

基于双目视觉的连接 PIN 正位度检测方法

刘文超^{1,2}, 杨轶睿^{1,2}, 汪威^{1,2*}, 杨昊^{1,2}, 翟中生^{1,2}¹湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068;²现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068

摘要 印刷电路板上连接 PIN 正位度检测是保证 PCB 电气可靠性的重要环节,其主要检测 PIN 缺针、共线度与高度。为满足生产实际需求,提出一种基于双目视觉的连接 PIN 正位度检测方法。首先,通过双目标定获取相机内外参数,实现图像立体校正;其次,根据先验的相对方位和给定的排列信息生成相应的栅格,基于栅格灰度阈值变化进行 PIN 缺失检测;然后,分别提取 PIN 在两个相机视野中对应的特征角点,基于视差原理进行针尖三维坐标计算,实现对 PIN 的排列共线度检测;最后,提出了基于特征提取的 PIN 相对高度检测方法,实现了对 PIN 的相对高度检测。实验结果验证了所提方法的有效性,PIN 相对高度检测的平均耗时为 125.4 ms,精度达 99.535%,重复性精度在 ± 0.05 mm 内。

关键词 双目视觉; PIN; 正位度检测; 视差; 图像处理

中图分类号 TP391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222425

Position Detection Method of Connecting PIN Based on Binocular Vision

Liu Wenchao^{1,2}, Yang Yirui^{1,2}, Wang Wei^{1,2*}, Yang Hao^{1,2}, Zhai Zhongsheng^{1,2}¹School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China;²Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, Wuhan 430068, Hubei, China

Abstract Position detection of connecting PIN on printed circuit board (PCB) is a vital link to ensure the electrical reliability of PCB, which mainly detects missing, collinearity, and height of PIN. In this study, a method for determining the position of the connecting PIN based on binocular vision is proposed to meet the actual needs of production. First, the intrinsic and extrinsic parameters of the cameras are obtained by binocular calibration, and the stereo rectification of images is achieved. Second, the relevant grid is constructed according to the previously provided arrangement information and relative orientation, followed by PIN missing detection using a change of the grid's gray threshold. Next, to achieve the collinearity detection of PIN arrangement, the feature corner points corresponding to the PIN in two camera fields of view are extracted separately. Furthermore, the three-dimensional coordinates of the pinpoint are determined based on the disparity principle. Finally, a feature extraction-based PIN relative height detection approach is suggested to implement the relative height detection for PINs. The experimental findings support the effectiveness of the proposed method; the average elapsed time of PIN relative height detection is 125.4 ms, the accuracy is 99.535%, and the repeatable accuracy is within ± 0.05 mm.

Key words binocular vision; PIN; position detection; disparity; image processing

1 引言

印刷电路板(PCB)上的PIN是一种常见的针状电气连接元件,用来完成电信号导电和传输。PIN通过插装和焊接固定在PCB上,在大批量生产过程中,由于来料或制程等原因,会出现缺针、歪针和针尖高度异常等情况,导致信号连接不稳定甚至中断^[1]。为保证PCB功能的可靠性,对PIN进行正位度检测是产品质量管控的重要环节^[2],主要内容包括PIN的缺失情况

检测、排列共线度检测和相对高度检测。

连接PIN正位度检测方法可以分为接触式测量和非接触式测量两类。接触式测量中,应用最广泛的是三坐标测量机,其通过监测探头与实物的接触情况获取坐标数据,但是测量过程中接触探头可能会造成连接PIN的局部变形而影响测量值的结果,甚至导致产品报废;并且在不同连接PIN之间进行切换时需要对接头重新排布,耗时耗力且成本高昂,无法满足现代化大型制造业的检测需求。非接触式测量方法可分为激

收稿日期: 2022-08-30; 修回日期: 2022-09-15; 录用日期: 2022-09-23; 网络首发日期: 2022-10-02

基金项目: 国家自然科学基金(32071457)、武汉市科技成果转化专项(2020030603012342)

通信作者: *wangw@hbut.edu.cn

光测量法^[3-4]、结构光法^[5-10]和视觉测量法^[11-16]。激光测量法利用激光三角测距原理生成三维点云数据,扫描速度快,精度高,但是扫描得到的点云细节和边界信息不够精细,且数据量大,噪点多,因此处理速度较慢。结构光法具有较高的精度和分辨率,但采集数据时会因连接PIN反光特质造成数据缺失,且设备较为昂贵。视觉测量法具有结构简单、测量稳定性强的优点,目前已在多个领域得到广泛应用^[17]。文献[14]在基于视觉的接插件PIN针正位度检测方面进行初步探索,但单目视觉不足以满足检测需求,无法通过二维图像对连接PIN的相对高度进行检测。

为了降低检测装置成本,提高检测效率,保证检测精度,本文提出一种基于双目视觉的连接PIN正位度检测方法。与现有的接触式测量方法相比,所提方法的检测速度更快,成本更低,有效避免了检测时测量机器对工件造成损伤,影响检测结果及工件后续使用的问题。与主动式非接触式测量方法相比,双目视觉测

距法更加依赖图像特征匹配^[18-20],因此如何从双目图像对中获取准确的匹配点对是研究的重点。

2 基于双目视觉技术的连接PIN正位度检测方案

综合分析连接PIN正位度检测的现场条件和双目图像的现场采集环境,本文提出了PCB PIN双目视觉检测系统的现场部署方案和检测流程。

2.1 PCB PIN双目视觉检测系统现场部署方案

设计的PCB PIN双目视觉检测系统的现场部署方案如图1所示。采用双目相机对X、Y轴移动平台上不同姿态的PCB拍摄图像进行处理,可编程逻辑控制器(PLC)与计算机通过串口线连接,主要为了实现节拍和流程控制。控制器用于控制平台移动,改变PCB位置,系统最终检测PCB PIN各参数,判断待测工件是否符合产品出厂要求。

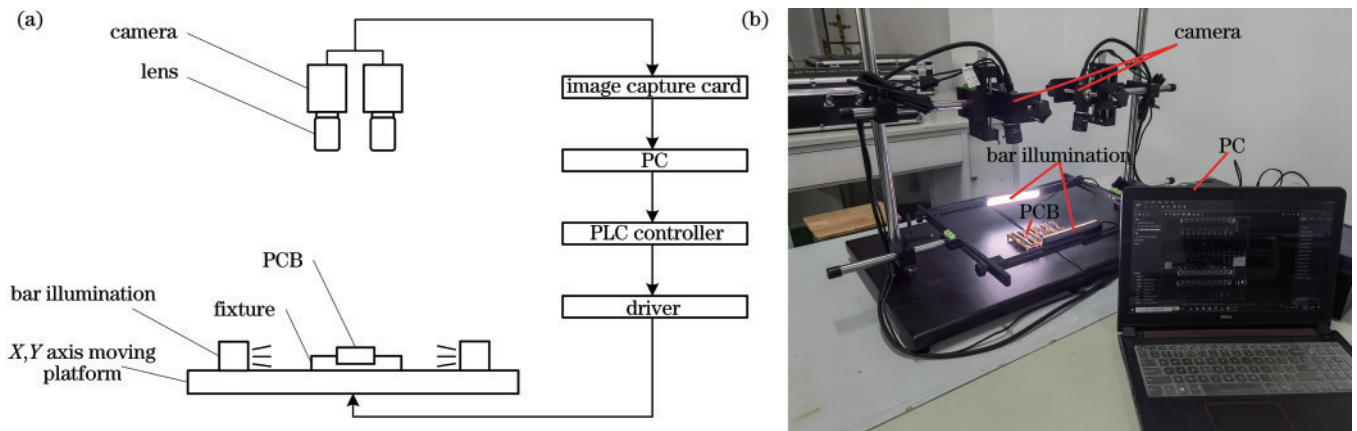


图1 PCB PIN双目视觉检测系统。(a)硬件结构;(b)实验平台

Fig. 1 PCB PIN binocular vision detection system. (a) Hardware structure; (b) experiment platform

2.2 检测流程

基于双目视觉技术的连接PIN正位度检测流程如

图2所示,主要包括5个步骤。

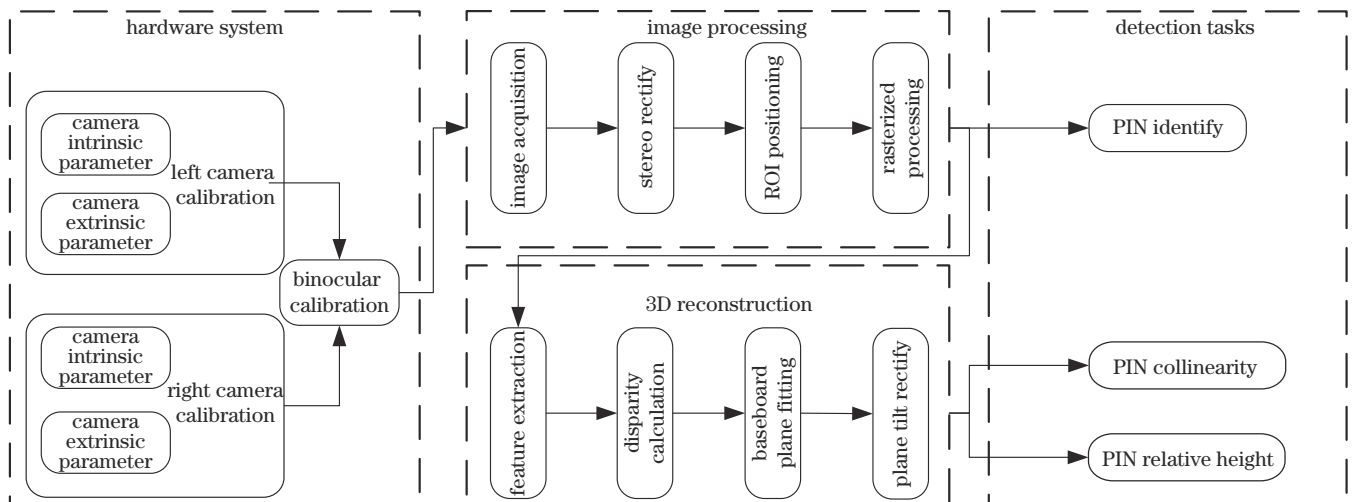


图2 检测流程

Fig. 2 Detection process

1) 根据双目立体标定结果,对采集到的图像进行立体校正;

2) 根据先验的相对方位和给定的排列信息,生成相应的栅格,使每个栅格至多包含 1 根 PIN,再对每个栅格的灰度进行统计分析,判断是否存在缺失;

3) 针对 PIN 的轮廓特征,利用边缘提取算法分别提取 PIN 在两个相机视野中对应的特征角点,基于视差原理计算出 PIN 的三维坐标,实现 PIN 的排列共线度检测;

4) 采用特征提取算法分别提取 PCB 在两个相机视野中对应的特征点,拟合出基板平面;

5) 根据罗德里格斯公式实现基板平面倾斜度校正,得到每个针尖到基板平面的相对高度。

3 基于双目视觉技术的连接 PIN 正位度检测方法

3.1 双目标定与立体校正

在空间中假定三维特征点 w ,定义左和右相机外部参数分别为 R_l, T_l 和 R_r, T_r ,被测特征点 (X_w, Y_w, Z_w) 在左与右相机成像面中的点坐标分别为 (X_c^l, Y_c^l, Z_c^l) 与 (X_c^r, Y_c^r, Z_c^r) ,则根据坐标转换原理,以左相机为主相机,左右相机坐标计算式为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X_c^l \\ Y_c^l \\ Z_c^l \end{bmatrix} = R_l \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T_l \\ \begin{bmatrix} X_c^r \\ Y_c^r \\ Z_c^r \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T_r \end{cases}, \quad (1)$$

进一步化简,可得

$$\begin{bmatrix} X_c^r \\ Y_c^r \\ Z_c^r \end{bmatrix} = R_r R_l^{-1} \begin{bmatrix} X_c^l \\ Y_c^l \\ Z_c^l \end{bmatrix} + T_r - R_r R_l^{-1} T_l. \quad (2)$$

用旋转矩阵 R 与平移矩阵 T 来描述左右相机相对关系,则左右相机外参矩阵变换公式为

$$\begin{cases} R = R_r R_l^{-1} = R_r R_l^T \\ T = T_r - R_r R_l^{-1} T_l \end{cases}. \quad (3)$$

结合式(1)~(3),分别对左右相机进行单目标定得到内外参数后,利用算法进行优化完成双目标定。

理想的双目视觉成像模型应保证两台相机的光心水平,成像平面共面,相机安装在同一平面。非标准成像模型中同一点在左右图像中的像点并非位于同一水平线上,因此需要图像立体校正,缩小匹配搜索范围,以提高计算效率。立体校正算法中对极几何原理示意图如图 3 所示。

设三维空间中被测物存在特征点 P ,将 $P = (X_c, Y_c, Z_c)$ 定义为特征点在相机坐标系下的空间坐标。左右相机都能观测到 P 点并对其采集图像, $P_l = (x_l, y_l)$ 和 $P_r = (x_r, y_r)$ 分别表示 P 在左右图像中的物理坐标, $O_l O_r P$ 为极平面, e_l 和 e_r 为极点, $e_l P_l$ 和 $e_r P_r$ 为极线

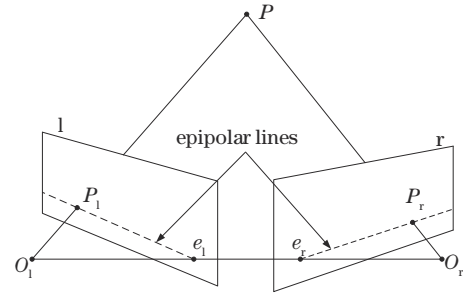


图 3 对极几何原理

Fig. 3 Principle of epipolar geometry

(epipolar line)。

采用 Bouguet 图像立体校正算法,使两相机光轴完全平行,像点在左右图像上高度一致,便于后续进行特征匹配。首先将双目标定得到的右相机相对于左相机的旋转矩阵 R 分解为两个相机各旋转一半的 R_1 和 R_2 ,其中 $R_1 = R^{\frac{1}{2}}$, $R_2 = R^{\frac{1}{2}}$ 。此时相机的成像平面平行,但基线与成像平面并不平行,极点并没有位于无穷远处。然后利用右相机相对左相机的平移矩阵 T 构造变换矩阵,令该变换矩阵为 $R_{\text{rect}} = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ 。其中, e_1 为与平移向量 T 同方向的极点, e_2 为图像平面方向的向量, e_3 为垂直于 e_1 与 e_2 所在平面的向量。令 $T = [T_x \ T_y \ T_z]^T$,则构造的向量为

$$\begin{cases} e_1 = \frac{T}{\|T\|} \\ e_2 = \frac{[-T_x \ T_y \ 0]^T}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}} \\ e_3 = e_1 \times e_2 \end{cases}. \quad (4)$$

使得基线与成像平面平行的左右相机旋转矩阵 R_l' 和 R_r' 为

$$\begin{cases} R_l' = R_{\text{rect}} R_l \\ R_r' = R_{\text{rect}} R_r \end{cases}. \quad (5)$$

通过左右相机旋转矩阵 R_l' 和 R_r' ,就能使左右图像对实现理想的行对齐^[21]。立体校正结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,左右图像中每根 PIN 都位于同一水平面上,说明立体校正实现了使图像行对准的目的。

3.2 基于栅格灰度阈值变化的 PIN 缺失检测

连接 PIN 缺针会导致信号连接不稳定甚至中断,影响产品性能。基于此,提出一种基于栅格灰度阈值变化的 PIN 缺失检测方法,流程如图 5 所示。对 PIN 粗定位区域进行栅格化处理,计算每个栅格区域内的灰度带宽值,并与设定的阈值进行比对,以此判断是否存在缺针情况,具体步骤如下。

设共有 n 个栅格;当前栅格为 i ,计算栅格内灰度值;定义 g_{std} 为标准灰度值,对当前栅格灰度值与其进行比较,结果显示识别出 PIN 存在或检测出 PIN 缺失,具体流程如下。

1) 选取 PCB 上的 Mark 点用于确定待检测 PIN 所

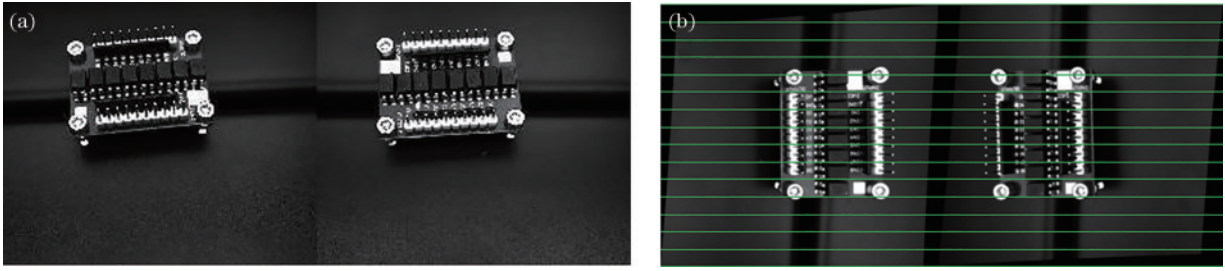


图 4 立体校正结果。(a)原始图像;(b)校正后图像

Fig. 4 Result of the stereo rectification. (a) Original image; (b) rectified image

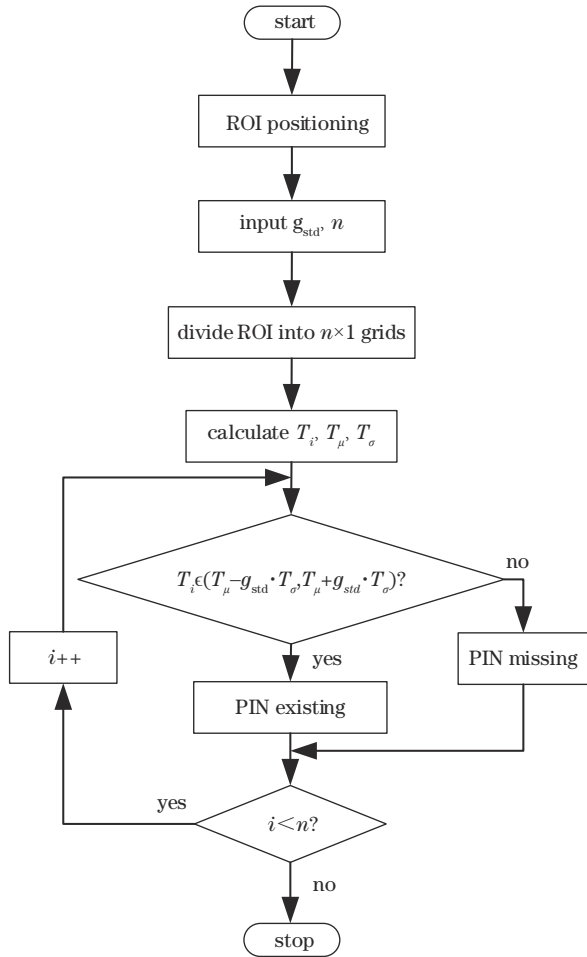


图 5 PIN 缺失检测流程

Fig. 5 PIN missing detection process

在的区域和方向,再根据先验的相对方位和给定的排列信息,将感兴趣区域(ROI)划分为 $n \times 1$ 的栅格,使每根 PIN 都划分至单个栅格内。

2) 计算每个栅格区域内的灰度极差 T_i :

$$T_i = g_{\max} - g_{\min}, \quad (6)$$

式中: g_{\max} 与 g_{\min} 分别表示每个栅格区域内的最大灰度值与最小灰度值。设所有栅格区域灰度带宽的均值为 T_μ , 则有

$$T_\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i. \quad (7)$$

子图灰度带宽的标准差 T_σ 为

$$T_\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_\mu)^2}. \quad (8)$$

3) 定义 g_{std} 为标准差系数,当栅格灰度带宽 T_i 在标准范围 $(T_\mu - g_{\text{std}} \cdot T_\sigma, T_\mu + g_{\text{std}} \cdot T_\sigma)$ 时,则判定该栅格区域存在 PIN;反之,则说明该栅格区域 PIN 缺失,并标记第 i 根针存在缺失情况。

基于栅格灰度阈值变化的 PIN 缺失检测只需要根据给定的排列信息输入 n 和 g_{std} ,即可有效识别出每个栅格区域内是否存在缺针情况,且能实现对每根 PIN 的精准定位,大大减少特征点提取的计算量。

3.3 基于边缘检测的针尖三维重建

在对栅格内单个 PIN 进行图像处理的过程中发现,针尖平面呈不规则几何形状,导致角点检测及双目图像匹配误差较大。为减小可控的误差,提升检测结果的精度,提出基于边缘检测的针尖三维重建方法。首先,利用 Canny 算子^[22]对左右图像对进行边缘检测,对 PIN 与图像背景进行分割;然后基于所得的边缘检测图像,进行 Blob 分析,将针尖轮廓区域从背景中提取出来;再将针尖平面轮廓拟合为具有方向特征的矩形,并对每个矩形进行角点提取,即可拟合得到针尖平面的形心;最后基于该点进行针尖三维坐标计算。针尖特征点提取效果如图 6 所示。

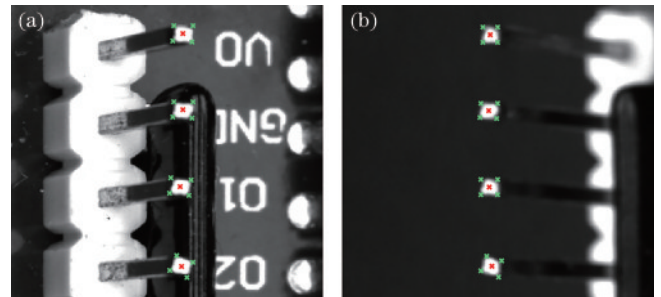


图 6 双目图像 PIN 特征点提取。(a)左相机图像;(b)右相机图像

Fig. 6 Binocular image PIN feature point extraction. (a) Left camera image; (b) right camera image

在得到双相机标定结果的前提下,左右相机同一时刻采集连接 PIN 图像;对双目图像进行针尖特征点提取,就可以计算出连接 PIN 的三维信息。假设两个相机的投影矩阵为 $M_k, k = 1, 2$ 。

$$Z_{c_k} \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^k & m_{12}^k & m_{13}^k & m_{14}^k \\ m_{21}^k & m_{22}^k & m_{23}^k & m_{24}^k \\ m_{31}^k & m_{32}^k & m_{33}^k & m_{34}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: $(u_k, v_k, 1)$ 为针尖形心 O 在双相机图像坐标系下的图像齐次坐标; $(X, Y, Z, 1)$ 为点 O 在世界坐标系下的齐次坐标。将 $k=1, 2$ 分别代入式(9)并化简, 得到

$$\begin{cases} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1)X + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1)Y + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1)Z = m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1)X + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1)Y + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1)Z = m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ (u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2)X + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2)Y + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2)Z = m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ (v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2)X + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2)Y + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2)Z = m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{cases}, \quad (10)$$

由此可根据最小二乘法求出点 $O(x, y, z)$ 的三维坐标。

与文献[2]中的形心拟合平面法相比, 所提基于边缘检测的针尖三维重建方法依据针尖平面几何形状特征, 在左右图像对中分别检测出针尖边缘轮廓, 再进行角点提取, 有效克服了相机视角对针尖平面形心拟合的影响, 能够实现高精度的针尖三维坐标重建。

3.4 基于特征提取的 PIN 相对高度检测

在得到针尖三维坐标 $O(x, y, z)$ 后, 可根据每根 PIN 的 x 和 y 坐标进行排列共线度检测, 但不足以判断 PIN 的相对高度, 因此以 PCB 的基板平面为参照物, 通过计算每根 PIN 的形心到基板平面的距离来判断 PIN 的相对高度。因此提出一种基于特征提取的 PIN 相对高度检测方法。

首先, 运用 SURF 算法在极线约束后的双目图像上搜索特征点, 再利用 RANSAC 算法剔除错误匹配点对, 根据剩余的特征点对拟合出 PCB 基板平面。为便于 PIN 的相对高度检测, 需将基板平面校正至标准位姿。定义基板平面法向量为 $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)^T$, 标准位姿基板平面的单位法向量为 $\mathbf{V}_{\text{std}} = (0, 0, 1)^T$, \mathbf{V} 和 \mathbf{V}_{std} 之间的夹角为 θ , 有

$$\cos \theta = \mathbf{V} \cdot \mathbf{V}_{\text{std}} = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = V_z. \quad (11)$$

定义 ${}^B \mathbf{P}_m (m=1, 2, 3, \dots)$ 为倾斜度校正前基板上

第 m 个点的特征点坐标, ${}^G \mathbf{P}_m (m=1, 2, 3, \dots)$ 为校正后第 m 个点的特征点坐标, 则由罗德里格斯公式可建立两者关系, 实现基板倾斜度校正。

$${}^G \mathbf{P}_m = {}^G \mathbf{R}_B {}^B \mathbf{P}_m, \quad (12)$$

其中,

$${}^G \mathbf{R}_B = \begin{pmatrix} V_y^2 \text{vers } \theta + \cos \theta & -V_y V_x \text{vers } \theta & -V_x \sin \theta \\ -V_y V_x \text{vers } \theta & V_x^2 \text{vers } \theta + \cos \theta & -V_y \sin \theta \\ V_x \sin \theta & V_y \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (13)$$

式中: $\text{vers } \theta = 1 - \cos \theta$ 。定义 $O_j(x_j, y_j, z_j)$ 为计算所得第 j 根 PIN 的针尖三维坐标, $O_j'(x_j', y_j', z_j')$ 为校正后第 j 根 PIN 的针尖三维坐标, 则有

$$O_j' = {}^G \mathbf{R}_B O_j. \quad (14)$$

由此可知, z_j' 为校正后 PIN 的相对高度, 定义 H_{std} 为 PIN 的标准高度, 则 PIN 的相对高度误差为

$$e_j = \left| \frac{H_{\text{std}} - z_j'}{H_{\text{std}}} \right| \times 100\%. \quad (15)$$

4 实验与结果分析

4.1 实验系统搭建

实验的计算机包含 Windows10 64bit 操作系统, 11G 独立显卡; 双目视觉系统采用海康威视 MV-CA050-10GM 工业相机, 分辨率为 2448×2048 , 像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$, 靶面尺寸为 $2/3''$, 镜头焦距为 12 mm。相机标定结果如表 1 所示。

表 1 双目标定结果

Table 1 Binocular calibration results

Parameter	Left camera	Right camera
Internal parameter	$\begin{bmatrix} 3651.71 & 0 & 1201.62 \\ 0 & 3644.06 & 976.77 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3496.87 & 0 & 1201.05 \\ 0 & 3469.69 & 1018.45 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Rotation matrix	$\begin{bmatrix} -0.999636 & 0.014437 & -0.022774 \\ -0.026608 & -0.664906 & 0.746453 \\ -0.004366 & -0.746787 & 0.665049 \end{bmatrix}$	
Translation matrix	$[-8.688 \quad -119.555 \quad 57.921]^T$	

4.2 PIN 识别及三维坐标获取

在完成双目标定与立体校正, 使左右图像对行对准后, 对 PIN 所在区域进行栅格化处理, 完成对 PIN 的识别及排序, 识别结果如图 7 所示。

4.3 PIN 共线度检测

如图 8 所示, 将同一工件以不同姿态重复实验 4 次, 对 4 个不同位姿的针尖三维坐标 $O_j(x_j, y_j, z_j)$ 进行共线度拟合。定义 J 为待计算点集的个数, $x_j (j=$

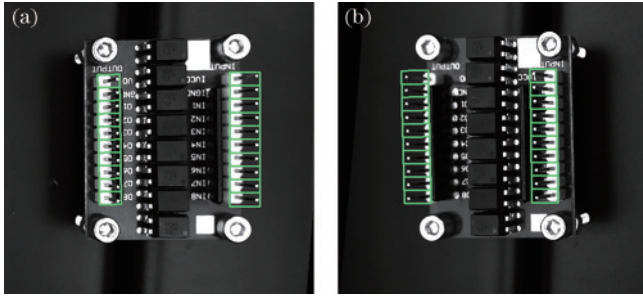


图 7 双目图像 PIN 识别。(a)左图 PIN 栅格;(b)右图 PIN 栅格
Fig. 7 Binocular image PIN recognition. (a) Left image PIN grid; (b) right image PIN grid

1, 2, 3, ..., J)为各点的横坐标, $y_j (j = 1, 2, 3, \dots, J)$ 为各点的纵坐标,由同一列 10 根 PIN 的横纵坐标,可利用最小二乘法拟合得到直线 $y = kx + b$ 。定义同一列的每个点 $(x_j, y_j) (j = 1, 2, 3, \dots, J)$ 到直线 $y = kx + b$ 的距离为 D_j ,则距离公式为

$$D_j = \frac{|kx_j + y_j + b|}{\sqrt{k^2 + 1}} \quad (16)$$

对针尖偏移距离 D_j 并进行标准化,有

$$D_j' = \frac{D_j - \bar{D}}{D_{std}} \quad (17)$$

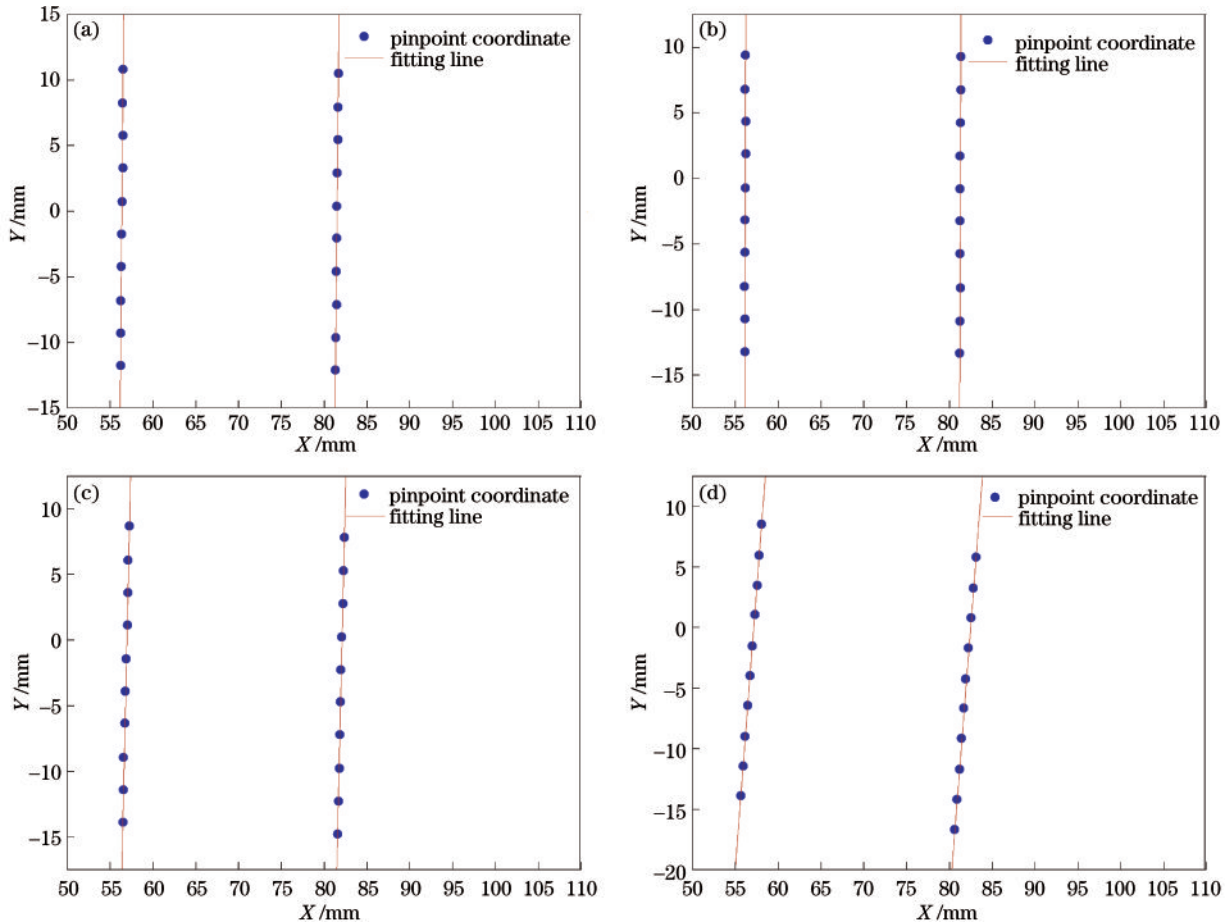


图 8 PIN 共线性拟合。(a)第 1 次测量;(b)第 2 次测量;(c)第 3 次测量;(d)第 4 次测量

Fig. 8 PIN collinearity fitting. (a) The first measurement; (b) the second measurement; (c) the third measurement; (d) the fourth measurement

式中: D_{std} 表示标准差; \bar{D} 为 D_j 的均值,即 j 根针尖的平均偏移距离; D_j' 反映 PIN 共线程度的标准分数,表示原始数据与距离均值相差 D_j' 个标准差,因此 D_j' 值越小表示共线程度越高。这几个参数结果如表 2 所示。

表 2 同一列 10 根 PIN 共线程度统计

Table 2 Statistics of collinearity of ten PINs in the same column

PIN No.	D_j /mm	\bar{D} /mm	D_{std} /mm	D_j'
1	0.009583	0.022346	0.015275	-0.835536
2	0.010210			-0.794524
3	0.055162			2.148340
4	0.007536			-0.969659
5	0.030344			0.523569
6	0.036659			0.937002
7	0.027610			0.344624
8	0.017553			-0.313808
9	0.009514			-0.840044
10	0.019292			-0.199967

4.4 PIN 相对高度检测

在进行基板平面拟合及校正,获取旋转矩阵后,将 PIN 的针尖三维坐标 $O_j(x_j, y_j, z_j)$ 校正为 $O_j'(x_j', y_j', z_j')$ 。将同一工件以不同姿态重复实验 4

次,图 9 为对工件上 20 根 PIN 测量 4 次的统计结果。表 3 为对 20 根 PIN 测量 4 次得到的针尖到基板距离的最小值、最大值、差值、均值及标准差。从表 3 可知: PIN 相对高度的最大值与最小值之间的差值在 0.05 mm 以内,说明所提方法可实现的重复性精度在 ±0.05 mm 以内,符合检测需求;同时标准差在 0.02 以内,证明所提方法具有一定的鲁棒性。

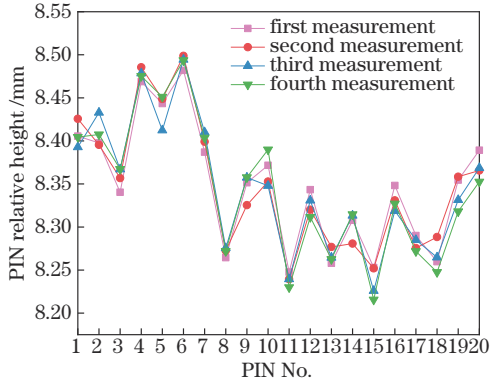


图 9 对工件上 20 根 PIN 进行 4 次高度测量的统计

Fig. 9 Statistics of 4 times height measurement for twenty PINs on workpiece

表 3 对工件上 20 根 PIN 进行 4 次相对高度测量的统计

Table 3 Statistics of the measurement of relative height for twenty PINs on the workpiece for four times

PIN No.	Minimum value /mm	Maximum value /mm	Difference / mm	Mean value / mm	Standard deviation
1	8.39282	8.42571	0.03289	8.40713	0.01366
2	8.39547	8.43289	0.03742	8.40835	0.01717
3	8.34041	8.36718	0.02677	8.35784	0.01259
4	8.46889	8.48551	0.01662	8.47704	0.00691
5	8.41227	8.45116	0.03889	8.43888	0.01803
6	8.48187	8.49879	0.01692	8.49215	0.00723
7	8.38697	8.41009	0.02312	8.39992	0.00976
8	8.26442	8.27552	0.01110	8.27110	0.00472
9	8.32541	8.35768	0.03227	8.34798	0.01533
10	8.34796	8.38987	0.04191	8.36558	0.01916
11	8.22995	8.24769	0.01774	8.23913	0.00725
12	8.31158	8.34334	0.03176	8.32648	0.01373
13	8.25792	8.27686	0.01894	8.26549	0.00808
14	8.28074	8.31472	0.03398	8.30416	0.01590
15	8.21563	8.25293	0.03730	8.23664	0.01877
16	8.31876	8.34821	0.02945	8.33124	0.01240
17	8.27190	8.29012	0.01822	8.28064	0.00840
18	8.24757	8.28843	0.04086	8.26512	0.01713
19	8.31808	8.35845	0.04037	8.34062	0.01916
20	8.35263	8.38913	0.03650	8.36901	0.01511

如图 10 所示,采用绝对关节臂测量机检测针尖距离基板平面的标准高度,并与所提 PIN 相对高度检测

方法进行对比。从表 4 可以看出,所提方法的高度检测平均误差率为 0.465%,具有较高精度,小于企业要求的 1%,符合连接 PIN 正位度检测需求。



图 10 绝对关节臂测量机检测针尖高度的现场

Fig. 10 Scene of needle tip height measured by absolute joint arm measuring machine

表 4 实测针尖高度与标准高度的对比

Table 4 Comparison between measured pinpoint height and standard height

PIN No.	Detection height /mm	Standard height /mm	Error /mm	Relative error /%
1	8.40713	8.40755	0.00042	0.00500
2	8.40835	8.34732	-0.06103	0.73113
3	8.35784	8.36085	0.00301	0.03600
4	8.47704	8.42008	-0.05696	0.67648
5	8.43888	8.36296	-0.07592	0.90781
6	8.49215	8.49826	0.00611	0.07190
7	8.39992	8.33975	-0.06017	0.72148
8	8.27110	8.23134	-0.03976	0.48303
9	8.34798	8.28059	-0.06739	0.81383
10	8.36558	8.35388	-0.01170	0.14005
11	8.23913	8.27951	0.04038	0.48771
12	8.32648	8.30582	-0.02066	0.24874
13	8.26549	8.26081	-0.00468	0.05665
14	8.30416	8.27895	-0.02521	0.30451
15	8.23664	8.25255	0.01591	0.19279
16	8.33124	8.28963	-0.04161	0.50195
17	8.28064	8.24777	-0.03287	0.39853
18	8.26512	8.19098	-0.07414	0.90514
19	8.34062	8.28504	-0.05558	0.67085
20	8.36901	8.29033	-0.07868	0.94906

如表 5 所示,相较于文献[1]中的方法,所提方法的运行速度提升了 87.46%,检测误差降低了 84%,表明所提方法具有较好的实时性和精度。

表 5 针尖高度检测运行时间

Table 5 Running time of pinpoint height detection

Method	Time /ms	Error /mm
Proposed method	125.4	0.08
Method in Ref. [1]	1000	0.5

5 结 论

针对 PCB PIN 在实际大规模生产中存在高度检测精度低、速度慢的问题,研究了采用双目立体视觉测量系统的连接 PIN 正位度检测方法。先利用双目标定结果对图像进行立体校正;采用基于栅格灰度阈值的检测方法,实现对 PIN 的识别与排序;同时基于双目视觉视差原理,实现针尖坐标三维重建,进而对正位度进行检测;并搭建了实验平台,验证所提方法的检测精度与速度。实验结果表明,所提方法适用于对连接 PIN 的实时高精度检测,平均耗时为 125.4 ms,平均测量精度达 99.535%,重复性精度可控制在 ± 0.05 mm 内,且具有较强的鲁棒性,满足连接 PIN 正位度检测的工程需求。后续将对方法进行进一步优化,以提高检测精度与速度。

参 考 文 献

- [1] 雷海兵. 双目立体视觉在全针测量系统中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
Lei H B. Research on application of binocular stereo vision in the pins detection system[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [2] 孙国栋, 张杨, 李萍, 等. 电子接插件视觉检测系统设计及误差分析[J]. 仪表技术与传感器, 2015(8): 104-106, 110.
Sun G D, Zhang Y, Li P, et al. Design of visual inspection system for electronic connectors and error analysis[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(8): 104-106, 110.
- [3] 姜景科, 秦琴, 严学井, 等. 基于 3D 激光传感器的汽车连接器 PIN 针高度检测系统[J]. 上海第二工业大学学报, 2020, 37(2): 124-128.
Jiang J K, Qin Q, Yan X J, et al. 3D laser sensor-based automotive connector PIN height detection system[J]. Journal of Shanghai Polytechnic University, 2020, 37(2): 124-128.
- [4] 张远, 李焯鹏, 张为公. 基于激光三角法的接插件引脚共面度检测[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(9): 154-156, 160.
Zhang Y, Li X P, Zhang W G. Detection of coplanarity of connector pins based on laser triangulation[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(9): 154-156, 160.
- [5] Zhong M, Su X Y, Chen W J, et al. Modulation measuring profilometry with auto-synchronous phase shifting and vertical scanning[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 31620-31634.
- [6] 杜钦生, 李丹丹, 陈浩, 等. 结构光 3D 点云的 PIN 针针尖提取[J]. 液晶与显示, 2021, 36(9): 1331-1340.
Du Q S, Li D D, Chen H, et al. PIN tip extraction from 3D point cloud of structured light[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(9): 1331-1340.
- [7] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 106: 119-131.
- [8] Wu Z J, Guo W B, Chen Z D, et al. Three-dimensional shape and deformation measurement on complex structure parts[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 7760.
- [9] 杨帆, 刘斌, 初录, 等. 基于网格结构光的双目测量方法[J]. 中国激光, 2021, 48(23): 2304004.
Yang F, Liu B, Chu L, et al. Binocular measurement method using grid structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2304004.
- [10] 侯冠宇, 吴斌, 何荣芳, 等. 基于双目光栅重建和纹理映射的缺陷三维测量方法[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0712003.
Hou G Y, Wu B, He R F, et al. Three-dimensional measurement method of defects based on binocular grating reconstruction and texture mapping[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0712003.
- [11] 卢佳宇. 基于机器视觉的航空电连接器插针检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Lu J Y. Research on technologies of pin's detection for avionics electronic connector based on machine vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [12] 胡万志. 基于图像处理电子连接器视觉定位检测算法[J]. 控制工程, 2017, 24(1): 118-123.
Hu W Z. Electronic connector vision inspection algorithm based on image processing[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(1): 118-123.
- [13] 王彦朝. 基于机器视觉的端子高低针检测系统研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.
Wang Y C. Research on detection system of terminal high and low pins based on machine vision[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2018.
- [14] 凡良玉, 潘丰. 基于视觉的接插件 pin 针正位度检测系统设计[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2015, 14(6): 762-768.
Fan L Y, Pan F. Detection system design for the pin's position of connectors using machine vision[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2015, 14(6): 762-768.
- [15] 雷经发, 韦旺, 李永玲, 等. 基于双目视觉的弱纹理液压元件尺寸测量[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 181511.
Lei J F, Wei W, Li Y L, et al. Dimensionality measurement of weak texture hydraulic components based on binocular vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(18): 181511.
- [16] 江荣, 朱攀, 周兴林, 等. 基于双目视觉算法的路面三维纹理信息获取[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 284-292.
Jiang R, Zhu P, Zhou X L, et al. Three-dimensional pavement texture information acquisition based on binocular vision algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(14): 284-292.
- [17] 崇爱新, 尹辉, 刘艳婷, 等. 基于双目视觉的无缝线路钢轨纵向位移测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 82-89.
Chong A X, Yin H, Liu Y T, et al. Research on longitudinal displacement measurement method of

- seamless rail based on binocular vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 82-89.
- [18] 罗久飞, 邱广, 张毅, 等. 基于自适应双阈值的 SURF 双目视觉匹配算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 240-247.
Luo J F, Qiu G, Zhang Y, et al. Research on speeded up robust feature binocular vision matching algorithm based on adaptive double threshold[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 240-247.
- [19] 化春键, 潘瑞, 陈莹. 基于改进 ORB-RANSAC 的双目测距方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 2215002.
Hua C J, Pan R, Chen Y. Binocular ranging method based on improved ORB-RANSAC[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(22): 2215002.
- [20] 王月敏, 张宗华, 高锋, 等. 基于特征匹配的非连续镜面物体三维测量[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1612004.
Wang Y M, Zhang Z H, Gao F, et al. Three-dimensional measurement of discontinuous specular object based on feature matching[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1612004.
- [21] 李一航, 周东兴, 韩东升. 一种基于透视变换的远距离双目测距方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(7): 93-99.
Li Y H, Zhou D X, Han D S. Long-distance binocular ranging method based on perspective transformation[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(7): 93-99.
- [22] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6): 679-698.