

融合视觉标定与斑点检测算法的PCB钻孔定位方法

杨铎 张书晨 陈昕 易鹏飞 吴宏伟

Fusion of visual calibration and spot detection algorithm for PCB drilling positioning

YANG Duo, ZHANG Shuchen, CHEN Xin, YI Pengfei, WU Hongwei

引用本文:

杨铎, 张书晨, 陈昕, 等. 融合视觉标定与斑点检测算法的PCB钻孔定位方法[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 178–185. DOI: 10.5768/JAO202546.0105003

YANG Duo, ZHANG Shuchen, CHEN Xin, et al. Fusion of visual calibration and spot detection algorithm for PCB drilling positioning[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 178–185. DOI: 10.5768/JAO202546.0105003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0105003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双路多尺度金字塔池化模型的显著目标检测算法

Salient target detection algorithm based on dual-channel multi-scale pyramid pooling model

应用光学. 2021, 42(6): 1056–1061 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0602007>

基于斑马鱼图像特征的鱼群检测算法

Fish stock detection algorithm based on zebrafish image features

应用光学. 2022, 43(2): 257–268 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0202004>

复杂背景下改进的ViBe运动目标检测算法

Improved ViBe moving target detection algorithm in complex background

应用光学. 2023, 44(5): 1045–1053 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0502005>

基于音视频信息融合的目标检测与跟踪算法

Object detection and tracking algorithm based on audio-visual information fusion

应用光学. 2021, 42(5): 867–876 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502007>

基于改进Faster R-CNN的红外目标检测算法

Infrared target detection algorithm based on improved Faster R-CNN

应用光学. 2024, 45(2): 346–353 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0202001>

基于嵌入式GPU的特征畸变单目视觉定位系统的研究

Monocular visual positioning system with characteristic distortion based on embedded GPU

应用光学. 2023, 44(3): 469–475 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0301001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 01-0178-08

引用格式: 杨铎, 张书晨, 陈昕, 等. 融合视觉标定与斑点检测算法的 PCB 钻孔定位方法 [J]. 应用光学, 2025, 46(1): 178-185.

YANG Duo, ZHANG Shuchen, CHEN Xin, et al. Fusion of visual calibration and spot detection algorithm for PCB drilling positioning[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 178-185.



在线阅读

融合视觉标定与斑点检测算法的 PCB 钻孔定位方法

杨 铎^{1,2}, 张书晨¹, 陈 昕¹, 易鹏飞^{1,4}, 吴宏伟^{1,3}

(1. 大连大学 机械工程学院 软件工程学院, 先进设计与智能计算教育部重点实验室, 辽宁 大连 116622;

2. 谦研科技(大连)有限公司, 辽宁 大连 116622; 3. 广东世运电路科技股份有限公司, 广东 江门 529700;

4. 逆时针芯片科技(大连)有限公司, 辽宁 大连 116622)

摘 要: 为了解决目前 PCB (printed circuit board) 钻孔定位方法中多次标定的问题, 提出了一种新的 PCB 钻孔定位方法, 融合了视觉标定和斑点检测算法, 能适应动态变化的拍摄环境, 提高了 PCB 钻孔定位时的鲁棒性。这一方法基于张正友标定法, 通过多视角拍摄标定板以获取相机参数和畸变系数。之后, 利用这些参数校正 PCB 图像, 并运用多尺度空间斑点检测算法提取 PCB 图像中的钻孔点中心坐标。最终, 借助相机参数和 PCB 钻孔点的图像坐标, 成功地还原了 PCB 钻孔点的三维空间坐标, 实现了高效的钻孔点定位。通过实验得出, 本文方法的定位精度可在 0.1 mm 上下浮动, 平均定位误差可以控制在 0.05 mm~0.07 mm。结果表明, 本文方法具备一定的操作灵活性和鲁棒性, 符合 PCB 机械钻孔加工需求。

关键词: PCB; 视觉标定; 斑点检测算法; 三维坐标; 多点定位

中图分类号: TN911; TP391

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0105003

Fusion of visual calibration and spot detection algorithm for PCB drilling positioning

YANG Duo^{1,2}, ZHANG Shuchen¹, CHEN Xin¹, YI Pengfei^{1,4}, WU Hongwei^{1,3}

(1. Key Laboratory of Advanced Design and Intelligent Computing (Ministry of Education), College of Mechanical

Engineering, College of Software Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. Qianyan

Technology (Dalian) Co., Ltd., Dalian 116622, China; 3. Guangdong Shiyun Electronic Circuit

Technology Co., Ltd., Jiangmen 529700, China; 4. Counterclockwise Chip Technology

(Dalian) Co., Ltd., Dalian 116622, China)

Abstract: To address the issue of multiple calibrations in current printed circuit board (PCB) drilling positioning methods, a novel PCB drilling positioning method that integrated visual calibration and spot detection algorithms was proposed, which could adapt to dynamically changing shooting environments, thereby improving the robustness of PCB drilling positioning. The proposed method was based on Zhang's calibration method, and the camera parameters as well as distortion coefficients were obtained by shooting the calibration board from multiple angles. These parameters were then used to correct the PCB image, and a multi-scale spatial spot detection algorithm was employed to extract the center coordinates of the drilling

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2024-10-12

基金项目: 辽宁省教育厅高等学校基本科研项目 (青年项目) (LJKQZ2021172); 广东省江门市科技特派员科研项目 (2023760300230008495); 教育部产学研合作协同育人项目 (230704876283529); 大连大学交叉学科项目 (DLUXK-2024-QN-013; DLUXK-2023-QN-013)

作者简介: 杨铎 (1980—), 女, 博士, 教授, 主要从事机器视觉算法在精准医疗方面的应用研究。E-mail: yangduo@dlut.edu.cn

通信作者: 吴宏伟 (1987—), 男, 博士, 主要从事人工智能算法在 PCB 智能制造中的应用研究。E-mail: wuhongwei@dlu.edu.cn

points in the PCB image. Finally, with the help of camera parameters and image coordinates of PCB drilling points, the three-dimensional spatial coordinates of PCB drilling points were successfully reconstructed, and efficient drilling point positioning was realized. Through the experiment, the positioning accuracy of this method fluctuates around 0.1 mm, with an average positioning error controlled within 0.05 mm~0.07 mm. The results show that this method possesses a certain degree of operational flexibility and robustness, which meets the requirements of PCB mechanical drilling processing.

Key words: printed circuit board; visual calibration; spot detection algorithm; 3D coordinates; multi-point positioning

引言

近年来, 现代电子技术正处于迅猛发展的阶段, 电子设备正朝着微型化和多功能化的方向迈进^[1]。印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 作为电子设备的核心组件, 其钻孔定位问题长期以来一直是加工过程中的难点。传统的人工定位方式对夹具设备的要求很高, 并且加工效率很低。机器视觉的定位方式是利用相机等传感器获取 PCB 图像, 通过图像识别算法定位 PCB 位置, 并通过坐标转换调整刀具与加工点阵列的相对位置进行钻孔定位, 相较于传统人工定位, 机器视觉的定位方式具有高精度和高度自动化的优势, 因此机器视觉的定位加工方式逐渐取代传统人工定位^[2,3]。

目前, 应用于 PCB 定位的机器视觉方法主要包括基于边缘提取和基于模板匹配^[4], 边缘提取算法^[5]主要是通过计算图像梯度变化, 检测并提取出图像中的边缘信息, 并通过拟合的方式, 计算出边缘特征的中心, 这种方法的问题在于受图像边缘特征信息的影响, 存在提取边缘不准确的情况, 进而会影响中心坐标拟合精度。模板匹配^[6]的方法是通过创建模板图像, 计算图像中与模板最匹配的位置坐标, 并通过坐标转换实现元件定位, 模板匹配的方法虽然鲁棒性更好, 但在一些情况中其计算量很大, 并且其通用性并不强, 无法做到多目标识别定位。文献 [7] 采用 Canny 边缘提取算法和图像金字塔策略相结合的方式, 提取特征并创建模板进行模板匹配, 该方法可以得到较高定位精度的同时缩短模板匹配计算时间; 文献 [8] 使用 RST 模板匹配算法提取 PCB 表面标记位置坐标, 并与相机基准对齐, 利用他们之间的差异调整定位系统的位置, 通过实验证明该方法可以达到较高的定位精度; 文献 [9] 通过使用小面模型的方法, 提取模板轮廓亚像素边缘信息, 并结合亚像素遍历策略, 实现了模板亚像素级别的精确定位。

针对模板匹配算法计算时间长, 复杂度高的问题; 文献 [10] 提出了一种两阶段双校验有界部分相关的模板匹配算法, 来降低模板匹配算法的计算时间。以上方法的共同点在于需要重复进行标定计算, 这必然会增加冗余的计算量, 并且针对多点识别定位时泛用性不高, 无法针对多个目标同时定位。

本文提出一种新的 PCB 视觉定位方法, 该方法主要应用相机标定测距技术和斑点检测算法实现钻孔定位加工。该定位方法主要包含两步, 首先采集多视角的标定板图像用于标定相机, 方法上主要借鉴 ZHANG Z Y 等人^[11,12]提出的二维标靶视觉标定方法, 其次采集含有定位特征的 PCB 图像, 采用本文提出的多尺度空间斑点检测算法提取特征边缘轮廓并定位中心坐标。利用这两步得到的 PCB 钻孔点的图像中心坐标与相机参数, 计算 PCB 钻孔点的实际三维坐标, 该方法可应用于多数 PCB 钻孔加工。目前虽然有学者对标定测距在钻孔加工的应用展开研究^[13], 但到目前为止, 该方法还未应用于 PCB 钻孔加工中, 因此该方法具有一定的可研究性。

本文的主要贡献如下: 1) 提出一种新的 PCB 钻孔加工定位方法, 该方法具有计算复杂度低的优势, 且这种方法不需要多次标定, 具有较高的操作灵活性, 并且可以保证一定的加工精度, 可应用于 PCB 钻孔加工; 2) 提出了一种多尺度空间检测圆心坐标的方法, 该方法解决了斑点检测算法在高分辨率图片上无法检测到全部圆心坐标的情况。

1 拟定方法

1.1 相机标定模块

该模块主要为定位加工孔中心提供保障, 因此标定参数的准确性直接影响定位结果精度, 采集

图像时需要控制相机的焦距不变,焦距变化会影响相机的内参数。在标定图片数量上的选择,本文采用Halcon推荐的10~20张图片为主^[14],具体标定图像数量的选择须考虑标定板的特征点数量信息。

标定板图像及圆心提取效果图如图1所示,本文采用圆形标定板作为标准,通过斑点检测算法提取圆心坐标,将圆心坐标 p 与其对应的空间点坐标 X_w 代入相机模型^[15]中,其表达式如式(1)所示:

$$p = K \begin{bmatrix} R & T \end{bmatrix} X_w = M X_w \quad (1)$$

式中: K 为相机内参数矩阵; R 、 T 分别表示旋转和平移矩阵; M 表示相机的投影矩阵,内参数矩阵为相机固定信息,需要选择一张基准图像作为定位标准,以此张图像的位姿作为输出。之后,利用非线性最小二乘法^[16]计算该组相机的畸变系数用于校正PCB图像,其中校正前图像特征点中心的坐标为 $p(u, v)$,校正后的图像特征点中心的坐标为 $p'(u', v')$,其表达式如式(2)所示:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 uv + p_2(r^2 + 2u^2) \\ 2p_1(r^2 + 2v^2) + 2p_2 uv \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $r^2 = u^2 + v^2$; k_1 、 k_2 、 k_3 、 p_1 、 p_2 为畸变校正系数,至此完成相机标定模块。

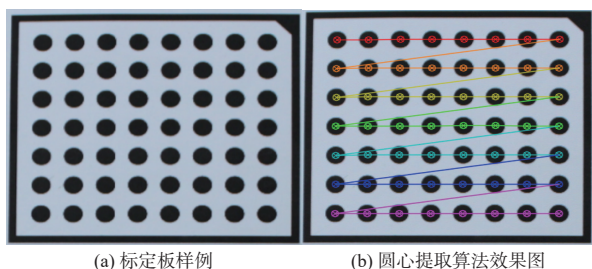


图1 标定板样例和圆心提取算法效果图

Fig. 1 Calibration board example and effect image of circle center extraction algorithm

1.2 圆心提取模块

PCB表面存在孔布局复杂,大小不一的情况,因此本文采用多尺度空间斑点检测算法检测加工孔的特征,提取特征中心图像坐标,并进行去重、排序操作,将过滤后的特征点通过标定模块得到的相机参数进行三维重建,可得到待加工孔的三维位置坐标。该方法优势在从多尺度空间对直径相差较多的特征进行筛选,可以有效提取待加工点的全部坐标,适用于复杂表面特征定位。

1.2.1 图像金字塔

图像金字塔^[17]技术是将同一图像划分为不同分辨率的子图集合,由于圆形特征并无复杂的边缘信息,因此对原始图像进行下采样可以保存圆形特征的边缘轮廓。本文对分辨率为 $2\,352 \times 1\,568$ pixel的图像进行4层图像金字塔的构建,具体效果图如图2所示。

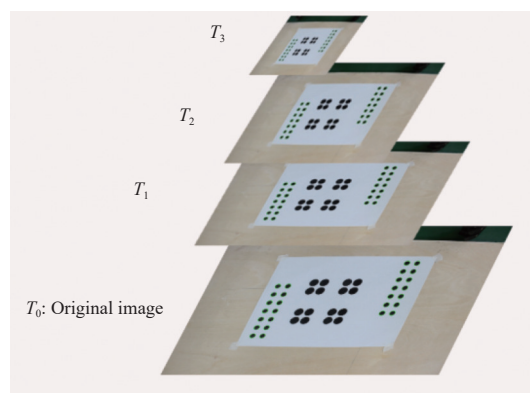


图2 图像金字塔

Fig. 2 Image pyramids

1.2.2 多尺度空间斑点检测算法

由于PCB表面需要加工大小不一的孔,在高分辨率图像中无法准确提取全部的圆形特征,因此,提取PCB表面所有的圆形特征也是难点之一。针对此问题,本文提出多尺度空间斑点检测算法,融合图像金字塔技术和基于局部极值的分水岭算法^[18]进行图像特征提取。基于局部极值的分水岭算法是一种常见的斑点检测算法,OpenCV提供了Simpleblobdetector函数实现这个算法,其算法流程首先通过设置最小阈值 $T_{\min}$ 和最大阈值 $T_{\max}$,并根据阈值步长 S ,将原始图像划分为一组二值图像,提取每张二值图像的连通区域和中心坐标,并设置最大斑点面积和最小斑点面积对特征进行筛选,剔除掉钻孔点特征以外的噪点。此外,设置圆度参数对特征点进行精细筛选,圆度计算公式如式(3)所示:

$$C = \frac{4\pi S}{l} \quad (3)$$

式中: S 表示特征点区域面积; l 表示特征点周长长度。然而该算法在高分辨率的图像下,无法检测到全部的圆形特征,因此在该算法的基础上,引入图像金字塔技术,对原始的图像进行下采样。假设原始图像分辨率为 $M \times N$,它的下一层图像即为 $M/2 \times N/2$,以此类推。之后对每一层下采样后的图像提取斑点特征,最后将不同尺度空间提取到

的圆形特征映射回原始图像中。由于多尺度空间检测可能存在对同一特征进行多次检测, 因此需要进行去重处理, 本文采用欧式距离判断来筛出相似的点, 首先设置阈值 T_1 。 T_1 需要根据特征点之间的距离来设定, 避免剔除正确的点, 假设通过多尺度空间斑点检测算法提取到的任意两点 $p_1(x_1, y_1)$ 和 $p_2(x_2, y_2)$, 通过式(4)计算欧式距离:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (4)$$

判断 d 与阈值 T_1 的大小关系来剔除掉多余的点, 并根据坐标归一化原则对图像坐标进行排序, 至此完成 PCB 圆心提取模块。本文方法可以对高分辨率图像进行特征点提取, 图 3 为本文算法和斑点检测算法的效果图, 两张图像的分辨率为 $2352 \times$

1 568 pixel, 可以看到采用本文算法提取特征的效果更佳。

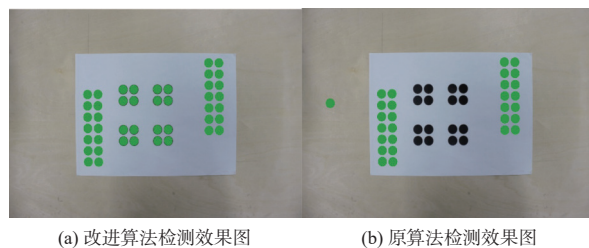


图 3 本文算法和斑点检测算法效果图

Fig. 3 Effect images of proposed algorithm and spot detection algorithm

1.3 方法流程

本文所提方法的具体流程如图 4 所示。

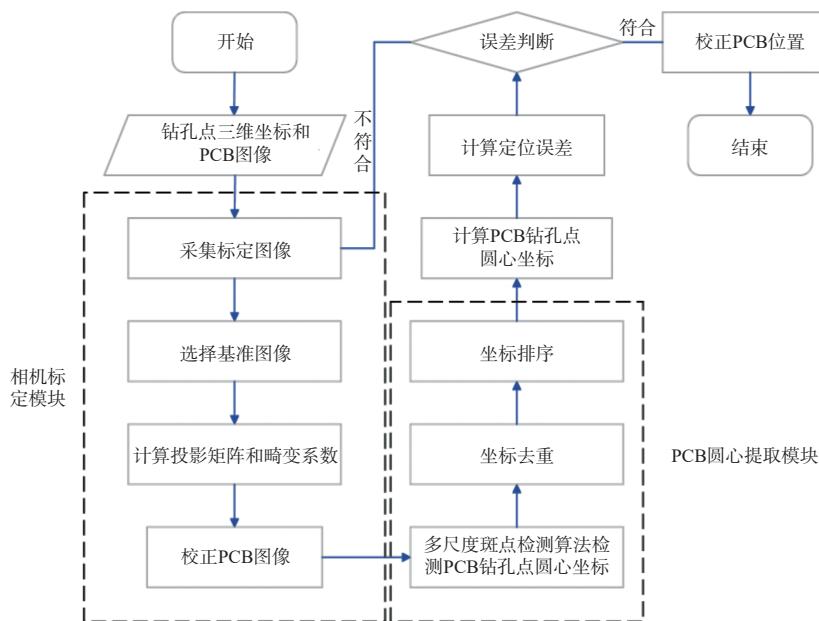


图 4 PCB 视觉标定与定位程序流程图

Fig. 4 Flow chart of PCB visual calibration and positioning method

由图 4 可知, 相机标定模块需要多角度的一系列标定板图像、标定板特征中心的三维坐标、PCB 图像和 PCB 待加工孔的中心三维坐标。通过相机标定模块得到相机参数和畸变系数, 利用畸变系数对 PCB 图像进行校正, 并通过圆心提取模块得到的 PCB 待加工孔中心坐标, 对校正后的 PCB 加工点图像坐标根据相机参数映射回三维空间中, 得到加工点的真实三维坐标。最后需要判断拟合计算出的三维坐标与 PCB 钻孔点真实三维坐标之间的误差值, 如果符合标准, 则根据坐标调整刀具与 PCB 的相对位置, 进行钻孔加工。反之则判断相机标定模块得到的相机参数不可靠, 需要重新

进行标定。

2 实验结果与分析

由于 PCB 表面复杂, 易反光, 所以本文实验选择将钻孔点绘制在纸张上进行定位实验。本文共绘制了 2 张用于相机标定的标定板, 4 张 PCB 特征点图片, 设计了 2 种实验方案, 如图 5 所示。实验器械包括一部佳能 500D, 相机云台, 相机支架, 实验器械的布局如图 6 所示, 相机的相关数据如表 1 所示。实验场景选择在室光环境下, 定位结果如图 7 所示, 本文的代码实验环境为 Python3.10.9 和 OpenCV4.7.0。

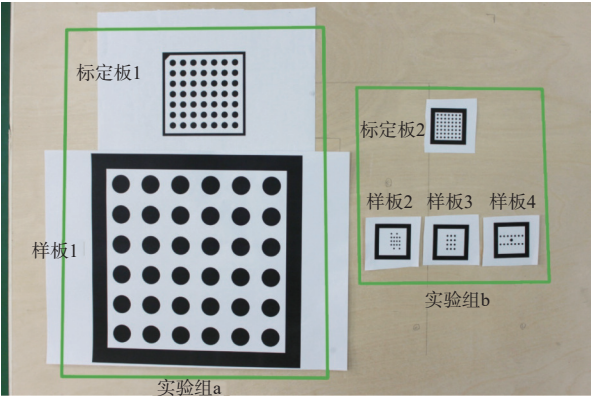


图 5 标定板和 PCB 样板图像

Fig. 5 Calibration board and PCB sample images

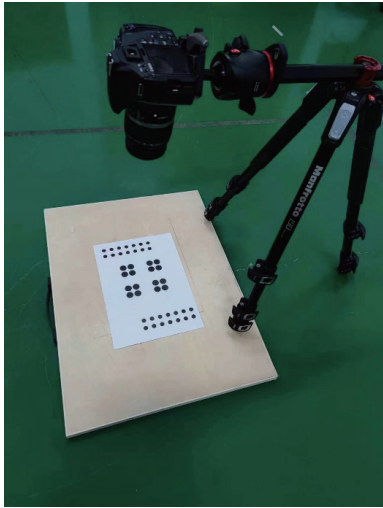


图 6 实验设备

Fig. 6 Experimental apparatus

表 1 实验参数设置	
Table 1 Experimental fixed parameters	
参数	数值
相机型号	Canon EOS 500D
焦距/mm	55
ISO	200
图像分辨率/pixel	4 752×3 168

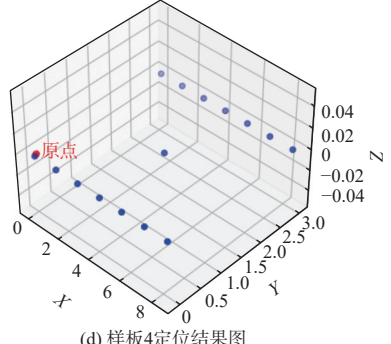
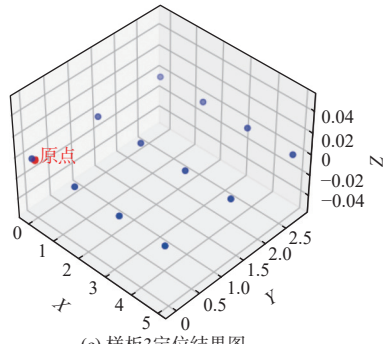
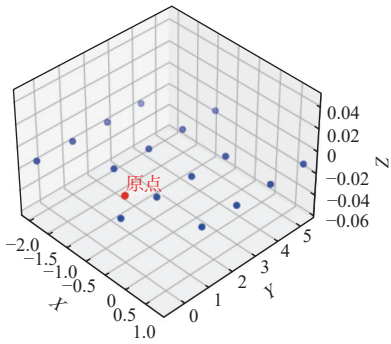
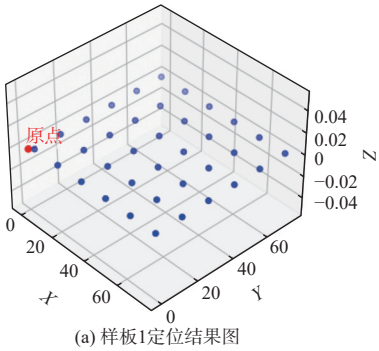


图 7 定位结果图

Fig. 7 Diagrams of positioning results

2.1 标定参数选择

该部分主要选择出用于钻孔定位的相机参数和畸变系数,采用相机平均重投影误差^[19]作为评价标准,如式(5)所示:

$$E_R = \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^n \|p_j - \hat{p}_j\|^2 \tag{5}$$

式中: p_j 为图像二维坐标; $\hat{p}_j$ 为拟合计算后的图像二维坐标; m 表示图像数量; n 表示图像的特征点数量。实验共设计了2种标定板,针对不同大小的PCB样板图形进行定位实验。标定板1为7×7,圆心距为10 mm,特征点直径为6 mm的圆点标定板;标定板2为7×7,圆心距为2.7 mm,特征点直径为1.2 mm的圆点标定板。标定的图

片数量为 16 张, 标定板 1 的平均重投影误差为 0.072 pixel, 标定板 2 的平均重投影误差为 0.081 pixel, 计算得到的相机内参数和畸变系数如表 2 所示。

表 2 相机内参数

Table 2 Camera matrix parameters

	f_x	f_y	C_x	C_y	K_1	K_2	P_1	P_2	K_3
标定板1	20 323	20 419	2 040	1 053	-0.29	-18.8	-0.02	0.01	-16.3
标定板2	100 193	103 293	2 378	1 557	4.40	-6.38	-0.05	0.21	-0.01

2.2 方法测试

共进行了 2 组实验对本文方法进行验证, 实验的分组如图 5 所示, 分为 a 组和 b 组。其中 a 组实验对象的边框范围为 17.6 cm×17.6 cm, 拍摄高度为 85.7 cm; b 组实验对象的边框范围为 2.6 cm×2.6 cm, 拍摄高度为 16.6 cm。在完成相机标定之后, 首先利用畸变系数校正 PCB 图像, 之后利用多尺度空间斑点检测算法对 PCB 进行特征点中心坐标提取, 并通过相机内外参数将这些二维图像坐标映射到三维坐标空间中。将这些通过拟合计算得到的三维坐标与实际的三维坐标进行对比, 本文采用欧式距离公式计算误差, 如式(6)所示:

$$E_A = \pm \sum_{i=1}^n \sqrt{X_w - \hat{X}_w} \tag{6}$$

式中: X_w 为真实三维坐标; $\hat{X}_w$ 为拟合计算得出的三维坐标; n 表示三维点的数量。

2.2.1 视野范围 (FOV) 对定位精度的影响

在 a 组实验中, 将样板 1 划分成为 5 个区域进行定位实验, 如图 8 所示。

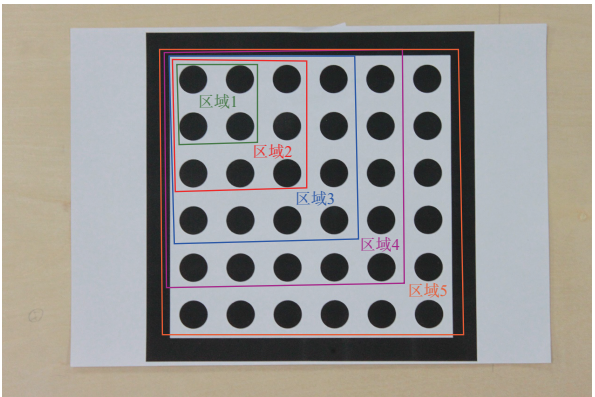


图 8 对样板 1 划分 5 个区域

Fig. 8 Divide sample 1 into 5 regions

每个区域的视野范围(FOV)不同, 特征点数量也不同, 用标定板 1 标定得到的相机参数对样板 1 进行钻孔点位置定位, 计算每个区域的钻孔点平均定位误差, 对其进行统计, 其平均定位误差曲线

如图 9 所示。

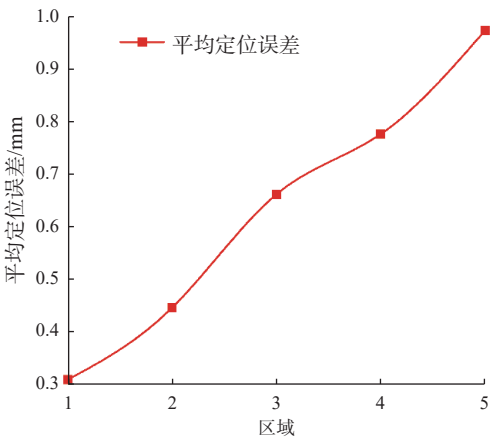


图 9 5 个定位区域的平均定位误差曲线图

Fig. 9 Average positioning error curve for 5 positioning regions

这组实验结果表明, 样板 1 的整体平均定位误差保持在 1 mm 以内。然而, 随着 FOV 的扩大, 平均定位误差显著增加。从图 9 中的区域 1 到区域 5, 平均定位误差累计增加了 0.67 mm。同时, 钻孔点数量的指数性增加导致平均定位误差近线性地增长, 钻孔点每进行一次指数性增加, 平均定位误差增加约 0.1 mm~0.2 mm。这表明, FOV 的扩大和钻孔点数量的增加对定位误差有显著影响, 且误差的增长趋势接近线性。因此, 本文的方法可在较小的 FOV 中具有较好的定位精度。

2.2.2 拍摄高度对定位精度的影响

不同于实验 a 组, 实验 b 组的拍摄高度要更低, 并且实验 b 组的定位范围更小, 特征点直径更加接近于 PCB 表面的孔(过孔和定位孔), 因此实验 b 组主要验证在高分辨率图像下, 通过缩小镜头拍摄的 FOV 面积及定位精度的变化。该组实验选用的标定板为图 5 中的标定板 2, 实验对象为样板 2、样板 3 以及样板 4, 定位误差结果如图 10 所示, 样板 2、样板 3 和样板 4 的平均定位误差分别为 0.056 mm, 0.079 mm 和 0.062 mm。

这组实验结果显示, 在最近的拍摄高度和较小

的 FOV 条件下, 本文方法的定位精度可以控制在 0.1 mm 以内(个别点的定位误差在 0.13 mm 以内), 并且平均定位误差在 0.05 mm~0.07 mm 范围内。目前 PCB 的钻孔方法有机械钻孔和激光钻孔, 激光钻孔的精度要求很高, 因此对采集设备和加工设备具有较高的要求, 而机械钻孔的精度要低一些, 一般在 0.025 mm~0.1 mm 之间, 因此本文所提方法的定位精度符合这个标准, 可应用于 PCB 机械钻孔的加工中。

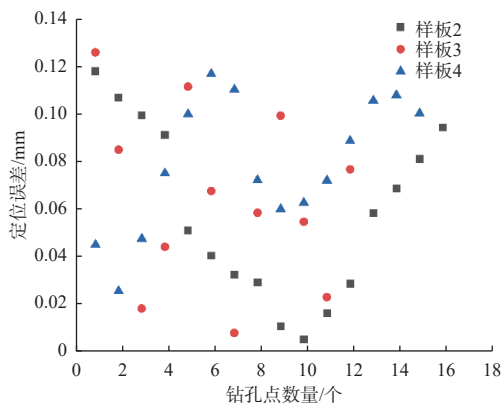


图 10 样板 2、样板 3 以及样板 4 的定位误差散点图

Fig. 10 Positioning error scatter plots for sample 2, sample 3, and sample 4

3 结论

本文介绍了一种融合视觉标定和多尺度空间斑点检测算法的 PCB 钻孔定位方法, 该方法无需多次标定, 且可以对多点同时定位, 并且具有较高的定位精度, 因此具备一定的研究价值。该方法首先需要标定相机参数, 之后采用多尺度空间斑点检测算法提取 PCB 钻孔点的圆心坐标, 最后利用标定参数恢复钻孔点的三维坐标, 进行 PCB 钻孔定位。在实验中, 对 4 种 PCB 样板进行定位实验, 一共进行了两组实验。由第一组实验得出, 本文方法的定位精度受到拍摄 FOV 影响, 随着 FOV 范围的增加, 钻孔定位误差随之增加; 由第二组实验得出, 当缩小定位表面的 FOV 面积时, 可以得到较高的定位精度, 并且这种方法适用实际的 PCB 钻孔情况。实验结果表明, 本文方法的平均定位精度可以达到 0.05 mm~0.07 mm, 最大定位误差在 0.1 mm 上下浮动, 因此本文方法可以应用于 PCB 机械钻孔加工中。

参考文献:

[1] 李轩, 杨舟, 陶新宇, 等. 基于 Mask R-CNN 结合边缘

割的颗粒物图像检测[J]. *应用光学*, 2023, 44(1): 93-103.

LI Xuan, YANG Zhou, TAO Xinyu, et al. Particles image detection based on Mask R-CNN combined with edge segmentation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(1): 93-103.

[2] HE W B, JIANG Z W, MING W Y, et al. A critical review for machining positioning based on computer vision[J]. *Measurement*, 2021, 184: 109973.

[3] 何曦, 李良福, 王娇颖, 等. 基于 NPU 的实时深度学习跟踪算法实现[J]. *应用光学*, 2022, 43(4): 682-692.

HE Xi, LI Liangfu, WANG Jiaoying, et al. Implementation of real-time deep learning tracking algorithm based on NPU[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(4): 682-692.

[4] LING Q, ISA N A M. Printed circuit board defect detection methods based on image processing, machine learning and deep learning: a survey[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 15921-15944.

[5] JING J F, LIU S J, WANG G, et al. Recent advances on image edge detection: a comprehensive review[J]. *Neuro-computing*, 2022, 503: 259-271.

[6] ZHOU Y B, YUAN M H, ZHANG J, et al. Review of vision-based defect detection research and its perspectives for printed circuit board[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 70: 557-578.

[7] SI Y J, WANG W C, ZHENG Z L, et al. A fast and robust template matching method with rotated gradient features and image pyramid[M]//Intelligent Robotics and Applications. Shenyang: Springer International Publishing, 2019: 505-516.

[8] LE M T, TU C T, GUO S M, et al. A PCB alignment system using RST template matching with CUDA on embedded GPU board[J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(9): 2736.

[9] WANG R, YANG K M, ZHU Y. A high-precision mark positioning algorithm based on sub-pixel shape template matching in wafer bonding alignment[J]. *Precision Engineering*, 2023, 80: 104-114.

[10] CHEN F J, LIAO J Q, LU Z J, et al. A real-time two-stage and dual-check template matching algorithm based on normalized cross-correlation for industrial vision positioning[J]. *Pattern Analysis and Applications*, 2021, 24(3): 1427-1439.

[11] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Ma-*

- chine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [12] ZHAO P, LI Y K, CHEN L J, et al. Camera calibration technology based on circular points for binocular stereovision system[M]//Computer Science for Environmental Engineering and EcoInformatics. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 356-363.
- [13] ZHAN Q, WANG X. Hand-eye calibration and positioning for a robot drilling system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(5): 691-701.
- [14] MORU D K, BORRO D. Analysis of different parameters of influence in industrial cameras calibration processes[J]. Measurement, 2021, 171: 108750.
- [15] KANNALA J, BRANDT S S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(8): 1335-1340.
- [16] CLARKE T A, FRYER J G. The development of camera calibration methods and models[J]. The Photogrammetric Record, 1998, 16(91): 51-66.
- [17] LEE S, LEE K M. Image pyramid[M]//Computer Vision: A Reference Guide. Cham: Springer International Publishing, 2021: 629-632.
- [18] ZHU M, SHAN Z, NING W, et al. Image segmentation and quantification of droplet dPCR based on thermal bubble printing technology[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7222.
- [19] WENG J, COHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.