

# 基于单幅图像的集成电路引脚共面性检测方法

吴福培, 朱树锴, 李昇平\*

汕头大学智能制造技术教育部重点实验室, 广东 汕头 515063

**摘要** 集成电路(IC)芯片引脚的共面性检测是确保其贴装质量的关键。基于单幅图像提出一种 IC 引脚共面性检测方法。首先,基于单目视觉系统建立相机、光源和被测表面的关系模型;其次,给出发光二极管(LED)环形结构光源的光强标定方法,并通过实验确定被测 IC 引脚材质的相关参数;然后,基于建立的光强与图像灰度的关系模型给出高度信息的求解方法;最后,基于高度信息还原 IC 引脚及其焊点的表面三维形貌。实验结果表明,本文方法检测 IC 芯片引脚及其焊点的实验结果与实际测量结果相比,其高度测量误差小于 $\pm 0.08$  mm,相对误差为 $-2.6\%$ ,验证了本文方法的有效性。

**关键词** 成像系统; 三维检测; 共面性检测; 集成电路芯片引脚; 单幅图像

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0111023

## Coplanarity Inspection Method for Integrated Circuit Pins Based on Single Image

Wu Fupei, Zhu Shukai, Li Shengping\*

Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology, Ministry of Education, Shantou University, Shantou, Guangdong 515063, China

**Abstract** Inspection of the coplanarity of pins in an integrated circuit (IC) is a very important process for ensuring the mounting quality of IC. In this paper, a coplanarity inspection method for IC pins based on a single image is proposed. First, a relation model that contains a camera, light source, and measured surface is constructed. This model is based on a monocular vision system. Then, the light intensity calibration method of a light emitting diode (LED) ring-structured light source is described, and the correlative parameter of the measured IC pin material is experimentally obtained. Further, a method for estimating the height information based on the constructed relationship model of light intensity and image grayscale is presented. Finally, the surface three-dimensional morphology of the IC pins and their solder joints are recovered using the height information. In comparison with the actual measurement results for IC pins and their solder joints, the experimental measurement results obtained in this work show that the measurement error for height is less than  $\pm 0.08$  mm, and the relative error is within  $-2.6\%$ , which verifies the effectiveness of the proposed method.

**Key words** imaging systems; three-dimensional detection; coplanarity detection; integrated circuit pins; single image

**OCIS codes** 110.3010; 120.2830; 120.1880

## 1 引 言

印刷电路板(PCB)是电子产品的核心部件,而集成电路(IC)芯片作为 PCB 重要的电子器件,其贴装质量的好坏将直接影响电子产品的品质。表面贴装型 IC 因具有集成度高、管脚多、间距小等特点,

目前已成为主流的封装形式。引脚是 IC 芯片内部电路与 PCB 上电路连接的“桥梁”。若 IC 芯片引脚不满足共面性要求,即最低引脚平面与最高引脚平面的垂直距离大于  $0.1$  mm<sup>[1-3]</sup>,在贴装时易出现空焊、连锡等缺陷,从而影响电子产品的功能和寿命,因此,IC 芯片引脚的共面性检测是确保其贴装质量

收稿日期: 2019-08-29; 修回日期: 2019-10-09; 录用日期: 2019-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61573233)、广东省自然科学基金(2018A0303130188)、广东省高校创新团队项目(2015KCXTD018)、广东省科技专项(190805145540361)

\* E-mail: spli@stu.edu.cn

的关键。目前,对 IC 引脚的共面性检测方法主要分为两类,即二维检测法和三维检测法。二维检测法通过采集样品图片,分析 IC 引脚特征,进而实现 IC 缺陷的检测和分类<sup>[4-6]</sup>。三维检测法则通过恢复 IC 引脚样品表面的三维形貌,进而评估其与正常良品的差异,以检测 IC 引脚贴装缺陷<sup>[7]</sup>。与二维检测法相比,三维检测法对待测物体的颜色、纹理、边缘等特征依赖程度较低,可更全面地评价待测物体的质量<sup>[8]</sup>。

三维检测法可分为接触式和非接触式检测。接触式检测主要有三坐标测量机<sup>[9-10]</sup>和接触式轮廓仪<sup>[11-12]</sup>,该类方法的测量精度高,但速度慢,且在测量时需要与待测物体进行接触,容易对待测物体表面造成损伤<sup>[13]</sup>。非接触式检测主要是光学测量方法。光学测量方法可分为两类,即主动检测法和被动检测法<sup>[13-15]</sup>。主动检测法对 IC 引脚投射特定的结构光,被引脚调制的结构光经解调后可得引脚的三维信息。主动检测法主要有飞行时间法<sup>[16]</sup>、激光三角法<sup>[17]</sup>、结构光法<sup>[18]</sup>等。主动检测法测量精度高,但易受环境光线的干扰,此外在检测过程中需确保引脚表面各区域均被光源照射,因此,该过程需移动物体或光源,易出现移位误差而导致误判。被动检测主要依靠环境光或结构光反射,从一个或多个摄像头获取的二维图像中提取距离信息,形成三维

表面数据<sup>[19-20]</sup>。被动检测法主要有单目视觉法和双目立体视觉法。单目视觉法使用单个相机采集 IC 引脚图像,根据光照模型及物体表面特性等先验知识设计算法以恢复 IC 引脚的三维形貌。双目立体视觉法采用两个相机采集 IC 引脚在不同视角下的图像,基于三角测量原理,并结合图像特征匹配点的视差信息以恢复 IC 引脚表面的三维形貌<sup>[21]</sup>。双目立体视觉法使用前需对两台摄像机的内外参数进行标定,在恢复物体表面三维形貌时需完成不同图像的特征匹配,测量过程复杂且运算量较大<sup>[21-24]</sup>。而单目视觉法仅需对一台摄像机进行内外参数标定,匹配过程中无图像特征点,利于降低计算量。

为克服双目视觉的图像特征匹配问题和主动检测法的机械移位误判问题,本文基于单幅图像提出一种 IC 芯片引脚共面性检测方法,用以提高检测精度和稳定性。首先建立 IC 引脚光照反射模型,分析入射光光强与图像灰度之间的关系;其次在上述关系的基础上建立入射光光强与图像灰度关系模型;最后基于关系模型,提出 IC 引脚共面性检测方法。

## 2 单目视觉系统

图 1 为单目视觉系统流程,检测过程由图像采集、图像预处理、三维重建、缺陷检测四部分组成。

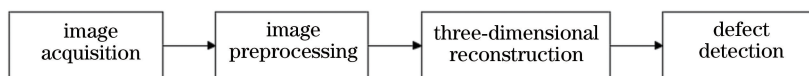


图 1 单目视觉系统流程

Fig. 1 Flow chart of monocular vision system

图 2 为单目视觉系统示意图。通过 3CCD 相机采集 IC 芯片引脚及其焊点图像,其中,三色环形结构光源由红(r)、绿(g)、蓝(b)三种不同颜色、不同照射角度的发光二极管(LED)阵列组成,待测物体位于光源的焦点位置,从而获得均匀一致的照明<sup>[25]</sup>。由于 IC 芯片引脚及其焊点上各点的高度和表面形状相异,以及其对应红、绿、蓝三色光的入射角不同,IC 引脚图像中各像素点用相应的灰度值来表示<sup>[26]</sup>。本文 IC 引脚共面性检测方法将建立光强与图像灰度的关系模型,然后标定光强,求取关系模型中被测表面各点的高度信息,进而实现三维检测。

## 3 基于单幅图像的三维计算模型

在光学成像系统中,图像中的每一个像素点均为图像传感器上一个微小的感光元,像素点的灰度

值能反映进入相机光线的强度。为进一步分析,建立如图 3 所示的单目视觉系统模型。

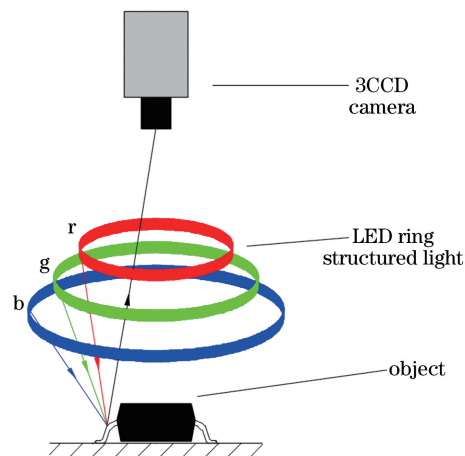


图 2 单目视觉系统示意图

Fig. 2 Diagram of monocular vision system

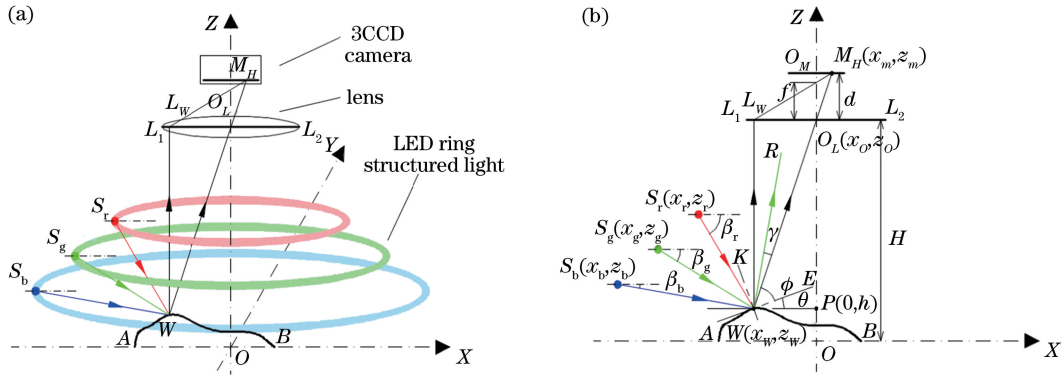


图 3 单目视觉系统模型。(a)光照模型;(b)简化模型

Fig. 3 Model of monocular vision system. (a) Illumination model; (b) simplified model

在图 3(a)的单目视觉系统中,环形结构光源红、绿、蓝三色发光点  $S_r$ 、 $S_g$ 、 $S_b$  的光线照射在待测物体表面区域  $\sigma_w$ , 假设光强分别表示为  $I_r$ 、 $I_g$ 、 $I_b$ 。其经物体表面反射后,一部分光线进入相机,成像于像素点  $M_H$ , 对应的红、绿、蓝灰度值分别为  $G_r$ 、 $G_g$ 、 $G_b$ 。在光线的传输过程中,受到待测物体表面倾角和材料属性的影响,其光强通常会发生相应变化。物体表面经过光源照射,将产生两种反射光,一种是散射光,另一种是镜面反射光。因此,为简化数学模型,只考虑物体材料对散射光的影响,将物体材料对红、绿、蓝光的影响系数分别设为  $f_r$ 、 $f_g$ 、 $f_b$ 。另外,如图 3(b)所示,光线经过表面倾角为  $\theta$  的  $W$  点反射后,根据光的反射原理,红、绿、蓝光的理论反射光线与他们的入射光线关于法线  $KW$  对称,但实际上,他们的反射光线会聚在一起沿光路  $WM_H$  进入相机,故可将理论反射光线与实际反射光线夹角分别设为  $\gamma_r$ 、 $\gamma_g$ 、 $\gamma_b$ 。则光强与图像灰度值的对应关系可表示为

$$\begin{cases} G_r = I_r \times \sigma_w \times f_r \times \cos \theta \times \cos \gamma_r \\ G_g = I_g \times \sigma_w \times f_g \times \cos \theta \times \cos \gamma_g \\ G_b = I_b \times \sigma_w \times f_b \times \cos \theta \times \cos \gamma_b \end{cases} \quad (1)$$

在所采用的单目视觉系统中,将红、绿、蓝光线与平面  $XOY$  的夹角分别设为  $\beta_r$ 、 $\beta_g$ 、 $\beta_b$ , 实际反射光

线与在横截面中过  $W$  点的切线的夹角为  $\phi$ , 则

$$\begin{cases} \tan \beta_r = \left| \frac{z_r - z_w}{x_r - x_w} \right| \\ \tan \beta_g = \left| \frac{z_g - z_w}{x_g - x_w} \right| \\ \tan \beta_b = \left| \frac{z_b - z_w}{x_b - x_w} \right| \end{cases} \quad (2)$$

根据  $\theta$ 、 $\phi$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  之间的关系,可得红、绿、蓝光理论反射光线和实际反射光线的夹角  $\gamma_r$ 、 $\gamma_g$ 、 $\gamma_b$  分别为

$$\begin{cases} \gamma_r = |(\pi + \theta - \phi) - (\pi - \beta_r)| \\ \gamma_g = |(\pi + \theta - \phi) - (\pi - \beta_g)| \\ \gamma_b = |(\pi + \theta - \phi) - (\pi - \beta_b)| \end{cases} \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式,可得

$$\begin{cases} \gamma_r = \left| \theta - \phi + \arctan \left| \frac{z_r - z_w}{x_r - x_w} \right| \right| \\ \gamma_g = \left| \theta - \phi + \arctan \left| \frac{z_g - z_w}{x_g - x_w} \right| \right| \\ \gamma_b = \left| \theta - \phi + \arctan \left| \frac{z_b - z_w}{x_b - x_w} \right| \right| \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $0 < \gamma_r < \frac{\pi}{2}$ ,  $0 < \gamma_g < \frac{\pi}{2}$ ,  $0 < \gamma_b < \frac{\pi}{2}$ 。将(4)式代入(1)式,可得

$$\begin{cases} G_r = I_r \times \sigma_w \times f_r \times \cos \theta \times \cos \left| \theta - \phi + \arctan \left| \frac{z_r - z_w}{x_r - x_w} \right| \right| \\ G_g = I_g \times \sigma_w \times f_g \times \cos \theta \times \cos \left| \theta - \phi + \arctan \left| \frac{z_g - z_w}{x_g - x_w} \right| \right| \\ G_b = I_b \times \sigma_w \times f_b \times \cos \theta \times \cos \left| \theta - \phi + \arctan \left| \frac{z_b - z_w}{x_b - x_w} \right| \right| \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $G_r$ 、 $G_g$ 、 $G_b$  为彩色图像的灰度值;  $I_r$ 、 $I_g$ 、 $I_b$  可通过实验标定;  $f_r$ 、 $f_g$ 、 $f_b$  可通过初始实验算出;  $\sigma_w$

为检测区域,在图像中表示与点  $W$  对应的像素点在  $X$  和  $Y$  方向上的位置;  $z_w$  为待测点的高度。在所

采用的单目视觉系统中,  $(x_r, z_r)$ 、 $(x_g, z_g)$ 、 $(x_b, z_b)$  均已知,  $x_w$  可以通过 X 方向上图像坐标与像素坐标的变换关系确定。因此, 在 (5) 式中, 未知量只有  $z_w$ 、 $\phi$ 、 $\theta$ , 通过求解 (5) 式, 即可解出此三个未知量。在图像中, 所有检测区域均可采用相同的方法求取相应高度信息, 进而完成待测物体表面的三维重建, 实现表面质量检测。

### 4 实验结果与分析

在工业检测中, 常用的 IC 芯片尺寸小于  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , 少数 IC 芯片的最大尺寸小于  $18\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 。为检测本文方法的有效性, 将针对实测最大高度为  $1.58\text{ mm}$  的 IC 芯片引脚及其焊点进行三维测量实验。实验过程采用环形结构光源, 且相机成像视场为  $24\text{ mm} \times 18\text{ mm}$  (满足绝大部分 IC 芯片的检测), 相机分辨率为  $1024\text{ pixel} \times 768\text{ pixel}$ 。实验所用的软件为 MATLAB R2017a。实验所用计算机配置为双核 Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU 1.70 GHz, 2.40 GHz 处理器, 8 GB 内存, 64 位操作系统。

检测过程中, 被测材质对光的反射特性易受入射光强的影响。实验前, 使用照度计标定环形结构光源焦点处的光强, 分别为  $I_r = 2510\text{ cd}$ ,  $I_g = 2620\text{ cd}$ ,  $I_b = 766\text{ cd}$ 。为测得材料对光的影响系数, 需采用与 IC 引脚相似材质的标定物进行初始实验。初始实验将已知高度的焊锡垫片作为标定物, 使用与环形结构光源光强相同的单色 LED 点光源, 以不同

入射角照射焊锡标定物, 获得一组图像序列, 分析图像序列中处于标定物同一位置标定点的灰度变化规律, 通过实验数据拟合出入射角与灰度值函数方程, 从而确定方程中材料对光的影响系数<sup>[27]</sup>。如表 1 所示, 初始实验确定材料对光的影响系数为  $f_r = 1079$ ,  $f_g = 185$ ,  $f_b = 671$ 。

表 1 材料对光的影响系数

Table 1 Effect coefficient of material on light

Calibration point	Calibration position	$f_r$	$f_g$	$f_b$
Point 1	(200, 384)	1886	343	1094
Point 2	(225, 384)	1446	275	826
Point 3	(250, 384)	1068	131	812
Point 4	(275, 384)	676	167	397
Point 5	(300, 384)	316	10	225
Mean		1079	185	671

图像进行预处理后, 基于 IC 引脚图像的颜色特征对引脚进行区域划分, 分为引脚外侧焊点区域、靠近外侧焊点的引脚根部区域、靠近芯片本体的引脚顶部区域、根部区域和顶部区域之间的引脚过渡区域, 对不同区域分别进行计算。图 4 为 IC 原图及其各颜色通道灰度图, 图中两侧颜色较为丰富的区域为 IC 引脚的焊点, 中间黑色区域为芯片本体, 焊点与芯片本体之间的区域为 IC 引脚。对 IC 进行三维测量, 其重建结果如图 5 所示。IC 引脚外侧焊点表面形状具有随机性, 引脚根部和焊点区域连接处高度平缓过渡, 在靠近芯片本体处轮廓逐渐递增, 各引脚的形状清晰可见, 与实际 IC 引脚及其焊点的形状相符。

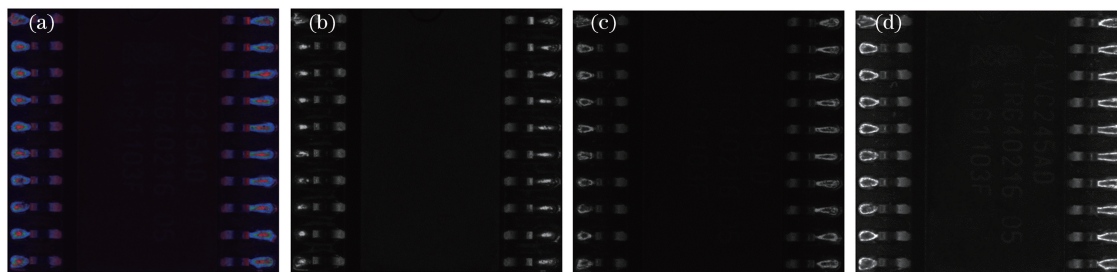


图 4 IC 图。(a)原图;(b)红色通道;(c)绿色通道;(d)蓝色通道

Fig. 4 IC diagrams. (a) Original image; (b) red channel; (c) green channel; (d) blue channel

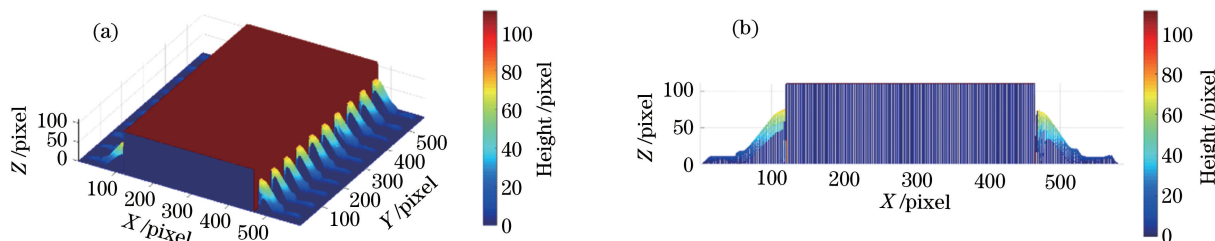


图 5 IC 芯片重建图。(a) IC 芯片侧视图;(b) IC 芯片 Y 方向视图

Fig. 5 Reconstruction result of IC. (a) Sideview of IC; (b) Y direction view of IC

为进一步检验实验结果的有效性,实验过程中将测得的高度信息转换为实际高度,并与实际测量的引脚及其焊点的三维图进行对比。为节省检测时间,截取原始图像中 IC 芯片引脚部分进行测量。在  $572 \text{ pixel} \times 589 \text{ pixel}$  的芯片图像中,取左侧焊点 X 轴像素为 30 和左侧引脚根部 X 轴像素为 66 的截

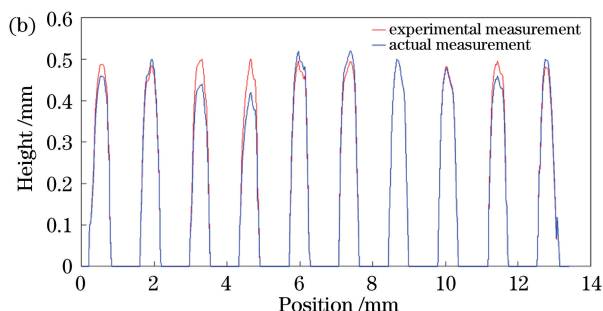
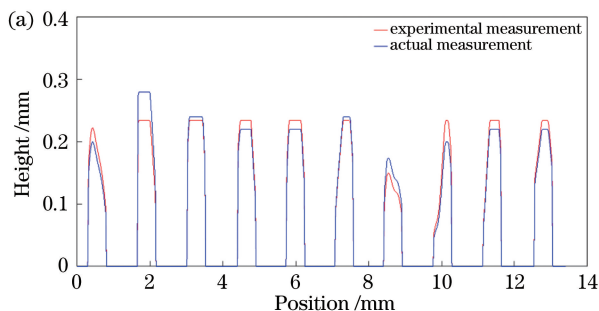


图 6 IC 芯片截面图。(a) IC 芯片焊点截面;(b) IC 芯片引脚截面

Fig. 6 Cross-sections of IC. (a) Cross-section of IC solder joints; (b) cross-section of IC pins

如表 2 所示,分别在 IC 芯片引脚和焊点截面图上的 10 个分段中选取最高点进行误差分析。将采用本文方法检测 IC 芯片引脚及其焊点的结果与使用如图 7 所示的激光三角法<sup>[17]</sup>的实际测量结果相比较,其误差小于  $\pm 0.08 \text{ mm}$ ,相对误差为  $-2.6\%$ ,实验结果表明:本文方法能有效恢复被测表面的三维形貌;通过比较同一截面不同测量点的高度,如果最大偏差均小于或等于  $0.1 \text{ mm}$ ,则可判断该引脚的共面性良好,反之,则不合格。

为进一步检验本文方法的有效性,采用基于单目视觉的灰度迭加法<sup>[27]</sup>对图 4 所示的 IC 进行三维测量,其重建结果如图 8 所示。在图 8(a) 中 IC 左侧引脚外侧焊点与引脚根部直接相连,与实际形状相比,存在较大的误差,最大误差超过  $3\%$ 。

如图 9 所示,相比于本文方法,基于单目视觉的灰度迭加法对引脚表面的轻微凸起不敏感,在 IC 引脚三维检测时易出现检测错误。并且表 3 所示的误差分析结果表明,采用灰度迭加法对该 IC 引脚检测结果与实际结果相比较,最大误差为  $-0.18 \text{ mm}$ ,难

面,焊点截面如图 6(a) 所示,引脚截面如图 6(b) 所示。实验中,将初始实验标定的系数,如光照影响系数、光源光强等,与芯片图像采集过程中的实际系数相比,实验标定的系数存在少量的误差,实验结果发现,实验标定的系数对引脚重建结果产生的误差小于  $3\%$ 。

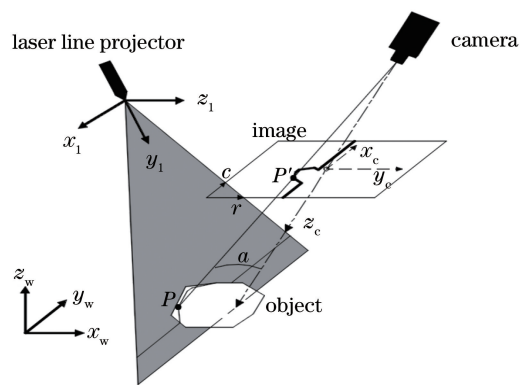


图 7 激光三角法<sup>[17]</sup>

Fig. 7 Laser triangulation<sup>[17]</sup>

以满足 IC 引脚共面性检测精度的要求。

为了进一步证明本文方法的可重复性,使用如图 5 所示的三维测量结果进行误差统计与分析。以各测量点偏离真实值的误差为横坐标,误差所占的比重为纵坐标,得到如图 10 所示的实验结果。由图 10 可知,测量误差呈正态分布,采用本文方法对 IC 芯片引脚及焊点三维检测的误差置信区间为  $[-5\%, 5\%]$ ,其置信水平为  $95.12\%$ 。

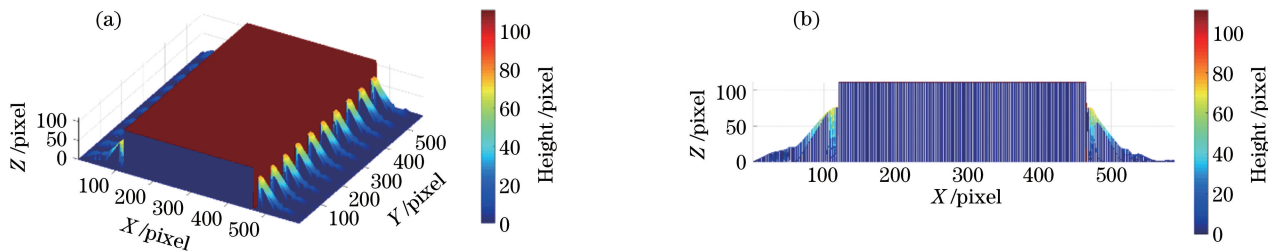


图 8 灰度迭加法的 IC 芯片重建图。(a) IC 芯片侧视图;(b) IC 芯片 Y 方向视图

Fig. 8 Reconstruction results of IC by using gray superposition method. (a) Sideview of IC; (b) Y direction view of IC

表 2 IC 焊点和引脚的三维检测结果

Table 2 3D detection results of IC solder joints and pins

mm

Sampling point	Solder joint of IC			Pin of IC		
	Actual height (result in Ref. [17])	Experimental height	Error	Actual height (result in Ref. [17])	Experimental height	Error
Point1	0.20	0.22	-0.02	0.46	0.48	-0.02
Point2	0.28	0.23	0.05	0.50	0.48	0.02
Point3	0.24	0.23	0.01	0.44	0.50	-0.06
Point4	0.22	0.23	-0.01	0.42	0.50	-0.08
Point5	0.22	0.23	-0.01	0.52	0.50	0.02
Point6	0.24	0.23	0.01	0.52	0.49	0.03
Point7	0.18	0.17	0.01	0.50	0.50	0
Point8	0.20	0.23	-0.03	0.48	0.48	0
Point9	0.22	0.23	-0.01	0.46	0.49	-0.03
Point10	0.22	0.23	-0.01	0.50	0.48	0.02

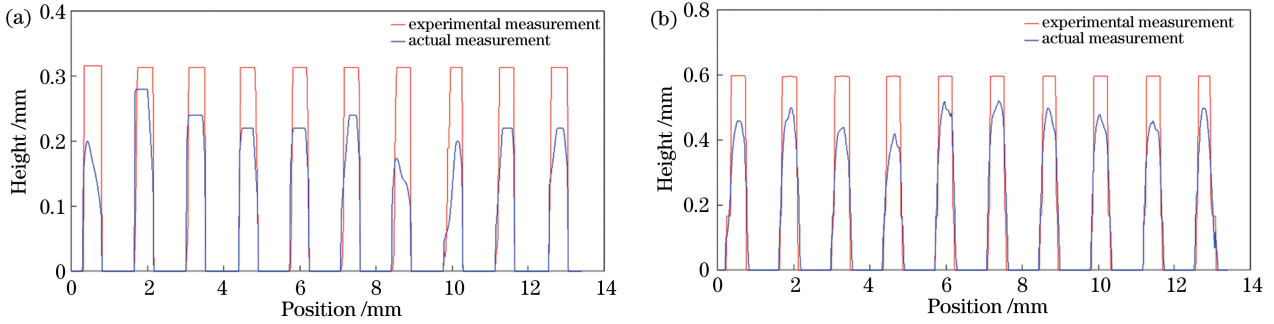


图 9 灰度迭加法的 IC 芯片截面图。(a) IC 芯片焊点截面;(b) IC 芯片引脚截面

Fig. 9 Cross-sections of IC by using gray superposition method. (a) Cross-section of IC solder joints; (b) cross-section of IC pins

表 3 基于灰度迭加法的 IC 焊点及引脚的三维检测结果

Table 3 3D detection results of IC solder joints and pins based on gray superposition method

mm

Sampling point	Solder joint of IC			Pins of IC		
	Actual height (result in Ref. [17])	Experimental height	Error	Actual height (result in Ref. [17])	Experimental height	Error
Point1	0.20	0.32	-0.12	0.46	0.60	-0.14
Point2	0.28	0.32	-0.04	0.50	0.60	-0.10
Point3	0.24	0.32	-0.08	0.44	0.60	-0.16
Point4	0.22	0.32	-0.10	0.42	0.60	-0.18
Point5	0.22	0.32	-0.10	0.52	0.60	-0.08
Point6	0.24	0.32	-0.08	0.52	0.60	-0.08
Point7	0.16	0.32	-0.16	0.50	0.60	-0.10
Point8	0.20	0.32	-0.12	0.48	0.60	-0.12
Point9	0.22	0.32	-0.10	0.46	0.60	-0.14
Point10	0.22	0.32	-0.10	0.50	0.60	-0.10

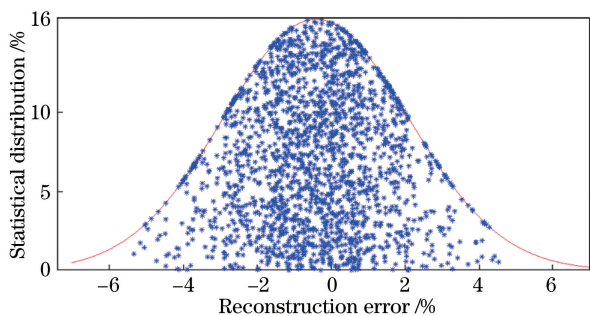


图 10 IC 芯片重建结果的概率分布

Fig. 10 Probability distribution of IC reconstruction results

## 5 结 论

基于单目视觉成像系统,建立入射光光强与图像灰度值的关系模型,提出基于恢复待测物表面形貌的三维检测方法。在标定红、绿、蓝三色入射光强的过程中,建立该三色光光照强度与其三通道图像灰度的对应关系模型,并给出关系模型中高度信息的求解方法,该方法能准确恢复引脚及其焊点的表面形貌,实现引脚共面性检测。采用本文方法检测,不仅可恢复待测物体的表面形貌,还可基于求解出的倾角信息对所得的高度信息进行检验,从而提高了重建精度和检测的可靠性。实验结果表明:本文方法的测量结果与实际高度的误差小于 $\pm 0.08$  mm,相对误差为 $-2.6\%$ ,检验了本文方法的有效性;IC 芯片检测误差的置信区间为 $[-5\%, 5\%]$ ,置信水平为 $95.12\%$ ,表明本检测方法具有较好的稳定性。

## 参 考 文 献

- [1] Yang C, Deng Y. The study of reforming pins for surface mount integrated circuit[J]. Electronics and Packaging, 2014, 14(9): 5-8, 32.  
杨城, 邓勇. 表面贴装集成电路引脚整形研究[J]. 电子与封装, 2014, 14(9): 5-8, 32.
- [2] General administration of quality supervision, inspection and quarantine of the people's republic of China. Terminology of packages for semiconductor integrated circuits: GB/T 14113-1993 [S]. Beijing: China Standards Press, 1993.  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 半导体集成电路封装术语: GB/T 14113-1993 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [3] Ministry of industry and information technology. Semiconductor integrated circuits—specification of leadframes for small outline package: GB/T 15878-2015 [S]. Beijing: China Standards Press, 2015.  
中华人民共和国工业和信息化部. 半导体集成电路小外形封装引线框架规范: GB/T 15878-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [4] Wu F, Zhang X. Feature-extraction-based inspection algorithm for IC solder joints[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2011, 1(5): 689-694.
- [5] Cai N, Lin J, Ye Q, et al. A new IC solder joint inspection method for an automatic optical inspection system based on an improved visual background extraction algorithm [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2016, 6(1): 161-172.
- [6] Chen S H, Perng D B. Automatic optical inspection system for IC molding surface [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016, 27(5): 915-926.
- [7] Wen X, Song K, Niu M, et al. A three-dimensional inspection system for high temperature steel product surface sample height using stereo vision and blue encoded patterns[J]. Optik, 2017, 130: 131-148.
- [8] Song L M, Zhou X L, Xu K X, et al. Three-dimensional defect detection based on single measurement image [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(9): 1195-1200.  
宋丽梅, 周兴林, 徐可欣, 等. 基于单幅测量图像的三维缺陷检测技术 [J]. 光学学报, 2005, 25(9): 1195-1200.
- [9] Li Y D, Gu P H. Free-form surface inspection techniques state of the art review [J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(13): 1395-1417.
- [10] Sidki H M, Amer M. Evaluation of CMM for flatness measurements [J]. Metrology and Measurement Systems, 2008, 15(4): 585-593.
- [11] Zhou M B, Lin D J, Guo F R, et al. Measurement of microstructure surface topography [J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(3): 7-13.  
周明宝, 林大健, 郭履容, 等. 微结构表面形貌的测量 [J]. 光学精密工程, 1999, 7(3): 7-13.
- [12] Yang L, Gao Y, Wang X Z, et al. Development of a large range nanometer level profilometer with controlled contact force [J]. Key Engineering Materials, 2005, 295/296: 489-494.
- [13] Zhang Z Y, Lin Y. Building a 3D scanner system based on monocular vision [J]. Applied Optics, 2012, 51(11): 1638-1644.
- [14] Su X Y, Zhang Q C. Dynamic 3-D shape measurement method: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 191-204.
- [15] Guo M, Hu L L, Li J. Local point cloud reconstruction of ceramic-bowl-surface defect based on multi-image sequences [J]. Acta Optica Sinica,

- 2017, 37(12): 1215002.  
郭萌, 胡辽林, 李捷. 基于多幅图像的陶瓷碗表面缺陷的局部点云重建[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1215002.
- [16] Lange R, Seitz P. Solid-state time-of-flight range camera[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(3): 390-397.
- [17] Tognola G, Parazzini M, Svelto C, et al. A fast and reliable system for 3D surface acquisition and reconstruction[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(3): 295-305.
- [18] Pan W, Zhao Y, Ruan X Y. A new method for getting high precision phase in structural light measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 687-691.  
潘伟, 赵毅, 阮雪榆. 结构光测量中获取高精度相位的新方法[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 687-691.
- [19] Bogue R. Three-dimensional measurements: a review of technologies and applications[J]. Sensor Review, 2010, 30(2): 102-106.
- [20] Li J J, Zhao H. Three-dimensional vision measuring technique based on multi-modal monogenic features detecting and matching [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0712007.  
李进军, 赵宏. 一种基于多模式单演特征检测与匹配的三维视觉测量方法[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0712007.
- [21] Wang S, Xu X. 3D reconstruction based on horopter [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0515004.  
王珊, 徐晓. 基于双目单视面的三维重建[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0515004.
- [22] Lei Y Z, Zhao H J, Jiang H Z. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1338-1342.  
雷彦章, 赵慧洁, 姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. 光学学报, 2008, 28(7): 1338-1342.
- [23] Wei Y J, Wu C D, Wang Y, et al. Diffusion-based three-dimensional reconstruction of complex surface using monocular vision[J]. Optics Express, 2015, 23(23): 30364-30378.
- [24] Zeng Z P, Zhang J L, Wei Z S, et al. Three-dimensional reconstruction method based on smartphone imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111502.  
曾昭鹏, 张江乐, 魏志尚, 等. 一种基于智能手机成像的三维重建方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111502.
- [25] Lu S L, Zhang X M. Analysis and optimal design of illuminator for lead fess tin solder joint inspection[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(8): 1377-1383.  
卢盛林, 张宪民. 无铅焊点检测光源的分析与优化设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8): 1377-1383.
- [26] Bai X F, Zhang Z H. 3D shape measurement based on colour fringe projection techniques [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1912-1925.  
白雪飞, 张宗华. 基于彩色条纹投影术的三维形貌测量[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1912-1925.
- [27] Wu F P, Guo J H, Zhang X M, et al. 3D quality inspection method for PCB solder joint surface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 233-240.  
吴福培, 郭家华, 张宪民, 等. PCB焊点表面三维质量检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 233-240.