

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107195

基于降采样和改进 Shi-Tomasi 角点检测 算法的 PCB 图像拼接*

胡涛 茅健

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院 上海 201600)

摘要: 针对大型多重复单元 PCB 图像拼接耗时长、拼接错误率高等问题,提出了一种快速鲁棒的图像拼接方法。对采集到的高分辨率 PCB 图像进行降采样,基于人工选点精准获取含重叠区域的图像单元作为配准区域;引入抑制半径的方法对 Shi-Tomasi 角点检测算法进行改进,使提取出的区域特征点分布更加均匀;使用暴力匹配方式分别对区域特征点进行粗匹配并通过 RANSAC 算法剔除误匹配点对后获得配准系数矩阵;结合仿射变换公式推导计算出原图像的配准系数矩阵,根据配准系数矩阵对待拼接的图像进行融合,得到完整的 PCB 拼接图像。实验结果表明,所提出的 PCB 图像拼接方法,加快了 PCB 图像拼接的速度同时也提高了特征点匹配精度,在对图像降采样 8 倍下,改进的 Shi-Tomasi 算法较传统的 Shi-Tomasi 算法和 Harris 算法在匹配正确率上分别提高了 7.8% 和 4.0%,验证了该方法的可行性。

关键词: 大型 PCB 图像;图像拼接;Shi-Tomasi 角点;暴力匹配;RANSAC 算法

中图分类号: TP391.41;TN41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

PCB image stitching method based on down-sampling and improved Shi-Tomasi corner detection algorithm

Hu Tao Mao Jian

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

Abstract: Aiming at the problems of long time consuming and high error rate of large multi-repeating unit PCB image stitching, a fast robust image stitching method was proposed. The collected high-resolution PCB images were sampled down, and image units containing overlapping areas were accurately obtained based on manual points as registration areas. The Shi-Tomasi corner detection algorithm was improved by introducing the suppression radius method to make the extracted regional feature points more evenly distributed. The violence matching method was used to carry out the rough matching of the regional feature points respectively and the registration coefficient matrix was obtained after removing the mismatched point pairs by RANSAC algorithm. Combined with affine transformation formula, the registration coefficient matrix of the original image was deduced and calculated. According to the registration coefficient matrix, the stitched images were fused to obtain a complete PCB stitched image. Experimental verification shows that the proposed image matching method accelerates the speed of large PCB image stitching, and also significantly improve image registration precision at the same time, when the image is downsampled 8 times, compared with the traditional Shi-Tomasi algorithm and Harris algorithm, the improved Shi-Tomasi algorithm improves the matching accuracy by 7.8% and 4.0%, respectively, which proves the feasibility of the proposed method.

Keywords: large PCB images; image stitching; Shi-Tomasi corners; brute-force match; RANSAC algorithm

0 引言

印刷电路板(printed circuit board, PCB)是电子设备中

非常重要的组成部分之一,也是电子元器件实现电气连接的载体^[1]。在 PCB 板的生产过程中,由于加工工艺复杂,板上线路和孔位密集,不可避免的产生各类缺陷^[2]。对这

收稿日期:2021-07-07

* 基金项目:国家自然科学基金(61703268)项目资助

些缺陷的检测已经成为电子制造业保证产品质量、可靠性和降低制造成本关键过程^[3]。20 世纪 80 年代起,自动光学检测设备(automated optical inspection, AOI)逐渐取代传统人工目检的方式成为 PCB 缺陷检测的发展方向^[4]。AOI 的工作原理是通过图像采集装置获取被检测物体的图像,与标准图像进行对比,定位并识别出缺陷。在采集大面积 PCB 板的图像时,由于相机的视野有限,需要同时使用多台相机拍摄 PCB 板的不同部位,得到多幅具有重叠区域的图像。图像拼接技术就是通过利用图像之间的重叠区域,将多幅图像拼接成一幅完整的高分辨率图像^[5],解决了相机由于自身不足无法直接拍摄完整目标的问题,是目前机器视觉领域的研究热点^[6]。

图像配准是图像拼接的关键,配准的结果直接影响最后图像拼接的质量^[7]。目前已提出的图像配准方法,可以归纳为 3 类:基于灰度、基于相位相关和基于特征点的配准方法^[8]。基于特征点的配准方法是从图像中提取一些点作为特征点,对特征点进行描述构成特征向量,找出两幅图像中特征向量最接近的点构成匹配点对^[9]。这种方法配准精度高,运算量小,是目前最为常用的图像配准方法^[10]。特征点提取的算法主要有 Harris、Shi-tomasi、FAST、SIFT (scale-invariant feature transform) 和 SURF (speeded up robust features) 等,其中 SIFT 和 SURF 算法提取出的角点在图像尺度变换、旋转和光照变化等条件下具有良好的不变性^[11]。

现有的特征点检测算法直接对大尺寸图像提取特征点,占用计算空间大,用时长。针对上述问题,近些年来,国内外学者通过相关研究,提出了一些解决方法。凡宇琼等^[12]提出对大尺寸图像先进行降采样,使用 SIFT 算法提取降采样图像的关键点,根据关键点匹配获得配准系数,然后结合仿射变换矩阵最终得到原图像的配准系数,完成图像配准,该方法缩短了图像的配准时间。赵岩等^[13]提出利用频域相位相关算法获取图像间的公共部分,只对该部分检测关键点,避开图像无用区域的计算,从而加快了图像的拼接速度。保文星等^[14]提出对待拼接的图像分割成若干个矩形块,根据信息相似性找出图像中最相似的矩形块,只对该矩形块进行特征点提取,减少算法的运算时间。刘杰等^[15]提出对图像中特征丰富的区域进行特征点提取,避开图像中特征稀疏区域的检测,提高了算法运行效率。上述算法对于尺寸越大的图像,图像拼接用时降低的越显著,然而当图像中存在重复单元或者相似的局部特征时,直接进行图像配准就容易受到干扰,大量关键点匹配失败,导致配准率下降,出现图像拼接效果差问题。杨帆等^[16]提出对待拼接图像手动添加记号,通过记号图分别与待拼接的图像进行匹配,避免了图像中相同单元的影响。王栋等^[17]提出对待拼接图中几何图形的中心构成点集,进行 DT 剖分生成三角网,后基于相似三角形约束进行图像配准。

随着 PCB 线路设计的密集度越来越高,对 PCB 进行

缺陷检测的精度要求也相应提高,在使用高分辨率的相机采集 PCB 图像时,会得到大尺寸的图像。本文结合待拼接 PCB 图像的特点,提出一种快速鲁棒的图像拼接方法。该方法首先将大尺寸 PCB 图像降采样,缩小图像尺寸后进行人工选点获得配准区域。利用改进的 Shi-Tomasi 算法提取配准区域中的特征点,为消除图像重复单元造成的干扰,对待拼接图像中对应的配准区域分别进行特征点匹配,通过 RANSAC 算法去掉误匹配点对并得到配准系数矩阵,结合仿射变换公式计算出原图像的配准系数,完成图像拼接。通过设计 PCB 图像在不同的降采样倍数下进行拼接实验,验证了所提出的 PCB 图像拼接方法的可行性,显著缩短了图像拼接时间,同时改进的 Shi-Tomasi 算法较传统的角点检测算法在匹配精度上也有一定提高。

1 大尺寸 PCB 图像拼接算法

图像拼接的过程分为 4 步,包括特征点的选取和描述、特征点匹配、计算配准系数矩阵和图像融合^[18]。通过分析采集到的大型多重单元 PCB 图像的特点,首先对图像降采样,采用人工选点的方式获取图像间的配准区域,这样可以有效降低图像拼接的时间,消除图像中重复单元对特征点匹配带来的干扰。由于传统 Shi-Tomasi 算法在提取角点时,出现角点集聚现象,本文提出抑制半径的方法,一定程度上减少角点的数目且使角点分布的更加均匀,有效避免角点集聚现象的产生。算法的整体流程如图 1 所示。

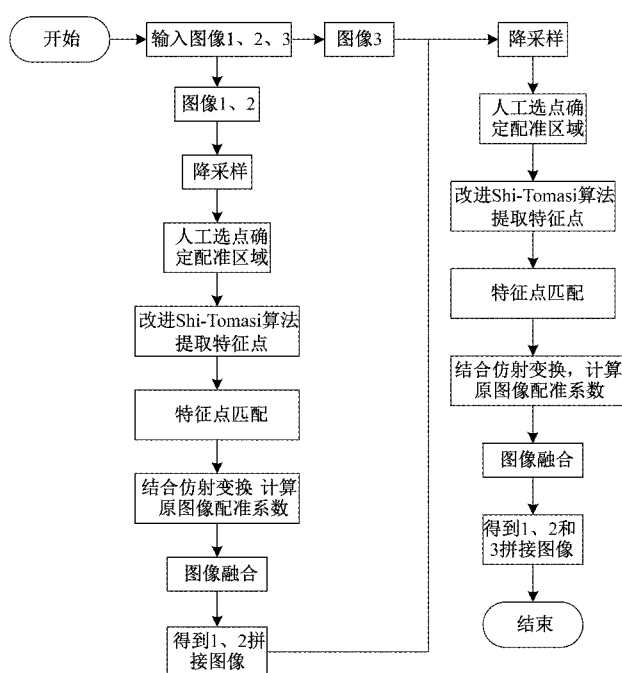


图 1 图像拼接方法流程

1.1 配准区域特征点检测

企业在生产 PCB 板时,为了提高效率和节省材料,通常将多个 PCB 线路印制在一张板上进行加工制造。在缺

陷检测环节,通过采用多台高精度相机同时拍摄 PCB 板,得到多幅高分辨率且存在重复单元的形象。

本文先对 PCB 图像降采样,降低图像的尺寸,结合 PCB 图像特点,采用人工选点的方法,对图像内单个单元逐个进行粗配准,后对粗配准的结果使用 RANSAC 算法消除误匹配的点对。

原理如图 2 所示,图中五角星表示两幅图的重叠部分,每幅图中方框中的图形为相同的单元,黑色的圆点为人工选中的点,基于这些圆点坐标,对两幅图像各分割成 3 块区域,作为配准区域。

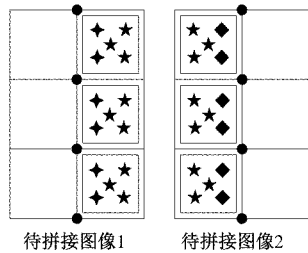


图 2 配准区域示意图

1.2 Shi-Tomasi 角点检测

Shi-Tomasi 算法是在 Harris 算法的基础上改进的角点检测算法,其原理是通过计算局部窗口在图像上沿着不同方向移动的灰度变化,寻找角点响应的局部极值来确定角点。

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) [I(x + u, y + v) - I(x, y)]^2 \quad (1)$$

式中: (u, v) 为局部微小的位移量, $w(x, y)$ 为窗口函数, $I(x, y)$ 为某点的灰度值。对 $I(x + u, y + v)$ 进行泰勒展开可对式(1)进行简化,简化后的公式为:

$$E(u, v) = [u, v] \mathbf{M} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \sum_{x, y} w(x, y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{M} 为梯度的协方差矩阵, I_x 和 I_y 分别为图像灰度沿 X 和 Y 方向的偏导数。

Harris 算法通过矩阵 \mathbf{M} 得到特征值来判断图像中某像素点是否为角点,为了方便判断,定义角点响应函数 R ,当 R 的值大于设定的阈值时,可确定当前的像素点为角点,其计算公式为:

$$R = \det \mathbf{M} - K(\text{trace} \mathbf{M})^2 \quad (4)$$

式中: $\det \mathbf{M}$ 是矩阵 \mathbf{M} 行列式值, $\text{trace} \mathbf{M}$ 为矩阵 \mathbf{M} 的迹, K 值一般取 0.04~0.06 之间。

Shi-Tomasi 算法在 Harris 算法的基础上进行改进,将角点响应函数 R 定义为矩阵 \mathbf{M} 的特征值中较小的那一个。当 R 的值大于设定的阈值时,可确定当前的像素点为角点,公式为:

$$R = \min\{\lambda_1, \lambda_2\} \quad (5)$$

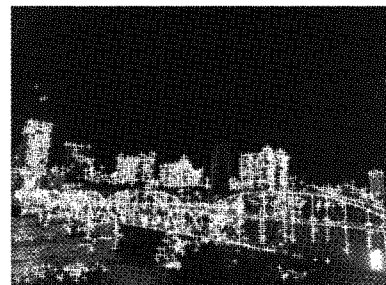
式中: λ_1 和 λ_2 为矩阵 \mathbf{M} 的两个特征值。

1.3 改进 Shi-Tomasi 算法

Shi-Tomasi 算法检测出角点的数量与阈值的设定有很大关系,阈值设置太小,检测出角点的数量过多,在图像部分区域出现簇集现象,增加后期关键点匹配的时间,同时对匹配的精度也会造成影响;阈值设置太大,检测出角点的数量过少,导致关键点匹配对数太少,影响最终图像拼接的效果。

针对传统 Shi-Tomasi 算法的不足,本文提出改进方法,对于检测出的角点先按照响应值大小进行排序,按照设定比例保留部分响应值大的角点,然后为其余的每个角点确定抑制半径,将抑制半径的值从大到小进行排序,根据实际的需求,选择出所需要数目的角点。抑制半径大小的确定以图像中某一个角点为例,若其响应值在设定比例的范围内,则保留该角点;若不是,则选出响应值比该角点响应值大的角点,并计算出他们之间的欧氏距离,保留最小的距离值即为该角点的抑制半径。该方法可有效地解决角点簇集现象的发生,使角点分布的更加合理。

为验证改进 Shi-Tomasi 算法的有效性,图 3 展示了对 Shi-Tomasi 算法改进前后的对比图,图 3(a) 为传统 Shi-Tomasi 算法提取角点的结果,图 3(b) 使用改进的 Shi-Tomasi 算法提取角点的结果。通过对两幅图片对比可以看出,本文改进的方法有效的避免了角点簇集现象的发生,角点分布的也更加均匀、合理。



(a) 传统Shi-Tomasi算法



(b) 改进Shi-Tomasi算法

图 3 特征点检测结果对比

1.4 特征点匹配

将通过改进的 Shi-Tomasi 算法提取出的每一个特征点进行特征描述,生成特征向量,采用暴力匹配的方法实现特征点的粗匹配。暴力匹配是通过计算出两幅图像特征向

量之间的欧氏距离,公式为:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (l_i - l'_i)^2} \quad (6)$$

式中: l_i 和 l'_i 分别表示两幅图像中特征点对应的 n 维特征向量的分量。

若某个特征点对的最小欧氏距离和次近邻距离的比值小于设定的阈值,则判断这一对特征点对为匹配点对。该方法较为简单高效,通常会出现很多误匹配点对。本文采用随机样本一致性(RANSAC)对粗匹配的结果进行筛选,消除误匹配点对。

1.5 配准系数计算

在图像处理中,通过应用仿射变换实现对二维图像平移、旋转、缩放等操作,仿射变换的公式如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: (x, y) 和 (x', y') 分别为原图像和变换后图像中对应的坐标点。仿射变换矩阵中含有 6 个未知参数,其中 $m_{00}, m_{01}, m_{10}, m_{11}$ 表示图像旋转、缩放等变换, m_{02}, m_{12} 表示图像水平和垂直方向的位移量。

通过对超大图像降采样,降低原始图像的尺寸,从而加快图像拼接的速度。为了减少水平方向和垂直方向的形变,将原图像 $I(x, y)$ 的横坐标和纵坐标同时缩小相同倍数 k ,代入公式得:

$$\begin{bmatrix} \frac{x}{k} \\ \frac{y}{k} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

对式(8)求解可得出变换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{k} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

设基准图像 I_0 , 缩小 k 倍后,得到图像 I'_0 , 将图像 I_0 和 I'_0 中对应的坐标点 (x_0, y_0) 和 (x_{s0}, y_{s0}) 代入式(7)得:

$$\begin{bmatrix} x_{s0} \\ y_{s0} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

设待配准图像 I_1 , 缩小倍后,得到图像 I'_1 , 将图像 I_1 和 I'_1 中对应的坐标点 (x_1, y_1) 和 (x_{s1}, y_{s1}) 代入式(7)得:

$$\begin{bmatrix} x_{s1} \\ y_{s1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

设缩放前后,基准图像和待配准图像的配准矩阵分别为 M 和 M_s , 其中 M_s 是通过 RANSAC 算法筛选误匹配点后得到的配准矩阵,令 $M_s = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ a & b & 1 \end{bmatrix}$, 其中 a 和

b 分别表示水平和垂直方向的形变量,有:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} x_{s0} \\ y_{s0} \\ 1 \end{bmatrix} = M_s \begin{bmatrix} x_{s1} \\ y_{s1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

结合上式得:

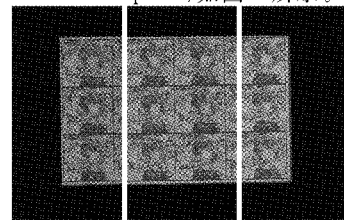
$$M = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} M_s = \begin{bmatrix} \frac{1}{k} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & km_{02} \\ m_{10} & m_{11} & km_{12} \\ \frac{a}{k} & \frac{b}{k} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

通过以上推导,便可间接的获得图像降采样前的配准系数。

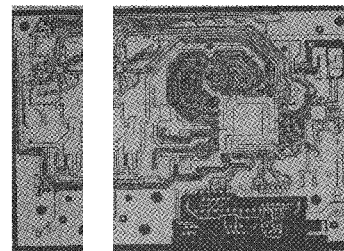
2 实验与分析

2.1 实验环境

本文实验平台为 Windows10 操作系统, CPU2.4 GHz, 内存 16 GB, 编程环境为 MATLAB 2019a。所进行图像拼接实验的图像来自 PCB 生产流水线, 由 3 台线阵相机同时扫描 PCB 板的不同位置拍摄获得。每幅图像的尺寸大小为 30 000 pixel × 16 352 pixel, 如图 4 所示。



(a) 原始图像



(b) 局部放大图像

图 4 待拼接图像

2.2 评价标准

为了验证本文方法的可行性,从图像拼接用时、算法匹配准确率两个方面对其进行分析。匹配准确率(correct matching rate,CMR)的计算公式为:

$$CMR = \frac{R}{N} \quad (15)$$

式中: N 表示粗匹配点对数, R 表示正确匹配点对数。

2.3 实验设计

为了验证本文所提出的算法在 PCB 图像特征点提取和拼接的准确率,本文分别采用传统的 Shi-Tomasi 算法和 Harris 算法进行对比实验。为了验证本文方法在拼接速度上的优势,对原始图像进行 4 倍,8 倍和 16 倍降采样,即分别对图像横坐标和纵坐标同时缩小 4 倍,8 倍和 16 倍。基于篇幅限制,本文只对其中两幅图像的拼接进行分析。图 5~7 分别展示的是运用本文改进的算法在不同的降采样倍数下对 PCB 图像的拼接过程图,表 1~3 数据分别表示在图像不同降采样倍数下,本文改进算法和对比算法完成图像拼接的数据。

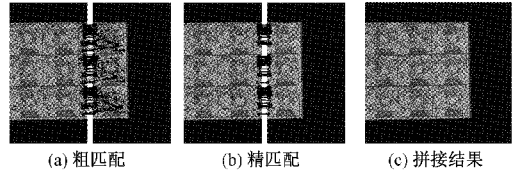


图 5 图像 4 倍降采样拼接过程

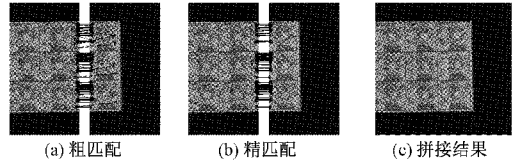


图 6 图像 8 倍降采样拼接过程

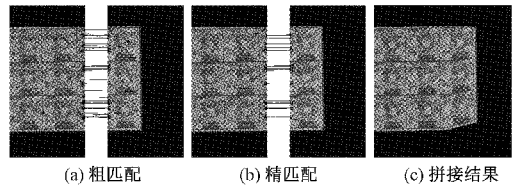


图 7 图像 16 倍降采样拼接过程

表 1 图像 4 倍降采样实验结果对比

4 倍降采样	特征点数量 (左/右)	粗匹配点 对数	正确匹配点 对数	正确率/ %	特征点检测 用时/s	总用时/ s
Shi-Tomasi	1 534/6 692	959	625	65.17	28.55	51.58
Harris	1 223/5 729	816	417	65.32	3.47	23.82
本文	1 350/4 500	599	420	70.12	28.62	46.39

表 2 图像 8 倍降采样实验结果对比

8 倍降采样	特征点数量 (左/右)	粗匹配点 对数	正确匹配点 对数	正确率/ %	特征点检测 用时/s	总用时/ s
Shi-Tomasi	894/3 680	337	242	71.81	8.15	18.30
Harris	900/3 393	317	236	74.45	1.99	11.65
本文	750/3 000	261	202	77.39	8.27	17.59

表 3 图像 16 倍降采样实验结果对比

16 倍降采样	特征点数量 (左/右)	粗匹配点 对数	正确匹配点 对数	正确率/ %	特征点检测 用时/s	总用时/ s
Shi-Tomasi	335/1 745	51	29	56.86	3.12	9.32
Harris	279/1 656	45	27	60.00	1.60	7.67
本文	300/1 500	47	29	61.70	3.31	8.64

2.4 实验分析

从图 5~7 中可以看出,在对原始图像进行 4 倍和 8 倍降采样之后,可以很好的将两幅图像进行拼接。当原始图像在 16 倍降采样之后,拼接的图像出现变形,结合表 3 数据发现,图像在 16 倍降采样后,获取的特征点匹配点对数量太少,导致拼接效果不理想。观察图像在不同降采样倍数的粗匹配结果可以看出,本文采用人工选点确定配准区域,

使得特征点匹配未受到图像中重复单元的影响,出现部分误匹配点对是因为受到配准区域中相似部位的干扰,随着降采样倍数增大,干扰相应减少。分析表 1~3 中的数据可以发现,随着图像降采样倍数的增大,图像配准区域尺寸变小,检测的特征点数相应减少,使得图像拼接时间大幅度的下降。本文提出的改进算法有效减少了特征点的误匹配点对数,匹配正确率相较于传统的 Shi-Tomasi 算法和 Harris

算法都有一定的提高。同时,改进的算法减少了特征点的数目,拼接用时较传统 Shi-Tomasi 算法有所降低,在对图像 8 倍降采样时,匹配正确率达到最高,较传统的 Shi-Tomasi 算法和 Harris 算法分别提高了 7.8% 和 4.0%。

2.5 拼接结果

对于 3 幅待拼接的图像,为了得到完整的拼接图像,需要 2 个配准系数矩阵,运用本文的方法可得到原始图像降采样后的配准系数矩阵,代入式(14),可计算出原始图像的配准系数矩阵,结果如表 4 和 5 所示。

表 4 原始图像 1、2 配准系数

配准	1.000 0	$1.824\ 9 \times 10^{-16}$	$-1.555\ 2 \times 10^4$
系数 1	$-1.398\ 0 \times 10^{-14}$	1.000 0	-24.000 0
	$-8.657\ 3 \times 10^{-19}$	$-4.060\ 9 \times 10^{-20}$	1.000 0

表 5 原始图像 1、2 和 3 配准系数

配准	1.005 4	$6.584\ 4 \times 10^{-4}$	$1.551\ 2 \times 10^4$
系数 2	0.005 3	1.002 3	-79.807 3
	$2.943\ 8 \times 10^{-7}$	$4.114\ 6 \times 10^{-8}$	1.000 0

根据求得的配准系数,3 幅原始图像拼接的结果如图 8 所示。

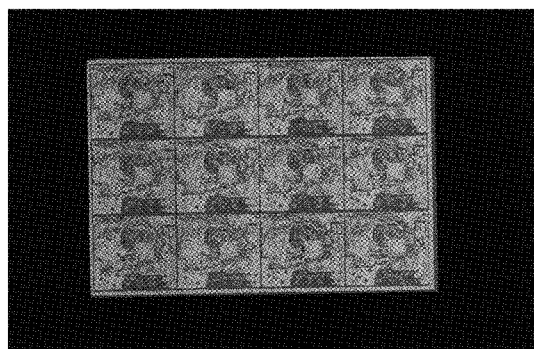


图 8 原始图像拼接结果

3 结 论

本文针对实际采集 PCB 板图像在拼接过程中由于尺寸大、存在多重单元的特点,提出了一种快速鲁棒的图像拼接方法。实验结果表明,本文提出的对图像降采样和人工选点确定配准区域的方法极大地加快了图像拼接的速度,同时也有效避免了图像中重复单元造成的干扰;提出的抑制半径的方法有效解决了 Shi-Tomasi 算法提取角点时出现角点集聚的现象,减少了特征点的误匹配点对数,在图像缩小 8 倍后,改进的 Shi-Tomasi 算法在匹配正确率方面相较于传统的 Shi-Tomasi 算法和 Harris 算法分别提高了 7.8% 和 4.0%。

本方法适用于大尺寸或存在重复单元的图像中,可以提高图像配准精度的同时,显著缩短图像拼接时间。由于

PCB 线路中存在很多相似结构,使得在特征点匹配阶段,部分关键点匹配错误,正确率不是很高。接下来工作将针对该问题进行展开与研究。

参考文献

- [1] 王永利,曹江涛,姬晓飞. 基于卷积神经网络的 PCB 缺陷检测与识别算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8):78-84.
- [2] 李云峰,李晟阳. 基于梯度方向信息熵的印刷电路板缺陷检测[J]. 中国机械工程, 2017, 28(6):695-701.
- [3] CHAUDHARY V, DAVE IR, UPLA KP. Automatic visual inspection of printed circuit board for defect detection and classification [C]. 2nd IEEE International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, Chennai, INDIA: WISPNET, 2017: 732-737.
- [4] 杨庆华,陈亮,荀一,等. 基于机器视觉的 PCB 裸板缺陷自动检测方法[J]. 中国机械工程, 2012, 23(22): 2661-2666.
- [5] 杨晓,黎琼炜,殷春,等. 应用于压力容器红外无损检测的 SIFT 图像拼接方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12):31-40.
- [6] 樊彦国,柴江龙,许明明,等. 基于 ORB 与 RANSAC 融合改进的图像配准[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 702-717.
- [7] 孙艳丽,周伟,张亚周,等. 基于 SIFT 的航空侦查图像拼接算法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19):112-116.
- [8] QU Z, WANG T F, AN S Q, et al. Image seamless stitching and straightening based on the image block[J]. Iet Image Processing, 2018, 12(8): 1361-1369.
- [9] 姜骞,刘亚东,方健,等. 基于轮廓特征的电力设备红外和可见光图像配准方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11):252-260.
- [10] 黄远征,尹春丽,刘波,等. 基于改进的快速 Shi-Tomasi 特征点检测算法的图像拼接算法[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(4):70-73.
- [11] 王施意,张丽荷. 基于复合算子异源图像匹配方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(22):98-103.
- [12] 凡宇琼,黄小仙. 基于 SIFT 的超大图像配准[J]. 现代电子技术, 2013, 36(14):82-84,88.
- [13] 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.
- [14] 保文星,桑斯尔,沈象飞. 基于信息熵约束和 KAZE 特征提取的遥感图像配准算法研究[J]. 光学精密工程, 2020, 28(8):1810-1819.
- [15] 刘杰,游品鸿,占建斌,等. 改进 SIFT 快速图像拼接和重影优化[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9):2076-2084.
- [16] 杨帆,金国强,金一,等. 基于 SIFT 特征提取的多重复单元 PCB 板图像拼接[J]. 工业控制计算机, 2018,

31(9):3-4,7.

- [17] 王栋,马纯永,陈戈.一种新型的 PCB 图像快速配准算法[J].计算机科学,2016,43(Z6):152-155.
- [18] LI X Q, HE S Y, GAO X Y, et al. Research on Container Panorama Image Stitching Method [C]. Chinese Automation Congress(CAC), Xian, CHINA, 2018: 661-664.

作者简介

胡涛,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉及数字图像处理。

E-mail:507926646@qq.com

茅健,博士,教授,主要研究方向为精密检测与控制、智能机器人、机器视觉等。

E-mail:jmao@sucs.edu.cn