

基于六元组和面积比的图像自动配准

付必涛¹ 王 乘¹ 曾致远¹

(1 华中科技大学水电与数字化工程学院,武汉市珞喻路 1037 号,430074)

摘 要:基于面积比这一仿射不变量提出了一种粗匹配算法,它利用特征点六元组和面积比进行特征匹配。首先用特征点集构建不规则三角网(TIN)和特征点六元组,根据六元组内相邻三角形之间的面积比以及仿射变换方程组来搜索同名六元组,再建立两个点集之间的多项式变换关系,从而实现两个点集之间的粗匹配;然后用松弛匹配法进行两个点集间的精匹配;最后用同名特征点对图像进行小面元校正。实验表明,此算法不需任何人工干预和辅助信息,能自动配准不同类型的图像。

关键词:图像配准;六元组;面积比;不规则三角网;松弛匹配法

中图法分类号:P237.3

图像配准是遥感图像处理、计算机视觉和模式识别领域中的一个重要问题,其方法有人工和全自动两种类型。采用人工的方法,存在着对应点选取不准、不能实现自动化等缺点;自动配准方法分为基于区域的方法和基于特征的方法,基于特征的配准方法往往在不同传感器、不同时相的图像中具有较强的稳定性^[1]。只要找到两个特征点集之间的自动匹配算法,就可以实现图像的自动配准。匹配两个特征点集的实质是找到它们的同构子集^[2-5]。这些算法都有运算量大的缺点,并且多局限于相似变换或仿射变换。本文提出了一种基于特征点六元组和面积比的特征匹配算法。

1 基于特征点六元组和面积比的图像配准算法

在本文中,把参考图像称为主图像,待配准图像称为辅图像。主、辅图像之间往往并不是简单的仿射变换关系,但是用微分的观点,在微观尺度上,用仿射变换足以精确表达同名三角形之间的几何变换关系^[6]。根据这一思想,用主辅图像的特征点集构建 TIN,用 TIN 把图像微分成三角形面元,尽管相邻三角形之间的面积比是仿射不变量,但它也同样适用于非仿射变换的像对。在三角形面元中,特征点之间的位置关系可以用仿射

变换关系来度量,但搜索相邻三角形之间的面积比显然比逐一计算每个三角形的仿射变换方程组要快得多。

1.1 主、辅图像特征点集的粗匹配

特征点提取算子中,较知名的有 Moravec 算子、Forstner 算子、Hannah 算子以及提取角点的 SUSAN 算子。本文采用 Forstner 算子^[7]。

1.1.1 用特征点集构三角网

采用 Delaunay 三角网生成 TIN。用一个结构体数组来存储 TIN 的信息,其结构为 $\{t, v_1, v_2, v_3, t_1, t_2, t_3, n_1, n_2, n_3, \text{area}, S_1, S_2, S_3\}$ 。

如图 1 所示, t 为三角形序号; v_1, v_2, v_3 是三角形顶点; t_1, t_2, t_3 分别是与边 $v_2 v_3, v_1 v_3, v_1 v_2$ 相邻的三角形序号; n_1, n_2, n_3 是三角形 t_1, t_2, t_3 的另外一个顶点;area 是 t 的面积,可以根据三角形顶点的像素坐标 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 计算得到:

$$\text{area}_t = \frac{1}{2} | (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) | \tag{1}$$

S_1, S_2, S_3 是三角形 t_1, t_2, t_3 与三角形 t 的面积比:

$$S_1 = \text{area}_{t_1} / \text{area}_t, S_2 = \text{area}_{t_2} / \text{area}_t, S_3 = \text{area}_{t_3} / \text{area}_t \tag{2}$$

可以看出,每个三角形 3 个顶点和它的 3 个相邻点构成一个特征点六元组, TIN 结构体数组

实质上存储的是六元组的特征。搜索相似六元组时,是根据 TIN 中的三角形序号 t 进行循环的,所以在本文中,同名三角形和同名六元组是等同的。

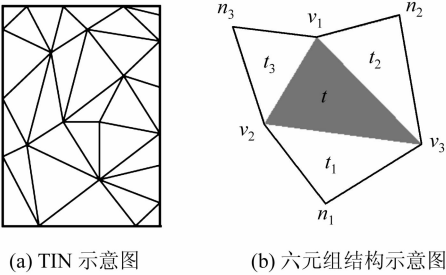


图 1 TIN 及六元组结构示意图

Fig. 1 Structure of TIN and 6-Points-Group

1.1.2 用面积比搜索候选六元组

利用面积比是仿射不变量这一特性,循环搜索主、辅图像中面积比相似的六元组作为后续计算的候选六元组。假设主辅图像中各有六元组 A 和 B ,它们的 $S_1、S_2、S_3$ 值分别表示为 $S_{A_1}、S_{A_2}、S_{A_3}$ 和 $S_{B_1}、S_{B_2}、S_{B_3}$ 。

设 $K_{ij} = |S_{A_i} - S_{B_j}| / (S_{A_i} + S_{B_j})$, 则 $r_1 = K_{11} + K_{22} + K_{33}, r_2 = K_{11} + K_{23} + K_{32}, r_3 = K_{12} + K_{23} + K_{31}, r_4 = K_{12} + K_{21} + K_{33}, r_5 = K_{13} + K_{22} + K_{31}, r_6 = K_{13} + K_{21} + K_{32},$

$$r = \min(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6) \tag{3}$$

选定某一阈值 d_1 ,如果 $r < d_1$, A 和 B 是一对候选六元组。

用以上算法,不仅可以找出主、辅图像之间候选的同名六元组,而且可以同时得到两个六元组之间的点对关系,而不需像文献[4,5]那样,还要在多元组内逐一迭代计算来寻找同名点。最小值 $r_i (i=1,2,\cdots,6)$ 反映了六元组之间的顶点对应关系,记录为 $(v_i, v'_j)、(n_i, n'_j) (i=1,2,3; j=1,2,3)$,供后续计算使用。

1.1.3 用仿射变换关系检验候选六元组

在候选六元组中,先用点对 (v_i, v'_j) 建立仿射变换方程组:

$$\begin{cases} a_0 + a_1x_1 + a_2y_1 = x'_1, b_0 + b_1x_1 + b_2y_1 = y'_1 \\ a_0 + a_1x_2 + a_2y_2 = x'_2, b_0 + b_1x_2 + b_2y_2 = y'_2 \\ a_0 + a_1x_3 + a_2y_3 = x'_3, b_0 + b_1x_3 + b_2y_3 = y'_3 \end{cases} \tag{4}$$

式中, $(x_i, y_i)、(x'_i, y'_i)$ 是点对 (v_i, v'_j) 的像素坐标,把它们代入可以求得 $a_0、a_1、a_2、b_0、b_1、b_2$ 。再用点对 (n_i, n'_j) 作检核点,把坐标 $(x_{n_i}, y_{n_i})、(x'_{n_j}, y'_{n_j})$ 代入方程组(5):

$$\begin{cases} \Delta_x = a_0 + a_1x + a_2y - x' \\ \Delta_y = b_0 + b_1x + b_2y - y' \end{cases} \tag{5}$$

选定某一阈值 d_2 ,如果 $\Delta_x、\Delta_y < d_2$, 则认为候选六元组是同名六元组。

1.1.4 建立两个特征点集之间的映射关系

两个特征点集之间的多项式变换公式为:

$$\begin{cases} x' = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij}x^i y^j \\ y' = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij}x^i y^j \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} \Delta_x = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij}x^i y^j - x' \\ \Delta_y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij}x^i y^j - y' \end{cases} \tag{7}$$

在每一对同名控制点中,抽取外围 3 点 $n_1、n_2、n_3$ 作控制点代入式(6)。 n 为多项式次数,当 $n=1、2、3$ 时,式(6)的参数 $a_{ij}、b_{ij}$ 分别有 6、12、20 个,分别需要 3、6、10 对控制点解算。

还需在同名六元组中选取若干检核点,把检核点坐标代入式(7)。选定某一阈值 d_3 ,如果 $\Delta_x、\Delta_y < d_3$, 则建立起两个特征点集之间的映射关系;否则,再换其他控制点进行类似计算。

需要说明的是,以上各项阈值大小由主辅图像的分辨率差异决定,差异较大时,应选取较大的阈值。如果在自动配准之前不知道分辨率差异的大小,可以选取较大的阈值,但这样会降低匹配速度。

只有相邻的 6 个特征点完全一致,且其所构建的三角网形状也完全一致时,才能构成同名六元组。而主、辅图像由于传感器和成像时间不同,或目标本身局部特征发生变化,以及各种成像误差的影响,提取的特征点集会有差异,所构建的三角网也不同,所以主、辅图像特征点集之间的同名六元组不会太多。但是,只要找到 1 对以上的同名六元组,就可以实现主、辅图像特征点集的粗匹配。

1.2 特征点集精匹配算法

1.2.1 找出所有候选特征点对

把辅图像特征点集代入式(7),可以计算出其映射点集。映射点集与主图像特征点集的坐标系一致,同名特征点对位置接近。由于成像误差的影响,同名点对存在几个像素的位移,但是位移量有一定的限度。

假设主图像的特征点集为 $P(p_1, p_2, \cdots, p_m)$, 映射点集为 $Q(q_1, q_2, \cdots, q_l)$, 点对 (p_i, q_j) 的距离为 δ_{ij} 。设定一个比较宽松的阈值 d_4 ,如果 $\delta_{ij} < d_4$, 则

(p_i, q_j) 是一对候选同名点;否则不是同名点。在映射点集中搜索每一个主图像特征点对应的候选同名点,一个点可能对应一个或多个候选同名点,也可能没有候选同名点。

1.2.2 松弛匹配法

假设点集 P 和 Q 中的两个候选点对为 (p_i, q_j) 、 (p_h, q_k) , 它们的坐标差为:

$$\begin{cases} \delta x = (x_{ph} - x_{pi}) - (x_{qk} - x_{qj}) \\ \delta y = (y_{ph} - y_{pi}) - (y_{qk} - y_{qj}) \end{cases} \quad (8)$$

定义:

$$\delta_{ij}(h, k) = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} \quad (9)$$

$\delta_{ij}(h, k)$ 指当 (p_i, q_j) 是同名点对时 (p_h, q_k) 之间的距离。假如 $\delta_{ij}(h, k)$ 为零,则表示 q_k 相对于 q_j 等同于 p_h 相对于 p_i , 因此,点对 (p_h, q_k) 应当给予 (p_i, q_j) 最大的支持。随着 $\delta_{ij}(h, k)$ 的增加,其支持度应减小。于是,令 (p_h, q_k) 对 (p_i, q_j) 的支持度为^[4]:

$$\phi(\delta_{ij}(h, k)) = \frac{1}{1 + (\delta_{ij}(h, k))^2} \quad (10)$$

若要求当 p_i 与 q_j 配对时, p_h 仅与一个 q_k 相配对,即与 p_h 相联系的对 (p_i, q_j) 的支持度最大的 q_k 相配对,则可得支持度表达式为 $\max_{k \neq j} \phi(\delta_{ij}(h, k))$ 。

m 个点之间的匹配度可以用 $S(p_i, q_j) = \frac{1}{m-1} \sum_{h \neq i} \max_{k \neq j} \phi(\delta_{ij}(h, k))$ 来衡量,因为已有部分同名六元组存在,可指定其初始支持度为 1,所以在点集中进行松弛匹配是基于先验知识的,从这些点开始往周围“生长”,这样就不必像文献[4]那样计算初始支持度了。

在第 r 次迭代($r > 0$)时, (p_i, q_j) 对 (p_h, q_k) 的支持度不仅依赖于 p_h 和 q_k 间的位置差别,而且也依赖于它们的第 $(r-1)$ 次迭代值 $S^{r-1}(p_h, q_k)$,即允许局部支持度的反馈。这里取这两个因素中的最小值:

$$S^r(p_i, q_j) = \frac{1}{m-1} \cdot$$

$$\sum_{h \neq i} \max_{k \neq j} \min[S^{r-1}(p_h, q_k), \phi(\delta_{ij}(h, k))] \quad (11)$$

松弛处理是一个迭代的过程,至 $d_r = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (S^r(p_i, q_j) - S^{r-1}(p_i, q_j)) < \epsilon$ 为止(ϵ 为一个预先设定的极小正数)。

用以上松弛匹配法对候选同名点进行处理,可以找出映射点集和主图像特征点集之间的所有同名点对。

1.3 辅图像小面元校正

去除找不到同名点的特征点,用匹配好的特

征点对在主、辅图像中重新构建三角网。以每个三角形为单位,先把同名三角形的顶点坐标 (x_i, y_i) 、 (x'_j, y'_j) ($i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$) 代入式(4),求得仿射变换参数 $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$,然后把三角形内各点逐一代入式(4)进行插值计算,就可以完成三角形面元的几何校正。对辅图像中的各三角形逐一进行以上处理,就可以实现整幅图像的配准,平均配准误差在 0.3 像素以内^[8]。查找三角形内各像素点的计算量较大,笔者通过实验发现,用三角形外接矩形内的所有像素点代替三角形内的像素点进行计算,可使计算速度提高 4 倍左右,而校正效果相差不大(只有不到百分之一的点的 DN 值有微小差别)。

2 实验与分析

笔者用 IDL 语言编写了相关程序。在 PC 机(Pentium 2.4G CPU, 1G 内存)上匹配两幅遥感图像,主图像为 2002 年 7 月 9 日武汉市 ETM⁺ 图像的第 4 波段(近红外波段,分辨率为 28.5 m,大小为 5 000×4 000),辅图像为 1978 年 10 月 16 日的 MSS-5(红光波段,分辨率为 57 m,大小为 3 550×3 880),两幅图像的色调反差很大(见图 2)。为了检验本文算法对图像旋转和翻转的有效性,先把辅图像逆时针旋转 22°后再上下翻转。用 Forstner 算子提取主、辅图像的特征点集,特征点数量分别为 841 和 1 734(见图 3),TIN 中三角形的个数分别为 858 和 1 961,搜索到的同名六元组有 7 个,精匹配后的同名特征点数量为 517 对。特征点集粗匹配费时 31.2 s,精匹配费时 45.3 s,小面元校正费时 58.7 s(采用双线性插值方法)。

通过大量实验发现,本文算法适用于各种分辨率的影像,但是主、辅图像之间的分辨率差异对匹配效果有影响,分辨率差异越大,匹配成功率越低,两幅影像的分辨率差异过大(10 倍以上),会导致匹配失败。这是因为主、辅图像的面积比是根据图像像素坐标计算得到的,其精度受图像本身分辨率的影响,这导致主、辅图像之间的分辨率差异过大时,同名六元组的面积比差值较大。

本文的六元组搜索算法适合于主、辅图像公共区域尺寸较大、特征点较多的图像。对于公共区域特征点少、尺寸小的像对,有可能找不到特征点六元组,从而无法进行匹配。这时可以把特征点六元组改为特征点四元组(由三角形和一个邻点组成,四元组存在的条件比六元组宽松得多),同样可以进行小尺寸图像的自动匹配。

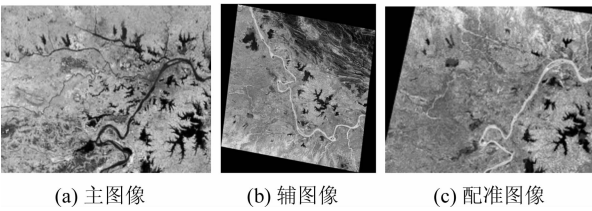


图2 配准前后的图像
Fig.2 Experimental Images

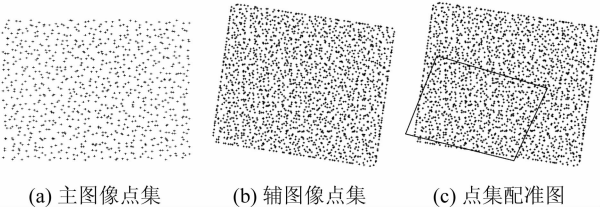


图3 主辅图像特征点集
Fig.3 Characteristic Point Sets of Experimental Images

3 结 语

本文算法为图像自动配准提供了一种新思路,它是基于特征点集本身的位置关系,而没有利用图像灰度、纹理和边缘信息,所以计算量小,匹配速度快,而且能够匹配不同传感器的图像。它对图像之间的旋转、翻转、灰度、纹理、分辨率等差异不敏感,所以能进行图像之间的全自动配准,而不需要任何人工干预。

参 考 文 献

[1] Fonseca L, Manjunath B. Registration Techniques for Multisensor Remotely Sensed imagery[J]. PE&RS, 1996, 562(9):1 049-1 056
[2] Hong Pengyu, Huang T S. Spatial Pattern Discovering by Learning the Isomorphic Subgraph from Multiple Attributed Relational Graphs [J]. Elec-

tronic Notes in Theoretical Computer Science, 2001,46:1-20
[3] 罗纲,罗斌.图像特征点集配准的加权相关迭代算法[J].中国图像图形学报,2000,5(9):755-758
[4] 桑农,张天序.旋转与比例不变的点特征松弛匹配算法[J].电子学报,1998,26(6):74-77
[5] 陈志刚,宋胜锋.基于相似原理的点特征松弛匹配算法[J].火力与指挥控制,2006,31(1):49-51
[6] 张祖勋,张剑清.山区遥感影像的小面元微分纠正[C].海峡两岸会议,台北,1999
[7] 张祖勋,张剑清.数字摄影测量学[M].武汉:武汉测绘科技大学出版社,1996
[8] 李立钢.星载遥感影像几何精校正算法分析比较[J].光子学报,2006,35(7):1 028-1 034

第一作者简介:付必涛,讲师,博士生。主要研究方向为遥感图像处理。
E-mail:fubitao@163.com

Automatic Image Registration Using Six-Point Groups and Area Ratio

FU Bitao¹ WANG Cheng¹ ZENG Zhiyuan¹

(1 School of Hydropower and Digital Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 1037 Luoyu Road, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new initial match algorithm using six-point groups and area ratio is proposed. Its main idea is to constitute triangulated irregular network(TIN) and six-point groups by point sets, search the pairs of homonymous six-point groups by area ratio and affine transform relations, and then establish initial transform equations between two characteristic point sets by polynomial. According to the counterpart points, the sub-image can be corrected using small panel correction. Experimental results show that it can match two images automatically without manpower intervention and other auxiliary information.

Key words: image registration; six-point groups; area ratio; TIN; relaxation matching

About the first author: FU Bitao, lecturer, Ph.D candidate, majors in remote sensing image processing.
E-mail: fubitao@163.com