

文章编号: 1007-4619 (2000) 03-0208-06

SeaWiFS 与 AVHRR 资料自动几何配准

毛志华, 黄海清, 朱乾坤, 潘德炉

(国家海洋局 第二海洋研究所 海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 研究了一种自动几何配准的方法, 来实现多时相的卫星资料 and 不同遥感资料之间的几何配准。利用海岸线自动选取 GCP 的点, 借助相关松弛法寻找同名点, 且有判别机制来保证 GCP 的正确性, 可以方便地得到分布密集的 GCP 值。同时研究了二元 n 次方程组和 GCP 数目与几何配准精度的关系, 得到 GCP 数目的增加可明显提高几何配准精度。利用该方法对 SeaWiFS 和 AVHRR 资料进行几何配准, 可以提高几何配准的精度和节省机时, 为遥感资料的动态监测和不同遥感资料复合应用创造了有利条件。

关键词: 几何配准; 遥感资料; GCP; 相关松弛法

中图分类号: TP151.1/P71 **文献标识码:** A

1 引 言

在多时相卫星遥感资料研究和不同卫星资料复合应用研究中, 几何配准是基础, 配准方法和精度直接影响到遥感资料复合的物理意义。如利用多时相 NOAA 卫星资料分析某一目标的变迁情况, 1 个像元点的误差会引起 1. 1km 的地面目标差异; 利用连续二天海表温度(SST)图计算海表流场时, 1 个像元点的配准误差会造成 1. 27cm/s 的流速误差^[1]。二幅遥感图像的几何配准实质上是几何精校正, 也就是地面控制点(GCP)的获取和几何变换函数的求取。

已有大量文献报道 GCP 获取的各种方法。最简单的方法是人工目视选取 GCP, 但在遥感图像中, 目视选取 GCP 非常困难, 且很难保证几何精度。针对具体的应用研究, 产生许多获取 GCP 的方法。利用陆地卫星 MSS 图像在 AVHRR 资料中寻找控制点, 由于 MSS 高空间分辨率(50m * 50m), 在 AVHRR 图像中找到的控制点达到 1/10 个像元点误差^[2]。Goshtasby 借助图像区域细化技术来寻找控制点, 通过细调图像分割的阈值使二幅图像中的二个目标最相似, 将目标的重心点作为控制点, 使 GCP 达到子像元精度^[3]。Ventura 借助图像结构相似性探测技术来寻找 GCP, 通过逻辑树的操作将有关相似性评

价的图像属性转化为相似性等级, 来判断二个目标是否相似, 用目标的中心点作为控制点^[4]。

在海洋遥感资料中, 由于海洋的流动性而无法选取地面控制点, 海岛可作为卫星遥感资料的定位目标。Patt 在全球范围选择了 7800 个岛屿, 作为 SeaWiFS 资料的定位目标^[5], 但由于岛屿分布不均匀和云覆盖影响, 使某些轨道资料找不到一个岛屿来定位。对中图海区的遥感资料, 连续而漫长的海岸线具有明显的几何特征为 GCP 的选取创造了良好的条件。本文研究利用海岸线对 Seastar/SeaWiFS 资料和 NOAA/AVHRR 资料实现自动几何配准的方法。

Seastar/SeaWiFS 是美国于 1997 年 9 月发射成功的“海星”号卫星(Seastar)装载的海洋宽视场扫描仪(SeaWiFS), 具有 8 个可见光和近红外通道, 在卫星轨道(705 km, 太阳同步等)、地面分辨率(星下点 1. 1km)等方面与 NOAA/AVHRR 相近, 但没有热红外通道。在许多海洋应用研究中, 需要将这二颗卫星资料进行复合。

2 海岸线检测和几何误差分析

海岸线信息提取实际上是一种边缘检测技术, 已有大量文献报道各种边缘检测方法。常用的是微

收稿日期: 1999-02-01; 修订日期: 1999-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(818-07-01和818-0-02)

作者简介: 毛志华(1966—), 男, 副研究员, 1988 年获浙江大学计算机系学士学位, 1996 年获浙江大学地科系硕士学位, 1999 年获中国科学院上海技术物理研究所博士学位, 现从事海洋水色信息提取和多种资料源复合技术研究。发表论文 8 篇。E-mail: Zh-mao@hotmail.com。

分法,即采用某些梯度算子来锐化图像的边缘值,常用的梯度算子有 Roberts 一阶偏导核、Sobel 一阶偏导核、Prewitt 一阶偏导核。统计表明有 70% 的边缘检测器采用 Sobel 边缘核^[6]。实际上,不同的边缘检测算子具有不同的适应范围,Roberts 算法适合于提取良好锐化的边缘^[6],且具有敏感的边缘方向性^[7]。 3×3 的 Sobel 和 Prewitt 边缘核产生较粗的边界图^[6]。Rosefeld 算法具有良好的噪音免疫功能,适合于提取高噪音图像的边缘^[6]。为了消除噪音对边缘提取的影响,Poppel 采用先对图像进行滤波平滑后,再用加权对称梯度算子来提取边界信息^[8]。Suk 则采用并行统计方法来消除噪音对边缘提取的影响^[9]。对图像中存在的不同特征的边缘信息,融合高斯梯度边缘检测器和过零点边缘检测器的高斯加权算子适合于提取不同几何分辨率的边界信息^[10]。

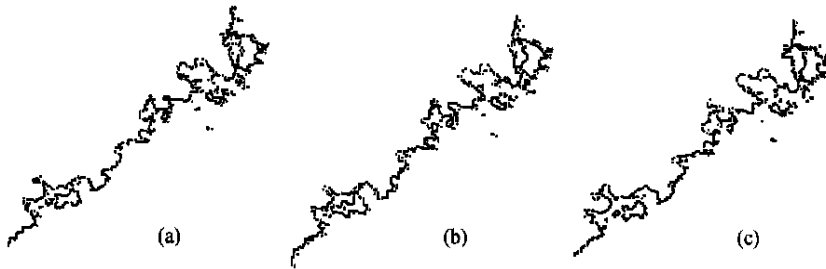


图 1 SeaWiFS 资料提取海岸线

Fig. 1 Coastline extracted from SeaWiFS images

上述图像都先经过几何粗校正,将 SeaWiFS 1A 产品资料和 AVHRR 的 1B 资料按莫卡托投影在相同区域,区域范围为 $23.95^{\circ}\text{N} - 25.82^{\circ}\text{N}$, $117.89^{\circ}\text{E} - 120.15^{\circ}\text{E}$,投影图像大小为 170×180 像元点。

遥感资料经莫卡托投影后仍存在着几何误差,假定连续二天的海岸线地理位置相对不变,将连续二天的海岸线重叠就可以明显看出二幅图存在的几何误差。1998 年 8 月 16 日和 17 日二天的 SeaWiFS 资料提取的海岸线图重叠结果见图 2(a),该图表明二者之间存在的误差比较大。在经度和纬度上的误差分量分布见图 2(b),在该子图的 x 轴上,分别列出了二幅图像在经度方向误差分布 (Δx) 和纬度方向误差分布 (Δy),即 $\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta y = y_2 - y_1$,其中 (x_1, y_1) 对应于图 2(a) 中的第一天 SeaWiFS 图像的坐标, (x_2, y_2) 对应于第二天同一地物图像坐标,单位是像元数。 y 轴对应图 2(a) 的纵坐标,即误差分布按图 2(a) 的纵坐标方向从上到下排列,单位是像元数。该图基本反映出这二天 SeaWiFS 资料的几何配准误差分布情况,在经度方向,第二天图像平均

基于小波理论的边缘检测可用于提取多尺度的边缘信息^[11]。

用 Roberts 核、Sobel 核、Prewitt 核分别对 SeaWiFS 和 AVHRR 资料进行试验,从遥感图像提取海岸线结果表明,Sobel 核与 Prewitt 核结果类似,得到的海岸线具有二个像元点的宽度,Robel 核可明显锐化海岸线,得到一个像元点宽度的海岸线。因此,Robel 核比较适合用于遥感资料海岸线的提取。用八邻点的拉普拉斯算子对上述图像进行卷积,也可得到一个像元点宽度的海岸线图。对连续三天的 SeaWiFS 资料提取海岸线的结果见图 1,三幅子图(a)、(b)、(c)分别代表 1998 年 8 月 16 日、17 日、18 日三天的 SeaWiFS 资料提取的海岸线图。这些图是经人工方法掩膜去掉无关信息。

右移了 2.3 个像元点;在纬度方向,第二幅图像的上半部下移了一个像元点,中间一段没有移位,下半部分上移一个像元点,相当于缩小了近二个像元点。

3 利用相关松弛法寻找 GCP

寻找 GCP 的匹配方法很多,常用的有最小灰度差之绝对值和、最小灰度差的平方和、最大相关函数、最大协方差、最大相关系数等,其中最大相关系数能消除灰度陈列之间的线性畸变,是一个最常用的相似性尺度,用于模板匹配^[4]。本文采用相关松弛法来进行整体影像匹配。

在第一幅图像中,以控制点为中心选取 $n \times n$ 像元矩阵 P_1 ,在第二幅图像的一定搜索范围 S 选取同样大小的一个矩阵 P_2 ,求 P_1 与 P_2 矩阵的相关系数,当矩阵 P_2 在 S 中每移动一个像元位置可求得一个相关系数,当移完 S 中所有位置时形成一个相关系数矩阵 $[c]$,最大相关系数法是在矩阵 $[c]$ 中选取具有最大相关系数对应的位置上的点作为匹配

点。由于实际遥感图像的复杂性,特别在矩阵 $[\rho]$ 中同时具有多个相同的最大相关系数值时,使该方法在匹配点的选取中带有某种随机性。为了改善最大相关系数法存在的不足,引进松弛概念。将矩阵 $[\rho]$ 中大于某一阈值的相关系数组成候选集,归一化候选集的相关系数作为概率值 P 的初始值:

$$P_{ij}^0 = \rho_{ij} / \sum_r \rho_{ij} \quad (1)$$

其中, ρ_{ij} 是相关系数, r 是候选集中相关系数总数。

将控制点及对应的配准点的关系定义为向量 l ,二组相邻GCP的关系可以转化为二个向量间的关系。定义二个向量存在的一致性强度 C 为二个向量方向、大小和距离的函数。计算2个向量的一致性强度 C :

$$C = \exp(-d_1/d_0) \cos \left\{ 1 - \frac{|l_1| - |l_2|}{\max(|l_1|, |l_2|)} \right\} \quad (2)$$

其中, l_1, l_2 为二个向量, d_1 为二个向量起点间距离, d_0 为调节参数, θ 为二个向量的夹角。 d_0 基本决定了对某一控制点参与松弛的控制点分布范围,当二个控制点的距离 d_1 超过 d_0 时,得到的 C 值明显减小,对该控制点对应值的修正作用明显减弱,本文取 d_0 值为8。 C 值范围为 $[-1, 1]$,当二组控制点对应的二个向量在距离上越接近,方向越一致,大小越接近时所产生的 C 值就越大。

一个向量对另一个向量的支持强度 S 定义为该向量具有的概率值 P 和二个向量一致性强度 C 函数。一个向量从周围所有向量得到的总的支持强度 S 可表述为:

$$S_{ik}^n = \sum \sum C(i, K, h, j) P_{hj}^n \quad (3)$$

其中, $C(i, K, h, j)$ 是第 i 个相关系数矩阵中第 K 个向量与第 h 个相关系数矩阵中第 j 个向量的一致性强度。 P_{hj}^n 是第 n 次循环时第 h 个相关系数矩阵中第 j 个向量的概率值。在 d_0 范围的控制点中,具有较大概率值和与该点产生较大 C 值的控制点对该点具有较大的支持强度,而当 C 值为负时,将减小该点得到的支持强度。

用该向量得到的支持强度来修正该向量的概率值,并进行归一化。

$$P_{ik}^{n+1} = P_{ik}^n (1 + S_{ik}^n) / \sum_r (P_{ir}^n (1 + S_{ir}^n)) \quad (4)$$

从上式可以看出,得到正的 S 值可以增加该点的概率值,反之,则减小概率值, S 值越大, P 值增大越快。因此,与周围控制点对比较协调一致的点对可明显增加概率值。将上述式(3)和式(4)二式进行

递归计算,使二次循环得到的最大概率值之差小于某一设定值。选取具有最大概率值的点作为同名点。相关松弛法充分考虑所有同名点之间的相互关系,是一种整体迭代解法,大大降低局部的模棱两可性,增加整体的一致性。

如果能自动确定一组控制点,通过一种合适的匹配方法寻找匹配点,并有一种可靠的判断标准来确定匹配得到的点是否为同多点,就可以实现GCP的自动寻找,从而实现自动的几何配准。本文利用第一幅遥感图像的海岸线自动作为GCP的点,借助相关松弛法进行二幅遥感图像之间模板匹配来寻找匹配点,并用第二幅图像的海岸线作为标准来判定匹配的点是否为同名点。

利用相关松弛法对多时相SeaWiFS资料GCP自动寻找进行试验的结果见图3(a),以图1(a)的海岸线作为一组控制点,通过相关松弛匹配方法,用1998年8月16日SeaWiFS波段8的图像在8月17日的图像中寻找匹配点,得到的结果用图1(b),即8月17日的海岸线来判定,只有二者匹配的点才作为同名点。该子图表明,用上述方法寻找的GCP在数量上比较密集,共得到435组GCP值。对AVHRR资料中进行了同样试验,结果见图3(b),共得到649组GCP值。对SeaWiFS资料与AVHRR资料的几何配准得到的结果见图3(c),共有282组GCP值。

由于海岸线具有某种程度的连续性,通过相关松弛法,可以增加附近海岸线上的点被选为控制点的可能性,使得到的控制点分布具有某种程度的连续性,且数目明显增加。因此,本文所采用的方法实际上是进行两组海岸线匹配。

4 几何配准误差分析

二元一次多项式是线性变换,可用于校正平移、旋转、扭曲、比例尺四方面因素引起的误差。利用二天SeaWiFS资料匹配寻找的435组GCP坐标值求得二元一次方程式的系数见表1,该方程组可用来校正1998年8月17日的SeaWiFS资料图像。在表1中, S 表示SeaWiFS资料, A 表示AVHRR资料, $S-S$ 表示两天SeaWiFS进行配准, $A-A$ 表示两天AVHRR资料进行配准, $S-A$ 表示同一天SeaWiFS与AVHRR图像进行配准。 n 是求二元一次方程式所采用的GCP数目, $a_{00}, a_{01}, a_{10}, b_{00}, b_{01}, b_{10}$,对应于二元一次方程式的系数。表1同时列出了利用另外二种GCP值求得的二元一次方程式系数。

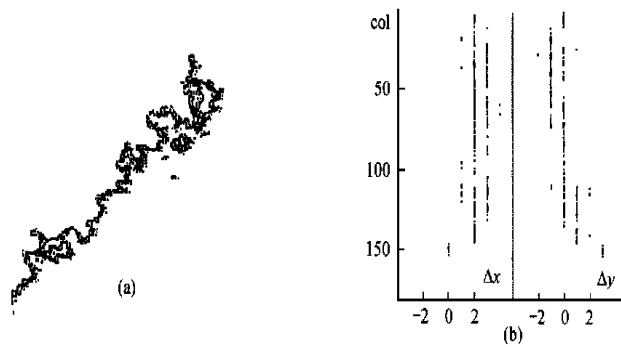


图 2 连续二天 SeaWiFS 资料配准误差

Fig. 2 Misregistration distribution of two SeaWiFS images



图 3 GCP 自动匹配结果图

Fig. 3 GCP distribution obtained by CR match technique

表 1 二元一次方程式系数及误差分析

Table 1 Coefficients of the first-order bivariate transforms and RMS analysis

	n	a_{00}	a_{01}	a_{10}	b_{00}	b_{01}	b_{10}	RMS_0	RMS	RMS_1
S-S	435	0.141	0.985	-0.014	0.409	0.005	0.990	2.479	0.691	0.605
A-A	649	1.119	1.000	-0.002	-1.000	0.002	0.993	1.713	0.272	0.139
S-A	282	5.810	0.971	-0.060	1.601	0.003	0.964	2.628	1.238	1.176

用表 1 的方程组对第二幅图像进行几何变换, 为了检查变换后的几何配准精度, 对几何误差 RMS 进行分析, 结果见图 4, 在 x 轴上, RMS_0 是几何变换前的二幅图像的配准误差, RMS 是对第二幅图像几何变换后存在的配准误差, y 轴对应于遥感图像的纬度方向上的纵坐标。表 1 列出了二幅图像存在的平均配准误差, RMS_0 和 RMS 分别对应于图 4 中 RMS_0 和 RMS 的平均值, RMS_1 是用最近邻点法投影后存在的平均配准误差。

图 4 反映了二幅图像存在的配准误差分布。比较这三幅子图, 图 4(b) 表示的二幅 AVHRR 经几何变换后配准误差最小, 平均为 0.272 个像元点, 经最近邻点法插值后, 有 86.1% 的点是完全配准的, 平均配准误差下降到 0.139 个像元点。二幅 SeaWiFS 图像经最近邻点法插值后, 有 47.4% 的点完全配

准, 平均配准误差为 0.605 个像元点。同一天的 SeaWiFS 与 AVHRR 经最近邻点法插值后有 27.0% 的点是完全配准, 平均误差为 1.176 个像元点。

对 GCP 数目与几何配准精度的关系进行了研究, 结果见表 2。S 表示 SeaWiFS 图像, A 是 AVHRR 图像, SC 表示 GCP 采样比例, n 表示用于求二元一次方程式系数所采用的 GCP 数目, RMS_x 表示经几何变换后二幅图像在经度上存在的平均几何误差, RMS_y 是二幅图像在纬度上存在的平均误差, RMS 是总的平均误差。上述平均误差是对所有 GCP 值的误差进行统计。从表 2 可以看出, 随着控制点数目的增加, 平均几何配准误差变小。二幅 SeaWiFS 图像平均配准误差从 5 组 GCP 得到的 1.869 个像元点误差改善为 435 组 GCP 得到的 0.691 个像元点误差, 平均配准误差减小了 1 个多像元点, 同样, S-A

平均配准误差也减小了 1.4 个像元点。因此,在二幅图像的几何配准时,应尽量多选择控制点,本文所

采用的自动寻找 GCP 方法可明显提高几何配准精度。

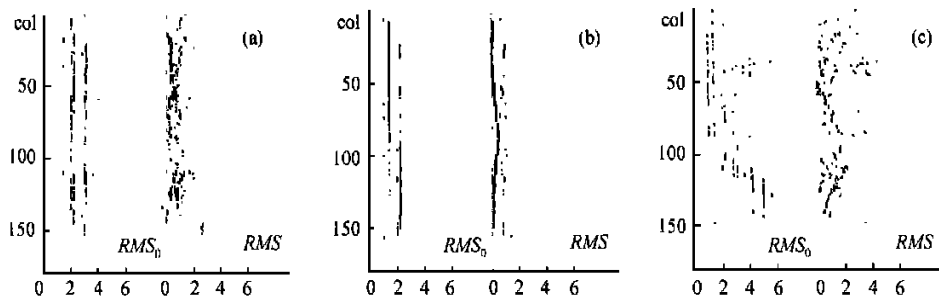


图 4 几何配准误差分布图

Fig. 4 Error distribution of the geometric registration

表 2 GCP 数目与几何配准精度关系

Table 2 The relationship between the number of GCP and the accuracy of geometric registration

SC	n	S-S			n	A-A			n	S-A		
		RMS _x	RMS _y	RMS		RMS _x	RMS _y	RMS		RMS _x	RMS _y	RMS
1/80	5	1.913	1.322	1.869	8	0.257	0.362	0.393	3	3.027	1.065	2.676
1/40	10	0.717	0.738	0.836	16	0.241	0.331	0.347	7	1.415	1.302	1.647
1/10	43	0.623	0.595	0.706	64	0.183	0.328	0.277	28	1.306	1.042	1.414
1/4	108	0.615	0.580	0.695	162	0.185	0.326	0.279	70	1.211	0.997	1.275
1	435	0.612	0.578	0.691	649	0.183	0.325	0.272	282	1.206	0.987	1.238

5 结 论

(1) 几何自动配准的基本方法是,求取标准图像的海岸线作为地面控制点,通过相关松弛法寻找需校正图像的对应匹配点,将求得的匹配点与该图像的海岸线进行比较,也就是用第二幅图像的海岸线来衡量求得的匹配点是否为同名点,只有同名点的坐标才用于求解几何变换方程组。用求得的方程组对第二幅图像进行几何精校正,从而实现二幅遥感图像的几何配准。上述方法可以用软件自动实现,因此,可进行自动的几何配准。

(2) 采用自动寻找 GCP 方法,可以方便地得到分布密集的 GCP 值,并有一种判断标准来衡量匹配到的点是否为同名点,可以保证得到的 GCP 的正确性,为几何配准精度提高和研究新的几何变换函数创造了有利条件。

(3) 由于二元 n 次多项式不能对二幅遥感图像实现完全配准,可以认为,除平移、旋转、扭曲、比例尺四方面因素造成二幅图像之间的几何误差,还存在着卫星轨道、传感器扫描倾角、瞬时视场角、仪器

微小抖动等复杂因素引起的几何误差,需要研究新的几何变换方程来进一步提高配准精度。

参 考 文 献 (References)

- [1] Mao, Z., Pan, D., Pan Y., Huang, W. A New Method of Estimating Velocity Fields from Satellite Images [A]. Narendra Saxena. Recent Advances In Marine Science and Technology '96[C]. Pacon International. Honolulu, Hawaii. 96828, US, 1997, 11-17.
- [2] Cracknell A P, Pathoonwattanakij K. Pixel and Sub-pixel Accuracy in Geometrical Correction of AVHRR Imagery [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1989, **10**(4): 661-667.
- [3] Goshtasby A, Stockman G C, Page C V. A Region-Based Approach to Digital Image Registration with Subpixel Accuracy [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1986, **24**(3): 390-399.
- [4] Ventura A D, Rampini A, Schettini R. Image Registration by Recognition of Corresponding Structures [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1990, **28**(3): 305-314.
- [5] Patt F S, Woodnard R H, Gregg W W. An Automated Method for Navigation Assessment for Earth Survey Sensors Using Island Targets [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1997, **18**(16): 3311-3336.
- [6] Peli T. A Study of Edge Detection Algorithms [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1982, **20**: 1-21.
- [7] Sethi I K. Edge Detection Using Charge Analogy [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1982, **20**: 185-195.

- [8] Poppl S, Henmann G. Boundary Detection in Scintigraphic Images [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1982, **19**: 281—290.
- [9] Suk M, Hong S. An Edge Extraction Technique for Noisy Image [J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1984, **25**: 24—45.
- [10] Hartle R. A Gaussian-Weighted Multi-Resolution Edge Detector [J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1985, **30**: 70—83.
- [11] Zhu C Q, Yang X M, Tao D Z. Multi-Scale Edge Detection of Image Based on Dyadic Wavelet [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(4): 262—266. [朱长青, 杨晓梅, 陶大欣. 基于样条二进小波的影像多尺度边缘检测[J]. 遥感学报, 1997, **1**(4): 262—266.]

Automatic Image Registration of SeaWiFS and AVHRR Data

MAO Zhi-hua, HUANG Hai-qing, ZHU Qian-kun, PAN De-lu

(Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou, 310012, China)

Abstract: An automatic approach of image registration is developed to register the multi-temporal images of different sensors. A point in the coastline derived from SeaWiFS and AVHRR images is taken as a ground control point (GCP), and the correlation-relaxation (CR) technique is employed to search the counterpart point of GCP. The correction of GCP values is guaranteed by a decision rule, which will improve the accuracy of registration. The relationship between the n -th order bivariate transforms and the accuracy of registration is studied. The averages of RMS show that the larger number of GCP will lead to the more accurate image registration, while the high order bivariate transforms can not reduce that RMS of two images. The large number of GCP obtained by this method give a chance to study new transforms for geometric rectification to improve the accuracy of image registration. The approach described in the paper can be used in dynamic monitoring and integrating of Satellite data.

Key words: image registration; satellite images; GCP; correlation-relaxation