

耦合相位一致性与互信息的 光学影像与 SAR 影像配准方法

薛庆¹, 杨树文^{1,2,3*}, 闫恒¹, 臧丽日¹, 付昱凯¹

¹兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;

²地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070;

³甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070

摘要 针对光学和 SAR 影像间非线性辐射差异和乘性噪声导致匹配效果不佳的问题, 提出了一种耦合相位一致性与互信息的光学影像与 SAR 影像自动配准方法。首先, 基于相位一致性矩特征图在参考影像上检测均匀分布稳定的特征点。其次, 构建一种新的相似性测度最大索引图互信息, 采用模板匹配策略实现同名点快速识别。最后, 通过边缘化样本共识算法剔除外点, 并利用分段线性变换模型几何纠正, 实现光学-SAR 影像间的精配准。对 4 组中高分辨率光学与 SAR 影像进行了实验, 实验结果表明, 所提方法相较于其他先进方法具有更高的配准精度。

关键词 遥感; 光学和 SAR 影像; 影像配准; 非线性辐射差异; 相位一致性; 互信息

中图分类号 TP237

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2428003

Optical and SAR Image Registration Method of Coupling Phase Congruency and Mutual Information

Xue Qing¹, Yang Shuwen^{1,2,3*}, Yan Heng¹, Zang Liri¹, Fu Yukai¹

¹Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

²National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, Gansu, China;

³Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, Gansu, China

Abstract Focusing on the problem of poor matching due to nonlinear radiation difference and speckle noise between optical and SAR images, an automatic registration method of coupling phase congruency and mutual information is proposed. First, the stable feature points with uniform distribution are detected from the reference image based on the phase congruency moment feature map. Second, a new similarity measure called maximum index map mutual information is constructed, and it is used to achieve corresponding points by employing a template matching strategy. Finally, the outliers are eliminated by marginalizing sample consensus algorithm and the geometric correction of piecewise linear transformation is used to realize high accuracy registration between images. The proposed method is verified by four sets of medium and high resolution optical and SAR images. The result indicates that the suggested approach has higher registration accuracy than other advanced methods.

Key words remote sensing; optical and SAR image; image registration; nonlinear radiation difference; phase congruency; mutual information

1 引言

随着传感器技术的快速发展与应用多样化, 光学

影像与 SAR 影像集成处理已成为近年来研究的热点与难点问题之一。将两种不同模态数据集成应用于影像融合^[1]、变化检测^[2]、影像拼接^[3]等是一个重要趋势,

收稿日期: 2021-10-09; 修回日期: 2021-10-14; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0504201)、国家自然科学基金(41761082, 42161069)

通信作者: *ysw040966@163.com

其关键技术是影像配准^[4-5]。然而,光学影像与 SAR 影像成像方式不同,存在显著的非线性辐射差异及几何畸变^[6]。因此,光学影像与 SAR 影像的高精度自动配准一直是个难题。

众多学者已对光学-SAR 影像配准方法展开了广泛研究。基于相似性测度误差平方和(SSD)、归一化积相关(NCC)的方法直接利用图像的灰度,对非线性辐射差异相当敏感,不适用于光学与 SAR 的配准^[7-8]。之后,基于互信息(MI)测度的相似性匹配方法被提出:如基于空间域互信息的相似性度量 SMI,采用蚁群优化算法对其进行优化^[9];文献[10]通过连续蚁群算法和互信息实现多传感器遥感图像配准;文献[11]提出了一种充分利用图像空间结构的梯度互信息(NGMI)配准算法,实现了光学与 SAR 的配准。上述方法表明,MI 对复杂的辐射差异具有一定鲁棒性,但基于梯度和灰度的 MI 在光学与 SAR 影像匹配中难以广泛应用。近年来,基于相位一致性(PC)^[12]的光学与 SAR 配准方法研究颇多:如文献[13]结合相位一致性和方向梯度直方图构建了相位一致性方向直方图(HOPC);文献[14]提出了一种结合非线性扩散和 PC 结构描述子的图像配准方法;为了解决光照差异、非线性辐射畸变等问题,文献[15]提出了一种新的相位一致性局部描述子用于多源遥感影像匹配;文献[16]提出了一种辐射特征不变算法,实现了光学与 SAR 影像配准。上述 PC 方法虽然实现了光学与 SAR 的配准,但也有不可忽视的局限性,如描述符和相似性测度的鲁棒性有待提高,而且它们大多基于单一算法,往往无法实现理想配准效果,因此耦合 PC 模型与 MI 方法非常有必要。

针对以上问题,本文提出了一种耦合 PC 和 MI 的光学影像与 SAR 影像自动配准方法。采用 PC 方法构建具有良好结构特征的叠加矩特征和抗辐射差异的最大索引图(MIM),其中矩特征在参考影像中提取均匀分布的特征点,最大索引图在 MI 方法的基础上构建一种新的相似性测度最大索引图互信息(MIM-MI),采用模板匹配进行同名点识别,实现光学与 SAR 影像的自动配准。

2 基于相似性测度 MIM-MI 的光学与 SAR 影像配准方法

实现光学与 SAR 影像配准的核心问题在于克服它们之间的非线性辐射差异,所提方法使用混合模型来解决该问题,总体流程如下:1)特征点检测。利用分块 Harris 在参考影像叠加矩图像上提取分布均匀的稳定特征点。2)同名点匹配。以 MIM-MI 作为相似性测度,在感测影像上通过模板匹配策略识别同名点,并剔除外点。3)影像配准。依据所获取的同名点构建不规则三角网,对感测影像进行逐三角网纠正,实现影像的高精度自动配准。实验总体流程图如图 1 所示。

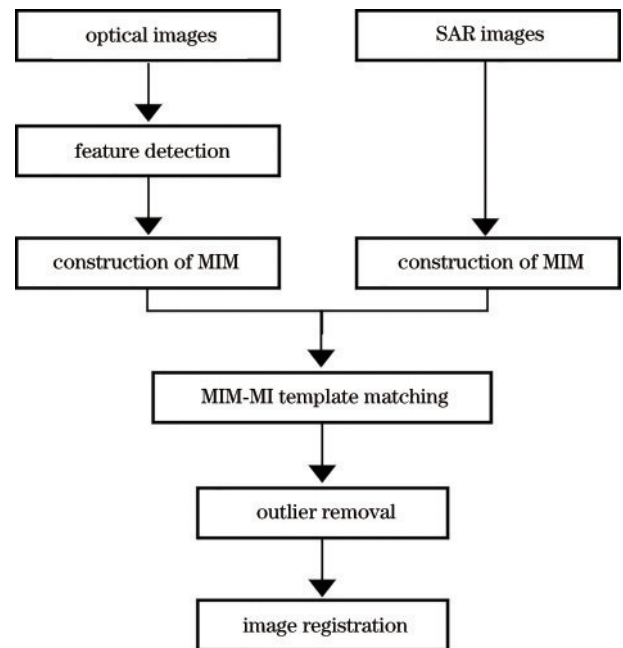


图 1 配准流程图

Fig. 1 Registration flow chart

2.1 特征点检测

光学与 SAR 影像配准精度取决于一定数量高度可重复的匹配点,虽然参考影像与感测影像进行了局部纠正,然而由于高分辨率多模遥感图像具有信息丰富、纹理特征复杂多变的特点,难以找到具有重复性、独特性和较强鲁棒性且分布均匀的特征点,尤其在光学与 SAR 影像匹配过程中乘性噪声的存在,对于同名点的寻找来说是困难的^[17]。考虑到这一问题,本研究仅在参考影像上提取均匀分布的特征点,采用滑动窗口来搜索同名点。

现有的特征检测算法大多依赖于图像梯度特征,梯度对辐射差异存在一定的敏感性。相位一致性理论是一种利用频域信息表达和描述图像的方法,与空间域基于梯度的特征检测方法不同。图像的相位信息对于光照、对比度、尺度等具有不变性,可以提取辐射差异较大图像中的显著结构特征,并且有很强的适应性和稳定性。因此,利用相位信息进行特征检测具有一定优越性。

在相位一致性算法中,采用 Log-Gabor 滤波器(LGF)对原始图像进行卷积计算以获得相位信息。给定一幅图像 I ,图像上任意一个像素点记为 $I(x, y)$,可以利用 LGF 获得偶部与奇部卷积分量:

$$\begin{aligned} [e_{s,o}(x, y), o_{s,o}(x, y)] &= [I(x, y) \times \\ & \text{LGF}_{s,o}^{\text{even}}, I(x, y) \times \text{LGF}_{s,o}^{\text{odd}}], \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\text{LGF}_{s,o}^{\text{even}}$ 和 $\text{LGF}_{s,o}^{\text{odd}}$ 为尺度 s 和方向 o 上的偶对称滤波器和奇对称滤波器。进一步,像素点 $I(x, y)$ 的幅值 $A_{s,o}(x, y)$ 和相位角 $\varphi_{s,o}(x, y)$ 分别为

$$A_{s,o}(x,y) = \sqrt{e_{s,o}(x,y)^2 + o_{s,o}(x,y)^2}, \quad (2)$$

$$\varphi_{s,o}(x,y) = \arctan[o_{s,o}(x,y), e_{s,o}(x,y)]. \quad (3)$$

则相位一致性的表达式为

$$PC(x,y) = \frac{\sum_o \sum_s W_o(x,y) [A_{s,o}(x,y) \bar{\varphi}_{s,o}(x,y) - T]}{\sum_o \sum_s A_{s,o}(x,y) + \epsilon}, \quad (4)$$

$$\Delta\varphi_{s,o}(x,y) = \cos[\varphi_{s,o}(x,y) - \bar{\varphi}_{s,o}(x,y)] - \left| \sin[\varphi_{s,o}(x,y) - \bar{\varphi}_{s,o}(x,y)] \right|, \quad (5)$$

式中: $PC(x,y)$ 表示像素点 $I(x,y)$ 处相位一致性的特征值, 是一个 0 到 1 的无量纲数字; $W_o(x,y)$ 为权重因子; 符号 $[\cdot]$ 表示当其值为正时, 所包含的量与自身相等, 否则为 0; T 为估计的噪声阈值; ϵ 为防止分母为 0 的常数; $\Delta\varphi_{s,o}(x,y)$ 表示相位差; $\bar{\varphi}_{s,o}(x,y)$ 为平均相位角度。

此外, 虽然相位一致性可以保持较好的结构特征, 但为了便于特征点检测, 需要获取相位一致性的最大矩与最小矩, 即获取随着方向 o 变化的相位一致性信息, 使用式(4)可独立计算每个方向上的相位一致性。因此, 根据方向角 θ_o 的不同, 可以计算获得 o 个相位一致性图 $PC(\theta_o)$ 。相位一致性的最大矩和最小矩的表

达式分别为

$$M_{\max} = \frac{1}{2} \left[a + c + \sqrt{b^2 + (a-c)^2} \right], \quad (6)$$

$$M_{\min} = \frac{1}{2} \left[a + c - \sqrt{b^2 + (a-c)^2} \right], \quad (7)$$

$$a = \sum_o [PC(\theta_o) \cos \theta_o]^2, \quad (8)$$

$$b = 2 \sum_o [PC(\theta_o) \cos \theta_o] \cdot [PC(\theta_o) \sin \theta_o], \quad (9)$$

$$c = \sum_o [PC(\theta_o) \sin \theta_o]^2. \quad (10)$$

尽管光学与 SAR 影像之间的辐射差异较大, 但边缘轮廓特征具有较好的相似性, 在边缘特征中检测特征点可以保证一定的重复率, 并且边缘特征上的特征点数量较多。本研究基于相位一致性模型获取参考影像的最大矩和最小矩信息, 其中最大矩 M_{\max} 反应影像边缘特征, 最小矩 M_{\min} 表现影像角点特征。将最大矩和最小矩叠加形成叠加矩特征图, 然后将参考影像的叠加矩特征图像划分为 $n \times n$ 个互不重叠的图像块, 之后分别在每个区域内采用 Harris^[18] 算子进行角点检测, 并按响应值从大到小排序, 选取一定数量的点作为待匹配关键点, 特征检测示意图如图 2 所示。所设计的特征点检测策略可以较好地避免特征点分布不均匀而产生的聚簇现象, 同时保证了特征点的数量和稳定性, 有利于后续同名点的识别。

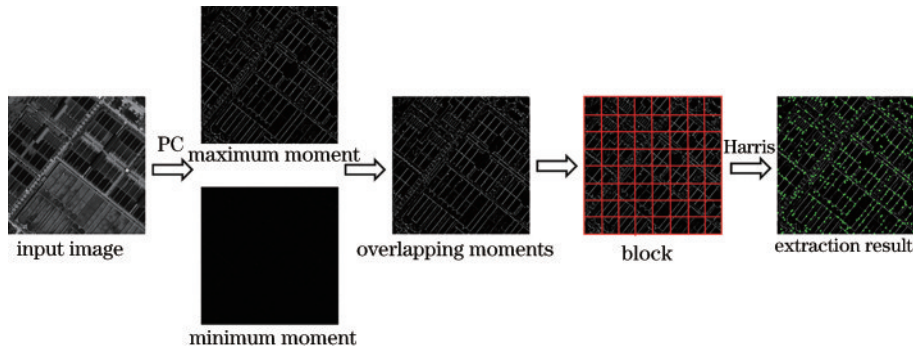


图 2 特征检测示意图

Fig. 2 Schematic of feature detection

2.2 同名点匹配

利用所设计的特征检测策略获取大量分布均匀的特征点后, 传统方法利用 MI 等作为相似性测度。MI 是源于信息论中一种度量, 通常用信息熵描述两个随机变量之间的统计相关性, 应用于影像匹配中主要衡量影像间相互包含的信息总量^[19]。依据此性质可知, 当两幅影像位于正确的匹配位置时, 其互信息值达到最大值, 然而 MI 利用图像原始的灰度信息、梯度信息进行配准, 在 SAR 影像中无法处理其噪声, 致使配准效果不理想甚至出现误配现象。为克服这个缺点, 所提方法使用一种新的相似性测度 MIM-MI, 将参考影像与感测影像分别利用相位一致性模型映射为 MIM,

之后直接统计光学影像与 SAR 影像的 MIM 互信息值:

$$MIM-MI(A_{MIM}, B_{MIM}) = H(A_{MIM}) + H(B_{MIM}) - H(A_{MIM}, B_{MIM}), \quad (11)$$

$$H(A_{MIM}) = - \sum_a p_A(a) \log p_A(a), \quad (12)$$

$$H(B_{MIM}) = - \sum_b p_B(b) \log p_B(b), \quad (13)$$

$$H(A_{MIM}, B_{MIM}) = - \sum_{a,b} p_{A,B}(a,b) \log p_{A,B}(a,b), \quad (14)$$

式中: $H(A_{MIM})$ 和 $H(B_{MIM})$ 分别代表 A_{MIM} 和 B_{MIM} 的熵值; $H(A_{MIM}, B_{MIM})$ 代表 A_{MIM} 和 B_{MIM} 的联合熵; $p_A(a)$ 和 $p_B(b)$ 是值分布概率; $p_{A,B}(a,b)$ 表示联合分布概率。

MIM是由LGF的卷积序列振幅 $A_{s,o}(x,y)$ 所构建的,其具有 s 个尺度和 o 个方向,并已在第2.1小节得到。将在同一方向 s 个尺度的 $A_{s,o}(x,y)$ 累加,获得LG卷积序列 $A_o(x,y)$:

$$A_o(x,y) = \sum_{n=1}^s A_{s,o}(x,y) \quad (15)$$

并将LG卷积层依次排列得到卷积序列 $\{A_o^w(x,y)\}_1^O$,其中 O 为小波方向个数,上标 $w=1,2,\dots$ 。最后,对于影像中的每一像素位置,获取其对应的像素值形成有序数组,求取该数组的最大值并记录最大值所在通道 ω_{max} ,将 ω_{max} 的值作为新的像素值构建最大值索引图,如图3所示。

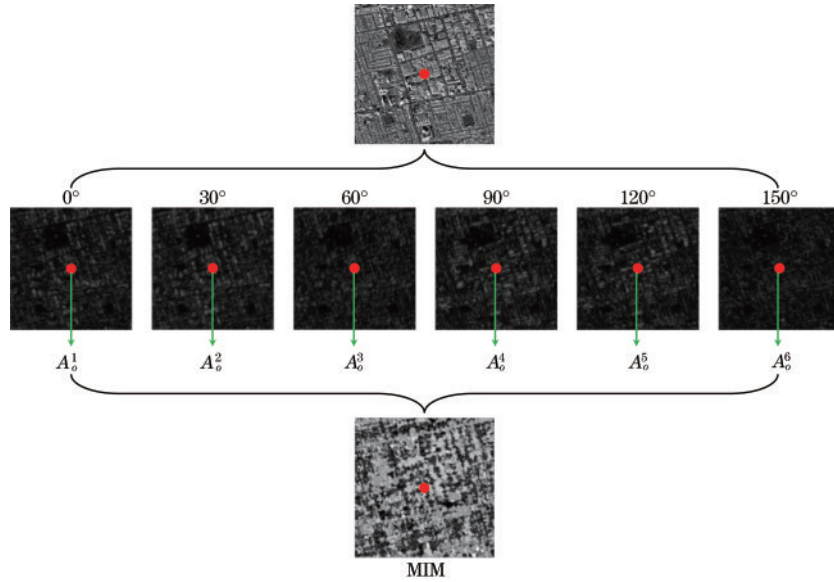


图3 MIM构造

Fig. 3 MIM construction

与MI相比,MIM-MI充分利用具有较好鲁棒性、独特性和抗非线性辐射差异的MIM,克服了辐射差异,保证了配准精度。在利用MIM-MI匹配的过程中,对于参考影像上每一个特征点确定模板区域后,由影像的初始定位信息确定待匹配点在感测影像上的坐

标,形成搜索区域,采用模板匹配(图4)的方式,依据MIM-MI最大原则在感测影像上寻找与之对应的匹配点。另外,阴影、地物遮挡等因素的影响会导致误匹配,这里采用 marginalizing sample consensus (MAGSAC)^[20]剔除外点。

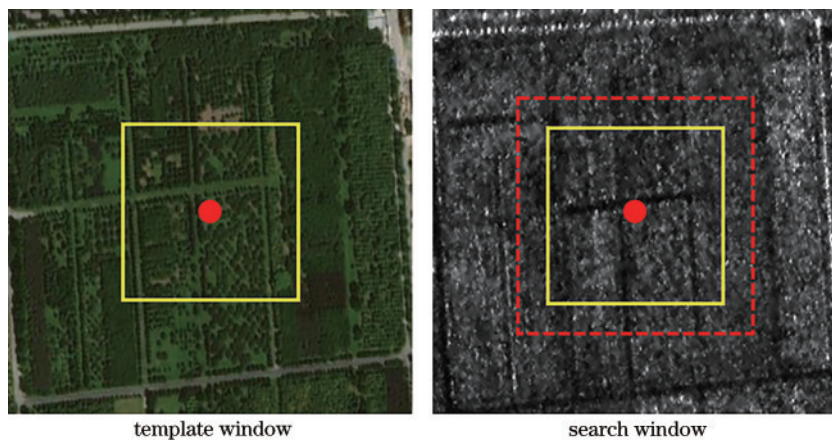


图4 模板匹配

Fig. 4 Template matching

2.3 影像配准

在影像精确匹配获取同名点后,需要利用影像间的同名点计算变换函数的参数对感测影像进行纠正。一般依据参数的数量,变换函数可以分为全局函数与

局部函数两类^[21]。由于光学与SAR影像配准精度易受地形起伏、几何畸变、非线性辐射差异等因素影响,使用全局仿射变换、透视变换、几何多项式等模型难以拟合影像间的局部形变实现高精度配准。而分段线性

变换^[22]利用 Delaunay 算法通过感测影像中的特征点来构建三角网,然后利用所匹配的特征点在参考影像中构造相对应的三角网,通过每个三角形的顶点计算仿射变换参数,将感测影像中的每个三角形区域局部配准到对应参考影像的区域。因此,本研究采用三角网结构的分段线性变换模型计算同名三角形间的仿射变换参数,实现每个三角形区域影像的高精度配准:

$$\begin{cases} x = a_0 + a_1x' + a_2y' \\ y = b_0 + b_1x' + b_2y' \end{cases} \quad (16)$$

式中: (x, y) 与 (x', y') 分别为参考影像与感测影像上的同名点坐标。

表 1 实验数据基本信息

Table 1 Data description of test images

Case	Reference image Sensed image	GSD /m	Size /pixel	Date	Image characteristic
Case 1	Sentinel-1A	10	1024×1024	2020-11	Complex terrain with large undulations
	Sentinel-2A	10	1024×1024	2020-11	
Case 2	Google	3	500×500	2007-11	High buildings and significant noise
	TerraSAR-X	3	500×500	2007-12	
Case 3	Google	3	628×618	2009-03	Have a temporal difference of 14 months
	TerraSAR-X	3	628×618	2008-01	
Case 4	Google	1	512×512		Cover weakly textured area of farmland
	GF3	1	512×512		

为衡量所提方法的性能,采用主观和客观评价指标对所提方法进行评价。主观方法即目视检查,对参考影像和配准结果进行棋盘格镶嵌,观察镶嵌图像中地物边缘连续性。定量评价指标包括正确匹配点数量、正确匹配率(CMR)、均方根误差(RMSE)。RMSE采用人工选取20个检查点, RMSE值越小,表示配准精度越高。CMR与RMSE的表达式分别为

$$R_{\text{CMR}} = \frac{N_{\text{Corresponding Points}}}{N_{\text{Matched CPs}}}, \quad (17)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2]}, \quad (18)$$

式中: $N_{\text{Corresponding Points}}$ 为正确匹配点数量; $N_{\text{Matched CPs}}$ 为所有匹配点数量; (x'_i, y'_i) 和 (x_i, y_i) 为参考影像和配准后影像上的一对检查点; n 为正确匹配数量。

3.2 对比分析

不同模板半径下匹配效果对比如图5所示。从图中可以看出,在实验1中,尽管所提方法匹配正确率在52%左右,但优于MI方法。在另外3组实验中,虽然光学与SAR影像成像机制不同,且存在显著的非线性辐射差异及SAR影像中的噪声,随着模板窗口的增大,MI方法和所提方法都获得了一定的匹配正确率,但所提方法的CMR较MI方法更高,且MI对模板窗口的大小更敏感。这表明了所提方法的有效性和稳

3 实验与分析

3.1 实验数据与评价方法

为验证所提方法的有效性,利用4组不同场景的遥感影像作为实验数据,这4组影像之间均存在显著的非线性辐射差异,包括中分影像(10 m)和高分影像(1~3 m)。实验数据详细信息如表1所示。此外,采用MI^[18]、RIFT^[15]及OS-SIFT^[23]进行对比,所提方法与MI方法的搜寻区域半径均设置为10 pixel,其他对比方法参数依据原始论文。实验所用计算机配置如下: Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90 GHz; RAM为16 GB。

定性。

依据图5所确定的各实验最佳模板半径参数,对4组实验进行同名点匹配,所获得同名点如图6所示。在实验1中,由于影像包含山地弱纹理区域,部分同名点位于该区域,而大多同名点位于道路和建筑物分布密集区域,这导致匹配精度较低。在另外3组实验中,影像覆盖农田、空地、建筑物、河流等区域,使用所提方法特征检测策略所提取的特征点在参考影像(光学影像)中分布均匀,经过MIM-MI模板匹配后,光学与SAR影像间的同名点分布极为均匀,匹配精度较高。

结合表2从配准精度来看,实验1数据是时相差异较小中分辨率遥感影像,受到了地形起伏的影响,致使匹配点数量和匹配正确率不高,但所提方法的配准精度依然达到了1.34 pixel。实验2和实验3是建筑物较为丰富的高分辨遥感影像且实验3参考影像与感测影像时相差异达一年之多,地物变化对匹配点和匹配正确率有一定的影响,但所提方法较好地克服时相差异并达到了亚像素的配准精度。相比前三组实验,实验4覆盖了耕田、空地等弱纹理区域,其配准精度相对较低,达到了子像素的精度,优于对比算法。为清晰地观察配准结果,图7显示了每组图像的棋盘格镶嵌图及对应放大子图。对镶嵌图像进行简单的目视检查,其中道路、建筑、农田等场景边缘吻合,连

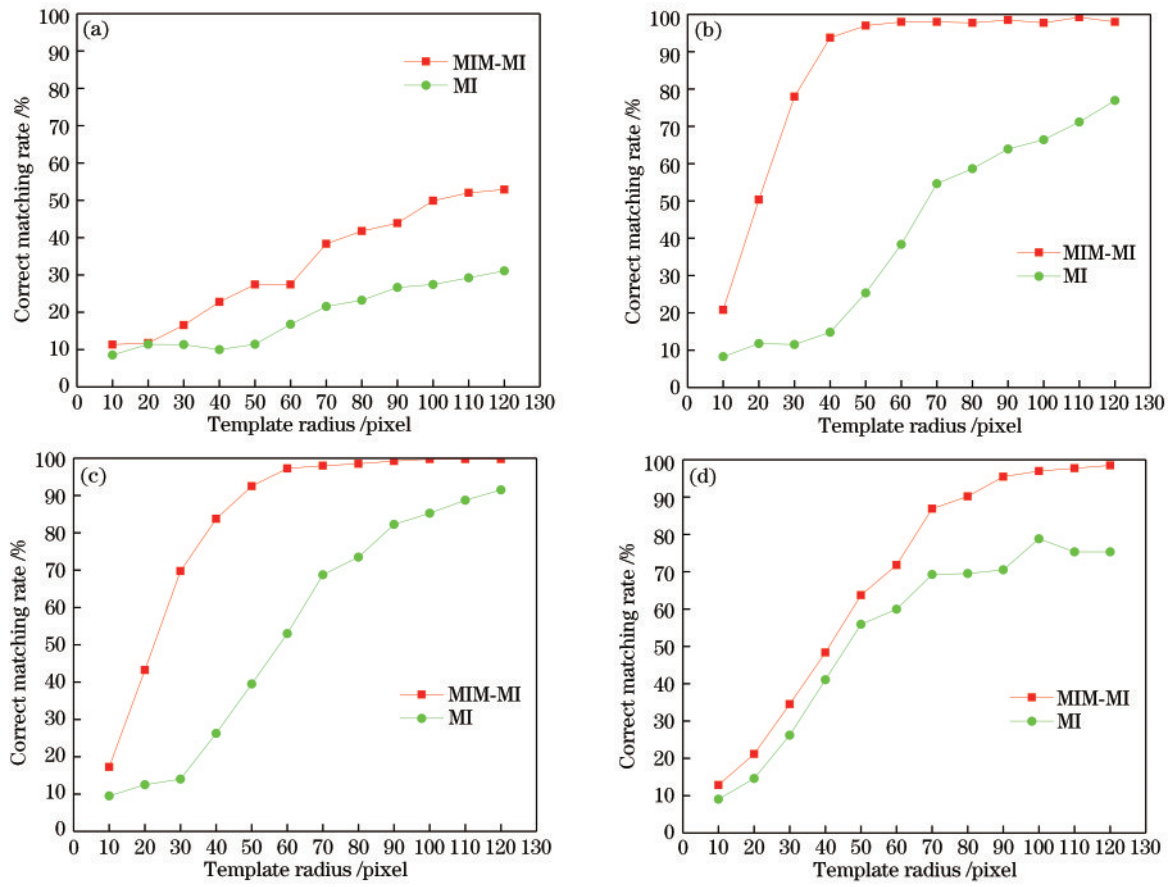


图 5 不同模板半径下匹配效果对比。(a)实验 1;(b)实验 2;(c)实验 3;(d)实验 4

Fig. 5 Comparison of matching effect under different template radius. (a) Case 1; (b) case 2; (c) case 3; (d) case 4

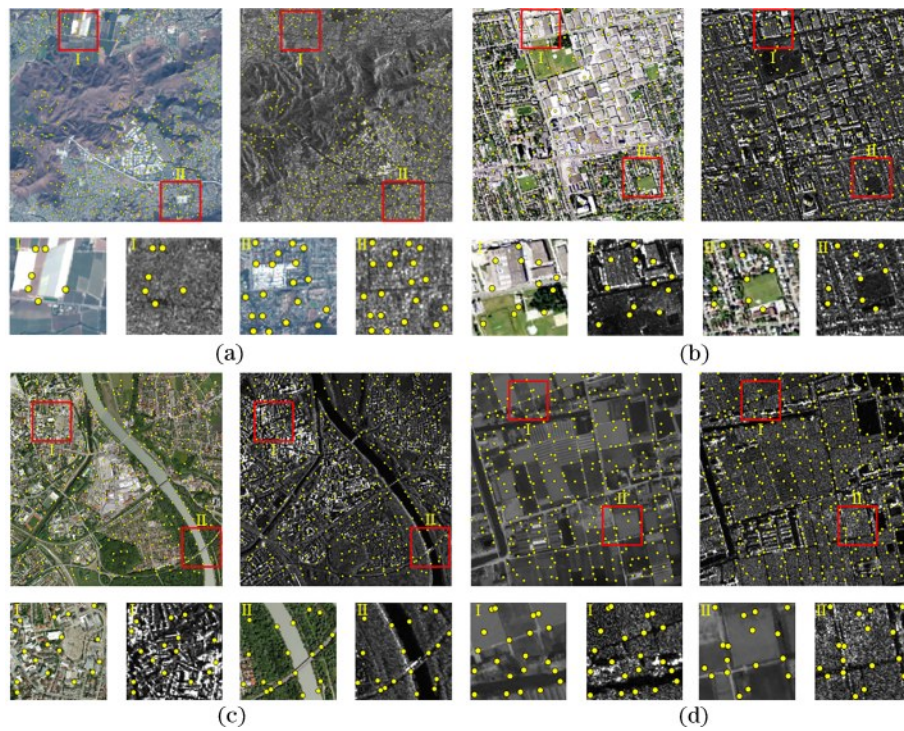


图 6 匹配效果图。(a)实验 1;(b)实验 2;(c)实验 3;(d)实验 4

Fig. 6 Matching effect diagrams. (a) Case 1; (b) case 2; (c) case 3; (d) case 4

表 2 实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results

Case	Method	$N_{\text{Matched CPs}}$	$N_{\text{Corresponding Points}}$	CMR / %	RMSE / pixel
Case 1	Proposed method	900	476	52.89	1.34
	MI	900	280	31.11	5.4
	OS-SIFT	290	0	0	
	RIFT	1494	79	5.29	3.90
Case 2	Proposed method	399	391	97.99	0.87
	MI	399	307	76.94	3.15
	OS-SIFT	303	73	24.09	4.58
	RIFT	1456	433	29.74	1.91
Case 3	Proposed method	400	399	99.75	0.83
	MI	400	366	91.5	2.50
	OS-SIFT	250	0	0	
	RIFT	2036	672	33.01	2.19
Case 4	Proposed method	397	391	98.49	1.18
	MI	397	304	75.31	1.95
	OS-SIFT	103	27	26.21	4.03
	RIFT	844	132	15.64	2.90

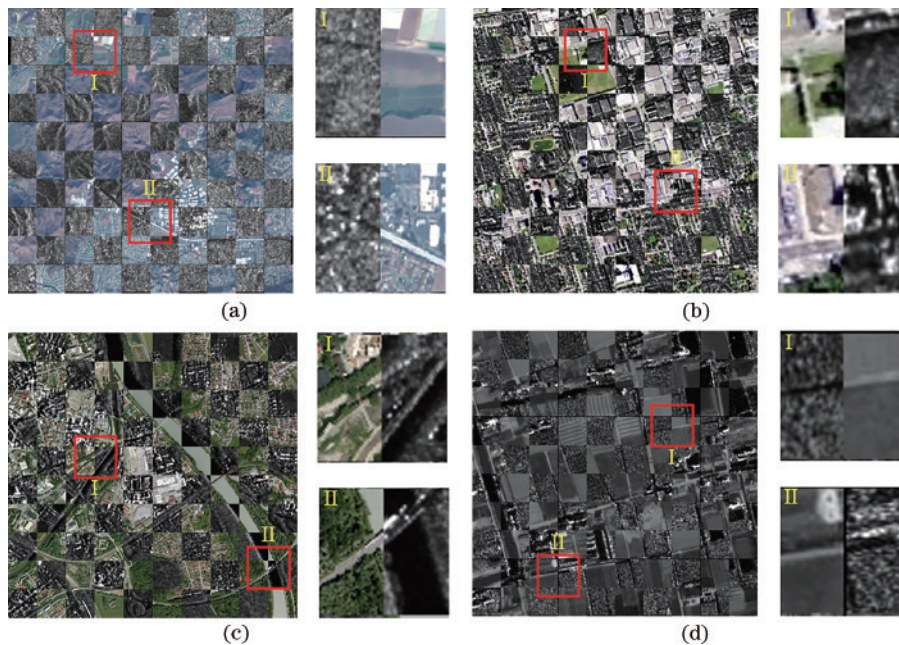


图 7 实验配准棋盘格镶嵌图。(a)实验 1;(b)实验 2;(c)实验 3;(d)实验 4

Fig. 7 Checkerboard mosaic of experimental registration. (a) Case 1; (b) case 2; (c) case 3; (d) case 4

续型良好,无偏差,验证了所提方法的良好配准性能。总而言之,对于 4 组实验数据,所提方法的正确匹配点数量、正确匹配率及配准精度均优于对比方法,具有一定的优越性。

4 结 论

提出了一种新的光学与 SAR 影像配准方法,旨在解决由复杂的非线性辐射变化引起的匹配困难。在所提方法中,稳定均匀分布的特征点通过 PC 叠加矩特征图获得,同时引入了一种新的相似性测度 MIM-MI,

利用滑动窗口捕获同名点实现光学影像与 SAR 影像的自动配准。在 4 组中高分辨率遥感影像上进行了配准实验,结果表明,所提方法在定量指标正确匹配点数、匹配正确率和 RMSE 均优于对比方法。在棋盘格镶嵌图中也可以看出,所提方法配准结果地物边缘连接一致,无交错现象,从而定性验证所提方法的配准精度。所提方法较好地发挥混合模型的优点,具有一定的有效性和优越性。然而,所提方法需要计算联合概率直方图,因此耗时有所增加,在未来的工作,将探索快速模板匹配框架。

参 考 文 献

- [1] Li S T, Yin H T, Fang L Y. Remote sensing image fusion via sparse representations over learned dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(9): 4779-4789.
- [2] Klaric M N, Claywell B C, Scott G J, et al. GeoCDX: an automated change detection and exploitation system for high-resolution satellite imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(4): 2067-2086.
- [3] Li J M, Ma L L, Fan Y X, et al. An image stitching method for airborne wide-swath HyperSpectral imaging system equipped with multiple imagers[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 1001.
- [4] Ma J Y, Jiang J J, Zhou H B, et al. Guided locality preserving feature matching for remote sensing image registration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(8): 4435-4447.
- [5] 冯蕊涛, 杜清运, 罗恒, 等. 基于光流校正的复杂地形区多时相遥感影像配准[J]. *遥感学报*, 2021, 25(2): 630-640.
Feng R T, Du Q Y, Luo H, et al. A registration algorithm based on optical flow modification for multi-temporal remote sensing images covering the complex-terrain region[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(2): 630-640.
- [6] Yan X H, Zhang Y J, Zhang D J, et al. Registration of multimodal remote sensing images using transfer optimization[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(12): 2060-2064.
- [7] Ma J L, Chan J C W, Canters F. Fully automatic subpixel image registration of multiangle CHRIS/Proba data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2829-2839.
- [8] 王梦瑶, 孟祥超, 邵枫, 等. 基于深度学习的 SAR 辅助下光学遥感图像去云方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1228002.
Wang M Y, Meng X C, Shao F, et al. SAR-assisted optical remote sensing image cloud removal method based on deep learning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1228002.
- [9] Liang J Y, Liu X P, Huang K N, 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.
- [10] Wu Y, Ma W P, Miao Q G, et al. Multimodal continuous ant colony optimization for multisensor remote sensing image registration with local search[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019, 47: 89-95.
- [11] 臧丽日, 杨树文, 张萌生, 等. 耦合梯度互信息与 PV 插值的影像配准算法[J]. *测绘科学*, 2021, 46(4): 68-74.
Zang L R, Yang S W, Zhang M S, et al. Image registration algorithm of coupling gradient mutual information and PV interpolation[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(4): 68-74.
- [12] Kovesi P. Image features from phase congruency image features from phase congruency[J]. *Videre A Journal of Computer Vision Research*, 1999, 1(3): 1-26.
- [13] Ye Y X, Shan J, 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.
- [14] Fan J W, Wu Y, Li M, 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.
- [15] 李欣, 杨宇辉, 杨博, 等. 利用方向相位特征进行多源遥感影像匹配[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(4): 488-494.
Li X, Yang Y H, Yang B, et al. A multi-source remote sensing image matching method using directional phase feature[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(4): 488-494.
- [16] Li J, Hu Q, Ai M. RIFT: multi-modal image matching based on radiation-variation insensitive feature transform [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 29: 3296-3310.
- [17] 孙明超, 马天翔, 宋悦铭, 等. 基于相位特征的可见光和 SAR 遥感图像自动配准[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(3): 616-627.
Sun M C, Ma T X, Song Y M, et al. Automatic registration of optical and SAR remote sensing image based on phase feature[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(3): 616-627.
- [18] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[C]//*Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988*, September, 1988, Manchester, UK. [S.l.: s.n.], 1988: 1-6.
- [19] Maes F, Collignon A, Vandermeulen D, et al. Multimodality image registration by maximization of mutual information[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1997, 16(2): 187-198.
- [20] Jin Y H, Mishkin D, Mishchuk A, et al. Image matching across wide baselines: from paper to practice[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2021, 129(2): 517-547.
- [21] Sedaghat A, Mohammadi N. High-resolution image registration based on improved SURF detector and localized GTM[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(7): 2576-2601.
- [22] Han Y, Kim T, Yeom J. Improved piecewise linear transformation for precise warping of very-high-resolution remote sensing images[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(19): 2235.
- [23] Xiang Y M, Wang F, You H J. OS-SIFT: a robust SIFT-like algorithm for high-resolution optical-to-SAR image registration in suburban areas[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(6): 3078-3090.