

互信息熵与区域特征结合的图像匹配研究

黄杰贤, 杨冬涛, 龚昌来
(嘉应学院电子信息工程学院, 广东 梅州 514015)

摘要:解决检测目标的定位问题是实施自动光学检测的前期工作。针对挠性印制电路基材制成品与标准设计存在的差异导致的匹配误差,本文提出了基于互信息熵与关键区域特征相结合的匹配误差校正方法。首先采用图像灰度互信息熵作为衡量检测目标与设计标准之间差异的指标,建立以互信息熵值为目标函数的搜索方法;根据关键区域内的互信息熵对匹配误差具有更好的敏感性与准确性的特点,选取含灰度信息丰富的关键区域与互信息熵相结合的方法对检测目标进行匹配以提高匹配效率;然后,在焊盘图像中添加椒盐噪声、缺损、冗余等干扰信息,在存在干扰的环境下实现对目标的准确定位与搜索,验证了算法的抗干扰能力。通过最终的实验表明,采用该方法对于75 μm 制程该方法定位精度可达22.4 μm ,优于霍夫变换法与坐标转换法。对于工艺误差、基材胀缩、外形缺损等因素造成的不良影响具有良好的抗扰性,更适于在实际的工业环境中使用。

关键词:挠性印刷电路板;匹配误差;互信息熵;区域特征

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.01.021

Research on image match based on mutual information entropy and regional feature

HUANG Jie-xian, YANG Dong-tao, GONG Chang-lai
(School of Electronic Information Engineering, Jiaying University, Meizhou 514015, China)

Abstract: The method of correcting position error based on mutual information entropy is proposed in this paper. The realistic product is always different from standard template since the FPC manufacturing material is easily affected by thermal expansion and contraction. Correcting matching error is crucial during manufacturing process. The mutual information entropy (MIE) is applied to evaluating the correlation between the images. The MIE increases and reach maximum when the referent and inspecting FPC solders are aligned with the same place. Moreover, The MIE in some image's region which contains more grey information can react to position error strongly. According to the above principle, the MIE and key regional feature is applied to searching best optimal correction parameters to improve positioning accuracy. The method is verified by a simulation and applied to the inspecting system. It demonstrates that the method can correct the position error more effectively compared with Hough transformation and affine transformation method. The matching accuracy can reach 22.4 micron under the condition that manufacturing error is 75 micron.

Key words: flexible printed circuit; matching error; mutual information entropy

1 引言

挠性印制电路(FPC)是以聚亚胺或聚脂薄膜为基材制成的一种具有高密度、可卷绕的印刷电路^[1-2],广泛应用于电脑、手机、LCD等产品。随着电子产品朝着轻、薄、小、巧方向发展,挠性电路的应

基金项目:广东省自然科学基金(No. S2012010010368)资助;2011年梅州市产业技术与开发资金计划项目。

作者简介:黄杰贤(1982-),男,讲师,博士,主要从事模式识别研究。E-mail:huangjiexian@126.com

收稿日期:2012-05-08;**修订日期:**2012-05-22

用越来越广泛,同时也对其检测提出了严苛的要求。在基于机器视觉 FPC 表面缺陷检测工作中,实现对目标的准确匹配是极为重要的前期工作。由于受装夹误差、制造基材热胀冷缩、机械振动的影响,实际采集的图像很容易发生移位、旋转;噪声与制程误差的干扰也给目标的准确匹配增加了难度。这就对匹配算法的抗干扰能力与适应能力提出了很高的要求。常用的匹配算法主要有:坐标系转换法^[3]、霍夫变换法^[4]、轮廓特征法^[5]、函数修正法^[6]。但以上算法往往存在有匹配精度不高、抗干扰能力差、或者受到检测目标的外形是否规则等问题的制约,使该类算法在许多应用中受到限制。为了有效地提高定位精度,提出基于互信息熵与关键区域特征相结合的图像匹配方法。主要内容包括:①论述互信息熵衡量定位误差的有效性,提出基于互信息熵的匹配方法;②选取含有丰富信息区域作为匹配的区域特征,采用互信息熵与关键区域特征相结合的方法实现对检测目标的高效匹配;③通过添加噪声、冗余信息、制造外形误差等方式验证算法的抗干扰能力;④跟同类算法进行比较,凸显算法的优越性。

2 互信息熵与匹配误差分析

互信息熵源自于信息熵的内容,用于衡量事物与事物之间的相关性。两个离散随机变量假设 X 与 Y 的相关性可以描述为:

$$I(X, Y) = \sum_{y \in Y} \sum_{x \in X} p(x, y) \log \left(\frac{p(x, y)}{p_1(x)p_2(y)} \right) \quad (1)$$

式中, $p_1(x)$ 和 $p_2(y)$ 分别表示 X, Y 变量的概率。因此,互信息熵(简称为 MIE)的表达式可以写为:

$$\begin{aligned} H(X) &= - \sum_{x \in X} p_1(x) \log p_1(x) \\ H(Y) &= - \sum_{y \in Y} p_2(y) \log p_2(y) \\ H(X, Y) &= - \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log p(x, y) \\ I(X, Y) &= H(X) + H(Y) - H(X, Y) \end{aligned} \quad (2)$$

互信息熵、 X 变量、 Y 变量之间的关系如图 1 所示。

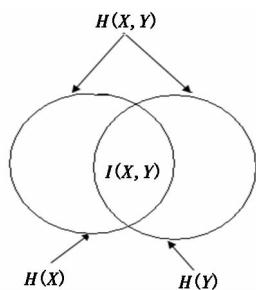


图1 互信息熵

根据互信息熵的性质,以互信息熵作为匹配测度,衡量图像与图像之间的相关性,一幅图像包含的信息量可以用图像的灰度值来表示。因此,图像的信息可以通过图像的灰度直方图来获取。设 I 是图像矩阵;图像的尺寸为 $M \times N$, 图像的最大灰度级为 Level, I_a 是参考图像,另一幅图像检测图像 I_b , 两幅图像的信息熵分别为 H_a 与 H_b , 两幅图像之间的相关性可通过两幅图像之间的联合灰度直方图表示:

$$\begin{aligned} h_{ab}(i, j) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f(n, m) \\ \begin{cases} f(n, m) = 1, & \text{if } I_a(n, m) = i, I_b(n, m) = j \\ f(n, m) = 0, & \text{Others} \end{cases} \quad (4) \\ i, j &= 1, \dots, \text{Level} \end{aligned}$$

联合概率可以计算为:

$$P_{ab}(i, j) = h_{ab}(i, j) / \sum_{i=1}^{\text{Level}} \sum_{j=1}^{\text{Level}} h_{ab}(i, j) \quad (5)$$

图像信息熵可以计算得到:

$$H = - \sum_{i=1}^{\text{Level}} P(i) \log P(i) \quad (6)$$

联合信息熵可以计算得到:

$$H_{ab} = - \sum_{i=1}^{\text{Level}} \sum_{j=1}^{\text{Level}} P_{ab}(i, j) \log P_{ab}(i, j) \quad (7)$$

参考图像与检测图像之间的互信息熵为:

$$I_{ab} = H_a + H_b - H_{ab} \quad (8)$$

当两幅图像之间的相似度最大时,它们之间的互信息熵值越大。以图 2 所示,图 2(a) 是参考图像,图 2(b) 是检测图像。两图作差影操作如图 2(c) 所示,直接显示了图与图之间差异性^[7-8]。

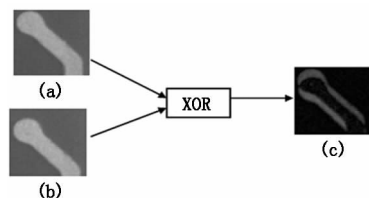


图2 FPC 图像差异

为了评估图像匹配与信息熵测度的关系,本文选取了 4 幅图像(图 3(b) ~ 图 3(e))分别跟参考图像图 3(a) 匹配,匹配的结果分别如图 3(f) ~ 图 3(i) 所示。图 3(b) ~ 图 3(e) 与参考图像图 3(a) 的互信息熵分别为:0.37, 0.62, 0.76, 0.89。如图 3 所示。从图 3 中可得到:当两幅图像的匹配效果最好,之间互信息熵值最大。通过该实验证明:互信息熵有效反映图像的匹配结果。

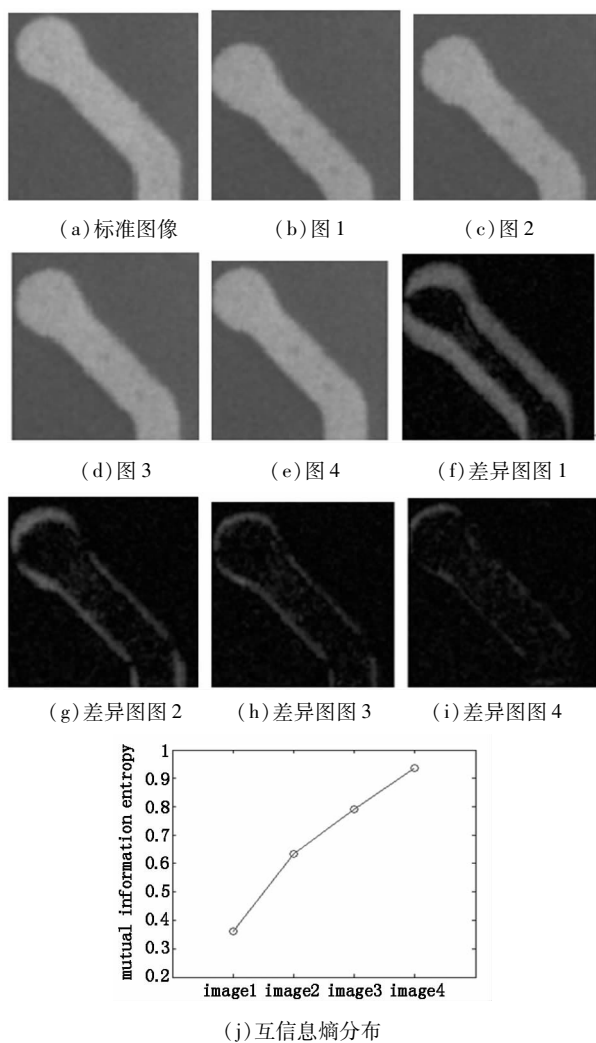


图 3 互信息熵值检测实验

基于互信息熵测度的匹配问题是一个参数优化问题。匹配参数主要有:检测图像沿 x, y 轴平移量 t_x, t_y , 旋转角度量 θ 。互信息熵变量为 MI。具体的匹配工作为:在给定的搜索范围 (T_x, T_y, Angle) 内, 当互信息熵值 MI 最大时, 所得到 (t'_x, t'_y, θ') 数组为最佳的匹配参数。匹配结果分别如图 4(b) ~ 图 4(h) 所示。表 1 对应各匹配参数组及互信息熵值。

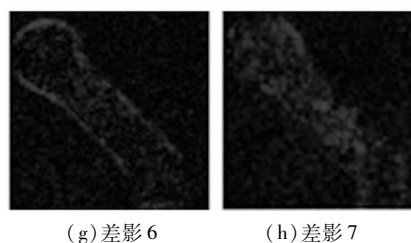
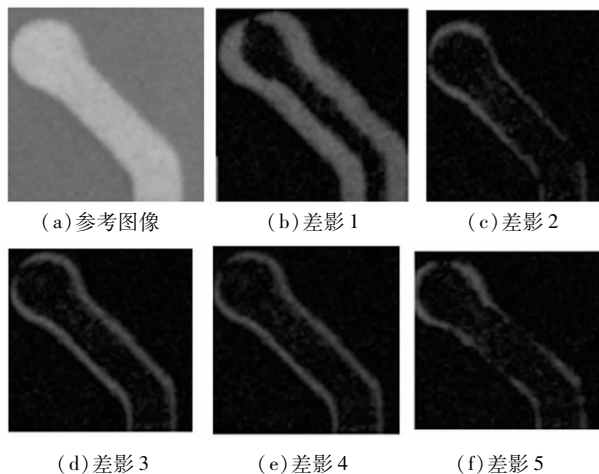


图 4 基于互信息熵的图像匹配

通过对图 4 与表 1 的实验分析得到:以互信息熵作为评估参数,并在一定的参数范围域内搜索出最佳匹配参数值,可有效地提高匹配精度。但是,该方法最大的局限性在于:计算量大,尤其在多个检测目标需同时匹配的情况下。在确立互信息熵的作为匹配测度的基础上,为了提高匹配效率,对基于信息熵的匹配算法做进一步研究与分析。

表 1 检测结果

Fig Num	t_x	t_y	θ	MIE
差影 1	0	0	0°	0.3604
差影 2	1	0	4°	0.6329
差影 3	3	0	1°	0.7371
差影 4	4	1	2°	0.7598
差影 5	2	3	3°	0.7927
差影 6	3	3	2°	0.8730
差影 7	4	3	1°	0.9354

3 基于单元图像互信息熵的匹配方法

为了搜索、提取有利于图像匹配的区域特征,首先将整幅图像划分为若干个单元图像(如图 5 所示)。根据公式(6)分别计算每个单元图像所包含的信息量——信息熵,本文通过对单元图像的灰度级分布情况进行统计以获取灰度信息熵值。

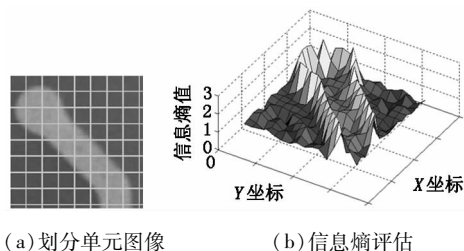


图 5 单元图像所包含信息熵评估

通过对图 5 的观测得到:检测目标在边缘部分的熵值明显高于非边缘区域。在对整幅图像分割成若干单元图像的基础上,基于每个单元图像的互信息熵值对图像图像匹配作进一步分析,以图 6 为例,图 6(a) ~ 图 6(d) 的匹配误差逐渐减小,相对地,基于单元图像的互信息熵值如图 6(e) ~ 图 6(h) 所示,图 6(i) 反映了图 6(a) ~ 图 6(d) 的单元图像互信息熵之和的分布情况。

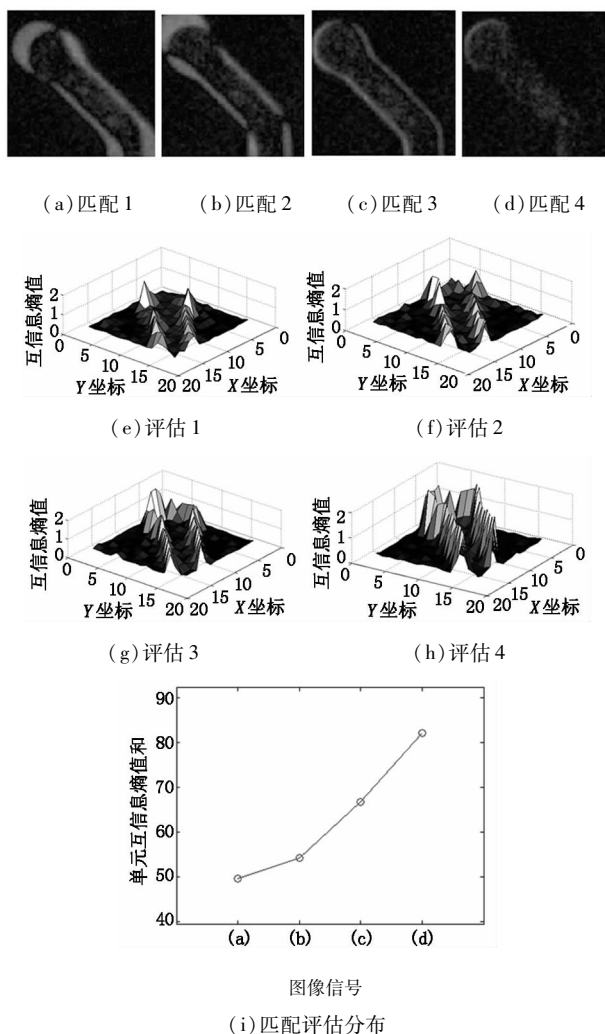


图6 单元图像所包含信息熵评估

图6实验结果表明:当单元图像处于检测目标边缘区域,即处于灰度信息量比较丰富的位置区域时,互信息熵对于图像匹配误差的度量表现出了更好的灵敏度。图7(a)、图7(b)分别选取9个信息熵值较大的单元图像(平均熵值为2.2653)与9个信息熵值较小的单元图像(平均熵值为0.577)作为各自的区域特征,并基于区域内的互信息熵值之和对图像匹配误差进行侦测,图像匹配误差如图7(c)~图7(f)所示趋于减小,侦测结果如图7(g)、图7(h)所示。

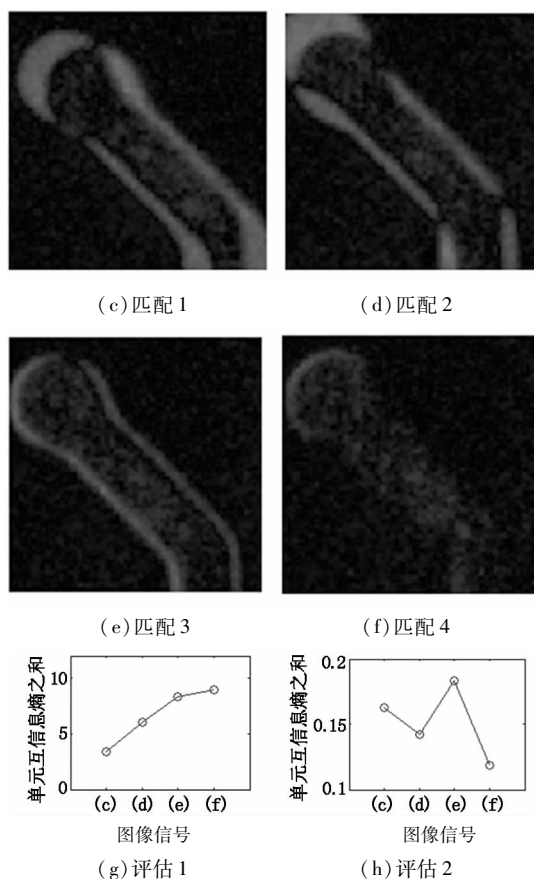
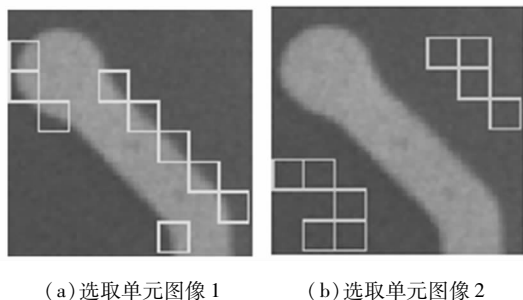


图7 关键区域与互信息熵的图像匹配

从图7的实验结果表明:当在信息熵值较大区域内选取单元图像作为区域特征时,其互信息熵值可正确地反映匹配结果(如图7(g)所示),具有良好的灵敏度;而当选取信息熵较小区域内的单元图像作为区域特征时,其互信息熵并不能正确地反映匹配结果(如图7(h)所示),不利于匹配工作。根据以上实验得到,选取含有丰富灰度信息的单元图像作为图像匹配的区域特征,并基于单元互信息熵的图像匹配方法不仅能够保证匹配精度,而且能够减少图像匹配工作中的冗余运算量,有效地提高了检测效率。

4 基于互信息熵与区域特征相结合的匹配实验

基于单元互信息熵图像匹配的具体工作步骤如下:

Step1. 将整幅图像分为若干个单元图像,分别计算每个单元图像的灰度信息熵;

Step2. 单元图像按信息熵的大小进行排列,选取若干信息熵比较大的单元图像作为区域特征;

Step3. 以单元图像的互信息熵值作为匹配评价参数,在一定的范围内($T_x, T_y, Angle$)搜索最佳的匹配参数,匹配评价参数最大时,匹配参数(t'_x, t'_y, θ')为所求,匹配完成。

以图 8、图 9 为例,基于单元图像的互信息熵对各类型的检测目标作图像匹配。

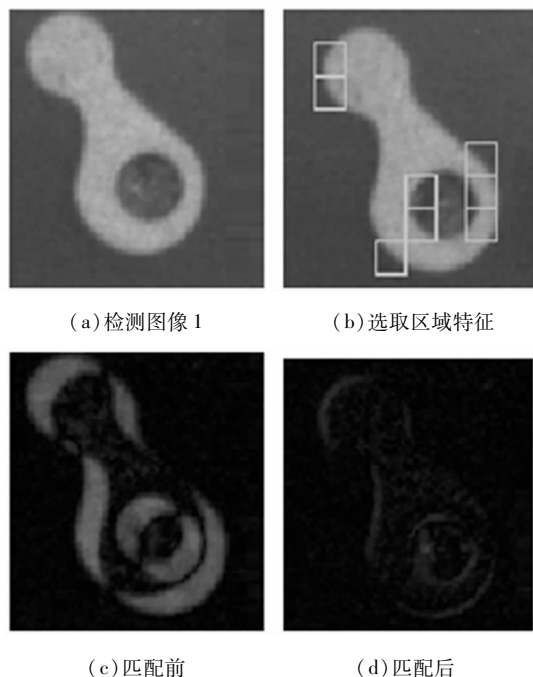


图 8 图像匹配实验 1

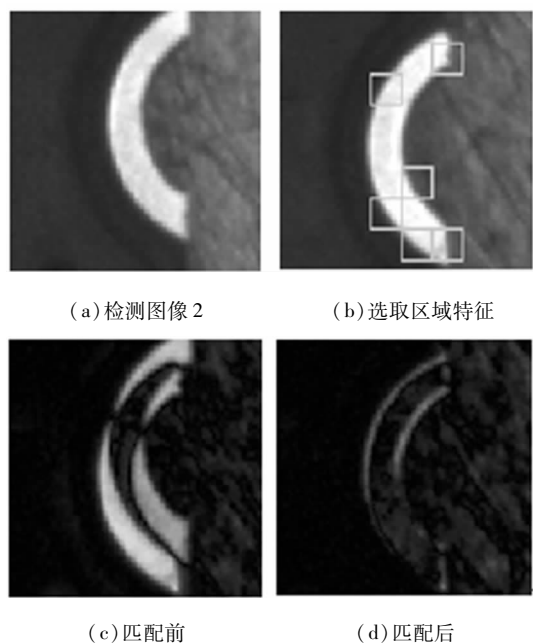


图 9 图像匹配实验 2

图 8、图 9 的实验结果验证了本文提出算法的有效性,不仅能够有效地提高匹配精度,而且不受检测目标的外形制约。下文对抗扰性作分析。

5 抗噪性能分析

为了对算法的抗造性能进行分析,选取带缺陷的检测目标,并在该检测图像上添加椒盐噪声对匹配工作进行干扰^[9],以评估该算法的抗干扰能力与鲁棒性。实验结果如图 10、图 11 所示。

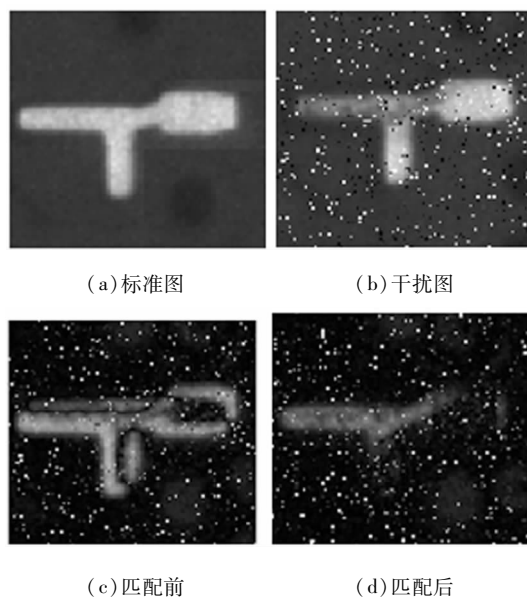


图 10 干扰下的图像匹配实验 1

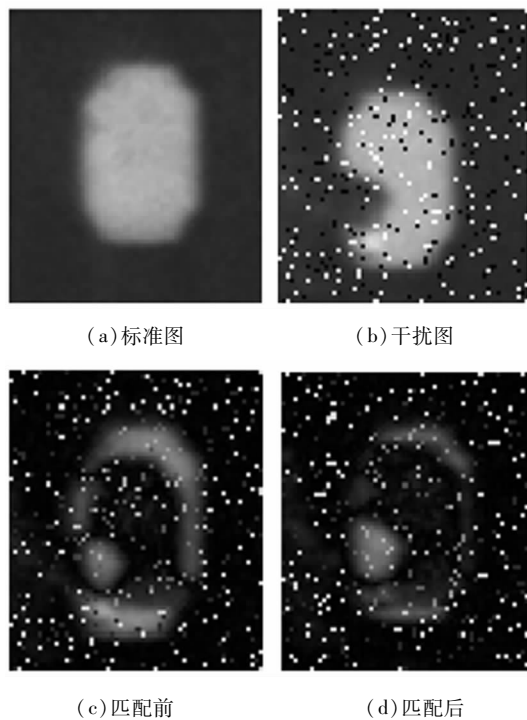


图 11 干扰下的图像匹配实验 2

从实验结果可以得到,采用基于单元互信息熵的匹配方法,在目标物缺陷、噪声的干扰下,仍然能够提高检测目标的匹配精度,验证了该算法的适应能力与抗干扰能力。图 12 是实验中用到的样品图像。

6 算法比较与评估

将本文提出的算法应用于 FPC 检测目标的定位匹配工作。并与文献[3]的坐标变换与文献[4]霍夫变换的匹配算法进行比较,以证明本文提出算法的优越性。误差分析如表 2 所示。

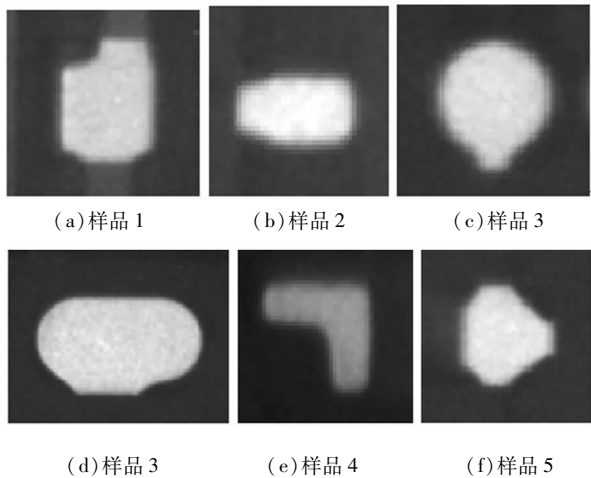


图 12 实验样品

表 2 误差分析

	μm		
	坐标变换法	霍夫变换法	本文提出的方法
最大误差	88.6	37.7	22.4
平均误差	40.61	19.22	16.4
均方误差	20.58	10.05	4.0

从表 2 的实验结果得到:本文提出的单元图像互信息熵匹配算法与同类算法相比较,无论在匹配精度还是稳定度上明显优于其他两种方法。经分析,基于坐标系变换的匹配方法产生的误差主要源自于机械振动、FPC 基材褶皱、热胀冷缩;而霍夫变换法产生的匹配误差主要是由外形误差、光照强弱不均引起的。本文算法可有效克服这两种方法的弱点,具有获取更高匹配精度的能力与更好的实用性。

7 总结与展望

本文针对挠性印制电路(FPC)因制造工艺水平,基材表面不平或者其他外界因素干扰引起图像匹配误差,本文引入互信息熵的概念,提出基于互信息熵的图像匹配误差校正方法。为提高效率,选取灰度信息丰富的单元图像作为关键区域特征,结合局域特征与互信息熵的方法实现图像的高效、高精度匹配。与前人研究的同类型算法相比较,该方法不仅可获取更高的匹配精度,而且具有良好的抗干扰能力,更适用于在实际的生产环境中使用。为了进一步提高算法的健壮性与效率,未来的研究工作将集中在以下两个方面:①压缩灰度级。为提高检测效率,在保证对匹配误差度量有效性的前提下,尽可能地对灰度级进行压缩;②从算法的稳定性、敏感性、效率方面综合考虑,优化单元图像尺寸的选取。

参考文献:

[1] Hyabg Jiexian, Li Di, Ye Feng, et al. Detection of surface defect of solder on flexible printed circuit [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18 (11) : 2443 – 2453. (in Chinese)
黄杰贤,李迪,叶峰,等. 挠性印制电路板焊盘表面缺陷的检测[J]. 光学 精密工程, 2010, 18 (11) : 2443 – 2453.

[2] Liu Wenxia, Zhang Yan, Shen Jingling, et al. Application of infrared thermography in PCB via quality detection [J]. Laser & Infrared, 2010, 40 (3) : 254 – 256. (in Chinese)
刘文霞,张焱,沈京玲,等. 红外热成像技术在 PCB 板过孔质量检测中的应用 [J]. 激光与红外, 2010, 40 (3) : 254 – 256.

[3] Chiu-hui Chen, Chun-chieh Wang, Chun-yu Lin, et al. Realization of defect automatic inspection system for flexible printed circuit (FPC) [C]. Proceedings of the 35th International MATADOR Conference, 2007 : 225 – 228.

[4] Kyungjin Choi, Younghyun Lee, Jongwoo Moon, et al. Development of an automatic stencil inspection system using modified hough transform and fuzzy logic [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2007, 54 (1) : 604 – 611.

[5] Hu Tao. Research of contour comparison-based defect inspection algorithm for bare PCB [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008. (in Chinese)
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, 2008.

[6] Taniguchi Yoji. Digital image processing [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
谷口庆治. 数字图像处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[7] Jiexian Huang, Feng Ye, Zhijie Dong, et al. Correction of FPC solder position error based on mutual information entropy [J]. Circuit World, 2011, 37 (1) : 46 – 51.

[8] Ding Xianyun, Zhu Yu. Segmentation for sem image based on two-dimensional entropy and artificial fish swarm algorithm [J]. Laser & Infrared, 2010, 40 (2) : 210 – 214. (in Chinese)
丁贤云,朱煜. 基于二维熵的人工鱼群材料图像分割方法 [J]. 激光与红外, 2010, 40 (2) : 210 – 214.

[9] Zhao Fucui, Hu Yihua, Tao Xiaohong, et al. Research on the effect evaluation based on information theory in image systems [J]. Laser & Infrared, 2008, 38 (4) : 371 – 374. (in Chinese)
赵福才,胡以华,陶小红,等. 基于信息理论的成像系统干扰效果评估 [J]. 激光与红外, 2008, 38 (4) : 371 – 274.