

基于人工免疫算法的光学影像与 SAR 影像配准方法

冯甜甜, 艾翠芳, 王建梅, 张绍明

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 提出了一种基于人工免疫算法的光学影像和 SAR 影像配准方法, 该方法从影像上的面状地物入手, 仅从识别性较好的光学影像上提取面状地物, 先随机给定一组配准参数, 将光学影像上面状地物的坐标经仿射变换获得新的坐标, 以转换后新坐标在 SAR 影像上对应区域的均质性为评价标准, 并利用人工免疫算法对配准参数进行优化, 从而得到影像配准结果. 最后, 利用 WorldView-2 和 RadarSat-2 影像的配准实验验证该方法的有效性, 结果表明该方法配准精度可优于 2 像素.

关键词: 光学影像; SAR 影像; 影像配准; 人工免疫算法

中图分类号: TP15

文献标志码: A

A Novel Image Registration Method for Optical and SAR Satellite Images Based on Artificial Immunity Algorithm

FENG Tiantian, AI Cuifang, WANG Jianmei, ZHANG Shaoming

(College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A novel registration method for optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite images based on artificial immunity algorithm (AIA) was proposed. By taking into account of the sufficient spectral information from optical satellite image, areal features were extracted from optical image based on the image classification strategy. Then the affine transformation with initial transformation parameters was adopted to obtain the new coordinates of features according to the location of features in optical image. Finally, the transformation parameters were optimized based on AIA by using the homogeneity of corresponding areas in SAR image, which were determined by the new coordinates of areal features, as the criterion of the transformation

parameters. WorldView-2 and RadarSat-2 images were used to verify the effect of the proposed image registration method for optical and SAR satellite images. It is proved that the RMSE of image registration is less than 2 pixels.

Key words: optical image; Synthetic Aperture Radar (SAR) image; image registration; artificial immunity algorithm (AIA)

由于成像机理和成像波段的不同, 光学影像与 SAR 影像具有很大的差异性和互补性. 结合这两种影像的互补信息对于影像解译和地物信息提取具有重要的应用价值. 其中, 实现地物特征差异显著的光学影像和 SAR 影像的准确配准是进行影像融合、特征提取、目标识别、变化检测等应用的基础和关键, 也是近年来遥感影像配准领域的研究热点^[1].

基于灰度的匹配和基于特征的匹配是实现遥感影像配准的常用方法^[2]. 基于灰度的匹配是直接利用图像的像素灰度信息, 通过计算两幅影像灰度值的相关系数等相似性测度实现影像的配准, 这类方法常因部分地物在光学影像和 SAR 影像上的波谱反射特性差异干扰而影响整体配准结果^[3]. 利用灰度互信息的配准方法^[4-5]则比较两幅影像在一定范围内的灰度统计信息, 尽管这种策略能在一定程度上降低影像灰度差异的影响, 但仍难以用于地物成像特性差异大的光学影像和 SAR 影像的配准. 因此, 更多的研究采用基于特征匹配的配准方法, 即先分别从两幅影像上提取各自特征, 再利用特征相似性测度寻找影像上的同名特征, 以实现影像配准. 其中, 如何从影像上提取有利于配准的特征是关键. 有些研究尝试针对遥感影像的特点对点特征提取算子进行改进, 利用提取出的点特征进行光学影像和

收稿日期: 2014-10-26

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2012CB719903); 国家自然科学基金(41171327, 41201379, 41201380); 教育部高等学校博士学科点专项基金(20120072120057); 同济大学青年优秀人才培养行动计划(2014KJ027); 测绘地理信息公益性行业科研专项(201412017)

第一作者: 冯甜甜(1983—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为遥感图像处理、目标识别及遥感技术在极地和重大灾害中的应用.

E-mail: fengtiantian@tongji.edu.cn

SAR 影像的配准^[1]. 但由于 SAR 影像的点特征不够稳定,因而有研究利用道路河流等线状地物的边缘特征或水体停车场等面状地物的区域特征进行影像配准^[6-7]. 这种方法避免了异源影像上地物灰度差异的影响,但又引入了影像特征的提取误差. 因此,近年来出现了考虑多特征约束的匹配方法,即综合利用影像的线特征、面特征以及由线特征延伸获得的虚拟角点等,在多类特征的联合约束下进行特征的匹配,提高影像配准的准确性^[8].

尽管目前基于特征匹配的配准方法取得了较大的进展,但自动从待配准影像尤其是 SAR 影像上准确提取可用的配准特征仍具有较大的难度. 因此,文献^[9]将隐含相似性^[10-11]这一理论应用到了光学影像和 SAR 影像的配准中. 将光学影像上的边缘结构特征通过配准参数迁移到 SAR 影像上,利用 SAR 影像上对应的梯度平方和作为配准测度,并采用量子粒子群智能搜索算法对配准参数进行迭代计算. 该方法的优点在于避免了 SAR 影像特征提取困难的问题. 不足在于利用迁移后的梯度平方和作为配准测度要求光学影像和 SAR 影像具有较高的边缘一致性,且量子粒子群算法计算量较大,容易出现迭代不收敛的情况.

因此,本文仍沿用基于隐含相似性理论的特征迁移思想,一方面利用光学影像和 SAR 影像上一致性更高的区域特征进行迁移并定义配准测度,另一方面,选用人工免疫算法对配准参数进行优化,实现对光学影像和 SAR 影像的配准.

1 人工免疫算法概述

免疫系统是指生物体能够辨识出外来细菌,并将其消灭或排除,从而实现机体自身保护的整体防御性结构. 即通过产生抗体对抗原进行免疫应答,并根据抗体抗原的结合强度(即亲和度)不断地对抗体进行克隆和变异,最终达到清除抗原的目的^[12]. 人工免疫算法就是受到生物免疫系统的启发,通过模拟生物免疫系统的智能行为而抽象形成的进化寻优方法,常被用于最优化问题的求解. 这样,上述抗原、抗体、抗体抗原的亲和度分别对应于最优化问题中的目标函数、解、以及解对目标函数的作用效果^[13]. 在求解过程中,包括以下几个关键步骤:

(1)自然免疫:对应生物学中初次感染时总由机体通过自然免疫产生初始抗体的特点,优化问题求解时需以一定的数量规模随机生成初始抗体,以保

证初始抗体的多样性.

(2)记忆学习:对抗体进行克隆和变异是使得抗体能够不断被优化的关键. 克隆是将当前抗体按照一定的规模进行复制,变异则是使复制后的抗体产生变化. 为了保证抗体的可继承性,根据抗体抗原亲和度的高低决定抗体的变异数量,并由抗体抗原的亲和度决定抗体的变异程度. 因此,当亲和度高时抗体变异程度低,而亲和度低时抗体变异程度高,这样能够使得抗体实现快速收敛. 此外,在抗体进行变异的同时引入一个随机量,使得变异后的抗体仍具有多样性.

(3)浓度抑制:抗体浓度是指相近抗体在抗体群中所占比例,为了防止由于相似抗体的数量优势导致求解陷入局部最优而过早收敛,必须对抗体浓度进行稀释和选择,即选取少数具有代表性的配准参数代替克隆和变异后的大量配准参数,以降低具有高度相似性的抗体数量,并且再重新随机生成少量新的抗体加入,以保持抗体群的活力.

由此可见,当前抗体群中的大部分抗体是由上一代抗体变异的结果,小部分抗体是随机生成,因而当前抗体群既具有记忆能力又富有多样性,而由抗体抗原的亲和度确定抗体的变异程度能够对变异加以约束,从而更快更稳定地达到全局最优的收敛结果,这两大优点符合异源遥感影像配准问题中寻找最优配准参数的需求.

2 人工免疫算法在遥感影像配准中的应用

遥感影像配准实质上是确定两幅影像在空间上的映射关系,而空间上的映射关系可通过含有未知参数的坐标变换模型拟合得到. 因此,影像配准的过程是从坐标变换模型的确定到模型参数的求解过程. 本文选用仿射变换模型作为异源遥感影像配准的坐标变换模型如下^[14]:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x \cos \omega_x & k_y \sin \omega_y \\ -k_x \sin \omega_x & k_y \cos \omega_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (x_1, y_1) 为地物在光学影像上的坐标; (x_2, y_2) 为地物经转换后的新坐标; k_x, k_y 分别为光学影像坐标在 x, y 方向的缩放参数; ω_x, ω_y 分别为光学影像坐标在 x, y 方向的旋转参数; d_x, d_y 分别为光学影像坐标在 x, y 方向的平移参数.

在利用人工免疫算法对配准参数进行优化问题中,抗原对应配准问题,抗体对应配准参数,抗体抗

原的亲度对应影像配准结果优劣的评价指标。算法的具体流程如图 1 所示。

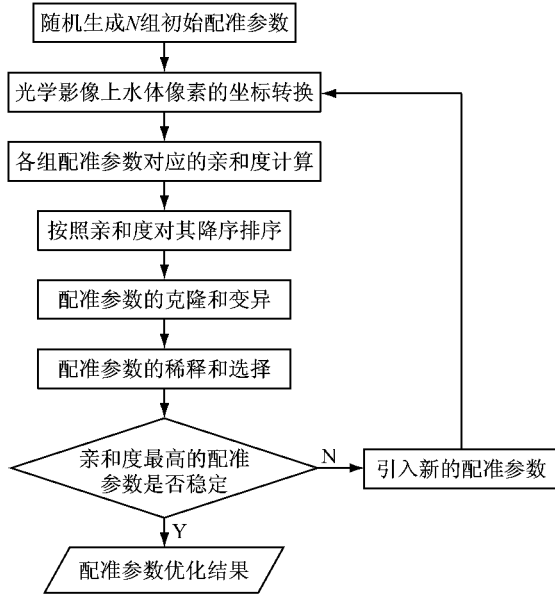


图 1 基于人工免疫算法的配准参数优化流程

Fig.1 Optimization of registration parameters based on AIA

2.1 初始配准参数的生成

为了使初始参数更接近配准参数的真值,提高迭代收敛速度,在影像配准中,可通过目视判读方式根据参考影像和待配准影像的显著地物估算其旋转、平移和缩放的粗略关系,由此给初始配准参数设置取值范围,以该取值范围为参考随机生成 N 组初始配准参数,生成方法如下:

$$T_i = T_0 + \frac{1}{2} \cdot N(0,1) \cdot (T_{\max} - T_{\min}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (2)$$

式中: $T_i = [k_{xi}, k_{yi}, \omega_{xi}, d_{xi}, d_{yi}]$, 为第 i 组配准参数, $T_{\max} = [k_{x\max}, k_{y\max}, \omega_{x\max}, \omega_{y\max}, d_{x\max}, d_{y\max}]$, $T_{\min} = [k_{x\min}, k_{y\min}, \omega_{x\min}, \omega_{y\min}, d_{x\min}, d_{y\min}]$, 分别对应 6 个配准参数取值的最大和最小值, $T_0 = T_{\min} + \frac{1}{2} \cdot (T_{\max} - T_{\min})$, 为配准参数取值范围内的中值, $N(0,1)$ 为服从 $(0,1)$ 高斯分布的随机数。

2.2 抗体抗原亲合度计算

根据同地区异源遥感影像具有隐含相似性的思想,利用 SAR 影像上低反射区的面状地物具有高度均质性的特点,将光学影像上面状特征迁移后,对应 SAR 影像各区域的面积加权强度平均值定义为亲和度,用于评价当前配准参数的优劣,从而避免了异源遥感影像灰度值不具直接可比性及特征不对应带来的配准难题。亲和度的计算方法如下:

$$f = 1 - \sum_{i=1}^m p_i \cdot \text{mean}(I_i)$$

$$p_i = \frac{s_i}{\sum_{i=1}^m s_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (3)$$

式中: f 为配准参数的亲和度; m 为影像上面状区域的个数; p_i 为其对应的面积权重; s_i 为第 i 个面状区域的面积; $\text{mean}(I_i)$ 为光学影像上第 i 个面状区域经坐标转换后对应 SAR 影像区域的强度均值。

2.3 配准参数的克隆和变异

为了保证配准参数的可继承性,先按亲和度的高低对原有配准参数排序,并选取前 n 组配准参数组成活力抗体进行克隆。每组配准参数的克隆规模 N_i 则由其亲和度确定, N_i 的计算方法如下:

$$N_i = \text{int}(\frac{\beta \cdot N}{j}) \quad (4)$$

式中: N_i 为第 i 组配准参数的克隆规模; j 为当前抗体按亲和度降序排列的序号; N 为初始配准参数数量; $\text{int}()$ 是按照四舍五入原则的取整算子; β 为常数,用于调节整个克隆规模的大小。

为了不断产生更接近真值的配准参数,对克隆后的各组配准参数分别进行变异,变异方程如下:

$$T' = T + N(0,1) \cdot \exp(-f) \cdot (T_{\max} - T_{\min}) \quad (5)$$

式中: T 和 T' 分别为变异前后的配准参数; f 为配准参数 T 对应的亲和度; $N(0,1)$ 为服从 $(0,1)$ 高斯分布的随机数。

2.4 配准参数的稀释和选择

采用 K 均值聚类的方法对配准参数进行稀释,即在配准参数的 6 维空间中用 K 均值聚类的方法进行聚类分析,将所有配准参数聚为 p 类,从每类中选择亲和度最高的 k 个配准参数组成新的抗体群。再随机生成 d 组新的配准参数,与稀释后的配准参数一起重新组成新的初始配准参数,进入下一次优化,直至亲和度达到稳定。

3 实验

选用江苏苏州地区 2010 年 8 月的 WorldView-2 卫星 2 m 分辨率的 8 波段多光谱影像和 RadarSat-2 卫星 4.745 m 分辨率的单极化 SAR 影像进行配准实验,实验影像如图 2 所示。在该区域中, SAR 影像上低反射区的面状地物对应光学影像上的水体,因此选用水体区域作为光学影像上待迁移的特征,配准过程如图 3 所示。

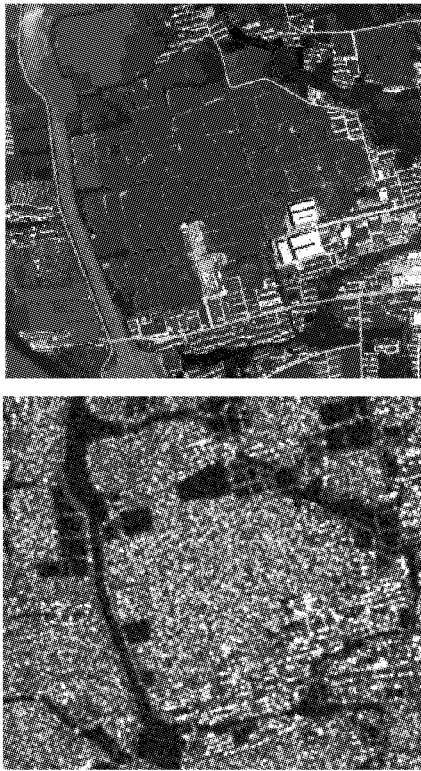


图 2 WorldView-2 影像和 RadarSat-2 影像
Fig.2 WorldView-2 image and RadarSat-2 image

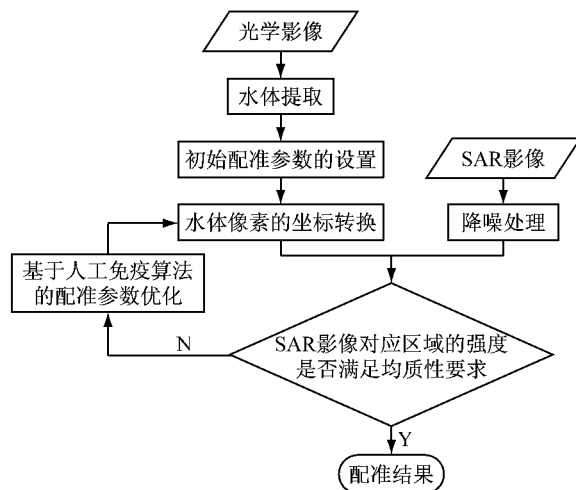


图 3 光学影像和 SAR 影像配准流程图
Fig.3 The flowchart of registration method for optical image and SAR image

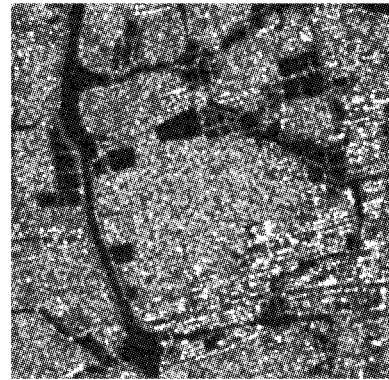
首先根据光学影像的光谱信息,结合归一化水体指数(NDWI)将光学影像分为水体和非水体两类,并利用腐蚀和膨胀的形态学处理方法对分类结果进行分类后处理.光学影像水体提取的结果与第五波段影像的叠加及 SAR 影像经 LEE 滤波降噪后的结果如图 4 所示.

配准实验分两组进行.第一组先将 2 m 分辨率的 WorldView-2 影像下采样到 4.745 m,用于测试

同分辨率下光学影像和 SAR 影像的配准效果;第二组直接对 WorldView-2 和 RadarSat-2 原始影像进行配准,用于测试不同分辨率下光学影像和 SAR 影像的配准效果.



a 光学影像水体提取结果



b SAR 影像降噪结果

图 4 图像预处理结果

Fig.4 The results of image preprocessing

两组实验均采用相同的人工免疫优化参数设置.考虑到配准参数多样性的保证与计算速度的平衡,初始配准参数数量 N 为 100,选择进行克隆的配准参数数目 n 为 80,计算克隆规模的参数 β 为 0.5,配准参数的稀释和选择中聚类类别数 p 为 80,每类选取的配准参数数量 k 为 1,引入新的抗体数目 d 为 20.

3.1 相同分辨率的配准实验

光学影像经下采样后影像大小为 281×311 像素, SAR 影像大小为 335×377 像素.由于是相同分辨率下的配准实验,因此转换模型中的两个缩放参数均设为 1,配准参数由 6 维简化为 4 维.设置初始配准参数 $T_0 = [1, 1, 0, 0, 7.5, -3.5]$,配准参数的最大和最小取值范围分别为 $T_{\max} = [1, 1, 15^\circ, 15^\circ, 17.5, 6.5]$, $T_{\min} = [1, 1, -15^\circ, -15^\circ, -2.5, -13.5]$.配准参数经 20 次迭代优化后收敛,计算出的配准结果为 $\omega_x = -0.253^\circ$, $\omega_y = -0.025^\circ$, $d_x = 7.9$, $d_y = -3.9$.

为了对配准结果进行精度评价,分别在光学影像和 SAR 影像上人工选取 20 对同名点作为检核点,其

分布情况如图 5 所示. 各检核点的配准误差如表 1 所示,整幅影像配准的均方根误差为 1.79 像素.

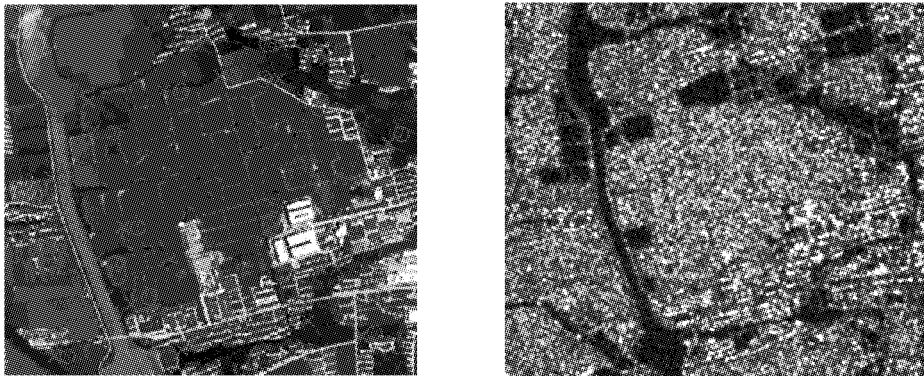


图 5 同分辨率配准实验中用于精度评价的同名点对

Fig.5 Corresponding points for accuracy assessment of registration results using optical image and SAR image with same resolution

表 1 相同分辨率的配准点位误差(单位:像素)
Tab.1 The registration errors for images with the same resolution (unit: pixel)

点号	光学影像坐标	配准后坐标	SAR 影像坐标	X 方向配准误差	Y 方向配准误差
1	(90, 167)	(130.91, 198.19)	(130, 200)	-0.91	1.81
2	(153, 26)	(193.85, 56.91)	(194, 59)	0.15	2.09
3	(164, 56)	(204.86, 86.86)	(203, 89)	-1.86	2.14
4	(63, 74)	(103.87, 105.31)	(105, 106)	1.13	0.69
5	(244, 41)	(284.86, 71.51)	(285, 72)	0.14	0.49
6	(269, 253)	(309.95, 283.40)	(310, 283)	0.05	-0.40
7	(291, 106)	(331.88, 136.31)	(331, 136)	-0.88	-0.31
8	(37, 269)	(77.96, 300.42)	(78, 301)	0.04	0.58
9	(68,95)	(108.88,126.29)	(110,125)	1.12	-1.29
10	(27,75)	(67.87,106.47)	(65,105)	-2.87	-1.47
11	(225,71)	(265.87,101.60)	(267,100)	1.13	-1.60
12	(230,239)	(270.94,269.57)	(272,268)	1.06	-1.57
13	(96,229)	(136.94,260.16)	(137,260)	0.06	-0.16
14	(34,132)	(74.90,163.44)	(76,162)	1.10	-1.44
15	(250,200)	(290.92,230.49)	(291,232)	0.08	1.51
16	(118,66)	(158.87,97.07)	(161,96)	2.13	-1.07
17	(135,264)	(175.95,294.99)	(176,295)	0.05	0.01
18	(209,32)	(249.85,62.67)	(251,63)	1.15	0.33
19	(206,56)	(246.86,86.68)	(249,87)	2.14	0.32
20	(72,193)	(112.92,224.27)	(114,222)	1.08	-2.27

3.2 不同分辨率的影像配准实验

光学影像的大小为 790×871 像素, SAR 影像大小为 391×405 像素. 设置初始配准参数 $T_0 = [0.4215, 0.4215, 0, 0, 8.3, -3.5]$, 配准参数的最大和最小取值范围分别为 $T_{\max} = [0.5215, 0.5215, 15^\circ, 15^\circ, 18.5, 6.5]$, $T_{\min} = [0.3215, 0.3215, -15^\circ, -15^\circ, -1.7, -13.5]$. 配准参数经 51 次迭代优化后收敛, 计算出的配准结果为 $k_x = 0.420$, $k_y = 0.421$, $\omega x_x = 0.066^\circ$, $\omega y = -0.282^\circ$, $d_x = 9.7$, $d_y = -3.6$.

为了对配准结果进行精度评价,同样人工选取 20 对同名点作为检核点,其分布情况如图 6. 各检核点的配准误差如表 2,整幅影像配准的均方根误差为 1.99 像素.

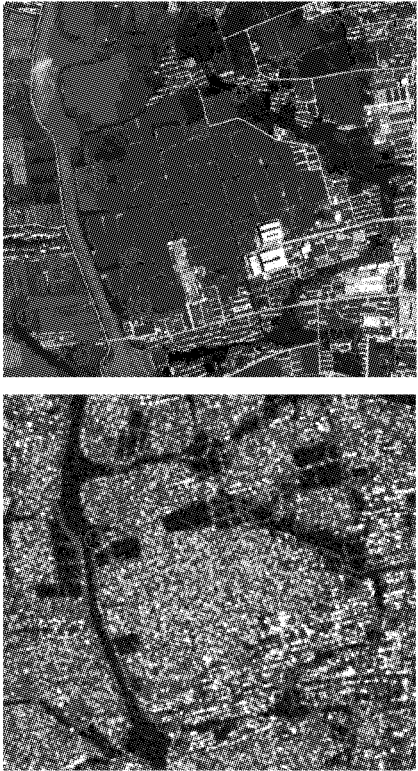


图 6 不同分辨率配准实验中用于精度评价的同名点对
Fig.6 Corresponding points for accuracy assessment of registration results using optical image and SAR image with same resolution

3.3 配准精度讨论

为了评价利用人工免疫算法对异源遥感影像进

表 2 不同分辨率的配准点位误差(单位:像素)
Tab.2 The registration errors for images with different resolutions(unit: pixel)

点号	光学影像 点坐标	转换后 点坐标	SAR 影像 点坐标	X 方向 配准 误差	Y 方向 配准 误差
1	(194,95)	(110.15, 72.68)	(109, 74)	-1.15	1.32
2	(616,208)	(287.62, 120.46)	(288, 121)	0.38	0.54
3	(196,338)	(111.49, 174.99)	(112, 174)	0.51	-0.99
4	(709,36)	(326.33, 48.10)	(327, 49)	0.67	0.90
5	(120,750)	(80.43, 348.40)	(80, 350)	-0.43	1.60
6	(257,558)	(137.57, 267.64)	(134, 267)	-3.57	-0.64
7	(660,712)	(307.15, 333.66)	(306, 332)	-1.15	-0.66
8	(805,490)	(367.59, 239.27)	(366, 240)	-1.59	0.73
9	(116,382)	(77.98,193.47)	(78,193)	0.02	-0.47
10	(383,263)	(189.88,143.50)	(188,143)	-1.88	-0.50
11	(533,187)	(252.72,111.58)	(254,113)	1.28	1.42
12	(401,5)	(196.90,34.90)	(196,36)	-0.90	1.10
13	(352,736)	(177.84,342.62)	(178,344)	0.16	1.38
14	(101,288)	(71.49,153.89)	(69,155)	-2.49	1.11
15	(724,363)	(333.30,185.77)	(334,186)	0.70	0.23
16	(398,176)	(196.00,106.88)	(197,109)	1.00	2.12
17	(622,115)	(289.95,81.31)	(292,82)	2.05	0.69
18	(12,681)	(34.92,319.30)	(31,320)	-3.92	0.70
19	(263,655)	(140.29,308.48)	(139,310)	-1.29	1.52
20	(615,597)	(288.01,284.23)	(288,286)	-0.01	1.77

行配准的精度,本文采用相同的实验数据和坐标转换模型,计算了利用量子粒子群算法对配准参数进行优化的结果.实验结果发现,对于相同分辨率和不同分辨率的光学影像与 SAR 影像配准,量子粒子群算法分别经过 52 次和 63 次迭代达到收敛.分别采用相同的检核点对配准结果进行精度评价,发现利用量子粒子群算法进行相同分辨率和不同分辨率异源影像配准的均方根误差分别为 2.26 像素和 2.58 像素.由此可见,基于人工免疫算法的配准参数优化收敛速度更快,配准精度更高.

4 结语

本文研究了光学影像和 SAR 影像的配准问题,利用 SAR 影像上低反射区的面状地物具有高度均质性特点建立两种影像的联系,并将人工免疫算法应用到影像配准中对配准参数的优化.通过相同分辨率影像配准和不同分辨率影像配准两组实验,以及量子粒子群算法的对比,发现该方法均能较快达到收敛并得到较高精度的配准结果,从而验证了这一配准方法在光学遥感影像和 SAR 影像配准中的有效性.

参考文献:

[1] FAN Bin, HUO Chunlei, PAN Chunhong, *et al.* Registration

of optical and SAR satellite images by exploring the spatial relationship of the improved SIFT[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(4): 657.

- [2] Siddique M A, Sarfraz M S, Bornemann D, *et al.* Automatic registration of SAR and optical images based on mutual information assisted Monte Carlo[C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Munich: IEEE, 2012: 1813-1816.
- [3] Merkle N, Muller R, Schwind P, *et al.* A new approach for optical and sar satellite image registration[C]// *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Munich: ISPRS, 2015: 119-126.
- [4] Suri S, Reinartz P. Mutual-information-based registration of TerraSAR-X and IKONOS imagery in urban areas[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 939.
- [5] Inglada J. Similarity measures for multisensor remote sensing images[C]// *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toronto: IEEE, 2002: 104-106.
- [6] 叶发茂. 基于人工免疫系统的多源遥感图像配准研究[D]. 北京:中国科学院研究生院遥感应用研究所, 2006.
YE Famao. A study of image registration of multi-source image based on artificial immune system[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application Chinese Academy of Science, 2006.
- [7] Goshtasby A, Stockman G C, Page C V. A region-based approach to digital image registration with subpixel accuracy [J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 1986, 24(3): 390.
- [8] WANG Zhenhua, ZHANG Junping, ZHANG Ye, *et al.* Automatic registration of sar and optical image based on multi-features and multi-constraints[C]// *International Geoscience And Remote Sensing Symposium*. Honolulu: IEEE, 2010: 1019-1022.
- [9] 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.
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.
- [10] 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.
- [11] Keller Y, Averbuch A. Multisensor image registration via implicit similarity[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(5): 794.
- [12] 孙宁. 人工免疫优化算法及其应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
SUN Ning. Artificial immune optimization algorithm and applications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [13] 焦李成, 杜海峰. 人工免疫系统进展与展望[J]. *电子学报*, 2003, 31(10): 1540.
JIAO Licheng, DU Haifeng. Development and prospect of the artificial immune system[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(10): 1540.
- [14] Li B, Shen Y, Zhang X, *et al.* Seamless multivariate affine error-in-variables transformation and its application to map rectification [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(8): 1572.