

场景点云中中小孔洞边界提取算法

王宪伦,丁文壮,孙旭祥

(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266100)

摘要:计算机处理速度的提高和深度相机的广泛应用使点云数据在工业领域中的应用越来越广泛。针对巡检机器人非固定场景中中小孔定位问题,提出小孔边界检测提取算法。对点云进行预处理;求取目标点对应近邻点的切平面上的投影点,通过投影点算出质心点位置,由质心位置将圆盘分为两个半圆盘,通过两个半圆盘中投影点数量比值作为边界点判定条件。实验表明,该算法可以较好地提取出边界点使得噪声对结果的影响成比例减小,鲁棒性好,运行速度快且稳定。

关键词:点云;孔洞边界检测;半圆盘度量准则;场景定位

中图分类号:TP242.6 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)05-0039-03

Boundary Extraction Algorithm for Small Holes in Scene Point Cloud

WANG Xianlun, DING Wenzhuang, SUN Xuxiang

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266100, China)

Abstract: The improvement of computer processing speed and the wide application of depth camera make the point cloud data more and more widely used in the industrial field. To address the problem of locating small and medium holes in non fixed scene of patrol robot, a small hole boundary detection algorithm is proposed. The point cloud is preprocessed. The projection point on the tangent plane of the target point corresponding to the adjacent point is obtained. The center of gravity point is calculated by the projection point. The disc is divided into two half disks by the center of gravity position. The ratio of projection points in two semi disks is used as the boundary point judgment condition. Experimental results show that the algorithm can well extract boundary points, reduce the influence of noise on the result by times, has good robustness, and gain fast and stable operation speed.

Keywords: point cloud; hole boundary detection; half-disc criterion; scene positioning

0 引言

随着计算机技术的快速发展,计算速度得到快速提升。作为最直观反映客观位置的点云信息运用范围越来越大,复杂性要求越来越高,在场景获取、位置测量、三维重建、逆向开发^[1]方面,点云处理成为场景感知的重要手段。

安装在移动机器人上的深度相机常常需要通过获取点云信息来定位,其中孔洞信息经常是一些定位的关键信息,例如集装箱上的吊装孔位。何学铭等^[2]利用最大角度准则、半圆盘度量准则、形状度量准则,通过三者加权来判断为边界点的概率,但是却难以选择恰当的权重系数。陆帆等^[3]提出了利用反距离权重加权等效合力和点云密度作为目标点为边界点的判定条件,但是其普遍性较差。王春香等^[4]对点云模型的孔洞形成原因及孔洞类型进行了分析和总结,就边界识别方法做出了详细的介绍和归纳。孙殿柱等^[5]提出一种基于曲面局部形貌标架的点云特征识别方法。通过标架夹角的差异性,对曲面样本形貌进行量化分析,区分平滑、边界、棱边及尖角等特征区域,实现对中心样点属性的稳健判别,但是其算法就孔洞边界提取而言开销较大。TABIB R A 等^[6]使用深度学习的框

架来识别边界特征。MINEO C 等^[7]优化了现有的边界点检测算法并提出了 BPD 算法。

本文对半圆盘准则和最大角度准则易受噪声影响的问题,提出了双半圆盘准则。本文利用质心点位置将圆盘划分为双半圆盘,通过双半圆盘中投影点数目的比值来判断边界点,噪声的影响会成比例缩小,鲁棒性较好,能够快速、稳健地实现边界提取。

1 点云数据预处理

1.1 点云滤波

本文采用 KD-Tree 的数据结构来构建点云,对边缘离群点进行滤波处理。分别对点云中各个点的 x 、 y 、 z 坐标值进行统计,由统计的结果拟合对应的正态分布函数,即: $N(\mu_x, \sigma_x^2)$ 、 $N(\mu_y, \sigma_y^2)$ 、 $N(\mu_z, \sigma_z^2)$, 分别对 x 、 y 、 z 坐标的正太分布设定各自的标准差倍数 k_x 、 k_y 、 k_z , 点云中点的 x 、 y 、 z 值在 $k_x\sigma_x$ 、 $k_y\sigma_y$ 、 $k_z\sigma_z$ 值之外的点认定为边缘离群点,可以从点云中删除边缘离群点。在判定是否为边缘离群点的时候,可以选择点云中各点的 x 、 y 、 z 坐标值是否需要同时满足在区间 $(\mu_x - k_x\sigma_x, \mu_x + k_x\sigma_x)$ 、 $(\mu_y - k_y\sigma_y, \mu_y +$

$k, \sigma_y)$ ($\mu_z - k_2 \sigma_z, \mu_z + k_2 \sigma_z$) 中或者 x, y, z 坐标值只需要满足其中的一个,即三者之间是“与”或者“或”的关系。用上述滤波方法可以去除分布在点云边缘且密度较大的离散点集。然后对点云进行半径滤波和均值滤波^[8]去除点云中的离散点。

1.2 点云降采样

本文采用体素化网格的方法实现下采样来减少点的数量,同时保证点云的形状特征不变。点云几何结构不仅是宏观的几何外形,也包括其微观的排列方式^[9-10],比如横向相似的尺寸、纵向相同的距离等。随机下采样虽然效率比体素栅格^[11]滤波器高,但会破坏点云微观结构。

2 点云边界检测算法

2.1 计算切平面

根据目标点 P 及其在半径为 r 的范围内的近邻点构造在目标点 P 处的局部切平面。半径 r 的选择应当至少为两倍的体素格对角线长度,局部切平面的构造方法采用最小二乘法来拟合切平面^[12],假设切平面方程为

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

变形为

$$z = -\frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C} \quad (2)$$

令 $m_1 = -\frac{A}{C}, m_2 = -\frac{B}{C}, m_3 = -\frac{D}{C}$, 公式(2)变为

$$z = m_1x + m_2y + m_3 \quad (3)$$

令 $S = m_1x + m_2y + m_3$, 近邻点数目为 k , 则

$$\sum_{j=1}^k \delta_j^2 = \sum_{j=1}^k (S - z)^2 \quad (4)$$

由近邻点拟合切平面即:各个近邻点到切平面的距离的平方和最小,所以应取上述公式的最小值,为此要得到 m_1, m_2, m_3 的最佳参数估计,所以令

$$\frac{\sum_{j=1}^k \delta_j^2}{\partial m_i} = 0 \quad (5)$$

其中 $i=1, 2, 3$, 所以有

$$\begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^k \delta_j^2}{\partial m_1} = \sum_{j=1}^k 2 \times (m_1x + m_2y + m_3 - z) \times x = 0 \\ \frac{\sum_{j=1}^k \delta_j^2}{\partial m_2} = \sum_{j=1}^k 2 \times (m_1x + m_2y + m_3 - z) \times y = 0 \\ \frac{\sum_{j=1}^k \delta_j^2}{\partial m_3} = \sum_{j=1}^k 2 \times (m_1x + m_2y + m_3 - z) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

将上述方程组整理成矩阵的形式为

$$\begin{bmatrix} \sum x_j^2 & \sum x_j y_j & \sum x_j \\ \sum x_j y_j & \sum y_j^2 & \sum y_j \\ \sum x_j & \sum y_j & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum z_j x_j \\ \sum z_j y_j \\ \sum z_j \end{bmatrix} \quad (7)$$

对上述方程组求解,即可得到切平面方程。

2.2 计算切平面投影点

将目标点 P 的近邻点投影到切平面上,其具体步骤为:建立平面 ω 过点 P 且平行于切平面,通过带入点 P 的坐标可以得到 ω 的平面方程,进而获得平面 ω 的法向量 $\mathbf{n}(n_x, n_y, n_z)$, 设目标点 P 的近邻点其中之一 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 在平面 ω 上对应点为 $P'_0(x'_0, y'_0, z'_0)$, 可以建立方程式(8)。

$$\begin{cases} y'_0 = \frac{B}{A}(x'_0 - x_0) + y_0 \\ z'_0 = \frac{C}{A}(x'_0 - x_0) + z_0 \end{cases} \quad (8)$$

将上述两式带入 ω 的平面方程即可解出 $P'_0(x'_0, y'_0, z'_0)$ 的值。

2.3 双半圆盘算法具体实现

将目标点 P 的近邻点 P_0, P_1, \dots, P_k 投影到平面 ω 上得到其各自的对应点 P'_0, P'_1, \dots, P'_k 。由于近邻点所在的空间为球体,且平面 ω 过球心,所以 ω 平面的感兴趣区域为一块圆形区域,如图1所示。

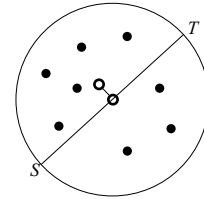


图1 双圆盘建立示意图

求取投影在圆形范围内投影点的质心坐标,经过质心点(图1中空点)和圆形中心点(图1中黑色点)来建立直线方程 l_0 (图1中短直线)。求取过圆心并且垂直于 l_0 的直线 l_d (图1中直线 ST)。直线 l_d 将圆形区域分为两个半圆盘,将坐标点带入直线 l_d 的方程来判断点在直线上方或者直线下方,分别对直线上方和下方的点的数目进行统计,在上下两个半圆盘数目统计时遵循下列原则:恰好位于直线上的点不纳入计数范围,如果某一半圆盘上的投影点的个数为0,则设置该半圆盘的最佳参数为0.25,反之,该半圆盘的最佳参数等于该半圆盘上投影点的个数。半圆盘投影点的个数之和应当大于2,认定小于2的为边界离散点。对两个半圆盘参数进行排列大小得到 a_{\max}, a_{\min} , 通过两者之比得到参数 k_a , 通过给定参数 k_a 的阈值来判定是否为边界点。 n_1, n_2 分别为两个半圆盘上投影点的个数, a_1, a_2 分别为两个半圆盘的最佳参数。综上所述,边界点条件满足下式:

$$\begin{cases} a_1 = \begin{cases} 0.25, & n_1 = 0 \\ n_1, & n_1 > 0 \end{cases} \\ a_2 = \begin{cases} 0.25, & n_2 = 0 \\ n_2, & n_2 > 0 \end{cases} \\ k_a = \frac{a_{\max}}{a_{\min}} \\ n_1 + n_2 > 3 \end{cases} \quad (9)$$

凡是满足上式的点则认为边界点,遍历点云中的所有点,得到边界点的索引。

3 内边界判定条件

经过上节可以将边界点提取出来,然后通过聚类^[13]分类出各个边界所包含的边界点的索引 v_i 。分别用 2.1 节中所提到的最小二乘法求取各个 v_i 所对应边界的切平面,将该边界所对应的边界点投影到边界点切平面 ω_p 上。对投影点用广度优先搜索算法 (BFS)^[14] 进行边界点排序。搜索求取该边界所对应边界点邻域内点的质心,邻域半径的选取参考 2.1 节中半径 r 值,计算得到由质心指向边界点的单位向量 u_i ,然后将各个边界点所对应的单位向量 u_i 也投影到切平面 ω_p 上,并将得到的投影点按照搜索最近点的方法来连接成多边形,示意图如图 2 所示。其中 A、B、C、D、E、F、G 代表边界点,其对应的向量代表 u_i 。

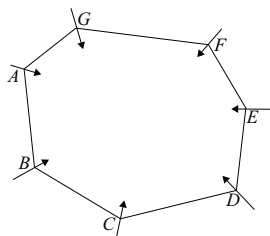


图 2 边界点及其对应向量

假设该边界上的边界点个数为 k_ω ,取其中任意一点为起始点 $k_\omega/4$,取为一个步长,得到 4 个边界点及其对应向量 u_i ,求取任意相邻的两向量沿着向量延长线方向的交点。如果交点和质心点所构成向量与目标点和质心点所构成向量方向一致,即向量各元素符号相同,则认为是内边界点。随后沿顺时针或者逆时针定向取另外间隔相等的 4 个点,依次执行上述判断。如果超过一定比例的点都满足向量延长线交点条件,则认为该边界为内边界。

4 实验验证

本实验采用 PCL (point cloud library), Visual Studio 2015, kinect2.0 平台来获取点云数据。为了直观地表达本文提出的双半圆盘准则,本文采用基于 Opencv3.4.7 和 Visual Studio 2015 平台的 C++ 语言来直观地测试该准则,计算机采用 Inter Core i5-6400CPU 内存为 12 GB。在实验中创建了空白图片然后将图片分为 40×60 的格子,并分别在格子中随机生成黑色点来代表投影点,随机截取其中一块并去掉外围点和内孔点,采用上述算法对其边界点检测,结果图如图 3 所示。图 3 中:列为 a、b、c;行为 1、2、3。(1a)、(2a)、(3a) 为随机生成的待检测图;(1b)、(2b)、(3b) 为本文改进的边界点检测结果图;(1c)、(2c)、(3c) 为半圆盘准则的边界点检测结果图(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

图 4 为各个点对应算法判定值的区间分布图,图 4 中表明本文算法(双半圆盘准则)和半圆盘准则边界点检测算法结果,圆圈点表示外边界点,星号点表示内边界点。本实验中采用半圆盘边界检测算法检测边界点数目略多于本文算法的原则。由结果可知,本文算法边界点检测结果更好,边界点均匀程度更好,并且能够在一定程度上

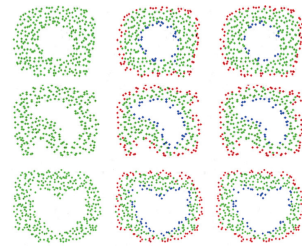
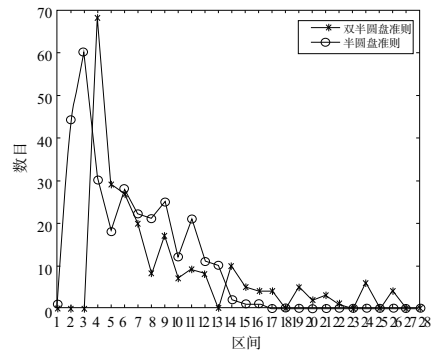
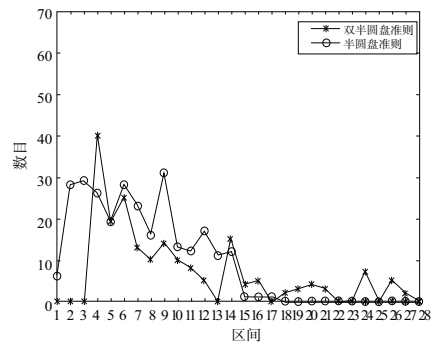


图 3 边界点检测实验结果图

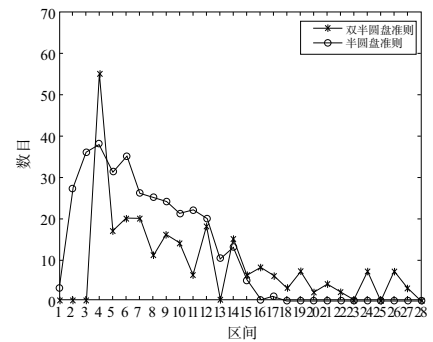
排除噪声点所带来的影响,因而其鲁棒性更高。对本文算法提出范围为 0.6~3.4 共 28 个区间,半圆盘准则为从 0~28 共 28 个区间,对其进行归一化得到区间分布点数直方图。由图 4 可知:本文算法边界点范围为 >2.0 ,对应图中的 >14 的值;半圆盘准则为 $>0.255R$ 的数值,实验中 R 值为 28,即 >7.13 的为边界点。经上述分析,本文提出的边界点判定方法使得边界点和非边界点分界明显,而半圆盘方法边界点和非边界点分布密集,不易区分。



(a) 图1判定值分布图



(b) 图2判定值分布图



(c) 图3判定值分布图

图 4 各个投影点对应判定值结果分布区间图

(下转第 52 页)

所有程序编制完成后进行仿真。图 8 为仿真效果图^[5]。仿真无误后方可进行加工,待加工完成时,拆下工件和剩余毛坯,在毛坯背面轻轻敲下工件去掉毛刺,形成成品工件,如图 9 所示。

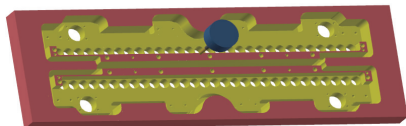


图 8 仿真效果图



图 9 成品工件

3 测量与检验

用三坐标对工件进行测量,所有尺寸都合格。把改进后的支架装配在设备上调试,明显地减小了设备运行时的噪声,伺服电机负载明显降低。通过胶囊生产厂家实际情况反馈,整体设备性能明显提高,胶囊套合合格率达到 90%。

(上接第 41 页)

实验结果表明质心点位置精度对边界点检测结果具有较大的影响,可以通过改变 k_a 值进行多次实验来获取较好的检测边界点的效果,图 4 所示为 $k_a = 2.0$ 时的结果。通过多次实验表明本算法稳定、有效且计算效率较高。

5 结语

通过多次实验表明本算法稳定、高效、检测结果较好,可以有效地将边界点检测出来,达到预期目标。该算法在多次实验后可以确定在值的选择范围上本算法的有效范围较小,相比于文献[2]可以快速地确定适当的值。相比于文献[5]而言,该算法具有更简洁的运算原则,因而计算速度更快,对硬件要求更低。在多次实验中发现,偶尔会出现检测结果出错的情况,并且内边界检测比外边界检测更困难(可能曲率较小的原因),出现这种现象原因猜测为简单将圆盘分为两个半圆,应该是根据密度不同将圆盘分为两个区域,再统计投影点数目进行比较可以得到较好的效果。总体来讲,该算法简单、快速、稳定,噪声的影响较小,可以快速地实现边界点的提取。

参考文献:

- [1] 杨必胜,董震. 点云智能研究进展与趋势[J]. 测绘学报, 2019,48(12):1575-1585.
- [2] 何学铭,嵇永盛,庞明勇. 点云模型中孔洞边界曲线多准则提取算法[J]. 农业机械学报,2014,45(2):291-296.
- [3] 陆帆,李松,曹菁菁,等. 基于反距离权重和密度的点云边界点检测算法[J]. 计算机工程与设计,2019,40(2):364-369,454.

4 结语

文中论述了全自动伺服胶囊机齿轮轴支架的数控加工及工艺改进,并针对此类支架特点,提出合理的加工方案,并已经在实际生产中批量使用,尤其是采用了板料“裁剪法”的加工方法,只需要一次装夹,避免了异形支架加工时多次装夹和重复找正带来的误差,缩短了加工周期,提高了加工效率,降低了企业生产成本。文中思路和方法对同类异形支架零件的数控加工具有通用性和可借鉴性。

参考文献:

- [1] 邓彭冲. 体育器材器械的改性铝基复合材料性能分析[J]. 工业加热,2020,49(9):46-48.
- [2] 李毅. Mastercam 编程参数设置的含义和应用[J]. 湖北农机化,2019(17):74.
- [3] 岳宏梅,王甫. MasterCAM 软件在数控加工中的应用[J]. 内燃机与配件,2020(3):257-258.
- [4] 马永红,杨亮,王亚平,等. 基于 MasterCAM 复杂异形零件铣削加工工艺与仿真[J]. 金属加工(冷加工),2015(14):62-64.
- [5] 李财正,李杰,邱明,等. 航空桁肋零件精准成形工艺研究[C]//第十七届沈阳科学学术年会论文集. 沈阳:2020:701-708.

收稿日期:2020-09-15

- [4] 王春香,梁亮,王耀,等. 三维点云模型孔洞边界识别的研究综述[J]. 现代制造工程,2019(7):157-162.
- [5] 孙殿柱,沈江华,贾宗福,等. 散乱点云局部形貌标架量化及特征识别方法[J/OL]. 中国机械工程:1-9[2020-07-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20200630.1816.044.html>.
- [6] 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.
- [7] MINEO C, PIERCE S G, SUMMAN R. Novel algorithms for 3D surface point cloud boundary detection and edge reconstruction[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2019, 6(1): 81-91.
- [8] 许龙,黄翔,李根. 一种基于模糊 C 均值和均值滤波的点云去噪算法[J]. 机械制造与自动化,2016,45(4):5-7,23.
- [9] 赵夫群,周明全. 层次化点云去噪算法[J]. 光学精密工程, 2020,28(7):1618-1625.
- [10] 顾营迎,王立,华宝成,等. 一种面向空间非合作目标位姿测量应用的三维点云滤波算法[J]. 应用光学,2019,40(2):210-216.
- [11] 郭浩. 点云库 PCL 从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2019:3.
- [12] 薄怀志. 三种点云数据平面拟合方法的精度比较与分析[J]. 测绘与空间地理信息,2018,41(5):206-208.
- [13] 高新. 一种改进 K-means 聚类算法与新的聚类有效性指标研究[D]. 合肥:安徽大学,2020:23-30.
- [14] 王春香,周国勇,刘流. 逆向工程中点云孔洞轮廓线提取[J/OL]. 激光与光电子学进展:1-12[2020-07-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20200703.0943.006.html>.

收稿日期:2020-10-21