

引用格式: 陈思摇, 伍世虔. 基于降采样和相位相关的印刷电路板图像配准[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(4): 17-22.
[CHEN S Y, WU S Q. Printed circuit board image alignment based on downsampling and phase correlation[J]. Microelectron-
ics & Computer, 2021, 38(4): 17-22.]

基于降采样和相位相关的印刷电路板图像配准

陈思摇, 伍世虔

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 针对 PCB 缺陷检测系统对配准的要求, 提出了一种基于图像降采样和相位相关法的配准算法. 首先, 为了解决使用单侧峰的相位相关亚像素配准方法在整数位移处误差较大的问题, 提出根据两侧峰峰值差值占主峰的比例来判断是否需要使用双侧峰法修正的方法; 其次, 为了解决算法应用中的效率问题, 讨论了不同降采样倍率对配准速度和精度的影响. 实验结果表明, 该改进算法的最大误差和平均误差均比原单侧峰法小; 二千万像素的图像在五倍降采样情况下就能获得高精度, 且速度约有 20 倍提升, 该算法具有鲁棒性和实时性.

关键词: 相位相关; 图像配准; 亚像素; 降采样; 印刷电路板 (PCB)

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7180(2021)04-0017-06

Printed circuit board image alignment based on downsampling and phase correlation

CHEN Si-yao, WU Shi-qian

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology,
Wuhan 430081, Hubei China)

Abstract: A registration algorithm based on image downsampling and phase correlation was proposed to meet the registration requirements of PCB defect detection system. First of all, in order to solve the problem that the phase-dependent sub-pixel registration method using one-sided peak has a large error at the integer displacement, a two-side peak method is proposed to judge whether it is necessary to use the two-side peak method according to the ratio of the peak-to-peak difference between the two sides to the main peak. Secondly, in order to solve the efficiency problem in the application of algorithms, the effects of different downsampling magnifications on registration speed and accuracy are discussed. The experimental results show that the maximum error and average error of the improved algorithm are smaller than that of the one-sided peak method. The 20-million-pixel image can achieve high accuracy under the condition of five times of downsampling, and the speed is improved by about 20 times. The algorithm has robustness and real-time performance.

Key words: Phase correlation; image alignment; subpixel; downsampling; printed circuit board (PCB)

1 引 言

随着电子产业的迅猛发展, 对产品的质量把控越来越严格, 传统的人工目测检测法在效率和准确度上已经不能完全满足要求. 基于节省人力和提高

检测效率的目的, 应用新的技术进行 PCB 缺陷检测非常重要且必要^[1].

图像配准是将空间中存在变换的两张或多张图像对齐的过程, 它是 PCB 缺陷检测中的一个重要步骤, 配准的精度能直接影响缺陷检测的结果和检测

的精度^[2],所以在设计整个 PCB 缺陷检测算法的时候,挑选合适的配准算法非常重要.许多学者针对 PCB 的图像配准展开了研究.这些配准方法主要是基于区域特征和基于点特征^[3-6].

基于灰度和基于变换域的配准算法也是较为常见的配准算法,但是在 PCB 图像配准中使用的并不广泛.基于灰度的配准算法精度高但是速度却比较慢,很难满足实时性.基于变换域的算法,如傅里叶梅林法,速度快,精度较高,对噪声和光照也不敏感,适合 PCB 图像的配准,但是该算法占用内存较多,对图像的尺寸有一定限制.

为解决 PCB 图像配准速度和精度的要求,本文从傅里叶梅林法作为切入点,讨论降采样倍率对速度和精度的影响,并且为了减少亚像素配准的整体误差,针对单侧峰法在整数位移处误差较大的问题,提出通过峰值差判断并用双侧峰法修正的方法.

2 傅里叶梅林理论

基于傅里叶梅林的配准方法有着速度快,精度较高,对噪声不敏感等优点,在机器视觉等很多领域有广泛的应用.

基于傅里叶梅林的配准方法是相位相关法的扩展,Reddy 将只能计算平移的相位相关法,利用傅里叶梅林变换扩展为能计算图像间的缩放,旋转和平移的应用更广泛的方法.且该方法具有解耦性,缩放,旋转和平移可以独立计算.本文针对 PCB 图像,研究图像间的平移和旋转.下面介绍其理论.

假设 $f_2(x, y)$ 和 $f_1(x, y)$ 之间存在平移量 (x_0, y_0) ,则:

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

它们对应的傅里叶变换 F_1 和 F_2 会有如下关系:

$$F_2(\xi, \eta) = e^{-j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} F_1(\xi, \eta) \quad (2)$$

图像 f_1 和 f_2 对应的傅里叶变换 F_1 和 F_2 的交叉功率谱定义如下:

$$\frac{F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)}{|F_1(\xi, \eta) F_2^*(\xi, \eta)|} = e^{j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} \quad (3)$$

式中, F_2^* 是 F_2 的复共轭.傅里叶的平移定理说明了交叉功率谱的相位等于图像间的相位差.通过对交叉功率谱进行傅里叶反变换,将会得到一个脉冲函数.也就是说,除了在最佳对齐两张图像所需的平移量处,其他地方都近似为零.

下面是计算旋转量的方法:

假设 $f_2(x, y)$ 相对于 $f_1(x, y)$ 之间存在平移量

(x_0, y_0) 和旋转量 θ_0 ,则:

$$f_2(x, y) = f_1(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0 - x_0, -x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0 - y_0) \quad (4)$$

根据傅里叶的平移和旋转特性,对 f_2 和 f_1 进行傅里叶变换可得到如下关系:

$$F_2(\xi, \eta) = e^{-j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} F_1(\xi \cos \theta_0 + \eta \sin \theta_0, -\xi \sin \theta_0 + \eta \cos \theta_0) \quad (5)$$

取 F_1 和 F_2 的幅度,得到 M_1 和 M_2 ,则它们的关系如下:

$$M_2(\xi, \eta) = M_1(\xi \cos \theta_0 + \eta \sin \theta_0, -\xi \sin \theta_0 + \eta \cos \theta_0) \quad (6)$$

从(6)中可以看出 F_1 和 F_2 的幅度中可以看出已经没有平移量,只剩下旋转量.通过将 M_1 和 M_2 投射到极坐标中,可得到如下关系:

$$M_2(\rho, \theta) = M_1(\rho, \theta - \theta_0) \quad (7)$$

此时使用上面介绍的计算位移的方法就可以计算角度 θ_0 .

3 相位相关法的亚像素配准

傅里叶梅林法对于平移量的精度只能计算到整数级,对于角度的计算精度与图像矩阵大小有关,矩阵越大精度越高.为了在有限的图像大小上获得足够高的精度,需要将该方法扩展到亚像素精度.本文介绍 Foroosh 方法以及在这个方法上做的一点改进.

3.1 Foroosh 法

相位相关法的亚像素配准理论,也属于相位相关法的扩展. Foroosh 等^[7]基于降采样图像相位相关的信号功率不集中在单个峰中,而集中在大多数彼此相邻的相干峰中的现象,提出一种亚像素配准的方案.该方案的主要思想如下:

式(3)的离散傅里叶形式如下:

$$G(u, v) = e^{2j\pi(\frac{ux_0}{M} + \frac{vy_0}{N})} \quad (8)$$

式中, M 和 N 指的是图像矩阵的长和宽,对其进行反变换且仅考虑幅值得到如下结果:

$$|g(x, y)| = \frac{1}{MN} \frac{\sin(\pi(x - x_0))}{\sin(\frac{\pi(x - x_0)}{M})} \frac{\sin(\pi(y - y_0))}{\sin(\frac{\pi(y - y_0)}{N})} \quad (9)$$

因为 M 和 N 的值较大,所以可以将式(9)近似为:

$$|g(x, y)| \approx \frac{\sin(\pi(x - x_0))}{\pi(x - x_0)} \frac{\sin(\pi(y - y_0))}{\pi(y - y_0)} \quad (10)$$

当 $x = x_0$ 且 $y = y_0$ 时, $|g(x, y)|$ 可取到最大

值,则可以根据峰值位置得到两幅图之间的相对位移.

当存在亚像素位移时,因为图像数字化的原因,峰值位置的坐标是整数,无法直接估计出亚像素的位移量.而对于亚像素位移的求解,文献[8]中证明与主峰和侧峰的峰值有关,更进一步的,相位相关中的信号功率通常集中在某个坐标 (x_m, y_m) 处的主峰中,以及在 (x_s, y_m) 和 (x_m, y_s) 处的两个侧峰处,其中 $x_s = x_m \pm 1$ 和 $y_s = y_m \pm 1$,使用这三个点可以解决亚像素偏移值.亚像素位移与主侧峰幅值的关系用下面的例子说明,假设主峰位置在 $(0,0)$ 处,延 x 轴方向 $(1,0)$ 处有一侧峰,如表 1,则有如下推论:

$$\frac{\sin \pi x_0}{\pi x_0} \frac{\sin \pi y_0}{\pi y_0} = C(0,0)$$

(11)

$$\frac{\sin(\pi(1-x_0))}{\pi(1-x_0)} \frac{\sin \pi y_0}{\pi y_0} = C(1,0)$$

(12)

将(11)和(12)相除再进行简单变换,得到如下结果:

$$\Delta x = x_0 = \frac{C(1,0)}{C(1,0) + C(0,0)}$$

(13)

式中, $C(x,y)$ 表示坐标 (x,y) 处的幅值; Δx 是 x 轴方向的亚像素位移.基于以上推论,亚像素的位移计算公式如(14)(15):

$$x = \begin{cases} x_m + \frac{C(x_m+1, y_m)}{C(x_m+1, y_m) + C(x_m, y_m)} \\ \quad \text{if } C(x_m+1, y_m) > C(x_m-1, y_m) \\ x_m - \frac{C(x_m-1, y_m)}{C(x_m-1, y_m) + C(x_m, y_m)} \\ \quad \text{if } C(x_m+1, y_m) < C(x_m-1, y_m) \end{cases}$$

(14)

$$y = \begin{cases} y_m + \frac{C(x_m, y_m+1)}{C(x_m, y_m+1) + C(x_m, y_m)} \\ \quad \text{if } C(x_m, y_m+1) > C(x_m, y_m-1) \\ y_m - \frac{C(x_m, y_m-1)}{C(x_m, y_m-1) + C(x_m, y_m)} \\ \quad \text{if } C(x_m, y_m+1) < C(x_m, y_m-1) \end{cases}$$

(15)

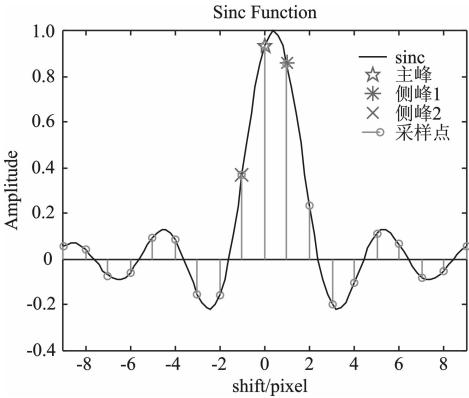
式(14)和(15)的符号选择可以用图 1(a)和图 1(b)来解释,从图上可以看出,当存在亚像素位移时,采样点在整数位置,所以采样的最高值并不是 sinc 函数的最高值.但是可以根据采样点的最高值(主峰)旁边的两侧峰高低来判断 sinc 函数的最高值在主峰的哪一侧.因为采样点是均匀的,所以 sinc 函数的最高值在主峰和较高侧峰之间,这也是式(14)和(15)需要判断加减号的原因.

表 1 子像素运动估计的主峰 $C(0,0)$ 及其相邻的相关值

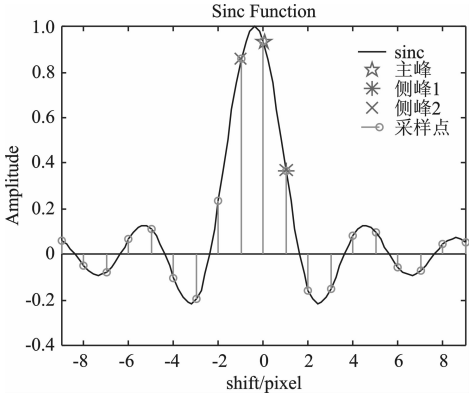
$C(-1,-1)$	$C(0,-1)$	$C(1,-1)$
$C(-1,0)$	$C(0,0)$	$C(1,0)$
$C(-1,1)$	$C(0,1)$	$C(1,1)$

3.2 改进思路

Foroosh 方法属于 sinc 拟合法中的一种^[8],这种方法估算较为准确,但是在位移接近整数时估算的准确度不如其他算法,如加权质心法等.主要是因为利用单侧峰 sinc 拟合法的固有缺陷,主峰因为量化和噪声等原因不可能形成无限脉冲,侧峰也因为同样的原因不能为 0,所以在接近整数位移时单侧峰法的误差会比其他多侧峰法的误差大.为了解决这个问题,本文展开研究,首先从图 1 可知,当采样点均匀,主峰越接近 sinc 峰值时,两侧峰峰值越接近.两侧峰相近分两种情况,如图 2 所示,两侧峰值较小且接近,两侧峰值较大且接近.为了确定是否处于整数位移处,本文提出一种利用两侧峰峰值差值占主峰比例的判断方法,并使用一种双侧峰加权方法估计接近整数时的位移.



(a)较高侧峰在主峰右侧



(b)较高侧峰在主峰左侧

图 1 sinc 函数拟合时侧峰两种情况
判断是否接近整数位移,需要判断两侧峰的差值是否够小,但是不同的平移量峰值大小不同,无法

直接用差值定义小的程度,所以用差值与主峰峰值的比值来定义,(16)式是 x 轴方向的定义, y 轴方向与它类似

$$\frac{|C(-1,0) - C(1,0)|}{C(0,0)} < \epsilon \quad (16)$$

式中, ϵ 是一个较小的值,一般取 $(0, 0.1]$ 之间的值.

当式(16)成立时,则用式(17)定义 x 轴方向的亚像素位移:

$$\Delta x = \frac{C(1,0) - C(-1,0)}{C(0,0) + |C(1,0) - C(-1,0)|} \quad (17)$$

式(17)是 Ren 等人^[9]提出的用于解决噪声图像中的高精度配准问题.该式在假设利用单侧峰估算平移量时对噪声敏感的基础上提出,主要解决两侧峰相近似的问题.该方法在处理无噪声或少噪声的图像时整体效果不如 Foroosh 法,但是在接近整数像素位移处效果比 Foroosh 法好.本文利用该式对接近整像素平移量估算精度较高的优点,修正 sinc 函数拟合法中对整像素平移量估算误差较大的问题.实验证明该方法在精度上有一定提升.

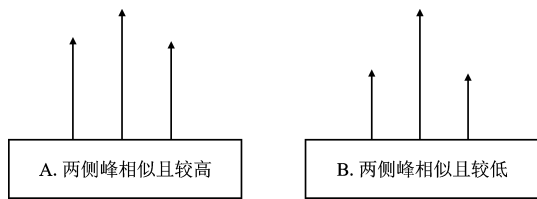


图2 两侧峰相似的两种情况

3.3 算法流程

- (1)输入图像对;
- (2)利用傅里叶梅林法估算出粗略的平移量;
- (3)判断两侧峰峰值的关系,满足式(16)则进行步骤5,否则进行步骤4;
- (4)用式(14)的方法估算精确的平移量;
- (5)用式(17)的方法估算出亚像素的平移量,加上2中计算出来的粗略平移量得到精确平移量.

为了后续的 PCB 图像配准算法方便描述,给本算法取名为修正的 sinc 函数拟合法.

4 基于降采样的 PCB 图像配准

对于 PCB 图像的配准,最关注的问题是配准速度和配准精度能否达到缺陷检测系统的要求.多数时候 PCB 图像使用工业相机采样,为保证缺陷的检出与识别,图像分辨率较大.一张两千万像素的图需要在数十秒内处理完成,预留给图像配准的时间很少,所以保证配准速度是一个较大的难题.一个简单的提升速度的方法是对图像进行降采样.降采样之

后数据量减小,但是同时也意味着信息量的损失,多数配准方法在降采样的图像上不能保证精度,比如基于点特征的配准方法.文献[7]中的亚像素配准方法基于两张具有整数平移量的图像在降采样之后会产生亚像素平移量的假设上提出,且证明了两个降采样图像的归一化交叉功率谱仅仅是滤波后的单位脉冲的多相分解.所以降采样的提速方法适合用在基于相位相关法的图像配准中.

下面根据前文的描述介绍基于降采样的 PCB 图像配准算法流程,需要说明的是,降采样方法采用双线性插值法.

算法流程

- (1)输入图像对;
- (2)对两张图像进行 k 倍降采样,将降采样后的图像记为 $f_1(x, y), f_2(x, y)$;
- (3)对 $f_1(x, y), f_2(x, y)$ 进行傅里叶变换,取其幅度谱,记为 $M_1(u, v)$ 和 $M_2(u, v)$,并对幅度谱进行高通滤波;
- (4)将幅度谱从笛卡尔坐标系转换到对数坐标系,记为 $M_1(\rho, \theta)$ 和 $M_2(\rho, \theta)$;
- (5)使用修正的 sinc 拟合法估算旋转角度 θ ;
- (6)根据计算出的角度 θ 旋转图像 $f_2(x, y)$ 得到图像 $f_3(x, y)$;
- (7)运用修正的 sinc 拟合法估算 $f_1(x, y), f_3(x, y)$ 之间的平移量,并乘上降采样倍数 k 得到最终估算的平移量.

5 实验与分析

本文首先利用合成的数据验证本文提出的算法对 sinc 拟合法的修正作用.测试图是 CSIQ 数据库中的一张无损图片,名字是 aerial_city,它的分辨率为 512×512 .利用该图在 $[0, 5]$ 之间等距离生成 300 个角度数据旋转图像作为测试图,每个角度的距离为 0.016 7,计算出角度之后画出误差图,如图 3 所示.从图 4 可以看出在 Foroosh 提出的方法误差较大处,本文提出的方法的误差相对较小,体现了本文算法对 Foroosh 提出的算法的修正作用.

本次测试中,Foroosh 方法的最大误差是 0.201 7,平均绝对误差(MAE)是 0.034 4,均方误差(MSE)是 0.002 2,本文方法最大误差是 0.149 3,平均绝对误差(MAE)是 0.030 4,均方误差(MSE)是 0.001 6,从这些评价指标可以看出本文的估算准确且比 Foroosh 提出的方法整体误差小.

接下来讨论降采样对配准的影响,测试图像如

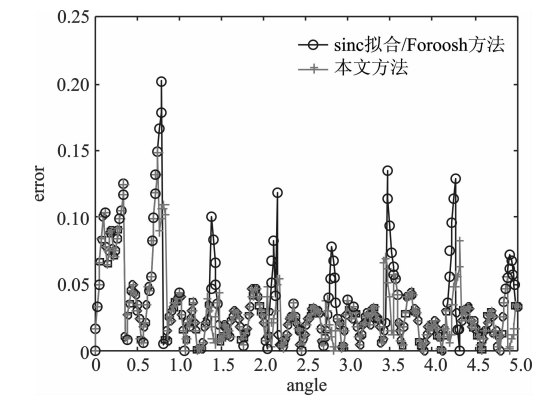


图 3 两种算法的绝对误差

图 4 是一张分辨率为 5472×3648 的 PCB 图像,在 $[40,50]$ 之间等距离生成 100 组 x 轴平移量的数据, y 轴平移量固定为 50,分别考察非降采样和不同倍率降采样之后计算出的平移量,计算它们与实际值之间的误差,然后分别计算它们的均方误差及计算时间等指标整理为表 2。

从表 2 的数据可以看出随着降采样倍率的增加,计算的准确率在逐步下降,计算每张图像平移量的时间也在变小。需要注意的是,在目前有限的测试中,五倍降采样的计算精度最高,虽然它计算用时是十倍降采样的两倍,但是也不超过 0.4 秒,有很高的性价比。在应用时可以根据精度要求和时间要求选择合适的降采样倍率。

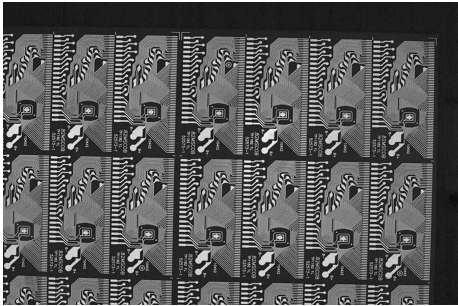


图 4 PCB 测试图像

表 2 不同降采样倍率计算平移量的性能

降采样倍率	MAE	MSE	最大误差	平均用时(s)
10 倍	0.073 7	0.009 3	0.359 6	0.17
7 倍	0.065 4	0.006 1	0.258 6	0.23
5 倍	0.047 2	0.003 7	0.165 7	0.33
原图	0.118 3	0.017 1	0.238 7	4.25

除了对平移量的计算,更重要的是对角度的计算,因为角度计算的准确度会影响后续平移量的计算。同样的,选择图 4 所示的测试图像,在 $[1,5]$ 之间等距生成

100 组角度数据,分别考察非降采样和降采样之后计算出的角度,计算它们与实际之间的误差,然后分别计算它们的均方误差及计算时间等指标整理为表 3。

从表 3 可以看出,原图的计算准确度最高,这与角度计算的性质相关,在不利用侧峰的情况下也能算出较高精度的角度,但是需要图像的分辨率足够高。但是高分辨率代表着大的数据量,大数据量代表着大的计算量,所以使用原图计算需要耗费大量的时间。从表 3 可以看出,7 倍降采样时最大误差已经小于 0.1 度,用时与原图计算时间相比有很大的优势。在应用时不建议使用原图进行配准,因为在原图上计算除了很耗时外,对计算机的内存要求也很高,不利于往其他嵌入式系统上移植。

表 3 不同降采样倍率计算角度的性能

降采样倍率	MAE	MSE	最大误差	平均用时(s)
10 倍	0.065 1	0.006 8	0.274 3	0.25
7 倍	0.032 1	0.001 6	0.094 4	0.36
5 倍	0.023 8	0.000 9	0.064 4	0.51
原图	0.002 0	0.000 01	0.009 1	10.15

为了证明本文算法的优势,将本文算法与 SURF 算法进行对比,随机生成一个旋转角度,分别计算原图,5 倍降采样,10 倍降采样在两种算法下的计算误差,记录计算时间,结果整理为表 4。

表 4 本文算法与 SURF 的对比

	原图	5 倍降采样	10 倍降采样
本文误差	0.008 2	0.028 1	0.025 6
SURF 误差	0.000 3	0.645 5	0.112 0
本文用时(s)	9.91	0.50	0.26
SURF 用时(s)	3004.71	4.91	1.16

从表 4 可以看出,SURF 算法在用原图计算时误差很小,但是用时长,在降采样情况下用时大量减少,但是本文方法在这种情况下速度仍有优势。本文的算法在降采样之后计算误差能保持稳定,但是 SURF 算法在降采样之后计算误差不够稳定,会出现误差大于预期的情况。初步分析是因为降采样之后图像信息量减小,图像变得模糊,加大了寻找正确匹配点的难度,且 SURF 算法为了估算出旋转或平移矩阵,一般需要配合 RANSAC 方法剔除误匹配点之后拟合出正确结果,RANSAC 方法引入了随机性,使得计算结果不够稳定。可以通过调整参数增加 SURF 算法的准确度,但是会加大时间开销。所以在计算稳定性和计算速度上本文算法有一定优势。

最后展示一下利用本文算法使用实验现场拍摄的 PCB 图片的配准结果,图片分辨率为 $5\,472\times$

3 648, 采用五倍降采样计算出角度和平移量, 最后逆变换之后二值化相减, 结果如图 5, 可以看到图中还存在部分残影, 除了配准误差, 还存在图像畸变和二值化引入的误差, 此时再配上相应的缺陷检测算法, 就可以检测出缺陷. 用原图配准计算时间为 15.75 秒, 五倍降采样计算时间为 0.75 秒, 原图配准时间是降采样的 21 倍, 可以证明降采样很好的节约了计算时间.

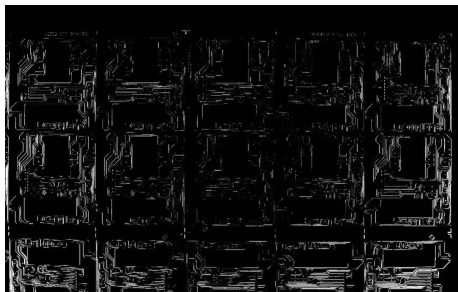


图 5 配准后二值化相减结果

6 结束语

相位相关法的亚像素配准算法在速度和精度上都很有优势, 在医学、遥感和机器视觉等很多领域有极高的应用价值. 本文针对 Foroosh 方法在整数位移处的估计误差较大的情况, 提出利用侧峰峰值与主峰峰值的关系判断是否在整数位移附近, 并利用双侧峰峰对整数位移处的估算进行修正, 让该算法的最大误差和平均误差都有一定减小.

图像配准在 PCB 缺陷检测中占重要作用, 为了达到配准精度和速度, 本文对相位相关法的亚像素配准的降采样方法的速度和精度进行了讨论, 降采样对该算法的精度影响较小, 但是对速度的提升很大. 五倍降采样的情况下, 配准速度约有 20 倍提升.

参考文献:

- [1] 孙友涛, 孙轶, 花文波, 等. 基于 AOI 技术的 PCB 常见质量缺陷检测[J]. 科技风, 2020(8): 24. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202008022.
SUN Y T, SUN Y, HUA W B, et al. Common PCB quality defect detection based on AOI technology[J]. TechnologyWind, 2020(8): 24. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202008022.
- [2] HASSANIN A A T M, EL-SAMIE F E A, EL BANBY G M. A real-time approach for automatic defect detection from PCBs based on SURF features and morphological operations[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(24): 34437-34457. DOI: 10.1007/

s11042-019-08097-9.

- [3] 刘政, 熊昊, 肖森林, 等. 基于 PCA 和分段 RHT 的 PCB 板圆 Mark 点定位[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(1): 93-99. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2017.01.015.
LIU Z, XIONG H, XIAO S L, et al. Positioning of circular mark in PCB based on PCA and segment RHT[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(1): 93-99. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2017.01.015.
- [4] HUA G L, HUANG W P, LIN H. Accurate image registration method for PCB defects detection[J]. The Journal of Engineering, 2018, 2018(16): 1662-1667. DOI: 10.1049/joe.2018.8272.
- [5] 产叶林, 胡新平. 基于 FAST 和 SURF 的特征点快速匹配算法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(12): 3500-3504. DOI: 10.16208/j.issn1000-7024.2019.12.023.
CHAN Y L, HU X P. Fast featurepoint matching algorithm on FAST and SURF[J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40(12): 3500-3504. DOI: 10.16208/j.issn1000-7024.2019.12.023.
- [6] DONG Z N, CHEN L J. Image registration in PCB fault detection based on infrared thermal imaging[C]//2019 Chinese Control Conference (CCC). Guangzhou, China: IEEE, 2019: 4819-4823. DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8866191.
- [7] FOROOSH H, ZERUBIA J B, BERTHOD M. Extension of phase correlation to subpixel registration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(3): 188-200. DOI: 10.1109/83.988953.
- [8] TONG X H, YE Z, XU Y S, et al. Image registration with Fourier-based image correlation: a comprehensive review of developments and applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(10): 4062-4081. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2937690.
- [9] REN J C, JIANG J M, VLACHOS T. High-accuracy sub-pixel motion estimation from noisy images in Fourier domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(5): 1379-1384. DOI: 10.1109/TIP.2009.2039056.

作者简介:

陈思摇 女, (1996-), 硕士研究生. 研究方向为图像处理和机器视觉.

伍世虔(通讯作者) 男, (1964-), 博士, 教授. 研究方向为机器视觉、机器学习、智能机器人及公共安全与视频技术. Email: shiqian.wu@wust.edu.cn