

基于特征的遥感图像自动配准算法

韦燕凤,赵忠明,闫冬梅,曾庆业

(中国科学院遥感应用研究所遥感工程中心,北京 100101)

摘要: 面向光学图像的多时相、多光谱、多传感器图像的自动配准,本文描述一个基于特征的高精度图像配准算法.它以点映射配准技术为基础,处理具有全局仿射几何失真的图像配准问题.首先,通过边缘检测和相应的后处理提取封闭边界;其次,根据边界链码相关和区域不变矩匹配策略建立边界的对应,并对对应重心即匹配点进行一致性检测获得基元控制点;最后,估计初始变换参数,并通过显著点片的相关匹配来增加控制点个数,迭代修正变换参数以提高配准精度.多种遥感图像数据的配准实验和对比试验证实了的自动算法具有较高的可靠性和配准精度.

关键词: 遥感图像配准; 封闭边界; 一致性检测; 控制点; 迭代修正参数

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 01-0161-05

Remote Sensing Image Automatic Registration Based on Feature

WEI Yan-feng, ZHAO Zhong-ming, YAN Dong-mei, ZENG Qing-ye

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Aim at automatic registration of temporal images, multispectral images and multisensor optical images, a feature-based automatic image registration algorithm is described in this paper. On the basis of point mapping techniques, it deals with the registration of images with affine geometric distortion. First, with edge detection and a postprocess, the closed boundary regions in both images are extracted. Next, the correspondence of closed boundary regions is developed by chain-code correlation and invariant moments. And the center of gravity in the correspondent regions is used as matching points. After a global consistency check is applied to the matching points, the primitive control points are acquired. Finally, initial transformation parameters are estimated based on the primitive control points. The number of control points is added by salient point chip correlation matching in the reference image and the transformed image. An iterative refined parameter process is devised to improve the accuracy of registration. Experimental results with various kinds of remote sensing images have verified high accuracy and reliability this algorithm.

Key words: remote sensing image registration; closed bounder; consistency check; control points; iterative refined parameters

1 引言

在遥感数据处理中,图像配准是变化检测、数据融合的基本预处理步骤,配准精度对后续的处理产生重要的影响^[1].针对各种类型的数据和应用,图像配准已经开发了一些相应的技术^[2].目前图像配准技术大致分为两大类^[3,4]:基于灰度的方法和基于特征的方法.大多数基于灰度的方法采用互相关技术或傅立叶变换技术来实现^[5,6],它的局限在于难以处理灰度特性差异较大的图像,通常只能配准大重叠区的图像.基于特征的方法^[3,4,7]通过提取两幅图像的共同结构来实现,更适合不同波段、不同传感器图像的配准.

针对空间上存在仿射差异的两幅图像的配准,本文描述一个基于特征的遥感图像自动配准算法.其配准过程由以下几个步骤组成:(1)封闭边界和显著点提取;(2)封闭边界匹配以建立匹配点对;(3)匹配点对的一致性检测以获得基元控制点;(4)初始变换参数估计;(5)显著点片的相关匹配增加控制点数目以迭代修正变换参数.

2 基元控制点对的确定

2.1 封闭边界和显著点提取

Canny 边缘算子是一个数值优化滤波器^[8],它表现很好

的边缘检测性能.但对于噪声干扰,它常常导致局部的破碎边缘.为了检测出结构化边缘,提取更多的封闭边界,本文在canny边缘检测的基础上,对各边缘端点进行邻域探测连接.

即在端点的八邻域内根据边缘点的走向对一些位置进行探测,当发现某个探测位置能够连接不相邻的边缘点时,将该位置强行置为边缘点.图1

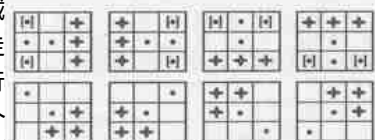
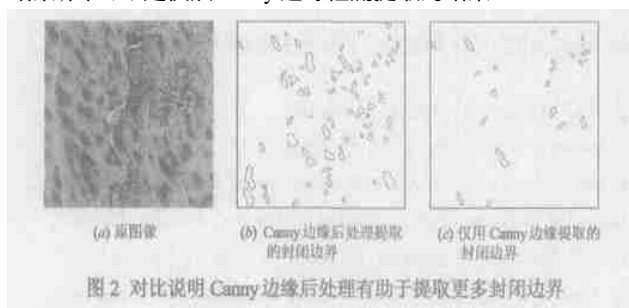


图1 边缘端点的邻域探测连接示意图

所示是端点的八邻域探测示意图,将端点的所有邻域分布类型归纳成八种探测情况,每种类型至多探测三个位置.探测过程中若发现某一位置可以置为边缘点,不必对其余的位置探测,转入处理下一个端点,直到将所有端点处理完毕.

对边缘端点的邻域进行探测连接后,为避免盲目连接,对那些不位于封闭边界上的新增边缘点则将其删除,然后对开边界进行链码跟踪.跟踪规则是从端点开始跟踪,碰到新的端点或交叉点时停止,并将跟踪过的点从边缘图像中删除.这一

步处理有两个目的:一是从开边界提取显著点(高曲率点和交叉点),为后续的参数修正提供特征点;二是对几乎封闭的开边界用短线段强制连接,以形成封闭边界.这里的几乎封闭指边界足够长,且起点和终点的直线距离很近的开边界.开边界跟踪剩下的主要是封闭边界.通过区域填充、形态学滤波和链码跟踪,获得封闭边界的八方向链码表示.为屏蔽小区域边界,只提取周长大于 20 个像素的封闭边界.为了说明边缘检测后处理有助于提取更多的封闭边界,图 2 比较了边缘检测后处理提取的封闭边界和仅从 Canny 边缘检测提取的封闭边界,其中图 2(a)是森林遥感影像,图 2(b)是 Canny 边缘检测后处理提取的结果,图 2(c)是仅从 Canny 边缘检测提取的结果.



2.2 封闭边界匹配策略

从两个图像提取封闭边界后,应建立相应的匹配策略以获得边界的对应.文献[4]用乘法将链码相关和不变矩组合作为边界匹配测度,它的封闭边界匹配策略用最小距离分类找到三个最好的匹配对,然后通过图像空间的一致性检测找到所有的控制点.但实际上最小距离分类找到的三个最好匹配对往往不可靠,这将直接导致错误的配准结果.本文确定匹配策略时采用改进链码^[3]的相关值的双向最优准则进行搜索,以不变矩的距离作为约束条件确定区域的对应关系.

2.2.1 改进链码表示及链码相关矩阵 改进链码表示是对标准链码的移位平滑运算,详见文献[3].设 $\{a_1, \dots, a_n\}$ 是长度为 n 的标准链码,它的改进链码 $\{b_1, \dots, b_n\}$ 通过递归方式定义:

$$\begin{cases} b_1 = a_1 \\ b_i = q_i, \text{使 } (q_i - a_i) \bmod 8 = 0 \text{ 且 } |q_i - b_{i-1}| \text{ 最小} \end{cases} \quad (1)$$
 其中 q_i 为整数 ($i = 2, \dots, n$).上式的改进链码减轻了标准链码的卷绕问题^[3],经五点高斯滤波器 $[0.1, 0.2, 0.4, 0.2, 0.1]$ 平滑后,得到比表示标准链码更光滑的曲线.改进链码指由标准链码经过以上移位和平滑运算后的结果.

建立参考图像和输入图像封闭边界之间关系时,用改进链码计算链码相关矩阵 $S = \{s_{ij}\}$.若从参考图像中提取出 m 个封闭边界,从输入图像中提取 n 个封闭边界,则 S 为 $m \times n$ 的矩阵.令第 i 个边界由改进链码 $\{a_k\}$ 来表示,第 j 个边界由改进链码 $\{b_l\}$ 来表示,为了消除链码之间的缩放差异,计算相关前将较长的链码(假设是 $\{a_k\}$)重采样到和短链码一样的长度 N ,重采样得到的链码用 $\{a'_l\}$ 表示,则第 i 个边界和第 j 个边界之间的链码相关值为^[3,4]:

$$s_{ij} = \max_{1 \leq k \leq N} \left[\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \cos \frac{\pi}{4} (a'_l - b_l(k)) \right] \quad (2)$$

$$\text{其中 } a'_l = a_l^r - \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N a_l^r, \quad 1 \leq l \leq N \quad (3)$$

$$b_l(k) = b_l(k) - \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N b_l(k), \quad 1 \leq l \leq N \quad (4)$$

式中 $\{a'_l\}$ 是重采样链码 $\{a_l^r\}$ 的归一化表示,以消除链码旋转的差异. $\{b_l(k)\}$ 表示起点位于第 k 个边界点时,第 j 个边界的改进链码表示, $\{b_l(k)\}$ 则是其对应的归一化表示.余弦函数保证相关值在 $[0, 1]$ 区间.

在实际应用中,考虑到边缘检测时在同一滤波尺度下可靠提取同一结构的可行性,将缩放比限制在 $(0.5, 2)$ 区间.当长短链码的长度比大于某个阈值(例如 3)时,令其相关值得为 0,表示两链码不匹配.

2.2.2 区域之间的仿射不变矩距离 仿射矩不变量是基于矩的平面形状描述子,关于矩不变量的详细推导和证明见文献[9].我们不加证明地运用矩计算 2D 目标区域 G 的七个矩不变量 (ϕ_1, \dots, ϕ_7) .目标区域中心矩定义为:

$$\mu_{pq} = \frac{1}{G} \int_{(x,y)} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q \quad (5)$$

七个不变矩计算如下:

$$\phi_1 = (\mu_{20} + \mu_{02}) / \mu_{00}^2 \quad (6)$$

$$\phi_2 = [(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2] / \mu_{00}^4 \quad (7)$$

$$\phi_3 = [(\mu_{30} - 3\mu_{12})^2 + (3\mu_{21} - \mu_{03})^2] / \mu_{00}^5 \quad (8)$$

$$\phi_4 = [(\mu_{30} + \mu_{12})^2 + (\mu_{21} + \mu_{03})^2] / \mu_{00}^5 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \phi_5 = & [(\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{30} + \mu_{12}) / (\mu_{30} + \mu_{12})^2 \\ & - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2] - (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{21} + \mu_{03}) \\ & \cdot [(\mu_{21} + \mu_{03})^2 - 3(\mu_{30} + \mu_{12})^2] / \mu_{00}^{10} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \phi_6 = & [(\mu_{20} - \mu_{02}) / (\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2] \\ & - 4\mu_{11}(\mu_{30} + \mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03}) / \mu_{00}^7 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \phi_7 = & [(3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{30} + \mu_{12}) / (\mu_{30} + \mu_{12})^2 \\ & - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2] - (\mu_{30} - \mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03}) \\ & \cdot [3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2] / \mu_{00}^{10} \end{aligned} \quad (12)$$

对于每一个封闭区域,将它的七个矩不变量看成七维特征空间的一个点,两个区域的相似性由两点间的距离来度量.对于参考图像中的 m 个区域和输入图像中的 n 个区域,它们的关系用 $m \times n$ 的不变矩距离矩阵 $D = \{d_{ij}\}$ 来表示.若 $\phi_i^r(k)$ ($k = 1, \dots, 7$) 表示参考图像第 i 个边界的不变矩向量, $\phi_j^i(k)$ ($k = 1, \dots, 7$) 表示输入图像的第 j 个边界的不变矩向量,则参考图像第 i 个边界和输入图像第 j 个边界的不变矩距离

$$\text{为}^{[4,7]}: \quad d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^7 [\phi_i^r(k) - \phi_j^i(k)]^2} \quad (13)$$

2.2.3 搜索封闭区域之间的匹配对 对参考图像的 m 个区域和输入图像的 n 个区域,链码相关值矩阵 S 和不变矩距离矩阵 D 将参考图像和输入图像的区域建立了数量上的联系.设链码相关的阈值为 t_s ,不变矩距离的阈值为 t_d ,对于参考图像的第 i 个边界,它与输入图像的第 j 个边界匹配须同时满足以下三个条件:

- (1) $s_{ij} = \max_{1 \leq l \leq n} s_{il}$ 且 $s_{ij} = \max_{1 \leq k \leq m} s_{kj}$
- (2) $s_{ij} > t_s$

(3) $d_{ij} < t_d$

建立的匹配条件要求匹配的区域须满足相关值双向最优准则.与运用文献[3]的链码相关单向最优准则相比,双向最优准则的约束条件更强了,因此更好地排除伪匹配对,匹配区域的重心称为匹配点.

2.3 匹配对的一致性检测:删除伪匹配对

建立在匹配条件下的匹配点不一定是图像上的物理对应点,即匹配过程难免产生一些伪匹配对.因此对自动配准算法而言,匹配点的一致性检测是至关重要的,它直接决定配准结果的可靠性.在这里,匹配点一致性检测运用类似于文献[3]中的原理,它基于这样的事实:任一线段在仿射变换(平移、旋转、缩放的组合)前后的比是变换的缩放比.对于包含 n 个点对的两个匹配点集 $\{A_i\}$ 和 $\{B_i\}$,对应线段比为 A_iA_j/B_iB_j .这样的线段比一共有 $n(n-1)/2$ 种组合.当所有点对都是物理对应点时, $n(n-1)/2$ 个比值都是一样的.将物理对应点的线段比值称为一致性数值.一致性检测首先对所有线段比值数据进行分级聚类,找出一致性数值.然后通过处理线段比值矩阵,迭代删除伪匹配对.一致性检测算法详细描述如下:

Step1 计算对应线段比值矩阵 $F = \{f_{ij}\}$, F 的大小为 $(n+1) \times (n+1)$. 矩阵元素 f_{ij} 定义如下:

$$f_{ij} = \begin{cases} j-1, & i=1 \text{ 且 } 2 \leq j \leq n+1 \\ i-1, & 2 \leq i \leq n+1 \text{ 且 } j=1 \\ f_{ji} = A_{i-1}A_{j-1}/B_{i-1}B_{j-1}, & 2 \leq i, j \leq n+1 \text{ 且 } i \neq j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中 $i-1$ 和 $j-1$ 表示匹配点序号

Step2 对位于 $(0, 5, 2)$ 区间的所有比值数据进行分级聚类,使聚类结果的类别数少且类内距离足够小.聚类结果若有某一类样本个数大于 3 且大于其它类的样本个数,则该类样本值称为一致性数值.

Step3 从 F 的第二行起,统计各行的非一致性数据个数 c 和一致性数据的方差;

Step4 将 c 值最大的行作为候选行,然后将候选行中最大的一行及相同的列删除;

Step5 从 F 的第二行起,再次统计各行的非一致性数据个数 c 和一致性数据的方差;

Step6 若 F 的行数仍大于 3 且至少有一行统计的 c 值大于 0, 转 step4;

Step7 若 F 的行数大于 3, F 的首行数值就是匹配对的序号,将这些序号的匹配点作为基元控制点输出.

3 变换模型及初始参数估计

以上的封闭区域匹配和一致性检测均建立在仿射变换基础上,而空间仿射变换用于配准平坦地形的遥感数据也是合理的.因此建立平移、旋转、缩放组合的四参数仿射变换模型:

$$\begin{cases} X = s(x \cos \theta - y \sin \theta) + t_x \\ Y = s(x \sin \theta + y \cos \theta) + t_y \end{cases} \quad (14)$$

这里 (x, y) 和 (X, Y) 分别是输入图像和参考图像的对应点坐标.令 $a = s \cos \theta$, $b = s \sin \theta$, 用所获得的控制点坐标即可求出

参数 a, b, t_x, t_y 的最小二乘解.

4 多控制点迭代修正变换参数

因为一对对应封闭只产生一对控制点,通过封闭边界匹配获得的基元控制点数量通常比较少.为了在更多的控制点处满足配准精度,运用估计的初始参数在参考图像和初始变换图像之间通过显著点片的相关系数匹配获得更多的控制点.然后用多控制点迭代修正变换参数.

多控制点迭代修正变换参数的实现流程如图 3 所示.首先用初始估计的参数对输入图像 I 进行变换和插值重采样,得到变换图像 T ; 根据特征提取环节中获得的参考图像 R 的显著点,将落在 R 和 T 的重叠区域内的显著点作为候选点;然后以各候选点为中心在参考图像内截取大小为 $n \times n$ 子块作为显著点片(实验中 n 取 64).在变换图像同一位置的小邻域内搜索,进行灰度相关系数的模板匹配运算.若搜索邻域内的最大相关系数大于给定阈值,则将最大相关系数的位置的逆变换作为显著点的对应点.各显著点和它们的对应点被称为点片控制点.点片控制点和基元控制点一起参与多控制点迭代修正变换参数.

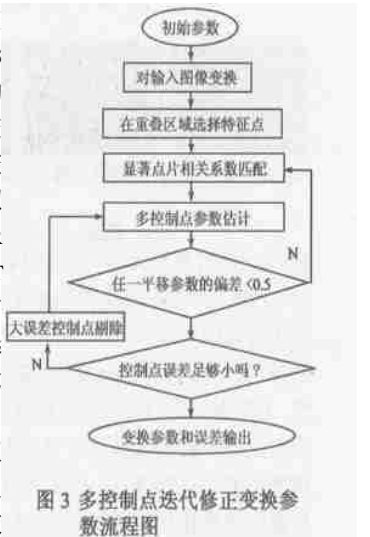


图 3 多控制点迭代修正变换参数流程图

度相关系数的模板匹配运算.若搜索邻域内的最大相关系数大于给定阈值,则将最大相关系数的位置的逆变换作为显著点的对应点.各显著点和它们的对应点被称为点片控制点.点片控制点和基元控制点一起参与多控制点迭代修正变换参数.

5 实验结果及结论

为了评估所描述的自动配准算法的各项性能指标,分别对多光谱图像配准、多时相图像配准和多传感器光学图像配准分别给出实验结果.在实验中采用统一的参数设置.特征提取环节:Canny 算子的标准差 $\sigma = 2$, 高低阈值自适应确定.封闭边界匹配环节:链码相关的阈值为 0.9;不变矩距离的阈值为 0.05.参数修正环节的相关系数阈值为 0.5.

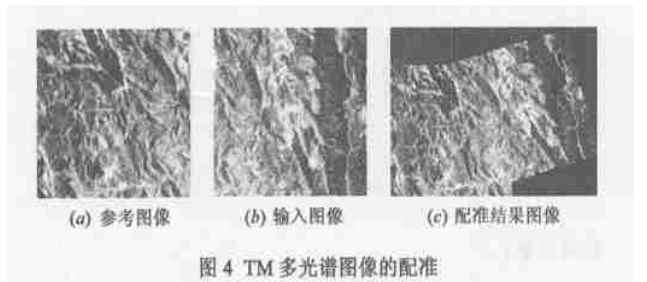
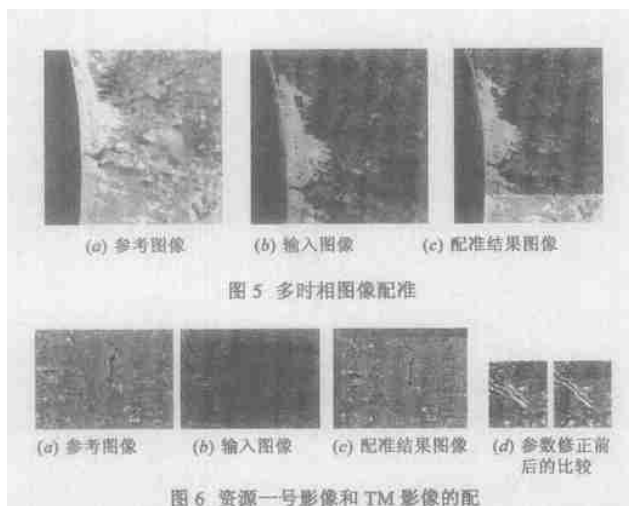


图 4 TM 多光谱图像的配准

多光谱图像的配准实验如图 4 所示.参考图像和输入图像分别是 TM 不同波段的两幅图像,大小均为为 512×512 像素,如图 4(a) - (b) 所示.图 4(c) 是配准结果.多时相图像的配准实验如图 5 所示.参考图像为拍于 88 年 5 月的 Landsat TM 第 5 波段影像,输入图像为拍于 88 年 3 月的 Landsat TM 第



3 波段影像,两者大小均为 400×400 像素,分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示。图 5(c) 是配准结果图像。不同光学传感器图像的配准实验如图 6 所示。参考图像是资源一号卫星多光谱单波段影像,大小为 478×652 像素;输入图像为 TM 多光谱单波段影像,大小为 315×435 像素;分别如图 6(a) 和 (b) 所示。由于资源卫星影像的质量欠佳以及时相的影像,基元控制点的定位精度不够。经过参数修正后,配准精度得到提高。配准结果和精度的视觉比较如图 6(c) 和 (d) 所示。表 1 所示是以上三个代表性配准实验的性能指标。

从以上的实验数据可以看出一致性检测可以从较多的噪声匹配对中挑出准确的基元控制点,确保配准的可靠性。通过显著点片的相关系数匹配增加控制点个数,提高了参数估计

精度。除了以上所举的例子外,本文还对自有的 6 对典型数据进行测试,所得的实验结果均是有效的;对网站: <http://vision.ece.ucsb.edu/registration/satellite/testimag/> 提供的 11 对测试数据进行验证,基元控制点配准(初始参数估计)的有效率达到 82%,对于少数数据由于找到的基元控制点个数不够而使初始配准失效时,可以通过简单的人工干预输入 3 对手动控制点,显著点片匹配的迭代修正参数仍可使配准过程继续进行并达到到较高的配准精度。所建立的全局仿射变换模型用于配准平原地区的中低分辨率资源卫星影像非常有效,达到较高的配准精度。

为了进一步说明本文的基元控制点确定策略的有效性,对实验过程中所采用的大量测试图像将本文算法的基元控制点确定策略和典型的基于封闭边界的配准算法[4]的控制点确定策略进行比较。为体现可比性,将本文的封闭边界提取结果作为两种算法的封闭边界匹配的输入,并且采用同样的阈值设置。对比实验表明本文算法即使在全自动基于控制点配准时也体现比较高的有效性。表 2 所示是 3 个代表性实验例子中两种算法的所得到的控制点个数,控制点的可靠性以及配准精度。由于文献[4]的配准可靠性依赖于最小距离分类确定的三对最优控制点的可靠性,而这三对最优控制点的可靠性受封闭区域大小,噪声小区域的影响比较大。而不可靠的三对最优控制点将直接导致错误的配准结果。但它的优点是只要三对最优控制点可靠,通过图像空间的一致性检测,所有基元控制点可以全部被找到。相比而言,本文的基元控制点确定策略的配准可靠性和成功率较高,但由于采样较严格的双向匹配条件,有时会造成个别控制点丢失。

表 1 配准结果的性能指标

数据项 实验图像	基元控制点个数 (匹配个数)	特征点片 控制点个数	变换参数(修正前) $s, (\theta, t_x, t_y)$	变换参数(修正后) $s, (\theta, t_x, t_y)$	x 残差	y 残差	均方 误差
图 4	8(14)	58	1.00, -14.98, 249.73, -6.78	1.00, -15.00, 249.60, -6.79	0.2075	0.0404	0.2114
图 5	10(18)	86	1.00, 0.02, 0.56, -77.64	1.00, 0.01, 0.43, -77.65	0.1906	0.0388	0.1866
图 6	5(13)	18	1.46, -0.98, -39.19, -31.16	1.50, -0.11, -38.00, -41.54	0.2044	0.0557	0.2119

表 2 本文算法与典型基于边界的算法^[4]的性能指标比较

实验 图像	本文算法		文献[4]的算法	
	基元控制点个数 + 点片控制点个数	均方误差	基元控制 点个数	均方误差
图 4	8 + 58	0.2114	3(错误)	无意义
图 5	10 + 86	0.1866	11	0.2201
图 6	5 + 18	0.2119	3(错误)	无意义

参考文献:

- [1] TOWNSHEND J R G, JUSTIC C O, GUMEY C, et al. The impact of misregistration on change detection[J]. IEEE Trans, 1992, Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 1054 - 1060.
- [2] BROWN L G. A survey of image registration techniques[J]. Comput Surv, 1992, 24(4): 325 - 376.

- [3] LI H, MANJUNATH B S, MITRA S K. A contour-based approach to multisensor image registration[J]. IEEE Trans, 1995, Image Processing, 1995, 4(3): 320 - 333.
- [4] DAI X, KHORRAM S. A feature-based image registration algorithm using improved chain-code representation combined with invariant moments[J]. IEEE Trans, 1999, Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2351 - 2362.
- [5] STONE H S, WOLPOV R. Blind cross-spectral image registration using prefiltering and Fourier-based translation detection[J]. IEEE Trans, 2002, Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(3): 637 - 650.
- [6] REDDY B S, CHATTERJI B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration[J]. IEEE Trans, 1996, Image Processing, 1996, 5(8): 1266 - 1271.
- [7] FLUSSER J, SUK T. A moment-based approach to registration of Images with affine geometric distortion[J]. IEEE Trans, 1996, Geoscience and Remote Sensing, 1996, 32(2): 382 - 387.

- [8] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Trans.,1986 ,PAMF8(6) :679 - 698.
- [9] 孙即祥等,著. 模式识别中的特征提取与计算机视觉不变量 [M]. 北京: 国防工业出版社,2001.238 - 269.

作者简介:



韦燕凤 女,1972 年生于广西南宁,2003 年获中国科学院自动化研究所博士学位,现为中国科学院遥感应用研究所博士后,主要研究方向为图像处理与分析、模式识别等. E-mail: weiyf20032003@yahoo.com.cn.



闫冬梅 女,1973 年生于山西长治,2004 年获中国科学院遥感应用研究所博士学位,主要研究领域为图像处理、计算机视觉、数据融合等.



赵忠明 男,1961 年生于甘肃省,中国科学院遥感应用研究所副所长,研究员,博士生导师,主要研究领域遥感图像处理、小波分析与尺度效应等.



曾庆业 男,1976 年生于山东省,现为中国科学院遥感应用研究所博士生,研究方向为图像配准,镶嵌,模式识别.