

引文格式: 李东宸, 向文豪, 党倩楠, 等. 均匀分布与结构描述 ASIFT 相结合的 SAR 与可见光图像配准算法[J]. 测绘学报, 2020, 49(12): 1583-1590. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20190324.
LI Dongchen, XIANG Wenhao, DANG Qiannan, et al. SAR and optical images registration using uniform distribution and structure description-based ASIFT[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(12): 1583-1590. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20190324.

均匀分布与结构描述 ASIFT 相结合的 SAR 与可见光图像配准算法

李东宸¹, 向文豪¹, 党倩楠², 吴 艳²

1. 中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094; 2. 西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071

SAR and optical images registration using uniform distribution and structure description-based ASIFT

LI Dongchen¹, XIANG Wenhao¹, DANG Qiannan², WU Yan²

1. Systems engineering research institute, Beijing 100094, China; 2. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: Aiming at the problems of nonlinear gray difference, speckle noise and different imaging viewpoints in SAR and optical image registration, this paper presents a SAR and optical images registration using uniform distribution and structure description-based ASIFT. In the proposed algorithm, firstly, the guided scale space is constructed by guided filter to achieve noise suppression and edge preservation. In the feature extraction stage, the phase congruency is utilized due to the nonlinear gray difference, and combined with scale space gridding to extract from images for the uniform feature points. In the feature description stage, the consistency gradient magnitude and orientation of SAR and optical image are calculated by extended phase congruency method, which improves the accuracy of the main orientation and descriptor. At last, Optimal-RANSAC is used to establish feature descriptor matching to achieve effective registration. The simulation experiment and analysis on four pairs of real images show that the proposed algorithm has more accurate registration accuracy than SAR-SIFT and traditional ASIFT.

Key words: SAR image; optical image; uniform distribution; structural information of phase congruency; ASIFT algorithm

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(No. 61772390)

摘 要: 针对 SAR 与可见光图像配准中存在的非线性灰度差异与斑点噪声, 同时考虑不同的成像视角问题, 提出了基于均匀分布与结构描述 ASIFT 的 SAR 与可见光图像配准算法。该算法首先采用引导滤波建立引导尺度空间以达到噪声抑制与边缘保持, 在特征点提取阶段, 由于非线性灰度差异引入相位一致性强度信息, 并与尺度空间网格划分相结合, 指导筛选图像中均匀特征点的获取; 然后在特征描述阶段, 引入扩展相位一致性方法计算 SAR 与可见光图像的一致性梯度幅值和方向, 提高了主方向和描述符的准确性; 最后利用 Optimal-RANSAC 进行特征描述符匹配实现有效配准。通过对 4 组实测图像进行试验及结果分析, 证明该算法相比 SAR-SIFT 与传统 ASIFT 算法具有更准确的配准精度。

关键词: SAR 图像; 可见光图像; 均匀分布; 相位一致性结构信息; ASIFT 算法

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2020)12-1583-08

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61772390)

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 具有全天时全天候的成像优势, 能够穿透云层和雾霾等的遮挡, 突破光学成像的限制。可见光遥感图像在良好的成像条件下, 可获得地面目标丰富的纹理与光谱信息。因此, 通过有效的

多模态遥感影像配准与融合技术, 能够弥补单一影像源的不足, 实现多源影像信息的优势互补, 成为当今遥感影像处理领域的一个重要研究课题。

目前图像配准方法主要分为基于灰度信息和基于点特征的图像配准方法。基于灰度信息的配

准方法计算复杂度高,极易陷入局部极小值,其中比较经典的包括归一化互相关系数^[1]、互信息^[2-3]等方法。基于点特征的对准方法通过提取待对准图像对之间的特征点来建立可靠的特征匹配关系,如 Harris 角点^[4]、SIFT 特征^[5]、扩展的 SURF 描述符^[6]等。其中尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)算法由于对尺度、旋转和光照变化的不变性在光学图像对准中得到了广泛的应用^[7-10],但其应用于 SAR 图像对准仍存在较多问题,其相关研究仍然较少。在 SAR 图像对准领域,由于斑点噪声的干扰^[11-14],国内外学者提出了一些改进算法^[15-20]。其中文献^[16]提出了 SAR-SIFT 算法,该算法通过 ROEWA 算子计算 SAR 图像的梯度幅值和方向,避免了 SAR 图像噪声对准准的影响。文献^[20]采用非线性扩散构建尺度空间,采用分块策略提取均匀分布的特征点,使用加权相位一致性结构图构建特征点描述符,实现了有效的对准精度。但以上算法对存在视角差异的 SAR 图像对准,常会失配或对准精度下降。对此,文献^[21]在 SIFT 的基础上提出了一种完全仿射尺度不变特征变换(affine-scale invariant feature transform, ASIFT)算法。该算法的核心思想就是建立全仿射变换分解数学模型,模拟相机视角变化对图像带来的仿射形变,以足够的精度模拟由摄像机光轴方向变化引起的所有畸变,之后沿用 SIFT 算法的思想进行归一化参数和模拟尺度缩放。由于模拟了所有可能的仿射形变,ASIFT 相比 SIFT 具有更好的对准效果。但传统 ASIFT 算法只是针对可见光图像的对准。对于存在视角差异的 SAR 和可见光图像对准的问题,本文尝试在 ASIFT 的框架下,提出一种均匀分布和结构描述 ASIFT 相结合的 SAR 与可见光图像对准算法。

1 均匀分布与结构描述 ASIFT 相结合的 SAR 与可见光图像对准算法

SAR 与可见光图像虽然非线性灰度差异较大,但有着共同的结构信息,由于相位一致性(phase congruency, PC)^[22]特征对光照、灰度等变化具有较强的不变性,能很好地捕获 SAR 与可见光图像共存的结构信息。本文提出一种均匀分布与结构描述 ASIFT 相结合的 SAR 与可见光图像对准算法。该算法依据 ASIFT 算法框架,考虑到 SAR 图像的斑点噪声对准准的影响,分别采用

引导滤波(guided image filter, GIF)^[23]与高斯滤波来构造 SAR 与可见光图像的引导尺度空间(guided image scale space, GISS)与高斯尺度空间(Gaussian scale space, GSS),在特征点提取阶段,通过引入相位一致性强度值来指导筛选获取足够数量均匀分布的稳定特征点;在特征描述阶段,利用扩展的相位一致性方法计算 SAR 与可见光图像的一致性梯度幅值和方向,以此获得的结构信息更加适合处理多模态对准中的非线性灰度差异,提高主方向和描述符的准确性;最后,在特征描述符匹配环节,利用最近邻与次近邻比值(nearest neighbor distance ratio, NNDR)算法^[5]与最优化随机采样一致性(Optimal-RANSAC)算法^[24],对粗糙匹配点对集合进行筛选,计算正确的变换模型参数实现有效对准。具体算法流程如图 1 所示,其中加黑粗虚线框中内容为本文算法的创新部分。

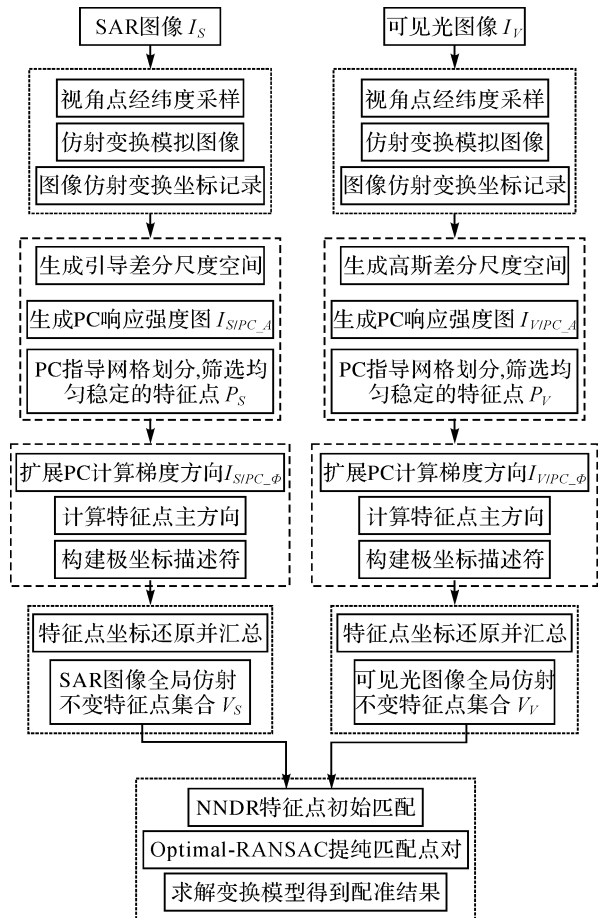


图 1 均匀分布与结构描述 ASIFT 相结合的 SAR 与可见光图像对准算法流程

Fig. 1 Flowchart of SAR and optical images registration using uniform distribution and structure description-based ASIFT

1.1 基于相位一致性强度指导筛选的均匀分布特征点检测方法

SAR 图像采用原始的 ASIFT 算法中的高斯尺度空间(GSS),不能抑制噪点,容易形成误匹配。在 SAR 与可见光图像配准中,本文对 SAR 图像引入了引导滤波代替高斯滤波以达到抑制噪声与保持边缘的作用,可见光图像则仍采用 GSS,处理流程与 SAR 图像相同。定义 SAR 图像为 $I_S(x, y)$,可见光图像为 $I_V(x, y)$,具体以 SAR 图像 $I_S(x, y)$ 来阐述,SAR 图像的引导尺度空间(GISS)构造通过改变邻域窗口半径 r ,保持 ξ 为不变常数,具体 GISS 被分为 G 组、 L 层,其中第 g 组第 l 层尺度图像的尺度值为 $r = \sigma$,参数 σ 可由式(1)计算得出

$$\sigma_{gl} = \sigma_0 \cdot 2^{g-1 + \frac{l}{L}}, \quad g \in [1, 2, \dots, G] \quad (1)$$

$$l \in [1, 2, \dots, L]$$

式中, σ_0 为初始尺度; g 为组索引; l 为层索引。

基于式(1),SAR 图像的引导尺度空间中两个相邻尺度的图像可由式(2)表示

$$\left. \begin{aligned} L(x, y; \sigma_{gl}) &= I_S(x, y) * GF(x, y; \sigma_{gl}, \xi) \\ L(x, y; \sigma_{g(l+1)}) &= I_S(x, y) * GF(x, y; \sigma_{g(l+1)}, \xi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $*$ 为卷积运算; $GF(x, y; \sigma_{gl}, \xi)$ 为引导滤波核函数。其定义如下

$$GF_{ij}(I_S) = \frac{1}{|\omega|^2} \sum_{k:(i,j) \in \omega_k} \left(1 + \frac{(I_{S_i} - \mu_k)(I_{S_j} - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \xi} \right) \quad (3)$$

式中, $L(x, y; \sigma_{gl})$ 为引导滤波后的第 g 组第 l 层尺度空间的图像; μ_k 和 σ_k^2 分别表示 I_S 在窗口 ω_k 中的均值和方差; $|\omega|$ 是窗口 ω_k 中的像素点总数; I_{S_i} 和 I_{S_j} 是相邻两个像素点的值; ξ 是一个惩罚项。以上两个相邻尺度的图像相减即可获取引导差分尺度空间(guided differential scale space, GDSS),在此引导差分尺度空间进行特征点检测,以确保尺度空间的不同组(g)不同层(l)上均有一定数目的特征点^[25]。

由于 SAR 与可见光图像之间的非线性灰度差异,更重要还要解决特征点在图像坐标空间的不均匀分布问题。本文引入相位一致性强度值来指导筛选获取足够数量均匀分布的稳定特征点。具体步骤如下。

(1) 计算 SAR 图像 $I_S(x, y)$ 的相位一致性强度值 I_{S/PC_A} ,计算公式如下

$$I_{S/PC_A}(x, y) = \frac{\sum_n W(x, y) [A_n(x, y) \Delta \Phi_n(x, y) - T]}{\sum_n A_n(x, y) + \epsilon} \quad (4)$$

$$\Delta \Phi_n(x, y) = \cos(\phi_n(x, y) - \bar{\phi}(x, y)) - |\sin(\phi_n(x, y) - \bar{\phi}(x, y))|$$

式中, $A_n(x, y)$ 、 $\phi_n(x, y)$ 分别表示滤波器响应的幅值和相位; (x, y) 表示图像中该点的坐标; 下标 n 表示滤波器尺度; $W(x, y)$ 是给定频率分量的权重因子; $\bar{\phi}(x, y)$ 是加权平均相位; T 是噪声阈值; ϵ 是一个较小的常量以避免上式中分母为零的情况发生。

(2) 对尺度空间图像进行规则的网格划分,则每个网格的对应 $I_S(x, y)$ 的 PC 值为 pc_i ,根据网格中初始特征点数目,平均对比度值以及平均 PC 强度值的加权信息来计算每个网格中均匀分布的特征点数的上限 f_cell_i ,计算公式如下

$$f_cell_i = F_{gl} [W_f \cdot M_f + W_{pc} \cdot M_{pc} + (1 - W_f - W_{pc}) \cdot M_R] \quad (5)$$

式中, F_{gl} 表示不同组(g)不同层(l)上均有一定数目的特征点; M_f 、 M_{pc} 、 M_R 表示第 i 个网格的原始特征点数、平均 PC 强度值和平均对比度响应值, $M_f = \frac{f_i}{\sum_i f_i}$, $M_{pc} = \frac{pc_i}{\sum_i pc_i}$, $M_R = \frac{R_i}{\sum_i R_i}$; W_f 和 W_{pc} 分别是该单元格子原始特征点数和平均 PC 强度值的权重因子; f_i 表示该单元格子原始特征点数; pc_i 表示该单元格子内的特征点的 PC 强度值; R_i 表示该单元格子内的特征点的 GDSS 响应值。

(3) 在 SAR 图像中,噪声点或不稳定特征点的 PC 信息强度一般较弱,而稳定特征点的 PC 信息强度则相对较高。若对每一个单元格子内的所有候选特征点根据 $pc_i(x, y)$ 强度值排序,保留排名靠前的 f_cell_i 则可作为该单元格子内的筛选后的特征点,之后对筛选后的特征点汇总,得到第 g 组第 l 层的特征点 P_{gl} ,进而得到所有的特征点集合,如此即可实现特征点在坐标空间内的均匀分布。计算公式如下

$$P_S = \bigcup_{g=1}^G \bigcup_{l=1}^L P_{gl} \quad (6)$$

式中, P_{gl} 为第 g 组第 l 层的特征点; P_S 为 SAR 图像特征点检测的集合。

图 2 分别展示了 SAR 与可见光图像经过

SAR-SIFT、ASIFT 算法和本文算法后特征点提取的空间分布对比,从结果可看出,使用本文算法得到的特征点由于引入相位一致性强度值对网格控制筛选后,在图像场景相对平滑的区域也有一定数目的特征点分布,实现了均匀分布的稳定特征点。

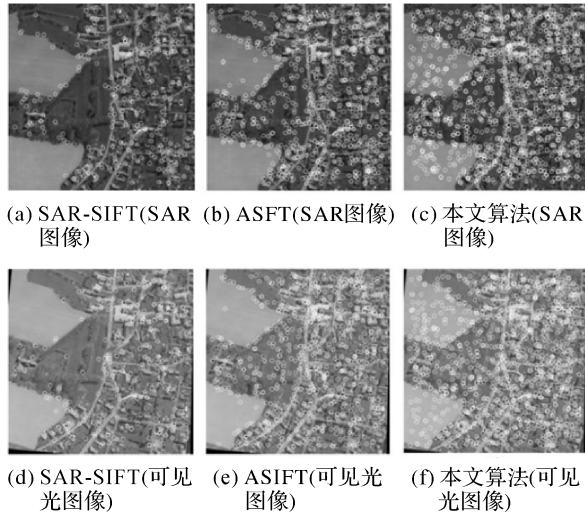


图 2 3 种算法的特征点提取空间分布对比

Fig.2 Comparison of spatial distribution of feature point extraction by three algorithms

1.2 基于相位一致性结构信息的主方向计算和描述符构造

在特征描述阶段,采用相位一致性描述的结构信息计算 SAR 与可见光图像的梯度幅值和方向信息,以解决非线性灰度差异问题,提高主方向和描述符的准确性。具体以 SAR 图像来阐述,可见光图像与之相同。

1.2.1 SAR 图像相位一致性方向信息的计算

通过对相位一致性模型进行扩展^[26],建立 SAR 图像的相位一致性模型的方向表示,相位一致性的方向信息分布图见图 3。具体的方向信息计算公式如下

$$a = \sum_{\theta} (o_n(x, y, \theta) \cos(\theta)) \quad (7)$$

$$b = \sum_{\theta} (o_n(x, y, \theta) \sin(\theta)) \quad (8)$$

$$I_{S/PC_{\phi}}(x, y) = \arctan(b, a) \quad (9)$$

式中, $o_n(\theta)$ 是奇对称小波 M_n^o 在 SAR 图像 I_s 各个方向 θ 的卷积结果,即 $o_n = I_s(x, y) * M_n^o$; a 、 b 分别为图像在坐标点 (x, y) 的水平方向和竖直方向导数; $I_{S/PC_{\phi}}$ 为该点的相位一致性方向信息。

1.2.2 主方向计算和描述符构建

在主方向计算时,利用关键点所在引导尺度空间中邻域窗口内像素的一致性梯度幅值 I_{S/PC_A} 和方向 $I_{S/PC_{\phi}}$ 的分布特性,计算关键点周围邻域的一致性梯度方向直方图,选择峰值最大处对应的方向为特征点主方向,将直方图中峰值大于主方向峰值 80% 的方向作为辅助方向,以提高算法的稳定性。

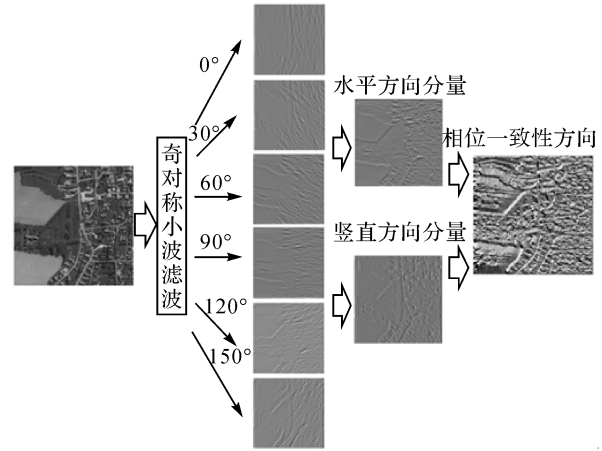


图 3 SAR 图像的相位一致性方向信息分布

Fig.3 Distribution of the orientation information of phase congruency of SAR image

在描述符构建时,选取特征点周围一定半径内的图像作为其邻域块,将该邻域块旋转至主方向之后,对邻域块内的像素点,根据其距离中心点的远近程度,在极坐标系下划分至不同的扇形网格内,这样就得到 17 个网格区域。对每个扇形子区域和中心圆内的每个像素点,利用各自对应的一致性梯度算法计算其梯度幅值 I_{S/PC_A} 和梯度方向 $I_{S/PC_{\phi}}$,然后将子块内的梯度值分配至 8 个方向,最后将 17 个子区域内的各个方向的梯度信息串联并归一化之后,得到 136 维的一致性梯度统计结构描述符。

实现特征点描述符的构建之后,分别得到 SAR 与可见光图像的特征向量集合(包括坐标及尺度信息) V_s 和 V_v ,需要通过特征向量描述符之间的相似性度量准则建立正确的匹配关系。本文算法先利用 NNDR 算法建立初始的匹配关系,之后利用 Optimal-RANSAC 算法对其中的错误匹配点对去除,通过保留的正确匹配点对,计算变换模型得到配准结果。

2 试验及结果分析

针对 SAR 与可见光图像配准,本文采用了存在不同程度视角差异的 4 组实测图像进行仿真试验,SAR 图像为参考图像,可见光图像为待配准图像,编程环境为 Matlab 2016b,运行环境为双 2.4 GHz CPU,64 GB 内存。为了验证本文算法的有效性,在仿真试验中引入了 SAR-SIFT 算法和 ASIFT 算法,并与本文算法的仿真试验结果进行了对比。

2.1 实测图像数据来源

本文选择了 4 组各有特色的 SAR 与可见光

实测图像进行配准试验,SAR 与可见光图像配准试验的实测图像信息见表 1。实测图像 1 中,SAR 与可见光图像间存在着较大程度的视角,由于可见光图像的传感器观测视角较低,可见光图像相比 SAR 图像,在上半部分存在较大程度的挤压而变窄;实测图像 2 中,SAR 图像中存在较大的斑点噪声,而可见光图像较为模糊;实测图像 3 中,图像间存在明显的多视角与形变,图像内容较为复杂;实测图像 4 中,图像场景是密集的住宅区域,可见光图像自上而下存在不同程度的横向挤压而呈现形变。

表 1 SAR 与可见光实测图像数据集

Tab.1 Real SAR and optical image data sets

数据集	传感器	图像尺寸	分辨率/m	获取区域	
实测图像 1	SAR 图像	TerraSAR-X	640×480	3	俄罗斯某区域
	可见光图像	Google Earth	690×474	3	
实测图像 2	SAR 图像	TerraSAR-X	640×636	16	印度某区域
	可见光图像	Google Earth	637×634	16	
实测图像 3	SAR 图像	TerraSAR-X	640×480	3	德国某区域
	可见光图像	Google Earth	690×474	3	
实测图像 4	SAR 图像	TerraSAR-X	580×470	3	美国某区域
	可见光图像	Google Earth	650×487	3	

2.2 试验结果对比及分析

本文采用 SAR-SIFT、ASIFT 及本文算法,对表 1 中的 4 组实测 SAR 与可见光图像进行了配准试验对比,见图 4,3 种算法的性能定量对比表,见表 2。对比分析从主观评价和客观评价两个方面进行,对于主观评价,本文采用轮廓重叠图作为配准精度的评价准则,即将配准结果的轮廓直接叠加在参考图像上,通过人眼目测轮廓重叠的好坏来判断配准的效果;对于客观评价,即采用正确匹配点数(correct matching number,CMN)和均方根误差 RMSE 作为配准精度的定量评价准则。RMSE 的计算公式如下

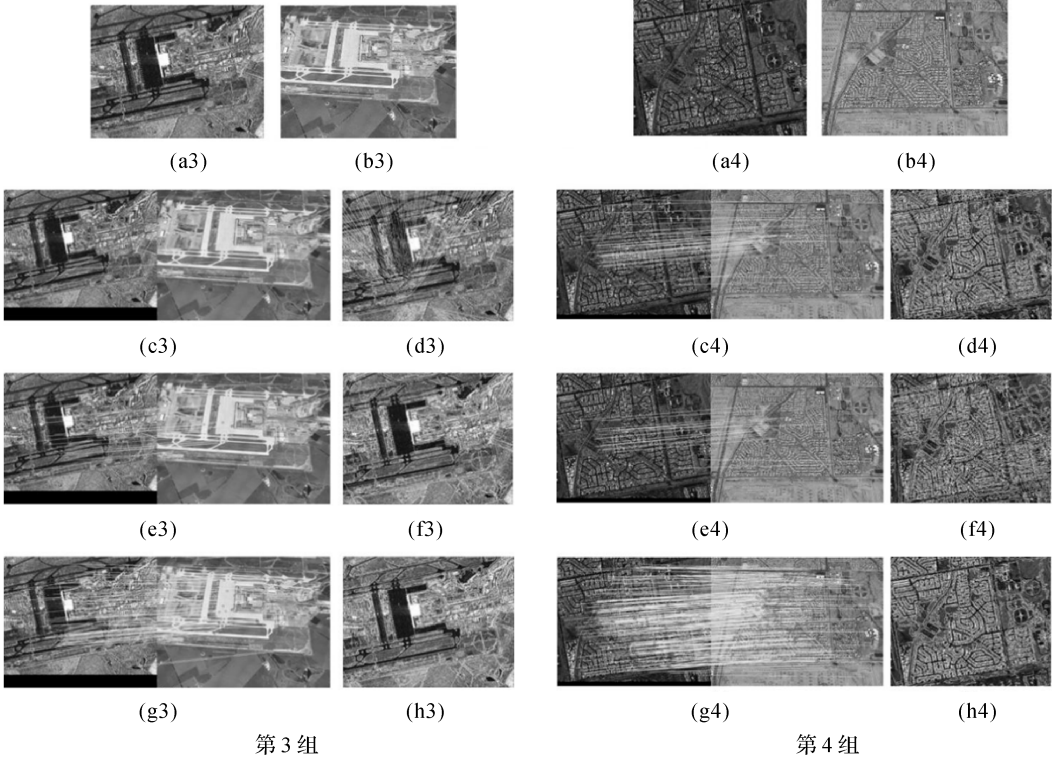
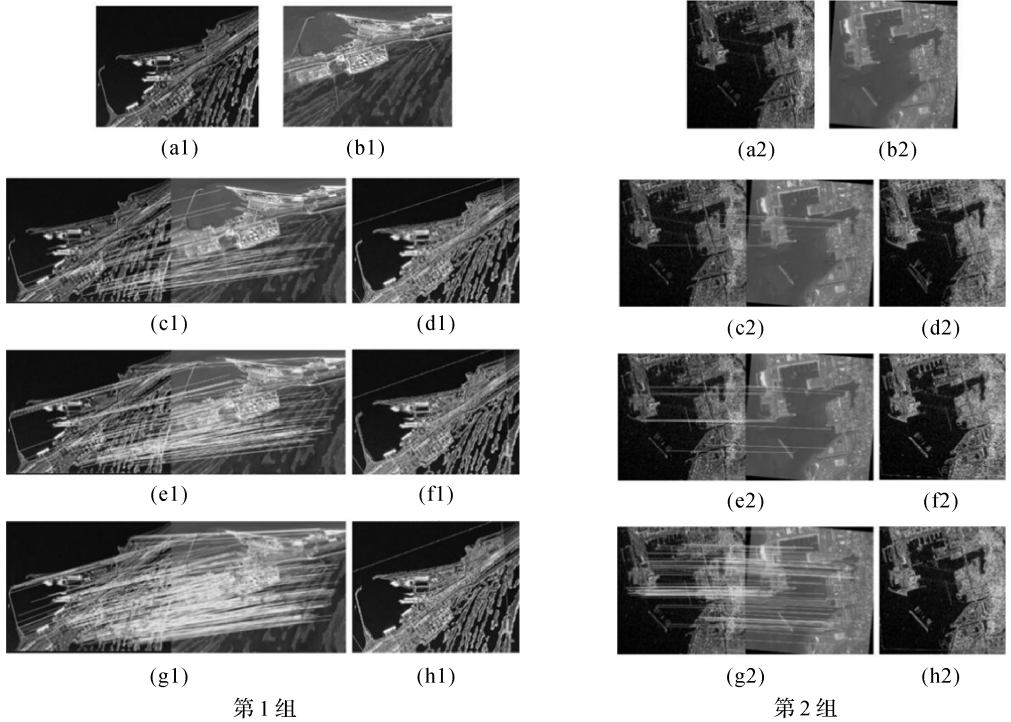
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(x_R^i - x_{F'}^i)^2 + (y_R^i - y_{F'}^i)^2]}{N}} \quad (10)$$

式中,参考图像 R 中的 N 个点记为 (x_R^i, y_R^i) , $i = 1, 2, \dots, N$,选取配准结果图像 F' 中对应的 N 个点,记为 $(x_{F'}^i, y_{F'}^i)$, $i = 1, 2, \dots, N$,式(10)计算得到的均方根误差的值越低,则配准的精度越高,效果越好。

在对比试验中,为公平起见,本文算法和

ASIFT 算法的参数设置一致,主要取决于两个参数,即由经度(水平角度) φ 和纬度(垂直角度) θ 来决定,经度随纬度变化,步长为 $\Delta\varphi = 72 \text{ m/t}$, m 为使 $\Delta\varphi < 180$ 的最后一个整数,倾斜角 $t \geq 1$,由 $t = 1/\cos\theta$ 决定,其中 $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$, $\varphi \in [0, \pi)$ 。

从主观评价分析,对于实测图像 1 的试验结果(见图 4 的第 1 组),使用 3 种算法均可获得一定数目的正确匹配连线,但本文算法的正确匹配连线最多;而对于实测图像 2、3 的试验结果(见图 4 的第 2 组和第 3 组),SAR-SIFT 算法由于特征点数目不足而匹配失效,采用传统 ASIFT 和本文算法均可实现正确匹配,而本文算法比 ASIFT 算法的正确匹配连线更多;对于实测图像 4 的试验结果(见图 4 的第 4 组),传统 ASIFT 算法由于正确匹配点对和均匀分布不足而出现失配现象,采用本文算法比 SAR-SIFT 算法的正确匹配连线更多;综上所述,本文算法对以上 4 组实测图像均能实现有效配准,并且轮廓重叠图吻合最好,说明算法有效考虑并解决了 SAR 乘性斑点噪声、视角的差异、场景的复杂度、形变等问题对配准的影响。



注:(a)SAR 图像;(b)可见光图像;(c)(e)(g)分别为 SAR-SIFT、ASIFT 和本文算法的对应匹配点;(d)(f)(h)分别为 SAR-SIFT、ASIFT 和本文算法的轮廓重叠图。

图 4 SAR 与可见光图像配准结果对比

Fig.4 Registration results of SAR-optical images

从客观评价分析,3 种算法的配准结果在 CMN 与 RMSE 上都呈递进状态,本文算法配准精度明显最优(见表 2),主要原因是 3 种不同算

法针对的问题不同,SAR-SIFT 主要解决 SAR 图像斑点噪声对配准带来的干扰问题,没有考虑非线性灰度差异问题;传统 ASIFT 算法主要用于解

决光学图像中视角差异的问题,但它不能适用于 SAR 图像的配准问题,所以相比传统 ASIFT 和 SAR-SIFT 算法,本文算法在考虑视角差异情况下,采用引导尺度空间抑制噪声,引入相位一致性结构信息指导获取稳定均匀特征点,利用扩展的相位一致性方法计算 SAR 与可见光图像的一致性梯度幅值和方向信息,以解决非线性灰度差异问题,提高了主方向和描述符的准确性,获得了更有效的配准精度,使得本文算法更具稳健性。本

文算法由于考虑以上问题其耗时相对 SAR-SIFT 有所上升,原因在于 SAR-SIFT 在原图像上提取特征点的数目较少,但本文算法相比传统 ASIFT 算法耗时却有一定程度的下降,主要归因于对半球模型参数的调整和模拟图像上均匀提取的特征点数目有所下降,因此在提高特征点质量的同时降低对特征点匹配环节的耗时,提高了配准的实时性。

表 2 本文算法与 SAR-SIFT 和 ASIFT 的性能对比

Tab.2 Quantitative comparison of the proposed method with SAR-SIFT and ASIFT

数据集	配准算法	CMN	RMSE/像素	T/s
实测图像 1	SAR-SIFT	58	3.0	16.8
	ASIFT	121	2.6	190.2
	本文算法	236	1.8	139.3
实测图像 2	SAR-SIFT	5	误配	20.6
	ASIFT	13	2.5	90.8
	本文算法	117	1.8	72.1
实测图像 3	SAR-SIFT	0	误配	16.9
	ASIFT	23	3.7	141.2
	本文算法	129	2.2	112.3
实测图像 4	SAR-SIFT	45	4.1	34.5
	ASIFT	19	误配	169.9
	本文算法	283	1.6	137.4

3 结 论

本文针对 SAR 与可见光图像配准中的非线性灰度差异所造成的特征点提取不均匀, SAR 斑点噪声的干扰,同时考虑成像时可能存在的视角差异,从相位一致性的结构信息描述出发,提出均匀分布与结构描述 ASIFT 相结合的 SAR 与可见光图像配准方法。本文的创新工作主要在于对 SAR 图像采用引导尺度空间以抑制噪声,采用相位一致性强度指导筛选和尺度空间网格划分相结合的方式从图像中获取稳定均匀特征点;采用扩展的相位一致性方法计算 SAR 与可见光图像的一致性梯度幅值和方向,避免图像间较大的非线性灰度差异,并以此提高传统 ASIFT 算法主方向和描述符的正确性。通过 4 组 SAR 与可见光实测图像配准试验,验证本文算法的有效性。相比 SAR-SIFT 算法与传统 ASIFT 算法,本文算法具有更高的匹配成功率和配准精度。

参考文献:

[1] KANEKO S, SATOH Y, IGARASHI S. Using selective

correlation coefficient for robust image registration[J]. Pattern Recognition, 2003, 36(5): 1165-1173.

[2] FAN Xiaofeng, RHODY H, SABER E. A spatial-feature-enhanced MMI algorithm for multimodal airborne image registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(6): 2580-2589.

[3] LIANG Jiayong, LIU Xiaoping, HUANG Kangning, et al. Automatic registration of multisensor images using an integrated spatial and mutual information (SMI) metric[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 603-615.

[4] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detection[C]//Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester: [s.n.], 1988: 147-152.

[5] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.

[6] 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 Nan, SUN Quansen, GENG Leilei, et al. An extended SURF descriptor and its application in remote sensing images registration[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(3): 383-388.

- [7] XU Qizhi, ZHANG Yun, LI Bo. Improved SIFT match for optical satellite images registration by size classification of blob-like structures[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5): 451-460.
- [8] LÜ Guohua, TENG S W, LU Guojun. Enhancing SIFT-based image registration performance by building and selecting highly discriminating descriptors [J]. Pattern Recognition Letters, 2016, 84: 156-162.
- [9] PAUL S, PATI U C. Remote sensing optical image registration using modified uniform robust SIFT[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(9): 1300-1304.
- [10] HOU Yi, ZHOU Shilin. Robust point correspondence with gabor scale-invariant feature transform for optical satellite image registration [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, 46(7): 395-406.
- [11] 岳春宇, 江万寿. 基于最大后验和非局域约束的非下采样轮廓波变换域 SAR 图像去噪方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(1): 59-64.
- YUE Chunyu, JIANG Wanshou. An algorithm of SAR image denoising in nonsubsamped contourlet transform domain based on maximum a posteriori and non-local restriction[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(1): 59-64.
- [12] 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.
- [13] WANG Feng, YOU Hongjian, FU Xingyu. Adapted anisotropic Gaussian SIFT matching strategy for SAR registration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(1): 160-164.
- [14] DELEDALE C A, DENIS L, TUPIN F, et al. NL-SAR: a unified nonlocal framework for resolution-preserving (Pol) (In)SAR denoising[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(4): 2021-2038.
- [15] CHEN Tianze, CHEN Limin, SU Yi. A SAR image registration method based on pixel migration of edge-point feature[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(5): 906-910.
- [16] DELLINGER F, DELON J, GOUSSEAU Y, et al. SAR-SIFT: a SIFT-like algorithm for SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(1): 453-466.
- [17] ZHU Hao, MA Wenping, HOU Biao, et al. SAR image registration based on multifeature detection and arborescence network matching[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(5): 706-710.
- [18] FAN Jianwei, WU Yan, WANG Fan, et al. New point matching algorithm using sparse representation of image patch feature for SAR image registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(3): 1498-1510.
- [19] 闫利, 王紫琦, 叶志云. 顾及灰度和梯度信息的多模态影像配准算法[J]. 测绘学报, 2018, 47(1): 71-81. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170368.
- YAN Li, WANG Ziqi, YE Zhiyun. Multimodal image registration algorithm considering grayscale and gradient information[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(1): 71-81. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.
- [20] FAN Jianwei, WU Yan, LI Ming, et al. SAR and optical image registration using nonlinear diffusion and phase congruency structural descriptor [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(9): 5368-5379.
- [21] MOREL J M, YU Guoshen. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2009, 2(2): 438-469.
- [22] KOVESI P. Image features from phase congruency[J]. Videre: Journal of Computer Vision Research, 1999, 1(3): 1-26.
- [23] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaoou. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [24] HAST A, NYSJÖ J, MARCHETTI A. Optimal RANSAC towards a repeatable algorithm for finding the optimal set [J]. Journal of WSCG, 2013, 21(1): 21-30.
- [25] SEDAGHAT A, MOKHTARZADE M, EBADI H. Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4516-4527.
- [26] YE Yuanxin, SHAN Jie, BRUZZONE L, et al. Robust registration of multimodal remote sensing images based on structural similarity[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(5): 2941-2958.

(责任编辑:张艳玲)

收稿日期: 2019-08-21

修回日期: 2020-06-08

第一作者简介: 李东宸(1987—),男,博士,研究方向为雷达信号处理与遥感应用。

First author: LI Dongchen (1987—), male, PhD, majors in radar signal processing and remote sensing application.

E-mail: charliedc@163.com

通信作者: 吴艳

Corresponding author: WU Yan

E-mail: ywu@mail.xidian.edu.cn