

QFP 芯片外观视觉检测系统及检测方法

郑金驹 李文龙 王瑜辉 罗明成

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉, 430074

摘要: 基于 QFP 芯片的管脚外观检测的需要, 开发了基于机器视觉的 QFP 芯片外观检测系统, 并简要介绍了该系统的硬件系统和软件系统。为实现管脚外观检测要求, 采用 Canny 算子边缘检测算法针对 QFP 管脚的图像进行处理, 着重论述了管脚栈高的检测方法以及基于三点法的管脚共面度的检测方法。测试结果表明, 该外观检测系统能达到在线生产的工艺要求。

关键词: QFP 外观检测; 机器视觉; Canny 算子; 三点法

中图分类号: TN047

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2013.03.002

QFP Chip Visual Inspection System and Its Inspection Method

Zheng Jinju Li Wenlong Wang Yuhui Luo Mingcheng

State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment & Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract: In order to inspect the appearance of QFP chip lead, an automatic inspection system based on machine vision was designed. Hardware structure and software system were introduced herein. In the software system, Canny algorithm was successfully applied to detect the edge of the QFP chip lead. After that, the inspection method of standoff and the detecting method based on three-point seating plane of co-planarity were discussed. Finally, the testing experiments with respect to the QFP chip visual inspection system were carried out, which achieves satisfactory results.

Key words: QFP visual inspection; machine vision; Canny algorithm; three-point seating plane method

0 引言

集成电路(integrated circuit, IC)芯片在封装工序之后, 必须经过检测才能确保芯片的品质。检测环节主要对封装完成的芯片进行电性能测试及芯片外观检测。芯片外观缺陷直接影响到产品的品质及 IC 制造后续工艺环节的顺利进行。因此, 芯片外观检查在 IC 制造业中具有重要的地位。

一般芯片外观检测包括三种方法: ①传统的人工肉眼检测方法; ②基于激光测量技术的检测方法; ③基于机器视觉^[1-2]的检测方法。人工肉眼检测的效率低, 且可靠性差, 不能适应大批量生产制造, 现在已逐渐被淘汰。激光检测技术对硬件要求较高, 维护工作较繁杂, 且成本也相应地比较高。随着机器视觉技术理论研究及硬件技术的不断发展, 机器视觉技术在芯片外观检测领域的应用也越来越多, 这方面的研究也越来越多。国外对机器视觉在芯片外观检测领域的应用研究起步较早, 现在已有较成熟的产品; 而在国内, 目前尚无成熟的相关产品。

本文旨在研究利用机器视觉对 IC 芯片进行

检测的相关技术, 研制出相关的检测方案及检测系统, 应用于 IC 芯片封装检测装备。

1 QFP 芯片外观检测系统

本文所研究的基于机器视觉的 QFP 芯片外观检测系统可检测 QFP 芯片管脚的缺失、折损以及间距、宽度、栈高、共面度等多项关键几何外形参数, 精度要求达 $\pm 0.01\text{mm}$; 可对 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \sim 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ 范围的不同型号的 QFP 芯片进行检测。QFP 芯片外观如图 1 所示。

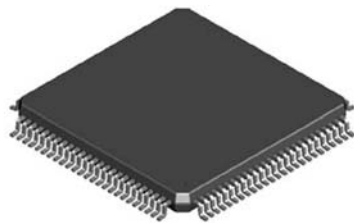


图 1 QFP 芯片外观图

QFP 芯片外观检测系统针对 QFP80、QFP64、QFP32 芯片所采集的图像如图 2 所示。图像中有 5 个管脚区域, 中部的称为底部视图, 四周分别为上侧视图、右侧视图、下侧视图、左侧视图。侧视图是芯片四侧管脚通过立体视觉系统在 CCD 相机中所成的像。

QFP 芯片外观检测系统主要应用于 QFP 测

收稿日期: 2011-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50835004, 50975112);

中央高校基本科研业务费资助项目(2012QN251)

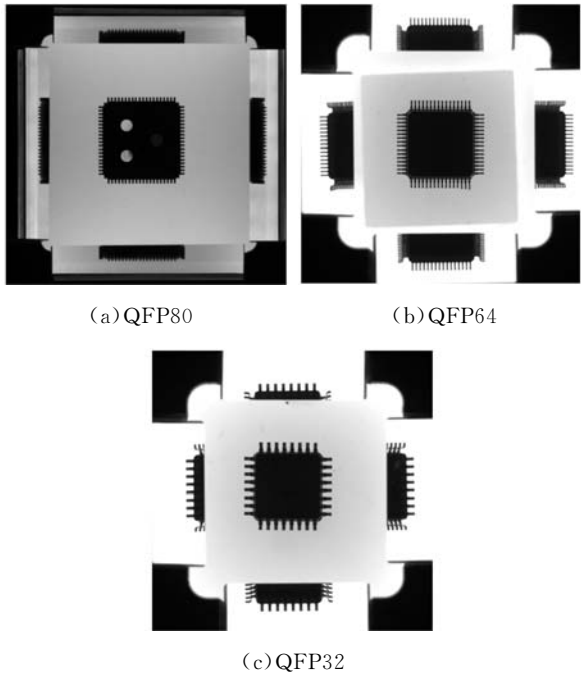


图 2 外观检测系统所采集的图像

试分选装备。测试分选装备是集成电路生产线中的关键设备之一,主要用于对芯片进行测试,包括电测试与视觉检测,最终分选出合格的芯片。在测试流程中,芯片经过电测试合格后,测试分选主机发指令给外观检测系统,外观检测系统得到检测指令后开始对芯片进行视觉外观检测,然后将检测结果实时传给测试分选主机。

1.1 硬件系统

本文所研究的 QFP 芯片外观视觉检测系统硬件结构框图见图 3。硬件系统由 PC 机、CCD 相机、镜头、一组平面反射镜、光源和反光板等关键机器视觉部件组成。CCD 相机选用微视 (Microview) 的 MVC2010DAM-GE12 数字摄像机,镜头选用 OPTO 的 TC1236。

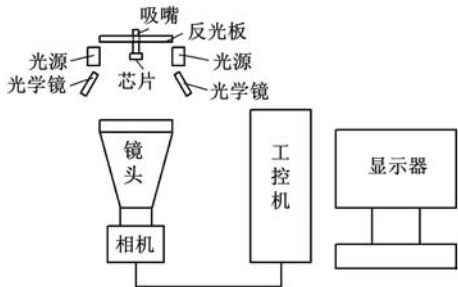


图 3 QFP 芯片外观检测装置结构框图

系统运行时,待检测的芯片放置在反光板下方,光源发出的光束一部分经反光板反射后照射在待检测的芯片上,另一部分经平面反射镜反射后透过镜头在 CCD 相机中成像;触发 CCD 相机采集图像,并将图像信息传输到图像采集卡中;PC 机读取图像采集卡中的图像信息,然后进行图

像处理,实现对芯片管脚关键参数的检测。

1.2 软件系统

本文所研究的 QFP 芯片外观视觉检测系统的软件系统根据功能将其划分为 4 大模块,包括图像标定模块、图像检测模块、相机控制模块及参数管理模块。

相机控制模块主要控制 CCD 相机完成芯片管脚图像的采集。PC 机发采图触发信号给 CCD 相机,CCD 相机收到信号后开始采图,并将采集的图像传输到图像采集卡中。

图像标定模块完成对采集的图像的标定功能,校正图像畸变。

图像检测模块对经校正处理后的图像进行图像处理,检测出管脚外形几何参数。图像检测模块中图像处理流程如图 4 所示。

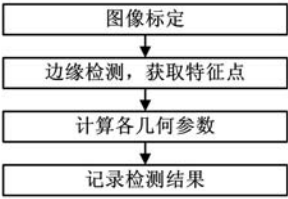


图 4 图像处理流程

2 关键三维参数检测

2.1 Canny 算子边缘检测算法

在视觉检测系统中,图像处理部分关键在于边缘检测。边缘检测算法^[3]的优劣直接影响到系统检测效率及检测精度的高低。

所谓边缘是指周围像素灰度值有阶跃性变化或屋顶状变化的像素的集合。边缘存在于目标物与背景之间,它是提取几何形状的基础;边缘是位置的标志,对灰度变化敏感。边缘检测是视觉测量中关键的图像处理技术。

边缘具有方向和幅度两个特征。沿边缘走向,像素值的幅度变化平缓;垂直边缘走向,像素值的幅度变化比较剧烈。因此,边缘上像素值的一阶导数较大,二阶导数为零,呈现零交叉。据此特征,边缘检测的方法有基于搜索和基于零交叉两类。常用的一阶边缘检测算子包括梯度算子、Roberts Cross 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子;利用二阶微分的算子有方向二阶差分算子、拉普拉斯算子、高斯-拉普拉斯算子。另外还有 Canny 算子^[4-7]和小波算子等。

Canny 算子是基于最优化思想的边缘检测算子,具有检测准确、定位精度高的特点,在机器视觉中应用广泛。Canny 算子在边缘检测中满足三大最优准则:①信噪比准则,即对边缘点的判定要准确,尽可能少地将非边缘点错判为边缘点和将边缘点错判为非边缘点;②定位精度准则,检测出

的边缘与实际边缘要足够接近,使定位精度达到最高;③单边响应准则,对单一边缘产生多个响应的概率要低,并且能抑制虚假边缘产生。

Canny 算子的三大最优准则使得该算法检测精度高,能够达到集成电路生产线上对芯片检测的精度要求,因此本文采用 Canny 算子对图像进行边缘检测,完成视觉测量。应用 Canny 算子检测边缘的具体步骤如下:

(1) 采用高斯滤波函数对图像进行平滑。定义二维高斯函数:

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

其中, σ 为高斯分布的标准方差,它决定了高斯滤波器的宽度,控制图像平滑的程度。当 σ 较小时,边缘定位精度高,但是图像平滑作用弱,信噪比低; σ 较大时,则高斯平滑模板增大,边缘位置偏移严重,且运算量增加,因此要根据需要适当地选取 σ ,构造滤波器,计算出一个合适的模板,用标准卷积实现高斯平滑,平滑函数如下:

$$I(x, y) = (\nabla G(x, y)) f(x, y) \quad (2)$$

将求卷积与求导互换得

$$I(x, y) = \nabla (G(x, y) f(x, y)) \quad (3)$$

本文所研究的 QFP 芯片外观检测系统对精度要求较高且要求检测速度尽量快、检测效率高,为提高边缘定位精度、减少运算量提高效率而取较小的 σ 。工程应用中,通常会采用实验法确定适合具体需求的 σ 。首先根据经验确定 σ 的取值范围,然后取不同 σ 值,得出实验结果,确定符合 QFP 芯片外观检测系统精度要求的 σ 值。

(2) 计算去噪后的图像的梯度幅值和梯度方向。Canny 算子采用 2×2 邻域一阶偏导的有限差分计算平滑后图像的梯度幅值和方向。图像 $I(x, y)$ 在 x 方向的偏导 $I_x(i, j)$ 与 y 方向的偏导 $I_y(i, j)$ 为

$$I_x(i, j) = (I(i+1, j) - I(i, j) + I(i+1, j+1) - I(i, j+1))/2 \quad (4)$$

$$I_y(i, j) = (I(i, j+1) - I(i, j) + I(i+1, j+1) - I(i+1, j))/2 \quad (5)$$

则图像的梯度幅值为

$$M(i, j) = \sqrt{I_x(i, j)^2 + I_y(i, j)^2} \quad (6)$$

梯度方向为

$$\theta(i, j) = \arctan(I_y(i, j)/I_x(i, j)) \quad (7)$$

(3) 对梯度图进行非极大值抑制。为了保证边缘定位精度,防止出现虚假边缘,要对边缘进行细化,因此只保留 $M(i, j)$ 的局部极大值,即非极大值抑制。

(4) 采用双门限法去除虚假边缘点和连接边

缘。Canny 算子采用高低两个阈值检测图像的强边缘和弱边缘。当图像像素点 (i, j) 的梯度幅值 $M(i, j)$ 大于高阈值时,该像素一定是边缘点;当 $M(i, j)$ 小于低阈值时,该像素一定不是边缘点;当 $M(i, j)$ 介于高低阈值之间时,判断该像素的八邻域像素中是否存在大于高阈值的边缘点,若存在则它是边缘点,否则它不是边缘点。

2.2 芯片管脚栈高的检测

QFP 管脚栈高如图 5 所示,是管脚端到芯片底部间的垂直距离。管脚栈高是芯片外观检测中必须检测的关键三维参数之一。如果管脚栈高不符合精度要求,将影响下一级的封装。

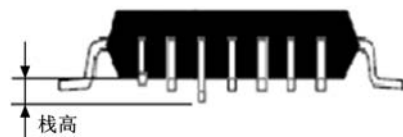


图 5 QFP 管脚栈高图示

如图 6 所示, s 表示栈高, s_1 表示侧视图中所检测的管脚长度, d (AD 间的距离) 表示管脚端到芯片基体的水平距离(该参数值为已知), θ 为光路入射角度(图中 $\angle ACB$), a 表示距离 DC 。

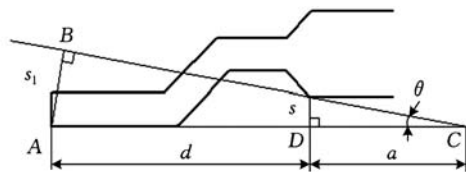


图 6 管脚栈高计算图示

栈高的计算公式如下:

$$s = s_1 / \cos\theta - d \tan\theta \quad (8)$$

根据图 6 可得

$$s = a \tan\theta \quad (9)$$

$$d + a = s_1 / \sin\theta \quad (10)$$

结合式(9)、式(10)可求出栈高:

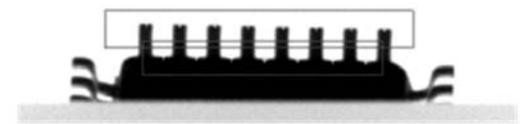
$$s = (s_1 / \sin\theta - d) \tan\theta = s_1 / \cos\theta - d \tan\theta \quad (11)$$

根据以上分析,求栈高的关键在于通过视觉系统检测每个管脚在对应的侧视图中的管脚长度。如图 7 所示,在侧视图中加载检测框(矩形框),框选管脚上端部区域,然后通过边缘检测拟合管脚边缘,求出管脚端部中点(十字标记)的坐标。用同样的方法可求出管脚的根部中点(根部矩形框区域中的十字标记)。

管脚长度即为管脚端部到根部的距离。本文采用计算方法为:首先将管脚的根部中点拟合成一条直线,然后计算管脚端部中点到该直线的距离,即为管脚长度。 (x_i, y_i) 表示管脚端部中点坐标, (x_j, y_j) 表示管脚的根部中点坐标。通过最小二乘法将管脚的根部中点坐标拟合成直线,该直



(a) 侧视图管脚端部中点检测



(b) 侧视图管脚根部中点检测

图 7

线公式如下:

$$\left[\sum_{j=1}^n x_j \sum_{j=1}^n y_j - n \sum_{j=1}^n (x_j y_j) \right] x - \left[\left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2 - n \sum_{j=1}^n x_j^2 \right] y + \left[\sum_{j=1}^n x_j \sum_{j=1}^n (x_j y_j) - \sum_{j=1}^n x_j^2 \sum_{j=1}^n y_j \right] = 0 \quad (12)$$

式中, n 为拟合直线的坐标点的个数。

以式(12)表示的直线为基准求侧视图中管脚长度:

$$s_i = |Ax_i + By_i + C| / \sqrt{A^2 + B^2} \quad (13)$$

$$A = \sum_{j=1}^n x_j \sum_{j=1}^n y_j - n \sum_{j=1}^n (x_j y_j)$$

$$B = - \left[\left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2 - n \sum_{j=1}^n x_j^2 \right]$$

$$C = \sum_{j=1}^n x_j \sum_{j=1}^n (x_j y_j) - \sum_{j=1}^n x_j^2 \sum_{j=1}^n y_j$$

2.3 芯片管脚共面度的检测

QFP 管脚共面度如图 8 所示,是高管脚与最低管脚的垂直距离,即所有管脚中最大栈高值与最小栈高值的差值。本文提出一种基于三点法的改进方法来评价 QFP 芯片管脚共面度。



图 8 QFP 管脚共面度图示

三点法^[8]是指假设把被测器件放在一个理想的平面上,其中的三个管脚与基面构成一个接触面。以该接触面为基准,求其他管脚端部到该面的距离,该值即作为评价该管脚的共面度的值。在工程应用中,为减少运算量,一般都是选取最高的三个管脚作为确定一个平面的三点,即选取栈高最大的三个管脚来确定基准平面,如图 9 所示,三角形对应的三个顶点即为确定基准平面的三点。但这样可能会带来较大误差,栈高测试误差的累计导致基准面与理想基准面发生较大偏离。为减少误差,本文采用一种改进的三点法方案。芯片管脚共面度的检测具体步骤如下。

(1) 栈高按从大到小排序,取前 6 个栈高较大

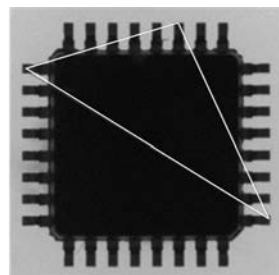


图 9 三点法

的管脚点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $\dots$ 、 $P_6(x_6, y_6, z_6)$,其中 x 、 y 分别为管脚端部中点坐标值, z 为管脚的栈高值。

(2) 由 $P_1, P_2, \dots, P_6$ 按最小二乘法拟合基准平面 S :

$$Ax + By + Cz = 1 \quad (14)$$

式中, A, B, C 为平面 S 的法线方向数。

使残差平方和最小:

$$\min E = \sum_{i=1}^6 (Ax_i + By_i + Cz_i - 1)^2 \quad (15)$$

(3) 以平面 S 为基准面,求各个管脚端部中点到该平面 S 的距离,作为芯片管脚共面度的值。

3 测试结果分析

图 10 是 CCD 拍摄的 QFP80 图像。本文将 Canny 算子应用于 QFP 芯片外观视觉检测系统中,对 QFP80 型号的芯片进行测试,并在同一精度上,与 Prewitt 算子作对比实验。

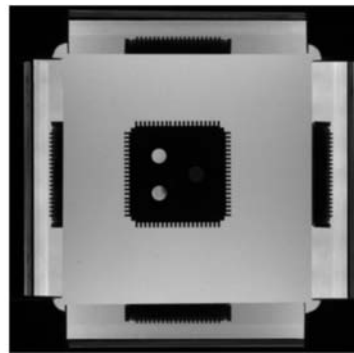


图 10 QFP80 图像

Prewitt 算子属于一阶微分算子,该边缘检测算子有两个模板(水平模板和垂直模板),分别为

$$\left. \begin{aligned} P_x &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ P_y &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

采用 Prewitt 算子对图像进行边缘提取时,分别用水平模板 P_x 和垂直模板 P_y 对图像进行卷积计算。如果 P_x 的响应是 x , P_y 的响应是 y ,则可以

根据下式求出图像的幅值：

$$P = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{17}$$

当 P 大于设定的阈值时即为边缘像素。

测试实验中,以 QFP80 芯片标准件为测试对象,将通过该系统测试所得的值与其标准值比较,用它们的差值评估系统检测精度。

测试步骤如下:①调试外观检测系统,将器件放在采图区中间,保证采图清晰;②视觉检测,通过软件系统进行图像处理,并将测试结果记录到数据库中;③将检测结果导出数据库,测试值与真值之差即为误差值;④根据测试结果综合评估视觉检测系统的精度。

分别采用 Canny 算子和 Prewitt 算子作为边缘提取算子时,外观检测系统栈高测试结果见表 1(表中列出了 QFP80 某一条边上的管脚的测试结果及误差值),QFP80 芯片管脚栈高标准值为 0.238mm。

表 1 Canny 算子和 Prewitt 算子对 QFP80 部分管脚栈高测试结果对比 mm

采用 Canny 算子的测试结果			采用 Prewit 算子的测试结果		
管脚 编号	测试值	误差值	管脚 编号	测试值	误差值
1	0.247	0.009	1	0.254	0.016
2	0.250	0.012	2	0.259	0.021
3	0.248	0.010	3	0.221	-0.017
4	0.231	-0.007	4	0.248	0.010
5	0.249	0.011	5	0.261	0.023
6	0.251	0.013	6	0.263	0.025
7	0.228	-0.01	7	0.221	-0.017
8	0.249	0.011	8	0.262	0.024
9	0.244	0.006	9	0.225	-0.013
10	0.225	-0.013	10	0.260	0.022
11	0.249	0.011	11	0.263	0.025
12	0.230	-0.008	12	0.256	0.018
13	0.247	0.009	13	0.249	0.011
14	0.244	0.006	14	0.248	0.010
15	0.226	-0.012	15	0.218	-0.020
16	0.246	0.008	16	0.248	0.010
17	0.244	0.006	17	0.227	-0.011
18	0.249	0.011	18	0.261	0.023
19	0.226	-0.012	19	0.219	-0.019
20	0.247	0.009	20	0.251	0.013

表 1 中,采用 Canny 算子提取边缘时,栈高测试结果的差值平均值为 0.0035mm,误差绝对值最大值为 0.013mm;而采用 Prewitt 算子提取边缘时,栈高测试结果的差值平均值为 0.0077mm,误差绝对值最大值为 0.025mm。如图 11 所示,采用 Prewitt 算子做边缘提取算子时,检测结果偏差比 Canny 算子的大。Prewitt 算子作为一阶微分算子,实现简单,但存在一阶微分算子固有的缺陷:对噪声敏感,容易丢失图像的

边缘信息,造成误差。而 Canny 算子是基于最优化思想推导出的边缘检测算子,满足三大最优准则,边缘定位精度高,不会产生虚假边缘,并使外观检测系统的精度达到了工业生产对检测精度的要求($\pm 0.01\text{mm}$)。

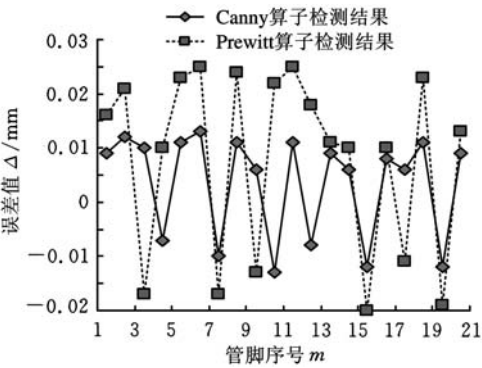


图 11 栈高检测结果对比折线图

采用 Canny 算子作为边缘提取算子,外观检查系统的共面度测试结果见表 2(表中列出了 QFP80 某一条边上的管脚的真值、测试结果及误差)。

表 2 QFP80 部分管脚共面度测试结果 mm

管脚 编号	真值	测试值	误差值	管脚 编号	真值	测试值	误差值
1	0.002	0.011	0.009	11	0.004	0.004	0.000
2	0.003	0.013	0.010	12	0.004	0.017	0.013
3	0.003	0.009	0.006	13	0.007	0.011	0.004
4	0.000	0.002	0.002	14	0.005	0.008	0.003
5	0.001	0.008	0.007	15	0.004	0.015	0.011
6	0.026	0.028	0.002	16	0.004	0.013	0.009
7	0.003	0.010	0.007	17	0.006	0.016	0.010
8	0.002	0.013	0.011	18	0.001	0.006	0.005
9	0.003	0.016	0.013	19	0.004	0.007	0.003
10	0.004	0.013	0.009	20	0.005	0.011	0.006

表 2 中,共面度测试结果的误差值平均值为 0.007mm,其误差绝对值最大为 0.013mm。测试结果表明,外观检测系统的精度已达到工业生产对检测精度的要求($\pm 0.01\text{mm}$)。

4 结语

结合 Canny 边缘检测算子,本文提出了有效的 QFP 管脚关键三维参数的检测方法,在理论与实践结合方面取得了满意的结果。本文将机器视觉成功应用到了 QFP 芯片外观检测中,有效地应用了 Canny 算子对芯片管脚进行边缘检测,使检测系统达到生产线上的检测精度要求。该系统在 QFP 封装集成电路芯片的视觉检测领域具有广阔的应用前景,而且该系统的设计思路还可应用于其他封装形式的集成电路芯片的视觉检测领域,可取得很好的经济效益和社会效益。

(下转第 301 页)

- erator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 203-207.
- [7] 王旭东,林腾蛟,李润方,等. 风力发电机组齿轮系统内部动态激励和响应分析[J]. 机械设计与研究, 2006, 22(3): 47-49.
- Wang Xudong, Lin Tengjiao, Li Runfang et al. The Internal Dynamic Excitation and Response Analysis of the Gear System for the Wind-driven Generator[J]. Machine Design and Research, 2006, 22(3): 47-49.
- [8] Peeters J L M, Sas P, Vandepitte D. Analysis of Internal Drive Train Dynamics in a Wind Turbine [J]. Wind Energy, 2006, 9(1/2): 141-161.
- [9] Heege A, Radovic Y, et al. Fatigue Load Computation of Wind Turbine Gearboxes by Coupled Structural Mechanism and Aerodynamic Analysis [J]. DEWI Magazin, 2006, 2(28): 61-68.
- [10] 秦大同, 邢子坤, 王建宏. 基于动力学和可靠性的风电齿轮传动系统参数优化设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(7): 24-31.
- Qin Datong, Xing Zikun, Wang Jianhong. Optimization Design of System Parameters of the Gear Transmission of Wind Turbine Based on Dynamics and Reliability[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(7): 24-31.
- [11] 秦大同, 古希国, 王建宏. 兆瓦级风力机齿轮传动系统动力学分析与优化[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(4): 408-414.
- Qin Datong, Gu Xiguo, Wang Jianhong. Dynamic Analysis and Optimization of Gear Trains in a Megawatt level Wind Turbine [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(4): 408-414.
- [12] 李东东, 陈陈. 风力发电系统动态仿真的风速模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 41-44.
- Li Dongdong, Chen Chen. Wind Speed Model for Dynamic Simulation of Wind Power Generation System[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 41-44.
- [13] Lim T C, Singh R. Vibration transmission Through Rolling Element Bearings[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 139(2): 179-22.
- [14] 杨军, 秦大同, 陈会涛, 等. 风力发电机传动系统随机风速下的载荷特性研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(15): 1837-1841.
- Yang Jun, Qin Datong, Chen Huitao et al. Research on Dynamic Load Characteristics of Wind Power Generation Transmission System under Random Wind[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(15): 1837-1841.
- (编辑 袁兴玲)
- 实验室教授、博士研究生导师。研究方向为机械传动和车辆动力传动及其控制。杨 军, 男, 1977 年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生, 西南科技大学制造科学与工程学院讲师。周志刚, 男, 1978 年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生, 河南科技大学车辆与动力工程学院讲师。陈会涛, 男, 1981 年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生。
- ~~~~~
- (上接第 294 页)
- 参考文献:
- [1] Newman T S, Jain A K. A Survey of Automated Visual Inspection[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1995, 61: 231-262.
- [2] Jarvis J. Research Directions in Industry Machine Vision [J]. A Workshop Summary, Computer, 1982, 15: 55-61.
- [3] 董鸿燕. 边缘检测的若干技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- [4] 金刚. 自适应 Canny 算法研究及其在图像边缘检测中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [5] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [6] 雒涛, 郑喜凤, 丁铁夫. 改进的自适应阈值 Canny 边缘检测[J]. 光电工程, 2009, 36(11): 106-111, 117.
- Luo Tao, Zheng Xifeng, Ding Tiefu. Improved Self-adaptive Threshold Canny Edge Detection[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(11): 106-111, 117.
- [7] 唐路路, 张启灿, 胡松. 一种自适应阈值的 Canny 边缘检测算法[J]. 光电工程, 2011, 38(5): 127-132.
- Tang Lulu, Zhang Qican, Hu Song. An Improved Algorithm for Canny Edge Detection with Adaptive Threshold [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(5): 127-132.
- [8] 薛晓洁, 孙长库, 叶声华. 用于 BGA 共面性检测的激光扫描在线测试系统[J]. 光电工程, 2001, 28(1): 39-42.
- Xue Xiaojie, Sun Changku, Ye Shenghua. Laser Scanning On-Line Inspection System for Ball Grid Array Coplanarity Measurement [J]. Opto-Electronic Engineering, 2001, 28(1): 39-42.
- (编辑 袁兴玲)
- 作者简介: 郑金驹, 男, 1987 年生。华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室硕士研究生。主要研究方向为机器人技术及应用机器视觉进行视觉检测与视觉定位。李文龙, 男, 1981 年生。华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室讲师、博士。王瑜辉, 男, 1968 年生。华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室高级工程师。罗明成, 男, 1986 年生。华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室硕士研究生。