



研究与开发

一种改进能量函数的显微图像拼接算法

王江安, 梁温茜, 黄乐, 秦林珍
(长安大学信息工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 针对传统最佳缝合线算法难以有效消除显微图像拼接后的拼接缝问题, 提出一种基于最佳缝合线的图像融合优化算法。首先, 利用 ORB (oriented FAST and rotated BRIEF) 算法对待拼接图像进行特征提取并定位重叠区域; 其次, 设计改进能量函数, 结合动态规划技术, 在重叠区域内有效搜索出最佳缝合线, 基于这条缝合线, 进一步采用改进融合方法有效融合两幅图像; 最后, 利用泊松融合方法消除重叠区域与非重叠区域之间存在的拼接缝, 得到最终图像。实验结果显示, 该方法将最佳缝合线两侧像素的相似度提高了 5% 左右, 降低了能量损失, 有效消除了拼接缝, 提高了图像质量。

关键词: 最佳缝合线; 图像融合; 能量函数; 泊松融合

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024212

A microscopic image stitching algorithm with improved energy function

WANG Jiang'an, LIANG Wenqian, HUANG Le, QIN Linzhen
School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract: Addressing the challenge of traditional optimal suture algorithms in effectively eradicating splicing seams after fusing microscopic images, an image fusion optimization algorithm based on the optimal suture was proposed. Firstly, ORB was used to extract features from the to-be-spliced images and locate the overlapping region. Secondly, an improved energy function was designed and combined with the dynamic planning technique to effectively search for the optimal suture line in the overlapping region. Based on this line, the improved fusion method was further used to fuse the two images. Finally, the Poisson fusion method was utilized to eliminate the splicing seams existing between the overlapped and non-overlapped regions to obtain the final image. The experimental results show that this method improves the similarity of the pixels on both sides of the optimal suture line by about 5%, reduces the energy loss, eliminates the splicing seam, and improves the image quality.

Key words: optimal suture line, image fusion, energy function, Poisson fusion



0 引言

随着科学技术的进步和时代需求的演变,人们的研究重心逐步从宏观领域向微观领域拓展,显微镜技术也取得显著进步。然而,光学显微镜视场受限于放大倍率,特别是在高放大倍率下,只能观察样本的局部区域,给使用者带来诸多不便。为了克服这一局限性,图像拼接技术应运而生,它可将同一显微切片的多幅图像拼接起来,合成具备较宽视野和较高分辨率的图像,为显微图像的研究提供极大便利。

在图像采集过程中,待拼接图像往往会受曝光度、色温和亮度不一致等因素的影响,通过图像拼接技术处理后出现明显的拼接缝,从而降低最终拼接图像的质量。为了解决这一问题,众多学者进行了深入研究。Patrick等^[1]提出泊松融合算法,利用泊松方程对图像进行融合,能有效处理颜色差异较大的问题,但通常需要结合其他优化算法以达到更佳效果;Chang等^[2]提出SPHP算法,采用相似变换、线性变换和单应性矩阵变换等不同的图像变换方法,分别处理非重合区域、过渡区域以及重合区域的图像,保持原图像的结构完整性;Qi等^[3]用图像能量的归一化互相关系数来快速提取匹配图像与匹配图像之间的重叠区域,并采用最优接缝算法将两幅图像融合以消除重影,大大提高了图像匹配速度及图像拼接质量;Jinsol等^[4]提出使用梯度分量生成一个能量矩阵来估计最佳最短距离,并生成距离矩阵,得到最佳接缝,图像拼接后的视觉效果更加自然流畅,环境融合度更高;赵书睿等^[5]对最佳缝合线的准则进行改进,有效处理图像中的曝光差异问题,但算法计算较为复杂,运行效率有待提高;针对有效特征点匹配对数不足和拼接融合图像质量低的问题,张文博等^[6]提出利用交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)和自适应直方图方法抑制图像颜色畸

变,并采用加速稳健特征(speeded up robust features, SUFT)算法和渐入渐出融合实现水下图像的高质量拼接,不仅保留了原图的细节信息,还显著提升整体视觉效果。

以上研究成果为显微图像拼接提供了良好的思路。然而,由于采集的显微图像常常存在对比度低、成像噪声大等问题,部分图像在拼接后仍有明显的拼接痕迹。尽管深度学习结合机器学习的方法在图像无缝拼接方面取得了显著成效^[7],但在对精确度要求极高的显微图像领域,准确性和稳定性仍显不足。更为棘手的是,面对复杂的拼接任务,这些方法往往耗费大量时间和计算资源,增加了实际应用难度。

因此,本文提出一种改进最佳缝合线与加权融合相结合的方法来消除图像拼接的痕迹,为了使得拼接后的显微图像更加接近真实场景。该方法通过改进能量函数的求解准则,并利用动态规划完成最佳缝合线的搜索,随后使用改进加权融合方法对缝合线附近的图像进行融合,以实现图像拼接缝的消除。

1 系统模型与相关理论

1.1 图像拼接模型

本文提出一种利用ORB(oriented FAST and rotated BRIEF)算法进行图像配准^[8],改进最佳缝合线和加权融合实现图像融合的方法来完成显微图像的无缝拼接。

图像拼接算法流程如图1所示,主要包含图像采集、图像预处理、图像配准、图像融合4个部分。首先,通过移动显微镜的光栅尺,采集样品不同位置的图像。在此过程中,必须确保相邻图像间至少有20%的重叠区域,以确保后续特征匹配步骤能够精确无误地进行。其次,对采集图像进行曝光度和亮度的调整^[9],完成图像预处理。再次,利用ORB特征提取算法对预处理后的图像进行特征点和描述符的提取,并采用暴力匹配器

进行特征点匹配。随后,通过随机抽样一致(random sample consensus, RANSAC)算法剔除错误的匹配点,提高配准的准确性。接着通过计算两幅图像的偏移量确定重叠区域,并初步完成图像拼接。然后,在待拼接两幅图像的重叠区域内,运用改进能量函数来动态寻找最佳缝合线,并通过改进加权融合方法对缝合线进行处理,从而实现图像的平滑融合。最后,如果发现融合后的重叠区域与非重叠区域拼接处存在水平或垂直的拼接缝,则使用泊松融合技术对其进行消除。

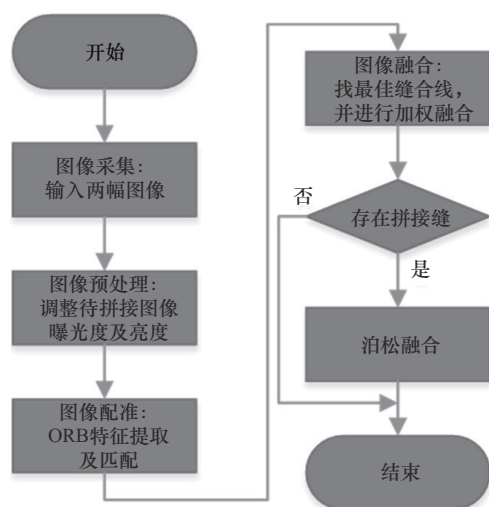


图1 图像拼接算法流程

1.2 图像配准

(1) ORB特征提取

ORB算法相比尺度不变特征变换匹配(scale invariant feature transform, SIFT)算法^[10-11]和SUFT算法^[12],高效性较为突出。它结合了快速特征点提取和描述^[13],具体而言,该算法基于FAST(features from accelerated segment test)算法来检测特征点,并利用BRIEF(binary robust independent elementary features)算法构建这些特征点的描述子,且FAST算法和BRIEF算法均以速度快著称,故ORB算法也拥有出色的运算速度。FAST算法通过以目标像素

为圆心、半径为 r 的圆,检测局部像素灰度显著变化的地方。若圆上连续 k 个像素与目标像素灰度差值超过阈值 T ,则判定为目标特征点。BRIEF算法为已检测到的特征点创建二进制特征描述符,是仅包含0和1的特征向量。其实现步骤为:首先利用高斯核函数进行滤波处理,消除图像中的噪声干扰;然后以需要进行描述的特征点为中心选取 $S \times S$ 的领域窗口,选择 n 对像素点 $p_i, q_i(i=1,2,\dots,n)$ 进行比较,如果 $I(p_i) > I(q_i)$,则生成二进制串中的1,否则为0,通过比较所有点对,得到长度为 n 的二进制编码,作为特征描述子。

(2) 特征匹配与RANSAC精确配准

通过ORB算法提取图像特征点及描述符后,利用汉明距离作为匹配度量,并采用 K -最近邻(K -nearest neighbors, KNN)算法^[14]完成粗匹配。然而,在粗匹配结果中,仍然存在许多错误的匹配点对,因此需要对其进行过滤,保留尽可能多的正确匹配点。为了实现这个目的,本文采用RANSAC算法^[15],通过迭代逐步剔除错误匹配,实现对特征点的精确匹配。完成精确匹配后,根据匹配关系对齐两幅图像,并确定重叠区域的具体位置和大小,最终生成一张初步拼接后的图像。

1.3 图像融合

(1) 改进最佳缝合线的能量函数

最佳缝合线算法结合动态规划的思想,在两幅待拼接图像的重叠区域内寻找一条差异最小的缝合线^[16]。通过这条缝合线,将重叠区域的图像进行拼接及融合,并尽可能避开重叠区域内颜色差异显著的部分,减少因拼接产生的痕迹,最佳缝合线示意图如图2所示。

本文通过能量函数对最佳缝合线进行搜索,其计算方式如式(1)所示。

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

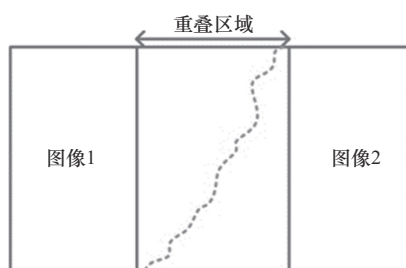


图2 最佳缝合线示意图

本文基于文献[17]中的能量函数进行改进,改进后的能量函数由两部分组成:其一为颜色差异 $E_{\text{color}}(x,y)$, 通过图像之间的颜色差异进行评估, 具体计算方法为计算两幅图像在重叠区域内对应像素的RGB三通道绝对值之差, 再求其平均值获取颜色差异; 其二为几何差异 $E_{\text{geometry}}(x,y)$, 通过计算图像之间的梯度差异进行评估, 本文对该部分计算方式进行修改。

改进前 $E_{\text{geometry}}(x,y)$ 的计算方式如式 (2) 所示。

$$E_{\text{geometry}}(x,y) = [\mathbf{S}_x \cdot (I_s(x,y) - I_t(x,y))]^2 + [\mathbf{S}_y \cdot (I_s(x,y) - I_t(x,y))]^2 \quad (2)$$

改进后 $E_{\text{geometry}}(x,y)$ 的计算方式如式 (3) 所示。

$$E_{\text{geometry}}(x,y) = [\mathbf{S}_x * (\text{diff}_x \cdot \text{sal}_1)]^2 + [\mathbf{S}_y * (\text{diff}_y \cdot \text{sal}_2)]^2 \quad (3)$$

其中, $I_s(x,y)$ 和 $I_t(x,y)$ 表示待拼接的两幅图像, $\mathbf{S}_x$ 、 $\mathbf{S}_y$ 为 Sobel 算子在 x 、 y 方向上的梯度算子,

$$\text{取值分别为 } \mathbf{S}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{S}_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}。$$

diff_x 、 diff_y 为两幅图像在重叠区域内在水平和垂直方向上像素的灰度差异值, 具体计算方式分别如式 (4)、式 (5) 所示。

$$\text{diff}_x = \begin{cases} |I_s(x,y) - I_t(x,y)|, (x,y) \in \text{edge} \\ \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} |I_s(x,y) - I_t(x,y)| \\ + |I_s(x-1,y) - I_t(x-1,y)| \\ + |I_s(x+1,y) - I_t(x+1,y)| \end{bmatrix}, (x,y) \notin \text{edge} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{diff}_y = \begin{cases} |I_s(x,y) - I_t(x,y)|, (x,y) \in \text{edge} \\ \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} |I_s(x,y) - I_t(x,y)| \\ + |I_s(x,y-1) - I_t(x,y-1)| \\ + |I_s(x,y+1) - I_t(x,y+1)| \end{bmatrix}, (x,y) \notin \text{edge} \end{cases} \quad (5)$$

其中, edge 表示重叠区域边缘部分。 sal_1 、 sal_2 表示视觉显著性系数, 这些系数由边缘检测算法从图像提取的边缘信息得出。通常, 检测到的边缘被视为图像的显著特征之一, 这些边缘信息被用来计算视觉显著性。将视觉显著性系数与像素差异相乘, 使得在计算能量时更注重显著性区域的差异, 可以提高算法符合人类视觉系统特性的程度, 进而提升图像比对效果。

搜索最佳缝合线时, 首先通过改进能量函数计算两幅图像重叠区域内的能量, 然后结合动态规划的思想进行计算。具体而言, 从重叠区域的第一行像素开始, 逐行向下计算每个像素点及其相邻位置像素点的能量值。在这个过程中, 还需考虑上一行中像素的累积能量来源。通过这种方式, 能够在重叠区域内找到一条能量最小的路径, 这条路径即最佳缝合线。

(2) 改进的加权融合

为消除图像拼接时产生的痕迹, 需进行图像融合处理, 本文采用最佳缝合线将重叠区域分为两部分: 缝合线区域及其外部区域。对于这两部分, 分别采取不同的像素点融合策略。这种融合方法是基于式 (6) 中渐入渐出的融合方法进行改进的, 新融合方法如式 (7) 所示, 旨在获得更高质量的拼接图像。

$$I(x,y) = \begin{cases} I_s(x,y), (x,y) \in I_1 \\ w_1 \cdot I_s(x,y) + (1-w_1) \cdot I_t(x,y), (x,y) \in A_1 \\ I_t(x,y), (x,y) \in I_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$I(x,y) = \begin{cases} w_1 \cdot I_s(x,y) + (1-w_1) \cdot I_t(x,y), (x,y) \in A_1 \\ w_L \cdot I_s(x,y) + w_R \cdot I_t(x,y), (x,y) \notin A_1 \end{cases} \quad (7)$$

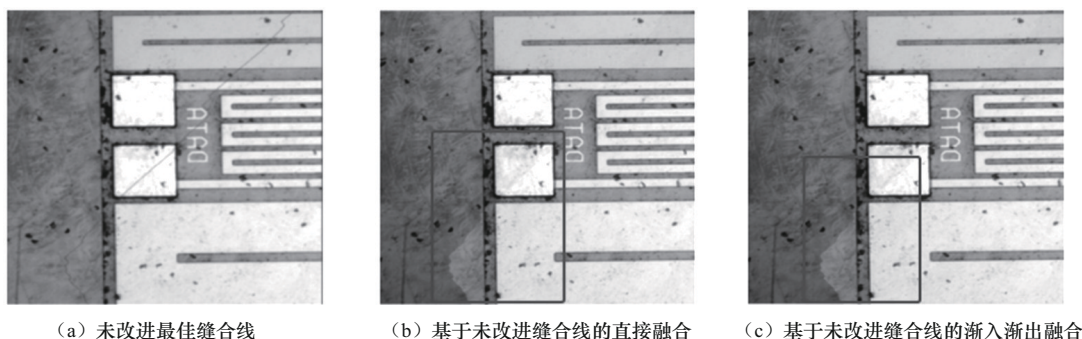


图3 未改进最佳缝合线与图像融合效果

其中, $w_1 = \frac{W-x}{W}$, $w_L + w_R = 1$, $w_L = \frac{d}{W}$, w_1 与 $(1-w_1)$ 表示最佳拼接缝上融合图像的权重系数, A_1 表示所述最佳拼接缝, I_1 与 I_2 分别表示缝合线 A_1 左侧与右侧区域, w_L 与 w_R 分别表示拼接缝左右两侧的重叠区域的像素点的权重系数, W 表示重叠区域的宽度, d 表示所述重叠区域的像素点距最佳拼接缝的距离。

(3) 局部泊松融合

为减少重叠区域与非重叠区域之间的显著过渡, 本文采用局部泊松融合技术, 该技术主要目标是将两个或多个图像进行无缝融合, 使得合成结果视觉上更加自然、无缝连接。针对仍存在的水平或竖直的拼接缝, 首先采用一种基于相邻像素的平均值填充方法对拼接缝周围像素进行处理。随后, 利用梯度域修复技术对其进行修复。修复后, 再将其复制回原图像, 并应用泊松融合算法对过渡区域进行无缝融合, 以获得最终拼接结果。

2 实验结果

为了验证本文算法的效果, 本文在处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-12490F 3.00 GHz、Windows 11 的操作系统上进行算法仿真实验, 程序编译软件为 Visual Studio 2022。

2.1 改进最佳缝合线

采用文献[18]的方法搜索得到的最佳缝合线

与图像融合, 得到的未改进最佳缝合线与图像融合效果如图3所示。图3(a)展示了未改进最佳缝合线, 从视觉上看, 该缝合线从完整的矩形中间穿过^[19], 导致同一物体的两部分存在色差; 图3(b)采用直接融合的方式对拼接缝处进行融合, 可以观察到矩形框中的图像存在明显的拼接缝; 图3(c)则运用渐入渐出加权融合技术^[20], 虽然融合后的图像仍能看出拼接缝, 但其整体色调较图3(b)部分更为均匀, 且被穿过的矩形左右两侧痕迹较轻。

同样地, 改进最佳缝合线与图像融合效果如图4所示。图4(a)展示的最佳缝合线未直接穿过任何完整物体, 这种分割方式更符合人眼对显著物体的直观感知。图4(b)、图4(c)分别展示了采用直接和渐入渐出融合技术处理的效果。可以观察到, 图4(b)、图4(c)矩形框中仍能观察到拼接缝的存在, 但其高度要低于图3(b)、图3(c)矩形框的高度, 这表明图4的最佳缝合线性能略胜一筹。因此, 通过肉眼观察可以确认, 改进后的最佳缝合线质量明显优于未改进版本。

两种不同方法搜索得到的最佳缝合线质量评价结果见表1, 通过计算最佳拼接缝两侧像素值的差异值作为评价指标。对比数据显示, 改进的最佳缝合线指标相较于未改进的低了约0.05, 表明改进的缝合线在降低拼接缝两侧像素差异和拼接缝断开时的损失方面表现更优。因此, 可以认

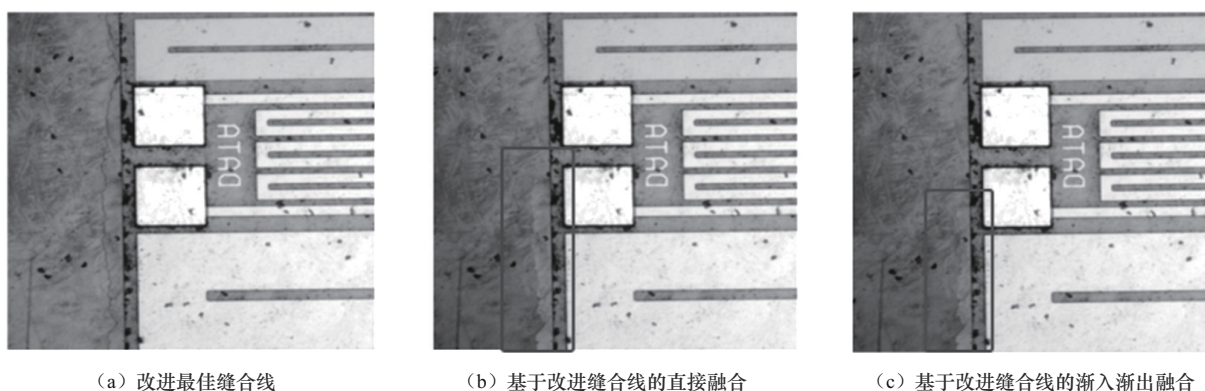


图4 改进最佳缝合线与图像融合效果

为改进最佳缝合线方法质量略优于文献[18]所述方法。

表1 最佳缝合线质量评价结果

组别	算法	缝合线左右差异值
1	未改进最佳缝合线	0.099 2
	改进最佳缝合线	0.049 0
2	未改进最佳缝合线	0.076 4
	改进最佳缝合线	0.025 2
3	未改进最佳缝合线	0.195 8
	改进最佳缝合线	0.153 9
4	未改进最佳缝合线	0.190 7
	改进最佳缝合线	0.154 3
5	未改进最佳缝合线	0.165 5
	改进最佳缝合线	0.127 6
6	未改进最佳缝合线	0.183 7
	改进最佳缝合线	0.139 8
7	未改进最佳缝合线	0.120 6
	改进最佳缝合线	0.066 5
8	未改进最佳缝合线	0.165 0
	改进最佳缝合线	0.129 5

2.2 改进融合方法

改进缝合线的融合结果对比如图5所示。图5(a)为采用渐入渐出加权融合方法进行融合的结果图,可以观察到,在这种方法下,拼接缝

两侧的亮度明显不一致,仍能辨别出拼接缝的痕迹。相比之下,图5(b)是根据改进融合方法进行融合,基本能消除拼接缝,并减少色差对比,因此,得到的拼接后图像具有更好的视觉效果。

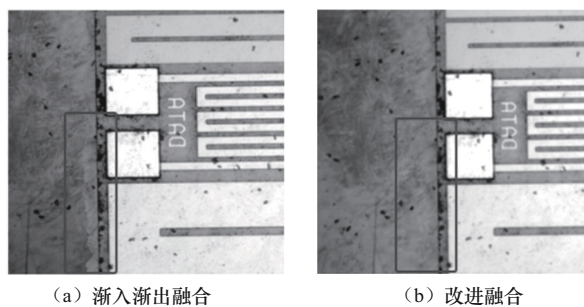


图5 改进缝合线的融合结果对比

不同最佳缝合线采用改进融合方法的效果如图6所示。图6(a)为采用改进融合方法对文献[18]生成的最佳缝合线进行融合后的效果图,图6(b)是将图6(a)中矩形框区域放大一定倍数后的图像。仔细观察可以发现,尽管在图6(a)中几乎看不到拼接缝的存在,但经过放大后,图6(b)中仍显示轻微的拼接痕迹。图6(c)展示了采用相同的改进融合方法对改进后的最佳缝合线进行融合的效果,图6(d)则是将图6(c)中矩形框区域放大相同倍数后的图像。可以发现,图6(c)中几乎看不到任何拼接缝的踪迹,且在放大后的图6(d)中也几乎无法察觉到拼接痕迹的存在。这一对比充分说明,在相同的

融合方法下，改进后的最佳缝合线显著提升了图像拼接质量。

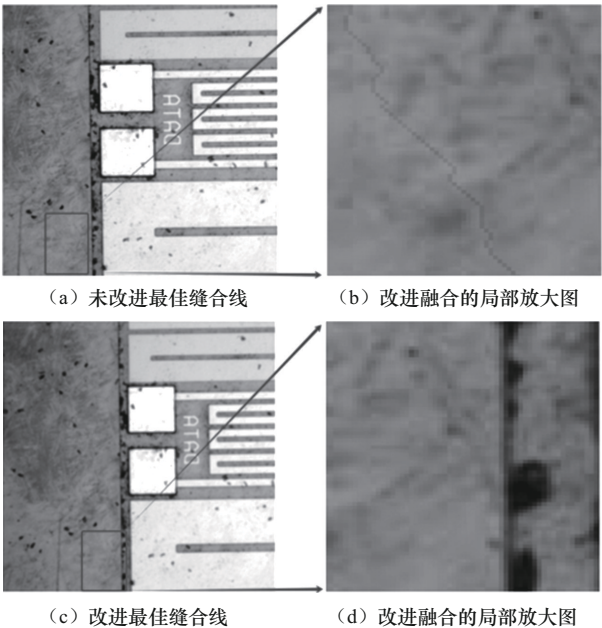


图6 不同最佳缝合线的改进融合效果

峰值信噪比（peak signal-to-noise ratio, PSNR）是一种常用的评估图像融合质量的指标，通过对比原始图像与融合图像之间的信号与噪声水平，衡量图像融合的效果。一般而言，PSNR值越高，表明融合质量越好。两种图像融合算法的PSNR值对比见表2。对比数据清晰显示，改进融合方法的PSNR值普遍高于渐入渐出融合方法。更值得一提的是，无论是采用渐入渐出融合还是改进融合，使用改进后缝合线的图像均获得了更高的PSNR值，这显著优于未改进缝合线对应的融合方法。这一结果充分证明了改进后的融合方法在提高图像融合质量方面的卓越性能，同时也验证了采用改进融合方法对改进缝合线进行融合，能够获得更高质量的融合图像。

对比改进融合算法与经典的渐入渐出融合算法的执行效率时，尽管改进后的算法在性能上可能带来更优的融合效果，但其运行时间却相应有所增加。具体而言，以表2中首组改进最佳缝合

线的数据为例，采用改进融合方法相较于传统的渐入渐出融合算法，执行时间从2.90 s延长至4.54 s，时间差值为1.64 s，这直观地反映了改进算法在计算复杂度上的提升。进一步验证其他多组实验数据后，发现这一时间增长的趋势是普遍存在的，平均而言，改进后的融合算法较之于渐入渐出方法，其执行时间平均增加了约1.47 s。因此，在追求更高融合质量的同时，也需要权衡算法执行效率的提升空间，以确保在实际应用中能够做出既满足质量要求又兼顾效率的合理决策。

表2 两种图像融合算法的PSNR值对比

组别	最佳缝合线算法	融合算法	PSNR 值
1	改进最佳缝合线	渐入渐出融合	24.028 5
		改进融合	26.054 3
	未改进最佳缝合线	渐入渐出融合	23.917 7
		改进融合	25.977 5
2	改进最佳缝合线	渐入渐出融合	21.951 4
		改进融合	22.448 4
	未改进最佳缝合线	渐入渐出融合	18.764 4
		改进融合	19.361 7
3	改进最佳缝合线	渐入渐出融合	17.757 8
		改进融合	19.385 1
	未改进最佳缝合线	渐入渐出融合	17.704 9
		改进融合	17.830 5
4	改进最佳缝合线	渐入渐出融合	10.186 7
		改进融合	11.387 1
	未改进最佳缝合线	渐入渐出融合	9.340 4
		改进融合	9.547 8
5	改进最佳缝合线	渐入渐出融合	11.479 9
		改进融合	15.229 8
	未改进最佳缝合线	渐入渐出融合	10.997 2
		改进融合	14.191 4
6	改进最佳缝合线	渐入渐出融合	11.968 2
		改进融合	12.369 7
	未改进最佳缝合线	渐入渐出融合	11.854 9
		改进融合	12.211 4



2.3 泊松融合结果

尽管采取了前期的融合措施,但在图像重叠区域与非重叠区域的交界处,仍有少部分区域留着水平或垂直方向的拼接痕迹,这些拼接缝影响了最终图像的视觉连贯性。泊松融合效果对比如图7所示,其中,图7(a)呈现了未经泊松融合处理的局部图像区域,可以观察到在矩形框标注的区域内中央,存在一条淡淡的水平拼接缝,且缝两侧的颜色过渡不够自然,存在较明显色差,而图7(b)展示的经过泊松融合优化后的局部区域显示,矩形框内的颜色分布变得均匀,原有的拼接缝几乎不可见,实现了更为平滑和自然的色彩过渡,显著提升了图像的视觉一致性和美观度。所以,泊松融合在消除图像拼接过程中的残留接缝及色差方面展现出了较好的效果,为生成高质量、无缝的图像提供了有力支持。

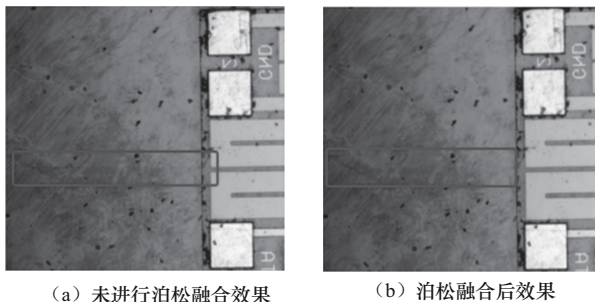


图7 泊松融合效果对比

2.4 拼接结果

采用本文所提拼接算法,按照拼接流程并裁剪黑边得到的拼接结果如图8所示,展现了良好

的效果。在拼接过程中,图像与图像之间的过渡更加自然,没有出现明显的鬼影或错位现象,确保了拼接后图像的整体连贯性和视觉舒适度。值得注意的是,本算法还有效减小了图像发生畸变的程度,进一步提升了拼接后图像的质量和观感。

3 结束语

本文针对图像拼接过程中常见的拼接缝现象,提出一种改进的图像拼接算法。在图像配准阶段,采用ORB特征提取,并利用暴力匹配进行初步匹配,然后使用RANSAC算法进行精细匹配。在图像融合阶段,使用改进能量函数来确定最佳缝合线的位置,通过对最佳缝合线两侧像素点的差异性进行评估实验,发现改进方法相比未改进方法的性能指标下降了5%左右,即缝合线两侧的像素相似性得到了提高。此外,采用改进融合方法对重叠区域图像进行融合后,相较于渐入渐出的融合方法,改进得到的融合后图像质量更高。实验结果表明,本文算法在显微图像拼接方面表现出色,生成图像质量较高。

参考文献:

- [1] PATRICK P, MICHEL G, ANDREW B. Poisson image editing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 313-318.
- [2] CHANG C H, SATO Y, CHUANG Y Y. Shape-preserving half-projective warps for image stitching[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recog-

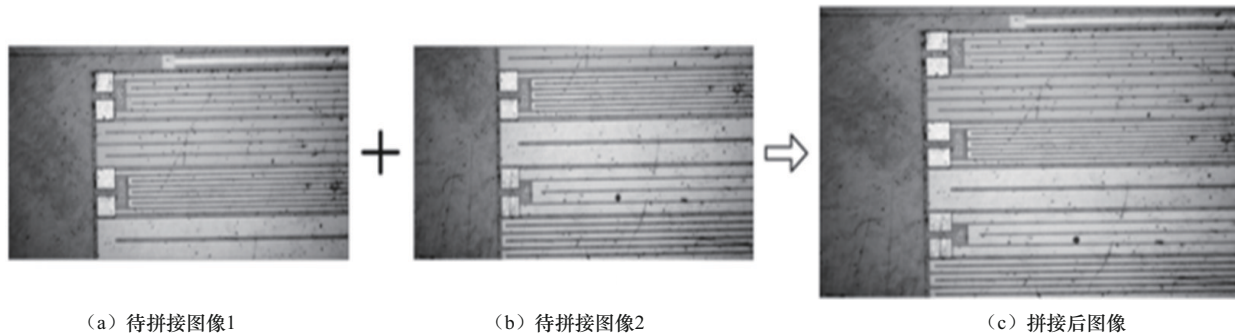


图8 拼接结果

- tion(CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2014: 3254-3261.
- [3] QI M, YANG T. Image stitching algorithm based on area blocking and optimal seam[C]//Proceedings of the 2019 11th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics(IHMSC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 287-290.
- [4] JINSOL C, HEUNSEUNG L, SANGWOO Y, et al. Image stitching method for surround view image without seamline[C]//Proceedings of the 2023 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-3.
- [5] 赵书睿. 全景图像拼接关键技术研究[D]. 四川: 电子科技大学, 2013.
- ZHAO S R. Research on key technology of panoramic image stitching[D]. Sichuan: University of Electronic Science and Technology, 2013.
- [6] 张文博, 刘卫东, 李乐, 等. 基于自适应图像增强的水下多帧目标图像拼接融合方法[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(5): 997-1003.
- ZHANG W B, LIU W D, LI L, et al. Adaptive image enhancement based stitching fusion method for underwater multi-frame target images[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(5): 997-1003.
- [7] 郭璠, 李小虎, 刘文韬, 等. 基于参数回归的快速全景图像拼接算法[J]. 通信学报, 2023, 44(9): 36-47.
- GUO F, LI X H, LIU W T, et al. A fast panoramic image stitching algorithm based on parametric regression[J]. Journal of Communication, 2023, 44(9): 36-47.
- [8] 刘杰, 游品鸿, 田明, 等. 基于局部投影的视差图像拼接平滑优化[J]. 电子学报, 2022, 50(6): 1451-1456.
- LIU J, YOU P H, TIAN M, et al. Optimization of parallax image stitching smoothing based on local projection[J]. Journal of Electronics, 2022, 50(6): 1451-1456.
- [9] YANG S, WU J, WANG H. Virtual exhibition image stitching fusion method based on light compensation and improved optimal stitching lines[C]//Proceedings of the 2023 3rd International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering (ICCECE). Piscataway: IEEE Press, 2023: 803-806.
- [10] 练洋奇, 陈新度, 吴磊, 等. 高分辨率瓷砖图像实时拼接算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(7): 144-150.
- LIAN Y Q, CHEN X D, WU L, et al. Real-time stitching algorithm for high-resolution tiled images[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(7): 144-150.
- [11] SUN Y, LV Y, SONG B, et al. Image stitching method of aerial image based on feature matching and iterative optimization[C]//Proceedings of the 2021 40th Chinese Control Conference (CCC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 3024-3029.
- [12] 黄旭龙, 杨晓梅. 含噪无人机图像拼接方法[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(7): 1973-1980.
- HUANG X L, YANG X M. Noise-containing UAV image stitching method[J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(7): 1973-1980.
- [13] 江一帆. 基于ORB特征的街景图像拼接技术研究与实现[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- JIANG Y F. Research and implementation of street view image splicing technology based on ORB features [D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
- [14] 杨春德, 成燕菲. 基于拼接缝自适应消除和全景图矫直的快速图像拼接算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(10): 3053-3059.
- YANG C D, CHENG Y F. Fast image stitching algorithm based on adaptive elimination of stitching seam and panorama straightening[J]. Computer Applications, 2019, 39(10): 3053-3059.
- [15] DONG Y, LIANG C, ZHAO C. A novel remote sensing image registration algorithm based on feature using ProbNet-RANSAC[J]. Sensors, 2022, 22(13): 4791.
- [16] 李四杰, 唐清善, 高英华. 基于GMS和改进最佳缝合线的视差图像拼接算法[J]. 计算机与现代化, 2022(12): 95-101, 117.
- LI S J, TANG Q S, GAO Y H. Parallax image stitching algorithm based on GMS and improved optimal suture[J]. Computer and Modernization, 2022(12): 95-101, 117.
- [17] TANG H, LIN Y B, SUN G Y, et al. A metal artifact reduction scheme in CT by a Poisson fusion sinogram based postprocessing method[J]. Journal of X-ray Science and Technology, 2021, 29(2): 245-257.
- [18] 王茹. 基于改进的ORB特征和融合算法的图像拼接系统实现[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- WANG R. Implementation of image stitching system based on improved ORB features and fusion algorithm[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [19] 斯捷, 肖雄, 李涇, 等. 基于格林坐标和改进最佳缝合线的图像拼接技术[J]. 计算机应用, 2021, 41(Z1): 230-236.
- SI J, XIAO X, LI J, et al. Image stitching technique based on Green's coordinates and improved optimal stitching line[J]. Computer Applications, 2021, 41(Z1): 230-236.
- [20] 占建斌. 基于改进特征提取和融合优化的图像拼接算法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
- ZHAN J B. Image stitching algorithm based on improved feature extraction and fusion optimization[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.



[作者简介]



王江安（1981-），男，长安大学信息工程学院副教授、硕士生导师，主要研究方向为卫星导航算法、三维合成算法、深度学习和人工智能。



黄乐（1999-），男，长安大学信息工程学院硕士生，主要研究方向为基于深度学习的三维重建。



梁温茜（1999-），女，长安大学信息工程学院硕士生，主要研究方向为图像拼接、三维重建。



秦林珍（1999-），女，长安大学信息工程学院硕士生，主要研究方向为三维点云语义分割。