

一种新型的 PCB 图像快速配准算法

王 栋 马纯永 陈 戈

(中国海洋大学信息科学与工程学院 青岛 266100)

摘 要 PCB 图像配准是进行自动光学检测的关键步骤。PCB 中往往存在许多相似图形和区域,一般特征点提取和匹配方法效率低,且容易产生误匹配。提出一种以 PCB 图像中特定几何图形的中心作为特征点,基于相似三角形约束的快速配准算法。提取实测图和标准图中圆形和方形的中心点集进行 DT 剖分,找出两幅图三角网中的相似三角形集,再对相似三角形的中心点集进行二次剖分和比对,以增强匹配的可靠性。实验证明,该方法计算速度快、匹配正确率高,且能得到均匀分布的正确匹配点。

关键词 图像配准,DT 剖分,相似三角形,PCB

中图分类号 TP391 文献标识码 A

Fast Image Registration Algorithm for PCB Images

WANG Dong MA Chun-yong CHEN Ge

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract PCB(Printed Circuit Board) image registration is a key step in automatic optical inspection. There are many similar graphics and area in PCB. The general method of extracting and matching of feature points is low efficiency and easy to produce false match. A fast registration algorithm based on the similarity triangle constraint was proposed, which takes specific geometric center as the feature points. The sets of centers of round and square were Delaunay triangulated. Similar triangles were found in two triangulation networks and implemented another subdivision and comparison to enhance reliability. Experiments show that the method is rigid and has higher accuracy, which can get the correct matching point of uniform distribution.

Keywords Image registration, Delaunay triangulation, Similar triangle, PCB(printed circuit board)

1 引言

印刷电路板自动光学检测(PCB AOI)逐渐取代人工目检成为 PCB 质量检测的发展方向。PCB 在生产过程中由于工艺和材质原因,往往发生变形,拍摄 PCB 图像时也会产生平移、旋转和缩放等问题。使用参考比较法对 PCB 进行自动缺陷检测时,将待测 PCB 图像与标准 PCB 图像进行精确配准是一个重要的步骤^[1]。通常采取的 PCB 图像配准方式是预先在 PCB 中设计定位标记,通过算法搜索 PCB 图像中的定位标记,提取定位标记的坐标来计算图像配准所需的空变换参数。常用的标记搜索算法有 Hough 变换和模板匹配,如电子科技大学张静等采用随机 Hough 变换方法寻找配准目标,提高了 PCB 图像配准的效率^[2]。

目前很多领域的研究和应用都涉及到图像配准,主要配准方法可以分成两类,基于灰度的配准方法和基于特征的匹配方法。基于灰度的配准方法直接通过搜索图像间的灰度值相似区域,确定待配准图像之间的空间几何变换关系。这类算法计算量一般比较大,而且容易受图像噪声、变形等影响,不适合工业生产环境下的实时在线检测^[3]。基于特征点的配准算法是从图像中提取局部重要特征作为特征点,对特征点处的图像特征进行描述,根据描述内容找出匹配点对。基于

特征点的配准方法简化了图像处理过程,也减少了运算量,并且对灰度变化、图像变形和遮挡都有较好的适应能力。但是图像的质量、各种几何变换、光照等都会影响算法检测出的特征点的准确性(位置偏差)和重复性,使得计算图像空间变换模型参数得出错误结果,从而导致图像配准的失败。

基于尺度不变特征的图像配准技术是近年来受到广泛关注的热点,其中经典方法有 SIFT 和 SURF 算法。此类算法检测出的特征点在图像尺度变化、旋转、视角变化和光照变化的条件下都具有较好的不变性,而且算法将特征点检测、特征点的描述和匹配作为一个统一的过程,自动完成配准并且效果较好。很多研究人员将 SIFT/SURF 应用于 PCB 检测中的图像配准,Charbel 等提出一种基于 SIFT 算法的小批量生产的 PCB 的检测方法^[4]。张永宏等基于 SIFT 匹配算法研究了 PCB 的缺陷检测方法^[5]。

现有的基于特征点的图像匹配方法都需要对特征点处的局部特征进行描述,根据描述内容找出匹配点对。如果图像中有重复出现的局部特征,容易产生错误的匹配特征点对^[6]。针对此问题,研究者提出了很多利用图像特征点全局分布信息来增强特征点匹配准确度的方法。陈洁等利用相似三角形性质来提高 Harris 角点的匹配精度,并利用 RANSAC 算法拟合出配准参数^[7]。张东兴等通过相似三角形约束有效抑制

王 栋(1979—),男,博士生,工程师,主要研究方向为机器视觉、图像处理与分析;马纯永(1983—),男,博士,讲师,主要研究方向为虚拟现实;陈 戈(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为海洋遥感、地理信息系统、虚拟现实。

了 SURF 算法的错误匹配^[8]；吴飞等提出一种可用于图像配准的改进 Delaunay 三角网生成方法^[9]；吴田军等提出一种基于加权总最小二乘的遥感图像配准方法，采用 WTLS 作为估测器对不等精度的特征点坐标进行处理^[10]。

PCB 由于线路设计规则要求，往往存在许多相似的图形和区域。PCB 图像的旋转、缩放、亮度和对比度变化以及噪声影响会使特征点重复率降低，特征稳定性变差，影响匹配结果。根据 PCB 图像特点，本文提出一种以 Hough 变换提取 PCB 图像中几何图形的中心作为特征点、基于 DT 剖分的快速配准算法。该算法首先从待检测图像和参考图像中分别通过 Hough 变换提取出两组特定的几何图形，并以这些几何图形的中心点作为配准算法使用的特征点集。对这两组特征点分别进行 Delaunay 三角形剖分得到两幅图像的三角网，在两幅图像的三角网中搜索比对相似三角形作为匹配三角形对。逐个对三角形进行相似性判断，会产生错误匹配对，因此该算法再将匹配三角形的中心作为特征点集，进行二次 DT 剖分后再匹配，增强了匹配的可靠性。

2 PCB 图像特征点提取

从 PCB 图像中提取特征点要能适应 PCB 实测图像包含的噪声、旋转、平移、变形等因素，而且在 AOI 系统中为了保证检测的精度，受摄像机 CCD 分辨率和镜头视野限制，实测图像和参考图像间会存在较大的尺度变化。观察发现 PCB 图像中有很多规则的图形，如定位孔、方形或者圆形的触点和焊盘等。这些特征具有独特和不变性，而且以这些图形中心作为特征点也使算法更加直观、易于理解。

本文采用了 Hough 变换来检测 PCB 图像中的圆形和矩形。Hough 变换是一种采用投票原理的参数估计技术，原理实质是对图像进行坐标变换^[8]，根据图形的几何特征，把图像空间中的图形检测转换到参数空间。通过对参数空间进行累加统计，然后寻找累加投票聚集点的方法来检测直线或者圆形。直线的几何特征是直线到原点的距离和方位角 (ρ, θ) ；圆的几何特征是圆心和直径 (a, b, r) ；而矩形的几何特征是中心、长和宽^[11] (a, b, c, w) 。

2.1 圆提取

经典 Hough 变换检测圆算法采用传统圆参数方程，如式(1)所示。

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (1)$$

其中， (a, b) 为圆心坐标， r 为圆的半径。通过 Hough 变换，经图像空间 (x, y) 对应到参数空间 (a, b, r) 。

$$\begin{cases} a = x - r \cos \theta, & \theta \in [0, \pi] \\ b = y - r \sin \theta, & r \in [r_{\min}, r_{\max}] \end{cases} \quad (2)$$

转换后图像空间中的过任意一点的圆对应到参数空间中的一个三维锥面，同一圆上的点对应于参数空间中的所有三维锥面必交于一点。根据这个原理，逐像素输入式(2)，在检测半径范围内 $r \in [r_{\min}, r_{\max}]$ ，累加得到参数空间值，根据设定阈值，搜索聚集点就可以得到圆。

2.2 矩形提取

通过对组成矩形边的直线段进行检测，可以实现对矩形的检测。直线公式：

$$y = kx + b$$

直线与参数 (ρ, θ) 的函数关系为：

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta, \theta \in [0, \pi]$$

转换为：

$$\begin{cases} k = -\frac{\cos \theta}{\sin \theta} \\ b = \frac{\rho}{\sin \theta} + y_0 - x_0 k \end{cases}$$

其中， (x_0, y_0) 为中心点，转换后图像空间 (x, y) 对应到参数空间 (ρ, θ) ，参数空间每一个局部最大值对应一条直线段。矩形 4 条边通过直线 Hough 变换后会出现 4 个局部最大值，如图 1 所示。

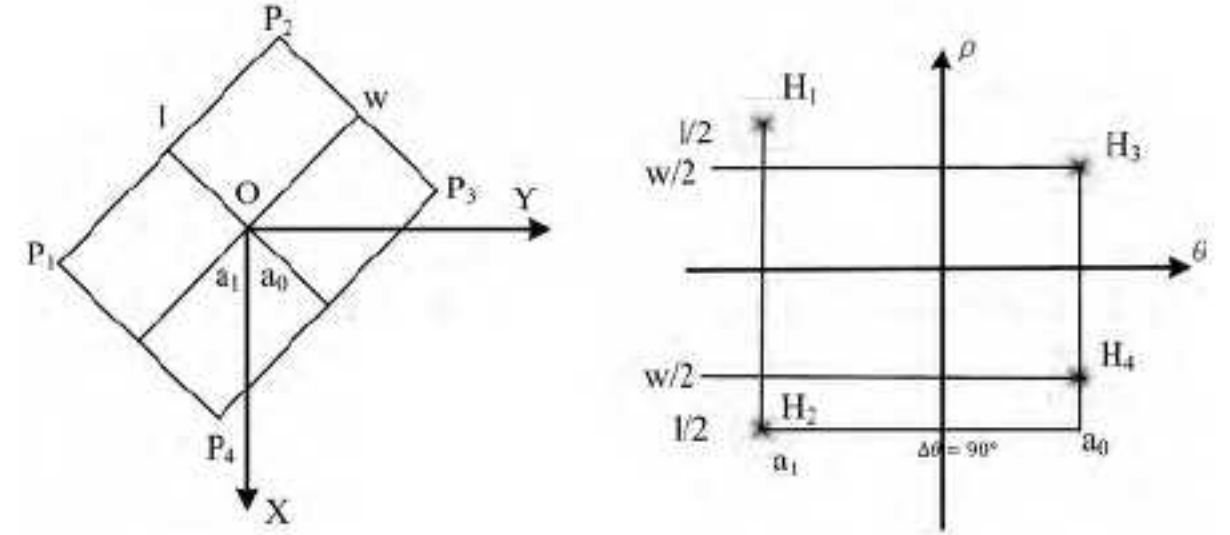


图 1 矩形的 Hough 变换

P_1, P_2, P_3, P_4 为矩形的 4 个顶点， w, l 为矩形的宽和长， α_1, α_0 分别为长宽与坐标系原点的角度。矩形 4 条边 $P_1P_2, P_2P_3, P_3P_4, P_4P_1$ 在参数空间 (ρ, θ) 中，当 $\theta = \alpha_1$ 时形成了 H_1, H_2 ；当 $\theta = \alpha_0$ 时形成了 H_3, H_4 。其中 $H_i = (\rho_i, \theta_i), i \in [1, 2, 3, 4]$ 。

矩形边在参数空间应该沿 θ 轴对称： $\rho_1 + \rho_2 = 0, \rho_3 + \rho_4 = 0$ 。当直线垂直时， $\Delta \theta \approx 90^\circ (|\alpha_0 - \alpha_1| \approx 90^\circ)$ 。

若用 $C(\rho_i, \theta_i)$ 表示累积值数组，则有 $C(\rho_1, \theta_1) = C(\rho_2, \theta_2) = w, C(\rho_3, \theta_3) = C(\rho_4, \theta_4) = l$ 。

根据上述原理，将图像转换成参数空间累计值 $C(\rho, \theta)$ ，得到局部最大值 $H_i = (\rho_i, \theta_i) (i \in [1, m])$ ，限定局部最大值范围，筛选出适合长度的直线段。通过下式判断直线段 i 和 j 之间是否有关联。

$$\begin{cases} \Delta \theta = |\theta_i - \theta_j| < T_\theta \\ \Delta \rho = |\rho_i - \rho_j| < T_\rho \\ |C(\rho_i, \theta_i) - C(\rho_j, \theta_j)| < T_L (C(\rho_i, \theta_i) + C(\rho_j, \theta_j)) / 2 \end{cases}$$

其中， T_θ 为角度 θ 的阈值，用于判断两个极值 H_i, H_j 是否平行，如果 $\theta_i = \theta_j$ 则可以确定为矩形的一对平行边。 T_ρ 为距离 ρ 的阈值，如果 $\rho_i = \rho_j$ 则关于 θ 轴对称。 T_L 为规范阈值，用于判断 H_i, H_j 对应的边是否有近似的长度。如果 $C(\rho_i, \theta_i) \approx C(\rho_j, \theta_j)$ ，则边长相等。

满足上式的关联边，可以表示为

$$E_k = \begin{cases} (\epsilon_k, \alpha_k) \\ (-\epsilon_k, \alpha_k) \end{cases}$$

其中

$$\begin{cases} \alpha_k = (\theta_i + \theta_j) / 2 \\ \epsilon_k = (\rho_i - \rho_j) / 2 \end{cases}$$

最后利用下式比较两组关联边夹角是否为直角来判断是否为矩形。

$$\Delta \alpha = ||\alpha_1 - \alpha_2| - 90^\circ| < T_\alpha (\text{阈值})$$

其中， T_α 为判定阈值，检测到的矩形方向为 α_k ，宽和长为 $2\epsilon_1, 2\epsilon_2$ 。

3 图像特征点的匹配

本文采用分辨率为 1280×960 的 PCB 图像，通过上述方

法,提取出的图像的特征点位置精确,而且分布均匀。为防止特征点数量过少或者过多引起配准精度和效率降低,提取 30 个左右的特征点生成 Delaunay 三角网。

3.1 DT 剖分

Delaunay 三角网具有空外接圆特性和最大最小角特性,即三角网中所有三角形的外接圆内部不包含任何其他三角形的顶点,并且所有三角形的最小内角之和最大,保证了 Delaunay 三角网中不会出现过于狭长的三角形,使得三角网的构建更加合理与准确。DT 剖分还具有唯一性和稳健性,对图像平移、尺度和旋转变换具有不变性,而且构建简单,有多种方法,分治法、逐点插入法、三角网生长法^[12]。

本文采用逐点插入法进行特征点的 DT 剖分,插入法流程如下。

首先遍历特征点集 $P = \{P_0, P_1, \dots, P_{n-1}\}$, 构建初始大三角形,大三角形包含所有的特征点。然后重复下列步骤,依次插入每个点 P_i :

1) 查找内部包含 P_i 的三角形 T , 将三角形各个顶点相连,生成 3 个新三角形。

2) 用 LOP(Local Optimization Procedure) 算法优化三角网。LOP 算法的思想是,新三角形与周围的三角形构成共用同一条对角线的四边形,逐个对四边形中的两个三角形进行空外接圆检测,如果满足空外接圆准则,则略过,如果不满足,则用另一对角线替换现有对角线,在交换对角线后,又会产生相应的新四边形,继续进行空外接圆检测。

最终全部特征点都经过处理,并且网中三角形都满足空外接圆准则。

3.2 相似三角形判别

分别提取待测图与标准图的特征点进行 DT 剖分,在剖分后的三角网中搜索相似三角形。利用相似三角形性质准确匹配特征点。相似三角形的 3 个角对应相等、3 条边对应成比例。首先计算三角形各条边的长度,按边长计算 3 个内角。

$$A = \cos^{-1} \left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \right)$$

为简化运算,先按照边长大小将对角按大小排序。设置角误差阈值 $T_\theta = 0.01$ (经验值),当 3 个角在误差阈值内近似相等时,认为 2 个三角形相似。

$$|\theta_i - \theta'_i| < T_\theta, i=1, 2, 3$$

对三角形逐个进行相似判别时,其与网中其他三角形联系少,相似三角形中会存在误匹配问题。如图 2 所示,误匹配原因是单个三角网中存在数个三角形也是相似三角形的情形。

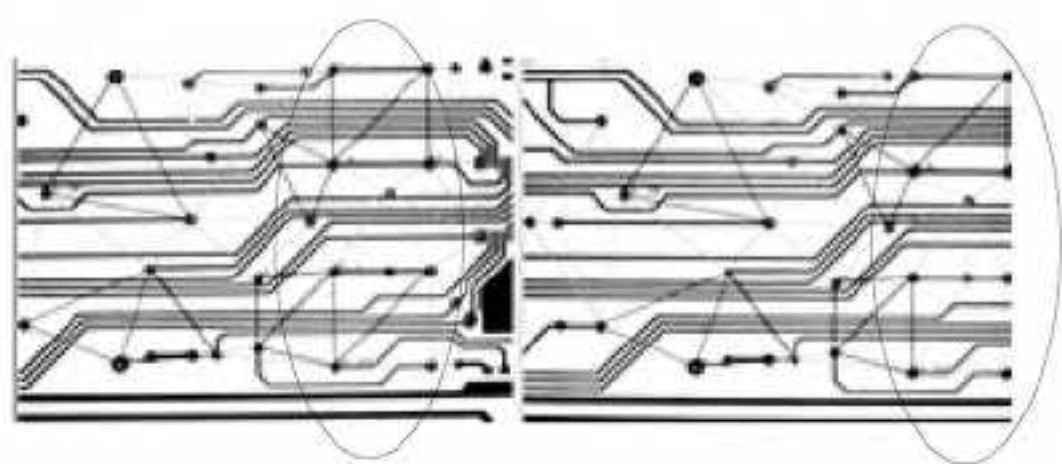


图 2 一次 DT 剖分后查找相似三角形的结果

为解决此问题,将相似三角形的中心作为特征点集,进行二次 DT 剖分后再匹配。

3.3 算法流程

二次 DT 剖分是基于 DT 剖分的唯一性和稳健性。DT

剖分是对图像所有特征点进行处理,除特征点之间具有全局的关联性之外,形成的三角形之间也具有关联性,还可以进行 DT 剖分。

特征点匹配的算法流程分 3 步:1) 特征点集的 DT 剖分; 2) 搜索 Delaunay 三角网中相似三角形; 3) 相似三角形中心点集作为特征点集,重复步骤 1) 和 2) 增加匹配三角形对的准确性。

综上,本文完整的算法流程如图 3 所示。

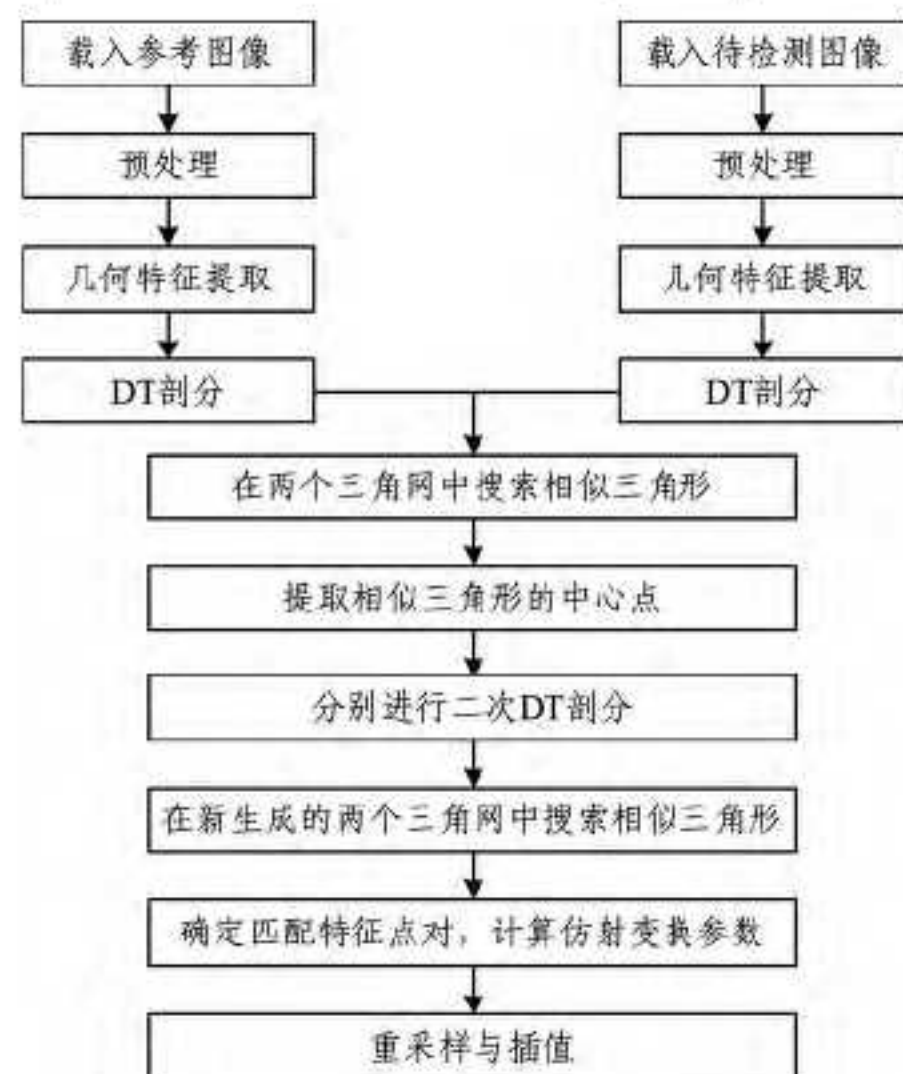


图 3 算法流程

算法输入参考图与待检测图,经过滤波降噪、图像增强等预处理,分别通过 Hough 变换提取圆形和方形的几何特征,定位特征点。特征点经过两次 DT 剖分和相似三角形匹配,得到准确匹配的特征点对。利用特征点对坐标计算仿射变换模型参数,根据模型实现待测图与标准图的配准。

4 实验

为验证本文算法的检测效率,使用工业相机实拍的 PCB 图像与标准图进行配准实验。相机型号为映美精 DMK41 BF02,实拍图像分辨率为 1280×960 的灰度图像。实验程序采用 VC++ 9.0 实现算法,测试环境为 Intel I5-4690 3.5GHz、8GB RAM、Windows7 64 位操作系统的普通电脑。

Hough 变换与 Shi-Tomasi 算法的对比实验结果如图 4 所示。

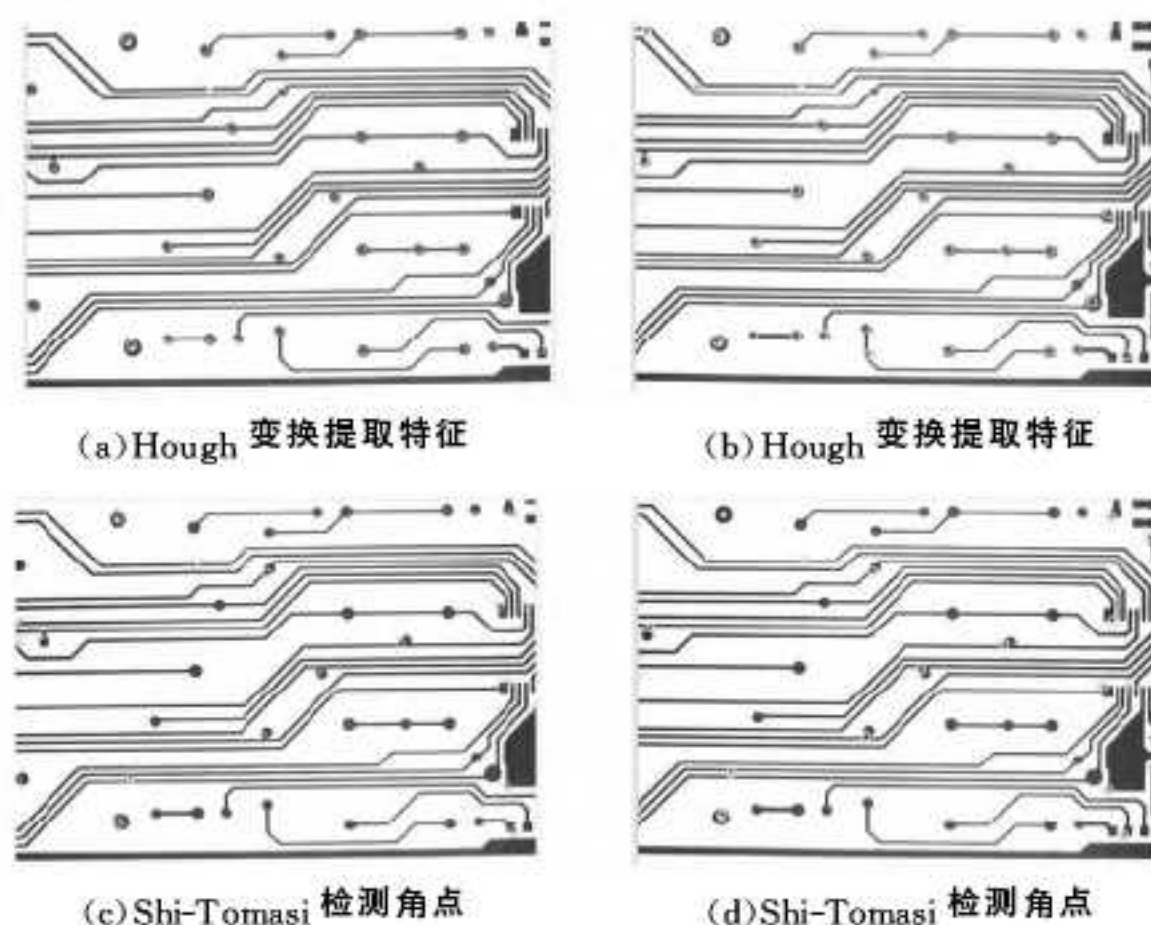


图 4 特征点提取效果

当两幅图像旋转角度很小或者轻微移动时,分别使用 Hough 变换提取特定几何特征和 Shi-Tomasi 算法检测角点,

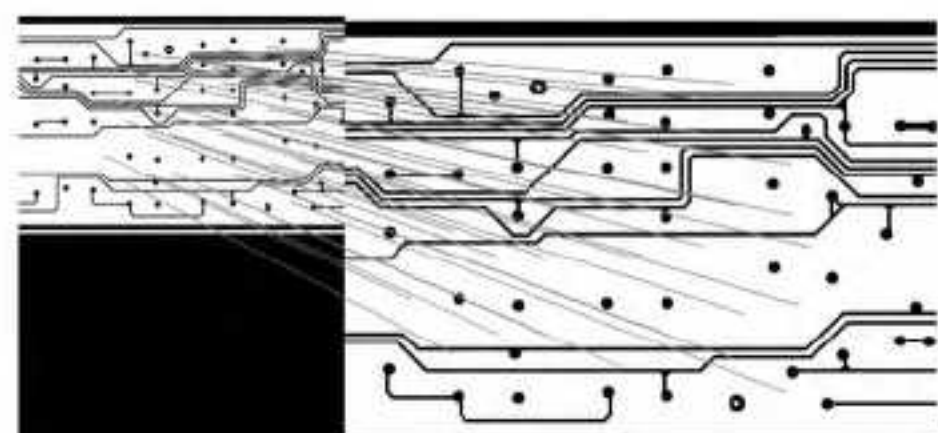
所得实验数据如表 1 所列。

表 1 特征提取算法结果

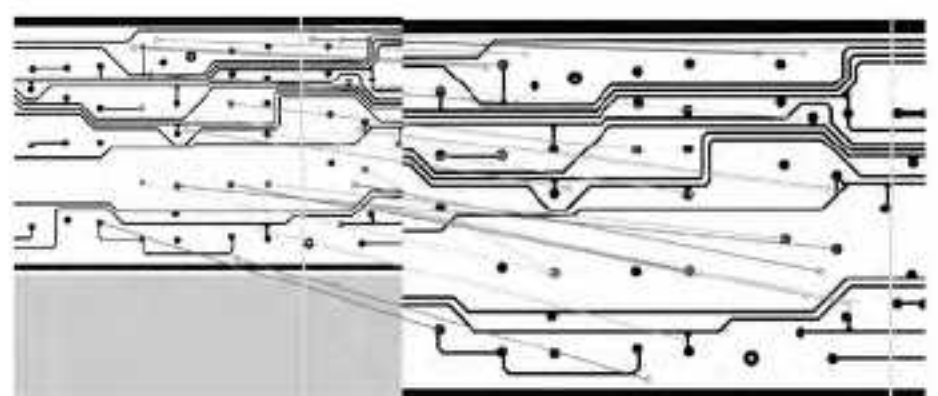
算法	图片	特征点数	重复点	耗时(ms)
Hough	1	29	29	307
	2	32		327
Shi-Tomasi	1	19	11	135
	2	21		140

从表 1 和图 4 看, Shi-Tomasi 算法提取角点速度较快,但在平滑边缘处容易受图像光照、边缘模糊和噪声的影响发生位置偏离,检测点稳定性差。Hough 变换耗时较多,但检测点的重复率高。更换实验样本,重复实验也得出相同结果。

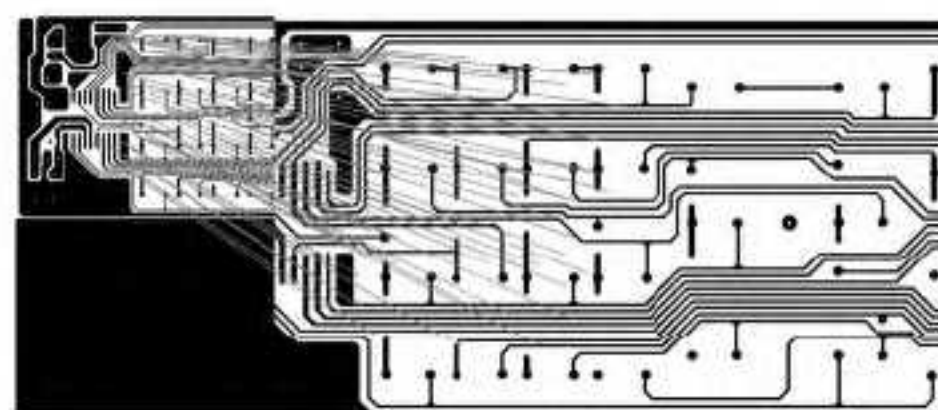
为了实验不同尺度下的特征点匹配效果,本文选取高分辨率的参考图像,其与待配准图像有较大的尺度变化。在相同的运行环境下,将本文特征点匹配算法与 FLANN 结合 SURF 的特征点描述和匹配算法进行对比实验。



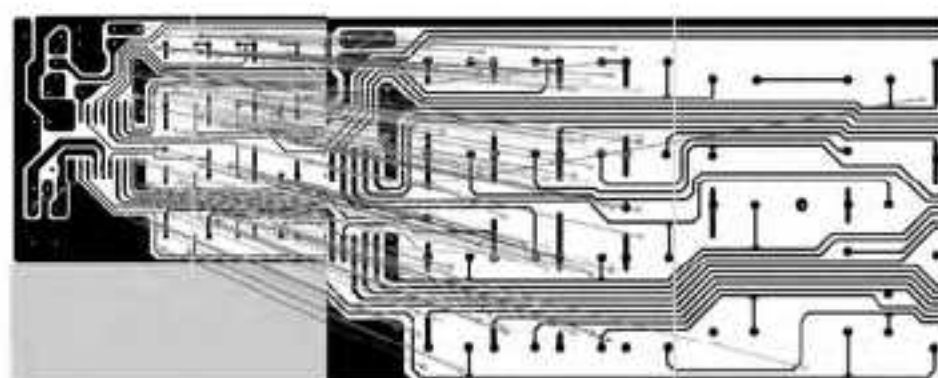
(a) 采用本文算法



(b) 采用 SURF 算法



(c) 采用本文算法



(d) 采用 SURF 算法

图 5 特征点匹配效果

两组实验的特征点匹配效果如图 5 所示,匹配特征点对通过直线标出。可以看出,相比 SURF 算法,本文方法进行

特征点匹配准确率较高,基本没有误匹配。实验结果如表 2 所列。

表 2 算法实验结果

组	算法	正确匹配数	错误匹配数	耗时(ms)
1	本文	80	0	473
	SURF	26	1	780
2	本文	84	0	678
	SURF	130	12	1311

结束语 本文根据 PCB 图像的特点,提出一种基于 PCB 图形几何特征和 DT 剖分的图像配准方法。该方法首先利用一种快速的 Hough 变换方法,从 PCB 图像中提取出特定几何图形,并以图形的中心作为特征点,基于 DT 剖分对特征点空间分布特征进行描述。通过搜索两幅图像三角网中的一致结构,实现了特征点的匹配。实验证明,该算法应用于 PCB 自动光学检测时,配准速度快,准确率高,鲁棒性强,满足在线实时检测的要求。

参 考 文 献

- [1] 胡涛. 基于轮廓对比的 PCB 裸板缺陷检测算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009
- [2] 张静. PCB 表面缺陷的自动光学检测理论与技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2013
- [3] 丁南南. 基于特征点的图像配准技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012
- [4] Szymanski C, Stemmer M R. Automated PCB inspection in small series production based on SIFT algorithm[C] // 2015 IEEE 24th International Symposium on IEEE in Industrial Electronics (ISIE). Buzios, 2015: 594-599
- [5] 张永宏, 黄晓华. 基于 SIFT 匹配算法的 PCB 板缺陷检测[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(9): 2328-2330
- [6] Wu Li-zhen, Niu Yi-feng, Zhang Hui-xia, et al. Robust Feature Point Matching Based on Local Feature Groups (LFGs) and Relative Spatial Configuration[J]. Journal of Computational Information Systems, 2011, 9(7): 3235-3244
- [7] 陈洁, 付冬梅, 刘燕. 基于相似三角形匹配的红外与可见光图像配准方法[J]. 激光与红外, 2010, 40(2): 215-218
- [8] 张东兴, 祝明波, 李相平, 等. Delaunay 三角形剖分约束下的图像配准算法[J]. 信号处理, 2013, 29(12): 1644-1649
- [9] 吴飞, 蔡胜渊, 郭同强, 等. 三角形约束下的图像特征点配准方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(3): 1-8
- [10] Wu T, et al. A WTLS-Based Method for Remote Sensing Imagery Registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(1): 102-116
- [11] 秦开怀, 王海颖, 郑辑涛. 一种基于 Hough 变换的圆和矩形的快速检测方法[J]. 中国图象图形学学报, 2010, 15(1): 109-115
- [12] 武晓波, 王世新, 肖春生. Delaunay 三角网的生成算法研究[J]. 测绘学报, 1999, 28(1): 28-35
- [13] 祝恩. 低质量指纹图像的特征提取与识别技术的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005
- [14] Gottschlich C. Curved-region-based ridge frequency estimation and curved Gabor filters for fingerprint image enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 2220-2227
- [15] Mei Y, Zhao B, Zhou Y, et al. Orthogonal curved-line Gabor filter for fast fingerprint enhancement[J]. Electronics Letters, 2014, 50(3): 175-177
- [16] 唐良瑞, 谢晓辉, 蔡安妮, 等. 基于 D-S 证据理论的指纹图像分割方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(7): 887-892

(上接第 151 页)

- [13] 祝恩. 低质量指纹图像的特征提取与识别技术的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005
- [14] Gottschlich C. Curved-region-based ridge frequency estimation and curved Gabor filters for fingerprint image enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 2220-2227