 匹配点对连线图

Fig.6 Diagram of SIFT matching points connection, data group 2

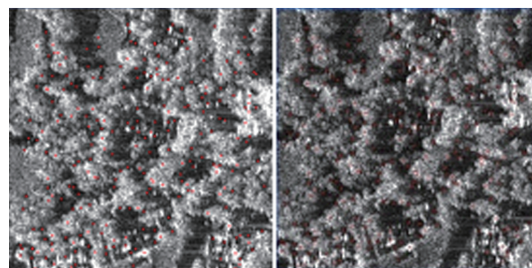


图7 粗差别除后的匹配点对

Fig.7 The matching points after the elimination, data group 2

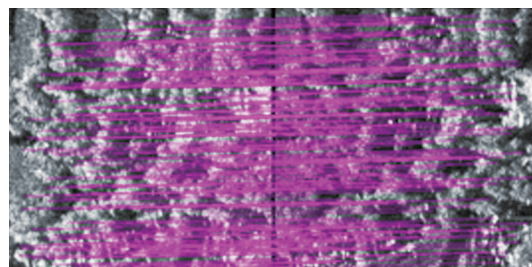


图8 粗差别除后的SIFT 匹配点对连线图

Fig.8 Diagram of SIFT matching points connection after the elimination, data group 2

5.3 第三组数据(纹理信息缺乏的机载SAR影像)

在该机载SAR影像对中,截取 450×450 大小的数据进行实验;生成3027个SIFT特征描述符;提取20个SIFT匹配点对。为了易于观察,使用彩色直线连接匹配点对,如图9所示,SIFT匹配点对连线方向基本一致,只有少数匹配点对存在粗差;剔除误匹配点对后,正确匹配点对有17个(图10);如图11所示,粗差别除后的SIFT匹配点对连线方向保持一致,因此,提高了匹配点对正确率。

实验结果表明,对于含有人工建筑物的机载SAR影像,SIFT算法可有效地提取大量稳定的匹配点对,其正确率高;对于含有自然植被的机载SAR影像,SIFT算法可有效地提取较多稳定的匹配点对,其正确率较高;由于SIFT算法实质上是基于局

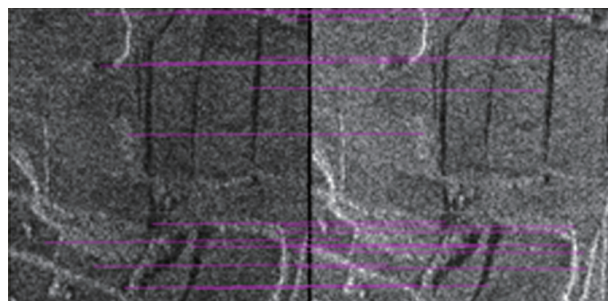


图9 SIFT匹配点对连线图

Fig.9 Diagram of SIFT matching points connection, data group 3

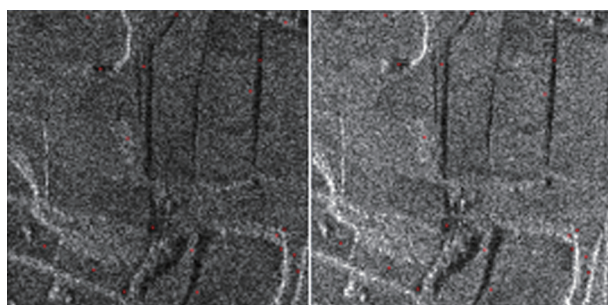


图10 粗差剔除后的匹配点对

Fig.10 The matching points after the elimination, data group 3

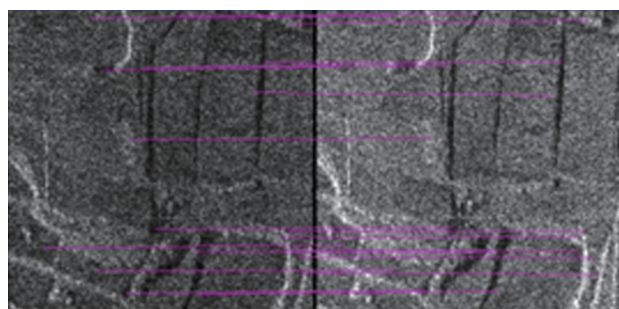


图11 粗差剔除后的SIFT匹配点对连线图

Fig.11 Diagram of SIFT matching points connection after the elimination, data group 3

表1 SIFT匹配点对正确率

Tab.1 Correct rate of the matching points with SIFT algorithm

实验编号	匹配点对总数	正确匹配点数	匹配点对正确率
第一组数据	687	678	98.7%
第二组数据	273	265	97.1%
第三组数据	20	17	85%

部灰度匹配的算法,对于纹理信息缺乏的机载SAR影像,只可提取少量稳定的匹配点对,其正确率相对前两者较低。此外,本文虽然是分别针对单一地

物进行实验,但若对存在着多种地物的整景机载SAR影像进行匹配时,由于SIFT匹配是基于局部灰度的算法,该方法同样具有适用性。

总体而言,从上面的实验结果匹配点对连线及匹配点对精度表可知,在机载SAR影像中,SIFT算法能够较准确地匹配到大量的稳定特征,具有一定的鲁棒性^[14];并结合2D单应变换的RANSAC剔除算法可有效剔除误匹配点对,在RANSAC粗差剔除中,误差阈值限制在3个像元以内,从而提高了匹配正确率及精度。

6 结语

在SAR图像存在严重的相干斑噪声与类似纹理结构的条件下,基于SIFT特征的方法仍然可以较准确地匹配到大量的稳定同名点^[15]。本文采用SIFT算法完成了机载SAR影像匹配,并用2D单应变换的RANSAC算法,对匹配后存在的误匹配点对进行剔除,以提高匹配点对的精度。选取3组不同类别的机载SAR影像数据,利用SIFT和粗差剔除相结合的算法,通过VC++和OpenCV编程,提取出特征稳定且均匀分布的同名点对,完成机载SAR影像匹配实验。实验结果表明,在机载SAR影像中SIFT算法可以较准确地匹配到稳定的特征,具有一定的鲁棒性;并结合2D单应变换的RANSAC算法,可有效剔除误匹配点,从而提高匹配点对的正确率,继而应用于SAR影像数据的后续处理中。但本文中还有着不足之处,仍需要后续改进,利用SIFT和粗差剔除相结合方法实现同一条带相邻SAR像对的匹配效果远好于相邻不同条带间的像对,但相邻不同条带间的像对存在着较大的几何变形,而SIFT算法仅限于存在一定程度变形的SAR影像匹配,因此,还需进一步将SAR的构象模型引入匹配中,结合几何约束条件实现匹配。

参考文献:

- [1] 尤红建,付琨.合成孔径雷达图像精准处理[M].北京:科学出版社,2011.
- [2] 吕文涛,吕高焕.SIFT算法在雷达图像匹配中的应用[J].信息与电子工程,2010,8(4):388-392.
- [3] Lowe D G. Distinctive image features from Scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004,60(2):91-110.
- [4] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant

- features[C]. International Conference on Computer Vision, Washington, USA, IEEE Computer Society, 1999.
- [5] Lowe D. Local feature view clustering for 3D object recognition[EB/OL].
- [6] 曹红杏. 基于特征的图像拼接技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [7] 刘景正. 基于特征的 SAR 影像匹配技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2007.
- [8] 于秋则. 合成孔径雷达图像匹配导航技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [9] 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 (S1545-598X), 2009, 6(2): 287-291.
- [10] 王琳. 高精度、高可靠的无人机影像全自动相对定向及模型连接研究[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2008.
- [11] 罗晓曼. 合成孔径雷达影像匹配技术研究[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2008.
- [12] 陈尔学, 李增元, 田昕, 等. 尺度不变特征变换法在 SAR 影像匹配中的应用[J]. 自动化学报, 2008, 34(8): 861-868.
- [13] 宋巨艳. RANSAC 算法及其在遥感图像处理中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [14] 孙艳丽, 等. SIFT 在高分辨率 SAR 图像自动配准中的性能分析[J]. 电子设计工程, 2011, 19(7): 180-183.
- [15] 杨朝辉, 陈鹰, 邵永社, 等. 基于 SIFT 特征的合成孔径雷达景象匹配方法[J]. 计算机应用, 2008, 28(9): 2404-2406.

Matching of Airborne SAR Images Based on a Combination of SIFT Algorithm with Mismatching Points Eliminated Algorithm

JIANG Wencong^{1*}, ZHANG Jixian¹, CHENG Chunquan¹ and LIANG Yong²

(1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China; 2. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China)

Abstract: Success rate, correct rate and precision of SAR image matching are usually low, so it indirectly affects the subsequent application of SAR images. SIFT feature is the local feature of the image, and it remains invariance of the rotation, scale and luminance variation; it also maintains a certain degree of stability of the viewing angle variation, the affine transformation and the noise. The stable features are extracted by using SIFT algorithm which is applied to airborne SAR image matching. AS 2D homography transform is the model of the RANSAC algorithm, four pairs of points at least are used to calculate 2D homography transform model parameters. RANSAC algorithm is a kind of robust parameter estimation method to obtain the effective sample data. The mismatching points are eliminated by using the RANSAC algorithm based on 2D homography transform. Based on VC++ and OpenCV programming, three sets of different kinds of airborne SAR image data are selected to complete matching experiment of airborne SAR image in which SIFT algorithm combined with error eliminated algorithm is used. The result shows that for airborne SAR images of artificial buildings and natural vegetation, SIFT algorithm can be used to effectively extract numerous stable matching points and the correct rate is high; for airborne SAR images of lack of texture information, SIFT algorithm can be used to extract a small amount of stable matching points and the correct rate is obviously lower than the former. In a word, SIFT algorithm can be used to extract the stable matching points in the airborne SAR image matching, and the mismatching points are effectively eliminated by using RANSAC algorithm based on 2D homography transform, so the correct rate and precision of matching is greatly improved.

Key words: SIFT algorithm; RANSAC algorithm; 2D homography transform; airborne SAR image; matching

*Corresponding author: JIANG Wencong, E-mail: wenconghappy@163.com