

文章编号: 0253-2239(2010)s100407

# 基于边缘支持度的合成孔径雷达与 可见光图像匹配方法

李 壮<sup>1</sup> 朱宪伟<sup>1</sup> 杨 夏<sup>1</sup> 任德新<sup>2</sup> 于起峰<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>国防科学技术大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)  
(<sup>2</sup>第二炮兵驻中国电子科技集团型号办事处, 北京 100085)

**摘要** 异源图像匹配是视觉导航、多源图像融合分析的关键步骤之一,常用的匹配方法是分别从两幅图像中提取特征,再对特征进行匹配。但是对于成像机理差别较大的异源图像,如合成孔径雷达(SAR)图像和可见光图像,很难提取到同名特征。提出一种基于边缘支持度的异源图像匹配方法,只需要从一幅图像中提取边缘特征,在变换空间中寻找另一幅图像对该特征的最大支持度。支持度的计算采用了标准化方向梯度强度和的形式。采用遗传算法对支持度函数解空间进行全局优化搜索来获取匹配解。实验结果表明,该方法能有效实现 SAR 图像和可见光图像的匹配。

**关键词** 图像处理;图像匹配;边缘支持度;多源图像;边缘检测;遗传算法

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201030.s100407

## Matching Synthetic Aperture Radar and Optical Images Based on Edge Support

Li Zhuang<sup>1</sup> Zhu Xianwei<sup>1</sup> Yang Xia<sup>1</sup> Ren Dexin<sup>2</sup> Yu Qifeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

<sup>2</sup> SAC Accredited Office in China Electronics Technology Group Corporation, Beijing, 100085, China

**Abstract** Multi-sensor images matching is one of the key steps in vision navigation and multi-sensor images fusion. A common image matching method is to match the features detected in both images separately. However, for the images with great difference in imaging apparatuses, for example, synthetic aperture radar(SAR) image and optical image, it is hard to obtain corresponding features. A edge support (ES) algorithm is proposed to matching multi-sensor images. ES algorithm only needs to detect edge feature in one image and find the maximal support in the transform space of the other image. The ES is calculated by normalizing the summation of orientation gradient. The matching result can be obtained by optimizing the support function through genetic algorithm's global optimum solution. Experimental results show that the ES algorithm can matching SAR image and optical image effectively.

**Key words** image processing; image matching; edge support; multi-sensor images; edge detection; genetic algorithm

**OCIS codes** 100.0100; 120.4630; 200.0200

收稿日期: 2010-05-31; 收到修改稿日期: 2010-07-06

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z121)资助课题。

作者简介: 李 壮(1982—),男,博士研究生,主要从事图像匹配和目标识别等方面的研究。

E-mail: lizhuang2007@hotmail.com

导师简介: 于起峰(1958—),男,教授,中国科学院院士,主要从事光学测量和视觉导航等方面的研究。

E-mail: jmgc108@163.com

## 1 引言

随着空间遥感技术的发展,获取同一地区的来自不同传感器、覆盖不同电磁波段的异源遥感图像数据已变得越来越容易。光学卫星传感器(如 SPOT, QUICKBIRD)所成的像符合人眼的视觉特性,图像易于人工判读,但是光学图像容易受成像时间,云层遮挡及天气的影响而造成成像质量不高。合成孔径雷达(SAR)不受云、雨、雾、光照等自然因素的影响,可以较好地弥补光学传感器的不足。通过选择合适的雷达波长,能穿透一定的覆盖物,如云层、植被成像<sup>[1]</sup>,从而可以发现重要的目标。因此,对具有信息互补的 SAR 图像与光学图像进行匹配具有很重要的意义。

目前对异源图像匹配的方法主要分 3 种:基于区域的图像匹配方法<sup>[2]</sup>、基于特征的图像匹配方法<sup>[3~5]</sup>和基于语义的图像匹配方法<sup>[6,7]</sup>。基于区域的方法主要包括传统的灰度互相关方法和互信息方法。由于异源图像的成像机理不同,通常无法直接使用灰度互相关方法;互信息方法对某些异源图像匹配效果较好(如红外图像与可见光图像),但是它要求图像间存在一致的灰度级映射,这在 SAR 图像和可见光匹配中是难以满足的。基于语义的方法建立在对图像的正确解释上,目前人们对图像理解的研究还远远不足以实现稳定可靠的匹配。因此,当前国际上较为普遍的采用基于特征的方法进行异源图像匹配。图像中最常用的特征是梯度特征和边缘特征。实验表明,SAR 图像和光学图像的梯度特征和边缘特征通常也有一部分不能互相对应上,这就导致了直接使用梯度相关方法和边缘距离方法的可靠性不高。

文献[8]提出了刚体结构支持度匹配方法。借鉴该算法的思想,本文提出一种基于边缘支持度的异源图像匹配方法。首先在基准图像中提取边缘特征,在变换空间中寻找实时图对该特征的最大支持度,其中支持度的计算采用了标准化方向梯度强度和的形式,用遗传算法对支持度函数解空间进行全局优化搜索来获取匹配解。与传统的在两幅图像中分别提取同种特征并比较相似度的思想不同,本文算法只在基准图中提取边缘特征,通过计算实时图中对应位置的亮度变化得到边缘支持度,进而实现图像匹配。避开了 SAR 图像上难以准确提取边缘的问题。本文定义了一种可靠性和实时性较高的支持度计算函数,用以表示实时图梯度对基准图边缘的支持程度。遗传算法的应用则大大加快了计算速度。

## 2 图像匹配模型

在飞行器视觉导航等应用中,预先装载的光学卫星图像作为基准图,记为  $M$ ,机载雷达获得的 SAR 图像作为实时图,记为  $R$ ,实时图场景是基准图场景的一部分。用  $T$  表示对基准图的某种变换, $U_T$  表示全体变换的集合,则图像匹配问题可以转化为全局寻优问题,即寻找使某种条件达到极值的  $T_m$ ,记为

$$T_m = \operatorname{argmax}_{T \in U_T} \{S[R, T(M)]\}, \quad (1)$$

式中  $T(M)$  是对基准图的某种变换, $S[R, T(M)]$  是  $T(M)$  与  $R$  的相似性度量。

## 3 边缘支持度匹配算法

边缘支持度匹配算法主要包括边缘特征提取,计算支持度,全局寻优 3 个部分。整个算法结构如图 1 所示。输入光学基准图和 SAR 实时图;采用边缘提取算法得到基准图的边缘特征;将变换空间中的变换参数作用于边缘特征图并计算实时图对该变换参数的支持度;比较得到最大支持度,其对应的变换参数即为匹配结果。实际应用时,可以对基准图进行边缘特征检测后,直接装载边缘特征图。

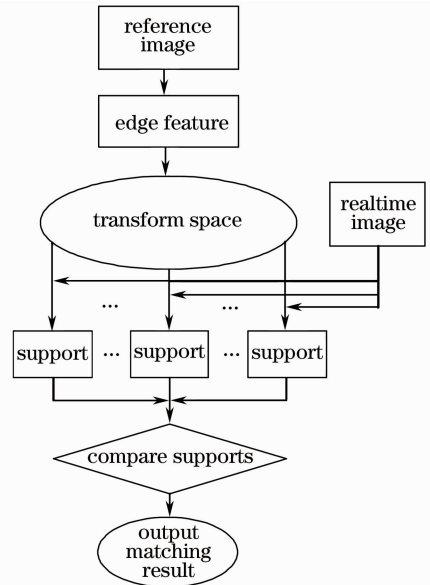


图 1 边缘支持度匹配方法

Fig. 1 Edge support method

### 3.1 边缘特征提取

对光学基准图提取边缘有大量成熟的算法,如 Canny 算法, Mean-Shift 算法<sup>[9]</sup>, 小波算法, Contourlet 变换方法<sup>[10]</sup>, 相位一致性算法<sup>[11]</sup>等。这里综合考虑算法性能和实时性,采用 Canny 算子提取边缘。由于后面的支持度计算需要利用到边缘方向

信息,故要将边缘法线方向信息保存下来。

由于异源图像成像机理不同,图像中对应的边缘法线方向可能相同或者反向。因此,首先要将角度规范到 $[0^\circ, 80^\circ]$ 范围。接下来,要将角度量化到  $n$  个区间,以便使用整数型数据保存方向信息。文中将角度量化到 4 个区间,如图 2 所示。将边缘方向在同一区域内的像素用相同的灰度表示。

对于基准图中的像素,若该点提取到边缘,则将边缘特征图中的对应像素赋值为边缘法向角度区间号,否则,将边缘特征图中的对应像素置 0。则只需存储 5 值边缘特征图。图 3(a), (b) 分别是卫星光

学图像及对其提取边缘并保存边缘方向的边缘特征图。

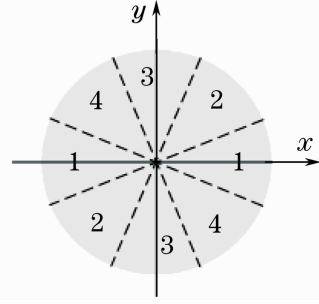


图 2 角度量化方法

Fig. 2 Angle partition

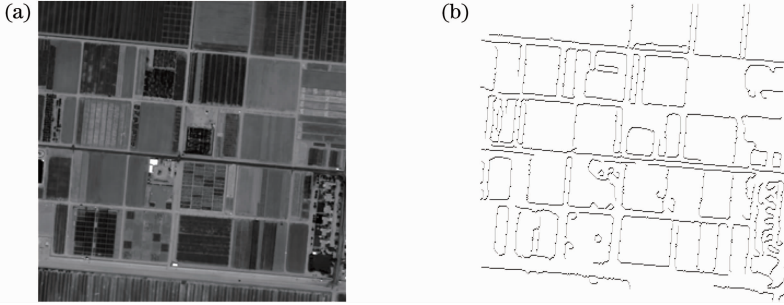


图 3 边缘提取及角度量化。(a)光学基准图,(b)边缘特征图

Fig. 3 Edge detection and angle partition. (a) optical reference image, (b) edge feature image

### 3.2 支持度计算方法

给定变换参数  $T$ ,可以得到与边缘特征图对应的变换特征图。计算实时图中所有与变换特征图中边缘点对应的法向梯度的和。对于图像变换参数  $T$ ,实时图上每一点对应的方向梯度为  $G(x, y, T)$ ,其计算公式如下:

$$G(x, y, T) = \begin{cases} 0 & T(M)(x, y) = 0, \\ R(x+2, y+1) + 2R(x+2, y) + R(x+2, y-1) - \\ R(x-2, y+1) - 2R(x-2, y) - R(x-2, y-1), & T(M)(x, y) = 1 \\ R(x, y+2) + 2R(x+1, y+1) + R(x+2, y) - \\ R(x, y-2) - 2R(x-1, y-1) - R(x-2, y), & T(M)(x, y) = 2 \\ R(x-1, y+2) + 2R(x, y+2) + R(x+1, y+2) - \\ R(x-1, y-2) - 2R(x, y-2) - R(x+1, y-2), & T(M)(x, y) = 3 \\ R(x, y+2) + 2R(x-1, y+1) + R(x-2, y) - \\ R(x, y-2) - 2R(x+1, y-1) - R(x+2, y), & T(M)(x, y) = 4 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $R(x, y)$  是实时图,  $M(x, y)$  是基准图。

则在变换  $T$  下,与实时图对应的所有方向梯度强度求和应为

$$SG[R, T(M)] = \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} |G(x, y, T)|. \quad (3)$$

考虑对于不同变换参数  $T$ ,与实时图对应的边缘特征数量不同,故需要对上式标准化。令

$$B(x, y, T) = \begin{cases} 0 & T(M)(x, y) = 0 \\ 1 & T(M)(x, y) > 0 \end{cases}, \quad (4)$$

则标准化后的支持度为

$$S[R, T(M)] = \frac{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} |G(x, y, T)|}{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} |B(x, y, T)|}. \quad (5)$$

当特征数量较少时,支持度有可能因为少量特征的作用变得很大,其匹配结果通常是不可靠的。实时图和基准图中的总的像素数分别是  $S_R, S_M$ 。 $N$  表示基准图中边缘像素总数。当与实时图对应的边缘数目小于平均值  $S_R N / S_M$  的  $\lambda$  倍时,认为此变化

参数缺乏足够的边缘特征支持,故将其排除。其中  $\lambda$  是预设阈值,取值区间为  $(0,1)$ ,本文的实验将  $\lambda$  设

为 0.3。最终的支持度函数为

$$S[R, T(M)] = \begin{cases} 0, & \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} |B(x, y, T)| < \frac{\lambda S_R N}{S_M} \\ \frac{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} |G(x, y, T)|}{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} |B(x, y, T)|}, & \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} |B(x, y, T)| > \frac{\lambda S_R N}{S_M} \end{cases} \quad (6)$$

### 3.3 遗传算法寻找最优匹配点

首先确定图像变换关系,对于视觉导航中的图像匹配,一般可以用仿射变换模型近似表示图像间的变换关系。仿射模型为

$$\begin{cases} x_2 = t_1 x_1 + t_2 y_1 + t_5 \\ y_2 = t_3 x_1 + t_4 y_1 + t_6 \end{cases} \quad (7)$$

则仿射变换参数为  $T = [t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6]^T$ 。根据任务要求,设定变换参数取值空间,下面探讨在取值空间内求取最优解的方法。

传统的寻优方法采用穷举搜索,即给定一幅待匹配的图像,对于所有可能的变换参数  $T$ ,分别计算对应的匹配支持度,支持度最大的变换参数为匹配结果。然而这种方法计算量很大,针对这种情况,本文采用遗传算法对边缘支持度匹配方法进行寻优。

遗传算法是由美国密歇根大学的 Holland 教授<sup>[12]</sup>提出的一类模拟达尔文的自然选择(亦即适者生存)理论的自适应启发式搜索优化技术。它使用一种有指导的随机搜索技术来确定全局最优解。由于其搜索不偏向于局部最优解,所以它优于“梯度下降”技术。另一方面,它又不同于普通的随机采样算法,因为它不是进行简单的随机比较操作,而是通过染色体的评价和对基因的操作,有效地利用已有信息的指引,向有希望改善优化质量的状态进化。遗传算法将参数求解问题表示成染色体(个体)的适者生存过程,通过染色体群的进化,包括选择、交叉、变异等操作,使其收敛到问题的最优解。它的最显著特点是隐含并行性和全局空间搜索。

本文算法中,遗传算法编码采用二进制格雷码,每个变换参数为一个染色体,其长度为 128 bit,群体大小为 256,随机产生初始种群,交叉概率为 0.4,变异概率为 0.08,最大运行 200 代。

## 4 实验结果与分析

采用多幅光学图像和 SAR 图像对本文算法进

行测试,下面只给出两组有代表性的匹配结果。其中光学图像大小为  $400 \text{ pixel} \times 460 \text{ pixel}$ ,SAR 图像大小为  $200 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ ,如图 4 所示。将光学图像作为基准图,SAR 图像作为实时图。分别用互相关方法,互信息方法,相位一致性方法和边缘支持度方法对图像进行匹配。匹配结果如表 1 所示。互相关方法通常只适用于存在线性灰度变换的图像间的匹配。互信息方法和相位一致性方法是比较流行的异源图像匹配方法。这两种方法适用于匹配图像间存在非线性灰度变换的情况。由于 SAR 和可见光成像特性不同,可见光中同一灰度的场景有可能在 SAR 图像中呈现截然不同的灰度,因此无法建立匹配图像间的灰度变换关系,这就导致了互信息方法和相位一致性方法对实时图 2 匹配失效。边缘支持度方法能够适应匹配图像间存在复杂灰度变换,并存在部分区域不一致的情况。边缘支持度方法只计算实时图中与基准图边缘特征对应位置的支持度,计算所耗时间在四种方法中最少。

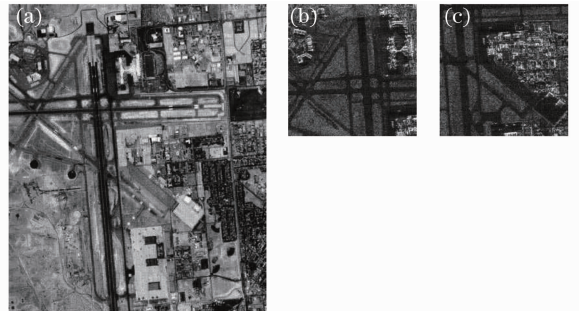


图 4 输入图像。(a)基准图,(b)实时图 1,(c)实时图 2

Fig. 4 Input Images. (a) reference image,

(b) real image 1, (c) real image 2

在主频 2.4 G 的计算机平台上,采用 VC 编程实现本算法,运行时间约为 3 s,匹配结果如图 5 所示。图 5(a),(b)分别是图 4 中两幅实时图在基准图中匹配,并叠加在匹配位置的效果图,其中基准图只显示角度量化后的边缘图。从图中可以看出,基



准图中的边缘特征与实时图中的边缘基本吻合。

表 1 各种方法匹配结果比较

Table 1 Matching results of different methods

	Real image 1	Real image 2	Average time /s
Cross correlation	wrong	wrong	4.0
Mutual information	right	wrong	8.6
Phase congruency	right	wrong	12.3
Edge support	right	right	3.2

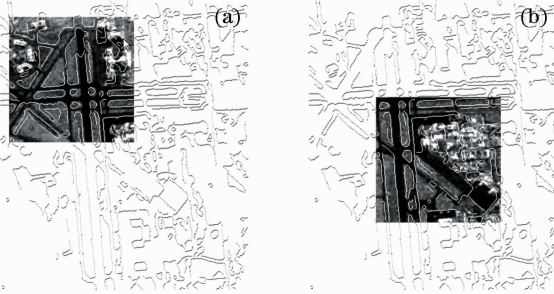


图 5 匹配结果。(a)实时图 1 匹配结果，  
(b)实时图 2 匹配结果

Fig. 5 Matching results. (a) matching real image 1,  
(b) matching real image 2

## 5 结 论

本文提出一种适合 SAR 图像与光学图像匹配的新方法——边缘支持度方法。边缘支持度方法基于图像边缘和梯度进行匹配，相比基于灰度的匹配方法更加可靠。而与传统的边缘匹配方法相比，该方法只需在基准图中提取边缘，避开了在噪声密布的 SAR 实时图像中提取边缘的难题。实验表明，该方法能够准确快速地实现异源图像之间的匹配，在匹配可靠性和匹配时间方面明显优于互相关方法、

互信息方法和相位一致性方法，具有较高的工程应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Francesco Serafino. SAR image coregistration based on isolated point scatterers [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, **3**(3): 354~358
- 2 Ji Xiquan, Pan Hao, Liang Zhipei. Further analysis of interpolation effects in mutual information-based image registration[J]. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 2003, **22**(9): 1131~1140
- 3 David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[C]. *IJCV* 60, 2004. 91~110
- 4 Serge Belongie, Jitendra Malik, Jan Puzicha. Shape matching and object recognition using shape contexts[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(24): 509~522
- 5 Svetlana Lazebnik, Cordelia Schmid, Jean Ponce. Beyond bags of features: spatial pyramid matching for recognizing natural scene categories[C]. *CVPR*, 2006
- 6 Sanjiv Kumar, Martial Hebert. A hierarchical field framework for unified context-based classification[C]. *ICCV*, 2005
- 7 Derek Hoiem, Alexei A. Efros, Martial Hebert. Putting objects in perspective[C]. *CVPR*, 2006
- 8 Zhu Xianwei. Study on Registration between Multi-sensor Images Based Structure Feature[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. 87~112  
朱宪伟. 基于结构特征的异源图像配准技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. 87~112
- 9 Dorin Comaniciu, Peter Meer. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(3): 603~619
- 10 Chen Zhigang, Yin Fuchang, Sun Fu. Registration technique for high-resolution remote sensing images based on nonsubsampling contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2744~2750  
陈志刚, 尹福昌, 孙 孚. 基于非采样 Contourlet 变换高分辨率遥感图像配准[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2744~2750
- 11 Peter Kovess. Phase congruency: A low-level image invariant [C]. *Proc. 7th Digital Image Computing: Techniques and Applications*, Sydney, 2003. 309~318
- 12 John H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975