

复杂背景下沿骨架的遥感影像拼接线自动生成

张汉松^{1,2}, 陈建裕², 侯淑涛¹, 霍奕任¹

(1. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 国家海洋局第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对复杂背景下遥感影像镶嵌中快速自动生成均匀分隔重叠区域且形态美观的几何拼接线, 提出了一种基于图像解析的沿重叠区域骨架的几何拼接线自动生成算法。首先顾及复杂背景值区域标记待镶嵌影像的不同类型区域; 然后每一处待处理重叠区域被认为是一个图像对象, 迭代搜索图像对象的轮廓线, 并按指定规则对轮廓线逐像素标记, 直至重叠区域中不存在这样的待处理区域; 最后基于 4 邻域搜索标记沿骨架的几何拼接线。实验结果表明, 即使顾及背景值影像重叠区域为复杂多边形时, 该算法也能快速自动生成美观的几何拼接线。算法鲁棒性优于基于图形解析的方法。

关键词: 几何拼接线; 骨架; 图像对象; 轮廓线

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S126003

Automated seamline generation along skeleton for remote sensing image mosaicking considering complex background

Zhang Hansong^{1,2}, Chen Jianyu², Hou Shutao¹, Huo Yiren¹

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. The State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, The Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: In response to geometry seamline detection with average separation of overlapped region and beautiful shape for remote sensing images mosaicking considering complex background, a fast automated geometry seamline generation approach along skeleton was proposed on image analysis. Firstly, different kinds of region for image mosaicking were marked in view of background value. Secondly, each block overlapped region to be processed was considered as one image object, the footprints of these image objects were detected and re-marked following specific rules pixel by pixel until the overlapped regions to be processed don't exist. Finally, the geometry seamline along skeleton was marked on four neighborhood search. The experimental result shows that even if the overlapped region is complex polygon considering background value, the fine seamline can be quickly automatically selected. The algorithm robustness is better than those algorithms on graphic analysis.

Key words: geometry seamline; skeleton; image object; footprint

收稿日期: 2016-02-11; 修订日期: 2016-03-18

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12521014); 东北农业大学博士启动基金(2012RCB49);

国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放基金(SOED1308)

作者简介: 张汉松(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事遥感图像智能处理、GIS 开发与应用方面的研究。Email: songzhi_zhang@163.com

0 引言

遥感影像镶嵌是将具有一定重叠区域的两幅或多幅影像拼接成一幅更大范围的正射影像。受成像时刻、位置及镜头畸变等多因素的影响,影像间会存在几何或色彩上的不一致。因此,适宜的遥感影像拼接线的自动选择是光学遥感应用预处理的基础。

参考商业化遥感和 GIS 软件 ArcGIS 或 Envi,依据拼接线的类型,目前遥感影像拼接线的生成方法大致可分为两大类^[1-12]。一类是构建一条使镶嵌影像间色调与纹理差异都最小的最优拼接线。该类方法主要有 Dijkstra 算法、A* 算法、Twin Snakes 算法、Grasp 算法、蚁群算法、灰色理论法和动态规划法等。该类方法能自动生成最优或次最优的拼接线,当影像间色彩或纹理差异大时能显著消除或减弱拼接缝痕迹。但计算复杂度高,对重叠区域大的遥感影像镶嵌如果不进行适当的人工干预(剪枝、分枝或定界等优化处理)会造成计算崩溃灾难性的后果。另一类是构建一条连接重叠区域几何特征点的拼接线(Geometry seamline,称为几何拼接线)。该类方法主要有边缘羽化法、轮廓线法、地类边界法和 Voronoi 图法等。此类方法直观易懂、操作简单、运算速度快。但影像间几何拼接线主要依靠人工划定,当影像间色彩或纹理差异略大时镶嵌效果不理想。

随着遥感数据源的丰富和遥感影像的广泛应用,几何拼接线越来越多应用于镶嵌的整体定位或镶嵌拼缝网的构建^[2-3]。因此,目前主流的商业化应用软件都提供了各自基于几何拼接线的镶嵌解决方案。例如,Envi 和 Erdas 都提供了地类边界镶嵌法;Envi 提供了边缘羽化镶嵌法;ArcGIS 支持了轮廓线镶嵌法。地类边界镶嵌法需手动加载先验或人工编辑的矢量图件;边缘羽化镶嵌法依据影像间镶嵌边缘自动镶嵌,忽略了影像的背景值而不考虑有效重叠区域的轮廓;轮廓线镶嵌法依据叠置次序下的有效轮廓边界自动镶嵌,但宜受轮廓边界噪声的影响;以参考文献[3-4]为代表的基于图形解析的算法虽然利用 Voronoi 图沿有效重叠区域能自动生成几何拼接线和拼缝网络且已有商业应用,但一般要求有效重叠区域为四边形。

针对顾及背景值的复杂有效重叠区域的遥感影

像镶嵌处理,结合著名的 Blum grassfire 模型^[13]和面向对象的遥感影像分析思想(OBIA)^[14-15],文中提出一种沿骨架的几何拼接线快速自动生成算法。该方法能快速自动生成均匀分隔重叠区域且形态美观的几何拼接线,完全不受重叠区域图形复杂度高的影响。

1 沿骨架的几何拼接线搜索原理

沿骨架的几何拼接线是沿有效重叠区域和其骨架特征点连接而成的折线(如图 1 A-B-C-D)。它将有效重叠区域均匀分隔为两个不同的数据区域,方便了后续的镶嵌处理。因此,沿骨架的几何拼接线的生成并不是完整的有效重叠区域骨架的提取,有别于经典的区域骨架提取算法。

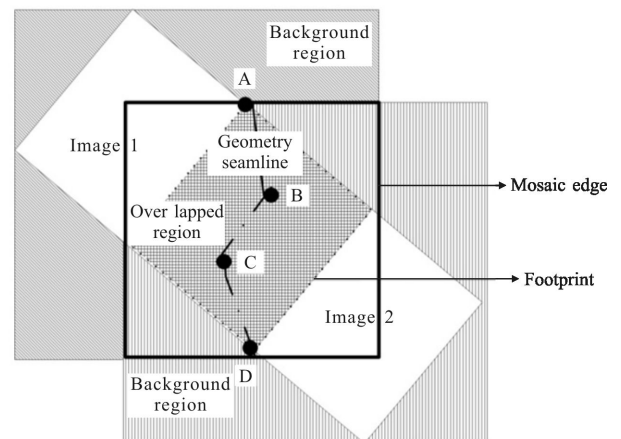


图 1 几何拼接线与关键技术语

Fig.1 Geometry seamline and key terms

1967 年 Blum 给出了著名的模拟草原着火“Grassfire”骨架定义。假设一块平面多边形区域沿着其图形轮廓线同时点火,火以相同速度向内部燃烧直至熄灭,大火熄灭点的集合即该区域的骨架。参考这一思想,沿骨架的几何拼接线生成算法可以分为三步:(1)初始化、(2)生长、(3)标签,如图 2 所示。初始化指区分不同范围的影像数据源,指定有效重叠范围为待处理区域;生长指从待处理区域轮廓线开始,按一定规则迭代的重新标记待处理区域像素;标签指有效重叠区域中不存在待处理像素时则生长终止,并标志拼接线位置。

图 2(a)标定了初始化后不同范围的影像数据源 A 和 B,空格网 C 区域为待处理像素区域(不包含代表背景值的黑色像素);图 2(b)为第一次生长后用灰

色或深灰色标记过的像素；迭代生长终止时图 2(c) 中不存在待处理像素，此时标签灰色和深灰色相邻处为沿骨架的几何拼接线，即黑色折线。依据上述过程，文中提出复杂背景下沿骨架的遥感影像几何拼接线自动生成算法流程，如图 3 所示。

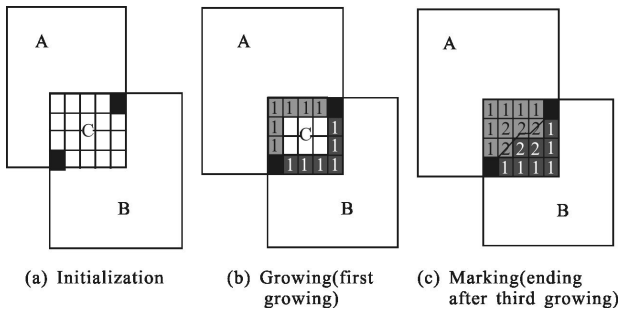


图 2 沿骨架的几何拼接线搜索原理

Fig.2 Principle of automated seamline generation along skeleton

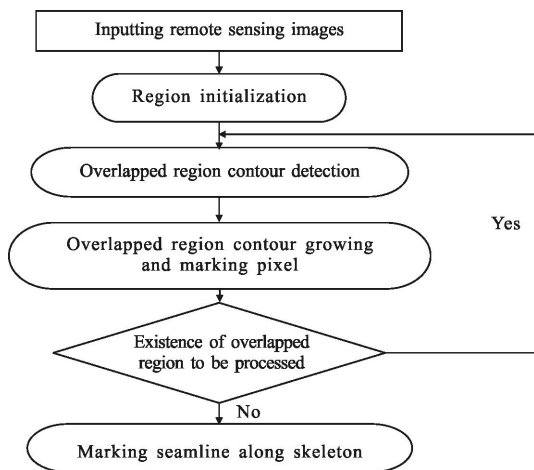


图 3 沿骨架的几何拼接线自动生成算法

Fig.3 Framework of automated seamline generation along skeleton

2 沿骨架的几何拼接线生成算法

2.1 区域初始化

区域初始化是标记待镶嵌遥感影像 I1、I2 间的不同区域。设 $P_{(x,y)}$ 表示 (X, Y) 处的任一像素， V_j 表示像素 $P_{(x,y)}$ 是否为影像 j 的有效值。 V_j 的值域为 0、1、2，分别表示 $P_{(x,y)}$ 是影像 j 的背景、 $P_{(x,y)}$ 仅仅是影像 I1 的有效值、 $P_{(x,y)}$ 仅仅是影像 I2 的有效值。因此，顾及背景值下镶嵌全范围可以初始化为四种不同的区域，如公式(1)：

$$A = \{P_{(x,y)} | V_{I1} + V_{I2} = 1\}$$

$$B = \{P_{(x,y)} | V_{I1} + V_{I2} = 2\}$$

$$C = \{P_{(x,y)} | V_{I1} + V_{I2} = 3\}$$

$$D = \{P_{(x,y)} | V_{I1} + V_{I2} = 0\} \quad (1)$$

从公式(1)可知，A 类区域是属于 I1 影像且不属于 I2 影像的有效区域或属于 I1 影像的有效区域且属于 I2 影像的背景区域；B 类区域是属于 I2 影像且不属于 I1 影像的有效区域或属于 I2 影像的有效区域且属于 I1 影像的背景区域；C 类区域是同时属于 I1 和 I2 影像的有效区域；D 类区域是影像 I1 和 I2 镶嵌后的背景区域。

A、B、C、D 四种不同类型区域在区域初始化后用 1、2、3、0 分别标识，并构建镶嵌标记图如图 4 所示。镶嵌标记图指示了镶嵌全范围中不同位置下的影像数据源，为区域生长与标记奠定了基础，同时能帮助影像集的快速镶嵌。

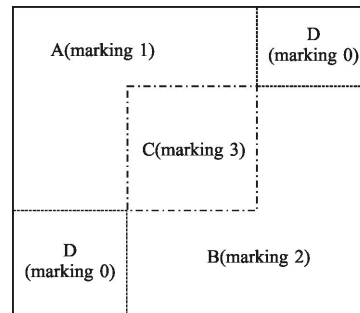


图 4 镶嵌区域的不同类型与标记值

Fig.4 Different kinds of region for RS images mosaicing and marking value

2.2 生长与标记

生长是模拟草原火向内部燃烧的过程，是沿骨架的几何拼接线自动生成的关键。凡是 C 类型区域均为有效待处理区域，生长和标记仅仅对 C 类型区域进行。生长和标记的特定法则如公式(2)：

$$P_{(x,y)} = \begin{cases} 1 & \text{Num1} > \text{Num2} \\ 2 & \text{Num2} > \text{Num1} \\ 1 & \text{Num1} = \text{Num2} \text{ 且 } \text{Num1} + \text{Num2} + \text{Num0} = 8 \\ 3 & \text{Num1} = \text{Num2} \text{ 且 } \text{Num1} + \text{Num2} + \text{Num0} \neq 8 \end{cases} \quad (2)$$

式中：Num0 表示 P 像素八邻域内背景值像素的个数，Num1、Num2 表示 P 像素八邻域内值分别为 1、2 像素的个数。

从公式(2)可知，当 Num1 大于 Num2 时， P 像素将被重新标记为 1，如图 5(a)所示；当 Num2 大于 Num1 时， P 像素将被重新标记为 2，如图 5(b)所示；

当 Num1 等于 Num2 时,若从 Num0~Num2 的和为 8 时, P 像素应被重新标记为 1,如图 5(c)所示,否则不需重新标记,如图 5(d)所示。

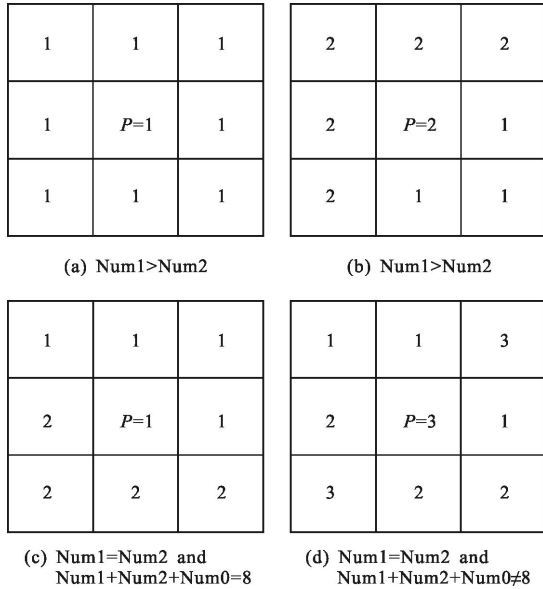


图 5 生长与标记法则示意图
Fig.5 Schematic views of growing and marking

2.3 标志拼接线

生长与标记的迭代过程结束时,镶嵌标记图中 C 类型区域将被全部标记为 A 类型或 B 类型区域。最后通过有效重叠区域中四邻域搜索与相异像素的判断可快速标志沿骨架的几何拼接线。拼接线判断函数 $S_{(x,y)}$ 如公式(3):

$$S_{(x,y)} = \begin{cases} \text{Ture} & P_{(x,y)}=1 \text{ 且 } D_{\text{Neighbor}(x,y)}=\{1,2,\dots\} \\ \text{False} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: (X, Y) 为像素位置; $P_{(x,y)}$ 为该像素下相应镶嵌标记图中的值; $D_{\text{Neighbor}(x,y)}$ 为该像素四邻域的值域。满足 $S_{(x,y)}$ 为 True 所有像素的集合为沿骨架的几何拼接线,即 A 类型与 B 类型区域彼此邻接像素的集合。

2.4 基于图像对象的算法优化

如 2.2 节所述,生长与标记是一个迭代的过程,直至镶嵌全范围内不存在 C 类型区域。因此,沿骨架的几何拼接线生成算法的计算复杂度为 $O(9N^2)$ 。其中, N 为镶嵌影像集有效重叠范围的大小。设 k 为遍历影像重叠范围的次数, k 的大小取决于从重叠范围轮廓线向重叠范围内部生长的速度且 $k < N$ 。因每次遍历都需考察单个像素的八邻域,故无优化的算法复杂度为 $O(9N^2)$ 。考虑遥感影像的大数据镶嵌,

这显然是一个极高复杂度的算法,甚至可能会造成计算崩溃。

参考图 5,一次重叠范围内的生长和标记需要重新标记的像素仅仅是 C 类型区域轮廓线的像素,而 C 类型区域内部不需进行多余判断。依据 OBIA 的思想,每块 C 类型区域可被认为是一个图像对象,迭代处理中每次生长和标记只是针对一个图像对象的轮廓线上的像素进行,而不需要完全遍历重叠范围进行生长和标记,这样可以极大提高几何拼接线的生成效率。因此,优化的流程如图 2 所示,而算法关键步骤如下:

Step1. 声明迭代控制变量 T 。

Step2. 以 T 控制进入 do-while 循环。

Step2.1. 置 $T=0$ 。

Step2.2. 遍历重叠范围。

Step2.2.1. 判断像素 $p(X, Y) == 3$, 否则继续遍历。

Step2.2.1.1. 从像素 $p(X, Y)$ 起基于八邻域搜索 C 类型区域轮廓线。

Step2.2.1.2. 按公式(2)对搜索的轮廓线像素进行区域生长和标记,并记录该过程中置 3 像素的个数 S 。

Step2.2.1.3. 置 $T = \text{该 C 类型区域轮廓线的像素个数}$ 。

Step2.2.1.4. 若 $S == T$ 则轮廓线像素均置 1。

Step2.2.1.5. 跳出 Step2.2.遍历重叠范围循环。

Step3. 若 $T \neq 0$,则重新进入 Step2。

若 $T = 0$,则迭代终止。

分析上述步骤,不难发现结合 OBIA 思想沿骨架的几何拼接线生成算法计算复杂度 $O(f)$ 被优化为 $O(N) \leq O(f) \leq O(N^2)$ 。由于不需要迭代完整遍历重叠区域,计算复杂度大大降低,完全能满足大数据遥感影像的几何拼接线快速检测的要求。上述步骤中基于八邻域的区域轮廓线搜索方法可以参考文献[16]。

3 实验与讨论

3.1 实验数据

选择两景经过匀色处理后的相邻区域的 SPOT5 遥感影像,如图 6 所示。不难发现两景影像的色彩与纹理差异微小,适合进行沿骨架的几何拼接线自动检测与镶嵌。两景 SPOT5 遥感影像的空间分辨率均为 10 m,有绿光、红光、近红外和短波红外四个通

道。其中,图 6(a)大小为 7 482×12 176(行数×列数,以下类同)像素,图 6(b)大小为 7 617×8 787 像素,图 6(a)与图 6(b)重叠区域大小为 1 903×7 186 像素(包含背景值像素,背景像素值为 0)。

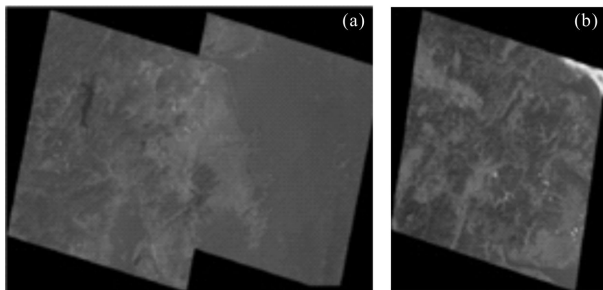


图 6 遥感影像镶嵌实验数据
Fig.6 Experimental data for RS images mosaicking

3.2 算法过程与分析

沿骨架的几何拼接线生成过程中区域初始化的结果如图 7(镶嵌标记图)所示。图 7 中的数字表示不同类型的区域,如 2.1 节。其中值 0 区域代表背景值区域 D,值 3 区域代表有效的重叠区域 C,即需要进行生长和标记的处理范围。

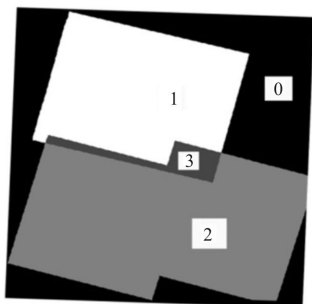


图 7 区域初始化结果
Fig.7 Result of region initialization

不同于一般航空摄影测量像片镶嵌四边形的重叠区域,顾及背景值时图 7 中值 3 区域是一个复杂的凹多边形,这也体现了遥感影像大数据、大范围镶嵌的特点。图 8(a)简单重叠区域下的几何拼接线可由轮廓线的特征点 A、D 与轮廓线角平分线的交点 B、C 快速构成 ABCD;图 8(b)复杂重叠区域下依据类似特征点 A'B'C'D'不能直接构成有效的折线。基于图形解析的几何拼接线自动生成算法(如 Voronoi 图法)一般要求有效重叠区域为四边形,因此难以解决图 7 所示的复杂重叠区域的情况。

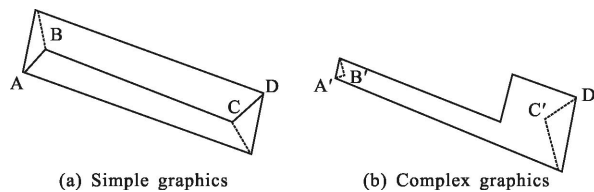


图 8 基于图形解析算法的局限性
Fig.8 Limitations of algorithm on graphics analysis

文中提出的算法能自动检测出任何复杂重叠区域沿骨架的几何拼接线。其中沿骨架的几何拼接线生成的关键步骤是生长和标记,如图 9 所示。图 9(a)和图 9(b)分别为镶嵌标记图经过 550 次和 1 509 次循环后生长和标记的结果。由图可知,由于轮廓线上生长的速度不一致,图 7 初始的完整值 3 区域被破碎为若干 C 类型区域(白色),且随着循环次数的增加,值 3 区域越来越小直至全部消失。经过 2 548 次循环后,C 类型区域的生长和标记完全停止,其结果如图 9(c)所示。最后依据 2.3 节标志沿骨架的几何拼接线,结果如图 9(d)(折线)所示。

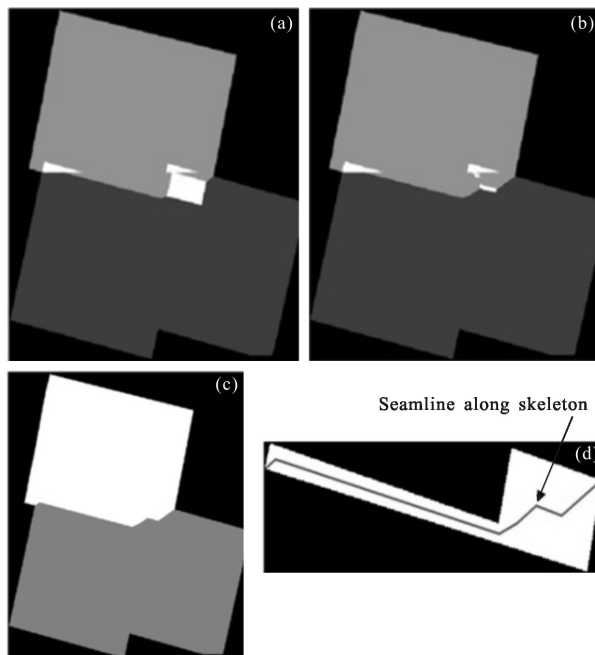


图 9 生长和标记的过程
Fig.9 Growing and marking procedure for geometry seamline

由 3.1 可知两景影像重叠区域大小为 1 903×7 186 像素,经过对重叠区域 2 548 次迭代处理后沿骨架的几何拼接线被标志出来。若每次均完整遍历重叠区域,计算量大的几乎无法完成。但依据 OBIA 思想优化后的算法,在 Intel 酷睿 II 2.5 GHz CPU、内

存 3GB 的计算机上仅耗时约 3 min 就完成几何拼接线的搜索。这表明了文中算法能适用于大数据遥感影像的快速镶嵌。

3.3 实验结果

依据叠置顺序应用 Envi 软件镶嵌模块直接处理的结果和采用文中算法的处理结果如图 10 所示。由于噪声的影响,单景遥感影像轮廓线附近一般会存在“黑边”。如果镶嵌处理中不选择适当拼接线,应用 Envi 的直接镶嵌结果是不能去除黑边的,也达不到无缝镶嵌的要求(图 10(a))。采用文中算法后镶嵌结果中不存在黑边,由于沿重叠区域和骨架的特征点构成拼接线,同时图 6 中待镶嵌的遥感影像间视觉差异小,自动生成的几何拼接线形状美观,镶嵌结果视觉效果良好(图 10(b))。

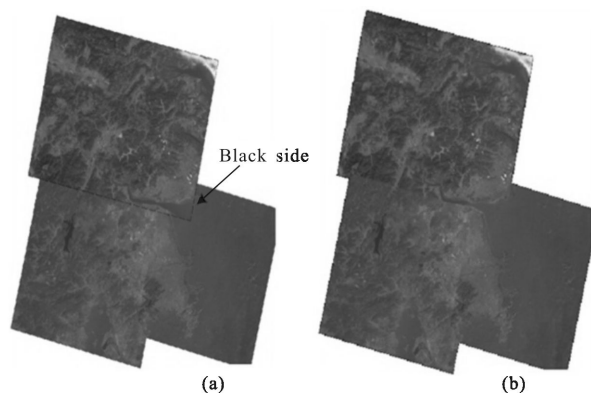


图 10 不同镶嵌方法的比较

Fig.10 Comparison of different mosaicking methods

4 结论

沿骨架的遥感影像几何拼接线自动生成算法在光学遥感应应用处理中取得了令人满意的效果。实验表明:(1) 该算法能解决复杂重叠区域无法依靠图形解析自动生成几何拼接线的困难;(2) 该算法能快速自动获取形状美观、视觉良好的几何拼接线,全过程不需要人工干预,自动化程度高;(3) 该算法能有效克服镶嵌中影像边界或轮廓线的黑边效应,不需要人工干预排除黑边区域;(4) 由于几何拼接线区别于最优拼接线,该算法适合于无明显差异遥感影像数据间的自动镶嵌或事先经过较理想的匀色处理。

参考文献:

[1] Milgram D L. Computer methods for creating photo mosaics

[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1975, 24: 1113–1119.

[2] Wu Yu, Yu Tao, Xie Donghai. Fast automatic stitching for images of unmanned aerial vehicle in emergency response[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(3): 410–416. (in Chinese)

吴侯,余涛,谢东海.面向应急响应的无人机图像快速自动拼接[J].*计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(3): 410–416.

[3] Pan Jun, Wang Mi, Li Deren. Generation of seamline network using area voronoi diagram with overlap [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34: 518–521. (in Chinese)

潘俊,王密,李德仁.基于顾及重叠的面Voronoi图的接缝线网络生成方法[J].*武汉大学学报信息科学版*, 2009, 34: 518–521.

[4] Hsu S, Sawhney H S, Kumar R. Automated mosaics via topology inference [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002, 22(2): 44–54.

[5] Davis J. Mosaics of scenes with moving objects [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1998: 354–360.

[6] Kerschner M. Seamline detection in colour orthoimage mosaicking by use of twin snakes [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 5(6): 53–64.

[7] Fernandez E, Mart R. GRASP for seam drawing in mosaicking of aerial photographic maps [J]. *Journal of Heuristics*, 1999, 5: 181–197.

[8] Yuan Xiuxiao, Zhong Can. An improvement of minimizing local maximum algorithm on searching seam line for orthoimage mosaicking[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(2): 199–204. (in Chinese)

袁修孝,钟灿.一种改进的正射影像镶嵌线最小化最大搜索算法. *测绘学报*, 2012, 41(2): 199–204.

[9] Wang Xiaoli, Dai Huayang, Yu Tao, et al. Research on UAV image and color uniform based on multi-resolution fusion[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013, 4: 27–30. (in Chinese)

王晓丽,戴华阳,余涛,等.基于多分辨率融合的无人机图像拼接匀色研究[J].*测绘通报*, 2013, 4: 27–30.

[10] Xandri R, Prez F, Pal V, et al. Automatic generation of seamless mosaics over extensive areas from high resolution imagery [C]//World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, 2005.

[11] Zhang Jianqing, Sun Mingwei, Zhang Zuxun. Automated seamline detection for orthophoto mosaicking based on ant colony algorithm [J]. *Geomatics and Information Science of*

- Wuhan University*, 2009, 34(6): 675–678. (in Chinese)
- 张剑清, 孙明伟, 张祖勋. 基于蚁群算法的正射影像镶嵌线自动选择 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2009, 34(6): 675–678.
- [12] Li Haichao, Hao Shengyong, Zhu Qi. Fast seamless mosaic algorithm for multiple remote sensing images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1381–1386. (in Chinese)
- 李海超, 郝胜勇, 朱琦. 多片遥感图像的快速无缝拼接方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1381–1386.
- [13] Blum H. A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape, Models for the Perception of Speech and Visual Form [M]. Cambridge: MIT Press, 1967: 362–381.
- [14] Blaschke T. Object based image analysis for remote sensing [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65: 2–16.
- [15] Blaschke T, Strobl J. What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS [J]. *GIS-Zeitschrift Fur Geo-Information System*, 2001, 14(6): 12–17.
- [16] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. Image Processing, Analysis, and Machine Vision [M]. 3rd ed. Ai Haizhou, Su Yanchao, et al. translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 136–139. (in Chinese)