

# 基于 MFC+HALCON 图像识别 Mark 圆的检测方法

李泽峰，欧阳八生\*

(南华大学 机械工程学院， 衡阳 421000)

**摘要：**为了解决传统印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)中定位标识圆（以下简称 Mark 圆）的检测精度和准确率不高的问题，采用了曲线拟合及优化拟合算法改善 Mark 圆检测方式并进行了理论分析，通过使用微软基础类库（Microsoft Foundation Classes, MFC）嵌入标准的机器视觉算法包 HALCON 的方法搭建检测平台进行实验验证，结果表明，该方法检测成功率可达 97%，检测精度在 0.3 pixel 以下，检测时间小于 100ms，解决了传统 PCB 中 Mark 圆精度不高的问题，同时大量测试数据显示在图像发生平移、旋转、缩放的环境下仍能保证较好的检测效果，该研究对实际 PCB 生产检测具有一定借鉴意义。

**关键词：**图像处理；Mark 检测；MFC 嵌入 HALCON；曲线拟合；优化拟合；激光加工

中图分类号：TP317.4；TN247 文献标志码：A

## Image recognition Mark circle detection scheme based on MFC+HALCON technology

LI Zefeng, OUYANG Basheng\*

(College of Mechanical Engineering, The University of South China, Hengyang Hunan 421000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low detection accuracy of mark circle in traditional printed circuit board (PCB), the curve fitting and optimization fitting algorithm are used to improve the mark circle detection mode, and the theoretical analysis is carried out. And the test platform is built by using Microsoft Foundation classes (MFC) to embed the standard machine vision algorithm package Halcon for experimental verification. The results showed that the success rate of the method was 97%, the detection accuracy was less than 0.3 pixel and the detection time was less than 100ms. It solved the problem of low accuracy of mark circle in traditional PCB. At the same time, a large number of test data showed that it could still ensure a good detection effect in the environment where the image was panned, rotated, zoomed. This research has certain reference significance to the actual PCB production detection.

**Keywords:** image procession; Mark detection; MFC embedded in HALCON; curve fitting; optimization fit; laser processing

## 引言

随着中国制造2025的提出，各行业不断蓬勃发展，电子行业印刷电路板(Printed Circuit

Board, PCB)上元器件同样朝着小型化、精密化、集成化方向发展,对PCB的加工精度要求越来越高。PCB上的定位标识圆(以下简称Mark圆)及圆心坐标是其加工的定位标识,又称为基准点,在加工前需要精确识别PCB上的Mark圆及圆心坐标,以进行准确的加工定位<sup>[1-3]</sup>。目前圆的常见检测方法包括:模板匹配、霍夫(Hough)变换和曲线拟合等。

对模板匹配法的研究中,WANG<sup>[4]</sup>、DING<sup>[5]</sup>等人提出基于特征点匹配的模板匹配方法,前者是采用Oriented FAST and Rotated BRIEF(ORB)算法、暴风(Brute Force, BF)算法结合运动统计模型(Grid-based Motion Statistics, GMS)算法,后者利用ORB算法和最大相关熵准则(maximum comentropy criterion, MCC)交叉检验的方式进行模板匹配,虽然这两种方法相对于传统模板匹配方式有了较大优化改进,但是针对于PCB中Mark圆检测,当Mark圆明显变化或者背景干扰大时,检测精度有限。此外,采用Hough变换方法进行Mark圆检测精度高、抗噪能力强,但由于采用三维累加器,且每维数据长度很大,存在计算量大、占用内存多等缺陷,同时此方法若要继续提高精度,则累加器每维数据长度成倍增加,运算量呈指数三次方上升<sup>[6-7]</sup>,难以满足PCB快速生产加工的需要。

本文旨在改善传统的PCB中Mark圆识别精度不高的问题,使用计算机计算速度较快的曲线拟合的方式进行Mark圆检测,同时改进标准的机器视觉算法包HALCON中圆拟合算子,提高Mark圆拟合精度。且能在检测图像发生旋转、平移、缩放等情况下使用,鲁棒性好。使用微软基础类库(Microsoft Foundation Classes, MFC)嵌入HALCON的方式搭建检测平台,该平台可继承HALCON的检测功能,同时可根据不同种类Mark圆保存或加载与之匹配的检测配置,方便、快捷。满足实际PCB加工中多样的检测需求。

## 1 曲线拟合检测Mark圆

### 1.1 圆曲线拟合识别的优势

WANG<sup>[4]</sup>、DING<sup>[5]</sup>提出的基于特征点匹配的模板匹配方法,这两种方法主要适用于图像整体特征的准确匹配,如人脸识别等领域,区别是采用了不同的统计方式剔除错误的特征点,具有较好的鲁棒性,识别成功率较高,但是运用于精度较高的PCB中静态Mark圆识别,由此产生的Mark圆精度问题无法得到有效保证。其次Hough变换方式受计算机本身配置影响较高,且即使不断优化也无法达到或超越曲线拟合的计算速度<sup>[6]</sup>,本身不适用于大批量工业化生产PCB中Mark圆检测。文中曲线拟合检测方法是寻找图像Mark圆的边缘,通过一系列的边缘像素点和圆拟合方程计算得到最接近实际的Mark圆,基本不受图像缩放,平移,旋转的影响,同时计算速度较快,精度较高,且对电脑配置要求不高,适用于大批量工业化生产。

### 1.2 圆曲线拟合准则

圆是一种特殊的二元二次方程,故可用数学形式表现,其方程一般形式为

$$x^2 - 2a_1x + y^2 - 2a_2y + a_3 = 0 \quad (1)$$

式中:( $a_1, a_2$ )为圆心,  $r$ 为半径,  $r = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 - a_3}$ 。

确定了圆的圆心  $(a_1, a_2)$  和半径  $r$ ，就可以得到唯一确定圆，在圆曲线拟合中，已知圆曲线上系列测点  $z_i (x_i, y_i) (i=1,2,3\dots m)$ ，该点对应的圆曲线拟合点为  $z_i^* (x_i^*, y_i^*)$ ，存在以下拟合准则

$$\rho = \min \sum_{i=1}^m [(x_i^* - x_i)^2 + (y_i^* - y_i)^2] \quad i=1,2,3\dots m \quad (2)$$

理想情况下，当  $\rho$  (表示距离总和) 为 0 时，圆曲线拟合点与圆上测点重合，即曲线拟合圆与真实圆完全重合，故实际拟合过程中当  $\rho$  取值越小，拟合圆越接近真实圆。该方法于图像检测圆拟合同样适用。

## 2 检测方案设计及图像预处理

HALCON 是德国 MVtec 公司研发的一套完善的标准机器视觉算法包，包含一千多个图像处理算子，能适用于各种操作系统，同时具有百余种工业相机和图像采集卡的接口，拥有广泛的机器视觉集成开发环境，但是 HALCON 单独作为检测软件使用局限性较大，一般需要把 HALCON 中的视觉算法库嵌入到实际检测软件中使用，才能满足多样的检测功能。本文将 HALCON 嵌入 MFC 中，进行 Mark 圆识别检测和优化拟合，以满足 PCB 的高精度加工要求。

### 2.1 HALCON 配置及检测方案设计

首先制作一个包含 HALCON<sup>[8-9]</sup> 函数库信息的属性项目表，该属性表中添加包含 HALCON 算子的库目录、包含目录、附加依赖项等信息，然后在 MFC 的开发环境（操作系统：Window7 x86，内存 4g）中导入该属性表，即可正常调用 HALCON 函数库的算子。然后通过激光加工平台上的电荷耦合器件（charge coupled device, CCD）相机拍摄图像信息，再传递给文中设计的含 HALCON 函数库的 MFC 模块对图像进行检测和处理，得到所需的 Mark 圆相关信息后再和激光控制平台实时通讯，从而实现激光加工前的基准精确定位，检测流程图如图 1 所示。

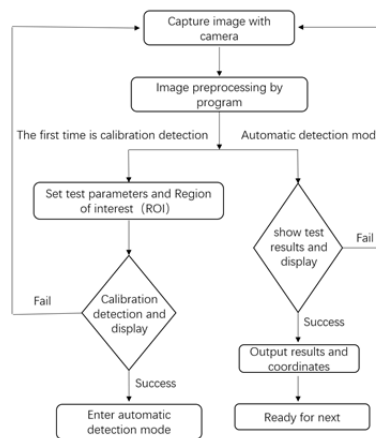


图 1 检测流程图 Fig.1 Flow chart of detection

### 2.2 图像清晰度评价和图像预处理

图像处理与检测首先要求图像清晰，图像模糊对检测的效果和精度影响很大，通过查阅清晰度评价相关文献，得知本方法中 Mark 圆的检测属于灰度图像边缘检测，其主要影响图像清晰度<sup>[10-12]</sup>的噪声是椒盐噪声，故文中 MFC 模块直接调用 HALCON 的 Brenner 函数对图像清晰度进行评价。当采集到清晰图像后，文中 MFC 模块调用 HALCON 算子来完成图像采集和预处理<sup>[13-15]</sup>，如 read-image 算子和 get-image-size 算子组合获取图像及其尺寸信息，rgb1-to-gray 算子将 RGB 图像转化为灰度图像，draw-rectangle1 算子和 gen-rectangle1 算子组合可人机交互选择合适的感兴趣区域（region of interest，ROI）。

### 3 工件Mark圆的检测及优化拟合

本方法对Mark圆的检测包括两个步骤：Mark圆的检测及原始曲线拟合、优化拟合，详细步骤如下。

#### 3.1 Mark 圆的检测及原始曲线拟合

首先使用 Robert 算子进行图像边缘过滤，去除无关的噪声，使图像边缘变得更加容易识别，Robert 算子过滤前后图片效果见图 2，然后利用 edges\_sub\_pix 和 canny 算子进行边缘检测，筛选出所有的边缘，接着利用轮廓分割算子 segment\_contours\_xld 将轮廓分割为直线或者圆，再利用分割后轮廓的全局属性 cont-approx 识别出所有的圆弧，利用 fit\_circle\_contour\_xld 算子拟合圆弧轮廓，同时添加筛选条件，最后通过 gen\_circle\_contour\_xld 算子重绘生成符合条件的拟合圆，并展示在图像中<sup>[16-18]</sup>。

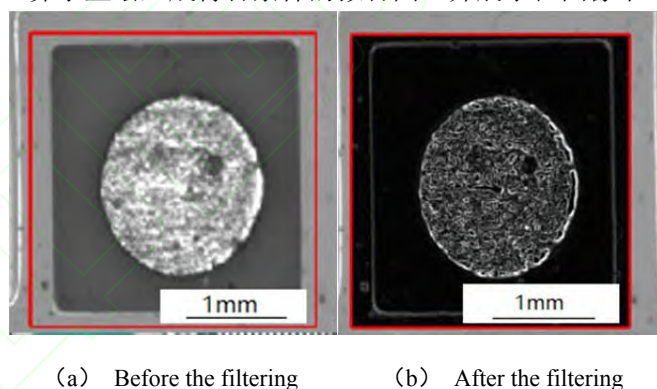


图 2 Robert 算子过滤前后 ROI 区域 Mark 点对比图 Fig. 2 Comparison of images of a Mark in the ROI region before and after the filtering process with a Robert's operator

上述边缘检测中选用的 canny 算子<sup>[19-20]</sup>只是单一的检测像素点的灰度等级，对边缘的识别方式是逐一跟踪可能存在的边缘像素点，其检测结果从微观上看是一个不规则的近似圆或者圆弧的像素点集合，因此该集合的中心，难以准确确定，需要进一步对检测信息进行拟合，再进行圆孔中心检测。文中检测圆的拟合算法是依据圆曲线拟合的思想，将轮廓上点到拟合圆心的距离的平方进行求和，根据最小二乘准则，当  $\rho$  最小时，得到的对应点集合即为需要的圆孔轮廓区域。拟合函数见公式（3），

$$\rho = \sum_{i=0}^n \left[ \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - r \right]^2 \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为距离总和(单位: pixel);  $(a, b)$  为圆心点的坐标;  $r$  为圆的半径(单位: pixel);  $(x_i, y_i)$  为圆孔轮廓上点的坐标;  $n$  为轮廓上像素点的总数量。

### 3.2 优化拟合

在实际情况下, 由于自身及环境各种因素的综合影响, 利用 HALCON 算法生成的拟合圆信息不唯一, 则产生的拟合圆心坐标也不唯一, 因此会对 Mark 圆的位置识别精度造成一定的影响, 不能满足实际需要, 根据最小二乘法和迭代法圆曲线拟合的原则<sup>[21]</sup>, 本文在 HALCON 拟合圆算法的基础上, 添加了优化拟合圆坐标的算法, 达到了较高的识别精度。

其优化拟合过程是: 设平面圆的标准方程式如下:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (4)$$

式子中参数  $a$ 、 $b$  分别为圆心坐标, 参数  $r$  为圆的半径。首先记录原始拟合圆产生的  $a$ 、 $b$ 、 $r$  数据, 根据平均值法分别求出均值  $a^0$ 、 $b^0$ 、 $r^0$ , 以该值生成标准圆, 然后利用间接平差的原理, 令

$$\hat{a} = a^0 + \delta \times a; \quad \hat{b} = b^0 + \delta \times b; \quad \hat{r} = r^0 + \delta \times r$$

(5)

式中  $\hat{a}$  为待求参数,  $a^0$  为待求参数近似值, 其中  $\delta$  为待求参数的改正补偿系数。

设优化拟合前(原始拟合生成了  $n$  个拟合半径)和拟合后(总会有且只有 1 个)半径差值为  $d_i$ , 则

$$d_i^2 = (\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - r)^2 \quad (6)$$

依据最小二乘准则, 应使得  $\sum (d_i - r)^2$  取最小, 即

$$\min(\sum (d_i - r)^2) \quad (7)$$

设检测生成的原始拟合圆个数为  $n$  ( $n \geq 1$ ), 并将  $d_i$  作为观测对象, 则  $\hat{d}_i$  的平差值方程为

$$\hat{d}_i = d_i + \varepsilon_i = \sqrt{(x_i - \hat{a})^2 + (y_i - \hat{b})^2} - \hat{r} \quad (8)$$

将上式按照泰勒公式展开得

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta x_i^0}{s_i^0} \times \delta \times a - \frac{\Delta y_i^0}{s_i^0} \times \delta \times b - \delta \times r - l_i \quad (9)$$

式中

$$\Delta x_i^0 = x_i - a^0, \quad \Delta y_i^0 = y_i - b^0, \quad s_i^0 = \sqrt{(x_i - a^0)^2 + (y_i - b^0)^2}, \quad l_i = r^0 - s_i^0$$



虽然原始拟合圆心坐标(a, b)不精确,但误差较小。这样便可以将圆心计算范围限制在(a, b)附近,大大减少了无效计算,为了避免拟合过程出现精度不高的问题,引入迭代法,迭代时,为了提高收敛速度,设置迭代终止条件

$$\delta=\left|\frac{X_n-X_{n-1}}{X_n}\right|\leqslant 1\times 10^{-5} \tag{10}$$

其中  $X$  代表 a、b、r。

采用该优化算法后,得到一个以 a、b、r 数据重绘的拟合圆,同时输出重绘后的坐标,该优化拟合圆更接近实际圆,从而提高检测精度。

#### 4 实验方法及结果分析

##### 4.1 标准 CAD 图圆心检测

为验证优化算法与原始拟合算法的位置精度,特制作一张带有标准圆及圆心的 CAD 样板图,并转化为图片格式,画图软件显示圆心坐标为 (586,372),如图 3 所示;为方便分析对比,将图像检测程序写入到同一个程序界面,其检测结果如图 4 所示,图中左侧显示区域表示直接利用 HALCON 算法拟合的圆,用“红色圆”显示,输出圆心信息显示为“检测圆信息”;右侧显示区域表示优化拟合计算之后拟合的圆,用“绿色圆”显示,输出圆心信息为“拟合圆信息”。

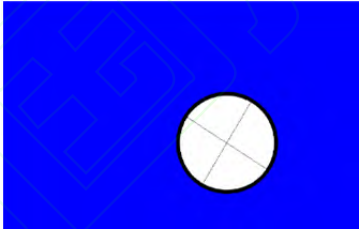


图 3 标准 CAD 圆图像 Fig.3 Standard CAD drawing

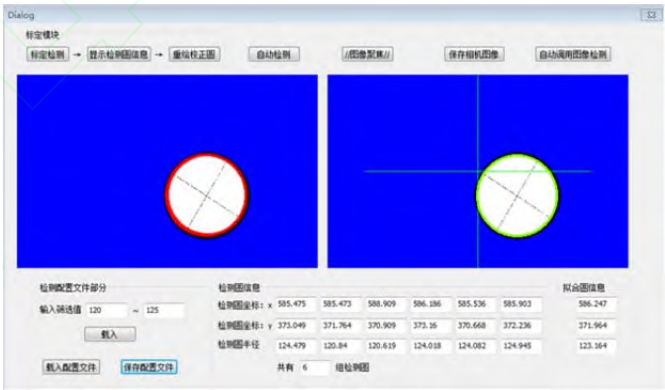


图 4 标准模板检测图 Fig.4 Standard inspection chart

下表 1 为优化前后圆心检测数据对比。可以发现,优化处理前拟合出来的圆心坐标与标准坐标位置偏差较大,最小偏差 0.255pixel,最大偏差 3.143pixel;经过优化拟合之后输出的

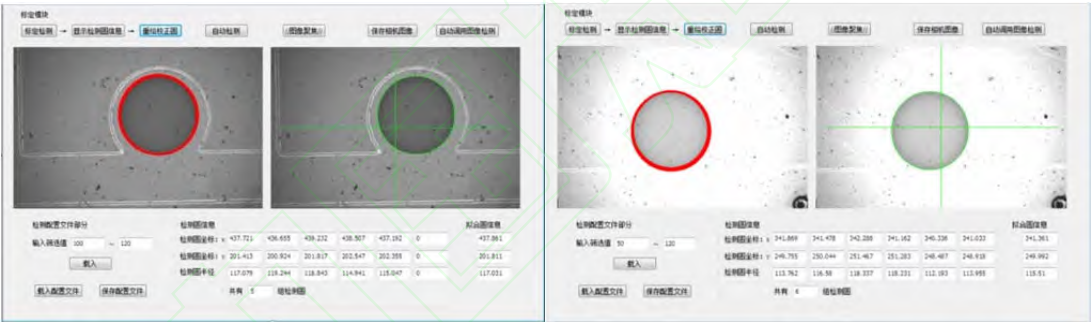
圆心坐标与标准坐标偏差较小, 精度 $\leq 0.3\text{pixel}$ , 表明检测的精度得到提高; 一方面, 通过限制 ROI 区域的检测范围, 另一方面, 重新拟合迭代数据计算量增加不多且和图片显示分属不同的线程, 因此在软件界面显示优化前后处理时间没有明显变化。

表 1 优化前后圆心检测数据对比 Table 1 Data comparison of circle center detection before and after optimization

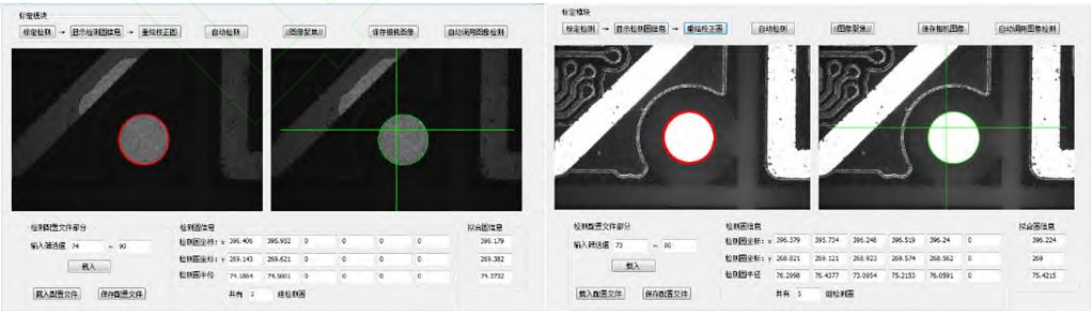
	Detection circle.1	Detection circle.2	Detection circle.3	Detection circle.4	Detection circle.5	Detection circle.6	Fitting circle	Standard coordinates
Coordinate X (pixel)	585.475	585.473	588.909	586.186	585.536	585.903	586.247	586
Coordinate Y (pixel)	373.049	371.764	370.909	373.160	370.668	372.236	371.964	372
Center offset (pixel)	1.173	0.577	3.143	1.175	1.411	0.255	0.250	0

4.2 实际铝基板 PCB Mark 圆心检测

为了验证本方法的实用性, 特选用两种常见的铝基板 PCB, 在不同光源条件下进行测试, 其产品测试效果如图 5 所示。



(a) Aluminum substrate of XCZ-86101815 (dark light source) (b) Aluminum substrate of XCZ-86101815 (light source)



(c) Aluminum substrate of LED(dark light source) (d) Aluminum substrate of LED( light source)

图 5 两种常见的铝基板 PCB 在不同光源条件下检测效果对比图 Fig.5 Comparison of the detection effects

of two common aluminum substrate PCBs under different light sources

从图 5 可以发现, XCZ-86101815 铝基板 PCB 拟合圆心坐标偏差范围为: 暗光源下为 0.23~0.29 pixel, 亮光源下为 0.11~0.24 pixel; LED 铝基板 PCB 拟合圆心坐标偏差范围为: 暗光源下

为 0.22~0.27 pixel，亮光源下为 0.13~0.22 pixel。结果表明：两种铝基板拟合圆心坐标总体检测精度 $\leq 0.3\text{pixel}$ ，且在亮光源条件下测试效果更好。

4.3 批量实际检测统计分析

选取 100 组 XCZ-86101815 型号铝基板 PCB，50 组 FR-4 玻纤 PCB，80 组 LED 铝基板 PCB 利用文中的 MFC 模块在不同环境下测试，统计检测结果情况如表 2 至表 3 所示。结果表明：检测成功率可达 97%，检测精度 $\leq 0.3\text{pixel}$ ，检测时间 $<100\text{ms}$ 。实际检测说明本文开发的 MFC 程序模块能有效地检测并识别铝基板 PCB 上的 Mark 圆，并适时输出坐标信息，完全能满足实际加工需要。

表 2 批量检测统计情况 Table 2 Statistics of batch detection

model	Test number ( group )	succeed ( group )	fail ( group )	Success rate ( % )	Range of deviation ( pixel )
Aluminum substrate PCB of XCZ-86101815	100	97	3	97	0.08-0.24
FR-4 glass fiber PCB	50	49	1	98	0.18-0.30
Aluminum substrate PCB of LED	80	79	1	98.75	0.12-0.26

表 3 检测时间统计 Table3 Statistics of detection time

Test Time (ms)	<25	25~50	50~75	75~100	>100
First Test number :100	4	35	44	17	0
Second Test number : 50	3	11	23	13	0
Third Test number :80	3	18	37	22	0

实际检测结果也有少量失败，产生误检的原因主要有：a、光源强度不匹配，不同产品表面对光敏感程度不同，相机采集图像过程中需要适时调整，如图 6 表示因光源亮度过低导致检测失败；b、平台运动不到位，导致检测视野中缺少有效的检测部位，造成软件无法识别而误检。后期解决方法可考虑添加检测失败判定，当检测失败或产生误检时，软件报警提醒并提示进入人工检测界面，实现人工辅助检测。



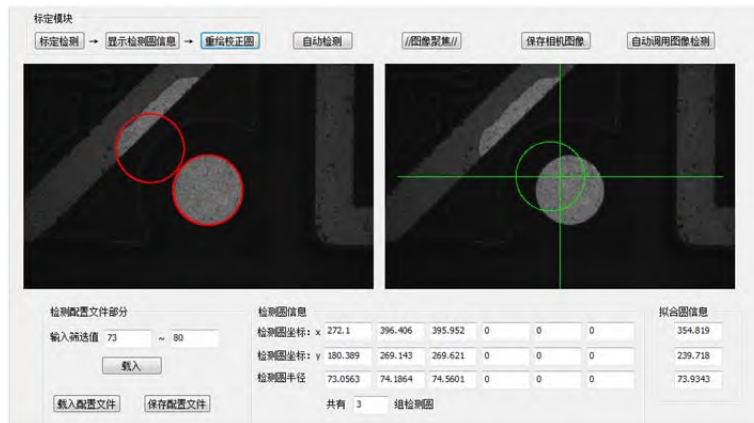


图 6 误检图片示例 Fig.6 Example of mistaken image

## 5 结论

文中通过在 MFC 中嵌入 HALCON 函数库方式搭建检测平台，开发的新型图像识别和检测工具模块，既继承了 HALCON 的图像检测功能，能在图像发生平移、旋转、缩放的环境下使用，同时实验测试表明：该研究检测成功率可达 97%，检测精度 $\leq 0.3\text{pixel}$ ，检测时间 $< 100\text{ms}$ 。能满足目前 PCB 生产加工行业的功能需要。其次，平台可根据不同种类 Mark 圆保存或加载与之匹配的检测配置，方便、快捷，对实际 PCB 生产或检测具有一定借鉴意义。

## 参考文献

- [1] QIAO N Sh, YE Y T, MO Ch H, *et al.* Method for the Detection of Concentric Circles of Photoelectric Image of Circular Hole in Printed Circuit Board[J]. ACTA OPTICA SINICA,2010,30(1):75-78(in Chinese)
- [2] XIE G W, ZHONG Zh Zh, ZHONG Sh K, *et al.* Research on Positioning Method of Circular Mark in PCB Based on Machine Vision[J]. Computer Knowledge and Technolgy,2013,9(32):7340-7344(in Chinese).
- [3] DONG M. Object Multi-Mark Recognition Algorithm Based on Machine Learning and Image Processing[J]. Computer & Digital Engineering,2016,44(12):2488-2492(in Chinese).
- [4] WANG M H, CHEN J B. A Fast and Robust Template Matching Algorithm[J]. Industrial control computer,2019,32(3):45-48(in Chinese).
- [5] DING X Y, WANG T. Image template matching algorithm based on cross-check ORB and MCC[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2019,33(5):39-45(in Chinese).
- [6] BAI C B , QI Ch , SONG F M, *et al.* Fast detection of circular pcb mark using Hough transform[J]. Opto-Electronic Engineering,2005,32(9): 75-78(in Chinese).
- [7] XIONG G J, MA Sh Y, LIU R Zh. Fast Precise Positioning of Circular Mark in PCB Inspection[J]. Computer Engineering,2012,38(11):211-216(in Chinese).

- [8] XIAO J H, XIANG X J. Design of measurement system for steel ruler end face based on Halcon[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology,2018,30(6):488-495(in Chinese).
- [9] GONG P L, LV X Sh. Skills on Bar Code Recognition Based on Halcon[J]. Computer and modernization.2013,1(4):73-76(in Chinese).
- [10] LI X, JIANG M Sh. A comparison of sharpness functions based on microscopes[J]. Optical Instruments,2018,40(1):28-38 (in Chinese).
- [11] GAO Sh Sh, WANG Y J, JIN W Q, *et al.* Objective image sharpness metric based on perceptual contrast[J]. Optical Techniques,2015,5:396-399(in Chinese)
- [12] Braga-Neto, Ulisses, Goutsias, John. Object-based image analysis using multiscale connectivity[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2005,27(6):892-907.
- [13] MA Y F. Research on image processing technology applied to infrared and lidar compound system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2012: 11-36(in Chinese).
- [14] ZENG J Q, WANG J, CHEN Y, *et al.* Multi-color-image compression and encryption by using discrete wavelet transform in Fresnel transform domain[J]. Laser Technology, 2018, 42(6): 733-738(in Chinese).
- [15] ZHOU, Y. T. Multi-sensor image fusion[C]. //Proceedings of IEEE 2001 International Conference on Image Processing, New York:IEEE,2001:846-849.
- [16] LI Y, QIAO B, LU Y P. Circle fitting algorithm based on clustering[J]. Computer Applications, 2013, 33(22) :206-208(in Chinese)
- [17] SonkaM, Hlavac V, Ceng R B D M. Image processing ,analysis and machine vision[M]. Belmont:Thomson Learning,2008: 685-686
- [18] FU Z M, WANG J W, ZHANG S H, *et al.* Workpiece Size and Defect Detection in Metal Forming Based on HALCON[J]. Tool technology, 2019,53(2):134-137 (in Chinese)
- [19] SHI Y L, MEI L L. Edge detection technologies research based on PCB locating hole[J]. Printed Circuit Information,2012, (11):53-57(in Chinese).
- [20] XU Y L, MA Y. An Edge Detection Algorithm Based on Improved Canny Operator[J]. Journal of Fujian Computer,2019,35(5):5-7(in Chinese).
- [21] CHEN M J, FANG Y M, CHEN J. Fitting of circular curve based on least square method and iterative method[J]. Science of Surveying and Mapping,2016,41(1):194-197(in Chinese).