引文格式：陈晓轩,徐家利. 利用缝合线拼接无人机影像的方法[J]. 地理空间信息, 2024, 22(5): 49-52. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.05.009

利用缝合线拼接无人机影像的方法

陈晓轩[1]，徐家利[2]
（1. 陕西省交通规划设计研究院有限公司，陕西 西安 710065；2. 中国电子科技集团公司第二十七研究所，河南 郑州 450018）

摘　要：针对无人机海量影像拼接生产应用需求，提出了一种基于梯度和准则影像的动态规划缝合线改进拼接方法；重构了差异准则影像，将梯度差异加入到差值影像中，对差值影像做进一步改进。以无人机影像为实验数据，对缝合线提取和拼接结果进行了验证分析。结果表明，该方法生成的最佳缝合线可以较好地避免穿过建筑物，解决了影像几何错位和重影问题，具有一定的应用价值。

关键词：无人机影像；影像拼接；梯度差异；动态规划
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）05-0049-04

Unmanned Aerial Vehicle Image Stitching Method Based on Seam Line

CHEN Xiaoxuan[1], XU Jiali[2]
(1. Shaanxi Provincial Transport Planning Design and Research Institute, Xi'an 710065, China;
2. Twenty-seventh Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450018, China)

Abstract: In order to meet the demand for the production and application of large-scale image stitching using unmanned aerial vehicle (UAV) imagers, we proposed an improved seam line stitching algorithm based on gradient and criterion images. We incorporated gradient differences into the difference images to reconstruct difference criterion images, and further improved the difference images. Taking UAV images as experimental data, we validated and analyzed the seam line extraction and stitching results. The results show that the proposed method can effectively avoid crossing buildings, solve the problems of geometric misalignment and image overlap, and has some practical value for application in engineering projects.

Key words: UAV image, image stitching, gradient difference, dynamic programming

图像拼接[1]是将一组在空间上存在重叠部分的小视野图像序列组合成一幅自然无缝的图像，是图像处理领域的一个研究热点，在计算机视觉、摄影测量学、医学影像分析等领域具有广泛的应用价值。经典的图像拼接流程包括图像配准[2]和图像融合[3]两个步骤。图像配准是根据图像重叠区域的特征点对[4]，计算得到两幅图像之间的投影变换关系[5]，再将待匹配图像映射到同一坐标系下。此时，若将拼接图像重叠区域的像素值直接取两幅原图对应像素之间的线性加权值[6]或基于多波段的融合值[7]，均易使拼接后图像在重叠区域出现目标错位或伪影等问题。为使图像拼接技术能够适应视角偏差较大、重叠部分有移动物体等难以配准的图像场景，利用最佳拼接线[8-11]缝合待拼接图像的方法得到了广泛应用。最佳拼接线由重叠区域的一系列坐标点连接而成，一条好的拼接线会消减甚至避免纹理差异或移动目标等造成的拼接后影像重影和模糊问题。国内外对在图像拼接过程中寻找最佳拼接线的方法已有较深入的研究，如方贤勇[12]等提出基于动态规划原理的最佳拼接线寻找方法，在计算能量函数时主要强调了图像的颜色差异，但并未顾及图像结构的纹理特征，易出现拼接线两侧灰度过渡不连续的现象；Tang Y[13]等提出了一种基于贪婪算法的最佳拼接线搜索方法，但由于拼接线搜索路径由上至下且受搜索方向限制，往往找到的是局部最佳路径，导致拼接线经常从移动物体上切过；Gao J[14]等提出了一种新颖的最佳拼接线搜索方法，根据相似性准则为图像中的像素分配两个不同的标签，并据此将图像分成两个部分，该方法虽可避过较大的移动目标，但相对于动态规划法计算复杂度较大。针对上述问题，本文主要做了两点改进：①根据差值影像的灰度和梯度差异信

收稿日期：2023-07-04。
项目来源：陕西交通科技资助项目（18-06K）。
第一作者简介：陈晓轩（1969— ），本科，高级工程师，研究方向为公路无人机摄影测量及影像处理、公路三维激光雷达测量及数据处理，E-mail：1715770201@qq.com。

息构造了一个新的用于搜索最佳路径节点的能量函数；②结合动态规划算法可搜索下一行所有点的优势，可以更好地在构造的能量函数上找出一条全局最佳拼接线，再沿着拼接线缝合两幅初配准好的图像，即可实现无伪影的图像拼接。实验表明，采用本文方法找到的最佳拼接线可以成功地绕过重叠区域中较大的物体。

1 改进的最佳缝合线算法

1.1 最佳缝合线获取

获取最佳缝合线的目的是尽可能地减少待拼接图像之间的偏差带来的拼接痕迹。方贤勇[15]提出了一种基于图像色彩和几何特征的改进的缝合线搜索准则，即

$$E(x,y)=E_{\text{dif}}(x,y)^2+E_{\text{geometry}}(x,y) \tag{1}$$

$$E_{\text{geometry}}(x,y)=\text{Diff}\left(I_1(x,y),I_2(x,y)\right) \tag{2}$$

式中，$E_{\text{dif}}(x,y)$、$E_{\text{geometry}}(x,y)$分别为重叠区域的颜色差异和几何差异；$I_1(x,y)$、$I_2(x,y)$为两幅待拼接图像；Diff为待拼接图像在x和y方向梯度之差的乘积。

采用Sobel算子计算影像梯度，即

$$S_x=\begin{bmatrix}-1&0&1\\-2&0&2\\-1&0&1\end{bmatrix},\ S_y=\begin{bmatrix}-1&-2&-1\\0&0&0\\1&2&1\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，S_x、S_y分别为Sobel算子水平、垂直方向的模板。

1.2 能量函数的提出

采用式（1）得到的能量函数图可能存在噪声，图像边缘信息模糊，搜索到的最佳缝合线往往未从能量差异值最小的位置穿过，易导致拼接重叠区域存在明显拼缝或重影，因此需对能量函数进行改进。两幅拼接图像重叠区域的差分一般由差分影像来表达，而差分影像的灰度值则反映了相应位置的差异性，灰度值较大，表明重叠区的几何、颜色差别较大；反之，则较小。常用方法是先找出影像的重叠区域，再求取影像在重叠区中的像素灰度值。

$$\Delta f(x,y)=\left|f_1(x,y)-f_2(x,y)\right| \tag{4}$$

式中，$f_1(x,y)$、$f_2(x,y)$为两幅待拼接图像重叠区域中同一位置的像素点灰度值；$\Delta f(x,y)$为灰度值差值。

该方法计算简便，可以很好地反映不同颜色的重叠区域，但不能精确表示不同的几何特征。在灰度差分影像中，建筑物的边界往往是不连续的，被搜寻的缝合线很可能会穿越建筑，从而产生几何上的偏差，影响地物的完整性。因此，本文采用一种基于梯度的算法，计算公式为：

$$g(x,y)=\sqrt{\left[f(x,y)-f(x+1,y)\right]^2+\left[f(x,y)-f(x,y+1)\right]^2} \tag{5}$$

$$o(x,y)=\arctan\left(\frac{f(x,y)-f(x,y+1)}{f(x,y)-f(x+1,y)}\right) \tag{6}$$

式中，$g(x,y)$为像素的梯度值；$f(x,y)$为目标像素；$f(x+1,y)$、$f(x,y+1)$分别为目标像素的右侧像素和下侧像素；$o(x,y)$为像素的梯度方向。

梯度差异的计算公式为：

$$\Delta g(x,y)=\begin{cases}\left|g_1(x,y)+g_2(x,y)\right| & \left\|o_1(x,y)-o_2(x,y)\right\|\geqslant 25^\circ\\ \left|g_1(x,y)-g_2(x,y)\right| & \left\|o_1(x,y)-o_2(x,y)\right\|<25^\circ\end{cases} \tag{7}$$

式中，$\Delta g(x,y)$为待拼接影像重叠区域中同一位置像素点的梯度差异；$g_1(x,y)$、$g_2(x,y)$和$o_1(x,y)$、$o_2(x,y)$分别为两幅待拼接影像重叠区域中同一位置像素点的梯度值和梯度方向。

取灰度差异和梯度差异的最大值作为差值影像的灰度值，即

$$\Delta D(x,y)=\max\left(\Delta f(x,y),\Delta g(x,y)\right) \tag{8}$$

式中，$\Delta D(x,y)$为差值影像中像素点的灰度值。

影像梯度能反映灰度变化，而影像地物的边缘一般具有很大的梯度值。将梯度差异加入差值影像中，有助于避免缝合线通过建筑物和地物。

1.3 基于准则影像的动态规划缝合线搜索算法

无人机影像拼接时，首先需要寻找缝合线，进而沿着缝合线进行拼接。传统动态规划法寻找当前节点的候选缝合线节点时（图1a），只能从下一行相邻的3个点中选择一个点作为节点，因而限制了候选节点的选择范围；而改进的路径搜寻算法[16]（图1b）则根据改进的能量函数，将搜索范围从下一行相邻的3个点扩展为下一行所有的点。这两种搜寻缝合线方法的对比见图1c，图中蓝色区域是地面上的障碍物，黄色、红色节点分别是采用传统动态规划法和改进方法寻找的缝合线节点，可以看出，改进方法提取的缝合线能很好地避开运动物体和建筑物。算法基本原理为：

1）初始化两个二维零矩阵$\boldsymbol{M}$和路径矩阵$\boldsymbol{P}$，其尺寸大小和差值影像（E）相同；并将E的第1行的值分配到$\boldsymbol{M}$的第1行。

2）从第2行开始，将当前点的值与上一行所有点的值进行比较，每个点的数值由式（9）累加得出。

$$s(i-1,j,k)=\begin{cases}\sum_{t=k+1}^{j-1}E(i-1,t) & k<j\\ 0 & k=j\\ \sum_{t=j+1}^{k-1}E(i-1,t) & k>j\end{cases} \tag{9}$$

式中，$s(i-1,j,k)$ 为第 $i-1$ 行第 $k\sim j$ 列之间全部点在 E 中相应的能量值之和。

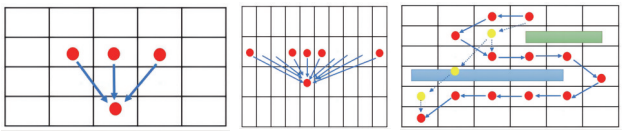
根据改进能量函数，该方法使任何一条直线上的点都可能在缝合线上形成一个连接节点。将得到的第 $i-1$ 行计算结果进行对比，在路径矩阵 $\boldsymbol{P}$ 中的 (i,j) 位置保存最小值对应的列 k，并将最小值与当前点 (i,j) 对应的能量值 $E(i,j)$ 相加，从而更新目前的缝合线能量值，即

$$M(i,j)=E(i,j)+\min_{k=1,2,3,\cdots,\mathrm{col}}\left(M(i-1,k)+s(i-1,j,k)\right) \tag{10}$$

式中，$E(i,j)$ 为差值影像 (i,j) 处的能量值；$M(i-1,k)$ 为 $\boldsymbol{M}$ 矩阵 $(i-1,k)$ 处的能量值。

3）若缝合线目前节点的位置在重叠区域的最后一行，则执行步骤4）；反之，返回步骤2）。

4）选择能量值最小的缝合线为最佳缝合线。在影像的末行位置，利用能量总量最小的缝合线将剩下的路径节点从路径矩阵 $\boldsymbol{P}$ 中反推出来。



a 动态规划法　b 改进方法　c 两种方法对比

图1　两种方法路径搜索原理

2　实验验证与分析

2.1　无人机影像缝合线提取结果分析

本文选取包含交叉道路、建筑物和不同面积植被灌木区的无人机影像作为实验数据，影像大小为7 952像素×5 304像素（图2）。对无人机影像进行最佳缝合线求解，得到能量函数图；再通过改进的动态规划方法搜索到缝合线（图3），可以看出，本文方法提取的缝合线从不同地物目标的接合处穿过，基本没有缝合线穿过地物目标的现象，且提取的缝合线没有明显的锯齿状弯曲。为更直观地比较两种方法的结果，本文选取了图3中的部分区域进行放大比较，结果见图4，可以看出，基于动态规划法检测的最佳缝合线穿过了建筑物和花坛，不满足影像拼接中对地物完整性保持的基本要求；而本文方法提取的最佳缝合线从建筑物和花坛边缘穿过，最大程度地保留了地物的完整性。



图2　无人机图像



a 动态规划法



b 本文方法

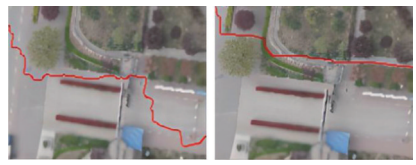
图3　最佳缝合线结果比较



a 场景一动态规划法　b 场景一本文方法



c 场景二动态规划法　d 场景二本文方法



e 场景三动态规划法　f 场景三本文方法

图4　最佳缝合线结果局部放大图比较

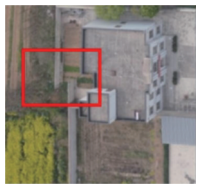
2.2　无人机影像拼接结果与分析

图像拼接的最后一步是两幅拼接图像重叠部分灰度信息处理，即拼接影像的缝合。为比较本文方法用于无人机遥感图像拼接的效果，验证方法的有效性，本文分别利用多张不同的无人机图像进行定性和定量实验分析，并与经典的加权平均算法进行对比；同时选取客观评价指标来评价拼接后重叠部分影像的缝合效果。本文利用信息熵（IE）、灰度方差乘积（SMD2）、能量梯度（EG）和基于点锐度的清晰度算法（EVA）4个定量评价指标衡量改进算法的图像拼接效果。

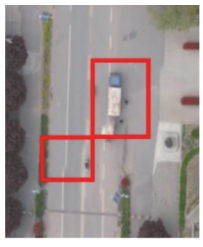
从定性评价方面来看（图5），采用加权平均法，拼接影像重叠部分影像灰度过渡较平稳，影像的缝合效果较好，但在某些地方会存在几何误差和重叠（图5a、5b）；采用本文方法的影像缝合取得了更好的效果，可有效消除拼接缝，并在很大程度上避免了影像的模糊，获得了更高的影像质量。从定量评价方面来看（表1），本文方法的 *IE* 、SMD2、 *EG* 和EVA指标均高于加权平均算法，从而证明了本文方法的效果更好。实验结果表明，本文方法能够更好地适应无人机遥感影像的拼接，且影像重叠部分的影像质量得到显著提升。

表1 影像拼接结果定量评价

影像	方法	*IE*	SMD2	*EG*	EVA
场景一	加权平均算法	6.792 5	10.369 9	46.913 7	70.250 3
场景一	本文方法	7.010 9	10.872 0	49.088 1	72.498 0
场景二	加权平均算法	6.119 9	6.067 8	27.508 7	50.798 2
场景二	本文方法	6.963 8	8.034 0	30.002 8	54.725 7


a 场景一加权平均算法


b 场景一本文方法


c 场景二加权平均算法

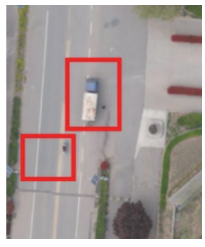

d 场景二本文方法

图5 影像拼接缝合效果局部比较

3 结 语

传统的基于最佳缝合线的动态规划方法不能很好地反映影像中的物体边界，且最佳缝合线通过建筑物等地面目标时，易产生几何错误。本文将影像中的灰度和梯度差异相结合，利用形态学技术对差值影像进行了改进，能够很好地反映影像的几何和色彩差别，搜索出最佳缝合线，从而避免缝合线穿过建筑物，减少无人机影像拼接的误差。实验结果表明，本文方法搜索出的缝合线能更好地避开具有不同几何特征的房屋、色差较大的区域，影像拼接效果更符合人的视觉感觉。

尽管本文方法取得了良好的效果，但由于无人机影像具有高分辨率和高数据量的特点，影像拼接需要耗费大量时间，本文没有分析和比较无人机遥感影像的拼接速度和效率，这是今后需要研究的一个方向。另外，本文方法主要是针对实际生产中出现的技术问题而进行的研究改进，没有采用标准数据集进行实验对比，这也是今后需要进一步研究的方向。

参考文献

[1] 王艳,祁萌. 基于GA-SIFT算法的无人机航拍图像实时拼接[J]. 测绘通报,2021(8):28-32

[2] Szeliski R. Image Alignment and Stitching: A Tutorial[J]. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 2006,2(1):1-104

[3] 周杰,解琨,付超,等. 结合SIFT特征点和泊松融合的无人机遥感影像拼接技术[J]. 测绘通报,2021(1):94-98

[4] 孙和利,彭政杰,李娟,等. 基于GPU的无人机遥感影像快速拼接[J]. 地理空间信息,2017,15(2):9-11

[5] 代家印,王育昕,袁杰. 低空航拍全景图像拼接研究[J]. 南京大学学报(自然科学),2023,59(2):239-246

[6] Chang C H, Sato H Y, Chuang Y Y. Shape-preserving Half-projective Warps for Image Stitching [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2014:3 254-3 261

[7] Ouyang N,Zhai Z L,Shou Z Y. Image Stitching of Multi-band Blending Based on Graph Cut [J]. Microelectronics and Computer,2013,30(7):107-110

[8] 徐志远,刘嘉文,王山东,等. 低空无人机影像的快速拼接技术研究[J]. 地理空间信息,2016,14(4):39-41

[9] Qiu Z H, Shi P,Jiang X H. Image Stitching and Ghost Elimination Based on Shape-preserving Half-projective Warps[C]. IEEE International Conference on Information and Automatio,2015:2 610-2 615

[10] Sun P, Han Q. Improved Optimal Stitching Line Applied to Image Stitching[J]. Computer Engineering and Applications,2016,52(21):218-221

[11] Xue J, Chen S, Zhao M. A New Optimal Seam Method for Seamless Image Stitching[C]. International Conference on Digital Image Processing,2017:104 201

[12] 方贤勇,潘志庚,徐丹. 图像拼接的改进算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(11):1 362-1 365

[13] Tang Y, Jiang H. Highly Efficient Image Stitching Based on Energy Map[C]. IEEE 2nd International Congress on Image and Signal Processing,2009:1-5

[14] Gao J, Li Y, Brown M S. Seam-driven Image Stitching[C]. The Eurographics Association,2013:45-48

[15] 方贤勇. 图像拼接技术研究[D]. 杭州: 浙江大学,2005

[16] 陈丹丹,方发明,刘惠燕. 一种基于改进动态规划的最佳拼接线搜索方法[J]. 计算机应用与软件,2018,35(10):211-216