

文章编号: 0253-2239(2009)10-2744-07

基于非采样 Contourlet 变换高分辨率遥感图像配准

陈志刚 尹福昌 孙 孚

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 为了提高高分辨率遥感图像配准的精确度, 将非采样 Contourlet 变换应用于高分辨率遥感图像配准算法中。首先对高分辨率遥感图像进行非采样 Contourlet 变换, 利用非采样 Contourlet 变换的平移不变性在变换域提取图像的边缘并选择合适的阈值准确地得到图像的边缘特征点。然后利用归一化互相关匹配法和概率支撑法对特征点进行匹配。最后通过三角形局部变换映射函数实现图像配准。实验结果表明, 该方法更能准确地提取高分辨率遥感图像的特征点, 大大提高了正确匹配的概率, 与基于小波方法的图像配准效果相比有更高的准确性和稳健性。

关键词 图像处理; 图像配准; 非采样 Contourlet 变换; 归一化互相关; 概率支撑匹配

中图分类号 TN911.73 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092910.2744

Registration Technique for High-Resolution Remote Sensing Images Based on Nonsampled Contourlet Transform

Chen Zhigang Yin Fuchang Sun Fu

(School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract For the purpose of improving high-resolution remote sensing images registration precision, nonsampled contourlet transform is applied to high-resolution remote sensing images registration. Firstly, for nonsampled contourlet transform shift invariance, nonsampled contourlet transform is used to extract the images edge in contourlet transform domain and the feature points are extracted from images edge by selecting an appropriate threshold. Then, normalized cross-correlation matching and probability support matching method are used to match the images feature points. Finally, triangle-based local transformation function is employed to register the images. The experimental results show that this method can more accurately extract the corresponding feature points of high-resolution remote sensing images and increase correct matching probability and have more precise and more robust registration effect than the method based on wavelet.

Key words image processing; image registration; nonsampled contourlet transform; normalized cross-correlation; probability support matching

1 引 言

在遥感图像处理中, 高分辨率遥感图像配准不仅是高分辨率遥感图像融合的必要前提, 同时也是目标制导等领域的重要方法。配准的准确度将直接影响遥感图像融合的质量, 在目标制导领域将直接决定目标的制导精度^[1]。

图像配准的方法大体可以分为基于图像灰度信息和基于图像特征的两种。而多传感器遥感图像配准采用基于图像特征的配准方法, 这些方法包括基于区域的配准方法^[2], 基于图像轮廓的配准方法^[3], 基于结构的配准方法^[4], 基于线型特征配准方法^[5]以及基于小波特征点提取的方法^[6,7]等。小波变换近年来被广泛地应用到图像配准的特征提取算法

收稿日期: 2008-11-28; 收到修改稿日期: 2009-01-07

基金项目: 总装备部预先研究基金(404050603)资助项目。

作者简介: 陈志刚(1970—), 男, 博士研究生, 主要从事图像处理, 模式识别方面的研究。E-mail: zhigang_chen@163.com

导师简介: 尹福昌(1945—), 男, 教授, 主要从事光信息传输与处理方面的研究。

之中后, 配准的准确度得到很大的提高。但应用小波提取图像的特征时常常忽略 45° 方向子带信息^[8], 使得提取到的特征会出现细微的偏差, 从而影响图像配准精度。

2006 年 Cunha 等提出非采样 Contourlet 变换^[9], 不但克服了小波变换和 Contourlet 变换^[10]的缺点而且还具有平移不变性, 有效消除了图像边缘 Gibbs 现象^[11,12]。由于高分辨率遥感图像含有丰富的细节信息, 会导致在图像配准时出现大量的匹配特征点, 这就要求特征点的提取要有更高的准确性, 否则就会造成配准的失败。将非采样 Contourlet 变换应用到高分辨率遥感图像配准中的特征点提取中, 能使得图像配准算法更具有准确性和鲁棒性, 配准基本过程包括: 应用非采样 Contourlet 变换提取高分辨率遥感图像的边缘特征点; 采用归一化互相关法进行特征点的匹配^[13], 同时采用概率支撑法对匹配的特征控制点对进行检验消除错误的控制点对; 以控制点对为基础建立 Delaunay 三角形局部变换映射函数实现配准。

2 非采样 Contourlet 变换

非采样 Contourlet 变换 (NSCT) 是在 Contourlet 变换的基础上提出的, 相对于 Contourlet 变换, NSCT

在图像的分解和重构过程中, 取消了子采样环节, 从而使得 NSCT 不仅具有多尺度、良好的空域和频域局部特性和方向特性外, 还具有平移不变特性。

NSCT 首先采用非采样塔式滤波器组 (NSPFB) 获得图像的多尺度分解, 然后采用非采样方向滤波器组 (NSDFB) 对得到的各尺度子带图像进行方向分解, 从而得到不同尺度、方向子带系数。其中, NSPFB 的结构类似于用 à Trous 算法设计的非抽样小波变换, 从而满足平移不变性。图像经过 $J (J \geq 2)$ 级 NSCT 分解变换后可以得到一个低频近似图像和 $\sum_{j=2}^J 2^j$ 个方向子带图像, 而且它们的分辨率和原图像相同。如图 1 所示为非采样 Contourlet 变换结构示意图; 图 2 所示为高分辨率遥感图像的 2 级非采样 Contourlet 分解变换结果: 分解出 1 个低频子带和 4 个方向子带。

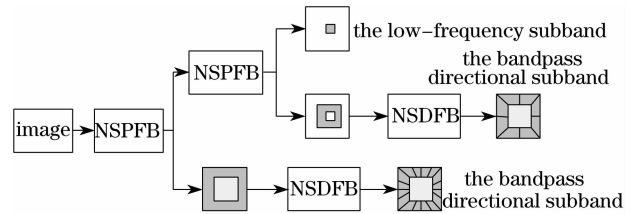


图 1 非采样 Contourlet 变换结构示意图

Fig.1 Structure of nonsubsamped contourlet transform

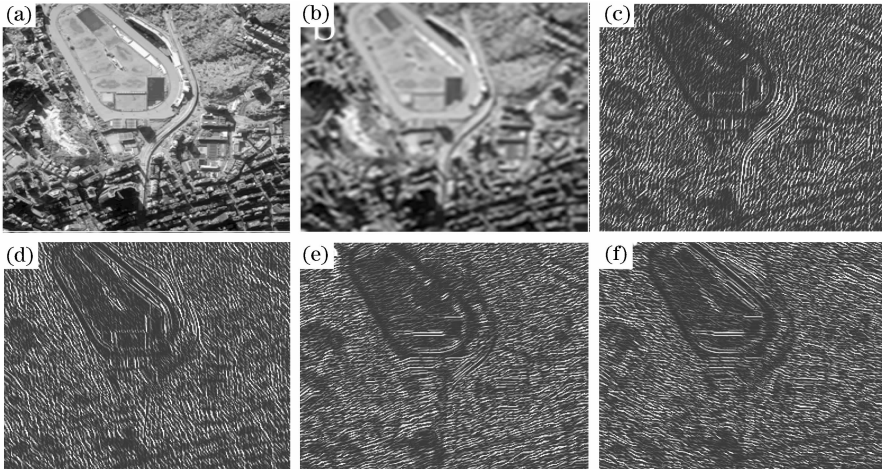


图 2 高分辨率遥感图像 2 级非采样 Contourlet 分解变换。(a) 原图像, (b) 低频子带, (c), (d), (e) 和 (f) 分别为四个方向上的高频子带

Fig.2 Fig.2 Example of the nonsubsamped contourlet transform on high-resolution remote sensing image. (a) Original image; (b) low-frequency sub-band; (c), (d), (e), (f) four high-frequency sub-bands

3 基于非采样 Contourlet 变换的特征点提取

由于非采样 Contourlet 分解变换后的低频子带

和低频方向子带具有和原始输入图像具有相同的像素分辨率和它的平移不变性, 就可以利用非采样 Contourlet 变换的高频方向子带来提取图像的边缘, 再选择合适的阈值就可以获得图像的边缘特征

点。在小波变换提取图像的边缘时^[14],只利用了小波分解后的垂直方向和水平方向的子带系数而舍弃 45° 方向的子带系数,这样往往会造成图像边缘信息的流失而造成提取的特征点的位置有偏差,从而导致配准的准确度降低。非采样 Contourlet 变换分解出的每一尺度下的高频子带是成对出现的,其方向两两垂直,这样就会很方便地求取图像的边缘。

非采样 Contourlet 变换不同的尺度会分解出不同的方向子带,在每一尺度下的方向子带某一位置上的系数可以看做是原始图像在该位置上该方向上的梯度,将这些梯度求矢量和,就能提取出图像的边缘,以尺度为 2 时为例提取图像的边缘,为了计算方便将负方向子带系数赋值为 0,即在将方向子带系数的方向归结 0 到 π 之间。当尺度为 2 时原始图像经过非采样 Contourlet 变换分解出 4 个方向子带,那么每相邻方向就相差为 $\pi/4$,设四个方向矢量分别为 $\mathbf{F}_1(x,y)$, $\mathbf{F}_2(x,y)$, $\mathbf{F}_3(x,y)$ 和 $\mathbf{F}_4(x,y)$, (x,y) 表示在子带图像中的位置,根据非采样 Contourlet 变换的原理可知 1 方向和 4 方向垂直, 2 方向和 3 方向垂直,那么:

$$|\mathbf{F}_{14}(x,y)| = \sqrt{|\mathbf{F}_1(x,y)|^2 + |\mathbf{F}_4(x,y)|^2} \quad (1)$$

$$\theta_{14} = \arctan(|\mathbf{F}_1(x,y)| / |\mathbf{F}_4(x,y)|) \quad (2)$$

$$|\mathbf{F}_{23}(x,y)| = \sqrt{|\mathbf{F}_2(x,y)|^2 + |\mathbf{F}_3(x,y)|^2} \quad (3)$$

$$\theta_{23} = \arctan(|\mathbf{F}_2(x,y)| / |\mathbf{F}_3(x,y)|) \quad (4)$$

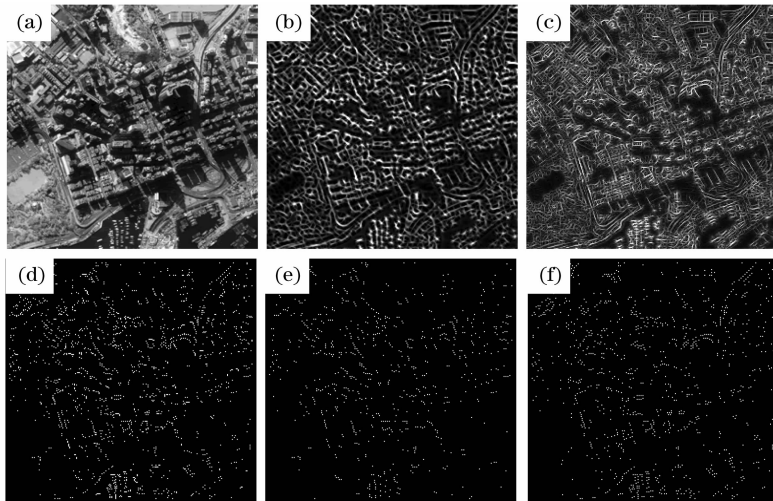


图 3 特征边缘和特征点的提取。(a)原图像,(b)尺度为 2 时提取的边缘,(c)尺度为 3 时提取的边缘,(d)全局特征点,(e)尺度为 2 时提取的特征点,(f)尺度为 3 时提取的特征点

Fig. 3 Feature edge and feature point extraction. (a) Original image; (b) feature edge (scale=2); (c) feature edge (scale=3); (d) global feature points; (e) feature points(scale=2); (f) feature points(scale=3)

其中 $\mathbf{F}_{14}(x,y)$ 和 $\mathbf{F}_{23}(x,y)$ 分别为对应方向的合成矢量; θ_{14} 和 θ_{23} 分别为对应方向合成矢量的方向角。根据每个相邻矢量方向相差 $\pi/4$, 不难计算出 $\mathbf{F}_{14}(x,y)$ 和 $\mathbf{F}_{23}(x,y)$ 的夹角 θ :

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \theta_{14} - \theta_{23}, \quad (5)$$

则由方向子带最终合成的梯度矢量的大小 $|\mathbf{F}(x,y)|$ 可表示为

$$f_c(x,y) = 2 |\mathbf{F}_{14}(x,y)| |\mathbf{F}_{23}(x,y)| \cos \theta, \quad (6)$$

$$|\mathbf{F}(x,y)| =$$

$$\sqrt{|\mathbf{F}_{14}(x,y)|^2 + |\mathbf{F}_{23}(x,y)|^2 + f_c(x,y)}. \quad (7)$$

$|\mathbf{F}(x,y)|$ 就是所求得的图像的边缘值,其它尺度求取边缘的方法与此类似。边缘值的大小代表原图像上该位置图像相对的变化趋势或者说是图像的该位置上的频率点,这样选取合适的阈值就可以准确提取出图像的大于此阈值的高频点称之为边缘特征点,同时也控制了特征点数目。这样在每个尺度提取出边缘特征点,之后就可以将各个尺度下的特征点合成为整个图像的全局特征点。如图 3 所示将原图像进行 3 级非采样 Contourlet 变换后的不同尺度下提取的边缘和特征点,其中(d)的特征点为(e)和(f)的特征点之和,称之为全局特征点。

4 特征点的匹配

在对参考图像(Reference image)和待配准图像

(Sensed image)特征点提取之后,需要对两组特征点进行匹配建立控制点对,消除冗余的特征点。常

用的特征点匹配算法有 Hausdorff 距离法, 松弛标记法, 确定性退火算法以及迭代最近点算法等^[13]。本文先是采用归一化互相关法 (Normalized cross-correlation matching) 实现特征点的匹配, 然后采用概率支撑匹配 (Probability support matching) 法进行对归一化互相关匹配法的结果进行检验, 从而消除错误的特征点对的匹配。

4.1 归一化互相关法特征点匹配

用归一化互相关匹配方法来测量参考图像特征点和待配准图像特征点之间的相似度。假设两个子图像分别为 A 和 B , 它们的大小相同为 $M \times N$, 则 A 和 B 的归一化互相关系数 r_{AB} 可以用下式表示:

$$r_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_A(i, j) - \bar{I}_A][I_B(i, j) - \bar{I}_B]}{\left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_A(i, j) - \bar{I}_A]^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_B(i, j) - \bar{I}_B]^2 \right\}^{1/2}} \quad (8)$$

其中, $I_A(i, j)$ 和 $I_B(i, j)$ 分别为子图像 A 和 B 的 (i, j) 位置上的灰度值; \bar{I}_A 和 \bar{I}_B 分别为子图像 A 和 B 的平均灰度值。

采用归一化互相关法特征点匹配的方法可以分为两种情况。

第一, 当待配准的两个图像几何变形、分辨率相差不大时应用如下方法:

1) 分别将参考图像和待配准图像在非采样 Contourlet 变换域中提取的特征点的位置映射到原图像中。

2) 分别以特征点为中心, 在原图像上截取 $M \times N$ 的子图像, 得到两组和对应特征点数目相同的相同大小的子图像。

3) 分别计算参考图像中的一个子图像和待配准图像中的所有子图像的互相关系数, 互相关系数最大且大于某阈值的待配准图像中的子图像对应的特征点作为匹配点, 得到一个匹配点集。

4) 和 3) 过程类似, 计算的方向对调, 分别计算待配准图像中的每一个特征点对应于子图像到参考图像所有特征点对应的子图像的互相关系数, 取最大值得到另一个匹配点集。

5) 将两个匹配点集进行对比, 将两个匹配点集中相同的匹配点对作为两幅图像的匹配控制点对。

第二, 当待配准的两个图像分辨率相差较大或其中一个图像相对另一个图像的几何变形较大时, 则仅从几何分辨率较高或几何变形小的图像上提取

特征点, 直接利用这些均匀分布的特征点建立搜索窗口, 在另一图像上进行全局搜索计算互相关系数, 取最大互相关系数的点作为匹配点。

4.2 概率支撑法

采用归一化互相关法特征点匹配时往往会出现错误的匹配, 本文提出基于特征点空间相对距离的概率支撑法对归一化互相关法匹配的特征点进行检验, 消除错误的匹配点对。

概率支撑法的原理是假设某一对匹配点是一对真的控制点对时来计算其它匹配点的支持度和支撑度, 如果支撑度大于一定阈值则认为此匹配点对是真的控制点对。由于在归一化互相关特征点匹配时采用的是双向互相关, 所以匹配后的两组匹配点的个数是相同的。设两组匹配点集分别为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 和 $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$, 假设匹配点 (A_i, B_i) 是一对真的特征控制点的话, 则其它的匹配点 (A_j, B_j) 对 (A_i, B_i) 的支持度 $S(i, j)$ 可表示为

$$S(i, j) = \min \left\{ \frac{d_A(i, j)}{d_B(i, j)}, \frac{d_B(i, j)}{d_A(i, j)} \right\}, \quad (9)$$

其中, $d_A(i, j)$ 和 $d_B(i, j)$ 分别是 A_i 到 A_j 和 B_i 到 B_j 的欧氏距离 (Euclidean distance)。可见 $0 \leq S(i, j) \leq 1$ 。由于待配准图像局部相对于参考图像会产生一些变形, 建立变形系数 $\eta, \eta \in [0, 1]$, 当 $\eta = 1$ 时表示没有相对变形, 而 $\eta = 0$ 时表示已经产生了不可逆转的变形。如果用户给定一定的 η 值, 按照支持度就可建立支持决定函数 C :

$$C[S(i, j)] = \begin{cases} 1 & S(i, j) \geq \eta \\ 0 & S(i, j) < \eta \end{cases}, \quad (10)$$

$C[S(i, j)]$ 表示了由变形系数决定了 (A_j, B_j) 对 (A_i, B_i) 是否有支持, 如果为 1 表明有支持, 否则无支持。这样其余各点对 (A_i, B_i) 的支撑度 $P(i)$ 可以用下式表示:

$$P(i) = \frac{1}{m-1} \sum_{n=1, n \neq i}^m C[S(i, j)]. \quad (11)$$

$P(i)$ 实质上表明了其它匹配点对对第 i 个匹配点对的支持概率, 用户可自己设定支撑度的大小, 如果某匹配点对的 P 大于规定值则认为当前的匹配点对是控制点对为真, 否则为假。

5 映射函数的建立

采用全局多项式作为映射函数往往不能解决因地势地貌引起的图像的局部变形, 采用局部的三角变换来作为局部映射函数能够减少局部变形的影响^[15]。在参考图像和待配准遥感图像中, 对搜索到

的特征点对, 构建 Delaunay 三角网^[16]而不是普通三角网, 这样三角网的拓扑关系能保持不变, 由此再进行约束几何映射关系的构建, 则各分块的几何变换不会产生错乱, 一旦所有控制点的 Delaunay 三角网格构建完成, 而可以按照对应的三角形的映射函数对待配准的图像进行重采样的操作。由于每一个三角形, 都对一个变换的映射函数, 而全局多项式在两个图像之间只有一个变换的映射函数, 所以基于局部三角形映射函数的线性变换既快捷又简单, 其变换等式为

$$\begin{cases} x' = a_0 + a_1x + a_2y \\ y' = b_0 + b_1x + b_2y \end{cases}, \quad (12)$$

其中 (x', y') 是待配准图像中局部三角形的坐标, (x, y) 是参考图像中的相对应的局部三角形的坐标。则已知连接成为此三角形的三个控制点对坐标, 即能求出(12)式中待定系数。

6 实验结果与分析

为了验证本文算法的正确性和应用于高分辨率遥感图像配准中的准确性, 实验中分别选用了同一传感器不同时间拍摄两幅全色遥感图像进行配准和不同传感器拍摄的两幅遥感图像进行配准。在一个完整的配准中, 特征点的提取准确性直接决定了图像配准的最后结果的准确性, 所以在验证本文算法的同时又将基于非采样 Contourlet 变换的特征点提取方法和文献[6],[14]和[15]等基于小波特征点提取的方法分别结合本文的匹配算法和映射函数建立方法后的配准结果进行了对比。

首先, 同一传感器不同时间拍摄的高分辨率遥感图像的配准, 如图 4 所示为(a)为参考图像;(b)为待配准图像, 图像的像素分辨率为 384×384 。由于参考图像和待配准图像的灰度范围差别较大, 在配准之前先对待配准图像进行拉伸, 使其灰度水平和参考图像灰度水平接近, 在特征点提取时分别采用 3 级非采样 Contourlet 变换和 3 级小波变换, 在利用归一化互相关特征点匹配时选用第一种方法。将两种不同的特征点提取方法的配准的图像效果进行对比, 如图 5 所示为 (a)基于小波方法匹配的控制点对;(b)基于小波方法的配准的图像。(c)本文方法匹配的控制点对;(d)本文方法配准的图像。两种方法提取的特征点的数量大致相同, 但基于小波方法的控制点对却明显少于本文方法而且本文方法比小波方法的特征点分布的更均匀。为了更好的对

比两种方法配准图像的效果, 分别将图 5 中的(b)和(d)和参考图像“叠加”, 其方法是将参考图像赋予 RGB 图像的红色(R)分量, 将配准后的图像赋予绿色(G)分量, 如图 6 所示。可以清楚地看到(a)基于小波方法图像的配准结果, 在标记处有明显的和参考图像的不一致, 而(b)方法的配准则基本和参考图像重合, 说明本文算法配准的准确性。

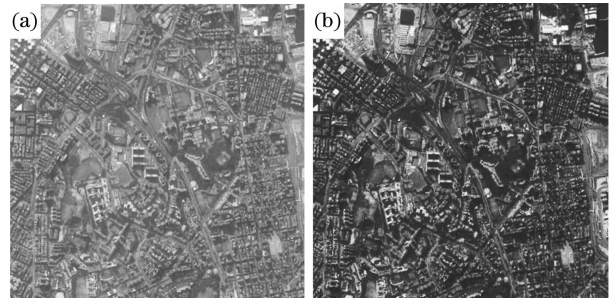


图 4 参考图像和待配准图像。(a)参考图像,(b)待配准图像

Fig. 4 Reference image and image to be registered.

(a) reference image; (b) image to be registered

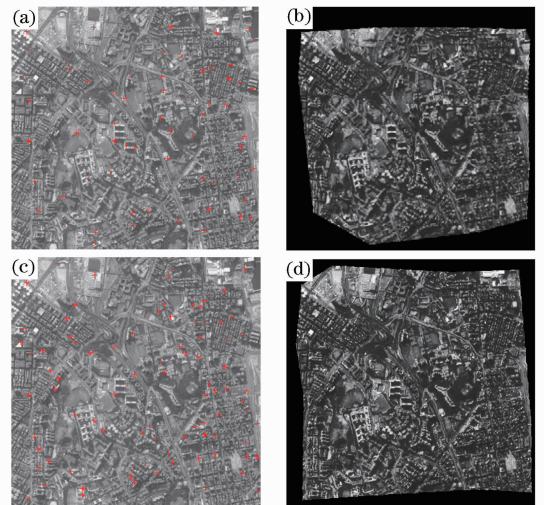


图 5 两种方法的控制点对和配准后图像的对比 (a)小波方法提取的控制点对,(b)小波方法配准的图像,(c)本文方法提取的控制点对,(d)本文方法配准的图像

Fig. 5 Control pairs and registered image based on NSCT and wavelet method. (a) control pairs by wavelet method, (b) registered image based on wavelet method, (c) control pairs by NSCT, (d) registered image based on NSCT

其次, 不同传感器摄取的多光谱遥感图像和高分辨率全色遥感图像配准, 如图 7 所示, 多光谱遥感图像(a)为参考图像而全色遥感图像(b)为待配准图像, 像素分辨率 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。

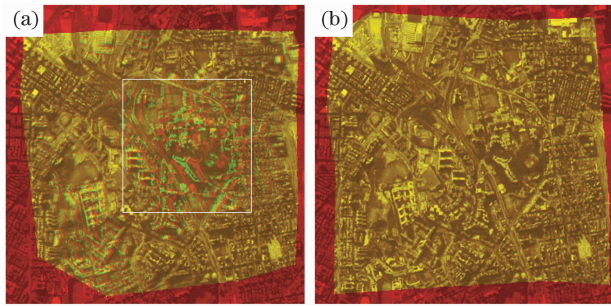


图 6 配准效果的对比 (a)小波方法的配准后图像的叠加, (b)本文方法的配准后图像的叠加

Fig. 6 Comparison of registered results (a) overlaid image (wavelet); (b) overlaid image (NSCT)

配准方法是将多光谱遥感图像转换为灰度图像后和全色遥感图像配准。但由于多光谱遥感图像空间分辨率较低,为了能有更多的控制点对,在配准前需要对全色遥感图像进行平滑处理,在此选用 3×3 的平滑滤波器对全色遥感图像进行平滑滤波,同时做灰度拉伸处理,并且在互相关特征点匹配时选用第二种方法。如图 8 所示为(a)基于小波方法配准的结果和参考图像的“叠加”;(b)本文方法配准后的结果和参考图像的“叠加”。从图 8 可以看到基于小波的方法的配准结果(a)中的标记处出现了匹配偏差,而本文的方法得到良好的配准结果。

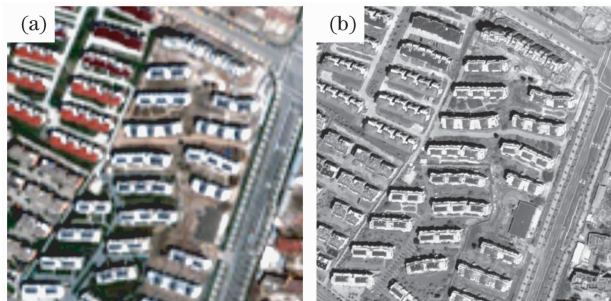


图 7 参考图像和待配准图像 (a)参考图像,(b)待配准图像

Fig. 7 Reference image and sensed image

(a) reference image; (b) sensed image

最后,对配准效果的评价。虽然目前没有统一的方法对图像配准效果做定量的评价,但可以通过对以上实验得出两种特征点提取方法的不同阈值下所提取的特征控制点对个数的对比结果和配准后图像和参考图像的互相关系数(f_{corr})和均方根误差(RMSE)对配准结果图像进行评价。

如表 1 所示,其中 Max. coeff. 表示变换系数的最大值,选用最大阈值的百分比作为阈值的等级。在实验中在选用相同等级的阈值时,两种方法提取的特征点的数量大致相同,但经过特征点匹配后得到的最后的特征控制点对的数量却有很大差别在表

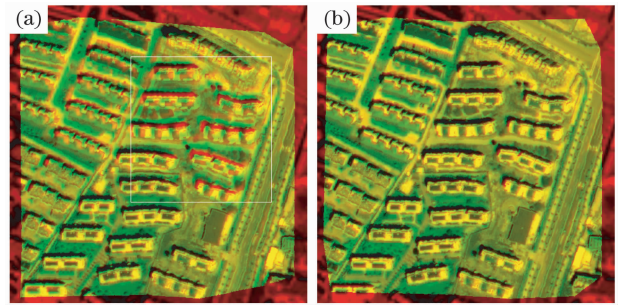


图 8 配准效果的对比(a)小波方法的配准后图像的叠加, (b)本文方法的配准后图像的叠加

Fig. 8 Comparison of registered results (a) overlaid image (wavelet); (b) overlaid image (NSCT)

1 中列出,这说明本文方法提取的特征点比基于小波方法提取的特征点有更好的准确性,才使得最后特征点匹配时有更多的特征控制点对,这也是图像配准结果准确性的基础。

针对配准后的图像与参考图像的互相关系数 f_{corr} 和均方根误差 E_{RMS} ,如果互相关系数越大说明配准后的图像与参考图像之间的关联越大,配准的效果就越好;如果配准后图像和参考图像的均方根误差越小,则说明两者图像越接近,配准的结果越精确。分别对两种方法配准后的图像和参考图像作相同大小尺寸的截取,分别计算 f_{corr} 和 E_{RMS} 在表 2 中列出两种方法配准结果评价参数的对比。

表 1 不同阈值下的控制点对数量的对比

Table 1 Comparison of control pairs amount in different threshold

Threshold	The same sensor		Different sensor	
	wavelet method	NSCT method	wavelet method	NSCT method
50% Max. coeff.	113	175	135	199
60% Max. coeff.	94	130	128	169
70% Max. coeff.	79	119	112	145
80% Max. coeff.	66	92	97	120
90% Max. coeff.	37	58	69	101

表 2 配准结果评价参数对比

Table 2 Comparison of registered results evaluation parameters

	Wavelet method		NSCT method	
	The same sensor	Different sensor	The same sensor	Different sensor
f_{corr}	0.436	0.315	0.489	0.362
E_{RMS}	42.96	56.44	31.32	50.08

7 结 论

从对高分辨率遥感图像配准的实验结果可以看出,非采样 Contourlet 变换域特征点提取的图像配

准算法,能够从含有大量细节的高分辨率遥感图像中准确的提取边缘特征点,提取的特征控制点对要比小波方法多 40%左右,并且控制点分布地更均匀。同时将配准的结果和基于小波方法特征提取的图像配准结果进行对比,结果表明本文方法的互相关系数比小波方法高 12%左右,均方根误差比小波方法低 11%左右,这说明本文算法更接近参考图像,配准的准确性更高。另外考虑到地形地貌对高分辨率遥感图像的影响,选用 Delaunay 三角形映射函数法,从而减少了局部变形的影响,从对同一传感器不同时间摄取的遥感图像和不同传感器摄取的遥感图像的配准的结果看,本文的方法在高分辨率遥感图像的配准中有更强的鲁棒性。

参 考 文 献

- 1 Fonseca L. M. G., Manjunath B. S.. Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1996, **62**(9): 1049~1056
- 2 Irene G. Ki, Emmanouil Z. P., Kostas Berberidis *et al.*. An efficient spatial domain technique for subpixel image registration [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2008, **23**(9): 711~724
- 3 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
- 4 Ventura A. D., Rampini A., Schettini R.. Image registration by recognition of corresponding structures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, **28**(3):305~314
- 5 Shi W. Z., Shaker A.. The line-based transformation model (LBTM) for image-to-image registration of high-resolution satellite image data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(4): 3001~3012
- 6 Zavorin I., Le Moigne J.. Use of multiresolution wavelet feature pyramids for automatic registration of multisensor imagery[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(6): 770~782
- 7 Wang Haihong, Zeng Ni, Lu Wei *et al.*. Edge detection of laser imaging radar based on wavelet transform and mathematical morphology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):903~906
王海虹,曾妮,陆威等.基于小波变换和数学形态学的激光成像雷达图像边缘检测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6):903~906
- 8 Fonseca L. M. G., Costa M. H. M.. Automatic registration of satellite images [C]. *Proceedings Brazilian Symposium on Graphic Computation and Image Processing, Campos de Jordão, Brazil*, 1997. 219~226
- 9 Arthur L. Cunha, Jianping Zhou, M. N. Do. The nonsubsampling contourlet transform; theory, design, and applications [J]. *IEEE Tran. Image Processing*, 2006, **15**(10): 3089~3101
- 10 Minh N. Do, Martin Vetterli. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2005, **14**(12): 2091~2106
- 11 Zhang Qiang, Guo Baolong. Remote sensing image fusion based on the nonsubsampling contourlet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):74~80
张强,郭宝龙.基于非采样 Contourlet 变换的遥感图像融合算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):74~80
- 12 Liang Dong, Yin Bing, Yu Mei *et al.*. An algorithm for color image digital watermarking using the nonsubsampling contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8):1469~1474
梁栋,殷兵,于梅等.基于非采样 Contourlet 变换的彩色图像数字水印算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8):1469~1474
- 13 Liu Guixi, Liu Dongmei, Liu Fengpeng *et al.*. A robust image registration algorithm based on feature points matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):454~461
刘贵喜,刘冬梅,刘凤鹏等.一种稳健的特征点匹配算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3):454~461
- 14 Mallat S. G., Hwang W. H.. Singularity detection and processing with wavelets[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, **38**(2): 617~643
- 15 Gang Hong, Yun Zhang. Wavelet-based image registration technique for high-resolution remote sensing images [J]. *Computers & Geosciences*, 2008, **34**(12):1708~1720
- 16 Rognant L., Chassery J. M., Goze S. *et al.*. The Delaunay constrained triangulation: the Delaunay stable algorithms[J]. *IEEE International Conference on Information Visualisation*, 1999, **7**:147~152