

基于改进 SIFT 算法的超声图像拼接方法

迟大钊¹, 徐智贤¹, 刘海春², 李庆生², 郭强², 苏维刚², 贾涛²

(1. 哈尔滨工业大学, 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨, 150001;
2. 国家管网集团工程质量监督检验有限公司, 北京, 100013)

摘要: 针对大型结构超声 C 扫描获得的多幅子图像, 为了获取被测结构的全景图像, 研究图像的拼接方法。根据超声波法成像检测的动态过程并结合数字化图像处理技术, 在传统的基于尺度不变特征变换 (scale invariant feature transform, SIFT) 算法基础上, 提出了一种改进的超声 C 扫描检测图像拼接方法。首先, 针对传统 SIFT 算法存在超声图像配准成功率低的问题, 利用超声扫查过程中探头起始位置的矢量差对 SIFT 算法得到的特征点粗匹配结果进行筛选; 其次, 采用动态规划的方法寻找最佳缝合路径; 最后, 沿最佳缝合路径进行渐入渐出融合以改善融合区域的视觉效果。人工缺陷试块及焊接结构试件超声图像的拼接结果表明, 基于改进的 SIFT 图像拼接算法可以将多幅超声 C 扫描子图像有效拼接为全景图像; 所提方法特征点匹配准确率高、图像融合失真小, 优于常规 SIFT 图像拼接算法; 拼接图像中, 目标位置关系对应良好, 可实现结构加工质量的整体无损评价。

创新点: (1) 引入超声 C 扫描成像过程中探头起始位置的矢量差, 提出基于改进 SIFT 算法的图像拼接方法。
(2) 采用动态规划方法寻找图像的最佳缝合路径, 并进行渐入渐出融合, 改善拼接图像的视觉效果。

关键词: 无损检测; 超声成像; 图像拼接; SIFT 算法

中图分类号: TG 409 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20240630001

An ultrasonic image mosaic method based on improved SIFT algorithm

CHI Dazhao¹, XU Zhixian¹, LIU Haichun², LI Qingsheng², GUO Qiang², SU Weigang², JIA Tao²

(1. National Key Laboratory of Precision Welding and Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China; 2. PipeChina Engineering Quality Supervision and Inspection Company, Beijing, 100013, China)

Abstract: A comprehensive non-destructive testing of large structures usually needs a series of C-scans. In order to obtain a panoramic image of the structure under test, the method of sub-image mosaic is studied. According to the dynamic process of ultrasonic imaging and combined with digital image processing technology, an improved image mosaic method for ultrasonic C-scan detection is proposed based on the traditional scale invariant feature transform (SIFT) algorithm. Firstly, in view of the low success rate of ultrasound image registration using the traditional SIFT algorithm, the obtained matching feature points are screened through the vector difference of the starting positions of ultrasonic probe. Secondly, a dynamic programming method is used to find the best stitching path. Finally, a gradual in and out fusion is carried out along the best path for stitching to improve the visual effect of the fused area. Artificial defect contained block and welded piece are prepared and tested. The results of ultrasonic image mosaic show that the improved SIFT algorithm can effectively stitch multiple ultrasonic C-scan sub-images into panoramic images, and the proposed method has high accuracy of feature point matching and small image fusion distortion, which is better than the conventional SIFT image mosaic algorithm. In the mosaic image, the positions of targets match well, which can achieve overall non-destructive evaluation of structural processing quality.

Highlights: (1) By introducing the vector difference of the starting positions of the probe during C-scan imaging, an image mosaic method based on the improved SIFT algorithm is proposed.

(2) A dynamic programming method is used to find the best path for stitching, and a gradual-in and gradual-out fusion

is carried out to improve the visual effect of the fused area.

Key words: non-destructive testing; ultrasonic imaging; image mosaic; SIFT algorithm

0 序言

在众多的无损检测方法中,超声成像技术可以显示缺陷的多维度分布信息,便于对无损检测结果进行量化评价。目前,主要的超声成像检测方法有C扫描^[1-3]、衍射视差法^[4-5]及相控阵^[6-8]等。其中,超声C扫描成像显示结构的投影图,反映缺陷在某一深度范围内分布的位置和面貌信息,是判断结构缺陷分布的主要视图。由于单次成像检测范围有限,常出现单次检测不能覆盖全部待检测区域的情况。为了实现大型焊接结构的全面检测,需要进行分区的多次C扫描。

图像拼接是通过一定算法,将多幅子图像拼合成全景图像的技术手段,在卫星成像、医学成像、生物识别及水下监视等领域都有广泛应用^[9-11]。图像拼接技术以图像配准和图像融合为基础。图像配准阶段计算具有重叠部分的不同图像间的变换关系,将多幅互有重合的图像置于同一坐标系下;图像融合阶段将已配准的图像合并形成1张视野范围更广的全景图像。目前,已有应用的缺陷检测图像拼接算法以基于点特征的配准拼接算法为主,其中具有代表性的SIFT算法由Lowe^[12]于2004年提出,因其尺度不变性、对噪声的鲁棒性以及对图像特征的精准定位现已被应用于光学图像、显微图像及医学射线图像等领域^[13-15]。但工业上的超声缺陷图像相比医学超声,分辨率低、信息量少、缺陷形状和分布都具有随机性,常规的图像拼接方法不能直接用于超声波法检测图像的拼接。

目前关于焊接结构缺陷声学检测图像拼接研究的相关报道较少。文中研究超声C扫描图像拼接方法,为提高图像配准成功率和融合效果,提出一种改进的SIFT图像拼接算法,实现超声C扫描图像的有效拼接。

1 人工缺陷试块超声图像获取

设计并加工制作含人工缺陷试块,如图1所示。在厚度20 mm的低碳钢板上,通过铣削加工了不同轮廓的阶梯状区域用以模拟结构内壁腐蚀缺

陷。各阶梯深度分别为1 mm,2 mm和5 mm。利用Multi 2000 Pocket超声相控阵探伤仪,配合编码器获取C扫描图像;超声换能器为中心频率5 MHz、64阵元线性阵列探头;检测参数为同时激发16阵元、0°声束偏转和系统增益为57 dB;编码器步进值为0.5 mm,机械扫查范围为105 mm。以上述条件进行检测时,单次检测图像宽度为24.8 mm。检测图像以编码器步进方向为横轴,探头电子扫查方向为纵轴,编码器某次采样中一组阵元检测得到的A信号在C扫描图像中体现为一固定长宽的像素区域。对该结构分为4部分进行图像采集,得到的图像,如图2所示。



图1 人工缺陷试块

Fig. 1 Artificial defects contained block

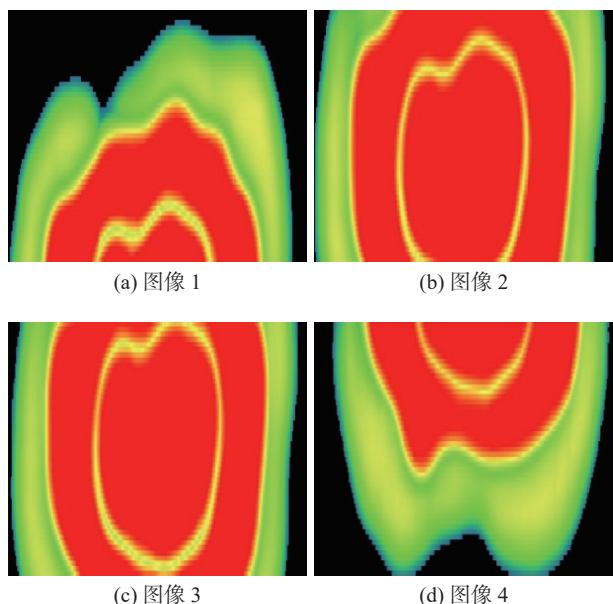


图2 待拼接的超声图像

Fig. 2 Ultrasonic images involved in stitching. (a) image 1; (b) image 2; (c) image 3; (d) image 4

2 改进 SIFT 算法的图像拼接

2.1 SIFT 算法图像配准原理

SIFT 算法提取到图像的局部特征, 其对旋转、尺度缩放和亮度变化保持不变性, 对视角变化、仿射变换和噪声也保持一定程度的稳定性。SIFT 算法可以配准经平移、旋转或缩放的目标图像, 对图像噪声具有高容忍性, 是超声检测图像配准的潜在方法。

$$m(x, y) = (L(x+1, y) - L(x-1, y)) + (L(x, y+1) - L(x, y-1)) \quad (1)$$

$$\theta(x, y) = \frac{\arctan(L(x, y+1) - L(x, y-1))}{(L(x+1, y) - L(x-1, y))} \quad (2)$$

将特征点所在 16×16 邻域像素内梯度方向直方图最大值所对应的方向作为关键点方向; 将邻域的 16×16 像素划为 16 个子区域, 计算每个区域的 8 个梯度方向就可以得到 SIFT 的 128 维特征描述子。最后, 经 Best Bin First 算法和随机抽样一致性 (random sample consensus, RANSAC) 算法统计出符合模型的准确的特征点, 计算图像的变换模型。

2.2 改进算法图像拼接

采用传统的 SIFT 算法对图 2 中的图像 1 和图像 2 进行特征点匹配运算, 结果如图 3 所示。由于超声检测图像分辨率低, 纹理特征不明显, 常规 SIFT 算法计算出的两幅图像特征点匹配对中包括大量的误匹配对, 经 RANSAC 算法筛选后的 16 对特征点中仅有 3 对匹配正确。为解决该问题, 结合超声检测动态过程, 提出改进方法。具体方法为, 按照检测起点在同一坐标系下位置的矢量差对特征点粗匹配结果进行筛选, 再将筛选后的匹配对进行 RANSAC 抽取, 得到最终用于计算变换矩阵的匹配点。设同一坐标系两次扫描过程中探头的起点坐标分别为 (x_a, y_a) 和 (x_b, y_b) ; 检测图像粗匹配结果中共有 n 个匹配对, 对应的特征点坐标集合分别为

$$\begin{cases} loc_a = \{(x_{a1}, y_{a1}), (x_{a2}, y_{a2}), \dots, (x_{ai}, y_{ai}) \dots, (x_{an}, y_{an})\} \\ loc_b = \{(x_{b1}, y_{b1}), (x_{b2}, y_{b2}), \dots, (x_{bi}, y_{bi}) \dots, (x_{bn}, y_{bn})\} \end{cases} \quad (3)$$

匹配对筛选公式为

$$\begin{cases} 1 - k \leq \frac{x_{bi} - x_{ai}}{x_a - x_b} \leq 1 + k \\ 1 - k \leq \frac{y_{bi} - y_{ai}}{y_a - y_b} \leq 1 + k \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 值为匹配对筛选时允许的误差系数。

采用改进的 SIFT 算法对图 2 中的图像 1 和图

SIFT 算法主要分为尺度空间极值检测、关键点定位、方向分配及关键点描述子的生成 4 个步骤。首先, 通过将原始图像做不同尺度的高斯模糊和降采样, 对相邻尺度的两幅高斯图像相减得到高斯差分 (difference of gaussian, DOG) 金字塔; 选择像素值在 DOG 尺度空间本层以及上下两层的 26 个邻域中是最大或最小值的点为该尺度下的特征点, 同时去除低对比度的关键点和不稳定的边缘响应点。利用关键点邻域像素得到的梯度模值和方向为

像 2 进行特征点匹配运算, 结果如图 4 所示。改进后算法的特征点匹配结果中 16 对特征点中有 11 组匹配正确。

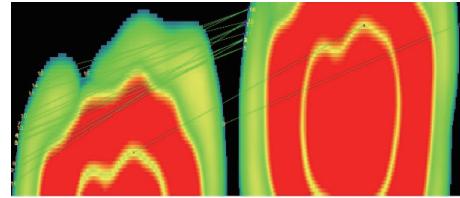


Fig. 3 Result of feature points matching using traditional SIFT algorithm

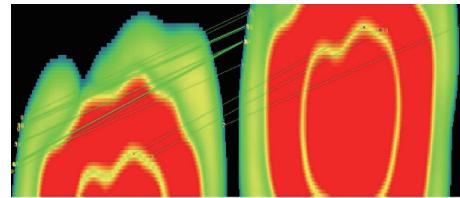


Fig. 4 Result of feature points matching using improved SIFT algorithm

利用图 3 及图 4 所示的特征点匹配结果计算变换矩阵, 并分别对图 2 中的图像 1 和图像 2 进行基于常规及改进 SIFT 算法的拼接, 图像拼接结果, 如图 5 所示。图 5(a) 中可见, 常规 SIFT 算法由于特征点错误匹配对过多, 变换矩阵计算有误, 进而导致图像拼接失败。改进的配准算法得到了正确的变换矩阵, 可用于后续图像拼接, 并获得了准确的拼接效果, 如图 5(b) 所示。同时, 直接拼接得到的图像在拼接线两侧存在明显像素突变, 拼接线两侧图像过渡不平滑, 图像的视觉效果较差。

2.3 图像融合

2.3.1 最佳缝合线寻找

为解决拼接图像视觉效果差的问题, 引入基于

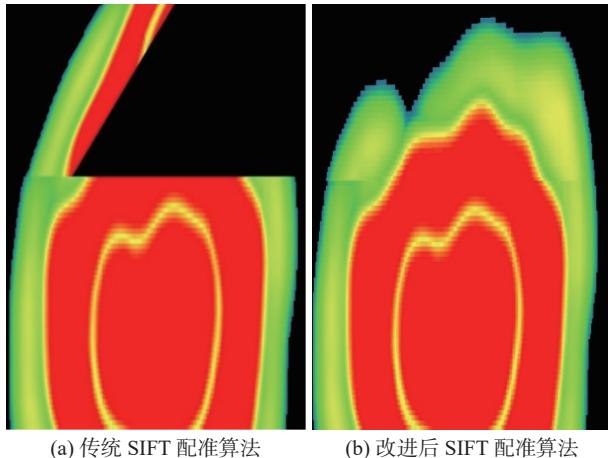


图 5 不同配准算法直接拼接的图像

Fig. 5 Images stitched by different registration algorithms. (a) traditional SIFT algorithm; (b) improved SIFT algorithm

动态规划的最佳缝合算法,在两幅检测图像重合区域中寻找最佳缝合线。为使缝合线理想分割配准后两幅图像的重叠区域,应当满足缝合线上的像素在两幅原始图像上的颜色值之差最小,以及缝合线上的像素点在两幅原始图像上的结构最相似两个条件。为此,最佳缝合线求解准则为

$$E(x, y) = E_{\text{col}}^2(x, y) + E_{\text{geo}}(x, y) \quad (5)$$

式中: E_{col} 为两幅原始图像上重叠像素点的颜色值之差; E_{geo} 为两幅原始图像上重叠像素点的结构差值。

为强调像素点为中心的对角线方向的 4 个边缘像素点的相关性,并将它们的差值作为几何结构相似度的评价标准,采用梯度计算算子模板计算 E_{geo} ,即

$$S_x = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$S_y = \begin{bmatrix} -2 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

设两幅原始图像为 f_1 和 f_2 , E_{geo} 可由下式求得,即

$$E_{\text{geo}} = \text{Diff}(f_1(x, y), f_2(x, y)) \quad (8)$$

Diff 的求解是通过计算两幅图像 f_1 和 f_2 在 x 和 y 方向的梯度之差的积得到。根据上述求解准则,设两幅图像重叠区域为 a 行 b 列,将第 1 列的各个像素点视为每条缝合线的起点,缝合线强度值初始化为各个点的准则值;再将已经计算过缝合线强度

的 1 列向右扩展,每条缝合线当前点与该点相邻的下 1 列中的 3 个像素点准则值相加,将准则值加和最小的方向作为拓展方向;按照此方式,将每条缝合线拓展到重叠区域的最后一列,选择准则值加和最小的缝合线为最佳缝合线。

2.3.2 渐入渐出图像融合

在缝合线两侧采用渐入渐出融合实现融合区域的平滑过渡。渐入渐出图像融合对两幅图像重叠区域像素赋以不同权值再相加,权值分配应当依据拼接图像的特点进行选择。为避免图像融合时对融合区域过度平滑影响检测结果评价的准确性,采用了一种新的渐入渐出权值分配方法,方法示意图,如图 6 所示。按照上述方法,将图 2 中的 4 幅检测图像进行一一拼接,并在完成拼接后按照实际比例压缩图像,得到的全景图像,如图 7 所示。

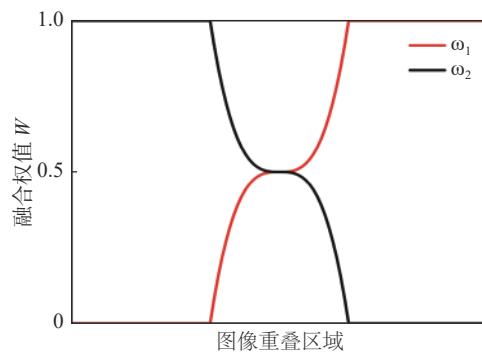


Fig. 6 Schematic of weight of gradual in and out fusion

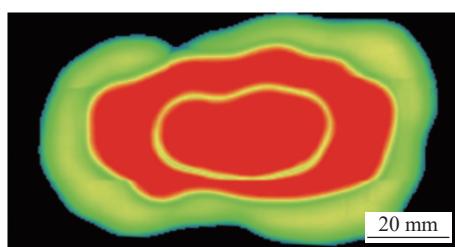


Fig. 7 The panoramic image by stitching

2.4 图像拼接效果评价

2.4.1 图像配准结果评价

按照上述算法对图 2 的 4 幅图像进行 3 次拼接得到完整检测图像后,分别对每次图像配准和图像融合的结果进行评价。图像配准结果根据特征点匹配情况进行评价;图像融合结果采用客观评价指标中的峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 和结构相似性 (structural similarity, SSIM) 进行评价。在图像拼接过程中,特征点匹配对的数量和准

确率对配准成功率有直接影响。3 次拼接过程中常规 SIFT 配准算法和改进的配准算法经过 RANSAC 算法筛选得到的特征点匹配结果, 如表 1 所示。

传统 SIFT 算法拼接的匹配对总数均为 16, 匹配准确率在 10%~30% 之间。采用改进算法拼接的匹配对总数略有降低, 但图像配准率提升到 60%~70% 之间。因此, 依照探头的起始位置对特征点匹配对进行筛选后, 最终得到的特征点匹配对数目可能较常规 SIFT 算法少, 但准确率大幅提升。

表 1 图像配准结果评价

Table 1 Evaluation of image registration results

配准算法	拼接次序	匹配对总数 <i>n</i>	匹配准确率 <i>k</i> (%)
传统SIFT	1	16	18.75
	2	16	31.25
	3	16	12.50
改进算法	1	16	68.75
	2	16	62.50
	3	11	72.73

2.4.2 图像融合结果评价

PSNR 代表当前图像中的峰值信号的能量与噪声的平均能量的比值, 表征经过处理后的图像品质。PSNR 为

$$\eta_{\text{PSNR}} = 10 \times \lg \left(\frac{(2^n - 1)^2}{\delta_{\text{MSE}}} \right) \quad (9)$$

式中: *n* 为每像素的比特数, 一般取 8, 即像素灰度值阶数为 256; δ_{MSE} 为当前图像 A 和参考图像 B 的均方误差。

PSNR 的具体数值与融合后图像的失真程度成反比, 即数值越大表示失真越小。SSIM 是一种衡量两幅图像相似度的指标, 评价结果更符合人眼的直观感受。SSIM 为

$$F_{\text{SSIM}}(X, Y) = L(x, y) \times C(x, y) \times S(x, y) \quad (10)$$

式中: $L(x, y)$ 为图像的亮度偏差; $C(x, y)$ 为图像的对比度偏差; $S(x, y)$ 为结构相似度偏差。

PSNR 和 SSIM 均为全参考的图像质量评价指标, 需要选择理想图像作为参考图像。文中以相同检测参数直接检测得到的图像为参考图像, 对经直接拼接和改进融合得到的图像融合区域分别进行 PSNR 和 SSIM 的计算, 如表 2 所示。经改进融合算法获取的拼接图像具有更高的 PSNR, 平均增加值约为 0.8, 图像具有更好的信噪比, 像素过度柔和。

同时 SSIM 也有小幅提升, 表明改进后的融合方法得到的图像与参考图像更接近, 融合过程的失真更小。

表 2 图像融合结果评价

Table 2 Evaluation of image fusion results

融合算法	拼接次序	峰值信噪比 η_{PSNR}	结构相似性 $F_{\text{SSIM}}(X, Y)$
直接融合	1	20.5743	0.9424
	2	20.8279	0.9497
	3	17.1486	0.9173
改进算法	1	21.9148	0.9526
	2	21.3024	0.9549
	3	17.6537	0.9305

3 焊接结构超声图像拼接

采用文中提出的图像处理方法, 对扩散焊流道结构的超声 C 扫描图像进行拼接处理。流道结构的焊接对象为两直径 $\phi 400$ mm、厚度分别为 10 mm 的铝合金圆盘。其中一盘件单侧加工流道, 流道宽度为 3 mm, 深度为 2 mm。盘件的流道面与另一盘件通过扩散焊连接。由于结构尺寸大, 在扩散焊接过程中, 压力及受热不均等因素都会带来扩散界面的结合质量问题。尤其大尺寸未焊合缺陷的出现, 会导致流道之间的贯通, 致使结构丧失功能。同时, 扩散焊接的热、压过程会使细小的流道产生形变, 当形变程度超过设计尺寸时, 同样会导致结构不满足使用要求。为了确定结构焊后界面结合质量及流道变形程度, 对其进行无损检测。采用美物理声学所研制的超声 C 扫描成像系统对结构件进行水浸聚焦式的 C 扫描成像检测。焊接结构超声图像拼接, 如图 8 所示。水浸聚焦探头为中心频率为 5 MHz、焦距为 20 mm、晶片尺寸为 $\phi 10$ mm; 在检测步长为 0.2 mm 和系统采样频率为 100 MHz 等检测条件下获取结构件的原始超声图像, 如图 8(a) 和图 8(b) 所示。对获取的图像进行了拼接处理, 结果如图 8(c) 所示。在声波传播路径上, 流道形成了铝/空气界面, 声波和流道作用后, 回波能量高; 在焊接质量良好的情况下, 结构中扩散焊界面声波透射率高, 回波能量低。因此, 在待拼接图像中, 流道影像具有高的对比度; 同时, 流道影像边界具有高的清晰度。在两幅待拼接图像中, 分别存在一定尺寸的

重叠区域。重叠区域中流道影像的存在为特征点搜寻及匹配提供有效信息,利于获取可靠的特征点匹配对。特征点匹配对的高准确率利于图像配准。针对待配准的图像之间存在旋转和平移关系,采用刚体变换模型计算变换矩阵。在拼接后的图像中,流道位置关系正确,图像融合效果良好,利于结构的整体性质量评价。

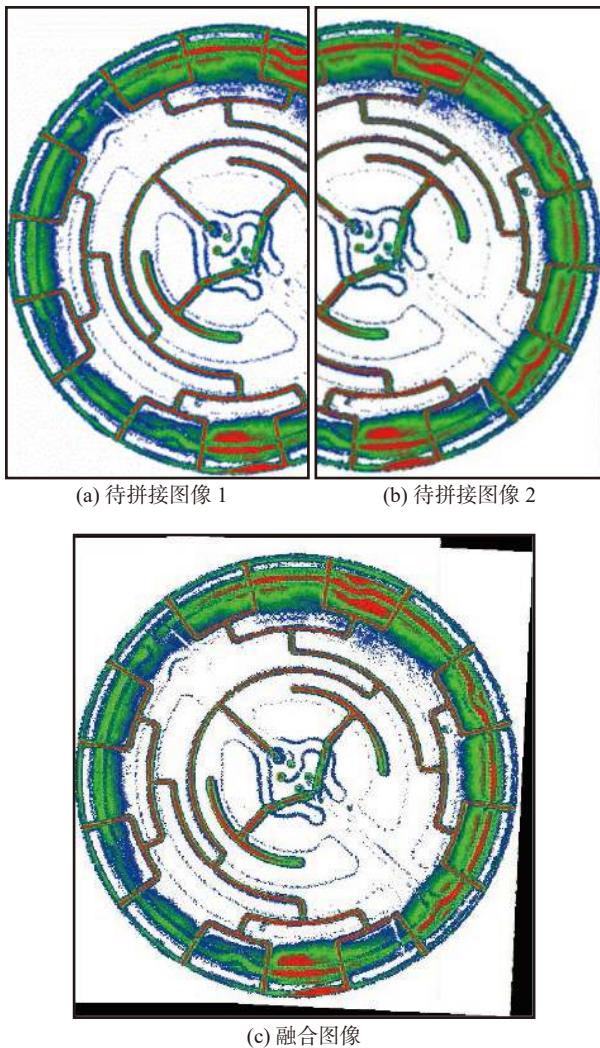


图 8 焊接结构超声图像拼接

Fig. 8 Mosaic of welding structure tested ultrasonic images. (a) image 1; (b) image 2; (c) fused image

4 结论

(1) 针对超声图像配准成功率低的问题,提出根据两幅 C 扫描图像对应的探头起始位置的矢量差,对 SIFT 算法得到的特征点匹配结果进行筛选,再经 RANSAC 算法筛选出用于计算变换矩阵的特征点匹配对,特征点匹配成功率明显提升。

(2) 采用动态规划方法寻找最佳缝合路径,并

沿该路径对两幅图像进行渐入渐出融合,得到的融合图像消除了拼接线两侧的图像误差,像素过渡平滑,改善视觉效果。

(3) 对人工缺陷试块和扩散焊流道结构的 C 扫描图像进行拼接。结果表明,基于 SIFT 的改进图像拼接算法可以将多幅超声 C 扫描图像有效拼接为全景图像,所提方法特征点匹配准确率高、图像融合失真小,优于常规 SIFT 图像拼接算法。

参考文献

- [1] 张晨昊, 陈兵, 刘恒, 等. 增材制造 AlSi10Mg 超声横波和纵波孔隙率检测对比分析 [J]. 焊接学报, 2023, 44(10): 111–119. .
Zhang Chenhao, Chen Bing, Liu Heng, et al. Comparison of ultrasonic transverse and longitudinal wave porosity detection in additive manufacturing of AlSi10Mg[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(10): 111–119.
- [2] 王斌, 李升, 朱富慧, 等. 基于超声无损检测的扩散连接界面缺陷尺寸评估 [J]. 焊接学报, 2020, 41(8): 34–38.
Wang Bin, Li Sheng, Zhu Fuhui, et al. Evaluation on interfacial defect size of diffusion bonding based on ultrasonic non-destructive testing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(8): 34–38.
- [3] 迟大钊, 郭涛, 张闰琦, 等. 声阻法胶接结构缺陷实时成像检测 [J]. 焊接学报, 2022, 43(11): 107–111.
Chi Dazhao, Guo Tao, Zhang Runqi, et al. Study on real-time imaging detection of bonding defects by acoustic impedance method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(11): 107–111.
- [4] 陈尧, 冒秋琴, 石文泽, 等. 基于相位相干性的厚壁焊缝 TOFD 成像检测研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(4): 25–32.
Chen Yao, Mao Qiuqin, Shi Wenze, et al. Research on ultrasonic TOFD imaging inspection for heavy-walled weld based on phase coherence characteristics[J] Journal of Mechanical Engineering. 2019, 55(4): 25–32.
- [5] Bazulin E G. TOFD echo signal processing to achieve superresolution[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2021, 57(5): 352–360.
- [6] 王锐, 刘志宏, 吴杰峰, 等. 316L 对接焊缝相控阵超声检测工艺模拟与试验验证 [J]. 焊接学报, 2019, 40(11): 33–38.
Wang Rui, Liu Zhihong, Wu Jiefeng, et al. Simulation and experimental verification of phased array ultrasonic testing process in 316L butt weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(11): 33–38.
- [7] 汪认, 赵鹏, 何建英, 等. 基于超声相控阵的耐候钢接头疲劳裂纹动态监测 [J]. 焊接学报, 2022, 43(12): 100–104.
Wang Ren, Zhao Peng, He Jianying, et al. Fatigue crack dynamic

- monitoring of weathering steel joint based on ultrasonic phased array[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(12): 100 – 104.
- [8] 杨敬, 吴斌, 焦敬品, 等. 奥氏体不锈钢焊缝超声阵列检测方法 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(2): 1 – 10.
Yang Jing, Wu Bin, Jiao Jingpin, et al. Nondestructive testing of austenitic welds using method of ultrasonic array[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(2): 1 – 10.
- [9] Chen L L, Zhao Y Q, Kong S G. SFA-guided mosaic transformer for tracking small objects in snapshot spectral imaging[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 204: 223 – 236.
- [10] Liu Y F, Zhao, X N, Song Z H, et al. Detection of apple mosaic based on hyperspectral imaging and three-dimensional gabor[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 222: 109051
- [11] Zhang K, Yin C, Cheng Y H, et al. Rapid defect detection for spacecraft in infrared reconstructed images using image mosaic technique[C]/The 21st World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), July 12-17, 2020, Berlin. San Francisco: Curran and Associates, Inc., 2020: 5695-5700.
- [12] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant interest points[J]. *International Journal Of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91 – 110.
- [13] Huang Q H, Deng Q F, Li L, et al. Scoliotic imaging with a novel double-sweep 2.5-dimensional extended field-of-view ultrasound[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2019, 66(8): 1304 – 1315.
- [14] Tsourounis D, Kastaniotis D, Theoharatos C, et al. SIFT-CNN: when convolutional neural networks meet dense SIFT descriptors for image and sequence classification[J]. *Journal of Image*, 2022, 8(10): 256.
- [15] Wang F B, Paul T b, Chen W, et al. Multi-image mosaic with SIFT and vision measurement for microscale structures processed by femtosecond laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 100: 124 – 130.

第一作者: 迟大钊, 博士, 副教授; 主要研究方向为焊接质量无损检测与评价; Email: dzchi@hit.edu.cn.

(编辑: 汤明日)