

SAR 与可见光图象匹配方法的研究

陈东 李飏 沈振康

(国防科学技术大学 ATR 国家重点实验室, 长沙 410073)

刘文华

(中央电视台播送部, 北京 100859)

摘要 由于 SAR 和可见光成像传感器图象的物理特征不同, 因此进行匹配难度很大. 本文在深入分析了这两种传感器图象物理特征的基础上, 提出了一种图象匹配的新方法. 该方法运用形态学滤波方法去除 SAR 图象斑点噪声, 利用图象的边缘特征进行匹配, 并采用多分辨率分级搜索技术减少计算量, 在对实验结果进行分析的基础上提出了搜索真实匹配位置的准则, 大大提高了匹配的准确率. 通过实验对 SAR 图象斑点噪声滤波和 SAR 与可见光图象匹配算法进行了验证, 实验证明本算法的 SAR 图象去噪效果明显优于传统的 Frost 方法, 图象匹配精度高、稳定性好.

关键词 SAR 图象 可见光图象 形态学滤波 图象匹配 多分辨率分级搜索 边缘特征

中图法分类号: TP751.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2001)03-0223-05

Research on the Approach to SAR and Optical Images Matching

CHEN Dong¹⁾, LI Biao¹⁾, SHEN Zhen-kang¹⁾, LIU Wen-hua²⁾

¹⁾ (National Laboratory of ATR, National University of Defense Technology, ChangSha 410073)

²⁾ (China Central Television Station, Beijing 100859)

Abstract It is very difficult to match SAR (Synthetic Aperture Radar) and optical images because of the difference physical peculiarity. A new image matching approach based on analyzing the physical peculiarity of the two sensors has been proposed. This method applies morphological filtering algorithm to remove the speckle noise of SAR image and uses the edge's features of images to solve the matching problem and uses the technology of multiresolution gradational searching to reduce the complexity of computation. A new criterion that can search the real match position based on analyzing the experimental result is presented. It will be able to give a more accurate matching result. We validate the speckle noise filtering algorithm and the matching algorithm between the SAR image and Optical image by experiment. Experimental results show that the filtering effect is more excellent than traditional Frost algorithm, the matching algorithm have high precision and stability.

Keywords SAR image, Optical image, Morphological filtering, Image matching, Multiresolution gradational searching, Edge feature

0 引言

不同传感器获取图象的匹配技术是当今图象处理和模式识别领域研究的热点之一, 该技术主要用于导航、导弹末端制导、自然资源分析、环境研究等方面. 如应用于导弹制导, 其原理就是, 当导弹按预定的弹道飞行时, 其下方地面的景象特征必须是已

知的, 而且已将该地面图象数据存入计算机内, 当导弹实际飞行时, 导弹导引头上的传感器即将拍摄的图象数据输入计算机内, 然后计算机则不断地将实测的图象数据同已存入计算机的图象数据进行匹配, 得到导弹当前的实际位置, 从而确定实际飞行弹道同预定弹道的偏差, 计算出必要的修正量, 将制导武器修正到预定的弹道上来. 本文主要研究 SAR (Synthetic aperture radar), 即合成孔径雷达图象与可

见光图象的匹配问题. 由于 SAR 传感器具有全天候工作、有一定的穿透能力等优点, 因此它尤其适用于巡航弹的景象匹配, 但由于 SAR 图象和可见光图象的成象机理不同, 且它们之间的匹配属于非相似图象的匹配问题, 因而导致两者精确匹配的难度很大. 通过研究发现, SAR 图象与可见光图象对同一地面特征的反应不总是相同的, 其主要区别是, 在 SAR 图象中道路显示为黑色, 而在可见光图象上则呈白色. SAR 图象上对建筑物显示非常清楚, 而在可见光图象上则可能有阴影效应. SAR 图象中有明显的斑点‘闪烁’特征, 而可见光图象中则没有等等. 主要相似点是道路、建筑物、植被区等的形状特征. 由此可见, 景物的边缘形状特征是两种图象共同具有的特征, 因此, 对于 SAR 和可见光图象的匹配, 研究这两种图象的边缘特征是至关重要的.

1 算法的主要思想

SAR 图象与可见光图象的匹配, 其采用的算法包括 SAR 图象散斑噪声消除算法、SAR 图象和可见光图象边缘提取算法、多分辨率分级搜索算法和图象匹配算法等 4 个部分.

1.1 SAR 图象散斑噪声消除算法

由于 SAR 图象的斑点噪声污染非常严重, 因此在进行边缘提取之前必须对图象进行噪声抑制处理, 以改善 SAR 图象的质量, 从而为边缘提取奠定基础. 本文噪声抑制过程将采用数学形态学滤波算法.

(1) 数学形态学的基本运算^[1]

数学形态学滤波算法是一种非线性滤波方法, 它用于图象噪声抑制、边缘提取、目标检测等效果均很好, 因此, 得到了广泛的应用.

数学形态学滤波的基本运算包括膨胀、腐蚀、开和闭运算, 其定义如下:

设 A_n 为定义在图象空间 Z 上的离散函数, 结构元素 B_m 为 Z 上的有限子集, 则 A_n 关于 B_m 的膨胀、腐蚀、开、闭运算分别为

$$(A \oplus B)_n = \max \{A_{n-m}/m \in B\} \quad (1)$$

$$(A \ominus B)_n = \min \{A_{n-m}/m \in B\} \quad (2)$$

$$(A \circ B)_n = [(A \ominus B) \oplus B]_n \quad (3)$$

$$(A \bullet B)_n = [(A \oplus B) \ominus B]_n \quad (4)$$

其中, $\oplus$ 、 $\ominus$ 分别表示 Minkowski 的和、差.

形态学运算中的开运算定义为先腐蚀后膨胀,

而闭运算定义为先膨胀后腐蚀. 由于这种开运算可以抑制信号中的峰值噪声, 而闭运算可抑制信号中的低谷噪声, 因此, 本文将它们联合运用于 SAR 图象斑点噪声的消除.

(2) 结构元素的选择

选择结构元素应主要考虑噪声的产生机理、统计性质和几何特征等因素. 由于 SAR 发射的是相干波, 而且当这种相干信号照射目标时, 目标的随机散射面上的散射信号与雷达发射的相干信号之间发生作用, 从而形成斑点噪声, 且其分布是相乘的概率模型^[2], 因此它使得噪声灰度和几何特征变化很大. 通过实验发现, 选用单个结构元素进行斑点噪声消除的效果不好, 再通过较深入的研究分析, 从而选用了级联的线性结构元素 B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 , 其中 B_1 为水平 3 个像素, B_2 为垂直 3 个像素, B_3 为水平 5 个像素, B_4 为垂直 5 个像素.

(3) 算法的实现

设 A 为原始图象, T 为中间结果图象, R 为结果图象, a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} , a_{31} , a_{32} , a_{41} , a_{42} 为加权因子, 本文采用权值组合的滤波算法如图 1 所示.

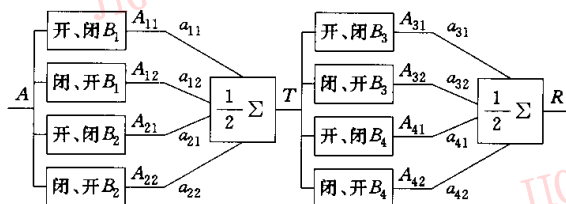


图1 形态学滤波算法

依据 SAR 散斑噪声的统计性质确定加权因子, 并令

$$a_{1i} = 1 - P_1(M) \quad (5)$$

其中, $\sum_{i=1}^2 a_{1i} = 1$; $P_1(M)$ 为概率分布函数, 且

$$P_1(M) = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{M}{2\sigma^2}\right) & M \geq 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$\sigma^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\langle |a_k|^2 \rangle}{2}$; a_k 是图象的灰度值.

本文通过实验对上述思想进行了验证. 结果证明, 采用级联和权值组合的形态学滤波算法对 SAR 斑点噪声消除有良好的效果.

1.2 SAR 图象和可见光图象边缘提取算法

SAR 和可见光图象匹配所提取出的边缘要满足

以下3个条件:①提取完整的边缘;②定位准确性高;③从背景中提取出的杂乱边缘尽量地少。

针对上述要求,本文选用了 PARK 等人提出的多分辨率边缘检测算法^[3],该算法与传统的边缘检测算法相比,具有计算量小、定位精度高、提取出的边缘完整等特点。

1.3 多分辨率分级搜索算法

由于 SAR 与可见光图象的分辨率不一定相同,因此在匹配算法处理之前必须将两者图象的分辨率变换为一致,变换处理的方法很多,这里不详述,本文只考虑它们的分辨率已经一致的情况。

此外,两幅图象还存在方位一致和不一致的情况。对于方位不一致的情况,本文运用多分辨率分级搜索的思想,在最低分辨率下进行方位配准,即首先将 SAR 图象每隔 10° 进行一次旋转变换(实验已证明,本匹配算法在旋转 10° 之内能够实现准确匹配),从而确定好正确的方位。尽管确定方位的工作量较大,但由于是在最低分辨率下进行,因此大大减小了运算量。有关确定方位的处理方法这里不做详细介绍,本文假定两幅图象方位已经为一致时的情况。

大家知道,对两幅图象与之进行相关匹配的计算量是非常大的,如在尺寸为 $M \times M$ 的可见光图象上,用尺寸为 $N \times N$ 的 SAR 图象进行相关匹配,将会有 $(M - N + 1)^2$ 个匹配位置。根据人视觉系统的机理,即远处的景物整体结构清晰,而近处的景物细节信息丰富,为此提出了多分辨率分级搜索算法,该算法的主要思想如下:

(1) 假设可见光的基准图象尺寸为 $256 \times 256 \text{ pixel}$,则将其分解成尺寸为 $256 \times 256 \text{ pixel}$ 、 $128 \times 128 \text{ pixel}$ 、 $64 \times 64 \text{ pixel}$ 3 级。

(2) 假设 SAR 的实时图象尺寸为 $128 \times 128 \text{ pixel}$,则将其分解成尺寸为 $128 \times 128 \text{ pixel}$ 、 $64 \times 64 \text{ pixel}$ 、 $32 \times 32 \text{ pixel}$ 3 级。

(3) 从最低分辨率开始,首先从 SAR 图象中选取一幅尺寸为 $32 \times 32 \text{ pixel}$ 的子图象,然后将其在与之对应的尺寸为 $64 \times 64 \text{ pixel}$ 的可见光图象中进行匹配,并找到可能的匹配位置,以使用其指导下一个较高级分辨率等级的搜索,匹配准则依据下节采用的算法。

(4) 在高一级分辨率下,匹配操作只在最有可能匹配位置的相邻区域进行,在找出可能的匹配位置后,再向更高一级分辨率传播,搜索一直进行到最

高分辨率为止,这时具有最大匹配概率的位置将被认为是最可能的匹配位置。

1.4 SAR 和可见光图象匹配算法

本文利用 Green 等人提出的相似度相关方法进行匹配^[4],该方法提出了成对函数的概念。匹配时,在测试位置 (u, v) 处,必须逐行扫描 SAR 和可见光图象(假定大小均为 $N \times N$)的测试区域,使得每一个测试区域对准窗口 (S_k, O_k) 位置,其中 S, O 分别代表 SAR 和可见光图象, $1 \leq k \leq N^2$ 。假设 S_k 的量化等级为 i , O_k 的量化等级为 j ,则成对函数为 $F_{ij}(u, v)$, $0 \leq i, j \leq 2^n - 1$,其中 n 是量化中使用的位数。相似度相关值 $R(u, v)$ 定义如下:

$$R(u, v) = \prod_{i=0}^{2^n-1} [F_{ij}(u, v) / \sum_{j=0}^{2^n-1} F_{ij}(u, v)] \quad (6)$$

其中, $R(u, v)$ 是实际相匹配的窗口对数与每一种类型可能的匹配数相比的乘积。

在二值图象的匹配中,式(6)变为

$$R(u, v) = \left(\frac{F_{00}}{F_{00} + F_{01}} \right) \left(\frac{F_{11}}{F_{11} + F_{10}} \right) \quad (7)$$

其中, $R(u, v) \leq 1$,其最大值即为可能的匹配位置。

2 实验结果分析

实验分为如下两个部分:第1部分是验证数学形态学滤波算法对 SAR 图象散斑滤波的有效性,第2部分是考察多分辨率分级搜索图象匹配算法的性能。定义正确匹配的标准为配准误差的绝对值在1个像素之内。图2(a)是原始 SAR 图象;图2(b)是采用适用于 SAR 斑点噪声消除的经典 Frost 滤波算法的去噪声结果图象;图2(c)是用单个结构元素 B_1 的形态学滤波算法的去噪声结果图象;图2(d)是用数学形态学滤波算法的去噪声结果图象。从图2明显看出,数学形态学滤波算法的去噪声效果优于 Frost 滤波算法。图3和图4分别是 SAR 和可见光的原始图象。图5(a)、图5(b)分别是 SAR 和可见光经过边缘提取后的多分辨率图象,从图5可以看出在低分辨率下,图象的整体结构清晰,随着分辨率的提高,细节信息随之丰富。图6是 SAR 图象与可见光图象的匹配结果,从图中看到匹配结果很好。进一步,本文还对10幅含有不同景物的 SAR 和可见光图象(包括桥梁、建筑物、田地、山脉等)进行了匹配实验,匹配次数为100次,其中匹配正确次数为68

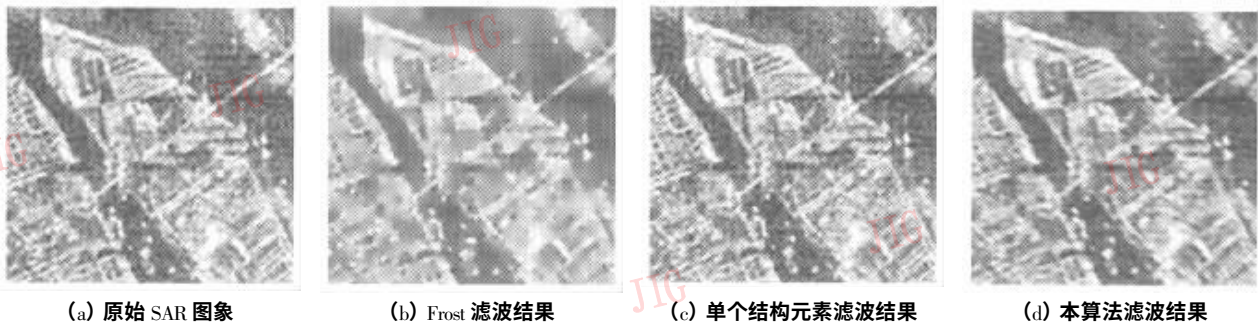


图 2 各种数学形态学滤波算法对 SAR 图象的滤波效果

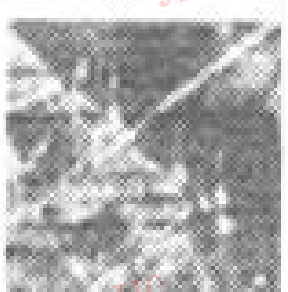


图 3 SAR 原始图象
(128 × 128pixel)

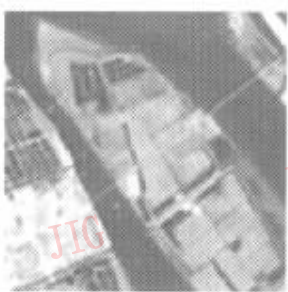
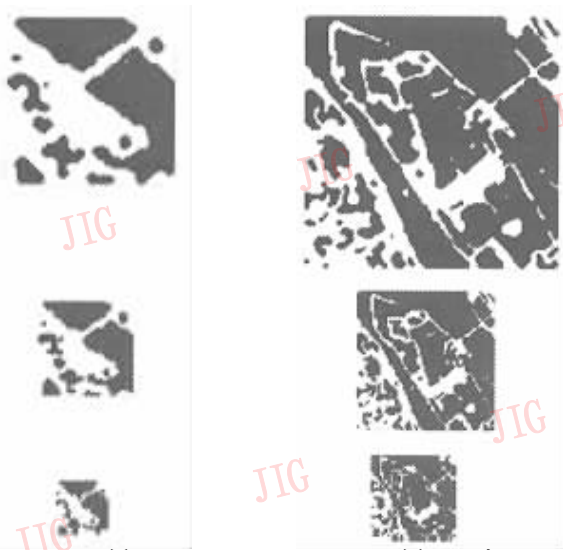


图 4 可见光原始图象
(256 × 256pixel)



(a) SAR

(b) 可见光

图 5 SAR 和可见光的多分辨率边缘图象

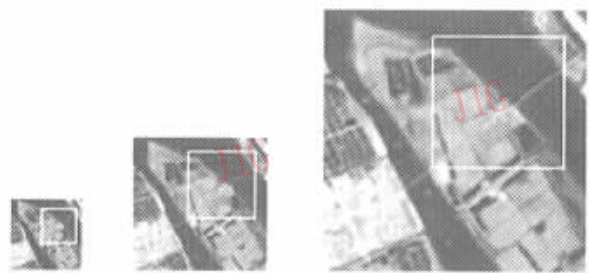


图 6 SAR 图象与可见光图象的匹配结果

次.通过对实验结果进行深入的研究发现,真实匹配位置不一定是在相关匹配的全局最大值处,对于虚假匹配位置,即使其相关匹配值为全局最大值,但它的相关峰不明显,即峰的陡度不大.而真实匹配位置即使不是全局最大值点,也必定是局部极大值点,而且它的相关峰陡度较大,并具有对称性.如图 7 所示,其中与标记有“+”的峰对应的位置为真实匹配位置.本文依据此准则进行匹配,其正确匹配次数为 89 次,其余 11 次有偏差的主要原因是,可见光图象整体结构非常相似,这时,匹配位置可能会上下或左右滑动.总的说来,实验结果证明了本算法的有效性.

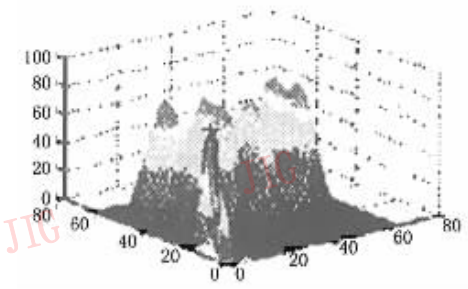


图 7 相关匹配峰值分布

3 结 论

由于 SAR 和可见光图象的物理特征不同,其反映在图象上,即灰度、纹理和统计特征等都有很大的不同,所以,一般地说,基于灰度匹配的方法效果不理想,而边缘是 SAR 和可见光图象中共有的特征,因此基于边缘的图象匹配方法可以较好地解决这个问题.此外,多分辨率分级搜索图象匹配方法符合人的视觉系统选择性搜集信息的机理,且能节省系统的计算开销,因而是一种有应用前途的图象匹配方法.最后需要强调的是,对实验结果进行分析并找出

其中的规律性是非常重要的,上述结果分析有力地证明了这一点.

参 考 文 献

1 唐常青等. 数学形态学方法及其应用. 北京: 科学出版社,1990.

2 Arsenault H H. Information extraction from image degraded by speckle. In Proceeding of IGARSS '87 Symposium, Ann Arbor, 1987,5:1371 ~ 1320.

3 Deok J Park. Multiresolution edge detection techniques. Pattern Recognition, 1995,28(2): 211 ~ 229.

4 Green G S, Reagh E L, Hibbs E B. Detection threshold estimation for digital area correlation. IEEE Trans. System, Man and Cybernetics, 1976,31(1): 65 ~ 70.

陈 东 1965 年生,高级工程师,现为国防科技大学 ATR 国家重点实验室在站博士后. 主要研究方向为图象处理、自动目标识别、地理信息系统、多传感器信息融合、神经网络等. 发表论文 30 多篇. 曾获部委级科技进步二等奖 2 项、三等奖 3 项.

李 颢 1967 年生,博士,国防科技大学电子科学与工程学院讲师. 主要研究方向为图象处理、自动目标识别、多传感器信息融合、神经网络等. 发表论文 10 多篇. 曾获部委级科技进步二等奖 1 项、三等奖 2 项.

沈振康 1937 年生,国防科技大学电子科学与工程学院教授,博士生导师,⁸⁶³ 专家. 主要研究方向为图象处理、自动目标识别、小波分析、多传感器信息融合、神经网络等. 发表论文多篇. 曾获部委级科技进步一、二等奖多项.

刘文华 高级工程师,1968 年毕业于北京邮电学院,在中央电视台长期从事图象处理等方面的技术工作. 主要研究方向为图象处理、数据融合等. 发表论文多篇.