

高分辨率 SAR 影像同名点自动匹配技术

陈富龙¹⁾ 张红²⁾ 王超¹⁾²⁾

¹⁾中国科学院研究生院,中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点开放实验室,北京 100101)

²⁾中国科学院中国遥感卫星接收站,北京 100086)

摘要 由于 SAR 工作原理跟光学遥感成像技术截然不同,而经典同名点匹配方法已不能完全满足 SAR 自动配准需要。为了快速有效地进行 SAR 影像配准,基于 SAR 影像自动配准技术的发展,提出了一种新颖的高分辨率 SAR 影像同名点自动匹配算法,该算法首先创建金字塔影像,同时在金字塔影像上回溯搜索,以确定初始变换函数类型及相应的变换参数,然后通过分层回溯逐层加密控制点来求解最佳变换函数类型及相应变换参数,最后在原始影像分辨率下修正同名点坐标,以获取最终匹配同名点对。这种分层回溯策略不仅很好地解决了同名点搜索计算复杂度问题,使获取的同名点对分布更趋均匀、精度更高,而且能确保每层变换函数达到全局最小二乘最优。另外,以高分辨率 SAR 影像为实验数据进行的实验结果表明,该同名点搜索算法不仅计算时间可由 221s 缩短至 34s,而且可达到 0.284 636 pixels 的配准精度。

关键词 分层回溯 同名点匹配 高分辨率 SAR

中图法分类号: TP751.1 TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)09-1276-06

Automatic Matching of Tie-points with High-resolution SAR Images

CHEN Fu-long¹⁾, ZHANG Hong²⁾, WANG Chao¹⁾²⁾

¹⁾ Graduate university of Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101)

²⁾ China Remote Sensing Satellite Ground Station, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086)

Abstract The imaging system of SAR is totally different from optic's, thereby, the traditional matching method can not be fully suitable in the case of SAR image process. Based on the development of automatic registration of SAR images, in this paper, a novel method of automatic matching of tie-points with high-resolution SAR is proposed. The method consists of three steps: In the first step, back-trace is employed to determine the type and parameters of the initial mapping function after pyramid images are created; secondly, layered back-trace is used to increase control points, the type and parameters of the optimal mapping function are resolved afterwards; finally, the coordinates of control points are revised on original image resolution in order to acquire the final matched tie-points. The strategy of layered back-trace is employed in this algorithm, which not only resolves the problem of compute efficiency, achieves a higher matching accuracy with more evenly distributed tie-points, but also insures the mapping function to be optimal in MMSE (mean minimum square error) sense. High-resolution airborne SAR images are used in our experiments, and the result shows the proposed algorithm is efficient and effective, where comparing with a traditional method which costs 221s computer time, our method only costs 34s; what is more, it can achieve a sub-pixel matching precision, equaling to 0.284 636 pixels.

Keywords layered back-trace, matching of tie-points, high-resolution SAR

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”计划项目(2001CB309406)。

收稿日期: 2005-07-19 改回日期: 2005-09-09

第一作者简介: 陈富龙(1980~),男,2003年毕业于武汉大学遥感信息工程学院,获摄影测量与遥感专业学士学位,现于中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点开放实验室攻读博士学位。目前主要从事 SAR 影像自动配准研究工作。E-mail: richdragonchen@163.com

1 引言

如何综合分析多数据源遥感数据,以尽可能多地挖掘综合数据中潜在的信息,已成为遥感技术为全球环境和可持续发展提供决策智力支持的热点问题之一,其中高精度自动配准技术是影像数据融合、动态变化检测、3 维重建等遥感影像集成分析应用的关键环节。由于通过影像空间配准,可以在现有遥感数据的基础上,获取质量更高、维数更多的丰富信息,从而可延拓遥感信息应用的深度和广度。

近 20 年来,随着 SAR(synthetic aperture radar)遥感平台和传感器的发展,使得基于多源、多波段、多时相的 SAR 影像数据获取能力大为增强。高分辨率 SAR 是当前 SAR 技术发展的主要热点和发展趋势,它不仅为整个 SAR 技术的发展注入了新的活力,而且也对基于 SAR 的自动配准技术提出了更高要求。

图像自动配准大致包括以下 3 大步骤:

(1)在主、辅影像中提取特征点,通过实施同名点搜索来获取同名点;

(2)利用同名点信息来解求主、辅影像之间的变换函数;

(3)对辅影像进行几何变换,并通过重采样来获得纠正后的配准影像。

在这 3 大步骤中,之所以同名点对的确定是自动配准流程中的关键环节,首先,因为它的配准精度将直接决定变换函数的解求及解求精度;其次,因为同名点搜索计算复杂度通常情况下较复杂,其在整个影像配准流程中占有较高的机时量。鉴于此,研究一种高精度、高效率的同名点搜索技术将显得格外重要。

由于 SAR 的工作原理跟光学遥感成像技术截然不同,因此经典的同名点匹配算法,比如摄影测量学中基于核线相关的影像配准技术等就未必完全能适应于 SAR 影像的自动配准处理。至今,已有不少基于 SAR 影像,采用同名点匹配技术的自动配准算法(模型)被相继提出,如黄勇等人提出了基于图像区域不变矩的图像自动匹配方法^[1],该方法首先提取图像闭合区域特征,然后使用区域重心进行同名点配准,但鉴于 SAR 影像斑噪等特性的影响,致使算法要求的闭合区域往往很难得到满足。Dare 和 Dowman 使用影像边缘特征点来进行同名点匹

配^[2],由于该方法需以影像分割粗匹配为前提,因此算法较为繁琐耗时。DeBonet 等人提出了基于纹理驱动的 SAR 自动配准方法^[3],但该方法要求影像存在较多的高亮点或者特征线作为特征,这在一般场景下无法得到满足。综上所述,此类文献介绍的影像自动配准算法(模型)尽管都使用了同名点匹配策略,但其涉及的同名点匹配算法往往较传统方法耗时,也不太适应高分辨率 SAR 影像自动配准需要,且算法对如何高效获取同名点对及如何获取高精度的同名点对等若干问题也未能做详细的论述和分析。鉴于此,本文提出了一种针对高分辨率 SAR 影像的同名点自动匹配算法,该算法系统阐述了特征角点提取及匹配的全过程,并给出了同名点匹配精度的定量评价,实验结果证明,该算法不仅处理速度快,而且提取的同名点对精度高、分布均匀。

2 同名点自动匹配算法

本文提出的同名点自动匹配算法大致包括以下 3 大步骤(1)创建金字塔影像,并通过在金字塔影像上进行回溯搜索来确定初始变换函数类型及相应的变换参数(2)通过分层回溯逐层加密控制点来解求最佳变换函数类型及相应变换参数(3)在原始影像分辨率下修正同名点坐标,以获取最终匹配同名点对。

2.1 初始变换函数及相应变换参数的确定

在获知卫星轨道参数(星载 SAR)或飞机航道姿态参数(机载 SAR)的前提下,假设参考 SAR 影像与待匹配 SAR 影像,即主、辅影像间的旋转角和重叠度初值已获得,则初始变换函数类型及参数的确定即可使用均匀分布的少量控制点,采用序贯相关性分析来搜索同名点对,进而解求主、辅影像间几何变换关系式。其具体步骤如下:

(1)创建金字塔影像,并在主、辅影像上提取特征角点

通过创建金字塔影像来实施由粗到精的匹配策略,不仅是综合考虑配准正确性和准确性的直接体现,也是由高分辨率 SAR 影像特性所决定的。高分辨率 SAR 影像空间分辨率高,其相同场景对应的影像图幅较中、低分辨率影像尺度范围大。从另一角度分析,金字塔影像创建还能减小数据处理的时间复杂度及内存吞吐量。

本文的特征角点提取选用经典 Forstner 算

子^[4]。为了使得到的同名点对达到全局意义上的均匀分布,本文选用了均匀控制的方法,即把主、辅影像的重叠区域等分成若干网格,接着在每个网格上提取唯一角点。在本阶段,一般只需划分几十个网格。

(2) 采用交叉搜索算法搜索同名点对

首先使用从主影像中提取的特征角点,应用序贯相关性分析在辅影像对应的重叠区域中搜索同名点,接着,使用从辅影像中提取的特征角点来对主影像中的重叠区域进行相似搜索处理,最后,合并交叉搜索获取的同名点对。本阶段采用同名点来搜索不定区域是由主、辅影像轨道参数或飞机航道姿态参数决定的,其对应区域一般较大。为了综合考虑计算时间复杂度和匹配精度,本文一般先选用较大尺度的匹配模板和较稀疏的控制点,以获取准确的控制点对,然后根据获取的同名点对情况,采用最小二乘原理来回溯搜索最佳变换函数类型及求解对应的变换参数。影像变化函数共分以下 3 种:仿射变换、二次多项式变换和三次多项式变换(由于三次多项式变换足以拟合复杂的几何变换,且变换稳定性好,又无明显的阶跃抖动现象,故本文算法中采用的几何变换关系式的最高次数为 3 次),其对应的变换表达式分别为

仿射变换:

$$x_2 = a_0 + a_1x + a_2y$$

$$y_2 = b_0 + b_1x + b_2y$$

二次多项式变换:

$$x_2 = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2$$

$$y_2 = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2$$

三次多项式变换:

$$x_2 = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3$$

$$y_2 = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^3 + b_7x^2y + b_8xy^2 + b_9y^3$$

(1)

基于回溯搜索的最小二乘算法大概包括以下两步:

(1) 使用同名点对,并采用最小二乘原则,依次计算同名点对在采用仿射变换、二次多项式变换和三次多项式变换下的总的中误差及对应变换参数;

(2) 对所得的 3 个总的中误差进行排序,并选取总的中误差中最小的对应变换函数。

2.2 分层回溯同名点加密处理

本文分层回溯同名点加密处理引入了同名点误

差评定、误差剔除及加密控制点方法。其处理步骤大致包括:

(1) 特征角点提取及同名点交叉搜索,即首先细化网格,并使用 Forstner 算子提取特征角点,然后使用步骤 1 获取的几何变换函数及同名点对信息来计算同名点对在图像坐标系 X 、 Y 轴上的最大中误差 $\sigma_{\max X}$ 、 $\sigma_{\max Y}$,最后,对新获取的特征角点使用不定区域($3 \times \sigma_{\max X}$, $3 \times \sigma_{\max Y}$)重新进行交叉搜索来更新同名点对,值得注意的是,此时匹配模板尺度可相应变小;

(2) 同名点对误差评价及剔除,即首先设定模板匹配相关系数的阈值 T ($T \geq 0.5$),并直接剔除相关系数小于阈值 T 的同名点对,然后,使用基于回溯搜索的最小二乘算法来计算同名点对的总中误差 σ_s (下角 s 代表 sum),滤除同名点对中的中误差

$$\sigma^{(i)} = \sqrt{(\sigma_{\max X}^2 + \sigma_{\max Y}^2)} \text{ 大于 } 2\sigma_s \text{ 的同名点对,即}$$

$$\begin{cases} \sigma^{(i)} \geq 2\sigma_s & \text{直接剔除} \\ \sigma^{(i)} < 2\sigma_s & \text{保留} \end{cases} \quad (2)$$

式中 i 为控制点序列号;

(3) 应用最小二乘原则,对剔除粗差后的同名点对,使用步骤(2)获取的最佳变换函数进行重新计算来获取新的变换参数;

(4) 应用新的变换函数及新的最大中误差 $\sigma_{\max X}$ 、 $\sigma_{\max Y}$,重复迭代步骤(1)~步骤(4),直至格网控制的空间区域细分到预定要求。

2.3 最终同名点对的获取

通过步骤 1、2 处理,即可获得金字塔影像分辨率尺度上的同名点对的坐标信息。使用金字塔影像尺度逆变换来解求最终同名点对,就是把金字塔影像的分辨率尺度上的同名点对坐标映射变换到原始影像的分辨率尺度上。该映射变换过程可表示为

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 A 表示尺度变换因子, $\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$ 表示坐标修正值。

从式(3)可看出,映射变换包含了同名点对坐标值的修正处理。所谓坐标值的修正处理,就是经金字塔影像尺度逆变换后,在获取的同名点坐标初值邻域进行最佳坐标值搜索,进而求得坐标修正值 $\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$ 。

3 实验结果与分析

本文实验采用 38 所的机载 SAR 数据,图幅覆盖范围为我国海南三亚地区,空间分辨率为 1m,数据共分 X_u, X_L, P 4 个波段。该区域气候属于典型的热带季风气候,植被中包含了大量的热带经济作物,譬如芒果、香蕉、椰树等,此外,影像中显示局部区域地势错落有致,有一定范围的丘陵分布,这在机载高分辨率 SAR 影像上表现为阴影。鉴于实验区影像的图幅大,为了便于实验说明,本文仅以 X_u 波段两子图 $Ku_Data017$ 和 $Ku_Data024$ 为例来进行说明,影像成像时间为 2005 年 1 月 26 日,影像大小均为 7752×16384 pixels,其中 $Ku_Data017$ 为主图像, $Ku_Data024$ 为辅图像。其他波段及数据的处理雷同,故不赘述。

根据飞机航道的先验已知参数获取的主、辅影

像的初始重叠度为(1 878 ,7 659) ,旋转角为 0° 。

传统实验采用控制点均匀分布策略,控制点对应的区域网格大小为 90×90 ,实验时,先使用序贯相关性分析来对主、辅图像采用仿射变换实施传统的同名点搜索,其搜索的不定区域为 150×150 ,然后经由粗差剔除,即保留相关系数 $T \geq 0.5$ 和中误差 $\sigma^{(i)} < 2\sigma_s$ 的同名点对来获取同名点对的全局效果图(如图 1 所示),其对应的局部细节图如图 3 所示。采用本文提出的同名点搜索算法获取的同名点对全局效果图如图 2 所示,其对应的局部细节图如图 4 所示。本文算法实验中,控制点网格大小由初始的 720×720 逐层递减为 90×90 ,递减规律满足关系式

$$R^{(i+1)} = R^{(i)}/2 \quad (4)$$

式中 $R^{(i)}$ 是第 i 层控制点对应的网格尺度。有关两种方法获取的同名点对匹配参数指标的比较可参见表 1。

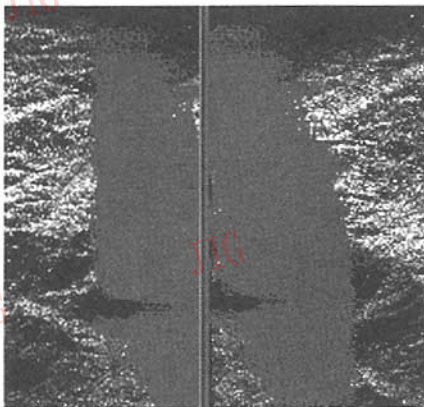


图 1 传统方法主、辅影像同名点全局分布效果图

Fig. 1 Distribution of the tie-points on the master/slave images using traditional method

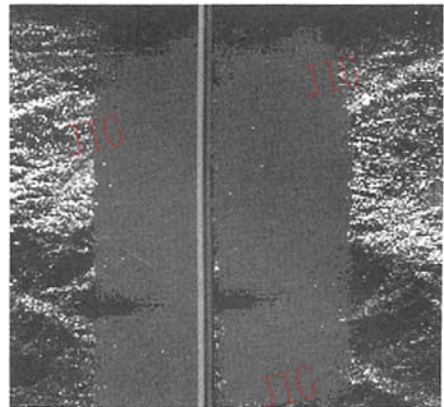
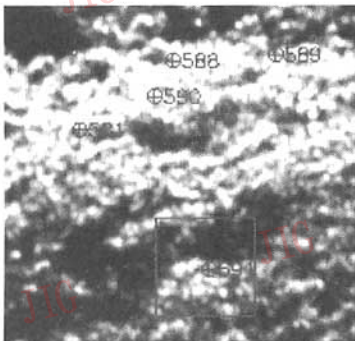
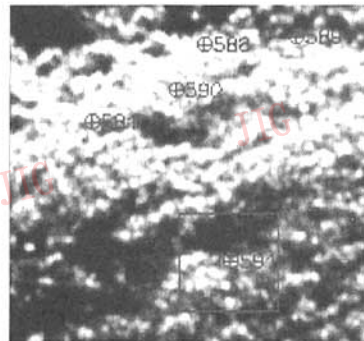


图 2 本文算法主、辅影像同名点全局分布效果图

Fig. 2 Distribution of the tie-points on the master/slave images using our method



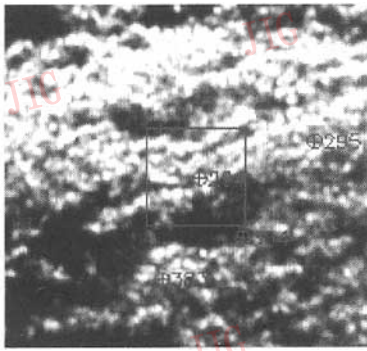
(a) 主影像同名点分布情况



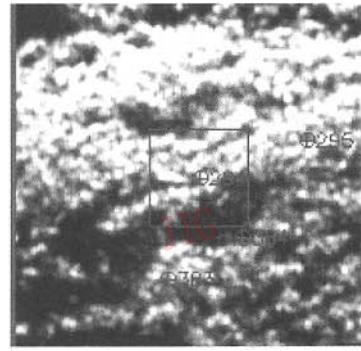
(b) 辅影像同名点分布情况

图 3 传统方法同名点匹配局部细节图

Fig. 3 Detailed images of matched tie-points using traditional method



(a) 主影像同名点分布情况



(b) 辅影像同名点分布情况

图 4 本文算法同名点匹配局部细节图

Fig. 4 Detailed images of matched tie-points using our method

表 1 匹配参数指标

Tab. 1 Parameters index of matching

参数指标	传统方法	本文方法
同名点对	983	905
总中误差(pixels)	1.928 133	0.284 636
机时(s)	221	34
多项式拟合次数	2	2

注:运行环境 Windows XP 核心配置 CPU P4 2.4 GHz, DDR 512MB

从视觉观察定性分析出发,对照图 1、图 2 发现,传统算法尽管也采用了均匀分布策略,但由于在图 1 的右上角和左下角均出现了“空洞”,即缺乏同名点对的现象,从而造成同名点总体分布不均,这会直接影响后续配准及镶嵌处理;与此相反,图 2 则很好地克服了该效应。分析其原因,由于高分辨率 SAR 影像图幅覆盖范围大,且传感器系统误差的非线性及其他局部畸变均可产生影像局部区域的非线性扰动,因此使得采用单一几何变换函数及固定搜索区域来搜索同名点对变得不现实。由于采用传统方法易造成影像同名点对的局部误匹配,因而会导致“空洞”效应的产生。这种“空洞”虽可通过增大不定搜索区域的方式得以缓解或解决,但其引入的计算量却是相当可观的;此外,不定搜索区域的增大,还会降低匹配精确性。而本文算法在搜索策略上则采用了回溯、分层逐步逼近的策略。这种回溯思想的引入,能够确保获取到最小二乘意义上的最佳几何变换关系式,而分层策略的引入,则解决了计算时间复杂度和匹配精确度的折衷选择问题。为了

综合考虑匹配准确性和计算效率,在第 1 层中,本文往往采用大的匹配模板和少量的均匀分布控制点;而在后续逐层加密同名点处理中,基于上层匹配的贡献,则可以采用相对小的匹配模板。鉴于不定搜索区域是由上层匹配控制点的最大中误差决定的,因此算法在误差分析和剔除方面是自适应的,并且该最大中误差数值一般较小,这就保证了算法搜索的计算高效性。分层步进策略的采用,既全面利用了上层拟合几何变换式的信息,又增强了变换函数拟合局部非线性的能力,还保证了局部非线性区域也具有足够多的高精度匹配控制点。通过对照图 3、图 4 影像的相同区域发现,本文提出的算法配准精度更高,譬如传统算法在图 3 中编号为 588、589、591 的控制点上分别造成了几个像素至十几个像素的偏差,而在相同区域的图 4 中,则每对同名点均保证了很好的配准精度。

从定量角度分析,参照表 1 不难发现,采用本文方法,主要参数指标均有较大的改善和提高。分层回溯策略的使用,使配准的总中误差已由传统方法的 1.928 133 pixels 变为 0.284 636 pixels,计算耗时由原先的 221s 变为 34s,这在整个匹配算法设计中具有较深远的意义。观察表 1 还发现,采用本文方法所得到的匹配总同名点对数目要略小于传统方法,这是由本文算法的高精度性决定的。通过遍历图 1 对应的每一个控制点发现,图 1 中影像重叠区域同名点对的配准精度呈现出中间精度高,而逐步向右上、左下区域递减的现象,同时进一步观察发现,该图在接近“空洞”的区域,同名点的配准精度已不容乐观,匹配精度误差大者可达十几至几十像素,而图 2 中对应的同名点对,其精度分布却是均匀的。

4 结论与讨论

针对高分辨率 SAR 技术的发展对影像配准的要求,本文提出了一种行之有效的同名点匹配算法。实验结果表明,该算法不仅解决了大图幅影像同名点搜索的计算复杂度问题,而且获取的同名点对分布更趋均匀,精度更高。本文实验输出的同名点对为 983,其对应的配准精度为 0.284 636 pixels,已达子像素级。总结本文算法,其特点如下:

(1) 由于回溯算法的采用,使得分层变换函数类型能达到全局最小二乘最优;

(2) 分层策略的采用,不仅很好地解决了控制点局部分布不均匀的问题,而且提高了同名点对的匹配精度和算法的计算效率。

显然,由于本文工作采用了序贯相关性测度,这就要求影像具有较强的相关性,即本文工作是针对同类型传感器 SAR 数据开展的,而基于高分辨率

SAR 影像与高分辨率光学影像的实验则有待进一步验证。随着研究的深入,综合采用序贯相关性测度和基于特征线、面的匹配技术是今后的研究方向。

参考文献(References)

- 1 Huang Yong, Wang Jian-guo, Huang Shun-ji. An image matching algorithm and implement for SAR images[J]. Signal Processing, 2003, 19(2): 179 ~ 183. [黄勇, 王建国, 黄顺吉. SAR 图像匹配算法及实现[J]. 信号处理, 2003, 19(2): 179 ~ 183.]
- 2 Dare P, Dowman I. An improved model for automatic feature-based registration of SAR and SPOT images[J]. ISPRS(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2001, (56): 13 ~ 28.
- 3 DeBonet J S, Chao A. Structure-driven SAR image registration[EB/OL]. <http://www.ai.mit.edu>.
- 4 Forstner W, Gulch E. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centers of circular features [A]. In: Proceeding of Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data[C], Interlaken, Switzerland, 1987: 281 ~ 305.