

基于级联变换的光学和 SAR 图像配准算法

王峰^{1,2,3}, 尤红建^{1,2}

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要:针对光学和 SAR (Synthetic Aperture Radar) 图像配准中存在明显辐射和几何差异的问题, 提出了一种基于级联变换的多源遥感图像配准方法. 首先, 利用灰度变换提取光学和 SAR 图像间的稳定结构特征, 去除辐射差异性; 然后, 提出一种新的加权对数极坐标变换算法, 解决图像间全局几何差异性, 保证算法的尺度和旋转不变性, 并初步得到整体的平移量; 最后, 通过局部几何变换, 得到一系列的匹配点对, 构建薄板样条模型, 实现图像的精确配准. 实验验证了算法去除辐射差异性和获得全局几何变换参数的能力, 与传统的多源图像配准算法相比, 基于级联变换的配准算法鲁棒性好, 配准精度高.

关键词: 图像配准; 级联变换; 相位一致性; 加权对数极坐标变换

中图分类号: TP407.8 **文献标识码:** A

Robust registration method of SAR and optical remote sensing Images based on cascade transforms

WANG Feng^{1,2,3}, YOU Hong-Jian^{1,2}

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System,
Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Because that there are obvious differences of radiometric and geometric in SAR and optical image registration, this article presents a method based on cascade transform (CT) to register SAR and optical images. To remove radiation differences, gray transformation was used to extract stable structure information for the SAR and optical images. Then, Weighted-Logarithmic-Polar transformation is proposed to obtain scale and rotation parameters between the images, solving the global geometric differences. Finally, local geometric transform is conducted to get accurate matches and the image was registered by TPS model. The registration experiments show that the proposed method is able to extract stable structures and robust to the differences of radiometric and geometric. The precision of the registration method is high.

Key words: registration, cascade transforms, phase congruency, weight log-polar transform

PACS: 07.05.Pj

引言

由于成像机理不同, 同一地物目标在光学和 SAR 图像中会呈现不同的辐射和几何特性, 增加了图像间配准的难度. 常用的图像配准算法很难直接应用于光学和 SAR 配准中.

已有多源遥感图像配准算法主要有基于区域相似性和基于特征提取的两类. 张翰墨等^[1]通过比较梯度结构相似性实现红外和多光谱图像的配准. Suri 等^[2]提出 MIB (Mutual-Information-Based) 算法, 通过直方图阈值分割去除部分强散射点的干扰, 使用互信息作为图像间相似性比较准则, 对实际图像

收稿日期: 2014-05-28, 修回日期: 2015-06-01

基金项目: 高分重大专项 (GFZX0404040904)

Foundation items: High Resolution Key Projects (GFZX0404040904)

作者简介 (Biography): 王峰 (1988-), 男, 山东日照人, 博士研究生, 主要研究为多源遥感图像配准. E-mail: wfeng_gucas@126.com

Received date: 2014-05-28, revised date: 2015-06-01

取得了较好的实验效果. Wong 等^[3]提出 ARRSI (Automatic Registration of Remote-Sensing Images) 配准算法,首先,通过相位一致性最小矩检测特征点;然后,采用相位一致性最大矩描述特征,可以处理多波段和多传感器遥感数据,具有一定的旋转不变性,但是对光学和 SAR 图像配准精度不理想.

针对光学和 SAR 图像配准中的辐射差异和几何差异问题,文章中提出一种基于级联变换的遥感图像自动配准算法.首先,根据光学和 SAR 图像的特点,通过灰度变换提取图像间的结构信息,削弱辐射差异性的影响;其次,提出一种新的加权对数极坐标变换算法,充分利用图像信息,得到图像间尺度和旋转参数,并初步确定平移量,解决图像间全局的几何差异;最后,通过分块模板匹配得到精确匹配的同名点对,运用薄板样条插值算法实现图像的精确配准,去除图像间局部几何畸变的影响.级联变换的处理策略,将复杂的光学和 SAR 图像配准问题分解为灰度变换问题、全局几何变换问题和局部几何变换问题,由粗到细获得图像间几何关系,可以在保证算法鲁棒性的同时获得较高的图像配准精度.

1 原理与算法

针对光学和 SAR 图像配准中存在的辐射和几何差异性问题,通过级联变换将配准问题分解为灰度变换、全局几何变换和局部几何变换问题,整体算法流程如图 1 中所示:

1.1 灰度变换

同一地物目标在不同传感器条件下的辐射特性不同,直接配准光学和 SAR 数据效果不理想.在同一传感器条件下,同质区域内的辐射特性相同,而不同区域之间存在辐射特性的变化.对于光学和 SAR 图像,尽管存在明显的辐射差异性,但是局部区域的变化信息所反映的地物结构是不变的,这种变化结构信息在配准中发挥至关重要的作用.基于此,本文提出灰度变换,利用地物本身的空间结构信

息,解决图像间的辐射差异性.

相对于光学图像,SAR 图像相干斑噪声干扰严重.与普通加性噪声相比,相同起伏的乘性噪声对不同灰度水平同质区域将产生差异很大的梯度差异,从而影响变化区域的梯度结构信息.因此,首先需要在保持图像结构信息的前提下,去除相干斑的影响.

相干斑抑制各向异性扩散滤波算法 SRAD (Speckle Reducing Anisotropic Diffusion),是一种针对超声和雷达图像相干斑噪声设计的扩散滤波算法^[4],其偏微分方程可以表示为:

$$\begin{cases} \partial I(x,y;t)/\partial t = \text{div}[c(q) \nabla I(x,y;t)] \\ I(x,y;0) = I_0(x,y), (\partial I(x,y;t)/\partial \vec{n})|_{\partial\Omega} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

其中, $I_0(x,y)$ 是待滤波图像, $I(x,y;t)$ 是在图像域 Ω 处理后尺度为 t 的图像, ∇ 是梯度算子, div 是散度算子, $\partial\Omega$ 是 Ω 的边界, \vec{n} 代表 $\partial\Omega$ 的外法线方向, $c(q)$ 是扩散系数,如下式所示:

$$c(q) = \frac{1}{1 + [q^2(x,y;t) - q_0^2(t)] / [q_0^2(t)(1 + q_0^2(t))]}, \quad (2)$$

其中, $q_0(t)$ 是相干斑尺度函数,对于普通单视图像取 $q_0 = 1$. $q(x,y;t)$ 是变量的即时系数:

$$q(x,y;t) = \sqrt{\frac{(1/2)(|\nabla I/I|^2 - (1/4^2)(\nabla^2 I/I)^2)}{[1 + (1/4)(\nabla^2 I/I)]^2}}. \quad (3)$$

即时系数作为一种边缘检测器,在边缘或者高对比度特征处的值较大,而在均匀区域值较小.SRAD 在均匀区域内部相当于纯粹的相干斑滤波器,滤除噪声影响;在边缘处则相当于全通滤波器,保持边缘信息.

相位一致性算法 PC (Phase Congruency) 是一个高性能的图像特征检测算法,它利用图像的相位信息提取特征,符合人类视觉机制,不受图像对比度变化影响,可以在亮度改变的情况下获得可靠、完整的图像特征^[5]. Venkatesh 和 Owens^[6]提出通过寻找局部能量函数的峰值得到最大相位一致性点,局部

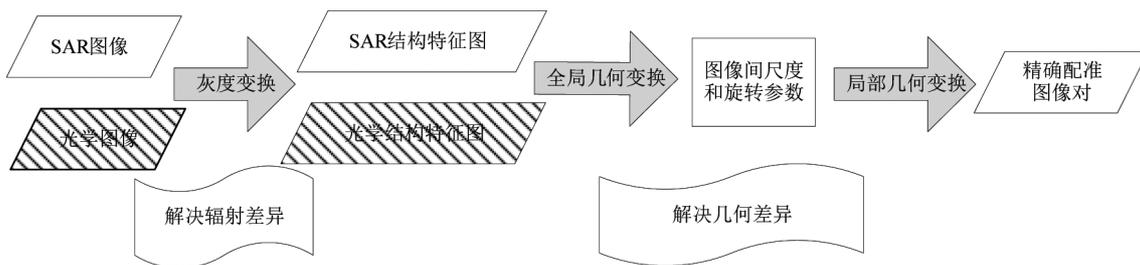


图 1 级联变换配准流程图

Fig. 1 Procedure of cascade transforms registration

能量函数定义为:

$$E(x) = \sqrt{F^2(x) + H^2(x)} \quad , \quad (4)$$

其中, $F(x)$ 是信号移除的直流分量, $H(x)$ 则是 $F(x)$ 的 Hilbert 变换, 即由 $F(x)$ 经相位移动 90° 得来. 能量函数 $E(x)$ 与 PC 有如下关系:

$$E(x) = PC(x) \sum_n \sum_n A_n \quad . \quad (5)$$

相位一致函数最终经 Peter Kovesi 修正后的计算式为^[7]:

$$PC(x, \theta) = \frac{\sum_n W(x, \theta) [A_n(x, \theta) \Delta \phi_n(x, \theta) - T]}{\sum_n A_n(x, \theta) + \varepsilon} \quad , \quad (6)$$

$$\Delta \phi_n(x, \theta) = \cos(\phi_n(x, \theta) - \bar{\phi}(x, \theta)) - |\sin(\phi_n(x, \theta) - \bar{\phi}(x, \theta))| \quad , \quad (7)$$

其中, W 为频率传播加权量, θ 表示朝向角度, 取值范围在 $[0, \pi]$, $A_n(x, \theta)$ 和 $\phi_n(x, \theta)$ 是像点在 Log Gabor 滤波器尺度为 n , 方向为 θ 时的振幅和相位, $\bar{\phi}(x, \theta)$ 是平均相位, ε 是一个很小的常量, 只有能量值超过噪声阈值 T 的信号才被计入结果内. 对应二维图像, 相位一致最大矩代表了图像的边缘结构特征, 其计算式为:

$$M = \frac{1}{2} \sum_{\theta} [(PC(\theta) \sin(\theta))^2 + (PC(\theta) \cos(\theta))^2] + \sqrt{4 \left[\sum_{\theta} (PC(\theta) \sin(\theta) PC(\theta) \cos(\theta))^2 \right] + \left[\sum_{\theta} ((PC(\theta) \cos(\theta))^2 - (PC(\theta) \sin(\theta))^2)^2 \right]} \quad , \quad (8)$$

式中, $PC(\theta)$ 表示滤波方向为 θ 的相位一致性值.

1.2 全局几何变换

由于 SAR 图像的侧视成像几何和光学图像的下视成像几何不同, 以及遥感平台和高度的差异, 常常会使光学和 SAR 图像存在全局的几何变形, 主要表现为分辨率(尺度)和方向(旋转)不同. 为了确保在局部区域内进行图像匹配, 需要通过全局变换解决图像的旋转和尺度差异, 并初步确定图像间的平移量.

常用的对数极坐标(Log-Polar)变换, 可以将图像间的尺度和旋转变换转换为 LP 变换域下的平移变换进行计算^[8]. 点 (x, y) 的对数极坐标变换可以表示为:

$$\begin{cases} u = \log r = \log \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2} \\ v = \theta = \arctan(y-y_c/x-x_c) \end{cases} \quad , \quad (9)$$

其中, (x_c, y_c) 是变换中心点, r 是距离变换中心的半径, (u, v) 表示 LP 变换域内图像坐标.

LP 变换采用的是符合视觉机制的非均匀采样,

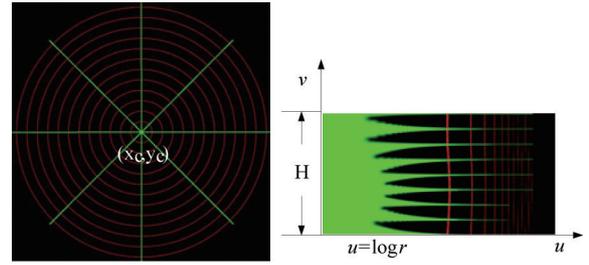


图2 LP 变换过程

Fig. 2 Process of LP translation

对变换中心区域的采样率远多于周边区域. 如图 2 所示, 在 r 较小的区域, 图像几乎不包含有用信息; 在较 r 大区域, 图像采样率降低, LP 变换域中每个像素都包含了原图中的大量信息. 因此, LP 变换对中心点的定位精度要求较高, 且对图像间的畸变鲁棒性差. 针对这个问题, 本文提出加权对数极坐标变换(WLP, Weight-Log-Polar), 通过增加权重系数调节采样率, 保证算法的稳定性.

假设图像域内单位面积的小块所包含信息量是相同的, 记为 E_0 , 则距离中心点 r 的圆环中所包含的信息量是 $2\pi r E_0$. 如果 LP 变换后图像高度为 H , 那么在 LP 变换域内横向坐标为 u 的单位区域包含的信息 $I_0(u)$ 可以表示为:

$$I_0(u) = \frac{2\pi E_0}{H} r = \frac{2\pi E_0}{H} e^u \quad , \quad (10)$$

其中, e 为对数变换中所采用的基底. 从上式可以看出, 在 LP 变换域内, 随着横向距离的增加, 单位区域所反映原图的信息量成指数倍数增加. 为了保证原图不同区域的信息得到均衡利用, 在 LP 变换域内计算图像间偏移量时, 横向距离越大的区域所占的权重应该相应增加. 本文提出通过加权归一化互相关系数在 LP 变换域内计算偏移量:

$$C_{\text{coef}} = \frac{\sum_{u,v} (w(u)I(u,v)-\mu_1)(w(u)T(u,v)-\mu_2)}{\sqrt{\sum_{u,v} (w(u)I(u,v)-\mu_1)^2 (w(u)T(u,v)-\mu_2)^2}} \quad , \quad (11)$$

其中, I 和 T 分别代表参考图像和模板图像, μ_1 、 μ_2 为图像 I 和 T 的加权灰度均值:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 1/N \sum_{u,v} w(u)I(u,v) \\ \mu_2 &= 1/N \sum_{u,v} w(u)T(u,v) \end{aligned} \quad , \quad (12)$$

其中, N 为图像块所包含的像素数, $w(u)$ 为与图像的横向坐标成指数关系的权重系数:

$$w(u) = e^u \quad , \quad (13)$$

使用 WLP 获取图像间变换参数的前提是变换中心一致, 常用的方法是采用全局迭代搜索的方式

去除平移参数的影响^[8]. 为了提高计算效率, 在进行全局变换之前, 先对图像对进行降采样处理. 由于全局变换只是要解决图像间的全局几何差异, 降采样处理不会影响图像全局变换参数的计算.

1.3 局部几何变换

为了应对光学和 SAR 图像间的局部几何畸变, 需要定位精确且均匀分布的同名点对, 利用合适的插值模型, 实现图像间的精确配准.

首先, 对全局几何变换后的图像进行分块模板匹配, 在待配准图像上依次选取直径为 D 的模板切片. 参考图像 I 和模板 T 间的互相关模板匹配结果为:

$$C_{\text{coef}}(u, v) = \frac{\sum (I(x-u, y-v) - E(I))(T(x, y) - E(T))}{\sqrt{\sum (I(x-u, y-v) - E(I))^2 \sum (T(x, y) - E(T))^2}}, \quad (14)$$

其中, (x, y) 为 (u, v) 的邻域点, $E(I)$ 、 $E(T)$ 为图像 I 和 T 在当前区域的灰度均值. 灰度变换削弱了图像间的灰度差异性, 全局变换去除了图像间尺度和旋转差异性, 并获得大致的平移关系. 因此, 模板匹配可以在局部范围内搜索极值点, 不仅计算效率高, 而且可以避免由于图像场景重复引起的误匹配问题. 对模板匹配获得的同名点对进行 RANSAC (Random sample consensus) 算法^[9] 筛选, 可以进一步保证匹配点对的准确性.

其次, 以模板匹配获得的同名点对作为控制点, 采用薄板样条模型 (TPS, thin-plate spline) 校正待配准图像. TPS 是一种基于控制点获得图像间一一对应关系的插值算法, 在匹配点密集分布的情况下可以很好的应对图像局部畸变, 做到精确的点点配准^[10]. TPS 插值函数可以表示为:

$$\begin{pmatrix} f(x, y) \\ g(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{13} \\ h_{23} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N F_i r_i^2 \ln r_i^2 \\ \sum_{i=1}^N G_i r_i^2 \ln r_i^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}, \quad (15)$$

其中, (x, y) 是输入图像坐标系, $(f(x, y), g(x, y))$ 是基准图像坐标系, $r_i^2 = (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2$ 表示 (x, y) 和 (x_i, y_i) 的距离, (x_i, y_i) 是待校正图像中匹配点位置, h_{11}, \dots, h_{23} 定义了一个仿射变化矩阵, F_i 和 G_i 是非线性径向插值函数的权重, 且有如下限制条件:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N F_i = \sum_{i=1}^N F_i x_i = \sum_{i=1}^N F_i y_i = 0 \\ \sum_{i=1}^N G_i = \sum_{i=1}^N G_i x_i = \sum_{i=1}^N G_i y_i = 0 \end{cases}, \quad (16)$$

通过 N 对匹配点对, 求解上述 6 个方程, 可以得到 TPS 的 $2N + 6$ 个未知参数.

2 实验结果与分析

2.1 灰度变换相似性实验.

本组实验采用 10 对精确配准的 Google 光学和 TerraSAR-X 图像, 尺寸都是 $1\ 300 \times 1\ 300$, 比较不同灰度变换方法的效果. 对光学图像直接提取 PC 特征, 对 SAR 图像分两种情况处理, 第一种情况, 首先分别采用 Frost 滤波、PM (Perona-Malik) 方程滤波和 SRAD 滤波, 然后提取 PC 特征, 比较不同滤波算法对提取结构特征的影响; 第二种情况, 对经过 SRAD 滤波处理的 SAR 图像, 分别采用 sobel 算子、ROA (Ratio of Averages) 算法和 PC 算法提取边缘特征, 比较不同边缘提取算法对提取结构特征的影响.

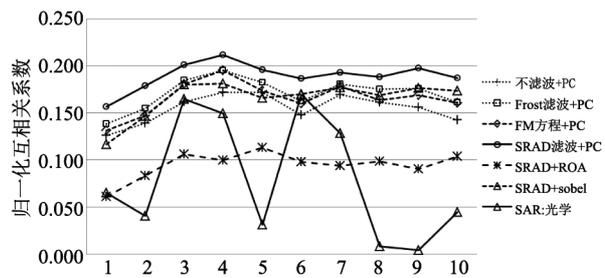


图 3 光学图像和 SAR 图像运用不同的灰度变换处理后的灰度相似性

Fig. 3 The similarity of optical images and SAR images filtered by different gray transformations

以光学边缘图作为基准, 与不同灰度变换得到的 SAR 特征图像计算归一化互相关系数, 可以定量分析灰度变换的有效性, 实验结果如图 3 所示. 从图中可以看出, SAR 图像与光学图像直接比较相似性的曲线起伏剧烈, 结果不稳定, 且相似性整体较低, 这也说明了在图像域内直接运用匹配算法效果不理想; 在经过灰度变换后再比较相似性的结果中, SRAD 滤波之后采用 PC 算法提取的结构信息与光学边缘图像相似性最高. 这说明通过 SRAD 和 PC 处理的灰度变换可以很好地去除噪声和不稳定纹理的影响, 提取出稳定的结构信息, 保证级联变换配准对于不同数据的鲁棒性.

图 4 展示了光学和 SAR 图像以及它们经过灰度变换后处理得到的结构特征图. 从图中可以看出: SRAD 滤波处理, 去除了噪声在弱边缘附近的干扰, PC 特征提取算法对图像亮度变化、对比度变换不敏感, 强边缘和弱边缘信息都能提取出来, 提取的边缘

特征稳定且连续.

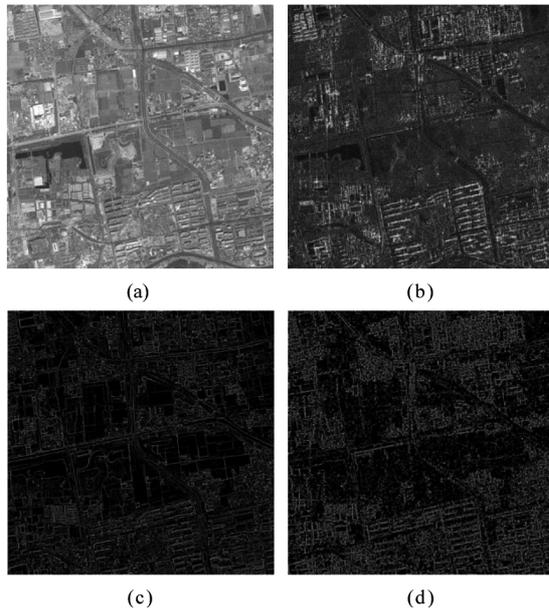


图4 光学和 SAR 图像不同灰度变换结果 (a) 光学图像, (b) SAR 图像, (c) 光学图像提取 PC 特征, (d) SAR 图像 SRAD 滤波后提取 PC 特征

Fig. 4 The structure features extracted from optical and SAR images. (a) Optical image, (b) SAR image, (c) PC feature of optical image, (d) PC feature of SAR image filtered by SRAD

2.2 全局几何变换实验

本组实验中对同一地区 Google 光学图像和 TerraSAR-X 图像进行全局变换实验, 验证本文算法获得图像间全局变换参数的能力. 光学图像尺寸是 $2\,000 \times 2\,000$, SAR 图像尺寸 $1\,400 \times 1\,400$, 图像分辨率都是 1 m, 图像间存在 5° 旋转差异. 以光学图像作为基准, 对 SAR 图像进行 0.8 倍缩放, 两图像中心点之间的平移量是 (50, 100).

图 5(b)(d) 展示了图像灰度变换的结果, 削弱了图像间的辐射差异性, 保留了稳定的边缘结构信息, 但是图像的纹理细节减少. 为了提高运算效率, 将图像都降采样 0.1 倍之后进行全局变换, 空间搜索范围是 90×90 像素区域. 图 5(e) 和 (f) 分别展示了 LP 变换和 WLP 变换得到的极值点空间分布. LP 变换得到的极值点分布杂乱, 不能得到稳定的极值点. WLP 变换得到的极值点空间分布呈现稳定渐变的尖峰, 适用于求取具有一定局部几何畸变的光学和 SAR 图像配准中. 全局变量求取结果: 缩放参数 0.80, 旋转角度 5° , 平移量 (5, 10). WLP 变换通过权重系数的调节, 可以保证图像各个区域信息的充分利用, 对中心点定位不敏感, 对图像形变具有较好的鲁棒性.

2.3 鲁棒性和精度对比实验

经典多源遥感图像配准方法 MIB^[2] 和 ARRSI^[3] 分别使用基于区域相似性和特征匹配的方法对光学和 SAR 图像进行配准, 具有代表性. 将本文提出的算法与这两种算法进行对比实验, 验证本文算法处理实际遥感数据的有效性. 由于 MIB 和 ARRSI 配准算法仅能处理同尺度的遥感数据, 对比实验选取 6 对分辨率都是 1 m 的 Google 光学图像和 TerraSAR-X 图像 (SpotLight 模式) 作为实验对象, 图像尺寸分别是 $2\,000 \times 2\,000$ 像素和 $1\,400 \times 1\,400$ 像素, 第 1~3 对实验数据没有旋转, 第 4~6 对实验数据分别存在 5° 、 10° 和 15° 的角度旋转. 横向和纵向搜索范围都是 30 像素, 级联变换算法和 ARRSI 算法中使用模板尺寸都是 300×300 像素, MIB 算法中使用的直方图灰度分割阈值是 30%, 图像旋转搜索范围设置为 $0^\circ \sim 20^\circ$, 其他参数设置与原始论文相同.

针对本组实验中的 6 对数据, 在基准图像和待配准图像上人工选取 $N = 20$ 对同名点作为控制点, 第 i 个控制点在基准图像上坐标是 (X_i, Y_i) , 在配准后图像上的坐标为 (X'_i, Y'_i) , 对应控制点的偏差可以作为配准精度的度量, 图像配准前后控制点均方差 (RMSE) 如下式所示:

$$\text{RMSE} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} [(X_i - X'_i)^2 + (Y_i - Y'_i)^2] \right)^{\frac{1}{2}}, N = 20 \quad (20)$$

表 1 展示了三种配准算法在不同实验数据上得到的配准结果. 从配准结果鲁棒性分析, 基于级联变换的配准算法在 6 对实验数据上都能获得稳定的配准结果, 算法鲁棒性最好. 这是由于灰度变换去除了图像间辐射差异性的影响; 另一方面, 局部几何变换中采用分块模板匹配的策略, 通过多个切片匹配, 避免由于模板选择和场景变化而导致配准失败, 增加了算法的鲁棒性. ARRSI 算法可以配准 4 对实验数据, 在旋转角度增大时, 配准算法失效, 鲁棒性最差. MIB 算法可以实现 5 对实验数据的配准, 有较好的鲁棒性. MIB 通过直方图阈值分割, 可以去除 SAR 图像中部分强散射点对配准结果的影响, 但是也会减弱图像中有用的低频纹理信息, 这种方法不能反映 SAR 图像和光学图像间本质结构信息.

从配准精度分析, 本文提出的级联变换算法能获得最好的配准精度, 不同实验条件下的配准精度都在 4 像素以内. 灰度变换提取地物固有的结构特征, 去除辐射差异性的干扰, 全局几何变换则保证在

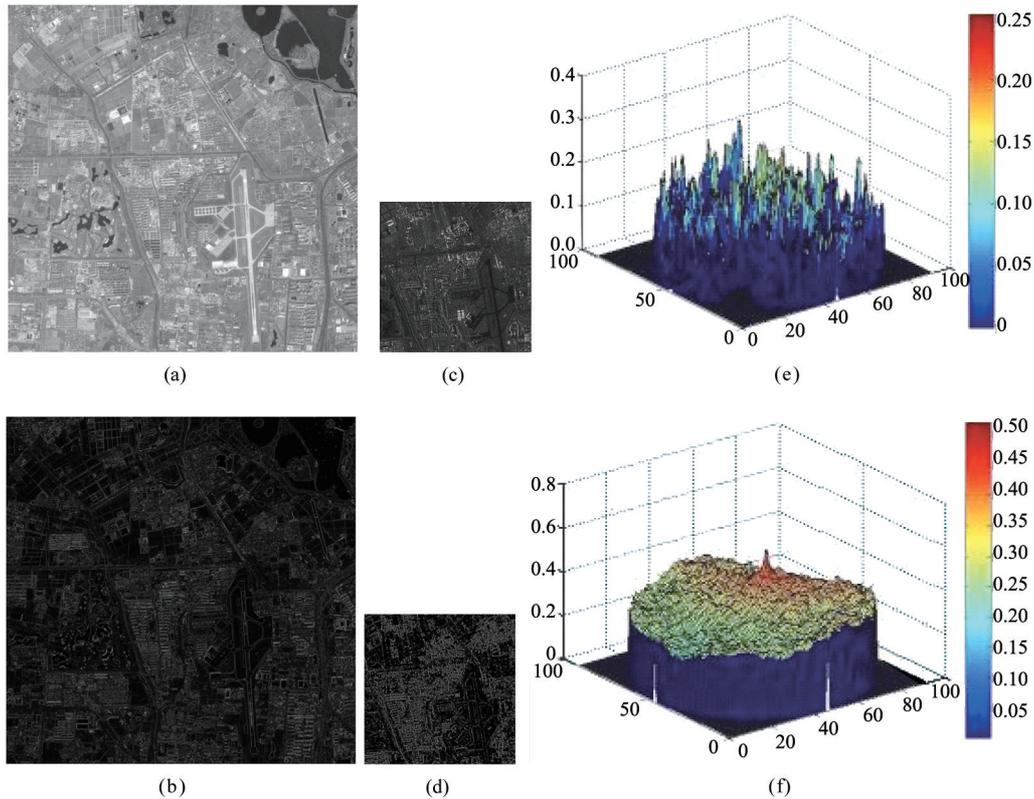


图5 灰度变换和全局几何变换处理过程 (a) 光学基准图像, (b) 图 a 灰度变换后图像, (c) SAR 待配准图像, (d) 图 c 灰度变换后图像, (e) 普通 LP 变换, 得到的极值点空间分布, (f) WLP 变换, 得到的极值点空间分布

Fig. 5 Process of gray transformation and global geometric transformation. (a) Reference image of an optical image, (b) Gray translated image of figure (a), (c) SAR image, (d) Gray translated image of figure (c), (e) Spatial distribution of the extreme from LP translation, (f) Spatial distribution of the extreme from WLP translation

局部范围搜索极值点, 提高了控制点的置信度, 局部几何变换通过控制点计算 TPS 插值模型, 部分克服了图像间局部几何畸变的问题, 从而最终提高了图像的配准精度. ARRSI 算法配准精度最低, 这是由于 ARRSI 需要在基准图像上和待配准图像上提取离散的特征点, 仅比较这些离散特征点的相似性, 从而获得匹配点对. 光学图像和 SAR 图像存在明显的辐射差异, 特征点的选取和定位精度很难保证, 从而降低了算法的配准精度. MIB 算法配准精度较好, 这种算法通过直方图阈值分割去除了部分强散射点对配准结果的影响, 但是并不能提取图像间本质的结构信息, 图像间的辐射差异性依然会对图像的配准精度造成一定的影响.

级联变换在第四对实验数据上的匹配结果如图 6 所示, 共找到 25 对同名点. 其中, 左图和右图是其中两对同名点附近切片的拼接交叉显示结果. 从图中可以看出, 同名点附近纹理过渡平滑, 道路、楼房等明显地物结构特征连续, 模板中心定位准确. 局部几何变换是在灰度变换提取的结构特征基础上比较

表 1 三种配准算法配准精度结果 (“-” 均方误差大于 10 认为配准失败)

Table 1 Registration accuracy of the three registration methods (“-” registration fails if RMSE > 10)

测试数据	1	2	3	4	5	6
级联变换	2.41	3.12	2.83	2.69	3.35	3.73
MIB	3.12	-	3.35	4.55	5.12	5.31
ARRSI	6.84	7.13	7.39	8.65	-	-

相似性, 不仅保证了算法的鲁邦性, 而且能够保持道路、建筑等地物原有结构特征的连续性. 图像的配准结果如图 7 中所示, 左图和右图中分别展示了配准图像的局部细节, 配准后的图像在实际像素下通过人眼观察无误差, 各种地物在交叉处变化自然, 过渡平滑, 可以获得理想的配准结果.

3 结论

针对光学和 SAR 图像的配准问题, 文章中结合不同数据的特点, 提出了一种基于级联变换的多源图像配准算法. 算法中有如下几点改进: 1. 级联变换配准框架, 将配准问题转换为灰度变换、全局几何变



图6 5°旋转图像级联变换找到的同名点及细节展示
Fig.6 Details of the matches from cascade transform 5° rotation



图7 5°旋转图像间级联变换配准结果及细节展示
Fig.7 Details of cascade transform registration with 5° rotation

换和局部几何变换问题,分级逐个解决,可以在保证算法鲁棒性的同时,实现图像精确配准;2、给出具体的灰度变换方法,提取与传感器类型无关,仅反映地物本身结构特性的特征,对噪声和局部畸变的鲁棒性较好;3、提出一种加权对数极坐标变换方法,解决LP变换中心过采样的问题,稳定获得图像间的旋转和尺度参数,并初步确定平移量,为下一步精确获得同名点对准备条件。

实验结果验证了本文提出的算法应用于光学和SAR图像配准的能力,可以去除图像间的辐射差异性,解决全局几何差异,获得稳定精确的配准结果。与已有的光学和SAR图像配准算法相比,本文提出的算法不仅具有尺度和旋转的不变性,而且配准结果的鲁棒性和精度有明显提高。这种基于级联变换的图像配准框架,也适用于其他多源图像配准,包括红外、多光谱图像、全色图像和SAR图像之间,以及不同成像条件的SAR图像之间。

References

- [1] ZHANG Han-Mo, YOU Hong-Jian. A gradient structure based registration method for space-borne infrared and panchromatic image[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张翰墨, 尤红建. 基于梯度结构的星载红外图像和全色图像配准方法. *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(3):270-276.
- [2] Suri S, Reinartz P. Mutual-information-based registration of TerraSAR-X and Ikonos imagery in urban areas[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2010, **48**(2):939-949.
- [3] Wong A, Clausi D A. ARRSI: automatic registration of remote-sensing images[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2007, **45**(5):1483-1493.
- [4] Yu Y, Acton S T. Speckle reducing anisotropic diffusion[J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2002, **11**(11):1260-1270.
- [5] Kovess P. Image features from phase congruency[J]. *VIDE-RE: Journal of computer vision research*, 1999, **1**(3):1-26.
- [6] Owens R A, Venkatesh S, Ross J. Edge detection is a projection[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1989, **9**(4):233-244.
- [7] Kovess P. Phase congruency detects corners and edges[C]. *The Australian pattern recognition society conference: DICTA 2003*.
- [8] Wolberg G, Zokai S. Robust image registration using log-polar transform[C]. *International Conference on Image Processing IEEE*: 493-496.
- [9] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, **24**(6):381-395.
- [10] Ma J, Chan J-W, Canters F. Fully automatic subpixel image registration of multiangle CHRIS/Proba data[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2010, **48**(7):2829-2839.