

基于 Delaunay 三角化的噪声点云非均匀采样

李国俊*, 李宗春, 侯东兴

(信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450052)

(*通信作者电子邮箱 1010551750@qq.com)

摘要: 针对基于 Delaunay 三角化曲面重建方法要求点云密度满足 ε -sample 条件, 提出了一种基于 Delaunay 三角化的噪声点云非均匀采样算法。首先, 利用 k -邻近点的 Voronoi 顶点计算出各点的负极点来逼近曲面中轴(MA); 然后, 根据近似中轴估计出曲面局部特征尺度(LFS); 最后, 结合 Bound Cocone 算法, 删除多余的非边界点。实例表明, 该算法可以准确、稳健地简化噪声点云, 同时可以很好地保留曲面边界特征, 经简化后的点云适用于基于 Delaunay 三角化的曲面重建方法。

关键词: Delaunay; 边界探测; 非均匀采样; 曲面重建

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Delaunay-based Non-uniform sampling for noisy point cloud

LI Guojun*, LI Zongchun, HOU Dongxing

(Institute of Geography Space Information, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450052, China)

Abstract: To satisfy ε -sample condition for Delaunay-based triangulation surface reconstruction algorithm, a Delaunay-based non-uniform sampling algorithm for noisy point clouds was proposed. Firstly, the surface Medial Axis (MA) was approximated by the negative poles computed by k -nearest neighbors' Voronoi vertices. Secondly, the Local Feature Size (LFS) of surface was estimated with the approximated medial axis. Finally, combined with the Bound Cocone algorithm, the unwanted interior points were removed. Experiments show that the new algorithm can simplify noisy point clouds accurately and robustly while keeping the boundary features well. The simplified point clouds are suitable for Delaunay-based triangulation surface reconstruction algorithm.

Key words: Delaunay; boundary detection; non-uniform sampling; surface reconstruction

0 引言

近年来,随着计算机技术、三维激光扫描技术等快速发展,三维散乱点云的曲面重建技术得到了广泛的研究与应用。根据重建曲面的表示形式不同,可将曲面重建方法分为参数曲面重建、隐式曲面重建、变形曲面重建、细分曲面重建和网格曲面重建^[1]。

基于 Delaunay 三角化的曲面重建方法是唯一具有严格理论证明的网格曲面重建方法。几种典型的算法有:Crust 算法^[2]、Power Crust 算法^[3]、Cocone 算法^[4]、Bound Cocone 算法^[5]、Tight Cocone 算法^[6]、Robust Cocone 算法^[7]和 Singular Cocone 算法^[8]等。此类算法可以在理论上保证重建曲面拓扑关系正确,但 Delaunay 三角化的复杂度高,不适合处理海量点云。因此,可在确保采样点密度满足曲面重建要求的前提下,尽可能保留曲面边界特征,通过减少重建点云数量来提高算法速度。

本文在文献[9-10]的基础上,提出了一种基于 Delaunay 三角化的噪声点云非均匀采样算法,该算法可以很好地保留曲面边界特征,经简化后的点云适用于基于 Delaunay 三角化

的曲面重建方法,并实例对比分析了不同算法的曲面重建效果。

1 基本定义

足够的采样密度是曲面重建的基础,基于 Delaunay 三角化的曲面重建方法要求点云采样密度满足 ε -sample 条件,下面是关于 ε -sample^{[11]16}的几个定义:

定义1 Σ 表示一空间曲面, M 表示与 Σ 有一个以上最近点的点所形成的闭包,则 M 称为 Σ 的曲面中轴(Medial Axis, MA)。

定义2 x 表示曲面 Σ 上一点, $f(x)$ 表示 x 到 M 的最小距离,则 $f(x)$ 称为曲面 Σ 在 x 处的局部特征尺度(Local Feature Size, LFS)。

定义3 P 表示曲面 Σ 的采样点集,对于 Σ 上任意点 x , P 中都存在点 p 满足 $\|x - p\| \leq \varepsilon f(x)$,则 P 满足曲面 Σ 的 ε -sample 条件。

图1为 ε -sample示意图。 ε -sample具有以下三个特点:

- 1) ε 取值一般要求小于0.4;
- 2) ε -sample 仅定义采样密度的下界,无需采样密度一致;

收稿日期:2014-04-30;修回日期:2014-06-20。

作者简介: 李国俊(1990-),男,湖北武穴人,硕士研究生,主要研究方向:地面三维激光扫描仪、精密工程测量; 李宗春(1973-),男,山东日照人,教授,博士,主要研究方向:天线测量、工业测量系统、精密工程测量; 侯东兴(1988-),男,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向:地面三维激光扫描仪、精密工程测量。

3) 曲面局部特征变化越明显, $\varepsilon f(x)$ 越小, 采样密度要求越高, 局部细节信息越丰富。

2 非均匀采样算法

2.1 局部特征尺度估计

中轴对于曲面细节微小变化十分敏感, 如图2所示。局部特征尺度估计的关键在于中轴计算是否准确, 一般情况下曲面是未知的, 只能由采样点表示, 因此采样数据的微小误差会对中轴产生很大的影响, 导致严格意义上的中轴计算非常困难。目前, 比较常见的是采用 Voronoi 图逼近中轴^[12]。

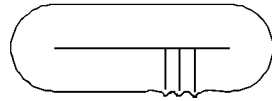
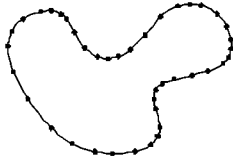


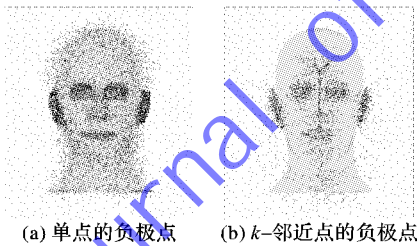
图1 ε -sample 示意图 图2 曲面细节微小变化对中轴的影响

当点云不存在噪声时, 采用单点计算的极点可以很好地逼近曲面中轴; 当点云存在噪声时, 部分极点会贴近曲面。文献[13]以 k -邻近点为整体计算极点具有良好的抗差性, 由于各点与负极点的距离比与正极点距离小, 因此仅采用负极点逼近曲面中轴用于估计曲面局部特征尺度。

近似中轴流程如下:

- 1) Delaunay 三角化点集 P ;
- 2) 对于 P 中任一点 p , 计算出其 k -邻近点 N_p ;
- 3) 计算 N_p 中各点至其对应 Voronoi 单元顶点 v_{p_1} 距离最大点 p_1 ;
- 4) 计算 N_p 中各点至其对应 Voronoi 单元顶点 v_{p_2} 距离最大且 $\angle(\overrightarrow{p_1 v_{p_1}}, \overrightarrow{p_2 v_{p_2}}) > \pi/2$ 的点 p_2 ;
- 5) 提取出所有的负极点 v_{p_2} 。

图3所示为含模拟噪声 mannequin 的近似中轴。



(a) 单点的负极点 (b) k -邻近点的负极点

图3 含噪声 mannequin 的近似中轴

显然, 图3(b)采用 k -邻近点估计的中轴明显优于图3(a)采样单点估计的中轴, 但部分极点与采样点距离非常大, 若将各点的对应极点作为最近的中轴点, 则可能造成部分点估计的局部特征尺度过大。因此, 根据定义2, 可利用采样点到最近极点的距离估计局部特征尺度。

2.2 边界探测

为保留曲面边界特征, 在进行非均匀采样之前, 利用 Bound Cocone 算法探测出所有的边界点, 引出以下定义^[4]:

定义4 p 为一采样点, p^+ 表示 p 的正极点, 则 $C_p = \{y \in V_p : \angle(\overrightarrow{py}, \overrightarrow{pp^+}) \geq 3\pi/8\}$ 表示点 p 的 Cocone 区域, 该区域以 p 为顶点, 形成对顶的圆锥区域。

定义5 V_p 为采样点 p 的 Voronoi 单元, 则 V_p 的半径 $r_p = \max\{\|y - p\| \mid y \in C_p\}$, 高度 $h_p = \|p - p^+\|$, p^- 为 p 的负极点。

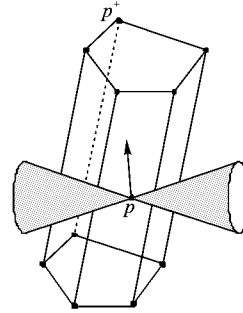


图4 Cocone 区域

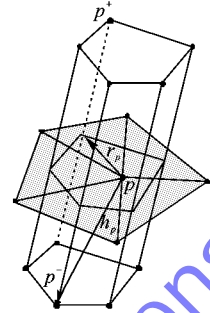


图5 Voronoi 单元半径与高度

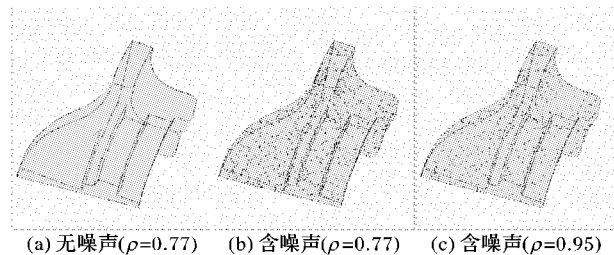
根据内部点的 Voronoi 单元细长且极点方向与法向近似一致的特性, 经严格证明^[5], 同时满足以下两个条件的采样点必为内部点。

- 1) 比例条件: $r_p \leq \rho h_p$;
- 2) 法向条件: q 的 Cocone 邻点为 $N_q = \{p \in P : C_q \cap V_p \neq \emptyset\}$, 对于所有以 p 为 Cocone 邻点的点 q , 满足 $\angle(V_p, V_q) \leq \alpha$ 。

边界探测流程如下:

- 1) 计算所有 Voronoi 单元的半径 r_p 与高度 h_p ;
- 2) 初始化所有的点为内部点;
- 3) 若点 p 满足 $r_p \geq \rho h_p$, 或者任意以 p 为 Cocone 邻点的点 q , 满足 $\angle(V_p, V_q) > \alpha$, 则该点为边界点, 其余点为初始内部点;
- 4) 进一步检测满足比例条件但不满足法向条件的所有边界点, 若存在以 p 为 Cocone 邻点的点 q , 满足 $\angle(V_p, V_q) \leq \alpha$, 则该点为内部点。

图6所示为无噪声和含模拟噪声的 fandisk 边界探测结果。



(a) 无噪声($\rho=0.77$) (b) 含噪声($\rho=0.77$) (c) 含噪声($\rho=0.95$)

图6 边界探测效果

图6(a)是 $\rho = 0.77$ 时无噪声 fandisk 边界探测结果, 图6(b)、(c)分别是 $\rho = 0.77$ 和 $\rho = 0.95$ 时含噪声 fandisk 边界探测结果。Bound Cocone 算法的理论证明是基于无噪声数据的, 因此图6(a)中的边界探测效果很好。当点云存在噪声时, 各点的 Voronoi 单元会稍变扁平, 此时适当增大 ρ , 同样可以取得较好的边界探测效果, 且非边界处探测出的错误边界点分布散乱, 对下一步非均匀采样影响很小。

2.3 非均匀采样

利用近似中轴可估计出点 p 的局部特征尺度 $f(p)$, 曲面上与该点距离小于 $\varepsilon f(p)$ 的微小曲面片的细节特征可通过该

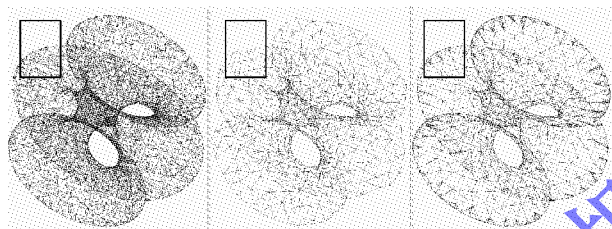
点充分地表达,在保留曲面边界特征的情况下,该微小曲面片内的其余内部点可全部删除。

结合 2.1 节和 2.2 节,非均匀采样流程如下:

- 1) Delaunay 三角化点集 P ;
- 2) 采用 Bound Cocone 算法探测出所有的边界点;
- 3) 以 k -邻近点为整体,计算出点集 P 的所有负极点;
- 4) 针对各采样点 p ,计算 p 与最近极点的距离 $f(p)$;
- 5) 以点 p 为球心, $ef(p)$ 为半径进行球形域搜索,保留点 p ,删除区域内其余内部点。

3 算法验证

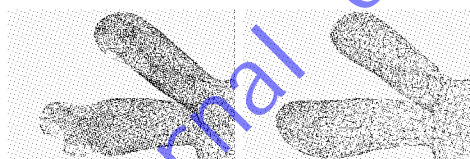
在 Windows 7 系统、Intel Core2 T6670 CPU 2.2 GHz 下,基于 CGAL^[14] 和 VTK^[15] 实现了本文算法。为验证边界探测的效果,使用的数据是 hypersheet,曲面重建算法采用 Bound Cocone 算法。图 7(a) 是原始数据;图 7(b) 是未探测边界的非均匀采样;图 7(c) 是基于边界探测的非均匀采样。



(a) 原始数据 (b) 未探测边界采样 (c) 探测边界采样
图 7 边界探测后曲面重建效果

对比图 7 方框中的边界区域,以图 7(a) 为理想参考,图 7(c) 的边界特征保留状况明显优于图 7(b)。因此,在进行非均匀采样之前,有效的边界探测有助于保留曲面边界特征。

进一步验证采用最近极点估计局部特征尺度的必要性。使用的数据是 bunny,采用 Bound Cocone 算法进行曲面重建。图 8(a) 采用各点对应极点估计局部特征尺度;图 8(b) 采用最近极点估计局部特征尺度。



(a) 各点对应极点 (b) 最近极点
图 8 极点选择的影响

显然,无论是从理论还是实际效果上看,采用最近极点估计局部特征尺度更为合理。

最后,为验证本文算法同样适用于噪声点云,采用的数据是三维激光扫描仪 Riegl VZ400 实测的某雷达罩数据。由于雷达罩具有边界,目前很难对含边界的噪声点云进行具有严格理论证明的曲面重建^{[11]150},为保留曲面边界特征,当点云噪声较小时可采用 Bound Cocone 算法进行曲面重建。

从图 9 可以看出,由于受到点云噪声的影响,文献[10]的曲面中轴估计不准确,造成部分区域局部特征尺度估计不合理,最终导致算法失败。本文算法在保留曲面边界的同时,能够对噪声点云进行合理的非均匀采样,采样后的点云适用

于基于 Delaunay 三角化的曲面重建方法。

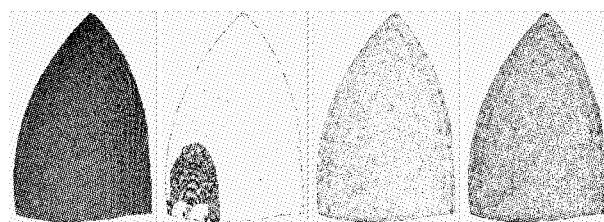


图 9 噪声点云非均匀采样

不同点云非均匀采样耗时如表 1 所示。

表 1 非均匀采样耗时

点云	点数		效果图	耗时/s		
	采样前	采样后		Delaunay	非均匀采样	总耗时
hypersheet	6 752	1 533	图 7(c)	0.45	1.40	1.85
bunny	35 947	3 649	图 8(b)	1.87	6.22	8.09
雷达罩	364 806	4 362	图 9(c)	16.37	47.87	64.24

4 结语

本文从 ε -sample、曲面中轴和局部特征尺度等的基本定义出发,结合 Bound Cocone 算法,提出了一种基于 Delaunay 三角化的噪声点云非均匀采样算法,并实例验证了该算法在处理含边界的噪声点云时的有效性和稳健性,非均匀采样后的点云适用于基于 Delaunay 三角化的曲面重建方法。

但该算法需要进行大量的 k -邻近点和球形邻域搜索,算法速度有待进一步提高。由于曲面中轴是近似得到的,部分参数的设置与噪声水平相关,下一步可考虑提高算法的自动化程度。

参考文献:

- [1] ZHU D. PCL manual [M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 359 - 360. (朱德海. 点云库 PCL 学习教程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 359 - 360.)
- [2] AMENTA N, BERN M. Surface reconstruction by Voronoi filtering [J]. Discrete and Computational Geometry, 1999, 22(4): 481 - 504.
- [3] AMENTA N, CHOI S, KOLLURI R K. The power crust [C]// Proceedings of the 6th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. New York: ACM, 2001: 249 - 266.
- [4] AMENTA N, CHOI S, DEY T K, et al. A simple algorithm for homeomorphic surface reconstruction [C]// Proceedings of the 16th Annual Symposium on Computational Geometry. New York: ACM, 2000: 213 - 222.
- [5] DEY T K, GIESEN J. Detecting undersampling in surface reconstruction [C]// Proceedings of the 17th Annual Symposium on Computational Geometry. New York: ACM, 2001: 257 - 263.
- [6] DEY T K, GOSWAMI S. Tight cocone: a water-tight surface reconstructor [C]// Proceedings of the 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. New York: ACM, 2003: 127 - 134.
- [7] DEY T K, GOSWAMI S. Provable surface reconstruction from noisy samples [C]// Proceedings of the 20th Annual Symposium on Computational Geometry. New York: ACM, 2004: 330 - 339.
- [8] DEY T K, WANG L. SMI 2013: Voronoi-based feature curves extraction for sampled singular surfaces [J]. Computers and Graphics, 2013, 37(6): 659 - 668.

(下转第 2929 页)

仅仅只是高斯模糊图像与高斯白噪声图像,常见的失真图像还包括 JPEG 压缩、JPEG2000 压缩图像以及同时含有多种失真类型的图像等,如何有效、准确地评价其他类型的失真图像的质量将是进一步研究方向。

参考文献:

- [1] FERZLI R, KARAM L J. A no-reference objective image sharpness metric based on the notion of Just Noticeable Blur (JNB) [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(4): 717–728.
 - [2] HASSEN R, WANG Z, SALAMA M. No-reference image sharpness assessment based on local phase coherence measurement [C]// *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 2434–2437.
 - [3] XIE X, ZHOU J, WU Q. No-reference quality index for image blur [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(4): 921–924. (谢小甫, 周进, 吴钦章. 一种针对图像模糊的无参考质量评价指标 [J]. *计算机应用*, 2010, 30(4): 921–924.)
 - [4] CHEN M J, BOVIK A C. No-reference image blur assessment using multiscale gradient [J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2011(3): 1–11.
 - [5] SANG Q, LI C, WU X. No-reference blurred image quality assessment based on gray level co-occurrence matrix [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2013, 26(5): 492–497. (桑庆兵, 李朝锋, 吴小俊. 基于灰度共生矩阵的无参考模糊图像质量评价方法 [J]. *模式识别与人工智能*, 2013, 26(5): 492–497.)
 - [6] CIANCIO A, da COSTA A L N. No-reference blur assessment of digital pictures based on multifeature classifiers [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(1): 64–75.
 - [7] LI X. Blind image quality assessment [C]// *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Image Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2002, 1: 449–452.
 - [8] XIAO W. Spatial no-reference image quality assessment [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2006. (肖文. 空域无参考的图像质量评价 [D]. 南昌: 江西财经大学, 2006.)
 - [9] HU X, ZHANG X, CHEN J. An image edge detecting algorithm fused with wavelet transform and mathematical morphology [J]. *Journal of China Railway Society*, 2011, 33(3): 45–48. (胡晓辉, 张晓颖, 陈俊莲. 一种融合小波变换和数字形态学的图像边缘检测算法 [J]. *铁道学报*, 2011, 33(3): 45–48.)
 - [10] GUO Y, YU M, ZHU Q. No reference image quality assessment based on sub-bands similarity and statistical analysis for JPEG2000 [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1496–1500. (郭迎春, 于明, Zhu Qiu-ming. 基于子带结构相似性分析的 JPEG2000 图像无参考质量评价 [J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(6): 1496–1500.)
 - [11] JIANG M, MA Z, XIN Y, *et al.* Image quality evaluation method base on digital wavelet transform and vision weighted [J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(9): 130–136. (蒋铭, 马兆丰, 辛宇, 等. 基于 DWT 和视觉加权的图像质量评价方法研究 [J]. *通信学报*, 2011, 32(9): 130–136.)
 - [12] MA W, ZHAO B, REN H, *et al.* A criterion of image quality assessment based on wavelet frequency band partition and CSF property [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(7): 688–690. (马文波, 赵保军, 任宏亮, 等. 基于小波频带划分及 CSF 特性的图像质量评价方法 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(7): 688–690.)
 - [13] YANG C-L, CAO W-R, PO L-M. Discrete wavelet transform-based structural similarity for image quality assessment [C]// *Proceedings of the 2008 15th IEEE International Conference on Image Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2008: 377–380.
 - [14] XU Y, YIN D. An image quality assessment algorithm based on contourlet transform [J]. *Electronic Technology*, 2010, 47(7): 23–26. (徐云生, 尹东. 一种基于 Contourlet 变换的图像质量评价算法 [J]. *电子技术*, 2010, 47(7): 23–26.)
 - [15] VQEG. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment [EB/OL]. [2014-01-12]. <http://www.vqeg.org/>.
 - [16] ZHOU W, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600–612.
 - [17] CHEN G-H, YANG C-L, PO L-M, *et al.* Edge-based structural similarity for image quality assessment [C]// *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2006, 2: 933–936.
-
- (上接第 2924 页)
- [9] GAO S, LU H, ZHOU W. A fast algorithm for surface reconstruction from unorganized points [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, 7(12): 108–112. (高山, 卢汉清, 周万宁. 散乱点的快速曲面重建方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2002, 7(12): 108–112.)
 - [10] NI T, YANG C. A fast surface reconstruction algorithm based on border-estimation for 3D unorganized points [J]. *Journal of Computer Applications*, 2006, 26(7): 1580–1582. (倪彤光, 杨长春. 基于边界检测的三维散乱点快速曲面重建算法 [J]. *计算机应用*, 2006, 26(7): 1580–1582.)
 - [11] DEY T K. Curve and surface reconstruction: algorithms with mathematical analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 14–16.
 - [12] AMENTA N, BERN M, KAMVYSSELIS M. A new Voronoi-based surface reconstruction algorithm [C]// *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM, 1998: 415–421.
 - [13] DEY T K, SUN J. Normal and feature approximations from noisy point clouds [C]// *Proceedings of the 26th International Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science*. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 21–32.
 - [14] CGAL. Computational geometry algorithm library [EB/OL]. [2014-06-20]. <http://www.cgal.org>.
 - [15] VTK. Visualization toolkit [EB/OL]. [2014-06-20]. <http://www.vtk.org>.