

基于弹性特征编组的图像配准方法

高峰

(国防科技大学自动目标识别重点实验室 长沙 410073)

摘要 为了解决遥感图像中直线断裂、遮挡等情况对配准结果产生影响的问题,提高图像配准的精度,文中提出了一种新的基于弹性特征编组的图像配准方法.该方法分为四步:首先分别从基准图像和待配准图像中提取弹性特征编组;然后依据局部属性相似性寻找这两幅图像中弹性特征编组的所有可能匹配情况;接着,从所有可能匹配情况中寻找一个最优匹配子集,使得该子集相似性测度之和最大且由它确定的配准误差最小;最后,根据弹性特征编组对应情况计算同名像点,运用仿射变换模型,实现基准图像和待配准图像之间的配准.实验表明,文中提出的方法对存在明显直线特征的图像之间的配准是有效的,且能有效克服直线断裂和遮挡的影响.

关键词 图像配准;弹性特征编组;主直线;交点;分支-定限

中图法分类号 TP391 DOI号 10.11897/SP.J.1016.2018.02467

FFG: Flexibility Feature Group Based Method for Image Registration

GAO Feng

(Science and Technology on Automatic Target Recognition Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract A new image registration method based on flexibility feature group (FFG) is proposed to cope with the influence of breaking and occlusion of extracted lines in images as well as improving the registration accuracy. It is divided into four steps: we firstly extract all flexibility feature groups, which consist of main line and neighboring lines, from the based and sensed images respectively, and then construct as much putative matching pairs between FFGs from the two images as possible to form a matching set; thirdly, find a optimal subset to maximize its total similarity measure and to minimize its registration error; finally, compute all control points which are acquired from the optimal subset and be used to solve the parameters of affine transformation model, and register the two images. The experiment results indicate that the proposed algorithm for registration is accurate and effective and can reduce the influence of breaking and occlusion of lines. The proposition of the concept of FFG is to take use of the space relation and extract more information to describe the lines as well as to construct invariant features to some transformation. In order to extract FFG, we firstly define the robustness measure, which considers the influences of length, grads and so on. Then Main Lines are extracted from the images according to the robustness measure. We next find the other lines that are at the neighbor window of the Main Line to construct FFG whose descriptor parameter is computed using the angles between the Main Line and other lines. What need to be explained is that the numbers of the lines in different FFGs are different, that is why we call them FFG. The step of computing the corresponding of FFGs in based and sensed images is divided into two parts, which are coarse matching and precise matching. During the process of coarse matching, we mainly compute the corresponding of FFGs using their descriptor parameters. What is special is that the dimensions of the descriptor parameters of

different FFGs may be different, which are related to the numbers of lines of FFGs. To deal with this problem, we define a new formula to measure the similarity of different FFGs. During Precise matching, we aim to gain the optimal matching set by wiping off the wrong corresponding pairs. In this part, we model the case and exploit a branch-and-bound method to find a subset to maximize its total similarity measure and to minimize its registration error. In order to compute the transformation parameters, the corresponding points in the two images should be extracted from the matching FFGs. If the FFG are only made up of the main line and other one line, the point of intersection of the two lines is used as the corresponding point. If the FFG is made up of more than two lines, we firstly transform the lines, except the main line, to polar coordinates, and then compute the centers of gravity, each of which corresponding to one new line. Finally, we use the point of intersection of the main lines and the new line as the corresponding point.

Keywords image registration; flexibility feature group; main line; intersection point; branch-and-bound

1 引 言

当前,遥感技术在数据获取方面的一个特点是趋向三高,即高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间分辨率.特别是随着我国高分辨率卫星的发射升空,每天可以获得大量的遥感数据,这些数据可以广泛服务于情报信息获取、地形测绘、气象水文预报、城市扩张监测、耕地面积变化测量等.为了充分发挥这些数据的效益,提高各领域产品的精度和准确度,提高产品的生产效率和数据的利用率,有必要研究由遥感数据生产各种产品所涉及的关键技术.其中,遥感图像配准技术是目标检测、变化分析、动态监视、资料同化等各项技术的基础和前提.

图像配准是将不同条件下获取的图像叠加起来的过程,它的主要目的是减少或消除图像之间的几何形变^[1],在民用和军用方面都有广泛的应用.早期的图像配准^[2-5]主要采用相关技术实现,这类方法主要适合于灰度变化不大或者灰度呈线性变化的图像之间的配准,如同种传感器图像之间的配准.为了解决灰度差别比较大或者异源图像之间的配准问题,一些学者提出了基于特征的图像配准方法^[6-14].这类图像配准方法不是在原始的灰度层次上进行,而是首先利用灰度的变化信息(如梯度)提取某种特定的特征,如线特征^[7,13]、点特征^[8,14]、区域特征^[9]、边缘特征^[10]等,然后再利用特征的属性描述来构造相似性测度函数,选择最大相似性测度值对应的特征作为同名特征.这些特征反映的是灰度的相对关系,而不是灰度本身的大小.研究和实验都表明,一般情

况下,除特征被遮挡外,图像对中的一幅图像中存在明显特征的地方,在另外一幅图像的相应位置也存在明显的特征.也就是说,特征不会因为传感器类型、拍摄时间、拍摄位置等的不同而消失,这是基于特征的图像配准方法的基础.基于特征的方法由于能够减弱因各种条件造成的灰度差异影响等特点而引起学者的重视,近期出现的配准方法也大多是基于特征的方法.

基于特征的图像配准方法可以分为基于点特征的方法^[8,14]、基于直线特征的方法^[7,13]、基于轮廓特征的方法^[9]、基于区域特征的方法^[9]等.这些方法中,基于点和直线特征的配准方法研究比较多,基于点特征的方法思路主要包括3类:第1类可以称为“假设-检验”法,即首先根据配准模型依次选择一定数目的点,并假设它们为同名;然后根据这些同名点计算模型参数,并依据该参数进行图像变换;最后基于两图像提取的特征点之间的距离等构造代价函数,并计算其值.如此可以得到一系列的代价函数值,选择最小代价函数值对应的匹配情况为最终的匹配结果,完成图像之间的配准;第2类可以称为“属性比较”法,即根据提取点特征属性参数之间的相似程度(可以用距离等衡量),确定同名像点,进而完成图像之间的配准.该类方法有时还综合考虑特征之间的空间一致性;第3类可以称为“构造图形”法,即首先利用提取的点特征构造一些特定图形(如三角形等),然后利用图形之间的相似性来衡量点之间的相似性.这类方法较第1类和第2类可以提高匹配的效率和构造代价函数的灵活性.同基于点的图像配准方法相似,基于直线的配准方法的主要思

路包括 2 类: 第 1 类是基于单个直线特征的方法, 这类方法利用的是单个直线特征的属性, 包括长度、方向、支持区域属性等, 显然, 当存在图像分辨率差异较大、遮挡、断裂、图像畸变等问题时, 该类方法难以进行有效的配准; 第 2 类是基于直线编组的方法, 即把直线进行两两编组, 利用直线编组的属性进行配准. 与第 1 类方法不同的是, 该方法可以利用的信息量更大, 并且在直对直线编组进行匹配时, 常利用的是它们之间的位置关系, 而不是利用长度等容易受遮挡、断裂等影响的信息, 因此, 相对于前一类方法, 本类方法更容易得到比较好的配准结果. 但是, 分析可知, 已有的以两个直线进行编组的方法^[13]是以编组为基本特征单元, 当一幅图像直线编组中的任一条直线在另外一幅图像中没有被提取出来时, 整个编组就不能匹配成功, 这影响了匹配成功的概率和最后配准的精度.

为了解决上述问题, 本文提出了一种基于弹性特征编组的方法. 该方法首先指定主直线特征, 并对主直线特征进行特征编组, 编组中特征的个数不固定, 而是根据主直线特征邻域直线特征的数目确定; 然后设计适合弹性特征编组的相似性测量函数, 衡量主直线特征之间匹配度, 进而得到可能匹配的直线特征, 接着利用空间关系一致性构造代价函数, 得到最终的匹配直线特征. 在衡量空间关系一致性时, 不是利用直线的端点或者中点, 而是利用上述可能匹配直线的交点, 这能有效避免由于直线提取不完整造成的模型参数计算误差, 大大提高计算的精度. 最后, 利用最终匹配直线的交点作为控制点, 进行图像模型变换参数的计算, 完成图像的配准.

本文第 2 节给出弹性特征编组的构造方法及基于弹性特征编组的主直线特征参数描述, 并讨论如何利用基于弹性特征编组的参数描述构造相似性测试函数和代价函数, 进行主直线特征的对应性求解; 第 3 节阐述如何根据匹配的主直线特征提取同名像点, 并进行模型参数的计算; 第 4 节给出整个图像配准方法; 第 5 节列出部分实验结果; 最后得出一些结论.

2 弹性特征编组

2.1 主直线特征提取

主直线指的是从图像中提取的长度、对比度等满足一定要求且局部最优的直线. 为了对直线进行综合衡量, 我们定义了如下的计算公式, 称之为直线

稳健性计算公式:

$$Rob_i = \begin{cases} 0, & \text{如果 } Len_i < L_{\min}^T \text{ or } CT_i < CT_{\min}^T \text{ or} \\ & \Delta CT_i < \Delta CT_{\min}^T \\ \omega_1 \times (1 - e^{-Len_i}) + \omega_2 \times (1 - e^{-CT_i}) + & \\ \omega_3 \times (1 - e^{-\Delta CT_i}), & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

假设第 i 条直线记为 l_i , 则 Rob_i 表示直线 l_i 的稳健度, Len_i 表示直线 l_i 的长度, CT_i 表示直线 l_i 的对比度, ΔCT_i 为梯度差 (表示直线 l_i 的对比度与支持区平均梯度的差), $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 表示权系数, $L_{\min}^T, CT_{\min}^T, \Delta CT_{\min}^T$ 分别表示长度最小阈值、直线对比度最小阈值和梯度差的最小阈值. 直线 l_i 对比度 CT_i 表示直线上所有点的梯度幅度和与直线长度的比值, 计算公式如下:

$$CT_i = \sum_{(m,n) \in l_i} Mag(m,n) / Len_i \quad (2)$$

$Mag(m,n)$ 表示像素点 (m,n) 的梯度幅度.

直线 l_i 的支持区 WIN_i 定义为以直线为中心的长 Len_i 宽 W_s 的矩形区域, 如图 1 所示.

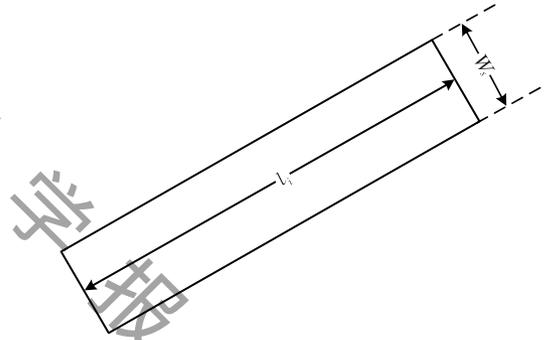


图 1 直线支持区示意图

那么 ΔCT_i 的计算公式如下:

$$\Delta CT_i = \left| CT_i - \frac{\sum_{(m,n) \in WIN_i} Mag(m,n)}{Len_i \times W_s} \right| \quad (3)$$

如果直线满足如下条件,

$$\begin{cases} Rob_i > Rob_T \\ Rob_i = \max_{v_j, l_j \in WIN_j} (Rob_j) \end{cases} \quad (4)$$

则称该直线为主直线. 其中, Rob_T 表示稳健度的阈值, WIN_j 表示直线 l_j 的邻域窗口, 一般根据具体情况而定, 文中取以直线 l_j 中点为中心的 20×20 大小的区域.

由式(4)可以看出, 主直线是稳健度大于给定稳健度阈值且局部稳健度最大的直线. 本文利用基于卡尔曼滤波的方法^[11]从图像中提取直线特征, 假设从参考图像和待配准图像中分别提取 M 和 N 条主直线, 分别记为 $ML_i^b (i=1, 2, \dots, M)$ 和 $ML_j^c (j=1,$

2, ..., N), 下面阐述如何以提取的主直线为基础, 进行弹性特征编组.

2.2 弹性特征编组的构造

为了利用直线之间的空间位置关系和提取更丰富的描述信息进行直线的属性描述, 并构造具有特定变换不变性的特征, 我们首先对提取的直线进行编组, 把特性编组作为一个整体, 计算直线的属性描述, 然后利用属性描述进行直线的相似性求解, 得到直线之间的对应关系.

在 2.1 节中, 已经从参考图像和待配准图像中分别提取 M 和 N 条主直线, 下面我们以一条主直线为例, 说明其特征编组方案, 并依据特征编组提取其属性描述. 假设图 2 是一幅图像的直线提取结果, 中间红色方框中编号为“3”的直线为我们提取的满足式(4)的一条主直线, 不妨记为 ML_i^b , 为了对该直线进行编组, 我们取以该直线中点为中心的一个矩形窗口 $win(ML_i^b)$, 由图可以看出, 窗口中还包括编号为“1”, “2”, “4”的直线, 那么我们就把这些直线与主直线 ML_i^b 进行编组, 主直线的属性描述用编组直线之间的关系进行描述. 此处, 我们把主直线与编组中其它直线的夹角作为主直线的属性描述, 那么主直线 ML_i^b 的属性描述可以记为 $ML_i^b \{ \theta_1, \theta_2, \theta_3 \}$. 假设已经对参考图像和待配准图像中的所有主直线进行了编组, 分别记为 $ML_i^b \{ \theta_1^b, \theta_2^b, \dots, \theta_{i_n}^b \}$ 和 $ML_j^r \{ \theta_1^r, \theta_2^r, \dots, \theta_{j_n}^r \}$, 其中 $i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N$. 因为每条主直线的编组中包含的其它直线的条数不固定, 而是由主直线邻域窗口其它直线的条数确定, 因此称为弹性特征编组.

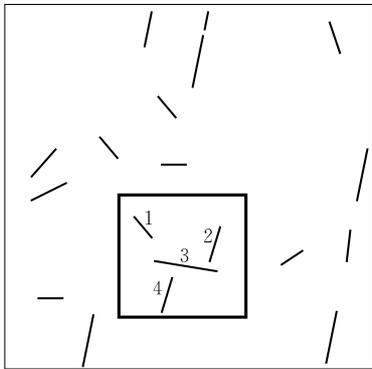


图 2 直线描述参数

2.3 基于弹性特征编组的主直线特征对应性求解

上面已经得到了所有的主直线及其特征编组, 并且通过计算得到了其属性描述. 接下来, 我们分析如何根据弹性特征编组及其属性描述进行对应性求

解. 为了在保证对应性求解准确度的基础上, 提高特征对应性求解的效率, 我们采用由粗到精的测量, 即首先根据属性描述得到主直线的粗匹配情况, 然后再结合空间关系一致性, 得到最优的匹配结果. 由于在粗匹配步骤中, 主要是利用主直线局部的一些特征, 因此, 粗匹配又称为局部一致性匹配; 而在精匹配步骤(即寻找最优匹配结果步骤), 利用的是整个图像中全局的几何关系一致性, 因此, 又称为全局一致性匹配.

2.3.1 粗匹配

在粗匹配阶段, 主要根据主直线弹性特征编组的属性相似性进行匹配度的求解. 与通常的属性相似性求解不同的是, 弹性特征编组属性参数的维数不是固定的, 而是随弹性特征编组中直线的条数变化而变化. 因此, 通常的相似性求解方法不再适合弹性特征编组相似性的求解, 为此, 需要定义新的相似性度量方法进行衡量弹性特征编组之间的相似性.

假设两条主直线弹性特征编组分别为 $ML_i^b \{ \theta_1^b, \theta_2^b, \dots, \theta_{i_n}^b \}$ 和 $ML_j^r \{ \theta_1^r, \theta_2^r, \dots, \theta_{j_n}^r \}$, 由于它们参数的维数不一样, 因此不能直接利用属性参数之间的距离来衡量它们之间的相似性, 下面分析如何进行弹性特征编组之间相似性的求解.

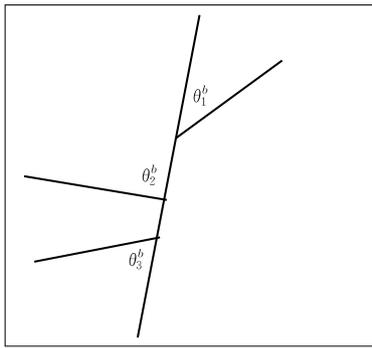
假设对于 $\theta_k^b (k=1, \dots, i_n)$, 存在角度 θ_h^r , 使得满足如下条件:

$$\min_{h=1, \dots, j_n} |\theta_k^b - \theta_h^r| < \epsilon_0 \quad (5)$$

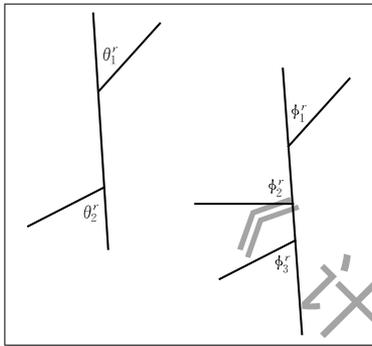
其中 ϵ_0 为一个给定的阈值. 那么则认为两个弹性特征编组对应的主直线有可能是匹配的. 需要说明的是, 满足上述条件的角度越多, 则说明两条主直线相互匹配的证据越多, 因此, 它们之间匹配的可能性就越大. 这可以用如图 3 所示来说明这个问题.

在图 3 中, 基准图像中的弹性特征编组和待配准图像中左上角的弹性特征编组有 2 对角度属性参数满足式(5), 即 θ_1^b 和 θ_1^r, θ_3^b 和 θ_2^r , 和待配准图像中右下角的弹性特征编组有 3 对角度属性参数满足式(5), 即 θ_1^b 和 ϕ_1^r, θ_2^b 和 ϕ_2^r, θ_3^b 和 ϕ_3^r , 如果对应的角度误差比较接近的情况下, 显然和右下角的弹性特征编组匹配的可能性更大, 这相当于有 3 个证据表明基准图像中的弹性特征编组和待配准图像中右下角的弹性特征编组相匹配, 而只有两个证据表明它和待配准图像中左上角的弹性特征编组相匹配.

因此, 两对弹性特征编组的相似程度, 不仅和角度差本身有关, 还和满足式(5)的角度的个数有关.



(a) 基准图像中弹性特征编组示意图



(b) 待配准图像中弹性特征编组示意图

图 3 提取弹性特征编组示意图

我们认为,角度差越小,弹性特征编组的相似性越大,反之相似性越小;而满足式(5)的角度的个数越多,弹性特征编组的相似性越大,反之相似性越小。因此,我们定义如下的弹性特征编组相似性计算公式:

$$Sim(ML_i^b, ML_j^r) = \sum_k e^{-\epsilon_k} \quad (6)$$

其中, ϵ_k 表示弹性特征编组 ML_i^b 和 ML_j^r 中第 k 对满足式(5)的角度属性差的绝对值。

假设对于待配准图像中的每一个弹性特征编组,通过式(5)和式(6)计算得到了与基准图像中弹性特征编组的相似性测度值。为了保证在该步骤中不漏掉正确的匹配对,保证后续步骤能够寻找最优的匹配结果,该步骤中保留相似性测度值排在前三位的所有情况(当和待配准图像中的弹性特征编组满足式(5)的基准图像弹性特征编组的个数小于3时,则按照实际情况保留全部可能的匹配结果)。通过此粗略匹配步骤,可以初步去除一些局外特征(即在另外一幅图像中不存在匹配特征的特征),但是得到的匹配集合中仍然包括错误的情况,这将在下节进行阐述。

2.3.2 寻找最优匹配结果

经过粗匹配阶段,我们得到了待配准图像中所有弹性特征编组的匹配情况,需要注意的是,该匹配结果中存在如下问题:(1)一配多的情况,即待配准

图像中的一个主直线弹性特征编组有可能和多个基准图像中的弹性特征编组相对应,基准图像中的一个主直线弹性特征编组也可能包含在多个待配准图像弹性特征编组的匹配结果中;(2)可能的匹配结果中没有正确的结果,即待配准图像中主直线弹性特征编组保留的三对可能匹配情况都是错误的,也就是说仍然存在局外特征。引起这种结果的因素很多,如待配准中的主直线没有在基准图像中的对应位置提取出来或者图像中存在一些类相似的结构特征等,下面分析如何解决这些问题,得到正确的匹配结果。分析可知,这部分工作就相当于利用一定的策略对初始匹配集合进行集合校验和剔除其中的局外特征。

我们称在粗匹配阶段得到的所有匹配关系为集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_M\}$, 元素 c_i 表示一个弹性特征编组匹配对, 它由3个要素组成, 记 $c_i = \{nb_i, nr_i, Sim(ML_{nb_i}^b, ML_{nr_i}^r)\}$, 其中 nb_i 和 nr_i 分别表示基准图像和待配准图像中弹性特征编组的编号, $Sim(ML_{nb_i}^b, ML_{nr_i}^r)$ 为这两个弹性特征编组按照式(6)计算得到的相似度。那么寻找最优匹配结果等同于从集合 C 中挑选出一个子集 C' , 在保证每个弹性特征编组最多出现在它的一个元素中的前提下, 使得子集中所有元素的相似性测度之和最大。为了综合考虑弹性特征编组的相似性和全局关系一致性, 我们定义一个新的量, 称为综合测度值, 定义如下:

$$TotalV = Tsim - e^{R_{err}} \quad (7)$$

其中, $Tsim$ 为 C' 中所有匹配弹性特征编组之间的相似度的总和, R_{err} 为配准误差, 此处采用均方根误差计算公式, 计算公式如下:

$$R_{err} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K ((x_1^k - a_1 x_2^k - b_1 y_2^k - c_1)^2 + (y_1^k - a_2 x_2^k - b_2 y_2^k - c_2)^2)}{K}} \quad (8)$$

其中 (x_1^k, y_1^k) 和 (x_2^k, y_2^k) 分别是两幅图像中第 k 对匹配点, K 是所有匹配点对的数目。

那么最优结果的求解就变成了从集合 C 中挑选出一个子集 C' , 使得上述综合测度值达到最大值。为了问题的求解, 我们引入匹配矩阵 MC , 具体如下:

$$MC = \begin{bmatrix} mc_{00} & mc_{01} & \cdots & mc_{0(N-1)} \\ mc_{10} & mc_{11} & \cdots & mc_{1(N-1)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ mc_{(M-1)0} & mc_{(M-1)1} & \cdots & mc_{(M-1)(N-1)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

如果集合 C 中包含由弹性特征编组 ML_i^b 和 ML_j^r

组成的匹配对,则 $mc_{ij} = 1$, 否则 $mc_{ij} = 0$. 为了表示子集 C' 中包含的元素,我们引入如下的选择矩阵:

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_{00} & \delta_{01} & \cdots & \delta_{0(N-1)} \\ \delta_{10} & \delta_{11} & \cdots & \delta_{1(N-1)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \delta_{(M-1)0} & \delta_{(M-1)1} & \cdots & \delta_{(M-1)(N-1)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

如果匹配矩阵的 mc_{ij} 元素被选中,则 $\delta_{ij} = 1$, 否则 $\delta_{ij} = 0$. 因此,最优匹配结果的求解,变成了对式(7)求最大值,即

$$\max(TotalV) \quad (11)$$

在下面的约束条件下:

$$\begin{cases} \sum_{j=0}^{N-1} \delta_{ij} \leq 1, i=0,1,\dots,M-1 \\ \sum_{i=0}^{M-1} \delta_{ij} \leq 1, i=0,1,\dots,N-1 \end{cases} \quad (12)$$

我们利用分支-定限法对上述问题进行求解,具体可以参考文献[5].

2.4 参数值的确定

在具体算法实现时,该部分涉及到的主要参数包括直线长度最小阈值 L_{\min}^T 、直线对比度最小阈值 CT_{\min}^T 、梯度差的最小阈值 ΔCT_{\min}^T 、计算直线稳健度时的权重系数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 、判断弹性特征编组之间是否可能匹配时的角度阈值 ϵ_θ . 如何确定这些参数值关系到算法自动化程度和最终效果,本文有两种确定参数值的方法,下面分别进行阐述.

2.4.1 根据图像质量确定参数值

上述所有参数都是用来衡量图像中提取特征的一些属性信息,因此,参数的值和图像特征本身有关,而图像特征的提取又和质量紧密相关,比如,当图像质量较好时,容易提取出完整的直线(断裂情况较少),因此,提取的长直线比较多,长度最小阈值 L_{\min}^T 可以取的比较大,又由于图像噪声比较少,直线对比度最小阈值 CT_{\min}^T 和梯度差的最小阈值 ΔCT_{\min}^T 都可以设为比较大的值,且它们与长度的权重系数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 可能设为同样的值 $1/3$. 此时,提取的直线方向比较准确,因此角度阈值 ϵ_θ 可以取比较小的值,我们取 0.05 弧度. 当图像质量较差时,提取的直线比较容易断裂,因此直线长度最小阈值需要取的比较小,并且 CT_{\min}^T 和 ΔCT_{\min}^T 设为比较小的值才能得到足够数目的主直线. 此时, CT_{\min}^T 和 ΔCT_{\min}^T 受噪声影响较大,因此权重系数 ω_1 要大于权重系数 ω_2, ω_3 , 可以取 $\omega_1 = 0.5, \omega_2 = 0.25, \omega_3 = 0.25$, 角度阈值 ϵ_θ 需要取较大的值,才不至于漏掉正确的匹配情况,此时文中取 0.1 弧度. 我们用表 1 说明这些参数与图像质量的关系.

表 1 参数取值与图像质量关系

	图像质量好	图像质量差
L_{\min}^T	30/IS~40/IS	15/IS~25/IS
CT_{\min}^T	20~30	10~20
ΔCT_{\min}^T	18~25	10~15
ω_1	1/3	0.5
ω_2	1/3	0.25
ω_3	1/3	0.25
ϵ_θ	0.05	0.1

表 1 中, IS 为图像空间分辨率.

2.4.1 自适应确定参数值

参数值确定的第 2 种方法是根据图像质量自适应的确定. 自适应确定 L_{\min}^T 的步骤为: 首先把图像按照 3×3 个格子进行等分; 然后, 尽可能多的从图像中提取出直线特征(本文是把长度大于 8 个像素的直线全部提取出来); 接着, 对每个格子中直线按长度进行排序, 排在第 8 位的直线的长度作为该格子直线长度阈值, 所有格子直线长度阈值的最小值作为整个图像中直线长度最小阈值 L_{\min}^T . 自适应确定 CT_{\min}^T 和 ΔCT_{\min}^T 的步骤为: 把每个格子中长度大于 L_{\min}^T 的直线按照 CT_i 的值进行排序, 排在第 5 位的直线的 CT_i 作为该格子直线对比度最小阈值, 所有格子直线对比度阈值的最小值作为整个图像直线对比度最小阈值 CT_{\min}^T . 同理确定 ΔCT_{\min}^T 的值. 如果 $CT_{\min}^T < 20$, 则取 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 1/3, \epsilon_\theta = 0.05$, 否则 $\omega_1 = 0.5, \omega_2 = \omega_3 = 0.25, \epsilon_\theta = 0.1$.

2.4.2 两种确定参数值方法的比较

根据图像质量人工给定参数值的方法, 不需要进行特征的相关排序和属性提取, 并且在特征提取阶段不提取长度太小的直线, 因此, 速度更快、效率更高, 比较适合于应用背景单一的情况, 如工业生产中自动判断器件的尺寸是否符合标准等.

自适应获取参数值的方法不需要人工指定参数值, 因此自动化程度更高, 应用范围广. 但是, 参数值的确定依赖于对图像特征的估计和计算. 为了防止特征提取数目过少导致后续配准无法进行或者精度不够, 必须首先提取尽可能多的特征并计算它们的属性, 然后再根据排序情况确定参数阈值, 因此, 这种方式比较耗时, 效率也较低, 比较适合应用在背景不固定、图像来源比较多样化的情况.

3 同名像点的提取及模型参数的计算

假设待配准图像和基准图像之间服从如下仿射变换模型:

$$\begin{cases} x_1 = a_1 x_2 + b_1 y_2 + c_1 \\ y_1 = a_2 x_2 + b_2 y_2 + c_2 \end{cases} \quad (13)$$

(x_1, y_1) 表示基准图像中点的坐标, (x_2, y_2) 表示待配准图像中对应点的坐标. 为了进行配准模型参数的求解, 需要根据弹性特征编组的对应性情况, 确定三对以上的同名像点.

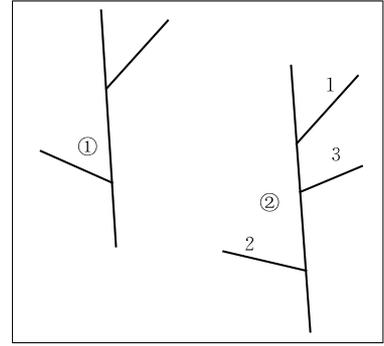
3.1 由弹性特征编组最优匹配结果确定同名像点

弹性特征编组由一条主直线和多条邻域直线组成, 无法利用文献[13]中方法直接把匹配干线对的交点作为同名像点, 因此, 如何根据弹性编组的对应情况, 确定同名像点是需要考虑的问题. 由于直线存在断裂的情况, 因此, 直接利用直线中点作为同名像点的策略是不适当的. 鉴于此, 本文设计了新的同名像点确定方案, 包括如下两种情况: 当匹配弹性特征编组除主直线外, 只包含一条其它直线, 我们取编组中主直线和另外一条直线的交点作为同名像点, 这与文献[13]中的情况类似; 当匹配弹性特征编组除主直线外, 还包括多条其它直线, 如图 4 所示, 根据第二部分的方法, 得到左图中编号为“①”的弹性编组和右图中编号为“①”的弹性编组相匹配, 左图中编号为“②”的弹性编组和右图中编号为“②”的弹性编组相匹配. 这时, 我们首先把其它直线变化到极坐标下, 假设第一对匹配弹性特征编组对应的极坐标分别记为 (ρ_2^1, θ_1^1) , (ρ_1^1, θ_2^1) 和 (ρ_2^2, θ_1^2) , (ρ_2^2, θ_2^2) , 然后在极坐标下求这些点的重心, 即

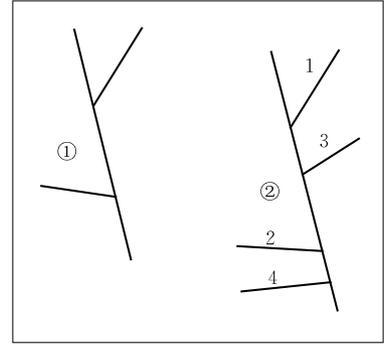
$$\begin{aligned} \bar{\rho}^1 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \rho_i^1, & \bar{\theta}^1 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \theta_i^1; \\ \bar{\rho}^2 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \rho_i^2, & \bar{\theta}^2 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \theta_i^2 \end{aligned} \quad (14)$$

那么极坐标 $(\bar{\rho}^1, \bar{\theta}^1)$, $(\bar{\rho}^2, \bar{\theta}^2)$ 分别对应左右图像中的一条直线, 我们用这条直线与弹性特征编组的主直线的交点作为同名像点. 这种对弹性特征编组内除主直线外的其它直线求重心的策略可以减少提取直线时随机误差的影响, 提高交点的位置精度, 进而提高后续利用同名像点进行图像配准的配准精度.

需要说明的是, 对于左图中编号为“②”的弹性编组和右图中编号为“②”的弹性编组, 虽然它们是相互对应的, 但是由于遮挡等原因, 它们包含的直线的条数是不相同的. 由于在第二部分求解弹性编组对应性时, 已经得到了直线之间的对应性, 因此, 在利用上述方法确定同名像点时, 我们只对对应的直线进行极坐标变换, 即在对图 4 左右图像编号为“②”的弹性特征编组确定同名像点时, 只对左右图像中编号为“1”, “2”, “3”的直线进行极坐标的变换和重心求解, 而不考虑编号为“4”的直线.



(a) 基准图像中弹性特征编组



(b) 待配准图像对应弹性特征编组

图 4 确定同名像点

3.2 模型参数计算

假设根据弹性特征编组确定的基准图像和待配准图像中的同名像点分别记为 (x_1^1, y_1^1) , (x_2^1, y_2^1) , \dots , $(x_{N_c}^1, y_{N_c}^1)$ 和 (x_1^2, y_1^2) , (x_2^2, y_2^2) , \dots , $(x_{N_c}^2, y_{N_c}^2)$, 用

矩阵分别表示为 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N_c}^1 \\ y_1^1 & y_2^1 & \dots & y_{N_c}^1 \end{bmatrix}$ 和 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N_c}^2 \\ y_1^2 & y_2^2 & \dots & y_{N_c}^2 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$, 描述基准图像和待配准图像

之间仿射变换模型的参数记为 $X = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{bmatrix}$,

那么, 下面关系式成立:

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}\mathbf{B} \quad (15)$$

由最小二乘估计可得

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{B}^T(\mathbf{B}\mathbf{B}^T)^{-1} \quad (16)$$

4 整个图像配准方法

综上所述, 整个图像配准算法分 4 步执行:

第 1 步. 利用基于卡尔曼滤波的稳健直线提取算法提取直线, 并对提取的直线按照式(4)进行主直线的选择, 并以主直线为基准, 构造弹性特征编组, 依据直线之间的夹角构造弹性特征编组的属性描述;

第 2 步. 利用局部一致性匹配寻找弹性特征编组粗略匹配情况;

第 3 步. 利用全局关系一致性和“分支定限”法求解最优弹性特征编组匹配子集;

第 4 步. 利用最优匹配子集中匹配弹性特征编组求解同名像点, 求出变换模型的参数, 完成图像的配准.

算法伪码描述见附录 1.

5 实验结果

下面实验所用的图像均为实际遥感图像, 所有实验均是在 CPU 为 3.0 GHz, 内存为 4 GB 的计算机上使用 VC6.0 实现的.

第 1 组实验主要是验证本文提出的算法. 图 5

(a) 为一幅遥感图像, 我们把它作为基准图像, 图 5 (b) 为另外一幅遥感图像, 我们把它作为待配准图像. 这两幅图像都是从 google earth 上获得的可见光遥感图像, 大小分别为 700×600 和 237×240 . 显然, 图 5(b) 相对于图 5(a) 存在一定的旋转和缩放变换. 为了配准图像, 本文首先利用文献[11]中基于卡尔曼滤波的方法对这两幅图像分别进行直线提取, 结果如图 5(c) 和 (d) 所示, 图中对提取直线进行了编号. 接着, 利用本文方法对提取的直线进行了弹性特征编组, 并对弹性特征编组进行对应性求解, 表 2 给出了得到的弹性特征编组对应情况. 得到弹性特征编组后, 确定两幅图像中的同名像点, 并依据同名像点进行变换模型参数的求解, 完成图像的配准, 图 6 为利用本文算法的配准结果. 从实验结果可以看出, 本文算法可以较好完成图像的配准.

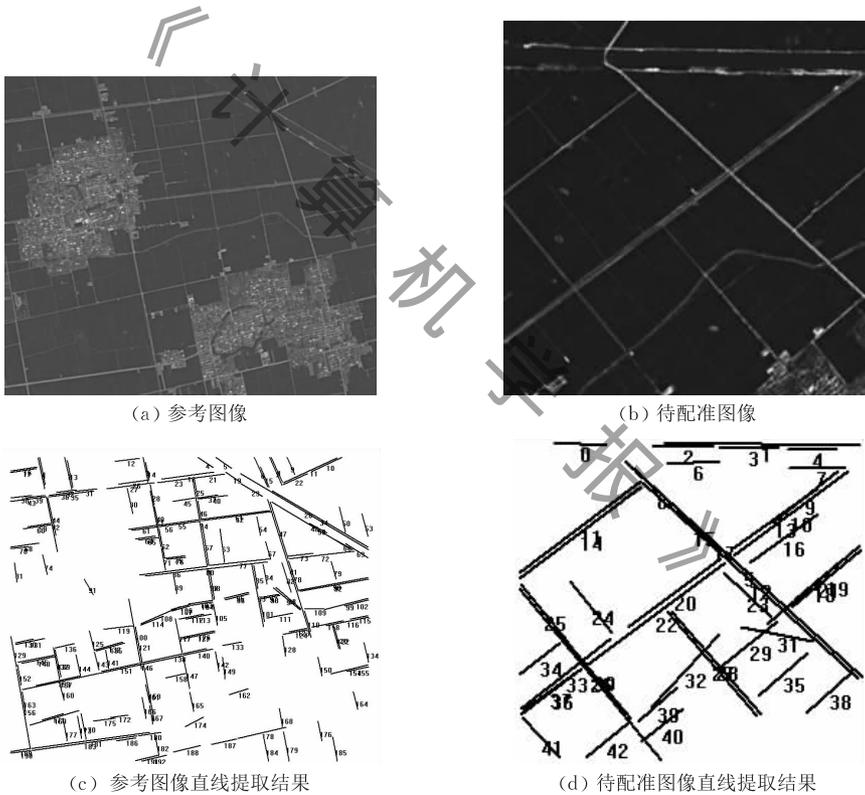


图 5 实验 1 需要配准的两幅图像

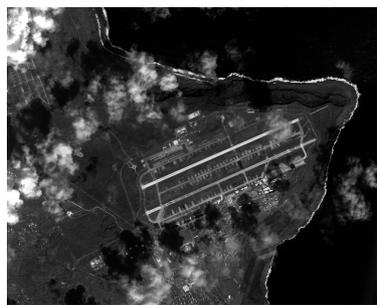
表 2 实验 1 本文方法得到的弹性特征编组对应情况表

序号	基准图像中弹性编组		待配准图像中弹性编组	
	主直线编号	其它直线编号	主直线编号	其它直线编号
1	48	72	7	9
2	41	52,77	15	14,20
3	51	57,47	11	25,8
4	63	77	24	20
5	80	88,83,82	22	30,27,23
6	101	98,111	28	29,35
7	87	86,95	26	36,39



图 6 实验 1 配准结果

下面通过另外一组实验来验证算法的优越性, 主要从配准精度和算法耗时两个方面同已有文献进行比较. 其中本文采用均方根误差(RMSE)来衡量图像配准精度. 图 7 为需要配准的两张图像, 其中图 7(a) 为某机场低分辨率图像, 大小为 2688×2166 像素, 实验中用作参考图像, 图 7(b) 为同一地区的高分辨率图像, 大小为 3018×2503 像素, 实验中用作待配准图像. 为了比较, 我们对本文算法、文献[8-9, 12-14]中算法进行了实现, 配准结果分别如图 8、图 9、图 10、

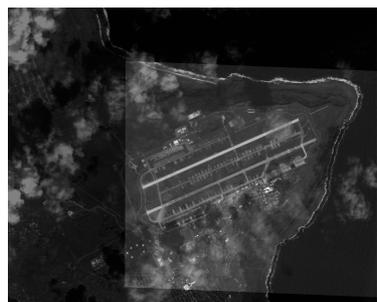


(a) 低分辨率卫星图像



(b) 高分辨率卫星图像

图 7 实验 2 某机场不同分辨率卫星图像

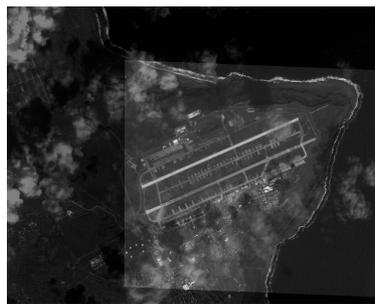


(a) 本文方法配准结果



(b) 本文结果局部放大图

图 8 实验 2 本文配准结果

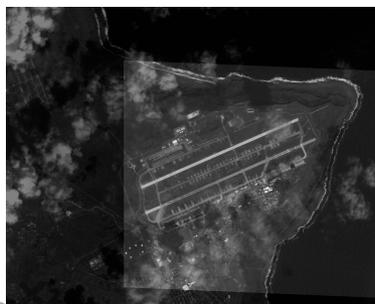


(a) 文献[8]配准结果



(b) 文献[8]配准结果局部放大图

图 9 实验 2 文献[8] 配准结果



(a) 文献[9]配准结果

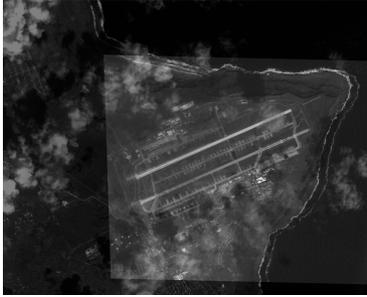


(b) 文献[9]配准结果局部放大图

图 10 实验 2 文献[9]配准结果

图 11、图 12 和图 13 所示. 为了比较配准细节, 给出了各个算法配准结果的局部放大图也. 为了定量比较, 表 3 给出了各种算法的具体配准精度和耗时, 其中耗时包括特征提取、编组和配准各个步骤的时间. 从实验结果的局部放大图以及表 3 可以看出, 文献[9]中算法无法得到正确的配准结果(精度太低), 文献[8]和文献[12]中算法的配准结果存在重影现象, 并且文献[12]算法耗时比较长, 无法达到实时要求,

文献[13]可以得到正确匹配结果,但是精度较低,而本文算法可以很好地对图像进行配准.

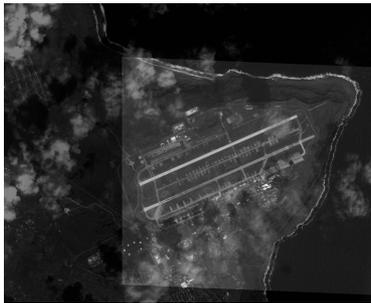


(a) 文献[12]配准结果



(b) 文献[12]配准结果局部放大图

图 11 实验 2 文献[12] 配准结果



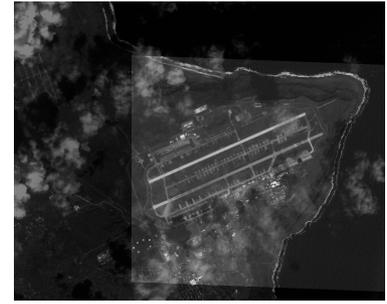
(a) 文献[13]配准结果



(b) 文献[13]配准结果局部放大图

图 12 实验 2 文献[13]配准结果

出现上述现象主要有以下几个方面的原因,第一,由于两幅遥感图像存在云遮挡的情况,且分辨率不同,文献[8]和文献[12]在分别利用 SURF 和 BRISK 算法进行特征点提取时,提取出了很多局外点,并且从两幅图像中提取的某些特征点存在一定的位置偏差,导致利用这些特征点进行配准时,配准



(a) 文献[14]配准结果



(b) 文献[14]配准结果局部放大图

图 13 实验 2 文献[14]配准结果

精度不是很高.另外,SURF 和 BRISK 算法提取的特征点描述维数比较高,使得参数描述提取和配准过程都相对比较耗时,这从表 3 中也可以看出来.文献[9]主要利用区域特征进行配准,由于在提取区域过程中难以从两幅图像中存在一定数目的不变区域,导致配准失败.文献[13]利用干线对进行配准,只有当一个图像中组成干线对的两条直线都在另外一幅图像中提取出来时,才能得到正确的匹配结果,并且仅利用两条直线的交点确定同名像点,精度显然没有本文方法高.而本文算法主要利用直线组成的弹性编组特征进行配准,并且弹性编组的数目可以根据图像特点进行调整(通过调整主直线的长度等实现),而图像中包含比较多的明显直线特征,所有本文算法精度高.本文算法不需要复杂的描述子提取,因此速度也比较快.

表 3 实验 2 各方法模型参数及均方根误差和时间

	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	RMSE	时间/s
本文方法	0.628	-0.002	853.9	0.025	0.657	387.5	0.243	1.985
文献[8]方法	0.630	0	849.6	0.025	0.658	387.1	0.793	30.601
文献[9]方法	0.679	0.021	737.7	0.016	0.654	408.4	6.384	2.050
文献[12]方法	0.636	-0.012	847.9	0.022	0.655	400.4	1.219	197.475
文献[13]方法	0.670	-0.010	849.9	0.033	0.659	400.2	1.100	1.755
文献[14]方法	0.628	-0.002	854.4	0.025	0.659	386.7	0.715	3.801

下面我们给出另外两组实验结果,来说明本文算法的有效性和优越性.图 14 为在不同时间从不同角度对美国五角大楼拍摄的两幅遥感图像,即左影像和右影像,图像尺寸都是 512×512 . 我们把这两幅图像分别作为基准图像和待配准图像进行配准,图 15 给出本文算法及文献[8-9, 12-14]中算法对图 14 中两幅图像的配准结果,表 4 给出了该组实验中各个算法的性能比较.图 16 为另外两幅不同时间对同一地区拍摄的两组遥感图像,图像尺寸也都是 512×512 . 相对于图 14 中的图像,该组图像的空间分辨率比较低. 同样我们用本文算法和文献中算法都进行了配准实验,实验结果放在图 17 中. 表 5 也给出了各个算法的配准精度和算法耗时. 从结果不难看出,两组实验中本文算法都能够得到较好的配准结果,且耗时比较少.

表 4 实验 3 各算法均方根误差和时间比较

	RMSE	时间/s
本文方法	0.315	2.317
文献[8]方法	1.127	26.452
文献[9]方法	2.189	3.974
文献[12]方法	1.989	179.864
文献[13]方法	0.997	1.897
文献[14]方法	0.442	4.151



(a) 五角大楼左影像



(b) 五角大楼右影像

图 14 实验 3 五角大楼左右影像



(a) 实验3本文算法结果



(b) 实验3文献[8]算法结果



(c) 实验3文献[9]算法结果



(d) 实验3文献[12]算法结果



(e) 实验3文献[13]算法结果

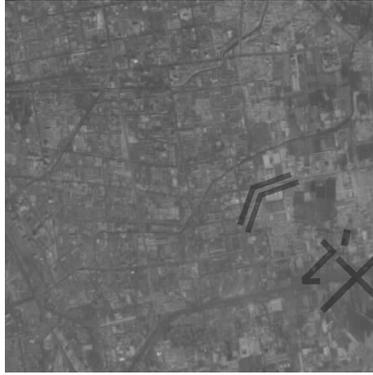


(f) 实验3文献[14]算法结果

图 15 实验 3 各算法配准结果



(a) 实验4参考图像



(b) 实验4待配准图像

图 16 实验 4 需要配准的两幅影像

表 5 实验 4 各算法均方根误差和时间比较

	RMSE	时间/s
本文方法	0.458	1.998
文献[8]方法	0.852	28.123
文献[9]方法	3.215	2.568
文献[12]方法	1.358	184.980
文献[13]方法	1.025	2.045
文献[14]方法	0.451	5.800

本文利用多对遥感图像做了实验,我们把本文算法及文献[8-9,12-14]算法对其中 10 对遥感图像的配准精度和实验耗时用曲线画在了图 18 中.从图可以看出,本文算法在配准精度和计算耗时方面都有比较好的表现.

另外,通过实验,有下面几点需要说明:(1)本文算法主要利用了弹性特征编组特征,因此,主要适用于包含机场、港口和城市区域等遥感图像的配准,并且算法对遮挡、阴影等存在较好的鲁棒性;(2)当图像质量较好,即不存在遮挡等问题时,文献[8,12]效果也比较好,对有无直线特征都适用,适应性更好,但是耗时比较长;(3)当图像质量较好且包含明显区域时,文献[9]也能得到比较好的结果,但是,它对区域提取结果要求比较高,适用范围有限.



(a) 实验4本文算法结果



(b) 实验4文献[8]算法结果



(c) 实验4文献[9]算法结果



(d) 实验4文献[12]算法结果

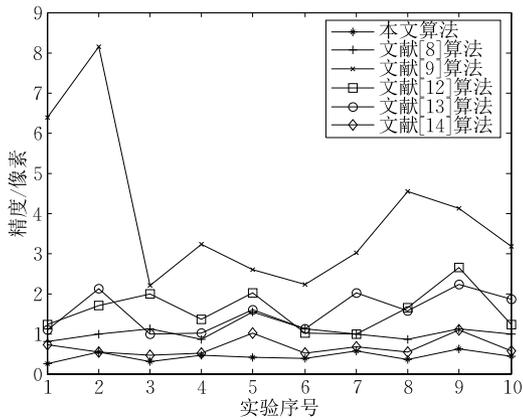


(e) 实验4文献[13]算法结果

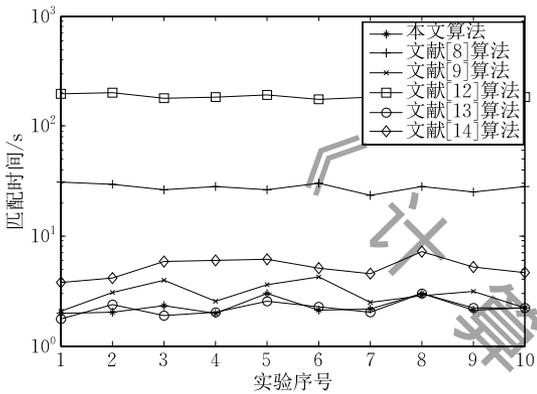


(f) 实验4文献[14]算法结果

图 17 实验 4 各算法配准结果



(a) 匹配精度比较



(b) 匹配时间比较

图 18 10 组实验精度和时间比较曲线

6 结 论

为了解决图像中存在直线断裂、遮挡等情况时的配准问题,本文提出了一种新的基于弹性特征编组的图像配准方法.其主要特点包括如下几个方面:(1)创造性的提出了弹性特征编组的概念,其由一条主直线和邻域内的其它直线构成,编组内直线的条数不固定,因此其属性描述矢量的维数也不固定.在利用弹性特征进行特征对应性求解时,由于不同编组的属性描述的维数不同,因此,难以用通常的方法计算不同编组之间的相似度,针对这种情况,提出了一种新的相似性测度衡量方法,能够有效的衡量弹性特征编组之间的对应性问题;(2)从弹性特征编组的构造和相似性求解方法可以看出,即使存在局部个别直线的遮挡、断裂或者没有被提取出来,仍然能够得到正确的匹配结果;(3)本文在寻找弹性特征编组之间对应性时,不仅考虑了局部弹性特征编组属性之间的相似性,而且使它们在拓扑关系上达到一致性;(4)在利用弹性特征编组求解同名像

点时,利用直线交点的方法可以较好的避免直线本身断裂带来的误差,提高配准的精度.

通过对实际图像的测试,证实了本文提出算法的稳健性和有效性.但是,本文仍有如下几个方面值得进一步研究:(1)如何提取对更复杂变换具有不变性的弹性特征编组属性描述.文中主要利用编组中各直线之间的夹角作为属性描述,这适合于刚性变换和角度变化不大的仿射变换,但对于更复杂的畸变显然不具有不变性;(2)本文提出方法主要适合于包含明显直线特征的遥感图像之间的配准,如何针对不包含明显直线特征提出更稳健的配准方法也是本文下一步需要研究的内容.

参 考 文 献

- [1] Zitova B, Flusser J. Image registration methods; A survey. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(11): 977-1000
- [2] Fonseca L M G, Manjunath B S. Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, 62(9): 1049-1056
- [3] Stone H S, Orchard M T. A fast direct fourier-based algorithm for subpixel registration of images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(10): 2235-2243
- [4] Niu Yong-Sheng, Ni Guo-Qiang. Automated registration for infrared image based on wavelet analysis. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2000, 9(1): 66-72
- [5] Xu Min, Varshney P K. A subspace method for fourier-based image registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 491-494
- [6] Wen Gong-Jian, Lv Jin-Jian, Yu Wen-Xian. A high-performance feature-matching method for image registration by combining spatial and similarity information. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(4): 1266-1277
- [7] Bigan A, Bouwmans T, Dubus J P. A new stereo matching algorithm based on linear features and the fuzzy integral. *Pattern Recognition Letters*, 2001, 22(2): 133-146
- [8] Song Zhili, Zhang Junping. Remote sensing image registration based on retrofitted SURF algorithm and trajectories generated from lissajous figures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3): 491-495
- [9] Bowen F, Du E, Hu J. New region feature descriptor-based image registration method//*Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, COEX, Seoul, Korea, 2012: 14-17*
- [10] Manay S, Cremers D, Hong B-W, et al. Integral invariants for shape matching. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(10): 1062-1618

- [11] Wen Gong-Jian, Wang Run-Sheng. A robust approach to extracting straight line. *Journal of Software*, 2001, 12(11): 1660-1667(in Chinese)
(文贡坚, 王润生. 一种稳健的直线提取算法. *软件学报*, 2001, 12(11): 1660-1667)
- [12] He Lin-Yang, Liu Jing-Hong, Li Gang, Liu Jian. Fast image registration approach based on improved BRISK. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2722-2727(in Chinese)
(何林阳, 刘晶红, 李刚, 刘剑. 改进 BRISK 特征的快速图像配准算法. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2722-2727)
- [13] Gao Feng, Wen Gong-Jian, Lv Jin-Jian. An optimal algorithm for IR/visual image registration based on main-line-pairs. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(6): 1014-1021(in Chinese)
(高峰, 文贡坚, 吕金建. 基于干线对的可见光和红外图像最优图像配准算法. *计算机学报*, 2007, 30(6): 1014-1021)
- [14] Shi Qiang, Ma Guorui, Zhang Feifei, et al. Robust image registration using structure features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(12): 2045-2049

附录 1. 算法核心伪码描述.

```

//read images
I1 = Imageread(BaseImage file);
I2 = Imageread(SensedImage file);
//extract Lines
L1 = ExtractLinesByCalman(I1);
L2 = ExtractLinesByCalman(I2);
//extract Main Lines;
FOR(i=0; i<L1.size(); i++){
    IF(L1[i].Rob>T1){
        ML1.push_back(L1[i]);
    }
}
FOR(i=0; i<L2.size(); i++){
    IF(L2[i].Rob>T2){
        ML2.push_back(L2[i]);
    }
}
//constract Flexibility Feature Group
FOR (i=0; i<ML 1.size(); i++){
    FOR (j=0; j<L1.size(); j++){
        IF (L1[j] == ML1[i])
            continue;
        IF (Dis(ML1[i],L1[j])<TD1){
            Ang = Angle(ML1[i],L1[j]);
            ML1[i].Angles.push_back(Ang);
        }
    }
}
FOR (i=0; i<ML 2.size(); i++){
    FOR (j=0; j<L2.size(); j++){
        IF (L1[j] == ML2[i])
            continue;
        IF (Dis(ML2[i],L2[j])<TD1){
            Ang = Angle(ML2[i],L2[j]);
            ML2[i].Angles.push_back(Ang);
        }
    }
}
//Coarse registration, MA with size of ML 1.size() ×
ML 2.size() is Match array
//Sim with size of ML 1.size() × ML 2.size() is similarity
matix
FOR (i=0; i<ML 1.size(); i++){
    FOR (j=0; j<ML 2.size(); j++){
        IF (minDif(ML1[i].Angles,ML2[j].Angles) <
            F3){
            MA[i,j]=1;
            Sim(i,j)=ComputeSimilarity(ML1[i],ML2[j]);
        }ELSE
            MA[i,j]=0;
    }
}
//find optimal registration
//find all possible registration case that satisfies one FFG in
baseimage match one FFG in sensedimage at most
//TotalV is a array that storages integrated similarity value
//OML is a array that storage optiaml registration result
//regPara is registration parameter
FindAllRegsitartion(ML1, ML2, ToatalV);
MaxTotalV=GetMaxVandOptimalRegs(TotalV,ML1,
    ML2,OML);
regPara=computeRegsitrationPara(OML);
RegistrationImages(I1,I2,regPara,ResultImage);

```



GAO Feng, born in 1982, Ph. D. , lecturer. His main research interests include image interpretation and target detection.

Background

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.41301492. Image registration is an important step in the remote sensing image analysis which needs to combine various kinds of data to get the final result. The task includes images fusion, change detection, environment monitor and so on. During two decades, techniques based on feature are main topic research and lots of researchers devote in them. However, most existing

methods can not deal with the influence of breaking and occlusion of extracted lines in images and get high registration accuracy. In this work, we extract a new feature-FFG, and use this feature and a new strategy which considers both the features' local similarity and their spatial consistency to register the images. All the research results can be used in guiding, target detection and the related research projects.

计算机学报