

文章编号:1002-2082(2013)05-0809-06

# 基于边缘与 SURF 算子的 SAR 与可见光图像配准方法

纪利娥,杨风暴,王志社,陈磊

(中北大学 信息与通信工程学院,山西 太原 030051)

**摘要:**鉴于 SAR(synthetic aperture radar)与可见光图像的成像机理存在很大差别,使得其同名特征的提取和配准十分困难,但在某些情况下,这两类图像的边缘存在一定的相关性。提出一种基于边缘与 SURF(speed-up robust feature)算子的图像配准方法。通过适当预处理增强图像间的共性,采用综合性能比较好的 Canny 算子提取两幅图像共有的边缘特征,在边缘图像的基础上提取 SURF 特征;通过比值提纯法进行特征点粗匹配,RANSAC(random sample consensus)算法剔除误匹配点,计算仿射变换模型从而实现 SAR 与可见光图像的自动配准。实验结果表明:该算法的正确匹配率为 100%,均方根误差为 0.852 个像素,配准精度达到亚像素水平。

**关键词:**图像配准;SAR 与可见光图像;RANSAC 算法;SURF 特征;Canny 算子

中图分类号:TN911.73; TP391.41

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201334.0502007

## SAR and visible image registration method based on edge and SURF algorithm

Ji Li-e, YANG Feng-bao, WANG Zhi-she, CHEN Lei

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Due to the prominent difference of the imaging mechanism between visible and synthetic aperture radar (SAR) images, it is very difficult to extract common features and register, but in some cases, the edges of these two kinds of images have some certain correlation. According to the above problem, an image registration algorithm based on edge and speed-up robust feature (SURF) is proposed. Firstly, the similarity of these two images is enhanced through appropriately preprocessing, the common edge features are extracted by Canny operator which has good performance, and the SURFs are extracted from the edges of the images; then the features matching is done by the ratio purification method, the random sample consensus (RANSAC) algorithm is applied to remove the false matching points, and the affine transformation model is calculated to realize image automatic registration of SAR and visible image. Experimental results demonstrate that the correct matching probability of the proposed algorithm is 100% and the root mean square error is 0.852 pixel, moreover, the registration accuracy can achieve sub-pixel level, which proves the validity of the algorithm.

**Key words:** image registration; SAR and visible images; RANSAC algorithm; SURF; Canny operator

收稿日期:2012-10-30; 修回日期:2013-01-04

基金项目:国家自然科学基金项目(61171057);山西省回国留学人员科研资助项目(20120706ZX);教育部高等学校博士学科点专项科研基金博导类资助课题(20121420110004)

作者简介:纪利娥(1987-),女,山西大同人,硕士研究生,主要从事异类图像配准研究。

E-mail:jilie0308@sina.com

## 引言

在目标识别跟踪、计算机视觉等领域,由于单一传感器在成像机理和光谱特性上的限制,使其在工作时很难摆脱一些固有缺陷的影响,而多传感器在对成像目标的描述上具有互补性,能够提供比单一传感器图像更加丰富的信息。因此,多源图像配准变得越来越重要,其中包括 SAR 与可见光图像的配准。可见光图像符合人眼的视觉特性,易于判读,但易受成像时间、云层遮挡及天气的影响而使图像质量下降;SAR 具有全天候、全天时及强透射等优点,可以较好地弥补可见光图像的不足,但由于 SAR 后向散射的成像特性,图像受斑点噪声的影响大且信噪比较低,因此,对具有信息互补的 SAR 与可见光图像进行配准具有重要的意义。图像配准方法大致分为两类:基于灰度和基于特征的配准方法<sup>[1]</sup>。基于灰度的方法利用图像本身具有的一些灰度统计信息来度量图像的相似程度。由于不同传感器的成像机理不同,同一目标的图像在灰度、统计特性等方面都有较大的差异,所以,基于灰度的方法并不适合于多传感器图像的配准。基于特征的方法是从图像中提取共有特征(如角点、边缘、轮廓等),依靠特征量之间的关系完成配准。其优点是提取了图像的显著特征,大大压缩了图像的信息量,计算量小,速度快,且对图像的灰度变化具有一定的鲁棒性,被广泛应用于异类图像的配准中。针对 SAR 与可见光图像的配准,文献[2-4]利用点或边缘设定某种目标函数,采用优化方法使目标函数达到最优,从而获得最佳变换模型完成图像配准,这类算法由于优化过程的存在,计算量大,复杂度高;文献[5]使用面特征和线特征共同实现图像的配准,但该算法要人工完成图像的粗匹配,没有实现图像的自动匹配;文献[6-7]都是利用图像间共有的轮廓特征,通过特征匹配得到控制点,但这种算法要求两类图像中必须具有比较稳定且易匹配的封闭轮廓,否则算法易失效。本文提出一种结合边缘与 SURF 特征点的 SAR 与可见光图像配准方法。虽然两类图像成像机理不同,但在大多数人造场景,如城市、机场等,景物的边缘形状特征具有一定的相似性。成像条件的差异使得实际获取的 SAR 与可见光图像往往存在着一定的局部形变,SURF 特征是近年来在计算机视觉领域兴起的一种局部特征,其在图像旋

转、尺度、仿射和视角变化等条件下都有很好的不变性,且综合性能优于 SIFT 算法,被广泛应用于图像配准及目标识别中。本文在边缘图像上提取 SURF 特征点,通过特征点两级匹配策略寻找最优匹配点对,根据仿射变换模型实现图像的配准。实验结果验证了本文算法能够很好地实现 SAR 与可见光图像的配准。

## 1 配准算法

本文提出的 SAR 与可见光图像配准方法步骤如下:

- 1) SAR 与可见光图像分别进行预处理及提取边缘;
- 2) 在边缘图像上分别提取 SURF 特征点,并为每个特征点构建 SURF 特征向量;
- 3) 采用比值提纯法作为相似度测量,对特征点进行粗匹配;
- 4) 利用 RANSAC 算法剔除错误的匹配点对;
- 5) 根据精确的匹配特征点对计算仿射矩阵参数,并对 SAR 图像进行仿射变换,得到最终的配准图像。

其总体流程如图 1 所示。

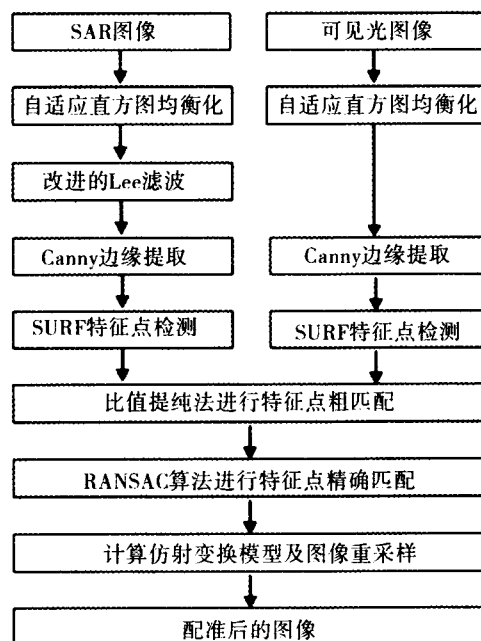


图 1 本文算法整体流程图

Fig. 1 Overall flow chart of proposed algorithm

### 1.1 SAR 与可见光图像边缘特征提取

图像预处理的好坏直接决定图像配准的效果。由于 SAR 图像存在固有的相干斑噪声,在进

行边缘提取之前必须对噪声进行处理,以改善 SAR 图像的质量,尽可能地去掉边缘提取过程中的伪边缘。SAR 图像的斑点噪声属于乘性噪声<sup>[8]</sup>,其模型表示如下:

$$I(x,y)=R(x,y) \cdot F(x,y) \quad (1)$$

式中: $I(x,y)$ 为被噪声污染后的图像强度; $R(x,y)$ 为随机的地面目标雷达散射系数,即图像未被噪声污染的真实值; $F(x,y)$ 为衰落过程所引起的斑点噪声,是与 $R(x,y)$ 独立的随机过程。

由于可见光图像的噪声为加性噪声,其边缘提取方法并不适合直接用于 SAR 图像的边缘提取。本文采用自适应直方图均衡化先对图像进行增强,使得 SAR 图像中的一些弱目标得到加强;改进的 Lee 滤波<sup>[9]</sup>在边缘和细节保持上效果较好,用其对 SAR 图像进行去噪,提高图像的信噪比,增强与可见光图像之间的共性,最后采用 Canny<sup>[10]</sup>算子对处理后的图像进行边缘提取。由于可见光图像信噪比较高,不进行滤波处理,均衡化后直接采用 Canny 算子提取边缘。

## 1.2 SURF 算法

SURF 是 Bay 等人在 SIFT 算法的基础上提出的一种速度快鲁棒性好的特征提取算法<sup>[11]</sup>。SURF 不仅对图像旋转、平移、缩放及噪声具有较好的鲁棒性,并引入积分图像和盒子滤波器,在运算速度上比 SIFT 要快 3 倍左右,综合性能要优于 SIFT 算法。

### 1.2.1 特征点检测

SURF 特征点检测基于 Hessian 矩阵,通过计算 Hessian 矩阵行列式的局部极值来定位特征点的位置。对于图像中一个点  $X(x,y)$ ,在点  $X$  处,尺度为  $\delta$  的 Hessian 矩阵  $H(X,\delta)$  定义为

$$H(X,\delta)=\begin{bmatrix} L_{xx}(X,\delta) & L_{xy}(X,\delta) \\ L_{xy}(X,\delta) & L_{yy}(X,\delta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $L_{xx}(X,\delta)$  是高斯二阶滤波  $\partial^2 g(\delta)/\partial x^2$  在点  $X$  处与图像的卷积; $L_{xy}(X,\delta)$  和  $L_{yy}(X,\delta)$  具有同样的含义。

SURF 利用盒子滤波器代替高斯二阶微分,并引入积分图像,极大提高了运算速度和精度。 $D_{xx}$ 、 $D_{xy}$  和  $D_{yy}$  分别为盒子滤波器与图像进行卷积运算的结果,Hessian 矩阵的行列式简化<sup>[11]</sup>为

$$\text{Det}(H)=D_{xx} \cdot D_{yy}-(0.99D_{xy})^2 \quad (3)$$

通过不同尺寸盒子滤波器模板与积分图像求取 Hessian 矩阵行列式的响应图像,在响应图像上采用 3D 非最大值抑制,可以求取不同尺度的特征点。

### 1.2.2 SURF 特征描述子

SURF 描述子表示在一个尺度内,快速 Hessian 矩阵检测到的每一个特征点周围像素灰度的分布。为了提高鲁棒性,减少计算时间,积分图像与 Harr 小波卷积分别得到  $x$  和  $y$  方向的梯度值。确保特征矢量具有旋转不变性,需要给每个特征点分配一个主方向。为此,在以特征点为中心,  $6\delta$  ( $\delta$  为特征点的尺度)为半径的圆形区域内,对图像在  $x$  和  $y$  方向进行 Harr 小波响应运算(Harr 小波响应模板为  $4\delta \times 4\delta$ ),并使用尺度为  $2\delta$  的高斯加权函数对 Harr 小波的响应值进行高斯加权,离特征点越近响应贡献越大。求取特征点主方向值时,以特征点为中心,张角为  $\pi/3$  的扇形滑动窗口在圆形区域内滑动,并对滑动窗口内图像 Harr 小波响应值进行累加,特征点主方向为最大 Harr 响应累加值所对应的方向。

沿主方向将以特征点为中心  $20\delta \times 20\delta$  的图像区域划分为  $4 \times 4$  个子区域,在每一个子区域内,用尺寸为  $2\delta$  的 Harr 模板进行响应值计算。为了增加对几何变换的鲁棒性,同样赋予以特征点为中心的高斯权重系数,然后对响应值  $\sum dx$ 、 $\sum |dx|$ 、 $\sum dy$ 、 $\sum |dy|$  进行统计。这样,在每个子区域形成 4 维灰度特征描述向量  $V_{\text{子区域}}$ :

$$V_{\text{子区域}}=[\sum dx, \sum |dx|, \sum dy, \sum |dy|] \quad (4)$$

其中: $dx$ 、 $dy$  分别表示水平方向和垂直方向的 Harr 小波响应值。

对于每一个特征点,形成  $4 \times 4 \times 4 = 64$  维的特征向量。为保证对光照的不变性,需要对特征向量进行归一化处理。

### 1.3 特征点匹配

特征点匹配,即在待配准图像中找到参考图像中每个特征点的唯一匹配点。本文通过特征点两级匹配,建立特征点之间正确的一一对应关系,提高了图像配准的精度。

#### 1) 比值提纯法进行特征点粗匹配

本文采用特征向量之间的欧式距离作为两幅图像中特征点的相似性判定度量,对特征点进行粗匹配。对于可见光图像中的每一个特征点,在 SAR 图像点集中查询得到它的最近邻点和次近邻点。若最近邻距离与次近邻距离比值小于阈值  $\epsilon$  (本文取 0.85),则保留该特征点与其最近邻构成的匹配,否则剔除这个匹配对。

#### 2) RANSAC 算法进行特征点精确匹配

通过比值提纯法得到的初始匹配点对中仍存在大量的错误匹配,因此需要进一步对这些匹配点进行处理以尽可能消除错误的匹配点对。本文采用可靠性好、精度高、鲁棒性强的 RANSAC 算法<sup>[12]</sup>对初始匹配点对进行筛选,得到最终正确的匹配特征点对。

文中采用仿射变换模型来估计图像间的变换模型参数。RANSAC 精确匹配的具体步骤如下:

1) 从初始匹配点集中随机选取 3 对控制点,判定这 3 对匹配点是否共线,如不共线则转 2),否则转 1);

2) 根据公式(6),通过选取的 3 对匹配点对计算仿射变换矩阵  $F$ ;

3) 以欧式距离  $d$  为判定依据,在剩余的匹配点对集合中寻找所有满足条件  $d < t$  的点对( $t$  为距离阈值,文中取 0.001),将它们视为内点,并记录内点的个数;

4) 重复上述 3 个步骤  $N$  次,记录每一次内点的个数,选择内点数目最多的那次,并把该次的内点视为最终的内点。

该算法中,可以确定一个适当的迭代次数  $N$ ,使得此时迭代的 3 对匹配点都是内点的概率  $P$  足够高,文中取 99%。任何一对匹配点是外点的概率表示为  $\eta$ ,且未知,随着程序运行而不断变化。则  $N$  用下式表示:

$$N = \frac{\lg(1-P)}{\lg[1-(1-\eta)^3]} \quad (5)$$

RANSAC 算法可以在预定的精度范围内选择合适的控制点对。

#### 1.4 变换模型参数求解与图像配准

图像配准的目的就是寻找最优的变换矩阵参数。常用的变换模型有刚体变换、相似变换、仿射变换和非线性变换等,考虑到图像之间存在的缩放、旋转、平移等变换,本文采用仿射变换模型来估计图像间的变换模型参数。仿射变换模型如下:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & t_x \\ a_3 & a_4 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $(x_i, y_i)$  和  $(X_i, Y_i)$  分别为 SAR 与可见光图像中对应的第  $i$  个特征点坐标;  $a_1, a_2, a_3, a_4, t_x$  及  $t_y$  为仿射变换模型参数,包含了图像间尺度、旋转、伸缩及平移等变化。

理论上,只需要 3 对正确匹配点就可以计算仿

射变换参数。为了提高图像的配准精度,本文根据最终所有的正确匹配点对,利用最小二乘法求解仿射变换参数。

考虑到插值算法的计算复杂度和插值效果,实验中使用双线性插值法对 SAR 图像进行重采样,实现图像的自动配准。

## 2 实验结果与分析

为了验证本文算法针对 SAR 与可见光图像配准的有效性以及检验本文算法相对于原始 SURF 算法的优点,采用正确匹配率(CMR)和均方根误差(RMSE)进行配准效果评价。

1) 正确匹配率 CMR 定义如下:

$$CMR = \frac{N_c}{N} \quad (7)$$

式中:  $N_c$  为最终的正确匹配点对数;  $N$  为经 RANSAC 算法匹配后的所有匹配点对数。

2) 均方根误差 RMSE 定义如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [(a_1 x_i + a_2 y_i + t_x - X_i)^2 + (a_3 x_i + a_4 y_i + t_y - Y_i)^2]} \quad (8)$$

式中:  $M$  为对应匹配点对个数;其他参数含义与(6)式相同。

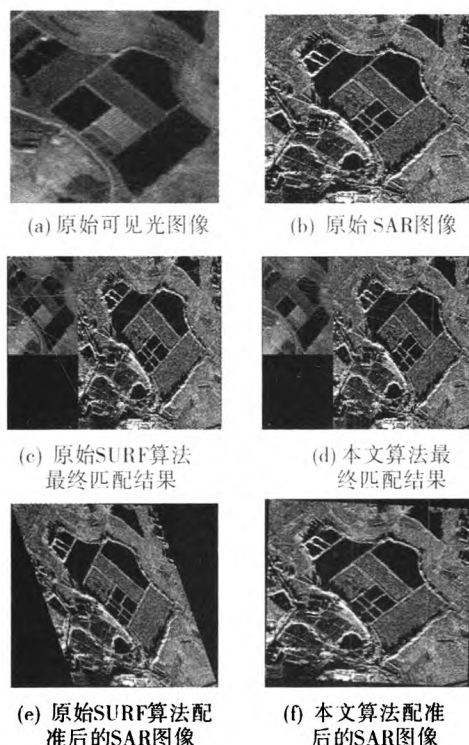


图 2 两种算法图像配准过程

Fig. 2 Image registration process by adopting two algorithms

整个实验是在 WindowsXP, Matlab7.0 的条件下进行的,实验所用图像来自文献[13],可见光图像的大小为 150 像素×200 像素,SAR 图像大小为 300 像素×350 像素。实验结果如图 2 所示。

将本文算法与原始 SURF 算法同时应用到可见光与 SAR 图像的匹配,实验结果如图 2(c)、图 2(d)所示,其中绿色的连线为错误匹配点对。表 1 给出了两种算法的比较结果。其中特征点个数 157/121,表示可见光边缘图像上 157 个 SURF 特征点,SAR 边缘图像上 121 个 SURF 特征点;11/11 表示精确匹配点对数为 11 对,其中正确的有 11 对。从正确匹配率可以看出,本文算法明显优于原始 SURF 算法。

表 1 两种算法匹配结果比较  
Table 1 Matching results comparison by using two algorithms

算法	特征点个数	粗匹配点对数	精确匹配点对数	正确匹配率/%
本文算法	157/121	17	11/11	100
原始 SURF 算法	96/108	13	11/6	54.55

图 2(e)、图 2(f)分别为两种算法的配准结果。从图 2(e)可以很直观地看出,配准后的 SAR 图像相对于参考可见光图像存在很大的畸变,而本文算法的配准效果目测不错。为了检查本文算法的配准精度,在两幅图像上选取 11 对匹配的控制点对,根据公式(8)计算其均方根误差 RMSE。本文算法的 RMSE 为 0.852 个像素,能够满足大部分图像融合处理的需要,可以应用到目标跟踪、识别等领域,是一种有效可行的 SAR 与可见光图像配准方法。

3 结论

本文提出了一种基于边缘和 SURF 特征的可见光与 SAR 图像的自动配准算法。其优势表现在以下几个方面:

- 1) 在边缘图像上提取特征点,克服了因图像之间较大的灰度差异而很难寻求同名特征的难题,且提取的特征点准确,具有很好的对应关系;
- 2) 采用 SURF 算法能快速、准确地提取特征点,且在图像变化时 SURF 特征具有一定的不变性,鲁棒性强;

3) 只针对提取的特征点进行匹配,原理简单,且大大减少了计算量,避免了搜索过程;

4) 采用特征点的两级匹配策略,极大地提高了图像的配准精度。

但该方法控制点的选取是在边缘图像的基础上进行的,配准精度受边缘的影响比较大。本文算法要求 SAR 与可见光图像的边缘存在一定的相关性,可以满足大多数人造场景,如机场、城市、港口等;但在一些特殊的环境,如植被通常很难提取对应的边缘。因此,对于边缘相关性很小的 SAR 与可见光图像的配准,是下一步研究的方向。

参考文献:

[1] ZITOVA B, FLUSSET J. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing, 2003(21): 977-1000.

[2] 杨敏. 结合形态学梯度互信息和多分辨率寻优的图像配准新方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(3): 246-250.

YANG Min. A novel image registration method combining morphological gradient mutual information with multiresolution optimizer[J]. Acta automatica sinica, 2008, 34(3): 246-250. (in Chinese with an English abstract)

[3] KELLER Y, AVERBUCH A. Multisensor image registration via implicit similarity[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(5): 794-801.

[4] KIM Y S, LEE J H, RA J B. Multisensor image registration based on intensity and edge orientation information [J]. Pattern Recognition, 2008, 41: 3356-3365.

[5] DARE P, DOWMAN I. An improved model for automatic feature based registration of SAR and SPOT image[J]. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2001, 56(1): 13-28.

[6] LI Hui, MANJUNATH B S. A contour-based approach to multisensor image registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(3): 320-334.

[7] YU Xiang-yu, GUO Li-hua. Image registration by contour matching using tangent angle histogram[J]. IEEE Congress on Image and Signal Processing, 2008, 4(4): 746-749.

[8] FLORENCE T, HENRI M. Detection of linear features in SAR images: Application to road network extraction [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote

- sensing,1993,15;850-863.
- [9] 张登荣,俞乐,蔡志刚.基于面特征的光学与 SAR 影像自动匹配方法[J].中国矿业大学学报,2007,11(6):843-847.
- ZAHGN Deng-rong, YU Le, CAI Zhi-gang. A region feature based automatic matching for optical and sar images [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007,11(6):843-847. (in Chinese with an English abstract)
- [10] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986,8(6):679-698.
- [11] HERBERT B, ANDREAS E, TINNE T, et al. Speeded-up robust feature[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- [12] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [13] 李孟君. 基于隐含相似性的光学和 SAR 图像配准研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2008.
- LI Meng-jun. Study on registration for sar and optical image via implicit similarity[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)