

基于光流校正的复杂地形区多时相遥感影像配准

冯蕊涛¹, 杜清运^{1,2,3}, 罗恒⁵, 沈焕锋^{1,2,3}, 李星华⁴, 刘波⁵

1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430079;

2. 武汉大学 地理空间技术协同创新中心, 武汉 430079;

3. 武汉大学 地理信息系统教育部重点实验室, 武汉 430079;

4. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079;

5. 广西壮族自治区基础地理信息中心, 南宁 530023

摘要: 几何配准是影像后续处理的重要前提, 是遥感信息处理领域研究的热点之一。复杂地形区多时相遥感影像的高精度配准一直是难以突破的难题, 光流估计法通过逐像素位移增量解算为此提供了可行的解决思路, 但光流法对地物变化异常敏感, 经常导致计算的光流场及配准影像存在异常。为此, 本文提出一种基于光流校正的复杂地形区多时相遥感影像配准方法, 采用亮度和梯度双重约束获取光流场初值, 在此基础上使用高斯拉普拉斯算子对异常光流进行检测, 然后通过Delaunay三角形曲面插值对异常光流进行校正处理, 从而得到各像素精准位移。实验表明, 本文提出方法对存在地物变化的复杂地形区多时相遥感影像, 可实现高保真、高精度的配准。

关键词: 遥感, 复杂地形区, 光流法, 高斯拉普拉斯, 配准, Delaunay三角形曲面插值

引用格式: 冯蕊涛, 杜清运, 罗恒, 沈焕锋, 李星华, 刘波. 2021. 基于光流校正的复杂地形区多时相遥感影像配准. 遥感学报, 25(2): 630-640

Feng R T, Du Q Y, Luo H, Shen H F, Li X H and Liu B. 2021. A registration algorithm based on optical flow modification for multi-temporal remote sensing images covering the complex-terrain region. National Remote Sensing Bulletin, 25(2): 630-640 [DOI: 10.11834/jrs.20209280]

1 引言

影像配准是将不同时间、不同传感器或不同条件下(天候、照度、摄像位置和角度等)获取的两幅或多幅影像进行几何对齐的过程(Wong和Clausi, 2007; 陈显毅, 2009), 是影像融合(Shen等, 2016)、影像镶嵌(Li等, 2015)、协同分析(管小彬等, 2015; 唐尧等, 2019)等不可缺少的预处理步骤。作为异源影像信息互补利用的前提, 近些年, 影像配准的研究多集中于针对多模影像构建辐射鲁棒性特征描述符, 特征匹配以及误匹配特征剔除(Chang等, 2019; 何梦梦等, 2018; 刘贵喜和王蕾, 2007; Murphy等, 2016; Kupfer等, 2015; Nagarajan和Schenk, 2016)。鲜有文献关注复杂地形区多时相影像配

准, 受地形起伏变化、气候条件、成像角度差异的影响, 不同时相的复杂地形区遥感影像间往往存在较大的几何差异。实现其高精度几何对齐, 有效助力复杂地形区后续研究。那么, 如何精细拟合复杂地形区影像间的几何关系是一大挑战。

传统的遥感影像配准方法可分为基于区域和特征的配准(Ding等, 2001; Zhang等, 2015)。基于区域的配准方法直接利用原始影像的灰度信息, 通过构建相似性度量准则, 根据其相似度实现配准。该方法精度高、耗时长, 对大的旋转、尺度变化鲁棒性差, 因此现有遥感影像配准的研究多集中于基于特征的配准方法(张迁等, 2003; 吕金建等, 2007; 林晓帆等, 2010; 朱志文等, 2011; Chang等, 2019; Ma等, 2019; 何梦梦等, 2018)。基于特征的配准方法利用影像的明显特

收稿日期: 2019-08-12; 预印本: 2019-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41701394); 数字制图与国土信息应用工程自然资源部重点实验室开放基金(编号:ZRZYBWD201903)

第一作者简介: 冯蕊涛, 1992年生, 女, 博士研究生, 研究方向为遥感影像几何处理与应用。E-mail: ruitaofeng@whu.edu.cn

通信作者简介: 沈焕锋, 1980年生, 男, 教授, 研究方向为遥感信息处理与地学应用。E-mail: shenhf@whu.edu.cn

征, 将对原始影像灰度信息的分析转化为对其抽象特征的应用, 主要包含特征提取、特征匹配、变换模型构建、坐标转换与重采样等步骤 (Sedaghat 和 Mohammadi, 2019)。以 Harris 角点检测 (Harris 和 Stephens, 1988; 刘贵喜和王蕾, 2007)、尺度不变特征转换算子 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004; 吕金建等, 2007)、加速鲁棒性特征算子 SURF (Speed Up Robust Features) (Bay 等, 2006) 等为代表的点特征提取算法在基于特征的配准方法中广泛使用。利用特征点构建影像间几何转换关系时, 常用整体变换模型。它假设整景影像满足同一个坐标变换关系 (Gong 等, 2014)。虽然该模型解算简便、高效, 但是当影像间存在局部畸变时, 其拟合能力有限。局部变换模型因其能更好地顾及局部不一致变形而被广泛使用 (Goshtasby, 1986; Zagorchev 和 Goshtasby, 2006; Feng 等, 2017)。然而, 在地形复杂区域, 一方面, 地物变化、山体阴影、辐射差异等因素对特征点定位存在影响, 导致匹配的特征点对存在位置误差; 另一方面, 地形起伏导致极小窗口内影像几何畸变不一致, 且周围特征信息难以准确表达不同位置的复杂几何关系 (Brigot 等, 2016)。在这种情况下, 要实现高精度配准, 更精细的局部模型, 甚至逐像素模型 (王慧贤等, 2015) 必不可少。

光流法作为视频影像中物体运动估计的常用方法, 它考虑物体局部运动的不一致, 利用像素自身信息逐一估计其 2D 空间的运动情况, 是一种高精度的逐像素模型。影像配准的位移场类似于运动物体的光流场, 复杂地形区遥感影像间不一致的空间错位类似于物体的局部运动。因此, 光流法可被用于复杂地形区不同时相的遥感影像配准, 而目前其在遥感影像配准中应用较少, 包括归一化互相关系数和局部光流模型结合方法 (范冲等, 2008)、模板匹配和光流法结合 (吴迅兮, 2010)、SIFT 特征约束与光流模型结合方法 (刘璐等, 2014) 等。以上研究继承了光流法逐像素位移估计的优势, 却没有考虑地物变化对光流估计的影响。在遥感影像中, 因季节变化、地质灾害、人类活动等引发的地表变化是不可避免的 (曹森等, 2014)。这种变化与运动快的物体覆盖慢的物体造成的遮挡类似, 即影像内容不对应, 将导致

计算所得光流出现局部异常。异常光流场会进一步影响转换后影像坐标, 重采样时糅合非邻域像素的灰度信息, 导致配准后影像内容变化。

为此, 本文提出一种基于光流校正 OFM (Optical Flow Modification) 的复杂地形区多时相遥感影像配准方法。在初始估算的光流场基础上, 使用高斯拉普拉斯算子 LoG (Laplace of Gaussian) 检测异常光流, 引入 Delaunay 三角形曲面插值算法对异常光流进行校正重建, 得到精准的逐像素位移场, 从而实现复杂地形区多时相遥感影像配准。

2 方法

本文提出的 OFM 方法主要分为 3 个步骤 (图 1): 首先, 进行影像光流场的估计, 采用一种亮度和梯度同时约束的光流估计方法; 其次, 进行光流异常的检测, 方法是光流场转换到 Munsell 颜色系统, 根据其颜色特性使用 LoG 算子进行检测; 最后, 利用 Delaunay 三角形曲面插值算法完成异常修正, 并通过坐标转换、重采样得到配准后影像。

2.1 影像的光流估计

理想情况下, 假设影像中物体运动前后的亮度信息不发生变化, 即亮度一致 (Horn 和 Schunck, 1981):

$$I(x, y, t) = I(x + u, y + v, t + 1) \quad (1)$$

式中, (u, v) 表示位移矢量, I 表示影像亮度, (x, y) 表示指定点的坐标, t 指示影像获取时间。为了应对影像亮度变化, 增强光流估计模型的稳定性, 影像的梯度信息被整合。假设运动前后影像的梯度信息保持不变, 即梯度一致 (Brox 等, 2004):

$$\nabla I(x, y, t) = \nabla I(x + u, y + v, t + 1) \quad (2)$$

式中, $\nabla = (\partial_x, \partial_y)^T$ 表示影像梯度。在梯度一致性约束下, 即使影像间存在亮度差异也能得到准确的光流。因此, 构建如下能量函数模型 (Brox 等, 2004):

$$E_{\text{data}}(u, v) = \int_{\Omega} \psi(|I(x + u, y + v, t + 1) - I(x, y, t)|^2) dz + \gamma \int_{\Omega} \psi(|\nabla I(x + u, y + v, t + 1) - \nabla I(x, y, t)|^2) dz \quad (3)$$

式中, $z = (x, y, t)^T$, $\psi(s^2) = \sqrt{s^2 + \varepsilon^2}$ 是惩罚函数。 ε 是为了避免惩罚项为 0 而设置的无穷小数, 实验取值为 0.001。能量方程中使用分段平滑光流场 (Brox 等, 2004), 即:

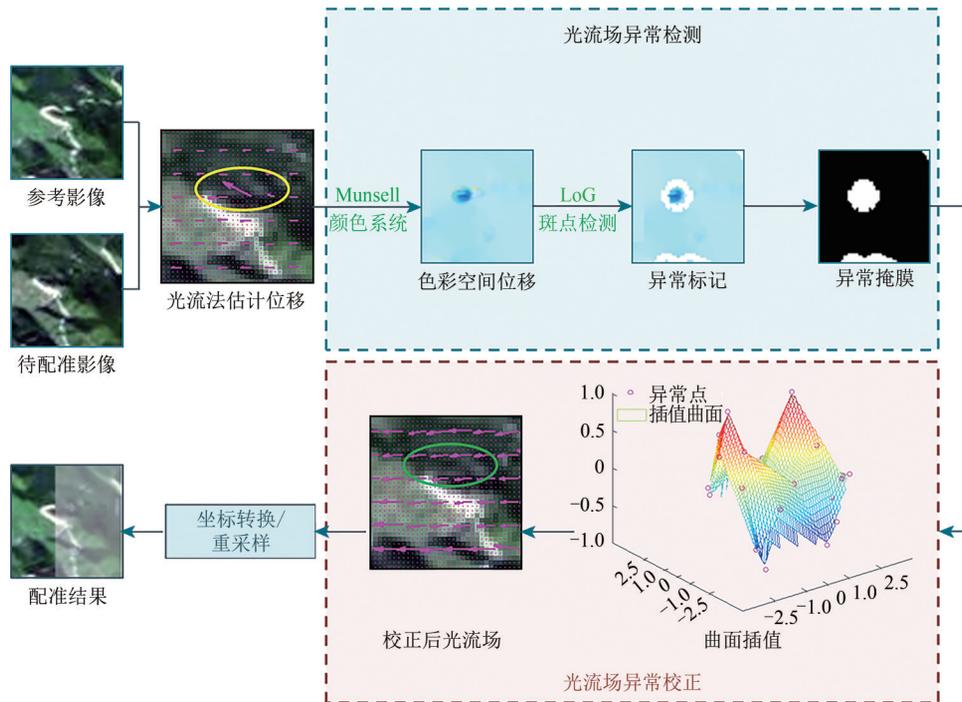


图1 基于光流校正(OFM)的复杂地形区遥感影像配准流程

Fig. 1 OFM based remote sensing image registration for complex terrain areas

$$E_{\text{Smooth}}(u, v) = \int_{\Omega} \psi(|\nabla_2 u|^2 + |\nabla_2 v|^2) dz \quad (4)$$

式中, $\nabla_2 = (\partial_x, \partial_y)$ 表示空间梯度。至此, 本文的光流估计模型表示如下:

$$E(u, v) = E_{\text{Data}} + \alpha E_{\text{Smooth}} \quad (5)$$

式中, $\alpha > 0$ 是正则化参数。式(5)的最小化满足欧拉-拉格朗日等式, 通过多尺度固定点迭代消除非线性项, 由常规数值近似解得最优 (u, v) 。实际上, 当地表覆盖变化造成影像内容不对应时总会使计算得到的光流存在局部异常。为此, 提出对异常光流的校正。

2.2 光流场异常检测

异常光流在 Munsell 颜色系统中色彩丰富, 有明显色彩突变, 且呈斑块状, 如图 2(d)。据此, 通过斑点检测算子 LoG 和光流色彩图的卷积运算检测异常光流:

$$L(x, y; \sigma) = \nabla_{\text{norm}}^2 f(x, y) = \sigma^2 \nabla^2 G \\ = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) \cdot e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

式中, σ 是高斯函数的尺度因子, (x, y) 表示影像坐标。 $\nabla^2 G$ 表示高斯函数的拉普拉斯变化。

$$\nabla^2 G = \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} \quad (7)$$

G 表示算法中使用的二维高斯函数, 即:

$$G(x, y; \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{\sigma^2}} \quad (8)$$

在多尺度空间中, 光流色彩图与 LoG 进行卷积而得到其对应尺度空间的拉普拉斯响应值。如果该点的拉普拉斯响应值都大于或小于其同尺度和相邻尺度空间的 26 个邻域的值, 则认为该点是异常光流 (Lindeberg, 1998)。基于上述理论, 图 2(d) 中的异常光流被提取并用白色圆圈标记, 如图 2(e)。检测的结果没有完全覆盖所有异常位移, 实验中设置掩膜半径略大于检测结果。

2.3 光流场异常校正

光流场异常校正通过曲面插值实现。以 X 方向异常位移插值修复为例, 利用未被标记点坐标和位移构建其 Delaunay 三角形曲面 (图 3(a)), 形成的插值曲面可以用以下抽象函数表示:

$$V = F(x, y) \quad (9)$$

式中, V 表示未被标记的正确位移, (x, y) 表示正确位移的坐标, F 表示抽象的曲面函数 (<https://www.mathworks.cn/help/matlab/ref/griddata.html?lang=en> [2019-08-12])。拟合得到曲面函数后, 根据异常位移点 (m, n) 所在三角形 (图 3(a) 红色虚线三角形) 的 3 个顶点位移量加权平均值修复异常点位移。为了清晰表示异常点位移量修复过程,

将图3 (a) 红色虚线三角形提取并放大如图3 (b)。图中A, B, C表示3个准确位移点, 构成曲面函

数 F 标记的一个Delaunay三角形。紫红色圆圈标记了待修复位移的位置。

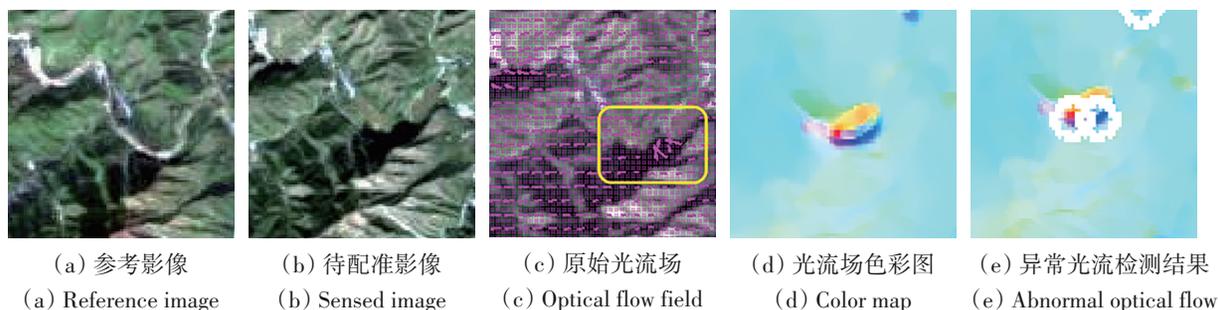
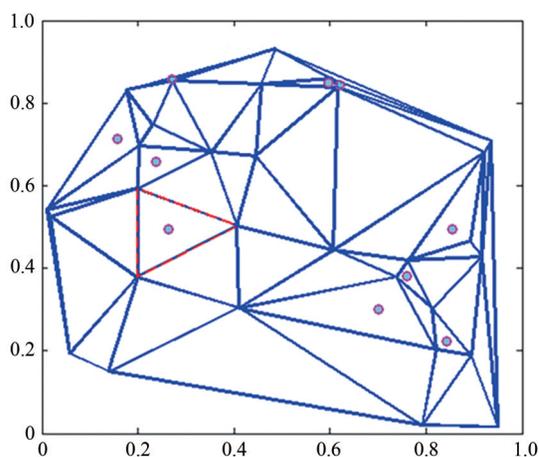


图2 光流场估计与异常光流检测

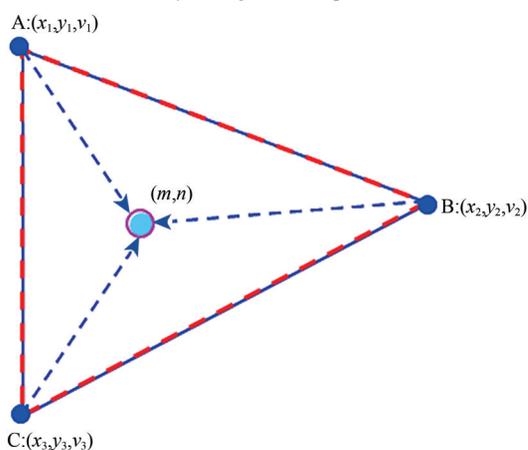
Fig. 2 Optical flow field estimation and abnormal optical flow detection



△ Delaunay三角形曲面 ● 异常位移点

(a) Delaunay 三角形插值曲面

(a) Delaunay triangular interpolation surface



(b) 红色虚线三角形放大图

(b) Close-up of the red dotted triangle

图3 Delaunay 三角形插值曲面与异常位移修复

Fig. 3 The illustration of surface interpolation

利用3个顶点的加权平均可计算得到该点的位移量 (Watson和Philip, 1984):

$$v_{(m,n)} = \frac{\sum_{i=1}^3 w_i \cdot v_i}{\sum_{i=1}^3 w_i} \quad (10)$$

式中, w_i 表示各点的权重, v_i 表示各点的位移量, $i = 1, 2, 3$ 标记三角形的3个顶点。其中, 设置权重是为了加重距离异常位移近的点对其修正的影响而削弱距离远的点的影响力。因此, 这里使用反距离加权函数:

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - m)^2 + (y_i - n)^2}} \quad (11)$$

式中, (x_i, y_i) 表示三角形各顶点坐标, $i = 1, 2, 3$, (m, n) 表示异常位移点坐标。

使用OFM算法对原始位移场修复, 配准参考和待配准影像 (图4(a)和图4(b))。图4 (d) 中红色虚线矩形框内的黑色不规则形状面积不改变, 而使用原始光流法配准后影像如图4 (c), 黑色不规则地物的面积发生了变化。再以参考影像左半部分和配准后影像右半部分组合构成图4 (e), 在接边处山脊线连续且顺接自然。因此, OFM算法不仅保持了光流法的几何配准精度, 而且有效修复了异常位移保证地物信息不发生改变。

3 实验与分析

实验选择3对复杂地形区多时相遥感影像进行配准, 数据描述如表1。光流模型中梯度一致性约束的权重 γ 为5, 平滑约束项权重 α 为80。预设检测异常位移区域为8, 以检测到的异常位移区中心像素为标准, 以其直径的2倍为窗口大小构建掩膜。3组实验均在MATLAB中操作, 运行平台的环境配置为3.30 GHz CPU和8 GB运行内存。

实验分别从局部目视判断和全局定量评价两方面,对比分析OFM算法在复杂地形区遥感影像中的配准效果。其中,目视判断中列举了光流法OF(Optical Flow)配准结果(Brox等,2004),旨在对比分析OFM算法能否在保证OF配准精度的同时确保配准后影像内容不被改变。罗列分段线性模型(PLM)(Goshtasby,1986)、薄板样条模型(TPS)(Goshtasby,1988)和局部两段模型(BWP-OIS)(Feng等,2019)的配准结果,是为了分析OFM算法与现有局部模型在配准精度上的区别。其中,PLM模型根据匹配的特征点对,将影像划分为一系列Delaunay三角形,根

据每个三角形对之间的顶点坐标构建仿射变换模型并进行解算。TPS模型以整体仿射变换和加权径向基函数描述特征点对的几何关系,从而得到配准结果。BWP-OIS分两个阶段,首先利用基于特征的局部加权模型实现参考和待配准影像粗对齐,然后利用基于灰度的离群点鲁棒局部模型实现精配准(Feng等,2019)。在定量评价阶段,选用相关系数CC(Correlation Coefficient)和均方根误差RMSE(Root Mean Square Error)指示原始参考和待配准影像间的几何变形情况,衡量对比方法和OFM算法的配准精度。

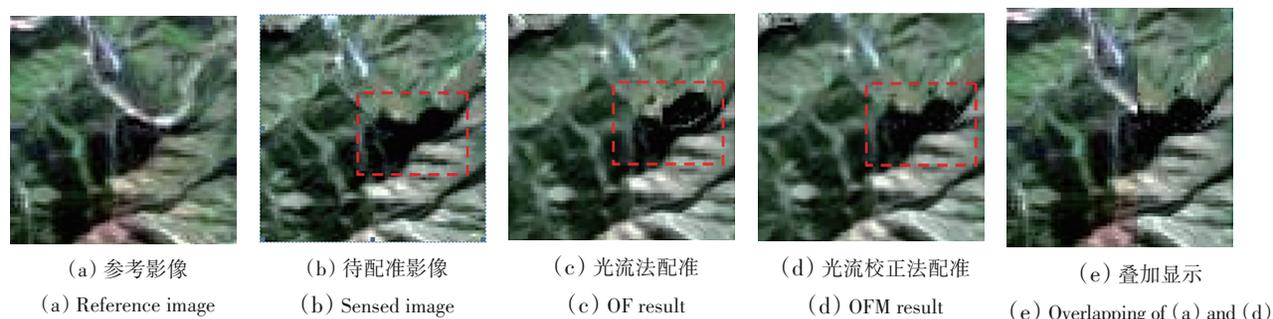


图4 OFM算法配准结果显示

Fig. 4 The registration result of OFM

表1 实验数据

Table 1 Introduction of experimental data

实验编号	分辨率/m	成像时间	传感器	影像特点
实验一	4	2016-05-06	GF-2_PMS2	覆盖山东省济南市附近的山区,有季节变化,地形起伏大,存在局部变形
		2016-02-07		
实验二	16	2016-08-28	GF-1_WFV3	包含陕西省秦岭山脉部分区域,季节变化引起地物不对应,积雪覆盖部分地物
		2017-02-12		
实验三	16	2018-04-03	GF-1_WFV3	覆盖四川省马边县滑坡区域,成像时间间隔小,地物变化小,有滑坡造成的塌方
		2018-05-14		

3.1 目视判断与分析

实验一中参考影像是春季成像,而待配准影像是冬季成像。相对于参考影像(图5(a)),待配准影像(图5(b))中地表覆盖发生了变化,局部区域有积雪。如图5(c),直接叠加原始影像,视觉上存在错位造成的模糊。经过OFM算法处理后,模糊和重影消除,如图5(d)叠置影像中地物细节清晰。选取影像中黄色矩形框区域,并以棋盘格镶嵌如图6所示。图6(a)中原始参考和待配准影像的两个区域接边处线状地物有错位,使用PLM,

TPS和BWP-OIS模型进行配准处理后,错位削弱,但都没完全对齐。这说明,基于特征的局部模型很难准确对齐复杂地形区的遥感影像。地形的特殊性使得在这些区域提取到的特征点存在位置误差,而且几何关系在很小的区域也会存在不一致。光流估计能够完全消除几何错位(图6(e)和图6(f))。但是,OF在两个区域的结果中都存在地物异常(图6(e)红色矩形框),配准后引入了在原始待配准影像中并不存在的地物(图5(b)红色矩形框)。这是因为标记区域在参考(图5(a))和待配准影像

(图5(b))中地物不一致,造成像素位移计算不准确,重采样时混合了其他区域地表信息从而改变了原有地物。而OFM算法修复了异常光流,配准后

影像内容不变(图6(f)红色矩形框),说明它能够实现高保真、高精度配准。

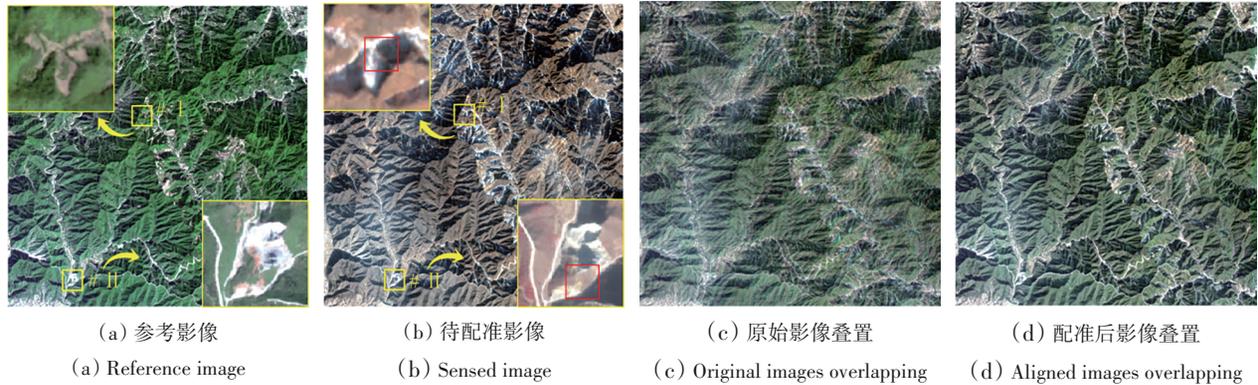


图5 实验一影像及配准结果

Fig. 5 The first experimental data and registration result

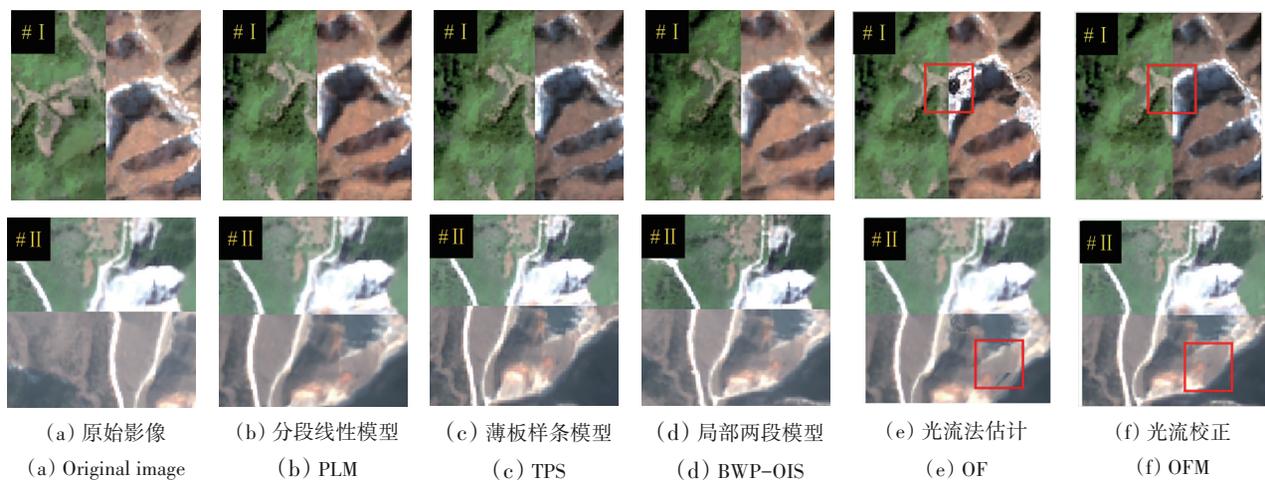


图6 实验一中各算法配准结果棋盘格放大图(图5中黄色矩形区域)

Fig. 6 Enlarged checkerboards of comparative algorithms in the first experiment (marked with yellow rectangles in Fig. 5)

图7(a)和图7(b)分别是实验二的参考和待配准影像,其中参考影像是夏季成像而待配准影像是冬季成像。图7(c)是参考和待配准影像的叠置图,视觉上略有模糊,说明原始影像间的几何错位较小,这在图8(a)参考和待配准影像的局部放大图中有所体现。参考影像和待配准影像在水平方向有较大几何错位,垂直方向几何畸变较小。经PLM算法处理后,图8(b)区域#I中道路在两景影像的拼接处出现了断裂,区域#II中弧形人工建筑区的原始畸变被放大。TPS也没能完全消除参考和待配准影像在水平方向的错位,如图8(c)区域#I所示;而在垂直方向上,如图8(c)区域#II中U型道路的下半段有较小错

位。BWP-OIS处理效果和PLM基本相当,只是在区域#II中,BWP-OIS配准结果和参考影像中的U型道路衔接自然平滑,如图8(d)。OFM的配准结果和参考影像在连接处过渡自然顺滑,说明它实现了这两景影像在局部区域的精准对齐。在图8(a),图8(e)和图8(f)中,用红色矩形框圈定了影像内容发生变化的区域。OF算法虽然实现了待配准影像和参考影像的几何位置准确对齐,但是红色矩形框中的影像内容相对于待配准影像发生了改变(图8(e)),而经过OFM算法处理,对应位置的影像内容和待配准影像一致,而且空间位置上也高度一致(图8(f))。因此,OFM算法在保证几何配准精度的同时保证待配准影像内容不发生变化,实现了有效配准。

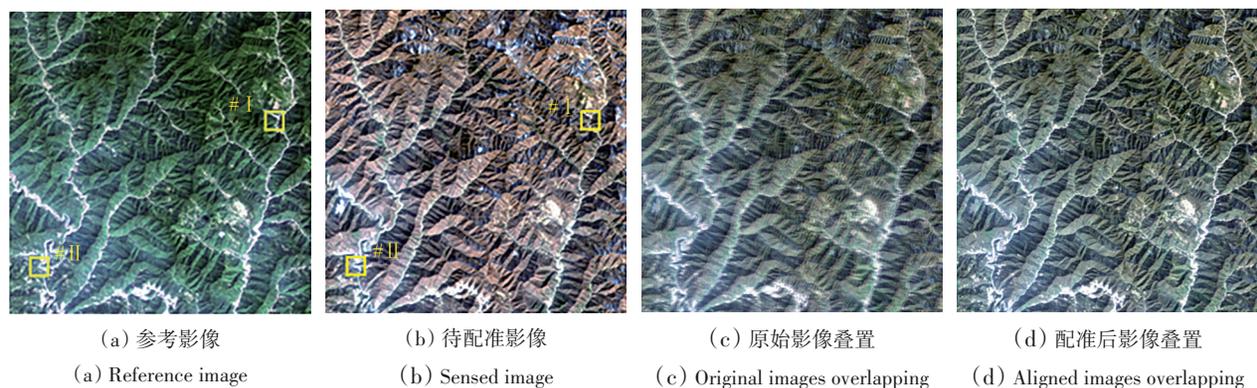


图7 实验二影像及配准结果

Fig. 7 The second experimental data and registration result

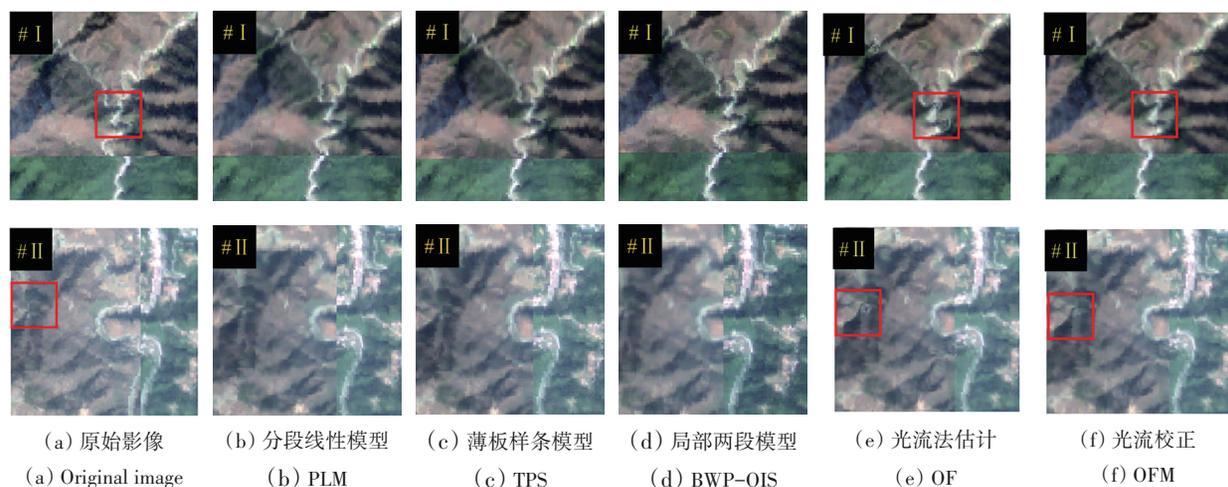


图8 实验二中各算法配准结果棋盘格放大图(图7中黄色矩形区域)

Fig. 8 Enlarged checkerboards of comparative algorithms in the second experiment (marked in yellow rectangles in Fig. 7)

实验三参考影像和待配准影像成像时间间隔内发生了滑坡灾害(图9(a)和(b)中区域#II)。直接观察图10(a),参考和待配准影像间存在大小不等的几何畸变,因此叠置影像图9(c)存在严重模糊。而经过OFM处理,几何畸变消除,图9(d)中影像纹理清晰,线状地物明显。PLM和TPS算法没能实现区域#I中道路和参考影像中相同道路的精准对齐,如图10(b)和图10(c),其在接边处是断裂的。同一位置,BWP-OIS算法能够消除参考和待配准影像在水平方向大部分错位,但不能完全消除,因此道路衔接不顺滑,如图10(d)。而OF和OFM算法配准结果如图10(e)和图10(f),道路衔接自然平滑。观察图10(b)区域#II放大图,PLM算法配准结果因为还存在垂直方向的错位,使得影像底部两条线段囊括的范围略有增大。而TPS算法因为水平方向

的错位,影像底部两条线段所在区域有缩小现象,如图10(c)。BWP-OIS、OF和OFM算法的结果不存在上述问题。但是对比待配准影像、OF和OFM的结果中滑坡造成的塌方形状,OF改变了滑坡面形状(图10(e)),而OFM算法处理结果和待配准影像最相似,如图10(f)红色矩形框。综合来看,OFM算法在几何配准精度上优于PLM、TPS和BWP-OIS这3个局部算法,在待配准影像的内容保持上优于OF算法。

综合3组实验的目视结果可以看到,OFM几何配准精度明显高于TPS、PLM和BWP-OIS局部模型。相对于OF配准结果,提出方法能够有效检测和修正异常光流场,保证原始待配准影像的内容在配准过程中不发生变化,即OFM算法实现了高精度、高保真的复杂地形区遥感影像配准。为定量对比分析OFM算法,使用两个评价指标对配准结果做评价。

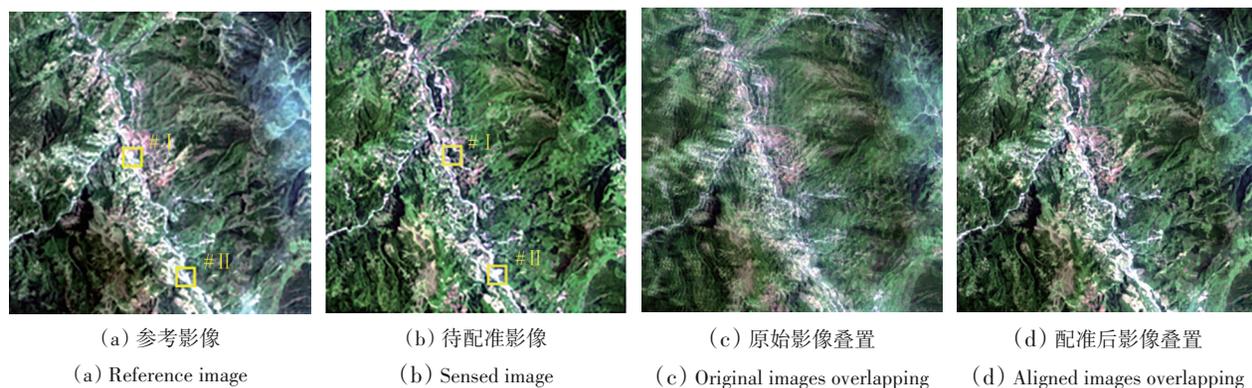


图9 实验三影像及配准结果

Fig. 9 The Third experimental data and registration result

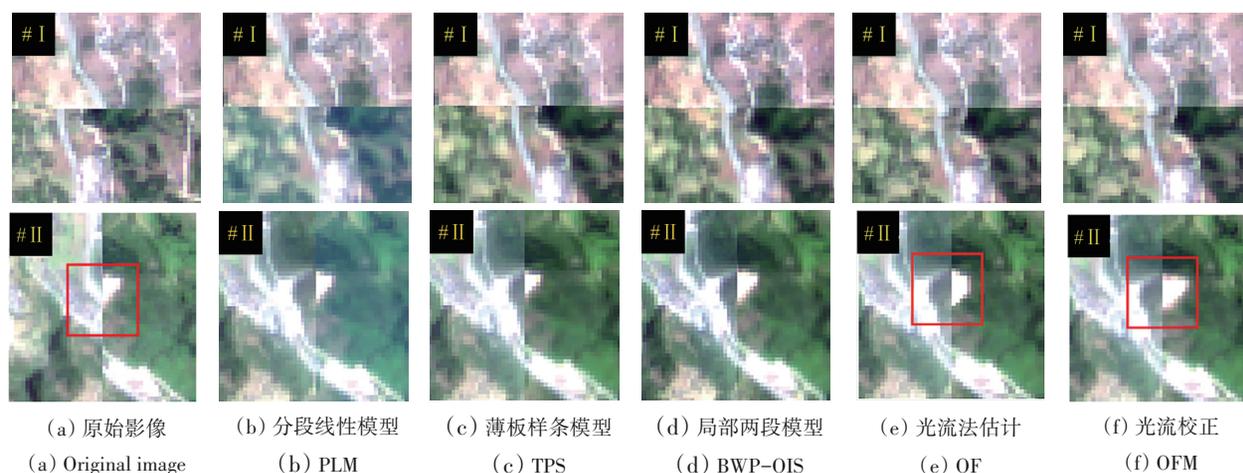


图10 实验三中各算法配准结果棋盘格放大图(图9中黄色矩形区域)

Fig. 10 Enlarged checkerboards of comparative algorithms in the third experiment (marked in yellow rectangles in Fig. 9)

3.2 定量评价与分析

两种定量评价指标为相关系数CC和均方根误差RMSE。其中，RMSE是通过人工选取明显的特征点，计算其平均欧氏距离而得到的。

实验中对对应选取了15组明显点对计算其RMSE。CC越大说明配准精度越高，相反，RMSE越小越配准精度越高(表2中箭头表示)。表2中的“原始影像”表示参考和待配准影像各项指标的定量评价结果，每组实验的最优结果用黑色粗体字标记。分析表2，每组实验都得到和目视判断一致的结论。4种方法对原始影像间的几何错位都有削弱，PLM算法、TPS算法和BWP-OIS算法的定量评价结果相当。因为它们都是在基于特征的配准算法框架下，顾及可能存在的局部几何畸变，通过构建局部模型实现参考和待配准影像的配准。它们对特征点数量、分布均匀度以及点位精度要求较高，而复杂地形区影像纹理信息不丰富、降质因素多，难以提取符合条件的特征点。逐像素

模型OFM的配准结果最优，这说明在复杂地形区遥感影像配准中，OFM通过逐像素计算其位移增量，解决了传统配准方法不能充分顾及局部细微几何变形的问题，实现了优质配准精度，在3组实验中两项评价指标都达到了最优。而且在该运行平台上，使用OFM算法处理3组实验分别耗时156.3 s, 36.5 s和8.42 s，其运行效率与影像大小、地物分布特点均有关系。

表2 实验定量评价结果

Table 2 The quantitative evaluation

编号	评价指标	原始影像	PLM	TPS	BWP-OIS	OFM
第1组 实验	CC(↑)	0.22	0.70	0.69	0.70	0.89
	RMSE(↓)	42.16	3.75	4.36	4.11	0.65
第2组 实验	CC(↑)	0.33	0.70	0.66	0.71	0.75
	RMSE(↓)	8.28	2.68	2.68	2.46	0.61
第3组 实验	CC(↑)	0.40	0.83	0.84	0.86	0.87
	RMSE(↓)	10.86	0.74	0.84	0.65	0.34

注:RMSE单位为像素。

4 结 论

多时相复杂地形区遥感影像的联合分析应用是地震、滑坡、泥石流等地质灾害研究的重要手段之一。而不同时相影像中同一地物空间位置对应一致是基本前提。传统的影像间转换模型引导的配准方法难以实现复杂地形区遥感影像间亚像素级空间对齐精度。针对于此,本文提出了一种光流校正的方法。该方法在亮度和梯度一致性的协同约束下,顾及复杂地形区影像间极局部的几何畸变,逐像素解算光流。在此基础上,对地物变化造成的异常光流使用LoG算子检测其位置并通过Delaunay三角形曲面插值修正。实验表明,本文提出的光流校正法不仅保留了光流法高精度空间对齐优势,且实现了地物变化区域的高保真配准,实现复杂地形区多时相遥感影像亚像素级配准精度,为多时相中高分辨率复杂地形区遥感影像的联合应用提供了精度保障。

虽然如此,在亚米级分辨率影像、不同传感器影像配准中,成像角度、成像机理、噪声类型差异等因素对本文提出算法的精度有影响。而这些遥感影像是地表精细研究,灾区成像条件较差情况下评估灾情、救灾等应用的重要数据保障。如何实现超高分辨率,异源影像高精度、高保真、高效率配准,是需要深入研究的问题。后续会在本文提出算法基础上,专门针对这类问题展开研究,并将配准后复杂地形区影像应用到灾害监测、评估、土地利用变化情况分析等领域。

参考文献(References)

- Bay H, Tuytelaars T and van Gool L. 2006. SURF: Speeded up robust features//Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision. Graz, Austria: Springer: 404-417 [DOI: 10.1007/11744023_32]
- Brigot G, Colin-Koeniguer E, Plyer A and Janez F. 2016. Adaptation and evaluation of an optical flow method applied to coregistration of forest remote sensing images. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9(7): 2923-2939 [DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2578362]
- Brox T, Bruhn A, Papenberg N and Weickert J. 2004. High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping//Proceedings of the 8th European Conference on Computer Vision. Prague, Czech Republic: Springer: 25-36 [DOI: 10.1007/978-3-540-24673-2_3]
- Cao S, Pan Y Z, Zhang J S and Yu Q Y. 2014. Land cover patches based automatic multi-temporal remote sensing images registration. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 43(3): 290-297 (曹森, 潘耀忠, 张锦水, 喻秋艳. 2014. 土地覆盖图斑多时相遥感影像自动配准. 测绘学报, 43(3): 290-297 [DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0042])
- Chang H H, Wu G L and Chiang M H. 2019. Remote sensing image registration based on modified SIFT and feature slope grouping. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 16(9): 1363-1367 [DOI: 10.1109/LGRS.2019.2899123]
- Chen X Y. 2009. Image Registration Technology and MATLAB Programming. Beijing: Electronics Industry Press: 1-2 (陈显毅. 2009. 图像配准技术及其MATLAB编程实现. 北京: 电子工业出版社: 1-2)
- Ding L, Goshtasby A and Satter M. 2001. Volume image registration by template matching. Image and Vision Computing, 19(12): 821-832 [DOI: 10.1016/S0262-8856(00)00101-3]
- Fan C, Gong J Y, Zhu J J and Zhang L H. 2008. A sub-pixel registration approach of the ADS40 images based on optical flow. Science of Surveying and Mapping, 33(6): 13-15 (范冲, 龚健雅, 朱建军, 张立华. 2008. 基于光流的ADS40影像亚像素配准算法. 测绘科学, 33(6): 13-15 [DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2008.06.003])
- Feng R T, Li X H, Zou W L and Shen H F. 2017. Registration of multi-temporal GF-1 remote sensing images with weighting perspective transformation model//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Beijing, China: IEEE: 2264-2268 [DOI: 10.1109/ICIP.2017.8296685]
- Feng R T, Du Q Y, Li X H and Shen H F. 2019. Robust registration for remote sensing images by combining and localizing feature- and area-based methods. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 151: 15-26 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.03.002]
- Gong M G, Zhao S M, Jiao L C, Tian D Y and Wang S. 2014. A novel coarse-to-fine scheme for automatic image registration based on SIFT and mutual information. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(7): 4328-4338 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2281391]
- Goshtasby A. 1986. Piecewise linear mapping functions for image registration. Pattern Recognition, 19(6): 459-466 [DOI: 10.1016/0031-3203(86)90044-0]
- Goshtasby A. 1988. Registration of images with geometric distortions. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 26(1): 60-64 [DOI: 10.1109/36.3000]
- Guan X B, Shen H F, Gan W X and Zhang L P. 2015. Estimation and spatiotemporal analysis of winter NPP in Wuhan based on Landsat TM/ETM+ Images. Remote Sensing Technology and Application, 30(5): 884-890 (管小彬, 沈焕锋, 甘文霞, 张良培. 2015. 基于Landsat TM/ETM+影像的武汉市冬季NPP估算及其时空变化分析. 遥感技术与应用, 30(5): 884-890 [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.5.0884])

- Harris C and Stephens M. 1988. A combined corner and edge detector// Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester, UK: Alvey Vision Club: 263-284 [DOI: 10.5244/C.2.23]
- He M M, Guo Q, Li A, Chen J, Chen B and Feng X X. 2018. Automatic fast feature-level image registration for high-resolution remote sensing images. *Journal of Remote Sensing*, 22(2): 277-292 (何梦梦, 郭擎, 李安, 陈俊, 陈勃, 冯旭祥. 2018. 特征级高分辨率遥感图像快速自动配准. *遥感学报*, 22(2): 277-292) [DOI: 10.11834/jrs.20186420]
- Horn B K P and Schunck B G. 1981. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 17(1/3): 185-203 [DOI: 10.1016/0004-3702(81)90024-2]
- Kupfer B, Netanyahu N S and Shimshoni I. 2015. An efficient SIFT-based mode-seeking algorithm for sub-pixel registration of remotely sensed images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(2): 379-383 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2343471]
- Li X H, Hui N, Shen H F, Fu Y J and Zhang L P. 2015. A robust mosaicking procedure for high spatial resolution remote sensing images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 109: 108-125 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.09.009]
- Lin X F, Lin L W and Deng T. 2010. Remote sensing image registration based on SURF descriptor. *Computer Engineering*, 36(12): 216-218 (林晓帆, 林立文, 邓涛. 2010. 基于SURF描述子的遥感影像配准. *计算机工程*, 36(12): 216-218) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2010.12.074]
- Lindeberg T. 1998. Feature detection with automatic scale selection. *International Journal of Computer Vision*, 30(2): 79-116 [DOI: 10.1023/A:1008045108935]
- Liu G X and Wang L. 2007. An image registration method based on region selecting and feature points matching. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 18(8): 999-1002 (刘贵喜, 王蕾. 2007. 基于区域选择和特征点匹配的图像配准算法. *光电子·激光*, 18(8): 999-1002) [DOI: 10.3321/j.issn:1005-0086.2007.08.031]
- Liu L, Chen F and Liu J B. 2014. Optical flow and feature constrains algorithm for remote sensing image registration. *Computer Engineering and Design*, 35(9): 3127-3131 (刘璐, 陈甫, 刘建波. 2014. 基于特征约束与光流场方法的遥感图像配准. *计算机工程与设计*, 35(9): 3127-3131) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-7024.2014.09.030]
- Lowe D G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2): 91-110 [DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94]
- Lv J J, Wen G J, Li D R and Gao F. 2007. An automated image registration method based on corner feature. *Remote Sensing Technology and Application*, 22(3): 438-442 (吕金建, 文贡坚, 李德仁, 高峰. 2007. 一种基于角点特征的图像自动配准方法. *遥感技术与应用*, 22(3): 438-442) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2007.3.438]
- Ma W P, Zhang J, Wu Y, Jiao L C, Zhu H and Zhao W. 2019. A novel two-step registration method for remote sensing images based on deep and local features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(7): 4834-4843 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2893310]
- Murphy J M, Le Moigne J and Harding D J. 2016. Automatic image registration of multimodal remotely sensed data with global shearlet features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(3): 1685-1704 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2487457]
- Nagarajan S and Schenk T. 2016. Feature-based registration of historical aerial images by Area Minimization. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116: 15-23 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.02.012]
- Sedaghat A and Mohammadi N. 2019. High-resolution image registration based on improved SURF detector and localized GTM. *International Journal of Remote Sensing*, 40(7): 2576-2601 [DOI: 10.1080/01431161.2018.1528402]
- Shen H F, Meng X C and Zhang L P. 2016. An integrated framework for the spatio-temporal-spectral fusion of remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(12): 7135-7148 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2596290]
- Tang Y, Wang L J, Ma G C, Jia H J and Jin X. 2019. Emergency monitoring of high-level landslide disasters in Jinsha River using domestic remote sensing satellites. *Journal of Remote Sensing*, 23(2): 252-261 (唐尧, 王立娟, 马国超, 贾虎军, 靳晓. 2019. 利用国产遥感卫星进行金沙江高位滑坡灾害灾情应急监测. *遥感学报*, 23(2): 252-261) [DOI: 10.11834/jrs.20198405]
- Wang H X, Jin H J, Lei C Q, Jiang W S and Wang Y. 2015. A visually inspired variational method for automatic image registration. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 44(8): 893-899 (王慧贤, 靳惠佳, 雷呈强, 江万寿, 王艳. 2015. 视觉驱动的变分配准方法. *测绘学报*, 44(8): 893-899) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140281]
- Watson D F and Philip G M. 1984. Triangle based interpolation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 16(8): 779-795 [DOI: 10.1007/BF01036704]
- Wong A and Clausi D A. 2007. ARRSI: automatic registration of remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5): 1483-1493 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.892601]
- Wu X X. 2010. Image registration algorithm based on template matching and optical flow. *Journal of Wuxi Institute of Technology*, 9(6): 43-45 (吴迅兮. 2010. 基于模板匹配和光流法的图像配准方法. *无锡职业技术学院学报*, 9(6): 43-45) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-7880.2010.06.014]
- Zagorchev L and Goshtasby A. 2006. A comparative study of transformation functions for nonrigid image registration. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(3): 529-538 [DOI: 10.1109/TIP.2005.863114]
- Zhang Q, Cao Z G, Hu Z W, Jia Y H and Wu X L. 2015. Joint image registration and fusion for panchromatic and multispectral images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(3): 467-471 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2346398]

Zhang Q, Liu Z K, Pang Y W and Li W. 2003. Automatic registration of aerophotos based on SUSAN operator. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 32(3): 245-250 (张迁, 刘政凯, 庞彦伟, 李威. 2003. 基于SUSAN算法的航空影像的自动配准. *测绘学报*, 32(3): 245-250) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2003.03.012]

Zhu Z W, Shen Z F and Luo J C. 2011. Parallel remote sensing image registration based on improved SIFT point feature. *Journal of Remote Sensing*, 15(5): 1024-1039 (朱志文, 沈占锋, 骆剑承. 2011. 改进SIFT点特征的并行遥感影像配准. *遥感学报*, 15(5): 1024-1039) [DOI: 10.11834/jrs.20110216]

A registration algorithm based on optical flow modification for multi-temporal remote sensing images covering the complex-terrain region

FENG Ruitao¹, DU Qingyun^{1,2,3}, LUO Heng⁵, SHEN Huanfeng^{1,2,3}, LI Xinghua⁴, LIU Bo⁵

1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

4. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

5. Geomatics Center of Guangxi, Nanning 530023, China

Abstract: Image registration is a process of geometric alignment of two or more images acquired at different time, different sensors or under different conditions (weather, illumination, camera position and angle, etc.). Remote sensing image registration is an important prerequisite for subsequent processing, such as image fusion, image stitching, long time sequence analysis etc., and it is one of spotlights in the field of remote sensing information processing. High-precision registration of multi-temporal remote sensing images covering complex-terrain region is always a problem to break through. The conventional registration algorithms guiding by the transformation model, is enable to take the pixel-level geometric distortion into consideration, which means that the displacements of a pair of corresponding pixels is different from that of the other pair.

Under this circumstance, the global or local mapping function could not describe the geometric deformation between two images covering the complex-terrain region. Optical flow estimation calculates per-pixel displacements considering the very local distortions, even the pixel-level deformation in the computer vision field, providing a feasible and creative solution. It estimates displacement in x- and y-directions for a pair of corresponding pixels under the intensity and gradient consistency constraints, with resistant to the change of illumination. However, it is sensitive to land cover changes, which often lead to abnormal optical flow field and further affect the registered image after the coordinate transformation and resampling. To this end, a registration algorithm based on the optical flow modification for multi-temporal remote sensing images covering the complex-terrain region is proposed. On the preliminary optical flow field, Laplace of Gaussian operator is employed to detect the abnormal optical flow in Munsell color system. With the mask of abnormal optical flow based on the detection results, the Delaunay triangle curved surface interpolation is utilized to correct them, which is calculated by the around accurate pixel displacements. The coordinates in the sensed image are transformed, and the new pixel value is put on the corresponding pixel with the specified resampling method. Ultimately, the aligned image is generated. Experiments based on multi-temporal remote sensing images covering the complex-terrain region with land cover changes demonstrate that the proposed method achieves high-fidelity and high-precision registration compared with the results of the conventional methods.

Nevertheless, for registration of the image with sub-meter spatial resolution or image registration of different sensors, the difference of imaging angle, imaging mechanism, noise type etc. have an impact on the accuracy of the proposed algorithm. These remote sensing images are important data guarantee for fine research of earth surface and disaster assessment under poor imaging conditions in disaster region. How to realize high fidelity and high efficiency registration of the ultra-high resolution image or the multi-model image, is a problem that needs an in-depth study for us. In our future work, based on the proposed algorithm in this paper, research will be carried out specifically for the aforementioned problem. The aligned complex topographic region images will be applied to disaster monitoring, assessment, land use change analysis and other fields for an assessment to further improve our proposed method.

Key words: remote sensing, complex-terrain region, optical flow algorithm, Laplace of Gaussian, registration, Delaunay triangle curved surface interpolation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41701394)