

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108521

# 基于线激光扫描的基准孔检测与定位方法\*

罗 哉<sup>1</sup>, 赵洪楠<sup>1</sup>, 江文松<sup>1</sup>, 杨 力<sup>2</sup>, 周根民<sup>3</sup>

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 中国计量大学信息工程学院 杭州 310018;  
3. 浙江科力车辆控制系统有限公司 衢州 324100)

**摘要:**为了满足尖端制造领域中大部件的数字化钻孔与装配需求,利用线激光扫描仪和工业机械臂提出了基准孔自动检测与定位系统及方法。首先,对基准孔三维点云进行孔底点云插值补偿,采用双向梯度约束算法实现了基准孔的粗略边缘特征点提取;然后,针对提取的边缘特征点,采用基于角度判断的细化算法和基于平面拟合的压缩算法,实现了边缘特征点的精细化提取;最后,对边缘特征点进行空间圆参数化,得到了孔径和孔距,实现了基准孔的检测与定位。实验结果表明:该方法对基准孔的检测精度和定位精度(相对误差)分别为1.77%和0.24%,优于传统方法的2.77%和0.46%,能够满足生产制造中大部件的数字化钻孔与装配要求。

**关键词:** 线激光;孔位;检测;点云;算法

**中图分类号:** TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

## A detection and positioning method for the base hole based on line laser scanning

Luo Zai<sup>1</sup>, Zhao Hongnan<sup>1</sup>, Jiang Wensong<sup>1</sup>, Yang Li<sup>2</sup>, Zhou Genmin<sup>3</sup>

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;  
2. College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;  
3. Zhejiang Keli Vehicle Control System Co., Ltd., Quzhou 324100, China)

**Abstract:** To meet the digital drilling and assembly need of large components in the cutting-edge manufacturing field, an automatic detection and positioning system for base hole are proposed by using the line laser scanner and the industrial robotic arm. Firstly, the hole bottom point cloud interpolation compensation is implemented for the three-dimensional point cloud of the base hole, and the rough edge feature point extraction of the base hole is achieved by using the bidirectional gradient constraint algorithm. Secondly, for extracting edge feature points, a refinement algorithm based on angle judgment and a compression algorithm based on plane fitting are used to achieve the refined extraction of edge feature points. Finally, the edge feature points are parameterized in the space circle, and the aperture and hole distance are obtained. The detection and positioning of the base hole are achieved. Experimental results show that the detection accuracy and positioning accuracy (relative error) of the proposed method for the base hole are 1.77% and 0.24%, respectively. These values are better than the 2.77% and 0.46% of the traditional method. It can meet the digital drilling and assembly requirements of large parts in manufacturing.

**Keywords:** line laser; hole position; detection; point cloud; algorithm

## 0 引 言

在航空航天、船舶、军工等尖端工业领域中,待装配

的大部件一般都有定位孔、装配孔等基准孔,随着先进制造业的不断发展,对大部件钻孔与装配的要求越来越高,不断朝着高精度、高环境适应性和高自动化程度的方向发展<sup>[1-3]</sup>。基准孔的质量和一致性对装配的可靠性有至

收稿日期:2021-09-03 Received Date: 2021-09-03

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52075511, 52005471)、中央高校基本科研业务费专项(PA2020GDSK0072)、浙江省自然科学基金(LQ20E050016)、浙江省教育厅科研项目(Y202045469)资助

关重要的影响,装配质量也直接受到基准孔检测精度的影响<sup>[4]</sup>。因此,提高机器人的基准孔自动检测与定位技术是改善机器人自动钻孔能力的关键。在现代工业中,传统的基准孔位检测使用三坐标测量仪,这种接触式检测方法成本高、效率低,容易损坏被测工件<sup>[5]</sup>;线激光扫描技术具有非接触、速度快、精度高等优点,能有效提高机器人钻孔与装配的自动化程度并降低成本<sup>[6]</sup>。利用线激光扫描以实现基准孔自动检测与定位在机器人自动化钻孔与装配技术中具有较高的研究和应用价值。

基于线激光扫描的基准孔检测与定位技术的关键是三维点云中基准孔边缘特征点的提取。目前,边缘特征点提取方法分为间接法和直接法<sup>[7]</sup>。间接法通过把三维点云转换为二维图像并提取图像边缘,再转换为三维点云边缘特征点,如 Li 等<sup>[8]</sup>采用间接法提取到了建筑边缘点云;Poullis 等<sup>[9]</sup>基于采用间接法提取到了屋顶轮廓的三维模型,但二维图像边缘表征点云边缘必然会忽略三维点云的几何优势,造成信息损失;直接法根据空间特征和相互关系参数直接对三维点云提取边缘特征点,保留了完整的三维点云信息,因此直接法是边缘特征点提取的研究热点,其常用的空间特征和相互关系有法方向、曲率、协方差矩阵等<sup>[10-11]</sup>,此外,赵吉宾等<sup>[12]</sup>通过设定分隔截面和计算每个截面上边界点得到了曲面点云的边界;樊晶晶等<sup>[13]</sup>提出了基于模式向量法的边缘点云提取方法,提取精度可达 0.1 mm。

但上述方法普遍针对某一特定边缘而设计,且大多依赖激光雷达、深度相机等具有点云数据量大且无序特点的测量设备,这忽略了线激光扫描点云具有数据量小且有序的优势。另外,点云法向量和曲率计算的复杂性对算法效率的影响,这些方法不适用于基于线激光扫描的基准孔检测与定位技术。为此,孙海龙等<sup>[14]</sup>利用线激光扫描仪提出了一种飞机装配孔位检测方法,根据每条线状点云中相邻两点间距提取边缘特征点;谭小群等<sup>[15]</sup>提出了一种基于线激光扫描和图像处理的基准孔检测方法;Tang 等<sup>[4]</sup>提出了一种基于线激光扫描的基孔边缘检测算法,通过梯度约束实现了基准孔边缘的快速提取等均取得了较好的效果。由于线激光扫描数据往往有较多的噪声干扰,复杂的检测模型往往会导致误差累积,降低检测精度。

本文利用线激光扫描仪与工业机械臂搭建基准孔自动检测与定位系统,提出一种基准孔边缘特征点提取的新方法,再针对边缘特征点进行空间圆参数化以实现基准孔的检测与定位,设计实验以验证方法的可行性与有效性。

## 1 基于线激光扫描的基准孔检测系统

线激光扫描原理是将线型激光照射到被测物表面,反射光经过成像透镜组后被相机接收形成条纹图像,根

据条纹图像在相机上的成像位置可计算被测物表面的三维坐标,其中  $X$  轴坐标值为 0,因此,线激光扫描仪每测量一帧得到一组在  $YZ$  平面内沿  $Y$  轴等距分布的线状二维数据点。

为了获得基准孔表面完整的三维点云数据,将线激光扫描仪固定在具有钻孔与装配功能的工业机器人末端执行器上,组成机器人自动化钻孔与装配系统,由机器人驱动线激光扫描仪以速度  $v$  沿其  $X$  轴正方向匀速扫描。设第一帧的三维点云坐标中  $x=0$ ,则相邻两帧的  $X$  轴增量为  $d=v/f$ , $f$  为采样频率,这样便可得到基准孔表面完整的三维点云,如图 1 所示。

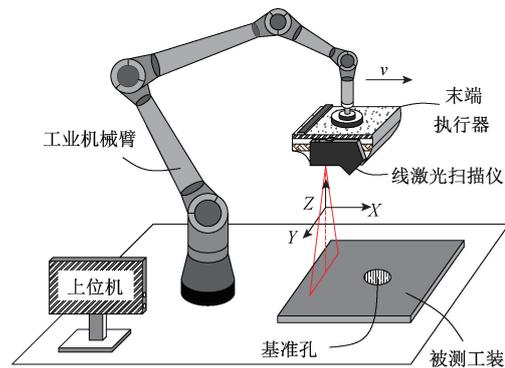


图 1 基准孔检测与定位系统

Fig. 1 Base hole detection and the positioning system

## 2 基准孔边缘特征点提取与参数化

### 2.1 孔底点云的插值补偿

在对基准孔测量时,孔底的光条无法被感光元件接收,测量结果可分为两种:1)扫描系统在孔底区域自动生成  $z=0$  的点进行补偿,如图 2(a) 所示;2)扫描系统因无法接收孔底信号而出现数据缺失,如图 2(b) 所示。

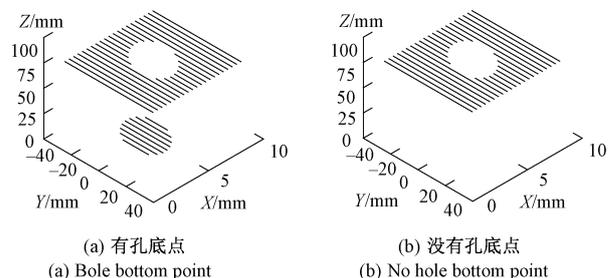


图 2 基于线激光扫描的基准孔点云

Fig. 2 Base hole point cloud based on line laser scanning

对孔底点云插值的目的是为了补偿基准孔边缘点云的缺失,便于特征提取。需对图 2(b) 所示的扫描结果进行孔底点云插值,补偿数据缺失。针对每一帧点云

$\{(0, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n\}$ , 遍历计算各点与相邻点的  $Y$  轴间距  $\delta y_i$ :

$$\delta y_i = y_{i+1} - y_i, i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (1)$$

设  $\Delta y$  为  $Y$  轴间距阈值, 当  $\delta y_i > \Delta y$  时, 在点  $p_i(0, y_i, z_i)$  和点  $p_{i+1}(0, y_{i+1}, z_{i+1})$  之间插值点  $p_{add}$ :

$$\begin{cases} p_{add}^j(0, y_i + j \cdot \Delta y, z_{min}), j = 1, 2, \dots, n_{add} \\ n_{add} = \lceil \delta y_i / \Delta y \rceil \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $p_{add}^j$  表示第  $j$  个插值点,  $n_{add}$  表示插值点个数, 其值为不大于  $(\delta y_i / \Delta y)$  的最大整数,  $z_{min}$  为扫描仪的  $Z$  轴量程最小值。

## 2.2 建立点云空间拓扑关系

基准孔三维点云  $\{P_{sum}\}$  表现为沿  $X$  轴、 $Y$  轴方向均呈等距有序分布, 如图 2 所示, 根据这一特点建立树状索引搜索相邻点, 如图 3 所示。

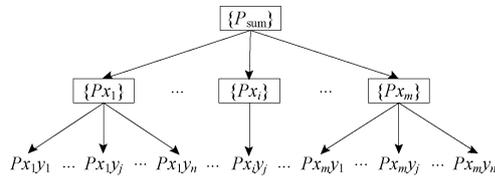


图3 领域搜索原理

Fig. 3 Principle of domain search

针对含  $m$  帧数据的点云集  $\{P_{sum}\}$ , 首先对  $X$  值相同的点聚类, 得到  $m$  组点云集  $\{P_{x_i} | i=1, 2, \dots, m\}$ , 并根据  $X$  值升序排列; 然后根据  $Y$  值对每个点云集  $P_{x_i} (i=1, 2, \dots, m)$  中的  $n$  个点  $\{P_{x_i y_j} | j=1, 2, \dots, n\}$  升序排列。以点云集  $\{P_{x_i}\} (i=1, 2, \dots, m)$  为单位, 以  $P_{x_i y_1}$  为种子点开始基准孔边缘特征点的检测。

## 2.3 基准孔边缘特征点提取

提出了一种基准孔边缘特征点的粗提取算法, 包括特征点的粗提取和离群点的滤噪。

1) 基于梯度约束的边缘特征点粗提取首先针对点云集  $\{P_{x_i} | i=1, 2, \dots, m\}$ , 计算每一个点  $p_j (j=2, 3, \dots, n)$  的梯度  $t_j$ :

$$t_j = \nabla P_{x_i}(x_i, y_j, z_j) = \frac{\partial z_j}{\partial y_j} = \frac{z_j - z_{j-1}}{y_j - y_{j-1}} \quad (3)$$

式中:  $(y_j, z_j)$ 、 $(y_{j-1}, z_{j-1})$  为点  $p_j$  和点  $p_{j-1}$  在  $YZ$  平面上的坐标, 理想情况下若  $t_j$  满足式(4), 则点  $p_j$  (或  $p_{j-1}$ ) 可被认定为基准孔的边缘特征点:

$$|t_j| = \left| \frac{z_j - z_{j-1}}{y_j - y_{j-1}} \right| > T_{min} \quad (4)$$

式中:  $T_{min}$  为梯度阈值。但在实际情况中线激光的部分光束会打在基准孔内壁而产生大梯度的点云, 这些点也满足式(4), 因此需增加约束条件如式(5)所示。

$$\begin{cases} \frac{1}{k_g + 1} \sum_{i=j_0-k_g}^{j_0} \left| \frac{z_i - z_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \right| < T_{max} \\ \frac{1}{k_g + 1} \sum_{i=j_0}^{j_0+k_g} \left| \frac{z_i - z_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \right| < T_{max} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $k_g$  为点  $p_j$  的领域点个数,  $T_{max}$  为辅助梯度阈值。当点  $p_j$  同时满足式(4)和(5), 则点  $p_j$  (或  $p_{j-1}$ ) 被认定为基准孔的边缘特征点, 这样便可得到边缘特征点集  $\{F_i | i=1, 2, \dots, N\}$ ,  $N$  为边缘特征点个数。

## 2) 基于统计分析的噪声点滤除

工装材料表面反光性强容易出现一些孔外噪声点, 这些噪声点经提取后也会被误判为特征点, 因此需对其滤除。由于噪声点通常与实际边缘特征点的距离较大, 采用统计分析的过滤算法来滤除孔外噪声点。迭代计算每一个特征点  $F_i (i=1, 2, \dots, N)$  与其领域内最近的  $k_n$  个近邻点  $\{F_j | j=1, 2, \dots, k_n\}$  的平均距离  $D_i$ :

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^{k_n} (|F_i F_j|)}{k_n} \quad (6)$$

$N$  个平均距离  $\{D_i | i=1, 2, \dots, N\}$  满足高斯分布:

$$f(D_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(D_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

根据平均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$  确定距离阈值  $D_{max}$ :

$$D_{max} = \mu + a \cdot \sigma \quad (8)$$

式中:  $a$  为标准差系数。最后再对每一个边缘特征点  $F_i (i=1, 2, \dots, N)$  迭代计算, 若  $D_i < D_{max}$ , 则  $F_i$  为内点, 保留之, 若  $D_i > D_{max}$ , 则  $F_i$  为离群点, 对其滤除。

## 2.4 基准孔边缘特征点精细化

基准孔边缘特征点的精细化方法包括特征点细化和特征点压缩两个主要步骤。

1) 基于角度判断的特征点精细化基准孔边缘的微角容易产生较大的噪声和误差, 因此经本文 2.3 节方法提取得到的边缘特征点容易出现模糊边缘, 即边缘特征点不唯一, 如图 4 所示, 黑色圆形点为有效点, 黑色三角形点为模糊点, 灰色圆形点为细化后得到的点, 为此提出了一种基于角度判断的特征点细化算法。

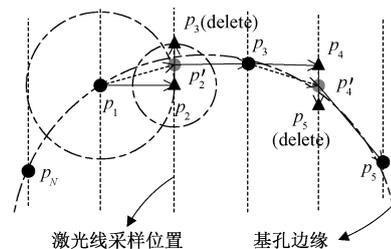


图4 特征点精细化

Fig. 4 Refinement of feature points

(1) 采用 kd-tree 对特征点集  $\{p_i | i=1, 2, \dots, N\}$  建立空间拓扑关系, 以便查找每个点的  $k$  近邻。

(2) 搜索种子点  $p_1$  的最近点  $p_2$ , 若两点距离  $|p_1 p_2|$  小于阈值  $D_y$ , 作投影在  $XY$  平面上的有向向量  $p_1 p_2$ , 否则重新选择种子点  $p_1$  及其最近点  $p_2$ 。

(3) 搜索点  $p_2$  的最近点, 作投影在  $XY$  平面上的有向向量  $p_2 p_3$ , 搜索点  $p_3$  的最近点, 作投影在  $XY$  平面上的有向向量  $p_3 p_4$ , 直到所搜点  $p_N$  的最近点, 作投影在  $XY$  平面上的有向向量  $p_N p_1$ , 计算点  $p_i$  的夹角  $\theta_i (\theta_i \in [0, \pi])$ :

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{p_{i-1} p_i} \cdot \overrightarrow{p_i p_{i+1}}}{|\overrightarrow{p_{i-1} p_i}| \cdot |\overrightarrow{p_i p_{i+1}}|}\right) \quad (9)$$

(4) 在上述过程中, 若  $\theta_i$  小于阈值  $\theta_{\max}$ , 则继续; 若  $\theta_i$  大于阈值  $\theta_{\max}$ , 则重新定义点  $p_i$ :

$$p_i = p'_i \left( \frac{(x_i + x_{i+1})}{2}, \frac{(y_i + y_{i+1})}{2}, \frac{(z_i + z_{i+1})}{2} \right) \quad (10)$$

同时, 删除点  $p_{i+1}$ , 并重复步骤(3)和(4)。

### 2) 基于平面拟合的特征点精细化

基于平面拟合的边缘特征点精细化是为了将提取到的边缘特征点统一在同一平面上, 使其之后的参数化结果更为准确, 具体方法如下。

将首先假设各点都处在同一平面内, 则平面方程可表示为:

$$ax + by + cz = 1 \quad (11)$$

设边缘点个数为  $n$ , 分别代入式(11), 则有:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ z_1 & z_2 & \dots & z_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{记 } \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ z_1 & z_2 & \dots & z_n \end{bmatrix}^T = \mathbf{M}, \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \mathbf{A}, \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{L},$$

则式(12)可表示为:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{L} \quad (13)$$

通过最小二乘法<sup>[16]</sup>对  $\mathbf{A}$  求解可得平面向量:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{L} \quad (14)$$

得到  $\mathbf{A}$  即得到了拟合平面方程式。保留所有边缘特征点  $X$  值和  $Y$  值而将  $Z$  值修改至拟合平面上:

$$z_i = (1 - ax_i - by_i) / c \quad (15)$$

### 2.5 特征参数的计算

基准孔边缘特征点参数化是为了获得基准孔在三维空间中的参数信息。通过对基准孔边缘特征点进行最优空间圆拟合, 得到基准孔的半径和中心坐标。

经上述处理后, 所有特征点均在拟合平面内, 设圆心  $C(x_0, y_0, z_0)$ , 取圆上任意两点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2,$

$z_2)$ , 则它们的中点坐标可表示为:

$$P_{12} \left( \frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2}, \frac{z_1 + z_2}{2} \right) \quad (16)$$

由圆的基本性质可知, 向量  $P_1 P_2$  和向量  $CP_{12}$  垂直, 即满足  $P_1 P_2 \cdot CP_{12} = 0$ , 对其展开整理得:

$$\Delta x_{12} \cdot x_0 + \Delta y_{12} \cdot y_0 + \Delta z_{12} \cdot z_0 - l_1 = 0 \quad (17)$$

$$\text{式中: } \begin{cases} \Delta x_{12} = x_1 - x_2 \\ \Delta y_{12} = y_1 - y_2 \\ \Delta z_{12} = z_1 - z_2 \\ l_1 = (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) / 2 \end{cases},$$

则由  $n$  个点和式(11) 可列出  $n$  个方程, 其矩阵形式可表达为:

$$\begin{bmatrix} a & \Delta x_{12} & \Delta x_{23} & \dots & \Delta x_{(n-1)n} \\ b & \Delta y_{12} & \Delta y_{23} & \dots & \Delta y_{(n-1)n} \\ c & \Delta z_{12} & \Delta z_{23} & \dots & \Delta z_{(n-1)n} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ l_1 \\ \vdots \\ l_{n-1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

参照式(12), 同理将式(18) 改写为:

$$\mathbf{W} \cdot \mathbf{C} = \mathbf{L}_2 \quad (19)$$

由于圆心在拟合平面上, 因此  $\mathbf{C}$  满足:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{C} = 1 \quad (20)$$

通过构建在式(20) 约束下的最优问题对式(18) 中的  $\mathbf{C}$  进行求解得到圆心坐标:

$$f(\mathbf{C}) = \|\mathbf{W}\mathbf{C} - \mathbf{L}_2\|^2 + \lambda(\mathbf{A}\mathbf{C} - 1) \quad (21)$$

式中:  $\lambda$  为拉格朗日乘子, 则可得到圆心坐标:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}^T \mathbf{W} & \mathbf{A}^T \\ \mathbf{A} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{W}^T \mathbf{L}_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

圆的半径可由所有点到圆心的平均距离得到:

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (23)$$

## 3 实验设计与结果分析

本文采用 window7 64 bit 操作系统, VS 2015 开发平台和 PCL 1. 8. 1 编译环境, 选择 NXSensor-I90 线激光扫描仪, 测量精度为 0. 045 mm,  $Z$  轴分辨率为 0. 005 mm; 由 AR5-S 六轴机械臂控制运动, 重复定位精度为  $\pm 0. 03$  mm; 被测对象为带基准孔的平面模拟工装, 算法的各参数设置如表 1 所示, 实验平台如图 5 所示。

扫描得到基准孔三维点云图如图 6(a) 所示, 可见孔底无点云数据, 根据 2. 1 节方法对其进行插值补偿, 补偿结果如图 6(b) 所示。

为了能更好体现本文方法的优越性, 选择结构较复杂的带有倒角的基准孔作为被测对象, 分别用本文方

表1 算法参数设置

Table 1 Algorithm parameter setting

| 参数                   | 值       |
|----------------------|---------|
| $\Delta y/\text{mm}$ | 0.08    |
| $T_{\min}$           | 4       |
| $T_{\max}$           | 10      |
| $a$                  | 1       |
| $k_g$                | 2       |
| $k_n$                | 10      |
| $D_y/\text{mm}$      | 0.1     |
| $\theta_{\max}$      | $\pi/4$ |



图5 实验平台

Fig. 5 Experiment platform

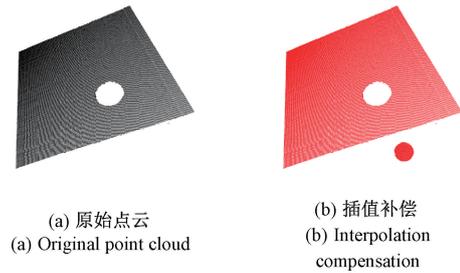


图6 基准孔三维点云及其插值补偿

Fig. 6 3D point cloud of base hole and its interpolation compensation

法与传统的阈值约束法和距离约束法提取基准孔边缘特征点。其中,阈值约束法和本文方法需插值补偿,距离约束法可不用插值补偿,扫描时X轴增量 $d = 0.25 \text{ mm}$ 。在同一视角下的检测结果如图7所示,图中实线框表示能容纳所有点的最小立体空间或最小二维平面。

可以看出,阈值约束法和距离约束法的检测结果中特征点边缘模糊,形状不规则,噪声多,因此这两种方法的环境适应性差,适用于较为理想的基准孔的检测;相比较与阈值约束法和距离约束法,本文方法提取到的特征点边缘精细,形状较为规则,噪声点少,因此本文方法的检测结果更精细、直观,噪声点少。

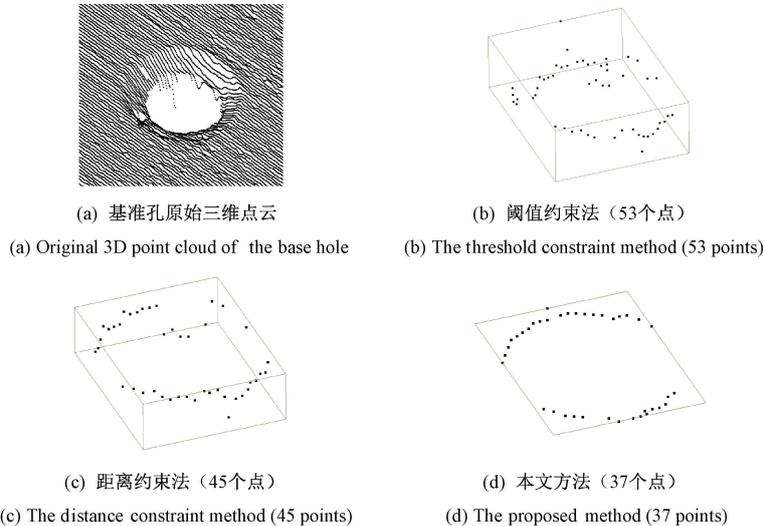


图7 基准孔边缘特征点检测结果

Fig. 7 Feature point detection results on the edge of the base hole

为了进一步验证本文方法的可行性与有效性,以发动机叶片模拟工装中的标准试验板作为被测对象,如图8所示,选择其中两个基准孔,孔距为 $49.98 \text{ mm}$ ,孔径为 $9.03 \text{ mm}$ ,标准值通过三坐标测量机测量得到。

根据双基准孔的参数化结果可以得到两个基孔的圆心坐标和圆半径参数,进一步可得基准孔的孔距和孔径,

多次测量结果如表2所示。可以看出,本文方法对基准孔的检测(孔径)误差为 $0.16 \text{ mm}$ ,定位(孔距)误差为 $0.12 \text{ mm}$ ,相对误差分别为 $1.77\%$ 和 $0.24\%$ ;而传统方法(阈值约束法)对基准孔的检测(孔径)误差为 $0.25 \text{ mm}$ ,定位(孔距)误差为 $0.23 \text{ mm}$ ,相对误差分别为 $2.77\%$ 和 $0.46\%$ 。因此,本文方法相较于传统方法对基准孔具

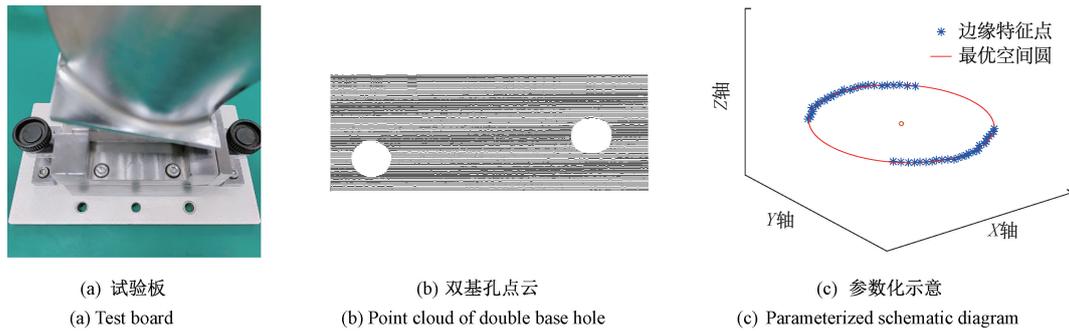


图 8 双基准孔边缘特征点检测与参数化

Fig. 8 Detection and parameterization of feature points on the edge of double base hole

表 2 双基准孔检测与定位结果

Table 2 Detection and positioning results of double base hole

| 参数      | 本文方法测量结果              |                       |                       |       | 传统方法测量的 |  |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|---------|--|
|         | 结果 1                  | 结果 2                  | 结果 3                  | 均方根误差 | 均方根误差   |  |
| 孔径 1/mm | 9.21                  | 9.20                  | 9.19                  | 0.16  | 0.25    |  |
| 孔径 2/mm | 9.18                  | 9.19                  | 9.21                  |       |         |  |
| 圆心 1    | (25.73, -22.72, 7.42) | (19.47, -24.50, 7.26) | (23.65, -25.16, 7.84) | -     | -       |  |
| 圆心 2    | (20.71, 26.86, 7.11)  | (16.38, 25.26, 7.75)  | (21.36, 24.66, 7.32)  | -     | -       |  |
| 孔距/mm   | 49.83                 | 49.87                 | 49.88                 | 0.12  | 0.23    |  |

有更高的检测(孔径)与定位(孔距)精度,能满足飞机、船舶等工业制造中对大部件基准孔高效率、高精度的自动化检测。

## 4 结 论

本文提出了一种基于线激光扫描的基准孔检测与定位方法。首先利用线激光扫描仪和工业机械臂搭建了基准孔自动检测与定位系统,扫描基准孔得到三维点云数据;其次,采用双向梯度约束算法实现了基准孔的粗略边缘特征点提取;然后,针对提取得到的边缘特征点,采用基于角度判断的细化算法和基于平面拟合的压缩算法,实现了边缘特征点的精细化提取;最后,对边缘特征点进行空间圆参数化,实现了基准孔的孔径检测与孔距定位。实验结果表明:相比传统方法,本文方法对基准孔的检测结果噪声更少、边缘更清晰。其中,基准孔孔径检测误差为 0.16 mm,其相对误差为 1.77%,孔距定位误差为 0.12 mm,其相对误差分别为 0.24%;传统方法的孔径检测与孔距定位误差分别为 0.25 mm 和 0.23 mm,相对误差分别为 2.77% 和 0.46%。因此本文方法对基准孔的检测与定位效果相比传统方法更优,能满足生产制造中大部件的自动化钻孔与装配需求,具有较高的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 王黎明,冯潼能. 数字化自动钻铆技术在飞机制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2008, 51(11): 42-45.  
WANG L M, FENG T N. Application of digital automatic drill-rieving technology in aircraft manufacture [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(11): 42-45.
- [2] SUN J, KIEKATA K, YAMATO H, et al. Efficient point cloud data processing in shipbuilding: Reformative component extraction method and registration method[J]. Journal of Computational Design & Engineering, 2014, 1(3): 202-212.
- [3] 周晏锋,陈蔚芳,曹新航,等. 基于线激光在机测量的一面两孔特征寻位方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 189-195.  
ZHOU Y F, CHEN W F, CAO X H, et al. One plane two hole feature positioning method based on line laser on machine measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 189-195.
- [4] TANG J, TAN X, LI X, et al. Research on edge detection algorithm based on line laser scanning [J]. Procedia CIRP, 2019(84): 1101-1106.
- [5] 刘增艺,江开勇,林俊义. 曲面孔位检测方法研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(7): 1048-1053.

- LIU Z Y, JIANG K Y, LIN J Y. Research on detection method of holes position for curved surface [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(7): 1048-1053.
- [ 6 ] 孙炜,苑河南,刘乃铭,等. 融合轮廓特征的线激光点云的快速配准算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 156-162.
- SUN W, YUAN H N, LIU N M, et al. Fast registration algorithm combining contour features for line laser point clouds [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 156-162.
- [ 7 ] 倪欢,张继贤,林祥国. 三维点云边缘检测和直线段提取进展与展望[J]. 测绘通报, 2016, 62(7): 1-4.
- NI H, ZHANG J X, LIN X G. Edge detection and straight line segment extraction from 3D-point clouds: Review and prospect [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016, 62(7): 1-4.
- [ 8 ] LI Y, WU H, AN R, et al. An improved building boundary extraction algorithm based on fusion of optical imagery and LIDAR data[J]. Optik, 2013, 124(22): 5357-5362.
- [ 9 ] POUILLIS C, CHARALAMBOS. A framework for automatic modeling from point cloud data [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(11): 2563-2575.
- [ 10 ] 陈华伟,袁小翠,吴禄慎,等. 基于曲率突变分析的点云特征线自动提取[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(5): 1218-1228.
- CHEN H W, YUAN X C, WU L SH, et al. Automatic point cloud feature-line extraction algorithm based on curvature-mutasion analysis[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(5): 1218-1228.
- [ 11 ] 王春香,周国勇,刘流. 逆向工程中点云孔洞轮廓线的提取[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(24): 375-381.
- WANG CH X, ZHOU G Y, LIU L. Extracting control lines of point cloud in reverse engineering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(24): 375-381.
- [ 12 ] 赵吉宾,刘伟军,孙玉文. 一种自由曲面点云边界的快速直接提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(7): 1269-1273.
- ZHAO J B, LIU W J, SUN Y W. Method for direct extraction of boundary from point clouds of freeform surface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(7): 1269-1273.
- [ 13 ] 樊晶晶,马骊群,孙安斌,等. 模式向量法提取点云数据线轮廓点[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(7): 1640-1648.
- FAN J J, MA L Q, SUN AN B, et al. Extraction of line contour points from point cloud data using pattern vector method [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(7): 1640-1648.
- [ 14 ] 孙海龙,张诚杰,李树军,等. 飞机装配孔位检测方法研究[J]. 机械制造, 2019, 57(7): 16-18, 22.
- SUN H L, ZHANG CH J, LI SH J, et al. Research on hole position detection method in aircraft assembly [J]. Machinery, 2019, 57(7): 16-18, 22.
- [ 15 ] 谭小群,唐婧仪,于薇薇,等. 基于线激光扫描和图像处理的基准孔检测技术研究[J]. 现代制造工程, 2019, 42(4): 115-121.
- TAN X Q, TANG J Y, YU W W, et al. Research on reference hole detection technology based on line laser scanning and image processing [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019, 42(4): 115-121.
- [ 16 ] 王利强,刘震,张钟华. 双目视觉中空间圆弧的高精度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2395-2400.
- WANG L Q, LIU ZH, ZHANG ZH H. Accurate dimensional measurement of spatial circle arcs based on stereo vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2395-2400.

### 作者简介



**罗哉**, 2001 年于合肥工业大学获得学士学位, 2005 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为中国计量大学教授, 主要研究方向为机器视觉的移动测量机器人关键技术研究及设备开发。

E-mail: luozai@cjl.u.edu.cn

**Luo Zai** received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Hefei University of Technology in 2001 and 2005, respectively. He is currently a professor at China Jiliang University. His main research interests include the key technology research and equipment development of mobile measurement robots based on machine vision.



**江文松** (通信作者), 2011 年于安徽理工大学获得学士学位, 2014 年于中国计量大学获得硕士学位, 2018 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为中国计量大学副教授, 主要研究方向为精密测试理论。

E-mail: jwensong@cjl.u.edu.cn

**Jiang Wensong** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2011, received his M. Sc. degree from China Jiliang University in 2014, and received his Ph. D. degree from Beihang University in 2018. He is currently an associate professor at China Jiliang University. His main research interest is the precision testing theory.