

# 基于骨架的柔性变形 FPC 断路检测\*

苑玮琦<sup>1,2</sup>, 李德健<sup>1,2</sup>, 李绍丽<sup>1,2</sup>

(1. 沈阳工业大学 视觉检测技术研究所 沈阳 110870; 2. 辽宁省机器视觉重点实验室 沈阳 110870)

**摘要:**为了解决柔性印刷电路(FPC)翘曲变形容易导致图像出现柔性形变现象造成当前的FPC断路检测方法性能降低的问题,在建立柔性形变模型、分析形变机理的基础上,提出了一种基于骨架处理策略的检测方案。首先提取预处理后FPC图像的线路骨架,然后将其输入到建立的动态模板尺度空间(DTSS)模型中,以去除骨架的分支噪声、得到‘纯净’骨架;接着,提取上一步骤处理所得骨架的全部端点,并通过形态学操作和局部模板匹配定位线路异形结构区域,剔除该端点集合中处于异形结构区域内的噪声端点,从而得到断路端点集合,再根据集合中成员与图像位置的对应关系识别断路缺陷。在基于实际环境建立的SUT-F1图库上进行了算法效果验证,并与其他经典方法进行了对比分析。结果表明,本文方法具备良好的抗形变性能,检测正确率(CDR)高达99.30%,误检率(FDR)低至2.25%,表明了方法的有效性;相比于其他方法,CDR至少提高了5.03%,FDR最少降低了8.22%,显示了方法的优势,且具有一定的实际应用价值。

**关键词:**骨架;柔性形变;柔性印刷电路;断路;动态模板尺度空间

中图分类号: TP391.41 TH165 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

## The circuit break detection of flexible deformation FPC based on skeleton

Yuan Weiqi<sup>1,2</sup>, Li Dejian<sup>1,2</sup>, Li Shaoli<sup>1,2</sup>

(1. Computer Vision Group, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. key Laboratory of machine vision, Liaoning Province, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** The warping deformation of flexible printed circuit (FPC) would result in flexible deformation of the image acquired, which reduces the detection performance of the system. To solve this problem, this paper propose a solution based on establishing an image flexible deformation model and analyzing deformation mechanism. Firstly, the circuit skeleton is extracted after image pre-processing and is delivered to dynamic template scale space (DTSS) model for acquiring clean skeleton image without branches noise. Then, whole endpoints of previous skeleton are extracted and abnormal structure regions are located by morphological operation and local template matching. Endpoints within abnormal structure regions are removed. . Thus, the endpoints of circuit break are acquired, and circuit break defects are detected through the congruent relationship between circuit break endpoints and locations. Experimental results show that the approach proposed in this paper is robust to flexible deformation. The CDR reaches to 99.30% and FDR reaches to 2.25%, which shows the validity of this method. Compared with other methods, CDR increases 5.03% at least, and FDR decreases 8.22%, which shows the advantages of this method in practical application.

**Keywords:** skeleton; flexible deformation; flexible printed circuit (FPC); circuit break; dynamic template scale space (DTSS)

## 1 引言

柔性印刷电路(flexible printed circuit, FPC)板是一种特殊的印制电路板(printed circuit board, PCB),以聚

酰亚胺或聚酯薄膜为基材使其具有轻薄且可自由弯曲的优点,从而被广泛应用于手机、笔记本电脑等电子产品中<sup>[1-2]</sup>。但其生产环节失误或受到硬件划伤等会导致电路出现缺陷,其中的断路缺陷会直接损坏电路,严重影响产品质量,而造成经济损失,而一种有效的解决办法为

检测出断路缺陷,然后对缺陷处进行补充印刷或直接剔除缺陷板材。传统的断路检测方法为人工目测,其检测效率低、精度差,无法满足现代自动化生产线的要求,因此,很多学者对 FPC 断路缺陷的自动化检测方法展开了研究,主要包括电气检测法、自动光学检测法(automatic optic inspection, AOI)以及自动 X 射线检测法(automatic X-ray inspection, AXI)<sup>[3-4]</sup>,其中 AOI 方法因其非接触、结构简单、可重复性高和成像方便等优点被广泛应用。

目前基于 AOI 的 FPC 断路检测方法主要是延续和借鉴传统 PCB 的检测思路<sup>[5-7]</sup>,可分为参考对比法<sup>[8-11]</sup>,非参考法<sup>[12-13]</sup>和混合法<sup>[14]</sup>。其中大部分文献的检测方法均为针对理想的无形变 FPC 图像,但由于 FPC 可自由弯曲的特点,在实际图像采集过程中往往存在不同程度的翘曲变形,导致图像出现柔性形变现象,表现为线路的弯曲和移位,这会严重影响各个方法的检测性能。具体为:1)参考对比方法的核心为图像的匹配和对比,而柔性形变会降低匹配精度,从而影响检测效果;2)非参考法通过制定规则判断线路有无缺陷,但目前基于该方法的断路检测研究并不多,主要包括文献[13]的线路边缘直线拟合法,该方法通过线路实际边缘与拟合直线的差异识别断路,但柔性形变会使得直线弯曲,从而影响拟合效果,降低检测性能,同时,该方法仅对直线线路有效,而无法实现波浪线、圆弧线及迂回线的检测;3)混合法是上述两种方法的综合,在一定程度上结合了两者的优点,但目前仍无法克服柔性形变的问题。经文献检索,目前关于柔性形变 FPC 图像及其断路检测这一实际问题的研究并不多,文献[15]对 FPC 图像柔性形变问题进行了初步研究,提出形变导致表面曲向的消除方法,但并没有对形变现象及其机理进行深入分析,也没有给出断路检测的具体方案;文献[16]针对柔性形变图像的断路检测问题,提出了基于边缘密度分布图匹配的方法,具有一定的容形变能力,但并没有对其能力的大小进行量化说明,也没有给出图像形变或算法抗形变能力的衡量机制。

综上所述,目前还没有方法能够有效解决柔性形变 FPC 各种线路情况下断路缺陷检测的问题,因此,本文提出使用不受柔性形变影响的稳定特征进行检测的思想,将表征线路区域拓扑性质的骨架作为稳定因子,进而利用断路处骨架形成端点这一特点进行断路识别。

## 2 FPC 图像形变和线路断路形态分析

### 2.1 FPC 图像形变分析及其度量方法的确定

进行柔性形变 FPC 断路检测的关键是,分析并充分利用形变由弱到强的变化过程中依然保持相对稳定的特征。通过观察统计,FPC 图像柔性形变过程可理解为无形变的 FPC 图像在空间域上进行局部或全局的旋转、平

移以及缩放,如图 1 所示,同时其数学模型可用式(1)描述。

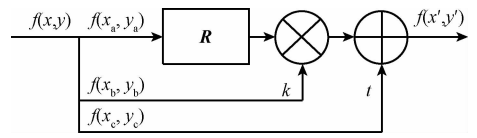


图 1 图像柔性形变数学模型

Fig. 1 Dynamic model of image flexible deformation

$$f(x',y') = \mathbf{R}f(x_a,y_a) + kf(x_b,y_b) + f(x_c,y_c) + t \quad (1)$$

式中: $\mathbf{R}$ 是旋转矩阵, $k$ 是比例缩放因子, $t$ 是平移矢量; $(x,y) \in \Omega_{all}, (x_a,y_a) \in \Omega_a, (x_b,y_b) \in \Omega_b, (x_c,y_c) \in \Omega_c; \Omega_a, \Omega_b, \Omega_c$ 为 $\Omega_{all}$ 的子集,且互相交集可以为空。根据其数学模型,点 $(x,y)$ 经过一系列几何变换转化为 $(x',y')$ ,即像素位置发生了改变,那么可据此改变量对图像的形变程度 $s$ 进行衡量。具体方式如式(2)所示。

$$s = \min_{\substack{\delta=0,1,2,\dots,360 \\ i=0,1,\dots,W-1 \\ j=0,1,\dots,H-1}} h(\delta,t(i,j)) \quad (2)$$

式(2)为采用模板图像与待测图像进行可旋转、移位的刚性匹配过程, $s$ 表示图像形变程度, $\delta$ 为匹配角度, $t(i,j)$ 为模板中心位置坐标, $h(\cdot)$ 表示当前角度和位置下匹配的相异值,具体计算方式如式(3)所示。

$$h(\cdot) = \frac{\sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} abs(f(x,y) - p(x,y))}{2 \times \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} p(x,y)} \quad (3)$$

式中: $f(x,y)$ 表示二值待测图像, $p(x,y)$ 表示二值模板图像, $W,H$ 分别表示图像宽、高。

为了对形变图像进一步观察和分析从而获取其不变性特征,对一 FPC 人为逐渐增加施力使其产生对应程度形变,得到其二值图像序列如图 2 所示。



图 2 形变 FPC 二值图像序列

Fig. 2 Binary image sequence of deformation FPC

图 3 描述了图 2 序列图像拓扑性质变化情况,具体由归一化的欧拉数 $\beta$ 表示,以及根据式(2)获得的图像形变程度 $s$ 的变化曲线。其中 $\beta = \alpha/\alpha_{max}$ , $\alpha$ 表示图像的欧拉数, $\alpha_{max}$ 表示图像序列中其欧拉数 $\alpha$ 的最大值。

由图 3 可见,图 2 中图像序列从左到右其形变度不断增加,但前 4 幅图像的 $\beta$ 值保持不变,这说明,在一定形变范围内线路区域的拓扑结构不变。因此,可根据拓扑状态将 FPC 图像形变程度划分为合理和过度两级,本文算法的检测对象为合理形变图像。

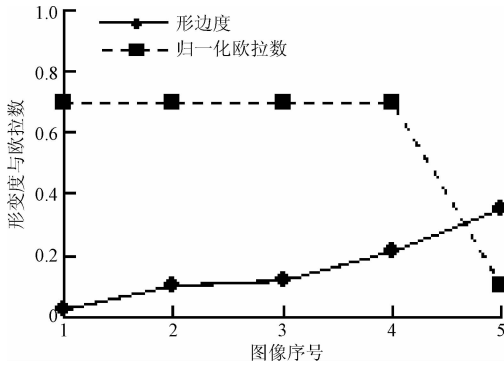


图3 FPC序列图像形变度和欧拉数变化曲线

Fig.3 Deformability and euler number changing curve of FPC image sequence

## 2.2 FPC 断路缺陷特征分析

根据2.1节分析,合理形变FPC图像其拓扑结构保持不变,因此可将其作为稳定性特征加以利用,而同伦骨架作为区域拓扑结构的简单表示,可考虑用于线路断路检测。

FPC电路组成可归结为线路和异形结构两类,线路包括直线、折线、弧线和迂回线,如图4(a)~(d)所示;异形结构包括接线端、焊盘、LED灯座和跳线4种,如图4(e)~(h)所示。

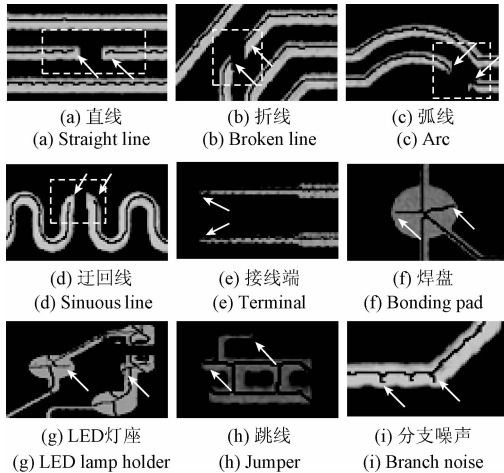


图4 FPC组成结构骨架及断路

Fig.4 Composition of FPC skeleton and short circuit

图4中,黑色实线为通过Golay字符集结构元素L对线路区域迭代细化<sup>[17]</sup>所得骨架(见式(21)),白色虚线矩形框标记了断路区域。由图4(a)~(d)可见,4种线路状态的断路处骨架均生成端点,如白色箭头所标注,因此考虑可通过检测骨架端点识别断路。

但是,由于阈值分割后的线路并非绝对平滑,且受骨架提取算法影响,所得骨架会存在分支噪声,亦形成

端点,如图4(i)白色箭头标注;同时,由图4(e)~(h)可见,异形结构的独特几何形态使其同样存在骨架端点,亦如白色箭头标注。

综上观察和分析,通过首先提取线路骨架端点,然后去除骨架分支和异形结构带来的噪声端点从而识别断路是一种可行的手段。

## 3 模型与理论

### 3.1 尺度空间理论

尺度空间(scale space,SS)理论是通过将原始图像进行尺度变换获得图像多尺度下的空间表示序列。它引入一个被视为尺度的参数,通过连续变化该参数获得不同的视觉处理信息,可综合这些信息深入挖掘图像本质特征<sup>[18]</sup>。

图像的多尺度表示如图5所示,将原始图像作为基层图像源,按设定规则从源图像中推导出一系列含有自由参数的子图像,即将一个二维 $(x,y)$ 平面图像在三维 $(x,y,z)$ 空间上表示出来,以便于获取图像在 $z$ 坐标下的性质,其具体生成规则如式(4)所示。

$$\begin{cases} L(:,0) = f \\ L(:,\sigma) = g(:,\sigma) * f \end{cases} \quad (4)$$

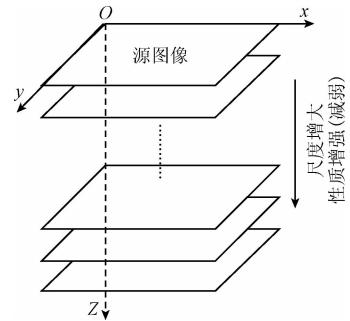


图5 图像的多尺度表示

Fig.5 Multi-scale representation of image

式中: $L(:,\sigma)$ 表示尺度空间, $f$ 表示原始图像, $g(:,\sigma)$ 表示尺度变换子,“\*”表示尺度变换子与图像的作用方法,不同的 $g(:,\sigma)$ 和“\*”将生成性质和特征不同的尺度空间模型。

### 3.2 动态模板尺度空间模型

#### 3.2.1 动态模板的建立

建立的动态模板以半径为 $r$ 的圆形为基本结构,如图6所示,圆心为 $O(i,j)$ ,并将其作为模板移动和运算的中心, $i,j$ 分别表示圆心像素在目标作用图像 $I_0$ 中的行数和列数。以 $O$ 为原点建立坐标系 $xoy$ ,则 $h1$ 、 $h2$ 为平行于 $x$ 轴、几何中心位于 $y$ 轴的线段, $w1$ 、 $w2$ 为平行于 $y$ 轴、几何中心位于 $x$ 轴的线段,其长度均为 $2 \times r$ 。4条线段所包围的区域 $C_E$ 即为模板区域。 $C_E$ 的几何形态和面

积取决于4条线段的位置,而线段位置又与模板中心 $O$ 在图像中所处位置有关,即 $C_E$ 随 $O$ 的位置而动态变化,具体规则如式(5)所示。

$$\begin{cases} r \leq \lambda \leq (\Omega - 1) - r, & P_\Omega[r, r] \\ \lambda < r, & P_\Omega[\lambda, r] \\ \lambda > (\Omega - 1) - r, & P_\Omega[r, \lambda - (\Omega - 1)] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $(\lambda, \Omega, P_\Omega[\cdot])$  为一组关联变量,取值为  $(i, H, P_H[\cdot])$  或  $(j, W, P_W[\cdot])$ ,  $H, W$  分别表示图像  $I_0$  的高、宽;  $P_H[a, b]$  表示在  $xoy$  坐标系下线段  $h_1, h_2$  中点坐标分别为  $(0, a), (0, b)$ ;  $P_W[a, b]$  表示在  $xoy$  坐标系下线段  $w_1, w_2$  中点坐标分别为  $(a, 0), (b, 0)$ 。

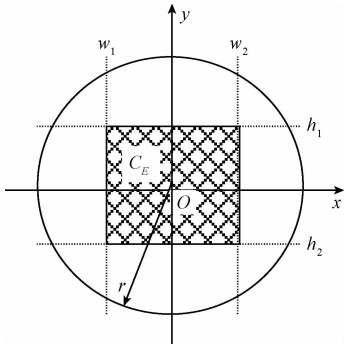


图6 动态模板

Fig. 6 Dynamic template

利用该模板对前景为1、背景为0的骨架图像进行搜索,可得到 $C_E$ 内的端点集合 $E = \{G(i, j) \mid \text{Cond1}\}$ ,及分支点集合 $P = \{G(i, j) \mid \text{Cond2 OR Cond3}\}$ 。其中 $\text{Cond1}$ 、 $\text{Cond2}$ 、 $\text{Cond3}$ 分别如式(6)~(8)所示。其中,  $(i, j)$  表示区域 $C_E$ 内的坐标位置,即  $(i, j) \in C_E, G(i, j)$  表示点  $(i, j)$  处的灰度值。

$$\text{Cond1: } \sum_{n=j-1}^{j+1} \sum_{m=i-1}^{i+1} G(m, n) \times G(i, j) = 2 \quad (6)$$

$$\text{Cond2: } \varphi_1 \parallel \varphi_2 \parallel \varphi_3 \parallel \varphi_4 \quad (7)$$

式中:  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  的定义如式(9)所示。

$$\text{Cond3: } \left( \sum_{n=j-1}^{j+1} \sum_{m=i-1}^{i+1} G(m, n) \geq 4 \right) \parallel (C_{OL} + R_{OW} \geq 6) \quad (8)$$

式中,  $C_{OL}, R_{OW}$  分别表示点  $(i, j)$  的8邻域范围内列、行方向上相邻像素前景和背景间的切换次数,其计算如式(10)、(11)所示。

$$\begin{cases} \varphi_1: \prod_{n=j}^{j+1} \prod_{m=i}^{i+1} G(m, n) = 1 \\ \varphi_2: \prod_{n=j-1}^j \prod_{m=i}^{i+1} G(m, n) = 1 \\ \varphi_3: \prod_{n=j-1}^j \prod_{m=i-1}^i G(m, n) = 1 \\ \varphi_4: \prod_{n=j}^{j+1} \prod_{m=i-1}^i G(m, n) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$C_{OL} = \sum_{u=j-1}^{j+1} [abs(G(i-1, u) - G(i, u)) + abs(G(i, u) - G(i+1, u))] \quad (10)$$

$$R_{OW} = \sum_{v=i-1}^{i+1} [abs(G(v, j-1) - G(v, j)) + abs(G(v, j) - G(v, j+1))] \quad (11)$$

式(6)、(8)、(9)中的变量 $m, n$ 均分别为变量 $i, j$ 的关联变量,其取值大小取决于相应的 $i, j$ 值及公式中所定义的关联关系。以式(6)为例,  $n$  的取值范围为  $j-1 \sim j+1$ ,  $m$  的取值范围为  $i-1 \sim i+1$ 。同理,式(10)、(11)中变量 $u, v$ 同样为 $i, j$ 的关联变量。

### 3.2.2 动态模板尺度空间模型的建立

动态模板尺度空间(dynamic template scale space, DTSS)模型的基本生成方法可由式(12)描述。

$$L(x, y, \sigma) = \begin{cases} I(x, y), & \sigma = 0 \\ \Theta[L(x, y, \sigma - 1)], & \sigma > 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $I$  表示待处理的FPC线路骨架图像,  $(x, y)$  为像素位置,  $x, y$  的取值范围分别为从  $0 \sim H-1$  和  $0 \sim W-1$ ,  $H, W$  分别表示图像  $I$  的高、宽;  $\sigma$  为尺度参数,  $L(x, y, \sigma)$  表示  $I$  在尺度  $\sigma$  下的图像,在  $\sigma$  的全部取值范围下构成整个尺度空间;  $T$  为模型分段值,由图像忠诚度(faithful degree, FD)得分确定,所对应的  $L(x, y, T)$  称为分段值尺度图像;  $\Theta[\cdot]$  为核函数。DTSS 具体生成过程如图7所示。

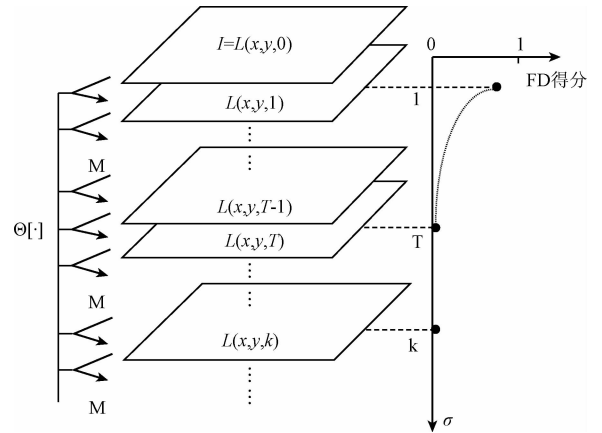


图7 DTSS模型

Fig. 7 Model of DTSS

图7中,原始骨架图像 $I$ 作为DTSS模型基层 $L(x, y, 0)$ ,其 $1 \sim T$ 层可分别通过对上层图像进行 $\Theta[\cdot]$ 运算得到,  $T$ 的取值如式(13)所示。

$$T = \zeta \mid f(\zeta) = 0, \zeta > 1 \quad (13)$$

式中:  $f(\cdot)$  为FD得分的计算函数,如式(14)所示。

$$f(\zeta) = \frac{\sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} abs[L(i, j, \zeta) - L(i, j, \zeta - 1)]}{W \times H} \quad (14)$$

DTSS 模型中 FD 得分满足  $f(\zeta + 1) \leq f(\zeta)$ , 其值越大表示当前尺度相对于上一尺度图像骨架分支噪声去除量越多,  $f(\zeta) = 0$  表示当前尺度图像已达到分支噪声最少状态。则通过对第  $k (k > T)$  层的上层图像进行  $\Theta[\cdot]$  运算后, 得到的第  $k$  层图像  $L(x, y, k)$  保持不变, 即满足式(15)。

$$\Theta[L(x, y, k)] = L(x, y, k), \quad k > T \quad (15)$$

式中:  $\Theta[\cdot]$  的运算过程为动态模板与骨架图像的相互作用过程, 具体可由式(16)表示。

$$L(x, y, \sigma + 1) = \Theta[L(x, y, \sigma)] = B(R_{\sigma+1}) = B[A(R_{\sigma})] \quad (16)$$

式中:  $B(R_{\sigma+1}) = B^{M-1}$ ,  $B^i$  的运算方式如式(17)所示。

$$B^i = C_{B^i} (B^{i-1} \cap R_{\sigma+1}^i) \cup R_{\sigma+1}^i \quad (17)$$

式中:  $i = 1, 2, 3, \dots, M-1, M$  为图像大小, 即  $M-1$  为动态模板遍历图像的移动次数;  $B^0 = R_{\sigma+1}^0, R_{\sigma+1}^i$  表示动态模板在图像  $L(x, y, \sigma)$  上移动第  $i$  次时的覆盖区域  $R_{\sigma}$  的作用结果。  $R_{\sigma+1}$  的计算方式如式(18)所示。

$$R_{\sigma+1} = A[R_{\sigma}] = R_{\sigma}^i \quad (18)$$

其中,

$$R_{\sigma}^i = C_{R_{\sigma}^i} A^{i-1} \quad (19)$$

式中:  $R_{\sigma}^0 = R_{\sigma}, j = 1, 2, 3, \dots, r, r$  为动态模板基圆半径;  $R_{\sigma}^i$  内端点集合为  $E^i$ , 那么  $A^i$  表示集合  $E^i$  中满足条件  $C_d$  的点  $E(x, y)$  形成的子集, 条件  $C_d$  如式(20), 式(18)中  $i = (m + 1), m = (i | A^i = \phi)$ 。

$$C_d: E(x, y) \notin J^i \quad (20)$$

式中:  $J^i$  表示  $R_{\sigma}^i$  内分支点集合。  $R_{\sigma}$  表示动态模板与图像  $L(x, y, \sigma)$  的当前作用区域内前景图像点的集合,  $R_{\sigma}^i$  表示动态模板与  $R_{\sigma}$  的第  $j$  次迭代操作结果。

## 4 基于骨架处理策略的 FPC 断路检测算法步骤及识别方法

### 4.1 FPC 断路缺陷检测算法步骤

FPC 断路缺陷检测的基本流程需要 5 个步骤, 分别为: FPC 图像预处理; 提取预处理后图像线路骨架; 通过 DTSS 模型获取无分支噪声骨架的图像; 提取骨架端点; 去除异形结构区域内的噪声端点。依次通过上述步骤操作后得到线路断路信息集合  $D_{\text{position}}$ , 各步骤具体描述如下。

1) FPC 图像预处理。读入原始图像, 根据文献[19]的方法分割出线路区域, 然后由文献[20]基于并查集的方法标记连通域, 并根据条件  $R_{\text{Area}} < A_{\text{rea}}$  去除噪声区域, 进而得到二值图像  $I_{\text{mg}}$ 。其中  $R_{\text{Area}}$  表示各子连通域的面积,  $A_{\text{rea}}$  为面积阈值, 其大小由实验统计获得。

2) 线路骨架提取。使用 8 栅格 Golay 字符集<sup>[17]</sup>中复合结构元素  $L = \{L_{(1)}, L_{(2)}, \dots, L_{(8)}\}$  对步骤 1) 中图像

$I_{\text{mg}}$  进行迭代细化操作, 得到线路骨架图像  $I_{\text{ske}}$ , 细化方式如式(21)所示, 迭代终止条件为  $I_{\text{mg}}^k = I_{\text{mg}}^{k+1}, I_{\text{mg}}^i$  表示第  $i$  次迭代操作结果。

$$I_{\text{mg}} \odot \{L_{(i)}\} = (((I_{\text{mg}} \odot L_{(1)}) \odot L_{(2)}) \dots \odot L_{(8)}) \quad (21)$$

式中:  $\odot$  表示形态学细化操作。

3) 基于 DTSS 模型获取无分支噪声骨架图像。将图像  $I_{\text{ske}}$  作为基层  $L(x, y, 0)$  输入到 DTSS 模型中, 确定合适的 DTSS 模型参数  $r$ , 得到‘纯净’的无噪声分支的分段值尺度图像  $L(x, y, T)$ , 记为  $I_{\text{clean}}$ 。

4) 骨架端点提取。通过式(22)得到线路断路的预备信息, 即骨架  $I_{\text{clean}}$  的端点集合  $D$ , 包括断路端点和噪声端点。

$$D = \{I_{\text{clean}}(i, j) | \text{Cond1}\} \quad (22)$$

式中: Cond1 如 3.2.1 节中式(6)所述。

5) 基于形态学和局部模板匹配精确筛选断路信息。通过式(23)的方法剔除步骤 4) 集合  $D$  中的异形结构噪声端点, 得到断路信息集合  $D_{\text{position}}$ 。

$$D_{\text{position}} = D \cap C_{r_{\text{mg}}} (I'_{\text{mg}} \cap A'_{\text{rt}}) \quad (23)$$

式中:  $I'_{\text{mg}}$  表示图像  $I_{\text{mg}}$  前景区域构成的点集,  $A'_{\text{rt}}$  表示图像  $I_{\text{mg}}$  前景异形结构区域  $A_{\text{rt}}$  所构成的点集。  $A_{\text{rt}}$  通过形态学和局部模板匹配的方法获得, 具体如下。

(1) 根据电路板设计中焊盘直径  $R_{\text{pad}}$  满足  $R_{\text{pad}} > L_w$  的规则, 其中  $L_w$  表示线宽, 通过式(24)的方法进行提取焊盘区域  $I_{\text{pad}}$ 。

$$I_{\text{pad}} = I_{\text{mg}} \otimes C_{L_w} \quad (24)$$

式中:  $I_{\text{mg}}$  为步骤 1 中预处理图像,  $\otimes$  表示形态学开运算,  $C_{L_w}$  表示直径为  $L_w$  的圆形结构元素。

(2) 根据文献[21]的方法对除焊盘外的全部异形结构区域建立模板; 然后采用文献[22]的方法进行模板匹配, 定位待测图像中的异形结构区域  $I_{\text{art}}$ 。

(3) 可得到图像中全部异形结构区域  $A_{\text{rt}}$  如式(25)所示。

$$A_{\text{rt}} = I_{\text{pad}} \cup I_{\text{art}} \quad (25)$$

### 4.2 断路缺陷具体识别方法

4.1 节获得了断路信息集合  $D_{\text{position}}$ , 据此, 断路的基本识别方法如式(26)所示。

$$\begin{cases} D_{\text{position}} = \phi, H_{\text{not}} \\ D_{\text{position}} \neq \phi, H_{\text{ave}} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $\phi$  表示空集,  $H_{\text{ave}}, H_{\text{not}}$  分别表示线路有、无断路。对于  $H_{\text{ave}}$  情况, 集合  $D_{\text{position}} = \{d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n\}$ ,  $n$  表示集合大小; 其成员  $d_i = (x_i, y_i)$ , 且  $x_i, y_i$  的取值范围分别为  $0 \sim W-1, H-1, W, H$  分别表示图像的宽和高, 则集合中的每个成员可映射到图像中的一个具体位置, 也即线路断点位置。

## 5 实验与分析

### 5.1 实验数据库的建立

为验证本文算法,建立了一个FPC图像库SUT-F1,成像目标为以聚酯薄膜为基材、以银浆为导体的笔记本电脑键盘电路,大小为450 mm × 680 mm,线路宽0.4 mm。图像采集基于生产现场真实环境,如图8所示,在自动化生产线上搭建采集系统,相机工作距离为270 mm,连同光源一并固定在移动平台上,由导轨带动。其中相机为DALSA公司P4-CM-08K070网口线阵相机,分辨率为8 192;光源为OPT-LST562-W线型高亮白光光源。由于目标FPC幅面较大,为了满足系统分辨率要求,使用两台相机并行放置,共同采集宽度为450 mm范围内的图像。单个相机采集图像分别如图9所示,大小为8 192 × 9 115,共采集了505张,挑选出含有断路缺陷的152幅图像构建图库,即图库大小为152,人工标定出断路位置共531处。

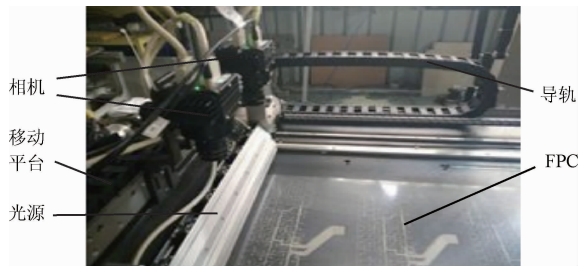
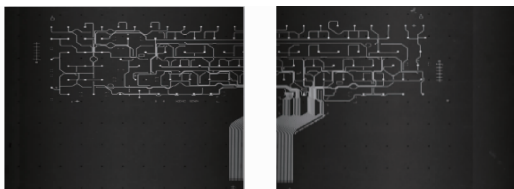


图8 图像采集装置

Fig. 8 Image acquisition device



(a) 左侧相机拍摄图像 (b) 右侧相机拍摄图像  
(a) Image acquired by left camera (b) Image acquired by right camera

图9 图库中图例

Fig. 9 Demo images of image library

### 5.2 后处理

由于SUT-F1图库中图像为半张FPC,则在其左侧或右侧发生截断,如图9所示,但截断处线路骨架仍存在端点,其集合记为 $T_{ru}$ ,为防止其在具体的实验过程中对检测结果产生影响,通过式(27)的方法对其加以处理。

$$D'_{\text{position}} = D_{\text{position}} \cap C_{D_{\text{position}}} T_{ru} \quad (27)$$

式中: $D_{\text{position}}$ 为本文算法所得的断路处骨架端点集合, $D'_{\text{position}}$ 表示剔除截断处噪声端点后的集合。

### 5.3 评价指标的定义和算法测试环境

对图库中152幅图像的断路进行人工标定,规则为每处断路用两个标记点分别标记其两端。本文算法检测规则为:使用灰度值0标记骨架区域,灰度值为255的“×”号标记缺陷两端。算法评价规则为断路两端的算法标记与人工标定均相同视为检测成功,否则为检测失败;算法标记处无人工标记视为误检。

为了评价算法性能,定义了评价指标检测正确率(correct detection rate, CDR)和误检率(false detection rate, FDR),如式(28)、(29)所示。

$$CDR = \frac{NCDP}{NDP} \times 100\% \quad (28)$$

$$FDR = \frac{NFDI}{NDI} \times 100\% \quad (29)$$

式中:NDP(number of defect positions)表示进行尝试的断路总个数,NCDP(number of correct detection positions)表示检测成功的断路个数,NFDI(number of false defect images)表示发生误检的图像个数,NDI(number of defect images)表示进行尝试的图像总个数。

同时,为了评价本文DTSS模型的工作效率,定义了骨架分支噪声剔除率(skeleton noise reject rate, SNRR),如式(30)所示。

$$SNRR = (1 - \frac{NDT}{NDB}) \times 100\% \quad (30)$$

式中:NDB(number of DSS basic level)表示DTSS基层图像上噪声分支的个数,NDT(number of DSS T level)表示DTSS分段值尺度图像上噪声分支的个数。

本文算法测试实验的软件平台为Visual Studio C++ 2010,所使用的计算机处理器型号为Intel i5-6600,4核,主频为3.30 GHz,内存为8 G,操作系统为Windows 7 64位专业版 Service Pack 1。

### 5.4 DTSS模型参数 $r$ 的确定

对于最大线宽为 $L_w$ 的FPC,骨架噪声分支长度的可能范围为1到 $L_w$ ,由于本文SUT-F1图库中FPC图像的 $L_w$ 值为14,因此可得到DTSS模型随参数 $r$ 在1~14变化时其相应的分支噪声去除能力情况,如图10(a)所示。该曲线具体获得方法为,在图库中任选50幅图像,通过4.1节步骤1)2)分别得到其线路骨架,然后将50幅骨架图像依次输入到DTSS模型中,获得其相应的SNRR,最后用50组实验SNRR的平均值SNRR/描述当前 $r$ 取值下DTSS模型的噪声去除能力。图10(b)所示为 $r$ 的取值与算法耗时关系曲线。

由图10(a)可见,当 $r < 8$ 时,SNRR随着 $r$ 的增大而增加,当 $r \geq 8$ 时,SNRR达到100%并保持不变;由



图 10(b)可见,随  $r$  的增加算法耗时增长。由于,SNRR 越大表明 DTSS 模型对骨架分支噪声的剔除能力也越大,因此, $r$  的取值规则应为 SNRR 尽量大,同时算法耗时尽量少,最终确定  $r$  取值 8。

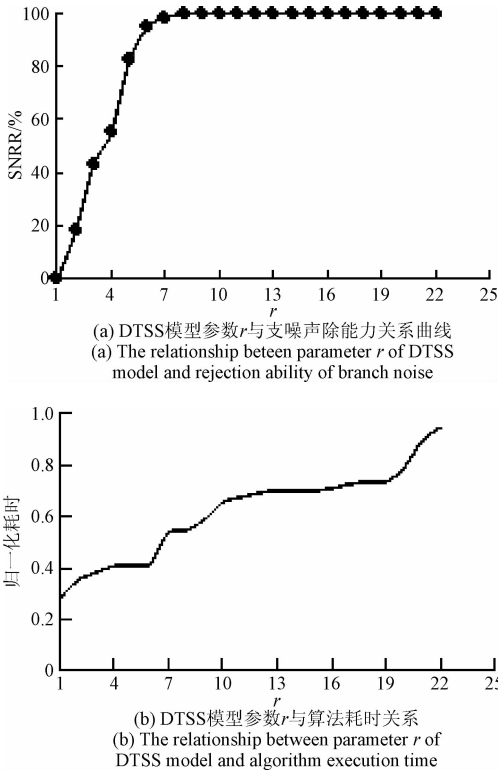


图 10 DTSS 参数  $r$  与噪声剔除能力及算法耗时的关系

Fig. 10 Relationship of DTSS parameter  $r$  and noise eliminating ability and algorithm time consumption

### 5.5 算法检测效果及分析

为验证本文算法对各种线路情况下的断路检测的有效性,在图库中挑选了带有直线断路、折线断路、圆弧断路和迂回线断路的样本进行检测效果验证,结果如图 11 所示。

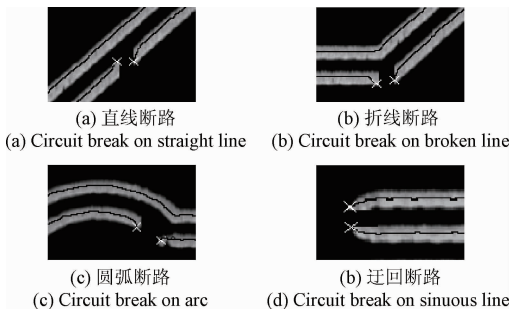


图 11 四种线路类型的断路检测情况

Fig. 11 Circuit break detection effects of four kinds of circuit types

由图 11 可见,4 种线路状态下的断路两端均被正确标记,表明了本文方法对各种线路结构缺陷检测的适用性和有效性。

### 5.6 实验效果与对比分析

为了进一步体现本文方法的抗形变性和优越性,进行了不同形变程度图像的检测效果实验,并与其他经典方法的检测结果进行了对比和分析。具体地,首先通过 2.1 节式(1)、(2)的方法对 SUT-F1 图库中 152 幅图像的形变程度  $s$  进行测试,统计得到  $S$  的分布范围为 2.6% ~ 18.2%,具体分布曲线如图 12 所示。

然后,将图库中的 152 幅图像根据  $s$  值等间隔分为 3 组,具体如表 1 所示,根据图 12 统计出各组图像数量分别为 27、98、27,人工标记出断路数量分别为 88 处、329 处和 114 处,具体检测结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,本文方法相对于其他 FPC 断路检测方法性能显著提升,其中 CDR 最小提高了 5.03%,FDR 最小降低了 8.22%。分析其原因为其他检测方法均为基于模板匹配的思路,对形变敏感,导致效果不够理想,由表 1 可以看出,随着形变程度  $S$  的增加,其 CDR 逐渐减小、FDR 逐渐增大;而本文方法的 CDR 和 FDR 几乎不随形变程度变化,其原因为本文方法充分利用了图像形变过程中线路拓扑性质不变这一特点,由此获得了优良的抗形变能力,同时,利用线路断路处骨架形成端点这一特征,使本文取得良好效果。

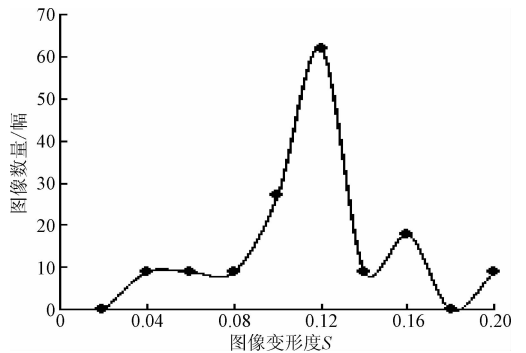


图 12 SUT-F1 图库图像形变度分布曲线

Fig. 12 Image deformability distribution curve of SUT-F1 image library

本文方法的平均 CDR 达 99.30%,现对其检测失败案例进行分析:断路缺陷发生在线路“T”字结构处的情况如图 13(a)白色虚线框标注,提取的线路骨架如图 13(b)所示,白色箭头标注的是由于断路而导致骨架出现的较短支路,将该骨架图像作为基层输入到 DTSS 后结果如图 13(c)所示,其骨架短支路被当作噪声分支剔除,使得该处缺陷仅识别到一个端点,检测失败。

表1 不同线路缺损检测方法检测正确率的对比  
Table 1 True positive rate comparison of various methods (%)

检测方法	形变度 $S$						平均 CDR	平均 FDR
	$0.02 < S \leq 0.08$		$0.08 < S \leq 0.14$		$0.14 < S \leq 0.20$			
	CDR	FDR	CDR	FDR	CDR	FDR		
全局+局部匹配 <sup>[10]</sup>	95.45	3.70	84.80	22.45	78.07	37.04	86.11	21.06
规则化参数匹配 <sup>[11]</sup>	97.73	0	89.36	19.39	82.46	18.52	89.85	12.64
Affine transformation <sup>[9]</sup>	100	0	87.54	21.43	85.96	25.93	91.17	15.79
Hausdorff distance <sup>[8]</sup>	98.86	3.70	93.01	9.18	86.84	29.63	92.90	14.17
边缘密度分布 <sup>[16]</sup>	100	0	94.22	9.18	88.60	22.22	94.27	10.47
本文方法	100	0	98.78	3.06	99.13	3.70	99.30	2.25

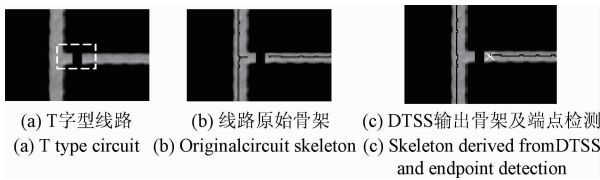


图13 检测失败案例

Fig. 13 Failure case of detection

本文方法存在 2.25% 的误检率, 现对误检案例进行观察和分析: 实验过程中发现如图 14(a) 所示情况, 白色虚线框标记的是由于线路印刷过程中网栅损坏而漏浆导致的线路出现异常凸起; 由图 14(b) 可见, 该异常凸起使得骨架形成分支、产生端点; 但由于该分支过长, 无法通过本文 DTSS 模型剔除, 从而导致误检。

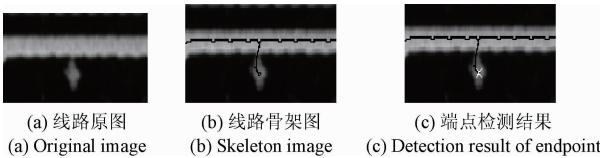


图14 误检图例

Fig. 14 Example image of false drop

## 6 结 论

针对柔性变形 FPC 断路缺陷检测问题, 本文提出了一种通过检测线路骨架端点识别断路缺陷的思路。从建立 FPC 图像形变模型出发, 分析了形变机理, 制定了 FPC 图像形变程度衡量方法。详细阐述了算法流程, 给出了算法的评价指标以及典型参数设置的方法, 并在自建的图像数据库 SUT-F1 上进行了测试, 结果表明: 本文方法 CDR 达 99.30%, FDR 达 2.25%, 表明了本文算法的高效性及其良好的抗柔性形变能力; 与其他经典方法相比, CDR 至少提高了 5.03%, FDR 最小降低了 8.22%, 显示出本文算法的优势, 对于柔性变形 FPC 断路缺陷检测的应用具有实际意义。

## 参考文献

[1] YANG Y, CHIESURA G, VERVUST T, et al. Design and fabrication of a flexible dielectric sensor system for in situ and real-time production monitoring of glass fibre reinforced composites [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 243(6): 103-110.

[2] GLATZL T, STEINER H, KOHL F, et al. Development of an air flow sensor for heating, ventilating, and air conditioning systems based on printed circuit board technology [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 237(5): 1-8.

[3] KIM H T, KIM S T, CHO Y J. Quick and efficient light control for conventional automatic optical inspection (AOI) systems [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(2): 247-254.

[4] MARKSTEIN H W. AOI and X-ray find a niche in assemblies PCB inspections [J]. Electronic Packaging and Production, 1998, 38(15): 31-35.

[5] KAUSHIK S, ASHRAF J. Automatic PCB defect detection using image subtraction method [J]. International Journal of Computer Science and Network, 2012, 1(5): 68-73.

[6] WANG W B, LIU D Y, YAO Y Q. Defects detection of printed circuit board based on the machine vision method [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 494-495(2): 785-788.

[7] CHAUHAN A P S, BHARDWAJ S C. Detection of bare PCB defects by image subtraction method using machine vision [J]. Lecture Notes in Engineering and Computer Science, 2011, 2(1): 1597-1601.

[8] LIAO C T, LEE W H, LAI S H. A flexible PCB inspection system based on statistical learning [J]. Journal of Signal Processing Systems for Signal, Image, and Video Technology, 2012, 67(3): 279-290.

[9] HUANG J X, LI D, YE F, et al. Flexible printed circuit defective detection based on image registration [C].



- International Congress on Image & Signal Processing, 2010,6;2570-2574.
- [10] REN K, HONG Y H. The automatic detection system of flexible printed circuit board's defect in computer equipment based on picture processing and pattern recognition[J]. Circuit World,2014,40(4):121-126.
- [11] 陈安,王盛婷,胡跃明.一种基于规则化参数的印刷电路板缺陷检测方法:中国201310440107[P].2014-01-08.  
CHEN AN, WANG SH T, HU Y M. A method of printed circuit board defect detection based on the regularization parameter; China, 201310440107[P].2014-01-08.
- [12] ZHANG J, YE Y T, XIE Y, et al. High density print circuit board line width measurement algorithm based on statistical process control theory[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2013,124(20):4472-4476.
- [13] 乔闹生,孙萍.印制电路板线路检测研究[J].光子学报,2013,42(11):1355-1359.  
QIAO N SH, SUN P. Circuitry detection in printed circuit board[J]. Acta Photonica Sinica,2013,42(11):1355-1359.
- [14] ITO M, FUJITA I, TAKEUCHI Y, et al. Pattern defect analysis and evaluation of printed circuit board using CAD data [C]. International Electronic Manufacturing Technology Symposium,1933;7-10.
- [15] 陈旭文,刘桂雄,黄坚.FPC的图像采集与表面曲向消除方法[J].电子测量与仪器学报,2015,29(6):895-900.  
CHEN X W, LIU G X, HUANG J. Method of image acquisition and curved surface elimination for flexible printed circuit[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015,29(6):895-900.
- [16] 陈泽武. FPC光学缺陷检测平台中的关键图像处理技术[D].广州:华南理工大学,2015.  
CHEN Z W. Key image processing technology in optical defect inspection of FPC[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2015.
- [17] SONKA M, HLAVAC V, CENG R. Image processing, analysis, and machine vision [M]. USA:International Thomson publishing, 2002.
- [18] YE X F, LI P, ZHANG J G, et al. A feature-matching method for side-scan sonar images based on nonlinear scale space [J]. Journal of Marine Science and Technology,2016,21(1):38-47.
- [19] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979,9(1):62-66.
- [20] AIZAWA K, TANAKA S, MOTOMURA K, et al. Algorithms for connected component labeling based on quadtrees [J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2009,19(2):158-166.
- [21] 张静,叶玉堂,谢煜,等.采用Gerber文档的印刷电路板表观检测[J].光学精密工程,2013,21(10):2679-2687.  
ZHANG J, YE Y T, XIE Y, et al. Appearance detection for printed circuit board by Gerber file[J]. Optics and Precision Engineering, 2013,21(10):2679-2687.
- [22] 吴晓军,邹广华.基于边缘几何特征的高性能模板匹配算法[J],仪器仪表学报,2013,34(7):1462-1469.  
WU X J, ZOU G H. High performance template matching algorithm based on edge geometric features[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013,34(7):1462-1469.

### 作者简介



**苑玮琦**,1982年于湖南大学获得学士学位,分别在1988年和1997年在东北大学获得硕士和博士学位,现为沈阳工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为机器视觉检测和生物特征识别。

E-mail:yuan60@126.com

**Yuan Weiqi** received his B. Sc. degree from Hunan University in 1982, and received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Northeastern University in 1988 and 1997, respectively. Now he is a professor and doctoral supervisor in Shenyang University of Technology. His research interests include machine vision and biometric identification.



**李德健**(通讯作者),2013年于沈阳工业大学获得学士学位,现为沈阳工业大学视觉检测技术研究所博士研究生,主要研究方向为机器视觉检测和生物特征识别。

E-mail:540785944@qq.com

**Li Dejian** (Corresponding author) received his B. Sc. from Shenyang University of Technology in 2013. Now he is a doctoral candidate in Computer Vision Group, Shenyang University of Technology. His research interests includes machine vision and biometric identification.



**李绍丽**,2013年于沈阳工业大学获得学士学位,现为沈阳工业大学视觉检测技术研究所博士研究生,主要研究方向为机器视觉检测和生物特征识别。

E-mail:707816215@qq.com

**Li Shaoli** received her B. Sc. from Shenyang University of Technology in 2013. Now she is a doctoral candidate in Computer Vision Group, Shenyang University of Technology. Her research interests includes machine vision and biometric identification.