基于姿态标准化的线特征点云提取方法

李 伟 李旭东 赵慧洁 张 颖

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 从零件三维点云中提取棱边等线特征所对应的点云是零件模型重构的关键,也是点云数据处理的基本操作. 基于曲率的线特征点云提取方法易受点云初始姿态以及曲率估计方法的影响,曲面拟合及曲率估计误差较大. 提出了一种基于点云姿态标准化的线特征点云提取方法:首先计算点云主方向并将其同 z 轴对准实现点云姿态的标准化,然后进行曲面拟合并以最大主曲率绝对值作为曲率估计值,最后对曲率值取阈值提取出线特征点云. 用不同类型的点云数据进行了实验,结果表明所提方法有较高的提取效率和良好的适用性.

关 键 词: 线特征点云提取; 点云数据处理; 姿态标准化; 曲率估计

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)08-1117-05

Attitude normalization based line feature point cloud extraction approach

Li Wei Li Xudong Zhao Huijie Zhang Ying

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Extracting the point cloud corresponding to the edges from point cloud of a part is a basic work in the part 3D reconstruction, also a key point of point cloud processing. The commonly used curvature based LFPC(line feature point cloud) extraction approach may have large errors in curve surface fitting and curvature estimation due to the arbitrary attitude of original point cloud and the way of curvature estimation. An attitude normalization based LFPC extraction approach is proposed. First the attitude normalization is accomplished by adjust the principle direction of the point cloud to the z axis, then, after the curve surface fitting, the main curvature with the maximal absolute value is treated as curvature, finally, the LFPC is obtained by applying a curvature threshold. Experiments on different models show that the proposed approach has better efficiency and is adaptive to different kinds of models.

Key words: line feature point cloud extraction; point cloud data processing; attitude normalization; curvature estimation

1 问题的提出

三维测量技术的发展,可以快速、高精度地获取被测对象表面的形貌数据,即三维点云数据[1-2]. 制造业领域中,对获取的零件三维点云数据进行处理,可以实现非接触、自动化尺寸测量、模型重构、逆向工程等. 三维点云数据处理技术得到越来越多的关注.

机械零件的结构多表现为简单的几何特征,如两个平面相交形成的直线、曲面和平面相交形成的平面曲线、两个曲面相交形成的空间曲线等,图 1 中白线对应的即为各种线特征.

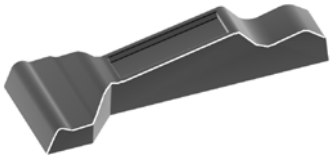


图 1 零件模型及其线特征

收稿日期: 2012-08-30; **网络出版时间**: 2013-08-06 11:39

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130806.1139.001.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60802044)

作者简介: 李 伟(1989-),男,河南安阳人,硕士生,weilee@aspe.buaa.edu.cn.

线特征是零件的固有结构,不会随零件旋转、平移等而变化. 从点云中提取这些线特征可以作为尺寸测量的参考基准或作为点云旋转变换的约束,提高点云数据处理的速度和精度. 线特征点云提取是三维点云数据处理的基本操作之一.

常见的提取线特征点云的方法主要有两类:一类是基于降维思想,把三维点云向某个平面投影,将三维特征点云的提取转化为二维平面上对应点的搜索. 文献[3-5]先把点云分割为多层,然后将各层点云沿其平面法向投影,通过寻找二维平面中点云拟合曲线的极值点作为特征点得到对应的三维特征点云,其结果易受点云姿态及投影方向的影响而不够稳定. 另一类是将表面结构参数化,由点云计算表面结构的几何参数如曲率、表面法向夹角等,然后基于参数进行特征点云提取. 文献[6]计算点云表面法向夹角,尽管其大小与点云姿态无关,但易受噪声影响;由于法向夹角的估计需先遍历所有点云计算法向量然后再次遍历全部点云进行邻近法向夹角的计算,需要的计算量很大;文献[7]为消除点云姿态对拟合误差的影响,仅对偏离点云主方向过大的点云进行适度的姿态调整;以平均曲率作为拟合曲面曲率估计值,无法准确描述表面的结构变化程度;从而曲率估计值误差较大.

本文首先分析点云姿态与拟合误差,在拟合前先进行点云姿态标准化;通过对不同曲率估计方法对比,采用最大主曲率绝对值作为曲率估计值;提出了一种基于姿态标准化的线特征点云提取方法. 并用不同类型点云数据进行了实验,证明所提方法有较高的提取效率和良好的适用性.

2 原 理

基于曲率提取线特征点云,需要估计点云的曲率值,而曲率的计算需以曲面方程为基础;由于点云姿态直接影响曲面方程的拟合误差,应先对点云数据姿态进行调整,即姿态标准化.

三维扫描得到的点云是无序点,确定点云姿态需要获得其邻近点云,因此需要快速完成散乱点的临近点搜索. 算法流程如图 2 所示.

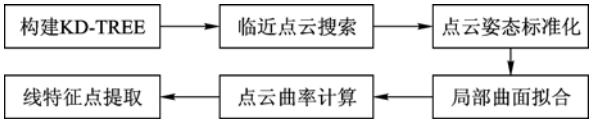


图 2 算法流程

2.1 临近点云搜索

邻近点云搜索用 KD-TREE[8] 算法实现. KD-TREE 算法基于二叉树原理,基于原始点云的三维坐标构建二叉树,通过对二叉树的搜索找到给定点的邻近点云. 同线性搜索相比,采用 KD-TREE 算法可大大提高搜索效率,如对于点数为 n 的点云,搜索方法的时间复杂度从 n 减少为 $\mathrm{lb}\,n$.

2.2 点云姿态标准化

对得到的邻近点云进行曲面拟合,得到点云曲面的方程,便于估计点云曲率.

记邻近点云为

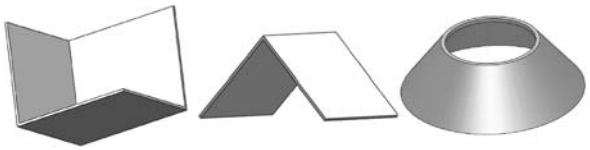
$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{local}} = \{(x_i, y_i, z_i) \mid i = 1, 2, \cdots, r\}$$

拟合的目标曲面方程为 $z=f(x,y)$,则拟合误差可表示为

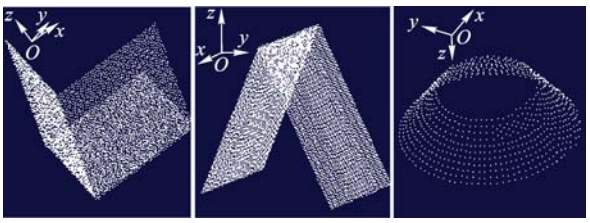
$$e = \sum_{i=1}^{r} [z_i - f(x_i, y_i)] \tag{1}$$

拟合误差会受点云数据相对于坐标系姿态的影响. 因此需要通过点云姿态标准化,减小点云姿态不同引起的拟合误差.

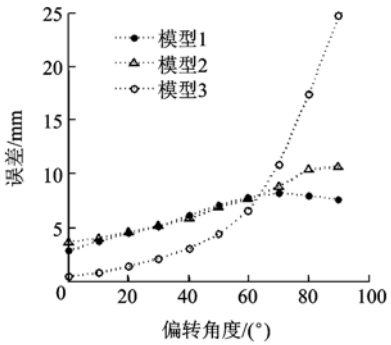
点云数据的主方向描述了点云的整体分布,当主方向与 z 轴重合时,点云在 xOy 平面上分布更均匀,曲面拟合误差会更小. 图 3a ~ 图 3c 显示了 3 种具有不同结构的模型,其主方向同 z 轴夹角从小变大时曲面方程拟合误差如图 3d 所示. 这 3 种模型是根据不同基本类型的三维对象仿真得到的,由于不存在测量误差,可以用以对比不同类型的三维模型主方向偏差同拟合误差影响.



a 模型 1　　b 模型 2　　c 模型 3



d 模型 1 点云　　e 模型 2 点云　　f 模型 3 点云



g 主方向偏差与曲面拟合误差关系图

图 3 不同模型主方向偏差与拟合误差关系

由图 3 可以看出,z 轴同主方向的夹角越小,拟合误差越小,复杂三维模型均可认为是简单结构的组合,因此该规律对复杂的模型也适用. 为了减少拟合误差从而提高曲率估计精度,应将主方向同 z 轴对准,即对点云进行姿态标准化.

记点 p_i 的临近点云为

$$\boldsymbol{P}_{\text{local}}=\begin{bmatrix}x_1 & y_1 & z_1\\ x_2 & y_2 & z_2\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ x_r & y_r & z_r\end{bmatrix}$$

点云 $\boldsymbol{P}_{\text{local}}$ 的主方向 $\boldsymbol{v}_{\text{normal}}$ 可用 PCA(Principle Component Analysis)方法[9]计算如下:

1) 计算点云 $\boldsymbol{P}_{\text{local}}$ 的协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$.

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}x_1-\bar{x} & y_1-\bar{y} & z_1-\bar{z}\\ x_2-\bar{x} & y_2-\bar{y} & z_2-\bar{z}\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ x_r-\bar{x} & y_r-\bar{y} & z_r-\bar{z}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\cdot\begin{bmatrix}x_1-\bar{x} & y_1-\bar{y} & z_1-\bar{z}\\ x_2-\bar{x} & y_2-\bar{y} & z_2-\bar{z}\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ x_r-\bar{x} & y_r-\bar{y} & z_r-\bar{z}\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中,$(\bar{x},\bar{y},\bar{z})=\left(\frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}x_i,\frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}y_i,\frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}z_i\right)$ 为点云中心.

2) 对 $\boldsymbol{C}$ 特征值分解,得特征值 $\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3$ 以及对应的特征向量 $\boldsymbol{\alpha}_1,\boldsymbol{\alpha}_2,\boldsymbol{\alpha}_3$,则主方向 $\boldsymbol{v}=\boldsymbol{\alpha}_i\mid_{\lambda_i=\min(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3)}$.

为将点云主方向同 z 轴对准. 要寻找转换矩阵 $\boldsymbol{R}$,使 $\boldsymbol{i}=\boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{v}$. 其中 $\boldsymbol{i}$ 为沿 z 轴单位向量且有 $\boldsymbol{i}=(0,0,1)^{\mathrm{T}}$. 借助 Householder 矩阵[10]可完成矩阵求取,令

$$\boldsymbol{b}=\frac{\boldsymbol{i}-\boldsymbol{v}}{\mid\boldsymbol{i}-\boldsymbol{v}\mid} \tag{3}$$

若 $\boldsymbol{I}$ 为 3 阶单位矩阵,则变换矩阵

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{I}-2\boldsymbol{b}\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

姿态标准化后的点云为

$$\boldsymbol{Q}_{\text{local}}=\boldsymbol{P}_{\text{local}}\cdot\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

2.3　曲率值估计

对经过姿态标准化的点云进行曲面拟合,由于由点云邻近搜索的点云形成的局部较小区域结构比较简单,可以直接用一般二次曲面表示,因此目标方程可写为

$$z=ax^2+by^2+cxy+dx+ey+f$$

记

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}x_1^2 & y_1^2 & x_1y_1 & x_1 & y_1 & 1\\ x_2^2 & y_2^2 & x_2y_2 & x_2 & y_2 & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ x_r^2 & y_r^2 & x_ry_r & x_r & y_r & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X}=[a,b,c,d,e,f]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{I}_z=[z_1,z_2,\cdots,z_r]^{\mathrm{T}}$$

则二次曲面的系数为

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_z \tag{6}$$

对于需要计算曲率值的点 $p_i(x_i,y_i,z_i)$ 一般不在拟合曲面上,需将 p_i 沿着主方向向曲面投影,得到投影点为 p_i':

$$p_i'=(x_i,y_i,ax_i^2+by_i^2+cx_iy_i+dx_i+ey_i+f) \tag{7}$$

令

$$\left.\begin{aligned}j&=\frac{\partial z}{\partial x}\\ l&=\frac{\partial z}{\partial y}\\ m&=\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\\ s&=\frac{\partial^2 z}{\partial x\partial y}\\ t&=\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

若有

$$\left.\begin{aligned}E&=1+j^2\\ F&=jl\\ G&=1+l^2\\ L&=\frac{m}{\sqrt{1+j^2+l^2}}\\ M&=\frac{s}{\sqrt{1+j^2+l^2}}\\ N&=\frac{t}{\sqrt{1+j^2+l^2}}\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

则主曲率值满足方程[11]:

$$(EG-F^2)k^2-(LG-2MF+NE)k+(LN-M^2)=0$$

解方程所得解为曲面上投影点的两个主曲率 k_1,k_2. $K=k_1k_2$ 为高斯曲率,$H=\frac{1}{2}(k_1+k_2)$ 为平均曲率.

目前曲率估计方法包括用 K 与 H 的组合形式[12]或者用 K 或 H 直接作为曲率估计值. 由于综合了两个主方向曲率值的大小,这种估计方法可看作是对点云曲率的综合估计. 然而根据线特征点云对应的结构如棱边的特点可知,在某一个

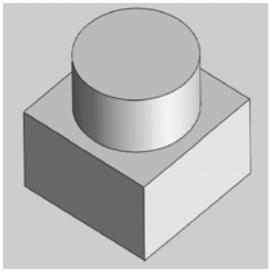
方向有较大的曲率估计之后再结合其他方向的较小曲率进行最终曲率估计的融合反而降低了线特征点云的曲率估值可区分性,因此用最大主曲率绝对值作为曲率估计值能够使线特征以及非线特征点云的曲率估计值差异更加明显,因此能够更准确地提取出线特征点云. 本文的曲率用最大主曲率绝对值来估计曲率,如式(10)所示.

$$\text{curvature} = \max(|k_1|, |k_2|) \quad (10)$$

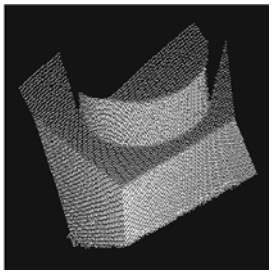
3 实 验

3.1 简单零件模型

图 4a、图 4b 所示为简单零件模型及其点云,分别基于前文的 3 种曲率估计方法进行线特征点云提取,结果如图 4c ~ 图 4e 所示.



a 简单零件模型



b 简单零件点云



c 高斯曲率提取结果



d 平均曲率提取结果



e 最大主曲率绝对值提取结果

图 4 用不同曲率估计方法提取线特征点云结果

可以看出,高斯曲率及平均曲率在提取中易出现特征点丢失. 以提取的有效线特征点云点数同点云的全部线特征点云数之比评价提取效率,针对不同的三维模型对象,分别计算最大主曲率提取、高斯曲率提取及平均曲率提取的提取效率,提取结果统计如表 1 所示.

综上所述,用本文所提出的曲率估计方法效果最好.

表 1 不同三维模型特征提取准确率对比 %

模型	最大主曲率提取	高斯曲率	平均曲率
海绵模型	97	89	75
简单零件	95	69	65
铸件	96	59	69
台钳工件	95	70	58

3.2 复杂零件模型

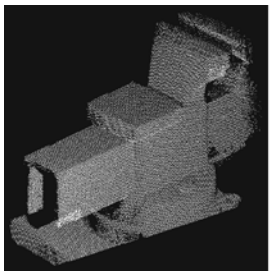
图 5 为对复杂零件模型进行线特征提取的结果,证明了本文方法对于复杂零件线特征提取仍然有效.



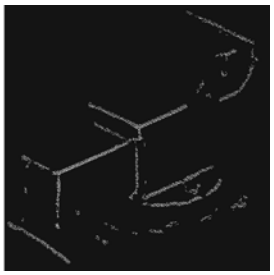
a 铸件模型点云



b 线特征点云提取结果



c 台钳模型点云

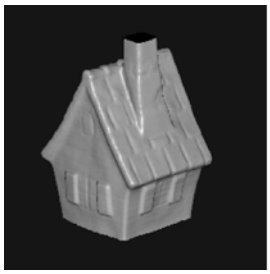


d 线特征点云提取结果

图 5 复杂零件模型的线特征提取结果

3.3 其他类型模型

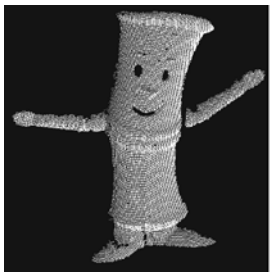
图 6 为对无明显线特征模型的线特征点云提取结果,证明了本文方法的适用性.



a 房子模型



b 房子模型线特征点云



c 玩偶模型点云



d 玩偶线特征点云

图 6 一般模型的线特征提取结果

4　结　论

本文对传统的基于曲率提取线特征点云的方法进行了改进,通过分析点云姿态与拟合误差的关系,在拟合前先进行点云姿态标准化;通过对不同曲率估计方法对比,采用最大主曲率绝对值作为曲率估计值. 改进后的方法有较高的线特征提取效率,适合不同类型的线特征提取,能为点云处理的后续工作提供较好的线特征点云.

参考文献(References)

[1] 雷彦章,赵慧洁,姜宏志. 一种单双目结合的三维测量方法[J]. 光学学报,2008,28(7):1338-1342
Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1338-1342 (in Chinese)

[2] Jiang Hongzhi, Zhao Huijie, Li Xudong. High dynamic range fringe acquisition: a novel 3-D scanning technique for high-reflective surfaces[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(10): 1484-1493

[3] 柯映林,王青. 基于截面特征相容的曲面约束重构[J]. 浙江大学学报,2006,40(10):1715-1719
Ke Yinglin, Wang Qing. Study on feature compatibility in surface reconstruction[J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 40(10): 1715-1719 (in Chinese)

[4] 孙晓兰,赵慧洁,祝世平. 基于深度图像的边缘检测方法研究[J]. 光学技术,2005(9):219-223
Sun Xiaolan, Zhao Huijie, Zhu Shiping. The research of edge detection based on range image[J]. Optical Technique, 2005(9): 219-223 (in Chinese)

[5] Ramamurthy R, Navalgund M, Hu Qingying, et al. Smooth 3D edge detection in scarfed composite surfaces [C]//Huang P S. Proceedings of SPIE V6762. Bellingham WA: SPIE, 2007: 1-12

[6] Hou Qibin, Bai Li. Line feature detection from 3D point clouds via adaptive CS-RBFs shape reconstruction and multistep vertex normal manipulation[C]//Sarfraz M, Wang Yangsheng, Banissi E. Proceedings of the Conference on Computer Graphics, Imaging and Vision: New Trends. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society, 2005: 79-83

[7] 李文姬,钟约先,袁朝龙,等. 曲面重构中散乱点云数据曲率估算算法的研究[J]. 机械设计与制造,2006(6):43-45
Li Wenji, Zhong Yuexian, Yuan Chaolong, et al. Curvature estimation arithmetic for scatted data point cloud in surface reconstruction[J]. Machinery Design & Manufacture, 2006(6): 43-45 (in Chinese)

[8] Bentley J L. Multidimensional binary search trees used for associative searching [J]. Communication of the ACM, 1975, 18(9): 509-517

[9] Sharkaji C M. Least-squares fitting algorithms of the NST algorithm testing system[J]. Journal of Research of the National Institute of Standard and Technology, 1998, 103(6): 633-641

[10] Householder A S. Unitary triangularization of a nonsymmetric matrix [J]. Journal of the ACM, 1958, 5(4): 339-342

[11] 梅向明,黄敬之. 微分几何[M]. 北京:高等教育出版社,2008:82-102
Mei Xiangming, Huang Jingzhi. Differential geometry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 82-102 (in Chinese)

[12] Ho H T, Gibbins D. Curvature-based approach for multi-scale feature extraction from 3D meshes and unstructured point clouds [J]. IET Computer Vision, 2009, 3(4): 201-212

(编　辑:赵海容)

(上接第 1101 页)

[9] 张考,马东立. 军用飞机生存力与隐身设计[M]. 北京:国防工业出版社,2002
Zhang Kao, Ma Dongli. Military aircraft survivability and stealth design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002 (in Chinese)

[10] Pei Y, Song B F, Han Q. A generic calculation model for aircraft single-hit vulnerability assessment based on equivalent target [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(3): 183-189

[11] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000
Sui Shuyuan, Wang Shushan. Terminal effects[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000 (in Chinese)

[12] 李寿安,宋笔锋,李东霞. 飞机在单个射弹打击下的生存概率分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(3):121-124
Li Shouan, Song Bifeng, Li Dongxia. Survival probability analysis of aircraft under single shot[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(3): 121-124 (in Chinese)

[13] 赵伟,伞冶. 基于 q-高斯的模糊神经网络在飞机作战效能评估中的应用[J]. 北京理工大学学报,2010,30(6):674-677
Zhao Wei, San Ye. Fuzzy neural network based on q-Gaussian and its application in operational effectiveness evaluation of planes[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(6): 674-677 (in Chinese)

[14] 周勇,朱彦鹏. 黄土地区框架预应力锚杆支护结构设计参数的灵敏度分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(1):3115-3122
Zhou Yong, Zhu Yanpeng. Sensitivity analysis of design prrameters of grillage supporting structure with prestressed anchor in loess region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 3115-3122 (in Chinese)

[15] Li X D, Engelbrecht A P. Particle swarm optimization: an introduction and its recent developments[C]//Genetic Evolutionary Computation Conference. New York: [s. n.], 2007: 3391-3414

[16] Volpe V, Schiavone J M. Balancing design for survivability [R]. AIAA-1993-982-715, 1993

(编　辑:李　晶)