

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107535

基于机器视觉的芯片引脚测量及缺陷检测系统*

杨桂华 唐卫卫 卢澎澎 张为心

(桂林理工大学 机械与控制工程学院 桂林 541006)

摘要: 芯片引脚的尺寸测量及缺陷检测在智能制造生产中具有重要意义,为了实现芯片引脚宽度、间距和长度以及引脚缺陷的高质量、高精度检测,利用 HALCON 视觉软件平台、采用形状匹配和一维测量算法进行检测实验。首先,通过上位机控制相机采集图片,采用基于形状的模板匹配方法并结合金字塔搜索算法对芯片进行匹配定位,其次,应用仿射变换获取芯片引脚的区域,最后,将提取的引脚区域运用一维测量算法实现对芯片的引脚尺寸测量和缺陷检测。实验结果表明单张图片检测时间为 56 ms,测量误差为 ± 0.01 mm,缺陷检测正确率为 100%。因此,利用机器视觉在线检测,不仅保证了测量的精度,同时保证了准确率,检测行业高精度、实时性的要求得到了充分的满足。

关键词: 机器视觉;HALCON;形状匹配;引脚测量;缺陷检测

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.2050

Chip pin measurement and defect detection system based on machine vision

Yang Guihua Tang Weiwei Lu Pengpeng Zhang Weixin

(College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: The size measurement and defect detection of chip pins are of great significance in intelligent manufacturing activities. In order to achieve high-quality and high-precision detection of chip pin width, spacing and length, and pin defects, uses the HALCON vision software platform and adopts shape matching perform detection experiments with one-dimensional measurement algorithms. First, the upper computer controls the camera to collect pictures, and uses the shape-based template matching method combined with the pyramid search algorithm to match and locate the chip. Secondly, the chip pin area is obtained by applying affine transformation. Finally, the extracted pin area is used the one-dimensional measurement algorithm realizes the size measurement and defect detection of the chip. The experimental results show that the detection time of a single image is 56 ms, the measurement error is ± 0.01 mm, and the defect detection accuracy rate is 100%. Therefore, using machine vision online detection can not only ensure the accuracy of measurement, but also ensure the accuracy, and the requirements of high precision and real-time in the detection industry have been fully met.

Keywords: machine vision;HALCON;shape matching;pin measurement;defect detection

0 引言

机器视觉在图像检测中应用非常广泛,利用机器视觉系统对电子部件的尺寸测量以及缺陷检测,可以避免在实际生产测量中与产品接触,保证产品不被损坏,在产品的品质和质量方面有着非常重要的作用^[1-3]。王伟华等^[4]提出了通过芯片上引脚垂直灰度投影值对引脚的宽度、间距进行测量,但是引脚稍微倾斜或者弯曲时,引脚的灰度投影值的间距会变宽,不能很好地检测出引脚的宽度和间距。肖海俊^[5]提出了使用单引脚边缘轮廓(extended line

descriptions,XLD)形状匹配的方法提取 IC 芯片的引脚部分,对其进行测量。但是由于引脚的长度、宽度以及弯曲度很难保持完全一致,因此通过单引脚 XLD 形状匹配很难找到 IC 芯片的全部引脚。李泽铃^[6]提出了通过阈值分割获得芯片引脚部分,然后通过模板匹配对芯片引脚缺陷进行检测。但是经阈值对芯片引脚部分进行提取很难获取标准的芯片模板,同时每个引脚存在较小尺寸差异时也会导致模板匹配失败。

本文基于 HALCON 软件开发平台,利用 Visual Studio C++(VS)2015 软件设计上位机界面来控制相机

收稿日期:2021-08-09

* 基金项目:国家自然科学基金地区基金项目(52065016)资助

获取芯片的图像,获取芯片上的字符作为模板并建立文字模板与芯片引脚之间的对应关系,然后通过形状匹配法在新的芯片图像上获得模板位置,利用已知对应关系,通过仿射变换^[7]得到引脚区域,相比通过利用单引脚 XLD 形状匹配得到引脚区域更加准确。随后通过引脚区域的灰度值变换,利用边缘振幅的一维测量技术^[8],对芯片的宽度、间距和长度进行测量,相比直接利用引脚的灰度值投影的方法对引脚尺寸测量更加准确。同时对引脚断裂、弯曲缺陷进行检测。实验表明基于机器视觉检测具有良好的连续性和测量精度,提高了工业检测的实时性和准确率,生产效率和质量也得到很好地提升。

1 SOP 芯片引脚测量及缺陷检测视觉系统方案

1.1 机器视觉检测系统硬件结构

视觉系统主要由图像采集设备、图像处理软件以及信息综合分析处理系统构成,包括相机、光源、计算机等,该视觉系统首先利用相机获取芯片的图像,将数据传输到图像采集卡,随后计算机通过图像处理软件对采集卡中的数据进行处理,它可以实时检测出芯片引脚个数、引脚宽度、引脚间距、引脚长度、引脚倾斜等参数。硬件系统结构如图 1 所示。

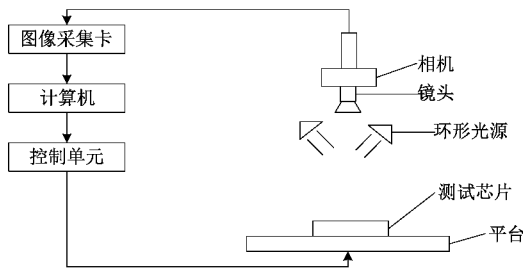


图 1 实验硬件组成结构

1.2 检测系统软件结构

1) 图像采集单元

本系统中,采用 balsa500 万像素的相机 c 接口,同时选择焦距为 35 mm、分辨率为 500 万的镜头,选用环形光源进行打光。

2) 上位机软件

本系统基于 HALCON 平台进行图像的算法开发,并将 HALCON 程序导出到 VS 上,设计并建立 MFC 上位机后通过界面显示检测结果。

3) 检测软件系统结构设计

芯片检测软件具有对芯片图像的采集与显示、芯片引脚的数据测量及缺陷检测、检测结果输出与保存的功能,根据功能将其划分为相机对图像的采集模块、芯片图像处理模块、结果显示模块,检测软件系统算法结构如图 2 所示。

2 芯片模板形状匹配

由于芯片引脚位置是随时变动的,加上噪声以及光线

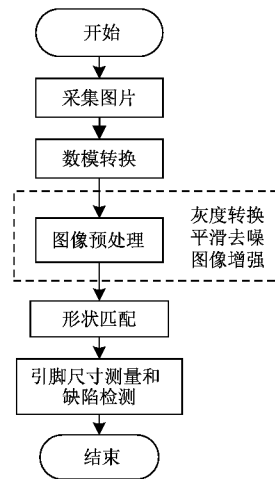


图 2 检测软件系统结构

等原因,利用 Blob 分析定位、单引脚 XLD 形状匹配等技术不能很好地找到引脚区域,而通过以芯片上字符为模板,基于形状模板匹配方法并结合金字塔搜索算法对芯片字符模板进行匹配定位,不仅对环境光照的变化适应性强,而且对自身灰度值变化并不敏感。利用已知模板与引脚之间的对应关系,通过形状匹配在新的图片上查找模板,获得模板之间的转换矩阵,最终通过仿射变换得到芯片上引脚区域,流程如图 3 所示。

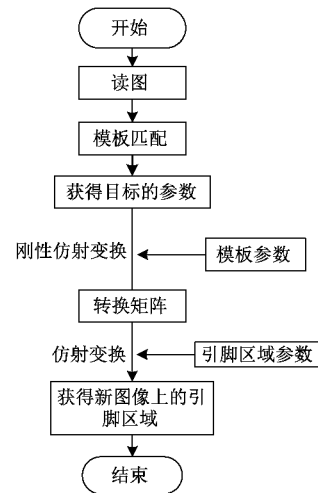


图 3 形状匹配流程

2.1 模板边缘提取

读取图片后,建立字符匹配模板和引脚区域如图 4(a)所示,提取模板区域如图 4(b)所示,为了获得模板边缘轮廓,采用 Canny^[9-10]边缘检测算法,算法包括 4 个步骤。

1) 滤波。采用高斯滤波器对图像进行平滑滤波,高斯函数的公式为:

$$H(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中: x 、 y 分别为当前点与目标点之间的水平和垂直距

离; σ 为标准差。将式(1)高斯滤波器与原图像进行卷积, 公式为:

$$G(x, y) = f(x, y) * H(x, y) \quad (2)$$

式中: $f(x, y)$ 为原图像, $G(x, y)$ 为卷积后图像。

2) 图像梯度计算。由于一阶微分表示变化率, 可以用一阶差分代替一阶微分来表示图像灰度值的变化情况, 采用的一阶差分卷积模板, 即:

$$\begin{cases} H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \\ H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

将模板与高斯平滑后的图像进行卷积, 即:

$$\begin{cases} \varphi_1(x, y) = G(x, y) * H_1(x, y) \\ \varphi_2(x, y) = G(x, y) * H_2(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

最后, 得到梯度值为:

$$\varphi(x, y) = \sqrt{\varphi_1^2(x, y) + \varphi_2^2(x, y)} \quad (5)$$

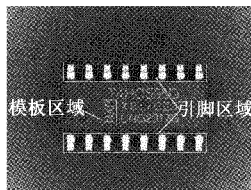
方向角度为:

$$\theta_\varphi = \arctan\left(\frac{\varphi_2(x, y)}{\varphi_1(x, y)}\right) \quad (6)$$

3) 非极大值抑制。获得图像梯度之后, 在生成得到梯度矩阵上进行非极大值抑制, 以梯度矩阵中的某一点为中心点 $O(x, y)$, 将梯度方向角分层 0° 、 45° 、 90° 和 135° , 比较中心点 $O(x, y)$ 与沿着梯度方向的两个相邻像素的梯度值, 若中心点 $O(x, y)$ 梯度值最大, 则保留, 否则置 0。

4) 双阈值边缘提取。采用双阈值算法对边缘和平滑边缘进行提取, 设定两个阈值 $T1$ 和 $T2$ 对非极大值抑制后的图像进行处理。高阈值分割得到强边缘图像, 含有较少的假边缘, 对于边缘不连续或不够平滑时通过低阈值得到弱边缘图像来连接边缘。

通过上述步骤最后得到清晰的边缘轮廓, 结果如图 4(c) 所示, 利用边缘轮廓创建匹配模板^[11], 算子为 create_shape_model_xld。



(a) 模板和引脚区域设置



(b) 提取ROI模板区域 (c) 提取边缘

图 4 模板的建立与边缘的提取

2.2 金字塔分层搜索策略

本文采用的算法为高斯金字塔搜索算法^[12-13], 图像金字塔由上到下分辨率逐渐降低的图像以金字塔形式排列组合而成。首先建立芯片的模板获得轮廓, 通过高斯平滑和亚采样对原图像进行处理。其次, 开始从金字塔的最高层进行模板搜索, 直到匹配到模板后停止搜索, 通过从上向下采样, 依次重复上述步骤, 直到搜索到金字塔的最底层。在新的图像上进行查找与模板轮廓相似的轮廓, 获得匹配得到轮廓信息。金字塔搜索图如图 5 所示。

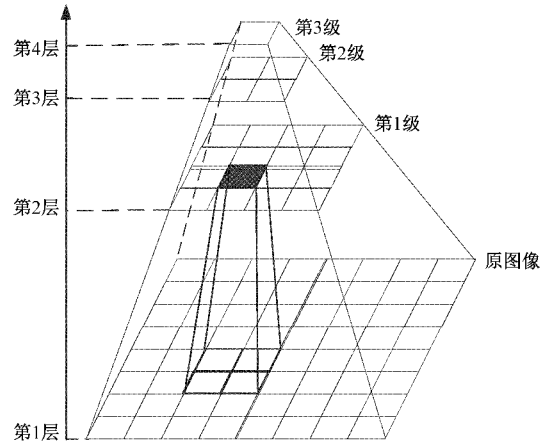


图 5 金字塔搜索图

基于形状的模板匹配算法相似度量是通过计算梯度向量的内积总和和最小值来确定最佳匹配位置^[14], 假设目标模板共有 n 个点, 梯度向量集合为 T , 点 p_i 处对应的梯度向量为 d_i , 其中 $i = 1, \dots, n$ 。由于此时图像不能对目标区域进行平移和旋转功能, 将模板匹配的搜索角度设置为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 搜索步长 r 划分 $0.5 \sim 1.5$ 倍的尺度区间, 搜索图像对应点的梯度向量集合为 G , 此时坐标点 $p_i(x, y)$ 处对应梯度向量为 $d_i(t_{xi}, u_{yi})$, 进行平移 Δx 、 Δy 和旋转 θ° , 由式(7)、(8)可以得到搜索图像中与模板对应的点为 $p_i(x', y')$ 。

$$x' = x \cos\theta + y \sin\theta + \Delta x \quad (7)$$

$$y' = -x \sin\theta + y \cos\theta + \Delta y \quad (8)$$

同理, 由式(9)、(10)可以得出此点的梯度向量为 $d_i(v_{xi}, w_{yi})$ 。

$$v_{xi} = t_{xi} \cos\theta + u_{yi} \sin\theta + \Delta t_{xi} \quad (9)$$

$$w_{yi} = -t_{xi} \sin\theta + u_{yi} \cos\theta + \Delta u_{yi} \quad (10)$$

可以得出相似度量为 S , 如式(11)所示。

$$S = \frac{1}{n} \langle T \times G \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{xi} v_{xi} + u_{yi} w_{yi} \quad (11)$$

由于式(11)中使用边缘提取算法计算方向向量的长度受光照影响, 将方向向量进行归一化处理, 光照的影响不会对相似度量产生干扰, 归一化相似度量 S , 如式(12)所示。

$$S = \frac{1}{n} \frac{\langle T \times G \rangle}{\|T\| \cdot \|G\|} =$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_{xi} v_{xi} + u_{yi} w_{yi}}{\sqrt{t_{xi}^2 + v_{xi}^2} \cdot \sqrt{u_{yi}^2 + w_{yi}^2}} \quad (12)$$

由于对梯度向量进行了归一化操作,所以 $S \leq 1$, 只有当模板与图像完全对应时才能够达到 $S = 1$, 最后得到目标对象所在的位置参数和匹配的置信度分数。

2.3 匹配过程

利用建立字符模板的边缘轮廓,在检测图片上采用 find_shape_model 算子在最高层进行模板的形状匹配,通过设定的匹配旋转角度和步长进行搜索,当匹配到模型的分数量大于设定的阈值时,依此向下一层进行搜索,最后得到目标模板匹配位置,包含坐标值、角度和相似度分数,范围为 0~1,形状匹配结果如图 6(b)所示,匹配结果数据如表 1 所示。

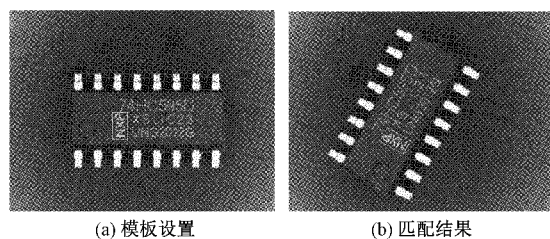


图 6 形状匹配

表 1 匹配结果数据

	模板中心坐标	角度	分数
芯片模板	(223.0, 215.0)	0	
匹配结果 1	(252.2, 207.4)	60.97	0.993

3 芯片引脚尺寸测量及缺陷检测

通过形状匹配在被测图像上获得模板位置,利用已知对应关系得到变换矩阵,利用仿射变换得到引脚区域,进行图像增强处理,将引脚部分更加清晰地展现出来,最后,对其进行一维测量,引脚尺寸测量及缺陷检测流程如图 7 所示。根据测量芯片引脚的长宽以及引脚间距值来判断引脚是否合格,其中,当检测到引脚数量不一致时,可判断芯片为引脚缺失;通过测量引脚的长度可以判断引脚共面度和引脚断裂;对比引脚间距测量数据可以判断引脚是否弯曲^[15]。

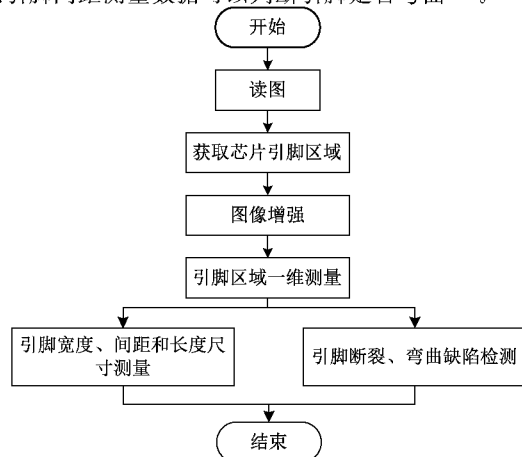


图 7 引脚尺寸测量及缺陷检测流程

3.1 芯片引脚区域的获取

实验过程中,芯片每次放置的位置和角度不一样,会产生一定角度的方向旋转,芯片不同的位姿会对实验判断产生一定影响。为了获得芯片引脚区域的位置,首先通过建立芯片模板位置与在新的图像上匹配模板的位置之间的坐标关系得到齐次变换矩阵,然后新的图像上通过仿射变换得到新的引脚测量区域。

设建立字符模板中心点为 $p_0(x_0, y_0)$, 进行形状匹配时,查找目标中心点为 $p_1(x_1, y_1)$, 其中 Δx 为 x 方向的平移量, Δy 为 y 方向的平移量, θ 为旋转角度,如图 8 所示。

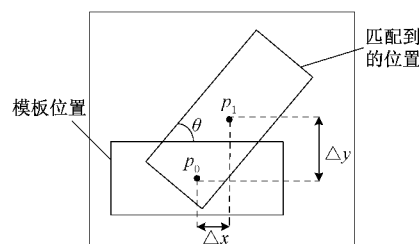


图 8 旋转和偏移检测

模板区域平移和旋转矩阵乘积的表达形式为:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

齐次变换矩阵 HomMat2D 为:

$$HomMat2D = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{O}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: \mathbf{R} 为 2×2 的旋转矩阵; \mathbf{t} 为二维平移向量; $\mathbf{O} = (0 \ 0)^T$ 。将芯片引脚区域通过齐次变换矩阵 HomMat2D,检测图像上得到真实引脚区域。如图 9(a)所示,先建立模板及设置引脚区域,在获得新的图片上查找模板,结果如图 9(b)所示,得到:

$$HomMat2D = \begin{bmatrix} 0.90 & -0.47 & 130.35 \\ 0.47 & 0.90 & -145.35 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

然后,将模板设定的引脚区域通过齐次变换矩阵仿射变换 affine_trans_region,最终得到检测图像上的引脚区域如图 9(b)所示。

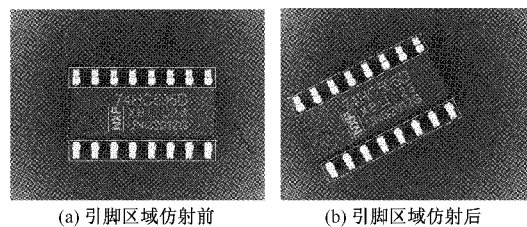


图 9 获得引脚区域

3.2 引脚边缘测量点提取

本文采用一维测量的方法,首先对引脚区域进行图像

增强处理,如图 10(a)所示,对引脚区域进行垂直投影可以得到灰度值曲线图,如图 10(b)所示,对于一个连续图像函数 $f(x,y)$,基于 x 轴的一阶求导为 $\frac{df(x,y)}{dx} = f(x+1,y) - f(x,y)$,对引脚区域灰度值进行一阶求导,同时利用高斯平滑对获得的引脚边缘一阶导数进行平滑处理如图 10(c)所示。如图 10(d)所示为引脚的测量区域,是利用 `gen_rectangle2` 算子获取得到,测量时将每条等距线中点连接在一起,形成一条带有测量方向的轮廓线,设置轮廓线灰度值的阈值,当一阶导数的极值点大于设定的阈值,则该点为引脚边缘与轮廓线的交点。

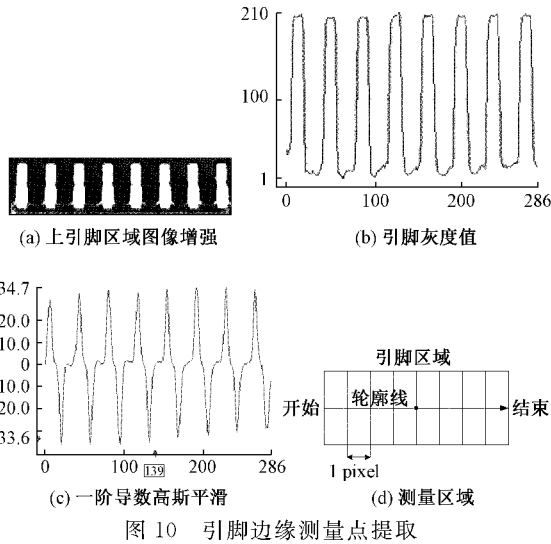


图 10 引脚边缘测量点提取

3.3 引脚宽度、间距和长度测量

为了获得芯片引脚的宽度以及引脚之间的间距,首先,利用仿射变换获得新图像上的引脚区域;其次,运用 `gen_measure_rectangle2` 算子获得测量句柄;最后,通过 `measure_pairs` 测量边缘算子获得引脚的个数、宽度、间距、长度。本文所要研究的是对 IC 芯片引脚在线测量,需要将 IC 芯片引脚的宽度、引脚的高度和引脚的间距测量出来,实验通过多次测试并对实验结果进行分析,求取平均值。实验通过边缘检测得到的边缘信息包括各个引脚的两边点坐标为 $(Row1,Column1)$ 和 $(Row2,Column2)$,以及引脚的长 `length2`和宽的长度为 `length1`,引脚尺寸示意图如图 11 所示。

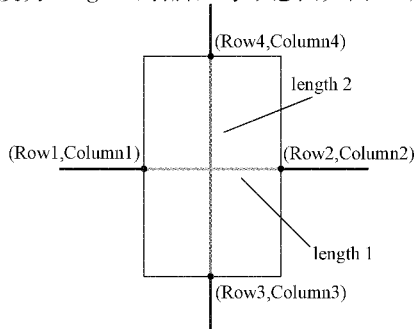


图 11 正常引脚长宽度测量

检测中相隔两个引脚的行坐标 `Row` 基本在一条水平直线上,根据计算列坐标的差值,使这一差值减去相邻两个引脚就可得到引脚间距;以上得到的值都是以 `pixel` 为单位的,分别乘以相应方向的像素精度就可以得到物体的实际尺寸,单位为 `mm`。

测量所得芯片引脚宽度如图 12(a)所示,箭头指向位置为引脚的宽度,平均宽度为 `0.511 mm`。芯片引脚间的间距如图 12(b)所示,箭头指向位置为引脚间的间距,平均间距为 `0.797 mm`。芯片引脚长度如图 12(c)所示,箭头指向位置为引脚的长度,平均长度为 `1.212 mm`。

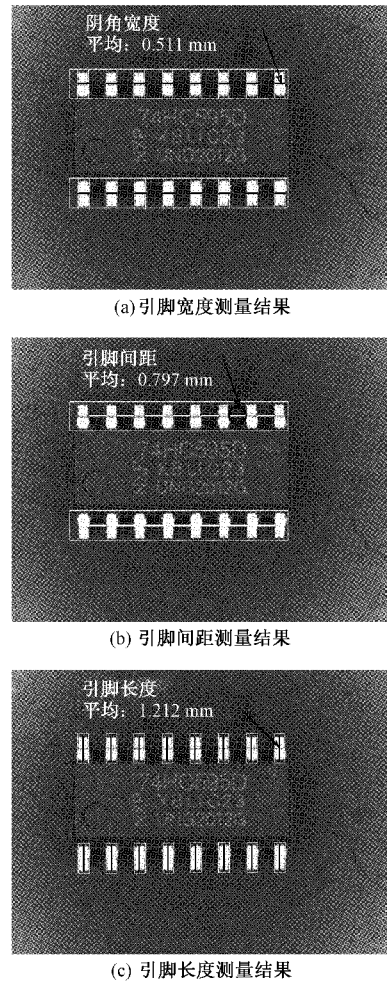


图 12 引脚宽度、间距和长度测量结果

通过多次试验,测量所得的芯片引脚宽度、间距和长度的 10 组数据值如表 2 所示,系统具有很好的稳定性和检测精度,误差在 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 之内。

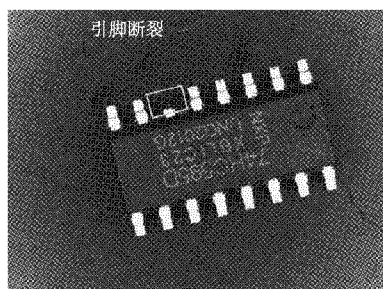
3.4 引脚断裂、弯曲缺陷检测

通过对芯片引脚区域的一维测量,得到相邻引脚间的间距,通过间距值的大小判断引脚是否断裂和弯曲,图 13(a)中长方形区域为引脚断裂,图 13(b)中长方形区域为引脚弯曲。

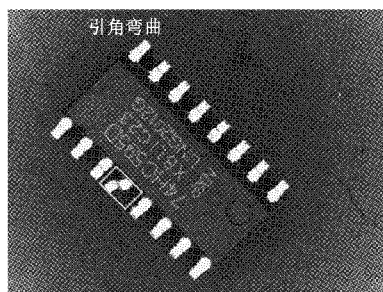
经过多次实验结果可知,该系统能较好地对芯片的引

表 2 芯片引脚参数测量结果

序号	测量参数		
	宽度/mm	间距/mm	长度/mm
1	0.507	0.802	1.217
2	0.512	0.799	1.215
3	0.504	0.792	1.209
4	0.518	0.798	1.208
5	0.505	0.803	1.217
6	0.512	0.809	1.212
7	0.518	0.794	1.207
8	0.509	0.803	1.213
9	0.515	0.795	1.207
10	0.513	0.794	1.217
均值	0.511	0.797	1.212
实际值	0.51	0.80	1.21
最大测量误差	0.008	0.009	0.009



(a) 引脚断裂检测图



(b) 引脚弯曲检测图

图 13 引脚缺陷检测结果

脚缺陷进行检测,并且标出缺陷的位置,保证了系统检测的稳定性。

4 实验结果

本文建立了基于机器视觉的芯片引脚测量及缺陷检测系统,硬件采用 PC 机搭配 i5 处理器,主频 3.0 GHz,内存为 8 GB,软件采 HALCON 与 MFC 联合编程,设计了检测芯片引脚缺陷测量上位机,如图 14 所示。上位机界面包含对单张图片的芯片个数、平均速度、总合格率、总次品率。

当引脚稍微倾斜但引脚质量仍合格时,基于引脚宽度一维测量算法和灰度值投影算法的测量效果分析如图

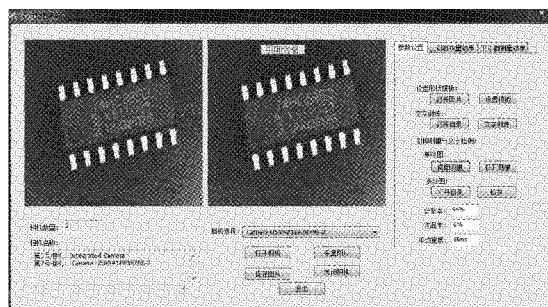


图 14 上位机界面

图 15 所示。由于垂直灰度值投影法是将芯片引脚像素按照垂直方向进行求和,通过计算一个引脚灰度投影曲线的间距为测量长度,如图 15 所示的灰度值投影长度。与一维测量算法相比,该方法测量误差较大。

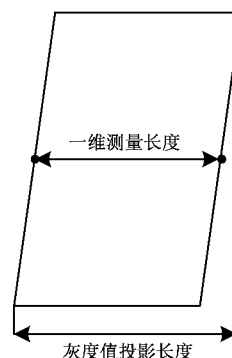


图 15 引脚倾斜长度测量对比

通过上述实验分析,采用形状匹配法定位引脚区域,并通过引脚区域的灰度值变换及利用边缘振幅的一维测量技术,对芯片的宽度、间距和长度进行测量。相比较文献[4-5]灰度投影测量方法,即通过单引脚 XLD 形状匹配及引脚灰度值投影法,应用相同的样本数据,采集图片数为 100,进行了测试,并把两种测试结果进行了比较,如表 3 所示,结果表明本实验对引脚尺寸测量更加准确和快速。

表 3 对比实验

	一维测量	灰度值投影测量
平均宽度/mm	0.511	0.526
平均间距/mm	0.797	0.783
平均长度/mm	1.212	1.211
测量误差/mm	±0.01	±0.03
检测速度/(张/ms)	56	89
准确率/%	100	96

5 结 论

本文设计了基于机器视觉的芯片引脚测量及缺陷检测系统,采用形状匹配的方法,并通过仿射变换定位引脚区域,应用一维测量算法对引脚进行测量。该系统不仅能够

精确计算出芯片引脚的个数,实现对各个芯片引脚宽度、间距和长度的精确测量,而且能够检测出引脚缺陷;该方法很好地解决了现有方法检测速度慢、误差大的问题。该视觉检测方法能够广泛地应用到芯片检测上,前景十分广阔。为了取得更好的应用效果,针对生产线上的运动芯片进行动态测量,是系统进一步改进和后续的研究方向。

参考文献

- [1] 王希波,李爱娟,高金胜,等.基于机器视觉的轮胎花纹深度测量系统研究[J].国外电子测量技术,2019,38(4):66-70.
- [2] 刘明,杨胜寒,高诚辉.基于水平集方法的划痕形状表面视觉测量[J].仪器仪表学报,2020,41(2):184-194.
- [3] 魏舜昊,章家岩,冯旭刚.三坐标测量机高速测量过程动态误差分析与补偿[J].电子测量与仪器学报,2020,34(5):43-50.
- [4] 王伟华,李朋轩.基于机器视觉的表贴芯片缺陷检测系统研究[J].无线互联科技,2017(12):99-100.
- [5] 肖海俊.基于机器视觉的精密器件尺寸在线测量系统的研究[D].聊城:聊城大学,2016.
- [6] 李锋铃.基于机器视觉的 SOP 芯片引脚缺陷检测研究[J].科技资讯,2018,16(10):2-5.
- [7] 朱寒,林丽,陈德全,等.基于多方向改进 Sobel 算子的 PCB 图像定位校正方法[J].电子测量与仪器学报,2019,33(9):121-128.
- [8] 朱先锋,潘洪军.基于 Halcon 的硒鼓缺陷检测与一维尺寸测量[J].吉林大学学报(信息科学版),2014,32(3):308-315.
- [9] 张聪聪,牟莉.基于机器视觉的图像边缘检测算法研究[J].国外电子测量技术,2020,39(12):80-85.
- [10] 谢俊,李玉萍,左飞飞,等.基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测[J].电子测量技术,2021,44(2):93-98.
- [11] 亢宇欣,谌贵辉,张三炳,等.基于 Halcon 的贴片电阻方向检测系统[J].包装工程,2017,38(23):116-120.
- [12] 董正天.基于机器视觉的丝印样板尺寸测量与表面缺陷检测研究[D].秦皇岛:燕山大学,2020.
- [13] 陈昊,张奔,黎明,等.基于图像光流的轴承滚子表面缺陷检测[J].仪器仪表学报,2018,39(6):198-206.
- [14] 谢珩,汪成龙,黄振雄,等.基于 LabVIEW 的五金件尺寸检测方法[J].电子测量技术,2019,42(24):152-156.
- [15] 邓海涛,吴捷,李建辉,等.基于机器视觉的芯片引脚缺陷检测研究[J].工业控制计算机,2017,30(3):69-70,73.

作者简介

杨桂华,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为计算机检测与控制技术。

E-mail:954991219@qq.com

唐卫卫(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为计算机检测与控制技术。

E-mail:1421583518@qq.com

卢澎澎,硕士研究生,主要研究方向为系统建模与优化控制。

E-mail:1650322379@qq.com

张为心,硕士研究生,主要研究方向为智能控制与决策技术。

E-mail:969197070@qq.com