

基于 PC-BRISK 的岩石显微图像拼接 *

卢文祥¹ 何小海¹ 袁旭拓¹ 滕奇志¹ 吕朝阳²

(1. 四川大学电子信息学院 成都 610065; 2. 成都西图科技有限公司 成都 610024)

摘要: 传统的配准算法在高分辨率岩石显微图像上配准准确率低、配准速度慢。此外,在显微岩石薄片全景拼接过程中,由于单视域画面可能存在有效内容缺失而无法提取到有效特征点,或者纹理单一提取到的特征点较少的情况,造成全景图像拼接失败。针对上述问题提出了一种基于改进相位相关法的 BRISK 图像拼接算法。通过提取待配准图像之间的相似区域,对相似区域进行 BRISK 图像配准,采用由载物台运动规律得出的最佳匹配模型来配准无特征点图像,最终完成岩石薄片图像的全景拼接。实验结果表明,本文提出的算法相较于传统算法,在配准方面达到 87.5% 的准确率,每组配准耗时 2.662 s,具有配准速度快、配准准确率高的优势。此外,本文提供了一种岩石薄片全景拼接的方法,具有实时拼接的实际应用价值。

关键词: 岩石显微图像; 相位相关法; BRISK; 特征匹配

中图分类号: TN391 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4050

Rock microscopic image mosaic based on PC-BRISK

Lu Wenxiang¹ He Xiaohai¹ Yun Xutuo¹ Teng Qizhi¹ Lyu Zhaoyang²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Chengdu Xitu Technology Co., Ltd., Chengdu 610024, China)

Abstract: The traditional registration algorithm has low registration accuracy and slow registration speed on high-resolution rock microscopic images. In addition, in the process of panoramic stitching of microscopic rock slices, due to the lack of effective content in single-view images, effective feature points cannot be extracted, or there are fewer feature points extracted by a single texture, resulting in panoramic image stitching failure. Aiming at the above problems, a BRISK image stitching algorithm based on an improved phase correlation method is proposed. By extracting the similar regions between the images to be registered, the BRISK image registration is performed on the similar regions, and the best matching model obtained by the motion law of the stage is used to register the image without feature points. Finally, the panoramic mosaic of rock slice images is completed. The experimental results demonstrate that the algorithm proposed in this paper achieves a registration accuracy of 87.5% compared to traditional algorithms, with a registration time of 2.662 seconds per pair. It exhibits advantages in terms of both fast registration speed and high accuracy. Moreover, this paper presents a method for panoramic stitching of rock thin sections, which offers practical value for real-time stitching applications.

Keywords: rock microscopic image; phase correlation method; BRISK; feature matching

0 引言

在地质学领域,由于岩石主要成分为晶体矿物,不同的岩石晶体会在不同形式的光下呈现不同光性变化^[1-2]。目前,依据岩石晶体的不同光学特性,地质研究人员利用偏光显微镜^[3]观察岩石制成的岩石薄片^[4]图像^[5],最后按照岩石鉴定标准进行岩石岩性识别^[6]。但是,通过偏光显微镜

只能观察到岩石薄片的单视域局部图像,而局部图像不能呈现整个薄片的岩石岩性信息。随着显微镜和计算机软硬件的广泛应用,对高分辨率观察岩石薄片的整体图像提出了更高的要求,将多张具有重叠区域的局部图像拼接成具有整个视域的全局图像成为提高分辨率的有效方法。

图像拼接过程由图像配准、图像融合共同完成,其中图像配准是影响图像拼接效果的关键。目前,图像配准有

3 类配准算法。

其一,基于灰度信息的图像配准。例如,针对全景相机昂贵的问题,刘明奇等人提出一种基于灰度相关和信息熵的图像拼接算法^[7],实现了使用普通相机拍出全景图的效果。但是,当图像背景不相似、图像有轻微模糊或其他变形、图像重叠区域少时,会产生较大拼接误差。

其二,基于时域和频域变换的图像配准。例如,针对不同纹理瓷砖图像的快速拼接问题,练洋奇等^[8]提出一种基于拉普拉斯算子的改进相位相关拼接算法,实现了快速和高质量图像拼接。但是,当图像纹理信息不明显、图像缩放时,会造成较大拼接误差。

其三,基于特征点的图像配准,例如,针对高分辨率图像配准时开销问题,Tang 等^[9]提出了一种基于 SIFT 的快速图像配准算法,该算法在高分辨率图像实时拼接上表现出优异的性能;针对传统三维多模态医学图像配准的精度不高、耗时较长且易受干扰的问题,程天宇等^[10]提出一种基于几何代数 SURF 的三维医学图像配准方法,该方法在三维配准上精度更高且稳定性更强,可为临床适用提供理论基础与诊疗预案;针对深海单视域局部图像信息有限、对比度和色彩失真等问题,Yuan 等^[11]提出一种用于深海图像拼接的多通道融合和改进的 AKAZE 方法,该方法能够以最小的接缝生成高质量的拼接图像;针对无人机单视域图像无法获得拍摄区域的整体信息,Zhu 等^[12]提出一种改进的定向 FAST 和旋转 BRIEF 算法,该算法具有更高的配准精度和速度。

由于岩石薄片的显微图像具有大量相似与复杂的纹理结构,大大增加了拼接的难度,对配准算法鲁棒性要求较高。一些研究人员通过深度学习的方式进行图像拼接^[13-15],发现基于深度学习的图像拼接具备更好的配准精度和鲁棒性。但是,受限于大量数据需求、特征提取不稳定和高性能的 GPU 硬件设备等因素,基于深度学习的图像拼接还无法部署在显微设备上。

目前,针对显微岩石薄片图像拼接多采用基于特征点的 SIFT 图像配准^[16],该方法配准准确率高,但配准时间更长。本文在基于特征点的图像配准方法上,并考虑实际显微镜采集系统依靠电动载物台移动固定步长进行岩石薄片图像的采集,以及采集的高分辨率岩石薄片图像的复杂性,提出一种适用于岩石显微图像场景下基于相位相关和 BRISK 算法(phase correlation-BRISK, PC-BRISK)的图像拼接算法。通过逐步扩张相位相关法,改进相位相关法在清晰度不一致的岩石显微图像中出现违峰而导致计算出错误的图像重叠区域,最终导致配准时间过长、甚至配准失败;通过自适应阈值的 BRISK 算法,改进传统 BRISK 算法在不同对比度岩石显微图像中出现提取过多或者过少的特征点数量而导致配准时间剧增或者配准失败。实验结果表明,与传统的图像拼接算法相比,本文算法配准准确率更高、配准时间更少,在高分辨率图像上表现出良好的性能,

在实时图像拼接中具有潜在的应用价值。

1 基于 PC-BRISK 的岩石显微图像拼接

1.1 岩石图像采集与拼接顺序

1) 岩石图像采集

由于显微镜观察到的视野是固定的,而实际采集薄片的面积远大于显微镜的可观察视野,因此利用步进电机控制载物台移动的方式间接采集岩石薄片的所有视野图像,如图 1 所示为岩石图像采集系统,通过控制载物台左右前后移动来转换显微镜下岩石薄片的视野,控制载物台上移动达到聚焦的目的,最终采集整张薄片所有视野清晰图像。

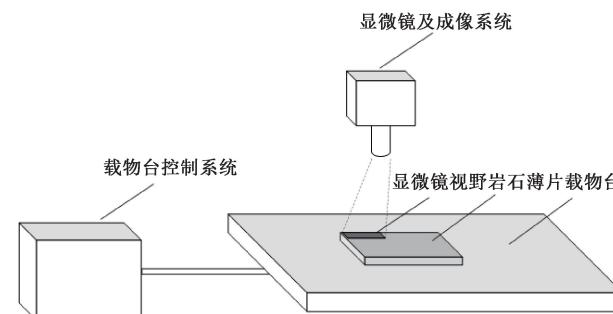


图 1 岩石薄片采集系统

2) 岩石图像拼接顺序

接下来将采集到的序列岩石图像进行拼接,图像拼接顺序和图像采集的顺序密切相关。控制载物台以“S”型移动,图像拼接也呈现“S”型的拼接顺序,如图 2 所示为采集与拼接顺序,按照数字从小到大的顺序采集与拼接,浅灰色区域为相邻视野图像的重叠区域。由于本文采用基于特征的图像拼接算法,该算法需要相邻视野图像具有重叠区域,因此通过控制载物台移动步长来控制重叠区域的大小。

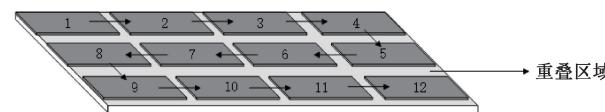


图 2 岩石薄片图像采集与拼接顺序

显微镜可观察视野大小与物镜放大倍数和视场数有着密切关系,显微镜可观察视野大小可表示为:

$$d_{field} = \frac{FN}{\Gamma} \quad (1)$$

式中: 观察视野大小; Γ 为物镜放大倍数; FN 为视场数,表示中间像面上可通过目镜观察到的区域的直径。

同时,显微镜可观察视野大小与相机的像元尺寸和图像分辨率有着间接关系,显微镜可观察视野大小可表示为:

$$d_{field} = \frac{\rho}{\alpha} \quad (2)$$

式中: ρ 为相机的像元尺寸; α 为图像分辨率。

载物台移动步长与实际移动距离也存在密切关系,可表示为:

$$\Delta Step = Kd_{move} \quad (3)$$

式中: $\Delta Step$ 表示物台移动步长; d_{move} 表示载物台移动距离; K 为比例系数。

最终,可推出相邻拼接图像的重叠区域像素宽度与载物台移动步长的关系,如式(4):

$$\Delta S = d_{move}\rho = \frac{\Delta Step}{K}\rho = \frac{\Delta Step}{K} \frac{FN}{F} \alpha \quad (4)$$

式中: ΔS 表示重叠区域像素宽度。

1.2 基于相位相关法的粗配准

由1.1节可知,在采集岩石图像时,相邻视野岩石图像需存在重叠区域才能完成图像拼接,通过控制载物台步长可控制相邻图像的重叠区域大小。图像拼接主要由图像配准和图像融合完成,其中图像配准是决定图像拼接效果的主要因素,如果直接对整张图像执行图像配准,存在诸多劣势:其一,图像越大,相应的特征点数量越多,此时会占用大量计算机内存来保存特征点信息,甚至超出现有的内存要求,带来购置更大内存的昂贵费用;其二,特征点越多,匹配耗时越多,匹配错误概率也越大;其三,由于本文使用岩石样本薄片图像进行拼接,岩石图像纹理单一、结构相似,非重叠区域特征点信息会对重叠区域特征点信息形成干扰,导致配准错误。基于以上思考,本文采取对重叠区域进行配准,这样既节省了电脑内存,更具有实时拼接的应用价值。

在对重叠区域进行配准前,需要知道重叠区域的位置。由于采集岩石图像时,载物台主要进行二维平面的移动,可知相邻图像也主要存在位置的偏差,因此可以通过相位相关法进行重叠区域的粗配准,找出重叠区域的大致位置,相位相关法原理如下:

1) 相位相关法

相位相关法依据傅里叶平移定理,将图像信号在空间域上的平移转化为频域上成比例的相位频移,计算获取图像间空间平移参数。假设两幅图像分别表示为 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 且存在平移关系,则:

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (5)$$

式中: x_0 和 y_0 表示空间平移距离。

将公式左右两边进行傅里叶变换后可以得到频域关系:

$$F_2(u, v) = e^{-i2\pi(ux_0+vy_0)} F_1(u, v) \quad (6)$$

根据式(6)可计算获得互功率谱:

$$H(u, v) = \frac{F_1(u, v)F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v)F_2^*(u, v)|} = e^{-i2\pi(ux_0+vy_0)} \quad (7)$$

2) 逐步扩张相位相关法

在理想情况下互功率谱的傅里叶逆变换是一个迪利克雷脉冲函数,因此可以通过寻找脉冲函数的峰值获取两幅图像间的偏移量。但在显微岩石图像中,由于图像纹理单

一,可能存在两幅图像清晰度不一致的情况,若对全幅图像执行计算,其频域会产生伪峰,导致计算得到错误的偏移量。为了解决伪峰问题,本文提出逐步扩张计算区域过程执行相位相关法来获取准确偏移量。

本文中图像的相似区域往往在待配准图像和基准图像的左/右侧或上/下侧,因此可以通过不断扩张计算区域来获取两幅图像相似区域的偏移量。如图3所示,以左/右侧为例,首先初始化步长为整张图像宽度的 $\frac{1}{128}$,即:

$$\Delta step = \frac{W_{img}}{128} \quad (8)$$

式中: $\Delta step$ 为初始步长; W_{img} 为岩石图像宽。

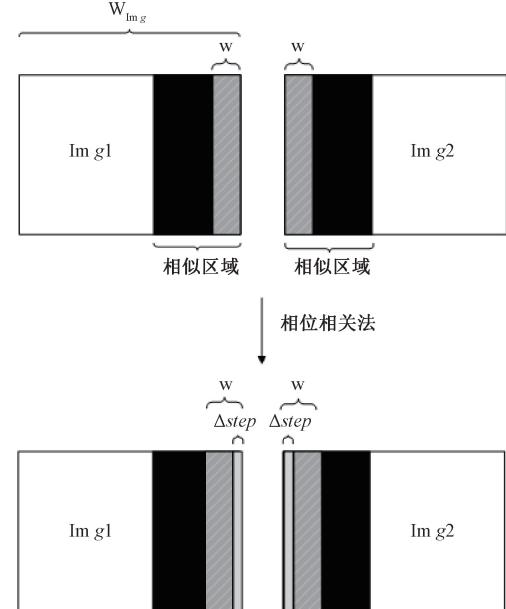


图3 逐步扩张相位相关法流程

然后计算相邻图像 w 宽度内图像的相位相关性,每次增加一个 $\Delta step$ 步长,当计算区域接近相似区域时计算所得偏移量趋近于0,后续跨过相似区域后,计算所得的偏移量将随着步长同步增长,本小节通过这一规律来确定相似区域。

$$w = w + \Delta step \quad (9)$$

式中: w 为初始计算区域。

对图4(a)、(b)进行相位相关法和逐步扩张相位相关法,得到重叠区域图4(c)、(d)、(e)、(f),可以发现使用逐步扩张相位相关法会得到更贴近的重叠区域图4(e)、(f),而使用相位相关法得到的重叠区域过大图4(c)、(d),会增加后续配准时间、甚至配准失败。

1.3 基于改进BRISK的精配准算法

由1.2节可知,通过逐步扩张相位相关法的粗配准可求出相邻图像重叠区域,接下来本节采用改进的BRISK算法对重叠区域进行特征点检测和描述。改进的BRISK算法通过采用自适应阈值的FAST9-16算法进行特征点提取,然后对提取的特征点进行BRISK描述,最后进行基于

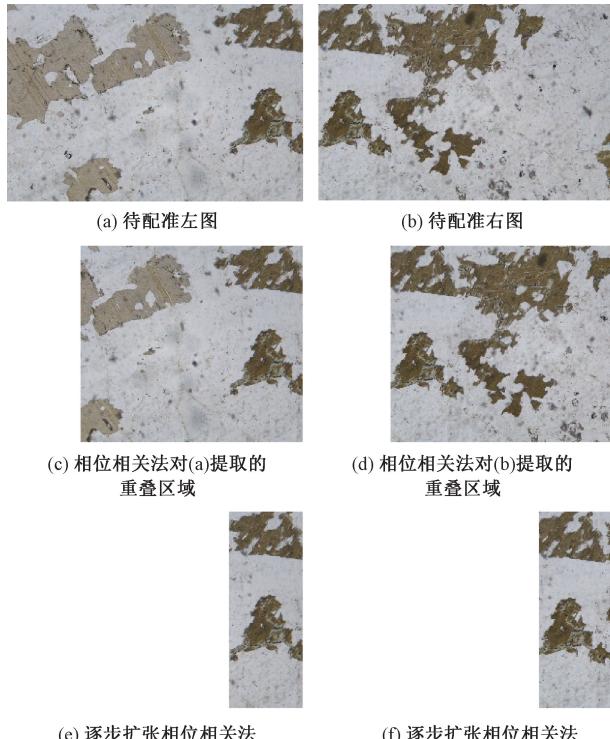


图 4 相位相关提取重叠区域

汉明距离的匹配。在进行显微岩石图像配准时,相比 SIFT、SURF、AKAZE、FREAK、ORB 等算法,本文改进的 BRISK 算法在具有较高的配准准确率和稳定性的同时,在配准速度上也较快,具有实时拼接的应用价值。

传统的 BRISK 算法在构建尺度空间后,对尺度空间中的图像采用 FAST9-16 算法进行角点检测,如图 5 所示,FAST9-16 算法对图像像素点进行遍历,若像素点周围的 16 个像素点存在连续的 9 个点的灰度值与中心像素点灰度值差的绝对值大于设定的阈值,即式(10)所示,则该中心像素点可判定为候选特征点。

$$\sum_{x \in \text{circle}(p)} |I(x) - I(p)| > \epsilon_{\text{Threshold}} \quad (10)$$

式中: x 表示周围像素点; $I(x)$ 表示像素点 x 的灰度值; p 表示周围像素点; $I(p)$ 表示中心像素点 p 的灰度值; $\epsilon_{\text{Threshold}}$ 表示阈值; $\text{circle}(p)$ 为像素点 p 的圆,半径一般为 3.4 像素。

由于 FAST9-16 算法提取到的特征点数量严重依赖阈值 $\epsilon_{\text{Threshold}}$ 的大小,若阈值 $\epsilon_{\text{Threshold}}$ 选取不合适,检测到的特征点数量过多会导致后续特征点描述及匹配耗费更多的时间,检测到的特征点数量过少会导致后续配准不稳定,甚至配准失败。显微镜下的岩石图像,根据使用光的不同,例如使用单偏光和正交偏光,得到如图 6 所示图像,正交偏光图对比度低,单偏光图对比度高,而高对比度图与低对比度图在同一个阈值 $\epsilon_{\text{Threshold}}$ 下,使用 FAST9-16 算法检测到的特征点数量差距很大,如图 7 使用图 6 的 8 张图进行实验得

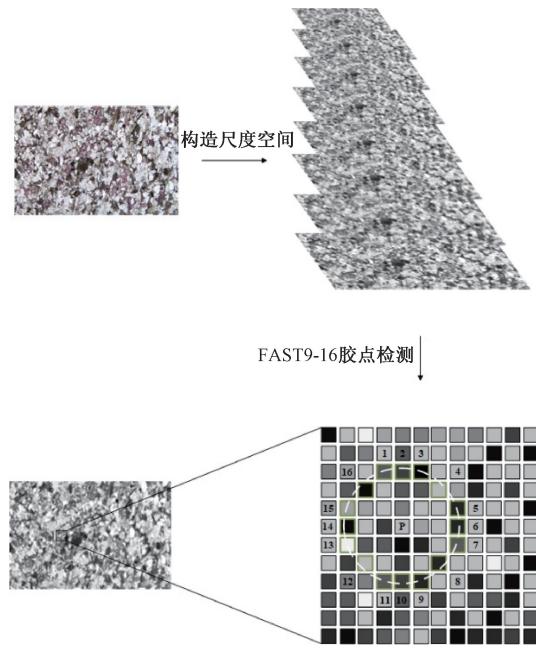


图 5 FAST9-16 角点检测

到的折线图,折线图横坐标代表阈值 $\epsilon_{\text{Threshold}}$,纵坐标代表阈值 $\epsilon_{\text{Threshold}}$ 下使用 FAST9-16 算法检测到的特征点数量。若选用固定阈值 $\epsilon_{\text{Threshold}}$ 对岩石图像进行 FAST9-16 算法特征点检测,会出现高对比度图像特征点数量远多于低对比度图像,这会出现高对比度图后续特征点描述及匹配耗费更多的时间,低对比度图后续配准不稳定,甚至配准失败。针对上述情况,本文提出一种自适应阈值的 FAST9-16 算法,该算法可以保证在不同对比度岩石图像下自适应改变阈值 $\epsilon_{\text{Threshold}}$,最终提取稳定数量的特征点,增强了后续配准的稳定性。

自适应阈值 FAST9-16 算法的阈值 $\epsilon_{\text{Threshold}}$ 计算过程如图 8 所示。首先根据模板计算灰度值,模板如图 9 所示,使用该模板对待检测特征点图像进行灰度差计算,计算公式如式(11),式中 $N_s(p)$ 表示中心像素 p 的 8 个相邻像素,如图 9 所示标记为 1~8 的像素,式中 $p_{(i,j)}$ 为像素 p 相邻的 $N_s(p)$ 像素,式中 δ_p 表示中心元素 p 所在图像位置的灰度差;然后,对待检测特征点图像的所有元素进行遍历,得到所有位置的灰度差;接下来,对求解的灰度差进行直方图统计;最终,根据式(12),求得阈值 $\epsilon_{\text{Threshold}}$,式中 P_{δ_p} 表示灰度差为 δ_p 的像素分布概率, α 是根据实验所得进行阈值调节的参数。

$$\delta_p = \frac{\sum_{i=1}^{N_s(p)} (p_{(i,j)} - p)}{8} \quad (11)$$

$$\epsilon_{\text{Threshold}} = \{x \mid \sum_{\delta_p=0}^x P_{\delta_p}^2 = \alpha \sum_{\delta_p=0}^{255} P_{\delta_p}^2\} \quad (12)$$

1.4 最佳匹配模型

参与拼接的某些单视域画面可能存在有效内容缺失而

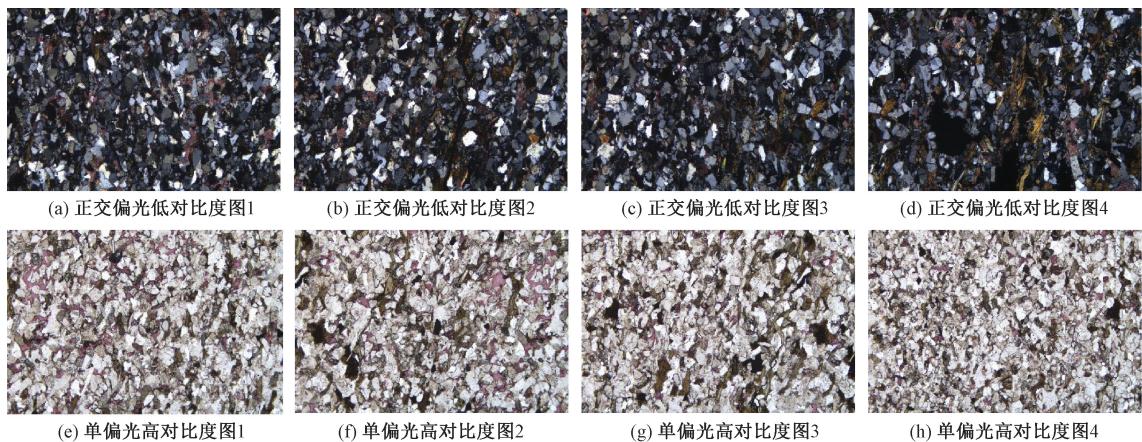


图6 正交偏光和单偏光下的局部岩石薄片图像

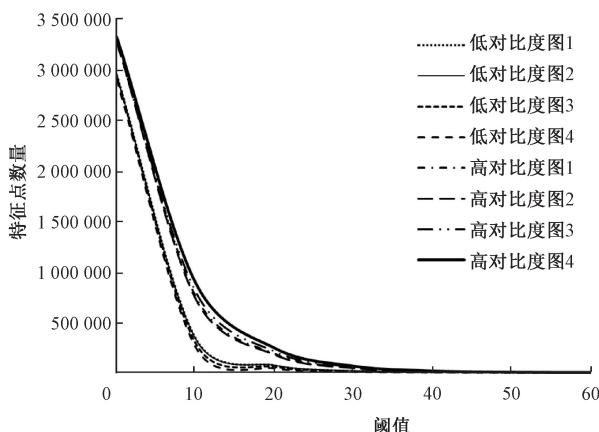


图7 高对比度图与低对比度图在不同阈值下检测到的特征点数量

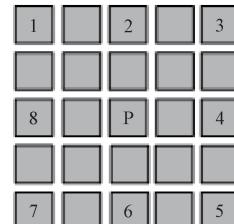


图9 灰度值计算模板

无法提取到有效特征点,或者纹理单一提取到的特征点较少,无法满足载物台机械规律而被判定为错误匹配的情况,会导致无法直接获取配准矩阵,无法执行配准。因此需要进行配准失败校正,使用矩阵来进行替换,避免拼接失败。因此本文进行最佳匹配模型建模,定义 X 轴最佳匹配 M_x 和 Y 轴最佳匹配 M_y ,在拼接过程中,每组图像配准完成后根据式(13)更新最佳匹配,其中 i 和 j 表示当前配准图像对, S_i, S_j, S_x 和 S_y 表示特征点匹配对数。在无法获取有效配准矩阵情况下,将直接采用最佳匹配关系替换。

$$\begin{cases} M_x = M_i, & S_i > S_x \\ M_y = M_j, & S_j > S_y \end{cases} \quad (13)$$

1.5 图像拼接总流程

根据1.1节的拼接顺序进行基准图像与待配准图像之间的拼接,拼接流程如图10所示。首先获取基准图像和待配准图像;然后对这两张图进行改进的相位相关法获取相似区域,如1.2节所示;接下来对相似区域进行改进BRISK的配准,如1.3节所示;若提取的特征点数量较少,则使用最佳匹配模型,如1.4节所示。

2 实验分析及讨论

2.1 实验材料

本文通过显微镜采集8张不同尺寸的薄片,共计得到3 326张分辨率为 2736×1824 的图像,以这些图像为材料进行显微镜岩石薄片图像配准实验,各个薄片的详细信息如表1所示。

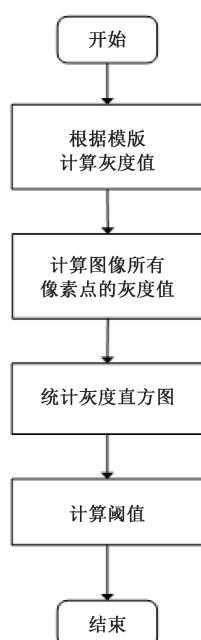


图8 自适应阈值计算流程

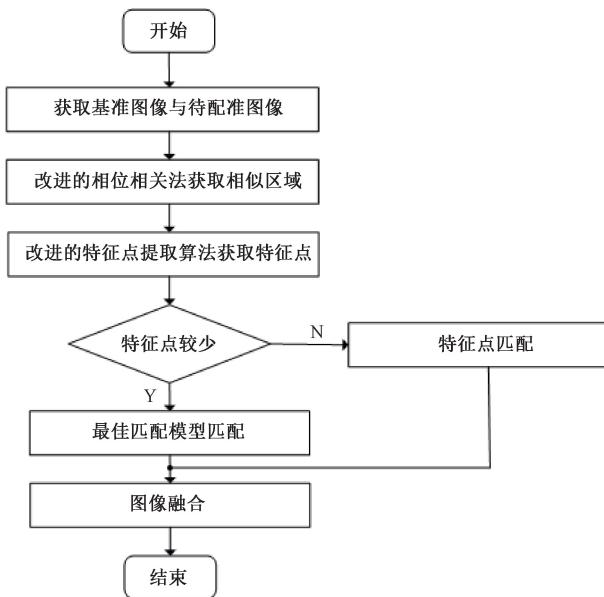


图 10 图像拼接总流程

表 1 拼接实验的薄片信息

| 薄片型号 | 图像数量/张 | 图像分辨率 |
|------|--------|-------------|
| 薄片 1 | 368 | 2 736×1 824 |
| 薄片 2 | 357 | 2 736×1 824 |
| 薄片 3 | 160 | 2 736×1 824 |
| 薄片 4 | 165 | 2 736×1 824 |
| 薄片 5 | 693 | 2 736×1 824 |
| 薄片 6 | 380 | 2 736×1 824 |
| 薄片 7 | 594 | 2 736×1 824 |
| 薄片 8 | 609 | 2 736×1 824 |

2.2 实验环境

本文基于显微镜岩石薄片图像进行拼接实验,实验环境在 Windows10 操作系统下进行,PC 的 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-7500 CPU@3.4 GHz,PC 的内存为 16 GB,使用 Visual Studio 2022 作为编程平台,使用 C++ 作为编程语言,PC 配置如表 2。

表 2 拼接实验个人电脑配置

| PC 属性 | 详细信息 |
|-------|---------------------------------------|
| 操作系统 | Windows 10 |
| CPU | Intel(R) Core(TM) i5-7500 CPU@3.4 GHz |
| 内存 | 16 GB |
| 编程平台 | Visual Studio 2022 |
| 编程语言 | C++ |

2.3 本文算法与经典配准算法性能比较

从 8 张岩石薄片采集到 3 326 张图像中,随机选取 200 组图像进行配准实验,配准实验结果如表 3 和图 11。通过将本文改进的算法与传统的相位相关、BRISK 进行比较,如表 3 的实验 2~4,根据实验 2、3 中实验 3 的平均配准时间和准确率较高,根据实验 3、4 中实验 4 的平均配准时间和准确率较高,从而可以验证本文改进的相位相关法和改进的 BRISK 算法在显微岩石图像配准中具有更高的配准准确性及更快的配准时间。通过将本文的改进算法与传统的 SIFT 进行比较,如表 3 的实验 1、4,可以看出在显微镜岩石图像配准中本文的改进的相位相关法和改进的 BRISK 算法具有更高的配准准确性和更快的配准时间。

2.4 多图拼接

使用 1.5 节图 10 流程对完整的岩石薄片进行拼接,采

表 3 图像配准性能对比

| 实验组别 | 算法 | 单组平均匹配点数 | 每组平均耗时/s | 配准错误组数 | 配准正确率/% |
|------|-------------------|----------|----------|--------|---------|
| 实验 1 | 本文的相位相关+SIFT | 31 313 | 11.397 | 44 | 78 |
| 实验 2 | 相位相关+BRISK | 36 217 | 9.431 | 47 | 76.5 |
| 实验 3 | 本文的相位相关+BRISK | 26 960 | 5.454 | 30 | 85 |
| 实验 4 | 本文的相位相关+本文的 BRISK | 17 085 | 2.662 | 25 | 87.5 |



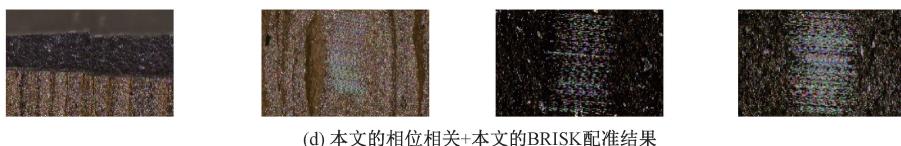
(a) 本文的相位相关+SIFT配准结果



(b) 相位相关+BRISK配准结果



(c) 本文的相位相关+BRISK配准结果



(d) 本文的相位相关+本文的BRISK配准结果

图 11 不同算法配准结果比较

注: 其中从左至右为对应薄片 1~薄片 8 中的随机显微岩石图像

用 2.1 节的 8 张薄片分别进行拼接, 拼接结果如图 12、13 所示, 为其中 2 张薄片的拼接结果。

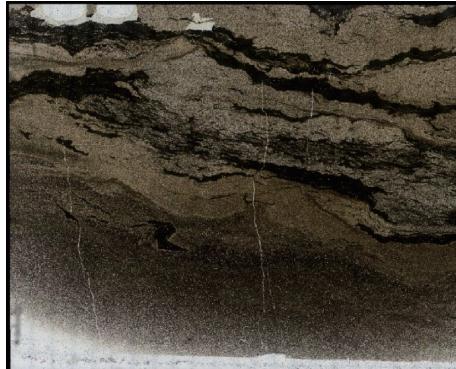


图 12 完整薄片拼接全景展示图 1

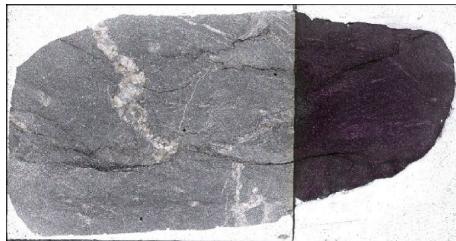


图 13 完整薄片拼接全景展示图 2

本文采集与拼接系统, 如图 14 所示, 通过控制载物台在显微镜中采集岩石薄片的图像, 再通过本文拼接算法进行图像拼接。



图 14 采集与拼接系统结构

3 结 论

本文针对传统配准算法在高分辨率岩石薄片图像上配准速度慢、配准准确率低, 以及岩石薄片局部图像无特征点造成全景图像拼接失败等问题, 提出了一种基于改进相位相关法的 BRISK 图像拼接(PC-BRISK)算法。通过提取待配准图像之间的相似区域, 后续针对相似区域进行

BRISK 图像配准, 以及采用由载物台运动规律得出的最佳匹配模型来配准无特征点图像, 然后进行图像融合消除拼接边缘光照不均的情况, 最终完成岩石薄片图像的全景拼接。实验结果表明, 本文算法相较于传统算法, 具有配准速度快、配准准确率高的优势, 并且提供了一种岩石薄片全景拼接的方法, 具有实时拼接的应用价值。

参考文献

- [1] 付光明, 严加永, 张昆, 等. 岩性识别技术现状与进展[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 26-40.
- [2] CHEN Z, LI X, CHEN H, et al. The characteristics of lithofacies and depositional model of fine-grained sedimentary rocks in the ordos basin, china [J]. Energies, 2023, 16(5): 2390.
- [3] PHILIP C R. Polarized Light Microscopy[EB/OL]. MicroscopyU [2024-06-18]. <https://www.microscopyu.com/techniques/polarized-light/polarized-light-microscopy>.
- [4] 胡修棉, 赖文, 许艺炜, 等. 沉积岩显微数字图像数据的获取与信息收集标准[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2020, 5(3): 15-25.
- [5] 赖文, 蒋璟鑫, 邱检生, 等. 南京大学岩石教学薄片显微图像数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2020, 5(3): 26-38.
- [6] 许振浩, 马文, 李术才, 等. 岩性识别: 方法、现状及智能化发展趋势[J]. 地质论评, 2022, 68 (6): 2290-2304.
- [7] 刘明奇, 倪国强, 陈小梅. 基于信息熵和灰度相关的图像拼接算法[J]. 光学技术, 2007(S1): 253-254.
- [8] 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.
- [9] TANG Z, ZHANG Z, CHEN W, et al. An SIFT-based fast image alignment algorithm for high-resolution image [J]. IEEE Access, 2023, 11: 42012-42041.
- [10] 程天宇, 顾菊平, 华亮, 等. 基于几何代数 SURF 的三维医学图像配准研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 227-237.
- [11] YUAN P, FAN C, ZHANG C. Deep-sea image stitching: Using multi-channel fusion and improved AKAZE[J]. IET Image Processing, 2023, 17 (14): 4061-4075.

- [12] ZHU F, LI H, LI J, et al. Unmanned aerial vehicle remote sensing image registration based on an improved oriented FAST and rotated BRIEF-random sample consensus algorithm [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 126: 106944.
- [13] 杨旭朝, 雷志勇, 王娇娇. 改进基于多相机的无监督学习图像拼接算法[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(2): 66-73.
- [14] WU J, FAN Y. HNAS-reg: hierarchical neural architecture search for deformable medical image registration [C]. 2023 IEEE 20th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), IEEE, 2023: 1-4.
- [15] QIU W, XIONG L, LI N, et al. AEAU-Net: an unsupervised end-to-end registration network by combining affine transformation and deformable medical image registration[J]. Medical & Biological

Engineering & Computing, 2023, 61 (11): 2859-2873.

- [16] 庞战, 滕奇志, 何海波. 基于 SIFT 的岩石薄片图像拼接[J]. 微型机与应用, 2017, 36(6): 46-50.

作者简介

卢文祥, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与识别。
E-mail: luwenxiang_scu@163.com

何小海(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为图像处理、模式识别、计算机视觉、图像通信和软件工程等。
E-mail: hxh@scu.edu.cn

员旭拓, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与识别。
E-mail: 164856670@qq.com

滕奇志, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为图像处理、图像传输、模式识别和软件工程。
E-mail: qzteng@scu.edu.cn

吕朝阳, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为软件工程师, 计算机视觉。
E-mail: Zhaoyang_lui@163.com