

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2002901

基于改进 Harris 角点检测的芯片图像快速校正*

周 伟 巢 渊 李 龑 李兴成
(江苏理工学院 机械工程学院 常州 213001)

摘 要:以方形扁平无引脚封装(QFN)芯片为实验对象,针对芯片在封装缺陷视觉检测过程中的图像倾斜问题,提出一种半导体芯片图像快速校正方法。首先,提出改进 Harris 角点检测算法,结合多边形逼近方法提取目标轮廓拐角顶点;其次,通过最小二乘法对最长边顶点进行直线拟合;最后,根据直线拟合结果进行图像校正。实验结果表明,与传统 Hough 变换、最小外接矩法以及傅里叶变换校正方法相比,该方法获取的倾斜角度准确度更高,运行时间少于其 1/5,速度更快且效率更高。

关键词: Harris 角点检测;多边形逼近;最小二乘法;图像校正

中图分类号: TP391; TN302 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 8030

Fast correction of chip image based on improved Harris corner detection

Zhou Wei Chao Yuan Li Yan Li Xingcheng
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: Taking the quad flat no-lead (QFN) package chip as the experimental object, proposes a fast image correction method for the semiconductor chip to solve the problem of the chip's image tilt during visual detection of packaging defects. Firstly, an improved Harris corner detection algorithm is proposed to extract the corner vertices of the target contour in combination with the polygon approximation method; secondly, the line fitting on the vertex of the longest edge is conducted by the least square method; finally, the image correction is carried out according to the line fitting results. The experimental results show as follows: compared with the traditional Hough transform, the minimum enclosing rectangle, and the Fourier transform correction method, the tilt angle obtained by the proposed method is more accurate, and the running time is less than one fifth of the above-mentioned traditional methods. Namely, it owns faster speed and higher efficiency.

Keywords: Harris corner detection; polygon approximation; least square method; image correction

0 引 言

半导体芯片,是将一定数量的半导体元器件封装入载体(如金属、塑料、玻璃或陶瓷等不同材料),实现某种特定功能的电路芯片^[1]。随着信息技术的高速发展,半导体芯片的应用领域越来越广,需求量也持续增加,对半导体芯片的封装与检测质量也提出了更高的要求。

在进行芯片封装缺陷视觉检测前,需要对芯片图像进行旋转校正与优化,以提高封装缺陷视觉检测效

率。图像校正^[2]在图像处理中占有重要的地位,常用的图像校正方法有霍夫(Hough)变换^[3]、最小外接矩法^[4]、傅里叶变换校正图像等^[5]。传统 Hough 变换,具有存储空间大、计算时间长、可靠性差等不足^[6]。最小外接矩法需要将每次选取的旋转角度的间隔尽可能地减小,才能得到较精确的最小外接矩形,但其旋转次数及相应的计算时间随间隔反比例增加^[7]。基于傅里叶变换校正图像是将图像从空域转换到频域对频谱图像进行校正,然后再将校正好的频谱图像转换到空域,这种校正方法需进行傅里叶正变换和逆变换,耗时长、效率低且实用性不强^[8]。在图像校正算法不断改进与优



化过程中,于明等^[9]采用自适应动态阈值的 Kirsch 算子提取水平边缘,融合 Hough 变换与 Radon 变换对车牌图像进行倾斜校正处理,提高了运算速度,但校正正确率有待进一步提高。王少伟等^[10]针对我国小型车蓝色白字的车牌提出一种基于 RGB 色彩空间与 Hough 变换的车牌校正定位算法,降低了后期车牌识别难度,但对车牌图像质量要求较高。刘旭等^[11]分析连续频率变化的条纹图像序列,构建像素点位置与像素斜率的转换模型,利用光栅图像倾斜角度与像素斜率变化关系实现倾斜校正,准确率较高,但只能检测 $[-90^{\circ}, 90^{\circ}]$ 范围内的倾斜角度。

角点是二维图像亮度变化剧烈的点,或者是图像边缘曲线上曲率最大的点。角点在保留图像图形重要特征的同时,可以有效地减少信息的数据量,使其信息含量很高,有效地提高计算的速度。目前角点检测方法^[12-13]主要有如下两种:1) 基于图像边缘特征的角点检测方法^[14],该算法虽然检测性能相对比较稳定,但是它对边缘轮廓的局部变化敏感,并且不能给予一个确切的门限去提取角点;2) 基于图像灰度的角点检测方法^[15],该算法计算简单且时间复杂度低,但会导致定位角点不准确,而且算法对噪声、孤立点较敏感。Harris 角点检测算法由于其计算简单、易于实现的特点,得到广泛的关注与研究应用^[16-17],但依然存在如下不足:1) 需要人工选取阈值,易产生较多伪角点;2) 运行时间较长^[18]。

针对上述问题,本文提出一种基于改进 Harris 角点检测的半导体芯片图像快速校正方法:利用多边形逼近方法提取芯片引脚图像的目标轮廓,改进 Harris 角点检测算法,提取目标轮廓拐角处顶点,通过最小二乘法拟合直线,将直线作为角度识别方向,进行半导体芯片图像的倾斜角度校正。将本文算法与传统 Hough 变换、最小外接矩法以及傅里叶变换校正方法进行倾斜校正效果、倾斜角度准确性、计算时间等方面的实验分析与对比,以验证本文算法的有效性。

1 图像预处理与多边形逼近

1.1 图像预处理

由于半导体芯片在封装过程中存在尺寸公差,因此制造料盘承载口时会留有一定余量,导致芯片放置于承载口时存在一定程度的倾斜,如图 1 所示。

本文以方形扁平无引脚封装(quad flat no-lead, QFN)芯片引脚图像为研究对象,如图 2(a)所示。工控机采集的图像存在一定噪声,需要先对图像进行滤波处理。高斯滤波是一种根据高斯函数的形状来选择权值的

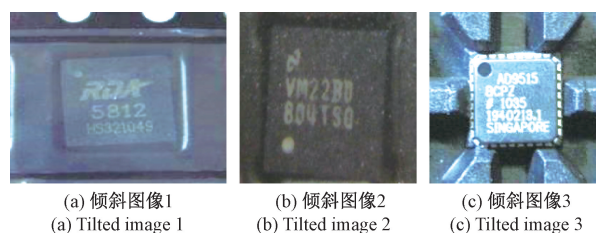


图 1 芯片倾斜示例

Fig. 1 Examples of tilt chips

线性平滑滤波器,可以有效地抑制服从正态分布的噪声^[19],故本文选用高斯滤波对芯片引脚图像进行处理,如图 2(b)所示。最大类间方差法是 1979 年由日本学者大津(Otsu)提出的一种自适应阈值确定的方法,又称大津法、OTSU 算法。该方法是基于全局的二值化算法,根据图像的灰度特性将图像分为前景和背景两个部分,类间方差值作为描述图像背景和背景差异的依据,方差值越大,则目标和背景的差异越大,图像的分割效果越好^[20]。由于该算法计算简单快速,不受图像亮度和对比度的影响,故本文利用最大类间方差法对芯片引脚图像进行二值化处理,如图 2(c)所示。

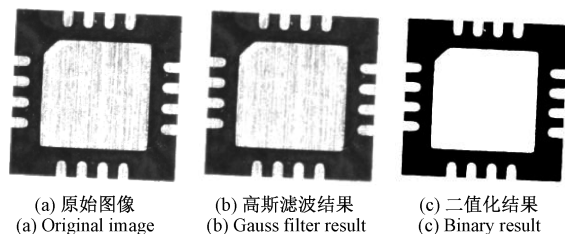


图 2 芯片引脚图像预处理结果

Fig. 2 Preprocessing results of the chip pin image

1.2 多边形逼近

将处理后的图像进行 Canny 边缘检测^[21-22],如图 3(a)所示。Canny 边缘检测的基本思想是在包含目标和背景的数字图像中,忽略背景和内部纹理以及噪声影响,采用非极值抑制技术进行处理得到轮廓边缘图像。通过多边形逼近方法^[23],提取出图像中心焊盘轮廓,滤除掉其余轮廓部分,如图 3(b)所示,将其作为后续处理中的目标轮廓。多边形逼近方法步骤如下。

1) 从目标轮廓中挑出两个最远的点,进行连接。

2) 接着从目标轮廓上寻找一个离线段距离最近的点,将该点加入逼近后的新轮廓,即连接这 3 个点形成的三角形作为轮廓。

3) 选择三角形的任意一条边出发,进行步骤 2),将距离最远点加入新轮廓,不断迭代,直至满足输出的精度要求。

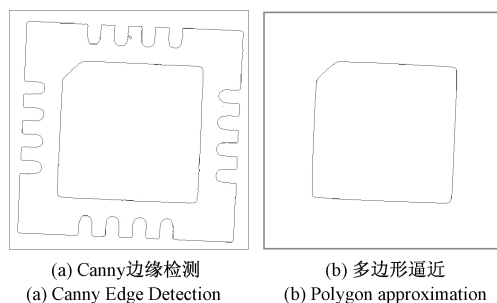


图 3 轮廓检测

Fig. 3 Contour detection

2 改进 Harris 角点检测算法

2.1 Harris 角点检测算法

Harris 角点检测算法由 Harris 等于 1988 年提出, Harris 角点检测用一阶梯度来描述灰度值的变化,依据灰度变化进行角点识别。对于一幅图像,在像素点 (x, y) 处平移 (u, v) 后的自相关函数可定义为:

$$E(u, v) = \sum_{x, y} \omega(x, y) [I(x + u, y + v) - I(x, y)]^2 \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 为图像的灰度函数; $\omega(x, y)$ 是以像素点 (x, y) 为中心的窗口加权函数,既可是常数,也可是高斯加权

函数 $\omega(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}$, σ 为标准差。利用泰勒级数将自相关函数展开得:

$$E(u, v) \cong \sum_{x, y} \omega(x, y) [I_x u + I_y v]^2 \cong [u, v] \mathbf{M} [u, v]^T \quad (2)$$

式中: I_x 为 x 方向的差分; I_y 为 y 方向的差分。 \mathbf{M} 为实对

称矩阵,且 $\mathbf{M} = \omega(x, y) \otimes \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}$ 。矩阵 \mathbf{M} 反映了

图像在像素点上的形状,矩阵 \mathbf{M} 的特征值可以表达像素点突出程度,但 Harris 给出的角点判别方法并不需要计算具体特征值,而是计算角点响应值 R 来判断角点,公式为:

$$R = \det \mathbf{M} - k(\text{trace} \mathbf{M})^2 \quad (3)$$

式中: $\det \mathbf{M}$ 为矩阵 \mathbf{M} 的行列式,且 $\det \mathbf{M} = \lambda_1 \lambda_2$, λ_1 、 λ_2 为矩阵 \mathbf{M} 的特征值; $\text{trace} \mathbf{M}$ 为矩阵的迹,且 $\text{trace} \mathbf{M} = \lambda_1 + \lambda_2$; k 为常数,取值范围为 0.04~0.06。一般情况下,当角点响应值 R 取局部极大值且 R 大于给定阈值时的位置即为角点。

2.2 改进 Harris 角点检测,提取轮廓顶点

为了进一步提高 Harris 角点检测的效率,使之更适合后续的目标轮廓检测,本文提出一种改进 Harris 角点检测算法,消除明显不属于目标轮廓拐角的角点及临近

角点,提取目标轮廓顶点,以达到减少计算量、提高计算效率的目的。

常见的角点类型有 L 型、T 型、Y 型、X 型、T 型 5 种。目标轮廓中的角点均为 L 型角点,因此在对芯片引脚图像校正过程中,直接对 L 型角点进行处理,可大幅度减少角点检测与图像校正的运算量。

1) 确定选取阈值

通常情况下,两幅黑白图像的像素灰度之差小于最大像素灰度值的 10%~15% 时,人眼是难以分辨的,故本文选取阈值 N 为:

$$N = 255 \times 12\% \approx 30 \quad (4)$$

2) 提取轮廓拐角角点

提取并保存所有角点,按顺序读取角点中的 3 点 M_{a-n} 、 M_a 、 M_{a+n} , 3 点构成一个由 3 个元素组成的模板,其中 3 点中将 M_a 作为模板中心,点的下标代表角点在所有角点中的序号。遍历所有角点,从初始值开始, M_a 确定为一个实时性操作点,取其前后序号相距 n 的两点, M_a 分别与模板中其他两点组成两条边,将两条边构成的夹角作为 M_a 点的角点响应值,如图 4 所示。

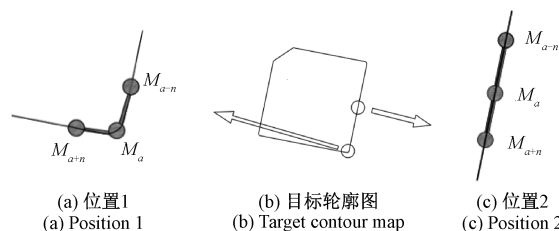


图 4 角点模板示意图

Fig. 4 Illustration of corner template

取角点中的 3 点,读取 3 点坐标,两两点可以得到 3 条线段,由点 M_a 与 M_{a-n} 的距离确定边 L_1 ,点 M_a 与 M_{a+n} 的距离确定边 L_2 ,点 M_{a-n} 与 M_{a+n} 的距离确定边 L_3 ,三边可以根据余弦定理得到 M_a 点的角度(弧度制)。

$$\cos \angle M_a = \frac{L_1^2 + L_2^2 - L_3^2}{2 \times L_1 \times L_2} \quad (5)$$

通过两条边构成的夹角,即角点响应值来判断是否保留角点。本文取角点响应值 $g = 1.5^\circ$,若点 $\angle M_a \geq 1.5^\circ$,则保存为所需要的角点,如图 4(a) 所示;反之,则去除,如图 4(c) 所示。

3) 剔除临近角点,保留轮廓顶点

提取出轮廓拐角角点后,周围可能还会存在有其他角点,也就是一个角点邻近周围可能存在着其他多个角点,增大后续图像拟合直线误拟合的几率。故为了消除这一现象,本文提出了一种剔除邻近角点的方法,取剩下的点作为轮廓拐角顶点。设图像高度为 H ,图像宽度为 W , $\text{Corner}(x, y)$ 表示在图像 (x, y) 处是否有角点,当

$Corner(x,y)=1$ 时, (x,y) 处有角点, $m\times m(m>1)$ 为以 (x,y) 为中心的矩阵, 则:

$$count = \sum_m^H \sum_m^W Corner(x,y)$$

(6)

其中, $m\leq x\leq H, m\leq y\leq W$, $count$ 指以 $m\times m$ 矩阵内的角点数目。通过实验, $m=2$ 时, 角点数目 $count=1$, 即以 (x,y) 为中心的矩阵范围有一个角点, 将其作为顶点, 并寻找出其余拐角处顶点, 以便后续图像校正处理。

3 半导体芯片引脚图像快速校正算法

3.1 算法思想

半导体芯片图像含有大量引脚与中心焊盘轮廓信息, 因此可通过拟合中心焊盘的 水平或垂直轮廓线来表示芯片角度方向, 从而获取芯片角度信息。当芯片图像发生倾斜时, 轮廓线的倾斜角度即代表芯片的倾斜角度, 可通过计算轮廓线的倾斜角度获知整幅芯片图像的倾斜角度。本文通过对 Harris 角点检测算法的改进, 提取轮廓顶点, 结合最小二乘法拟合直线, 提出一种半导体芯片引脚图像快速校正算法, 算法流程如图 5 所示。

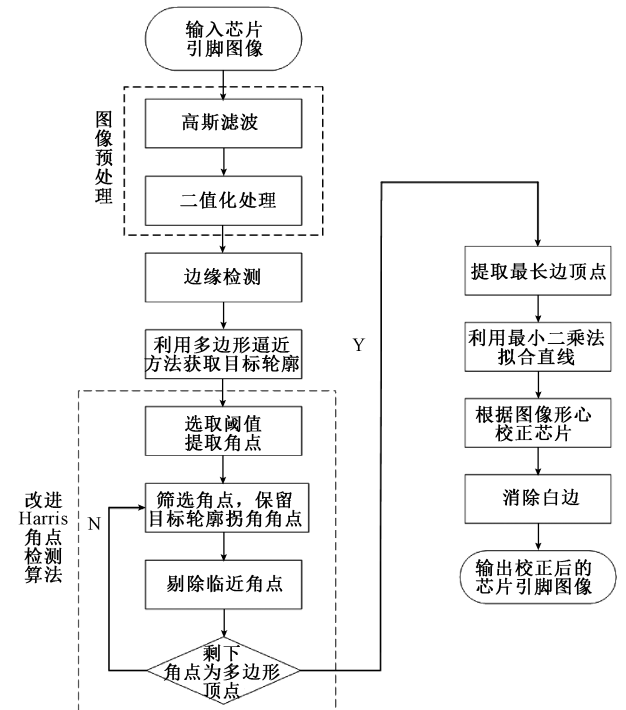


图 5 半导体芯片图像校正流程

Fig. 5 Flow chart of semiconductor chip image correction

3.2 算法步骤

1) 高斯滤波
为去除噪声, 采用 5×5 高斯滤波器与图像进行卷积, 以平滑图像, 减少边缘检测器上明显的噪声影响。

2) 二值化处理
基于对图像中背景区域和目标区域的类间方差越大分割越准确的推理, 对灰度级 $[0\sim 255]$ 进行遍历, 寻找最大方差下的灰度级阈值 T 。然后利用阈值 T 对滤波后的图像做二值化分割。

3) 边缘检测
为尽可能多的标识出实际边缘, 减少噪声产生的误报, 本文采用 Canny 边缘检测算法, 低阈值 110, 高阈值 230。

4) 多边形逼近
利用多边形逼近方法提取出芯片引脚图像中心焊盘轮廓, 滤除掉其余轮廓部分, 简化了后续环节图像处理。

5) 改进 Harris 角点检测, 提取轮廓顶点
采用提出的改进 Harris 角点检测算法, 筛选并保存目标轮廓拐角角点, 剔除临近角点, 获取目标轮廓的顶点, 提高检测效率。

6) 最小二乘法拟合直线
利用改进 Harris 角点检测算法, 获取目标轮廓的 5 个顶点。运用最小二乘法^[24], 将目标轮廓最长边的两个顶点进行直线拟合, 作为芯片引脚图像的方向, 如图 6 所示。设两个顶点坐标分别为 $p(x,y)$ 、 $q(x,y)$, 计算公式为:

$$y = ax + b$$

(7)

式中: a 和 b 分别为直线方程的斜率和截距。

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^{n-2} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n-2} x_i \sum_{i=1}^{n-2} y_i}{2 \sum_{i=1}^{n-2} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{n-2} x_i)^2}$$

(8)

$$b = \bar{y} - a\bar{x}$$

(9)

式中: \bar{x} 、 \bar{y} 分别为顶点 p 、 q 的横坐标与纵坐标的均值, $\bar{x} = \frac{p_x + q_x}{2}$, $\bar{y} = \frac{p_y + q_y}{2}$ 。

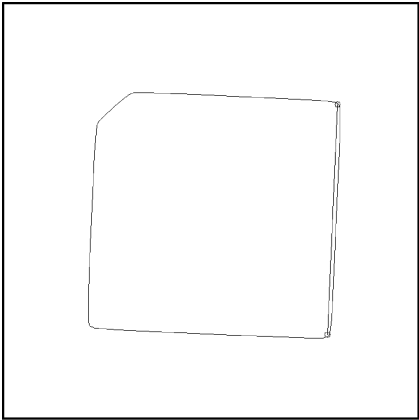


图 6 直线拟合

Fig. 6 Line fitting

7) 设定形心坐标

为了准确的校正图像,本文利用形心法确定引脚图像的中心位置,将形心坐标作为图像的旋转中心,图像左上角设为起始点坐标(0,0),右下角设为终点坐标(m,n),公式为:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n xf(x,y)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n f(x,y)} \tag{10}$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n yf(x,y)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n f(x,y)} \tag{11}$$

式中:(x_0,y_0)是形心坐标, m,n 分别为图像的行数和列数(m,n 均为 ≥ 2 的整数), $f(x,y)$ 是图像在点(x,y)处的灰度值。

8) 角度旋转

以形心坐标为图像的旋转中心,根据最小二乘法拟合出的直线,对芯片引脚图像进行角度判定,如图 7 所示,将此时芯片倾斜角度 α 与芯片在水平方向偏移值 x ,转化为简单的数学求解问题。设 OA 为形心坐标往 x 轴正方向的延长线, pq 为最小二乘法对最长边两个角点的拟合直线, $h(x,y)$ 为 pq 与 OA 的交点坐标, l 为点 p 到 h 的垂直距离,根据图中浅色线标注的直角三角形关系,有:

$$l = p_y - h_y \tag{12}$$

可求得引脚图像在水平方向偏移值 x :

$$x = p_x - h_x \tag{13}$$

则引脚图像倾斜角度 α 为:

$$\alpha = \arctan \frac{x}{l} \tag{14}$$

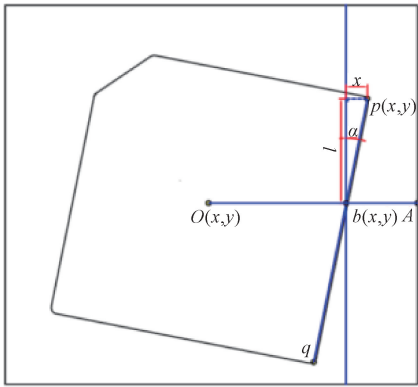


图 7 角度参数示意图

Fig. 7 Illustration of angle parameters

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

本文通过工控机采集芯片引脚图像,将本文提出的

改进 Harris 角点检测算法与传统 Harris 角点检测算法进行对比实验。实验环境为 4 核 CPU1.9 GHz、内存 4 GB、Visual Studio 2013。传统 Harris 角点检测算法结果如图 8 所示,存在较多伪角点以及角点拥簇现象,较难确定最长边顶点,从而直接影响到后续的图像校正处理。

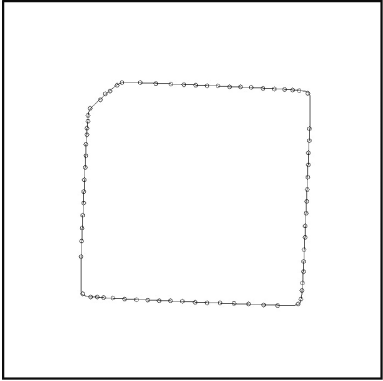


图 8 Harris 角点检测

Fig. 8 Harris corner detection

本文改进 Harris 角点检测算法的检测结果如图 9 所示,准确快速地筛选出最长边顶点,为后续的图像校正算法提高了检测效率。通过对 Harris 角点检测算法进行改进,提取出目标轮廓最长边顶点,利用最小二乘法将目标轮廓最长边的两个顶点进行直线拟合,作为芯片引脚图像的识别方向。将引脚图像形心坐标作为旋转中心,对芯片进行校正,如图 10(a)所示。最后,将旋转校正后目标区域存在的白边,通过选取连通区域长度、宽度属性进行去除,如图 10(b)所示。

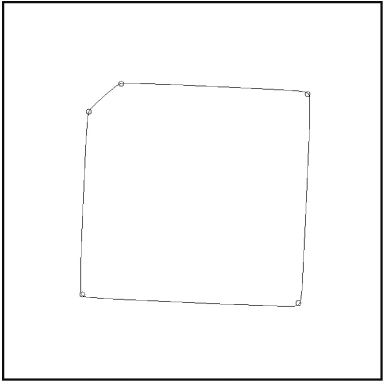


图 9 改进 Harris 角点检测

Fig. 9 Improved Harris corner detection

4.2 算法对比

选取 10 幅不同 QFN 芯片引脚图像为实验对象,将本文方法与传统 Hough 变换、最小外接矩法以及傅里叶变换校正方法进行对比。图 11 所示为其中一幅 QFN 芯片图像倾斜角度示意图,图 12 所示为上述 4 种算法检测

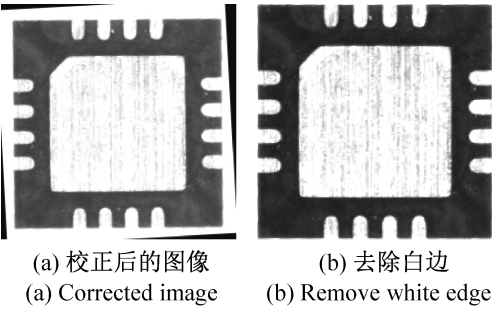


图 10 校正结果
Fig. 10 Results of correction

角度后的校正标注示意图。以校正后的芯片中心焊盘作角度检测与验证,白色框线为经不同算法得到的芯片中心焊盘部分的最小外接矩形,黑色框线为芯片中心焊盘部分的人工标注的理想外接矩形。不难发现,图 12(a)~(c)经 3 种传统算法获取的芯片中心焊盘部分最小外接矩形与人工标注的理想外接矩形相比,存在一定的角度偏差。本文算法校正后的外接矩形标注示意图如图 12(d)所示,本文算法获取的芯片中心焊盘部分最小外接矩形与人工标注的理想外接矩形接近重合,匹配度高于 3 种传统算法。表 1 列出了 4 种算法检测出的该芯片偏差角度,从表 1 可以发现,本文算法平均偏差角度为 2.072° ,低于另外 3 种传统算法平均偏差角度,因此本文算法获取倾斜角度更加准确。

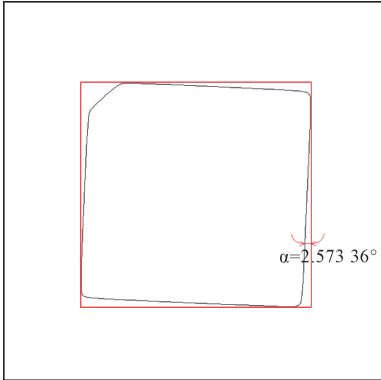


图 11 倾斜角度示意图
Fig. 11 Illustration of tilt angle

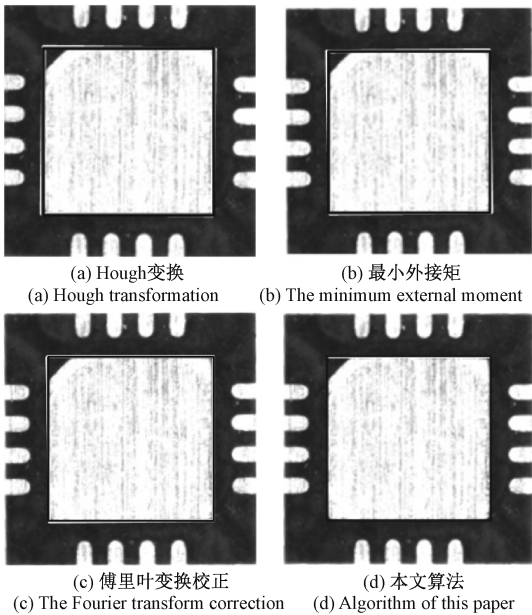


图 12 4 种算法校正标注示意图
Fig. 12 Illustration of the correction labels of the four algorithms

为了检测本文算法与传统 Hough 变换、最小外接矩法以及傅里叶变换校正方法的运行时间差异,分别对 10 幅不同 QFN 芯片引脚图像运行时间进行实验对比。表 2 列出了 4 种算法的运行时间。以图形编号 5 为例,传统 Hough 变换校正时间为 357 ms,最小外接矩法校正时间为 116 ms,傅里叶变换校正时间为 63 ms,而本文提出的算法仅用 18 ms 就完成了芯片图像校正过程。传统 Hough 变换对 10 幅芯片引脚图像校正平均时间为 412.6 ms,最小外接矩法对 10 幅芯片引脚图像校正平均时间为 125.8 ms,傅里叶变换校正方法对 10 幅芯片引脚图像校正平均时间为 64.4 ms,相对传统 Hough 变换,本文算法运行时间仅为其 1/34,相对最小外接矩法,本文算法运行时间仅为其 1/10,相对傅里叶变换校正方法,本文算法运行时间仅为其 1/5,因此本文提出的半导体芯片图像快速校正算法不仅准确度高,而且大幅地减少了运行时间,计算效率更高。

表 1 4 种算法的角度偏差
Table 1 Angle deviations of the four algorithms

	偏差角度/($^{\circ}$)										平均偏差角度/($^{\circ}$)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Hough 变换	-3.095	2.308	1.122	2.113	3.096	2.121	2.122	-3.095	-1.619	-3.083	2.377
最小外接矩法	-3.174	2.205	1.103	1.963	2.467	1.664	1.727	-3.053	-1.723	-3.128	2.221
傅里叶变换	-2.974	2.036	1.018	2.017	2.937	1.004	1.018	-3.000	-1.537	-3.214	2.076
本文算法	-3.094	2.291	0.979	1.450	2.573	1.225	1.456	-3.013	-1.605	-3.036	2.072

表 2 4 种算法的运行时间
Table 2 Running time of the four algorithms

	时间/ms										平均时间/ms
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Hough 变换	446	341	365	421	357	404	446	420	489	437	412. 6
最小外接矩法	108	112	133	124	116	132	131	134	146	122	125. 8
傅里叶变换	62	47	53	94	63	71	57	69	72	56	64. 4
本文算法	13	12	11	13	18	9	10	11	14	12	12. 3

5 结 论

本文以 QFN 封装芯片为具体研究对象,针对芯片在封装缺陷视觉检测过程中的图像倾斜问题,提出一种基于改进 Harris 角点检测的半导体芯片图像快速校正方法。首先,对芯片引脚图像进行处理,利用多边形逼近方法提取目标轮廓。其次,提出改进 Harris 角点检测算法,提取目标轮廓拐角顶点,通过最小二乘法对最长边顶点进行直线拟合。最后,以形心坐标作为定位中心,结合直线拟合结果进行图像校正。实验结果表明,与传统 Hough 变换、最小外接矩法、傅里叶变换校正方法相比,本文方法获取的倾斜角度准确度更高,运算速度更快且效率更高。本文方法目前已应用于半导体芯片封装缺陷视觉检测的图像预处理环节,并取得了较好的图像校正结果,能有效提高封装缺陷视觉检测效率。

参考文献

[1] 张步阳. 半导体芯片封装过程中视觉定位关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
ZHANG B Y. Research on key technologies of visual positioning in semiconductor chip packaging [D]. Wu han: Huazhong University of Science and Technology, 2016.

[2] 曾凡锋, 吴飞飞, 肖珂, 等. 一种快速文本图像倾斜校正方法[J]. 计算机应用与软件, 2015,32(4): 181-185.
ZENG F F, WU F F, XIAO K, et al. A fast text image tilt correction method[J]. Computer Applications And Software, 2015,32(4): 181-185.

[3] 艾朝霞. 基于 Hough 变换的改进的纸币倾斜校正方法[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(20): 4906-4908.
AI ZH X. Improved banknote skew correction method based on Hough transform[J]. Science Technology and Engineering, 2011,11(20): 4906-4908.

[4] 林德育, 肖曙红, 麦智伟. 基于最小外接矩形的 SOP 贴片元件的定位识别[J]. 现代制造工程, 2017(9): 133-138.
LIN D Y, XIAO SH H, MAI ZH W. Identification of SOP patch elements based on minimum external

rectangles [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(9): 133-138.

[5] 张志佳, 李媛, 徐洪, 等. 基于傅里叶变换的数字仪表字轮定位方法[J]. 仪表技术与传感器, 2010(2): 92-94,97.
ZHANG ZH J, LI Y, XU H, et al. Method for locating digital instrument wheel based on Fourier transform[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(2): 92-94,97.

[6] 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]. 中国图象图形学报, 2010,15(1): 109-115.
QIN K H, WANG H Y, ZHENG J T. A fast detection method for circles and rectangles based on Hough transform[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(1): 109-115.

[7] 卢蓉, 范勇, 陈念年, 等. 一种提取目标图像最小外接矩形的快速算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(21): 178-180.
LU R, FAN Y, CHEN N N, et al. A fast algorithm for extracting minimum external rectangle of target image[J]. Computer Engineering, 2010, 36(21): 178-180.

[8] 胡仁伟, 张希仁, 杨立峰, 等. 基于傅里叶变换和 Hough 变换的商标图案倾斜校正[J]. 轻工机械, 2018, 36(1): 62-65.
HU R W, ZHANG X R, YANG L F, et al. Trademark pattern tilt correction based on Fourier transform and Hough transform[J]. Light Industry Machinery, 2018, 36(1): 62-65.

[9] 于明, 李延果, 于洋, 等. 融合 Hough 与 Radon 变换的车牌倾斜校正算法[J]. 控制工程, 2013, 20(6): 1014-1017.
YU M, LI Y G, YU Y, et al. A license plate tilt correction algorithm combined Hough and radon transform[J]. Control Engineering of China, 2013, 20(6): 1014-1017.

[10] 王少伟, 尚媛园, 丁辉, 等. 一种改进 RGB Hough 车牌校正定位算法[J]. 光学技术, 2014, 40(1): 35-39.
WANG SH W, SHANG Y Y, DING H, et al. A modified RGB Hough plate correction and positioning algorithm[J]. Optical Technique, 2014, 40(1): 35-39.

[11] 刘旭, 巫玲, 陈念年, 等. 基于光栅投影序列图像融



- 合的倾斜校正算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(11): 3209-3212.
- LIU X, WU L, CHEN N N, et al. Tilt correction algorithm based on aggregation of grating projection sequences[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(11): 3209-3212.
- [12] 高晶, 吴育峰, 吴昆, 等. 基于角点检测的图像匹配算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1717-1725.
- GAO J, WU Y F, WU K, et al. Image matching algorithm based on corner detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1717-1725.
- [13] 章为川, 程冬, 朱磊. 基于各向异性高斯核的多尺度角点检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(1): 37-42.
- ZHANG W CH, CHENG D, ZHU L. Multiscale corner detection based on anisotropic Gaussian kernel [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012, 26(1): 37-42.
- [14] 赵亚利, 章为川, 李云红. 图像边缘轮廓自适应阈值的角点检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(11): 1502-1514.
- ZHAO Y L, ZHANG W C, LI Y H. Edge contour adaptive threshold detection algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(11): 1502-1514.
- [15] 赵慧. 基于 Harris 算子的灰度图像角点检测方法研究[J]. 产业与科技论坛, 2015(20): 55-56.
- ZHAO H. Research on gray image corner detection method based on Harris operator[J]. Estate and Science Tribune, 2015(20): 55-56.
- [16] WANG M, ZHOU Z Z, LI C H, et al. Harris corner detection algorithm based on pixel point gray difference[J]. Computer Engineering, 2015, 41(6): 227-230.
- [17] MAO C, QIAN W X, GU G H, et al. Harris corner detection based on bilateral filtering [J]. Infrared Technology, 2014, 36(10): 812-815, 819.
- [18] 苏婷, 金龙旭, 李国宁, 等. 基于改进 Harris 算法的图像角点检测[J]. 半导体光电, 2015, 36(3): 495-499.
- SU T, JIN L X, LI G N, et al. Image corner detection based on improved Harris algorithm [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(3): 495-499.
- [19] 姒绍辉, 胡伏原, 顾亚军, 等. 一种基于不规则区域的高斯滤波去噪算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(11): 313-316.
- SI SH H, HU F Y, GU Y J, et al. A Gaussian filtering denoising algorithm based on irregular regions [J]. Computer Science, 2014, 41(11): 313-316.
- [20] 胡敏, 李梅, 汪荣贵. 改进的 Otsu 算法在图像分割中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(5): 443-449.
- HU M, LI M, WANG R G. Application of modified Otsu algorithm in image segmentation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2010, 24(5): 443-449.
- [21] ZHANG F, PENG Z W, MENG S J. Improved Canny edge detection method based on self-adaptive threshold [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 32(8): 2296-2298.
- [22] 陆华才, 贺华展, 黄宜庆, 等. 改进 Canny 边缘算子和高斯混合模型的运动目标检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 142-147.
- LU H C, HE H ZH, HUANG Y Q, et al. Improved canny edge operator and gaussian mixture model for moving target detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 142-147.
- [23] 吴东东, 周东翔, 关涛, 等. 一种基于轮廓多边形逼近的可见光与红外图像配准方法[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(10): 28-30, 122.
- WU D D, ZHOU D X, GUAN T, et al. A visible and infrared image registration method based on contour polygon approximation [J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(10): 28-30, 122.
- [24] 邹见效, 王厚军, 舒军, 等. 一种基于最小二乘法的 FPN 与规则权值优化新方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(7): 667-672.
- ZOU J X, WANG H J, SHU J, et al. A new method for FPN and rule weight optimization based on least square method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2010, 24(7): 667-672.

作者简介



周伟, 2018 年于江苏理工学院获得学士学位, 现为江苏理工学院硕士研究生, 主要研究方向为机电产品检测与智能控制。
E-mail: chaoyuan@jst.edu.cn

Zhou Wei received his B. Sc. degree from Jiangsu University of Technology in 2018.

Now he is a M. Sc. candidate at Jiangsu University of Technology. His main research interest includes mechanical and electrical product detection and intelligent control.