



## 密集光流法正射影像镶嵌线智能提取

张春森, 张月莹, 郭丙轩, 任力

引用本文:

张春森, 张月莹, 郭丙轩, 任力. [密集光流法正射影像镶嵌线智能提取](#)[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2022, 47(2): 261–268.

ZHANG Chunsen,ZHANG Yueying,GUO Bingxuan,REN Li. [Dense Optical Flow Method for Intelligently Extracting Seamlne of Orthophotos](#)[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(2): 261–268.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

#### Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

##### [基于深度学习的立体影像密集匹配方法综述](#)

A Review of Dense Stereo Image Matching Methods Based on Deep Learning

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(2): 193–202 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200620>

##### [顾及各向异性加权力矩与绝对相位方向的异源影像匹配](#)

Heterologous Images Matching Considering Anisotropic Weighted Moment and Absolute Phase Orientation

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(11): 1727–1736 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200702>

##### [利用方向相位特征进行多源遥感影像匹配](#)

A Multi-source Remote Sensing Image Matching Method Using Directional Phase Feature

武汉大学学报 · 信息科学版. 2020, 45(4): 488–494 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180445>

##### [利用动态上采样滤波深度网络进行多角度遥感影像超分辨率重建](#)

Multi-angle Remote Sensing Images Super-Resolution Reconstruction Using Dynamic Upsampling Filter Deep Network

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(11): 1716–1726 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200651>

##### [基于通讯信号塔RCS建模的SAR影像绝对辐射定标](#)

SAR Image Absolute Radiometric Calibration Based on RCS Modeling of Communication Tower

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(11): 1746–1755 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210052>

DOI:10.13203/j.whugis20200573



文章编号:1671-8860(2022)02-0261-08

# 密集光流法正射影像镶嵌线智能提取

张春森<sup>1</sup> 张月莹<sup>1</sup> 郭丙轩<sup>2</sup> 任 力<sup>3</sup>

1 西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西 西安,710054

2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

3 西安中科星图空间数据技术有限公司,陕西 西安,710100

**摘要:**针对正射影像拼接时影像间存在复杂的几何错位问题,提出一种基于密集光流法正射影像镶嵌线智能搜索方法。利用影像密集光流、梯度信息和灰度信息构造代价影像并视其为带权无向图,以图割模型为基础,采用最大流最小割原理自诊断搜索镶嵌线。实验结果表明,采用所提方法得到的稀疏建筑区镶嵌线代价像素数大于100的仅占路径长度的0.7%,且相较于现有商业软件OrthoVista效率提升17%。对人工建筑物与正射影像间投影差较大的区域可实现自动规避,大大降低了几何错位的概率,可明显改善影像拼接的几何错位现象,实现正射影像镶嵌线搜索的智能化。

**关键词:**数字正射影像;密集光流;镶嵌线;图割模型;智能搜索

**中图分类号:**P232

**文献标志码:**A

数字正射影像(digital orthophoto map,DOM)是利用数字高程模型(digital elevation model,DEM)对单张影像进行数字微分纠正,然后将多张影像镶嵌得到。由于DEM中不包含明显地物(城市区域建筑物等)高程信息,在明显地物区域,影像间存在较大几何错位,该现象的存在降低了DOM的平面精度,影响了人的视觉感受。现有方法多依赖于人工特征和辅助数据,尚未有可自动搜索得到高质量镶嵌线的方法,在实际生产中依旧需要大量人工编辑。因此,镶嵌线自动搜索仍然是DOM实际生产中尚未解决的瓶颈问题。

文献[1-4]提出了基于数字表面模型(digital surface model,DSM)、正射影像高程同步模型、重叠区域Voronoi图等具有先验信息的辅助数据对镶嵌线进行搜索,基于辅助数据的方法能较好地避开房屋等独立地物,速度快且效率高,但辅助数据的精确度直接影响镶嵌线的效果。文献[5]提出通过高斯滤波将影像分为低频影像与高频影像,利用加权平滑算法与动态规划算法分别拼接低频与高频影像,将两者线性组合得到最终拼接影像,该方法解决了无人机影像拼接中产生的

“鬼影”问题,尽可能地避免了拼接线两侧产生几何错位。文献[6-8]提出了基于影像分割的镶嵌线搜索方法,其中文献[6]方法首先生成相邻影像的初始镶嵌线,然后通过分水岭分割方法提取形态学边界点和边界线,最后利用Dijkstra算法获得最佳镶嵌线,但该方法易出现过分割的现象,导致生成的镶嵌线过于弯曲。文献[7]利用图割算法将DOM的拼接转化为图割模型优化问题,搜索到的DOM重叠区域的最小割即为最优拼接线。文献[8]将语义信息引入DOM的图像分割中,进而搜索最优镶嵌线。文献[9]通过视差图进行镶嵌线搜索,首先利用DOM生成的视差图提取影像中的人工建筑物,然后采用贪婪搜索算法生成镶嵌线,该方法对规避人工建筑等区域具有很好的效果。文献[10]提出了一种最小化最大边权的镶嵌线自动搜索方法,首先利用视差图和差值影像叠加生成差异影像并视其为带权无向图,然后采用最小化最大边权算法搜索最佳镶嵌线作为拼接线,该方法适用于影像差异较小的区域,当建筑物较高、完全遮挡道路时,拼接线不能避免穿过建筑物。

通过对现有方法的分析发现,已有方法虽能

收稿日期:2021-07-28

项目资助:国家自然科学基金(92038301);陕西省自然科学基金(2018JM5103);自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室开放基金(KF-2018-03-052)。

第一作者:张春森,博士,教授,主要从事摄影测量计算机视觉与遥感应用研究。zhchunsen@aliyun.com

通讯作者:郭丙轩,博士,教授。mobilemap@163.com

够在一定程度上正确处理DOM的拼接问题,但很难表达出影像间明显地物的几何差异,对建筑物边缘描述不连续,易使镶嵌线穿越建筑物,产生几何错位现象。文献[5,7]虽然效果很好,但自动化程度不高。为此,本文提出一种基于密集光流法的数字正射影像镶嵌线智能搜索算法,基于DOM间的光流值表示同一目标点在不同影像重叠区域的位置差异,采用光流场欧氏距离的大小表示DOM间重叠区域差异的大小,将光流值引入代价函数,依据图割能量函数寻找最小割,实现DOM镶嵌线的智能搜索。光流值的引入可以使计算机自动识别并规避人工建筑物,不需要如商业软件OrthoVista中后续的人工调整镶嵌线的步骤,体现了本文方法的智能化。

## 1 本文方法技术流程

本文方法流程如图1所示,主要步骤包括:对原始单张正射影像进行预处理,处理后影像生成金字塔模型并进行密集光流场计算。结合密集光流场、灰度信息、梯度信息构造代价函数,建立图割能量模型。由于在利用影像构建图割模型过程中,每个像素对应图割模型中的节点,图像中像素的4个邻域对应图割模型中的边,每个边的权值即为该像素与其邻域像素能量函数值的代价和,因此在权重图中利用图割能量模型求得最小割,即为最优镶嵌线。

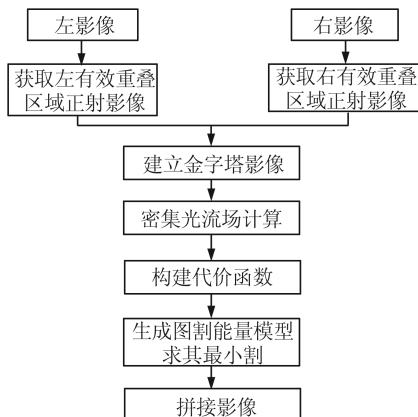


图1 本文方法流程图

Fig.1 Flowchart of the Proposed Method

## 2 密集光流法

光流表示一帧图像中代表同一对象的像素点移动到下一帧的移动量,使用二维向量表示,反映了同一目标点在相邻影像间的对应关系。密集光流法通过计算图像中每个像素的光流值,

得到密集光流场,光流场图上的像素点表示其对应的相邻影像同名点的位置差异,能很好地表达左右影像投影差。本文利用DOM间的密集光流场欧氏距离的大小探测DOM间同一目标在重叠区域影像中位置差异的大小,以此作为镶嵌线查找中需避开区域的代价之一。

### 2.1 密集光流法原理

传统的稀疏光流算法只对影像序列中少数具有明显特征的点进行光流场计算,本文采用文献[11]提出的密集光流法逐像素计算光流值,该方法可以使用任何程度的多项式展开,即用多项式近似每个像素的邻域。本文采用二次多项式逼近,在局部坐标空间中,将邻域信号 $f(x)$ 近似表示为:

$$f(x) \sim x^T A x + b x + c \quad (1)$$

式中, $x$ 为像素点在影像中的二维坐标, $x = (x, y)^T$ ; $A$ 为对称矩阵,通过邻域信息的最小二乘加权拟合得到; $b$ 为 $2 \times 1$ 的矩阵向量; $c$ 为标量。使用归一化卷积来估计该二次多项式的系数。

假设连续两帧影像 $I_1$ 和 $I_2$ 的整体位移量为 $d$ ,根据式(1)可以构造出对影像 $I_1$ 和 $I_2$ 的局部邻域多项式估计,计算式为:

$$f_1(x) = x^T A_1 x + b_1^T x + c_1 \quad (2)$$

根据整体位移量 $d$ 构造影像 $I_2$ 的邻域信号 $f_2$ ,计算式为:

$$f_2 = f_1(x - d) = x^T A_1 x + (b_1 - 2A_1 d) + d^T A_1 d - b_1^T d + c_1 \quad (3)$$

假设两个信号的二次多项式系数相等,可得关系式:

$$A_2 = A_1 \quad (4)$$

$$b_2 = b_1 - 2A_1 d \quad (5)$$

$$c_2 = d^T A_1 x - b_1^T d + c_1 \quad (6)$$

在 $A_1$ 为非奇异矩阵的情况下,即 $|A| \neq 0$ 时,可以通过式(5)推导出位移 $d$ ,计算式为:

$$d = -\frac{1}{2} A_1^{-1} (b_2 - b_1) \quad (7)$$

如式(2)所示,对两帧影像 $I_1$ 和 $I_2$ 进行多项式展开,其系数分别为 $A_1(x)$ 、 $b_1(x)$ 、 $c_1(x)$ 和 $A_2(x)$ 、 $b_2(x)$ 、 $c_2(x)$ ,在理想情况下, $A_1(x) = A_2(x)$ ,但在实际情况中,不能用一个局部多项式逼近整幅影像,也不能仅通过当前帧的整体平移得到下一帧,因此对式(7)中的各元素进行近似与简化表达,计算式为:

$$A(x) = \frac{A_1(x) + A_2(x)}{2} \quad (8)$$

$$\Delta b(x) = -\frac{1}{2} (b_2(x) - b_1(x)) \quad (9)$$

基于上述条件,可以得到主要约束条件,对光流进行求解,计算式为:

$$A(x)d(x) = \Delta b(x) \quad (10)$$

根据式(10)在每个像素邻域上构建下式,使得位移  $d(x)$  在像素邻域内最小化:

$$\sum_{\Delta x \in I} w(\Delta x) \|A(x + \Delta x)d(x) - \Delta b(x + \Delta x)\|^2 \quad (11)$$

式中,  $w(\Delta x)$  是像素的邻域  $I$  中各点的权函数。

将式(11)最小化可得:

$$d(x) = \left( \sum w A^T A \right)^{-1} \sum w A^T \Delta b \quad (12)$$

$$e(x) = \left( \sum w \Delta b^T \Delta b \right) - d(x)^T \sum w A^T \Delta b \quad (13)$$

式中,  $e(x)$  的最小值用作反向置信度值, 值越小, 置信度越高。

根据运动模型对光流场进行参数化可以提高鲁棒性, 采用 8 参数运动模型可得:

$$d_x(x, y) = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_7 x^2 + a_8 x y \quad (14)$$

$$d_y(x, y) = a_4 + a_5 x + a_6 y + a_7 x y + a_8 y^2 \quad (15)$$

引入系数矩阵  $S$  和  $p$ , 计算式为:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 & x^2 & xy \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & xy & x^2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$p = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8)^T \quad (17)$$

则有  $d = Sp$ , 将其代入式(11), 可得加权最小二乘:

$$\mu \|d(x) - d_0(x)\|^2 + \sum_{\Delta x \in I} w(\Delta x) \|A(x + \Delta x)d(x) - \Delta b(x + \Delta x)\|^2 \quad (23)$$

式中,  $\mu$  为常数。

当表达式对位移的约束条件足够时, 该项则不产生影响, 否则对位移进行约束。将式(23)最小化可得:

$$d(x) = \left( \mu I + \sum w A^T A \right)^{-1} (\mu d_0(x) + \sum w A^T \Delta b) \quad (24)$$

## 2.2 光流法金字塔模型

密集光流法适用于小场景移动, 当计算大运动场景中目标点光流值时, 需先建立影像的金字塔模型。采用金字塔模型计算密集光流场的策略是通过缩小影像尺寸来缩小相邻影像帧间的大尺度位移, 从而使其适用于光流法的约束条件。若原影像中目标像素的光流为  $d(x)$ , 则金字塔影像中每一层的光流为  $d^l(x) = d(x)/2^l$ , 其中  $l$  代表金字塔影像的层数。

如图 2 所示, 影像 1 和影像 2 分别为相邻两帧

$$\sum_i w_i \|A_i S_i p - \Delta b_i\|^2 \quad (18)$$

式中,  $i$  是像素邻域坐标索引, 可得出:

$$p = \left( \sum_i w_i S_i^T A_i^T A_i S_i \right)^{-1} \sum_i w_i S_i^T A_i^T \Delta b_i \quad (19)$$

为了避免位移过大造成的误差, 需引入先验位移  $d_0(x)$ , 将式(8)和式(9)变换为:

$$A(x) = \frac{A_1(x) + A_2(\tilde{x})}{2} \quad (20)$$

$$\Delta b(x) = -\frac{1}{2} (b_2(\tilde{x}) - b_1(x)) + A(x)d(x) \quad (21)$$

其中,  $\tilde{x}$  和  $x$  的关系式为:

$$\tilde{x} = x + d_0(x) \quad (22)$$

将式(12)与式(20)~式(22)联立, 得到估计位移值  $d(x)$ 。在计算  $\Delta b$  时, 将先验位移  $d_0(x)$  设置为 0, 根据式(19)~式(22)计算得到新的  $d_0(x)$ , 利用其求解新的  $\Delta b$ , 得到更加精确的  $d_0(x)$ , 多次迭代, 直到  $\Delta b$  收敛得到的位移估计精确逼近真实位移。

使用上述原理计算光流值时, 通过对位移场的观察可以看出大部分噪声来自无明显结构或对比度非常低的区域。在这些区域会产生孔径问题, 即约束条件小于求解未知量个数的现象。为此, 对式(11)进行改进, 添加正则项, 将背景场加到不确定的估计上, 实现序列中的运动目标的光流场局部平滑, 计算式为:

影像, 逐层对其降采样, 降低影像分辨率, 同时影像间的运动尺度也在减小。在金字塔模型中, 首先计算顶层影像的光流, 此时其先验位移  $d(x) = 0$ , 由此得到顶层影像间的位移为  $f_L$ , 这样得到的位移向量  $d^l = (d_x^l, d_y^l)^T$  就足够小; 然后逐层传递, 在计算下一层影像间的位移时, 将上一层影像间位移值的 2 倍作为其先验位移, 即  $d(x) = 2f_L$ , 直到金字塔底层图像计算结束, 大运动场景的光流值计算完毕。

图 3 为无金字塔模型和建立金字塔模型条件下计算得到的光流场。由图 3(a)可以看出, 对于无金字塔模型, 光流场局部不平滑且大小不一, 对于大运动尺度的物体出现位移检测失败现象。而图 3(b)中, 对于建立金字塔模型, 光流场局部更加光滑, 将图 3(b)中的光流值与原始影像中该区域地物对比, 可以看出金字塔模型光流矢量场

与被检测物体的运动情况更为接近,使用金字塔模型计算光流场不仅能检测高速运动的物体,而且细节也更加丰富。

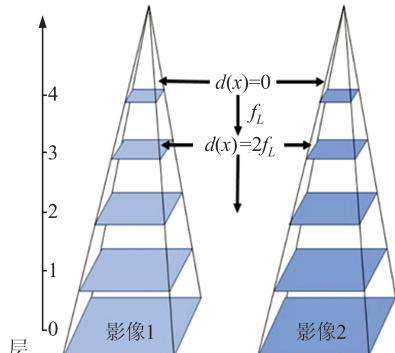


图2 光流法金字塔模型

Fig.2 Pyramid Model of Optical Flow

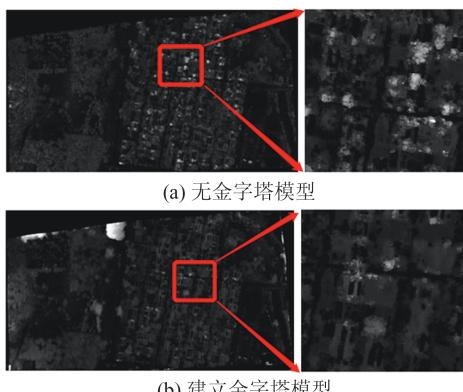


图3 无金字塔和建立金字塔模型条件下的光流场

Fig.3 Optical Flow Fields Without and with Pyramid Model

### 3 基于图割模型的镶嵌线搜索

#### 3.1 代价函数的建立

基于图割模型进行镶嵌线搜索的核心问题是结合像素特征设计一个代价函数,合理地表达影像间的相似性。本文基于DOM间密集光流场和影像梯度与灰度信息构造一种新的代价函数。设 $I_1$ 和 $I_2$ 为待拼接的两张影像,对于单个像素 $p$ ,其代价函数 $C_{I_1, I_2}(p)$ 计算式为:

$$C_{I_1, I_2}(p) = C_{I_1, I_2}^o + C_{I_1, I_2}^g + C_{I_1, I_2}^c \quad (25)$$

式中, $C_{I_1, I_2}^o$ 代表光流项; $C_{I_1, I_2}^g$ 代表梯度项; $C_{I_1, I_2}^c$ 代表灰度项。

像素的灰度信息可以衡量影像间的灰度差异,像素间灰度差异越大,则两个像素间的相似性越小;反之,则相似性越大。相似性越大代表拼接线穿过其的代价惩罚越小。灰度项计算式为:

$$C_{I_1, I_2}^c = |I_1(p) - I_2(p)| \quad (26)$$

式中, $I_1(p)$ 和 $I_2(p)$ 分别代表像素 $p$ 在影像 $I_1$ 和 $I_2$ 上的灰度值。

像素灰度值虽然在一定程度上能够反映影像间的差异性,但因其易受外界环境影响,不可避免会有拼接线穿过梯度值较大的边缘区域。为此,本文代价函数还引入了鲁棒性较好的梯度信息,使其不仅对光照变化敏感,还可以反映边缘信息的强弱,从一定程度上避免拼接线穿过人工建筑物造成的几何错位现象。梯度项 $C_{I_1, I_2}^g$ 计算式为:

$$C_{I_1, I_2}^g = |G_{I_1}^x(x) - G_{I_2}^x(x)| + |G_{I_1}^y(y) - G_{I_2}^y(y)| \quad (27)$$

式中, $G_{I_1}^x(x)$ 和 $G_{I_2}^x(x)$ 分别代表像素 $p$ 在影像 $I_1$ 和 $I_2$ 上水平方向的梯度大小; $G_{I_1}^y(y)$ 和 $G_{I_2}^y(y)$ 分别代表像素 $p$ 在影像 $I_1$ 和 $I_2$ 上垂直方向的梯度大小。

DOM间的光流场描述的是相邻帧影像同名点在像平面坐标系下的矢量位移( $\Delta x, \Delta y$ ),位移越大,穿过该区域出现错位的概率越大。因此在查找最优拼接线时应尽量避免拼接线穿过光流值大的区域。光流项的计算式为:

$$C_{I_1, I_2}^c = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (28)$$

#### 3.2 基于图割模型的能量优化

图割模型的能量函数主要分为数据项和平滑项两部分。针对两张影像 $I_1$ 和 $I_2$ 间的最优拼接线搜索问题,定义能量函数计算式为:

$$E(\Gamma) = E_{\text{data}}(\Gamma) + E_{\text{smooth}}(\Gamma) \quad (29)$$

式中, $\Gamma$ 表示拼接后的影像; $E_{\text{data}}(\Gamma)$ 和 $E_{\text{smooth}}(\Gamma)$ 分别为数据项和平滑项。

数据项是指拼接后影像中的每个像素标记来自影像 $I_1$ 和 $I_2$ 的能量总和,计算式为:

$$E_{\text{data}}(\Gamma) = E_{\text{data}}(I_1) + E_{\text{data}}(I_2) \quad (30)$$

式中, $E_{\text{data}}(I_1)$ 和 $E_{\text{data}}(I_2)$ 分别代表像素来自影像 $I_1$ 和 $I_2$ 的能量,计算式为:

$$E_{\text{data}}(I_i) = \sum_{p \in I_i} D_i^i(p), i = 1, 2 \quad (31)$$

式中, $p$ 为拼接后影像 $\Gamma$ 中的一个像素; $D_i^i(p)$ 代表将其标记来自影像 $I_i$ 的惩罚代价值。

平滑项是指将不同的标签标记给相邻的像素节点所产生的惩罚能量总和,计算式为:

$$E_{\text{smooth}}(\Gamma) = \sum_{(x, y) \in N(\Gamma)} \eta(L(p), L(q)) \cdot E_{\text{smooth}}(p, q) \quad (32)$$

式中,  $N(\Gamma)$  为所有 4 邻域邻接的像素对;  $L(p)$  和  $L(q)$  分别表示像素  $x$  和  $y$  的标签, 即该像素所属的影像编号, 若两者标签相同, 则  $\eta(L(p), L(q))$  为 0, 反之则为 1;  $E_{\text{smooth}}(p, q)$  代表像素  $p$  和  $q$  之间平滑项能量大小, 将其定义为两个像素的代价函数之和, 计算式为:

$$E_{\text{smooth}}(p, q) = C_{i_1, i_2}(p) + C_{i_1, i_2}(q) \quad (33)$$

至此, 图割模型的能量函数构造完成, 对有效重叠区域构建权重图, 即像素对应权重图中的节点, 每个像素的 4 个邻域对应权重图中的边, 逐像素计算能量函数值, 边的权值为该像素与邻域像素能量函数的代价和。在权重图中找到总能量最小的割, 完成能量优化。在最优镶嵌线搜索中, 能量函数最小值对应的即为最优镶嵌线。

## 4 实验与结果分析

本文实验采用 Visual C++ 计算机语言编程实现, 实验环境为 Windows 10 64 位操作系统, 处理器为 IntelCore XeonCPU @ 2.20 GHz, 内存为



图 4 本文方法镶嵌线搜索结果

Fig.4 Seamline Search Results of the Proposed Method in This Paper

代价影像反映影像间重叠区域的投影差异大小, 当镶嵌线沿代价影像中的低亮度区域前进, 沿该镶嵌线拼接的影像产生的几何错位最小。因此最优镶嵌线应穿越代价影像上像素亮度较小的区域, 本文方法将计算机视觉中的密集光流引入代价函数的构造, 加强了人工建筑物在代价影像上的代价值, 能够保证镶嵌线自动规避人工建筑物。如图 4 所示, 在密集建筑地区, 镶嵌线均沿着建筑物边缘前进, 在地势平坦地区, 镶嵌线基本沿道路前进。

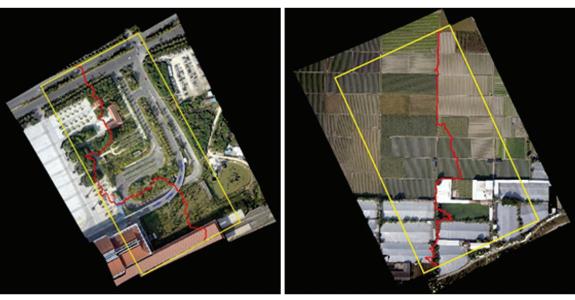
### 4.2 算法对比分析

使用商业软件 Inpho 中的 OrthoVista 对上述相同 2 张重叠影像进行镶嵌线搜索, 结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, OrthoVista 软件在密集建筑区域与稀疏建筑区域分别穿越 12 栋和 8 栋

64 GB。实验数据为无人机低空遥感影像, 为验证本文方法对建筑物的自动规避效果以及对几何错位的改善情况, 实验分别选取密集建筑区、稀疏建筑区、地势起伏与地势平坦 4 种不同地形区域进行影像镶嵌, 并将采用本文方法与商业软件 OrthoVista 的 DOM 镶嵌结果进行对比分析。

### 4.1 镶嵌线搜索结果

图 4 为本文方法在 4 种地形区域对应的两张重叠影像的镶嵌线结果, 其中, 黄色矩形区域为重叠区域, 红色曲线为 DOM 镶嵌线。由图 4(a)、4(b)可以看出, 基于密集光流法的镶嵌线搜索结果较好地避开了人工建筑物; 由于本文方法只在影像间重叠区域进行搜索, 所以在图 4(c)中, 该实验区域的拼接结果必须穿越两张影像重叠区域的高架桥(图中蓝线标注处), 从高架桥的接缝处可以看出, 本文方法在地势起伏区域没有出现明显的几何错位现象; 由图 4(c)、4(d)可以看出, 在地形起伏与平坦区域, 本文方法的拼接结果不受地势高低变化的影响, 具有较好的鲁棒性。



建筑物, 而由§4.1 可知, 本文方法生成的镶嵌线沿着道路和房屋边缘行进, 较好地避开了人工建筑物, 说明本文方法视觉效果整体上优于商业软件 OrthoVista 的搜索结果。

表 1 列出了本文方法和 OrthoVista 在 4 种不同类型区域搜索镶嵌线的质量与效率统计数据。从表 1 可以看出, 本文方法在 4 种类型区域均表现良好, 能够在不同地形下保证镶嵌线质量并具有较高效率, 镶嵌线走向一般沿着建筑物或道路边缘行进。其中, 密集建筑区的镶嵌线平均灰度值均高于地势平坦地区, 密集建筑区的影像重叠区域包含大量在代价影像上高亮显示的人工建筑物, 因此密集建筑区域影像的搜索时间明显高于稀疏建筑区域, 地势起伏地区与平坦地区在质量和效率上相差不大, 进一步验证了本文方法不

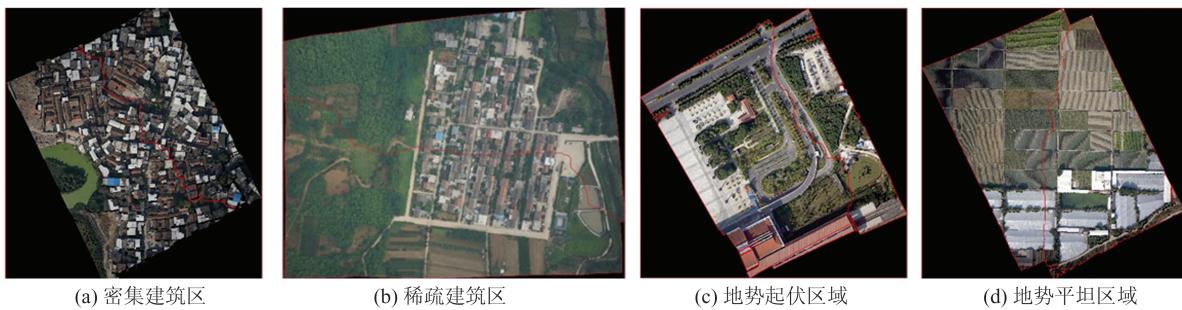


图5 OrthoVista拼接结果  
Fig.5 Seamline Search Results of OrthoVista

表1 不同方法镶嵌线质量与效率统计

Tab.1 Quality and Efficiency Statistics of Different Methods

地形区域	方法	路径长度/像素	搜索用时/ms	差异像素数(占比)			平均灰度值
				灰度>50	灰度>100	灰度>150	
密集建筑区	本文方法	7 470	22 700	184(2.4%)	83(1.1%)	47(0.6%)	33.26
	OrthoVista	6 036	27 325	458(7.6%)	229(3.7%)	156(2.5%)	28.34
稀疏建筑区	本文方法	5 024	11 470	77(1.5%)	37(0.7%)	20(0.3%)	24.04
	OrthoVista	4 833	13 585	265(5.5%)	122(2.5%)	84(1.7%)	30.15
地势起伏地区	本文方法	8 026	12 258	85(1.1%)	33(0.4%)	17(0.2%)	33.67
	OrthoVista	4 903	13 619	83(2.0%)	60(1.2%)	14(0.3%)	37.50
地势平坦地区	本文方法	7 189	10 377	39(0.5%)	24(0.3%)	19(0.3%)	21.58
	OrthoVista	6 154	10 940	62(1.0%)	31(0.5%)	25(0.4%)	47.31

受地势起伏变化的影响。通过对比表1数据可以看出,本文方法得到的镶嵌线在稀疏建筑区域差异像素灰度大于100的像素数仅占0.7%,灰度大于150的仅占0.3%,搜索用时为11 470 ms,而商业软件OrthoVista分别达到了2.5%和1.7%,用时为13 585 ms;在密集建筑区域,本文方法得到的镶嵌线差异像素灰度大于100的像素数仅为1.1%,而OrthoVista为3.7%,说明本文方法在质量和效率上均取得了较好的效果,同等条件下可以实现自动规避人工建筑物等高于地面高程的物体进行镶嵌线搜索,在地势起伏地区与地势平坦地区搜索效率与质量均优于OrthoVista拼接结果,且使用本文方法在平坦与地势起伏地区效果相当,说明影像拼接受地形影响不明显。

图6为商业软件OrthoVista和本文方法在两个局部区域生成的镶嵌线结果。由图6可以看出,在相同的局部区域,本文方法基本能够避开建筑物,沿边缘行进,而OrthoVista则明显穿越建筑物,且本文方法生成的镶嵌线穿越建筑物的次数明显少于OrthoVista生成镶嵌线穿越建筑物的次数。

图7为本文方法在地势平坦区域生成的拼接结果的局部示意图。由图7可以看出,本文方法

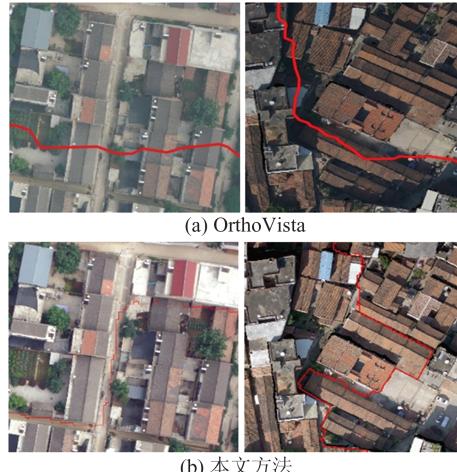


图6 镶嵌线结果比较  
Fig.6 Comparision of Seamline Search Results

在规避人工建筑物与改善几何错位现象方面有较好的效果。

## 5 结语

本文提出了一种全新的DOM拼接方法,通过构造代价函数,将连续检测人工建筑物边缘信息的光流值引入其中,利用同一目标在两幅影像上的坐标差异越大,表明两幅影像在该位置镶嵌

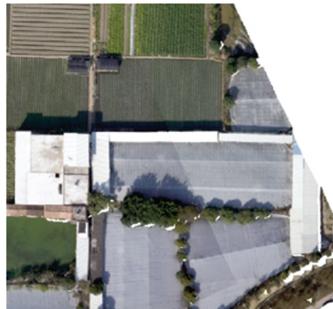


图 7 本文方法拼接结果的局部示意图

Fig.7 Partial Schematic Diagram of the Proposed Method in This Paper

后几何错位越明显这一现象,实现DOM镶嵌线智能搜索。实验结果表明,经该算法处理生成的拼接影像可以自动规避人工建筑物与重叠区域差异较大的像素,拼接后的影像几何差异较小,一定程度上实现了DOM镶嵌线搜索的智能化。由于目前所给方法仅为双片DOM拼接,未考虑多片DOM拼接镶嵌以及影像间的匀光匀色问题,这些问题有待后续进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Jin Jianli. A Study on DSM-Based Mosaicking Techniques for Remote Sensing Imagery [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2009 (靳建立. 基于DSM的遥感影像拼接关键技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2009)
- [2] Cai Ping, Wan Yi, Zhang Yongjun, et al. Automated Seamline Detection for Aerial Orthophoto Mosaicking Assisted by Point Cloud Information [J]. *Journal of Geomatics*, 2021, 46(S1): 200-204 (蔡平, 万一, 张永军, 等. 点云信息辅助的航空正射影像自动镶嵌方法[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(S1): 200-204)
- [3] Rong Lihui, Dai Chenguang, Nie Haibin, et al. Automatic Seamline Detection Algorithm for High Resolution Aerial Orthoimages with the Auxiliary Orthoimage Elevation Synchronization Model [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2017, 34(2): 162-167 (荣利会, 戴晨光, 聂海滨, 等. OESM辅助的高分辨率航空正射影像拼接线自动检测算法[J]. 测绘科学技术学报, 2017, 34(2): 162-167)
- [4] Li Penglong, Deng Fei, Li Hailiang, et al. A Method of GPU-CPU Co-Processing Rapid Images Mosaicking Based on Valid Areas [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 304-310 (李朋龙, 邓非, 李海亮, 等. 基于有效区域约束的GPU-CPU协同影像快拼方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(2): 304-310)
- [5] Li Wan, Zhao Shuangming, Zhang Weilong, et al. A Mosaic Method for UAV Images Based on Filtering [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6): 943-950 (李婉, 赵双明, 张卫龙, 等. 一种无人机影像滤波分频拼接算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(6): 943-950)
- [6] Yang Chao. Research on Fast Detection of Seam-Line for GF Image via Image Segmentation [D]. Hangzhou: Hangzhou Normal University, 2018 (杨超. 基于图像分割的高分影像镶嵌线快速生成算法研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2018)
- [7] Ding Kaiwei, Zou Zhengrong, Zhang Yunsheng, et al. Automatically Seam-Line Selection for Mosaicking Ortho-Photo via Graph Cut Algorithm [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016, 39(9): 54-56 (丁锴为, 邹峥嵘, 张云生, 等. 基于图割算法的正射影像镶嵌线自动选择[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(9): 54-56)
- [8] Zhang Shasha. Research on Orthophoto Mosaicking and Quality Evaluation Methods Based on Semantic Segmentation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018 (张莎莎. 基于语义分割的数字正射影像镶嵌及其质量评价方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018)
- [9] Duan Mengmeng. Research on Seam Line Detection and Quality Evaluation Methods for Orthophoto Mosaicking Based on Disparity Map [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015 (段梦梦. 基于视差图的数字正射影像镶嵌线自动搜索及其质量评价方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015)
- [10] Gong Siwei, Chen Shiyu, Cai Yang. Seamline Detection for Orthoimage Mosaicking Based on Minimizing the Maximum Edge Weight Algorithm [J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(4): 104-109 (宫思伟, 陈时雨, 蔡杨. 最小化最大边权的正射影像镶嵌线自动搜索[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(4): 104-109)
- [11] Farnebäck G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion [M]//Image Analysis. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003

## Dense Optical Flow Method for Intelligently Extracting Seamline of Orthophotos

ZHANG Chunsen<sup>1</sup> ZHANG Yueying<sup>1</sup> GUO Bingxuan<sup>2</sup> REN Li<sup>3</sup>

1 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Xi'an Zhongkexingtong Space Data Technology Co., Ltd, Xi'an 710100, China

**Abstract:** Objectives: Geometric misalignment is one of the key problems for orthophoto mosaicking. To solve this problem, this paper proposes a regional seamline detection algorithm based on dense optical flow. Methods: Firstly, the cost image is constructed with dense optical flow, gradient information and gray information. And the cost image is regarded as a weighted undirected graph. Secondly, the principle of maximum flow and minimum cut is used to search for seamline based on graph-cut model. Results: The experiment results show that the seamline cost of the sparse building area greater than 100 pixels obtained by the proposed method only accounts for 0.7% of the path length. And the search efficiency of the proposed method is increased by 17% compared with OrthoVista software. Conclusions: The proposed method can automatically avoid passing the building area and the areas with large projection in digital orthophoto map, greatly reduce the probability of geometric dislocation phenomenon of image mosaicking, and realize the intelligence of orthophoto seamline searching.

**Key words:** digital orthophoto map (DOM); dense optical flow; seamline; graph cut model; intelligent search

**First author:** ZHANG Chunsen, PhD, professor, specializes in photogrammetry computer vision and remote sensing application. E-mail: zhchunsen@aliyun.com

**Corresponding author:** GUO Bingxuan, PhD, professor. E-mail:mobilemap@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (92038301); the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2018JM5103); the Open Fund of Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Natural Resources(KF-2018-03-052).

**引文格式:** ZHANG Chunsen, ZHANG Yueying, GUO Bingxuan, et al. Dense Optical Flow Method for Intelligently Extracting Seamline of Orthophotos[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(2):261-268. DOI:10.13203/j.whugis20200573(张春森,张月莹,郭丙轩,等.密集光流法正射影像镶嵌线智能提取[J].武汉大学学报·信息科学版,2022,47(2):261-268. DOI:10.13203/j.whugis20200573)