

干涉合成孔径雷达复图像自动配准算法

刘宝泉, 冯大政, 武楠, 李军侠

(西安电子科技大学 雷达信号处理重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出了一种基于曲线特征的干涉合成孔径雷达(InSAR)复图像对的自动配准算法. 该算法借助于B-样条拟合特征曲线, 利用BFGS拟牛顿法加速最小均方差拟合, 通过相干系数法实现了曲线段的匹配, 采用最小二乘法计算仿射变换参数. 基于实测数据的实验结果表明, 该算法具有精度高、稳健性强和计算复杂性较小的特点.

关键词: 配准; B-样条拟合特征曲线; 拟牛顿法; 最小二乘法

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-2400(2006)06-0887-05

An image automatic registration algorithm for interferometric synthetic aperture radar complex images

LIU Bao-quan, FENG Da-zheng, WU Nan, LI Jun-xia

(Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: An automatic InSAR image registration approach is presented based on the curve feature. The characteristic of this technique is its application of a series of algorithms, such as B-spline curve fitting, Quasi-Newton Method, correlation coefficient and Least square method, to achieve superior accuracy and efficiency. Experimental and comparison results confirm our method's validity.

Key Words: registration; B-spline curve fitting; Quasi-Newton method; least square method

图像配准是对两幅图像进行空间几何变换, 使得图像对的共有特征能够匹配对应起来的过程, 它是影像处理和分析的一个重要步骤, 常应用于多源遥感数据的融合分析、多时相遥感图像的变化检测和高程重建等方面.

随着合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术的进一步发展, 人类获取了大量的适合进行干涉处理的 SAR 数据, 使得 InSAR 的研究从纯理论跨入到实用阶段. 在 InSAR 数据处理中, 两幅复图像的精确配准是提高地表高程测量精度的关键之一, 要求干涉复图像对达到亚像元级的配准精度, 而噪声的存在是影响 SAR 图像处理精度的最大障碍. 基于特征的方法是建立在图像幅度之上更高层次的信息, 主要利用图像的结构信息进行配准, 这种特性使得它更适合于多传感器的复图像配准. 特征提取和特征匹配是其中的关键步骤. 曲线特征的提取主要借助于边缘检测算子或统计概率的方法进行, 而曲线描述的方法主要有 Fourier 描述符、曲线矩^[1]、B-样条^[2]、链式码^[3]、多项式近似、自回归模型等方法. 其中 B-样条具有连续性、局部形状可控制性、仿射变换不变性等特点, 所以广泛应用于计算机辅助设计和计算机图形学, 但在遥感图像的处理上应用较少^[1]. 特征匹配是通过特征之间的空间关系或各种运算符发现其对应关系^[4], 进而完成对应匹配的过程. 常用的曲线匹配方法有微分算子、矩不变^[1]、多项式拟合^[5]、直方图、利用局部特征建立代价函数等算法, 这些方法均归结为通过先描述曲线的全局或局部特征, 再进行相似性测量完成匹配的过程. 在基于特征的方法中, 特征匹配依然是一个最具挑战的问题^[3].

笔者基于特征点检测和匹配, 利用 B-样条函数对边缘检测后主辅二值图像的特征曲线段进行拟合, 利用相关性测量得到主辅图像对应匹配的曲线段长度, 在完成各曲线段重心的求取后, 利用最小二乘法计算两幅图像的整体偏移, 完成两幅图像的像元级配准. 再利用插值的方法完成亚像元级配准. 与其他基于特征的像元级配准方法不同, 笔者提出的算法具有较好的抑制噪声的效果、运算量小、精度较高、稳健性强的特点.

收稿日期: 2005-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60372049)

作者简介: 刘宝泉(1974-), 男, 西安电子科技大学博士研究生.

1 图像的预处理

在基于特征的干涉 SAR 复图像的配准中,特征提取是重要的一步.特征是明显的、遍布在图像中、能够有效探测到的,在实验过程中保持着固定位置^[4].边缘检测算子是最常用的特征检测方法.文中采用了 Canny 算子^[6]检测边缘,由于 Canny 算子是建立在加性噪声之上检测边缘的,而 SAR 图像具有近似 Gamma 分布的乘性噪声,所以在边缘检测前先去噪处理,文中采用的是经典的 Lee 滤波.在此基础上,利用凸点具有高曲率的特性,在二值图像上进行特征点的检测,随后利用文献^[7]提出的算法完成特征点对的匹配过程.

2 B-样条曲线拟合

2.1 B-样条函数

B-样条函数是分段多项式函数,它利用部分参数(控制点)对曲线或曲面的某一段进行控制,从而实现对整条曲线或曲面的近似.一个 k 阶具有 $n+1$ 个参数(C_0, C_1, \dots, C_n)的 B-样条含有 $(n-k+1)$ 条曲线段 $r_i(t) = [x_i(t), y_i(t)]$,每个曲线段的形状仅由点列中的 k 个顺序排列的点所控制.立方 B-样条函数可以表示为

$$r(t') = \sum_{i=1}^{n-2} r_i(t' - i + 1) = \sum_{N=0}^n C_N Q_{N,4}(t') \quad (1)$$

其中 $Q_{N,4}(t')$ 是归一化的立方 B-样条基函数,它们具有水平平移的关系.

2.2 B-样条拟合

假设待拟合的曲线给定 m 个采样点 $r = (r_1, r_2, \dots, r_m) = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\} = (x, y)$,对应的 B-样条曲线有 $n+1$ 个控制点 ($m > n+1$).拟合误差的测量采用最小均方误差判断准则. d_j^2 代表原曲线的采样点 r_j 和它对应的 B-样条曲线上对应点 $r(t'_j)$ 的均方误差,见公式(2).

$$d_j^2 = \|r_j - r(t'_j)\|^2 = \left[x_j - \sum_{i=0}^n C_{i \bmod (n+1), x} Q_{i,4}(t'_j) \right]^2 + \left[y_j - \sum_{i=0}^n C_{i \bmod (n+1), y} Q_{i,4}(t'_j) \right]^2 \quad (2)$$

调整控制点和基函数的参数,可以得到拟合的最小均方误差.如果基函数参数 t'_j 已知,就可以通过最小二乘估计得到控制点的值.

实际上,控制点和基函数的参数均未知,这里采用了双迭代算法实现误差的最小化的过程.考虑到待优化函数具有解析表达式,所以利用梯度信息进行优化.其中的优化算法策略,采用了 BFGS 拟牛顿法,它的基本思想是用不包含二阶导数的矩阵近似牛顿法的 Hessian 矩阵的逆矩阵,简介如下:

设在第 K 次迭代后,得到点 $t^{(k+1)}$,将目标函数 $f(t)$ 在点 $t^{(k+1)}$ 展成 Taylor 级数,并取二阶近似,令 $t = t^{(k)}$,可得到 $t^{(k+1)}$ 处的 Hessian 矩阵的逆:

$$\nabla^2 f(t^{(k+1)})^{-1} = (t^{(k+1)} - t^{(k)}) (\nabla f(t^{(k+1)}) - \nabla f(t^{(k)}))^{-1} \quad (3)$$

利用得到的 Hessian 矩阵的逆构造搜索方向,完成优化的过程.

拟牛顿法有许多优点,比如,迭代中仅需一阶导数,不必计算 Hessian 矩阵,对于一般情况,具有超线性收敛速度,而且还具有 n 步二级收敛速率.

3 复图像的精配准

干涉 SAR 复图像的配准是通过调整一幅图像,达到将两幅图像的共同点对应于地面的同一点的过程,目的是利用相位差重建地物的高程信息.由于地形对相位的影响非常敏感,如果配准误差大于一个像元,则两幅图像完全不相干,干涉图为纯噪声,因此配准精度要达到亚像元级.考虑到噪声的影响,直接通过特征点匹配结果建立的对应关系精确度较低,而且稳健性也较差,这里采用了建立在其上的、通过匹配的曲线段得到对应关系,具有较强的抑噪效果,算法十分稳健.

3.1 曲线段匹配与仿射变换参数的计算

现有的方法^[1]缺点是:基于矩的方法对于相似的形状不敏感,而且容易受到噪声的影响;塔式搜索法需要较大的时间开销.本匹配算法正是笔者针对以上缺点提出的.根据第一节得到的点匹配结果,主图像上设定待拟合的曲线段一端位于匹配后的各特征点上,沿着边缘检测后的二值图像进行 B-样条曲线拟合,长度

为几十个像素点.在辅图像的对应之处也进行曲线拟合,然后将这两条曲线做相关处理,获取对应曲线段的匹配长度.在此基础上,得出匹配曲线段的重心坐标,利用最小二乘法计算仿射变换参数.

3.2 像元级配准

根据前面所述,配准的精度应达到亚像元级,考虑到直接插值计算量太大,先进行像元级配准,在此基础上再进行亚像元级精配准.所以,像元级的配准质量高低将直接决定亚像元级配准的速度和精确度,因此十分重要.

根据计算得到的仿射变换参数,对辅图像各像素点进行重采样,计算如式(4). X 和 Y 为辅图像各像素点坐标, α_i 和 β_i 为仿射变换参数, X' 和 Y' 为辅图像各像素点变换后的坐标.

$$X' = [1 \quad X \quad Y] \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}, \quad Y' = [1 \quad X \quad Y] \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

完成这一步骤后,两幅复图像的配准精度在 1 个像元以内.

3.3 亚像元级的配准

亚像元级的配准^[8]首先将主、辅图像作过采样处理,插值间隔为 0.1 个像元;然后采用基于窗口的搜索方法,进行最大相干估计,寻找可靠的相对偏移量;最后采用像元级配准计算偏移量的方法,计算偏移状况,接着对辅图像重采样完成亚像元级的配准.一般来说,亚像元级的配准精度可达到 1/8 像元,此时造成的去相干很小,符合 SAR 干涉处理的精度需求.

4 实验结果与性能分析

4.1 B-样条曲线拟合

采用立方均匀 B-样条曲线拟合一条原始曲线,控制点取 60 个,而采样点为 100 个,如图 1 所示.其中(a)为原始曲线,(b)为拟合后的曲线,十字标号为控制点的位置.

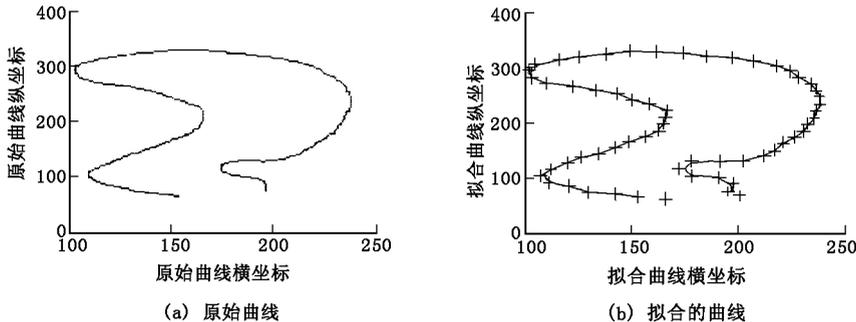


图 1 B-样条拟合曲线

采用弦长法得到的初值拟合误差 $d_j^2 = 9.2848$;用 BFGS 拟牛顿法寻优得到的拟合误差为 $d_j^2 = 7.8512$,平均迭代次数为 6 次;若采用文献[2]中黄金分割法,拟合误差虽然相差很小,为 $d_j^2 = 7.8958$,但平均迭代次数达到 22 次.由于每个采样点均需要优化,所以采用 BFGS 拟牛顿法大大减小了计算量.

4.2 复图像的精配准

本节利用实测数据,主要介绍曲线段匹配和像元级配准,给出了亚像元级配准的结果.分别使用了两幅河北尚义、意大利南部的一个海湾和意大利的 Etna 火山口 3 组干涉单视 SAR 复图像(SLC),配准目的是提取相位差,进而为地面的高程测量做准备.为了便于实验,均截取了 256×256 大小的子图像.

4.2.1 曲线段匹配

经过边缘检测、点特征提取及匹配和 B-样条曲线拟合过程,需要进行曲线段的匹配.根据 3.1 节提出的相关算法,完成了曲线段的匹配.与文献[1]的方法比较,笔者提出的算法不需要搜索过程,直接通过相干系数法完成了曲线段的匹配,不仅减小了计算量,同时避免了矩对于形状的不敏感性带来的计算误差.其中两条曲线段的相关性测量如图 2 所示.图 3 为主辅二值图像对应匹配拟合后的曲线段,为了方便视觉效果,仅给出了每幅图像的二值辅图像,同时将主辅图像上匹配的曲线段标注其上.

4.2.2 像元级配准

根据曲线段的匹配结果,提取各条曲线重心坐标,利用最小二乘法计算仿射变换参数,根据参数修正辅

图像各像素点坐标,完成像元级配准.三组数据的像元级配准的干涉相位图如图 4 所示.

4.2.3 亚像元级配准

按照 3.3 节步骤,得到了亚像元级的配准结果,如图 5 所示.其中图 5 (d)为(a)去平地后的干涉纹图.应该说明的是,干涉纹图在消除平地效应前后没有经过多视和滤波处理来提高视觉效果.

若进一步提高配准精度,只能从亚像元级配准考虑.由于此种方法是基于局部寻优后采用最小二乘法计算得到偏移状况,所以具有一定误差.具体提高维可采用基于每个像素点寻优的算法,但这种处理运算量较大.

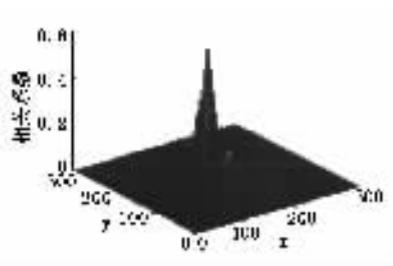


图 2 曲线段的相关性测量

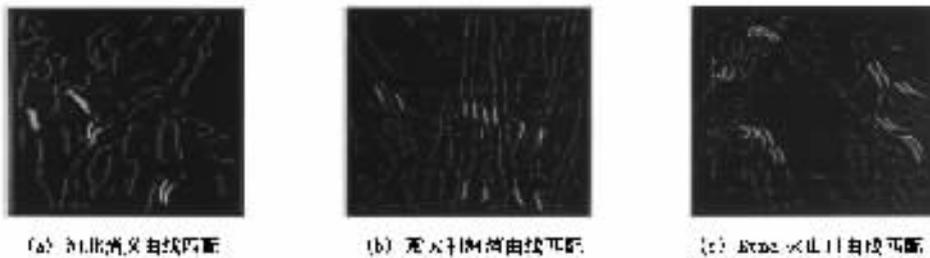


图 3 曲线段匹配结果

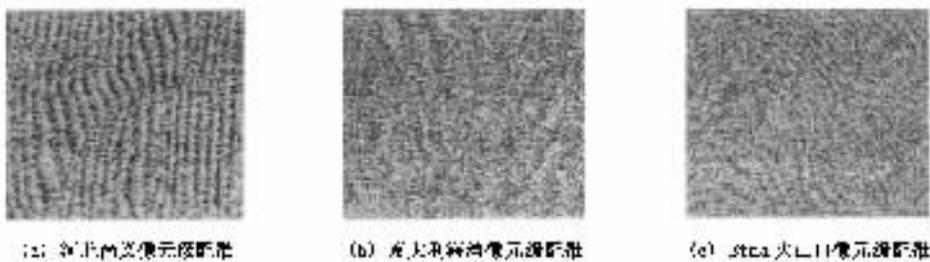


图 4 三组数据像元级配准的干涉相位图

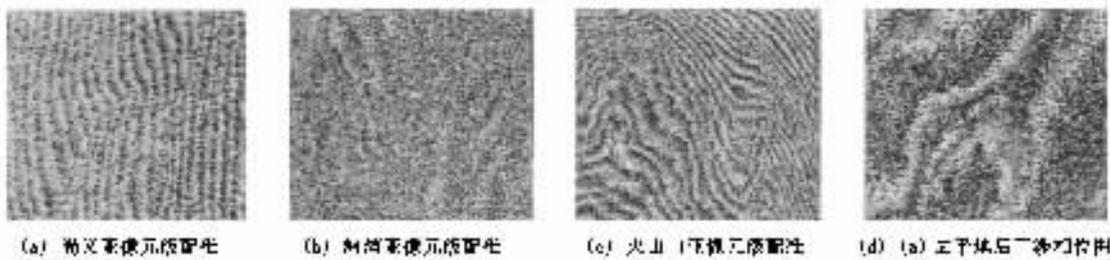


图 5 亚像元级配准的干涉相位图

表 1 配准结果的性能指标

	曲线匹配个数	亚像元级配准变换参数			X 残差	Y 残差	均方误差
河北尚义	4	-0.4327	1.0038	0.0067	0.4222	0.0124	0.4224
		0.0068	0.0027	1.0029			
海湾	6	0.0208	1.0027	-0.0112	0.0123	1.0782	1.0783
		1.0854	-0.0112	1.0040			
火山口	9	0.1642	0.9996	0.0008	0.1646	0.4231	0.4540
		0.4213	0.0021	0.9997			

4.2.4 实验误差分析

考虑到是实测数据的处理,配准的理想值是未知的.而文中提出的算法主要是针对像元级配准的,所以将亚像元级配准结果作为比较值,分析像元级配准的误差.表 1 给出以上 3 个配准实验的性能指标与误差分析.从表中可以看出,只有海湾数据配准精度较低,主要是因为这组数据的质量欠佳,导致边缘检测和点匹配结果误差较大,误差向后传递所致;而河北尚义和 Etna 火山口的像元级配准误差均远小于一个像素,说明本

算法较高的计算精度和强的稳健性,原因是曲线拟合、采用相干系数法完成匹配和利用最小二乘法建立仿射变换参数的过程均具有抑噪效果。

与文献[3]的算法进行比较的具体结果见表 2。

表 2 文中算法与文献[3]算法的性能比较

	文献[3]算法	文中算法
Total Error in X direction	0.6432	0.4222
Total Error in Y direction	0.7603	0.0124
RMSE	0.9959	0.4224

5 结束语

提出了一种基于曲线特征的干涉合成孔径雷达复图像配准算法,它也对其他类型的图像配准提供了新思路。该算法采用了 BFGS 拟牛顿算法加速曲线拟合、相干系数法完成曲线段匹配,有效地减小了计算量。同时,曲线拟合、匹配和仿射变换参数建立的过程均有抑噪效果,保障了计算精度和稳健性。实验和对比结果验证了算法的有效性。

参考文献:

- [1] Huang Zhaohui, Cohen F S. Affine-invariant B-spline Moments for Curve Matching[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1996, 10(10): 1473-1480.
- [2] Cohen F S, Huang Z, Yang Z. Invariant Matching and Identification of Curves Using B-splines Curve Representation[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1995, 4(1): 1-10.
- [3] Dai X, Khorram S. A Feature-based Image Registration Algorithm Using Improved Chain-code Representation Combined with Invariant Moments[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2351-2362.
- [4] Zitova B, Flusser J. Image Registration Methods: a Survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(4): 977-1000.
- [5] Xia Minghui, Liu Bede. Image Registration by "Super-Curves"[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2004, 13(5): 720-732.
- [6] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [7] Chang S H, Cheng F H, Hsu W H. Fast Algorithm for Point Pattern Matching: Invariant to Translations, Rotations and Scale Changes[J]. Pattern Recognition, 1997, 30(2): 311-320.
- [8] Wang Chao, Zhang Hong, Liu Zhi. Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry[M]. Beijing: Science Press, 2002.

(编辑:高西全)

(上接第 848 页)

参考文献:

- [1] ITU-T Rec H. 264. Advance Video Coding for Generic Audiovisual Services[S]. March, 2005.
- [2] Wiegand T, Sullivan G J, Bjontegaard G, et al. Overview of the H. 264/AVC Video Coding Standard[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(7): 560-576.
- [3] Marpe. D, Schwarz H, Wiegand T. Context-based Adaptive Binary Arithmetic Coding in the H. 264/AVC Video Compression Standard[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(7): 620-636.
- [4] Chen Jianwen, Chang Chengru, Lin Younlong. A Hardware Accelerator for Context-based Adaptive Binary Arithmetic Decoding in H. 264/AVC[A]. ISCAS 2005[C]. Kobe: IEEE Circuits and Systems Society, 2005. 4525-4528.
- [5] H. 264 Reference Software, JM9. 6[DB/OL]. http://iphome.hhi.de/suehring/tml/download/old_jm/jm96.zip, 2005-10-10.

(编辑:李维东)