

面向高分一号遥感影像的自动几何配准算法对比*

王媛¹ 叶思菁¹ 岳彦利² 刘帝佑¹ 熊全² 朱德海¹

(1. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100083)

摘要: 遥感影像的几何配准是影像后续处理的重要前提和遥感农情监测等应用的重要保障。不同的自动几何配准算法在配准效果上存在差异, 单一配准算法难以满足所有类型数据的配准要求。根据不同地形特征和不同时相特征, 选择了平原和山地、夏季和冬季4个实验区, 以现有的基于区域的互相关法、互信息法和基于特征的SIFT算法为基础, 分别对上述4个实验区的高分一号影像数据进行自动配准实验, 对比3种算法的配准精度、配准效率和稳定性。实验结果表明: 应用SIFT算法进行配准, 4组实验结果均目视接边效果良好且均方根误差达到 10^{-5} 数量级, 满足精度要求。该方法简单、高效, 可以应用于农情遥感监测等日常业务。

关键词: 遥感影像 自动几何配准 精度评价 高分一号

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0260-07

Contrast of Automatic Geometric Registration Algorithms for GF-1 Remote Sensing Image

Wang Yuan¹ Ye Sijing¹ Yue Yanli² Liu Diyou¹ Xiong Quan² Zhu Dehai¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Land Quality (Beijing),

Ministry of Land and Resources, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The geometrical registration of remote sensing image is an important premise for the subsequent processing of image. And it's also an important security for the application, such as agricultural condition monitoring. Different algorithms of automatic geometry registration lead to various registration effects. It's hard to meet the registration requirements of all images. Four testing types of plains, mountains, summer and winter were selected based the features of terrain and time. The main three registration methods were: cross correlation algorithm based on region gray, mutual information algorithm based on region gray and SIFT algorithm based on features. SIFT feature is the partial feature of the image, which can keep the invariance in rotating, scale-zooming and brightness changing. Then the automatic geometric registration was made for four classes of GF-1 remote sensing image using the above three algorithms. Two kinds of experiments were conducted for GF-1 remote sensing image under various conditions such as different terrains and different imaging time. The comparison of different geometric registration algorithms were made in the aspects of accuracy, efficiency and stability. The results show that the SIFT algorithm is the most appropriate one. The visual edge effect is good and the root mean square error reaches the magnitude of 10^{-5} , which can satisfy the demand of precision. This method is simple and efficient, and it can be applied into agricultural condition monitoring and other business efficiently.

Key words: Remote sensing image Automatic geometric registration Precision evaluation GF-1

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-09

* 国土资源部公益性行业科研专项资助项目(201511010-06)

作者简介: 王媛, 硕士生, 主要从事遥感影像处理研究, E-mail: 651544311@qq.com

通讯作者: 朱德海, 教授, 博士生导师, 主要从事空间信息技术研究, E-mail: 610628289@qq.com

引言

遥感技术如今已经广泛地应用到作物面积监测、长势监测、估产、灾害监测、农业环境监测与评价、土壤监测等多个农业领域^[1]。高分辨率卫星遥感影像成为农业遥感应用的主要数据源。近年来,随着人类对地卫星观测系统的发展,遥感数据逐步呈现多源、多尺度、多时相、全球覆盖和高分辨率特征,数据量爆炸性增长,呈 GB 级、TB 级、PB 级的发展趋势^[2]。面对海量遥感影像数据,如何快速有效地实现高精度影像几何配准,不但是影像后续处理(影像剖分、镶嵌、融合、重采样以及正射校正等)的必要前提,也是遥感农情监测等数据分析与应用的重要保障,已经成为目前遥感产业化应用面临的急需解决的问题^[3-4]。

传统的影像配准方法是手工地理配准,一般是根据大地坐标的明显标志点,通过地图比对、人工选取的方式确定地面控制点(GCP)^[5]。但是人工确定同名点很困难,尤其是在影像地物特征不明显的情况下更是如此,配准的精度受主观影响较大。另外,传统的手工选取控制点速度慢、效率低且劳动强度大,不能适应遥感影像数据量大、时序性强的特点。若要实现遥感影像的实时、批量化处理,就要寻求一种自动化的解决方法。因此,遥感图像自动配准技术应运而生,逐渐成为了一种成熟、适用性强、应用面广的影像预处理技术。

近年来,国内外学者在影像自动配准方面做了大量研究,Li 等^[6]将区域边界和其他强边缘作为特征,用链码相关和形状相似性规则来匹配闭区域。这一方法被应用于不同传感器影像的配准,如 Landsat-TM, SPOT 和 Seasat SAR,但用该方法提取明显轮廓需要大量计算;随着小波技术的发展,韩舸等结合实际将小波技术应用到影像匹配,但实验对象仅为单一传感器影像^[7]。Lowe 等提出了一种具有代表性的基于特征的自动配准方法 SIFT^[8]。在国内,影像配准技术起步相对较晚,后来获得了较快的发展,张祖勋等对多源影像进行基于灰度的多级概率松弛整体匹配,在此基础上实现了 SPOT 全色和 TM 多波段影像的配准,但必须借助于庞大而昂贵的 virtuozo 平台^[9]。李晓明等采用 SIFT 算法对同一光学传感器的遥感影像进行了配准,指出该方法在图像具有较复杂变形的情况下,仍然可以准确匹配到大量的稳定特征,但该实验只采用较小的影像局部区域,因此应用于大容量遥感影像的可行性和效率仍需进一步研究^[10]。在此基础上,王瑞瑞等提出了一种基于虚拟匹配窗口的 SIFT 算法,用于解

决应用在不同传感器获取的、具有较大角度和尺度偏差的遥感影像配准问题^[11]。

综上所述,影像几何配准技术经过多年的研究,已经取得了很多研究成果。然而由于影像数据多源异构特性,以及不同应用、不同特征的数据对几何配准的要求各不相同,此外,由于影响几何配准的因素众多,以及配准问题的复杂性,很难通过某一种方法实现普适的多源遥感数据高精度自动配准。“高分一号”LV1A 卫星数据具有成像清晰、层次分明、信息丰富、更新快速的特点,在我国农情遥感监测水平和技术能力的提高、农情遥感监测范围的拓展、农业遥感监测信息安全建设等方面发挥着巨大作用。本文在分析目前通用的几种自动化几何配准算法原理与特征的基础上,通过对比不同自动几何配准算法在处理不同地区、不同时相多源多尺度遥感影像几何配准过程中配准精度、计算效率、稳定性等方面差异,探索适合高分一号影像的稳健的自动或半自动影像配准策略。

1 方法

影像配准的基本步骤主要有影像配准点的自动提取、确定影像配准的数字模型、以及影像的重采样。近年来国内外许多学者对多源遥感影像的自动配准进行了深入研究,针对第 1 步控制点的自动提取提出了多种方法,主要分为 2 类:基于区域灰度的自动配准法和基于特征的自动配准法。

1.1 基于区域灰度的自动配准法

基于区域灰度的自动配准方法是从待拼接图像的灰度出发,对待配准图像中一块区域与参考图像中的相同尺寸区域使用最小二乘法或者其他数学方法计算其灰度的差异,通过差异分析来判断待拼接图像重叠区域的相似程度,由此得到待拼接图像重叠区域的范围和位置,从而实现图像配准。ENVI 的自动配准工具中提供了 2 种基于区域的自动配准算法:互相关法和交互信息法。

1.1.1 互相关法

互相关法^[12](Cross correlation)是 Rosenfeld 等^[13]在 1982 年提出的一种基于灰度统计的配准法,该方法设 A 为基准图像, B 为待配准图像,以一个点坐标为中心在 A 中先确定一个模版,然后再确定 B 中同样大小的搜索图像,计算 2 个图像间的相关值,最大值的位置即为所需窗口。其中,相关值计算式为

$$C(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [(A_{ij} - \bar{A})(B_{ij} - \bar{B})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (A_{ij} - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (B_{ij} - \bar{B})^2}} \quad (1)$$

式中 A_{ij} ——基准图像的像素值
 B_{ij} ——待配准图像的像素值
 \bar{A} ——基准图像的像素平均值
 \bar{B} ——待配准图像的像素平均值

通过式(1)可知,该方法思路简单明了,容易实现,但是计算量大,并在图像存在较大旋转或是图像光照及色彩差异较大的时候配准效果差,所以一般用于相同形态的图像间配准,如都是光学影像。

1.1.2 交互信息法

1995年,Viola等把交互信息(Mutual information)引入图像匹配领域。这种图像匹配方法是假设 C 、 D 是2个随机量,交互信息量是统计这2个随机量之间相关性的量度,或者是一个变量包含另一个变量信息量的量度,它表示2幅图像的统计依赖性,其思路是:如果2幅图像匹配,它们的互信息量将达到最大值^[14]。互信息定义为

$$M(C,D) = \sum_a \sum_b p(a,b) \lg \frac{p(a,b)}{p(a)p(b)} \quad (2)$$

式中 $p(i)$ ——事件 i 发生的概率, $i = a, b$
 $p(a,b)$ ——两个事件 x, y 分别为 a, b 时的概率

再根据熵的定义,计算互信息的最大值,求得位移量。互信息测度对于多源遥感影像之间的自动配准具有较高的鲁棒性,一般用于不同形态图像间的匹配,如光学-雷达图像、热红外-可见光图像等。

1.2 基于特征的自动配准法

基于特征的自动配准法通过提取出图像的显著特征,可大大压缩图像的信息量,使得计算量减小,速度变快,而且其对图像的灰度变化具有鲁棒性。一般步骤是:①提取配准图像之间的同名特征。②利用一组参数对同名特征进行描述。③利用参数描述符进行特征配准。常用的图像特征包括点、线、面(或者区域)等,目前来说,点特征是最为常用且效率较高的一种方法,特征点具有平移、旋转和缩放不变性,几乎不受光照条件的影响。经典的点特征提取算法主要有SIFT、Moravec^[15]、Forstner^[16]和Harris^[17]。其中,SIFT算法因其对旋转、缩放的不变性,应用广泛。ArcGIS的自动配准工具中提供了基于特征的SIFT配准算法。

尺度不变特征变换(Scale invariant feature transform, SIFT)的局部特征描述算子是David在1999年提出的,并于2004年进行总结完善^[7]。SIFT算法是一种提取局部特征的算法,在尺度空间寻找极值点,提取位置、尺度、旋转不变量等局部特征。SIFT算法提取的特征对旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变性,较好地解决了场景部分遮挡、旋转

缩放、视点变化引起的图像变形等问题^[18]。

SIFT特征匹配算法分4个步骤实现:①尺度空间极值点求取。搜索所有尺度上的图像位置,通过高斯微分函数来识别潜在的对于尺度和旋转不变的兴趣点。②特征点位置确定。在每个候选位置上,通过一个拟合精细的模型来确定位置和尺度,关键点的选择依据于它们的稳定程度。③为关键点指定方向参数。基于图像局部的梯度方向,分配给每个关键点位置一个或多个方向,所有后面的对图像数据的操作都相对于关键点的方向、尺度和位置进行变换,从而提供对于这些变换的不变性。④关键点描述子的生成^[19],在每个关键点周围的邻域内,在选定的尺度上测量图像局部的梯度,这些梯度被变换成一种表示,这种表示允许比较大的局部形状的变形和光照变化。SIFT算法使用了图像金字塔结构,减少了计算量,提高了计算效率^[20]。

2 实验及结果分析

2.1 实验数据

实验数据为“高分一号”LV1A PMS影像产品,参考影像统一选择2 m高分全色影像,单景影像分辨率为18 192像素×18 000像素,待配准图像则选择8 m高分多光谱影像,单景影像分辨率为4 548像素×4 596像素,幅宽60 km, WGS-84地理坐标系(基于RPC模型)。本文一方面根据地形地貌差异,分别选择了2个实验区:平原区和山地区;另一方面根据影像不同的成像时间,选择了另外2个实验区:夏季区和冬季区。做2次实验并分析结果。

2.2 实验环境

本文综合应用ENVI和ArcGIS作为遥感影像自动化几何配准算法载体,包括2种基于区域的自动配准算法:互相关法和交互信息法;1种基于特征的自动配准法:SIFT点特征提取算法。实验环境如表1所示。

表1 实验环境参数

Tab.1 Experimental environment parameters

项目	参数
操作系统	Windows 7
处理器	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 0@2.00 GHz 2.00 GHz(2处理器)
内存	32.0 GB
软件版本	ENVI 5.0、ArcGIS 10.2

2.3 不同地形区的影像自动配准实验

平原是指地势平坦、起伏和缓、海拔高度多在0~500 m的地貌。本研究选择陕西省关中平原作为平原实验区。图1为关中平原实验区同一景的

2 m和8 m 高分影像接边效果,从图中可以看出,实验区地势平坦,道路、河流纵横交错,特征地物点多,且特征明显。山地是指平均海拔高度 500 m 以上,地表起伏较大的地貌。图 2 为本研究选择的山地实验区。该实验区地处北京郊区,区域内遍地山林,可选择的明显控制点较少。

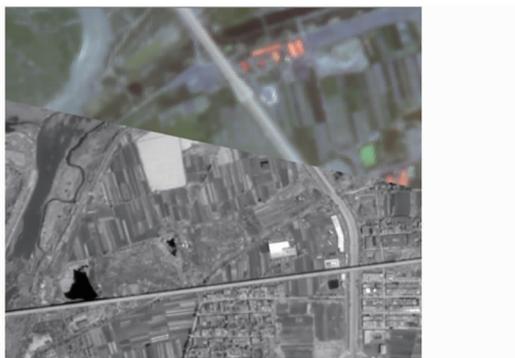


图 1 关中平原实验区

Fig. 1 Application region in Guanzhong Plain

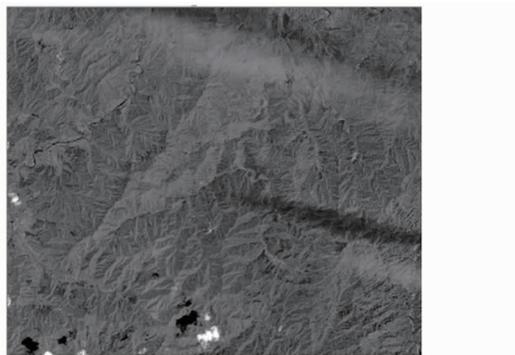


图 2 北京郊区山地实验区

Fig. 2 Application region of mountain around Beijing

2.3.1 实验过程

首先,测试 3 种方法的自动提取控制点的效果。变换方法统一使用一阶多项式模型,重采样方法采用双线性插值法。首先测试 3 种配准算法的配准效果,确定最优的一种,再测试该最优算法中不同的数学变换多项式模型的配准效果的问题,以确定最终

的配准策略。

以单景 2 m 高分全色影像为基准图像,待配准图像的匹配波段选择噪声较少的红色波段。由于各种算法中参数的设定会直接影响配准结果,经过多次实验对比,选择配准效果较好的一组参数。SIFT 算法不用输入任何参数,只用输入待配准图像、参考图像和变换方法。表 2 和表 3 分别是基于区域的互相关法和互信息法的参数。

表 2 基于区域的互相关法主要参数

Tab. 2 Parameters of cross correlation

参数	值
最小匹配系数	0.6
转换模型	一次多项式
单点最大误差	5.00
要求控制点个数	121
搜寻窗口大小/(像素×像素)	255×255
匹配窗口大小/(像素×像素)	61×61

表 3 基于区域的互信息法主要参数

Tab. 3 Parameters of mutual information

参数	值
最小匹配系数	0.6
转换模型	一次多项式
单点最大误差	5.00
要求控制点个数	121
搜寻窗口大小/(像素×像素)	255×255
匹配窗口大小/(像素×像素)	61×61

2.3.2 效果对比

以平原区数据为例,表 4 和图 3 为上述 3 种算法的自动配准效果。从图 3 可以看出,配准前平原区影像接边处道路存在偏差,经 3 种算法自动配准后,影像接边处仍有大于一个像素的偏差。SIFT 算法虽然耗时较长,但是配准精度有大幅提高。因此,选取 SIFT 算法作为 8 m 高分多光谱影像的自动配准算法。

表 4 不同地形实验中 3 种算法配准实验结果对比

Tab. 4 Contrast of three algorithms in different terrain experiments

自动配准方法	平原			山地		
	耗时/s	控制点个数	均方根误差	耗时/s	控制点个数	均方根误差
互相关法	59	55	1.26	69	63	1.05
互信息法	48	48	1.33	70	106	1.20
SIFT 算法	53	138	1.03×10^{-4}	28	135	6.50×10^{-5}

此外,配准算法精度与计算效率往往受到变换模型影响。本研究基于 SIFT 算法实现控制点的自动选择,并在此基础上对比分析不同变换模型对几

何配准结果的影响,见表 5。由于 SIFT 算法每次自动选取控制点都是随机的,因此 RMS 选择多次实验的最佳结果。

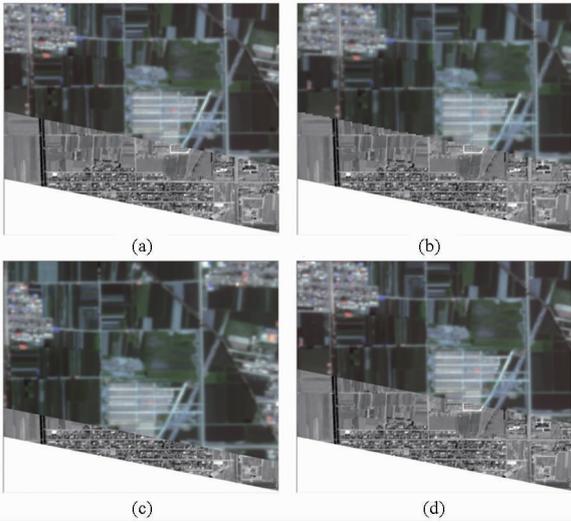


图3 3种算法配准前后平原区影像与相应底图的接边效果

Fig. 3 Edge effect of automatic registration after using three algorithms in plain

(a) 配准前 (b) 互相关算法 (c) 互信息算法 (d) SIFT算法

表5 SIFT算法中不同变换模型配准效果对比

Tab. 5 Contrast of different transformation models in SIFT algorithm

变换模型	平原			山地		
	耗时/s	控制点个数	均方根误差	耗时/s	控制点个数	均方根误差
零阶多项式	28.53	19	3.42×10^{-5}	17.20	27	3.40×10^{-5}
一阶多项式	51.27	83	4.99×10^{-5}	28.56	135	6.54×10^{-5}
二阶多项式	69.00	137	5.04×10^{-5}	23.74	262	4.65×10^{-5}
三阶多项式	102.00	419	1.10×10^{-4}	89.00	442	7.56×10^{-5}
投影变换	50.57	136	3.77×10^{-5}	32.33	210	9.55×10^{-5}

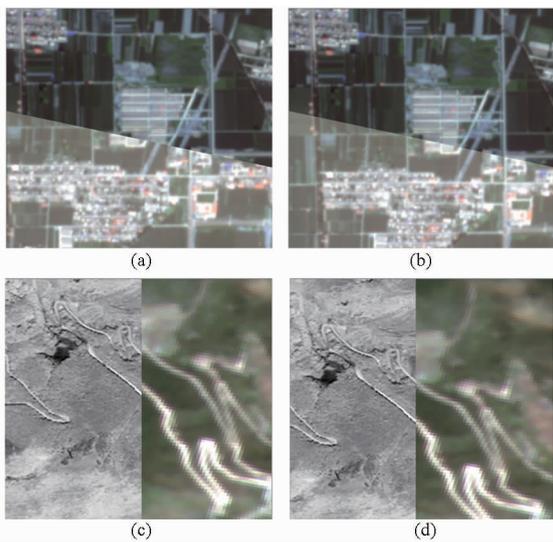


图4 平原区和山地区自动配准前后的接边效果

Fig. 4 Contrast of edge effect before and after automatic registration in plain and mountain

(a) 平原区配准前 (b) 平原区配准后
(c) 山地区配准前 (d) 山地区配准后

对比实验结果,对于平原区,一阶多项式速度快,控制点个数选取合理,配准结果误差在一个像素内,因此变换模型选用一阶多项式。而山地区,二阶多项式精度更高,因此变换模型选用二阶多项式。

综上,平原区和山地区8 m高分多光谱影像的自动配准策略为:使用SIFT算法,以2 m高分全色影像为基准图像,平原区采用一阶多项式模型进行变换,山地区采用二阶多项式进行变换,重采样方法选用双线性插值法。由图4可以看出,2组数据采用该策略配准后接边效果好。精度达到要求(误差小于1个像素),可以满足影像的后期处理(融合、镶嵌等)。

2.4 不同时相的影像自动配准实验

不同时相的遥感图像在光谱信息和空间信息上均存在差异,这对图像的解译、动态监测等影响很大,如不同季节下的植被覆盖率不一样,因此2幅不同季节下同一地物在图像上的像素值是不一样的,

自动配准实验。

图5为本研究选择的夏季和冬季实验区,分别拍摄于2013年8月和2014年2月。从图中可以看出,夏季图像的植被覆盖率要明显高于冬季图像。

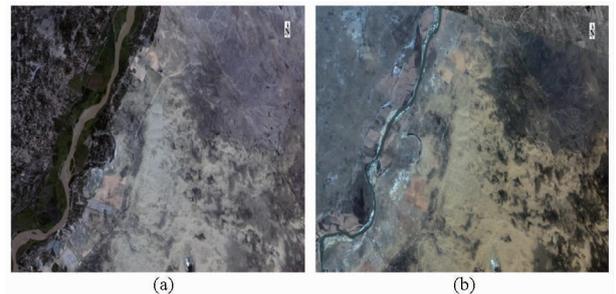


图5 夏季与冬季实验区

Fig. 5 Application region of summer and winter

(a) 夏季 (b) 冬季

由2.3节实验可知,使用SIFT算法,其配准效率和精度都要远高于基于区域灰度的配准方法,表6为不同时相影像的配准实验中,应用各配准算法时结果对比。表7为应用SIFT算法时不同几何变换模型的配准效果对比。

由表6看出,使用SIFT算法,配准精度大幅提

表现颜色也不同^[21]。本文选取了同景影像中季节特征差异最大的夏季和冬季,进行不同时相的影像

高。由表7看出,针对夏季区图像,配准效果最好的为一阶多项式模型,而对于冬季区图像,最好的变换模型为二阶多项式模型。图6和图7分别为应用不同的配准算法自动配准后的夏季区与冬季区影像与

基准影像的接边效果。对比可以看出,无论是夏季还是冬季时相,使用SIFT算法、互相关法、互信息法配准后,影像目视接边效果均良好,放大后误差小于一个像素。但SIFT算法操作简单,效率更高。

表6 不同时相实验中3种算法配准实验结果对比

Tab.6 Contrast of three algorithms in different time phases

自动配准方法	夏季			冬季		
	耗时/s	控制点个数	均方根误差	耗时/s	控制点个数	均方根误差
互相关法	69	55	0.755	48	100	0.665
互信息法	55	45	3.26	68	114	0.686
SIFT算法	51	185	3.90×10^{-5}	42	243	2.40×10^{-5}

表7 SIFT中不同变换模型配准效果对比

Tab.7 Contrast of different transformation models in SIFT algorithm

变换模型	夏季			冬季		
	耗时/s	控制点个数	均方根误差	耗时/s	控制点个数	均方根误差
零阶多项式	28.51	27	3.69×10^{-5}	17.20	27	3.40×10^{-5}
一阶多项式	31.31	185	1.92×10^{-5}	42.26	243	2.40×10^{-5}
二阶多项式	46.12	311	2.77×10^{-5}	43.80	261	1.89×10^{-5}
三阶多项式	60.00	529	3.92×10^{-5}	60.00	517	2.56×10^{-5}
投影变换	41.97	231	2.74×10^{-5}	32.33	210	2.02×10^{-5}

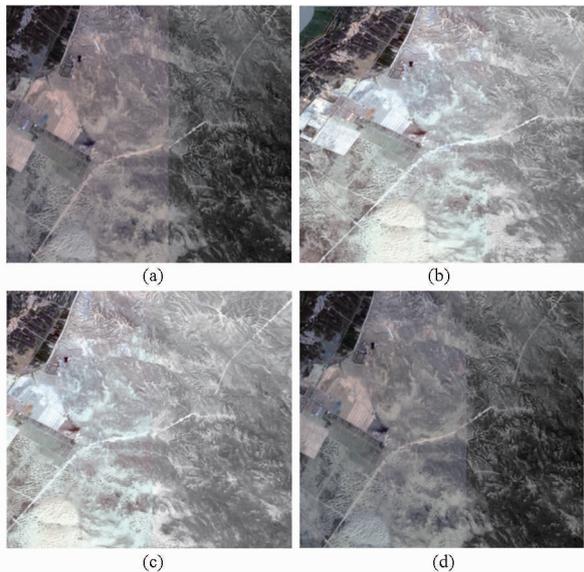


图6 夏季区各算法配准后影像与相应底图的接边效果

Fig.6 Edge effect of automatic registration after using three algorithms in summer region

(a) 配准前 (b) SIFT算法 (c) 互相关算法 (d) 互信息算法

目视可以看出,3种配准算法的自动配准效果均良好,但是SIFT算法因其高效率以及高控制点选取精度,可以作为配准时优先选择工具。

3 结束语

面向高分一号遥感影像,以不同地形(平原和山地)、不同时相(夏季和冬季)遥感影像为实验区,通过实验对比3种自动几何配准算法,得到一套适用于高分一号遥感影像的自动配准策略。结果发现,无论是针对不同地形的平原、山地区,还是针对不同时相的夏

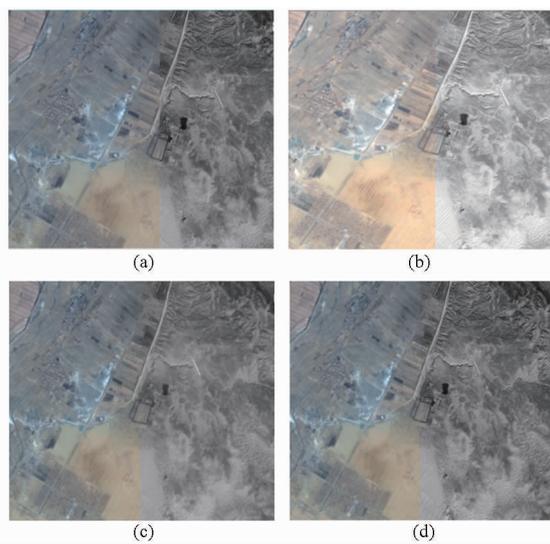


图7 冬季区各算法配准后影像与相应底图的接边效果

Fig.7 Edge effect of automatic registration after using three algorithms in winter region

(a) 配准前 (b) SIFT算法 (c) 互相关算法 (d) 互信息算法

季、冬季区,应用SIFT算法,目视接边效果良好且均方根误差数量级为 10^{-5} ,满足精度要求。

SIFT算法是随机提取控制点,因此每次实验的结果和效果不稳定,偶尔自动配准效果会有所下滑,但是相比其他配准策略,使用SIFT算法仍是自动配准8m高分多光谱影像效果最好的方法。但是本次实验缺乏大范围的2m高分全色影像作为基准影像,仅用单景2m和8m影像进行测试,以后需要对大范围的影像自动化配准作进一步研究。

参 考 文 献

- 1 史舟,梁宗正,杨媛媛,等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2015,46(2):247-260.
Shi Zhou, Liang Zongzheng, Yang Yuanyuan, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):247-260. (in Chinese)
- 2 吕雪峰,程承旗,龚健雅,等. 海量遥感数据存储管理技术综述[J]. 中国科学,2011,41(12):1561-1573.
Lü Xuefeng, Cheng Chengqi, Gong Jianya, et al. Review of data storage and management technologies for massive remote sensing data[J]. China Technology, 2011, 41(12):1561-1573. (in Chinese)
- 3 李德仁. 摄影测量与遥感学的发展展望[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2008,33(12):1211-1215.
Li Deren. Development prospect of photogrammetry and remote sensing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(12):1211-1215. (in Chinese)
- 4 陈述彭,郭华东. “数字地球”与对地观测[J]. 地理学报,2000,55(1):8-14.
Chen Shupeng, Guo Huadong. Digital earth and earth observation[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(1):8-14. (in Chinese)
- 5 谢仁伟,牛铮,王力. 基于控制点库的 SIFT 多源影像自动配准方法[J]. 测绘科学,2011,36(4):35-38.
Xie Renwei, Niu Zheng, Wang Li. Automatic image registration based on GCP database with SIFT algorithm[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(4):35-38. (in Chinese)
- 6 Li Hui, Manjunath B S. Acontour-based approach to multisensor image registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995,4(3):320-334.
- 7 韩舸,牛瑞卿. 利用 SIFT 和静态小波变换的遥感影像配准方法[J]. 测绘科学,2012,37(5):61-64.
Han Ge, Niu Ruiqing. An image registration method based on SIFT and SWT[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(5):61-64. (in Chinese)
- 8 Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key points[J]. International Journal of Computer Vision,2004, 60(2):91-110.
- 9 张祖勋,张剑清,廖明生,等. 遥感影像的高精度自动配准[J]. 武汉测绘科技大学学报,1998,23(4):320-323.
- 10 李晓明,郑链,胡占义. 基于 SIFT 特征的遥感影像自动配准[J]. 遥感学报,2006,10(6):885-892.
- 11 王瑞瑞,马建文,陈雪. 多传感器影像配准中基于虚拟匹配窗口的 SIFT 算法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(2):163-166.
Wang Ruirui, Ma Jianwen, Chen Xue. SIFT algorithm based on visual matching window for registration between multi-sensor imagery[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(2):163-166. (in Chinese)
- 12 Goshtasby A, Gage S H, Bartholic J F. A two-stage cross-correlation approach to template matching[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984,6(3):374-378.
- 13 Rosenfeld A, Kak A C. Digital picture processing Vol. I and II [M]. Orlando, FL: Academic Press, 1982:1-2.
- 14 周浩,叶沅鑫,王蕾. 一种利用点特征和互信息的多源遥感影像配准方法[J]. 遥感信息,2015,30(3):99-103.
Zhou Hao, Ye Yuanxin, Wang Lei. A multi-source remote sensing image registration method using point features and mutual information[J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(3):99-103. (in Chinese)
- 15 Moravec H P. Towards automatic visual obstacle avoidance [C] // Proceeding of International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1977.
- 16 Forstner W, Gulch E. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features [C] // Proceeding of ISPRS Intercommission Workshop on Fast Processing of Photogrammetric Data, 1987:281-305.
- 17 Harris C G, Stephens M J. A combined corner and edge detector [C] // Proceedings Fourth Alvey Vision Conference, 1988:189-192.
- 18 张谦,贾永红,胡忠文. 多源遥感影像配准中的 SIFT 特征匹配改进[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2013,38(4):455-459.
Zhang Qian, Jia Yonghong, Hu Zhongwen. An improved SIFT algorithm for multi-source remote sensing image registration[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(4):455-459. (in Chinese)
- 19 张谦,贾永红,吴晓良,等. 一种带几何约束的大幅面遥感影像自动快速配准方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2014,39(1):17-21.
Zhang Qian, Jia Yonghong, Wu Xiaoliang, et al. A rapid image registration method based on restricted geometry constraints for large-size remote sensing image[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(1):17-21. (in Chinese)
- 20 赵辽英,吕步云. 基于尺度不变特征变换和区域互信息优化的多源遥感图像配准[J]. 物理学报,2015,64(12):186-196.
Zhao Liaoying, Lü Buyun. Multi-source remote sensing image registration based on scale-invariant feature transform and optimization of regional mutual information[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(12):186-196. (in Chinese)
- 21 曹森,潘耀忠,张锦水,等. 基于土地覆盖图斑的多时相遥感影像自动配准方法[J]. 测绘学报,2014,43(3):290-297.
Cao Sen, Pan Yaoyong, Zhang Jinshui, et al. An automatic registration method for multi-temporal remote sensing images using land[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(3):290-297. (in Chinese)