

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905712

一种新能源动力电池顶盖平面度检测方法研究*

汪 威¹, 张开颜¹, 刘亚川¹, 黄玉春²

(1. 湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068; 2. 武汉大学遥感信息工程学院 武汉 430072)

摘 要:为实现车用电池顶盖等有平面特征的工件局部平面度在线检测,提出一种基于点云的局部平面度检测方法。首先用激光传感器获取目标点云,经聚类算法提取工件主平面法向量,根据法向量提供的倾角信息,对点云进行旋转,使点云倾角得到校正。然后,将旋转后的点云转换为灰度图,将其与标准灰度图进行模板匹配,获取待测件与标准件间的平移量和偏转角,完成点云校准。从已校准点云的指定区域截取点集,用最小二乘法进行平面度估计。该方法分别与迭代最近点法(ICP)以及三坐标测量机进行了电池顶盖平面度测量的对比实验。三者测量结果总体一致,但该方法在耗时上至少减少62%。作为一种结构简单、高效可靠的技术手段,该方法在精密制造领域具有广泛的应用前景和参考价值。

关键词: 电池顶盖; 平面度检测; 点云; 混合校准法

中图分类号: TP391.41 TH741.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on the flatness detection method for cap of the new energy power battery

Wang Wei¹, Zhang Kaiyan¹, Liu Yachuan¹, Huang Yuchun²

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To realize on-line detection of local flatness of workpieces with planar features (e.g., cap of power battery), a flatness detection method based on point cloud is proposed. First, the point cloud is acquired by a 3D laser-scanning sensor, and the unit normal vector of the main plane in the workpiece is achieved by a clustering algorithm. The point cloud is rotated to fulfill tilt of the point cloud alignment. Then, the rotated point cloud is transformed into a grayscale image. Template matching is performed with the grayscale image of the standard workpiece to obtain the offset angle and deflection angle between the measured workpiece and the standard workpiece. In this way, the point cloud is calibrated. A point set is intercepted from the aligned point cloud in a given region, and the flatness estimation is implemented using the least square method. The proposed method is applied to the online flatness detection of the automotive battery terminal plate. It is compared with the methods based on the ICP algorithm and the three-coordinate measuring instrument. Experimental results show that the proposed method can save 62% of the time, which also has consistent detection results with two methods. As a simple, efficient and reliable technique, the proposed method has broad application prospects and reference value in the field of precision parts manufacturing.

Keywords: power battery cap; flatness detection; point cloud; hybrid alignment method

0 引 言

在加工制造领域中,对工件局部形位公差提出较高要求的场合越来越多。其中,在新能源汽车动力电池行

业,作为车用锂电池的关键零部件之一,电池顶盖的平面度检测极具代表意义。电池顶盖组件包括基板和固定在基板上的极板。基板面和极板的平面度对整个电池顶盖的抗压、防爆和过流保护能力有重要影响,是保障电池安全性能的重要参数。目前的锂电池制造行业中,电池顶

盖极板的平面度检测仍以人工检测为主,难以适应大批量全数检验的要求。因此,针对以动力电池为代表的,具有局部平面特征的工件,设计一种能适应自动化生产线的平面度在线测量方法具有重要意义。

平面度误差是指被测实际表面对其理想平面的变动量,其测量与评定在工业领域特别是在精密工件的加工制造中具有非常重要的意义。如今虽然平面度的测量手段已经非常多,但受设备与操作的复杂程度、检测时间、设备成本和检测结果的可信性等因素影响,大多数都只能用于实验室或计量室。在大批量工件的现场全数检验等场合,目前多用塞尺、气动量仪等工具进行,但这些手段难以获取定量数据,不能为产品的制造工艺和质量控制改进提供指导性依据。因此,各种在生产现场进行快速平面度定量评估的方法涌现出来。李勇^[1]在冲床下床台表面平面度测量中设计了一种测量治具,用来夹持并定位百分表。测量时先利用分布的百分表做直线度误差评估,再通过几组 X 、 Y 平面上的直线度误差间接计算出下床台的平面度。景修润等^[2]在钳工台的平面度评估中,选择对待测面取25个测量点,利用最小包容区域法完成平面度误差评估。祝世平等^[3]针对具有特殊表面平面的大型工件平面度测量设计了一种光电式平面度测量仪。该测量仪对被侧面进行方格式取点,结合电子水平仪提供的参数与最小二乘法实现评估基准面的建立。荣溪超等^[4]基于一种磁尺设计了一种平面度检测机。该设备在测量时对待测面选取12个采样点,利用一种基于PLC平台的算法完成平面度测量。孔祥勇^[5]在桥梁索鞍平面度测量中,对待测面进行网格格式取点,分别采用打表法与水平仪法进行测量,并对结果进行了相关分析与总结。

上述方法多采用在被测面上取网格、对角线、圆形环等呈几何分布形式的散点,对这些采样点进行平面拟合及误差评估来实现对平面度的测量。这种利用较少采样点测量平面度的方法虽然计算过程简单,但也丢失了被测面的局部几何特征,测得平面度与实际值有较大偏差。随着激光三维扫描技术的高速发展,激光传感器扫描工件外表面获取的点云点数大且分布均匀,解决了扫描对象表面局部细微特征丢失的问题。由于点云含有被扫描对象丰富的几何信息,基于点云的几何量测量全部可以在PC机里实现,无须借助导轨、夹具等机械。故这种方法在适用范围、灵活性、检测速度和系统标准化等方面有着明显优势。

目前,国内外与点云相关的研究主要集中在如何实现两组或多组点云之间相对位姿差异的点云配准上^[6-10]。在平面度测量中与其密切相关的文献还不是很多。本文在锂电池顶盖的平面度检测项目中,设计了一种基于点云的平面度在线检测系统,为点云在平面度检

测等几何量测量的应用场合提供了一种案例。

1 点云预处理

由于工件在皮带线上自由放置时,工件工艺基准面(主平面)与传感器测量基准面存在倾斜角,该倾斜角随工件放置的状态不同而不同。本文在测量平面度过程中,选择将点云主平面作为评估基准,需要将主平面与测量基准面重合。同时为了方便待测区域点云的直接提取,还需将基准面内的点云校准到指定位姿。这两项需求的实现是快速且高精度测得平面度的必要条件^[11-15],为此,需要对点云进行预处理^[16]。点云预处理的流程如图1所示。

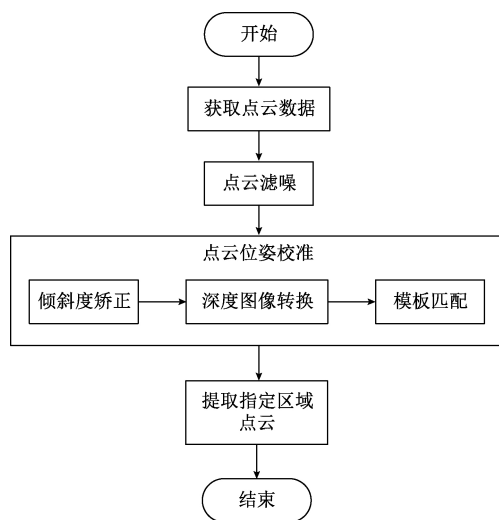


图1 点云预处理流程

Fig.1 Preprocessing flowchart for point cloud

点云位姿校准是预处理的核心,也是实现前述两项需求的关键。本文设计了一种基于聚类算法和轮廓特征匹配算法的点云混合校准方法(hybrid alignment method for point cloud, HAM)。HAM方法分两步进行:1)将电池顶盖中的点云主平面与传感器测量基准面进行倾斜度校正,使点云主平面与基准面重合。2)将经校正后的点云转换为灰度图,再利用模板匹配获取点云灰度图与模板间的相对位置和方向偏差。建立刚体变换矩阵,利用该矩阵实现点云在基准面内的位置与方向校正。

2 HAM方法

2.1 点云倾斜度校正

设激光三维扫描传感器的扫描基准面为坐标系 XOY 面(X 、 Y 轴方向与传感器定义一致),纵向测量方向为 Z 轴,按右手定则建立基坐标系 $G(OXYZ)$;另定义一个初

始位置与基坐标系 $G(OXYZ)$ 完全重合的刚体坐标系 $B(oxyz)$ 。设传感器采集到的点云在刚体坐标系 $B(oxyz)$ 内的坐标为 ${}^B\mathbf{P}$, 将点云主平面的法向与 xoy 面的法向 (即 z 轴) 夹角 θ 定义为两平面间的倾斜度。由于理想电池顶盖的正、负极板面和基板面相互平行, 所以 ${}^B\mathbf{P}$ 中任意不共线 3 点所构成平面的单位法向量趋于某一确定的单位向量 $\hat{\mathbf{V}}$ (或 $-\hat{\mathbf{V}}$, 为便于表达, 以下不考虑方向。) 的概率远高于其他情况出现的概率。 $\hat{\mathbf{V}}$ 即为顶盖基平面在基坐标系 $G(OXYZ)$ 内的单位法向量, 可以利用聚类法来确定。为避免人工介入, 本文选用基于残差和密度网格的聚类算法^[17]。

首先, 从点云中随机取不共线 3 点, 并计算该 3 点所在平面的单位法向量 $\hat{\mathbf{V}}_i$, 取样 n 次, 得到单位向量组 $\hat{\mathbf{F}} = [\hat{\mathbf{v}}_1, \hat{\mathbf{v}}_2, \dots, \hat{\mathbf{v}}_n]$ 。

为确定 $\hat{\mathbf{V}}$, 将 $\hat{\mathbf{F}}$ 的每个维度分为 a 个区域, 形成 $t = a^3$ 个网格对象 $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2 \dots \mathbf{u}_t$ 。设初始 $a = 2$, 则 $t = 8$ 。删除不含有任何数据的网格对象, 剩余网格对象的个数为 m , 若 $m < n/8$, 则令 $a = a + 1$, 重新开始划分网格对象, 如此迭代, 直至 m 和 a 趋于稳定。定义每个网格对象中点的个数为网格密度 $\rho_i = \text{count}(\mathbf{u}_i)$, ($i \in [1, m]$); 对网格对象 $\mathbf{u}_i$ 中的点各维度取平均值后得到向量 $\bar{\mathbf{u}}_i$, 则任两网格对象间距为:

$$d_{ij} = \|\bar{\mathbf{u}}_i - \bar{\mathbf{u}}_j\| \quad (0 < i, j \leq m, i \neq j) \quad (1)$$

令 δ_i 为一网格对象 $\mathbf{u}_i$ 到具有更高密度的网格对象 $\mathbf{u}_j$ 的最短距离。如果网格对象 $\mathbf{u}_i$ 的密度值 ρ_i 为最大值即 $\mathbf{u}_i$ 包含最大簇, 则 δ_i 定义为 $\max(d_{ij})$ 。 δ_i 的定义为:

$$\delta_i = \begin{cases} \min(d_{ij}), \exists j, \rho_j > \rho_i \\ \max_{j \in [1, m]}(d_{ij}), \nexists j, \rho_j > \rho_i \end{cases} \quad (2)$$

对 δ 和 $1/\rho$ 做线性回归得到回归方程 $\hat{\delta} = E(1/\rho)$, 定义 δ_i 与拟合值 $\hat{\delta}$ 之间的残差 $\varepsilon_i = \delta_i - \hat{\delta}(\rho_i)$ 、残差 ε 的均值 $\bar{\varepsilon}$ 、残差 ε 的标准差 σ 。构造评估系数 v_i , 如式(3)所示。

$$v_i = \frac{\varepsilon_i \sigma}{\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}} \quad (3)$$

评估系数 v_i 服从标准正态分布, 根据统计学对异常点的判定原理^[18], 若 v_i 绝对值大于 1, 则对应的 $\mathbf{u}_i$ 就是含有最大簇的网格对象, 进而确定 $\hat{\mathbf{V}}$, 设 $\hat{\mathbf{V}} = [\hat{\mathbf{V}}_x, \hat{\mathbf{V}}_y, \hat{\mathbf{V}}_z]^T$, 下标 X, Y, Z , 为向量在各坐标轴上的分量表示。设 $\hat{\mathbf{V}}_{\text{std}}$ 为标准位姿模板图像基板的单位法向量, 这里取 $\hat{\mathbf{V}}_{\text{std}} = [0, 0, 1]^T$, 则其与 $\hat{\mathbf{V}}$ 的夹角 θ 由式(4) 确定。

$$\cos\theta = \hat{\mathbf{V}} \cdot \hat{\mathbf{V}}_{\text{std}} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{V}}_x \\ \hat{\mathbf{V}}_y \\ \hat{\mathbf{V}}_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \hat{\mathbf{V}}_z \quad (4)$$

再根据式(5) 实现倾斜度校正。

$${}^G\mathbf{P} = {}^G\mathbf{R}_B {}^B\mathbf{P} \quad (5)$$

其中,

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

式中: $\text{vers}\theta = 1 - \cos\theta$ 。

2.2 基准面内的位置与方向校正

1) 点云灰度图与模板灰度图

将已经倾斜校正的点云 ${}^G\mathbf{P}$ 按式(6) 转换为点云灰度图。

$$\begin{cases} \text{gray}(u_p, v_p) = \text{round}\left[255 \times \frac{P_z - \min(P_z)}{\max(P_z) - \min(P_z)}\right] \\ u_p = P_x / s_u \\ v_p = P_y / s_v \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_x, P_y 和 P_z 分别为 ${}^G\mathbf{P}$ 中的点在基坐标系 $G(OXYZ)$ 内的坐标; s_u, s_v 分别为点云灰度图在宽度 u 和高度 v 两个方向上的量化因子, 单位为 mm/pixel ; u_p, v_p 分别为 ${}^G\mathbf{P}$ 中的点在点云灰度图中对应的像素坐标; $\text{gray}(u_p, v_p)$ 为灰度图中像素 (u_p, v_p) 的灰度。

在采集电池顶盖标准位置的实物图时, 需对相机进行标定, 并确定相机坐标系与扫描传感器坐标系间的刚体变换矩阵。设相机内参矩阵为 M_1 , 相机坐标系与传感器基坐标系位姿变换矩阵为 M_2 , 则相机图像坐标系 $u_c o v_c$ 与点云灰度图坐标系 $u_p o v_p$ 间的映射关系为:

$$\begin{bmatrix} u_c & v_c & 1 \end{bmatrix}^T = s M_1 M_2 \begin{bmatrix} u_p & v_p & 1 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} a_u & \gamma & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{t} \end{bmatrix}$$

式中: s 为比例因子; a_u 和 a_v 是 u_c 轴和 v_c 轴的尺度因子; (u_0, v_0) 是相机像素的中心坐标; $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 为相机图像坐标系两个轴在传感器基坐标系的方向矢量; $\mathbf{t}$ 为基坐标系的原点到图像坐标系原点的平移量。

2) 基准面旋转平移量矫正

设点云灰度图和模板图像像素在 $u_p o v_p$ 坐标系下的坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 则点云在 xoy 平面校准的变换矩阵 $\mathbf{G}$ 满足:

$$\begin{bmatrix} x_2 & y_2 & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{G} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

求解矩阵 $\mathbf{G}$ 属于模板匹配算法领域计算范围, 该领域的研究比较成熟, 故直接采用基于形状的模板匹配方法求解。首先, 对模板图像进行各种角度的旋转和尺度缩放, 从而得到各种姿态下的模板。用式(9) 计算每种姿态的模板图 $f(x, y)$ 的梯度响应图 $\text{Grad}(x, y)$ 。

$$\text{Grad}(x, y) = \sqrt{f_x(x, y)^2 + f_y(x, y)^2} \quad (9)$$

$$f(x,y) \times \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \approx \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} = f_x(x,y)$$

$$f(x,y) \times \frac{1}{8} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \approx \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} = f_y(x,y)$$

然后,对 $\text{Grad}(x,y)$ 设置合适的阈值获取梯度较大的图像边缘点,得到边缘图像 $f(x_i, y_i)$ 。通过式(10)计算这些边缘点梯度方向的单位向量 $\mathbf{m}_d(m_x, m_y)$ 。

$$\mathbf{m}_d(m_x, m_y) = \frac{(f_x(x_i, y_i), f_y(x_i, y_i))}{\sqrt{f_x(x_i, y_i)^2 + f_y(x_i, y_i)^2}} \quad (10)$$

同时,对点云灰度图也进行式(9)和(10)的计算,得到其边缘点梯度方向的单位向量 $\mathbf{s}_d(s_x, s_y)$ 。利用式(11)计算待匹配的点云灰度图在 (x, y) 点与各种姿态模板图像之间的相似度得分,总得分近似为 1 时对应姿态的模板即为匹配模板^[19],式(11)中 m_N 为模板边缘点的个数。

$$E(x, y) = \frac{1}{m_N} \sum_{m_x, m_y} \langle \mathbf{m}_d(m_x, m_y), \mathbf{s}_d(s_x, s_y) \rangle \quad (11)$$

$$s_x = m_x + x$$

$$s_y = m_y + y$$

最后,将匹配完成的点对代入式(8)求解矩阵 $\mathbf{G}$ 完成旋转平移量矫正。

3 电池顶盖点云的局部平面度检测

3.1 电池顶盖的基本结构

电池顶盖实物与几何量参数如图2所示,图2(a)所示为电池顶盖上部结构,主要由基板、正极板、负极板、防爆盖片和注液孔几部分组成;图2(b)所示为组件的下部结构,包含上部结构的背面、正负极导电块和连接键;图2(c)与(d)为某一型号电池盖零件图的俯视图与侧视图,图中标记的几何尺寸单位为 mm。

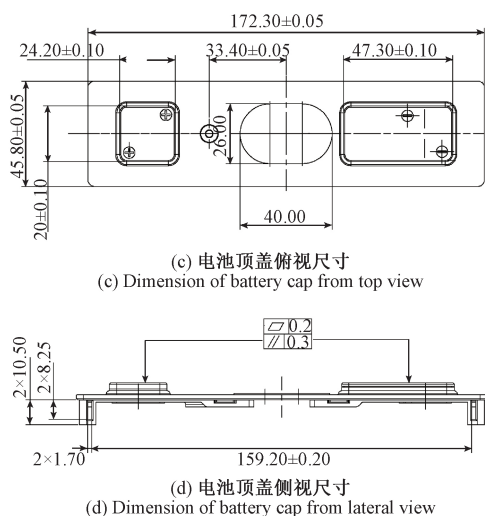
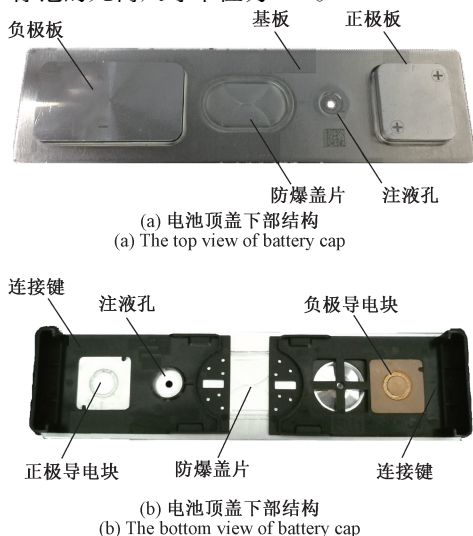


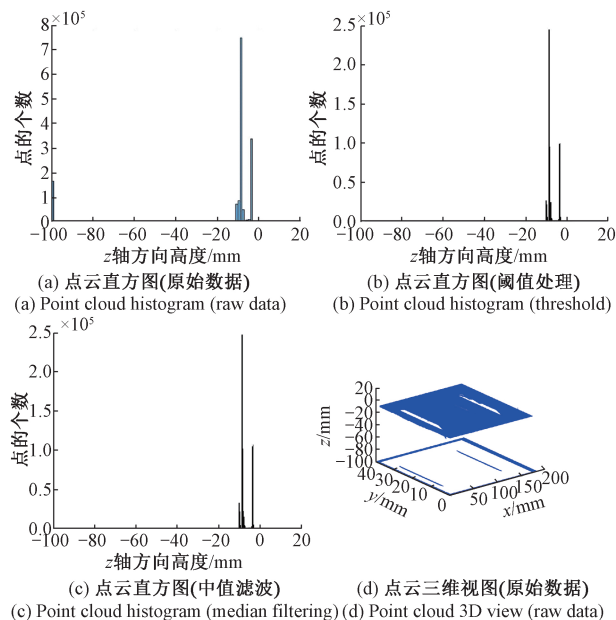
图2 电池顶盖及其几何量参数

Fig.2 Battery cap and its geometric parameters

3.2 实验平台与点云滤波

选用 KEYENCE LJ-V7200 线结构光传感器进行点云采集,该传感器在 X 轴采样间距为 $100 \mu\text{m}$, Y 轴采样间距为 $50 \mu\text{m}$,采样速率约为 1.56 m/s 。相机为 IMAGINGSOURCE DMK33GX264e, PC 机配置 CPU intel i7-7700k,内存 8 G, Windows 7 64 bit 位操作系统。

由于噪声点的存在,需对原始数据进行滤波。滤波过程如图3所示,图3(a)、(c)所示为原始点云的三维视图与其 Z 轴维度的统计直方图;经阈值处理剔除溢出点后,对应的三维视图与直方图如图3(b)、(e)所示;最后利用中值滤波去除孤立点后的对应结果如图3(c)、(f)所示。



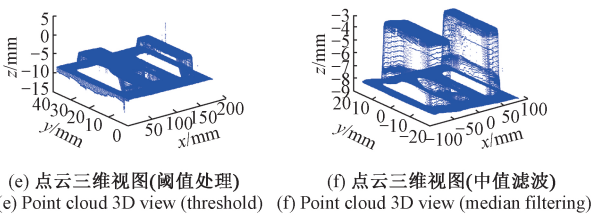


图3 点云滤波
Fig.3 Noise filtering for point cloud

3.3 点云位姿校正

为评估点云中抽样点数对计算主平面单位法向量 $\hat{V}$ 结果稳定性的影响,对5种不同型号电池顶盖的点云分别抽取不同数目的点(设为 n) 分别计算 $\hat{V}$ 。抽样点数对主平面法向量计算结果的影响评估如图4所示,横轴为抽样并参与计算的点数 n ,纵轴为点数变化所引起 $\hat{V}$ 的变化量 $\Delta \hat{V}$ (用标准向量的末端点欧氏距离表征)。由图4可知,随着抽样点数的增加, $\Delta \hat{V}$ 的变化趋于收敛,当取样次数 $n \geq 12\ 000$, $\Delta \hat{V}$ 的变化范围趋于稳定,并在可接受范围内。

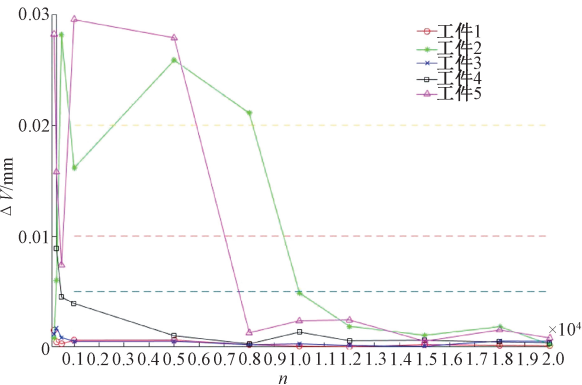


图4 抽样点数对主平面法向量计算结果的稳定性影响
Fig.4 Influence of sampling points on the stability of calculation results of principal plane normal vectors

经倾斜校正后的点云在基准面(XOY 或与其平行)内进行旋转和偏移校正过程如图5所示。图5(a)所示为倾斜校正后的点云;图5(b)所示为生成的点云灰度图;图5(c)所示为用经过标定的相机所采集到的标准样本灰度图,作为校准模板;图5(d)所示为提取到的模板轮廓;图5(e)所示为点云灰度图与模板轮廓特征匹配后,经旋转与平移后得到的图像;图5(f)所示为完成整个校准过程的点云图。

为评估 HAM 法的校正精度以及点云间的位姿关系对此方法校准稳定性的影响,用经典迭代最近点法(iterative closest point, ICP)^[20] 的校准结果作为对照,对8种不同位姿的点云样本分别进行 HAM 法和经典 ICP 法校

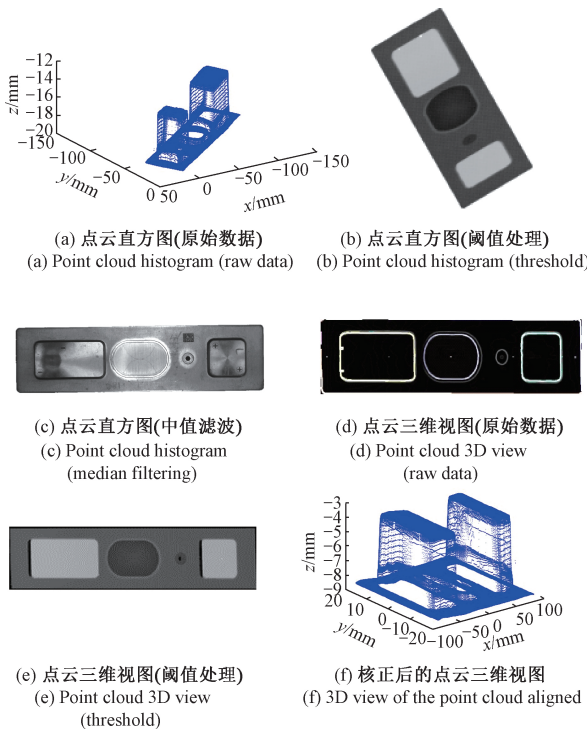


图5 基准面内的点云校正
Fig.5 Point cloud alignment in the datum plane

准,再用基于 KD 树改进的 ICP 算法对校准后的点云进行二次校准。二次校准算法收敛后的误差数量级为 1×10^{-14} mm,通过二次校准得到的变换矩阵可求得前次校准点云与 Z 轴方向的夹角(倾斜角)、相对标准位姿点云在绕 Z 轴方向的旋转偏角(偏航角)以及两点云之间的平移量。将此3个量值作为校准方法的精度评估参数,对 HAM 与 ICP 两种方法的校准精度评估结果如表1所示。结果表明, HAM 法在校准精度以及校准稳定性上要优于 ICP 法。

3.4 平面度评定

点云经过校准后,容易在指定区域内提取需要进行平面度评定的点云子集。为验证基于 HAM 校准方法的点云预处理对电池顶盖平面度检测带来的优势,设计了用3种不同的方法对5个不同的样本进行指定区域平面度评定的对照实验。第1种方法为本文所提出的 HAM 法对扫描得到的点云进行校准后,在指定区域内提取点云子集,利用最小二乘拟合得到相应区域的平面度误差。第2种方法为利用经典 ICP 校准法对点云进行校准后,在指定区域内提取点云子集,利用最小二乘拟合得到相应区域的平面度误差。第3种方法采用接触式三坐标测量机,对给定区域进行9点测量来评定其平面度误差。测量仪器实物与测量过程如图6所示,所用三坐标测量机型号为 HEXAGON ColoBAL classic SR 05.0205,测量环境与步

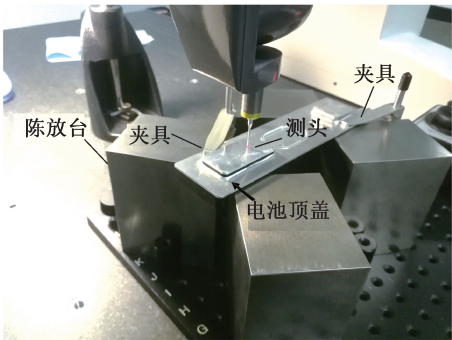
表 1 HAM 与 ICP 法的校准精度对比

Table 1 Comparison of alignment accuracy between HAM and ICP method

样本序号	HAM 方法			ICP 方法		
	倾斜角误差/(°)	偏航角误差/(°)	平移量误差/mm	倾斜角误差/(°)	偏航角误差/(°)	平移量误差/mm
1	0.005 7	0	0.000 7	0.011 4	0.058 4	0.097 3
2	0.002 0	0.012 8	0.050 5	0.058 9	0.067 0	2.057 3
3	0.009 1	0.014 6	0.063 4	0.020 0	0.037 7	1.477 4
4	0.005 8	0.033 8	0.145 6	0.016 2	-0.117 4	0.683 4
5	0.008 0	0.022 1	0.142 2	0.005 9	-0.263 5	1.102 3
6	0.012 9	0.007 5	0.066 1	0.011 5	-0.267 8	1.822 4
7	0.006 2	0.037 2	0.145 6	0.015 9	-0.304 7	1.219 1
8	0.001 1	0.002 4	0.162 8	0.024 5	-0.371 9	1.674 1
平均值	0.002 7	0.011 1	0.051 9	0.010 6	-0.145 3	0.544 9
标准差	0.003 6	0.012 9	0.055 5	0.014 9	0.015 5	0.649 8



(a) 三坐标测量机
(a) Coordinate measuring machine



(b) 九点法平面度测量
(b) Flatness measurement with nine-point

图 6 三坐标测量机测量平面度

Fig.6 Flatness measuring with coordinate measuring machine

3.5 结果分析

对照实验结果表明,3 种方法的评定结果总体一致。HAM 法与经典 ICP 法是对同一组点云采用不同的方法对点云校准,然后对指定区域内的全部三维点进行最小二乘评估,因此结果较为接近。但利用本文所提的 HAM 法与利用经典 ICP 法进行点云校准相比,前者的耗时只占后者的 37%左右。采用三坐标 9 点测量的评定方法,其结果比前两种方法略小,主要原因是参与评定的点数较少,难以完全反映实际的平面度误差。此外,第 3 种方法在操作的复杂程度、耗费的时间以及成本上与前两者存在较大的差距。因此,本文所提出的方法更适合于现场在线大批量测量场合。

4 结 论

本文首先针对具有平面特征的对象,在利用激光扫描得到三维点云后,通过方向向量聚类以及点云灰度图的模板匹配两种不同手段分步实现三维点云的校准,然后提取指定区域内的三维点集,进行平面度评定。在对汽车动力电池顶盖极板平面度评定的应用中,取得了较为满意的结果。

在利用聚类和模板匹配算法进行点云校准的过程中,尽可能地舍弃具有冗余信息或信息量不大的点,与经典 ICP 方法相比,不仅大大降低了运算上的耗费,而且具有较高的校准精度。由于可以快速提取工件三维点云的位置和姿态信息,所提出的混合校准方法可以在更多的领域得到应用,如为机械手抓取工件时,为机器人控制系统提供目标对象的位姿信息。另外,若再结合机器视

骤严格按照标准进行。利用上述 3 种方法测得的平面度与耗时数据如表 2 所示。

表 2 3 种不同方法测得的平面度与耗时
Table 2 Flatness and time consumption with three different methods

序号/区域	HAM 法				经典 ICP 法				三坐标测量机			
	正极板 柱面/mm	基板面 /mm	负极板 柱面/mm	耗时/s	正极板 柱面/mm	基板面 /mm	负极板 柱面/mm	耗时/s	正极板 柱面/mm	基板面 /mm	负极板 柱面/mm	耗时/min
1	0.019 2	0.015 6	0.016 3	1.801	0.019 2	0.014 3	0.016 3	4.880	0.018 8	0.011 6	0.015 7	>2
2	0.018 7	0.015 4	0.016 2	1.796	0.018 7	0.013 6	0.016 3	4.819	0.019 2	0.013 3	0.015 6	>2
3	0.018 2	0.015 7	0.016 7	1.828	0.018 2	0.013 5	0.016 5	4.876	0.015 2	0.019 9	0.014 7	>2
4	0.018 5	0.015 5	0.016 3	1.845	0.018 6	0.017 8	0.016 3	4.845	0.017 0	0.019 7	0.014 9	>2
5	0.018 9	0.016 5	0.016 5	1.873	0.018 9	0.018 3	0.016 5	4.846	0.018 4	0.013 2	0.015 7	>2
最大值	0.019 2	0.016 5	0.016 7	1.873	0.019 2	0.018 3	0.016 5	4.880	0.019 2	0.019 9	0.015 7	—
最小值	0.018 2	0.015 4	0.016 2	1.796	0.018 2	0.013 5	0.016 3	4.819	0.015 2	0.011 6	0.014 7	—
极差	0.001 0	0.001 1	0.000 5	0.077	0.001 0	0.004 8	0.000 2	0.061 0	0.004 0	0.008 3	0.001 0	—
平均值	0.018 7	0.015 7	0.016 4	1.828 6	0.018 7	0.015 5	0.016 4	4.853 2	0.017 7	0.015 5	0.015 3	—
标准差	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.028 5	0.000 3	0.002 1	0.000 1	0.022 5	0.001 5	0.003 5	0.000 4	—

觉技术,可以实现对工件的大部分几何尺寸和形位公差
的评估。

最后,在对点云特征的提取上,可以扩展到具有其他
可用简单数学表达式来描述的特征,如具有圆柱面、球面
等特征的对象。若借助机器学习等人工智能方法,则可
以识别更为复杂表面特征,从而为三维点云在制造业中
的现场实时利用提供较为广泛的空间。

参考文献

[1] 李勇.关于一种简易与快速平面度测量治具的介
绍[J].机电工程技术,2018,47(8):142-146.
LI Y. Introduction of a simple and fast flatness measuring
tool [J]. Mechanical & Electrical Engineering
Technology, 2018, 47(8): 142-146.

[2] 景修润,黄嵩,马丽,等.基于 MATLAB 的钳工台平面
度误差快速评定[J].现代制造技术与装备,2019(5):
119-120,122.
JING X R, HUANG S, M L, et al. A fast evaluation
method for flatness error of vise bench Based on MAT-
LAB [J]. Modern Manufacturing Technology and
Equipment, 2019, 5 (270): 119-120,122.

[3] 祝世平,房建成,周锐,等.基于测量平台的一种新型光
电式平面度测量仪[J].测控技术,1999,18(10):
17-19.
ZHU SH P, FANG J CH, ZHOU R, et al. The planeness
measurement system of solar panel substr-ate[J].
Measurement & Control Technology, 1999, 18(10):
17-19.

[4] 荣溪超,曾玉芸,张勇,等.某平面度检测机的设计[J].
新技术新工艺,2013(3):65-66.

RONG X CH, ZENG Y Y, ZHANG Y, et al. Design of
flatness measuring machine [J]. New Technology & New
Process, 2013(3): 65-66.

[5] 孔祥勇.桥梁工程索鞍平面度误差检测研究[J].工程
与建设,2018,32(5):725-727.
KONG X Y. Reasearch on detection of saddle flatness
error of bridge engineering [J]. Engineering and
Construction, 2018, 32(5): 725-727.

[6] 陈辉,马世伟,NUECHTER A.基于激光扫描和 SFM 的
非同步点云三维重构方法[J].仪器仪表学报,2016,
37(5):1148-1157.
CHEN H, MA SH W, NUECHTER A. Non-synchronous
point cloud algorithm for 3D reconstruction based on laser
scanning and SFM [J]. Chinese Journal of Scientific
Instrument, 2016, 37(5): 1149-1151.

[7] RUSU R B, BLODOW N, BEETZ M. Fast point feature
histograms (FPFH) for 3D registration[C]. Robotics and
Automation 2009, IEEE, 2009, 3212-3217.

[8] 张广鹏,张艳宁,郭哲.基于精确主轴分析及 ICP 的三
维人脸配准[J].计算机工程与应用,2006,42(29):
62-64.
ZHANG G P, ZHANG Y N, GUO ZH. 3D face
registration based on accurate principal axes analysis and
ICP[J]. Computer Engineering and Applications, 2006,
42(29): 62-64.

[9] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample
consensus: a paradigm for model fitting with applications
to image analysis and automated cartography [J].
Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.

[10] 张琮毅,魏子庄,徐昊文,等.尺度可变的快速全局点云

- 配准方法[J].计算机学报,2019,42(9):1939-1952.
- ZHANG C Y, WEI Z ZH, XU H W, et al. Scale variable fast global point Cloud registration[J]. Chinese Journal of Computers, 2019,42(9):1939-1952.
- [11] 周锐,房建成,祝世平,等.一种基于虚拟基准的太阳帆板平面度测量仪[J].仪器仪表学报,2000,22(3):323-325.
- ZHOU R, FANG J CH, ZHU SH P, et al. A solar panel substrate flatness measurement instrument based on virtual datum plane [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000,22(3):323-325.
- [12] 谭文,方森,段峰,等.基于机器视觉的3D激光平面度测量系统的应用[J/OL].仪器仪表学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2179.TH.20191205.1342.004.html>.
- TAN W, FANG M, DUAN F, et al. Research and application of 3D laser flatness measurement system based on machine vision [J/OL]. Journal of Mechanical. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2179.TH.20191205.1342.004.html>.
- [13] 孙玉梅,王鹏遥,孙巧妍,等.轮胎胎面参数在线检测系统研究及应用[J].仪器仪表学报,2016,37(12):2859-2865.
- SUN Y M, WANG P Y, SUN Q Y, et al. Research and application of online automatic measurement system for tire tread parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(12):2859-2865.
- [14] 史尧臣,周宏,唐武生,等.基于激光三角法的汽车同步带齿形轮廓参数测量[J].仪器仪表学报,2019,40(6):138-145.
- SHI Y CH, ZHOU H, TANG W SH, et al. Profile parameters measurement of automotive synchronous belt based on laser triangulation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(6):138-145.
- [15] 单忠德,张飞,聂军刚,等.非接触式缸盖平面度误差检测方法 with 测量系统研究[J].机械工程学报,2016,52(20):1-7.
- SHAN ZH D, ZHANG F, NIE J G, et al. Study on the detection method and measurement system of head flatness error non-contact detection [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (20): 1-7.
- [16] 赵俊宏,吕恩利,陆华忠,等.基于激光雷达的托盘位姿识别算法及验证[J].仪器仪表学报,2017,38(10):2469-2476.
- ZHAO J H, LYU EN L, LU H ZH, et al. Pallet localization detecting algorithm based on laser scanning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10):2469-2476.
- [17] 陈胜发,贾瑞玉.基于残差与密度网格的簇心自确认聚类算法[J/OL].计算机工程与应用. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20190612.1002.014.html>.
- CHEN SH F, JIA R Y. Self-confirming clustering algorithm based on residual error and density grid [J/OL]. Computer Engineering and Applications. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.tp.20190612.1002.014.html>.
- [18] 何晓群,闵素芹.实用回归分析[M].北京:北京高等教育出版社,2014.
- HE X Q, MIN S Q. Applied regression analysis [M]. Beijing: Beijing Higher Education Press, 2014.
- [19] 任菲菲.基于形状模板匹配的实时目标检测与跟踪算法研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
- REN F F. A research of realtime object detection and tracking based on shape-based template matching [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [20] BESL P J, MCKAY D H. A method for registration of 3D shapes[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 1992, 14(2):239-256.

作者简介



汪威(通信作者),2006年于湖北工业大学获得硕士学位,2012年于华中科技大学获得博士学位,现为湖北工业大学讲师,主要研究方向为机器视觉、机器人视觉引导、人工智能及其工业应用。

E-mail: Alvin_wangw@163.com

Wang Wei (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Hubei University of Technology in 2006, and received his Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2012. He is currently a lecturer at Hubei University of Technology. His main research interests include machine vision, visual servo and applications of artificial intelligence in industry.



张开颜,2017年于湖北工业大学获得学士学位,现为湖北工业大学硕士研究生,主要研究方向为机器视觉、图像处理和人工智能。

E-mail: zkyy6@qq.com

Zhang Kaiyan received his B. Sc. degree from Hubei University of Technology in 2017. He is currently a M. Sc. candidate in the Department of Instrument Science and Quality Engineering at Hubei University of Technology. His main research interests include machine vision, image processing and artificial intelligence.