

融合显性和隐性度量的多模图像配准算法

谷 雨¹ 徐 英² 陈华杰¹

(1. 杭州电子科技大学通信信息传输与融合技术国防重点学科实验室, 浙江杭州 310018;

2. 杭州电子科技大学生命信息与仪器工程学院, 浙江杭州 310018)

摘 要:为解决基于隐性度量的图像配准算法初始配准误差大容易引起失配的问题, 本文提出了一种融合显性度量和隐性度量的多模图像分层配准算法。首先采用金字塔分解算法得到低分辨率待配准图像。然后在每一层金字塔图像中, 先采用互信息作为显性度量, 利用粒子群算法获得初始的配准参数; 以此作为初始值, 采用基于隐性度量的配准算法, 利用融合粒子群和鲍威尔搜索法的优化算法获取更准确的配准参数。基于低分辨率图像计算得到配准参数后, 先对高分辨率待配准图像进行变换, 然后利用提出的上述算法进行参数优化, 根据每层得到的配准参数计算最终的配准参数。最后, 采用可见光与红外图像、多波段 SAR 图像进行了配准实验。实验结果表明, 提出的算法适用于多模图像配准, 能够减小配准误差, 具有一定的适用性。

关键词: 图像配准; 显性度量; 隐性度量; 粒子群; 鲍威尔搜索法

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2016.06.005

Multimodal Image Registration Algorithm by Combining Explicit and Implicit Similarity

GU Yu¹ XU Ying² CHEN Hua-jie¹

(1. Fundamental Science on Communication Information Transmission and Fusion Technology Laboratory Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; 2. College of Life Information Science and Instrument Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: To solve the mismatch problem caused by big initial registration error in image registration algorithm based on implicit similarity, the algorithm of hierarchical combining registration algorithms based on explicit similarity and implicit similarity for multimodal image is proposed in this paper. Pyramid transform is first adopted to obtain low resolution images to be registered. Mutual information is used as explicit similarity, and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is adopted to compute the initial registration parameters. The algorithm based on implicit similarity is then used to obtain more accurate results by combination of PSO and Powell algorithm. The registration parameter above is used to transform the high resolution image to be registered first, and registration parameter is then optimized using the method above, where the final registration parameter is computed using these two registration parameters. Several sets of visible images, visible and infrared images, and multi-band SAR images are used to perform registration experiments. The experimental results demonstrate that, the proposed algorithm can be applied to multimodal image registration, reduce registration errors, and have certain applicability.

Key words: image registration; explicit similarity; implicit similarity; particle swarm optimization; Powell algorithm

1 引言

图像配准是将不同时间、不同传感器或不同视角

下获取的两幅或多幅图像进行匹配、对齐、叠加的过程, 是许多图像处理和计算机视觉应用的关键步骤之一, 包括图像融合、图像拼接、视觉伺服等^[1]。

收稿日期: 2015-06-17; 修回日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61372024); 浙江省自然科学基金项目(LQ13F050010); 浙江省教育厅项目(Y201223278)

由于多模图像成像机理的差异,获得图像间的灰度相关性不强,采用互相关系数等作为相似性度量很难获得满意的配准结果,如何提高多模图像配准的成功率,并减小图像配准误差,是国内外研究者一直致力于解决的主要问题之一。目前主要的多模配准算法有基于互信息的方法^[2]、基于 Fourier-Mellin 变换的方法^[3-4]、基于特征的方法^[5-6]等。基于互信息的方法通过显式地计算两幅图像的像素间统计特征来实现配准,已广泛应用于医学图像配准等领域。基于 Fourier-Mellin 变换的方法利用傅里叶变换将配准图像转换到频域,通过最大化相位相关函数实现配准。该方法计算量小,但只适用于相似变换情况。基于特征的方法从待配准图像中分别提取点、线和轮廓等特征,然后根据特征间的匹配关系计算配准参数。该方法应用于单模图像配准时十分有效,但用于多模图像配准时,由于成像机理或参数不同导致目标在图像中差异较大,如何设计/选择合适的特征提取算法是需要重点解决的问题。

文献[7]提出了一种基于隐性度量的多模图像配准算法,算法思想是参考图像中梯度幅值最大的点集经过映射后在待配准图像中对应点的梯度幅值也最大,所以配准过程中不直接利用图像灰度的映射关系,而是基于特征传递计算配准参数,因而处理多模图像配准具有一定的优势。基于隐性度量的图像配准算法包括优化算法和隐含相似性计算两方面。文献[8]采用遗传算法和鲍威尔算法(Powell)进行分层优化来提高算法的鲁棒性和配准精度。文献[9]提出了边缘映射的隐含相似性计算方法用于可见光与红外图像配准,文献[10]提出了一种新的图像相似度量-隐直线度。文献[11]提出了一种改进的隐含相似性光学和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像配准算法,虽然能够取得亚像素级的配准精度,但是需要人工选点方式确定初始的配准参数。文献[12]和文献[13]提出了一种基于联合相似测度的 SAR 图像边缘点特征配准算法,采用城郊和城市地区的 SAR 图像验证了算法的有效性,但是采用遗传算法进行优化时需要确定各参数的合理范围。基于隐性度量的配准算法存在以下两方面问题:(1)由于多模图像成像机理不同,提出的改进隐含相似性有时会失

效;(2)当初始图像配准误差较大时,可能造成优化算法发散,从而造成图像配准失效。

为提高多模图像配准算法的鲁棒性,本文提出了一种融合显性度量和隐性度量的多模图像配准算法。首先利用基于显性度量的配准算法获得较精确的配准参数,然后将该参数作为初始值,采用基于隐性度量的配准算法进行进一步优化。算法中采用金字塔结构加速优化过程,当利用低分辨率图像获得配准参数后,利用该参数对更高分辨率的待配准图像进行变换,然后利用变换后的图像采用上述方法求取配准参数。实验验证了提出算法的有效性。

2 基于隐性度量的图像配准方法

基于互信息等显性度量的多模图像配准方法不同,文献[7]中提出的基于隐性度量的图像配准方法不直接计算两幅图像间的某种相似性,而是先在待配准图像中根据一定准则选取一些显著特征点,然后以这些点为中心提取特征向量,根据变换模型进行特征点集映射,并计算隐含相似性,因而适用于成像机理不同的多模图像配准。基于隐性度量的图像配准算法流程如图 1 所示,主要包括特征点集提取、特征向量计算、隐含相似性计算和配准参数优化等几个方面。

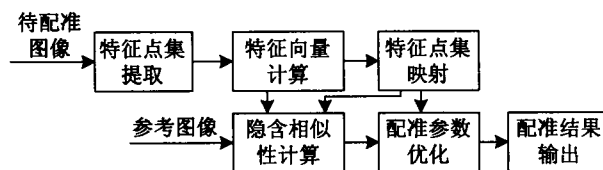


图 1 基于隐性度量的图像配准算法流程图

Fig. 1 Image registration algorithm block diagram based on implicit similarity

本文对文献[7]中特征点集提取和参数优化算法两方面进行了改进,具体介绍如下。

2.1 隐性度量计算

由于不同模态图像的噪声水平不同,为减小噪声对初始特征点集检测的影响,从参考图像和待配准图像中分别提取特征点,然后采用经过映射得到的特征值加权和作为隐性度量值。

(1) 初始点集检测

将待配准图像 I_1 按行列分均匀分割成 $10 * 10$

个子图像,然后在每个子图像中采用式(1)逐像素点计算梯度值;选择每个子图像中梯度幅值前10%的像素点,构成特征点集 $S_1 = \{v_i\}_{i=1 \dots m}$,其中 $v_i = (x_i, y_i)$ 。

$$|\nabla I(i, j)| = \sqrt{I_x^2(i, j) + I_y^2(i, j)} \quad (1)$$

其中, $I_x(i, j) = 0.5(I(i, j+1) - I(i, j-1))$, $I_y(i, j) = 0.5(I(i+1, j) - I(i-1, j))$, $I(i, j)$ 表示图像第 i 行第 j 列的像素值。

同理,从参考图像 I_2 中提取特征点集 S_2 。

(2) 特征点集映射

给定配准参数 p , 变换模型 $T(v, p)$, 对特征点集 S_1 和 S_2 中的特征点坐标进行变换和逆变换, 采用式(2)计算该参数对应的隐性度量值。

$$F(p) = 0.5 * \sum_{v_i \in S_1} \omega_i |\nabla I_2(T(v_i, p))|^2 + 0.5 * \sum_{v_j \in S_2} \omega_j |\nabla I_1(T^{-1}(v_j, p))|^2 \quad (2)$$

其中, ω_i, ω_j 为自适应权重, 具体计算公式见文献[7]。

2.2 融合 PSO 和 Powell 的优化算法

由于式(2)为非线性函数, 很难采用梯度下降法等直接优化方法, 并且容易陷入局部最优值。采用遗传算法、粒子群等智能优化方法时, 由于具有一定的随机性, 通常需要大量的粒子才能够获得全局最优值。由于 Powell 算法不需要计算目标函数的梯度, 故本文提出了一种融合 PSO 和 Powell 算法来提高配准精度^[14]。具体步骤如下:

(1) 利用 PSO 算法对参数进行优化求解, 此时采用式(2)计算粒子适应度值。

(2) 迭代结束后, 采用 Powell 搜索法对全局最优粒子进行进一步寻优。

(3) 配准参数输出。

3 融合显性和隐性度量的图像配准方法

基于互信息等显性度量的配准算法利用了图像全部像素的信息来计算显性度量, 而基于隐性度量的算法则利用了图像中显著特征点的信息, 因而本文融合了这两种算法的优势, 并采用图像金字塔结构, 设计了一种融合显性度量和隐性度量的多模图像配准方法, 流程图如图2所示。本文采用逐级优化的方法逐步获得更精确的配准参数, 先采用基于显性度量的方法获得较精确的配准参数, 以此作

为初值, 然后采用基于隐性度量的方法进一步获得更精确的配准参数。基于低分辨率图像获得初步配准参数后, 将其用于高分辨率图像估计配准参数时, 一种方法是将其作为参数进一步优化的初值, 另一种方法是将其作用于待配准图像, 利用变换后得到的图像与参考图像求得相对配准参数。由于低分辨率图像较高分辨率图像噪声减小, 利用其计算得到的估计值与真实值已经比较接近, 故采用后一种方法时会减小优化算法的搜索范围, 从而减小陷入局部极值的可能。

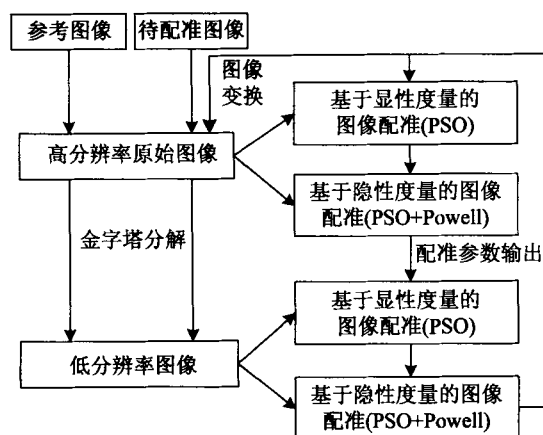


图2 融合显性度量和隐性度量的多模图像配准算法

Fig. 2 Multimodal image registration algorithm block diagram by combining explicit and implicit similarity

算法具体步骤如下:

(1) 对待配准原始图像进行一层高斯金字塔分解, 获得低分辨率待配准图像。

(2) 在低分辨率图像中, 首先采用基于显性度量的方法估计配准参数初值 p_0 , 优化算法选用粒子群优化算法, 度量值计算采用互信息; 然后以 p_0 作为初值, 采用基于隐性度量的方法获得配准参数值 p_1 , 优化算法选用融合 PSO 和 Powell 算法的优化策略。

(3) 对更高分辨率图像(原始图像)进行配准, 首先利用步骤(2)中获得的配准参数值 p_1 对待配准图像进行变换, 然后再采用步骤(2)中的方法基于参考图像和经过变换后的待配准图像计算得到更精准的配准参数 p_2 。

(4) 根据 p_1 和 p_2 计算最终的配准参数 p , 并对待配准图像进行变换, 采用双线性插值法得到最终的配准图像。

本文采用的变换模型为仿射变换,二维图像坐标采用齐次坐标表示法,则仿射变换计算公式为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = T(v_1, p) = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

待求解的仿射变换参数写成向量形式为 $p = [a \ b \ c \ d \ e \ f]^T$ 。变换过程中选取图像中心 (x_c, y_c) 作为坐标原点,变换前像素点原始坐标 $x_1 = x_0 - x_c, y_1 = y_0 - y_c$,则变换后对应像素点坐标为 (x_2', y_2') ,其中, $x_2' = x_2 + x_c, y_2' = y_2 + y_c$ 。已知第一层图像配准结果为 $p_1 = [a_1 \ b_1 \ c_1 \ d_1 \ e_1 \ f_1]^T$,第二层图像配准结果为 $p_2 = [a_2 \ b_2 \ c_2 \ d_2 \ e_2 \ f_2]^T$,则最终配准结果 $p = [a \ b \ c \ d \ e \ f]^T$ 计算公式为

$$\begin{cases} a = a_2 a_1 + b_2 d_1 \\ b = a_2 b_1 + b_2 e_1 \\ c = a_2 c_1 + b_2 f_1 + c_2 \\ d = d_2 a_1 + e_2 d_1 \\ e = d_2 c_1 + e_2 e_1 \\ f = d_2 c_1 + e_2 f_1 + f_2 \end{cases} \quad (4)$$

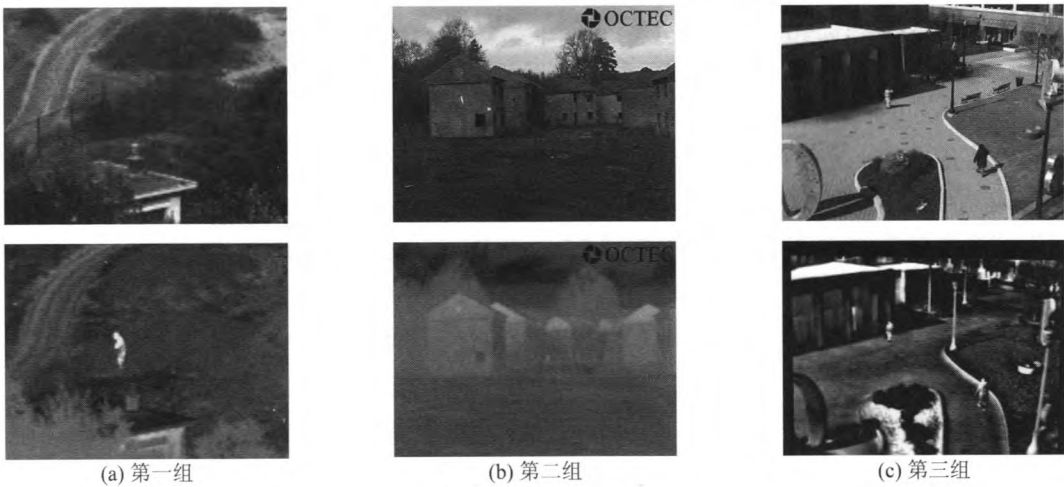


图 3 可见光与红外配准图像
Fig.3 Visible/IR image registration

表 1 本文算法图像配准误差
Tab.1 Image registration error of our algorithm

待配准图像组	图像分辨率	估计配准参数	初始误差/像素	配准后误差/像素
1	360×270	$[1.0608 \ 0.1014 \ 31.2759 \ -0.1059 \ 0.8668 \ -18.1536]^T$	79.52	3.62
2	320×240	$[1.0750 \ 0.0951 \ 32.1279 \ -0.1077 \ 0.8489 \ -15.8460]^T$	74.38	4.89
3	320×240	$[1.0426 \ 0.1096 \ 29.3990 \ -0.0872 \ 0.8317 \ -14.4789]^T$	74.38	1.98

4 实验结果分析

为验证本文提出算法的有效性,配准实验中采用互信息^[2]作为显性度量,采用 PSO 算法进行优化时,采用粒子个数为 20,迭代次数为 10。为提高粒子搜索范围,PSO 算法中粒子移动的最大速度绝对值为 $V = [0.1 \ 0.1 \ 20 \ 0.1 \ 0.1 \ 20]^T$;当采用隐性度量进行配准时,PSO 算法粒子移动的最大速度绝对值设定为 $V = [0.02 \ 0.02 \ 5 \ 0.02 \ 0.02 \ 5]^T$ 。Powell 算法中参数寻优顺序依次为 $a \rightarrow b \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow c \rightarrow f$,一维搜索方法选用牛顿迭代法,目标函数为式(2),迭代次数为 10,搜索范围的绝对值为 $[0.05 \ 0.05 \ 10 \ 0.05 \ 0.05 \ 10]^T$ 。

为验证算法的性能,采用可见光与红外图像、多波段 SAR 图像进行了配准实验。如图 3 所示,采用的三组可见光与红外图像为已配准图像,配准前根据变换参数利用公式(3)对其中一幅图像进行变换作为参考图像,另外一幅图像作为待配准图像与参考图像进行配准。计算配准误差时,从待配准图像中等间隔选择一组控制点,然后利用实际变换参数和估计变换参数对其进行变换,统计均方根误差^[15]。

首先设定变换参数为 $[1.05\ 0.1\ 30\ -0.1\ 0.85\ -15]^T$,从表 1 中可以看出,虽然初始误差均较大,但配准后误差明显减小,均小于 5 个像素,其中第三组图像小于 2 个像素。经过配准后,采用图 3(a)的两幅图像通过加权平均法得到的融合图像如图 4 所示。

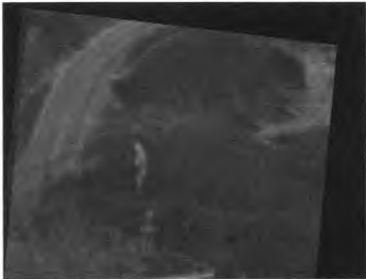


图 4 配准后融合图像
Fig. 4 Fusion image after registration

表 2 三种配准算法性能比较
Tab. 2 Performance comparison of three registration algorithms

变换参数	算法	配准误差/像素		
		第一组图像	第二组图像	第三组图像
$[0.7\ 0.15\ 1\ 0.15\ 0.7\ -1]^T$	算法 1	5.83	11.28	15.08
	算法 2	44.85	134.22	31.30
	本文算法	2.43	2.26	3.81
$[0.95\ 0.05\ 10\ 0.05\ 0.95\ -10]^T$	算法 1	10.32	10.96	28.98
	算法 2	2.76	9.69	2.09
	本文算法	2.37	1.39	4.27

在如图 2 所示的算法流程中,仅采用基于显性度量的配准算法,记做算法 1,采用改进的基于隐性度量的配准算法,记做算法 2,通过实验比较这三种算法的配准误差,结果如表 2 所示。图 3(a)中可见光与红外图像的局部信息不同(红外图像中包含隐藏目标),算法 1 由于利用了图像中全部像素信息,因而能够避免目标在不同模态图像中外观显著差异的情况,在不同变换参数情况下,基本使配准误差减小到 15 个像素以内。当采用变换参数 $[0.7\ 0.15\ 1\ 0.15\ 0.7\ -1]^T$ 时,参考图像与待配准图像间具有较大的仿射形变,使得梯度的计算会出现局部极值。对于图 3(a)图像,初始配准误差为 53.08,采用算法 1 的配准误差明显小于算法 2,对于图 3(b),算法 2 出现了优化算法发散的情况。本

文算法有效结合了两种算法的优点,配准误差最小。当采用变换参数 $[0.95\ 0.05\ 10\ 0.05\ 0.95\ -10]^T$ 时,参考图像与待配准图像间的仿射形变小,此时初始配准误差小,由表 2 可以看出,算法 2 的配准结果好于算法 1,对于图 3(c),采用基于隐性度量的图像配准算法取得了最好的配准结果,这说明基于隐性度量的配准算法在初始配准误差较小的情况下能够寻找到变换参数的次优值。综合表 1 和表 2 的结果可以得出,虽然采用的智能优化算法具有一定的随机性,但由于结合了 Powell 算法,使得在多种变换参数情况下,本文提出的融合显性度量和隐性度量的多模图像配准算法基本上能够将配准误差控制在 3 个像素以内,但均不超过 5 个像素,有效实现了可见光与红外图像间的配准。

当采用变换参数 $[0.95\ 0.05\ 10\ 0.05\ 0.95\ -10]^T$ 时,表 3 为各算法的运行时间,运行环境:Windows XP 32 位操作系统,Matlab R2012b, Intel Core i3 3.4 GHz CPU, 4 GB 内存。从表中可以看出,本文算法由于采用了两种度量计算方法,且采用了融合 PSO 和 Powell 的算法进行配准参数优化,故算法运行时间较长。

表 3 三种配准算法运行时间
Tab. 3 Running time of three algorithms

算法	时间/秒		
	第一组图像	第二组图像	第三组图像
算法 1	179	142	143
算法 2	897	750	680
本文算法	573	462	468

将该算法应用于多波段 SAR 图像配准时,采用加权平均法将配准后的图像进行融合,结果图如图 5 所示,融合后图像没有出现因失配而产生模糊的情况。其他常用的图像配准算法,如相位相关法^[2-3],基于局部特征的图像配准算法^[5-6]也应用于这两组 SAR 图像进行配准。实验结果表明,相位相关法由于利用整幅图像的信息来计算相位相关系数,也能够实现这两组图像的配准,如图 6 所示,但该方法只适用于相似变换情况,若图像中存在强烈的仿射变换关系,则该方法不适用。基于局部特征的图像配准算法,如在两幅图像中提取 SIFT 特征,

然后进行特征配对并计算配准参数,虽然适用于仿射变换情况,但 SAR 图像中存在的相干斑噪声以及多波段 SAR 图像中目标特性的差异,使得该算法也较难获得理想的配准结果,如图 7 所示,匹配的特征点对中存在少量的正确匹配点,但大多数为错误匹配情况。

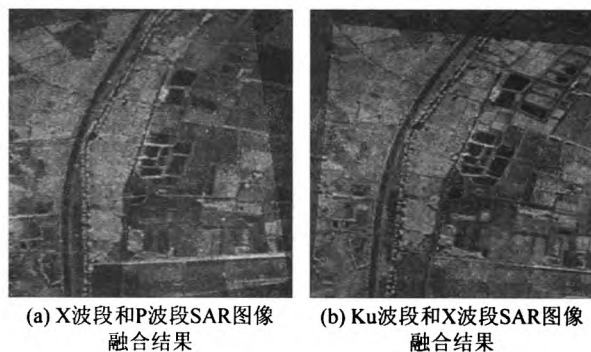


图 5 配准后多波段 SAR 图像融合结果

Fig.5 Fusion results of multiple band SAR image after registration

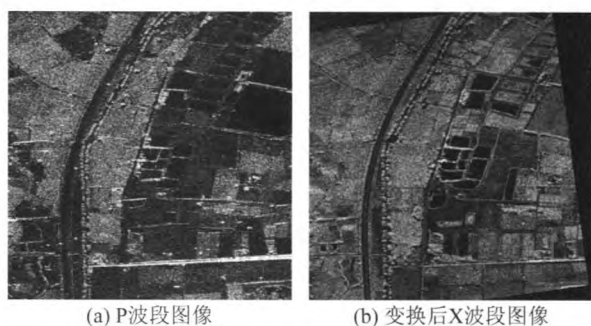


图 6 基于 Fourier-Mellin 变换的配准结果

Fig.6 Registration result based on Fourier-Mellin transform

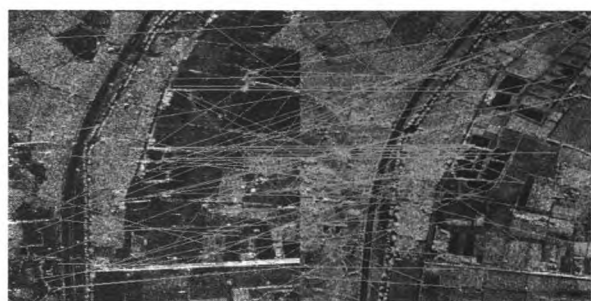


图 7 基于 SIFT 特征的 P 波段和 X 波段 SAR 图像配准结果

Fig.7 Registration result of P band and X band SAR images based on SIFT

5 结论

本文提出了一种融合显性度量和隐性度量的多模图像配准算法,其优势在于:(1)基于隐性度量

的图像配准方法采用融合了智能随机优化(PSO)和共轭梯度直接优化(Powell)的优化策略,在进行参数寻优时,可有效避免陷入局部极大值的情况;(2)采用逐级优化策略融合了两种具有不同机理的图像配准算法;(3)在进行分层优化求解时,当获较精确配准参数后,对待配准图像进行变换,在一定程度上提高了配准的成功率。实验结果验证了提出算法的有效性。本文提出的配准算法在实现时,显性度量和隐性度量均有多种选择,显性度量包括相关比、对齐度、归一化互信息等,隐性度量包括小波归一化系数、可调谐金字塔系数等,如何根据不同场景选择合适的度量将是下一步研究的重点。由于采用了智能优化算法,如何提高配准算法的实时性和收敛性也是需要解决的重点问题之一。

参考文献

- [1] 倪国强,刘琼. 多源图像配准技术分析与发展[J]. 光电工程,2004,31(9):1-6.
Ni Guoqiang, Liu Qiong. Analysis and prospect of multi-source image registration techniques[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(9): 1-6. (in Chinese)
- [2] Pluim J P W, Maintz J B A, Viergever M A. Mutual information based registration of medical images: a survey [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 22(8):986-1004.
- [3] Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation rotation, and scale-invariant image registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(8):1266-1271.
- [4] 胡永利,王亮,刘蓉,等. 一种从粗到精的红外和可见光卫星图像配准方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2013,(11):2968-2972.
Hu Yongli, Wang Liang, Liu Rong, et al. A coarse-to-fine registration method for satellite infrared image and visual image [J]. Spectroscopy and Spectr Analysis, 2013,(11):2968-2972. (in Chinese)
- [5] Tuytelaars T, Mikolajczyk K. Local invariant feature detectors; A survey[J]. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 2008, 3(3): 177-280.
- [6] 龚志成,裴继红,谢维信. 多光谱遥感卫星图像的精确配准方法研究[J]. 信号处理, 2013, 29(10): 1398-1406.
Gong Zhicheng, Pei Jihong, Xie Weixin. Research of Accurate Registration Method for Multispectral Remote

- Sensing Images[J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(10): 1398-1406. (in Chinese)
- [7] Keller Y, Averbuch A. Multisensor image registration via implicit similarity[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(5): 794-801.
- [8] Yao J C, Kian L G. A refined algorithm for multisensor image registration based on pixel migration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(7): 1839-1847.
- [9] 廉蒴, 李国辉, 张军, 等. 基于边缘最优映射的红外和可见光图像自动配准算法[J]. 自动化学报, 2012, 38(4): 570-581.
Lian Lan, Li Guohui, Zhang Jun, et al. An automatic registration algorithm of infrared and visible images based on optimal mapping of edges[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(4): 570-581. (in Chinese)
- [10] 艾锐, 史泽林, 徐德江, 等. 基于直线映射的红外与可见光图像自动配准算法[J]. 信息与控制, 2014, 43(2): 199-204.
Ai Rui, Shi Zelin, Xu Dejiang, et al. A line mapping based automatic registration algorithm of infrared and visible images[J]. Information and Control, 2014, 43(2): 199-204. (in Chinese)
- [11] 关泽群, 周敏璐, 王建梅. 一种改进的隐含相似性光学和 SAR 图像配准算法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(4): 600-606.
Guan Zequn, Zhou Minlu, Wang Jianmei. Optical and SAR image registration via improving implicit similarity[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(4): 600-606. (in Chinese)
- [12] 陈天泽, 李燕. 一种高性能 SAR 图像边缘点特征匹配方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(12): 2051-2063.
Chen Tianze, Li Yan. A high performance edge point feature match method of SAR images[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(12): 2051-2063. (in Chinese)
- [13] 陈天泽, 李燕. 基于联合相似测度的 SAR 图像边缘点特征配准方法[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(4): 67-73.
- Chen Tianze, Li Yan. The edge point registration method of SAR images based on the joint similarity[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(4): 67-73. (in Chinese)
- [14] 吴建辉, 章兢, 陈红安. 融合 Powell 搜索法的粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(3): 343-348, 354.
Wu Jianhui, Zhang Jun, Chen Hongan. Particle swarm optimization algorithm combination with Powell search method[J]. Control and Decision, 2012, 27(3): 343-348, 354 (in Chinese)
- [15] 余先川, 吕中华, 胡丹. 遥感图像配准技术综述[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2960-2972.
Yu Xuanchuan, Lv Zhonghua, Hu Dan. Review of remote sensing image registration techniques[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2960-2972. (in Chinese)

作者简介



谷雨男, 1982年生, 吉林双阳人, 杭州电子科技大学, 讲师, 研究方向为 SAR 目标识别、多源信息融合。
E-mail: guyu@hdu.edu.cn



徐英女, 1982年生, 福建南平人, 杭州电子科技大学, 讲师, 研究方向为 THz 图像处理。
E-mail: xuying@hdu.edu.cn



陈华杰男, 1978年生, 福建福州人, 杭州电子科技大学, 副教授, 研究方向为 SAR 目标识别。
E-mail: chj247@hdu.edu.cn