

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416805

# 基于最佳缝合线的电力设备红外图像拼接算法<sup>\*</sup>

吴润国 刘晓东 费继友 赵兴 姚梦涛

(大连交通大学詹天佑学院(中车学院)大连 116000)

**摘要:** 针对变电站电力设备红外图像普遍模糊且信噪比低,拼接过程中易出现明显拼接痕迹或重影的问题,提出一种基于 ROI 和改进最佳缝合线的变电站设备红外图像拼接方法。首先,划分待拼接两图相邻的 50% 区域作为 ROI,提高特征点提取以及匹配的精度和效率;然后,通过引入均值化余弦相似度改进最佳缝合线的能量差异函数,使最佳缝合线能够精准穿越重叠区域能量差异最小的位置。最后,进行实验验证,分别对比 Autostitch、ICE 和 Autopano Giga 三款图像拼接软件和本文的基于 ROI 和改进最佳缝合线图像拼接算法的图像拼接效果,结果表明,所提方法有效提高图像拼接整体过程的效率,有效减少拼接痕迹和重影现象,可实现较高质量的电力设备红外图像拼接。

**关键词:** 红外图像拼接;ROI;最佳缝合线;能量差异函数;均值化余弦相似度

**中图分类号:** TP391;TN919.8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Infrared image stitching algorithm of power equipment based on optimal seam-line

Wu Runguo Liu Xiaodong Fei Jiyu Zhao Xing Yao Mengtao

(Zhan Tianyou College of Dalian Jiaotong University(CRRC College),Dalian 116000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that infrared images of substation power equipment are generally blurred and low signal-to-noise ratio, and obvious stitching marks or glistening are easy to appear in the stitching process, an infrared image stitching method of substation equipment based on ROI and improved optimal seam-line was proposed. Firstly, the 50% adjacent area of the two images to be stitching was divided as the ROI to improve the accuracy and efficiency of feature point extraction and matching. Then, the energy difference function of the best suture line was improved by introducing the mean-cosine similarity, so that the best seam-line could accurately traverse the position with the smallest energy difference in the overlapping area. Finally, the experimental verification is carried out to compare the Image stitching effects of three image stitching software Autostitch,ICE and Autopano Giga with the image stitching algorithm based on ROI and improved optimal seam-line in this paper. The results show that the proposed method can effectively improve the efficiency of the overall process of image stitching, effectively reduce stitching traces and glowy phenomena, and achieve high quality infrared image stitching of power equipment.

**Keywords:** infrared image stitching;ROI;optimal seam-line;energy difference function;averaging cosine similarity

## 0 引言

变电站是连接各级电网和调控电能传输的枢纽,其电气设备的运行状态直接影响电力系统运行的安全稳定性<sup>[1]</sup>。变电站发生的故障 70% 是由电气设备引起的,而绝大多数电气设备发生故障是由部件间连接松动、接触不良或者漏磁等引起,并伴随着局部区域温度异常等现象<sup>[2]</sup>,可以通过红外热成像技术准确识别设备表面温度,判定变电站中电气设备的运行状态,作为维护检修工作的依据。然

而变电站的主要电气设备(如大容量变压器)尺寸普遍较大,且红外热像仪的画幅限,拍摄的单张图像往往无法反映设备的整体温度分布情况,导致不能准确显示电力设备的整体运行状态。因此,可以采用图像拼接技术,将多张含有重叠区域的红外图像拼接成一张完整的图像,便于确定设备的整体温度分布情况并进行相应的处理措施<sup>[3]</sup>。图像拼接是计算机视觉领域的一项基础研究,其将从不同位置和方向捕获的多个图像组合成一个具有更广视野的全景图<sup>[4]</sup>。传统图像拼接算法往往存在提取的特征点冗余、匹

收稿日期:2024-09-04

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金青年基金(62001079)项目资助

配准确率低以及拼接后图像的重叠区域存在伪影等问题,而且红外图像较可见光图像普遍更模糊,信噪比更低,更加影响算法精度。

针对提取的特征点冗余、匹配准确率低的问题,在局部区域进行特征点提取是较为有效的方法。Ciortea等<sup>[5]</sup>利用模板匹配法确定待拼接皮肤电容图像重叠区域的大致位置,并在重叠区域内进行特征提取,有效提高了特征匹配效率;姚俐<sup>[6]</sup>通过特征预匹配得到的匹配关系计算单应性矩阵,从而确定重叠区域位置、进行特征点提取,但涉及的步骤多,实时性较差;王建华等<sup>[7]</sup>将待拼接图像四分区域,仅提取其中两个对角即50%区域的特征点,一定程度提高了特征提取的效率,但仍会提取到无关区域的特征点,造成算法冗余;陶杰等<sup>[8]</sup>通过确定相机相对位置,对图像进行感兴趣区域(region of interest, ROI)提取,并将图像网格化处理,实现特征点的均匀化提取,从而全面描述图像特征,特征匹配的成功率较传统算法提高6%。

针对拼接后图像存在拼接痕迹的问题,渐入渐出的融合方法一直是研究的重点。姚莉等<sup>[9]</sup>利用线性加权融合法进行对图像的融合,使待拼接图像在重叠区域内像素的权重渐变变化,一定程度消除了重影问题。但由于权重函数在边界处存在第二类间断点,会造成亮度突变等现象;An等<sup>[10]</sup>提出了一种基于logistic函数的非线性加权融合方法替代线性加权融合法,该方法利用非线性函数的凹凸性和平滑性,解决了边界处的亮度突变问题,进一步消除了重影现象。相较于渐入渐出的融合方法,利用最佳缝合线方法对图像进行拼接时,图像之间不存在重合的区域,可有效规避重影问题。蓝章礼等<sup>[11]</sup>利用最佳缝合线进行车道图像的拼接,效果优于线性加权融合法。为了使缝合线恰好经过能量差异最小的位置,一些学者对最佳缝合线依据的能量函数进行了改进。王宇等<sup>[12]</sup>提出了一种基于混合范数的能量函数形式,将L1和L2范数相结合计算相邻像素的能量,并采用指数形式放大色差权重,加强重叠区域中对齐位置和非对齐位置区域的区分;Zhang等<sup>[13]</sup>引入人眼视觉系统,提高能量函数的颜色显著性,并利用Brisqure算法进行效果验证,该方法较传统最佳缝合线法提高约10%;Peng等<sup>[14]</sup>依据高光谱图像的多频段特性,设计了一个包含空间和光谱信息的能量函数,在具有高纹理一致性的连续区域中确定最佳接缝,拼接后图像的均方误差比传统最佳缝合线降低12%左右。

上述研究成果在RGB图像处理方面体现出一定的优势,但在红外图像处理方面应用较少。而较RGB图像相比,红外图像普遍成像更模糊、信噪比更低,不仅会增加提取有效特征点的难度,而且利用最佳缝合线法融合红外图像时,会更难识别能量差异最小位置,导致明显拼接痕迹或重影现象。针对以上问题,本文提出一种基于ROI和改进最佳缝合线的电力设备红外测温图像拼接算法。首先,在特征点提取之前进行ROI区域划分,提高特征点提取与匹

配的准确率与效率;其次,在图像融合部分,通过引入均值化余弦相似度改进最佳缝合线的颜色能量函数,使缝合线路径能够穿越能量差异最小的位置,实现较高质量的图像拼接。

## 1 拼接算法整体流程

拼接算法整体流程如图1所示。首先,划分两图相邻的50%区域为ROI区域;然后,利用加速的KAZE (accelerated-KAZE, AKAZE)算法在ROI内对电力设备红外图像进行特征点提取,并获取特征描述子;其次,采用K-最近邻(K-nearest neighbor, KNN)算法对特征点进行一一匹配,并利用随机采样一致性算法(random sample consensus, RANSAC)算法提纯匹配结果;再次,计算图像投影转换模型对图像2进行坐标变换,对齐待拼接两图的重叠区域;最后,采用基于改进的最佳缝合线算法进行图像融合,生成全景图像。



图1 拼接算法整体流程图

Fig. 1 The whole process of the stitching algorithm

## 2 特征点提取

### 2.1 AKAZE 特征点提取算法

AKAZE算法是一种应用较为广泛的特征提取算法,包括非线性尺度空间的构建、特征点检测和特征点描述3个步骤<sup>[15]</sup>。它的核心思想是采用非线性扩散滤波器来构造电力设备红外局部图像的非线性尺度空间,从而保留图像

更多的边缘特征,非线性扩散滤波方程定义如式(1)所示。

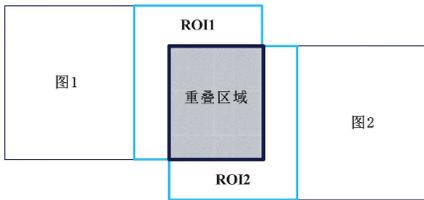
$$\frac{\partial L}{\partial t} = \text{div}(c(x, y, t) \cdot \nabla L) \quad (1)$$

式中:  $\text{div}$  是散度;  $\nabla L$  表示电力设备红外图像亮度  $L$  的梯度;  $c(x, y, t)$  为扩散传导函数,可以扩散图像的局部结构;时间  $t$  为尺度参数,数值越大,图像的表达形式越简单。

### 2.2 在 ROI 内提取特征点

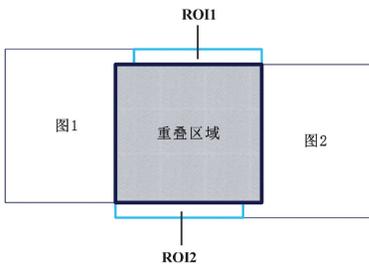
利用 AKAZE 算法提取特征点时,非重叠区域的冗余特征点很可能对匹配结果产生干扰,并降低算法效率。因此,在特征点提取之前先进行 ROI 提取将大致的重叠区域划分出来,提高有效特征点的提取率。

ROI 指的是图像中用户关心的、具有特定性质的区域。对于图像拼接而言,ROI 代表待拼接图像重叠区域的大致位置。一般来说,两张待拼接图像的重叠区域占到单幅图像完整区域的 30%~60%,如图 2(a)和(b)和所示,划分两图 50%的相邻区域能够覆盖所有或大部分的重叠区域。因此,本文采用相邻 50%的区域作为 ROI 区域进行特征点提取,以提高特征提取算法的性能。



(a) 重叠区域小于单幅图像面积的50%

(a) The overlap is less than 50% of the single image



(b) 重叠区域大于单幅图像面积的50%

(b) The overlap is greater than 50% of the single image

图 2 ROI 与重叠区域位置关系

Fig. 2 Relationship between ROI and overlap location

ROI 区域确定主要由以下 3 个步骤组成,分别为:确定分界线、确定保留区域、生成掩膜。对左右重叠的图像来说,分界线即图像宽边(width)的 1/2 处,最终保留的区域即 ROI。步骤示意图如图 3 所示。

## 3 特征点匹配与图像对齐

### 3.1 KNN 特征匹配算法

KNN 算法以距离作为度量标准,寻找参考图像 1 中某

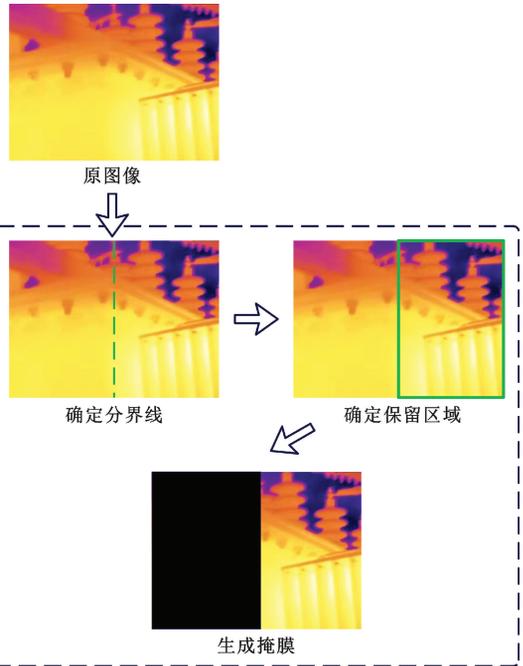


图 3 红外图像 ROI 提取步骤

Fig. 3 Infrared image ROI extraction

个特征点在图像 2 中  $k$  个距离最近的特征点。这里的  $k$  取 2,即得到原特征点的 2 个距离最近的特征点。

利用原特征点与上述两点的距离(最近距离/次最近距离)作比值,再与设定的阈值  $T$  进行对比,如果比值小于设定的阈值,则为正确匹配点,反之则为错误匹配点。公式如式(2)所示。

$$\frac{D_1}{D_2} < T \quad (2)$$

式中:  $D_1$  和  $D_2$  分别为最近距离和次最近距离,由汉明距离表示;阈值  $T$  一般取 0.7。

完成特征匹配后,采用 RANSAC 算法进行匹配结果提纯,剔除错误的匹配点对。

### 3.2 单应性矩阵的计算

根据提纯后的最终匹配点对,计算图像变换的单应性矩阵,并利用单应性矩阵对待配准图像进行坐标变换,使图像 1 与图像 2 的重叠区域对齐,以进行后续的图像融合。图像变换模型可以表示如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & h_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  是图像 1 和图像 2 的匹配点对;  $\mathbf{H}$  为用于图像变换单应性矩阵。

## 4 基于改进最佳缝合线法的图像融合

### 4.1 最佳缝合线原理

最佳缝合线法是为较常用的一种图像融合方法,其目

的是在待拼接两图的重叠区域找出一条路径,循着这条路径将两图缝合在一起,同时,保证这条路径从两幅图像重叠区域中能量差异最小的位置穿过,尽可能地减少图像错位带来拼接痕迹。最佳缝合线的形态示意图和搜索流程分别如图4和5所示。

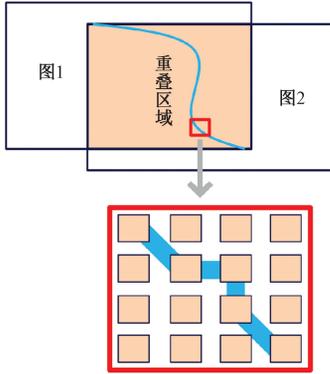


图4 缝合线形态示意图  
Fig. 4 Morphology of seam-line

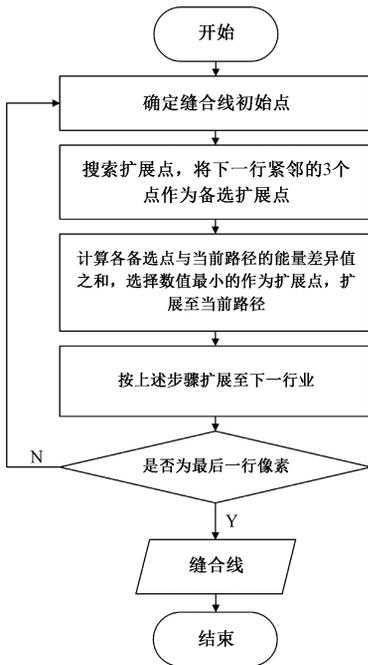


图5 最佳缝合线搜索流程  
Fig. 5 Searching process of optimal seam-line

由于缝合线搜索的关键是找到重叠区域每行像素中能量差异最小的位置,因此需要对各个位置的能量差异进行计算,其依据的能量差异函数表达式如式(4)所示。

$$E(x, y) = E_{color}^2(x, y) + E_{geometry}(x, y) \quad (4)$$

其中,  $E_{color}(x, y)$  为颜色差异函数,  $E_{geometry}(x, y)$  为结构差异函数。  $E_{color}(x, y)$  的表达式如式(5)所示。

$$E_{color}(x, y) = |I_1(x, y) - I_2(x, y)| \quad (5)$$

其中,  $I_1(x, y)$  和  $I_2(x, y)$  为两幅待拼接图像的灰度图。

结构差异函数的表达式如式(6)所示。

$$E_{geometry}(x, y) = Diff(I_1(x, y) - I_2(x, y)) \quad (6)$$

其中,  $Diff$  为两幅待拼接图像在  $x$  和  $y$  方向梯度差的乘积因子,由 Sobel 算子定义。

#### 4.2 利用均值化余弦相似度改进能量差异函数

在温度基本一致的情况下,红外测温图像中不同物体的颜色表征几乎一致。而且红外图像存在模糊、信噪比低的特性,导致传统的最佳缝合线在进行图像缝合时往往难以识别并穿越颜色差异最小的位置,容易导致拼接重叠区域存在明显拼接痕迹或重影现象。此外,缝合线所依据能量差异函数讨论的是差异程度,而差异程度可以转化为相似程度进行研究。因此,本文引入均值化余弦相似度,作为颜色差异判别的约束项,对颜色差异函数进行改进。

余弦相似度通过计算向量空间中两个向量之间夹角的余弦值作为两个向量之间的相似性度量<sup>[16]</sup>,其数值范围为  $[0, 1]$ 。余弦相似度数值越大,代表向量之间的夹角越小,两向量相似性越高,其表达式如式(7)所示。

$$S(\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2) = \cos\theta = \frac{\mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{T}_2}{\|\mathbf{T}_1\| \times \|\mathbf{T}_2\|} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{1i} T_{2i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n T_{1i}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n T_{2i}^2}} \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{T}_1$  和  $\mathbf{T}_2$  为空间中的两个向量,  $T_{1i}$  和  $T_{2i}$  分别为两向量中的第  $i$  个元素。

由于待拼接图像的重叠区域在坐标变换后存在不规则边界,且红外图像本身模糊的特性,导致直接计算得到的余弦相似度数值会明显偏小。因此,本文对余弦相似度进行均值化处理,消除因数值明显偏低对计算结果以及能量函数求解带来的干扰,具体流程如下:

首先将待拼接两图的重叠区域灰度化处理,得到灰度图像  $I_1$  和  $I_2$ ; 然后将灰度图像转化为特征向量  $\mathbf{V} = [V_1, V_2, \dots, V_{n \times m-1}, V_{n \times m}]$  和  $\mathbf{U} = [U_1, U_2, \dots, U_{n \times m-1}, U_{n \times m}]$ 。其中,  $n$  和  $m$  分别为重叠区域像素的行数和列数;其次,计算特征向量之间的平均值  $\mathbf{W}$ , 如式(8)所示。

$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{V} + \mathbf{U}}{2} = [W_1, W_2, \dots, W_{n \times m-1}, W_{n \times m}] \quad (8)$$

其中,  $V_i, U_i$  和  $W_i$  分别为各向量中的第  $i$  各元素。因此,可得到均值化余弦相似度的公式,如式(9)所示。

$$S(\mathbf{V} - \mathbf{W}, \mathbf{U} - \mathbf{W}) = \frac{(\mathbf{V} - \mathbf{W}) \cdot (\mathbf{U} - \mathbf{W})}{\|\mathbf{V} - \mathbf{W}\| \times \|\mathbf{U} - \mathbf{W}\|} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - W_i)(U_i - W_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - W_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_i - W_i)^2}} \quad (9)$$

其中,  $V_i, U_i$  和  $W_i$  分别为各向量中的第  $i$  个元素。

最后,将均值化余弦相似度补充到式(7)中,得到新的颜色差异能量函数,如式(10)所示。

$$E'_{color}(x,y) = |I_1(x,y) - I_2(x,y) - S[V-W, U-W]| \quad (10)$$

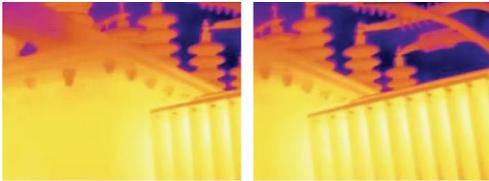
改进后总能量差异函数如式(11)所示。

$$E'(x,y) = E'^2_{color}(x,y) + E_{geometry}(x,y) \quad (11)$$

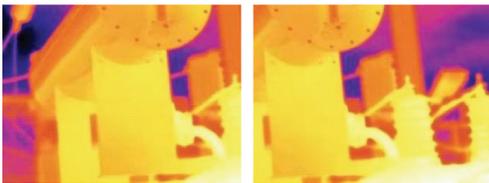
## 5 实验验证

### 5.1 实验设备及待拼接图像

本文实验的采集设备为手持式红外热像仪,采集的图像为新疆电网某变电站采集的两组变压器局部红外测温图像,图像尺寸为  $384 \times 288$ ,如图 6(a)和(b)所示。



(a) 变压器红外图像组1  
(a) Transformer image group 1



(b) 变压器红外图像组2  
(b) Transformer image group 2

图 6 待拼接红外图像

Fig. 6 Infrared image to be stitched

图像拼接设备采用 PC 机,配置为 Intel(R)-Core(TM)-i5-8300H CPU @ 2.30 GHz (8CPUs),内存为 8.0 GB RAM,实验软件为 Pycharm。

### 5.2 特征点提取与匹配实验

分别采用进行 ROI 划分后的特征点提取算法与未进行 ROI 划分的特征点提取算法进行对比实验,并选择提取特征点数量、粗匹配对数、提纯后对数和匹配正确率,以及 2.2 节中提出的均值化余弦相似度作为评价指标,衡量匹配效果。

其中匹配正确率为提纯后匹配对数占粗匹配对数的比率,匹配正确率越高,代表匹配效果越好,其计算公式如式(12)所示。

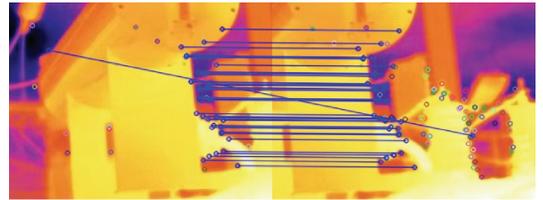
$$T = \frac{P_R}{P_Z} \times 100\% \quad (12)$$

其中,  $P_R$  为经提纯后的正确匹配对数,  $P_Z$  为粗匹配对数。

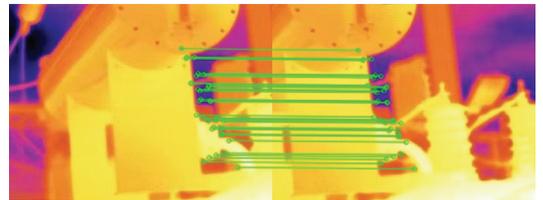
均值化余弦相似度则用来衡量利用确定后的匹配关系进行图像变形后,待拼接两图重叠区域的相似程度。均值化余弦相似度越高,说明两图重叠区域对齐程度越好,越有利于后续的图像融合。

特征点匹配效果如图 7、8 所示。由图 7 可以看出,未

划分 ROI 提取时,两图像建立起匹配关系的特征点更多,但出现了明显的错误匹配情况,如图 7(a)中白框所示;由图 8 可以看出,划分 ROI 后提取的特征点都集中在两图 50% 的相邻区域,且未出现误匹配情况。

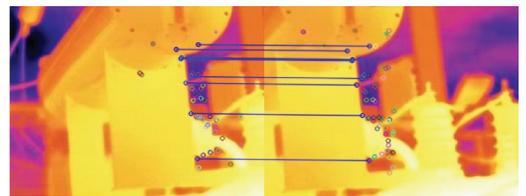


(a) 粗匹配效果  
(a) Rough matching effect

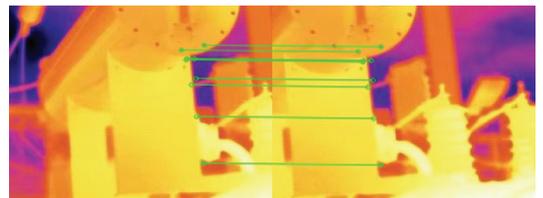


(b) 提纯后效果  
(b) Purified effect

图 7 未划分 ROI 的特征匹配效果图  
Fig. 7 Feature matching effect without ROI



(a) 粗匹配效果  
(a) Rough matching effect



(b) 提纯后效果  
(b) Purified effect

图 8 划分 ROI 后的特征匹配效果图  
Fig. 8 The proposed feature matching effect

特征匹配评价效果如表 1 所示,划分 50% 的 ROI 后提取出的特征点数量相较于无 ROI 的数量显著减少,算法运行时间有所减少。同时,变压器红外图像组 1 中,两种方法的匹配正确率持平,而变压器红外图像组 2 中,有 ROI 方法的匹配正确率较原方法提高了 11.5%。

由表 2 可知,两组图像的重叠区域均值化余弦相似度有所提高,说明经坐标变换后两图重叠区域的对齐程度提升,也进一步证明了采用 ROI 划分的特征匹配方法较合理,能够提取较高质量的特征点,并快速建立较高质量的匹配关系。

表 1 特征匹配效果对比

Table 1 Comparison of feature matching results

图像组号	评价指标	无 ROI	有 ROI
1	特征点数量	151	<b>108</b>
	粗匹配对数	18	<b>15</b>
	提纯后对数	18	<b>15</b>
	匹配正确率/%	100	<b>100</b>
	匹配时间/s	0.04	<b>0.03</b>
2	特征点数量	187	<b>126</b>
	粗匹配对数	39	9
	提纯后对数	35	<b>9</b>
	匹配正确率/%	89.7	<b>100</b>
	匹配时间/s	0.03	<b>0.02</b>

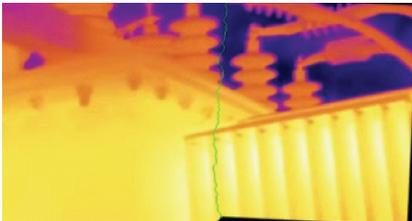
表 2 重叠区域均值化余弦相似度

Table 2 Comparison of feature matching results

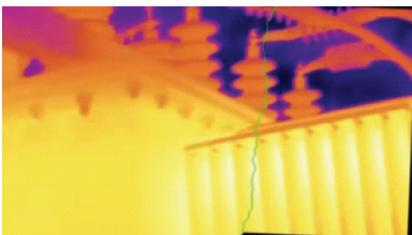
图像组号	评价指标	无 ROI	有 ROI
1	均值化余弦相似度	0.926	<b>0.935</b>
2	均值化余弦相似度	0.969	<b>0.973</b>

5.3 图像融合实验

利用传统最佳缝合线算法和改进最佳缝合线算法分别对两组实验图像进行融合,图 9 和 10 所示分别为两组实验图像利用两种不同算法融合时的最佳缝合线路径,可见缝合路径发生了明显改变。



(a) 传统最佳缝合线路径  
(a) Traditional optimal seam-line path

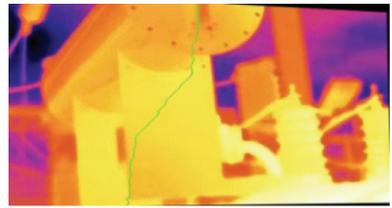


(b) 改进最佳缝合线路径  
(b) Improved optimal seam-line path

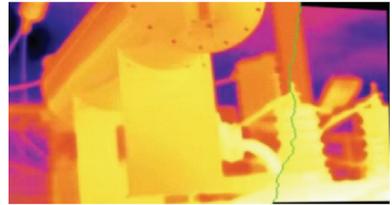
图 9 变压器红外图像组 1 最佳缝合线路径对比

Fig. 9 Comparison of transformer infrared image group 1 optimal seam-line path

为验证改进最佳缝合线算法的有效性,本文与传统缝合线法、典型的渐入渐出算法进行图像融合效果对比实验,两组实验图像的拼接效果分别如图 11 和 12 所示。

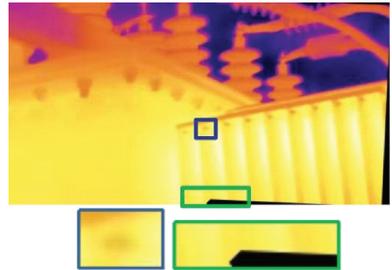


(a) 传统最佳缝合线路径  
(a) Traditional optimal seam-line path

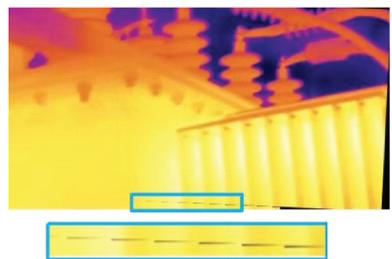


(b) 改进最佳缝合线路径  
(b) Improved optimal seam-line path

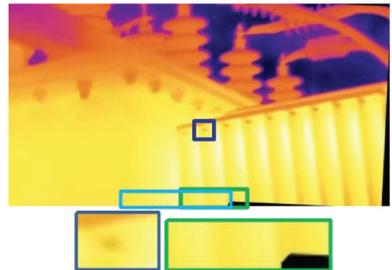
图 10 变压器红外图像组 2 最佳缝合线路径对比  
Fig. 10 Comparison of transformer infrared image group 2 optimal seam-line path



(a) 传统最佳缝合线融合效果  
(a) Traditional optimal seam-line blending results

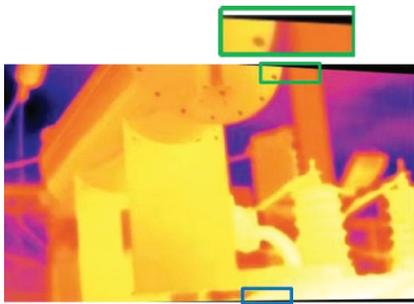


(b) 渐入渐出法融合效果  
(b) Fade in and fade out method blending effect



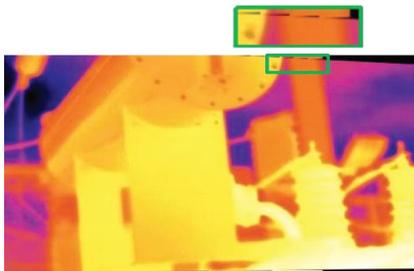
(c) 改进最佳缝合线融合效果  
(c) Improved optimal seam-line blending results

图 11 变压器红外图像组 1 融合效果对比  
Fig. 11 Comparison of the blending results of transformer infrared image group 2



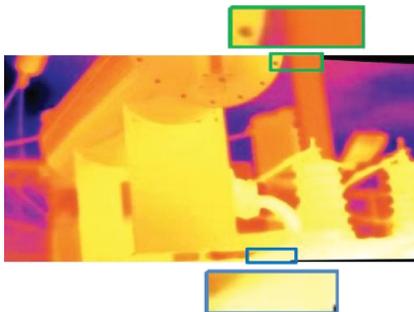
(a) 传统最佳缝合线融合效果

(a) Traditional optimal seam-line blending results



(b) 渐入渐出法融合效果

(b) Fade in and fade out method blending effect



(c) 改进最佳缝合线融合效果

(c) Improved optimal seam-line blending results

图 12 变压器红外图像组 2 融合效果对比

Fig. 12 Comparison of the blending results of the second set of images

利用传统缝合线法进行图像融合时,由于没有避开颜色差异较明显的部位,出现了如图 11(a)绿色框内所示的错位虚影现象,且图像边缘处也出现了如图 11(a)、图 12(a)所示的较大面积的黑边。

利用渐入渐出算法进行图像融合时,在重叠区域边缘出现了如图 11(b)和图 12(b)所示明显的边界痕迹;利用改进的最佳缝合线算法融合的图像未出现明显的错位和大面积黑边现象,也未产生明显的边界痕迹,如图 11(c)和图 12(c)所示,说明改进后的缝合线路径基本避开了颜色差异明显之处,拼接后图像在重叠区域过渡更自然,视觉效果更佳。

采用峰值信噪比和均方根误差以及融合时间 3 项评价指标,对图像融合质量及算法性能进行定量评估。

峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR)<sup>[17]</sup> 用于表示信号的最大可能功率与影响其表示的保真度的破坏噪声的功率之间的比率,在图像处理上主要用于量化经处理后图像的质量,PSNR 数值越大,代表图像质量越好。其计算公式如式(13)所示。

$$PSNR = 10 \times \lg\left(\frac{MAX^2}{MSE}\right) = 20 \times \lg\left(\frac{MAX}{\sqrt{MSE}}\right) \quad (13)$$

其中,MAX 表示拼接后图像重叠区域像素的最大值,数值范围为 0~255,MSE 表示图像重叠区域与基准图像对应区域至之间的均方误差。

均方根误差 (root mean square error, RMSE) 用于表示处理后图像与基准图像各个像素点之间的偏离程度, RMSE 数值越小,代表图像质量越好。其计算公式如式(14)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [f'(i,j) - f(i,j)]^2}{M \times N}} \quad (14)$$

其中,  $f'(i,j)$  和  $f(i,j)$  分别表示拼接后图像重叠区域和基准图像的对应区域,  $M$  和  $N$  分别表示表示拼接后图像重叠区域像素的行数和列数。

各项评价指标计算结果如表 3 所示。由表 3 数据可看出,与其他方法相比,本文改进最佳缝合线算法拼接后图像的 PSNR 数值至少提高 2.75%, RMSE 数值至少减少 26.1%,明显优于其他方法。此外,与其他方法相比,本文方法的融合速度最快,可满足快速拼接的要求。

表 3 融合效果对比

Table 3 Comparison of blending results

图像组号	评价指标	渐入渐出算法	最佳缝合线算法	改进最佳缝合线算法
1	PSNR	23.98	22.42	<b>24.64</b>
	RMSE	3.45	3.70	<b>2.55</b>
	融合时间/s	1.67	0.08	<b>0.08</b>
2	PSNR	29.36	23.39	<b>29.71</b>
	RMSE	3.18	3.91	<b>1.10</b>
	融合时间/s	1.77	0.09	<b>0.09</b>

#### 5.4 图像拼接对比实验

为进一步验证本文提出的基于 ROI 和改进最佳缝合线的拼接算法的有效性,使用市面上的主流图像拼接软件和本文算法进行拼接效果对比。参与对比的 3 款软件为: Autostitch、ICE 和 Autopano Giga。两组变压器红外图像拼接结果如图 13 所示。

由图 13(a)~(c)可看出,由 3 款图像拼接软件生成的图像在边缘处均出现不同程度的畸变与黑边,同时, Autostitch 和 Autopano Giga 生成的图像在变压器外壳处

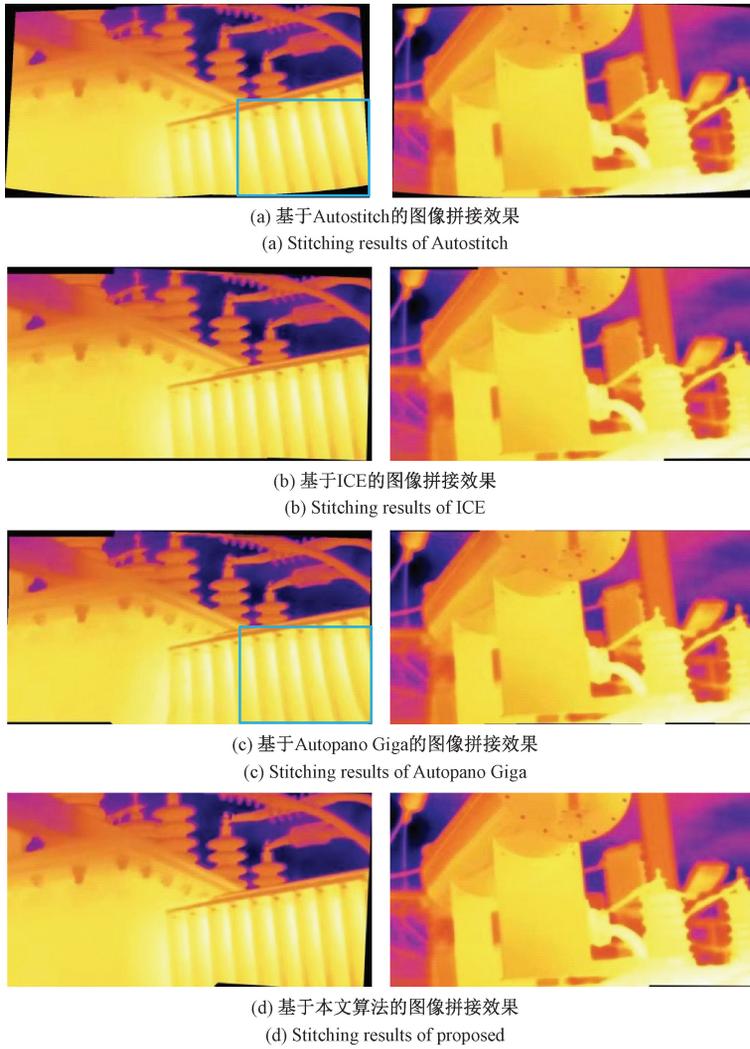


图 13 变压器红外图像拼接效果对比图

Fig. 13 Comparison of transformer infrared image stitching effect

(蓝框所示区域)出现了明显的变形情况。而由图 13(d)可看出,本文算法拼接的图像畸变程度最低、黑边面积最小、拼接效果最自然。

各项评价指标数值如表 4 所示,本文算法在两组实验中的 *PSNR* 和 *RMSE* 数值较 3 款图像拼接软件至少相对提高 21.85%和 63.54%,优势较为明显。

表 4 各图像拼接方法评价指标对比

Table 4 Comparison of the evaluation indexes of each image stitching method

图像组号	评价指标	Autostitch	ICE	Autopano Giga	本文算法
1	<i>PSNR</i>	19.88	16.41	19.67	<b>25.44</b>
	<i>RMSE</i>	7.02	6.94	6.83	<b>2.49</b>
2	<i>PSNR</i>	19.78	20.91	21.64	<b>32.50</b>
	<i>RMSE</i>	5.62	5.94	5.86	<b>0.88</b>

## 6 结 论

本文提出了一种基于 ROI 和改进最佳缝合线的电力设备红外图像拼接算法。划分两待拼接图像相邻的 50% 区域作为 ROI,在 ROI 内进行特征点提取,提高了特征点提取和匹配的效率和准确率,同时提升了图像对齐能力;在图像融合阶段,将两待拼接图像转化为特征向量做均值化处理,计算两特征向量之间的余弦相似度,作为颜色差异约束项引入能量差异函数得到改进的最佳缝合线,使缝合线准确穿越重叠区域能量差异最小的位置,避免拼接后图像出现明显的拼接痕迹。

本文所提方法具有配准和对齐准确、拼接图像畸变小且观感自然等优势。与主流拼接软件的图像拼接对比实验中,本文所提方法的 *PSNR* 和 *RMSE* 数值至少相对提高 21.85%和 63.54%。因此,该方法可以有效解决电力设备红外图像拼接的问题,有助于获取变电设备的完整温度情况。

## 参考文献

- [1] HE H, LEE W J, LUO D S, et al. Insulator infrared image denoising method based on wavelet generic Gaussian distribution and map estimation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3279-3284.
- [2] 周正钦, 杜振波, 王文瑞, 等. 基于分层分布的变电站带电运维智能化技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1):150-157.  
ZHOU ZH Q, DU ZH B, WANG W R, et al. Intelligent technology and application of substation live operation and maintenance based on hierarchical distribution[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1):150-157.
- [3] 卢泉, 杨振华, 黄粒峰. 改进最佳缝合线的红外图像拼接方法[J]. 红外技术, 2022, 44(6):580-586.  
LU Q, YANG ZH H, HUANG L F. Improved infrared image stitching method for optimal seam-line[J]. Infrared Technology, 2022, 44(6):580-586.
- [4] 张望成, 杨建永, 胡炎. 一种快速鲁棒性的视差图像拼接方法[J]. 无线电工程, 2024, 54(3):653-659.  
ZHANG W CH, YANG J Y, HU Y. A fast and robust stitching method for parallax images[J]. Radio Engineering, 2024, 54(3):653-659.
- [5] CIORTEA L I, CHEN D Q, XIAO P. Skin capacitive image stitching and occlusion measurements [J]. Cosmetics, 2023, 10(1):32.
- [6] 姚俐. 红外全景图像拼接方法的研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.  
YAO L. Research on infrared panoramic image stitching [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [7] 王建华, 杨继华, 王克旺, 等. 一种优化的钣金零件测量图像拼接方法[C]. 第十六届中国航空测控技术年会论文集, 2019:3.  
WANG J H, YANG J H, WANG K W, et al. An optimized image stitching method for measurement of sheet metal parts[C]. 16th Annual Meeting of China Aeronautical Measurement and Control Technology, 2019:3.
- [8] 陶杰, 倪双静, 陈雪云, 等. 基于改进 ORB 的高速公路实时视频拼接算法研究[C]. 2022 世界交通运输大会(WTC2022)论文集(运输规划与交叉学科篇), 2022:8.  
TAO J, NI SH J, CHEN X Y, et al. Research on real-time video splicing algorithm of expressway based on improved ORB [C]. 2022 World Congress on Transport (WTC2022) (Transportation Planning and Interdisciplinarity), 2022:8.
- [9] 姚莉, 杜俊康, 李长顺. 针对伪影改善的图像拼接方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(1):35-41.  
YAO L, DU J K, LI CH SH. Image stitching method for improvement of artifact[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Edition), 2021, 42(1):35-41.
- [10] AN Q, CHEN X J, WU SH S. A novel fast image stitching method based on the combination of SURF and cell[J]. Complexity, 2021, 2021: 1-14.
- [11] 蓝章礼, 李战, 李伟. 基于 SURF 和最佳缝合线的车道图像序列拼接研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(10):13-18.  
LAN ZH L, LI ZH, LI W. Research on lane image sequence stitching based on SURF and optimal sutures[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2019, 38(10):13-18.
- [12] 王宇, 张哲, 杨絮. 基于最佳缝合线的图像拼接创新实验设计[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(2):48-51.  
WANG Y, ZHANG ZH, YANG X. Innovative experimental design of image stitching based on optimal suture line [J]. Laboratory Research and Exploration, 2023, 42(2):48-51.
- [13] ZHANG J D, XIU Y. Image stitching based on human visual system and SIFT algorithm [J]. The Visual Computer, 2024, 40(1): 427-439.
- [14] PENG Z Y, MA Y, ZHANG Y J, et al. Seamless UAV hyperspectral image stitching using optimal seamline detection via graph cuts [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61:1-13.
- [15] 崔晨阳, 方宇, 高玮玮, 等. 基于 AKAZE 和 PROSAC 的风机叶片裂纹图像拼接方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(7):177-183.  
CUI CH Y, FANG Y, GAO W W, et al. Fan blade crack image stitching method based on AKAZE and PROSAC[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(7):177-183.
- [16] 张军军. 基于余弦相似性的在线监测系统智能预警方法[J]. 电气技术, 2023, 24(9):65-70.  
ZHANG J J. Intelligent early warning method of online monitoring system based on cosine similarity[J]. Electrical Technology, 2023, 24(9):65-70.
- [17] 杨树财, 于松, 苏帅, 等. 六通道球幕投影图像畸变校正及融合板设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 170-179.  
YANG SH C, YU S, SU SH, et al. Distortion correction and fusion plate design of six-channel spherical projection image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9):170-179.

## 作者简介

吴润国, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。

E-mail: wrg156525@163.com

刘晓东(通信作者), 博士, 高级实验师, 硕士生导师, 主要研究方向为机器视觉。

E-mail: lxd@djtu.edu.cn

费继友, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非接触精密测量技术。

E-mail: fjiy@djtu.edu.cn

赵兴, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为设备状态监测与故障诊断。

E-mail: Zhaoxing@djtu.edu.cn

姚梦涛, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。

E-mail: 996281735@qq.com