

文章编号 1004-924X(2013)11-2960-13

遥感图像配准技术综述

余先川*, 吕中华, 胡丹

(北京师范大学 信息科学与技术学院, 北京 100875)

摘要: 遥感图像配准是图像融合、多光谱分类、环境监测和图像镶嵌等不可缺少的步骤。本文讨论了遥感图像领域中重要的和最新的配准算法, 将配准方法划分为基于区域的配准、基于图像特征的配准、基于混合模型的配准和基于物理模型的配准四类; 描述了四类配准方法中的典型算法, 并分析了它们的优势和不足, 重点概述了基于特征配准中的局部不变特征变换算法。评述了国内外遥感图像配准的发展现状; 指出了遥感图像配准技术中存在的问题, 即多源遥感图像的配准、遥感图像配准的实时性、遥感图像的非线性配准和遥感图像配准的精度评价, 最后展望了遥感图像配准技术的发展前景。

关键词: 图像配准; 遥感图像; 特征提取; 物理模型

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132111.2960

Review of remote sensing image registration techniques

YU Xian-chuan*, LÜ Zhong-hua, HU Dan

(College of Information Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

* Corresponding author, E-mail: yuxianchuan@163.com

Abstract: Remote sensing image registration is an indispensable part for remote sensing image fusion, multispectral classification, environmental monitoring, image mosaicing and so on. In this paper, the important and latest registration methods for remote sensing are discussed and are divided into four types, including area-based methods, feature-based methods, hybrid-based model methods and physically-based model methods. Then, the classic algorithms of each type are analyzed respectively, and their advantages and shortcomings are also stated. The scale invariant feature transform algorithms are mainly discussed. Furthermore, the difficulties of remote sensing image registration techniques are summarized, including the multi-source remote sensing image registration, the real-time registration of remote sensing image, the nonlinear registration of remote sensing image and the accuracy evaluation of remote sensing image registration. Finally, the prospects of image registration are pointed out.

Key words: image registration; remote sensing image; feature extraction; physical model

1 引言

同视角使用相同或不同的传感器拍摄的有重叠区域图像进行几何校准的过程^[1-2]。图像配准技术是近年来发展迅速的图像处理技术之一, 主要用于军事、遥感、医学、计算机视觉等领域。国外从

图像配准是指在不同时段, 对同一场景从不

收稿日期: 2013-02-25; 修订日期: 2013-04-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41272359); 北京市自然科学基金资助项目(No. 4102029); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z156)

20 世纪 60 年代就开始了图像配准的研究,而国内从 20 世纪 90 年代初才开始涉足此领域。遥感图像配准是遥感图像处理的重要研究内容,也是图像融合、目标变化检测和识别、拼接和镶嵌等过程中必不可少的步骤。它主要包括预处理、特征提取、特征匹配、变换模型求解和图像重采样^[3]4 个处理步骤。

近年来,遥感图像配准领域的研究逐渐摆脱了仅着眼于准确性和高效性分析的局限性,涌现了许多新方法。鉴于这些新方法在遥感图像配准理论和实时应用上的重大意义,有必要对其研究现状进行综述。本文将传统的和最新的遥感图像配准方法划分为四类:基于区域的配准、基于特征

的配准、基于混合模型的配准和基于物理模型的配准,并指出了每类方法中的典型算法及优缺点;评述了遥感图像配准算法在国内国外的发展现状;指出了遥感图像配准研究中存在的难题,即多源遥感图像的配准,遥感图像配准的实时性、遥感图像的非线性配准和遥感图像配准的精度评价;最后展望了它的发展前景。

2 遥感图像配准方法

图像配准意在寻求两幅图像之间的变换模型,使两幅有重叠区域的图像在同一坐标系下显现,图 1 表示自动图像配准的主要方法。

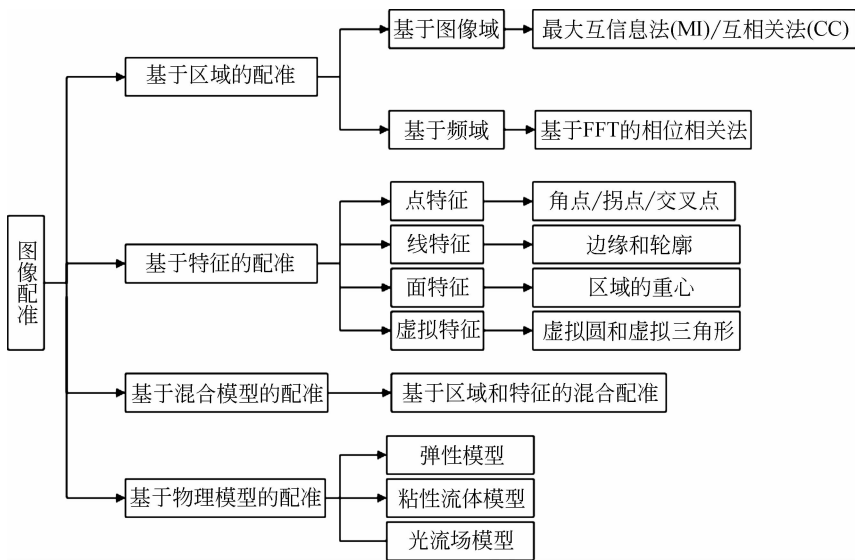


图 1 图像配准的主要方法

Fig. 1 Main methods of image registration

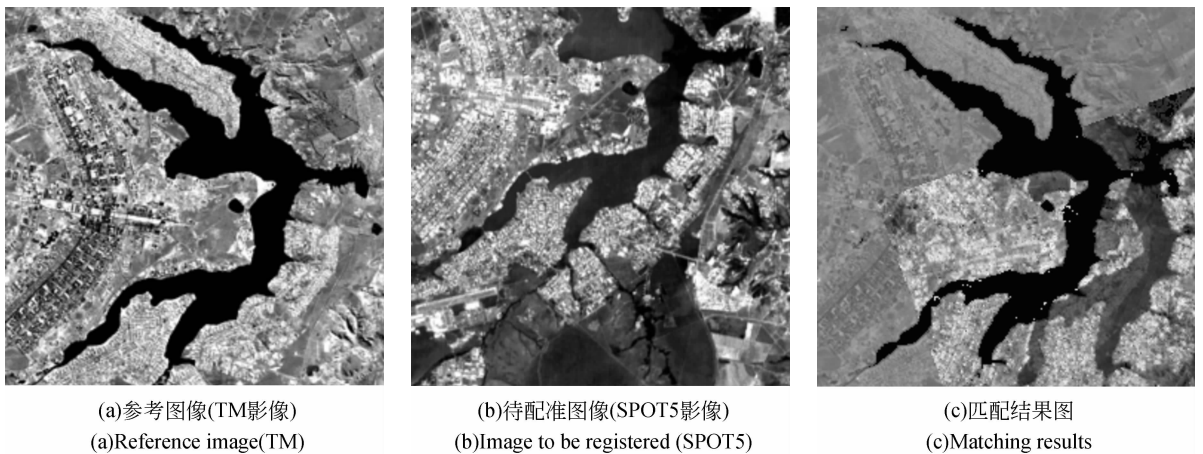


图 2 TM 影像和 SPOT5 影像的互信息配准结果

Fig. 2 Registration results of mutual information for TM and SPOT5 satellite images

2.1 基于区域的配准

基于区域的配准又称模板匹配法,是最早发展起来的图像配准技术,目前已发展的比较成熟。该方法利用图像的灰度信息,建立两幅图像之间的相似性度量,再采用某种搜索方法,寻找使相似性度量值最大或最小的变换模型的参数值,以达到配准图像的目的,一般不需要对图像进行复杂的预处理。基于区域的配准主要包含基于图像域和基于频域两类处理方法,前者包括互相关法(Cross-Correlation,CC)^[4]、最大互信息法(Mutual Information,MI)^[5]、极大似然匹配法^[6]和序贯相似性检测法(Sequential Similarity Detection Algorithms,SSDAs)^[7]等;后者包括基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT)的相位相关法^[8-9]和小波变换法等。

2.1.1 最大互信息法

最大互信息法最初用于医学图像配准,Chen^[10]和Johnson^[5]分别于2000年和2001年^[5]将它用于遥感图像配准。最大互信息法以信息熵(即2个随机变量统计相关性的测度)来衡量两幅图像的匹配程度。它通过查找最大的互信息,得到两幅图像的最佳匹配模型。其中,图像A和图像B的互信息定义如下:

图像A的熵定义为:

$$H(A) = - \sum_a P_A(a) \log P_A(a), \quad (1)$$

图像A和图像B的联合熵表示为:

$$H(A,B) = - \sum_{a,b} p_{AB}(a,b) \log p_{AB}(a,b), \quad (2)$$

则图像A和图像B的信息熵表示为:

$$MI(A,B) = H(A) + H(B) - H(A,B). \quad (3)$$

最大互信息法因其配准精度高,常用于多模态医学图像的配准;近年来也常用于遥感图像的配准,但计算速度限制了它在遥感图像配准领域的发展和應用。Ghorbani等^[11]将基于阻尼最小二乘的模拟退火算法(Simulated Annealing Marquardt Levenberg,SA-ML)作为查找最大互信息的搜索算法,并联合多分辨率金字塔对多模态遥感图像进行配准,获得了较好的效果;Dame等^[12]用改进的互信息基本函数来优化互信息法,以配准不同类型的图像(医学、自然景物和遥感图像),不仅计算速度得到了提高,精度也得到提高。而另一种经典的基于区域配准的互相关法与最大互信息法都是不同参数下的最大似然估计^[13],因此,它们具有一个

统计的框架。用最大互信息法配准TM影像和SPOT5影像(图2),该过程耗时206s。

2.1.2 基于FFT的相位相关法

基于FFT的相位相关法适合配准灰度属性有线性正相关的图像,依据傅里叶变换的平移、旋转和缩放性质来计算图像间的变换参数,其原理为:若图像 $f_2(x,y)$ 与图像 $f_1(x,y)$ 之间存在平移为 (x_0,y_0) 、旋转角为 θ_0 及尺度因子为 a 的变换,则有:

$$f_2(x,y) = f_1 \left(\begin{array}{l} a(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0) - x_0 \\ a(-x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0) - y_0 \end{array} \right). \quad (4)$$

则它们在极坐标下的傅里叶变换关系:

$$F_2(\rho,\theta) = e^{j(\rho x_0 \cos \theta + \rho y_0 \sin \theta)} a^{-2} F_1(\rho/a, \theta - \theta_0). \quad (5)$$

其中, F_1 和 F_2 是两幅图像的傅里叶变换,它们的幅值 M_1 和 M_2 满足:

$$M_2(\rho,\theta) = a^{-2} M_1(\rho/a, \theta - \theta_0). \quad (6)$$

利用公式(6)的对数变换及相位相关技术,可计算出旋转角 θ_0 和尺度因子 a ,进而利用它们校正图像的尺度和旋转角,再通过两幅图像功率谱的反傅里叶变换所对应的峰值位置得到校正图像的平移参数 (x_0,y_0) ,进而校正图像的平移。

基于FFT的相位相关法对图像的灰度变化、平移、旋转和缩放有较好的不变性,且易于硬件实现,但它要求图像间有严格的线性关系,且对噪声敏感。Xu等^[14]引入了子空间中用于频率估计的多信号分类算法,在较低信噪比区域仍能获得较高的峰值估计精度,提高了配准的精度;Tzimiropoulos等^[15]将相位相关函数替换为梯度相关(图像幅度和方向梯度)函数,并引入规范化梯度相关,提高了算法的鲁棒性和匹配精度;Thangavel等^[16]将高通滤波器用于傅里叶变换后的图像,再计算图像间的变换参数,提高了匹配精度。

基于区域的配准实现简单,并且,由于它直接利用全部可用的图像灰度信息,故配准精度高。但计算量大,无法满足遥感图像配准的实时性要求。当图像重叠部分较小时,配准效果不理想,且对图像非线性形变、光照和尺度变化鲁棒性不强。因此,它适用于配准灰度信息、尺度和旋转角差别不大的遥感图像。

2.2 基于特征的配准

基于特征的配准是目前使用最多的遥感图像配准方法,它将对整个图像的分析转化为对图像某种特征的分析,大大降低了计算量,且对图像灰度

变化及遮挡等有较好的不变性。主要特征元素包括点、线、面和虚拟特征,是图像属性的典型代表。

2.2.1 点特征

在各个方向灰度变化都较大的点称为点特征,包含拐点、角点和交叉点等。常用的匹配特征包含基本的点特征和高级描述符。图像特征点检测的重要起点是 1977 年 Moravec^[17] 提出的角点检测概念,但该检测算子不具备旋转不变性,并且噪声敏感;Harris 和 Stephens^[18] 于 1988 年提出 Harris 算子,比 Moravec 算子有更高的检测率和重复率,且对旋转和灰度变化都具有不变性,但不具有尺度不变性;1997 年,Smith 和 Brady^[20] 提出了 SUSAN (Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus) 局部检测算子,该算子对局部噪声不敏

感,抗干扰能力强;Mikolajczyk 和 Schmid^[21] 于 2004 年结合尺度空间理论并构造仿射区域,得到了具有尺度不变性的 Harris-Laplacian 检测子和具有仿射不变性的 Hessian-Affine 检测子。Lowe^[22-23] 于 1999 年提出了尺度不变特征变换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT),并在 2004 年进行了总结完善,使得 SIFT 特征描述符具有对图像灰度变化、旋转、缩放甚至仿射变换等保持不变性的优点。Baya^[24] 于 2008 年提出了 SURF (Speeded Up Robust Features) 局部算子,引入了积分图像和箱式滤波器以提高配准速度。局部不变性描述子 SIFT 和 SURF 以其对灰度变化、旋转、缩放的不变性及对仿射变换的部分不变性,得到了广泛应用,随后涌现了多种提升算法^[25-36]。

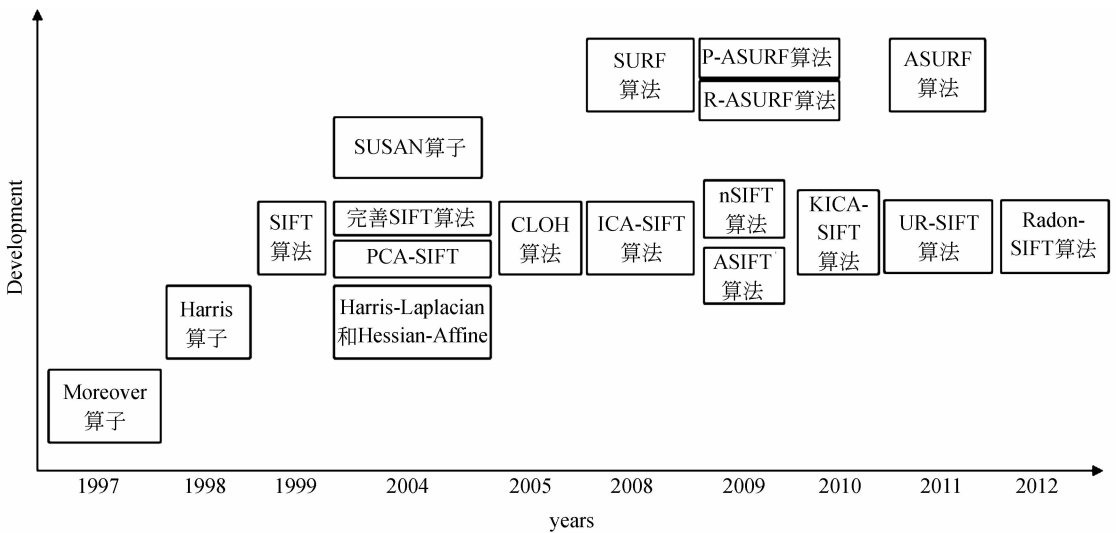


图 3 基于点特征的图像配准算法的发展历程

Fig. 3 Development process of image registration algorithms based on point feature

(1) Harris 检测算子

Harris 检测算子通过计算窗口沿各方向移动后的灰度变化,查找 Harris 响应局部极值点来确定 Harris 角点^[18]。设以像素点 (x, y) 为中心的小窗口平移为 $(\Delta x, \Delta y)$, 则其灰度变化 $c(x, y; \Delta x, \Delta y)$ 为:

$$c(x, y; \Delta x, \Delta y) = \sum \omega_{x,y} (I_{x+\Delta x, y+\Delta y} - I_{x,y})^2 = \sum \omega_{x,y} \left(\Delta x \frac{\partial I}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial I}{\partial y} + o(\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}) \right)^2 \quad (7)$$

其中, $\omega_{x,y}$ 为加权函数,一般定义为高斯函数; I 为图像灰度函数;根据泰勒公式对上式进行一阶近似,有:

$$c(x, y; \Delta x, \Delta y) \approx [\Delta x, \Delta y] \mathbf{M}(x, y) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{M}(x, y) = \sum \omega_{x,y} \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{M}(x, y)$ 是对称矩阵;对角化 \mathbf{M} 并简化公式(8),有:

$$c(x, y; \Delta x, \Delta y) \approx \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \mathbf{R} \quad (9)$$

其中: \mathbf{R} 为旋转因子; λ_1 和 λ_2 为处理后矩阵的特征值。因对角化处理不改变空间曲面的形状,且特征值反应了 2 个主轴方向的图像表面曲率,故当 2 个特征值均较小时,表明目标点附近区域是平坦的;特征值一大一小时,表明目标点位于边缘;只有当 2 个特征值均较大时,表明 c 在所有方向上都增

大。则 Harris 响应函数定义如下:

$$CFR = \det(\mathbf{M}) - \alpha(\text{trace}(\mathbf{M})). \quad (10)$$

其中: $\det \mathbf{M}$ 表示矩阵的行列式; $\text{trace}(\mathbf{M})$ 表示矩阵的迹。当目标像素点的 Harris 响应值大于给定的阈值时, 则该像素点即为 Harris 角点。易等^[19]提出了 5 维一阶优化梯度滤波的 Harris 检测器, 从而, 得到更为精确的亚像素角点。Harris 算子检测的角点重复率高且算法简单, 在许多遥感图像配准中得到了应用, 但其不具有尺度不变性。

(2) SIFT 算法

SIFT 算法^[22-23]由尺度空间极值点检测、特征点精确定位、特征点主方向确定和特征描述符生成四步组成。首先, 用高斯差分 DoG (Different of Gaussians) 函数近似拉普拉斯 LoG (Laplace of Gaussian) 函数, 并将其与源图像卷积生成 DoG 尺度空间。再利用非极大值抑制原理提取极值点, 即将每个目标点与同尺度的 8-邻域点和相邻尺度图像的 9×2 个点共 26 个点比较(保证在尺度域和空间域均为极值)。

图像二维离散空间得到的极值点不一定是真正意义上的极值点, 需要剔除不稳定的极值点(响应值低的点和边缘点), 并精确定位稳定的极值点。利用 Taylor 插值公式对初始极值点插值, 求取极值点的精确位置:

$$\tilde{x} = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial x^2} \frac{\partial D}{\partial x}. \quad (11)$$

公式(11)表示 Taylor 插值得到的相对初始极值点的偏移量, 它是一个关于位置空间 (x, y) 和尺度因子 δ 的三维矢量, 在任何方向偏移大于 0.5 的点都视为不稳定点, 需要剔除。同时, 将插值点的 DoG 响应作为对比度:

$$D(\tilde{x}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial x} \tilde{x}. \quad (12)$$

若插值点的 DoG 响应绝对值小于 0.03 (图像的灰度值在 0~1 之间)^[23], 则为不稳定点, 需要剔除。另外, 图像边缘处的点有较强的 DoG 响应, 但它们是不稳定的; 而一个平坦的 DoG 响应在横跨边缘处有较大的主曲率, 在垂直边缘处有较小的主曲率, 且主曲率与 2×2 的 Hessian 矩阵的特征值成正比。利用该矩阵特征值的比值得到主曲率的比值, 并剔除比值大于 10 的不稳定点。

得到具有精确位置的特征点后, 采用灰度直方图法确定特征点的主方向, 并将以特征点为中心的坐标轴旋转至特征点的主方向; 然后, 将以特征点为中心的 16×16 窗口划分为 4×4 个子区域, 每个子区域采用灰度直方图法形成一个 8 维的向量, 进而生成了特征空间维数为 $4 \times 4 \times 8 = 128$ 维的 SIFT 特征描述符。用 SIFT 算法配准 TM 影像和 SPOT5 影像(与 2.1.1 中相同), 其配准结果如图 4 所示, 该过程耗时约 6 s。

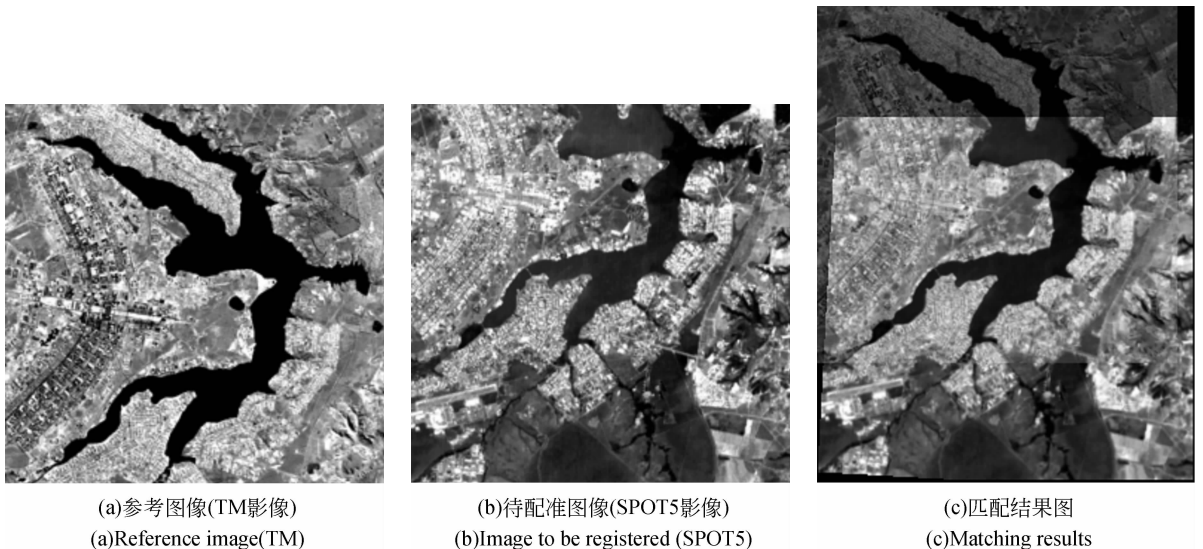


图 4 TM 影像和 SPOT5 影像 SIFT 配准结果

Fig. 4 Registration results of SIFT for TM and SPOT5 satellite images

由于 SIFT 算法的优点,国内外学者提出了许多基于 SIFT 的提升算法:针对 SIFT 特征描述符维度高计算量大的问题,2004 年 Ke 提出的 PCA-SIFT 算法^[25];2008 年 Duan 提出的 ICA-SIFT 算法^[26]和 2010 年 Liu 提出的 KICA-SIFT 算法^[27]分别利用了主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)、独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)和核独立成分分析(KICA)方法以除去 SIFT 描述符的冗余信息,这样就降低了描述符的维数,从而降低了特征匹配的计算量,但几种特征描述符的独特性不如 SIFT;2005 年 Mikolajczyk 提出的 GLOH 算法^[28]利用对数极坐标同心圆计算梯度直方图,提高了 SIFT 特征描述符的独特性和算法的鲁棒性。前面所提的几种提升方法需要大量的样本学习以生成特征空间的投影矩阵,且对不同类型的遥感图像需要分别训练,对数据依赖性较强;2009 年 Morel 提出的 ASIFT 算法^[29]解决了 SIFT 算法的不完全仿射性问题,且比 Harris-Affine 效果更好;2011 年 Sedaghat^[30]提出的 UR-SIFT 算法利用规则网格提高了 SIFT 特征点的分布情况,进而提高了具有局部变换的遥感图像配准精度;2012 年 Bu 等^[31]提出的 Radon-SIFT 利用局部特征点不同方向 36 条直线的 Radon 变换,得到了 36 维的描述符,实验表明该 36 维描述符比原始的 128 维描述符更准确有效。

基于点特征的配准目前发展的比较成熟,它仅用部分像素点表征整幅图像,故计算速度快,在遥感图像配准中应用广泛。它适合配准噪声对特征点影响较小的图像。但当对不同类型的传感器获得的图像进行配准(例如:SAR 图像与可见光图像)时,由于成像机理及像元表示形式不同使得图像间呈现很大的灰度和噪声差异,使匹配精度很低,甚至匹配失败。

2.2.2 线特征

线特征包括道路、河流的边缘和目标的轮廓线等,它反应了图像的边缘和纹理信息,它可以较好地剔除一些畸变的影响。基于线特征的配准首先利用边缘检测算法提取线特征,再以一定的方式表达和描述线特征,根据线特征描述符进行匹配,进而得到匹配线对;然后,选取匹配线对的同名点,如果线闭合,则取其质心作为同名点,如果线不闭合,则取线段的起点和中点作为同名点;最后对图像进行几何纠正。

边缘检测算法目前已经比较成熟,且检测快捷。时域经典的边缘检测算法^[37]有:直方图法、梯度算子(Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子)、方向算子、Canny 算子、Hough 变换等。变换域的边缘检测算法包括傅里叶变换法和小波变换法。其中,Canny 算子及其改进算法常用于边缘提取,但在提取过程中常损失一些弱边缘,常采用 Hough 变换来检测和连接线段。另外,为了有效地计算描述符,常用链码、边界段和多边形等表示法压缩表示图像的边缘,其中,链码使用广泛。常用的线特征描述符包括简单描述符(边界长度、边界直径、曲率)、傅里叶描述符和矩等。

Li 等^[38]以区域边界及强边缘作为线特征,用链码相关性和形状相似性规则配准多源遥感图像(光学遥感图像与 SAR 图像)。在这种方法的基础上,国内外学者提出了一些新的配准算法:Teo 等^[39]用互信息粗配准 AVNIR-2 和 SAR 图像,再采用 Canny 算子提取边缘特征,用最小点到线距离进行精确匹配;苏娟等^[40]提出了以结构特征边缘对遥感图像配准,该方法不仅适用于 SAR 与可见光图像的配准,也适用于其他不同类型的多传感器图像的自动配准。

基于线特征的配准常用于匹配边缘和轮廓较明显的多源遥感影像,例如:SAR 图像与光学图像,红外图像与光学图像等。由于线特征比点特征结构性强,鲁棒性更强,因而,配准效果更好。但由于大多数边缘检测算法都依赖于图像本身,不能对所有种类图像都提取出较理想的边缘,因而,线特征提取受限制;且当参考图像与待配准图像分辨率差别很大时,在一张图像上出现的边缘和轮廓有可能在另一张图像中不存在。

2.2.3 面特征

面特征常出现在卫星图像和航空图像中,如大片的水域、森林、湖泊、建筑物等,特别是这些区域的多光谱图像,由于不同区域的光谱成份不同,很容易对这些区域进行区分和识别。基于面特征的配准首先提取闭合区域,再以该闭合区域的某种特征作为区域形状的特征进行匹配,进而得到配准变换模型。

边缘检测法和图像分割法常用于提取闭合区域。图像分割法^[41]包含形态学分割算法、动态阈值技术、区域增长技术及基于 Mean-Shift 的分割算法等;常采用矩不变量(例如:中心距、Hu 矩、

Zenike 矩等)、面积、周长、扁平度和长宽比统计面特征,以便于匹配。

Goshtasby 等^[42]采用由粗到精的迭代过程获得了较好的图像分割效果,将分割得到的面特征配准图像,获得了亚像素级的匹配精度;Zhang 等^[43]采用区域生长技术分割图像以提取面特征,用于配准 ASAR 图像和 TM 图像;Cao 等^[44]提出了使用迭代阈值分割技术提取闭合区域,再以模糊集作为区域相似性准则进行匹配;张宝尚等^[45]用主动轮廓法获得去噪后 SAR 图像的分割区域,提取面特征以配准图像;辛亮等^[46]则用高斯拉普拉斯算子从 QuickBird 影像中提取封闭的边缘,得到细化的面特征,并用奇异值分解法匹配代表面特征的质量,提高了配准的速度和精度。

面包含的信息比线和点多,不会出现因检测轮廓或点的不准确而获得较差的配准结果。但闭合区域对分割算法依赖性很强,且没有一种分割算法对所有类型的图像都能获得最佳结果,大多数依赖于图像本身。另外,提取的面特征不易达到一致性,对灰度差异较大的图像不适用。

2.2.4 虚拟结构特征

虚拟结构特征是一种新的结构特征,它是通过扩展基本的点特征和线特征而获得的,包括虚拟三角形和虚拟圆等。基于虚拟结构特征的配准首先通过提取基本特征来获得虚拟结构特征,再依据一定的相似性准则完成匹配,进而得到配准变换模型。

Enrique 等^[47]以边缘特征组成虚拟三角形,配准视觉和热红外图像;康欣等^[48]用检测到的点特征构造仿射不变量虚拟结构三角形,配准 SAR 图像和可见光图像;Yu 等^[49]则以 Harris 角点构造虚拟三角形特征,用于精配准多源遥感图像;为避免 SAR 图像斑点噪声的影响,曹俊等^[50]以直线交点构造虚拟点,进而构造虚拟三角形,用于精配准 SAR 图像与可见光图像;Alhichri 等^[51]定义了最大不包含边缘点的虚拟圆,其半径可用于配准,该虚拟圆特征对破损的边缘具有鲁棒性,且通过距离变换易于从多种类型图像中提取。

虚拟结构特征不仅能有效地配准灰度差别较大的遥感图像,如 SAR 图像与光学图像,红外图像与光学图像,还可以精配准具有局部形变的遥感图像,为图像融合等提供高精度的配准数据。但定义虚拟结构特征的过程复杂且耗时,不利于遥感图像

配准的实时性。

2.3 基于混合模型的配准

基于混合模型的配准^[52]结合了基于区域的配准和基于特征的配准两类方法的优点,既具有前者配准精度高的优点,又具有后者计算速度快的优点,且对图像灰度变化、旋转和缩放等具有不变性。它包含粗配准和精配准两个处理过程,粗配准将最优配准参数限制在一个限定的范围内,精配准则采用优化搜索策略从粗配准得到的参数中快速找到最优参数,它们使用不同的匹配方法。

Yu 等^[49]用尺度不变性 SIFT 特征描述符粗配准多源遥感影像(SPOT5/TM/Quickbird)以获得相同尺度图像,再从小波域中提取 Harris 角点,用相关匹配法进行精配准;Hong 等^[53]利用小波变换提取多分辨率特征,以归一化互相关法得到匹配点对,再用概率松弛法(基于特征的配准方法)剔除错误匹配点对;凌志刚等^[54]用相位一致性变换和 Zernike 矩对具有旋转、灰度差异较大的 LandSat-7 和 ETM+ 图像粗配准,再用互相关修正迭代算法进行精配准;刘向增等^[55]利用改进的具有仿射不变性 SIFT 特征描述符粗配准 SAR 图像,再以奇异值分解法对重新构建的相似矩阵精配准,但算法复杂度较高,计算速度慢;Li 等^[56]用 SUFR 描述子和快速最小截平方和估计算子粗配准 SAR 图像,得到了像素级精度的变换参数,再用归一化互相关方法进行精配准,得到了子像素级精度的变换参数。

基于混合模型的配准在多源遥感影像配准中应用较广泛,适宜于对图像间有较大尺寸、旋转角和平移差别的配准,甚至对那些伴随各自图像的畸变的效果也很好,主要用于提高配准精度。但由于结合了两类方法,增加了算法复杂度,常常会降低了计算速度。

2.4 基于物理模型的配准

基于物理模型的配准与上述三类方法不同,它不是将图像视为离散点的组合,而是将图像理解为一个整体的物理模型,图像间的差异认为是由物理形变引起的,基于物理模型的配准主要就模拟这种形变过程。它包含基于弹性模型的配准^[57]、基于黏性流体模型的配准^[58]和基于光流场模型的配准^[59]。

2.4.1 基于弹性模型的配准

基于弹性模型的配准^[60]将源图像到目标图像

形变过程的建模等效于拉伸弹性体的物理过程。形变主要受内力和外力的作用,内力是当弹性材料形变时用于抵消使弹性体从平衡状态产生的力,外力是外界作用于弹性体的力,当作用于弹性体上的外力和内力达到平衡时,形变过程结束。描述弹性形变的 Navier 线性偏微分方程为:

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla \operatorname{div} u + f = 0. \quad (13)$$

其中, u 是位移形变场, ∇ 是梯度算子, ∇^2 是 Laplace 算子, λ 和 μ 是描述弹性体形变程度的参数, f 是作用在弹性体上的外力,并用于控制配准过程,常用的是选择相似性度量的梯度。公式(13)可通过有限差分法或逐次超松弛法求解。目前,在遥感图像配准领域的应用还很少。

2.4.2 基于光流场模型的配准

在基于光流场模型的配准^[61]中,源图像和目标图像被认为是图像序列 $I(x, y, t)$ 的连续时间采样,并假设在短时间间隔 Δt 运动前后,特定空间点的图像灰度保持不变:

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t). \quad (14)$$

用泰勒公式展开公式(14)的右边并进行一阶近似,有光流场公式:

$$\frac{\partial I}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0. \quad (15)$$

其中, (u, v) 用于描述两幅图像间的位移,一般要在其上附加光滑度约束,以便得到光流场的合理估计,进而得到图像的位移。上式约束所导致的强梯度方向上的位移分量为:

$$f(x, y) = - \frac{\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t}}{\|\nabla_x I(x, y, t)\|^2} \nabla_x I(x, y, t). \quad (16)$$

其中, $\nabla_x I(x, y, t)$ 表示图像的空间梯度。还需要在公式(15)中增加其他约束,以得到其他方向的位移分量。

基于光流场模型的配准在遥感图像配准领域的应用尚处于起步阶段,张泽旭等^[62]用全局光流场配准红外图像的背景区域,再以层次匹配算法精配准目标,该方法对场景的运动有很好的鲁棒性;Liu 等^[63]采用相位相关和光流匹配具有非线性变换的 ETM+ 和 ASTER 图像,获得了很好的效果。基于光流的技术不需要提取图像特征,因此,计算速度快,但这类方法很难完成不同对象间的匹配问题。

基于物理模型的配准是近期医学图像配准的

研究热点问题,在遥感图像配准的应用中处于起步阶段,且该方法尚不成熟,如何有效建立高精度和高计算速度的配准模型需要进一步研究。

3 遥感图像配准技术面临的难题

3.1 多源遥感图像的配准

随着遥感技术的发展,传感器的种类越来越多,分辨率也越来越高,单一传感器获得的信息无法满足应用的需求,如阴雨天气的地质灾害处理中,常要综合多种传感器(如合成孔径雷达、超光谱成像系统、红外夜视仪等)的信息来感知地质灾害的地点,以及时确定救灾线路,因此,需要配准多源遥感图像。但由于成像机理不同,不同传感器获得的同一地区的遥感图像具有不同的分辨率、灰度值、光谱、时相及景物特征等,这使它们之间的配准远远未达到快速和高精度的要求,因此,多源遥感图像配准技术是一个很有难度的课题。如 SAR 图像是与光学图像的配准。SAR 图像依据相干原理产生的, SAR 能对景物进行全天候拍摄,且对地面植被具有一定的穿透力,但斑点噪声很多,它的地物特征与光学图像有很大差异,虽然有学者研究了 SAR 图像与光学图像的配准^[45,50,64],但都是针对有明显地物特征(道路、河流等)的图像,且没有统一的配准框架。因此,多源遥感图像的自动配准技术需要进一步深入研究。

3.2 遥感图像配准的实时性

遥感图像配准的实时性是其在实际应用中的必然要求,如军事侦查中,要实时配准雷达图像、红外图像、光学图像等以定位目标。在现有的图像配准方法中,基于物理模型的配准目前还不成熟;基于混合模型的配准由于包含粗配准和精配准 2 个过程,计算速度慢;基于特征的配准虽然比基于区域的配准的计算速度快,但其特征提取和匹配过程耗时较长,仍不能满足配准的实时性需求。随着高光谱和高分辨率遥感图像的广泛应用,遥感图像的数据量成倍增长,数据的处理时间必然会增加,而传统人工选点的半自动配准方法更无法满足实时配准的需求。因此,如何在保证配准精度的前提下提高配准速度,以达到实时性的要求也是遥感图像配准领域的难题。

3.3 遥感图像非线性配准

遥感图像的线性配准已发展的比较成熟,但由

于传感器获取图像的角度和高度存在差异,图像中存在更多的是非线性形变,故有必要对其进行研究以提高配准精度。目前,已经有学者研究遥感图像的非线性配准,如多项式变换和基于物理模型的配准(基于弹性模型、黏性流体模型和光流体模型的配准)等。多项式变换模型复杂,且耗时长,而基于物理模型的配准是医学图像配准研究的热点问题,在遥感像配准领域的研究和应用还不成熟,需要进一步研究。

3.4 遥感图像配准的评价指标

评价遥感图像配准常用的指标包括均方根误差(RMSE)、正确匹配对数量(或正确匹配对数量占总匹配对数量的百分比)和视觉感知。在计算均方根误差时,通常根据实际情况使用不同的数据集。常用的数据集有计算变换模型的匹配对和计算变换模型以外的匹配对。前者实现简单,实际上是表示求解模型对匹配对的拟合程度。当拟合很好时,误差完全有可能为零;后者比前者更能说明配准精度,但受匹配对数量和奇异值的影响较大。正确匹配对数量只能在一定程度上说明某匹配算法所得到的特征匹配对数量。视觉感知只能粗略评价明显地物特征的对齐程度。因此,对于配准精度的评价指标还不完善,有待进一步研究。

4 结 论

经过几十年的发展,遥感图像自动配准在图像融合、变化特征检测等领域得到了广泛的应用,虽然已取得了很多成果,但仍面临很多问题。本文综述了遥感图像配准的四类方法:基于区域的配准、基于特征的配准、基于混合模型的配准和基于物理模型的配准,归纳了各类方法中典型的算法,并分析了各自的优势和不足。前两类方法研究的比较成熟,第三类方法是在前两类方法的基础上发展起来的,但前三类方法中每种方法相互独立且不成体系,它们是今后研究的热点方向之一,第四类方法是近年来医学图像配准的研究热点,在遥感图像配准中处于起步阶段,各方面技术尚不成熟,有待人们做进一步的研究。本文进一步指出了遥感图像配准技术发展面临的问题,包括多源遥感图像的配准、图像的非线性配准、遥感图像配准的实时性及遥感图像配准的评价指标。多源遥感图像的配准是遥感配准的研究热点问题。非线性配准的研究虽然不成熟,但是可解决遥感图像中常出现的局部形变,故值得深入研究,而配准的实时性和评价指标是自图像配准出现以来人们一直不断研究的问题。

参考文献:

- [1] BROWN L G. A survey of image registration techniques [J]. *ACM Computing Surveys*, 1992, 24(4):325-376.
- [2] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods; a survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(11):977-1000.
- [3] GOSHTASBY A. *2-D and 3-D Image Registration for Medical, Remote Sensing, and Industrial Applications* [M]. Hoboken: Wiley-Interscience Publication, 2005.
- [4] MARTINEZ A, GARCIA-CONSUEGRA J, ABAD F. A correlation-symbolic approach to automatic remotely sensed image rectification[C]. *Proceedings of IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany: IGARSS*, 1999: 336-338.
- [5] JOHNSON K, COLE-RHODES A, ZAVORIN I, et al.. Mutual information as a similarity measure for remote sensing image registration [J]. *SPIE Proceedings*, 2001, 4383:51-61.
- [6] LI W, LEUNG H. A maximum likelihood approach for image registration using control point and intensity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(8):1115-1127.
- [7] BAMEA D I, SILVERMAN H F. A class of algorithms for fast digital image registration [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1972, 21(2):179-186.
- [8] ANUTA P E. Spatial registration of multispectral and multi-temporal digital imagery using fast fourier transform techniques [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1970, 8(4):355-368.
- [9] REDDY B S, CHATTERJI B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration [J]. *IEEE Transactions on*

- Image Processing*, 1996, 5(8): 1266-1271.
- [10] CHEN H, VARSHNEY P, ARORA M. Performance of mutual information similarity measure for registration of multitemporal remote sensing images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(11):2445-2454.
- [11] GHORBANI H, BEHESHTI A A. Multiresolution registration of multitemporal remote sensing images by optimization of mutual information using a simulated annealing based Marquardt-Levenberg technique [C]. *Proceedings of 2007 International Conference on Intelligent & Advanced Systems, Malaysia, Kuala Lumpur: ICIAS, 2007: 685-690.*
- [12] DAME A, MARCHAND E. Second-order optimization of mutual information for real-time image registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(9):4190-4203.
- [13] ROCHE A, MALANDAIN G, AYACHE N. Unifying maximum likelihood approaches in medical image registration [J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology, Special Issue on three Dimensional Imaging*, 2000, 11(1): 71-80.
- [14] XU M, VARSHNEY P K. A subspace method for fourier-based image registration [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3):491-494.
- [15] TZIMIROPOULOS G, ARGYRIOU V, ZAFEIRIOU S, et al.. Robust FFT-based Scale-Invariant Image registration with image gradients [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(10): 1899-1906.
- [16] THANGAVEL P, KOKILA R. An extension of FFT based image registration [J]. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2013, 177(2): 729-737.
- [17] MORAVEC H P. Towards automatic visual obstacle avoidance [C]. *Proceedings of 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence, MA, USA, IJCAI, 1977, 2:584-584.*
- [18] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detection [C]. *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, Manchester, UK: AVC, 1988,147-151.*
- [19] 易盟,郭宝龙,严春满. 结合优化梯度滤波与投影不变的航拍视频配准[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 651-660.
- YI M, GUO B L, YAN CH M. Aerial video registration combining optimal gradient filters and projective invariant [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):651-660. (in Chinese)
- [20] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN: A new approach to low level image processing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 23(1): 45-78.
- [21] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. Scale & affine invariant interest point detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(1): 63-86.
- [22] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features [C]. *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece: ICCV, 1999, 2:1150-1157.*
- [23] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [24] BAYA H, ESSA A, TUYTELAARSB T, et al.. Speeded-Up Robust Features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3):346-359.
- [25] KE Y, SUKTHANKAR R. PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington DC, USA: CVPR, 2004, 2:506-513.*
- [26] DUAN C, MENG X, TU C, et al.. How to make local image features more efficient and distinctive [J]. *IET Computer Vision*, 2008, 2:178-189.
- [27] LIU X Z, TIAN ZH, LENG CH C, et al.. Remote sensing image registration based on KICA-SIFT descriptors [C]. *Proceedings of Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Yantai, R. P. China: FSKD, 2010, 1:278-282.*
- [28] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors [J]. *IEEE Transac-*

- tions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10):1615-1630.
- [29] MOREL J M, YU G S. SIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison [J]. *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Image Sciences*, 2009, 2(2): 438-469.
- [30] 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.
- [31] BU F, QIU Y H, LIU J, *et al.*. Improved bidirectional image registration based on Radon-SIFT [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2012, 8(12): 4997-5004.
- [32] LIU R H, WANG Y G. SAR image matching based on speeded up robust feature [C]. *Proceedings of the 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems, Xiamen, R. P. China: GCIS*, 2009, 4:518-522.
- [33] CHEN L, LIU J, CAO L. Image matching by affine speed-up robust features [J]. *SPIE*, 2011, 8004: 80040G-80040G-5.
- [34] ZHANG N. Computing parallel speeded-up robust features (P-SURF) via POSIX threads [C]. *Proceedings of 5th International Conference on Intelligent Computing, Ulsan, South Korea: ICIC*, 2009, 5754:287-296.
- [35] CHEUNG W, HAMARNEH G. N-SIFT: N-dimensional scale invariant feature transform [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(9):2012-2021.
- [36] 刘向增, 田铮, 史振广, 等. 基于 FKICA-SIFT 特征的合成孔径图像多尺度配准 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9):2186-2195.
- LIU X Z, TIAN ZH, SHI ZH G, *et al.*. SAR image multi-scale registration based on FKICA-SIFT features [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2186-2195. (in Chinese)
- [37] ZIOU D, TABBONE S. Edge detection techniques-an overview [J]. *International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis*, 1998, 8: 537-559.
- [38] LI H, MANJUNATH B S, MITRA S K. A contour-based approach to multisensor image registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995, 4(3): 320-334.
- [39] TEO T A, CHEN S Y. Feature-based image registration of ALOS PALSAR and AVNIR-2 images [C]. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada: IGARSS*, 2011, 566-569.
- [40] 苏娟, 林行刚, 刘代志. 一种基于结构特征边缘的多传感器图像配准方法 [J]. *自动化学报*, 2009, 35(3):251-257.
- SU J, LIN X G, LIU D ZH. A multi-sensor image registration algorithm based on structure feature edges [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(3): 251-257. (in Chinese)
- [41] PAL N R, PAL S K. A review on image segmentation techniques [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(9):1277-1294.
- [42] GOSHTASBY A, STOCKMAN G C, PAGE C V. A region-based approach to digital image registration with subpixel accuracy [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, 24(3): 390-399.
- [43] ZHANG D R, YU L, CAI ZH G. Automatic registration for ASAR and TM images based on region features [J]. *SPIE*, 2007, 6752: 75240.
- [44] CAO X Y, SHAO X X, LI X Y, *et al.*. Research on the image registration algorithm based on regional feature [C]. *Proceedings of 2011 International Conference on Electric and Electronics, Nanchang, R. P. China: EEIC*, 2011, 100: 795-801.
- [45] 张宝尚, 田铮, 延伟东. 基于分割区域的 SAR 图像配准方法研究 [J]. *工程数学学报*, 2011, 28(1): 7-14.
- ZHANG B SH, TIAN ZH, YAN W D. An SAR image registration algorithm based on segmentation-derived regions [J]. *Chinese Journal of Engineering Mathematics*, 2011, 28(1): 7-14. (in Chinese)
- [46] 辛亮, 张景雄. 共轭面状特征的快速提取与遥感影像精确配准 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2011, 36(6):678-682.
- XIN L, ZHANG J X. Fast extraction of conjuga-

- ted area features and accurate registration of remote sensing image [J]. *Journal of Wuhan University: Geomatics and Information Science*, 2011, 36(6):678-682. (in Chinese)
- [47] ENRIQUE C, SANTAMARÍA J, MIRAVET C. Segment-based registration technique for visual-infrared images [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1):282-289.
- [48] 康欣, 韩崇昭, 杨艺. 基于结构的 SAR 图像配准 [J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(5):1307-1310.
KANG X, HAN CH ZH, YANG Y. Structure-driven SAR image registration [J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(5):1307-1310. (in Chinese)
- [49] YU L, ZHANG D, 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.
- [50] 曹俊, 尹东, 张荣, 等. 基于虚拟点的可见光和 SAR 图像配准研究 [J]. *光电工程*, 2009, 36(11):79-84.
CAO J, YIN D, ZHANG R, *et al.*. An optical and SAR image registration algorithm based on virtual points [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(11):79-84. (in Chinese)
- [51] ALHICHRI H S, KAMEL M. Virtual circles: a new set of features for fast image registration [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(5):1181-1190.
- [52] 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.
- [53] HONG G, ZHANG Y. Wavelet-based image registration technique for high-resolution remote sensing images [J]. *Computers & Geosciences*, 2008, 24:1708-1720.
- [54] 凌志刚, 梁彦, 程咏梅, 等. 一种稳健的多源遥感图像特征配准方法 [J]. *电子学报*, 2010, 38(12):2892-2897.
LING ZH G, LIANG Y, CHENG Y M, *et al.*. A robust multi-source remote-sensing image registration method based on feature matching [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12):2892-2897. (in Chinese)
- [55] 刘向增, 田铮, 温金环, 等. 基于仿射不变 SIFT 特征的 SAR 图像配准 [J]. *光电工程*, 2010, 37(11):121-127.
LIU X Z, TIAN ZH, WEN J H, *et al.*. SAR image registration based on affine invariant sift features [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(11):121-127. (in Chinese)
- [56] LI D, ZHANG Y H. A fast offset estimation approach for InSAR image subpixel registration [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2):267-271.
- [57] BAJCSY R, LOVACIC S. Multiresolution elastic matching [J]. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 1989, 46:1-21.
- [58] CHRISTENSEN G E, RABBITT R D, MILLER M I. Deformable templates using large deformation kinematics [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(10):1435-1447.
- [59] BENCHEMIN S S, BARRON J L. The computation of optical flow [J]. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 1995, 27(3):433-466.
- [60] 李雄飞, 张存利, 李鸿鹏, 等. 医学图像配准技术进展 [J]. *计算机科学*, 2010, 37(7):27-33.
LI X F, ZHANG C L, LI H P, *et al.*. Development of medical image registration technology [J]. *Computer Science*, 2010, 37(7):27-33. (in Chinese)
- [61] 王海南, 郝重阳, 雷方元, 等. 非刚性医学图像配准研究综述 [J]. *计算机工程与应用*, 2005, 41(11):180-184.
WANG H N, HAO CH Y, LEI F Y, *et al.*. A survey of non-rigid medical image registration [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, 41(11):180-184. (in Chinese)
- [62] 张泽旭, 李金宗, 李冬冬. 基于光流场分析的红外图像自动配准方法研究 [J]. *红外与微波毫米学报*, 2003, 22(4):307-312.
ZHANG Z X, LI J Z, LI D D. Research of automated image registration technique for infrared images based on optical flow field analysis [J]. *Journal Infrared Millimeter and Waves*, 2003, 22(4):307-312. (in Chinese)

[63] LIU J G, YANA H. Phase correlation pixel-to-pixel image co-registration based on optical flow and median shift propagation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29 (20): 5943-5956.

[64] HUANG L, LI Z, ZHANG R. SAR and optical images registration using shape context [C]. *Proceedings of 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI: IGARSS*, 2010:1007-1010.

作者简介:



余先川(1967—),男,重庆梁平人,博士,教授,博士生导师,1992年、1995年于吉林大学分别获得工学硕士、工学博士学位,2006年度教育部新世纪优秀人才,主要从事影像处理与识别和盲信号处理的研究。E-mail: yuxianchuan@163.com



胡丹(1977—),女,四川南充人,副教授,2002年于四川师范大学获得硕士学位,2005年于北京师范大学获得博士学位,主要从事数据挖掘、智能数据分析方法的研究。E-mail: hufengdd@163.com



吕中华(1987—),女,吉林松原人,硕士研究生,2011年于北京师范大学获得学士学位,主要从事遥感图像处理方面的研究。E-mail: lvchina1988@yeah.net

(版权所有 未经许可 不得转载)