

一种 SAR 图像的自动匹配算法及实现

黄勇 王建国 黄顺吉

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 合成孔径雷达 (SAR) 图像的匹配处理是 SAR 图像后处理及应用的重要环节。该文提出了一种基于图像特征的快速匹配实现方法。针对两幅 SAR 图像, 该方法进行边缘检测和区域轮廓提取以及区域特征描述, 最后实现图像的自动匹配。利用真实 SAR 图像进行了试验, 获得很好的试验结果。

关键词: 合成孔径雷达, 图像匹配, 边缘检测, 图像分割

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)01-0006-04

Image Matching Algorithm and Implementation for SAR Images

Huang Yong Wang Jian-guo Huang Shun-ji

(Department of Electronic Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract SAR image matching is important to SAR applications. This paper presents a method to fast match SAR images based on image feature. Edge detection and image segmentation are carried out firstly. Then image matching is performed based on the feature of segmented image. The test carried out with real SAR images has achieved good results.

Key words SAR, Image matching, Edge detection, Image segmentation

1 引言

SAR 图像匹配处理是寻求多幅 SAR 图像中像素点对应关系的过程, 它是 SAR 图像应用中的重要环节和一个技术难点。它直接涉及和影响到 SAR 图像的多种应用。例如: SAR 图像与可见光图像的多源数据融合, SAR 的变化检测和运动目标检测, SAR 图像的拼接等等。

针对 SAR 的应用背景, SAR 图像匹配必须采用高效可靠的自动匹配方法。图像自动匹配方法分为两大类: 基于目标区域的方法和基于目标特征的方法^[1-3]。通常意义上, 需要进行匹配的 SAR 图像可能具有不同的分辨力, 不同的投射角, 视角, 或者不同的极化, 不同的时段, 不同的天气, 不同的雷达波段, 不同的 SAR 载体, 不同的工作模式, 这样虽然来源于同一雷达照射场景的图像会有不同的图像表现。这些因素在图像匹配意义上来讲, 图像中的同一目标会存在图像尺度不一致, 或者扭曲, 旋转, 或者表现出变化的图像强度, 整体图像的目标布局也可能不一致。再者, SAR 图像的相干斑特性, SAR 灰度图像的动态范围大等自身特点, 这些都不利于采用基于目标区域的方法来实现图像自动匹配。基于目标区域匹配的方法通常采用窗口匹配求其互相关, 求相关系数, 或序列相关等具体实现过程, 这些方法的前提是: 图像的布局, 尺度具有很强的一致性, 并且 SAR 图像的高动态范围和相干斑特性也会严重影响这些方法的效果。因此本文针对 SAR 图像特点, 提出一种适合 SAR 图像的基于目

标区域特征的匹配方法, 以获得好的匹配效果。

本文以 SAR 图像匹配处理结构来组织安排, 分别描述图像边缘特征提取, 区域分割, 区域匹配等处理流程, 如图 1 所示。

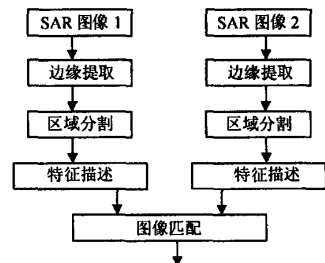


图 1 处理流程简图

2 基于边缘特征的图像分割

在本文基于区域特征的匹配方法中, 图像中典型区域或大区域的提取至关重要。也就是要把图像 X_1 和 X_2 分别分割成图像块, 这个分割是基于图像的边缘特征。这个过程分几步完成图像的边缘检测和边缘连接以实现图像分割。

我们提出一种结合拉普拉斯高斯 (LoG) 算子、强度算子、以及图像形态优化的方法进行边缘检测和连接来完成图像分割。这既兼顾边缘检测的准确性和弱边缘的保护, 而且又快速有效完成边缘优化和边缘连接。

2.1 边缘检测

LoG 算子是遥感图像中常用的边缘检测算法^[4]，通过检测“过零点”能够较可靠地确定边缘的位置。LoG 的高斯平滑过程相当于一个低通滤波器，可以有效地抑制高频噪声，尤其拉普拉斯过程是二阶的差分过程，对高频噪声非常敏感。

LoG 算子的系统函数为 $h(x,y) = \nabla^2 g(x,y) = \exp\{(x^2 + y^2 - \sigma^2)/\sigma^4\} \cdot \exp\{-(x^2 + y^2)/(2\sigma^2)\}$ ，其中 ∇^2 为拉普拉斯算子， $g(x,y)$ 是二维高斯过程，其定义为 $g(x,y) = \exp\{-(x^2 + y^2)/(2\sigma^2)\}$ ， σ 是高斯分布的均方差。图像 X_1 和 X_2 通过 LoG 算子检测出所有潜在的边缘。

2.2 边缘连接

因为噪声的存在，检测的边缘像素是孤立的或分小段的，甚至还有个别“虚假边缘”，为组成区域的封闭边界以将不同区域分开，需要将边缘连接起来。为了有效地连续边缘，我们采用梯度算子和图像形态学方法来完成和优化^[5]。连接过程分如下几步来完成，主要目的是获取典型大区域的边缘并连接形成图像区域。

2.2.1 边缘图的优化 用形态开启和闭合算子滤除小区域的边缘，散乱边缘，或者虚假边缘，保留大区域边缘，得到图 X_{O_i} ($i=1, 2$)，这是因为匹配时只需要用一些典型大区域便可，这样大大地减少连接运算量。

$$X_{O_i} = (X_{E_i} \circ B) \bullet B, \quad i=1, 2$$

其中 \circ 和 \bullet 分别是开启运算和闭合运算， B 为设定的运算模板。

2.2.2 按梯度算子进行边缘连接 计算图像 X_{O_i} ($i=1, 2$) 的梯度 $\nabla f(x,y) = [G_x, G_y]$ $= [\partial f/\partial x, \partial f/\partial y]$ ，梯度幅度： $G_A(x,y) = \text{mag}(\nabla f) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$ ，梯度方向： $G_\phi(x,y) = \text{arg tan}(G_y/G_x)$ 。

边缘像素连接的基准是边缘的梯度具有相似性，所以根据如下门限判断进行连接， T_A 和 T_ϕ 分别为梯度幅度和相位门限。

$$|\nabla f(x,y) - \nabla f(s,t)| < T_A, \quad |G_\phi(x,y) - G_\phi(s,t)| < T_\phi$$

如果满足上述两个条件就将边缘点 (x,y) 和边缘点 (s,t) 连接。完成该步操作得到的边缘图分别用 X_{L1} 和 X_{L2} 表示。

2.2.3 边缘图的再优化 检测 X_{L_i} ($i=1, 2$) 边缘点的连接，对剩余尚未构成区域的边缘进行形态膨胀连接，并腐蚀细化，得到图 X_{T_i} ($i=1, 2$)，

$$X_{T_i} = (X_{L_i} \oplus D) \ominus E, \quad i=1, 2$$

其中 \oplus 和 \ominus 分别是膨胀运算和腐蚀运算， D 为膨胀模板， E 为腐蚀模板。

2.2.4 形成图像区域 填充封闭区域，形成图像区域，并用二值图 $X_{R_i} = \{R_1^i, R_2^i, \dots, R_j^i\}$ ($i=1, 2$) 表示， R_j^i 表示第 i 幅的第 j 个区域。

3 图像匹配

3.1 图像特征描述

欲对两幅图像进行匹配，首先要对两幅图像进行特征描述。匹配两幅 SAR 图像是基于已获取的图像区域的特征来进行。我们知道这种描述需要克服图像的平移、旋转、尺度、起点等导致的影响。简单的特征描述符有：边界长度、边界直径、边界曲率等；其他的描述符有：矩、链码、形状数、傅里叶描述、状矩阵等。这些描述符可以单独使用，也可以联合使用。为了有效而快速地描述图像区域特征，我们采用区域的不变矩来进行特征描述。

区域图像 $f(m,n)$ 的矩定义为

$$M_{pq} = \sum_m \sum_n m^p \cdot n^q \cdot f(m,n)$$

其中 p, q 为矩的阶数，显然矩和区域是一一对应的。

区域图像的归一化中心矩定义为

$$\mu_{pq} = \frac{\sum_m \sum_n (m - \bar{m})^p (n - \bar{n})^q f(m,n)}{[\sum_m \sum_n (m - \bar{m})(n - \bar{n}) f(m,n)]^{\frac{p+q}{2} + 1}}$$

其中 \bar{m}, \bar{n} 是区域的重心：

$$\bar{m} = M_{10} / M_{00}, \quad \bar{n} = M_{01} / M_{00}$$

我们用一向量 $\Phi = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_7]$ 来描述图像区域，其中

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \mu_{20} + \mu_{02}, & \varphi_2 &= (\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4 \cdot \mu_{11}^2 \\ \varphi_3 &= (\mu_{30} - 3 \cdot \mu_{12})^2 + (\mu_{03} - 3 \cdot \mu_{21})^2 \\ \varphi_4 &= (\mu_{30} + \mu_{12})^2 + (\mu_{03} + \mu_{21})^2 \\ \varphi_5 &= (\mu_{30} - 3 \cdot \mu_{12})(\mu_{30} + \mu_{12})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - 3 \cdot (\mu_{03} + \mu_{21})^2] \\ &\quad + (3 \cdot \mu_{21} - \mu_{30})(\mu_{21} + \mu_{03})[3 \cdot (\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{03} + \mu_{21})^2] \\ \varphi_6 &= (\mu_{20} - \mu_{02})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2] \\ &\quad + 4 \cdot \mu_{11} \cdot (\mu_{30} + \mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03}) \\ \varphi_7 &= (3 \cdot \mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{30} + \mu_{12})[(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - 3 \cdot (\mu_{03} + \mu_{21})^2] \\ &\quad + (3 \cdot \mu_{12} - \mu_{30})(\mu_{21} + \mu_{03})[3 \cdot (\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{03} + \mu_{21})^2] \end{aligned}$$

向量 Φ 来描述图像区域有如下性质：

$\varphi_i, i=1, \dots, 7$ ，具有平移不变性，尺度不变性，旋转不变性；

$\varphi_i, i=1, \dots, 6$ ，还具有反转不变性；

φ_7 具有反转后幅值不变，仅符号改变；

定义向量 Φ' 与向量 Φ'' 间的距离为欧几里德距离：

$$D_{i,j} = \|\Phi^i - \Phi^j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^7 [\varphi_k^i - \varphi_k^j]^2}$$

3.2 图像匹配

图像匹配是基于上述的不变矩, 我们寻求两幅图像区域不变矩距离最短的3组对应区域, 然后选择它们的重心作为匹配控制点, 最后求得匹配系数。处理过程如下所述:

- (1) 计算 X_{Ri} 中区域 R_i' 的不变矩, 得到两个向量 $V_i = \{\Phi_1^i, \Phi_2^i, \dots, \Phi_N^i\}$, $i=1,2$, Φ_i' 是 R_i' 的不变矩向量。
- (2) 计算 V_1 和 V_2 的距离矩阵 $D = \{d_{i,j}\}$, $d_{i,j} = \|\Phi_i^i - \Phi_j^j\|$, D 大小是 $N_1 \times N_2$ 。
- (3) 查找矩阵中3个最小值, 其对应的3组区域分别用 $\{R_{S^i}, R_{T^i}\}$, $i=1,2,3$ 表示, 它们将用来计算匹配系数。
- (4) 计算上步3组区域的重心 $(\bar{x}_{S_i}, \bar{y}_{S_i})$ 和 $(\bar{x}_{T_i}, \bar{y}_{T_i})$, $i=1,2,3$, 以作为匹配控制点。
- (5) 解匹配方程, 求得匹配系数 $\{\alpha_x, \beta_x, \gamma_x\}$ 和 $\{\alpha_y, \beta_y, \gamma_y\}$

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_{T_i} &= \alpha_x + \beta_x \cdot \bar{x}_{S_i} + \gamma_x \cdot \bar{y}_{S_i} \\ \bar{y}_{T_i} &= \alpha_y + \beta_y \cdot \bar{x}_{S_i} + \gamma_y \cdot \bar{y}_{S_i} \end{aligned} \right\}, \quad i=1, 2, 3$$

4 试验结果

我们利用 SAR 图像进行了试验, 试验图像是中国香港地区的 SAR 图像, 其中图 2 是 C 波段图像, 大小为 524×732 , 图像平均灰度值为 70.6; 图 3 是 L 波段图像, 大小为 524×731 , 图像平均灰度值为 90.4。

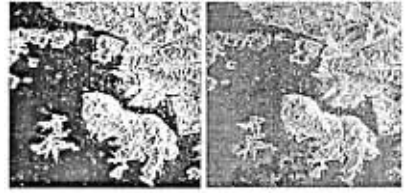


图 2

图 3

图 4 和图 5 分别是 C 波段和 L 波段图像的边缘检测图。图 4 的平均梯度强度为 22.9, 边缘检测门限 $T_A=20, T_P=0.6$; 图 5 的平均梯度强度为 27.1, 边缘检测门限 $T_A=20, T_P=0.6$ 。

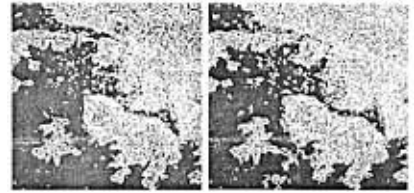


图 4

图 5

图 6 和图 7 分别是 C 波段和 L 波段图像的区域二值图。



图 6

图 7

表 1 和表 2 分别引出了图像 5 和图像 6 的区域重心 (x,y) 结果和不变矩距离 D_{ij} 结果。

表 1 图 5 和图 6 的区域重心 (x,y) 结果

图像	1	2	3	4	5	6	7	8
图像 5								
X	52.4125	67.8171	125.0967	198.7591	332.2722	268.7356		
Y	318.1188	251.0835	538.6432	140.5373	523.4588	197.1506		
图像 6								
X	17.614	109.913	52.6075	67.6329	132.767	201.135	333.26	268.229
Y	325.867	148.63	318.489	251.266	531.933	140.998	524.57	197.564

表 2 图 5 和图 6 二者不变矩距离 $D_{ij} (\times 10^{-3})$ 结果

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	102.35	389.9016	2.9541	42.312	247.490	42.680	55.768	6.5713
2	66.466	354.570	42.362	2.7392	209.913	5.8729	19.046	33.207
3	63.765	237.080	165.35	121.56	88.1324	122.573	106.869	156.32
4	73.835	362.075	33.204	12.090	218.1345	13.6143	26.265	24.064
5	43.313	331.552	62.984	21.571	187.6043	24.583	4.3678	54.064
6	93.94	381.867	11.967	33.082	238.8429	33.429	46.936	2.807

两幅图像的匹配结果为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9976 & 0.0009 \\ 0.0006 & 1.0008 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0015 \\ 0.0032 \end{bmatrix}$$

5 结论

本文提出了一种 SAR 图像自动匹配的实现方法。它在 SAR 图像进行优化处理的基础上,基于图像的区域特征的不变矩描述进行匹配。试验结果表明:这是一种有效的 SAR 图像匹配方法,可以取得理想的效果。

参 考 文 献

- [1] Dai X, Khorram S. A feature-based image registration algorithm using improved chain-code representation combined with invariant moments. *IEEE Trans. on GRS*, 1999, 37(5): 2351 - 2362.
 - [2] Li H, Manjunath B S, Mitra S K. A contour based approach to multi-sensor image registration. *IEEE Trans. on GRS*, 1995, 4(3): 320 - 334.
 - [3] Ventura A D, Rampini A, Schettini R. Image registration by recognition of corresponding structures. *IEEE Trans. on GRS*, 1990, 28(3): 305 - 314.
 - [4] 王润生. 图像理解[M]. 长沙, 国防科技大学出版社, 1995: 47 - 52.
 - [5] 章毓晋. 图像工程上册——图像处理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999, 第八章和附录.
- 黄 勇: 男, 1970 年生, 博士生, 主要从事 SAR 图像匹配、SAR 图像目标识别和图像变化检测等方向的研究.
- 王建国: 男, 1956 年生, 教授, 主要从事 SAR 系统、成像处理和 SAR 图像后处理等方向的研究工作.