

# 最优控制点选取的遥感图像亚像素配准算法

王凌霞 郝红侠

(西安电子科技大学智能感知与图像理解教育部重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 分析了已有图像配准算法应用遥感图像配准方面面临的问题, 针对提高不同模式遥感图像配准精度问题, 提出了一种人工辅助多模态图像配准算法。该算法首先由人工对待配准图像(测试图像)和参考图像输入控制点, 利用高斯差分算子确定测试图像极值点; 其次利用投影变换和最小线性平方差算法计算双边平均配准误差; 最后, 根据配准误差自动对控制点进行亚像素调整, 取得亚像素级控制点匹配, 实现遥感图像精确配准。实验结果表明, 该算法具备更高的配准精度。

**关键词:** 多模态; 配准; 遥感图像

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1003-0530(2015)03-0274-08

## Remote Sensing Images Sub-pixel Registration Algorithm by Selecting Best Control Points

WANG Ling-xia HAO Hong-xia

(Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education of China,  
Xidian University, Xi'an, Shaanxi Province 710071, China)

**Abstract:** This paper analyses the defect of the existing image registration algorithm which is applied in remote sensing image registration field. Addressing the problem about improving the accuracy of different modes for remote sensing image registration, it proposed an assisted multi modal image registration algorithm. Firstly inputting control points on test image and the reference image and using DOG(Difference of Gaussian) to determine the precise coordinates of key points on test images. Secondly, the test image and reference image can get a rough registration by using projection transform and linear least square algorithm. Finally the algorithm automatically adjusts the control points by sub-pixel step according to the registration error and achieves the sub-pixel registration result. The experimental results show that, the algorithm has higher registration accuracy.

**Key words:** multimodal; registration; remote sensing images

## 1 引言

图像配准<sup>[1]</sup>是计算机视觉领域的基本问题, 旨在对在不同时间, 从不同角度, 由不同方式, 不同光谱波段拍摄的图像进行几何对齐, 依据成像来源分为单模态图像配准和多模态图像配准。与单模态图像相比, 多模态图像来源于对同一场景不同的传

感器或成像设备, 包含同一场景的互补信息, 可以提供更多丰富信息, 因此多模态图像配准在卫星遥感图像融合方向具有重要应用<sup>[2]</sup>。然而由于成像机理不同, 多光谱图像的像素值缺少直接和间接的对应关系, 单模态图像的特征点与描述符在多光谱图像上可重复性与可区分性显著下降, 难以在多模态遥感图像上实现控制点(特征点)对的匹配<sup>[3]</sup>。另外一方面,

对于依赖于多光谱遥感图像配准实现应用遥感图像融合、目标识别和高分辨率成像,对配准精度提出更高的要求,即亚像素级的图像配准,实现遥感图像的多模态精确配准面临较大挑战<sup>[4-5]</sup>。

图像配准实现方法通常分为基于原始灰度信息的图像配准和基于图像特征的图像配准<sup>[1]</sup>。基于原始灰度的配准算法直接利用图像的灰度或者彩色信息,无需从图像中提取特征,包含两个主要步骤:1)定义图像之间的相似度测度作为变换参数的函数即配准函数;2)利用优化算法搜索配准函数达到极值时的变换参数。由于多模态图像间的像素值和其分布存在较大差异,很难获取准确的配准函数,导致任何基于原始灰度信息的配准算法都无法保证收敛到全局极值点,算法鲁棒性算法的收敛性在实际应用中无法保证,在大规模遥感图像集上很难实现精确配准。

基于特征点匹配的图像配准算法首先对两幅图像进行特征提取得到特征点;通过相似性度量找到匹配的特征图像配准点对;然后通过匹配的特征点对得到坐标变换参数;最后由坐标变换参数进行图像配准,可见特征点匹配准确度是影响配准的重要因素。尺度不变特征算法 SIFT (Scale Invariant Feature Transform)<sup>[6]</sup>算法用金字塔模型计算图像高斯差分,获得了以尺度为自变量的强度响应,然后选取图像空间和尺度空间中局部极值点作为稳定特征点,其配准性能在单光谱图像上得到了大规模检验。由于多光谱图像对应特征点的梯度模式通常不具有对应关系, SIFT 算法在遥感图像上无法实现满意的匹配。梯度对称的尺度不变特征转换 GS-SIFT (Gradient Symmetric-SIFT)<sup>[7]</sup>算法是对 SIFT 算法的改进, SIFT 算法比较两幅图像中所有特征点周围区域的特征描述符,选取相似度最高的进行匹配。由于多模图像中相同物体的颜色、亮度会有变化,导致像素之间的梯度信息发生改变,从而导致错误的描述符匹配。GS-SIFT 算法在计算特征点特征描述符的基础上将所有梯度方向量化到 0 至 180 度之间,接着将特征描述符作中心旋转,将原描述符与旋转后的描述符进行结合,得到新的描述符。通过这种方法可以有效地克服多模图像梯度翻转带来的影响,弥补 SIFT 算法的不足。Chen 等

人在 2010 年提出适用于多模态图像的局部强度不变的特征描述符 PIIFD (Partial Intensity Invariant Feature Descriptor)<sup>[8]</sup>,指定主方向与计算描述符时利用梯度的朝向 (orientation) 而不是方向 (direction),即两个具有相反方向 (direction) 的梯度在相同的朝向 (orientation) 产生贡献。Hossain 等人在 2011 年提出改进对称尺度不变特征算法 ISS (Improved symmetric-sift)<sup>[9]</sup>特征点描述符,与 PIIFD 类似,ISS 采用梯度朝向指定主方向以及计算描述符。然而,利用 PIIFD 和 ISS 建立的特征点匹配主要是采用描述符携带的局部信息以及利用统计一致性删除错误特征点匹配,当错误匹配率较高时,统计一致性显著下降,无法有效删除错误的特征点匹配。鉴于此,Liyong<sup>[10]</sup>等人在 2013 年提出了引入图像的全局信息删除错误的特征点匹配,有效提高了特征点正确匹配比例,降低了多模态图像的配准误差,但是其主要问题在于通过遍历所有的潜在特征点的组合寻找最佳三对匹配特征点对,导致算法计算复杂度较高。

而对于多光谱遥感图像配准,首先遥感图像尺寸较大特征点搜索和匹配时间较长;其次基于遥感图像配准的应用对配准精度要求高甚至达到亚像素级;最后部分多光谱遥感图像内容单一,背景简单,缺少纹理信息,采用自动配准算法无法有效提取特征点,匹配失败率较高。针对此问题,本文提出了一种基于人工辅助输入控制点先验知识的亚像素配准方法,利用最小线性平方差算法计算平均配准误差,通过自动调整控制点缩小配准误差,得到亚像素级控制点匹配,从而提高遥感图像配准精度和配准成功率,弥补自动配准算法在配准精度上存在的不足,适用于解决配准难度较大的多模态遥感图像融合问题。本文采用美国 LANDSAT 卫星和我国遥感卫星拍摄的遥感图像进行配准实验,通过主观与客观判断相结合的方法评估本文提出的方法,并与 GS-SIFT、ISS、PIIFD 以及基于全局信息的多模态配准算法进行比较。

## 2 图像配准数学模型

用二维矩阵表示图像, $I_t$  表示待配准图像(测试图像), $I_r$  表示参考图像。图像  $I_t$  中给定的任意像素点  $I_t(x, y)$ ,可以通过坐标变换函数  $T$  在参考图像  $I_r$

找到相对应的点,则  $I_t$  和  $I_r$  图像配准问题等价于寻找最优空间变换  $T$ ,

$$I_r(u, v) = I_t(T(x, y)) \quad (1)$$

其中  $I_r(u, v)$  为参考图像的像素点,使得  $I_t$  和  $I_r$  几何对齐度最大。即

$$\arg \min_{T, x, y} \|I_r(T(x, y)) - I_t(x, y)\| \quad (2)$$

其中  $\|\cdot\|$  为二阶范数,表示参考图像映射到测试图像坐标平面后的各像素点的欧式距离。

### 3 人工辅助配准算法

#### 3.1 基于最小二乘法求投影变换最优解

本方法使用投影变换  $H$  (Homography) 描述两幅图像控制点对的匹配关系。设  $p_i(x, y), pr(u, v)$  分别表示测试图像  $I_t$  和  $I_r$  的一对匹配控制点对的坐标。根据投影变换关系:

$$u = \frac{h_1x + h_2y + h_3}{h_7x + h_8y + 1} \quad (3)$$

$$v = \frac{h_4x + h_5y + h_6}{h_7x + h_8y + 1} \quad (4)$$

易见,为获得投影变换矩阵  $H = [h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, h_8]$ ,在  $I_t$  和  $I_r$  上至少需要 4 对匹配控制点对才可以解出 8 个参数。实际工程应用中,分布在  $I_t$  和  $I_r$  上控制点对存在匹配误差,若直接利用 4 对匹配控制点对进行计算,必然会引入较大匹配误差。因此本方法利用多对(大于 4)控制点匹配,通过最小二乘法近似计算  $I_t$  和  $I_r$  的投影变换参数。设  $p_{ti}(x_i, y_i), i=1, 2, 3, \dots, N$ , 表示  $I_t$  控制点坐标,  $pr_i(u_i, v_i), i=1, 2, 3, \dots, N$  表示  $I_r$  中与  $p_{ti}(x_i, y_i)$  与相匹配的控制点坐标。根据式(3)和(4),  $N$  对控制点匹配建立的方程可以写成式(5):

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_ix_i & -u_iy_i \\ 0 & 0 & 0 & x_i & y_i & 1 & -v_ix_i & -v_iy_i \\ \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_Nx_N & -u_Ny_N \\ 0 & 0 & 0 & x_N & y_N & 1 & -v_Nx_N & -v_Ny_N \end{pmatrix}}_X \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \\ h_8 \end{pmatrix}}_H = \underbrace{\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_i \\ v_i \\ \vdots \\ u_N \\ v_N \end{pmatrix}}_U \quad (5)$$

当  $N$  确定时,利用最小线性平方差求解式(5),获得  $H$  理想近似解,此时两幅图像的控制点对平均距离最小。 $N$  为输入的控制点对数目,根据本文提出的最小二乘法思想, $N$  的最小值为 4,实验表明当  $N$  取 6 或 7 时,本算法在配准精度和效率方面能取得良好折衷。

根据式(5), $I_t$  的控制点通过投影变换到映射到  $I_r$ ,与  $I_r$  控制点的平均距离为:

$$d_{2r} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H(x_i, y_i) - (u_i, v_i)|^2} \quad (6)$$

根据的逆矩阵  $H^{-1}$ , $I_r$  的控制点通过投影变换映射到  $I_t$ ,与  $I_t$  控制点的平均距离为:

$$d_{2t} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(x_i, y_i) - H^{-1}(u_i, v_i)|^2} \quad (7)$$

#### 3.2 控制点对选取和校正

控制点对选取和自动匹配是投影变换的重点。本算法首先根据人的视觉对测试图像和参考图像输入控制点对。根据图像特征,可以保证在测试图像和参考图像选择的特征点的分布位置和区域相对一致、在图像中分布均匀,为建立控制点对的精确匹配奠定良好基础。

由于人工初次输入的控制点不一定是图像的真实极值点,如图 1 所示。需将测试图像的控制点进行校正,使其分布图像的极值点上,以增强匹配稳定性、提高抗噪声能力。本算法利用高斯差分函数 DOG (Difference of Gaussian) 的泰勒展开式<sup>[9]</sup>,通过线性插值在测试图像控制点附件寻找极值点,从而使输入的控制点位置分布于稳定且位置精度更高的极值点上。

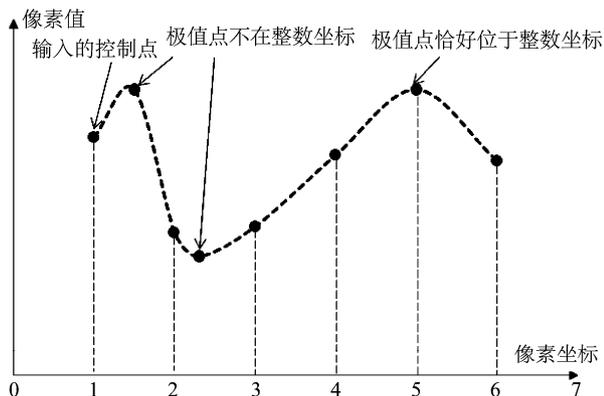


图 1 输入控制点与图像极值点的差别

Fig. 1 Difference of input control points and image extreme points

设点 A 为已知的输入控制点,用点 A 估计附近某极值点 B 的值,  $X=(x, y, \sigma)^T$  为 B 点相对于 A 点的偏移。根据 DOG 函数的泰勒函数展开式(拟合函数):

$$D(X) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 X}{\partial X^2} \quad (8)$$

求导并让方程(8)等于零,可以得到极值点的偏移量为:

$$\hat{X} = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial X^2} \frac{\partial D}{\partial X} \quad (9)$$

对应极值点,方程(8)的值为:

$$D(\hat{X}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial X} \hat{X} \quad (10)$$

当  $\hat{X}$  在任一维度上的偏移量大于 0.5 时(即  $x$  或  $y$  或  $\sigma$ ),表明极值点更靠近 A 的邻近点 C,将点 A 更新为点 C,继续迭代,直到  $\hat{X}$  任一维度的偏移都小于 0.5,迭代过程结束。将  $\hat{X}$  追加到当前点(整数像素位置),得到控制点的精确位置(亚像素)。

### 3.3 控制点对匹配

根据式(6)和式(7)可计算得到控制点对的初始匹配误差  $d_{l_2r}$  和  $d_{l_2t}$ ,初始值  $d_{l_2r}$  和  $d_{l_2t}$  需要通过控制点调整进一步缩小误差。由于测试图像的控制点经过 DOG 算子处理后,已接近理想极值点,因此本算法主要调整参考图像对应控制点位置。按照控制点对的标记顺序,分别在上、下、左、右四个方向上按照设定的步长  $s$  自动移动,以  $d_{l_2r}$  和  $d_{l_2t}$  取得极小值为原则搜索参考图像控制点最佳匹配位置。假设在测试图像和参考图像输入  $N$  对控制点,根据 3.1,  $N$  取 6 或者 7。通过 DOG 算子对测试图像的控制点完成校正后,则参考图像对应匹配控制点的自动搜索过程为:

(1) 计算初始误差:根据式(6)算初始控制点对匹配误差  $d_{l_2r}$  和  $d_{l_2t}$ ;

(2) 迭代调整参考图像控制点:其他控制点位置固定不变,对于第  $i$  个控制点,按照移动步长  $s$  移动坐标,当  $d_{l_2r}$  和  $d_{l_2t}$  收敛时,此时的控制点的位置为其最佳位置,顺序调整下一个控制点的位置;

(3) 迭代中止:对于迭代中止,考虑到测试图像和参考图像的控制点对的匹配距离误差小于某个

预设定的阈值时结束。即

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H(x_i, y_i) - (u_i, v_i)|^2} < T_h \quad (11)$$

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(x_i, y_i) - (u_i, v_i)|^2} < T_h \quad (12)$$

如何定义  $T_h$  是一个非常重要的问题。 $T_h$  定义过小,匹配控制点会对偏离图像实际特征点,不能取得理想的配准效果, $T_h$  定义过大会导致较大的配准误差。实验分析发现, $T_h$  分布在(0.3, 0.5)之间,图像的配准效果较为理想。

### 3.4 算法实现

(1) 算法初始化,设置迭代结束门限参数  $T_h$  和调整步长  $s$ ;

(2) 在测试图像  $L$  和参考图像  $L_r$  依次人工输入  $N$  对控制点  $P_l^1, P_l^2, P_l^3, P_l^4 \dots P_l^N$  和  $P_r^1, P_r^2, P_r^3, P_r^4 \dots P_r^N$ ;

(3) 利用 DOG 算子调整测试图像控制点,使其位于极值点位置,获得稳定的控制点;

(4) 利用投影变换,基于控制点对坐标计算  $H$  和  $H^{-1}$  将  $H$  和  $H^{-1}$  代入式(6)和(7),得到控制点对的初始匹配误差  $d_{l_2r}$  和  $d_{l_2t}$ ;

(5) 对  $L_r$  逐点自动调整控制点位置,调整步长为  $s$ ,重新计算  $d_{l_2r}$  和  $d_{l_2t}$ ;

(6) 当  $d_{l_2r} < T_h$  和  $d_{l_2t} < T_h$  时,自动调整过程结束;基于控制点对位置坐标计算  $H$ ;

(7) 利用  $H$ ,遍历  $L_r$  全部像素点,构造  $L_r(H(x, y))$  并投影到图像  $L_r$ ,配准算法结束。

## 4 评估方法和实验对比

### 4.1 评估方法

采用文献<sup>[11]</sup>提出的方法定量评估配准误差。步骤如下:

(1) 用已知仿射变换矩阵  $T_k$  对  $L_r$  变换,获得变换后的测试图像  $L_r^{T_k}(x, y)$ ;

(2) 根据本文提出的算法确定特征匹配点对计算仿射变换  $T$  即

$$(P_l^1, P_r^1, P_l^2, P_r^2, P_l^3, P_r^3 \dots P_l^N, P_r^N) = T(P_l^1, P_r^1, P_l^2, P_r^2, P_l^3, P_r^3 \dots P_l^N, P_r^N);$$

(3) 定义  $\eta$  为平均配准误差, 遍历  $I_i$  中的像素点, 可得

$$\eta = \frac{1}{\text{HEIGHT} * \text{WIDTH}} \sum_x \sum_y \|T(x, y) - T_k(x, y)\| \quad (13)$$

其中: HEIGHT 为图像的高度, WIDTH 为图像的宽度, 单位为像素, HEIGHT \* WIDTH 表示图像的像素数目。

## 4.2 实验对比

### 4.2.1 图像集

待配准图像集由 18 对不同模态卫星图像对组成, 序号为 1-10。图像对 1-6 为从互联网搜索到的 LANDSAT 卫星拍摄合成的不同模态图像。其中图像对 1 为 LANDSAT8 于 2013 年 8 月 19 日拍摄的图像日本九州鹿儿岛县樱岛火山喷发的卫星图像, 第 1 幅为 LANDSAT8 搭载陆地成像仪 (OLI) 成像, 第 2 幅为 LANDSAT8 搭载的热红外传感器 (TIR) 成像。图像对 2 为 LANDSAT5 号卫星 TM 传感器拍摄的美国迈阿密佛罗里达海岸, 第 1 幅图摄于 1989 年 4 月 2 日, 第 2 幅图摄于 1950 年 11 月 22 日。图像对 3 为 2011 年 9 月 2 日, LANDSAT 5 卫星拍摄的飓风艾琳给美国新英格兰地区康涅狄格河带来的泥沙冲积情况, 两幅图像分布在不同的模态。图像对 4 为 LANDSAT5 卫星 MSS 段和 TM 波段传感器分别拍摄的我国烟台地区城镇区域的信息特征。图像对 5 为 LANDSAT7 卫星拍摄的美国切萨皮克湾的自然可见光和热红外 (TIR) 图像, 图像对 6 分别为 LANDSAT7 卫星 B4 (0.76-0.96 $\mu\text{m}$ ) 近红外波段和 B7 (2.08-3.35 $\mu\text{m}$ ) 中红外波段拍摄的美国纽约地区卫星图像。图像对 7-12 来源于美国航空航天局官网 (<http://landsat.gsfc.nasa.gov>), 其中 7、8 对图像分布在可见光和近红外波段, 9、10 对图像分布在可见光和中红外波段, 11、12 对图像分布在可见光和热红外传感器 (10.40  $\mu\text{m}$  至 12.50  $\mu\text{m}$ ), 13、14 对图像分布在可见光和热红外传感器 (10.6  $\mu\text{m}$  到 11.19  $\mu\text{m}$ )。图像对 15、16、17、18 分别为我国遥感卫星拍摄的 2008 年四川地震灾区汶川县、北川县、江油市、茂县的地震前后的遥感图像。部分实验图像对见图 2。

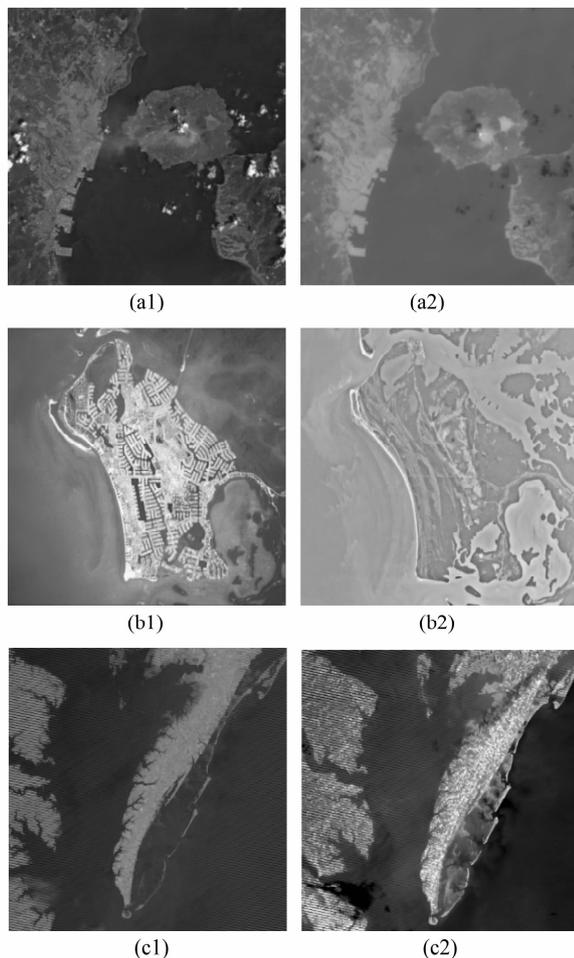


图 2 部分遥感卫星图像对

Fig. 2 Part of satellite remote sensing images

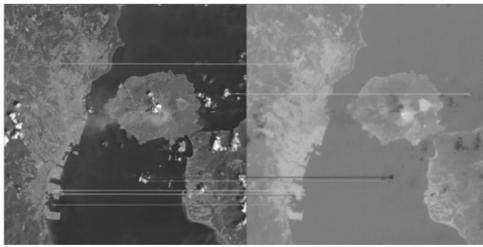
### 4.2.2 实验参数

GS-SIFT 算法基于文献 [7] 实现, ISS 算法基于文献 [9] 实现, PIIFD 算法基于文献 [8] 实现, 全局信息算法基于文献 [10] 实现。本文算法实验参数配置如下: 调整步长  $s=0.1$  (像素);  $T_h=0.3$ ;  $N=7$ , 根据 4.1, 为计算配准误差, 对其中一副待配准图像进行仿射变换, 仿射变换矩阵设为:

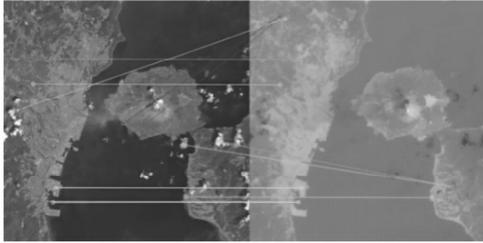
$$T_k = \begin{bmatrix} 0.908 & 0.121 & -18.673 \\ 0.133 & 0.931 & -7.952 \end{bmatrix}$$

### 4.2.3 实验结果

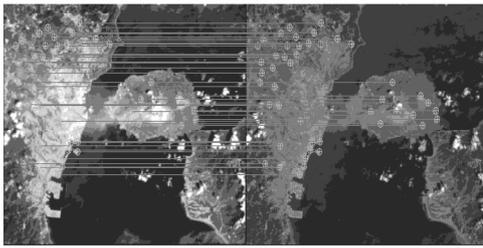
限于篇幅, 本文仅给出利用 GS-SIFT、ISS、PIIFD、全局信息以及本文方法对图像对 1 的配准效果图, 见图 3。



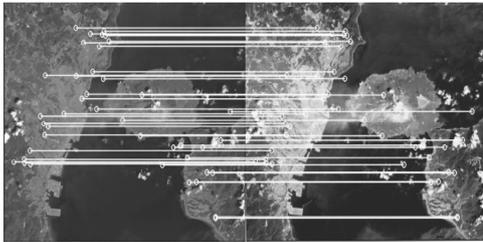
(a) GS-SIFT方法特征点匹配



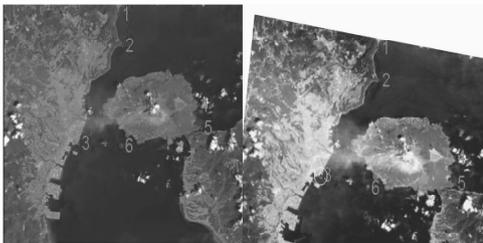
(b) ISS特征点匹配



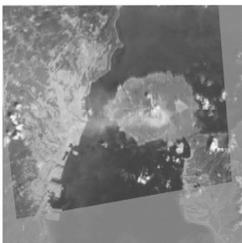
(c) PIIFD特征点匹配



(d) 全局信息特征点匹配



(e) 本文方法确定的OLI和TIRS图像控制点匹配点对



(f) 本文方法确定的OLI和TIRS图像融合效果图

图3 樱岛火山喷发的卫星图像的配准

Fig. 3 Registration of Sakura Shima volcano eruption images

图3(a)、3(c)、3(d)显示,GS-SIFT、PIIFD和全局信息算法检测出的特征点对在OLI图像和TIRS图像分布的区域和位置相对一致,显示GS-SIFT、PIIFD和全局信息算法对图像对1的配准效果较好,但本文方法的平均配准精度更高(见表1),且在实验数据集上具备较好地鲁棒性。图3(b)显示,ISS算法检测出的匹配特征点对在两幅图像上分布区域和位置有明显的位置偏移,显示配准误差较大,说明ISS算法对图像对1的配准效果较差。

本文提出的算法分别在OLI和TIRS图像输入7对控制点对,自动调整至匹配误差0.4时,结束迭代,图3(e)为输出的匹配控制点对的亚像素位置,图3(f)展示的为图像配准融合后的效果图。从图3(f)可以观察到配准融合后的图像清晰、纹理丰富、边缘清楚,也未出现马赛克,主观评价效果较好。

利用式(13)计算本文提出的算法的配准误差(像素),计算结果见表1。

统计表1各种方法的配准误差,对于GS-SIFT方法,在实验数据集中,16%的图像对配准误差分布在 $[0,5]$ 个像素,33%的图像对配准误差分布在 $[10,20]$ 个像素,16%的配准误差分布在 $[20,30]$ 个像素,11%的图像对配准误差分布在 $[30,50]$ 个像素;对于ISS方法,22%的图像对配准误差在 $[10,20]$ 个像素,11%的配准误差分布在 $[20,30]$ 个像素,11%的图像对配准误差在 $[30,50]$ 个像素,11%的图像对配准误差在 $[50,100]$ 个像素;对于PIIFD方法,22%的图像对配准误差在 $[0,5]$ 个像素,17%的图像对配准误差在 $[5,10]$ 个像素,28%的图像对配准误差在 $[10,20]$ 个像素,11%的图像对配准误差在 $[30,50]$ 个像素,5%的配准误差在 $[50,100]$ 个像素;对于全局信息配准方法,39%的图像对配准误差在 $[0,5]$ 个像素,56%的图像对配准误差在 $[5,10]$ 个像素,5%的图像对配准误差分布在 $[10,20]$ 个像素;利用本文提出的方法,94%的图像对误差在 $[0,5]$ 个像素,5%的图像对误差在 $[5,10]$ 个像素。实验结果表明,在多模态遥感图像配准方面,利用PIIFD描述符确定的特征点配准效果要优于GS-SIFT和ISS方法,也具备良好的鲁棒性,但配准精度还有待进一步提高。全局信息算法充分利用了图像全部特征点信息,通过组合筛选,确定最佳特征点匹配,特征点匹配正确率明显提高。本文提出的算法,从实验结果看到,由于充分引入先验知识,

表1 配准误差  
Tab.1 Registration errors

序号	GS-SIFT	ISS	PIIFD	全局信息配准	本文方法
1	5.43	31.27	3.74	3.75	1.38
2	配准失败	配准失败	6.78	4.74	3.71
3	配准失败	配准失败	3.69	5.89	2.67
4	19.25	20.38	10.94	7.84	2.29
5	30.47	50.83	14.32	3.45	2.45
6	9.21	15.78	10.21	3.67	1.73
7	10.38	12.49	6.84	1.78	1.89
8	7.45	19.94	2.76	2.83	2.26
9	13.24	14.57	4.67	3.84	2.65
10	13.53	15.78	8.94	7.46	3.37
11	17.89	20.34	15.81	7.25	2.67
12	20.43	34.57	48.43	8.31	3.64
13	37.84	69.84	30.67	6.78	3.12
14	27.89	40.68	60.91	12.45	5.67
15	配准失败	配准失败	配准失败	8.34	3.43
16	配准失败	配准失败	17.29	6.78	2.45
17	配准失败	配准失败	16.67	7.83	4.43
18	配准失败	配准失败	13.89	8.92	3.37

配准误差显著优于 PIIFD、GS-SIFT 和 ISS 方法,也优于全局信息配准算法,实验结果也证明了本方法具备较强的鲁棒性,可以解决难度较高的遥感图像配准。

在消耗计算资源方面,本文提出的算法计算内容包含确定初始输入控制点的极值位置、根据双边配准误差调整控制点的亚像素位置匹配以及最小二乘法计算最佳投影变换,算法运行耗时与控制点的数量相关,实验表明,当初始控制点数量取 6 或者 7 时,最小二乘法计算得到投影变换系数趋于收敛,配准误差无明显变化,在配准精度和计算复杂度方面取得平衡,计算复杂度为  $O(n^2)$ ,  $n=6,7$ 。在 Intel 2.6GHz (R) Core (TM) i5-3230M CPU、4GBRAM 配置下的运行时间在 2-3 秒。

## 5 结论

亚像素配准是多光谱遥感图像配准的难点问题,

本文提出的方法能达到亚像素级配准精度并提高配准成功率。虽然本方法在初始计算过程中引入了控制点先验知识,但实验结果表明,本方法在配准精度和鲁棒性方面有效弥补了自动多模态图像配准算法在配准精度方面的不足,能够应对多模态遥感图像融合对图像配准技术的挑战。下一步研究工作中,研究适合于多模态遥感图像的描述符,实现控制点自动输入机制,提高算法的运行效率。

## 参考文献

- [1] 张建勋,孙权,李涛. 基于改进尺度不变特征转换算法的合成孔径雷达图像配准并行研究[J]. 重庆理工大学学报:自然科学,2012,26(6):50-55.  
Zhang J X, Sun Q, Li T. Parallel Research and Implementation of SAR Image Registration Based on Optimized SIFT [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2012,26(6):50-55. (in Chinese)
- [2] Shi W, Su F Z, Wang R R, Lu Y D. Optical and SAR

- image registration based on improved nonsubsampling wavelet transform for sea islands [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(5):86-95.
- [3] Zheng Y, Cui Z G, Xue Y. Multi-spectral remote image registration based on SIFT [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(2):107-108.
- [4] Gong M G, Zhao S M, Jiao L C. A Novel Coarse-to-Fine Scheme for Automatic Image Registration Based on SIFT and Mutual Information [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7):4328-4338.
- [5] 徐颖,周焰. SAR 图像的 ROI 特征配准方法[J]. *信号处理*, 2014,30(1): 7-13.  
Xu Y, Zhou Y. A ROI Features Registration Method for SAR Images[J]. *Journal of Signal Processing*, 2014,30(1): 7-13. (in Chinese)
- [6] Lowe G D. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [7] Chen J, Tian J. Real-time multi-modal rigid registration based on a novel symmetric-SIFT descriptor [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(5):643-651.
- [8] Chen J, Tian J, Lee N, et al. A partial intensity invariant feature descriptor for multimodal retinal image registration [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, 57(7):1707-1718.
- [9] Hossain T M, Lv G, Teng W S, et al. Improved symmetric-sift for multi-modal image registration [C] // *International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*, 2011:197-202.
- [10] Li Y, Stevenson R. Incorporating global information in feature-based multimodal image registration [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2014, 23(2): 023013(1)-023013(14).
- [11] Xia M, Liu B. Image registration by "super-curve" [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(5): 720-732.

### 作者简介



王凌霞 女,1983年生,山东德州人,西安电子科技大学智能感知与图像理解教育部重点实验室,博士,研究方向为遥感图像处理、图像配准、变化检测。  
E-mail:wanglingxia@163.com



郝红侠 女,1980年生,陕西西安人,西安电子科技大学智能感知与图像理解教育部重点实验室,讲师,研究方向为多尺度几何分析、智能图像处理。  
E-mail:zz.ling@163.com