



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 密集光流法正射影像镶嵌线智能提取
作者: 张春森, 张月莹, 郭丙轩, 任力
DOI: 10.13203/j.whugis20200573
收稿日期: 2020-10-28
网络首发日期: 2021-06-01
引用格式: 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. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200573>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200573

引用格式: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,2021.DOI:10.13203/j.whugis20200573(ZHANG Chunsen, ZHANG Yueying, GUO Bingxuan, REN Li. Dense Optical Flow Method for Intelligently Extracting Mosaic Lines of Orthophotos [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021. DOI:10.13203/j.whugis20200573)

密集光流法正射影像镶嵌线智能提取

张春森¹张月莹¹郭丙轩^{2,3}任力⁴

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. 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室, 广东深圳, 518035

4 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,采用本文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。

关键字: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产生的。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的平面精度与人的视觉感受。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]等人分别提出了基于数字表面模型、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的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,将二者线性组合即可得到最终的拼接影像,该方法解决了无人机影像拼接中产生的鬼影问题,尽可能的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]首先生成相邻影像的初始镶嵌线,再通过分水岭分割方法提取形态学边界点和边界线,最后利用迪杰斯特拉算法获得最佳镶嵌线,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]利用图割算法将正射影像的拼接转化为图割模型优化问题,搜索到的正射影像重叠区域的最小割即为最优拼接线。文献[8]将语义信息引入正射影像的图像分割中进而搜索最优镶嵌线。有学者将计算机视觉中的密集匹配思想引入正射影像的镶嵌线搜索问题中,文献[9]通过视差图进行镶嵌线搜索,该方法利用正射影像生成的视差图提取影像中的人工建筑物,然后利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]提出了一种基于最优生成树的镶嵌线搜索算法,该方法利用了影像亮度差异与梯度信息构建重叠区域的差分

收稿日期:2020-10-28

项目资助:国家自然科学基金(92038301);陕西省自然基金项目(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资助课题(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

影像并视其为带权无向图，然后根据该带权无向图生成的最优生成树搜索最佳镶嵌线作为拼接线，该方法规避了迭代搜索过程，提高了效率，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。

综上所述，已有算法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，会产生几何错位现象。文献[5]与[7]虽然效果很好，但其自动化程度不高。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，基于正射影像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正射影像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，实现正射影像镶嵌线的智能搜索。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，体现了本文算法的智能化。

1 镶嵌线搜索技术流程

本文将密集光流引入图割模型算法中，构造代价函数，依据图割能量函数寻找到的最小割即为最优镶嵌线的搜索结果。算法包括：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。将密集光流场、灰度信息、梯度信息三者结合构造代价函数，建立图割能量模型，其中，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，图像中像素的四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数和，最后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。完整流程如图 1 所示。

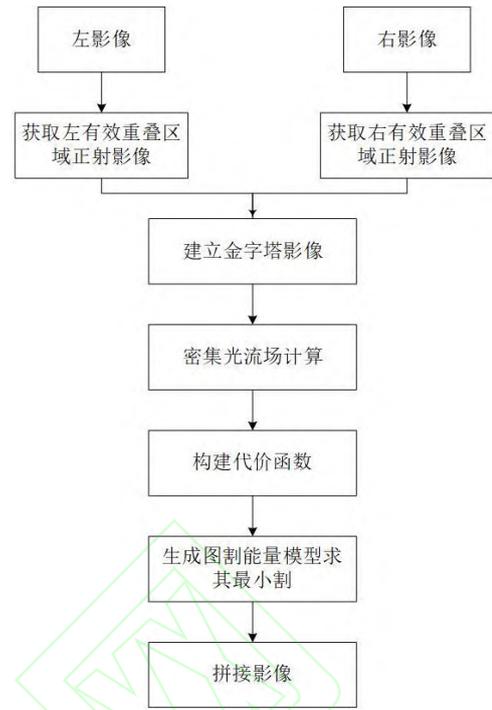


图 1 镶嵌线搜索技术流程图
Fig.1 Flowchart of Mosaic line search

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。利用正射影像间的密集光流场欧氏距离的大小探测正射影像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，本文采用的 GunnarFarneback 密集光流法^[11]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：

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

式中， \mathbf{A} 为对称矩阵， \mathbf{b} 为向量， 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 间的整体位移量为 d ，根据式 (1) 可以构造出对影像 I_1 的局部邻域多项式

估计, 如式(2)所示:

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

经整体平移量 d 构造影像 I_2 的邻域信号 f_2 , 如式(3)所示:

$$\begin{aligned} f_2 &= f_1(x-d) \\ &= x^T A_1 x + (b_1 - 2A_1 d) + d^T A_1 d - b_1^T d + c_1 \end{aligned} \quad (3)$$

设 A_2 为对称矩阵, b_2 为向量, c_2 为标量, 假设两个信号的二次多项式系数相等可得式(4)、(5)和(6):

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

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

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

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

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

如式(2)所述, 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 $A_2(x)$ 、 $b_2(x)$ 、 $c_2(x)$, 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, 在实践中, 对式(7)中的各元素进行近似与简化表达:

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

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

基于以上条件, 可以得到主要约束条件式(10)对光流进行求解:

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

根据式(10)在每个像素邻域上构建式(11), 使得位移 $d(x)$ 在像素邻域内最小化:

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

其中, $w(\Delta x)$ 是像素 x 的邻域 I 中各点的权函数。将其最小化可得:

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

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

其中 $e(x)$ 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, 可得式(14)和(15):

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

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

引入式(16)和(17):

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

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

则 $d = Sp$, 将其带入式(11), 可得加权最小二乘:

$$\sum w \|A_i S_i p - \Delta b_i\|^2 \quad (18)$$

其中 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(9)变换为式(20)和(21):

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

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

其中 \tilde{x} 和 x 具有以下关系:

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

将式(12), (20), (21), (22)联立, 得到估计位移 $d(x)$ 。其中计算 Δb 时, 首先将先验位移 $d_0(x)$ 设置为 0, 根据上述四式计算得到新的 $d_0(x)$, 利用其求解新的 Δb , 又将得到更加精确的 $d_0(x)$, 多次迭代直到 Δb 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于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, 以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:

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

其中, $d_0(x)$ 是先验估计的位移场, μ 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。上式的解由式(24)给出:

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

2.2 光流法的金字塔模型

上述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, Image1 和 Image2 分别为相邻两帧影像, 逐层对其降采样, 降低影像分辨率的同时影像间的运动尺度也在减小。金字塔模型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 fL 。这样得到的位移向量 $dL = (dL_x, dL_y)^T$ 就足够小, 然后逐层传递, 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, 即 $d(x) = 2 * fL$ 作为其先验位移, 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。

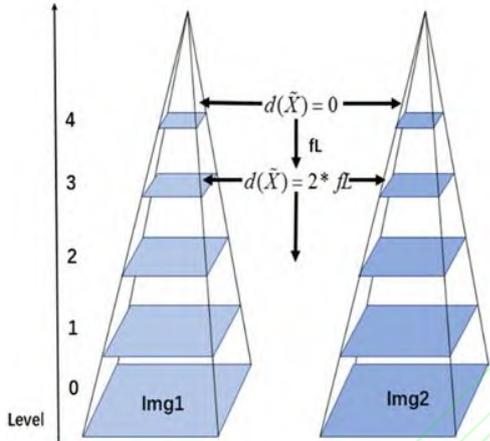


图 2 光流法金字塔模型

Fig.2Optical flow pyramid model

图 3, 图 4 分别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, 可以看出在图 3 中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 4 中光流场局部更加光滑, 将图 4 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, 因此使用金字塔模型计算光流场不仅能检测高速运动的物体并且细节也更加丰富。



图 3 无金字塔模型下的光流场

Fig.3Optical flow field without pyramid model

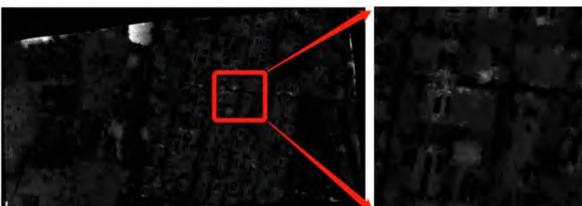


图 4 金字塔模型下的光流场

Fig.4Optical flow field under the 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, 合理的表达影像间的相似性。本文基于正射影像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, 对于每一个像素 x , 其代价函数 $C_{I_1, I_2}(x)$ 定义如式(25)。

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

其中, 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。灰度项定义如式(26)

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

其中, $I_1(x)$ 和 $I_2(x)$ 分别代表像素 x 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, 而且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 定义如式(27):

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

其中, $G_{I_1}^x(x)$ 和 $G_{I_2}^x(x)$ 分别代表像素 x 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 x 在影像 I_1 和 I_2 上垂直方向的梯度大小。

正射影像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。光流项的定义如式(28):

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

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两部分——数据项和平滑项, 针对两张影像 I_1 和 I_2 间的最优拼接线搜索问题, 定义能量函数如式(29):

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

其中 Γ 为拼接后的影像， $E_{data}(\Gamma)$ 和 $E_{smooth}(\Gamma)$ 分别为数据项和平滑项。

数据项表示将每个像素标记来自于影像 I_1 和 I_2 的能量代价总和，定义如式(30)：

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

其中 $E_{data}(I_1)$ 和 $E_{data}(I_2)$ 分别代表拼接后影像中的每个像素标记来自于影像 I_1 和 I_2 的能量总和。其定义如式(31)：

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

其中 x 为拼接后影像 Γ 中的一个像素， $D_i^j(x)$ 代表将其标记来自于影像 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。平滑项定义如式(32)：

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

其中， $N(\Gamma)$ 为所有4邻域邻接的像素对， $L(x)$ 和 $L(y)$ 分别表示像素 x 和 y 的标签，即该像素所属的影像编号。若二者标签相同，则 $\eta(L(x), L(y))$ 为0；反之则为1。其中 $E_{smooth}(x, y)$ 代表像素 x 和 y 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，即：

$$E_{smooth}(x, y) = C_{p,q}(x) + C_{p,q}(y) \quad (33)$$

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，每个像素的四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值和。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

实验使用 VisualC++ 计算机语言进行编程实现，并在 Inter(R)Xeon(R)2.20GHz, 64GB 内存, 64 位, Windows10 环境下的台式机上运行。为验证本文算法对建筑物的自动规避效果以及对几何错位的改善情况，实验影像分别选取密集建筑区、稀疏建筑区、地势起伏与地势平坦四种不同地形区域影像对本文算法的有效性进行验证，并将正射影像镶嵌结果与商业软件 OrthoVista 效果进行对比分析。

4.1 镶嵌线搜索结果

实验数据为无人机拍摄低空遥感影像。图 5(a)、5(b)、5(c)、5(d)分别表示四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，红色曲线为正射影像镶嵌线。从图 5(a)与 5(b)中可以看出基于密集光流法的镶嵌线搜索结果较好的避开了人工建筑物。

由于本文方法只在影像间重叠区域进行搜索，所以在图 5(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(图中有蓝线标注处)，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。从图 5(c)与 5(d)对地形起伏与平坦区域拼接的结果可以看出本文方法不受地势高低变化的影响，具有较好的鲁棒性。



图 5 本文方法镶嵌线搜索结果

Fig.5 Mosaic line search result in this paper

代价影像反映影像间重叠区域的投影差差异大小，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，本文算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 5 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。

表 1 列出了四个不同区域的实验数据，从中可以看出，本文方法在四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高效率，镶嵌线走向一般沿着建筑物或道路边缘行进。

其中，在密集建筑区镶嵌线最大灰度值和平均灰度值均高于地势平坦地区，密集建筑区由于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。从统计结果中可以看出地势起伏地区与平坦地区在质量和效率上相差不大，进一步验证了本文算法不受地势起伏变化的影响。

表 1 镶嵌线质量与效率统计
Table 1 Quality and efficiency of the seamlines

| | 重叠区域大小/像素 | 路径长度/像素 | 搜索用时/ms | 差异像素数/像素 | | | 最大灰度值 | 平均灰度值 |
|--------|-----------|---------|---------|----------|----------|----------|-------|-------|
| | | | | 灰度 > 50 | 灰度 > 100 | 灰度 > 150 | | |
| | | | | | | | | |
| 密集建筑区 | 2137×6400 | 7470 | 22700 | 184 | 83 | 47 | 247 | 33.26 |
| 稀疏建筑区 | 4706×2332 | 5024 | 11470 | 77 | 37 | 20 | 202 | 24.04 |
| 地势起伏区域 | 1842×3949 | 8026 | 12258 | 85 | 33 | 17 | 250 | 33.67 |
| 地势平坦区域 | 1871×4105 | 7189 | 10377 | 39 | 24 | 19 | 194 | 21.58 |

4.2 与现有算法对比分析

使用商业软件 Inpho 中的 OrthoVista 对上述相同影像对进行镶嵌线搜索，结果如图 6 所示。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 栋建筑物，而由 4.1 节

可知，本文方法生成的镶嵌线沿着道路和房屋边缘行进，较好的避开了人工建筑物，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。

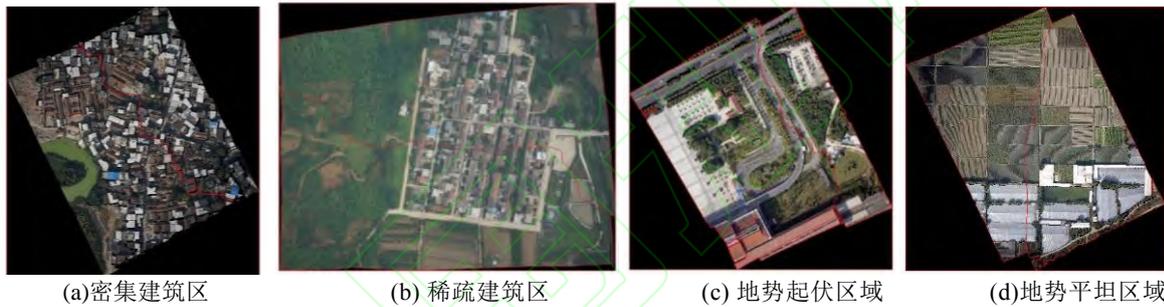


图 6 Ortho Vista 拼接结果

Fig. 6 Results based on Ortho Vista

表 2 列出了四个不同区域搜索镶嵌线的质量与效率统计数据。其中，本文方法在稀疏建筑区域差异像素灰度大于 100 的仅占 0.7%，灰度大于 150 的像素数仅占镶嵌线的 0.3%，搜索用时为 11470ms，而商业软件 OrthoVista 分别达到了 2.5% 和 1.7%，用时为 13585ms；在密集建筑区域，本文方法得到的镶嵌线的差异像素灰度大于 100 的仅为 1.1%，而 OrthoVista 得到的镶嵌线差异像素

灰度值超过 100 像素数的为 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，且使用本文方法平坦与地势起伏地区效果相当，说明影像拼接受地形因素影响不明显。

表 2 不同方法镶嵌线质量与效率统计
Table 2 Contrast of quality and efficiency with other methods

| | | 路径长度/像素 | 搜索用时/ms | 差异像素数/像素 | | | 平均灰度值 |
|--------|------------|---------|---------|------------|-------------|-------------|-------|
| | | | | 灰度 > 50(%) | 灰度 > 100(%) | 灰度 > 150(%) | |
| | | | | | | | |
| 密集建筑区 | 本文方法 | 7470 | 22700 | 184(2.4%) | 83(1.1%) | 47(0.6%) | 33.26 |
| | OrthoVista | 6036 | 27325 | 458(7.6%) | 229(3.7%) | 156(2.5%) | 28.34 |
| 稀疏建筑区 | 本文方法 | 5024 | 11470 | 77(1.5%) | 37(0.7%) | 20(0.3%) | 24.04 |
| | OrthoVista | 4833 | 13585 | 265(5.5%) | 122(2.5%) | 84(1.7%) | 30.15 |
| 地势起伏地区 | 本文方法 | 8026 | 12258 | 85(1.1%) | 33(0.4%) | 17(0.2%) | 33.67 |

| | | | | | | | |
|--------|------------|------|-------|----------|----------|----------|-------|
| | OrthoVista | 4903 | 13619 | 83(2.0%) | 60(1.2%) | 14(0.3%) | 37.50 |
| 地势平坦地区 | 本文方法 | 7189 | 10377 | 39(0.5%) | 24(0.3%) | 19(0.3%) | 21.58 |
| | OrthoVista | 6154 | 10940 | 62(1.0%) | 31(0.5%) | 25(0.4%) | 47.31 |

图 7 为局部区域的对比结果，其中图 7(a)为商业软件 Ortho Vista 生成的镶嵌线，图 7(b)为本文方法生成的镶嵌线。在相同的局部区域，本文算法基本避开建筑物，沿边缘行进，而 Ortho Vista 则明显穿越建筑物，且本文算法生成的镶嵌线穿越建筑物的次数明显少于 Ortho Vista 生成镶嵌线穿越建筑物的次数。



(a) Ortho Vista 生成的镶嵌线



(b) 本文方法生成的镶嵌线

图 7 局部镶嵌线结果比较

Fig.7 Contrast of Mosaic lines indetails with OrthoVista

图 8 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，可以看到本文算法在规避人工建筑物与改善几何错位现象有较好的效果，由于文中未考虑拼接后的影像匀光匀色问题，使得拼接后的影像存在亮度不一致，还需要后续进一步研究。



图 8 拼接结果的局部示意图

Fig 8. Partial schematic of result in this paper

5 结论

本文提出了一种全新的正射影像拼接方法，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，差异越大表明两幅影像在该位置镶嵌后几何错位越明显这一现象，实现正射影像镶嵌线智能搜索。实验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，一定程度上实现了正射影像镶嵌线搜索的智能化。由于目前所给方法仅为双片正射影像拼接，未考虑多片正射影像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] ZuoZhiquan, Zhang Zuxun, Zhang Jianqingetal.DSM-assisted intelligent detection of mosaic lines in large-scale orthophotos of urban areas[J].*Journal of Surveying and Mapping*,2011,40(01):84-89(左志权,张祖勋,张剑清等.DSM 辅助下城区大比例尺正射影像镶嵌线智能检测[J].测绘学报,2011,40(01):84-89.)
- [2] Jin Jianli. Research on the key technology of remote sensing image mosaic based on DSM[D]. PLA Information Engineering University, 2009(靳建立.基于 DSM 的遥感影像拼接关键技术研究[D].解放军信息工程大学,2009)
- [3] RongLihui, Dai Chenguang, NieHaibin et al.OESM-assisted automatic detection algorithm for high-resolution aerial orthophoto stitching lines[J].*Journal of Surveying and Mapping Science and Technology*,2017,34(02):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(02):162-167.)
- [4] Li Penglong,DengFei,LiHailiang et al.GPU-CPU collaborative image fast stitching method based on effective area constraints[J].*Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*,2018,43(02):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(02):304-310.)
- [5] Li Wan,ZhaoShuangming,ZhangWeilong et al.A UAV image filtering and frequency division stitching algorithm[J].*Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*,2018,43(06):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(06):943-950.)
- [6] Yang Chao. Research on fast generation algorithm of high-resolution image mosaic line based on image segmentation[D]. Hangzhou Normal University, 2018. (杨超.基于图像分割的高分辨率影像镶嵌线快速生成算法研究[D].杭州师范大学,2018.)
- [7] DingKaiwei,ZouZhengrong,ZhangYunsheng et al.Automatic selection of orthophoto mosaic line based on graph cut algorithm[J].*Surveying and Geospatial Information*,2016,39(09):54-56. (丁楷为,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(09):54-56.)

-
- [8] Zhang Shasha. Digital orthophoto mosaic based on semantic segmentation and its quality evaluation method[D]. 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]. 武汉大学, 2018.)
- [9] Duan Mengmeng. Research on Automatic Search and Quality Evaluation Method of Digital Orthophoto Mosaic Line Based on Disparity Map[D]. 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]. 武汉大学, 2015.)
- [10] Chen Jiyi, Xu Biao, Zhang Li et al. Fast and intelligent detection of orthophoto mosaic lines using optimal spanning tree[J]. *Journal of Surveying and Mapping*, 2015, 44(10):1125-1131. (陈继溢, 许彪, 张力等. 采用最优生成树的正射影像镶嵌线快速智能检测[J]. 测绘学报, 2015, 44(10):1125-1131.)
- [11] Farneback G. Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2003, 2749(1):363-370.

Dense Optical Flow Method for Intelligently Extracting Mosaic Lines of Orthophotos

ZHANG Chunsen¹ ZHANG Yueying¹ GUO Bingxuan^{2, 3} REN Li⁴

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 Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Natural Resources, Shenzhen, 518035

⁴ Xi'an Zhongkexingtu Space Data Technology Co., Ltd, Xi'an 710100

Abstract: Objectives: Geometric misalignment is one of the key problems when orthophotos stitched. To solve this problem, this paper proposes a regional seam line detection algorithm based on dense optical flow. **Method:** Firstly, construct the cost image with dense optical flow, gradient information and gray information, and regards the cost image as a weighted undirected graph. Secondly, using the principle of maximum flow and minimum cut based on graph-cut model self-diagnosis and search for mosaic lines. **Result:** The experiments show that the mosaic line cost of the sparse building area obtained by this method only account for 0.7% of the path length, and the search efficiency is increased by 17%. **Conclusion:** This method can automatically avoid passing the building area and the area with large projection in Digital Orthophoto Map, greatly reduces the probability of geometric dislocation phenomenon of image mosaic, and realizes the intelligent of ortho image mosaic line search.

Keywords: digital ortho photo, dense optical flow, mosaic line, graph cut model, intelligent search

First author: Zhang Chunsen, PhD, professor, major in Photogrammetry Computer Vision and Remote Sensing Application Research. E-mail: zhchunsen@aliyun.com

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

网络首发:

标题: 密集光流法正射影像镶嵌线智能提取

作者: 张春森, 张月莹, 郭丙轩, 任力

收稿日期: 2020-10-28

DOI:10.13203/j.whugis20200573

引用格式:

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, 2021, DOI:10.13203/j.whugis20200573 (ZHANG Chunsen, ZHANG Yueyingi, GUO Bingxuan, REN Li. Dense Optical Flow Method for Intelligently Extracting Mosaic Lines of Orthophotos[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI:10.13203/j.whugis20200573)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

利用方向相位特征进行多源遥感影像匹配

杨宇辉, 杨博, 尹峰

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(4): 488-494

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180445>

基于深度学习的立体影像密集匹配方法综述

季顺平, 罗冲, 刘瑾

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(2): 193-202

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200620>

一种基于带权 A*搜索算法的正射影像镶嵌线网络优化方法

郑茂腾, 熊小东, 朱俊锋, 鲁一慧, 刘薇, 邱焕斌

武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(11): 1650-1658

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180080>