

文章编号:1001-4888(2018)04-0499-10

基于 DIC 的印制线路板三维形貌高精度测量^{*}

张弦¹, 苏勇², 张勇¹, 丁晓华³, 于起峰³, 张青川²

(1. 南京中迅微传感技术有限公司, 南京 211300; 2. 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230027; 3. 国防科技大学, 长沙 410073)

摘要: 生产过程中对产品三维形貌的高精度实时测量是有效的质量监控手段, 具有迫切的需求。本文基于三维数字图像相关(DIC-3D)方法, 全场测量了印制线路板上的台阶状焊点和印制线路, 得到焊点大小、高度和印制线路线宽、线高等三维形貌数字图像数据; 使用台阶仪采集面内和离面形貌数据, 并进行比较。实验结果表明, 三维数字图像相关方法在测量印制线路板形貌时, 可测量出十数微米高的印刷线路台阶, 精度达 $3\mu\text{m}$; 对 $500 \times 500\text{pixels}$ 图像, 在 i7 4790k CPU 硬件条件, 步长 3pixels 、子区 $19 \times 19\text{pixels}$ 的参数下, 立体图像的重建速度小于 1s, 可满足线路板的在线实时检测。

关键词: 数字图像相关; 印制线路板; 三维形貌

中图分类号: O34; TB96; TN41

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-005

0 引言

印制线路板(Print Circuit Board, PCB)制造行业发展迅速, 并不断地向高精度、高密度和高可靠性方向发展。为了保证生产质量, 需要对印制线路板进行检测, 传统的检测方法有人工目测、针床测试、飞针测试等^[1]。由于“接触受限”等缺陷, 这些方法已经不能完全适应制造技术的发展需求^[2], 自 21 世纪以来, 基于图像的自动光学检测(Automatic Optical Inspection, AOI)技术逐渐发展并代替传统的检测方法^[3]。AOI 技术使用传感器获得检测物的二维照明图像并数字化, 利用灰度图像并通过参考比较法(与预先存储的数字化模板图像作比较)或设计规则检验法(按照一些给定的规则检测图形)进行缺陷检测^[4-8]。由于无法直接得到检测物表面三维形貌, 对于高度方面的缺陷, 传统 AOI 技术无法解决。其他一些方法如自动 X 射线扫描法, 由于高成本、检测速度慢的原因^[3, 4], 也难以在生产中使用。其他一些测量方法, 如干涉测量法^[9, 10]以及结构光法^[11](如: 激光扫描、影像云纹技术^[12]等)也可用于形貌测量。但干涉测量法光路复杂且结果易受环境中的温度、湿度等因素影响, 结构光法测量精度较低^[13]。因此, 精确、快速地获得表面的三维形貌, 在印制线路板生产、检测环节中有迫切需求和重要意义。

数字图像相关方法(Digital Image Correlation, DIC)是一种基于现代数字图像处理技术的光学测量方法, 于 1983 年首次提出后, 国内外学者对其算法和应用进行了大量的研究工作^[14-18]。这种方法最初提出是为了得到平面物体载荷作用下的面内变形信息, 称之为二维 DIC 方法, 对此方法所做的研究及应用工作也有很多^[19-22]。二维 DIC 方法在测量过程中易受离面位移等问题的影响, 在实际应用中, 为了满足对平面或者曲面物体三维形貌和变形信息的获取, 二维 DIC 方法与计算机双目立体视觉技术

^{*} 收稿日期: 2017-01-09; 修回日期: 2017-03-07

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB22040502)和国家自然科学基金(11332010, 11627803, 11472266, 11428206)资助

通讯作者: 张青川(1962—), 男, 博士, 教授。主要研究方向: 铝合金的 PLC 效应、光镊技术、微量生化传感检测、数字图像相关等方面。Email: zhangqc@ustc.edu.cn

相结合,拓展为三维 DIC 方法^[23-25]。该方法使用互成一定角度放置的两个相机拍摄物体表面图像,因为具有非接触、全场测量以及高精度的特点,适合多尺度以及复杂环境下物体三维形貌以及变形的测量,在材料性能测试、车辆工程、土木工程以及生物医学等领域得到广泛应用^[26-28],也有国内学者对形函数、子区大小以及它们对 DIC 系统误差和测量精度的影响做了许多研究^[29-31]。有文献报道的研究和应用大多集中在物体三维变形数据,忽略了该方法在测量三维形貌方面的高精度和广泛的应用前景。

本文基于自行开发的 PMLAB DIC-3D 系统,测量印制线路板局部形貌,分析焊点和线路的宽度,以及它们相对于基板的突起高度。为了进一步验证该方法的精度,使用台阶仪采集部分形貌数据进行了比较。

1 三维 DIC 方法

三维 DIC 方法结合了 DIC 方法(如图 1 所示)和双目立体视觉(如图 2 所示)的原理,使用两个互成一定角度固定的相机拍摄物体表面散斑图像,然后通过图像匹配算法计算得到图像中待测点的图像坐标,再结合事先标定好的两个相机的参数和相对位置关系,计算得到物体表面的三维空间坐标,得到物体表面的三维形貌。

从上述描述中可以看出,三维 DIC 方法中的关键技术主要包括以下四个方面:(1)图像采集:同步获取两个相机被测物表面的数字散斑图像;(2)图像匹配:在对应的两幅散斑图像中寻找对应点;(3)相机参数标定:标定两个相机成像模型参数;(4)三维重建:借助这些参数结合数字图像中对应点的图像坐标计算该点的三维空间坐标。

1.1 相关匹配

使用数字图像相关方法寻找两幅散斑图像中的对应点^[23]。如图 1 所示,在左相机参考图像 $f(x, y)$ 中取以某待求点 $P(x_0, y_0)$ 为中心的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 像素大小的正方形图像子区,在右相机图像 $g(x', y')$ 中通过一定的搜索方法按照预先定义的归一化最小平方距离函数来进行相关计算,寻找与参考图像子区的相关系数取极小值的以 $P'(x'_0, y'_0)$ 为中心的目标图像子区。

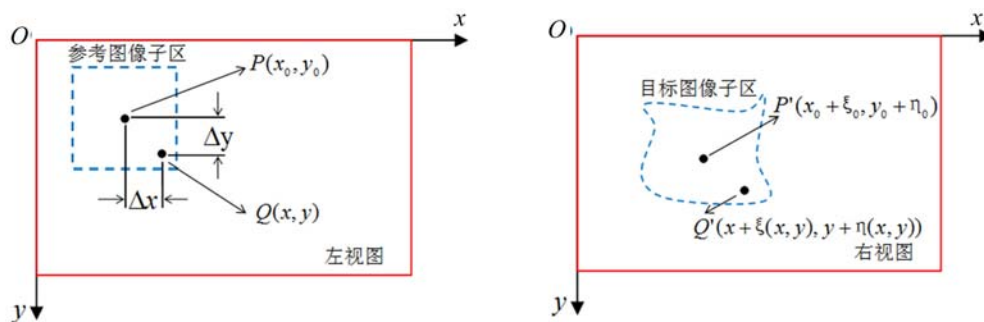


图 1 左右视图对应图像子区的匹配

Fig. 1 Correspondence subset matching of the left and right views

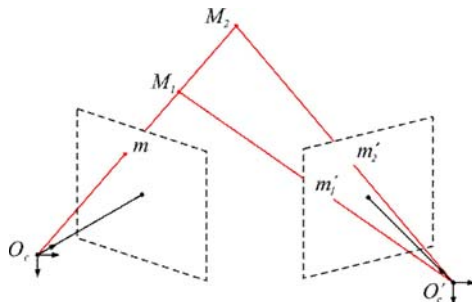


图 2 双目立体视觉原理示意图

Fig. 2 Schematic illustration of binocular stereo vision

左右相机图像子区不仅中心位置可能发生变化,其形状也可能改变,本文中,参考图像与目标图像

子区中对应点坐标 (x, y) 和 (x', y') 通过一阶形函数和待定参数矢量 $\vec{p}$ 建立联系:

$$x' = x + \xi(x, y, \vec{p}) = x_0 + \Delta x + \xi_0 + \xi_x \Delta x + \xi_y \Delta y \quad (1)$$

$$y' = y + \eta(x, y, \vec{p}) = y_0 + \Delta y + \eta_0 + \eta_x \Delta x + \eta_y \Delta y \quad (2)$$

式中, $\Delta x = x - x_0$, $\Delta y = y - y_0$; ξ_0, η_0 是参考图像子区中心 $P(x_0, y_0)$ 点的视差; $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y$ 是图像子区内视差的一阶导数。

定义归一化最小平方距离函数评价左右相机图像子区的相似程度, 其表达式为

$$C_{f,g}(\vec{p}) = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left[\frac{f(x, y) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2}} - \frac{g(x', y') - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x', y') - g_m]^2}} \right]^2 \quad (3)$$

式中, $f(x, y)$ 是参考图像子区中坐标为 (x, y) 点的灰度; $g(x', y')$ 是目标图像子区中对应点 (x', y') 的灰度; $f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M f(x, y)$, $g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M g(x', y')$ 分别为参考图像子区和目标图像子区的灰度平均值; $\vec{p}$ 为待求的参数矢量。

1.2 系统标定

世界坐标系中的一点在相机靶面的投影可用理想针孔成像模型来描述^[32], 齐次坐标下表示为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, s 为比例系数; (u, v) 为空间点在相机理想像平面上的坐标; $(x_w, y_w, z_w)^T$ 为对应点在世界坐标系中的坐标; R, t 分别为世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和平移向量, 称之为外部参数。A 为相机内部参数, 可表达为

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, (u_0, v_0) 为主点坐标; α 和 β 分别为图像在 u 轴与 v 轴的焦距参数; γ 为图像的歪斜参数。

基于三维 DIC 方法的测量系统在使用之前需要对其进行标定, 标定使用经过计量的 12×9 圆点标定板, 系统拍摄若干张不同姿态下的标定图像, 通过识别特征点在左右相机中的对应坐标, 获得每次拍摄时左右相机的内外参数 A_l, R_{li}, T_{li} 和 A_r, R_{ri}, T_{ri} , 然后通过非线性最小二乘优化方法做全局优化。目标函数为

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_{li}} \| m_{li,j} - \tilde{m}(A_l, R_{li}, t_{li,i}) \|^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_{ri}} \| m_{ri,j} - \tilde{m}(A_r, R_{ri}, t_{ri,i}, R_{ri,l}, t_{ri,l}) \|^2 \quad (6)$$

式中, $\tilde{m}(A_l, R_{li}, t_{li,i})$ 为左相机第 i 幅标定图上第 j 个特征点用非线性模型计算出来的图像坐标; $\tilde{m}(A_r, R_{ri}, t_{ri,i}, R_{ri,l}, t_{ri,l})$ 为右相机第 i 幅标定图上第 j 个特征点用非线性模型计算出来的图像坐标; $m_{li,j}, m_{ri,j}$ 为算法识别的对应特征点的真实图像坐标; 经 Levenberg-Marquart 算法优化后可获得三维 DIC 测量系统的所有标定参数。

1.3 三维重建

在对两个相机完成系统标定后, 获得它们的内外参数, 建立了图像坐标与世界坐标的对应关系, 通过相关匹配也得到了左右相机散斑图像上对应像素点的二维图像坐标。这样就可以通过对对应像素点的二维图像坐标来重构三维空间坐标。通过前述标定过程获得标定参数后, 可以确定矩阵 M_1, M_2 , 从而

$$z_{ci} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = M_i \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2) \quad (7)$$

式中, $(u_i, v_i, 1)^T$ 为空间点在左右相机理想像平面中齐次坐标; $(x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 为对应空间点在世界坐标系下的齐次坐标。上述方程组共计 6 个方程, 5 个未知数 $(z_{c1}, z_{c2}, x_w, y_w, z_w)$, 利用最小二乘法求解上述方程组, 得到空间点三维坐标 (x_w, y_w, z_w) , 从而实现物体表面的三维形貌重建。

2 实验方法

2.1 试件制斑及实验装置

实验对象有 2 个: 试件 1 是在白色基板上三维打印黑色焊点获得的模拟印制线路板, 焊点大小约 $500\mu\text{m}$, 相对于基板的高度约 $100\mu\text{m}$, 如图 3(a) 所示; 实验中观测试件中部方形区域, 如图 3(b) 所示; 将 6B 铅笔芯在纹路细密的锉刀上滑动, 获得极细小的黑色石墨粉(数微米到数十微米), 并将其喷洒在待观测区域, 得到制斑后的试件, 如图 3(c) 所示。试件 2 为印制线路板, 线条宽度约 $100\mu\text{m}$, 相对于基板的高度约 $20\mu\text{m}$, 如图 4(a) 所示; 实验中的观测区域, 如图 4(b) 所示; 将极细的白色淀粉颗粒(数微米到数十微米)吹起, 让其沉降在观测区域, 得到制斑后的试件, 如图 4(c) 所示。

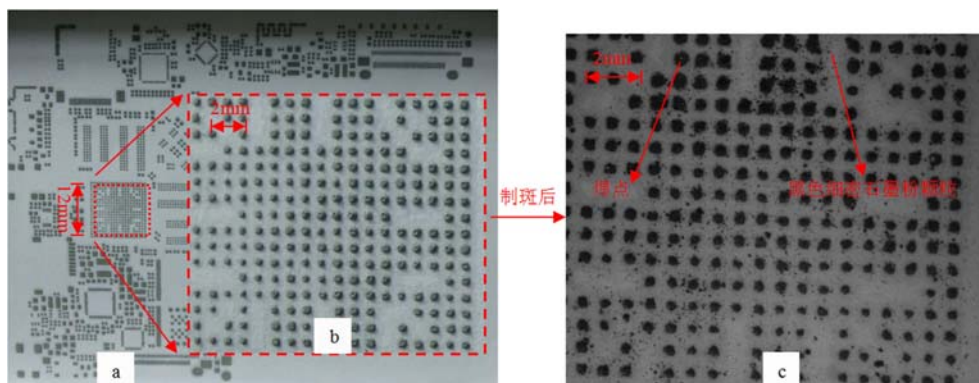


图 3 (a)试件 1; (b)制斑前的观测区域; (c)制斑后的观测区域

Fig. 3 (a)Speckle 1; (b)original image of observed area; (c)observed area with a speckle pattern

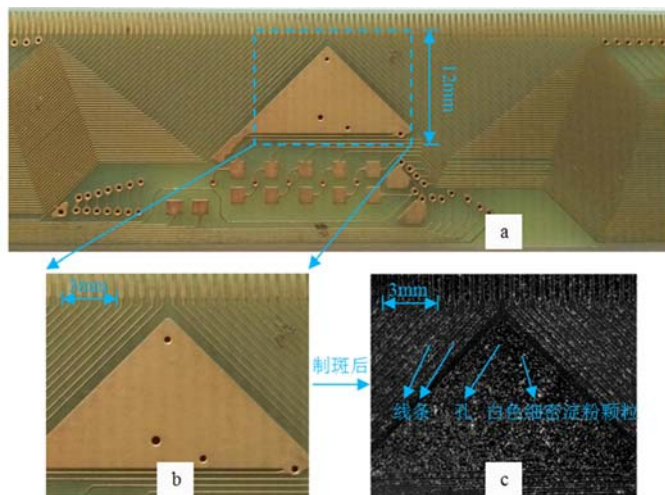


图 4 (a)试件 2; (b)制斑前的观测区域; (c)制斑后的观测区域

Fig. 4 (a)Speckle 2; (b)original image of observed area; (c)observed area with a speckle pattern

实验系统为非接触式三维应变光学测量系统(PMLAB DIC-3D 2014)。相机品牌: Point Grey, 型号: GRAS 50S5M-C, 相机分辨率 2448×2048 pixels; 选用定焦 Schneider 工业镜头, 焦距 50mm; 在相机与镜头之间加装 20mm 接圈, 缩小视场, 提高空间分辨率, 2 相机夹角约为 10° ; 使用集成起偏器的 LED 光源, 垂直试件表面照明, 配合镜头前的检偏器, 消除杂散光, 增强散斑与试件本色的对比度, 提高像质; 标定时使用 12×9 、点间距 1mm 的陶瓷标定板。实验系统及标定板如图 5(a)、图 5(b) 所示。

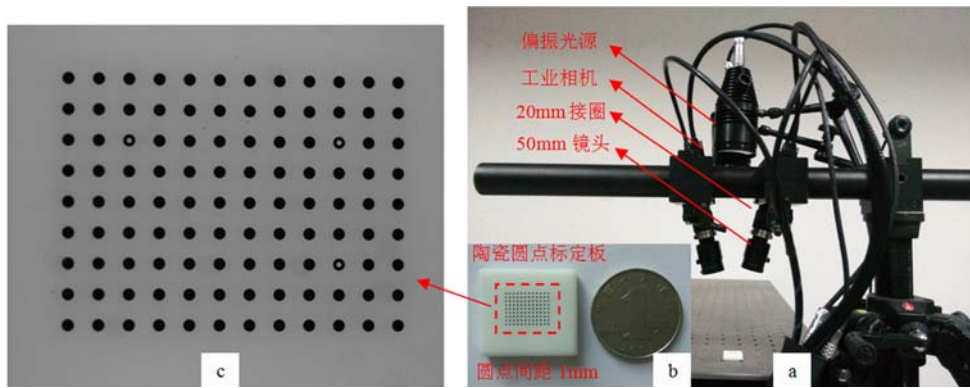


图5 (a)实验系统；(b)标定板；(c)标定图

Fig. 5 (a)Experimental system; (b)calibration board; (c)calibration image

2.2 实验结果

步长设为 3pixels,子区大小分别设为 37×37 pixels 和 19×19 pixels,对 2 个试件的散斑图像进行数字图像处理。选择基板上两点,用“原点-X 轴”方式建立坐标系,图 6(a)所示为试件 1 的局部三维形貌云图,在云图上从上往下绘制 3 条检测线,分别为阶段线 0、1、2;图 6(b)所示为二维贴图;图 6(c)所示为沿 3 条检测线的 Z 向形貌分布空序曲线。从 3 条空序曲线可以得到,焊点的宽度约 $500\mu\text{m}$,焊点相对于基板的高度不等,约为 $70 \sim 100\mu\text{m}$ 。选择第二条线与“三角形区域”之间的基板上两点,用“原点-X 轴”方式建立坐标系,图 7(a)所示,为试件 2 的局部三维形貌云图,在三维云图上从线条至三角形区域绘制 3 条检测线,分别为阶段线 0、1、2;图 7(b)所示为对应的二维贴图;图 7(c)所示为沿 3 条检测线的 Z 向形貌分布空序曲线。从 3 条空序曲线可以得到,线条的宽度约 $100\mu\text{m}$,线条和“三角形平台”相对于基板的高度约 $40\mu\text{m}$ 。

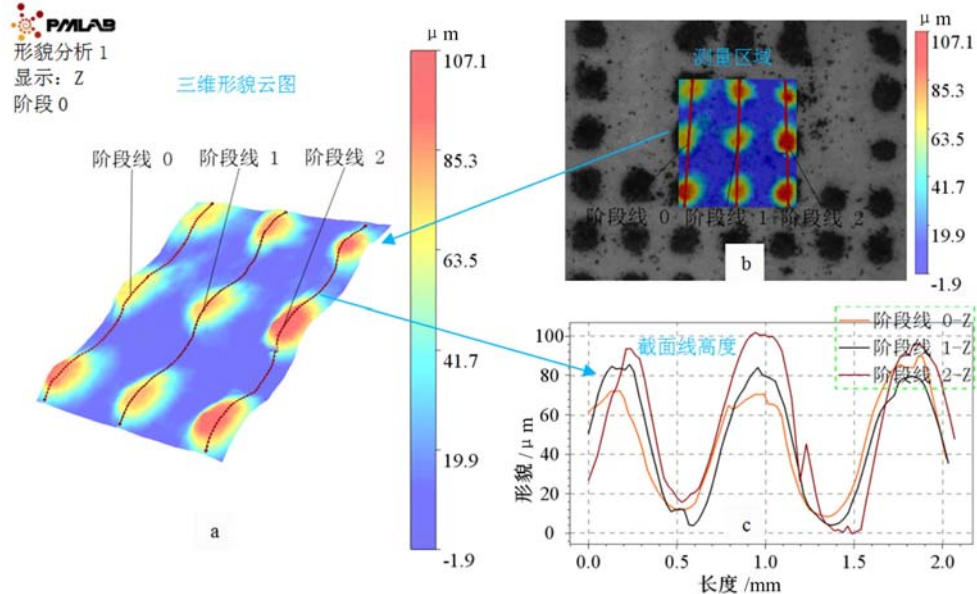


图6 (a)试件 1 三维形貌云图；(b)试件 1 二维贴图；(c)空序曲线

Fig. 6 (a)Three-dimensional shape of speckle 1; (b)two-dimensional shape of speckle 1; (c)spatial plot curve

3 精度分析

使用台阶仪测量印制线路板(试件 2)的面内和凸起特征,与三维 DIC 方法的测量结果做对比,分析三维 DIC 方法测量印制线路板形貌的精度。

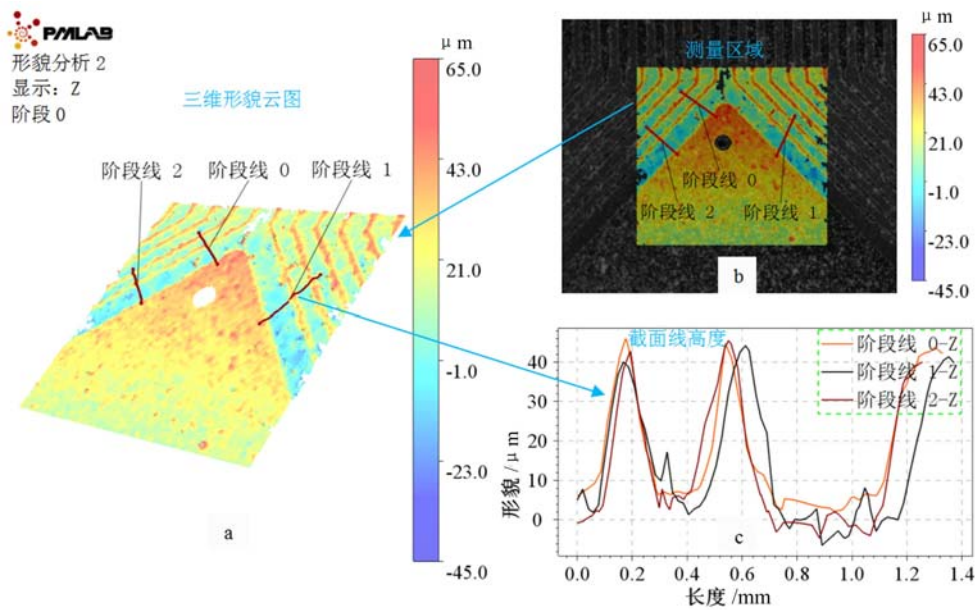


图 7 (a)试件 2 三维形貌云图; (b)试件 2 二维贴图; (c)空序曲线

Fig. 7 (a)Three-dimensional shape of speckle 2; (b)two-dimensional shape of speckle 2; (c)spatial plot curve

3.1 对比实验

使用中国科学技术大学微纳研究与制造中心的布鲁克台阶仪(型号为 Dektak XT, 台阶高度分辨率为 10nm), 对未制斑的印制线路板进行形貌测量, 台阶仪探针的探测路径为沿图 6 中阶段线 0 的起点至终点的一条线(探针依次经过线条 1、谷 1、线条 2、谷 2 和“三角形”平台, 分别记为 A 峰、B 谷、C 峰、D 谷和 E 平台)。将台阶仪与 PMLAB DIC-3D 系统测得的原始数据, 导入 Origin9.1 中拟合曲线。图 8(a)所示为台阶仪与 PMLAB DIC-3D 系统测得的沿阶段线 0 分布的高度图, 结合原始数据可以得到台阶仪测得 A、B 两峰和 E 平台相对于 D 谷的高度分别为 $41.3\mu\text{m}$, $40.8\mu\text{m}$, $39.9\mu\text{m}$; 三维 DIC 方法测得结果为 $41.0\mu\text{m}$, $39.7\mu\text{m}$, $38.7\mu\text{m}$ 。取 A、C 两峰的半高宽作为 2 线条的宽度, 台阶仪得到的第一条线宽为 $238.1\mu\text{m}-142.1\mu\text{m}=96.0\mu\text{m}$, 第二条线宽为 $619.6\mu\text{m}-524.5\mu\text{m}=95.1\mu\text{m}$; PMLAB DIC-3D 系统得到的第一条线宽为 $217.9\mu\text{m}-123.7\mu\text{m}=94.2\mu\text{m}$, 第二条线宽为 $602.3\mu\text{m}-504.3\mu\text{m}=98.0\mu\text{m}$ 。

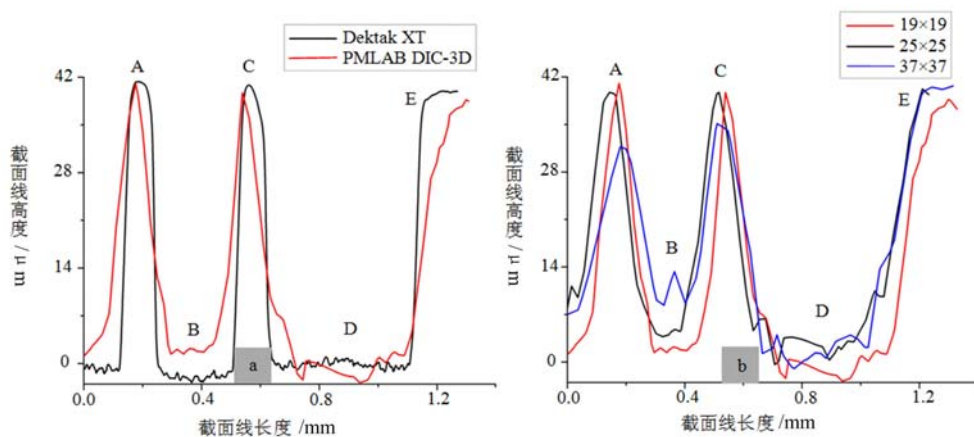


图 8 (a)三维 DIC 与台阶仪结果比较; (b)不同子区大小下的三维 DIC 结果比较

Fig. 8 (a)Result comparison between DIC-3D and stylus profiler;

(b)results of DIC-3D comparison in different patch

3.2 结果讨论

整理三维 DIC 及台阶仪对上述特征形貌的测量结果, 如表 1 所示。

表 1 三维 DIC 与台阶仪测量结果比较
Tab. 1 Result comparison between DIC-3D and stylus profiler

序号	线条 1 高	线条 2 高	平台高	线条 1 宽	线条 2 宽
DIC-3D 结果/ μm	41.0	39.7	38.7	94.2	98.0
台阶仪结果/ μm	41.3	40.8	39.9	96.0	95.1
绝对误差/ μm	-0.3	-1.1	-1.2	-1.8	2.9
相对误差	-0.7%	-2.7%	-3.0%	-1.9%	3.0%

由表 1 可以得到,在子区大小 $19 \times 19\text{pixels}$ 下,三维 DIC 方法对印制线路板形貌测量的离面与面内精度均优于 $3\mu\text{m}$,印刷线路板表面的细密淀粉颗粒的自身大小与分布,以及计算时子区大小的设置均会影响形貌测量精度。对于第一种影响因素,可以考虑使用更优的表面散斑生成方式,如激光散斑等;对于第二种影响因素,使用不同大小的子区对相同的 AOI 进行数字图像处理,比较图 7 中阶段线 0 的形貌测量结果。图 8(b)所示为子区大小分别为 19,25,37 时三维 DIC 方法的测量结果,图中 A、C 两峰的高度表征印制线路板的线条高度,A、C 两峰的半高宽表征线条宽度,B 谷高度表征两线条间的基板高度。与图 8(a)中台阶仪的测量结果对比可得,在子区大小为 19pixels 时,DIC-3D 的测量结果与台阶仪的测量结果最接近。子区越大,平滑效应越明显,台阶高度测量结果越小,台阶宽度测量结果越大,离面及面内形貌测量精度越低;子区越小,平滑效应越小,对印刷线路板上微小台阶这样极窄宽度、极低高度的形貌特征计算得越好,但局部越容易出现错误的计算结果。本实验中,子区大小设为 $19 \times 19\text{pixels}$ 时较合适。结合拍摄系统以及不同子区大小下线条宽度的测量结果,对子区大小的设置作一般性的讨论:本实验中,CCD 分辨率为 $2448 \times 2048\text{pixels}$,实际视场大小约为 $14.3 \times 12\text{mm}$,单位像素约对应实际中的 $5.8\mu\text{m}$ 。将线条的宽度(约 $96\mu\text{m}$)折算成像素大小,即约为 17 个像素,而子区大小设置为接近线宽的 19 个像素时,线宽与线高的测量结果已与台阶仪结果十分接近。考虑线条部分的计算结果以及子区内的平滑效应,相关计算时子区大小的设置应至少接近或小于线宽对应的像素数;考虑全场形貌的测量,子区越小,全局某些地方(如散斑质量不好的地方)越易出现错误结果。综合考虑这些,在形貌测量中出现台阶状微小凸起的情况下,子区大小设置为与台阶宽度接近较合适。在实际工业测量中,可以在拍摄系统调节固定好后,在采集到的散斑图上观察最细的线条宽度所占的像素数,据此设定相关计算的子区大小。

4 结论

本文基于三维 DIC 方法,测量了印制线路板的三维形貌,使用台阶仪测量了局部特征形貌,采用不同的子区大小处理数字图像并与台阶仪结果进行了比较,并根据不同子区大小下的结果讨论了设置子区大小的一般性原则。实验结果表明:

(1) 使用三维 DIC 方法,可以精确、快速地测量出印制线路板的三维形貌。在 $14 \times 12\text{mm}$ 的视场下,对高度约 $40\mu\text{m}$,宽度约 $96\mu\text{m}$ 的印刷线路台阶,离面和面内的形貌测量精度均优于 $3\mu\text{m}$;在 CPU 为 i7 4790k 的硬件条件下,用步长 3pixels、子区 $19 \times 19\text{pixels}$ 的参数对 $500 \times 500\text{pixels}$ 的图像处理、重构得到全场三维形貌的速度快于 1s。

(2) 合适子区大小的选择对于良好计算结果的获得很重要。

在实际工业测量中,可以考虑采用其他类型的表面散斑生成方式,如激光散斑等。一方面可以消除散斑本身大小对形貌测量的影响,提高测量精度;另一方面,可缩短制斑时间,提高检测效率。还可以在系统上集成散斑发生器(如激光散斑生成器),根据线路板的待检测区域大小调整好拍摄系统,垂直向下观测流水线上通过的 PCB。完成系统标定后,打开散斑发生器,根据流水线的速度设置系统散斑图采集频率,在获取某一块待检测 PCB 图像后立即分析得到三维形貌结果,后续待检测 PCB 依次类推,完成流水线上的工业测量需求。

参考文献:

- [1] 彭占勇. 计算机线路板质量检测技术[J]. 计算机与数字工程, 2005, 33(8): 80—81 (PENG Zhanyong. Technology of quality inspection for print circuit board of computer[J]. Computer and Digital Engineering, 2005, 33(8): 80—81 (in Chinese))
- [2] 姚立新, 张武学, 连军莉. AOI 系统在 PCB 中的应用[J]. 电子工业专用设备, 2004, 33(5): 25—28 (YAO Lixin, ZHANG Wuxue, LIAN Junli. The application of AOI system in PCB[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2004, 33(5): 25—28 (in Chinese))
- [3] 胡跃明, 谭颖. 自动光学检测在中国的应用现状和发展[J]. 微计算机信息, 2006, 22(1-2): 143—146 (HU Yumin, TAN Yin. State and development of automatic optical inspection applications in China [J]. Microcomputer Information, 2006, 22(1-2): 143—146 (in Chinese))
- [4] 熊振娇. 基于图像的线路板缺陷检测方法研究[D]. 南昌航空大学, 2012: 5—6 (XIONG Zhenjiao. Research on the detection method based on image for defect in circuit board[D]. Nanchang Hangkong University, 2012: 5—6 (in Chinese))
- [5] 杨庆华, 陈亮, 荀一, 等. 基于机器视觉的 PCB 裸板缺陷自动检测方法[J]. 中国机械工程, 2012, 23(22): 2661—2666 (YANG Qinghua, CHEN Liang, XUN Yi, et al. Automatic defect inspection of PCB bare board based on machine vision[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(22): 2661—2666 (in Chinese))
- [6] 郭民, 王蕊. AOI 技术在 PCB 缺陷检测中的设计与实现[J]. 测控技术, 2016, 35(12): 127—130 (GUO Min, WANG Rui. Design and implementation of AOI technology in PCB defect detection[J]. Measurement and Control Technology, 2016, 35(12): 127—130 (in Chinese))
- [7] 宋昀岑. PCB 自动光学检测系统基础算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014 (SONG Yuncen. The study on low-level vision algorithms used in PCB automatic optical inspection systems [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014 (in Chinese))
- [8] 王玉萍, 郭峰林. 基于机器视觉的 PCB 板缺陷检测系统关键技术研究[J]. 科技通报, 2017, 33(1): 101—105 (WANG Yuping, GUO Fenglin. Key technology research of the machine vision-based PCB defect inspection system[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(1): 101—105 (in Chinese))
- [9] 耿东锋, 何英杰, 苏宏毅. 透明台阶的白光干涉测量方法研究[J]. 光学仪器, 2013, 35(6): 74—77 (GENG Dongfeng, HE Yingjie, SU Hongyi. Study on the measurement of transparent step by white-light interferometer [J]. Optical Instruments, 2013, 35(6): 74—77 (in Chinese))
- [10] 徐永祥, 张乾方, 刘松松, 等. 基于空间频域算法的三维微观形貌的测量[J]. 光电工程, 2014, 41(8): 16—21 (XU Yongxiang, ZHANG Qianfang, LIU Songsong, et al. 3D micro topography measurement based on spatial frequency domain algorithm[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(8): 16—21 (in Chinese))
- [11] 刘玉娟, 许太, 闫松, 等. 一种基于线结构光的表面形貌测量方法[J]. 工程与试验, 2014, 54(3): 27—29 (LIU Yujuan, XU Tai, YAN Song, et al. Measurement method for surface morphology based on line structured light [J]. Engineering and Test, 2014, 54(3): 27—29 (in Chinese))
- [12] 姚骏, 唐颖, 陈巨兵. 基于任意系统位置关系的投影云纹形貌测量技术研究[J]. 实验力学, 2017, 32(1): 27—34 (YAO Jun, TANG Ying, CHEN Jubing. On the measurement technique of projection Moiré topography based on the arbitrarily system position relation [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1): 27—34 (in Chinese))
- [13] 张雨薇. 基于结构光的物体三维形貌测量[D]. 哈尔滨工程大学, 2012 (ZHANG Yuwei. 3D shape measurement based on structured light[D]. Harbin Engineering University, 2012 (in Chinese))
- [14] Michael A S, Stephen R M, Jeffrey D H, et al. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision[J]. Topics in Applied Physics, Springer Verlag, 2000, 77: 323—372.
- [15] 于起峰. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002 (YU Qifeng. Image based precise measurement and motion measurement[M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese))
- [16] 潘兵, 谢惠民, 续伯钦, 等. 数字图像相关中的亚像素位移定位算法进展[J]. 力学进展, 2005, 34(3): 345—352 (PAN Bin, XIE Huimin, XU Boqin, et al. Development of sub-pixel displacements registration algorithms in digital image correlation[J]. Advances in Mechanics, 2005, 34(3): 345—352 (in Chinese))

- [17] 王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2):195—203 (WANG Huaiwen, KANG Yilan, XIE Heping. Advance in digital speckle correlation and its application[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(2):195—203 (in Chinese))
- [18] 符师桦, 高越, 潘华烨, 等. 数字散斑相关法研究镍钴基高温合金中的 PLC 效应[J]. 实验力学, 2012, 27(5): 581—586 (FU Shihua, GAO Yue, PAN Huaye, et al. Investigation on Portevin-Le Chatelier effect in a Ni-Co based superalloy base on digital speckle correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(5):581—586 (in Chinese))
- [19] 刘颢文, 张青川, 项国富, 等. 白光散斑相关法多尺度分析 Portevin-Le Chatelier 剪切带变形[J]. 实验力学, 2005, 20(4):487—493 (LIU Haowen, ZHANG Qingchuan, XIANG Guofu, et al. White-light digital speckle image correlation analysis of the Portevin-Le Chatelier shearing band in multiscale[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(4):487—493 (in Chinese))
- [20] 潘兵, 谢惠民, 续伯钦, 等. 应用数字图像相关方法测量含缺陷试样的全场变形[J]. 实验力学, 2007, 22(3-4): 379—384 (PAN Bing, XIE Huimin, XU Boqin, et al. Full-field deformation measurement of specimen with discontinuity using digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(3-4):379—384 (in Chinese))
- [21] 陈琳, 卢荣胜. 数字图像相关法测量含缺陷试样全场变形量[J]. 激光杂志, 2014, 35(11):16—19 (CHEN Lin, LU Rongsheng. Digital image correlation method for full-field deformation measurement of specimen with discontinuity[J]. Laser Journal, 2014, 35(11):16—19 (in Chinese))
- [22] 朱珍德, 张勇, 李术才, 等. 用数字图像相关技术进行红砂岩微观裂纹损伤特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 24(7):1123—1128 (ZHU Zhende, ZHANG Yong, LI Shucai, et al. Studies on microcosmic crack damage properties of a red sandstone with digital image technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7):1123—1128 (in Chinese))
- [23] 潘兵, 谢惠民, 李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. 实验力学, 2007, 22(6): 556—567 (PAN Bin, XIE Huimin, LI Yanjie. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(6):556—567 (in Chinese))
- [24] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10):2244—2253 (TANG Zhengzong, LIANG Jin, XIAO Zhenzhong, et al. Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(10):2244—2253 (in Chinese))
- [25] 曾祥福, 刘程林, 马少鹏. 高速三维数字图像相关系统及其动载三维变形测量[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(4):364—369 (ZENG Xiangfu, LIU Chenglin, MA Shaopeng. Measurement of dynamic three-dimensional deformation of structures using high-speed 3-D digital image correlation system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(4):364—369 (in Chinese))
- [26] 刘聪, 陈振宁, 何小元. 3D-DIC 在土木结构力学性能试验研究中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(2):339—344 (LIU Cong, CHEN Zhenning, HE Xiaoyuan. Application of 3D-DIC in experimental study on mechanical properties of civil structures[J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2014, 44(2):339—344 (in Chinese))
- [27] CAI Yulong, ZHANG Qingchuan, YANG Suli, et al. Experimental study on three-dimensional deformation field of Portevin-Le Chatelier effect using digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(7):1243—1255.
- [28] XUE Yuan, CHENG Teng, XU Xiaohai, et al. High-accuracy and real-time 3D positioning tracking system for medical imaging applications based on 3D digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 88:82—90.
- [29] GAO Yue, CHENG Teng, SU Yong, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three dimensional measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65:73—80.
- [30] XU Xiaohai, SU Yong, ZHANG Qingchuan. Theoretical estimation of systematic errors due to shape functions and quadric surface fitting methods[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 88:265—279.

- [31] XU Xiaohai, SU Yong, CAI Yulong, et al. Effects of various shape functions and subset size in local deformation measurements using DIC[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(8):1575—1590.
- [32] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330—1334.
- [33] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998 (MA Songde, ZHANG Zhengyou. *Computer vision-computation theory and fundamentals of algorithm*[M]. Beijing: Science press, 1998 (in Chinese))

High Precision Three-Dimensional Morphology Measurement of Printed Circuit Board Based on Digital Image Correlation

ZHANG Xian¹, SU Yong², ZHANG Yong¹, DING Xiao-hua³, YU Qi-feng³, ZHANG Qing-chuan²

(1. Nanjing PMLAB Sensor Tech. Co., Ltd., Nanjing 211300, China; 2. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 3. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In production process, high precision real-time measurement of 3D product morphology is an effective means of quality monitoring, and has urgent requirement. Based on the three-dimensional digital image correlation (DIC-3D) method, the step like solder joints and printed circuit on printed circuit board were measured in full field, three-dimensional morphology data, such as the size of solder joint, the line height and width of printed circuit etc. were obtained. The in-plane and out-plane morphology data were collected by step gauge meter and compared with that from DIC method. Experimental results show that three-dimensional digital image correlation method can measure printed line step with ten microns height, and its precision is up to 3 micron in printed circuit board morphology measurement. For 500×500 pixels image, the reconstruction speed of stereo image is less than 1 second, under the condition of i7 4790k CPU hardware, the step size 3 pixels and sub area 19×19 pixels, which can satisfy the on-line real-time detection of the circuit board.

Keywords: digital image correlation; printed circuit board; three-dimensional morphology