

一种基于边缘轮廓信息的多源遥感图像 子像素匹配定位方法

张 斌 朱正中 葛成辉 吴佑寿

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 提出了一种基于图像边缘轮廓信息的多源遥感图像匹配定位方法,其目的是利用定位精度较高的高分辨率遥感图像对低分辨率图像实现子像素级的匹配定位.该方法有效地利用了多源遥感图像中共有的区域结构信息,将特征匹配和最小二乘影像匹配相结合,具有较好的普适性,且运算快速、抗噪性能好.采用该方法进行 NOAA AVHRR 图像和 Landsat TM 图像、1: 100 万数字地图的边缘图像匹配,并应用于 NOAA AVHRR 图像的几何精校正中,可实现精确的子像素匹配.

关键词 图像匹配 阈值选取 图像分割 多传感器图像

中图法分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)10-0830-06

A Subpixel Multisensor Image Registration Method Based on Edge and Contour Information

ZHANG Bin, ZHU Zheng-zhong, GE Cheng-hui, WU You-shou

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract A subpixel multisensor image registration method based on edge and contour information is proposed in this paper. The purpose of this method is to realize subpixel matching of low-resolution images by using high-resolution images. By effectively considering the edge and contour information preserved in the multisensor images, and unifying feature-based matching and least-square matching, this method is work well in general. In addition, it is computationally efficient, and robust to noise. The application of image registration between NOAA-AVHRR, Landsat TM and 1: 1 000 000 digital map data have shown that.

Keywords Image registration, Threshold selection, Image segmentation, Multisensor Image

0 引言

在具有不同空间分辨率的多源遥感图像的影像匹配中,精确定位是极为重要的前提,它通常是利用定位精度较高的高分辨率图像来实现对低分辨率图像的匹配定位.因此为提高两种不同分辨率遥感图像的匹配精度,需合理选择匹配定位方法.

对于各种各样的匹配定位方法,按其利用图像信息的不同,可划分为两类,即一类是直接基于图像灰度信息(如单个象元或一定区域内象元灰度信息)

的匹配定位方法;另一类是基于图像特征空间信息(如边缘轮廓信息,变换域信息等)的匹配定位方法.对于同一场景的、具有不同空间分辨率的多传感器图像,由于获取条件(时相、波段频谱等)及视点的不同,获取的图像在灰度特性上存在着一定的差异,因而使得直接基于图像灰度信息的匹配定位方法难以适用于各种实际应用.

为此,本文利用不同空间分辨率的多传感器图像中可对同一场景进行有效描述的边缘轮廓信息,提出了一种基于图像边缘轮廓信息的多源遥感图像匹配定位方法.该方法有效地利用了多源遥感图像中共有的

区域结构信息,将边缘轮廓信息的特征匹配和最小二乘影象匹配相结合,具有较好的普适性,且运算快速、抗噪性能好.通过采用该方法进行 NOAA AVHRR 图象和 Landsat TM 图象、1:100 万数字地图的边缘图象匹配的试验表明,该方法可提取定位精度很高的地面控制块对,而且该方法已应用于 NOAA AVHRR 数据的几何精校正中,并实现了精确的子象素匹配.

1 基于图象边缘轮廓信息的多源遥感图象匹配定位方法

本文提出的多源遥感图象匹配定位方法可描述如下:首先,对不同分辨率的图象作相同的地图投影变换,并对低分辨率的图象进行内插细化,以便对它实现子象素级的高精度定位;然后,采用改进的基于直方图指数凸包的阈值化分割算法提取多传感器图象中的边缘轮廓信息,并在相同的空间分辨率水平上,对多传感器图象中的边缘轮廓采用对函数度量进行匹配;最后,利用匹配所得的控制块进行多源遥感图象的最小二乘匹配定位.

本文选择边缘轮廓清晰的局部图象作为匹配定位用的控制块.为提高两种不同分辨率遥感图象的匹配精度,本文进行了一系列相关处理:首先,在进行图象匹配定位以前,对有关图象进行几何校正和

相同的地图投影变换,使其在同一种地图投影变换下基本达到象元级的定位精度;其次,在匹配定位中,为了保证低分辨率遥感图象的子象素级定位精度,以及便于检验定位精度,因而对低分辨率遥感图象进行了内插细化处理,使它可以在其相应的子象素级水平上与高分辨率图象进行精确配准,以提高两种图象之间的匹配精度.关于对低分辨率遥感图象的内插细化处理,详见文献[1].

1.1 多传感器图象中边缘轮廓信息的提取

本文采用一种改进的基于直方图指数凸包的阈值化分割算法进行多传感器图象中边缘轮廓信息的自动提取.本文所提取的边缘轮廓信息主要是遥感图象上海岸线、湖泊等具有明显地理标志的图象边缘信息.该算法是在文献[2]提出的直方图指数凸包分割算法的基础上加以改进而提出的.

设 $h(k), k \in [0, n]$ 为图象的直方图函数, n 为最大灰度级, $\bar{h}(k)$ 为多边形凸包(即包含 $h(k)$ 的最小凸多边形).在多边形凸包 $\bar{h}(k)$ 的基础上,可引出直方图指数凸包 $\bar{h}_e(k)$ 的定义,求取直方图指数凸包 $\bar{h}_e(k)$ 的过程如下,即先求 $\ln h(k)$ 的多边形凸包 $\ln \bar{h}(k)$, 然后由 $\exp[\ln \bar{h}(k)]$ 反过来求得 $\bar{h}_e(k)$. 假设 $h(k) \neq 0$ 的最小和最大灰度级分别为 L_{\min} 和 L_{\max} , 对于 $h(k)$, $k \in [L_i, L_{i+1}], L_{\min} \leq L_i \leq L_{i+1} \leq L_{\max}$, 则求取灰度级范围 $[L_i, L_{i+1}]$ 内的指数凸包 $\bar{h}_e(k; L_i, L_{i+1})$ 可如下表示

$$\bar{h}_e(k; L_i, L_{i+1}) = \begin{cases} \max \left| h(k), \max_{p, q} \left| h(p) \exp \left[\frac{k-p}{q-p} [\ln h(q) - \ln h(p)] \right] \right| \right|, \\ L_i \leq p < k < q \leq L_{i+1}, h(p) \neq 0, h(q) \neq 0 \\ h(k), \text{ 如果 } k = L_i, L_{i+1} \text{ 或 } h(k) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

令灰度级范围 $[L_i, L_{i+1}]$ 内的指数凸包残差为

$$r_e(L_i, L_{i+1}) = \sum_{k=L_i}^{L_{i+1}} [\bar{h}_e(k; L_i, L_{i+1}) - h(k)] \quad (2)$$

它可以用来描述在灰度级范围 $[L_i, L_{i+1}]$ 内的指数凸包 $\bar{h}_e(k; L_i, L_{i+1})$ 对原始直方图 $h(k)$ 的逼近程度,而且也反映了 $h(k)$ 在灰度级范围 $[L_i, L_{i+1}]$ 的凸凹程度.与多边形凸包 $\bar{h}(k; L_i, L_{i+1})$ 相比较,指数凸包 $\bar{h}_e(k; L_i, L_{i+1})$ 能更好地逼近原始直方图 $h(k)$, 从而有利于阈值化分割时的阈值选取,因而本文选择基于直方图指数凸包选取阈值门限的阈值化分割算法.

在基于直方图指数凸包的阈值化分割算法中,假设将灰度级范围 $[L_{\min}, L_{\max}]$ 分成 N 类,且选取的阈值门限分别为 t_1, t_2, \dots, t_{N-1} , 并定义指数凸包的整体残差为

$$R_N(L_{\min}, t_1, t_2, \dots, t_{N-1}, L_{\max}) = r_e(L_{\min}, t_1 - 1) + r_e(t_1, t_2 - 1) + \dots + r_e(t_{N-1}, L_{\max}) \quad (3)$$

则选取的阈值门限 t_1, t_2, \dots, t_{N-1} 应使得

$$R_N(L_{\min}, t_1, t_2, \dots, t_{N-1}, L_{\max}) = \min \quad (4)$$

在本文的边界提取中,需将原始图象分为两类(即 $N=2$), 于是只要确定阈值门限 t_1 , 使

$$R_2(L_{\min}, t_1, L_{\max}) = r_e(L_{\min}, t_1 - 1) + r_e(t_1, L_{\max}) = \min \quad (5)$$

则由阈值门限 t_1 即可将图象分为两类,在此基础上进一步可提取得到边缘轮廓信息.

在对实际的 NOAA AVHRR 图象、Landsat MSS 和 TM 图象进行阈值分割处理中,我们发现,上述采用直方图指数凸包选取阈值门限的方法对噪声

往往很敏感,有时会导致阈值门限选择不当,使得直方图上的象素几乎全落在选取阈值门限的一边,而阈值门限的另一边几乎没有.因此,在阈值分割前必须对直方图进行一定的预处理.

为此,又引入众数(Population)的概念^[3],即通过众数检验来消除该影响.定义灰度值*i*处的众数*P_i*为

$$P_i = \sum_{j=L_{\min}}^{i-1} h(j) \sum_{j=i}^{L_{\max}} h(j), L_{\min} \leq i \leq L_{\max} \quad (6)$$

众数*P_i*表示了图象中某个门限两边所具有的象素个数的情况.在求取直方图指数凸包之前,先去掉一部分众数很小的灰度级象素,再对直方图进行相应的均衡处理.这样做的好处是可消除图象高亮度区(灰度值较大)、低亮度区(灰度值较小)中的噪声影响,使得选取的阈值门限不致落在这部分噪声所在的虚假区域内.NOAA AVHRR 图象、Landsat MSS 和 TM 图象的阈值分割实验结果表明:(1)引入众数检验后,可使选取的阈值门限更为合理,有利于图象的阈值化分割;(2)与经典的基于直方图的阈值化分割算法 Otsu 法^[4]相比,本文采用改进的基于直方图指数凸包的阈值化分割算法,其图象分割效果略优.

对阈值分割后的边界图象,我们也进行了一些相应的后处理(如:滤除边缘轮廓信息中的孤立边界点等),以利于后续的边界图象匹配.

1.2 边界图象匹配

图象匹配的基本原理是根据两个图象的相似性度量,在两个图象(实测图、基准图)的相对移动中找出其相似性度量值最大或差别最小的位置,而常用的相似性度量^[5]有最小距离度量、最大相关度量、不变矩度量等.针对阈值分割后得到的边界图象为二值图象的特点,本文采用了一种简单直观的相似性度量——对函数度量方法^[5],并提出了基于边界重心的冲突仲裁算法,将其应用于边界图象的自动匹配中,已取得较好效果.与常用的几种相似性度量相比较,对函数度量方法更适合于二值边缘图象匹配,并具有简单、快速及抗噪性能强的优点.现将该方法简介如下:

设实测图大小为 $N_1 \times N_2$, 基准图大小为 $M_1 \times M_2$ (通常 $M_1 > N_1, M_2 > N_2$), 实测图和基准图坐标 (x, y) 处的灰度值分别为 $g(x, y)$ 和 $f(x, y)$, 则可将实测图表示为 $N_1 \times N_2 \times 1$ 维图象矢量, 简记为 \mathbf{G} , 即 $\mathbf{G} = [g(0, 0), g(0, 1), \dots, g(1, 0), g(1, 1), \dots, g(N_1 - 1, N_2 - 1)]^T$; 同样, 将起始位置为 (u, v) , 并与实测图具有同样大小的基准子图也表示为 $N_1 \times N_2 \times 1$ 维图象矢量, 简记为 $\mathbf{F}_{u,v}$, 即

$$\mathbf{F}_{u,v} = [f(u, v), f(u, v + 1), \dots, f(u + 1, v), f(u + 1, v + 1), \dots, f(u + N_1 - 1, v + N_2 - 1)]^T, \\ 0 \leq u \leq M_1 - N_1, 0 \leq v \leq M_2 - N_2.$$

设实测图和基准子图中的象元灰度级范围为 $[0, n]$, 则可在实测图中任一灰度级 r 与起始位置为 (u, v) 的基准子图中任一灰度级 s 之间建立相应的对函数 $N_{rs}(u, v)$. 定义对函数 $N_{rs}(u, v)$ 为实测图中灰度级为 r 的各个象元与起始位置为 (u, v) 的基准子图中相应点处灰度级为 s 的各个象元所构成的象元对数目, 即

$$N_{rs}(u, v) = NUM(\{(r, s) | (g(x, y) = r) \cap (f(x + u, y + v) = s), \forall x \in [0, N_1], \forall y \in [0, N_2]\}) \quad (7)$$

其中, $NUM(\cdot)$ 为计算括号内集合元素个数的运算, $r, s \in [0, n]$.

如果实测图和基准图为二值边缘图象, 则其对函数的定义可参照灰度图象的定义, 记为 $N_{rs}(u, v)$, $r, s \in [0, 1]$. 其中的 $r, s = 1$ 表示为边缘象元.

利用对函数可以定义几种形式的度量算法, 本文采用对函数的乘积度量算法, 而对于二值图象, 其对函数的乘积度量算法可以表示如下:

$$\left. \begin{aligned} R(u, v) &= \frac{N_{00}(u, v)}{N_{00}(u, v) + N_{01}(u, v)} \times \frac{N_{11}(u, v)}{N_{10}(u, v) + N_{11}(u, v)} \\ \max_{u,v} R(u, v), & 0 \leq u \leq M_1 - N_1, \\ & 0 \leq v \leq M_2 - N_2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, $R(u, v)$ 是实际匹配的象元对数目与每一类可能匹配的象元对数目之比的连乘积, $R(u, v)$ 越大, 表明两幅图象的相似性越好.

采用对函数的乘积度量算法进行二值化边界图象匹配时, 如果基准图中有两个或两个以上的试验点具有相同的最大相关系数 $R(u, v)$, 本文就采取测量边界重心的方法来寻找最佳匹配位置 (u', v') , 即求得的实测图和在试验点 (u, v) 处基准子图的边界重心位置 (\bar{x}_g, \bar{y}_g) 及 (\bar{x}_f, \bar{y}_f) 如下

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_g &= \frac{\sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} ig(i, j)}{N_1 - 1N_2 - 1} \\ \bar{x}_f &= \frac{\sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} jg(i, j)}{N_1 - 1N_2 - 1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \bar{x}_f = \frac{\sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} if(i+u, j+v)}{\sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} f(i+u, j+v)} \\ \bar{y}_f = \frac{\sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} jf(i+u, j+v)}{\sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} f(i+u, j+v)} \end{cases} \quad (10)$$

再按下面方法

$$\begin{cases} D(u, v) = \sqrt{(\bar{x}_g - \bar{x}_f)^2 + (\bar{y}_g - \bar{y}_f)^2} \\ \min_{u, v} D(u, v), 0 \leq u \leq M_1 - N_1, 0 \leq v \leq M_2 - N_2 \end{cases} \quad (11)$$

求得的最佳匹配点 (u', v') , 即为匹配位置。

1.3 最小二乘的影象匹配定位

通过上述边界图象匹配后, 可得到一系列在对函数乘积度量下实现最佳匹配的实测图和基准子图对应的图象块中心坐标 (x_i, y_i) 和 (ϵ_i, η_i) . 它们将作为实测图与基准图之间的控制块对, 根据上述建立的实测图与基准图的对应几何变换关系, 即可在最小二乘误差准则下进行实测图象与基准图的匹配定位, 亦称为最小二乘匹配定位. 假设实测图与基准图的对应几何变换关系以二元二次多项式表示, 即

$$\begin{cases} \epsilon_i = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy + a_{20}x^2 + a_{02}y^2 \\ \eta_i = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y + b_{11}xy + b_{20}x^2 + b_{02}y^2 \end{cases} \quad (12)$$

已知 (x_i, y_i) 和 (ϵ_i, η_i) , $i = 1, 2, \dots, M, M \geq 6$, 则可将实测图与基准图的匹配定位问题转化为求方程组

$$\begin{cases} \mathbf{WA} = \mathbf{U} \\ \mathbf{WB} = \mathbf{V} \end{cases} \quad (13)$$

的线性最小二乘解 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} , 其中

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= [a_{00} \ a_{10} \ a_{01} \ a_{11} \ a_{20} \ a_{02}]^T \\ \mathbf{B} &= [b_{00} \ b_{10} \ b_{01} \ b_{11} \ b_{20} \ b_{02}]^T \\ \mathbf{U} &= [\epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \dots \ \epsilon_M]^T \\ \mathbf{V} &= [\eta_1 \ \eta_2 \ \dots \ \eta_M]^T \\ \mathbf{W} &= \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_M & y_M & x_M y_M & x_M^2 & y_M^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

只要 \mathbf{W} 的秩 $N = 6$, 则存在 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 的最小二乘解

$$\begin{cases} \mathbf{A} = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{U} \\ \mathbf{B} = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{V} \end{cases} \quad (15)$$

需要指出的是, 在本文的最小二乘影象匹配定位中, 假设实测图与基准图的对应几何变换关系可

采用二元二次、二元一次多项式近似, 其基本出发点是: 采用可选的纠正多项式(二元二次、二元一次多项式) 直接对实测图的几何畸变模型进行数学模拟, 认为实测图的几何畸变总体上可以看作是平移、缩放、旋转、仿射、偏扭、弯曲以及二次多项式基本变形的综合作用. 这样一来, 即可以回避实测图的复杂成像空间几何过程, 以建立实测图与基准图的对应几何变换关系.

另外, 实测图与基准图的对应几何变换关系的选择, 即纠正多项式阶数的选择, 是与影象匹配定位精度要求、实测图与基准图中能分辨并可作控制块的 GCBs (Ground Control Blocks, 地面控制块) 数目密切相关, 而且从理论上说, 纠正多项式的阶数就决定了选取 GCBs 的最少数目. 对二元 N 次多项式来说, 其选取的 GCBs 数目 $M \geq (N+1)(N+2)/2$, 因此在实际应用中, 在满足影象匹配定位精度要求的情况下, 应使纠正多项式的阶数越低越好; 同时, 还应保证选取 GCBs 的高精度和高质量, 并使 GCBs 空间分布合理, 以减少误匹配和提高影象匹配精度.

2 应用及结果

用本文所述的多源遥感图象匹配定位方法进行 NOAA AVHRR 图象和 Landsat TM 图象、1: 100 万数字地图的边缘图象匹配, 并应用于 NOAA AVHRR 图象的几何精校正中, 取得了良好效果, 且匹配结果证明, 该方法可实现精确的子象素匹配.

基于高分辨率参考图象来提取高精度的参考点坐标, 是提高几何精校正定位精度的技术关键. 对在实际应用中得到广泛应用的 NOAA AVHRR 数据而言, 选用的高分辨率参考图象, 需满足定位精度高、数据源获取容易两方面的要求. 本文选用了我国测绘部门最新研制提供的 1: 100 万数字地图、以及以 Landsat TM 图象为代表的高分辨率图象数据.

为提高两种不同分辨率遥感图象之间控制块对的匹配精度, 如前所述, 需进行一系列相关处理, 即, 首先需对不同分辨率的遥感图象均进行相同的地图投影变换; 其次, 需对低分辨率的 AVHRR 图象进行内插细化, 得到一系列提高分辨率后的图象块(分辨率分别为 1100m, 500m, 250m, 125m), 然后在提高的分辨率水平上, 与高分辨率参考图象块进行精确配准, 以提高两种图象之间的控制块对匹配精度.

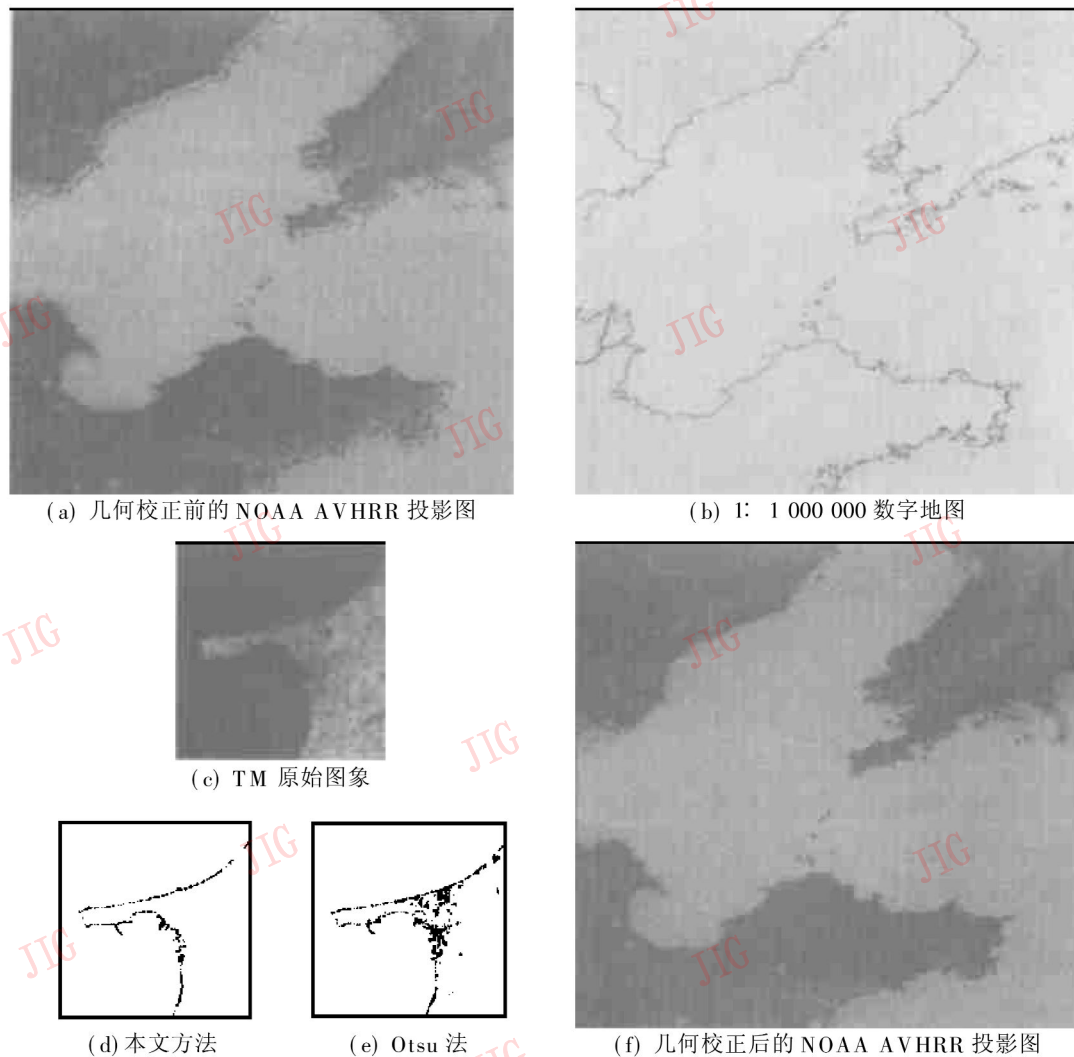


图 1 基于边缘图象匹配的 NOAA AVHRR 图象几何精校正实例

图 1 是其中一个实例. 其中, 以低空间分辨率的 AVHRR 图象作为待校正的实测图, 而以高空间分辨率的 Landsat TM 卫星图象和 1: 100 万中国数字地图作为基准图, 3 种图象均为麦卡托投影图, 而实测图与基准图的对应几何变换关系采用二元二次多项式. 图 1(a) 为几何精校正前渤海湾地区大范围的 NOAA AVHRR 图象, 经数据插值细化处理后, 图象中每个象元的空间尺度为 500m 左右; 图 1(b) 为与图 1(a) 相同地区的 1: 100 万数字地图图象, 而图 1(a) 中又叠加了如图 1(b) 的 1: 100 万数字地图, 由图 1(a) 可见, AVHRR 图象与地图边界图象有 8 个 Pixel 左右的定位偏差, 两者的海陆边界吻合得不好. 图 1(c) 所示本文为用到的一幅 Landsat TM 图象, 其象元的空间尺度为 30m; 图 1(d)、图 1(e) 分别为采用本文边缘提取算法、Otsu 法^[4]所提取的图 1(c) 边界图象, 图 1(d)、图 1(e) 所示结果表明本文边缘提取算法能比 Otsu 法更好地提取海陆边界, 并具有更好的抗噪性能. 在同一地图投影方式下, 可实现 NOAA AVHRR 图象、Landsat TM 图

象、1: 100 万数字地图 3 种不同空间分辨率图象在同一空间尺度上的图象叠加. 本文采用麦卡托投影来实现 3 种图象在对应于 NOAA AVHRR 500m 象元空间尺度上的图象叠加. 利用 NOAA AVHRR 和 Landsat TM 的边缘图象, 以及 1: 100 万数字地图的边界数据图象, 采用本文的对函数乘积度量算法可自动提取子象素精度的控制块对, 从而实现了 NOAA AVHRR 图象和 Landsat TM 图象、1: 100 万数字地图的最小二乘影像匹配定位, 即 NOAA AVHRR 图象的几何精校正. 图 1(f) 为几何精校正后的 NOAA AVHRR 图象, 图中同样叠加了如图 1(b) 所示的 1: 100 万数字地图, 由图 1(f) 中可见, 两者的海陆边界吻合得很好.

3 结 论

对本文方法, 通过一系列实验验证, 得到以下结论:

(1) 对不同空间分辨率的遥感图象, 在图象匹

配定位前需进行相同的地图投影变换,以便于实现不同空间分辨率图象在同一空间尺度上的图象叠加,从而也可利用定位精度较高的高分辨率图象来实现对低分辨率图象的高精度匹配定位.另外,本文对低分辨率图象所进行的内插细化处理,可使它在相应的子象素级水平上与高分辨率图象进行精确配准,以提高两种图象之间的匹配精度,同时也有利于进行定位精度的检验.

(2) 改进的基于直方图指数凸包的阈值化分割算法,由于采用直方图指数凸包能较好地逼近原始直方图,同时通过引入众数检验,可消除在图象的高亮度区(灰度值较大)、低亮度区(灰度值较小)的噪声影响,从而使选取的阈值门限更为合理,故其图象分割效果略优于经典的 Otsu 法.

(3) 与常用的最小距离度量、最大相关度量、不变矩度量相比较,本文采用的对函数乘积度量更适合于二值边缘图象匹配,并具有算法简单、运算快速及抗噪性能强的优点.在采用对函数乘积度量的边界图象匹配算法中,由于通过测量边界重心可唯一地确定最佳匹配位置,因而可实现快速、精确的特征(边缘轮廓信息)匹配.而且利用特征匹配所得的精确控制块对,可在最小二乘误差准则下实现实测图与基准图的影象匹配定位.这种将特征匹配和最小二乘影象匹配相结合的方法,由于有效地利用了图象控制块中的区域和结构信息,并且避免了人工手动选点时的人为误差,因而可获得亚像元级的控制块匹配精度,从而最终使待校正的整幅实测图获得子象素的匹配精度.

(4) 本文所提出的基于图象边缘轮廓信息的多源遥感图象匹配定位方法,比较适合于边缘轮廓信息明显、非闭合边界大量存在的场景或地区,尤其适合于那些包含海岸线、河流、湖泊等大尺度地理标志的场景或地区的图象.在这些大尺度的、非闭合边界大量存在的图象中,那些适于闭合区域分析的不变矩匹配方法^[6-8]、基于边界突变点的匹配方法^[8]的匹配效果则不如本文所提出的方法,并且它们难以克服自身运算复杂度大的缺陷,NOAA AVHRR 图象和 Landsat TM 图象、1:100 万数字地图的边缘图象匹配实验便是一个例证.另外,这种基于图象边缘轮廓信息的多源遥感图象匹配定位方法具有较好的普适性.需要指出的是,该方法也有其局限性,它要求多传感器图象中必须同时存在可对同一场景进行有效描述的、清晰的边缘轮廓信息.

参 考 文 献

- 1 Zhang B, Zhu Z Z, Wu Y S. Accurate geometric correction of NOAA AVHRR data using landsat TM data. In: Proceedings of SPIE on Imaging System Technology for Remote Sensing. China: 1998, (SPIE Vol. 3505): 132~ 138.
- 2 Whatmough R J. Automatic threshold selection from a histogram using the "Exponential Hull". CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(6): 592~ 600.
- 3 Rosenfeld A, Torre P. Histogram concavity analysis as an aid in threshold selection. IEEE Trans. Syst. Man Cybernet, 1983, SMC-13: 231~ 235.
- 4 Otsu N. A threshold selection method from gray level histograms. IEEE Trans. Syst Man Cybernet, 1979, SMC-9: 62~ 66.
- 5 孙仲康,沈振康. 数字图象处理及其应用. 北京:国防工业出版社,1985.
- 6 Flusser J, Suk T. A moment-base approach to registration of images with affine geometric distortion. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1994, 28(3): 305~ 314.
- 7 Goshtasby A, Stockman G, Page C. A region-base approach to digital image registration with subpixel accuracy. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1986, 24(3): 390~ 399.
- 8 Li H, Manjunath B S, Mitra S K. A contour-base approach to multisensor image registration. IEEE Trans. on Image Processing, 1995, 4(3): 320~ 334.



张 斌 1970 年生,分别于 1992 年、1995 年、1999 年获清华大学电子工程系学士、硕士、博士学位.在硕士和博士期间主要从事气象卫星的高精度定位及其应用方面的研究,已发表论文 9 篇.目前在深圳市中兴通讯股份有限公司从事第三代移动通信技术的研究.



朱正中 清华大学电子工程系教授.1958 年毕业于清华大学无线电系,1961 年清华大学在职研究生.从事的主要科研工作包括雷达系统研制、遥感图象处理及系统开发等工作.



葛成辉 清华大学电子工程系教授,中国图象图形学会副理事长,遥感学报副主编.长期从事遥感图象处理及系统、多媒体信息系统方面的科研工作.



吴佑寿 清华大学电子工程系教授,中国工程院院士.《中国科学》、《电子学报》和《Neural computing》编委.著有《高频电路》、《汉字识别-原理、方法与实现》等专著.