

基于点云法线与投影融合的三维圆孔识别算法

李皓宇, 杨蕴杰, 杨皓, 方宇*

上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620

摘要 针对已有的三维圆形孔洞识别算法提取精度差、边缘点提取不完整等问题, 提出一种基于点云法线与投影融合的三维圆孔识别的算法。首先利用 KD-tree 建立点云空间拓扑关系; 其次使用近邻算法 (KNN) 搜索距离点最近的 k 个邻域点, 通过定义距离阈值确定大于阈值的点为边界点; 最后采用点云法线与投影融合, 实现点云边缘的特征点和噪声点区分, 并提取点云数据的三维圆孔特征。以带有圆形孔洞的栅极件为试验工件进行算法验证, 试验结果表明, 该算法能够有效实现点云边缘提取以及三维圆孔识别。

关键词 光计算; 边缘提取; KD-tree; KNN 搜索; 圆孔识别

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0820002

Three-Dimensional Circular Hole Recognition Algorithm Based on Point Cloud Normal and Projection Fusion

Li Haoyu, Yang Yunjie, Yang Hao, Fang Yu*

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract This paper proposes a three-dimensional (3D) circular hole recognition algorithm based on the fusion of point cloud normal and projection to solve the problems of poor extraction accuracy and the incomplete edge point extraction of the existing 3D circular hole recognition algorithms. Firstly, k-dimensional tree (KD-tree) assists in establishing the spatial topological relationship of the point cloud. Secondly, K-NearestNeighbor (KNN) is used to search the k neighborhood points closest to the point. The point greater than the threshold is determined as the boundary point by defining the distance threshold. Finally, the fusion of point cloud normal and projection are combined to realize the distinction between feature points and noise points at the edge of the point cloud, and the 3D circular hole features of the point cloud data are extracted. The experimental results show that the algorithm can effectively realize point cloud edge extraction and 3D circular hole recognition.

Key words optics in computing; edge extraction; KD-tree; k-nearest neighbors search; circular hole recognition

1 引言

在逆向工程检测中, 通常采用激光扫描来获取工件表面的点云数据, 进而根据处理后的点云数据实现零部件的非接触式检测。准确提取点云边缘

并识别孔洞是后续检测的基础, 但点云数据的采集往往存在噪声、数据残缺等问题, 导致边缘提取不完整、孔洞识别不准确, 严重影响后续检测精度。

目前对点云模型孔洞特征进行有效识别是机械装备检测领域研究的热点之一^[1-5]。吕源治等^[6]把

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-09-03; 录用日期: 2021-09-10

基金项目: 上海市松江区科技攻关项目 (20SJKJGG08C)、上海市高水平应用技术大学创新平台建设项目

通信作者: *fangyu_hit@126.com

点云连接成三角形网格,通过网格里的拓扑关系获取孔洞边界,并利用最短路径搜索 Floyd 算法在三角形网格模型中提取孔洞。该方法能有效识别点云孔洞,且具有较强的通用性,但三角形网络在点云中构建比较复杂,计算效率较低,且存在小部分失真的可能性。王庆华等^[7]提出基于多判据准则提取点云特征点的算法,进行点云特征点提取和点云精简。该方法综合考虑了各个判据的优势,弥补了单一判定的弱点,但该算法仍然存在部分点云特征无法充分保留而造成点云缺失等问题。Tabib 等^[8-12]将深度学习用于点云的边缘提取以及孔洞识别方面,此方法在处理庞大的点云数据时,对计算机性能要求较高。

现有常用的圆形特征提取算法包括最小二乘法和随机采样一致性(RANSAC)^[13]。最小二乘法在点云分布不均匀时,产生的误差较大;RANSAC 在三维圆孔提取中,主要是拟合整体特征,会忽略圆形孔洞特征。

针对三维圆孔识别已有算法存在的不足,本文利用点云的距离密度特征进行孔洞边缘提取,并提出一种基于点云法线估计与投影融合算法,对点云

数据的圆孔特征进行识别。栅极件是航天离子推进器产品的核心部件,具有典型的三维圆孔结构特征,主要应用于通信卫星的位置保持和轨道转移、深空探测航天器推进等任务中。利用传统方法进行点云模型的建立时,特征缺失较为明显,本文选择栅极件进行算法研究的试验验证。

2 点云模型扫描及拼接

由于线激光宽度影响点云扫描的精度,考虑到拼接的问题,栅极件点云模型扫描的方案设计如下:

(1) 将待测件沿 x 轴正方向完整扫描,然后每次向 y 轴正方向移动 l_1 (l_1 为小于线激光的线宽),再重复沿着 x 轴扫描待测件,直至扫描完成;

(2) 利用高精度滑台坐标系进行全部扫描数据点的坐标计算,滤掉所有无信息的点,得到全部点的坐标信息;

(3) 整个扫描过程中, z 轴方向上无变化。每次扫描中,前一个局部件的末端和下一个局部件的始端有 $16-l_1$ 重复。利用重复的部分进行叠加,实现点云的配准与拼接。

栅极件点云模型扫描与建立过程如图 1 所示。

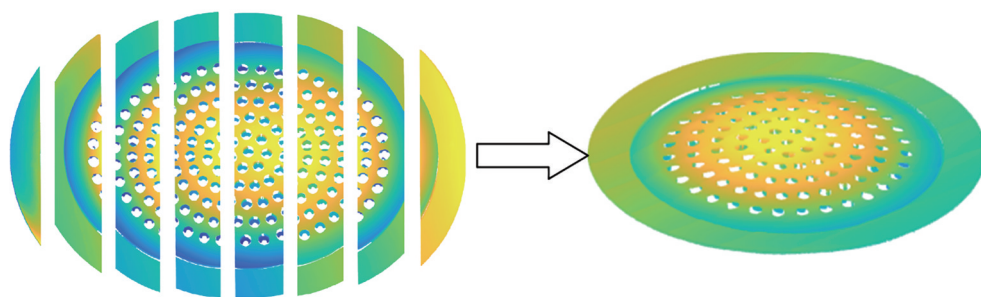


图 1 栅极件点云模型建立

Figure 1 Establishment of grid component point cloud model

3 点云孔洞边缘识别与提取

3.1 点云拓扑关系建立以及点云去噪

由于三维点云在空间中无规律散乱分布,没有任何位置关系,在进行孔洞的边缘提取以及孔洞识别时,首先需要在散乱点云中建立点云空间拓扑关系,使点与点之间建立起相应的位置关系,以实现点云邻近点之间的快速查询。本文采用 KD-tree 建立点云的空间拓扑关系,并采用近邻算法(KNN)进行 k 近邻搜索,随机取点 A 求平均距离 d ,并删除所有距离大于 $2d$ 的点,完成无序点云的去噪。

3.2 边缘密度提取

点云边缘密度提取的主要目的是对三维点云边缘孔洞特征进行识别。在建立了 KD-tree 空间拓扑关系后,设扫描的点集为 $P = \{ p_i | p_i \in R^3, i = 1, 2, 3, \dots, N \}$,对点 p_i 通过 KNN 进行 k 近邻搜索,将距离点 p_i 欧式距离最近的 k 个点保存到集合 $N(p_i)$ 中。为使边缘点区分明显,选择用 k 近邻点法进行近邻点查询。经多次尝试,当 k 值取 30 时,边缘提取效果最好。算法流程如下:

(1) 点云密度计算

利用 k 近邻搜索出所有点的最近 k 个点之后,计算点 p_i 与其最近邻的 k 个点的距离 D_i ,对所有的求

取平均值得到点云密度 $\rho(p_i)$, 计算公式可表示为

$$\rho(p_i) = \frac{\sum_{i=1}^k D_i}{k}. \quad (1)$$

(2) 距离阈值设定

给定阈值 n 计算公式可表示为

$$n = \mu \times \rho(p_i), \quad (2)$$

式中, μ 为阈值系数。

调整阈值的步骤为: 1) 预先设定阈值系数 μ 的值, 计算距离阈值 n ; 2) 进行边缘识别; 3) 根据边缘提取效果调整阈值系数 μ , 从而获得提取效果最好的最佳阈值 n 。

(3) 点云边缘提取

遍历所有点, 找出每个点 p_i 与其最近的 k 个点, 计算点 p_i 与其最近邻的 k 个点的距离 D_i , 在 $D_i (i=1, 2, \dots, k)$ 中存在一个大于阈值 n 的距离 D_j , 将距离 D_j 对应的点定义为边缘点 $q_i(x, y, z)$, 并保存在一个新的点集 $E(q_i)$ 中。计算公式可表示为

$$q_i = \begin{cases} 1, & D_i < n \\ 0, & D_i \geq n \end{cases}, \quad (3)$$

式中, 定义边缘点赋值为 0, 内部点赋值为 1。

(4) 遍历所有点并找出边缘点后, 可视化边界点, 分析边缘提取效果, 若边缘提取不明显, 则返回距离阈值设定, 并调整阈值系数 μ 。

3.3 圆形孔洞识别

通过点云边缘提取得到边缘数据集 $E(q_i)$ 后, 通过搜索圆形特征来提取栅极件的圆形轮廓。提出一种基于点云法线估计与投影融合的算法, 实现圆形孔洞的识别并提取圆孔特征。算法原理如图 2 所示。算法步骤如下:

(1) 对所有孔洞点分别进行平面拟合, 计算平

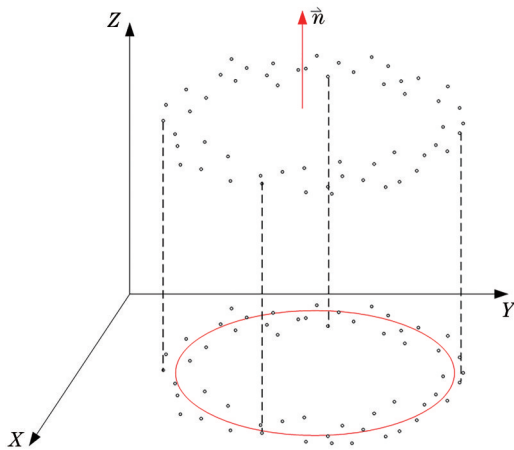


图 2 算法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of algorithm

面单位法向量 $\vec{n} = (a, b, c)$;

(2) 利用 \vec{n} 的坐标信息建立局部 $x-y$ 平面, 并将该部分的所有孔洞点向该平面投影;

(3) 在该平面上将投影点做二维圆的拟合, 求得圆心坐标 $o(x, y)$ 以及圆的半径 r ;

(4) 将得到的二维圆的圆心坐标反投影, 得到孔洞的三维圆心坐标 $O(x, y, z)$, 且二维圆半径 r 即为圆形孔洞的半径。

平面拟合采用奇异值分解(SVD)的方法, 设该拟合平面的法向量为 $\vec{n} = (a, b, c)$ 。以此平面法向量建立 xyz 坐标系, 将所有的点云数据投影在新建立的 $x-y$ 平面上, 利用最小二乘法拟合出二维圆的方程, 并获得圆心坐标 $o(x, y, 0)$ 以及半径 r , 再将其点乘投影矩阵的逆进行反投影, 得到三维圆的圆心坐标 $O(x, y, z)$ 。

得到三维圆心坐标后, 以边缘点到三维圆的圆心的距离作为特征进行孔洞形状估计。计算边缘点集 $E(q_i)$ 中的点 q_i 到拟合出的三维圆的圆心的距离集合,

$$r_i = \|q_i O\|, \quad (4)$$

式中, q_i 为边缘点, O 为三维圆的圆心。由于主要是针对圆形孔洞的识别与提取, 这里使用点 q_i 到 O 的距离离散程度 σ 评价圆心的准确性。判断方法可表示为

$$J = \begin{cases} 1, & 3\sigma \leq 0.2\Delta r \\ 0, & 3\sigma > 0.2\Delta r \end{cases}, \quad (5)$$

式中,

$$\Delta r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i - r|, \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (r_i - \Delta r)^2}{N - 1}}, \quad (7)$$

(5) 式中, J 为判断边缘点集 $E(q_i)$ 是否为圆形孔洞, 1 代表是, 0 代表否。判断后, 提取符合条件 J 为 1 的边缘点集, 此时圆形孔洞识别并提取完成。

4 试验对比与分析

4.1 平台介绍

使用的三维点云扫描检测系统由线激光相机、高精度运动滑台、可升降丝杆、运动电机控制模块和光学精密阻尼隔振平台组成, 如图 3 所示。使用夹具将栅极件固定在高精度滑台上, 实现在 x, y 轴上的运动; 线激光相机固定在可升降丝杆上, 实现在 z 轴上的测量高度调整; 整个扫描系统固定放置于光学精密阻尼隔振平台上, 以减少地面的微小震动对扫描结果产生的影响。

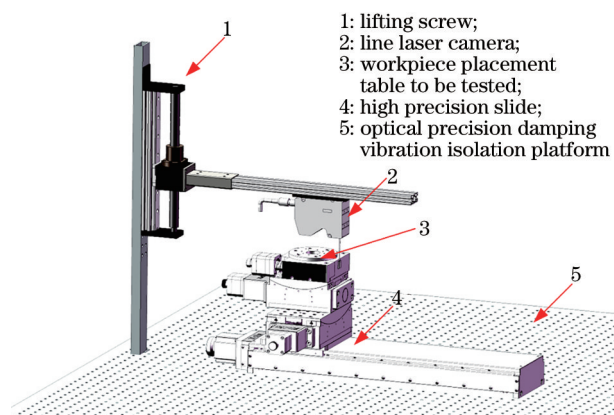


图 3 三维点云扫描检测系统

Fig. 3 3D point cloud scanning detection system

为了后续的点云预处理,需要先定义滑台的速度、移动间距以及线激光固定参数,具体如表 1, 2 所示。

表 1 线激光固定参数

Table 1 Line laser fixing parameters

Line width	Direction	Sampling frequency	Point distance
16 mm	y-axis direction	100 Hz	0.004 mm

表 2 移动滑台参数

Table 2 Parameters of mobile slide

x-axis unit speed	Positive direction of x-axis movement	y-axis unit speed	Positive direction of y-axis movement
	0.4 mm/s		from far to near

4.2 试验设计

为了验证提出的三维点云边缘提取和圆形孔

洞识别算法,设计了圆形孔洞提取对比试验:首先,对栅极件点云模型进行基于点云距离密度的边缘提取;其次,分别采用常规的RANSAC算法和本文提出的算法,对所提取的孔洞边缘进行圆形孔洞识别的试验对比。

4.3 结果分析

边缘提取结果如图 4 所示,图 4(a)为拼接过后的栅极件点云模型,共 5421109 个点;图 4(b)是对模型提取的边缘点,共 213676 个。由于栅极件是由两层栅极组成,上层孔洞边缘提取基本为圆形孔洞,下层在扫描的过程中由于遮挡,只采集到一半数据,故提取边缘为小型的半圆。

采用两种算法进行孔洞识别的对比效果如图 5 所示。图 5 中(a),(b)为选取的孔洞边缘点,为使试验效果明显,选取孔洞边缘点较为复杂的散乱点云数据。对图 5(a)采用RANSAC聚类算法进行直接拟合圆形区域,并拟合圆心。算法拟合效果如图 5(c)所示。图 5(e),(g)分别为圆心在二维空间和三维空间中的效果。由于RANSAC算法优先拟合整体特征,即考虑所有点进行拟合,明显看出得到的圆心发生了偏移,导致识别不准确。

对图 5(b)采用本文算法进行处理。在投影后拟合二维圆,选取符合圆形特征的点如图 5(d)所示,并得到二维圆心,然后反投影后得到三维空间中的圆心坐标。图 5(f),(h)分别为圆心在二维空间和三维空间中的效果。本算法在圆孔的识别过程中,避免了RANSAC算法优先拟合整体特征的缺陷,可以准确识别并提取组成圆形孔洞的边缘点。

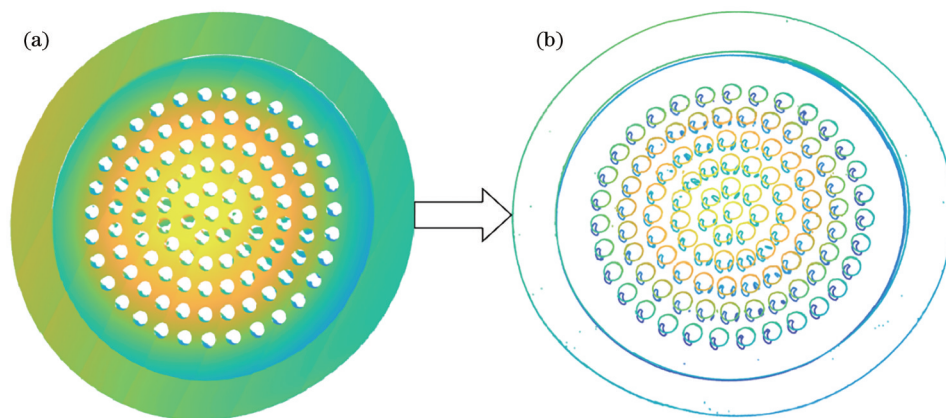


图 4 栅极件孔洞边缘提取。(a)边缘提取前;(b)边缘提取后

Figure 4 Edge extraction of grid hole. (a) Before edge extraction; (b) after edge extraction

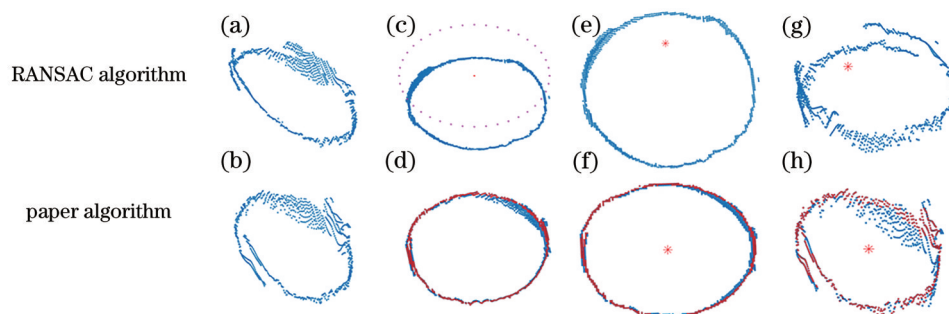


图5 RANSAC与本文算法试验对比图。(a)基于RANSAC算法的散乱边缘点;(b)基于本文算法的散乱边缘点;(c)基于RANSAC算法的圆形拟合效果;(d)基于本文算法的圆形拟合效果;(e)基于RANSAC算法提取的圆心在二维空间中的显示;(f)基于本文算法提取的圆心在二维空间中的显示;(g)基于RANSAC算法提取的圆心在三维空间中的显示;(h)基于RANSAC算法提取的圆心在三维空间中的显示

Fig. 5 Comparison between RANSAC and the proposed algorithm. (a) Scattered edge points based on RANSAC algorithm; (b) scattered edge points based on proposed algorithm; (c) circular fitting effect based on RANSAC algorithm; (d) circular fitting effect based on proposed algorithm; (e) display of the circle center extracted based on RANSAC algorithm in two-dimensional space; (f) display of the circle center extracted based on proposed algorithm in two-dimensional space; (g) display of circle center extracted based on RANSAC algorithm in three-dimensional space; (h) display of circle center extracted based on RANSAC algorithm in three-dimensional space

4 结 论

提出了一种基于点云法线与投影融合的三维圆孔识别算法,避免了传统算法中整体特征拟合所带来的圆心提取偏差,提高了三维圆孔的识别精度。利用栅极件3D打印件进行算法对比试验验证,结果表明,本文研究算法可有效用于孔洞边缘点的提取,实现圆形孔洞识别。研究成果有望为三维圆形孔洞的自动化检测水平提升提供一定的理论依据与技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Wang X L, Sun W L, Zhang J J, et al. Review on reverse engineering research based on point cloud data [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2018 (2): 49-53.
王鑫龙, 孙文磊, 张建杰, 等. 基于点云数据的逆向工程技术研究综述[J]. *制造技术与机床*, 2018(2): 49-53.
- [2] Liu Z Y, Jiang K Y, Lin J Y. Interactive extraction of boundary of specified target feature on scattered point cloud[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 52(6): 186-190.
刘增艺, 江开勇, 林俊义. 散乱点云特征边缘交互提取[J]. *计算机工程与应用*, 2016, 52(6): 186-190.
- [3] Wen P, Cheng Y L, Yu W S. Point cloud classification methods based on deep learning: a review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(16): 1600003.
文沛, 程英蕾, 余旺盛. 基于深度学习的点云分类方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(16): 1600003.
- [4] Gao J Y, Xu H L, Shao K L, et al. An adaptive edge detection method based on local edge feature descriptor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47 (6): 0604003.
高佳月, 许宏丽, 邵凯亮, 等. 基于局部边缘特征描述子的自适应边缘检测算法[J]. *中国激光*, 2020, 47 (6): 0604003.
- [5] Song W T, Jiang W S, Luo Z. Rapid batch three-dimensional reconstruction of point clouds based on multi-label classification[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(12): 1210001.
宋婉婷, 江文松, 罗哉. 基于多标签分类的点云快速批量三维重建[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58 (12): 1210001.
- [6] Lü Y Z, Sun Q, Bi G L. Recognition and repairing of surface hole in three dimensional laser scanning system[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 114-121.
吕源治, 孙强, 毕国玲. 三维激光扫描系统中曲面空洞的识别与修复[J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 114-121.
- [7] Wang Q H, Huang R N, Yan X G, et al. Feature point extraction of scattered point cloud based on multiple criterions[J]. *Application Research of Computers*, 2019, 36(5): 1585-1588.
王庆华, 黄茹楠, 闫晓庚, 等. 基于多判据的散乱点云特征点提取算法[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36

- (5): 1585-1588.
- [8] Tabib R A, Jadhav Y V, Tegginkeri S, et al. Learning-based hole detection in 3D point cloud towards hole filling[J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 171: 475-482.
- [9] Qi C R, Su H, Mo K, et al. Pointnet: Deep learning on point sets for 3d classification and segmentation [C]//*Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017: 652-660.
- [10] Wang Y, Ewert D, Schilberg D, et al. Edge extraction by merging 3D point cloud and 2D image data[C]//*2013 10th International Conference and Expo on Emerging Technologies for a Smarter World (CEWIT)*, October 21-22, 2013, Melville, NY, USA. New York: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [11] Bazazian D, Casas J R, Ruiz-Hidalgo J. Fast and robust edge extraction in unorganized point clouds [C]//*2015 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, November 23-25, 2015, Adelaide, SA, Australia. New York: IEEE Press, 2015: 1-8.
- [12] Xie Y C, Lin Y C, Huang Y G. The research of edge extraction and target recognition based on inherent feature of objects[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6625: 662515.
- [13] Schnabel R, Wahl R, Klein R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection[J]. *Computer Graphics Forum*, 2007, 26(2): 214-226.