

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106934

# 大尺寸面板级封装芯片精密定位检测<sup>\*</sup>

陈康清 陈新度 吴磊 陈志航 李璞

(广东工业大学机电工程学院 广州 510006)

**摘要:** 针对大尺寸面板级扇外型芯片封装过程中因塑封工序中芯片位置漂移会影响后续工序的问题,研究 600 mm×600 mm 大板扇出封装芯片精密定位检测方法。通过大理石气浮龙门架平台搭载的 CCD 相机实现大幅面小目标的自动定位。对 CCD 图像边缘定位精度、相机安装水平偏角误差、大理石气浮平台的定位精度、直线度和垂直度误差进行测量分析,建立误差模型,通过误差校正减少运动平台产生的累积误差,提高运动平台的定位精度。实验表明,结合 Canny 算子和 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法抗干扰能力强,边缘定位精度达到 0.3 pixel。误差补偿后运动平台的定位精度由 55.3 μm 降到 2 μm, X、Y 轴垂直度由 14.40 arcsec 降到 0.96 arcsec。大理石气浮龙门架平台与 CCD 相机融合的大板扇出封装芯片定位检测方法的定位精度为 7 μm,能满足大部分芯片封装过程中芯片定位的精度要求。

**关键词:** 亚像素边缘检测;芯片定位;定位测量;误差校正

**中图分类号:** TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Precise positioning and inspection of large-size panel-level packaged chips

Chen Kangqing Chen Xindu Wu Lei Chen Zhihang Li Pu

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that during the process of large-size panel-level fan-out chip packaging, the chip position drift in the plastic packaging process will affect the subsequent process, the precision positioning and detection method of the 600 mm×600 mm large-board fan-out package chip is studied. The automatic positioning of large-format small targets is realized by the CCD camera mounted on the marble air-floating gantry platform. Measure and analyze the CCD image edge positioning accuracy, camera installation horizontal deflection error, positioning accuracy of the marble floating platform, straightness and verticality errors, establish an error model, reduce the cumulative error generated by the motion platform through error correction, and improve the motion platform the positioning accuracy. Experiments show that the sub-pixel edge detection algorithm combining Canny operator and Zernike moment has strong anti-interference ability, and the edge positioning accuracy reaches 0.3 pixel. After error compensation, the positioning accuracy of the moving platform is reduced from 55.3 μm to 2 μm, and the verticality of the X and Y axes is reduced from 14.40 arcsec to 0.96 arcsec. The positioning accuracy of the large-slab fan-out package chip positioning detection method integrated with the marble air-floating gantry platform and the CCD camera is 7 μm, which can meet the accuracy requirements of most chip positioning in the chip packaging process.

**Keywords:** sub-pixel edge detection; chip positioning; positioning measurement; error correction

## 0 引言

近年来,随着电子设备功能的不断增强,芯片向着高密度、小尺寸和低成本的方向发展<sup>[1-2]</sup>。作为扇外型晶圆级封装技术(fan out wafer level package, FOWLP)的升级技术,大尺寸面板级封装(fan-out panel level package, FOPLP)拥有低成本,高度小型化封装等优势,拥有广阔的发展前

景<sup>[3-5]</sup>。面板级封装的面板呈方形,大小通常为 300 mm×300 mm~600 mm×600 mm。大板扇出封装的芯片尺寸能达到 1 μm,一个载板上封装的芯片可能有几十上百万个。面板级扇外型芯片封装过程中,晶圆在切割完成后需要将芯片转移到涂有临时键合胶的载板上,然后进行塑封、研磨、打孔、布线等工序。芯片在塑封过程中由于各种因素影响会造成芯片漂移的问题<sup>[6]</sup>,使芯片位置不再准确,影响芯

收稿日期:2021-06-14

\* 基金项目:广东省自然科学基金(2018A030307063)项目资助

片后续的打孔和布线等工艺,进而影响芯片封装的成品率。日前基于二维平面图像的小目标定位测量技术的研究比较成熟。文献[7]通过改进爬山算法和 Zernike 矩算法减少亚像素边缘检测的计算量,两者结合对规则边缘定位误差更小,为亚像素边缘检测提供了新方法。王小鹏等[8]针对透明微小器件的缺陷检测提出了可见光透射机器学习检测法,检测精度约为 10 μm。张喜民等[9]提出了基于机器学习的小尺寸零件的精密测量方法,对手机尾插工件测量精度达到 0.015 8 mm。文献[10]针对芯片缺陷检测过程中芯片摆放位置倾斜的问题提出一种基于改进 Harris 角点检测的芯片图像快速校正方法,有效提高视觉检测效率。但将视觉与运动平台结合实现大幅面小目标定位检测的研究较少。高精度精密定位检测是目前自动化生产迫切需求的,因此对大板扇出封装芯片进行定位测量的研究是有巨大价值的。

在视觉与图像融合定位检测过程中,测量误差有芯片图像位置的定位误差、运动平台的总体定位误差以及相机安装过程中相机坐标系的 y 轴与运动平台的 Y 轴安装不平行导致的测量误差。影响运动平台的总体精度的误差主要有 X、Y 轴的定位误差,直线度误差和垂直度误差。定位精度误差对运动平台的总体定位精度影响更为显著[11]。本文通过对亚像素边缘检测算法进行改进,提高芯片图像的定位精度。利用激光干涉仪测量平台的定位精度、直线度、垂直度和相机与坐标轴的水平夹角,建立误差模型用于校正由运动平台移动产生的累积误差,进而提升视觉与运动平台融合的定位检测的精度。实验结果表明视觉与图像融合定位检测的精度达到 7 μm,对芯片塑封后的芯片漂移位置检测、芯片激光打孔前的定位、芯片封装过程中的电路纠偏等都有重要的意义。

### 1 芯片图像的定位

随着工业检测技术的发展,Canny 算子等传统像素级边缘检测算子难以满足高精度检测的需求[12-14]。亚像素边缘检测算法由于具有更高的边缘定位精度被广泛地应用于精密定位检测。其中矩方法由于具有边缘检测精度高,抗干扰能力强等优点被广泛地应用于亚像素边缘检测[15]。

#### 1.1 Zernike 矩亚像素边缘点检测原理

Zernike 矩边缘检测理想模型如图 1 所示,圆为单位圆, L 为穿过单位圆的一条理想直线边缘,边缘两侧的灰度值分别为 h 和 h+k,灰度差为 k。ab、cd 分别为不同阶次 Zernike 矩求得的边缘, l 为理想边缘到原点的理论距离, l<sub>1</sub>、l<sub>2</sub> 分别为原点离 ab、cd 的距离[16]。

放大效应,亚像素坐标 (x<sub>s</sub>, y<sub>s</sub>) 为:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{Nl}{2} \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N 为模板大小。

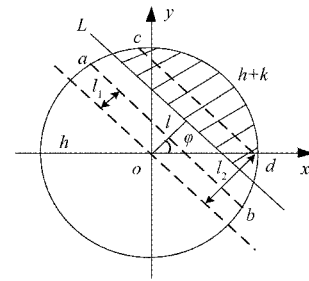


图 1 理想边缘模型

#### 1.2 改进 Zernike 矩亚像素边缘检测方法

文献[16]推导了 7×7 Zernike 矩模板系数,提出了新的亚像素边缘判定条件:  $k \geq k_t \cap |l_2 - l_1| \leq l_t$ , 使亚像素边缘定位精度更高、边缘更细。但实际检测中亚像素边缘点的判定条件中  $k_t$  和  $l_t$  的阈值需要手动选择,若选择不合适的  $k_t$  和  $l_t$ , 会导致检测到伪边缘点或边缘点丢失,从而影响定位精度。本文在文献[16]的基础上对亚像素边缘检测算法进行了改进,将亚像素边缘检测分为像素级边缘定位和亚像素级边缘定位两步。

具体步骤如下:

- 1) 采集芯片图像。
- 2) 对芯片图像进行中值滤波预处理,去掉部分噪声。
- 3) 利用 Canny 算子检测芯片图像像素级边缘。
- 4) 对 Canny 算子处理后的边缘图像进行边缘过滤,去除伪边缘和噪声点,只保留检测目标的边缘轮廓。
- 5) 利用基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法对像素级边缘点对应的原图像像素点进行亚像素边缘检测。
- 6) 在  $k \geq k_t \cap |l_2 - l_1| \leq l_t$  的判定条件基础上,增加判定条件  $r \leq r_t$ , 其中  $r$  为亚像素边缘点到像素级边缘点的距离。保证亚像素点在以像素级边缘点为圆心,半径为  $r_t$  的圆的邻域内,从而减少干扰边缘点的产生,使边缘更细。

#### 1.3 芯片图像位置拟合

利用最小二乘法对亚像素边缘点集进行拟合,直线边缘数学模型如下:

$$\alpha x + \beta y + \gamma = 0 \quad (2)$$

拟合芯片 4 条边缘得到芯片 4 条边缘直线,求 4 条直线的交点  $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ 、 $C(x_3, y_3)$ 、 $D(x_4, y_4)$ 。

则芯片在相机坐标系下的中心位置  $(x_0, y_0)$  为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4} - \frac{l_{width}}{2} \\ y_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} - \frac{l_{height}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $l_{width}$  为图像的宽度,  $l_{height}$  为图像的高度。

求 4 条边缘直线与图像坐标系的两坐标轴的最小夹角为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ , 则芯片在相机坐标系下的漂移的角度为:

$$\theta_0 = \frac{\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4}{4} \quad (4)$$

## 2 大理石气浮龙门架平台误差建模

图2为大板扇出封装芯片定位检测的大理石气浮龙门架平台,平台有X、Y、Z 3个移动轴,其中Z轴用于搭载相机,X轴和Y轴由伺服电机控制。

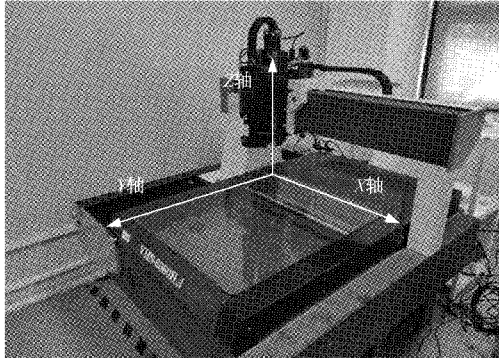


图2 大理石气浮龙门架平台

对运动平台的定位精度、直线度和垂直度进行误差测量、分析和建模,用于校正由大理石气浮龙门架平台运动产生累积误差。

根据待测面板大小确定X轴和Y轴的测量行程为600 mm,按国标GB/T 17421.2\_2000的相关规定,利用激光干涉仪进行重复测量。

对激光干涉仪测量的X、Y轴的定位误差数据进行分析,建立误差模型如式(5)所示。

$$\delta = a_0 l^2 + a_1 l + a_2 \quad (5)$$

式中:  $\delta$  为定位误差,  $l$  为X或Y轴的位移。

运动平台X、Y轴由直线度误差引起的定位误差模型如式(6)所示。

$$\epsilon = a_0 l^5 + a_1 l^4 + a_2 l^3 + a_3 l^2 + a_4 l + a_5 \quad (6)$$

式中:  $\epsilon$  为X、Y轴由直线度误差引起的定位误差。

由运动平台直线度和定位精度建立运动平台定位误差模型为:

$$\Delta = \delta + \epsilon \quad (7)$$

式中:  $\Delta$  为X、Y轴的定位误差。

利用激光干涉仪测量X、Y轴的垂直度为 $\theta$ ,则运动平台点 $(x, y)$ 的实际坐标 $(X_1, Y_1)$ 为:

$$[X_1 \ Y_1 \ 1] = [x \ y \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \Delta_x & \Delta_y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $\Delta_x$  为x轴的定位误差,  $\Delta_y$  为y轴的定位误差。

## 3 视觉与运动平台的融合定位检测

芯片加工位置是基于载板坐标系下的坐标,需要将图像坐标系转换为载板坐标系,对相机水平安装角度和图像单像素代表的物理尺寸进行测量。

如图3所示,相机安装过程中图像坐标系 $v$ 轴与机床坐标轴Y不能保证绝对的平行。利用高精度的马尔量放大器辅助将平晶与运动平台的Y轴摆放平行。相机采集 $n$ 组平晶边缘的图像,利用亚像素边缘检测算法求得平晶边缘角度,则相机水平安装偏角为:

$$\varphi_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i}{n} \quad (9)$$

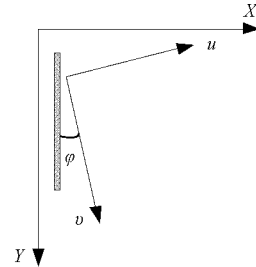


图3 偏角测量

利用标准校正板测量图像的单像素精度。将标准校正板随机摆放在测量平台上,控制相机采集 $n$ 张不同摆放位置的校正板上的同一个圆形孔的图像。通过圆拟合的计算圆形孔的半径 $r_i$ ,则相机单像素代表的物理尺寸 $\Delta_d$ 为:

$$\Delta_d = \frac{nr_{actual}}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad (10)$$

式中:  $r_{actual}$  为校正板上圆形孔的实际物理尺寸。

由式(8)~(10)和坐标转换原理得相机在点 $(x, y)$ 上测量到芯片在机床坐标系下的实际位置 $(X_2, Y_2)$ 为:

$$[X_2 \ Y_2 \ 1] = [X_1 \ Y_1 \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ x_0 \Delta_d & y_0 \Delta_d & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi_0 & \cos\varphi_0 & 0 \\ -\sin\varphi_0 & \sin\varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

芯片在机床坐标系下的偏角 $\theta_1$ 为:

$$\theta_1 = \theta_0 - \varphi_0 \quad (12)$$

如图4所示,图中黑色小矩形为载板上待检测的若干个芯片,黑色圆点 $A(x_a, y_a)$ 、 $B(x_b, y_b)$ 、 $C(x_c, y_c)$ 为基板上的基准点的圆心,  $\varphi'$  为大板坐标系与运动平台坐标系的夹角。

芯片在载板坐标系下的实际位置为:

$$[X_3 \ Y_3 \ 1] = [X_2 \ Y_2 \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -x_a & -y_a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi' & \cos\varphi' & 0 \\ -\sin\varphi' & \sin\varphi' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

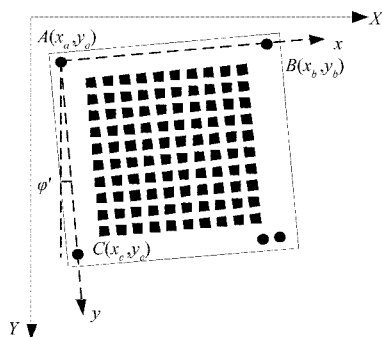


图 4 载板坐标系下芯片坐标

芯片的偏角为:

$$\theta_2 = \theta_0 - \varphi_0 - \varphi' \quad (14)$$

### 4 实验分析

本次实验的测量系统由大理石气浮龙门架平台、CCD 相机、激光干涉仪、高精度马尔量仪放大器、平晶、校正板和 PC 机组成。其中 CCD 相机分辨率为  $1\,152 \times 720$  像素,校正板精度为  $1\ \mu\text{m}$ 。PC 机上搭载 Visual Studio 2015 开发平台和 OpenCV 函数库进行测量。

#### 4.1 改进算法边缘检测

为检验算法对噪声的抗干扰能力,本文通过相机采集了陶瓷标定板其中一个小方格的图像,如图 5(a)所示,图 5(b)为图 5(a)经 Zernike 矩亚像素边缘检测算法检测后的图像。从图中可以看出 Zernike 矩边缘检测算法能将方格的边缘检测出来,但同时产生许多干扰边缘,检测到的边缘不够细。图 5(c)为改进的亚像素边缘检测算法。从图中可以看出,改进后的算法能有效地抑制噪声的干扰,使检测的边缘更细。

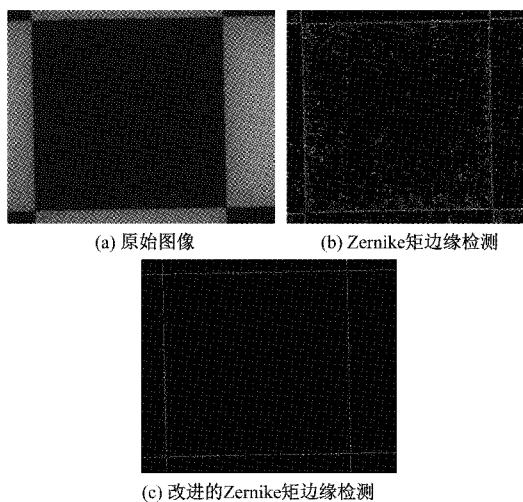


图 5 边缘检测结果对比实验

图 6 为人工合成的大小为  $301 \times 301$  的添加了高斯噪声的仿真芯片图像。利用传统 Zernike 矩算法与本文算法进行亚像素边缘检测,结果如表 1 所示。从表中可以看出

传统 Zernike 矩算法检测误差为 0.5 pixel,存在误差较大的伪边缘点。本文改进的算法检测误差为 0.3 pixel,与传统 Zernike 矩算法相比定位精度更高。

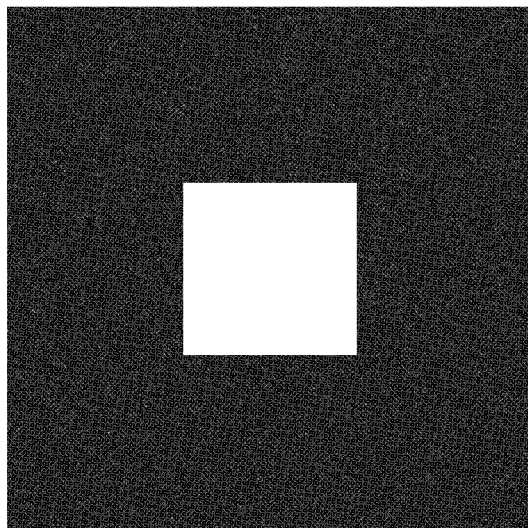


图 6 边缘检测结果对比实验

表 1 亚像素坐标

理论边缘	实际边缘	绝对误差	使用算法
(150.0,100.0)	(150.51,100.32)	(0.51,0.32)	传统 Zernike 矩
(151.0,100.0)	(151.53,99.59)	(0.53,0.41)	传统 Zernike 矩
(152.0,100.0)	(152.58,100.96)	(0.58,0.96)	传统 Zernike 矩
(150.0,100.0)	(150.31,100.12)	(0.31,0.12)	本文算法
(151.0,100.0)	(151.27,100.19)	(0.27,0.19)	本文算法
(152.0,100.0)	(152.26,100.02)	(0.26,0.02)	本文算法

为验证算法的精度,采集运动平台上同位置校正板的同一个直径 4.992 mm 的圆形孔图像进行测量,采集到圆形孔图像如图 7 所示,测量结果如表 2 所示。由表 2 的测量结果可以看出,改进的亚像素边缘检测算法检测的圆形孔半径误差不超过 0.3 pixel,单像素物理尺寸误差小于  $0.01\ \mu\text{m}$ 。将表中数据代入式(10)得标定后单像素物理尺寸  $\Delta_d$  为  $10.059\ \mu\text{m}$ 。

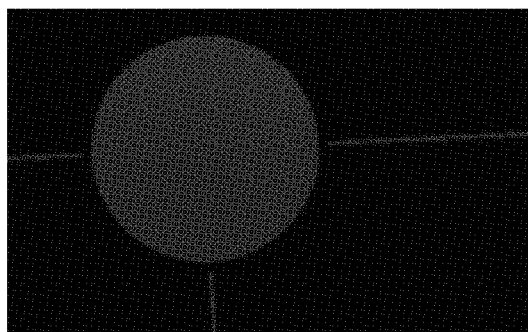


图 7 标定板上的圆形孔

#### 4.2 误差预测模型精度检测

为了确定由运动平台的定位精度误差  $\delta$  和直线度误差

表 2 圆形孔测量结果

图像直径/pixel	物理直径/mm	单像素物理尺寸/ $\mu\text{m}$
496.115	4.992	10.062 183
496.225	4.992	10.059 952
496.396	4.992	10.056 487
496.217	4.992	10.060 114
496.261	4.992	10.059 222

表 3 误差补偿表

X 轴位移/ mm	X 轴误差 补偿值/ $\mu\text{m}$	Y 轴位移/ mm	Y 轴误 补偿值/ $\mu\text{m}$
0	1	0	-1
60	4	60	3
120	7	120	7
180	8	180	12
240	11	240	17
300	14	300	23
360	16	360	30
420	18	420	37
480	21	480	42
540	24	540	48
600	28	600	55

$\epsilon$  建立的误差预测模型的精度,控制运动平台进行位置补偿后,利用激光干涉仪对 X、Y 轴重新进行定位测量。分别将  $x = 100, y = 100$  代入式(5)~(7),分别得到 X 轴位移为 100 mm, Y 轴不同位置和 Y 轴位移为 100 mm, X 轴不同位置的误差补偿表,如表 3 所示。

图 8、9 分别为 X 轴位移为 100 mm, Y 轴不同位移的定位精度误差和 Y 轴位移为 100 mm, X 轴不同位移的定位精度误差。其中补偿前 X 轴的双向定位精度为  $27.9 \mu\text{m}$ , Y 轴双向定位精度为  $55.3 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出,误差模型预测的定位误差和利用激光干涉仪实际测量的误差的数值接

近,偏差小于  $2 \mu\text{m}$ 。补偿后利用激光干涉仪测量的 X、Y 轴的定位精度由  $27.9 \mu\text{m}$  和  $55.3 \mu\text{m}$  减少到  $2 \mu\text{m}$ 。

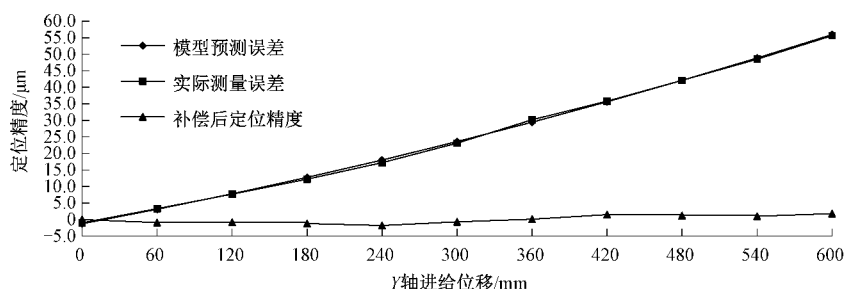


图 8 X 轴位移 100 mm, Y 轴不同位移的定位精度

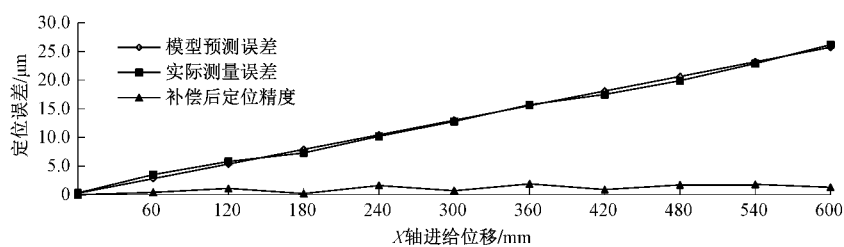


图 9 Y 轴位移 100 mm, X 轴不同位移的定位精度

以 Y 轴为测量基准轴,控制运动平台的 X 轴进行垂直度补偿,利用激光干涉仪重新测量补偿后的平台的垂直度,垂直度由  $14.40 \text{ arcsec}$  降到  $0.96 \text{ arcsec}$ 。

图 10 为大板扇出封装过程中载板上芯片经过塑封和研磨后的样品图像,在接下来打孔和布线的工序前需要重新对芯片进行定位检测,通过定位信息修改加工图纸以保证芯片封装最后的成品率。表 4 为本文 CCD 相机与大理石气浮龙门架平台融合的大板扇出封装芯片定位检测方法定位检测的结果。利用相机与运动平台测量载板上 3 个定位基准点坐标,建立载板坐标系,移动测量平台重复测量同一芯片的位置。从表中可以看出芯片定位精度达到  $7 \mu\text{m}$ 。

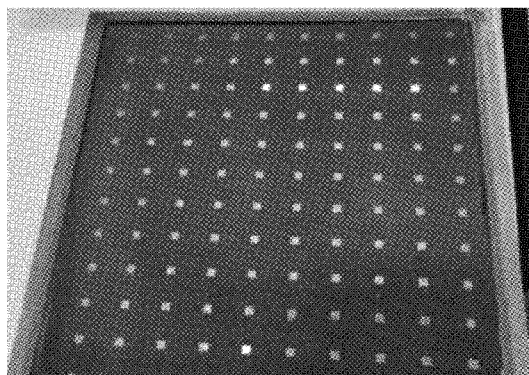


图 10 大板扇出封装芯片样品

表 4 芯片位置重复测量结果

X/mm	Y/mm
568.476 8	218.911 5
568.471 7	218.914 0
568.473 7	218.917 3
568.475 0	218.911 4
568.472 3	218.915 8
568.472 5	218.916 1
568.478 5	218.916 3
568.471 5	218.914 9
568.476 3	218.910 9
568.475 8	218.915 5

现有的高精度光学定位检测技术大部分通过图像拼接技术实现整幅图像的高精度定位检测。如图 11 所示, 由于塑封后的芯片图像的特征不明显, 图像拼接过程中容易产生伪匹配造成定位误差, 多次拼接会造成累积误差。本文的芯片定位检测通过将芯片贴片设计图中的定位孔与芯片塑封后载板的定位孔对位计算后, 将运动平台按设计图上芯片位置坐标采集图像, 采集的图像为完整的芯片图像, 可直接进行芯片位置测量。与现有的方案相比, 本文的检测方案省去了图像拼接的步骤, 减少了大量的计算, 同时避免了由图像拼接产生的累积误差。

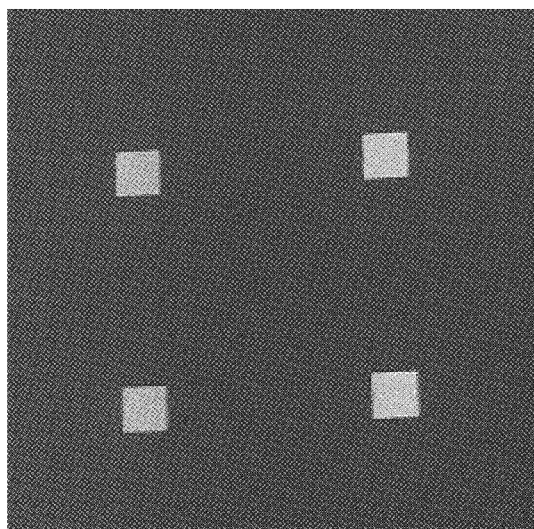


图 11 芯片塑封后载板的局部图像

## 5 结 论

本文提出的大尺寸面板级封装芯片精密定位检测方法, 通过将 CCD 相机和大理石气浮龙门架平台结合实现大幅面小芯片的精密定位。实验结果表明: 1) 改进后的边缘检测算法抗干扰能力强, 边缘检测精度较高, 图像定位精度达到 0.3 pixel; 2) 误差模型的预测误差精度高, 误差补偿后运动平台的定位精度由 55.3  $\mu\text{m}$  降到 2  $\mu\text{m}$ , 垂直度由

14.40 arcsec 降到 0.96 arcsec; 3) 视觉与运动平台融合的大板扇出封装芯片定位检测精度达到 7  $\mu\text{m}$ , 能满足大部分工业芯片定位的需求。

由于实验条件限制, 本文使用的 CCD 相机分辨率较低, 使用高分辨率相机能进一步提高芯片的定位精度。本文实验采用单个面阵相机进行研究, 在保证采集图像的精度情况下相机视野小, 对 600 mm  $\times$  600 mm 的大板进行芯片定位检测效率有待提高, 未来可以采用阵列相机或线扫相机进行芯片定位检测, 提高芯片检测效率。

## 参考文献

- [1] 周武平, 唐玉国, 黎海文, 等. 高通量离心式液滴生成芯片设计 [J]. 光学精密工程, 2020, 28 (12): 2636-2645.
- [2] 任郁苗, 吉智. 生物芯片检测系统设计 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(11): 122-126.
- [3] TAKAHASHI H, NOMA H, SUZUKI N, et al. Large panel level fan out package built up study with film type encapsulation material [C]. Electronic Components & Technology Conference, IEEE, 2016: 134-139.
- [4] BRAUN T, BECKER K F, VOGES S, et al. From wafer level to panel level mold embedding [C]. 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference, IEEE, 2013: 1235-1242.
- [5] BRAUN T, RAATZ S, VOGES S, et al. Large area compression molding for fan-out panel level packing [C]. IEEE Electronic Components and Technology Conference, IEEE, 2015: 1077-1083.
- [6] LIN T, HOU F, LIU H, et al. Warpage simulation and experiment for panel level fan-out package [C]. 2016 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), IEEE, 2016: 129-131.
- [7] 邵明省. 基于改进爬山算法的微小零件亚像素级定位 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(5): 889-895.
- [8] 王小鹏, 刘志华, 陈天宁. 透明材料微小器件键合质量检测系统设计 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 69-76.
- [9] 张喜民, 余奇颖, 张金博, 等. 基于机器视觉的手机尾插件精密测量方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 47-54.
- [10] 周伟, 巢渊, 李龔, 等. 基于改进 Harris 角点检测的芯片图像快速校正 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 74-81.
- [11] 吴天凤, 李莉, 杨洪涛. 数控机床 XY 工作台单向运动二维阿贝误差分析与建模 [J]. 光学精密工程, 2021, 29(2): 329-337.
- [12] 张彬, 谢冠星, 杨楠. 基于边缘的车轮与刹车片的缝隙轮廓距离估算算法 [J]. 国外电子测量技术, 2018,

37(12):115-119.

- [13] 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.
- [14] 童胜杰,江明,焦传佳.一种改进工件边缘检测方法的研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(1):128-134.
- [15] 葛松林.精密轴亚像素边缘检测算法研究与应用[D].南昌:华东交通大学,2019.
- [16] 高世一,赵明扬,张雷,等.基于Zernike正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进[J].自动化学报,2008,34(9):1163-1168.

#### 作者简介

陈康清,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉及数字

图像处理。

E-mail:1225308730@qq.com

陈新度(通信作者),博士,教授,主要研究方向为网络化制造、制造系统建模和仿真优化。

E-mail:544394747@qq.com

吴磊,讲师,主要研究方向为机器人仿真、虚拟示教。

E-mail:1650795492@qq.com

陈志航,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理。

E-mail:1035247028@qq.com

李璞,博士,副教授,主要研究方向为仿真优化、多领域建模。

E-mail:lipu\_300@sgu.edu.cn