

基于特征点的多光谱遥感图像配准

徐丽燕 王 静 邱 军 孙权森 夏德深

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

摘 要 提出一种基于特征点的多光谱遥感图像配准算法。首先在图像上建立二级规则网格,根据信息熵值及特征分布均匀性准则选取特征网格;然后利用 Forstner 算子在特征网格中提取特征点,针对多光谱图像的特点,利用基于相关性原理的粗匹配和改进的基于空间距离约束的精匹配确立特征点的对应关系;最后通过仿射变换得到配准后的图像,并用均方根误差评价配准效果。实验结果表明,该方法计算速度快,且能够达到亚像素级配准精度。

关键词 遥感图像,特征网格,Forstner,粗匹配,精匹配

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Multi-spectral Remote Sensing Image Registration Based on Feature Point

XU Li-yan WANG Jing QIU Jun SUN Quan-sen XIA De-shen

(The School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract A registration method for multi-spectral remote sensing image based on feature points was proposed. First, a two-degree regular mesh was formed on the image, and feature grids were chosen according to entropy and uniformity principle. Then feature points were detected by Forstner operate in feature grids. Due to the characteristic of multi-spectral images, the course matching step was achieved by Cross-Correlation theory, and improved space distance constraint was used in fine matching step. Finally, registered image was obtained by affine transformation. RMSE was applied to evaluate the method. The experimental results clearly indicate that the approach we proposed is efficient with sub-pixel precision.

Keywords Remote sensing images, Feature grid, Forstner, Course matching, Fine matching

1 引言

随着航空、航天技术的发展,遥感成为迄今为止能够提供全球范围的动态对地观测数据的重要手段,它在军事侦察、飞行器导航、变化检测、气象预报、城市规划等诸多领域有着广泛的应用。而图像配准技术是上述实际应用的基础,是图像处理的重要组成部分。图像配准的精度及可靠性对后续遥感数据的应用有着至关重要的影响。

图像配准是指对同一场景在不同时间、从不同视角或由不同传感器拍摄的两幅或多幅图像之间确定最佳匹配的过程^[1]。图像配准方法可以分为两类:基于图像灰度和基于图像特征。基于图像灰度的配准方法依赖于图像的灰度统计信息,比较适用于在图像灰度分布上有线性关系的图像^[2]。目前,基于灰度的配准方法主要应用于医学领域^[3,4]。基于图像特征的配准方法通常分为 4 步:1)特征提取;2)特征匹配;3)确定变换模型及参数;4)图像变换及插值。其中特征提取和特征匹配是两个关键步骤。特征提取是指通过空域或频域的方法提取出图像中保持不变的特征,如角点^[5]、边缘^[6]、形状^[7]等,形成特征集。特征匹配是指利用一些度量准则,为参

考图像和待配准图像特征集中的各个特征建立正确的一一对应的匹配关系,为后续变换参数的计算提供依据。传统的遥感图像配准方法依靠人工手动选取特征点对,要几个小时甚至几天的时间才能完成一幅图像的配准^[8]。由于人工配准技术不能满足大批量遥感图像配准的需求,且受到人的主观因素的影响,其配准精度也得不到有效的保证,因此,遥感图像亚像素级自动配准技术成为研究重点。基于特征的配准方法,由于其经过特征提取,数据量小,能够快速实现图像配准,因而成为自动配准技术中的主流方法。

本文提出一种基于特征点的遥感图像自动配准方法。首先通过选取特征网格,实现特征的均匀分布,保证配准精度及算法效率;然后在各特征网格内提取 Forstner 特征点,在特征匹配步骤利用粗匹配(相关性原理)及精匹配(改进的空间距离约束)进行特征点匹配;最后根据仿射变换模型计算出变换参数,实现图像配准。实验结果表明,该算法提取的特征点分布均匀,且算法效率较高,配准精度达亚像素级。

2 特征提取

2.1 特征网格选取

信息熵是图像所具有的信息量的度量,熵值越大,表明信

到稿日期:2011-01-28 返修日期:2011-04-24 本文受国家自然科学基金(61003108)资助。

徐丽燕(1983-),女,博士生,主要研究方向为图像处理、遥感信息系统等,E-mail:leeann666@126.com;王 静(1985-),女,博士生,主要研究方向为航天遥感、模式识别等;邱 军(1982-),男,硕士生,主要研究方向为模式识别、图像处理等;孙权森(1963-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为模式识别、遥感信息系统等;夏德深(1941-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为图像处理、卫星遥感等。

息量越大,特征存在的可能性越高^[9],因此可以将信息熵的值作为特征是否存在的判断依据。

$$E = - \sum_{i=0}^N p_i \log p_i \quad (1)$$

式中, $N=255$, p_i 表示灰度为 i 的像素在图像中出现的概率。

在图像上建立二级规则网格,该网格包含粗、细两种网格,如图 1 所示。细网格用虚线划分,粗网格用实线划分,相邻的 4 个细网格组成一个粗网格。选取特征网格的步骤如下:

1) 计算各细网格的信息熵,将熵值从大到小排序,对应熵值排在前 1/4 的细网格直接作为特征网格(如图 1 中 4 个灰色细网格);

2) 在不合特征网格的粗网格中(如图 1 中左下角粗网格),选取熵值最大的细网格作为特征网格(如图 1 中斜线细网格)。

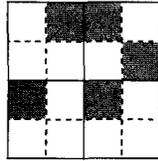


图 1 二级规则网格

在进行配准时,要么需要少量十分精确的特征点,要么需要大量精确且分布均匀的特征点,而在卫星遥感图像中自动确定有效的、精确的特征点是困难的,太少的点、不准确的点或者分布不均匀的点被选取都可能导致配准的误差^[10]。在图像上建立二级规则网格,计算所有细网格的信息熵,取熵值排在前列的细网格直接作为参与后续运算的特征网格,这样能够确保图像信息丰富的区域参与后续运算,并提取到大量精确的特征点;然后考察每个粗网格内是否含有特征网格,若不含,则在此粗网格内选取信息熵值最大的细网格作为特征网格,因而在信息贫乏的部分也存在少量特征点。特征网格的两步骤选择,能够保证特征网格在整幅图像中分布的均匀性,从而间接使得特征点也能够能够在图像中呈现均匀分布,提高配准精度。同时通过选取特征网格,缩小特征点的提取范围,可以大大减小算法的计算量,提高配准速度。

2.2 Forstner 特征点提取

常用的特征点提取算子有 Moravec 算子、SUSAN 算子、Harris 算子、Forstner 算子等。由于 Forstner 算子计算简便,且提取的特征点精度较高,因此本文采用 Forstner 算子^[10]提取图像中的特征点。

基于 Forstner 算子的特征点提取算法主要有以下 3 步:

1) 利用差分算子筛选初选点:计算像素 (x, y) 在上下左右 4 个方向的灰度差分绝对值 dg_1, dg_2, dg_3, dg_4 及其均值 M 。

$$\begin{cases} dg_1 = |g_{x,y} - g_{x+1,y}| \\ dg_2 = |g_{x,y} - g_{x,y+1}| \\ dg_3 = |g_{x,y} - g_{x-1,y}| \\ dg_4 = |g_{x,y} - g_{x,y-1}| \end{cases} \quad (2)$$

$$M = \text{mean}\{dg_1, dg_2, dg_3, dg_4\} \quad (3)$$

对给定的阈值 T (一般取 4.5),若 $M > T$,则 (x, y) 为初选点。

2) 根据兴趣值选择备选点:在以初选点 (x, y) 为中心的

3×3 的窗口内计算兴趣值 q 并选择备选点。

$$q = \frac{4 \text{Det}N}{(\text{tr}N)^2} \quad (4)$$

$$N = \begin{bmatrix} \sum g_u^2 & \sum g_u g_v \\ \sum g_u g_v & \sum g_v^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, N 为协方差矩阵; $\text{Det}N$ 为 N 的行列式; $\text{tr}N$ 为 N 的迹; $g_u = g_{x,y} - g_{x+1,y+1}$, $g_v = g_{x+1,y} - g_{x,y+1}$ 为 Roberts 梯度。

对于给定的阈值 T_q (一般取 1.0~1.5),若 $q > T_q$,则该点为备选点。

3) 提取极值点作为特征点:计算备选点 (x, y) 的权值 $w_{x,y}$,并以权值 $w_{x,y}$ 为依据选取网格中的极值点为特征点。

$$w_{x,y} = \frac{\text{Det}N}{\text{tr}N} \quad (6)$$

3 特征点匹配

所谓特征点匹配,就是在待配准图像中找到参考图像中每个特征点的唯一匹配点^[11]。本文算法通过粗匹配和精匹配两个步骤,建立待配准图像与参考图像的特征点之间正确的一一对应的匹配关系。

3.1 粗匹配——相关性原理

假设参考图像 X 和待配准图像 Y 的特征点集分别为 X_P 和 Y_Q (其中: P, Q 分别为基准图和待配准图的特征点数): $\{X_p = [x_p, y_p] | p=1 \dots P\}$, $\{Y_q = [x_q, y_q] | q=1 \dots Q\}$, 对 X_P 和 Y_Q 中的任意一点,均以该点为中心构造 $(2m+1)(2n+1)$ 像素的邻域,则两幅图像任意特征点对 (x_p, y_p) 和 (x_q, y_q) 的互相关系数(Cross-Correlation)为:

$$\rho = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{(2m+1)(2n+1)}}{\sqrt{(\sum X^2 - \frac{\sum X \sum X}{(2m+1) * (2n+1)}) * (\sum Y^2 - \frac{\sum Y \sum Y}{(2m+1) * (2n+1)})}} \quad (7)$$

式中, $\sum X$ 表示特征点 (x_p, y_p) 在图像 X 对应邻域的像素灰度值之和; $\sum Y$ 表示特征点 (x_q, y_q) 在图像 Y 对应邻域的像素灰度值之和; $\sum XY$ 表示两幅图像中对应像素的灰度值的乘积。

对参考图像 X 中的每一个特征点 (x_p, y_p) ,计算其与待配准图像特征点集中每点 (x_q, y_q) 的互相关系数,当所得互相关系数数值大于设定阈值时,认为 (x_q, y_q) 是 (x_p, y_p) 的匹配特征点。

由于同组多光谱图像间像差不大,正确的匹配特征点之间的像差应该在一定范围内,因此对于参考图像 X 中的每一个特征点,不必计算其与待配准图像特征点集中的每个特征点的互相关系数,而仅需计算该特征点与待配准图像 Y 相应区域内的特征点的互相关系数即可。结合先验知识,本文将搜索区域定义为以特征点为中心的 21 像素 \times 21 像素的区域,在该区域内搜索匹配点可以大大减少计算量,同时提高正确匹配率。

3.2 精匹配——空间距离约束

粗匹配后得到的初匹配点对一般存在两类误差:1)特征点自身定位的误差;2)误匹配点对。第一类误差无法避免,但只要正确匹配的点对数足够多,就可以通过最小二乘法消除该类误差对图像配准的影响。第二类误差误匹配点对的存在对图像变换参数的计算影响是巨大的,最小二乘法对其极为

敏感,通常只要有一个误匹配点对,就会使图像变换参数计算错误,导致配准失败^[11]。另外初匹配点对往往存在一对多的关系,即对参考图像中的一个特征点,在待配准图像中有若干个匹配点。因此必须对特征点加以校正,剔除误匹配点对,确立特征点之间一对一的关系。

设粗匹配后有 N 对初匹配点对,参考图像 X 和待配准图像 Y 的匹配点集分别为 X_N 和 Y_N : $\{X_N=[x_n, y_n] | n=1 \dots N\}$, $\{Y_N=[x_n, y_n] | n=1 \dots N\}$, 则待配准图像中的一个特征点 $Y_i(x, y)$ 是特征点 $X_i(x, y)$ 的正确匹配点的充要条件是 $Y_i(x, y)$ 到其他特征点正确对应点 $Y_j(x, y)$ ($0 < j \leq N$) 的距离 $dis_Y_{i,j}$ 和特征点 $X_i(x, y)$ 到其对应的特征点 $X_j(x, y)$ 的距离 $dis_X_{i,j}$ 相等^[11]。如图 2 所示, (a) 是参考图像, (b) 是待配准的图像, a 和 a' , b 和 b' , c 和 c' , d 和 d' 是正确的匹配点对, 而 e 和 e' 是误匹配点对。则 a 到 b 的距离和 a' 到 b' 的距离理论上应该相等, 即 $|ab|=|a'b'|$, 同理有 $|ac|=|a'c'|$, $|ad|=|a'd'|$, $|bc|=|b'c'|$, $|bd|=|b'd'|$, $|cd|=|c'd'|$ 。而 e 和 e' 到其它点的距离则不满足这个距离约束条件。由于特征点存在自身定位的误差, 即使是正确的匹配点对之间, 实际计算得到的距离也不可能完全相等, 一般认为误差在 0.5 个像素之内的都满足距离约束条件。

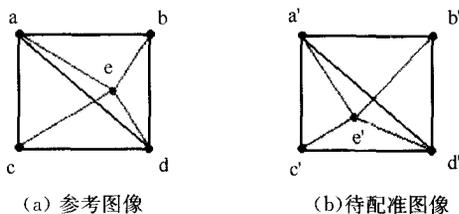


图 2 空间距离约束

然而,在未完成精匹配前,并不确定初匹配点对中哪些是正确的匹配点对,但其可以作为判定其他点对是否是正确匹配的依据。文献[11]提出设定阈值 NUM , 若 $dis_Y_{i,j}$ 和 $dis_X_{i,j}$ 相等的个数 num 与初匹配点对数 N 的比值大于 NUM , 则认为 $Y_i(x, y)$ 和 $X_i(x, y)$ 是正确的匹配点对。阈值 NUM 对精匹配的效果有重要影响, 由于实际图像质量的不同, 一个固定阈值很难满足不同图像的需要, 因此本文提出了自适应阈值 NUM 的改进空间距离约束方法, 步骤如下:

1) 初始值 $NUM=0.6$, 确定误匹配点的阈值 $NUM'=0.1$, 粗匹配后得到的初匹配点对数为 N , 正确的匹配点对数 $match=0$;

2) 对初匹配中的每一对匹配点对 $X_i(x, y)$ 和 $Y_i(x, y)$, 计算满足距离约束条件的点对个数 num ;

3) 若 $num > NUM \times N$, 则认为该点为正确的匹配点对, 予以保留, 同时 $match++$; 若 $num < NUM' \times N$, 则认为该点为错误的匹配点对, 将其剔除, 同时 $N--$;

4) 若最终得到的匹配点对较少 ($match < N \times 0.2$), 则 $NUM=NUM-0.5$, 重复上述 2)、3) 步; 若最终得到的匹配点对较多 ($match > N \times 0.8$), 则 $NUM=NUM+0.5$, 重复上述 2)、3) 步;

5) 重复 2)–4) 步, 直到获得适中的正确匹配点对数, 或当 $NUM > 1$ 或 $NUM < 0$ 时结束。

4 算法流程

算法流程如图 3 所示。

• 282 •

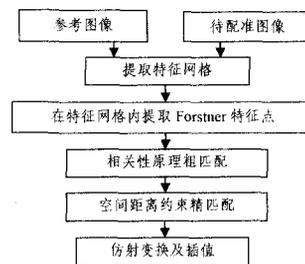


图 3 算法流程图

算法步骤:

1. 在参考图像和待配准图像上建立二级规则网格, 依据信息熵及特征分布均匀性准则选取特征网格;
2. 在各个特征网格中提取 Forstner 特征点;
3. 利用相关性原理建立参考图像与待配准图像特征点间的初匹配;
4. 根据改进的空间距离约束, 剔除初匹配点集中的误匹配;
5. 运用最小二乘法计算仿射变换参数, 并通过二次线性插值得到变换后的图像, 完成配准。

5 实验结果与分析

用 Visual C++ 6.0 在 PC 机 (Pentium Dual-Core 2.93 GHz, 2G 内存) 上实现了全部算法并进行了测试。在测试中采用均方根误差 (RMSE: Root Mean-Square Error)^[12] 及配准时间进行配准效果评价。

图 4 为测试图像, 图像大小为 512 像素 \times 512 像素, 灰度级 0~255。将 3 个谱段的图像分别作为 R, G, B 三通道图像, 其中图 4(b) 为参考图像, 图 4(a) 和 (c) 为待配准图像。

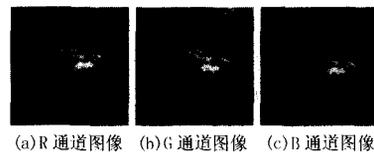


图 4 测试图像

以图 4(b) 为例, 在图像上建立二级规则网格, 细网格大小为 32 像素 \times 32 像素, 如图 5(a) 所示。计算每个细网格的熵值, 对熵值排在前 1/4 的细网格提取特征点 (如图 5(b)), 由于右侧方框内的图像相较左侧方框灰度变化明显, 熵值较高, 因此在右侧方框内提取了特征点。由图 5(b) 可以看出, 特征点集中在图像右侧, 并未均匀分布在整幅图像上, 这对后续变换参数的计算将产生不良影响。因此在此基础上划分粗网格, 进行二次特征网格选取并提取特征点 (如图 5(c))。可以看到, 左侧方框内也提取到了特征点, 并且特征点均匀地分布在整幅图像上。

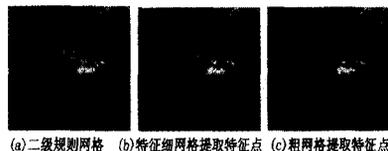


图 5 网格及特征点

图 6 给出配准结果, 图 6(a) 和 (b) 分别是图 4(a) 和 (c) 的

(下转第 297 页)



图3 基于CTD的相似图像压缩效果(PSNR=33.9115)

结束语 集合冗余压缩(SRC)技术实现图像压缩不仅要利用页内信息的统计特性,而且要利用页间信息的统计特性,图像相似性越大, SRC实现的压缩比越高。基于模板差分的压缩(CTD)方法依赖模板建立相似档案图像集合,是一种改进的最小-最大差分(MMD)方法,它比MMD方法具有更佳的性能,适合在档案图像信息系统中使用。

特定的应用应该选择特定的压缩方法。如果数据库中存在包括法律和历史的图像,则不允许有任何视觉信息的损失,因此压缩方案必须选择无损的。如果在基于网络传输的系统中,受到诸如带宽、功率和物理存储器的限制,则只需要保证文本可读性,使用有损压缩来提高压缩比。COT方法提供了有损和无损自由选择的灵活性。另一方面,定量评测一个档案图像压缩算法是否优秀是非常困难的,因为在档案图像信息系统中,某些评测参数不仅要有利于传统的空间减少,还要有利于图像的处理、图像的检索和图像数据的传输。

(上接第282页)

配准结果;图6(c)是将图6(a)、图4(b)和图6(b)作为R,G,B通道合成的BMP图像;图6(d)是图4(a)(b)(c)融合得到的BMP图像。表1给出本文精匹配方法与文献[11]的比较,从数据可以看出,采用自适应阈值的空间距离约束方法与文献[11]的固定阈值方法相比,能够得到更高的配准精度、更好的配准效果。

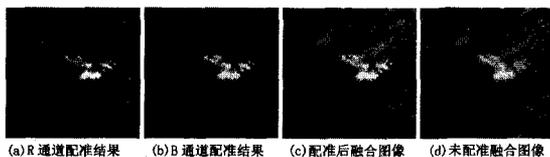


图6 配准结果网格及特征点

表1 本文方法与文献[11]比较

待配准图像	运行时间(s)	RMSE	
		文献[11]方法	本文方法
图4(a)	0.22	0.58	0.4
图4(c)	0.2	0.38	0.27

结束语 本文提出一种基于特征点的多光谱遥感图像自动配准算法。其通过特征网格选取步骤,减小计算量,同时确保了特征点的均匀分布。在粗匹配步骤中,依据多光谱图像的特点构造搜索窗口,提高了算法效率及初匹配的正确率。改进了精匹配的方法,提出了自适应阈值的空间距离约束方法,避免了人工阈值选取,使算法具有通用性。实验结果表明,该方法能够实现多光谱遥感图像的自动、快速、亚像素级配准。

参考文献

- [1] 杨有. 工商档案数字化[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2004,21(2):31-34
- [2] Karadimitriou K. Set redundancy, the enhanced compression model, and methods for compressing sets of similar images[D]. Department of Computer Science, Louisiana State University, Baton Rouge, La, USA, August 1996
- [3] Karadimitriou K, Tyler J M. The min-max differential method for large scale storage and compression of medical images[C]// Proceedings of Annual Molecular Biology and Biotechnology Conference. Baton Rouge, La, USA, 1996
- [4] Karadimitriou K, Tyler J M. Min-Max Compression Methods for medical image databases[J]. ACM SIGMOD Record, 1997, 26(1):47-52
- [5] Karadimitriou K, Tyler J M. The centroid method for compressing sets of similar images[J]. Pattern Recognition Letters, 1998, 19, 585-593
- [6] Lee J-D, Wan S-Y, Ma C-M, et al. Compression Sets of Similar Images Using Hybrid Compression Model[C]// Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME'02). Lausanne, Switzerland, Aug. 2002, 1:617-620
- [7] Ait-Auodia S, Gabis A. A comparison of set redundancy compression techniques[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2006, 1-13
- [8] Nielsen C, Xiaobo L. MST for lossy compression of image sets [C]// Proceedings of the Data Compression Conference (DCC'06). Vienna, Austria, March 2006:463
- [9] 杨有. 一种基于模板的档案图像压缩新方法[J]. 计算机科学, 2008, 35(6):265-267
- [10] 梁枫, 王平. 基于角点特征的高精度图像配准算法[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2010, 24(2), 87-90

参考文献

- [1] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11):977-1000
- [2] 谌安军, 陈炜, 毛士艺. 一种基于边缘的图像配准方法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(5):679-684
- [3] Pluim J P W, Antoine J B, Viergever M A. Mutual Information based Registration of Medical Images: A Survey [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(8):986-1004
- [4] Imam, Yetik S. A novel non-rigid registration method[C]// IEEE Southwest Symposium on Image Analysis & Interpretation (SSIAI2010). Austin, TX, 2010:45-48
- [5] Lin Hui, Du Pei-jun, Zhao Wei-chang, et al. Image Registration Based on Corner Detection And Affine Transformation[C]// 3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP2010). Yantai, China, 2010:2184-2188
- [6] Trias-Sanz R, Pierrot-Deseilligny M, Louchet J, et al. Methods for Fine Registration of Cadastre Graphs to Images[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(11):1990-2000
- [7] Wang Wei-an, Liu Yi, Zheng Bo, et al. A Method of Shape Based Multi-Sensor Image Registration [C] // 2009 Urban Remote Sensing Joint Event. Shanghai, 2009:1-5
- [8] Eastman R D, Moigne J L, Netanyahu N S. Research issues in image registration for remote sensing[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, MN, USA, 2007:1-8
- [9] 夏德深, 傅德胜. 计算机图像处理及应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2004
- [10] 郑明玲, 刘衡竹. 遥感图像配准中特征点选择的高性能算法研究及其实现[J]. 计算机学报, 2004, 27(9):1284-1289
- [11] 胡明昊, 任明武, 杨静宇. 一种快速实用的特征点匹配算法[J]. 计算机工程, 2004, 30(9):31-33
- [12] Yu Le, Zhang Deng-rong, Holden E-J. A Fast and Fully Automatic Registration Approach Based on Point[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(7):838-848