

基于几何结构属性的光学和 SAR 影像自动配准

叶沅鑫^{1,2}, 郝思媛^{3*}, 曹云刚^{1,2}

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031;

3. 青岛理工大学 通信与电子工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要:提出了一种基于几何结构属性的光学和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像配准方法.该方法引入了具有光照不变性的相位一致性模型进行影像特征提取,采用该模型的强度和方向信息构建了一种几何结构特征描述符—相位一致性方向直方图(histogram of orientated phase congruency, HOPC),并根据该描述符间的欧式距离定义了影像匹配的相似性测度(称为 HOPC_n).该测度能表示影像间的几何结构相似性.通过选择 4 组光学和 SAR 影像进行试验,结果表明, HOPC_n 能有效率的抵抗影像间的非线性辐射差异,并且其匹配性能好于经典的相似性测度.另外,也设计了一种基于 HOPC_n 自动的配准方法,试验结果证明了该方法的有效率和鲁棒性.

关键词:图像配准;相位一致性;几何结构属性;相似性测度

中图分类号:P23 **文献标识码:**A

Automatic registration of optical and SAR image using geometric structural properties

YE Yuan-Xin^{1,2}, HAO Si-Yuan^{3*}, CAO Yun-Gang^{1,2}

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. State-province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-speed Railway Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. College of Communication and Electronic Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: This paper proposes an automatic registration method for optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) images based on geometric structural properties. In the proposed method, the phase congruency feature with photometric invariance is first introduced for image feature extraction, and then both the magnitude and orientation information of phase congruency are used to build a geometric structural feature descriptor named HOPC (Histogram of Orientated Phase Congruency). A similarity metric named HOPC_n is defined for image matching by using the Euclidean distance of the descriptors. This similarity metric can capture the geometric structural similarity between images, and has been tested using 4 pairs of optical and SAR images. Experimental results show that HOPC_n is robust to non-linear radiometric differences, and outperforms the state-of-the-art similarity metrics such as correlation coefficient and mutual information. Moreover, this paper also design an automatic registration method based on HOPC_n. Experimental results demonstrate the effectiveness and robustness of the proposed method.

Key words: image registration, phase congruency, geometric structural properties, similarity metric

PACS: 07.07. Df

收稿日期:2017-02-17,修回日期:2017-09-29

Received date: 2017-02-17, revised date: 2017-09-29

基金项目:国家自然科学基金(41401369, 61701272, 41771451),国家重点研发计划项目(2016YFB0502603, 2016YF0501403)

Foundation items: Supported by National Nature Science Foundation of China(41401369, 61701272, 41771451), State Key Research and Development Program of China (2016YFB0502603, 2016YF0501403)

作者简介(Biography):叶沅鑫,博士,讲师,主要研究方向为遥感影像分析与处理. E-mail: yeyuanxin@home.swjtu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: lemonbanana@163.com

引言

光学影像和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像反映了地物的不同特征,能够为地表监测提供互补的信息,通过融合这两类影像的信息,可有效地对地表进行全面的观测和分析.为了实现这一功能,需要对光学和 SAR 影像进行配准,保证它们在地理空间位置上的一致性.由于成像方式和光谱特性的不同,光学和 SAR 影像间存在显著的非线性辐射差异.这些差异增大了影像间同名点识别的难度,因此光学和 SAR 影像的自动配准是当今研究的难点问题.

目前光学和 SAR 影像的配准可分为基于特征的方法和基于区域的方法^[1].基于特征的方法通过匹配影像间的显著特征来实现影像的配准,其中常用的特征有点特征^[2]、线特征^[3]和面特征^[4].最近局部不变性特征如 SIFT^[5]、Shape Context^[6]等在光学和 SAR 影像配准中也得到了一定的应用^[7-8].但这些方法通常需要在影像间提取出具有高重复率的共有特征,而对于具有显著辐射差异的光学和 SAR 影像而言,共有特征的提取本身也是现在的研究难题^[9-10],因此它们对于光学和 SAR 影像的自动配准还存在一定的局限性.

基于区域的配准方法则是采用模板匹配的策略,以某种相似性测度为准则,在影像间进行同名点识别,从而实现影像的配准.在此过程中,相似性测度的选择至关重要,直接影响到后续的配准精度.目前常用的相似性测度包括归一化互相关(normalized cross correlation, NCC)、互信息(mutual information, MI)^[11]和基于灰度映射的匹配测度(Matching by Tone Mapping, MTM)^[12]等.由于 NCC 对于影像间的辐射差异较为敏感,尤其是非线性的辐射差异^[12-13],所以它们难以较好地应用于光学和 SAR 影像的自动配准.相比之下,MI 能够较好地适应影像间的辐射变化,在光学和 SAR 影像配准方面得到了一定的应用.但基于 MI 的配准方法计算量较大,对于模板窗口的大小较为敏感,而且在收敛过程中容易陷入局部极值,从而导致误匹配的发生^[9].MTM 是最近在计算机视觉领域出现的一种新的相似性测度,它主要是通过非线性灰度映射技术来减小影像间的辐射差异,并实现影像的匹配^[12].不过由于异源遥感影像间的灰度关系非常复杂,难以通过某种函数模型进行拟合,因此 MTM 也具有一定的局限性.通常来讲,

这些基于区域的方法主要是根据灰度信息构建相似性测度来实现同名点匹配,而由于显著的非线性辐射差异,光学和 SAR 影像间的同一地物却呈现出完全不同的灰度信息,所以难以通过灰度间的相似性实现影像的自动配准.相比于灰度信息,影像的几何结构和形状等属性受非线性辐射差异的影响较小^[14-16].鉴于此,本文将利用几何结构、形状等特征信息构建相似性测度进行光学和 SAR 影像配准.

影像的几何结构可以通过梯度信息进行表达,但梯度对于影像间的辐射变化较为敏感.相比而言,相位一致性特征具有更好的光照和对比度不变性^[17].这一性质可以使它更好适应于影像间的辐射变化.目前虽然相位一致性模型已经应用于多传感器遥感影像的配准^[18-19],但这些方法只使用了相位一致性的强度信息,忽略了该模型的方向信息,其配准性能还不够稳健.因此本文将综合利用相位一致性的强度和方向信息,构建一种表示影像几何结构特征的描述符—相位一致性方向直方图(histogram of orientated phase congruency, HOPC),并利用 HOPC 描述符间的欧式距离建立一种描述影像间几何结构相似性的匹配测度(名为 HOPC_n).另外,本文根据光学和 SAR 影像的特点,设计了一种基于 HOPC_n 的自动配准方法,并选用不同类型的光学和 SAR 影像来验证该方法的有效性.

1 几何结构相似性测度

本节将构建一种反映影像几何结构属性的描述符(HOPC),并在此基础上定义影像匹配的相似性测度.首先采用相位一致性的强度和方向信息构建 HOPC 描述符,并利用 HOPC 描述符间的 NCC 建立一种表示影像间几何结构相似性的匹配测度—HOPC_n.

1.1 相位一致性强度

Morrone and Owens^[20]提出了一种局部特征检测模型,该模型的主要依据是角点、边缘等特征出现在影像傅里叶谐波分量叠合最大的相位处,即相位一致性.该模型已经被证明了符合人类视觉系统的感知特性,并且与影像的对比度和光照变化无关^[20].图像的相位一致性特征可由多尺度多方向的 Log Gabor 小波进行计算,其表达式为^[17]:

$$PC(x, y) = \frac{\sum_n \sum_o W_o(x, y) [A_{no}(x, y) \Delta \Phi_{no}(x, y) - T]}{\sum_n \sum_o A_{no}(x, y) + \varepsilon}, \quad (1)$$

式中, $PC(x, y)$ 表示在像点 (x, y) 相位一致性的强度值, $|\cdot|$ 符号表示值为正时取本身, 否则取 0, T 为噪声阈值, ε 是一个避免除数为零的常数, $A_{no}(x, y)$ 为像点 (x, y) 在 log Gabor 滤波器尺度 n 和方向 o 上的振幅, 它与 $\Delta\Phi_{no}(x, y)$ 的乘积为:

$$A_{no}(x, y)\Delta\Phi_{no}(x, y) = (e_{no}(x, y)\bar{\phi}_e(x, y) + o_{no}(x, y)\bar{\phi}_o(x, y)) - |e_{no}(x, y)\bar{\phi}_o(x, y) - o_{no}(x, y)\bar{\phi}_e(x, y)| \quad (2)$$

其中, $\bar{\phi}_e(x, y) = \sum_n \sum_o e_{no}(x, y)/E(x, y)$, $\bar{\phi}_o(x, y) = \sum_n \sum_o o_{no}(x, y)/E(x, y)$, $E(x, y)$ 是局部能量函数, 定义为:

$$E(x, y) = \sqrt{\left(\sum_n \sum_o e_{no}(x, y)\right)^2 + \left(\sum_n \sum_o o_{no}(x, y)\right)^2} \quad (3)$$

式中, $e_{no}(x, y)$ 为 Log Gabor 小波的偶对称滤波器响应值, $o_{no}(x, y)$ 为 Log Gabor 小波的奇对称响应值.

1.2 相位一致性方向

以上的相位一致性模型只能获得影像的特征强度值(类似于梯度值), 但不能获取到影像特征变化的方向信息^[21](类似于梯度方向). 通常情况下, 只使用特征的强度值不能较好地构建稳健的特征描述符. 如 SIFT 算子, 除了梯度值之外, 梯度方向也被用于特征描述符的构建. 因此本文将综合利用相位一致性的强度和方向信息来构建几何结构特征描述符.

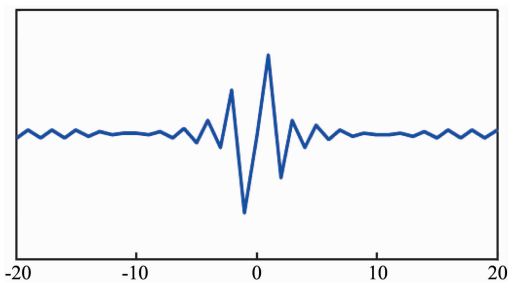


图1 Log Gabor 奇对称滤波器
Fig. 1 Odd symmetry filter of log Gabor

相位一致性方向表示影像特征变化最剧烈的方向(类似于梯度方向), 可通过 Log Gabor 小波的奇对称滤波器 $o_{no}(x, y)$ 来计算^[21-22]. 由图 1 可知, Log Gabor 小波的奇对称滤波器近似于一种导数差分模板, 其卷积结果可表示影像在某个方向的能量变化^[23]. 由于在计算相位一致性的时候, 使用了多个方向的 log Gabor 奇对称滤波器, 因此这里将多个方向的奇对称滤波器结果分别投影到水平方向(X

轴)和垂直方向(Y 轴), 可分别获得水平方向的能量和垂直方向的能量, 然后它们之间的反正切值, 即获得相位一致性特征方向 Φ , 计算式如下:

$$\begin{aligned} a &= \sum_{\theta} (o_{no}(\theta) \cos(\theta)) \\ b &= \sum_{\theta} (o_{no}(\theta) \sin(\theta)) \quad (4) \\ \Phi &= \arctan(b, a) \end{aligned}$$

式中, $o_{no}(\theta)$ 表示在方向 θ 上的奇对称滤波器响应值. 图 2 显示了一幅图像的相位一致性方向, 其取值范围在 $0^\circ \sim 360^\circ$.

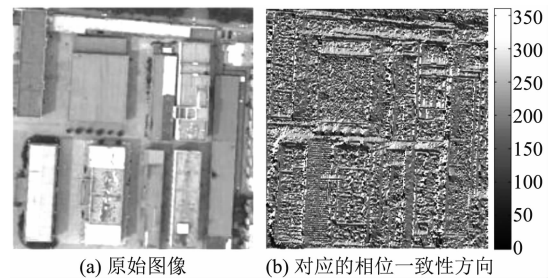


图2 相位一致性方向
Fig. 2 Orientation of phase congruency

1.3 几何结构描述符

HOPC 描述符的思想来源于梯度方向直方图(Histogram of Orientated Gradient, HOG)^[24], HOG 能表示目标的局部形状结构特征, 已经成功地应用于目标识别, 影像分类和影像检索等领域. 考虑到 HOG 是利用梯度信息来表示影像的几何结构信息, 而相位一致性与梯度信息都是反映影像局部区域的变化量, 并且相位一致性能更好地抵抗光照和对比度的变化. 因此这里将利用相位一致性的强度和方向信息, 并借助于 HOG 的思想, 构建 HOPC 特征描述符.

HOPC 主要通过把模板窗口划分为若干个 block 块, 并统计每个 block 的相位一致性方向直方图, 将其链接在一起形成最终的特征描述向量. HOPC 的提取过程如图 3 所示, 主要包括以下几个步骤: (1) 在影像上选取一定大小的模板窗口; (2) 在模板窗口内, 计算每个像素的相位一致性强度值和方向, 为 HOPC 的构建提供特征信息; (3) 把模板窗口划分为若干个 block 块, 其中每个 block 包含若干个 cell 单元, 形成 HOPC 的基本结构; (4) 计算 block 和 cell 的相位一致性方向直方图, 并进行归一化操作消除光照变化的影响; (5) 将所有 block 内的梯度方向直方图向量收集在一起, 形成描述整个模

板窗口的 HOPC 特征向量.

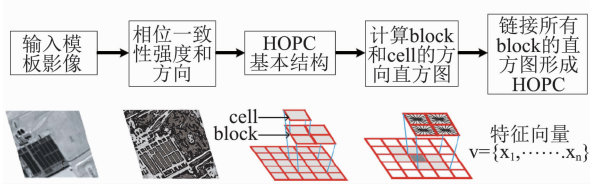


图3 HOPC 的构建过程

Fig. 3 Procedure of building HOPC

1.4 相似性测度

考虑到光学和 SAR 影像间的几何结构特征较为相似,这里采用 HOPC 描述符间的欧式距离作为相似性测度(该测度称为 $HOPC_n$)进行同名点匹配,其式如下所示:

$$HOPC_n = \sqrt{\sum_{k=1}^n (V_A(k) - V_B(k))^2}, \quad (5)$$

式中, V_A 和 V_B 分别表示模板影像 A 和 B 的 HOPC 描述符.

为了说明 $HOPC_n$ 的可行性,这里通过相似性曲线将它与 NCC, MTM 和 MI 进行比较.所采用的测试数据是一组城市地区的高分辨率光学和 SAR 影像,如图 4 所示.可以看出,两幅影像间存在显著的非线性灰度差异.图中实线框表示模板窗口,虚线框表示搜索区域,所采用的模板大小为 68×68 像素.

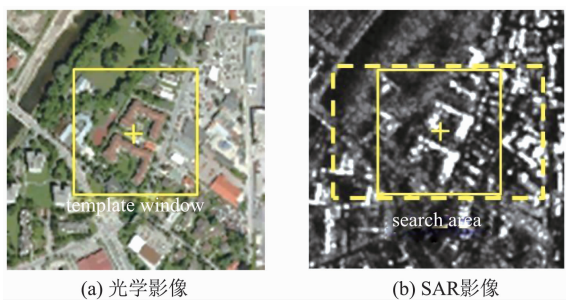


图4 测试相似性曲线的影像

Fig. 4 Images for testing similarity curve

图 5 显示了 NCC、MTM 和 $HOPC_n$ 三种相似性测度的相似性曲线.可以清晰的看出,NCC、MTM 和 MI 这三种测度的相似性曲线不够光滑,并且其匹配位置都有所偏差.相比而言, $HOPC_n$ 的相似性曲线更加光滑,而且获得了正确的匹配,这初步地说明了 $HOPC_n$ 是一种相对比较稳健的相似性测度.关于 $HOPC_n$ 匹配性能的分析见第 3.1 节.

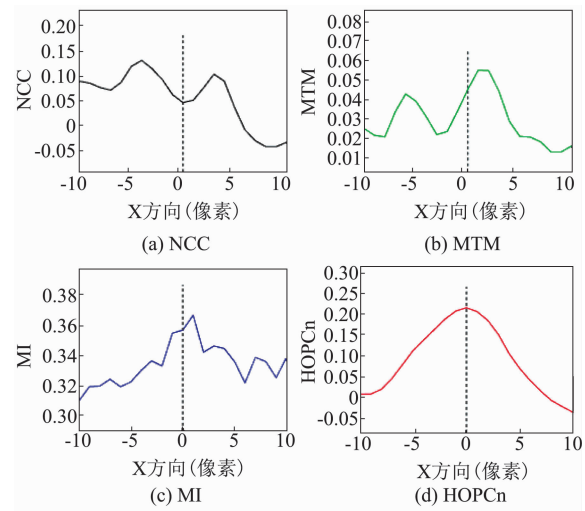


图5 NCC、MTM、MI 和 $HOPC_n$ 的相似性曲线

Fig. 5 Similarity curves of NCC、MTM、MI 和 $HOPC_n$

2 基于 $HOPC_n$ 的光学和 SAR 影像配准

本文根据光学和 SAR 影像的特点,设计一种基于 $HOPC_n$ 的自动配准方法,其步骤如下:

(1)根据卫星传感器自身的姿态和定位参数,利用其严格成像模型对影像进行粗纠正,消除影像间显著的全局变形(如尺度,旋转等差异)^[25],使影像间仅存在少量的平移差异;

(2)采用分块的 Harris 算子^[14],在参考影像上提取分布均匀的特征点.首先将影像划分为 10×10 互不重叠的格网区域,在每个格网内计算每个像素点的 Harris 特征值,并进行排序,然后选择 Harris 特征值较大的 3 个点作为特征点,总共得到 300 个特征点;

(3)然后在输入影像上确定一定大小(40×40 像素)的搜索区域,利用 $HOPC_n$ 作为相似性测度,并采用双向匹配的策略^[26]进行同名点识别;

(4)根据所获得的名点建立投影变换模型,并计算同名点的残差和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE),同时迭代地删除残差较大的同名点,直到 RMSE 小于给定的阈值(1 个像素)^[13];

(5)为了消除地形起伏所引起的局部形变,这里采用分段线性模型对影像进行配准.

3 试验

3.1 试验 1: $HOPC_n$ 匹配性能分析

为了验证 $HOPC_n$ 的匹配性能,这里采用模板匹配的策略,在匹配正确率(匹配正确率 = 正确匹配点数量/总匹配点数量)和计算效率两个方面,将它与 NCC, MTM 和 MI 进行结果对比和详细分析. 选择四组不同分辨率不同覆盖场景的光学和 SAR 影像作为试验数据,每组影像间都存在显著的非线性辐射差异,而且 SAR 影像上具有显著的斑点噪声. 试验图像如图 6 所示,对应的数据描述见表 1. 在匹配过程中,首先采用分块的 Harris 算子在参考影像上提取 200 个特征点,然后在输入图像上确定 20×20 像素的搜索区域,并利用不同尺寸的模板进行匹配.

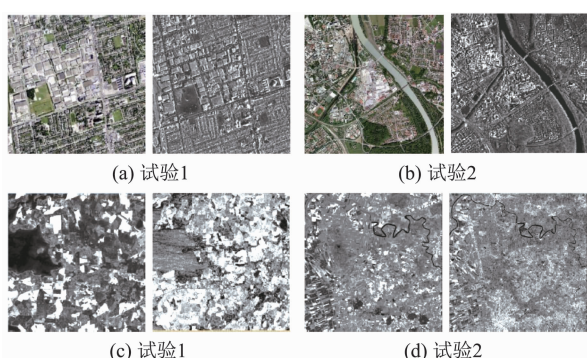


图 6 试验所使用的光学和 SAR 影像
Fig. 6 Optical and SAR images used in the experiments

图 7 显示了四种相似性测度的匹配正确率. 几乎对于所有试验数据, $HOPC_n$ 都获得了对最高的匹配正确率,其次为 MI 和 MTM. 而 NCC 的匹配正确率相对较低,主要原因是 NCC 对于影像间的非常非线性灰度差异非常敏感^[13]. MTM 采用了分段的线性函数来拟合影像间的灰度关系,并借此来减小影像间的灰度差异^[12],但由于光学和 SAR 影像间的灰度关系非常复杂,难以通过某种函数进行拟合,因此分段的线性函数也不能非常准确地表示影像间的灰

度关系,从而影响了 MTM 的匹配性能. 另外,相比于 MI, $HOPC_n$ 的匹配性能受模板尺寸变化影响相对较小. 由图 7 可知,当模板窗口较小时(如小于 60×60 像素),MI 的匹配正确率通常较低,有时甚至低于 NCC. 这是因为 MI 需要计算影像间的联合熵,而联合熵对于样本数量(即模板尺寸)非常敏感^[9]. 相比而言,当模板尺寸变化时, $HOPC_n$ 的匹配性能更加稳定,即使在较小的模板窗口也能获得较高的匹配正确率.

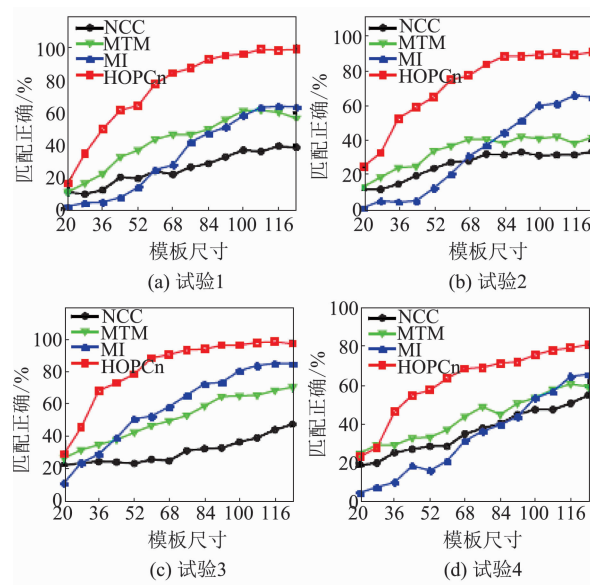


图 7 NCC、MTM、MI 和 $HOPC_n$ 在不同模板尺寸下的匹配正确率

Fig. 7 Correct matching ratios versus the template size of NCC, MTM, MI, and $HOPC_n$

另一方面,对于这四组试验数据,由于影像特点的差异,四种相似性测度都呈现出不同的匹配性能. 对于试验 1 和试验 2 的数据,它们是位于城市地区的高分辨率影像, $HOPC_n$ 的匹配正确率能明显高于其它的相似性测度(如 MI 和 MTM). 由图 7 (a-b) 可

表 1 匹配试验所使用的数据

Table 1 Description of datasets used in the matching experiments

试验编号	参考图像(光学)		输入图像(SAR)		图像特点
	传感器(或数据来源) 获取时间	大小(像素) 分辨率/m	传感器(或数据来源) 获取时间	大小(像素) 分辨率/m	
试验 1	Google Earth 11/2007	528 × 524 3	TerraSAR-X 12/2007	534 × 524 3	位于城市地区,结构和边缘特征清晰
试验 2	Google Earth 3/2009	628 × 618 3 m	TerraSAR-X 1/2008	628 × 618 3 m	位于城市地区,结构和边缘特征比较清晰,影像间具有 12 个月的时相差异
试验 3	TM 波段 3 5/2007	600 × 600 30	TerraSAR-X 3/2008	600 × 600 30	位于郊区地区,结构和边缘特征较为清晰
试验 4	TM 波段 3 3/2014	713 × 730 30	TerraSAR-X 7/2013	713 × 730 30	位于郊区地区,结构和边缘不够清晰

知,当模板尺寸较大时(如 124×124 像素), $HOPC_n$ 的匹配正确率分别是 99% 和 91%,而 MI 的匹配正确率分别只有 63.5% 和 64.5%,MTM 的正确率则分别为 56.5% 和 41.5%。其主要原因是这两组试验的影像间具有相似的形状和几何结构特征(如建筑物和道路等),而 $HOPC_n$ 能够表示影像间的几何结构相似性,所以相比于 MI 和 MTM 具有较为明显的优势。对于位于郊外地区的中分辨率影像(试验 3 和 4), $HOPC_n$ 相对于其它相似性测度的性能优势有所降低。究其原因,可能是因为这两组试验的影像没有包含较为丰富的形状和结构特征。而且对于试验 4,影像间的结构和轮廓信息不够丰富,相比于前三组试验, $HOPC_n$ 的匹配正确率出现了较为明显的降低。这说明了 $HOPC_n$ 的匹配性能主要依赖于影像的几何结构属性,如果影像的边缘和形状信息不够丰富时, $HOPC_n$ 的性能将有所降低。尽管如此, $HOPC_n$ 的匹配正确率仍然高于其它相似性测度。总而言之,以上的试验结果表明 $HOPC_n$ 能够较好地抵抗光学和 SAR 影像间的非线性辐射差异。

3.2 试验 2:光学和 SAR 影像配准结果分析

为了验证基于 $HOPC_n$ 的自动配准方法的有效性,本文采用两组不同分辨率不同覆盖场景的光学和 SAR 影像进行试验,一组是来自 TerraSAR-X 和 TM 传感器的郊外地区中分辨率影像,另一组是来自 TerraSAR-X 和 Google Earth 的城市地区高分辨率影像,影像间具有 14 个月的时相差异。这两组数据的详细信息如表 2 所示。为了进行精度评定,这里采用手工的方式在参考影像和配准后的影像上选择 40 个同名点作为检查点,并计算它们的 RMSE 来表示配准精度。

图 8 显示了两组试验的配准结果,从放大的影像叠合图可以看出,尽管影像间存在较为显著的噪声和非线性辐射差异,参考影像和配准后的影像依然叠合得非常好。表 3 给出了配准过程中的同名点数量和配准精度。可以看出,对于这两组影像,本文方法都获得了大量的正确匹配点。这是因为表示几何结构相似性

的 $HOPC_n$ 能够较好地抵抗影像的非线性辐射差异,具有稳健的匹配性能。在配准精度方面,由于试验 1 的数据是位于郊外地区的中分辨率影像,局部形变较小,所以它的配准精度要高于试验 2,并达到了子像素的精度。对于试验 2,其数据是高分辨率城市地区的影像,该地区建筑物的投影视差造成了显著的局部形变,导致其获得了相对较低的配准精度。尽管如此,试验 2 的精度也达到了 1.21 个像素,对于差异较大的高分辨率光学和 SAR 影像而言,该精度也是较为可观的。通过以上两组试验可知,本文方法能够较好地适应于光学和 SAR 影像的配准。

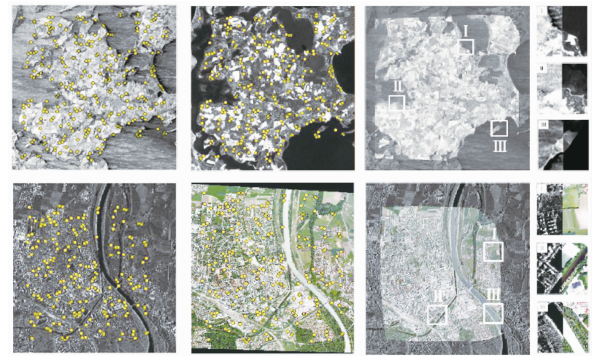


图 8 配准结果,第一行和第二行分别对应试验 1 和试验 2
Fig. 8 Registration results. Line 1 and Line 2 correspond to test 1 and test 2, respectively

表 3 配准精度

Table 3 Registration accuracy

试验编号	匹配点	正确匹配点	RMSE(像素)
试验 1	289	279	0.77
试验 2	216	215	1.21

4 结论

为了抵抗光学和 SAR 影像间显著的非线性辐射差异,本文利用影像间的几何结构属性进行影像配准,采用相位一致性的强度和方向信息建立了一种表示影像间几何结构相似性的匹配测度— $HOPC_n$ 。通过与目前经典的相似性测度 NCC、MTM 和 MI 进行详细的对比分析,结果表明: $HOPC_n$ 能够

表 2 配准试验所使用的数据

Table 2 Description of Datasets used in the registration experiments

试验编号	参考图像			输入影像		
	传感器(或数据源) 数据类型	大小(像素) 时间	分辨率/m	传感器(或数据源) 数据类型	大小(像素) 时间	分辨率/m
试验 1	TerraSAR-X SAR	1138 × 1251 2008/03	30	TM 波段 3 光学	1128 × 1251 2007/05	30
试验 2	TerraSAR-X SAR	1169 × 1221 2008/01	3	Google Earth 光学	1006 × 1123 2009/03	3

较好地适应光学和 SAR 影像间的非线性辐射变化,其匹配性能更为鲁棒.另外,本文根据光学和 SAR 影像的特征点,设计了一种基于 $HOPC_n$ 的配准方法,该方法综合利用了分块的 Harris 算子、 $HOPC_n$ 、双向匹配和分段线性模型等多种技术.通过对两组不同分辨率的光学和 SAR 进行试验,结果验证了该方法能够有效地实现光学和 SAR 影像的配准,并获得了可靠的配准精度.

值得注意的是, $HOPC_n$ 不具有旋转和尺度不变性,因此本文方法不能很好地处理影像间旋转和尺度差异较大的情况.另外由于 $HOPC_n$ 需要提取影像的几何结构特征,当影像的结构和形状特征不够丰富时,其匹配性能可能会有所下降.今后将针对这些问题进行进一步研究,以改进和提高 $HOPC_n$ 的匹配性能.

References

- [1] Zitova B, Flusser J. Image registration methods; A survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(11):977-1000.
- [2] ZHANG Deng-Rong, YU Le, CAI Zhi-Gang. Matching method based on Harris operator and wavelet pyramid[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)* (张登荣, 俞乐, 蔡志刚. 点特征和小波金字塔技术的遥感图像快速匹配技术. *浙江大学学报(理学版)*), 2007, **34**(4): 465-468.
- [3] Sui H. G., Xu C., Liu J. Y., et al. Automatic optical-to-SAR image registration by iterative line extraction and Voronoi integrated spectral point matching [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, **53**(11): 6058-6072.
- [4] Li H., Manjunat B., Mitra S K. A contour-based approach to multisensor image registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, **4**(3):320-334.
- [5] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91-110.
- [6] Belongie, S., Malik, J., Puzicha, J. Shape Matching and Object Recognition Using Shape Contexts [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(4):509-522.
- [7] Fan B, Huo C, Pan C, et al. Registration of optical and SAR satellite images by exploring the spatial relationship of the improved SIFT[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, **10**(4):657-661.
- [8] Huang L, Li Z. Feature-based image registration using the shape context[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **31**(8):2169-2177.
- [9] 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.
- [10] Ye Y, Shen L, Hao M, et al. Robust Optical-to-SAR image matching based on shape properties [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, **14**(4):564-568.
- [11] Cole-Rhodes A A, Johnson K L, LeMoigne J, et al. Multiresolution registration of remote sensing imagery by optimization of mutual information using a stochastic gradient [J]. *IEEE transactions on image processing*, 2003, **12**(12):1495-1511.
- [12] Hel-Or Y, Hel-Or H, David E. Matching by tone mapping: photometric invariant template matching [J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2014, **36**(2):317-330.
- [13] YE Yuan-Xin, SHAN Jie, PENG Jian-Wei, et al. Automated multispectral remote sensing image registration using local self-similarity [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, (叶沅鑫, 单杰, 彭剑威, 等. 利用局部自相似进行多光谱遥感影像自动配准. *测绘学报*), 2014, **43**(3):268-275.
- [14] Ye Y X, Shan J. A local descriptor based registration method for multispectral remote sensing images with non-linear intensity differences [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014, **90**(2014), 83-95.
- [15] Shechtman E, Irani M. Matching local self-similarities across images and videos [C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007. 1-8.
- [16] WANG Feng, YOU Hong-Jian. Robust registration of SAR and optical remote sensing Images based on cascade transforms [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王峰, 尤红建. 基于级联变换的光学和 SAR 图像配准算法. *红外和毫米波学报*). 2015, **34**(4): 486-492.
- [17] Kovese P. Image features from phase congruency [J]. *Journal of Computer Vision Research*, 1999, **1**(3): 1-26.
- [18] Wong A, Clausi D A. ARRSI: Automatic registration of remote-sensing images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(5): 1483-1493.
- [19] Wong A, Clausi D A. AISIR: Automated inter-sensor/inter-band satellite image registration using robust complex wavelet feature representations [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, **31**(10): 1160-1167.
- [20] Morrone M C, Owens R A. Feature detection from local energy [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1987, **6**: 303-313.
- [21] Ye Y X, Shen L. HOPC: A novel similarity metric based on geometric structural properties for multi-modal remote sensing image matching [C]. *Proceedings of ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016: 9-16.
- [22] Ye Y, 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.
- [23] Moreno P, Bernardino A, Santos-Victor J. Improving the SIFT descriptor with smooth derivative filters [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, **30**(1):18-26.
- [24] Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection [C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011: 886-893.
- [25] Reinartz P, Müller R, Schwind P, et al. Orthorectification of VHR optical satellite data exploiting the geometric accuracy of TerraSAR-X data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, **66**(1): 124-132.
- [26] Yu L, Zhang D R, Holden E J. A fast and fully automatic registration approach based on point features for multi-source remote-sensing images [J]. *Computers & Geosciences*, 2008, **34**(7):838-848.