文章编号:1671-8860(2007)05-0381-04　　**文献标志码**:A

基于边缘特征匹配的遥感影像变化检测预处理方法

袁修孝[1]　宋　妍[1]

(1　武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘　要:提出了一种基于边缘特征匹配的遥感影像变化检测预处理方法,在进行不同时相遥感影像配准时,一并解求两期影像的辐射校正系数,同时实现两期影像的配准和辐射校正。实验表明,经预处理后,两期影像的色调基本一致,地物没有明显的几何变形。

关键词:变化检测;特征匹配;配准;辐射校正;随机采样一致性原则

中图法分类号:P231.5

遥感影像变化检测是近年来遥感应用研究的热点之一。图像预处理——多时相遥感影像间的配准和辐射校正是保证变化检测精度的关键操作。目前的各种预处理方法,往往将两者分开进行,难以保证处理的效率和精度。

传统配准方法以明显地物点(如道路交叉口)为配准要素,人工完成同名点匹配,使用一次或二次多项式拟合影像间的变形,在最小二乘平差中剔除误匹配点,并由正确的匹配点对求取影像间的变形系数。这种方法效率低,配准效果取决于操作员的经验,精度不易保证,往往需要多次反复。为此,人们进行了诸多改进,使影像的配准由基于影像低层特征(点特征)的方法向基于中、高层特征(边缘、轮廓、线)的方法发展;从基于全局函数纠正向基于局部变形分块纠正的方向发展[1-6]。

辐射校正方法大体可以分为绝对辐射校正和相对辐射校正。前者通过大气辐射传递码以及传感器的辐射响应值,得到成像时刻景物真实的光谱反射值。而后者则利用多时相遥感影像各个波段之间的校正方程,对影像进行归一化处理,不仅能够纠正大气状况带来的两幅影像间的差异,而且能够削弱传感器等因素带来的噪声。由于绝对辐射校正需要知道大气辐射传递码,而历史数据难以得到这个数值,因此,变化检测中大多采用相对辐射校正方法。常用的校正方法有非线性校正法和线性回归法,线性回归法又根据不同的样本点选择方法分为伪不变特征法、暗集-亮集法、未变化集辐射归一法[7]。一般利用直方图、二维散点图、阈值技术来提取样本点。这些方法各有优点,但都存在着过程复杂、计算量大、不易操作等缺点。

就多时相遥感影像的变化检测而言,由于两期影像间同时存在几何变形和辐射差异,预处理问题相当复杂。如何选择可靠性高的配准要素,发展合适的匹配策略,关系到配准的效果;如何选择大量正确的样本点,关系到辐射校正方法的成败。本文在总结近年来出现的各种影像配准、辐射校正方法的基础上,研究了一种基于特征匹配的影像变化检测预处理方法。

1　基本思想

采用边缘特征作为配准要素,以两期影像上边缘匹配点应满足边缘梯度角之差与边缘点间距离的加权和最小的条件作为配准策略,在匹配出大量点的基础上,根据随机采样一致性原则(random sample consensus,RANSAC)[8]剔除误匹配点,最后应用仿射变换模型进行两期影像的配准。同时,视大量匹配点对为不变目标,将匹配出的点对选作

收稿日期:2007-01-06。

项目来源:国家 973 计划资助项目(2006CB701302);全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(200142);国家教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0438)。

相对辐射校正的回归样本点，再次运用 PANSAC 算法以最小误差中值为度量，求得两期影像的辐射校正系数，从而在进行多时相遥感影像精确配准的同时一并解求两期影像的辐射校正系数。

2 基于边缘特征匹配的影像配准

2.1 匹配要素

考虑到影像上存在大量的边缘特征，且边缘提取算法较为成熟，本文以边缘点作为配准要素。本文采用 Canny 算子在两期影像中提取边缘，生成二值化边缘影像，同时计算各个边缘点的梯度方向角。

2.2 匹配策略

基于相关系数的匹配仅是灰度线性变化的不变量[9]，对于两期影像的匹配显然缺乏稳健性。由于基于边缘特征的匹配不受辐射差异的影响，本文从方法的性能和可行性出发，选择了边缘匹配方法。匹配前，选取 3～4 个同名点进行人工配准，采用式(1)作为边缘点的匹配策略。其中 a、b 的选择取决于人工配准后两幅影像间的最大残差。如距离残差为 10 pixels 时，$a=0.1$；旋转角度残差为 0.001 rms 时，$b=1\ 000$。对提取出来的每个边缘点在一定的搜索范围内进行匹配，保留 c 值最小的点作为当前点的匹配点。为了保证匹配的可靠性，分别以 t_1 和 t_2 时刻的影像作为参考影像进行双向匹配，保留两次都匹配出来的点作为匹配的初始点集。

$$c = a \cdot d + b \cdot |\theta_{t1} - \theta_{t2}| \tag{1}$$

式中，$a=1/d_{\max}$；$b=1/r_{\max}$；d 为两时期影像间特征点的距离，以像素为单位；θ_{t1}、θ_{t2} 为 t_1、t_2 时刻的边缘点梯度方向角，以 rad 为单位；$d_{\max}$ 为手工配准后同名点之间的最大距离，以像素为单位；$r_{\max}$ 为两期影像同名边缘像素梯度方向角的最大差值，以 rad 为单位。

2.3 变形方程

由于遥感影像具有高空成像和窄视场角的特点，可以用平行光投影来近似表达影像与物方空间的投影关系，这一近似表达对于大多数遥感影像(如 TM、SPOT、IKONOS、QuickBird)都是成立的。研究表明，采用仿射变换模型进行影像定位定向参数的解算可取得令人满意的效果[3]。因此，本文将两期影像之间的变形用仿射变换模型表示：

$$\begin{aligned} x &= m_0 + m_1 x' + m_2 y' \\ y &= n_0 + n_1 x' + n_2 y' \end{aligned} \tag{2}$$

式中，(x,y) 为参考影像坐标；(x',y') 为待配准影像坐标；$m_0, m_1, \cdots, n_2$ 为仿射变换系数。

2.4 误匹配点剔除

从初始匹配点对中随机选取 3 个匹配点对作为样本，进行变形方程(2)的参数解算。在初始匹配点对上，统计在限差 ε 范围内的匹配点数目(ninliers)。最后选取 ninliers 最大的匹配点集作为正确匹配点对集，同时删除误匹配点。

在 RANSAC 框架下进行仿射变换参数的求解需要确定随机采样次数 N 和符合模型的限差 ε。理想情况下，每个可能的数据子集均应考虑，这时的 N 值会非常大。Rousseeuw 指出[10]，如果子集大小为 s，粗差点所占比例为 Q，那么在置信度 P 下至少需要计算的子集数为：

$$N = \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-(1-Q)^s)} \tag{3}$$

2.5 仿射变换系数解求

在获得初始匹配边缘点集后，可按图 1 计算仿射变换系数。

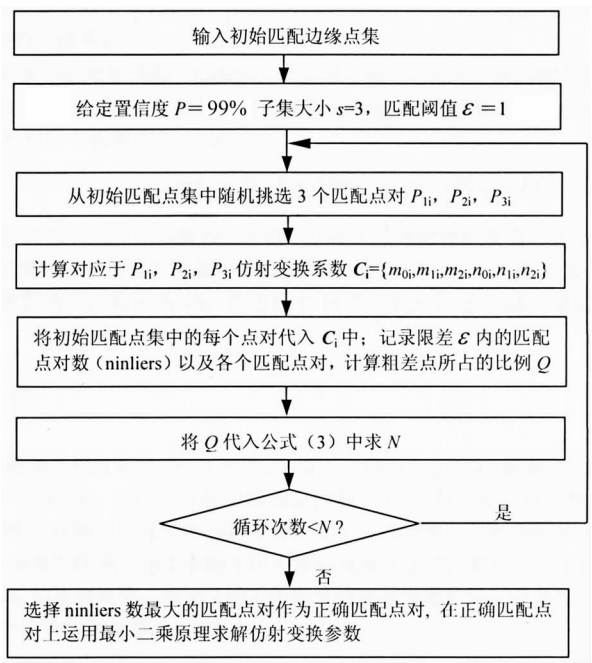

图 1 仿射变换流程图

Fig. 1 Flowchart of Affine Transformation

2.6 配准精度评定

在两期原始影像对中，人工选取分布均匀的 n 对同名像点，依据计算出来的仿射变换系数，根据式(4)进行配准精度的评定：

$$R_x = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m_0 + m_1 x_{2i} + m_2 y_{2i} - x_{1i})^2}$$

$$R_y = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(n_0 + n_1 x_{2i} + n_2 y_{2i} - y_{1i})^2}$$

$$R_e = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \tag{4}$$

式中，(x_{1i}, y_{1i})为参考影像像点坐标；(x_{2i}, y_{2i})为待配准影像同名像点坐标；n 为同名点数；R_x、R_y 分别为 x 向、y 向和位置均方根误差。

3　辐射校正系数解求

采用线性回归法，假定待纠正影像的灰度值 D_{N_1} 与参考影像的灰度值 D_{N_2} 之间存在如下线性关系：

$$D_{N_1} = g \cdot D_{N_2} + O \tag{5}$$

式中，g 为两幅影像间的拉伸系数；O 为两幅影像间的偏移系数。

对式(5)采用误差中值最小策略(LMeds)来估算 g 和 O。首先，从匹配点集中随机挑选出两对匹配点 P_{1i}、P_{2i}，进行公式(5)中辐射校正参数 $\boldsymbol{C}_i = \{g_i, O_i\}$的解算；然后，将匹配点集中每个匹配点代入 $\boldsymbol{C}_i$ 中，统计参数 $\boldsymbol{C}_i$ 所对应的误差中值 m_i：

$$m_i = \mathrm{median}\{D_{N_{1j}} - g_i \cdot D_{N_{2j}} - O_i\} \quad 1 \leqslant j \leqslant N \tag{6}$$

取 m_i 最小的参数 $\boldsymbol{C}_i$ 作为最终的辐射校正参数。LMeds 策略隐含地认为小于 m_i 值的点为限差内的点，因此默认 RANSAC 算法中，在匹配点集中存在 50%的粗差点(Q=50%)。设子集大小 s=2，置信度 P=99%，根据式(3)求得随机采样次数 N 为 16。即在进行了 16 次迭代后，选择 m_i 值最小时对应的 g 和 O 作为辐射校正参数。

4　实验及其结果分析

封 2 彩图 1 为用于实验的两景不同时相的 SPOT 影像，影像大小均为 512×512 像素。封 2 彩图 2 是用 Erdas 软件 Swipe 功能将两景影像叠加显示的结果。封 2 彩图 2(a)红色分隔线左侧显示 1992 年影像，右侧显示 1987 年影像，由于获取时间不同，两景影像存在明显的几何和辐射差异。为了更清楚地显示，于两影像中分别截取大小为 100 像素×50 像素的区域(封 2 彩图 1 中的 1 区)，将其放大 2 倍后叠加显示于封 2 彩图 2(b)。可以看到，两影像的同一道路存在明显的几何错位。由于 1987 年影像的视觉效果较好，将其作为参考影像，根据上文所述方法，对 1992 年影像进行预处理。

首先运用 Canny 算子对两期影像进行边缘提取，然后根据 §2.2 中的匹配策略进行边缘匹配，得到两期影像上正确匹配的边缘特征及仿射变换参数，再根据匹配出的特征点采用 §3 的方法求得两期影像的相对辐射校正系数，最后对 1992 年影像进行辐射校正和仿射变换。

封 2 彩图 3 显示了两期影像上正确匹配的边缘，表 1 给出了边缘匹配的结果。从表 1 可以看出，根据本文的匹配策略从两期影像上匹配出了大量的特征点，为影像的预处理奠定了基础。为了评价本文方法的配准效果，在原始影像中，人工选取了 25 对同名点(封 2 彩图 4 中绿色小三角点)，利用这些点解算仿射变换系数并实施影像配准。为了比较本文方法与人工配准的精度，又在原始影像人工选取了 10 对同名点(封 2 彩图 4 中绿色十字丝)，根据式(4)计算得到表 2 的配准精度。从表 2 可以看出，用本文方法得到的影像配准精度优于 0.25 像素，明显高于人工配准所能达到的 0.55 像素的精度，满足了多时相遥感影像变化检测的影像配准精度要求(一般小于 0.5 像素[11])。

表 1　边缘匹配结果

Tab. 1　Edge Matching Result

	SPOT 影像对
RANSAC 算法配准阈值 /像素	1
边缘匹配得到的匹配点数	12 437
剔除误匹配点后的匹配点数	11 954

表 2　配准精度 /像素

Tab. 2　Registration Accuracy

	人工配准	基于边缘特征的配准
R_x	0.356	0.124
R_y	0.425	0.187
R_e	0.555	0.225

根据匹配出的 11 954 对边缘点计算出相对辐射校正系数的拉伸系数 g 为 1.43，偏移系数 O 为−5。封 2 彩图 5 为相对辐射校正拟合直线，其斜率代表拉伸系数 g，截距代表偏移系数 O。为了说明本文的相对辐射校正效果，将其与传统的直方图匹配辐射校正方法[7]的结果进行了比较。本文以 1987 年影像作为参考影像，用 Erdas 软件的 Histogram Equalization 功能对 1992 年影像进行了直方图匹配辐射校正。

本文采用均方根误差和变化范围两个统计特征参数比较两种影像辐射校正方法。

均方根误差 R_e 用于检验归一化图像与参考图像的相似性。如果 R_e 的值较小，则辐射校正后的影像与参考影像的辐射值较接近，说明相对辐射校正效果较理想。计算公式为：

$$R_e = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i' - y_i)^2} \tag{7}$$

式中，y_i'为待配准影像经过辐射校正后的像元灰度值；y_i 为参考影像的像元灰度值。

变化范围为影像中像元灰度值的最大值与最小值之差。一般说来，变化范围越大，说明影像包含了越多的细节，辐射校正后影像的质量越好。

表3给出了本文与直方图匹配两种辐射校正方法的特征参数。从表3可以看出，前者较后者在保证了较大变化范围的基础上有更小的 R_e 值，从而定量地说明了本文方法的相对辐射校正效果较传统方法要好。

表3 两种相对辐射校正方法的比较

Tab.3 Comparison of Two Kinds of Radiometric Correction Methods

	本文方法	直方图匹配
均方根误差	57.846	62.027
最小值	10	31
最大值	255	255
变化范围	245	224

从封2彩图5可以看出，除了拟合直线上有大量的匹配点外，还有许多点远离拟合直线(图中黄色的点)。这是因为特征匹配中的边缘点有可能出现在边缘特征相似度高而实际地物已经发生了变化的地方(如封2彩图1中的2区)。封2彩图6为将其放大2倍显示的图像。

从封2彩图6可以清晰看出，1987年2区是一块空地，1992年发生了变化。然而，根据本文的匹配策略，仍旧匹配出了非常多的边缘点(绿色十字丝)。这说明本文方法在此种情况下仍可以较好地进行影像辐射校正，因为大量的匹配点并未发生变化，由这些点就可以保证辐射校正的正确性。

封2彩图7为预处理后的影像。将图7(b)、7(c)分别与图2(a)、2(b)比较可以发现，两期影像的色调基本一致，地物不再有明显的错位，这进一步说明了本文方法的有效性。

5 结 语

针对多时相遥感影像变化检测前的图像预处理问题，本文提出了一种影像配准与相对辐射校正同步进行的方法，半自动地解决了影像配准和相对辐射校正问题，实验取得了较好的配准精度和辐射校正结果。需要指出的是，在运用RANSAC算法时要求有大量正确匹配的点作保障，发展更为稳健的匹配策略以及剔除误匹配点的算法有待于进一步研究。

参 考 文 献

[1] 文贡坚. 从新卫星遥感影像中自动发现变化区域[D]. 武汉：武汉大学，2003

[2] Hong T D, Schwengerdt R A. A Robust Technique for Precise Registration of Radar and Optical Satellite Images[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(5):585-593

[3] Habib A, Al-Ruzouq R. Semi-automatic Registration of Multi-source Satellite Imagery with Varying Geometric Resolution[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(3):325-332

[4] Dai X L, Khorram S. A Feature-Based Image Registration Algorithm Using Improved Chain-Code Representation Combined with Invariant Moments[J]. IEEE Trans of Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5):2 351-2 362

[5] Jing Y, Qiu J. Feature Based Image Registration Algorithm Using Invariant Line Moments[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(9):1 114-1 117

[6] 张祖勋，张剑清. 山区遥感(RS)影像的小面元微分纠正[C]. 第三届海峡两岸测绘发展研讨会，香港，2000

[7] Yang C J, Lo C P. Relative Radiometric Normalization Performance for Change Detection from Multidate Satellite Images[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2000, 66(8):967-980

[8] Kim T, Im Y J. Automatic Satellite Image Registration by Combination of Matching and Random Sample Consensus[J]. IEEE Trans of Geoscience and Remote Sensing, 2005, 41(5):1 111-1 117

[9] 张祖勋，张剑清. 数字摄影测量[M]. 武汉：武汉大学出版社，1997

[10] Rousseeuw P J, Leroy A M. Robust Regression and Outlier Detection[M]. New York: Wiley Press, 1987

[11] 张路. 基于多元统计分析的遥感影像变化检测方法研究[D]. 武汉：武汉大学，2004

第一作者简介：袁修孝，博士，教授，博士生导师。主要从事航空航天遥感高精度对地目标定位理论与方法、高分辨率卫星遥感影像几何处理、影像变化检测与数据更新等研究与教学工作。代表成果：GPS辅助空中三角测量等。已出版专著2部，发表论文60余篇。

E-mail：yxxqxhyw@public.wh.hb.cn

(下转第393页)

Representation Methods of Spatial Objects with Uncertainty and Their Application in GIS

CHENG Tao[1,2]　*DENG Min*[3]　*LI Zhilin*[4]

(1　Department of Geomatic Engineering, University College London, Gower Street, WC1E 6BT, London, United Kingdom)

(2　School of Geography and Urban Planning, Sun Yatsen University, 135 West Xingang Road, Guangzhou 510275, China)

(3　Department of Surveying and Geo-informatics, Central South University, Yuelushan, Changsha 410083, China)

(4　Department of Land Surveying and Geo-informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

Abstract: This paper investigates the causes and origins of uncertainties in spatial objects and their classifications. Then, several mathematical tools including fuzzy set theory, rough set theory and cloud theory are presented to handle these uncertainties. Later on, the linkages between these theories are further explored and a unified representation based upon the cloud theory is proposed. A practical example of a river with different water levels is provided to illustrate the usefulness of the methods proposed.

Key words: spatial object; uncertainty; mechanism; fuzziness; cloud theory

About the first author: CHENG Tao, lecturer, research interests span uncertainty in geographic information, spatio-temporal data models, the spatial data mining and knowledge discovery, with application on coastal zone management, transportation planning and epidemic study.

E-mail: tao.cheng@ucl.ac.uk

(上接第 384 页)

Image Preprocessing Method Based on Edge Feature Matching for Change Detection in Multi-temporal Remotely Sensed Imageries

YUAN Xiuxiao[1]　*SONG Yan*[1]

(1　School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: A novel image preprocessing method is proposed. The method is based on edge feature matching and is designed for change detection to multi-temporal remotely sensed imageries. It can make the image registration and relative radiometric correction at the same time. The experiment results show that the preprocessed images have identical tonality and high registration accuracy. These meet the requirement for multi-temporal imagery change detection.

Key words: image change detection; feature-based matching; registration; radiometric correction; RANSAC

About the first author: YUAN Xiuxiao, Ph.D, professor, Ph.D supervisor. He is concentrated on the research and education in high precision photogrammetric positioning, POS-supported aerial photogrammetry, geometric processing of high-resolution satellite imageries, and image change detection and data update, etc. He published 2 monographs and more than 60 papers.

E-mail: yxxqxhyw@public.wh.hb.cn