

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.03.013

# 基于 SURF 算法的红外图像拼接方法的改进

王锦坤<sup>1</sup>, 张秋菊<sup>2</sup>

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;  
2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:**针对红外图像拼接存在速度慢、精度低的问题,将常用的几种可见光图像配准算法用于红外图像配准对比实验。选择其中实时性和准确性较好的 SURF 算法进行优化改进,采用的方法是图像区域分块、阈值化处理和特征点匹配对两级筛选(筛选条件根据不同对象可实时调整)。在不牺牲准确性的前提下,改进方法有效地提高了红外图像拼接的实时性。实验证明笔者提出的红外图像拼接改进方法的有效性。

**关键词:**图像处理;红外图像拼接;SURF 算法;图像分块;阈值处理;图像配准

中图分类号:TP391.41 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)03-0066-06

## Improvement of Infrared Image Mosaic Method Based on SURF Algorithm

WANG Jinkun<sup>1</sup>, ZHANG Qiuju<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;  
2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

**Abstract:** Aiming at the the problem of slow speed and accuracy of infrared image mosaic, several commonly used visible image registration algorithms were used in the contrast experiment of infrared image registration. The SURF algorithm with good real-time and accuracy was selected, and the improved method was improved by the image region block, the threshold processing and the two stage selection of the feature point matching (the filtering conditions can be adjusted in real time according to different objects). Without sacrificing the accuracy, the real-time performance of the infrared image mosaic was effectively improved. The experiment proves that the improved method of infrared image mosaic proposed in this paper is effective.

**Keywords:** image processing; infrared image mosaic; SURF algorithm; image segmentation; threshold processing; image registration

红外成像技术能用于夜间探测,抗干扰能力又强,被广泛应用于工业、军事和医学等领域<sup>[1]</sup>。对于那些需要红外图像视场大且分辨率高<sup>[2,27]</sup>的应用场合,目前大多数红外图像采集设备无法满足要求,需要采用红外图像拼接技术。如何在保证图像拼接准确性的基础上提高图像拼接的实时性具有重要的实用价值。

目前,图像拼接领域较为成熟的算法包括 Fast 算子、Moravec 算子、Forstner 算子、Susan 算子、Harris 算子及 SIFT 算子等<sup>[3-5]</sup>。如何提高图像拼接算法的实时性是众多学者所关注的焦点。2006 年, Bay<sup>[6]</sup> 提出了 SURF 算法,该算法具备了 SIFT 算法的旋转不变性和

尺度不变性,减小了特征点描述子的维度,从而提高了算法的运算速度。2011 年, Runlee 等<sup>[7]</sup> 提出了 ORB 算法, ORB 特征描述子的建立和匹配速度都比较快,但是不具备尺度不变性。2011 年, Leutenegger 等<sup>[8]</sup> 提出 BRISK 算法,具有较好的旋转不变性、尺度不变性和鲁棒性。2014 年, 徐鑫等<sup>[9]</sup> 提出一种改进的 RANSAC 算法,通过减少算法的迭代次数来提高算法的运算速度。2015 年陆园园等<sup>[10]</sup> 将 FAST 算法与 SIFT 算法有效的结合,提高了算法的运行效率。2016 年,李玉峰等<sup>[11]</sup> 提出了一种基于区域分块与尺度不变特征变换的图像拼接算法,减少了 SIFT 算法大量无用

收稿日期:2018-09-25;修回日期:2019-02-14

第一作者简介:王锦坤(1994),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为机电控制与检测技术。E-mail:w13476275235@qq.com

搜索,提高了匹配速度。2018 年樊佩琦等<sup>[2]33</sup>将 BRISK 描述子和 Canny 边缘检测应用于 SURF 红外图像拼接,该方法有效地减少了算法运行时间。

上述研究大多数是针对可见光图像的拼接,由于成像方式不同,其研究成果不一定适用于红外图像拼接。在实际工程中,往往只关注红外图像的局部特征区域,而现有的算法对特征区域的针对性并不强,且针对红外图像拼接的算法实时性方面还有待进一步提高。因此,课题组在优选现有的图像拼接算法基础上,对 SURF 算法进行了改进研究,在保证图像拼接准确性的同时,提高图像拼接的速度,以满足实际工程中红外图像拼接实时性的需求。

## 1 特征匹配算法优选

红外图像拼接流程如图 1 所示,包括图像采集、图像预处理、图像配准和图像融合等<sup>[12]</sup>步骤。其中图像配准最为关键,它影响着图像拼接的准确度和速度。图像配准包括了特征匹配、坐标转换等。特征匹配又包含特征点提取、描述和匹配等<sup>[13]</sup>步骤。为了在红外图像拼接准确的前提下,尽可能地提高图像拼接的速度,首先需要保证特征匹配算法的准确性和快速性。

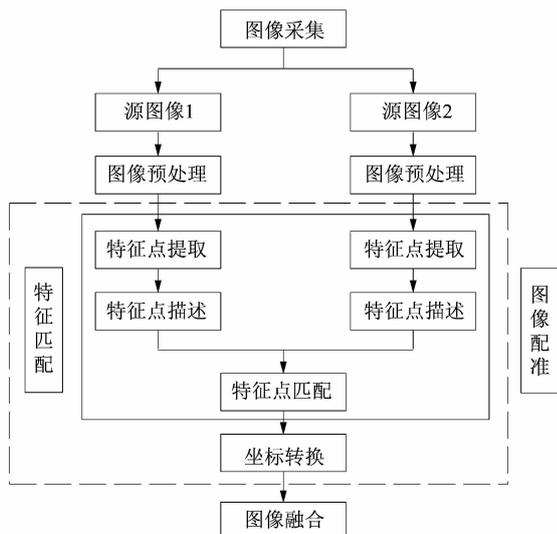


图 1 红外图像拼接流程

Figure 1 Flow of infrared image mosaic

由于红外图像成像方式与可见光图像不同,现有较为成熟的有关可见光图像拼接的研究成果不一定适用于红外图像拼接,但仍然具有很高的参考价值。笔者结合相关研究的成果,以高实时性、高准确度为目标,比较了以下 6 种针对红外图像匹配性能的处理方式:①SURF 算子提取以及描述特征点;②SURF 算子提取 + BRISK 算子描述特征点;③BRISK 算子提取以

及描述特征点;④ORB 算子提取以及描述特征点;⑤ORB 算子提取 + BRISK 描述特征点;⑥ORB 算子提取 + SURF 描述特征点。

通过实验比较“完成特征点匹配的时间<sup>[14]</sup>”和“经过初步筛选后的正确匹配率<sup>[15]</sup>”2 个指标来分析各个算法的匹配性能后发现:ORB 算子和 SURF 算子性能相对较好,但是 SURF 算子具备尺度不变性而 ORB 算子并不具备。考虑到算法的通用性,笔者选择以 SURF 算子为基础,继续优化研究,进一步提高红外图像拼接的实时性。

## 2 SURF 算法原理

### 1) 特征点提取

SURF 算法利用高斯滤波构建图像金字塔,得到不同尺度空间的图像序列。设原图像为  $I(x, y)$ ,通过高斯卷积得到的不同尺度空间的图像序列为  $L(x, y, \sigma)$ ,  $\sigma$  为图像尺度。

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (1)$$

再计算出 Hessian 矩阵:

$$\mathbf{H}(x, \sigma) \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{\partial^2}{\partial xy} \\ \frac{\partial^2}{\partial xy} & \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{bmatrix} \cdot L(x, y, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, y, \sigma) & L_{xy}(x, y, \sigma) \\ L_{xy}(x, y, \sigma) & L_{yy}(x, y, \sigma) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $L_{xx}(x, y, \sigma)$  为高斯二阶微分在  $x$  处与图像 1 的卷积;  $L_{xy}(x, y, \sigma)$  与  $L_{yy}(x, y, \sigma)$  同理。

数字图像中,用  $D_{xx}, D_{xy}, D_{yy}$  分别近似替代  $L_{xx}, L_{xy}, L_{yy}$ , 构建快速 Hessian 矩阵判别式,来提取局部极大值,确定关键点的位置。快速 Hessian 矩阵判别式为:

$$\det(\mathbf{H}) = D_{xx}D_{yy} - (\omega D_{xy})^2 > T \quad (3)$$

式中:  $T$  为选定的阈值;  $\omega$  为补偿系数。

为了保证判别式的统一性,针对不同的  $\sigma$  值和模板尺寸,  $\omega$  一般都取 0.9。

### 2) 特征点主方向确定及特征点描述

以特征点为中心,计算半径为  $6s$  ( $s$  为特征点所在的尺度值)邻域内的点在水平和垂直方向的 Harr 小波响应。统计  $60^\circ$  扇形窗口内的小波响应总和,数值最大的扇形对应的方向为主方向。  $dx$  和  $dy$  分别为水平和垂直的小波响应,  $w$  为扇形区域,该区域对应的方向计算方法如下:

$$\theta_w = \arctan \left( \frac{\sum_w dx}{\sum_w dy} \right) \quad (4)$$

以特征点为中心,沿主方向将  $20s \times 20s$  的图像划

分为  $4 \times 4$  个子块, 在每个子区域中分别统计  $\sum dx$ ,  $\sum dy$ ,  $\sum |dx|$  和  $\sum |dy|$ , 生成一个 64 维的特征描述子。

### 3) 特征点匹配

源图像 1 中的某个特征点  $F_{1i}$  与源图像 2 中的所有特征点依次先进行 Hessian 矩阵迹的判断, 如果迹同方向, 再计算两特征点描述子之间的欧氏距离; 如果迹不同向, 进行下一点的比较, 源图像 2 中与之欧氏距离最近特征点为  $F_{1i}$  的最佳匹配点。

## 3 改进的红外图像拼接方法

为进一步提高算法的实时性, 笔者在 SURF 算子图像配准阶段, 运用区域分块的相关算法将图像分块; 结合阈值化处理去掉无效的信息, 只对局部有效信息进行分析运算。在特征点匹配阶段, 进一步将得到的匹配对进行筛选, 提高匹配对的准确率, 从而减少 RANSAC 算法的迭代抽样计算转换矩阵的次数, 提高图像拼接的速度。改进的图像拼接流程如图 2 所示。

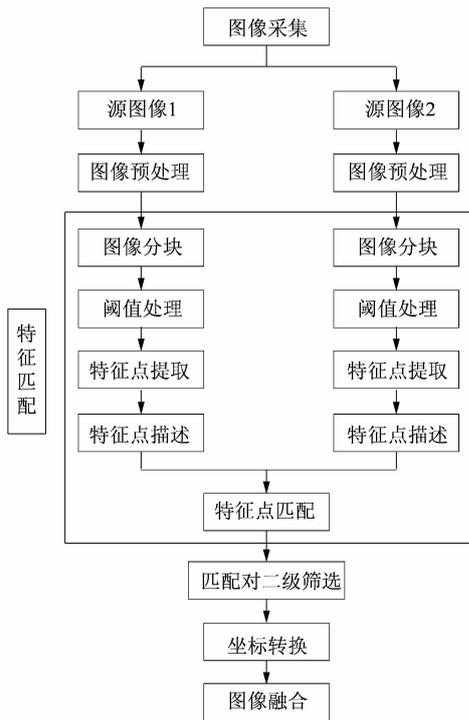


图 2 改进的红外图像拼接流程

Figure 2 Flow of improved infrared image mosaic

### 3.1 图像分块与相关性度量

分析 SURF 算法进行特征点匹配的原理发现, 只有两图像重叠区域内的特征点才是有效的特征点。将图像分块, 对重叠率大的子块进行分析运算能有效减少算法运行时间。

图像所分块数  $n$  越大, 对单个子块 SURF 算法的运行时间  $t/n$  越短, 但是对各个子块之间的相关性度

量耗时  $t_1$  会变长; 且分块过多会导致子块包含的有效信息不足。综合考虑算法的总耗时  $(t/n + t_1)$  和子区域的有效性, 本文  $n$  取 4。

图 3 是待拼接的两幅图像分块示意图。求出两幅图像中相似度最大的 2 块区域, 用于后续 SURF 算法进行特征点运算。这样能够大大缩短 SURF 算法的运算时间。

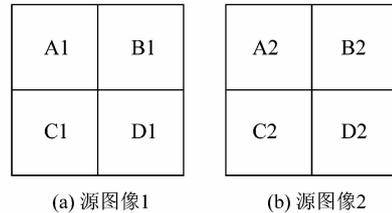


图 3 区域分块示意图

Figure 3 Block diagram

根据参考文献 [11] 第 1 200 页中提出的方法, 计算 2 幅图像各个区块之间的归一化互相关系数。假设每一小块图像的大小为  $W \times D$ , 则相应的归一化互相关系数:

$$\rho(r, c) = \frac{\sum_{i=1}^{i=W} \sum_{j=1}^{j=D} (g_{ij} - \bar{g})(f_{ij} - \bar{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=W} \sum_{j=1}^{j=D} (g_{ij} - \bar{g})^2 \sum_{i=1}^{i=W} \sum_{j=1}^{j=D} (f_{ij} - \bar{f})^2}} \quad (5)$$

式中:  $r, c$  分别表示源图像 1 和源图像 2 中的不同区块编号;  $g, f$  分别表示对应区块的图像;  $\bar{g}, \bar{f}$  分别表示对应区块的灰度平均值。

从 16 个计算结果中挑选互相关系数最大值, 则对应的 2 个区块图像重叠率最大, 将这 2 个区块用于后续运算。

### 3.2 图像阈值化处理

红外图像在工程中一般是用于“兴趣”区域的提取, 例如在酿酒上甾工艺过程中利用红外图像来判别甾桶内酒醅温度过高的区域。在红外图像拼接过程中, 可以省去对非“兴趣”区域的运算, 减少算法运行的时间使算法更具有针对性。

在特征点提取之前, 将上一步获得的图像区块先进行阈值处理, 公式如下:

$$f_{ij} = (f_{ij} > T) ? f_{ij} : 0 \quad (6)$$

式中:  $f_{ij}$  表示图像在像素坐标  $(i, j)$  处的灰度值;  $T$  为阈值 (通常  $T$  取值以能筛选出“兴趣”区域为原则, 课题组研究对象的“兴趣”区域为温度偏高的区域,  $T$  取值为 120 ~ 160)。

公式 (6) 的含义是如果某点的灰度值大于阈值则

保持不变,否则灰度值置为0。

阈值处理后,在进行特征点提取运算的过程中,只对“兴趣”区域的像素点进行运算,减少了部分运算量。

另外,缩小了运算范围,会导致非“兴趣”区域内有效特征点无法被提取,从而导致有效特征点数目减少的问题,由于阈值化处理之后,在“兴趣”区域外围形成了一个边缘,边缘中会出现新的有效特征点,能适当补偿上述出现的问题。

### 3.3 特征点匹配对两级筛选

经过 SURF 算法运算后得到的特征点匹配对存在误匹配,在利用 RANSAC 算法采样计算转换矩阵  $H$  之前,需要对特征点匹配对进行筛选。一方面能提高转换矩阵的准确性;另一方面可以减少 RANSAC 算法采样次数,提高算法的速度。

RANSAC 算法通过不断地随机抽取 4 对特征点匹配对计算转换矩阵,直到出现最符合要求的矩阵。设  $\alpha$  为正确匹配率, $p$  为在  $N_1$  次采样中至少出现一次好采样的概率,一般取 0.95 以上。RANSAC 算法的采样次数:

$$N_1 = \frac{\ln(1-p)}{\ln(1-\alpha^4)} \quad (7)$$

式中, $N_1$  随着  $\alpha$  的增大而减小,为了提高算法的速度,笔者将特征点匹配对进行两级筛选挑出准确度较高的匹配对,实现一次抽样获得较大的  $\alpha$  值,减少迭代采样次数。

1) 第 1 级筛选。在 SURF 特征点匹配阶段,源图像 1 中提取的每一个特征点,在源图像 2 中找到与之欧氏距离最近和次近的 2 个特征点,距离分别记为  $L_1$  和  $L_2$ 。利用如下判别式来筛选特征点匹配对,满足判别式的匹配对被保留。

$$T = L_1/L_2 < T_0 \quad (8)$$

式中: $T_0$  为阈值,工程中一般取 0.4 ~ 0.8 之间,文中针对不同图像,实时调整了  $T_0$  的取值。

一级筛选后,大部分误匹配对将被过滤掉。

2) 第 2 级筛选。将特征点匹配对按照欧氏距离的大小从小到大进行排序,在 C++ 中可以直接调用 `sort()` 函数实现上述过程。排好序后选出排在前  $M$  的匹配对用于 RANSAC 算法抽样计算转换矩阵。理论上,排在越靠前的匹配对准确性越高,只需要取出排在前 4 位的匹配对用于计算转换矩阵,这样就只需要迭代 1 次。但是在实际条件下,欧氏距离并不能绝对作为衡量匹配准确度的标准,存在欧氏距离很小的误匹

配对,如果  $M$  值取得过小,会影响图像拼接的准确性。通过实验发现, $M$  值取 15 ~ 20 时,实验效果较好。为适应不同红外图像,课题组设置了两级  $M$  值。

2 级筛选流程如图 4 所示,图中 Match0, Match1, Match2 分别表示原始、一级筛选后和二级筛选后特征点匹配对; $N$  表示一级筛选后特征点匹配对数。

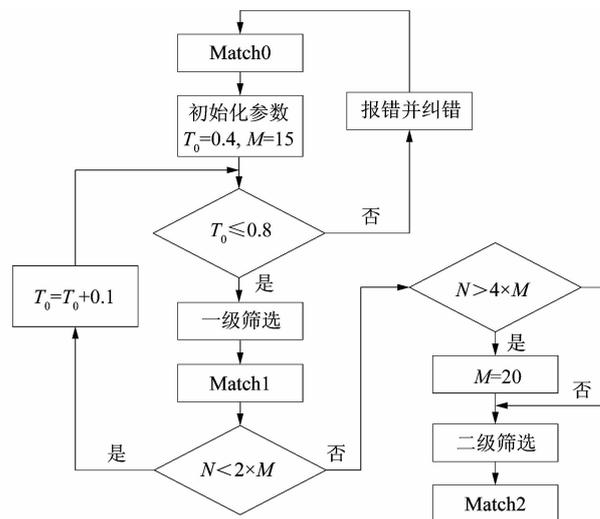


图 4 特征点匹配对二级筛选流程

Figure 4 Matching of feature points to two level screening process

课题组首先将  $T_0$  取值为 0.4, $M$  取为 15,一级筛选后如果  $N$  小于  $2 \times M$ ,则说明  $T_0$  取值偏小,将  $T_0$  增加 0.1,重新进行一级筛选,反复循环;如果  $N$  大于  $4 \times M$ ,表示实验图像的特征点匹配对偏多, $M$  值可取为 20。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验条件

算法运算环境:CPU 为 Intel(R) Core(TM) i7-6700@3.40 GHz;主频为 3.40 GHz;RAM 为 8.00 G;软件平台为 Microsoft Visual Studio 2010 C++ 编程平台。

图像采集设备为高德红外 OR2 测温机芯(分辨率为  $384 \times 288$ )配合 8.8 mm 焦距镜头。

### 4.2 实验验证与结果分析

本文设计了实验,对比以下 4 种红外图像拼接方法的实时性和准确性。4 种方法分别为:

- 1) 文献[11]中第 1 197 ~ 1 205 页提出的图像拼接方法(简称文献[11]方法);
- 2) 传统的基于 SURF 算法的红外图像拼接方法(简称传统方法);
- 3) 文献[2]中第 27 ~ 33 页提出的基于改进 SURF

算法的红外图像拼接方法(简称文献[2]方法);

4) 课题组提出的基于 SURF 算法的红外图像拼接改进方法(简称改进方法)。

### 4.2.1 实时性验证

采集 8 组红外图像(其中 4 组 2 源图像之间只存在平移变换,另外 4 组 2 源图像之间存在平移和旋转 2 种变换),分别用 4 种方法对源图像组进行拼接实验,绘制柱状图,如图 5 所示。

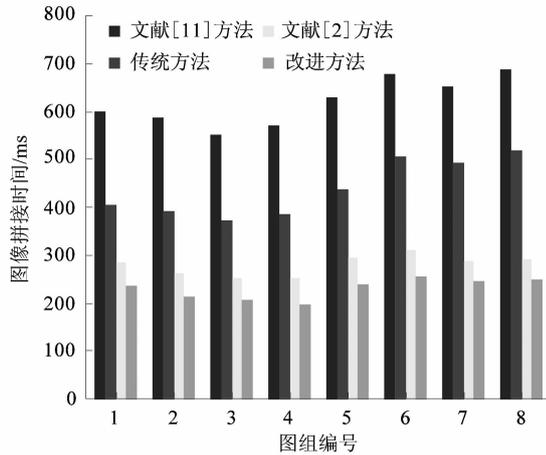


图 5 8 组图像完成拼接耗时柱状图

Figure 5 Time-consuming histogram of eight sets of image splicing

由图 5 可以看出,文献[11]方法虽然利用了图像分块,只对 1/4 图像进行检测运算,但是 SIFT 算法本身比 SURF 算法复杂度高,所以最终其实时性比传统方法差;课题组改进方法与传统方法相比,实时性提高了近 1 倍;改进方法相比文献[2]方法实时性也有所提高。

### 4.2.2 准确性验证

采集 8 张红外图像作为对比的基准(基准图),利用 Photoshop 将图片裁剪为具有重叠部分的 2 张图像(源图像 1,2),生成 8 组图像,将其中 4 组图像中的源图像 2 旋转一定的角度。分别用 4 种方法对 8 组图像进行拼接,利用 MATLAB 编程将拼接后图像与基准图像先灰度化,再逐个像素进行比较,像素点灰度值相差大于 1 记为不合格,分别记录正确率,绘制柱状图如图 6 所示。

已有研究表明文献[11]方法、文献[2]方法和传统方法准确性较好,为验证课题组改进方法的准确性,就只需要验证课题组所作改进并不会造成准确性降低。采用源图裁剪再拼接的方式设计实验,能有效地对比 4 种图像拼接方法的准确性,且与结构相似度评

估<sup>[16]</sup>相比,实验验证过程更容易实现。

由图 6 可以看出,文献[11]方法准确性要高于其他 3 种方法,这是因为 SIFT 算法准确率高 于 SURF 算法;而改进方法与传统方法以及文献[2]方法相比准确率有少量提升,可以看出改进方法并没有导致准确率下降。

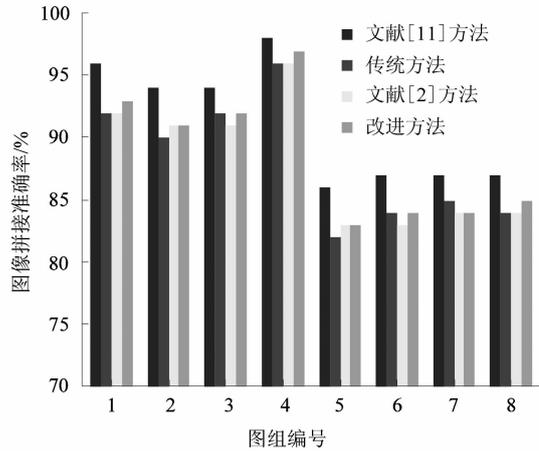


图 6 8 组图像拼接准确率柱状图

Figure 6 Histogram of eight sets of image accuracy

综合以上分析,改进方法在不牺牲准确性的前提下,实时性有了很大提升。

在实验过程中还发现:图像分块后,进行阈值化处理与不进行阈值化处理相比,有效特征点匹配对数有了一定的增多,特征匹配运算的时间也有了一定的减少,最关键的是提高了“兴趣”区域(温度较高区域)的拼接准确性;特征点匹配对经过 2 级筛选,计算转换矩阵的耗时相应的减少了,由于 2 次筛选过程增加了处理时间,所以此处对实时性的提高并不明显,但 2 次筛选有效的提高了特征点匹配的准确性,从而保证了图像拼接的准确性。

实验的部分截图如图 7 ~ 10 所示。

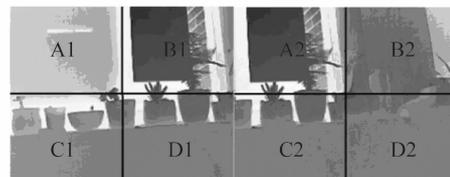


图 7 图像分块结果示意图

Figure 7 Schematic diagram of image blocking results

图 7 所示的实验图组经过相关性度量发现 B1-A2 与 D1-C2 的 2 组配对相似度都很大,考虑到温度偏高区域(较亮区域)是“兴趣”区域,本实验后续对 B1-A2

这 2 个子块进行处理,如图 8 所示。



图 8 2 子块阈值化图像

Figure 8 Threshold image of two blocks



图 9 2 次筛选后特征点匹配情况

Figure 9 Matching of feature points after two screening



图 10 只有平移变换图像组拼接结果

Figure 10 Image stitching result for translation transformation image montage

## 5 结语

课题组针对红外图像拼接技术在实际应用中存在的实时性不够、拼接精度不高等问题,首先对现有的几种性能较好的图像配准算法进行实验对比,选出了实时性准确性相对较好的 SURF 算法进行进一步改进,提出了基于 SURF 算法的红外图像拼接方法改进。通过图像分块匹配与图像阈值化以及特征点匹配对 2 级筛选等处理,对传统的基于 SURF 算法的红外图像拼

接方法进行了改进。实验结果表明:课题组提出的改进方法在保证准确性不下降的前提下,有效地提高了图像拼接的实时性。

### 参考文献:

- [1] 郑兰,安博文,曹芳. 一种基于特征点匹配的红外图像拼接算法[J]. 计算机应用与软件,2015,32(9):192.
- [2] 樊佩琦,吴诚,杨瑞宇,等. 一种基于 BRISK 改进的 SURF 红外图像拼接方法[J]. 红外技术,2018,40(1):27-33.
- [3] 王利勇,王慧,李鹏程,等. 低空遥感数字影像的点特征提取算子的比较[J]. 测绘科学,2011,36(1):121-124.
- [4] Morevec H P. Towards automatic visual obstacle avoidance[C]// 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Cambridge, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1977:584.
- [5] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[J]. Proceedings Alvey Vision Conference, 1988(3):147-151.
- [6] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. Computer Vision & Image Understanding, 2008, 110(3):346-359.
- [7] RUBLEE E, RABAUD V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF//International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain; IEEE, 2012:2564-2571.
- [8] LEUTENEGGER S, CHLI M, SIEGWART R Y. BRISK: binary robust invariant scalable keypoints[C]//International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain; IEEE, 2011:2548-2555.
- [9] 徐鑫,孙韶媛,沙钰杰,等. 一种基于改进 RANSAC 的红外图像拼接方法[J]. 激光与光电子学进展,2014,51(11):129-134.
- [10] 陆园园,张明. 基于 SIFT 算法的红外图像拼接方法改进[J]. 计算机系统应用,2015,24(8):165-170.
- [11] 李玉峰,李广泽,谷绍湖,等. 基于区域分块与尺度不变特征变换的图像拼接算法[J]. 光学精密工程,2016,24(5):1197-1205.
- [12] 陈志昂,徐晓刚,徐冠雷. 图像拼接技术研究[J]. 计算机科学,2015,42(增刊2):160.
- [13] 王雨曦,王义坤,葛明锋. 基于点特征算子的红外图像实时拼接系统[J]. 红外技术,2015,37(3):205.
- [14] 董强,刘晶红,周前飞. 用于遥感图像拼接的改进 SURF 算法[J]. 吉林大学学报(工学版),2017,47(5):1644-1652.
- [15] 赵岩,陈月,王世刚. 结合投影误差校正的快速 SIFT 图像拼接[J]. 光学精密工程,2017,25(6):1645-1651.
- [16] 万国挺,王俊平,李锦,等. 图像拼接质量评价方法[J]. 通信学报,2013,34(8):76-81.