

基于聚类分割和形态学的可见光与 SAR 图像配准

王志社^{1,2} 杨风暴¹ 纪利娥¹ 陈磊¹

(¹ 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)
(² 太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024)

摘要 针对可见光与 SAR 图像灰度差异大, 共有特征提取难的问题, 提出了一种基于 k -均值聚类分割和形态学处理的轮廓特征配准方法。利用 k -均值聚类算法对两类图像进行分割, 得到图像分割区域; 通过形态学处理, 有效减少 SAR 图像斑点噪声影响, 准确提取两类图像的封闭轮廓; 采用轮廓不变矩理论, 引入矩变量距离均值、方差约束机制和一致性检查的匹配策略, 获取最佳匹配对, 实现了两类图像的配准。通过实验, 三组图像的配准精度分别达到 0.3450、0.2163 和 0.1810, 结果表明该法可行且能达到亚像素的配准精度。

关键词 机器视觉; 图像配准; k -均值聚类; 形态学; 约束机制; 一致性检查

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0215002

Optical and SAR Image Registration Based on Cluster Segmentation and Mathematical Morphology

Wang Zhishe^{1,2} Yang Fengbao¹ Ji Li'e¹ Chen Lei¹

¹Information and Communication Engineering College, North University of China,
Taiyuan, Shanxi 030051, China

²College of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract In order to solve the problem of large difference of gray level and the difficulty of common feature extraction for optical and SAR image registration, an improved multi-model contour feature image registration method is proposed which is based on k -mean clustering segmentation and mathematical morphology. The k -mean clustering algorithm is used to get two kinds of image segmentation region, and through the mathematical morphology processing, accurate extraction of two classes of closed contour image has been realized, which can reduce the influence of the SAR image speckle noise effectively. The matching strategy of the mean and variance of torque variable distance constraint mechanism along with consistency check is bring in which aims to obtain the best match result. Through the experiment, image registration precisions of three groups reach 0.3450, 0.2163 and 0.1810, respectively, which indicates that this method is feasible and can achieve sub-pixel registration accuracy.

Key words machine vision; image registration; k -mean cluster; morphology; restriction mechanism; consistency check

OCIS codes 070.501; 280.6730; 100.5760

1 引 言

图像配准是多传感器图像融合、目标识别等处理的必要步骤, 其配准精度更直接影响图像融合和目标识别的效果。目前, 同类图像配准已经有了较成熟的算法^[1-2], 但异类传感器因为成像条件不同,

图像之间不仅会存在缩放、旋转和平移等几何形变, 而且图像之间的噪声也会存在较大的差异, 造成图像共有特征提取难的问题, 用于同类图像的配准方法一般不能直接应用于异类传感器图像配准^[3]。

现有的可见光图像和 SAR 图像的配准算法以

收稿日期: 2013-08-22; 收到修改稿日期: 2013-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(61171057)、山西省回国留学人员科研资助项目(20120706ZX)

作者简介: 王志社(1982—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事信息处理理论与技术、多源图像配准与融合技术方面的研究。E-mail: wzs2003@163.com

导师简介: 杨风暴(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信息处理与融合方面的研究。E-mail: yangfb@nuc.edu.cn

基于边缘和轮廓特征的算法为主。Li 等^[4]提出基于边缘特征的多传感器图像配准方法,采用基于活跃轮廓模型的弹性特征线匹配策略。韦燕凤等^[5]在此基础上进行了改进,采用 Canny 算子进行封闭边缘检测,计算 7 个仿射不变矩,通过改进匹配链码和匹配点对的方法,实现遥感图像的配准。于秋则等^[6]提出了基于边缘特征和遗传算法的可见光和 SAR 图像配准方法:利用遗传算法匹配边缘,得到匹配控制点,Yu 等^[7]也提出了类似的基于轮廓特征的多源图像配准方法。这些算法都利用 SAR 图像和可见光图像的共有特征——边缘特征或轮廓特征,采用链码编码的匹配方式,通过特征匹配得到控制点,其计算复杂,且对噪声敏感,一般在图像灰度差异不大的情况下才能得到较好的结果。张怀利^[8]提出形态学和信息熵双模式结合的封闭区域提取方法,实现了可见光和 SAR 图像的配准,但是配准精度较低,配准结果中有比较明显的配准误差。

为此本文提出一种基于 k -均值聚类分割算法

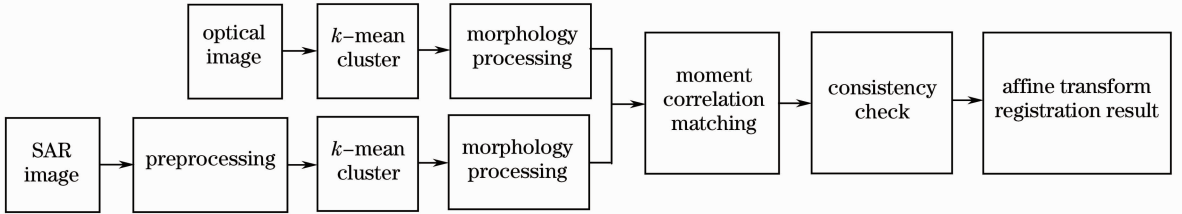


图 1 可见光与 SAR 图像配准示意图

Fig. 1 Framework of registration of optical and SAR image

3 主要算法

3.1 k -均值聚类分割算法

k -均值聚类分割算法是模式识别中的经典算法,它通常被用于图像分割并具有直观、快速、易于实现的特点^[10]。该算法的基本思想是选取 k 个初始聚类中心,把数据集中所有的对象分为 k 个类,按最小距离的原则,通过迭代计算,逐次更新各类的中心,直到算法收敛到一定的结束条件,输出聚类结果。

在可见光或者 SAR 的遥感图像中,一般都会含有河流、湖泊、海岸等共同水域特征。在可见光图像中,因为是依靠目标的表面反射成像,水体区域相对一般的地表特征来说,表面比较平滑,水质带来的反射光差异比较微弱,反映的辐射特性比较一致,在成像后所表现出的灰度连续性较好。在 SAR 图像中,水体区域表面对于微波的散射作用很小,所以水域在 SAR 图像中主要表现为暗区。水域同样会受

结合形态学处理的异源图像配准方法,通过轮廓特征实现可见光与 SAR 图像的精确配准,具有配准精度高、处理速度快的特点。

2 配准方法

本文提出的可见光与 SAR 图像配准方法如图 1 所示。

配准方法主要包括三个部分:1)预处理。针对 SAR 图像斑点噪声大、对比度低的特点,采用 Lee 滤波^[9]和直方图均衡方法进行预处理;2)封闭轮廓提取。对图像进行 k -均值聚类分割和形态学处理,实现封闭区域轮廓准确提取。删除小轮廓,减少伪匹配对;3)轮廓特征匹配。利用不变矩来描述提取的轮廓形状特征,加入矩变量距离均值、方差约束机制和一致性检查的匹配策略,以区域质点为控制点,采用广义仿射变换和双线性插值,实现可见光和 SAR 图像的精确配准。

SAR 图像的斑点噪声影响,带来水体的灰度的明暗变化,但斑点噪声在暗区的影响要比在亮区小得多。

虽然水体区域在可见光图像和 SAR 图像中的灰度表现存在差异,但灰度的分布相对来说都具有比较好的一致性。因此,采用 k -均值聚类分割算法,可以把图像中水体区域的像素归为一类,进而分割提取出水体区域特征。

具体的步骤如下:

1) 根据图像特性,选取 K 个分类数目,随机选取 K 个像均值作为初始聚类中心。

2) 在第 i 次迭代时,考察每个像素,计算其与每个聚类中心的距离,并将其赋给距离它最近的类,即 $H = \min\{\|x^* - u_j^{(i)}\|, j = 1, 2, 3, \dots, K\}$,则 $x^* \in P_j^{(i)}$ 。其中 x^* 表示图像像素的灰度值, $P_j^{(i)}$ 表示在第 i 次迭代后赋给第 j 类的像素集合, $u_j^{(i)}$ 表示该集合的均值。

3) 对于 $j = 1, 2, 3, \dots, K$,计算新的聚类中心,更

新类的均值 $u_j^{(i+1)} = \sum_{x^* \in P_j^{(i)}} x^* / N_j$, 其中 N_j 是 $P_j^{(i)}$ 中的像素个数。

4) 遍历所有像素, 如果对于 $j = 1, 2, \dots, K$, 都有 $u_j^{(i)} = u_j^{(i+1)}$, 则算法收敛, 否则返回 2) 继续下一次迭代。

3.2 形态学处理

利用 k -均值聚类算法得到的图像分割区域, 由于噪声的存在, 往往存在孤立散点和区域割裂的情况, 为此, 对分割后的图像运用数学形态学的先腐蚀后膨胀的开运算, 可以消除孤立散点和连通割裂区域, 形成封闭轮廓。这是因为腐蚀运算可以消除比腐蚀因子小的散点和噪声, 对图像具有低通滤波的效果; 膨胀运算可以把比膨胀因子小的缺口或孔洞填充上, 起到连通作用。在此基础上, 可以剔除大部分背景, 获得目标和背景各区域的封闭边界, 准确提取图像的封闭轮廓。

值得注意的是, 提取的封闭轮廓, 除了包含真正的轮廓以外, 还包含一些噪声形成的虚假的小封闭轮廓, 需要对这些小封闭轮廓进行删除。这些小的封闭轮廓中也可能会含有真实的小轮廓, 一并删除以后, 对后期的配准影响不大, 这是因为对于小的封闭轮廓, 尺寸越小, 外形结构差异就越小。太小的封闭轮廓反而会影响到匹配的结果。

3.3 矩相关匹配

在描述区域特征的方法中, 不变矩是描述区域形状特征很有效的方法, 因此本文采用不变矩来描述图像分割后的区域形状特征^[8]。

对于一个封闭的二维区域 G , 常用 7 个不变矩来表示。目标区域中心矩定义为(下标 p, q 分别代表 x, y 方向的指数)。

$$u_{pq} = \sum_{(x,y) \in G} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q, \quad (1)$$

利用(1)式所示中心矩, 构造的 7 个不变矩表示如下:

$$\varphi_1 = (u_{20} + u_{02}), \quad (2)$$

$$\varphi_2 = [(u_{20} - u_{02})^2 + 4u_{11}^2], \quad (3)$$

$$\varphi_3 = [(u_{30} - 3u_{12})^2 + (3u_{21} - u_{03})^2], \quad (4)$$

$$\varphi_4 = [(u_{30} + u_{12})^2 + (u_{21} + u_{03})^2], \quad (5)$$

$$\varphi_5 = (u_{30} - 3u_{12})(u_{30} + u_{12})[(u_{30} + u_{12})^2 - 3(u_{21} + u_{03})^2] - (3u_{21} - u_{03})(u_{21} + u_{03})[(u_{21} + u_{03})^2 - 3(u_{30} + u_{12})^2], \quad (6)$$

$$\varphi_6 = (u_{20} - u_{02})[(u_{30} + u_{12})^2 - (u_{21} + u_{03})^2] - 4u_{11}(u_{30} + u_{12})(u_{21} + u_{03}), \quad (7)$$

$$\varphi_7 = (3u_{21} - u_{03})(u_{30} + u_{12})[(u_{30} + u_{12})^2 - 3(u_{21} + u_{03})^2] - (u_{30} - u_{21})(u_{21} + u_{03})[3(u_{30} + u_{12})^2 - (u_{21} + u_{03})^2]. \quad (8)$$

对于每一个封闭的二维区域, 可以把它的 7 个不变矩看作是七维特征空间的一个点, 两个区域的相似性根据这两个点的距离来度量, 距离 D_{ij} 可以表示为

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^7 [\varphi_i(k) - \varphi_j(k)]^2}, \quad (9)$$

式中 $i=1, 2, \dots, m$ 和 $j=1, 2, \dots, n$ 分别表示基准图像和待配准图像中二维区域 G 的序号。

对于基准图像中的 m 个区域和待配准图像中的 n 个区域, 它们的关系可以用 $m \times n$ 的距离矩阵来判定, 距离矩阵 \mathbf{D} 表示为

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{21} & \cdots & D_{m1} \\ D_{12} & D_{22} & \cdots & D_{m2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ D_{1n} & D_{2n} & \cdots & D_{m,n} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

通常的判据准则是当 D_{ij} 取得最小值时, 此时对应的封闭区域为最佳匹配区域。但是由于 D_{ij} 是

一个累加和的形式, 其中存在许多不确定矩变量的起伏因素, 例如其中某个矩变量差稍大, 而其余的差很小, 这样也可能会得到一个很小的 D_{ij} , 就有可能影响到匹配结果, 造成误匹配。对此引入各个矩变量之间的距离均值和方差的约束机制。

各个矩变量之间的距离均值 $\bar{D}_{i,j}$ 及其方差 δ_{ij} 为

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{7} \sum_{k=1}^7 [\phi_i(k) - \phi_j(k)], \quad (11)$$

$$\delta_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^7 [\phi_i(k) - \phi_j(k) - \bar{D}_{ij}]^2}. \quad (12)$$

具体的步骤:

1) 遍历搜索匹配: 从基准图像 A 中的第 i 个封闭轮廓开始, 在待配准图像 B 中进行全部封闭轮廓的不变矩距离匹配, 获得初始匹配封闭轮廓对。

这里分两个步骤进行: 第一步, 计算距离矩阵 \mathbf{D} , 比较矩阵 \mathbf{D} 中的每一行元素, 把 D_{ij} 最小的轮廓

对作为满足初步要求的匹配对;第二步,最小设定一阈值 D_T ,当 $D_{ij} \leq D_T$ 时,可以认为轮廓 i 和轮廓 j 满足匹配要求,作为初始匹配结果。 D_T 一般选取 2~5。

2) 从初匹配结果中,利用 δ_{ij} 精确匹配结果,把 δ_{ij} 最小的两个区域作为匹配特征对。

3) 重复 1)、2),直到完成所有特征区域的匹配。

3.4 一致性检查

基于封闭区域不变矩的匹配一致性检查,采用逆向搜索和比例约束的策略:

1) 逆向搜索匹配

从最初的基准图像 A 到待配准图像 B 的遍历搜索,再进行从 B 图像到 A 图像遍历搜索匹配,检查匹配结果是否一致。对不一致的特征对,把 D_{ij} 小的作为匹配特征对。

2) 计算匹配特征区域的比例

计算比例均值:

$$L_{ij} = \frac{A_i}{B_j}, \quad (13)$$

$$\bar{L} = \frac{1}{N} \sum L_{ij}, \quad (14)$$

式中 A_i 表示 A 图像第 i 个封闭区域的轮廓长度, B_j 分别表示到 B 图像第 j 个封闭区域的轮廓长度,对于封闭区域检测后的二值化的图像,轮廓长度可以直接用特征轮廓的像素数目表示, N 表示匹配的特征对数目。

3) 当 $|L_{ij} - \bar{L}| \leq \Delta l$,则认为匹配正确,否则作

为伪匹配对。 Δl 要根据图像和经验选取,一般选取 0.1~0.3。

4 实验结果及分析

实验分别选择三组可见光和 SAR 图像进行实验。编译环境 Matlab 7.0, 计算机配置为: Core (TM)i3-2328M CPU, 主频 2.2 GHz, 内存 4 G。

4.1 封闭轮廓提取及匹配结果

利用本文提出的方法进行封闭轮廓提取。 k -均值聚类类数为 15, 对于可见光图像, 灰度连续性较好, 只需选取第一类图像作为最终的聚类结果即可。对于 SAR 图像, 由于斑点噪声的存在, 需要选取第一类和第二类的分割结果作为最终的聚类结果。聚类分割的结果如图 2(b)、图 3(b)、(d) 所示, 从结果来看 k -均值聚类分割算法可以很好提取图像区域特征, 但存在分割区域割裂和孤立散点的情况。利用 3×3 形态学结构因子进行形态学处理, 处理结果如图 2(c)、图 3(f) 所示, 可以发现, 通过形态学处理, 能够连通封闭区域, 剔除大部分背景, 获得目标和背景各区域的封闭边界, 从而实现封闭轮廓的准确提取。把轮廓的长轴小于 12 pixel 的小轮廓进行删除, 保留大的封闭轮廓用于下一步匹配, 结果如图 2(d)、图 3(g) 所示。计算封闭轮廓的距离矩阵 D , 实验选取阈值 $D_T = 3$, $\Delta l = 0.2$, 采用约束机制和一致性检查, 获取图像最佳轮廓特征匹配对, 如图 2(e)、图 3(h) 所示。

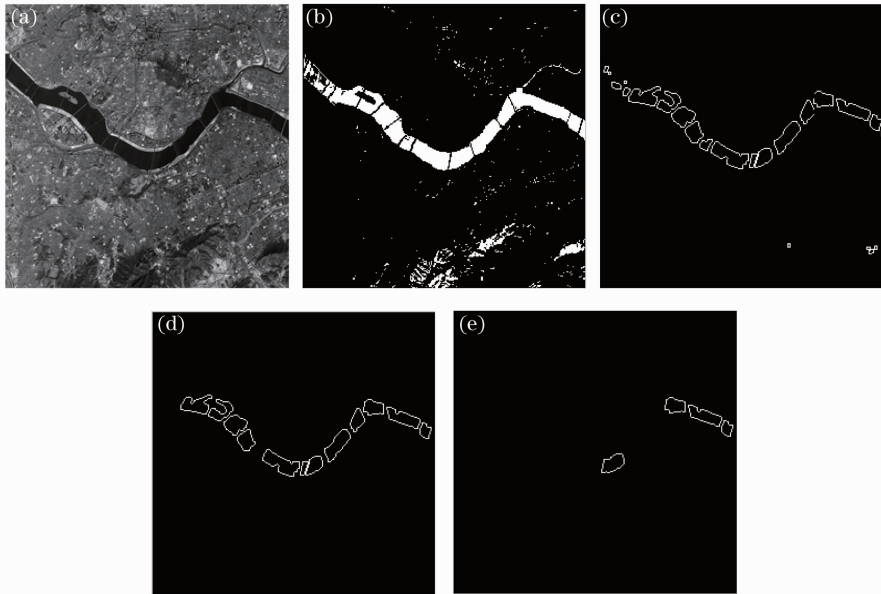


图 2 可见光图像轮廓匹配实验。(a)可见光图像;(b) k -均值聚类分割;(c)形态学处理;(d)小轮廓去除;(e)最佳匹配轮廓

Fig. 2 Closed contour matching experiment of optical image. (a) Optical image; (b) k -mean clustering segmentation; (c) mathematical morphology processing; (d) small outlines removing; (e) the best matching result

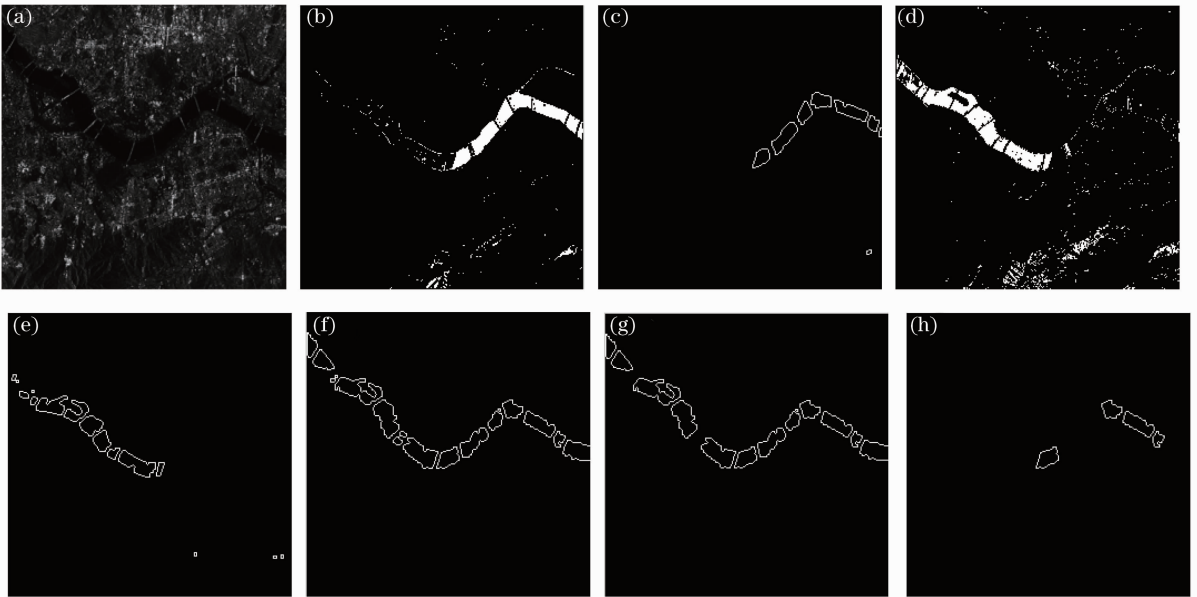


图 3 SAR 图像轮廓匹配实验。(a) SAR 图像；(b) k -均值聚类第一类分割；(c)对图(b)的形态学处理；(d) k -均值聚类第二类分割；(e)对图(d)的形态学处理；(f)整个封闭区域轮廓；(g)小轮廓去除；(h)最佳匹配轮廓

Fig.3 Closed contour extraction and matching experiment of SAR image. (a) SAR image; (b) the first kind of k -mean clustering segmentation; (c) mathematical morphology processing of (b); (d) the second kind of k -mean clustering segmentation; (e) mathematical morphology processing of (d); (f) overall closed contour image; (g) small outlines removing; (h) the best matching result

4.2 图像配准结果

以可见光图像为基准图像, SAR 图像为待配准图像,三组图像的配准结果如图 4~6 所示。从图 4 和图 5 的结果可以看出,河流区域的连接性较好,桥梁重合性较好,直观上配准效果较好。

此外,给出了本文与文献[8]提出的方法在三组实验上的定量比较,如表 1 所示。这里采用均方根误差(RMSE)作为配准精度的评价准则。从表 1 可以看出,本文的方法比文献[8]具有更高的配准精度,同时运算时间上也有优势。本文和文献[8]都采用基于轮廓特征的配准方法,但在具体的轮廓特征

提取方法上有所不同。文献[8]利用基于信息熵的水域提取方法,很容易受到 SAR 图像斑点噪声的影响,提取的结果含有太多的斑点噪声和干扰信息,出现较多由斑点噪声引起的虚假封闭轮廓,造成配准精度较低。另外,文献[8]需要计算图像的信息熵,运算量较大,不利于快速配准。而本文利用 k -均值聚类算法,把图像中水体区域的像素归为一类,分割提取出水体区域轮廓特征,定位准确,结合形态学处理,能有效减少斑点噪声的影响,具有更高的配准精度且运算处理速度更快。

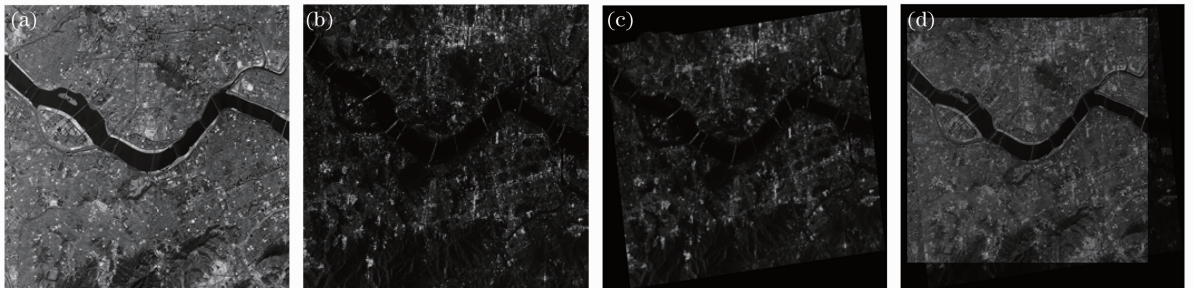


图 4 第一组实验配准结果。(a)可见光图像；(b) SAR 图像；(c) SAR 图像仿射变换后结果；(d)配准输出结果
Fig.4 Registration results of the first experiment. (a) Optical image; (b) SAR image; (c) affine result of SAR image; (d) registration result

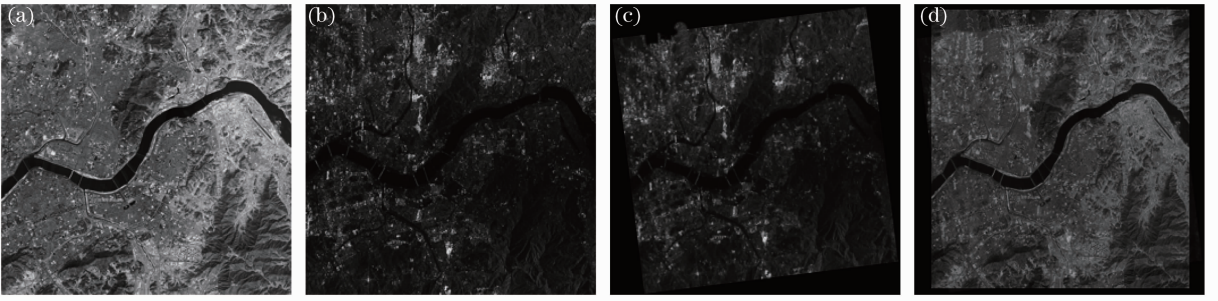


图 5 第二组实验配准结果。(a)可见光图像;(b) SAR 图像;(c) SAR 图像仿射变换后结果;(d)配准输出结果
Fig. 5 Registration results of the second experiment. (a) Optical image; (b) SAR image; (c) affine result of SAR image; (d) registration result

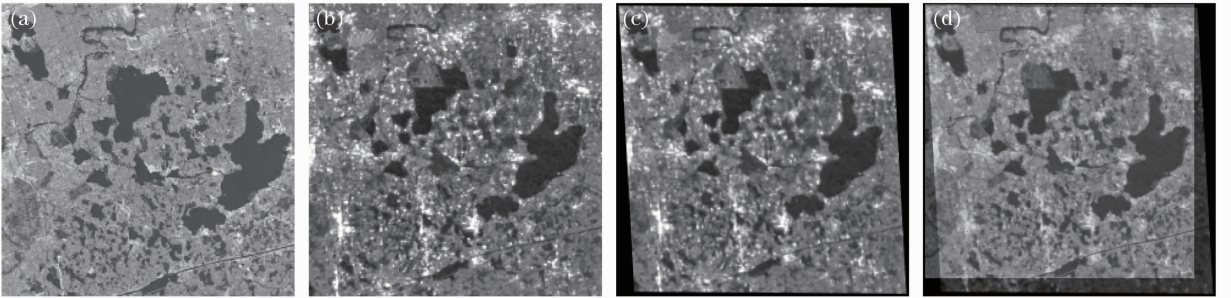


图 6 第三组实验配准结果。(a)可见光图像;(b) SAR 图像;(c) SAR 图像仿射变换后结果;(d)配准输出结果
Fig. 6 Registration results of the third experiment. (a) Optical image; (b) SAR image; (c) affine result of SAR image; (d) registration result

表 1 本文方法与文献[8]的实验定量比较

Table 1 Quantitative comparison of the proposed registration algorithm with reference [8]

	Method	Contour number	Contour number after selecting	Correct matching number	Root mean square error (RMSE)	Registration time /s
First group	Zhang ^[8]	32 35	23 22	8	1.3546	4.3236
	Proposed	19 18	12 10	4	0.3450	3.0950
Second group	Zhang ^[8]	82 87	41 39	10	1.5267	6.4682
	Proposed	13 11	10 6	3	0.2163	2.8560
Third group	Zhang ^[8]	42 57	8 10	6	0.6594	3.9843
	Proposed	33 45	6 6	4	0.1810	3.4850

5 结 论

综上所述,可得出如下结论:

1) 对于可见光和 SAR 图像的配准,利用提出的 k -均值聚类分割和形态学处理方法,能够准确提取两类图像的共有轮廓特征,有效减少 SAR 图像斑点噪声的影响。

2) 采用轮廓不变矩理论,引入了矩变量距离均值、方差约束机制和一致性检查的匹配策略,能够减少伪匹配轮廓对,获取最佳匹配对,达到亚像素配准精度。

3) 该法基于图像轮廓特征的配准,鉴于提取的封闭轮廓数量有限,轮廓之间的匹配可以不用考虑复杂的搜索算法,采用遍历方式即可,易于实现,处

理速度快,能够满足大部分实时处理的需要。

参 考 文 献

- 1 L G Brown. A survey of image registration techniques [J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24(4): 325—376.
- 2 B Zitova, J Flusser. Image registration methods: a survey [J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977—1000.
- 3 Liu Xiaochun, Zhong Tao, Yu Qifeng, *et al.*. Multi-model image registration based on local frequency information using modified simplex-simulated annealing algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0615002.
刘晓春, 钟涛, 于起峰, 等. 基于局部频率信息和单纯型-模拟退火的异源图像配准[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0615002.
- 4 H Li, B S Manjunath, S K Mitra, *et al.*. A contour-based approach to multisensor image registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(3): 320—334.
- 5 Wei Yanfeng, Zhao Zhongming, Yan Dongmei, *et al.*. Remote sensing image automatic registration based on feature [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(11): 161—165.
韦燕凤, 赵忠明, 闫冬梅, 等. 基于特征的遥感图像自动配准算法[J]. 电子学报, 2005, 33(11): 161—165.
- 6 Yu Qiuze, Cheng Hui, Liu Jian. Matching SAR image to optical image using modified Hausdorff distance and genetic algorithms [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(1): 130—134.
于秋则, 程辉, 柳健. 基于改进 Hausdorff 测度和遗传算法的 SAR 图像与光学图像匹配 [J]. 宇航学报, 2006, 27(1): 130—134.
- 7 Yu Xiangyu, Guo Lihua. Image registration by contour matching using tangent angle histogram [J]. IEEE Congress on Image and Signal Processing, 2008. 746—749.
- 8 Zhang Huaili. Onseveral Key Techniques of Different Type Sensor Images Registration [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008. 32—39.
张怀利. 异类传感器图像配准的若干关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2008. 32—39.
- 9 Wang Wenbo, Zhang Xiaodong, Fei Pusheng, *et al.*. The coherent speckle suppression method in SAR image based on contourlet domin adaptive bivashrink model [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2726—2731.
王文波, 张晓东, 费浦生, 等. 基于 Contourlet 变换的自适应 SAR 图像相干斑噪声抑制算法[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2726—2731.
- 10 Liu Yan, Yue Yingjuan. Application of rough set and *k*-means clustering in image segmentation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(3): 300—303.
刘岩, 岳应娟. 基于粗糙集的图像聚类分割方法研究[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 300—303.

栏目编辑: 李志兰