

基于直线曲线混合 Gabor 滤波器的指纹增强算法

梅 园 赵 波 朱之丹

(南京信息工程大学江苏省网络监控中心 南京 210044)

(江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044)

(南京信息工程大学计算机与软件学院 南京 210044)

摘 要 指纹图像增强对提高自动指纹识别系统的准确性具有重要意义。针对直线 Gabor 滤波器在纹线弯曲程度高的区域增强效果较差和曲线 Gabor 滤波器增强计算复杂度较高的问题,提出了一种基于直线曲线混合 Gabor 滤波器的指纹增强算法。其主要过程为:基于方向场一致性特征将指纹图像划分为弯曲区域和平缓区域,对弯曲区域和平缓区域,分别采用曲线 Gabor 滤波器和直线 Gabor 滤波器进行增强。在 FVC2002 上的实验结果表明,该方法在取得与曲线 Gabor 滤波器近似增强效果的同时,增强速度提高至其 1.404 倍。

关键词 指纹识别,指纹图像增强,Gabor 滤波器,弯曲区域

中图法分类号 TP391 文献标识码 A

Fingerprint Enhancement Based on Straight-curved Line Gabor Filter

MEI Yuan ZHAO Bo ZHU Zhi-dan

(Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

(Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China)

(School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract Fingerprint enhancement has a great significance on improvement of the accuracy of automatic fingerprint identification System (AFIS). To balance the weakness of straight-line Gabor filter in extremely curved region and the high computation complexity of curved line Gabor filter, a novel straight-curved line Gabor filter was proposed in this paper. First, orientation coherence was utilized to divide the fingerprint into curved and smooth regions. Then implemented curved-line filtering and straight-line filtering on curved and smooth regions respectively. Experiments on FVC2002 show that the proposed method achieves comparable enhancement effect and 1.404 times faster calculating speed, compared with curved-line Gabor.

Keywords Fingerprint identification, Fingerprint enhancement, Gabor filter, Curved region

随着信息技术的迅速发展,自动指纹识别技术作为使用最早、最广泛的生物特征识别技术 (Biometric Identification Technology) 之一,已经被广泛运用于日常生活中的各种身份认证场合中。自动指纹识别系统 (Automatic Fingerprint Identification System, AFIS) [1] 的主要步骤包括:指纹采集、指纹图像质量评估、指纹图像分割、方向场计算、频率计算、奇异点检测、指纹图像增强、二值化、细化、细节点提取、指纹分类/检索、指纹匹配 [2]。近年来,通过 GPU 进行大规模指纹库匹配 [3] 的工作也日益增多。

由于指纹自身原因 (表面干、湿、脏、茧、伤痕等) 和采集设备原因 (采集头脏、分辨率、信号传输噪声等),实际指纹识别中存在大量低质量指纹图像,严重影响了 AFIS 的识别准确率。因此,指纹图像增强步骤对提高 AFIS 识别率具有重要意义。

理想的指纹图像是脊谷线交替的纹理图像。指纹增强旨在去除指纹图像中的噪声点,连接断裂脊线,分离粘合脊线,提高脊谷线对比度。指纹图像增强按作用域可分为空域增强和频域增强。空域增强方法主要有:方向滤波 [4]、Gabor 滤波 [5]、偏微分方程滤波 [6] 等。频域增强的主要方法有傅里叶域的增强 [7]、短时傅里叶变换 (STFT) 增强 [8]、小波变换增强 [9]、离散余弦变换 (DCT) 增强 [10] 等。其中基于 Gabor 滤波器的增强方法由于增强效果好,在指纹图像增强中使用最为普遍。

Hong 等 [11] 最早将 Gabor 滤波器运用于指纹图像增强,该算法需要计算 8 张卷积图像,算法计算量大。为了克服这一缺点, Hong 等 [5] 又提出了一种快速的 Gabor 滤波算法,根据局部频率和方向重新调整 Gabor 滤波器的参数,用调整后的 Gabor 滤波器对每个像素点进行增强。Areekul 等 [12] 提出

本文受国家自然科学基金 (61206138), 中国博士后基金 (20110491413), 南京信息工程大学“优秀本科毕业论文 (设计) 支持计划”重点项目资助。梅园 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为图像处理机器学习、自动指纹识别, E-mail: chinameiyuan@126.com; 赵波 (1992—), 男, 硕士生, 主要研究方向为计算机视觉、机器学习, E-mail: zhaobo@pku.edu.cn; 朱之丹 (1992—), 男, 硕士生, 主要研究方向为图像处理、机器学习、自动指纹识别, E-mail: zdan-zhu@163.com。

可分离的 Gabor 滤波 (Separable Gabor Filter, SGF) 实现方法, 提高了增强速度, 其本质为两个直线 Gabor 滤波器。祝恩^[13] 提出圆形 Gabor 滤波器以克服矩形 Gabor 滤波器产生的块效应。Gottschlich^[14] 认为不管是矩形 Gabor 滤波器还是圆形 Gabor 滤波器都属于直 Gabor 滤波器, 并提出曲面 Gabor 滤波器 (Curved Gabor Filters, CGF) 以提高在弯曲程度高的指纹区域的增强效果。Mei 等^[15] 针对 CGF 计算量大的问题提出了正交双曲线 Gabor 滤波器 (Orthogonal Curved-line Gabor Filter, OCL-GF), 对图像每个点只需动态计算两条正交曲线模板。

然而本文认为在脊线弯曲程度不大的区域采用直线 Gabor 滤波器可以获得与曲线 Gabor 滤波器同样的增强效果, 并能够提高计算速度; 对脊线弯曲程度大的区域采用曲线 Gabor 滤波器能够提高增强效果。因此, 本文提出一种基于直线曲线混合 Gabor 滤波器的指纹增强算法, 在保证近似增强效果的同时降低增强所需时间。

1 相关工作

1.1 可分离 Gabor 滤波器

对指纹图像 Gabor 滤波的通常计算方法是将指纹图像小块与旋转后的 2-D Gabor 滤波器进行卷积。针对 2-D Gabor 滤波器卷积耗时问题, Areekul 等^[12] 提出可分离的 Gabor 滤波实现方法。其主要思想是将 2-D Gabor 滤波器分解为 1-D 低通滤波器和 1-D 带通滤波器分别实施 (如式 (1) 和式 (2) 所示)。其本质是将指纹图像根据局部方向场抽取两条相互垂直的直线滤波区域, 用直线上对应的指纹图像像素点与滤波器进行 1-D 卷积, 因此可以认为是一种直线 Gabor 滤波器。文中给出了直线模板的一种快速定位方法, 图 1 为 45° 时 1-D 分离滤波的实现。

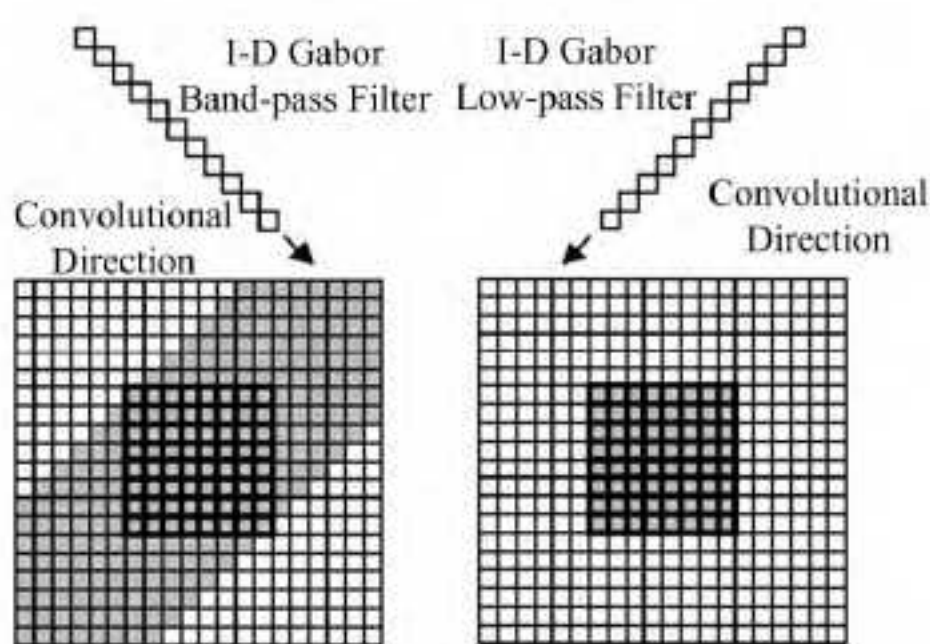


图 1 45° 的 1-D 分离滤波实现

与传统 Gabor 滤波方法一样, SGF 基于假设——指纹图像在一个小块内近似于交替的平行直线。这个假设本身存在一定的不合理性, 尤其在脊线弯曲程度较高的区域 (如奇异点附近), 即使在一个小块内指纹脊线都明显弯曲。因此, SGF 在弯曲程度较高的指纹区域增强效果较差。

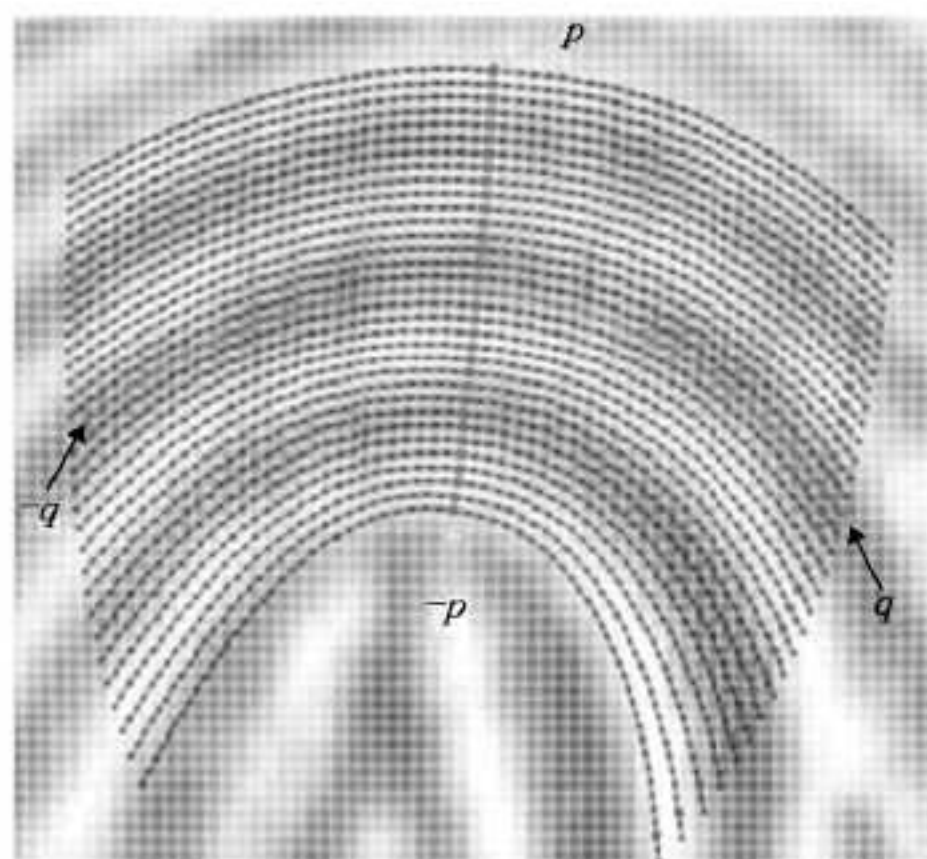
$$\begin{aligned} g(x, y, 0, f, \sigma_x, \sigma_y) &= \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \cos(2\pi fx) \\ &= \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{x^2}{\sigma_x^2}\right\} \cos(2\pi fx) \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right\} \\ &= g_{BP}(x) g_{LP}(y) \end{aligned} \quad (1)$$

其中,

$$g_{BP}(x) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\frac{x^2}{\sigma_x^2}\right\} \cos(2\pi fx) \quad (2)$$

1.2 曲线 Gabor 滤波器

Gottschlich^[14] 提出曲面 Gabor 滤波器, 对图像每个像素点构造曲面模板, 大大提高了在弯曲程度较高的指纹区域的增强效果。2-D 卷积本身十分耗时, 曲面 Gabor 滤波器在卷积之前需要为每个点动态构造曲面模板, 计算量非常大。针对此问题, Mei 等^[15] 提出正交双曲线 Gabor 滤波器, 其主要思想是对每个点采用曲面区域中最关键的两条垂直曲线 (见图 2) 作为 1-D Gabor 滤波器模板, 沿着 $CL_{1,i,j}$ 进行带通滤波, 再对带通滤波结果沿着 $CL_{2,i,j}$ 进行低通滤波。OCL-GF 获得与曲面 Gabor 滤波器近似的增强效果的同时, 大大降低时间复杂度。尽管如此, OCL-GF 相比于 SGF, 需要对每个点动态计算曲线区域, 仍较为耗时。



曲线 $-p$ 到 p 为垂直于脊线的中心线 $CL_{1,i,j}$,
曲线 $-q$ 到 q 为平行于脊线的中心线 $CL_{2,i,j}$

图 2 正交双曲线 Gabor 滤波器

2 直线曲线混合 Gabor 滤波器

尽管 OCL-GF 在弯曲区域能够获得比 SGF 更好的增强效果, 但指纹图像中大部分区域都是弯曲程度不高的, SGF 与 OCL-GF 增强效果几乎一样。方向场一致性 (Coherence) 描述了指纹图像小块内方向场一致性的程度。一些方法^[16] 采用一致性来判断指纹图像前景、背景区域。图 3 中较亮区域展示了一致性小于 0.88 的弯曲指纹区域。本文认为方向场一致性正好可以用来衡量指纹局部区域的弯曲程度, 从而可以将指纹分为弯曲程度高和低的区域, 用不同的增强方法分别增强。



图 3 弯曲指纹区域

因此,本文提出一种基于直线曲线混合 Gabor 滤波器 (Straight-Curved Line Gabor Filter, SCLGF) 的指纹增强算法。首先将指纹图像分块,计算每个小块的方向场一致性,对一致性好的指纹区域采用离散化 SGF 进行增强,即将方向场离散成若干份产生相应的滤波模板,对一致性差的区域采用连续性 OCL-GF 进行增强,即根据当前方向场动态定位滤波模板。算法伪代码如下。

Step 1: 将指纹图像分割成一系列互不重叠的大小为 $w \times w$ 的小块;

Step 2: 对每个小块计算方向场一致性;

Step 3: 设置一致性阈值,将图像分为一致性好的区域和一致性差的区域;

Step 4: 对一致性好的区域采用离散化 SGF 滤波,对一致性差的区域采用连续性 OCL-GF 滤波。

3 实验结果

本实验在 FVC2002 4 个指纹库上进行,库中包含 100 个手指的 8 幅图像,共 800 张指纹图像。实验均在 CPU 为 i5 2450M, 2.58GHz, OS 为 Windows7 的个人计算机中进行,编程语言为 MATLAB。

通过对 FVC2002 4 个库中每个指头的第一张指纹图像 (共 4×100 张) 进行增强,来对比本文提出的 SCLGF 与 OCL-GF、SGF 的增强效果和计算速度。实验中 σ_x 与 σ_y 均取经验值 4, 频率 f 采用指纹图像平均频率,实验中均取 0.12。3 种方法的滤波模板大小均取 33×33 。本实验在离散化 SGF 中,将 $[0^\circ, 180^\circ]$ 每 10° 作为一个方向值,即离散为 18 份。一致性阈值设为 0.95,一致性大于该阈值的块被认为是弯曲程度较低的区域,一致性小于该阈值的块被认为是弯曲程度较高的区域。

在每个指纹库上,增强 1 幅指纹图像的平均所需时间如表 1 所列,增强效果对比如图 4 所示,匹配准确率如表 2 所列。从表 1 中可以看出,本文提出的 SCLGF 计算速度是 OCL-GF 的 1.404 倍。从图 4 中可以看出本文方法的增强效果与 OCL-GF 近似,相比 SGF 在奇异点附近增强效果更好。



图 4 OCL-G、SGF 和 SCLGF 增强效果对比图

表 1 平均增强时间对比

滤波器	DB1	DB2	DB3	DB4
OCL-GF	3.2567	3.8348	1.6883	2.2555
SCLGF	2.5053	2.8095	1.0486	1.4946
SGF	1.8172	2.1177	0.9039	1.2213

表 2 匹配准确率对比

系数	DB1 中正准确率(%)			DB2 中正准确率(%)		
	OCL-GF	SCLGF	SGF	OCL-GF	SCLG	SGF
9	99.56	99.54	99.57	99.62	99.67	99.56
11	99.62	99.63	99.59	99.74	99.75	99.72
13	99.74	99.70	99.69	99.85	99.78	99.87
15	99.65	99.69	99.66	99.88	99.80	99.81
17	99.54	99.46	99.58	99.82	99.78	99.74

结束语 本文针对直线 Gabor 滤波器的在弯曲程度高的区域增强效果差和曲线 Gabor 滤波器增强速度慢的问题,提出基于直线曲线混合 Gabor 滤波器的指纹增强算法。在取得与曲线 Gabor 滤波器近似增强效果以及具有近似匹配率(见表 2)的同时,增强速度提高至其 1.31 倍(见表 1)。相比于直线 Gabor 滤波器,本文算法在奇异点附近增强效果更好。今后我们将研究曲线 Gabor 滤波中曲线模板的离散化,从而可以提前准备滤波模板,以减少计算时间。

参考文献

- [1] Peralta, Daniel, et al. Fast fingerprint identification for large databases[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(2): 588-602
- [2] Chen Fang-lin, Huang Xiao-lin, Zhou Jie. Hierarchical minutiae matching for fingerprint and palmprint identification[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(12): 4964-4971
- [3] Cappelli, Raffaele, Ferrara M, et al. Large-scale fingerprint identification on GPU[J]. Information Sciences, 2015, 306: 1-20
- [4] O'Gorman L, Nickerson J V. An approach to fingerprint filter design[J]. Pattern Recognition, 1989, 22(1): 29-38
- [5] Hong L, Wan Y, Jain AK. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777-789
- [6] 朱立新. 基于偏微分方程的图像去噪和增强研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007
- [7] Sherlock B G, Monro D M, Millard K. Fingerprint enhancement by directional Fourier filtering[J]. Vision, Image and Signal Processing, 1994, 141(2): 87-94
- [8] Chikkerur S, Cartwright A N, Govindaraju V. Fingerprint enhancement using STFT analysis[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(1): 198-211
- [9] Hsieh C T, Lai E, Wang Y C. An effective algorithm for fingerprint image enhancement based on wavelet transform[J]. Pattern Recognition, 2003, 36(2): 303-312
- [10] Jirachaweng S, Areekul V. Fingerprint enhancement based on discrete cosine transform[M]//Advances in Biometrics. Springer Berlin Heidelberg, 2007: 96-105
- [11] Hong L, Jain A K, Pankanti S, et al. Fingerprint enhancement [C]//Proc. 1st IEEE WACV. Sarasota, FL, 1996: 202-207
- [12] Areekul V, Watchareeruetai U, Suppasriwasuseth K, et al. Separable Gabor filter realization for fast fingerprint enhancement [C]//IEEE International Conference on Image Processing, 2005 (ICIP 2005). IEEE, 2005, 3: III-253-6

(下转第 155 页)

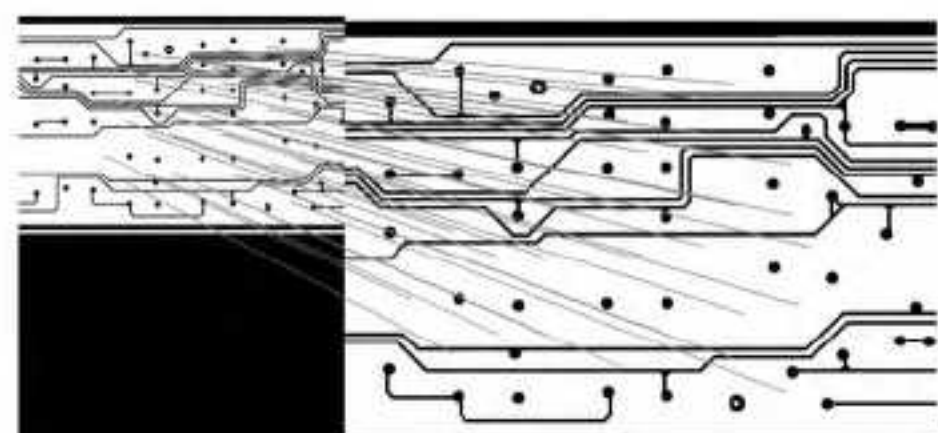
所得实验数据如表 1 所列。

表 1 特征提取算法结果

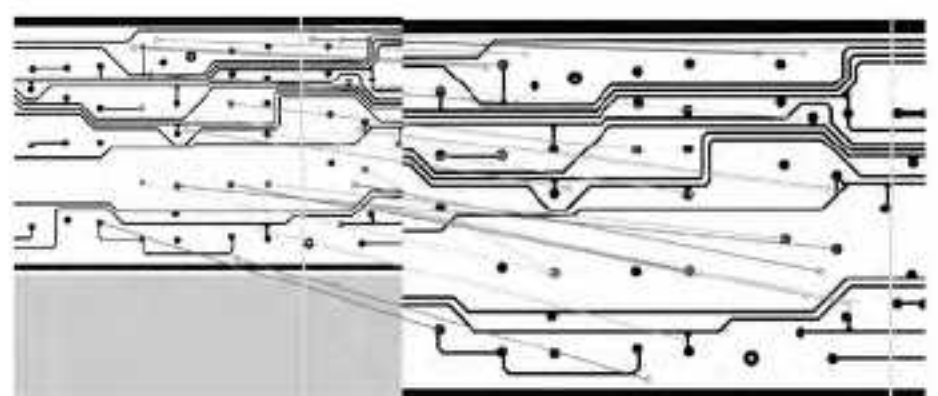
算法	图片	特征点数	重复点	耗时(ms)
Hough	1	29	29	307
	2	32		327
Shi-Tomasi	1	19	11	135
	2	21		140

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。

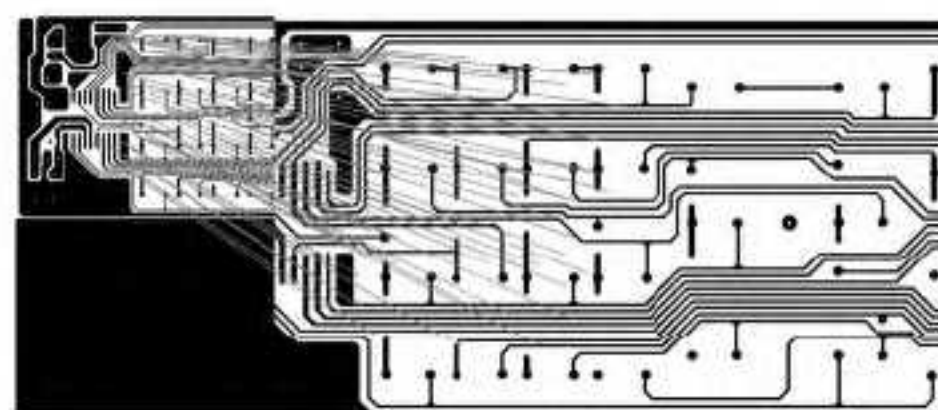
为了实验不同尺度下的特征点匹配效果,本文选取高分辨率的参考图像,其与待配准图像有较大的尺度变化。在相同的运行环境下,将本文特征点匹配算法与 FLANN 结合 SURF 的特征点描述和匹配算法进行对比实验。



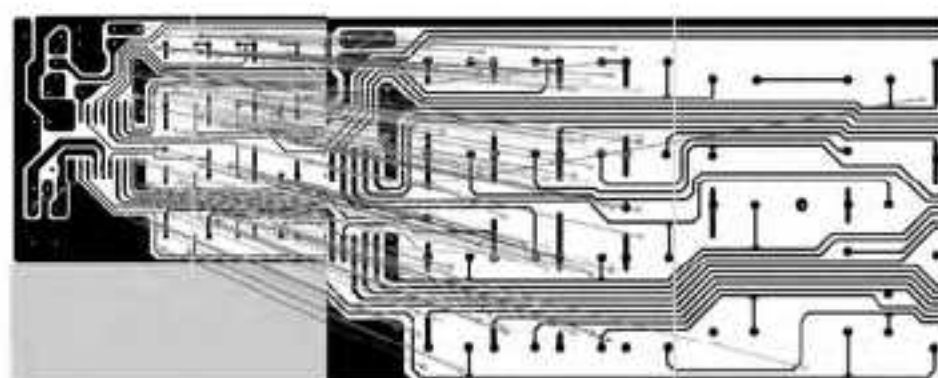
(a) 采用本文算法



(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,匹配特征点通过对直线标出。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