

# 基于曲线拟合的干涉合成孔径雷达(InSAR)复图像自动配准算法

刘宝泉 冯大政 李军侠 武楠

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 由于乘性噪声和相干斑的存在,干涉合成孔径雷达(InSAR)复图像对的配准算法比传统的图像配准算法更困难。该文提出了一种基于B-样条曲线拟合和匹配的InSAR复图像对的自动配准算法,能够有效地配准InSAR复图像对。在利用最小二乘法建立配准参数后,应用两步法完成了亚像元级配准。实验结果表明,该算法具有较高的精度和稳健性。

**关键词:** SAR; B-样条曲线拟合; 配准; 曲线匹配; 亚像元级

中图分类号: TN 957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1666-04

## An Image Automatic Registration Algorithm for InSAR Complex Images Based on Curve Fitting

Liu Bao-quan Feng Da-zheng Li Jun-xia Wu Nan

(National Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Due the presence of multiplicative and speckle noise, the method of registering InSAR image is more difficult than traditional image registration methods. In this paper, an automatic InSAR image registration method is presented, based on B-spline curve fitting and matching, that can handle the registration of InSAR image efficiently. After the registration parameters are established by the least square method, a two-step method is applied to registering with sub-pixel accuracy. The experimental results demonstrate the algorithm is of robustness, efficiency and accuracy.

**Key words:** SAR; B-spline curve fitting; Registration; Curve matching; Sub-pixel accuracy

### 1 引言

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。随着干涉合成孔径雷达(InSAR)测量技术的进一步发展,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,要求干涉复图像对达到亚像元级的配准精度<sup>[1]</sup>,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。作为一种曲线建模的方法,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,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<sup>[2]</sup>。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<sup>[3]</sup>,进而完成对应匹配的过程。常用的曲线匹配方法均可归结为通过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。特征匹配的计算复杂性一直是研究的热点和难点。

本文提出了利用B-样条函数,将边缘检测后主辅二值图像的曲线段进行拟合,搜索得到辅图像中与主图像匹配的曲线段长度,完成各曲线段重心的求取后,进一步完成两幅图

像的像元级配准。再利用插值的方法完成亚像元级配准。本文提出的算法具有较好的抑制噪声的效果、运算量较小、稳健性强的特点。本文首先简要介绍在边缘检测和凸点提取的基础上进行的点匹配过程;然后回顾B-样条的相关知识,在此基础上,介绍如何采用B-样条对主辅二值图像的部分曲线段进行拟合,以及对曲线段匹配的过程;在得到各曲线段重心坐标的基础上,利用最小二乘法计算主辅图像的仿射变换参数,通过将辅图像重新定位后完成像元级配准,进而实现复图像对亚像元级的配准过程;文章最后是实验结果和误差分析与比较。

### 2 图像的预处理

本文采用了Canny算子<sup>[4]</sup>检测边缘,在边缘检测前先进行去噪处理,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,利用文献[5]提出的算法完成特征点对的匹配过程。

### 3 B-样条曲线拟合

#### 3.1 B-样条函数

B-样条函数是分段多项式函数,它的特点是利用部分参数(控制点)对曲线或表面的某一段进行控制,从而实现对整条曲线或表面的近似。3次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  $Q_{N,4}(t')$  是归一化立方B-样条基函数。

$k$ 阶B-样条具有  $k-1$ 阶连续和可导、局部曲线可控制性等特点;在仿射变换下,只有控制点的位置发生变化,而基函数保持不变的仿射不变性。这些特性为B-样条函数在形状表示和分析中提供了非常好的保障。

### 3.2 B-样条拟合<sup>[6]</sup>

假设待拟合的曲线给出  $m$  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 ( $m > n+1$ )。这里重点考虑的问题主要有两个:(1)原曲线与拟合曲线之间对应误差测量的位置应该明确;(2)B-样条函数的基函数参数  $t'_j$  和控制点参数的确定。这两个问题又具有同一性,即参数一旦确定,误差测量也就随之确定了。下面分别加以介绍。

**3.2.1 拟合误差测量** 检验曲线拟合状况的指标是拟合误差,这里采用了最小均方误差判断准则。原曲线上的采样点作为真实值,拟合后的B-样条曲线上设法找到对应点作为测量点,也就是参数  $t'_j$  的值。因为B-样条函数分解为两个一维函数,所以控制点的估计可以分别计算,以减小计算的复杂性。 $d_j^2$  代表原曲线的采样点  $r_j$  和B-样条曲线上对应点  $r(t'_j)$  的均方误差,见式(2)。

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

通过改变控制点参数和基函数的参数,可以得到基于  $n+1$  个控制点的最小均方误差  $d_j^2$ 。如果  $t'_j$  的值已知,可以通过最小二乘估计得到控制点的值,见式(3)。这里采用

$$C_f^* = (Q^T Q)^{-1} Q^T f, f = x, y \quad (3)$$

标准的立方B-样条函数。

**3.2.2 参数迭代估计** 为了得到控制点参数  $C_f^*$ ,  $t'_j$  的值先应该确定,本小节主要阐述这个问题。这里应用了类似于EM(最大期望)算法的迭代过程,误差  $d_j^2$  最小化的迭代过程如下:

(1) 选择  $t'_j$  的初始值作为  $t'_j(\text{old})$ ;

(2) 根据  $t'_j(\text{old})$  计算得到  $Q_i(t')$ , 并将  $Q_i(t')$  代入式(3)得到  $C_f^*(\text{old})$ , 一并代入式(2), 确定  $d_j^2(\text{old})$ ;

(3) 将  $C_f^*(\text{old})$  固定, 通过某种策略最小化  $d_j^2$  来达到对  $t'_j$  的更新, 得到  $t'_j(\text{new})$ 。基于  $t'_j(\text{new})$ , 再次得到  $C_f^*(\text{new})$ , 计算  $d_j^2(\text{new})$ ;

(4) 如果  $d_j^2(\text{new}) \leq d_j^2(\text{old}) \cup |d_j^2(\text{new}) - d_j^2(\text{old})| > \text{threshold}$ ,  $C_f^*(\text{new}) \rightarrow C_f^*(\text{old})$ ,  $d_j^2(\text{new}) \rightarrow d_j^2(\text{old})$ , 转回(3); 否则(5);

(5) 停止,  $C_f^*(\text{old})$ ,  $t'_j(\text{old})$  和  $d_j^2(\text{old})$  为最终值;

应该说明的是,上面步骤(3)中最优化的策略必须是收敛的,这里采用了试探法中的黄金分割法,经过数步迭代后,  $t'_j$  值均可以收敛到一个局部极小点。而  $t'_j$  初始值可由弦长法<sup>[2]</sup>(Chord Length Method, CLM)获得。

## 4 仿射变换参数的建立

由于受到噪声的影响,直接通过前面的特征点匹配结果建立的对应关系不稳健,导致方法的适用性有限。本文采用了建立在点匹配基础上曲线段匹配的方法,具有较强的抑噪效果,算法十分稳健。

若建立仿射变换的参数,必须先完成B-样条拟合曲线的匹配,计算出各条拟合的曲线段重心坐标,再根据最小二乘法得到两幅图像的偏移状况。

### 4.1 曲线段的匹配

根据前面得到的点匹配结果,设定待拟合的曲线段一端位于匹配后的各特征点上,在主图像上沿着边缘检测后的二值图像的边缘进行B-样条曲线拟合,拟合的长度以几十个像素点为宜。然后分别计算各拟合的曲线段的加权矩,计算公式如下:

$$ma(p, q)^{(j)} = \int_{s=0}^s x^p(s) y^q(s) w_j(x, y) ds \quad (4)$$

然后,以辅二值图像上与主二值图像对应的各匹配点为起始点进行B-样条曲线拟合,拟合的长度需要与对应主图像上的拟合长度匹配,具体方法为:根据塔式搜索法思想,在辅二值图像对应处的边缘上进行从粗到细的搜索,目的是使误差函数  $E(s_{\text{start}}, s_{\text{end}})$  达到最小,确定终止点的坐标。主辅二值图像对应加权矩的计算公式相同,见式(4)。误差函数见式(5):

$$E(s_{\text{start}}, s_{\text{end}}) = |\bar{m}(0, 0)^{(j)} - ma(0, 0)^{(j)}(s_{\text{start}}, s_{\text{end}})| \quad (5)$$

### 4.2 仿射变换参数的计算

文献[1]和文献[2]所提供的算法是根据两条拟合的对应曲线段的零到二阶加权矩关系式得出仿射变换参数,这样做具有一定的局限性。如果这条曲线不是遍历在整幅图像上,误差会直接受到噪声、曲线段匹配质量的影响。本文提出的算法是基于前面的结果,分别在两幅图像上拟合若干条匹配的曲线段,然后分别计算各曲线段的重心坐标,利用最小二乘法得出对应的仿射变换参数。计算公式如下:

$$\alpha' = (B^T B)^{-1} (B^T R_x), \quad \beta' = (B^T B)^{-1} (B^T R_y) \quad (6)$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_n & Y_n \end{bmatrix}, \quad R_x = \begin{bmatrix} X'_1 \\ \vdots \\ X'_n \end{bmatrix}, \quad R_y = \begin{bmatrix} Y'_1 \\ \vdots \\ Y'_n \end{bmatrix}, \quad \alpha' = \begin{bmatrix} \alpha'_0 \\ \alpha'_1 \\ \alpha'_2 \end{bmatrix}, \quad \beta' = \begin{bmatrix} \beta'_0 \\ \beta'_1 \\ \beta'_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 5 复图像的精配准

完成特征匹配后, 根据建立的对应关系调整辅图像, 目的是将两幅图像的共同点对应地面的同一点, 进一步计算干涉相位。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。考虑到直接进行重采样计算量太大, 所以先进行像元级配准, 在此基础上, 再进行亚像元级精配准。所以, 像元级配准质量的高低将直接决定亚像元级配准的精确度和速度, 因此十分重要。应该说明的是, 仿射变换参数是建立在二值图像基础上的, 而配准是根据其建立的对应关系修正辅图像, 最终达到两幅图像同一位置点对应地面同一点的过程。

#### 5.1 像元级配准

根据式(6,7)计算出  $\alpha'$  和  $\beta'$ , 代入式(8),  $X'$  和  $Y'$  为辅图像各像素点相对于主图像的定位情况。完成这一步骤后, 两幅复图像的配准精度在 1 个像元以内。

$$X' = [1 \ X \ Y] \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}, \quad Y' = [1 \ X \ Y] \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

#### 5.2 亚像元级的配准<sup>[1]</sup>

亚像元级的精配准分为 3 步:

(1) 对主、辅图像作过采样处理。采用合适的插值方法对图像对进行插值, 插值间隔为 0.1 个像元。

(2) 进行最大相干估计。采用基于窗口的搜索方法, 寻找可靠的相对偏移量估算值。

(3) 偏移量拟合与辅图像的重采样。同样采用上述的最小二乘法利用二阶多项式对匹配的数据对进行拟合, 计算复图像对的坐标转换关系, 接着对辅图像进行重采样。

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。

## 6 实验结果与误差分析

### 6.1 B-样条曲线拟合

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

根据式(2), 采用弦长法直接得到的初值拟合的误差  $d_j^2 = 9.2848$ ; 而采用黄金分割法优化后参数的拟合误差

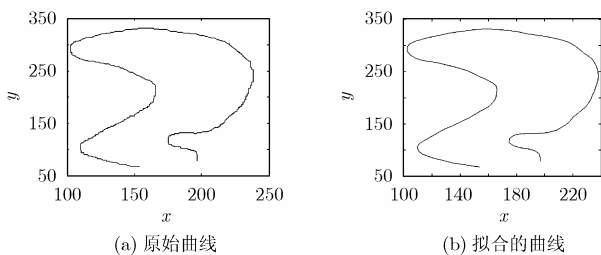


图1 B-样条拟合曲线

$d_j^2 = 7.8958$ 。主要因为曲线的采样点较多(100个), 所以采用初值拟合的误差不大。

### 6.2 复图像的精配准过程

本节将结合实测数据, 重点介绍曲线段匹配、像元级配准, 并给出亚像元级配准的结果。本文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。为了便于实验和分析, 本文分别截取了  $256 \times 256$  个像素的子图像。

**6.2.1 曲线段匹配** 经过边缘检测、点特征提取和匹配过程, 再根据B-样条曲线拟合与匹配过程, 得到主辅二值图像对应匹配的拟合后的曲线段, 如图2所示。为了便于说明, 本文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。



(a) 河北尚义曲线匹配 (b) 意大利海湾曲线匹配 (c) Etna 火山口曲线匹配

图2 曲线段匹配结果

**6.2.2 像元级配准** 根据曲线段匹配后的结果, 分别对各条曲线提取重心坐标, 利用最小二乘法得出仿射变换参数, 修正辅图像各像素点坐标, 完成像元级配准。河北尚义地区主辅图像的传输函数式如式(9)所示。

完成这一步骤后, 两幅复图像的配准精度在1个像元之内。图3是其完成像元级配准后的干涉相位图。图4分别为意大利海湾和Etna火山口的干涉相位图。

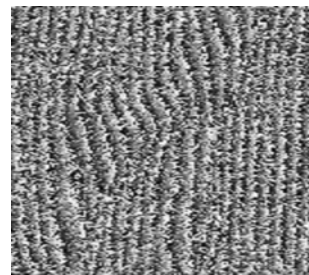
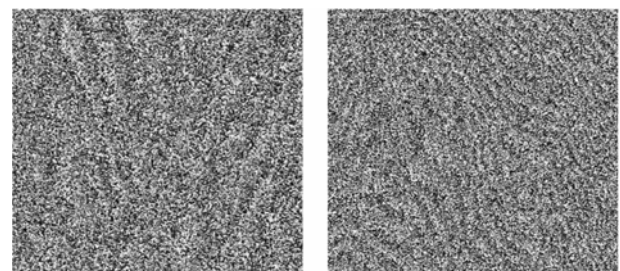


图3 河北尚义的干涉相位图



(a) 意大利海湾像元级配准 (b) Etna 火山口像元级配准

图4 另两组数据的干涉相位图

$$\left. \begin{aligned} X' &= 3.1432 + 1.0060X - 0.0216Y \\ Y' &= 2.5254 - 0.0011X + 0.9940Y \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

**6.2.3 亚像元级配准** 经过过采样、相干搜索、偏移量拟合与辅图像的重采样,我们得到了两幅偏差为亚像元级的复图像。图5为河北尚义亚像元级配准后的干涉相位图,利用最小二乘法进一步得到的传输函数见式(10)。干涉图在去平地效应前后没有经过多视和滤波处理来提高视觉效果。

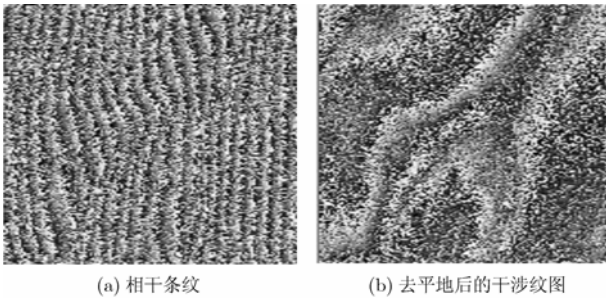


图5 河北尚义的亚像元级配准干涉相位图

$$\left. \begin{aligned} X' &= -0.4461 + 1.0043X + 0.0071Y \\ Y' &= 0.0065 + 0.0042X + 1.0035Y \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

### 6.3 误差分析与性能比较

由于是实测数据的处理,所以真值是未知的,这里采用亚像元级配准后的结果作为标准,与像元级配准的结果比较,分析像元级配准的误差。

根据亚像元级配准得到的传输函数,可以知道像元级配准与最终结果的误差。河北尚义的传输函数见式(10),由于篇幅原因,本文没有列出其余两个传输函数。

根据式(10),可以得到:除去结果有很小的尺度和旋转变化外(公式中  $X$  和  $Y$  的系数),误差主要来自于平移的影响,说明本算法较高的计算精度和较强的稳健性,这主要源自曲线拟合,采用了曲线特征代替点特征和最小二乘法建立仿射变换参数的过程均含有抑噪效果。具体参数见表1。

表1 三个地区的配准结果

	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	-0.4461, 1.0043,	0.4347	0.0142	0.4349
		0.0071, 0.0065,			
海湾	6	0.0042, 1.0035,	0.0148	1.1124	1.1125
		0.0223, 1.0030,			
火山口	9	-0.0105, 1.1293,	0.1754	0.4392	0.4729
		0.1784, 0.9997,			
		0.0009, 0.4354,			
		0.0033, 1.0005			

为了进一步说明本文算法的有效性,我们与文献[2]采用的算法进行了比较。由于文献[2]是采用一条拟合曲线通过加权矩的关系建立的仿射变换参数,所以其像元级的配准精度取决于采用那条曲线,具有一定的偶然性,从而体现出不稳

健的特性。从表2还可以得到,采用任一条曲线的配准误差都远大于本文的算法。

表2 算法性能比较

	X 残差	Y 残差	均方误差
采用曲线 1 计算	2.1485	-0.0713	2.1497
采用曲线 2 计算	1.9235	0.4079	1.9663
采用曲线 3 计算	-0.6432	0.7603	0.9959
采用曲线 4 计算	-3.4289	-1.0969	3.6001
本文算法 (采用河北尚义)	0.4347	0.0142	0.4349

## 7 结束语

本文提出了一种基于曲线段匹配的复图像配准方法。该方法建立在边缘检测和特征点对匹配的基础上,根据均匀立方B-样条函数拟合曲线段和利用加权矩之差最小准则实现了曲线段的匹配,通过最小二乘法建立了仿射变换参数,完成像元级配准过程。实验和对比结果表明,本算法具有较高的精度和稳健性。

### 参考文献

- [1] 王超,张红,刘智.星载合成孔径雷达干涉测量[M].北京:科学出版社,2002:73-79.
- [2] Huang Zhao-hui and Cohen S. Affine-invariant B-Spline moments for curve matching. *IEEE Trans. on Image Processing* [J]. 1996, 10(10): 1473-1480.
- [3] Zitova B and Flusser J. Image registration methods: A survey[J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(4): 977-1000.
- [4] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [5] Chang Shih-Hsu, Cheng Fang-Hsuan, and Hsu Wen-Hsing. Fast algorithm for point pattern matching: Invariant to translations, rotations and scale changes[J]. *Pattern Recognition*, 1997, 30(2): 311-320.
- [6] Cohen F S, Huang Z, and Yang Z. Invariant matching and identification of curves using B-splines curve representation[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995, 4(1): 1-10.

刘宝泉: 男,1974年生,博士生,研究方向为干涉 SAR 数据处理、SAR 成像。

冯大政: 男,1959年生,教授,博士生导师。已发表学术论文 50 余篇,其中近 20 篇被 SCI 收录,研究方向为雷达成像、现代信号处理、神经网络等。

李军侠: 男,1978年生,博士生,研究方向为 SAR 图像后处理。

武楠: 男,1979年生,博士生,研究方向为雷达成像、干涉 SAR。