

DOI:10.13203/j.whugis.20160146



文章编号:1671-8860(2018)06-0930-07

一种仿射不变量支持的准稠密控制点匹配算法

吴 炜^{1,2} 沈占锋³ 王显威³ 吴田军⁴ 王卫红¹

1 浙江工业大学计算机科学与技术学院,浙江 杭州,310023

2 浙江省海洋大数据挖掘与应用重点实验室,浙江 舟山,316022

3 中国科学院遥感与数字地球研究所,北京,100101

4 长安大学理学院,陕西 西安,710064

摘要:待配准的两景影像之间存在非均匀变形时,需要采用非刚性模型进行校正,而密集的、均匀分布的控制点是构建非刚性模型的基础,对此提出一种仿射不变量支持的准稠密控制点匹配算法。首先从两景影像提取特征点并进行稀疏匹配,根据稀疏匹配点消除两景影像间的整体偏移;然后以稀疏匹配点作为三角形的顶点,迭代构建特征点间的近邻三角形,并以面积之比作为仿射不变量,据此判断三角形顶点之间是否满足匹配关系,实现匹配点传播,从而获得准稠密的匹配点集;最后采用 HJ-Landsat 数据与南极地区 Landsat 7 ETM+ 数据进行实验,结果表明,本文方法能够提取均匀分布的准稠密控制点,在提取率等指标方面优于对比方法。

关键词:准稠密配准;匹配传播;非均匀变形;几何校正;仿射不变量

中图分类号:P237

文献标志码:A

配准是建立两景影像像素间的空间对应关系,使得相同地点的像素具有相同空间坐标的过程^[1]。采用的方法是从影像上提取明显几何特征(如角点、边缘、闭合多边形、局部极值点等),并利用特征向量进行描述,再通过相似程度的度量建立几何特征之间的对应关系,典型的特征点提取方法如 Susan、Harris 等^[2]。SIFT(scale invariant feature transform)算法由于具有旋转、缩放和一定程度的光照鲁棒性^[3],得到了广泛的应用,并发展出一系列改进算法,如 SURF^[4]等。该类方法的目的是提取一定数目的、定位精度高的匹配点(即稀疏匹配点),然后建立一种整体变形模型(即刚性模型)对影像进行校正。在影像上几何误差分布均匀的情况下,该方法能够取得较好的效果。

实际应用中,遥感影像上经常存在着随位置变化而改变的非均匀变形。例如,受倾斜观测和大幅宽影响,HJ 星 CCD 数据系统几何处理之后,同一扫描行上边缘定位误差比星下点大^[5];再如南北极地区冰川(冰舌)在陆地(海水)上移动,冰川(冰舌)移动速度和方向在不同区域各不相

同^[6]。上述局部变容易导致刚性模型失效,而非刚性配准利用弹性模型能够较好地拟合影像的局部变形,从而达到准确匹配的效果^[7],密集的、均匀分布的匹配点是非刚性配准成功的关键。

准稠密匹配是在提取稀疏匹配点的基础上,假设邻域满足仿射或者投影变形,在种子匹配点的邻域搜索新的匹配点,即匹配传播获得准稠密的匹配点云的过程^[8-9]。如唐丽等提出的区域增长匹配传播方法利用轮廓相似性以及局部细节相似性提取输入图像和参考图像中的匹配种子点,并以加权差值平方和作为目标函数将匹配关系向邻域传播,其中模板窗的大小随着纹理数量动态变化,搜索窗的大小与可信系数成反比^[10];许振辉等利用局部仿射模型建立局部区域的变形,并在规范化的区域上建立匹配传播,通过边传播邻域更新的方法提高了匹配点传播的精度^[11]。

准稠密匹配方法已应用于遥感领域,并在应用中取得了较好的效果^[12-16],但大多是假设邻域满足仿射或者投影变形的情况下实现匹配点的邻域传播,使得算法应用存在两个方面的不确定性:①局部窗口选取,即影像在多大局部范围内满足

收稿日期:2016-04-07

项目资助:国家自然科学基金(41301473);浙江省海洋大数据挖掘与应用重点实验室开放课题项目(OBDMA201511)。

第一作者:吴炜,博士,讲师,主要从事遥感数据处理及其遥感信息提取研究。wuwei@zjut.edu.cn

仿射变换;②局部仿射模型计算,即如何估计局部区域变形参数。虽然,根据影像内容自适应选择局部窗口^[10]和根据先验知识估计变形参数^[13]等方法都被提出来解决上述问题,但其目标均是准确地估计满足仿射不变特性的区域大小和参数。为此,本文提出一种仿射不变量支持的匹配点传播方法,其创新点在于根据特征点的近邻关系迭代构建三角形,以面积之比的仿射不变量作为指标,判断构成三角形的顶点是否匹配,从而实现匹配点传播,获取准稠密的匹配点,避免窗口大小选择和局部仿射模型估计。

1 匹配方法

输入影像 I_S 和参考影像 I_R 已经进行了系统几何校正,具有相对准确的地理坐标,但由于地表内容变化或不同传感器获取的影像具有不同的变形模式,使得两景影像之间仍然存在随位置变化而改变的非均匀形变,需要通过密集的、均匀分布的匹配点来描述并校正。本文采用与参考文献^[10]相似的多层次匹配方法,即首先提取稀疏的种子匹配点,再进行匹配点传播,从而得到准稠密的匹配点。本文方法包含 3 个主要步骤(见图 1)。

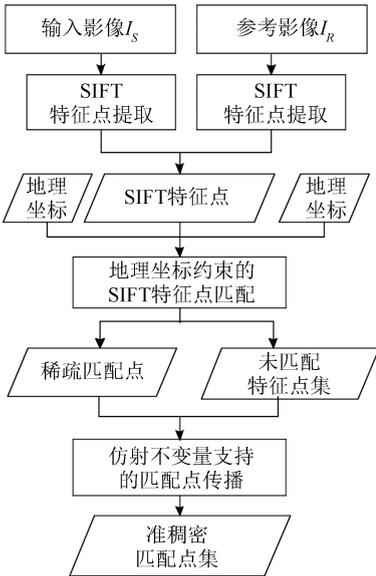


图 1 本文匹配方法流程图

Fig.1 Flow Chart of the Proposed Method

1)SIFT 特征点提取:分别对输入影像 I_S 和参考影像 I_R 进行 SIFT 特征点提取,获得的特征点集记为 P_S 和 P_R 。

2)地理坐标约束的 SIFT 特征点匹配:利用 SIFT 特征向量,结合地理坐标对 P_S 和 P_R 进行匹配,得到稀疏匹配点集 M_S :

$$M_S = \{ \langle P_S^1, P_R^1 \rangle, \langle P_S^2, P_R^2 \rangle \dots \langle P_S^t, P_R^t \rangle \} \tag{1}$$

式中, $\langle P_S^i, P_R^i \rangle \in M_S (i=1, 2 \dots t)$ 表示一组匹配点,其中 $P_S^i \in P_S, P_R^i \in P_R$ 。将 P_S^i 和 P_R^i 的广义并集记为 P_{SM} 和 P_{RM} ,表示已确定匹配点的特征点集。同时,将未找到匹配点的特征点集记为 P_{SU} 和 P_{RU} ,需要注意的是 P_{SU} 和 P_{RU} 也是 SIFT 特征点,但由于重复纹理等因素未获得匹配点,对此本文提出一种仿射不变量支持的特征点匹配方法,为从 P_{SU} 和 P_{RU} 提取新的匹配点。

3)仿射不变量支持的匹配点传播:通过仿射不变量支持的匹配点传播,从 P_{SU} 和 P_{RU} 中找到更多的匹配点,获得准稠密的匹配点集 M_Q 。

1.1 特征点提取与稀疏匹配

衡量特征点质量的指标主要有重复率、区分性、数量、空间分布等。其中,重复率是指两景影像提取到相同特征点数目与总特征点数目之比;区分性是指特征点之间相互区分的能力;数量和空间分布情况则决定了模型能够达到的精度及其在整景影像上的适应性。由于 SIFT 特征点具有较好的重复性和区分性^[1],同时考虑到交叉点等视觉特征点在中低分辨率影像上不明显,因而本文选用 SIFT 方法提取特征点。

记 I_S 和 I_R 提取的特征点集分别为 P_S 和 P_R :

$$P_S = \{ P_S^1, P_S^2 \dots P_S^m \} \tag{2}$$

$$P_R = \{ P_R^1, P_R^2 \dots P_R^n \} \tag{3}$$

局部纹理重复使得部分 SIFT 特征点区分性降低,从而可能导致误匹配,由于影像地理坐标标准程度相对较高,因而本文模仿人类由粗到细,由整体到局部的视觉认知过程,利用地理坐标对待匹配点进行约束,假设 $P_S^i \in P_S (i=1, 2 \dots m)$ 为待匹配点,按照地理位置在集合 P_R 中搜索到与点 P_S^i 最近邻的 N 个点 $N(P_S^i)$;然后在 $N(P_S^i)$ 中找到与 P_S^i 的 SIFT 特征相似程度最高的点将其作为匹配点,记得到的匹配点集为 M_S 。

SIFT 特征点一般采用特征向量之间的欧氏距离作为相似度度量,并根据最小距离进行匹配,即对于 $P_S^i \in P_S$,就是将其与 P_R 中的点一一进行相似度比较,将距离最小的 P_R^k 作为 P_S^i 的匹配点。由于重复纹理等因素的影响,可能存在与 P_S 之间距离最小的混淆点 P_R' ,从而导致误匹配。对此,引入最近点距离与次近点距离的距离比率 R 对候选匹配点进行筛选,当 R 小于阈值 R_T 时,将其作为匹配点,反之,作为误匹配点剔除。

阈值 R_T 是一个平衡误匹配和漏匹配的变量,该值设置得越大,则误匹配点增多而漏匹配点

减少;反之,误匹配点减少而漏匹配点增多。因而,为了保持匹配点集的正确率, P_{SU} 和 P_{RU} 中不可避免地存在漏匹配点。参考文献[3]建议将 R_T 设置为 0.8, 而稀疏匹配的目标是为了得到一定数目的准确匹配点。根据实验测试, 本文将其设置为 0.45 时, 能够较好地平衡特征点数目与准确率, 得到稀疏匹配结果 M_S , 并将其 R 由小到大排列, 表示匹配的正确可能性逐渐降低。

1.2 仿射不变量支持的匹配点传播

数学上, 在仿射变换下能够保持不变的变量, 称为仿射不变量(affine invariant)。三角形的面积之比是一个仿射不变量, 即 ΔA 和 ΔB 经过仿射变化后得到 $\Delta A'$ 和 $\Delta B'$, 其面积之比不变, 有:

$$\frac{S(\Delta A)}{S(\Delta B)} = \frac{S(\Delta A')}{S(\Delta B')} \quad (4)$$

若四边形 $DEFG$ 通过仿射变换得到四边形 $D'E'F'G'$ (见图 2), 则有:

$$\frac{S(\Delta DEF)}{S(\Delta DFG)} = \frac{S(\Delta D'E'F')}{S(\Delta D'F'G')} \quad (5)$$

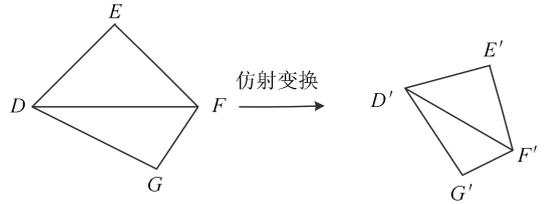


图 2 三角形面积之比的仿射不变量

Fig.2 The Affine Invariant of Ratio of Triangle Area

因此, 在满足仿射变换的条件下, 可以利用上述性质判断 D 和 D' 、 E 和 E' 、 F 和 F' 、 G 和 G' 是否构成匹配点。对此, 本文设计如下的匹配点传播算法(见图 3), 输入为经过稀疏匹配未获得匹配点的特征点集 P_{SU} 和 P_{RU} 、稀疏匹配点集 M_S , 输出为准稠密的匹配点集 M_Q , 具体步骤如下。

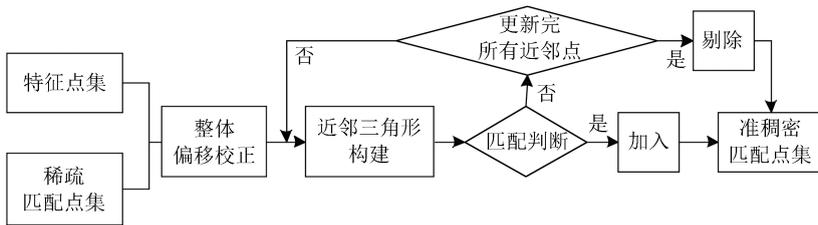


图 3 仿射不变量支持的匹配点传播方法

Fig.3 Flow Chart of Match Propagation Based on an Affine Invariant

1) 整体偏移校正: 在消除影像整体变形的基础上, 特征点集 P_S 和 P_R 中距离越近的点, 构成匹配点的可能性越高。根据这一特性, 本文首先利用初始匹配点集 M_S 估计影像间的整体偏移, 这里仅考虑水平和垂直方向的平移 O_x 和 O_y :

$$O_x = \sum_{i=1}^t x(p_i) - \sum_{i=1}^t x(p'_i) \quad (6)$$

$$O_y = \sum_{i=1}^t y(p_i) - \sum_{i=1}^t y(p'_i) \quad (7)$$

根据 O_x 和 O_y 对 P_S 中的点进行整体校正。其中, $P_S^i \in P_S$ 的校正方法为:

$$xC(P_S^i) = x(P_S^i) - O_x \quad (8)$$

$$yC(P_S^i) = y(P_S^i) - O_y \quad (9)$$

其中, $xC(P_S^i)$ 和 $yC(P_S^i)$ 表示点 P_S^i 校正之后的横坐标和纵坐标, 以下近邻关系计算等均是采用校正之后的坐标。

2) 邻近三角形搜索: 从稀疏匹配集 M_S 取出一组匹配点 A_1 和 A_1' , 并将其从 M_S 中删除。首先在 P_{SU} 中搜索 A_1 最近的两个点 A_2 和 A_3 , 然后找到与直线 A_1A_2 、 A_2A_3 和 A_1A_3 距离最近的点 A_4 , A_4 可能与 A_1A_2 、 A_2A_3 和 A_1A_3 中的某条边

最近(见图 4)。在 P_{RU} 中找到与 A_1' 最近和次近的点 A_2' 和 A_3' , 假设 A_2 、 A_2' 以及 A_3 和 A_3' 分别构成一对匹配点。然后, 对应地寻找到 A_4' , 即 A_4 与 A_2A_3 最近时, 则搜索与 $A_2'A_3'$ 最近的点作为 A_4' 。

3) 仿射不变量构建: 为了验证上述点是否满足匹配关系, 定义三角形面积之比的差 ΔS :

$$\Delta S = \left| \frac{S_{\Delta A_1 A_2 A_3}}{S_{\Delta A_2 A_3 A_4}} - \frac{S_{\Delta A_1' A_2' A_3'}}{S_{\Delta A_2' A_3' A_4'}} \right| \quad (10)$$

理论上, 若三角形所在局部区域满足仿射变换, 且 A_2 和 A_2' 、 A_3 和 A_3' 、 A_4 和 A_4' 分别构成匹配点, 则 $\Delta S = 0$ 。由于三角形面积计算、特征点定位存在误差, 因而, 定义阈值 T_e 以判断特征点是否满足匹配关系。

4) 匹配关系判断: ΔS 和 T_e 之间可能存在以下两种关系: ①若 $\Delta S \leq T_e$, 则可认为 A_2 和 A_2' 、 A_3 和 A_3' 、 A_4 和 A_4' 构成匹配点, 将其加入到匹配点集 M_S 和 M_Q , 然后回到第 2) 步; ②若 $\Delta S > T_e$, 则 A_2 和 A_2' 、 A_3 和 A_3' 、 A_4 和 A_4' 点中存在误匹配点。首先, 更新 A_4' 的近邻点, 即将与直线 $A_2'A_3'$ 次近的点替换 A_4' , 重新计算 ΔS 。如果

$\Delta S \leq T_e$, 则按照步骤 4) 的第①步处理; 否则, 继续更换 A_4' 的近邻点, 直到找到满足条件 $\Delta S \leq T_e$ 或者更新完 A_4' 的 k 个近邻点, 结束迭代。如果 A_4' 的 k 个近邻点判断后, 均不满足构成匹配的条件, 则依次更新 A_3' 、 A_2' 、 A_1 、 A_3 、 A_2 的 k 个近邻点, 并进行匹配关系判断。

5) 误匹配点剔除: 若更新完 A_4' 、 A_3' 、 A_2' 、 A_1 、 A_3 、 A_2 的 k 个近邻节点之后, 仍然不满足构成匹配的条件, 则说明 A_1 和 A_1' 可能是误匹配点, 将其从匹配点集 M_S 和 M_Q 中删除。

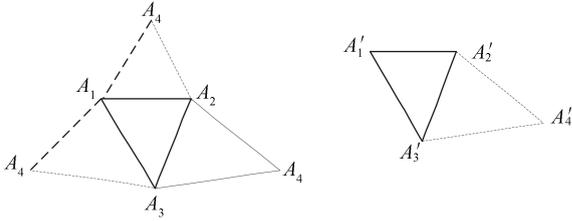


图 4 对应三角形构建示意图

Fig.4 Diagram of Corresponding Triangles Construction Method

6) 特征点循环匹配: 依次从 M_S 取出匹配点, 重复步骤 2)~5), 直到 P_{SU} 、 P_{RU} 或 M_S 中所有特征点都进行了处理, 而 M_Q 记录了获得的匹配点集。

利用该变量判断点与点之间是否满足匹配关系, 与传统方法相比, 具有两个优势: ①仅要求特征点所在的局部区域满足仿射变换, 而无需估计满足仿射变换局部窗口的大小和仿射变换的具体参数; ②基于特征点之间的关系进行判断, 避免了利用仿射变换重采样给区域相似性比较带来的误差。

T_e 和 k 是本文方法需要设置的两个参数, 影响着算法的精度和计算效率。其中, T_e 决定了能够克服局部形变的大小。随着 T_e 增大, 能够克服的变形增大, 获得正确匹配点的可能性增加; 但也会带来误匹配点数目增多, 导致正确特征点匹配率 TR 下降。根据实验结果, 设置 $T_e = 0.01$ 左右时, 能够较好地平衡 TR 和正确的匹配点数 T 。 k 决定了候选匹配点的搜索范围, 值越大, 获得正确匹配点的可能性增大, 引入误匹配的概率也随之增加; 获得正确匹配点所需要的迭代次数也会增加, 从而导致运算量上升; k 设置得小, 容易造成漏匹配, 难以获得足够数目的匹配点。设置 $k = 7$, 能够较好地平衡迭代次数和正确匹配点数目。

2 实验

2.1 实验及其评价方法

为了评价本文方法, 选取两组数据进行实验。

第 1 组数据是 HJ 星 CCD 数据和 Landsat 5 TM 数据, 影像间的变形主要是地形、HJ 星幅宽大等因素引起的非均匀形变, 记为实验 1。第 2 组数据是南极地区不同时间 Landsat 7 获取的 ETM+ 全色数据, 受复杂流体力学影响, 不同区域的冰川运动速度和方向(即运动模式)各异, 通过特征点匹配确定冰川运动模式, 记为实验 2。

对比方法上, 文献[10]和文献[13]都是通过种子点扩展出稠密或准稠密的匹配点, 拟解决的问题和技术思路与本文类似, 因而将其作为对比方法。评价指标方面, 采用正确匹配率(TR)、误匹配率(FR)、漏匹配率(OR)3 个指标, 计算方法分别为:

$$TR = \frac{T}{F + T} \times 100\% \quad (11)$$

$$FR = \frac{F}{F + T} \times 100\% \quad (12)$$

$$OR = \frac{O}{O + T} \times 100\% \quad (13)$$

式中, T 表示提取的特征点中正确匹配点的数目; F 表示提取的特征点中误匹配点的数目; O 表示 SIFT 特征点构成匹配关系, 但是算法未能提取的特征点数目。

参考匹配点方面, 准稠密匹配选取的控制点数量庞大, 人工检验费时费力, 某些情况下甚至不可能, 因此本文采用一种人工目视与机器结合的特征检验方法。从 3 种方法提取的匹配点中各选取 1/3 构成一个新的匹配点集, 再利用随机一致性采样剔除误匹配点, 然后进行薄板样条曲线(thin plate spline, TPS)模型解算, 用校正残差 e 表示匹配点质量:

$$e = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (14)$$

其中, x 和 y 为输入影像的像素坐标; x' 和 y' 为根据 TPS 模型校正后的坐标。将 $e > 5$ 的匹配点作为误匹配点; $e < 1$ 作为正确点; 对 $1 \leq e \leq 5$ 的匹配点, 结合邻近点的变形方向及大小进行人工目视判断。

2.2 实验结果与评价

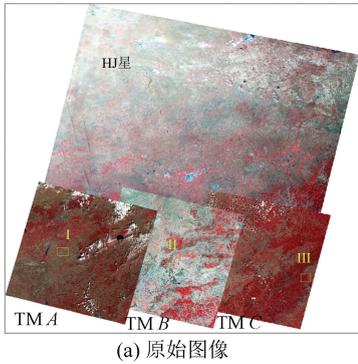
实验 1 采用一景 HJ1B-CCD 影像和 3 景 Landsat 5 TM 影像, 其元数据如表 1 所示, 标准假彩色合成图像如图 5(a)所示, 为了描述方便, 将 3 景 TM 影像分别记为 A、B、C。研究区位于山地与平原过渡地带, 高程变化较大, TM 影像进行了地形校正, 几何定位精度在 1 个像素以内, 不同轨道影像间接边良好; HJ 星数据由于大幅宽、地形等因素影响存在非均匀变形, 图 5(a)中位置

I、II、III 分布在影像边缘的 3 处,按照相同比例放大之后的卷帘显示如图 5(b)、5(c)和 5(d)所示,线段端点为同一地面点在影像上的不同位置,可以看出变形误差大小和方向各不一致,因而将 HJ 星影像校正到 TM 影像。

表 1 实验 1 影像的元数据

Tab.1 The Metadata of Images Used in Experiment 1

影像	卫星传感器	轨道号	获取日期
HJ 星	HJ1B-CCD	5/64	2012-08-29
TM 影像 A	Landsat 5 TM	126-032	2010-08-31
TM 影像 B	Landsat 5 TM	125-032	2010-07-05
TM 影像 C	Landsat 5 TM	124-032	2010-08-15



(a) 原始图像

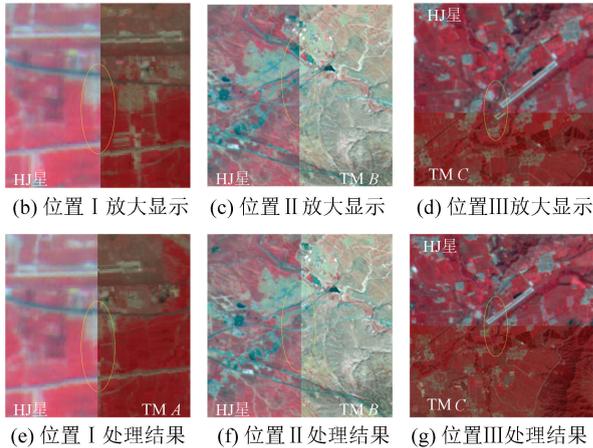


图 5 实验 1 原始数据及其处理结果

Fig.5 The Original Image and Results of Experiment 1

设置 $T_e=0.01, k=7$,使用本文方法提取匹配点,然后采用 TPS 作为校正模型对影像进行几何校正,图 5(b)、5(c)和 5(d)的处理结果分别如图 5(e)、5(f)和 5(g)所示,道路、河流等线性地物贴合紧密,配准效果良好,基本达到亚像素级。进一步地,利用半透明、卷帘等显示方法对影像各个区域进行目视检查发现,道路、河流、山脊等地物的连接紧密,配准效果良好,校正误差分布均匀,不同区域的配准精度达到 1 个像素以内。

虽然采用了计算机辅助的方式进行配准参考点判断,但影像区域太大,匹配点数目达到 20 多万个,人工检查匹配点工作量太大,因而从 A、B、C 这 3 景影像上各选取 2 块 $1\ 000 \times 1\ 000$ 像素大小的检验区域进行质量检查,检验区域尽量分散且靠近影像边缘,地形起伏大且地表覆被多样。统计指标结果如表 2 所示,可以看出:①本文方法提取的正确匹配点数目高于对比方法;②匹配点之间互相约束,精度较高,正确率达到 85% 以上,高于对比方法;③匹配点在影像上分布均匀,经统计平均 50×50 (像素)影像块上就存在一个匹配点,尤其是山区等变形较大区域存在一定数量的匹配点,而对比方法在山区变形较大区域估计仿射模型困难,导致特征点数目较少。

实验 2 选取一组南极地区的 Landsat 7 获取的 ETM+ 的全色波段影像,影像获取日期分别为 2002-11-18 和 2003-02-28,裁剪大小为 $2\ 000 \times 2\ 000$ 像素区域进行实验,如图 6(a)和 6(b)所示。由于南极地区受人类活动影响较小,冰川运动模式是气候变化响应的重要指标。常用方法是通过特征点建立像素间的匹配关系,根据像素点的位移估计冰川运动的速度和方向,本文实验中以 2002-11-18 的影像为参考,估计 2003-02-28 的相对流动速度和方向。

表 2 实验 1 的统计指标

Tab.2 The Statistical Metrics of Experiment 1

编号	T/个			TR/%			OR/%			FR/%		
	本文方法	文献[13]	文献[10]									
1	6 243	5 997	1 026	90.34	87.53	83.32	8.59	12.20	—	9.66	12.47	16.68
2	3 357	2 686	2 202	92.17	85.63	82.14	9.54	27.63	—	7.83	14.37	17.86
3	5 215	4 068	3 336	93.72	90.62	67.21	10.50	30.19	—	6.28	9.38	32.79
4	3 819	3 055	2 505	89.17	80.16	79.65	10.58	28.47	—	10.83	19.84	20.35
5	4 915	3 932	3 224	88.63	79.15	75.62	7.99	26.39	—	11.37	20.85	24.38
6	2 785	2 228	1 827	85.13	80.25	73.62	13.59	30.87	—	14.87	19.75	26.38

设置 $T_e=0.012, k=7$,获取的控制点如图 6(c)所示,线段的方向和长度分别表示了冰川移动的方向和速度。本文方法能够在纹理贫乏区域

获得较为密集的控制点,从而较好地描述不同区域海冰的运动速度和方向。图 6(d)中, d_1, d_2 和 d_3, d_4 分别表示两个局部区域选取的匹配点,箭

头尾端分别表示两景影像上的对应像素。由图 6 可见,控制点选取准确,从箭头的长度和方向看出变形大小在局部区域略有不同,从而说明在较小区域内,冰川运动模式也存在微小的变化。

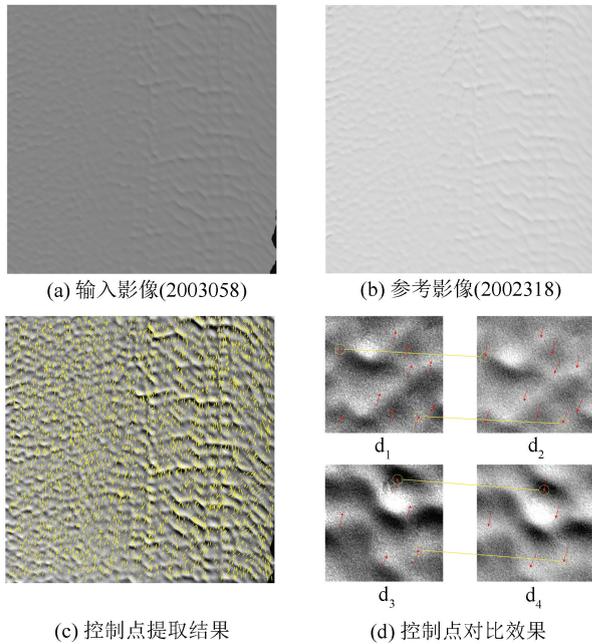


图 6 实验 2 原始数据及其实验结果

Fig.6 The Original Image and Results of Experiment 2

3 结 语

为了获得精度较高的匹配点集,本文提出了一种仿射不变量支持的匹配点传播的方法,该方法避免了仿射不变区域窗口大小、仿射变换参数估计两个问题带来的不确定性。选取 HJ 星数据与经过地形校正的 TM 数据进行配准,实验结果说明本文方法能够克服局部变形,具有较高的几何校正精度。此外,利用南极地区 ETM+ 数据估计冰川运动模式说明本文方法能够有效获得纹理贫乏区域的准稠密匹配点,具有较高的精度。

然而,本文研究也存在一些不足:①本文方法仅利用仿射不变量作为度量,以特征点之间的空间关系判断是否满足匹配关系,在地表内容变化情况下,一定局部区域的特征点不存在对应关系,本文方法会导致较多的误匹配点;②本文方法需要进行迭代构建近邻三角形中距离计算等复杂浮点计算,算法的效率较低,后续可以考虑通过算法优化或者采用并行算法提高计算效率,提高算法的实用性;③本文对整景 HJ 星影像的内存及其计算资源消耗太大,必须分块才能进行处理,但分块处理给算法的效率和精度带来了一些不确定性,需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Zitova F J. Image Registration Methods: A Survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(11): 977-1 000
- [2] Mikolajczyk K, Schmid C. Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(1): 63-86
- [3] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110
- [4] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-Up Robust Features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359
- [5] Huang Qingqing, Zhao Hongzhi, Yang Jian, et al. Geometric Rectification and Error Analysis for HJ-1 CCD Image with Wide Coverage Feature [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(12): 1 425-1 429 (黄青青, 赵鸿志, 杨健, 等. 环境星宽覆盖特征 CCD 影像几何定位及误差分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(12): 1 425-1 429)
- [6] Heid T, Käab A. Evaluation of Existing Image Matching Methods for Deriving Glacier Surface Displacements Globally from Optical Satellite Imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 118: 339-355
- [7] Zagorchev L, Goshtasby A. A Comparative Study of Transformation Functions for Nonrigid Image Registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(3): 529-538
- [8] Lhuillier M, Quan L. Match Propagation for Image-Based Modeling and Rendering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(8): 1 140-1 146
- [9] Lhuillier M, Quan L. A Quasi-Dense Approach to Surface Reconstruction from Uncalibrated Images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(3): 418-433
- [10] Tang Li, Wu Chengke, Liu Shigang, et al. Image Dense Stereo Matching by Technique of Region Growing [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2004, 27(7): 936-943 (唐丽, 吴成柯, 刘侍刚, 等. 基于区域增长的立体像对稠密匹配算法 [J]. 计算机学报, 2004, 27(7): 936-943)
- [11] Xu Zhenhui, Zhang Feng, Sun Fengmei, et al. Quasi-Dense Matching by Neighborhood Transfer for Fish-Eye Images [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(9): 1 159-1 167 (许振辉, 张峰, 孙凤梅, 等. 基于邻域传递的鱼眼图像的准稠密匹配 [J]. 自动化

- 学报, 2009, 35(9): 1 159-1 167)
- [12] Zhu Q, Wu B, Tian Y. Propagation Strategies for Stereo Image Matching Based on the Dynamic Triangle Constraint [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(4): 295-308
- [13] Yang Huachao, Zhang Shubi, Zhang Qiuzhao. Least Square Matching Methods for Wide Base-Line Stereo Images Based on SIFT Features [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(2): 537-543(杨化超, 张书毕, 张秋昭. 基于 SIFT 的宽基线立体影像最小二乘匹配方法 [J]. 测绘学报, 2010, 39(2): 537-543)
- [14] Yao Guobiao, Deng Kazhong, Ai Haibin et al. An Algorithm of Automatic Quasi-dense Matching and Three-dimensional Reconstruction for Oblique Stereo Image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(7): 843-849(姚国标, 邓喀中, 艾海滨, 等. 倾斜立体影像自动准稠密匹配与三维重建算法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(7): 843-849)
- [15] Wu Jun, Yao Zexin, Cheng Menmen, et al. Airborne Oblique Stereo Image Dense Matching by Integrating SIFT and SGM Algorithm [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3): 431-442(吴军, 姚泽鑫, 程门门, 等. 融合 SIFT 与 SGM 的倾斜航空影像密集匹配 [J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 431-442)
- [16] Li Quanwen, Zhao Weilin, Yang Xiaomei, et al. FAST Algorithm-Based Geometric Accurate Rectification of Large HJ Satellite Image [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2014, 26(4): 14-22(李全文, 赵卫林, 杨晓梅, 等. 基于 FAST 测点的大幅宽 HJ 星图像几何精纠正方法 [J]. 国土资源遥感, 2014, 26(4): 14-22)

An Affine Invariant-based Match Propagation Method for Quasi-dense Image Registration

WU Wei^{1,2} SHEN Zhanfeng³ WANG Xianwei³ WU Tianjun⁴ WANG Weihong¹

¹ College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

² Key Laboratory of Oceanographic Big Data Mining & Application of Zhejiang Province, Zhoushan 316022, China

³ Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

⁴ College of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract: Non-rigid models are needed to correct the non-uniform deformation between two images; dense, uniformly distributed control points is the premise of constructing such non-rigid models. This paper puts forward an affine invariant-based match propagation method for quasi-dense image registration. Interest points are extracted from the input image and reference image, respectively; and sparsely matched. According to the sparsely matched points, the global offset between the two images is estimated and corrected. A corresponding adjacent triangle is established using the interest points in the two images interactively; and an affine invariant, the ratio of the triangle area, is employed to determine whether the vertices in the two triangles match or not. Through this method, the spare initial seed matching points propagate to other points of interest to obtain quasi-dense match. The HJ-Landsat image and ETM+ data of Antarctic data are taken in an experiment, the results show that our method can extract dense and uniformly distributed matching points while outperforming other state of art methods in true positive ratio.

Key words: quasi-dense match; match propagation; non-uniform deformation; geometric correction; affine invariant

First author: WU Wei, PhD, lecturer, specializes in remote sensing data processing and information extraction, E-mail: wuwei@zjut.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41301473; the Key Laboratory of Oceanographic Big Data Mining & Application of Zhejiang Province, No. OBDMA201511.