

一种改进的隐含相似性光学和 SAR 图像配准算法

关泽群^{1, 2}, 周敏璐¹, 王建梅^{1, 2}

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 同济大学 遥感与空间信息技术研究中心, 上海 200092)

摘要: 光学和 SAR (synthetic aperture radar) 图像信息的互补性和特征表现的差异性使得两者的配准成为目前多源遥感图像处理的研究重点。隐含相似性配准从图像间存在结构上的相似性出发, 将传统复杂的特征匹配过程简化为特征点集的迁移和仅需在单幅图像上对配准参数进行迭代搜索的过程, 为光学和 SAR 图像配准提供新的思路。基于上述配准思想, 研究用 Canny 算子改进特征点集提取过程, 引入联合马尔可夫模型提高 SAR 图像去噪质量, 以改进后的量子粒子群算法优化配准参数搜索过程, 最终实现光学和 SAR 图像的配准。经实验证明, 改进后的隐含相似性光学和 SAR 图像配准算法能达到像素级甚至亚像素级的配准精度。

关键词: 隐含相似性; 图像配准; SAR 去噪; 联合马尔可夫模型; 量子粒子群算法

中图分类号: P237

文献标志码: A

Optical and SAR Image Registration Via Improving Implicit Similarity

GUAN Zequn^{1, 2}, ZHOU Minlu¹, WANG Jianmei^{1, 2}

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Research Center of Remote Sensing and Spatial Information Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Optical and synthetic aperture radar (SAR) image registration has become a research focus in the area of multisensory image processing for their information complementarity and feature difference. Based on the structural similarity between images, registration via implicit similarity simplifies the traditional feature matching process as a migration of the feature points and the iterative search of registration parameters on a single image. This method provides a new idea for optical and SAR image registration. As a result, the Canny operator is adopted to modify extraction process of feature points. The joint Markov model (JMM) is

employed to improve denoising quality of SAR image. The search process of registration parameters is optimized with the modified quantum particle swarm optimization (QPSO) algorithm, and the optical and SAR image registration is finally realized. The experiment proves that the improved implicit similarity algorithm on optical and SAR image registration can reach a high accuracy of pixel level or even sub-pixel level.

Key words: implicit similarity; image registration; SAR denoising; joint Markov model (JMM); quantum particle swarm optimization (QPSO)

随着光学、红外、SAR、激光等不同传感器的涌现与应用, 对同一地区多时相、多传感器、多平台、多分辨率遥感图像的获取变得越来越容易。图像配准作为多源遥感图像处理的关键支撑技术, 直接影响后续图像融合、变化检测、信息整合等应用的精度和有效性。而不同传感器的成像机理差异较大, 获取图像的时间、视角也不同, 使得多源图像上特征的表现形式各异, 因此, 异质遥感图像配准成为目前多源遥感图像处理的研究热点和难点, 光学和 SAR 图像因其显著的互补性成为其中的研究重点。

传统的配准方法主要有基于区域和基于特征的两大类方法^[1]。基于区域的方法通常采用灰度的相似性度量进行配准^[2], 但对异质图像上的灰度信息变化非常敏感, 难以取得有效的配准结果。基于特征的方法则分别提取两幅图像的特征后, 进行同名特征的匹配^[3], 但这类算法的前提是两幅图像的同名特征必须共同存在, 且被精确提取, 这在特征表现差异较大(多处特征反转或消失)的异质图像上较难实现。针对这个问题, Keller^[4-5]在研究多态医学图像配准时, 提出了基于隐含相似性的配准思想, 将传统配

收稿日期: 2012-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(41171327); 国家“九七三”基础研究发展计划(2012CB719903); 上海市自然科学基金(11ZR1439000)

第一作者: 关泽群(1957—2013), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为遥感应用, 模式识别, 图形图像处理, 人工智能等。

E-mail: zequnguan@tongji.edu.cn

通讯作者: 王建梅(1971—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为遥感影像分析与应用, 空间数据挖掘等。E-mail: jianmeiw@tongji.edu.cn

准需对两幅图像提取特征和复杂的同名特征匹配过程简化为仅需在一幅图像上提取特征,而在另一幅图像上完成配准参数迭代搜索的过程,有效避免两幅图像间的交互匹配,非常适用于特征差异较大的异质图像配准.李孟君^[6]在改进参数搜索算法的基础上,首次将这种隐含相似性配准应用到光学和 SAR 图像上,并取得了较好的配准结果.

但是,已有的研究^[4-6]在处理光学图像时,将高梯度幅值点集作为图像特征,未能从整体上保留图像结构,也未忽略孤立噪声点的影响;在处理 SAR 图像时,未强调 SAR 斑点噪声对隐含相似性配准算法的决定性影响;在优化搜索配准参数时,Keller^[4-5]采用的牛顿迭代法,易陷入局部最优,且必须在提供较准确粗配准的前提下,才能进行局部寻优,虽然李孟君^[6]采用遗传算法进行了改进,但是仍不能保证全局最优,且算法操作复杂,也不是最佳的搜索算法.

因此,本文采用 Canny 边缘检测算子优化高梯度幅值特征点集的提取过程,保证图像结构特征的完整性;考虑 SAR 斑点噪声是影响整个配准算法的关键,因此引入联合马尔可夫模型来提高去噪质量,为后续光学和 SAR 图像配准提供有效的数据支持;以原理简单、全局搜索性能更佳的改进量子粒子群算法进一步优化配准参数的搜索过程,最终实现基于隐含相似性光学和 SAR 异质图像的高精度配准.

1 隐含相似性配准及其改进

Keller 首次提出了隐含相似性的概念^[4-5],认为在两幅图像的共同场景中,虽然不同传感器下的灰度、特征表现各不相同,但在一定程度上存在着物理结构的相似性.因此,若把包含这类隐含相似特征的特征点集提取出来,并根据这种相似性构建配准测度,最终可实现异质图像的配准,这就是隐含相似性的配准思想.

已有的研究^[4-6]认为,对于图像中由前 20% 梯度幅值最大的像素点构成的点集,可将其物理意义看作是图像中大量基本结构特征和少量孤点噪声的代表,并涵盖了配准所需的隐含相似特征.不同于高梯度幅值点集,本文引入具有优良边缘检测能力的 Canny 算子,改进图像隐含相似特征的提取方法,能在一定程度上抑制孤点噪声,又保证了图像结构特征的完整性,为后续的像素迁移提供有效的数据支持.

由于 SAR 使用相干波照射物体,各个目标单元的随机散射信号相互叠加,因此在 SAR 图像上遍布相干斑噪声,严重影响 SAR 图像的特征提取、配准、目标识别和融合等处理以及应用^[7].现有的隐含相似性配准,并没有强调 SAR 斑点噪声的影响^[4-6].而本文认为噪声占据着整幅图像的梯度最大值位置,当隐含相似性配准以特征点集的梯度平方和(sum of squared-gradient, SSG)作为配准测度时,SAR 斑点噪声的大量存在会直接影响配准算法对最大 SSG 值的确定过程,使得配准参数搜索停止在非最优的位置,导致图像的误配准.因此,SAR 斑点噪声是隐含相似性配准的重要影响因素,本文将 SAR 图像去噪方法作为一个研究重点,目的是去除斑点噪声的同时也尽可能多地保留边缘细节信息,为实现 SAR 图像上配准参数的优化搜索提供可靠的数据源.

基于隐含相似性光学和 SAR 图像的整体配准过程如图 1 所示.

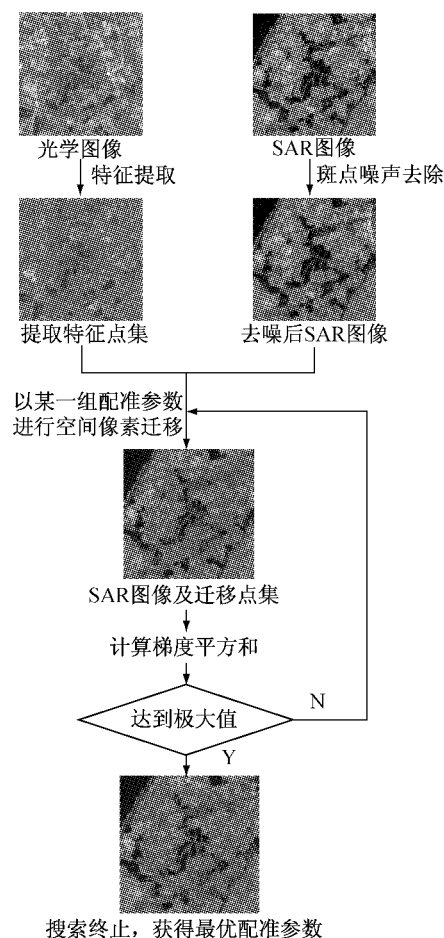


图1 基于隐含相似性的配准过程
Fig.1 Registration process based on implicit similarity

2 引入马尔可夫的 SAR 图像去噪

目前成像后 SAR 图像斑点去噪主要有空域和频域两种方法^[8].前者是直接以图像为处理对象,有传统非模型的均值滤波、中值滤波,和基于模型的 Lee, Kuan, Frost 滤波等.后者是对原始图像进行频域变换后,在频域内根据斑点噪声和信号的不同频谱特性进行滤波,近些年发展起来的小波变换因其频域多尺度特性而被广泛用于图像去噪.其中小波域隐马尔可夫树模型(hidden markov tree, HMT)^[9-10]成功地描述了图像小波系数在尺度间的相关性和依赖性,能进一步提高传统方法的去噪质量.李乔亮针对隐马尔可夫树模型忽略了尺度内小波系数的相关性问题而提出了联合马尔可夫模型(joint markov model, JMM)^[11],在 HMT 的基础上,对小波系数进行马尔可夫随机场邻域聚类,更真实地拟合了小波系数的空间分布,从而更好地还原无噪图像.

考虑到 SAR 斑点噪声对基于隐含相似性配准算法的重要影响,即斑点噪声的大量存在会直接影响算法对梯度平方和配准测度的极值搜索,得到错误的配准结果,因此本文将通过具体的实验对引入马尔可夫的 HMT 去噪、JMM 去噪和传统的均值滤波、中值滤波和小波软阈值去噪^[12]进行比较分析,以确定一种最为有效的方法,能同时兼顾斑点噪声的抑制和边缘细节信息的保持,为后续光学和 SAR 图像的配准提供可靠的数据源.

3 基于量子粒子群算法的配准参数优化搜索

针对已有隐含相似性配准研究^[4-6]利用牛顿迭代法或遗传算法搜索配准参数的不足,粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)具有原理更简单,没有“交叉”和“变异”的复杂操作,信息共享机制更全局,搜索更高效^[13]等优点,在此基础上的量子粒子群算法(quantum particle swarm optimization, QPSO)^[14]进一步降低搜索陷入局部最优的可能性,在实现全局最优搜索的同时,将原来复杂的位移-速度更新模型简化为仅需对位移的更新,将原有的 3 个控制参数简化为仅需 1 个.

引入全局寻优性更强、更易实现的 QPSO 算法实现图像配准,首先需根据具体问题,确定粒子群规

模 N 和搜索空间维数 d ;并在一定的参数范围内,确立随机初始化粒子的位置;然后根据位移更新模型(见公式(1)~(4))进行优化搜索,寻找使粒子适应度函数最大的位置,获取最优解.本文将配准参数记录于粒子的位置坐标中,并将梯度平方和 SSG 值作为粒子的适应度大小,通过改进粒子初始化范围和控制参数 α 的确定过程,实现基于隐含相似性的改进 QPSO 算法,完成配准参数的优化搜索过程.

$$x'_i = P_i \pm \alpha |C_i - x_i| \ln\left(\frac{1}{u}\right), u = \text{rand} \quad (1)$$

$$P_i = \varphi A_i + (1 - \varphi)B, \varphi = \text{rand} \quad (2)$$

$$C_i = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T A_i = \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T P_{i1}, \dots, \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T P_{id}\right) \quad (3)$$

$$\alpha = (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{(S - T)}{S} + \alpha_2 \quad (4)$$

式(1)~(4)中: x'_i 为第 i 个粒子的新位置, $x'_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$, $i = 1, 2, \dots, N$ (d 为搜索空间维数,即配准参数的个数; N 为粒子的总个数); x_i 为第 i 个粒子的原位置; P_i 为第 i 个粒子的最佳适应值与整个粒子群的最佳适应值之间的一个随机位置,即为新位置 x'_i 的更新提供随机化过程; α 为收缩扩张系数,控制着 QPSO 算法的收敛性,因此又称为整个算法的控制参数, α_1 为其初始值, α_2 为其最终值; C_i 为第 i 个粒子已搜索得到的最佳适应值的中间位置; A_i 为第 i 个粒子的最佳适应值; B 为整个粒子群的最佳适应值; u, φ 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数; T 为当前搜索次数; S 为定义的最大迭代次数.

3.1 确定粒子初始化范围

在粒子的初始化过程中,需要根据先验信息(即粗配准参数),定义初始参数范围.由于初始化过程的随机性,决定了无需准确的粗配准结果,因此本文通过易于实现的人工选点方式,简单确定粗配准参数.随后的初始参数范围,一般需要定义足够大的区间,以保证涵盖最优解,但在基于隐含相似性的配准思想中,由于以 SSG 测度作为粒子的适应度,若初始范围过大会使得特征点集迁移过程出现越界、聚集等不良现象,特别是后者可能出现多个特征点映射到一个梯度很大点上的极端现象,使得当搜索到 SSG 最大时,得到的是病态解.可见定义一个有效的初始参数范围十分重要.本文考虑到旋转缩放参数对越界、聚集不良现象的直接影响,采用由整体到局部的搜索策略来确定旋转缩放参数的范围.首先定义一个较大的参数范围,然后线性分段为若干个局部范围,通过比较各局部最优解下的最终 SSG 取值大小和迁移点集与搜索图的叠加效果,选择其中最

优的局部范围,作为粒子的初始化范围,这样既保证了大参数范围的前提,又保证了是在良态下实现最优配准参数的优化搜索.而对影响甚小的平移参数则采用统一的全局搜索范围.

3.2 合理选择控制参数

在 QPSO 算法的粒子进化过程中(见公式(1)),仅含唯一未知的参数 α ,为 QPSO 的收缩扩张系数,控制着整个算法的收敛性.但是在多数实验中常取经验的初始值 $\alpha_1=1.0$,最终值 $\alpha_2=0.5$,并未讨论其余取值及收敛情况.因此,本文将在具体实验中详细讨论控制参数 α 的不同取值,通过比较不同参数下粒子适应度函数的迭代曲线,来合理选择参数取值,保证 QPSO 算法的收敛性.

4 算法流程

本文利用 Canny 算子改进特征点集的提取过程,引入联合马尔可夫模型强化 SAR 图像的去噪效果,用改进后的量子粒子群优化搜索算法实现光学和 SAR 图像的最优配准,具体的算法流程如下:

(1)图像选取.为了避免直接对复杂的 SAR 图像进行特征提取,同时提高 SSG 搜索遍历的精度,将分辨率较低、易于处理的光学图像作为特征提取图,而将分辨率较高、不易处理的 SAR 图像作为无需进行特征提取的搜索图.

(2)图像裁剪.在光学图像上裁剪共同区域作为实验图像,而在 SAR 图像上为保证引入马尔可夫去噪时所需要的小波全尺度分解,图像大小要求为 2 的整数幂,如 256,512 等.

(3)光学特征提取.在光学图像上,采用 Canny 边缘检测算子,获取包含隐含相似特征的特征点集.

(4)SAR 去噪.对 SAR 图像作对数变换,变乘性噪声为加性噪声,并通过实验比较分析后,选择一种最为有效的去噪方法来实现 SAR 图像去噪.

(5)确定配准模型.本文选取 6 参数的仿射变换作为配准模型,见公式(5),其中 $p_1, p_2, p_3, p_4,$

p_5, p_6 为仿射变换参数,即配准参数.

$$\begin{cases} x'_i = p_1 x_i + p_2 y_i + p_3 \\ y'_i = p_4 x_i + p_5 y_i + p_6 \end{cases} \quad (5)$$

(6)定义 QPSO 算法.确定 QPSO 的初始配准参数范围与合理的控制参数取值,定义搜索粒子数和最大迭代次数.

(7)配准参数优化搜索.在 QPSO 算法下,首先随机初始化解空间中的配准参数并记录于粒子坐标中,将光学图像上的特征点集迁移到 SAR 图像上,并基于 SAR 的梯度图计算迁移点集在 SAR 图像上的梯度平方和值作为每个粒子的适应度大小,然后利用公式(1)~(4)不断更新粒子位置,调整适应度大小,直至所有粒子收敛,此时达到配准测度 SSG 最大值位置,认为是两幅图像对应结构特征最相似的位置,此时对应的粒子坐标即为最优配准参数.

(8)精度评价.从定性分析角度,对光学特征点集在最优配准参数下迁移到 SAR 的叠加图和配准后的光学重采样图进行目视评价.从定量分析角度,通过人工选择一定数量的检查点(一般选 10~15 个),进行配准点位误差和均方根误差(root mean squared error, RMSE)的计算,以此衡量配准精度.具体的 RMSE 计算见公式(6),其中 n 为检查点个数, (x_i, y_i) 为光学图像坐标, (\hat{x}_i, \hat{y}_i) 为 SAR 图像坐标.

$$d_{\text{RMSE}} = \left(\sum_{i=1}^n [(p_1 x_i + p_2 y_i + p_3 - \hat{x}_i)^2 + (p_4 x_i + p_5 y_i + p_6 - \hat{y}_i)^2] / n \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

5 实验与分析

基于上述算法流程,本文以 256×256 像素的光学图像(图 2a),和 512×512 像素的 SAR 图像(图 2b)为例,进行配准实验.

首先在光学图像上基于 Canny 算子提取特征点集,如图 2c 所示.

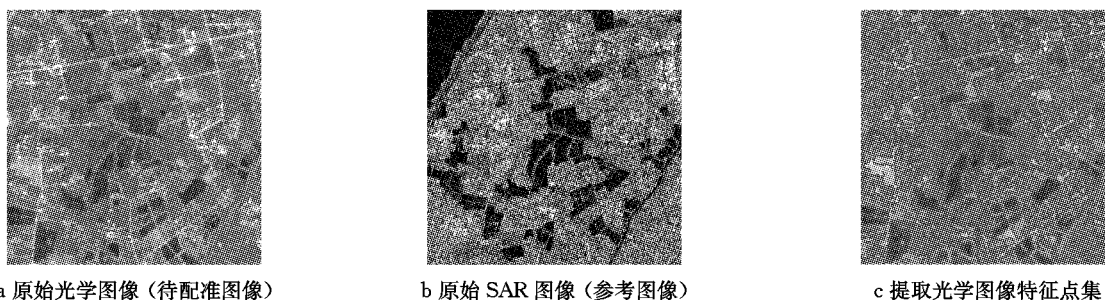


图 2 待配准图像及其特征点集与参考图像

Fig. 2 Image to be registered and its feature points as well as the reference image

然后比较 5 种不同方法下的去噪效果(定性定量评价如图 3 和表 1 所示),在尽可能保留边缘细节信息的前提下,选择平滑效果最佳的联合马尔可夫模型进行 SAR 图像的去噪,并将图 3f 的 JMM 去噪结果图用于后续配准实验。

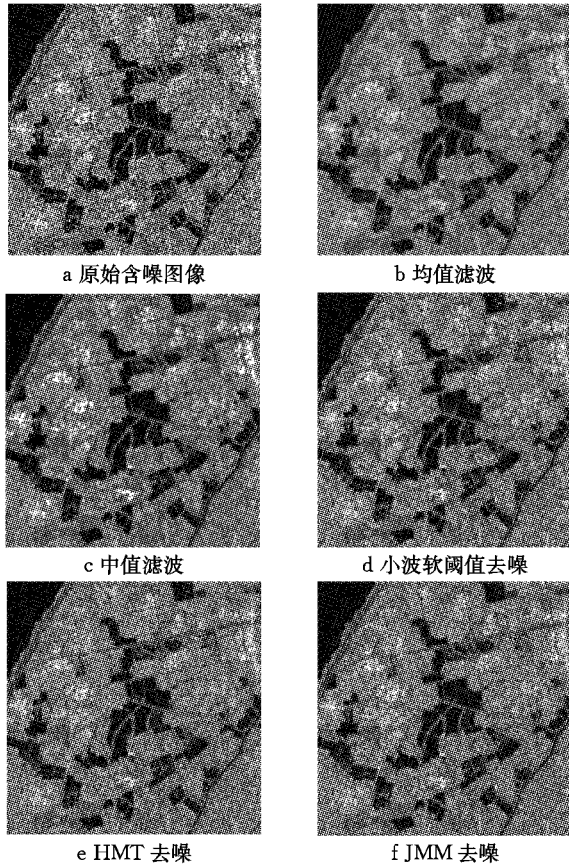


图 3 不同方法的去噪结果
Fig.3 The comparison of denoising images by different methods

表 1 不同方法的去噪评价指标比较

Tab.1 The comparison of denoising evaluation indexes by different methods

方法	均值	标准差	等效视数 ^[8]	水平边缘保持指数 ^[8]	竖直边缘保持指数 ^[8]
原始 SAR	94.647 8	73.730 9	1.647 9	1.000 0	1.000 0
均值滤波	94.648 0	43.858 0	4.657 2	0.147 8	0.142 8
中值滤波	88.551 0	48.017 0	3.401 0	0.180 8	0.174 5
小波软阈值	92.623 0	62.016 0	2.230 6	0.776 6	0.779 5
HMT 去噪	91.208 1	52.381 1	3.031 9	0.509 7	0.459 4
JMM 去噪	91.040 0	51.143 0	3.168 8	0.448 2	0.433 0

接着确定 QPSO 算法的粒子初始化范围和控制参数取值:①在表 2 的基础上,根据整体到局部的搜索策略,将旋转缩放参数范围线性分为 5 段,通过比较最终 SSG 取值大小(表 3 所示)、迁移点集与搜索图的叠加效果(图 4 所示)及其量化指标 RMSE(表 4 所示),来确定最优的局部范围,即旋转缩放参数为 $[-0.1, 0.1]$,平移参数为 $[-50, 50]$ 。②对于控制参数 α ,分别改变 α_1 和 α_2 的取值(如图 5a~5d 和图 5e~5g 所示),比较所有粒子 SSG 值的收敛性,确定最优的参数为 $\alpha_1=0.5$ 和 $\alpha_2=0$ 。

表 2 确定粒子初始化范围的基本参数

Tab.2 Basic parameters to determine initial ranges of particles

粒子数	40
最大迭代次数	200
粗配准参数	(1.684 7, -0.063 6, 79.599 0, -0.030 4, 1.603 4, 55.144 8)
旋转缩放参数整体范围	以粗配准参数为中心,范围为 $[-0.5, 0.5]$
平移参数整体范围	以粗配准参数为中心,范围为 $[-50, 50]$

表 3 旋转缩放参数在不同局部范围下的 SSG 取值

Tab.3 Final SSG values with different local ranges of rotation-scale parameters

范围	$[-0.5, -0.3]$	$[-0.3, -0.1]$	$[-0.1, 0.1]$	$[0.1, 0.3]$	$[0.3, 0.5]$
SSG 值	$1.017 1 \times 10^7$	$1.014 6 \times 10^7$	$1.022 1 \times 10^7$	$9.729 8 \times 10^6$	$8.570 3 \times 10^6$

表 4 旋转缩放参数在不同局部范围下的配准均方根误差

Tab.4 RMSE values with different local ranges of rotation-scale parameters

范围	$[-0.5, -0.3]$	$[-0.3, -0.1]$	$[-0.1, 0.1]$	$[0.1, 0.3]$	$[0.3, 0.5]$
RMSE	95.585 5	18.346 7	6.024 6	25.005 8	51.713 5

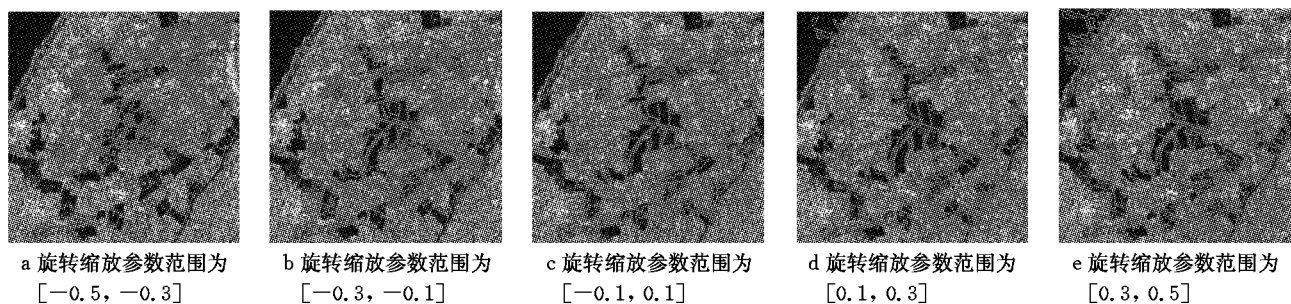


图 4 旋转缩放参数在不同局部范围下迁移点集与搜索图的叠加效果

Fig.4 Overlay images with different local ranges of rotation-scale parameters

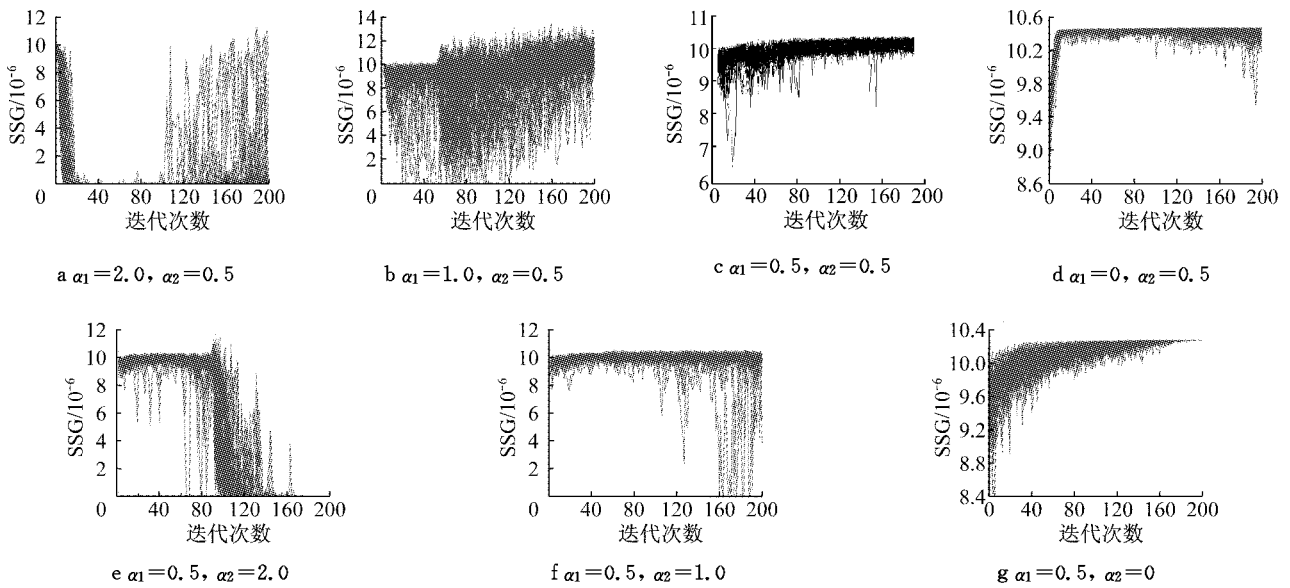


图 5 不同参数下所有粒子的 SSG 迭代曲线

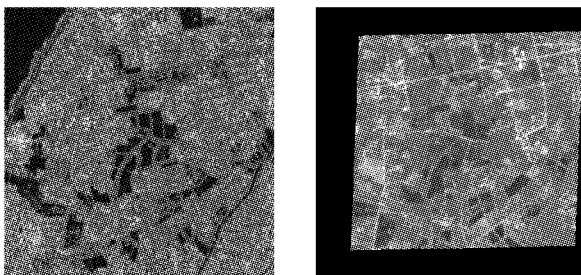
Fig.5 SSG iterative curves of all particles with different parameters

随后在 QPSO 算法下随机进行 10 次优化搜索, 得到最优解, 见表 5。由此得到配准结果如图 6 所示, 其中图 6a 为光学特征点集在最优配准参数下迁移到 SAR 图像上的叠加图, 图 6b 为最优配准参数下, 经过双线性插值重采样后的光学图像。

表 5 确定最优配准的基本参数

Tab.5 Basic parameters for optimal registration

粒子数	500
最大迭代次数	500
最大 SSG 值	1.0541×10^7
最优配准参数	(1.664 4, -0.058 6, 81.827 3, -0.032 4, 1.601 6, 54.130 9)



a 光学特征点集与 SAR 图像叠加 b 重采样后的光学图像

图 6 配准结果

Fig.6 Results of registration images

最后进行配准精度评价, 在光学和 SAR 图像存在共同特征的区域, 选择 15 对均匀分布的明显角点作为检查点, 计算配准点位误差(表 6), 得到总的配准均方根误差为 1.158 1。

表 6 配准点位误差

Tab.6 Position errors of registration

点号	像素			
	光学图像坐标	SAR 图像坐标	X 方向配准误差	Y 方向配准误差
1	(50, 222)	(152, 408)	0.038 1	0.066 1
2	(169, 247)	(348, 445)	0.636 7	0.749 5
3	(150, 218)	(317, 400)	1.712 5	1.580 3
4	(28, 216)	(115, 400)	0.772 9	0.830 7
5	(113, 248)	(255, 448)	0.371 7	0.333 5
6	(248, 141)	(485, 272)	1.335 9	0.078 7
7	(103, 144)	(245, 281)	0.177 9	0.424 1
8	(83, 178)	(209, 338)	0.541 7	1.473 5
9	(129, 130)	(289, 259)	0.083 1	0.840 7
10	(106, 91)	(253, 197)	0.078 9	0.557 9
11	(84, 50)	(219, 132)	0.293 1	0.510 7
12	(96, 82)	(237, 182)	0.195 5	0.351 7
13	(133, 90)	(297, 195)	0.918 5	1.034 3
14	(241, 170)	(471, 319)	1.985 7	0.405 5
15	(108, 40)	(259, 115)	0.238 5	0.304 3

实验结果分析:

(1) 基于 Canny 算子的光学特征点集, 能有效覆盖与 SAR 图像相似的结构特征, 也能保持图像结构特征的完整性, 并在一定程度上有效抑制孤点噪声的影响, 因此更具代表性。

(2) 联合马尔可夫模型用于 SAR 图像去噪, 能有效抑制 SAR 的斑点噪声, 又能最大程度地保留图像的边缘细节信息, 明显优于传统的去噪方法。

(3) 量子粒子群 QPSO 算法简单, 控制参数少, 易于实现, 经过本文改进粒子初始化范围和控制参

数的确定过程后,适用于光学和 SAR 图像的隐含相似性配准. 实际上算法的搜索效率与定义的粒子数、最大迭代次数紧密相关,粒子数越少,迭代次数越少,则搜索效率越高,但是可能会以牺牲全局最优解作为代价. 本文针对光学和 SAR 图像配准这种相对复杂的问题,在进行 QPSO 配准参数优化搜索时,采用较多的粒子数和较大的迭代次数来保证收敛到全局最优解,因此在搜索效率上并不高效.

(4)通过具体实验验证本文改进后的隐含相似性光学和 SAR 图像配准算法,从配准后光学特征点集与 SAR 的叠加图、光学重采样图可以看出配准的效果较为理想;而考虑到人工选择的检查点本身可能存在 1~2 个像素的选点误差,因此上述配准点位误差和均方根误差可以说明,本文的算法能达到 1 个像素甚至亚像素的配准精度,是一种有效可行的异质图像配准方法.

6 结论

本文在隐含相似性的配准思想下,从 3 个方面优化改进配准算法:用 Canny 边缘检测算子代替高梯度幅值点集实现更完整的图像结构特征提取,涵盖更多的隐含相似信息;分析 SAR 斑点噪声与隐含相似性配准之间的关系,将之作为此类配准的重要影响因素,引入更有效的联合马尔可夫模型进行 SAR 图像去噪;以原理简单、控制参数少、全局搜索性强的量子粒子群算法作为配准参数的优化搜索算法,并进一步改进粒子初始化范围和控制参数的确定过程,实现高精度的光学和 SAR 图像配准. 但是,在保证优化搜索全局性的前提下,如何实现配准算法的高效率,是今后有待研究和解决的问题.

参考文献:

- [1] Brown L G. A survey of image registration techniques [J]. *ACM Computing Surveys*, 1992, 24 (4): 326.
- [2] Kim J, Fessler J A. Intensity-based image registration using robust correlation coefficients [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2004, 23(11): 1430.
- [3] Christmas W J, Kittler J. Structural matching in computer vision using probabilistic relaxation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(8): 749.
- [4] Keller Y, Averbuch A. Implicit similarity: a new approach to multi-sensor image registration [C]//*Proceedings of the 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Madison: IEEE, 2003: 1-6.
- [5] Keller Y, Averbuch A. Multisensor image registration via implicit similarity [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(5): 794.
- [6] 李孟君. 基于隐含相似性的光学和 SAR 图像配准研究[D]. 长沙:国防科技大学电子科学与工程学院,2008.
LI Mengjun. Study on registration for SAR and optical image via implicit similarity [D]. Changsha: College of Electronic Science and Engineering of National University of Defense Technology, 2008.
- [7] 贾伟洁. SAR 影像与光学影像配准研究[D]. 青岛: 山东科技大学测绘科学与工程学院, 2010.
JIA Weijie. Study on registration of SAR image and optical image [D]. Qingdao: School of Geomatic Science and Engineering of Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [8] 黄世奇, 刘代志. SAR 图像斑点噪声抑制方法与应用研究 [J]. *测绘学报*, 2006, 35(3): 245.
HUANG Shiqi, LIU Daizhi. Research on method and application of speckle noise reduction of SAR image [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(3): 245.
- [9] Crouse M S, Nowak R D, Baraniuk R G. Wavelet-based statistical signal processing using hidden markov models [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1998, 46(4): 886.
- [10] FAN Guoliang, XIA Xianggen. Wavelet-based statistical image processing using hidden Markov tree model [C]// 2000 Conference on Information Science and Systems. Princeton: Princeton University, 2000.
- [11] 李乔亮. 图像配准若干理论及应用研究[D]. 武汉:华中科技大学图像识别与人工智能研究所,2009.
LI Qiaoliang. Theories and applications on image registration [D]. Wuhan: Institute of Image Recognition and Artificial Intelligence of Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [12] 张俊, 柳健. SAR 图像斑点噪声的小波软门限滤除算法[J]. *测绘学报*, 1998, 27(2): 119.
ZHANG Jun, LIU Jian. A speckle reduction algorithm by soft thresholding based on wavelet filters for SAR images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1998, 27(2): 119.
- [13] 刘国平, 徐钦龙. 粒子群算法及其与遗传算法的比较[J]. *中南工业大学学报: 自然科学版*, 2003, 34(2): 328.
LIU Guoping, XU Qinlong. Particle swarm optimization algorithm and comparison with genetic algorithm [J]. *Journal of Central South University of Technology: Natural Science*, 2003, 34(2): 328.
- [14] 刘琼. 智能优化算法及其应用研究[D]. 无锡:江南大学信息学院,2011.
LIU Qiong. Intelligent optimization algorithms and their applications [D]. Wuxi: College of Information Technology of Jiangnan University, 2011.