

基于曲率的植物三维点云精简算法的优化

黄天天¹, 刘波^{1,2*}

(1.湖南农业大学信息科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省农村农业信息化工程技术研究中心, 湖南 长沙 410128)

摘 要: 针对植物三维点云精简时特征信息提取不准确的情况, 提出局部曲率误差和法向量夹角相结合的区域复杂度判断方法, 对曲率精简算法进行改进。将每个数据点 K 邻域内曲率标准差和法向量夹角与阈值进行比较, 确定局部区域的复杂情况, 采用不同精简率判定邻域点是否保留, 统计其保留概率, 最后通过整体精简率和保留概率确定数据点的取舍。通过与传统精简算法进行对比分析, 在相近精简率下, 提出的局部曲率误差-法向量夹角法精简后的植物叶片、叶脉特征更明显, 封装建模后的偏差减小了 25%以上。

关 键 词: 植物; 三维点云精简算法; 局部曲率; 保留概率; K 邻域

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2018)05-0570-05

The optimization of 3D point cloud simplified algorithm for plants based on curvature

HUANG Tiantian¹, LIU Bo^{1,2*}

(1.College of Information Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;
2.Hunan Engineering Technology Research Center, Agricultural & Rural Information, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: In view of the inaccurate extraction of feature information for plant 3D point cloud simplification, a judging method of the region complexity was proposed to optimize the curvature simplified algorithm by combining the error of the local curvature and the normal vector angle. Comparing the standard deviation of curvature and the normal vector angle with the threshold of K neighborhood in each data point, the complexity of the local area is determined. Then, different reduction rates are used to determine whether the neighborhood points are retained or not, and their retention probabilities are counted. Finally, the trade-off between data points is determined through the overall reduction rate and retention probability. Compared with the traditional simplified algorithm applied to the plant point cloud, the results show that the leaf vein characteristics of the leaf are more obvious, and the deviation is reduced by more than 25% under the similar reduction rate.

Keywords: plants; simplification of 3D point cloud; local curvature; retention probability; K -nearest neighbors

近年来, 随着数据获取技术、计算图形学的快速发展, 植物的三维建模越来越多地使用三维重建技术^[1]。基于真实数据的植物三维重构可以获取植物各器官的动态参数数据, 跟踪植物生长信息^[2], 因此, 对于使用实测三维数据进行植物真实器官及植株的重建研究也更加广泛。这种通过扫描设备获

得的三维点云数据量大、模型较为复杂, 除占用存储空间外, 还会严重影响后续曲面重构的处理速度; 因此, 需进行数据精简, 在减少数据量的同时尽可能保留点云主要特征, 是真实植物三维建模中非常重要的点云数据预处理过程。

三维点云数据精简主要有 2 个方向: 一是基于

收稿日期: 2017-12-02

修回日期: 2018-05-29

基金项目: 湖南省制造强省专项(2017029); 湖南省科学技术厅重点项目(2015NK2145, 2016NK2118); 湖南农业大学团委科技创新立项(2016ZK15, 2017ZK25)

作者简介: 黄天天(1993—), 女, 湖南株洲市人, 硕士研究生, 主要从事农业信息工程和农业物联网研究, 601579204@qq.com; *通信作者, 刘波, 博士, 副教授, 主要从事数据库技术、物联网技术、农业信息化研究, 6633873@qq.com

空间区域划分^[3]进行精简,适用于模具、航空等模型零件表面几何信息单一的制造领域,典型的算法有包围盒法、三角网格法等;二是适用于表面特征复杂的基于曲率数据精简法^[4-5],主要是根据曲率大小或变化结合特定原则判定数据点是否保留,以达到精简的目的^[6],如最小距离法、角度偏差法等^[7]。王莹莹^[8]以牙齿点云数据为例,提出曲面拟合前根据法向量对点云位置进行调整,以加强曲率估算的准确性,再根据曲率大小进行精简,对整体曲率差值不大的牙齿点云数据有较好的精简效果,但这对植物等曲率变化剧烈的情况适用性不强。姜吕^[9]在对兔子点云数据进行曲率估算的基础上,采用不同距离阈值对不同曲率高低部分进行采样,提出曲率-最短距离采样法,在曲率精简基础上利用最短距离法提高稳健性,但对于植物曲率变化复杂的点云精简率过小。刘文锋^[10]以猫和人脸数据为对象,提出结合两级模糊模式识别模型选取曲率和法向量偏差作为精简指标来保留代表点。姚亚盼^[11]提出将法向量和曲率相结合,对于曲率变化小的区域通过计算法向量夹角重新判断精简率,避免在具有相近弯曲度的曲面由于精简过度出现棱角。麻卫峰等^[12]以兔子和建筑狮子点云作为实验数据,利用局部曲率中误差大小来衡量局部区域内的曲率变化,并设置局部曲率中误差的变化阈值,根据点的精简概率来判断数据点是否需要保留,从而进行精简,较好地保留了特征点。植物的点云精简需尽可能保留叶片、叶脉特征信息,因而对这些细节特征的保留有待加强。笔者根据植物点云精简的特点,提出在局部利用法向量夹角和曲率误差相结合来判断该区域特征的方法,对不同特征的区域设定不同的精简率来精简,最后根据整体精简率和点的保留概率判定数据点是否保留。

1 曲率和法向量计算

曲率计算采用二次曲面拟合法^[13],其步骤较简单,稳定性较强,主要通过某个数据点及其 K 个临近点拟合二次抛物面,计算抛物面的平均曲率,将抛物面的平均曲率作为该点的曲率。

1.1 K 邻域搜索

采用包围盒法^[11]建立数据点的邻域集合。首先

根据三维数据点的 x 、 y 、 z 坐标确定包含所有点的最小长方体的边长 M 、 N 、 L ,将这个长方体全部划分成边长为 l 的小栅格,假设三维点云中总共有 n 个点,所期望的每个栅格中平均包含 w 个点,则

$$l = \sqrt[3]{\frac{w}{n} \times MNL} \quad (1)$$

划分栅格后,对每一个小栅格 x 、 y 、 z 3 个坐标方向进行编号。编号从 0 开始,则可以计算出任意点 p_i 所在的小栅格编号。

$$M_i = x_i - x_{\min} / l, N_i = y_i - y_{\min} / l, L_i = z_i - z_{\min} / l$$

式中, $x_{\min}$ 、 $y_{\min}$ 、 $z_{\min}$ 分别表示所有数据点 x 、 y 、 z 坐标轴上的最小值。

通过包围盒划分后,对三维点云中任意点 p_i 进行 K 邻域搜索。搜索时,首先搜索 p_i 所在及周围相邻的 27 个小栅格,若搜寻后的邻域点不到 K 个,则扩展一圈直至找到 K 邻域。

1.2 局部曲面拟合

确定三维数据点的 K 邻域后,根据临近点,利用最小二乘法拟合局部曲面,曲面的数学方程为:

$$Z(x,y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f \quad (2)$$

式中: x 、 y 为坐标参数; a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 分别为曲面方程的各项系数。

根据最小二乘法原理,使目标函数最小,则对各系数分别求导可构造目标矩阵^[8]。

$$[S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = W^T$$

其中:

$$W = \left[\sum_{i=0}^k z_i x_i^2, \sum_{i=0}^k z_i x_i y_i, \sum_{i=0}^k z_i y_i^2, \sum_{i=0}^k z_i x_i, \sum_{i=0}^k z_i y_i, \sum_{i=0}^k z_i \right];$$

$$S_1 = \left[\sum_{i=0}^k x_i^4, \sum_{i=0}^k x_i^3 y_i, \sum_{i=0}^k x_i^2 y_i^2, \sum_{i=0}^k x_i^3, \sum_{i=0}^k x_i^2 y_i, \sum_{i=0}^k x_i^2 \right]^T;$$

$$S_2 = \left[\sum_{i=0}^k x_i^3 y_i, \sum_{i=0}^k x_i^2 y_i^2, \sum_{i=0}^k x_i y_i^3, \sum_{i=0}^k x_i^2 y_i, \sum_{i=0}^k x_i y_i^2, \sum_{i=0}^k x_i y_i \right]^T;$$

$$S_3 = \left[\sum_{i=0}^k x_i^2 y_i^2, \sum_{i=0}^k x_i y_i^3, \sum_{i=0}^k x_i^2 y_i^2, \sum_{i=0}^k x_i y_i^2, \sum_{i=0}^k y_i^3, \sum_{i=0}^k y_i^2 \right]^T;$$

$$S_4 = \left[\sum_{i=0}^k x_i^3, \sum_{i=0}^k x_i^2 y_i, \sum_{i=0}^k x_i y_i^2, \sum_{i=0}^k x_i^2, \sum_{i=0}^k x_i y_i, \sum_{i=0}^k x_i \right]^T;$$

$$S_5 = \left[\sum_{i=0}^k x_i^2 y_i, \sum_{i=0}^k x_i y_i^2, \sum_{i=0}^k y_i^3, \sum_{i=0}^k x_i y_i, \sum_{i=0}^k y_i^2, \sum_{i=0}^k y_i \right]^T;$$

$$S_6 = \left[\sum_{i=0}^k x_i^2, \sum_{i=0}^k x_i y_i, \sum_{i=0}^k y_i^2, \sum_{i=0}^k x_i, \sum_{i=0}^k y_i, \sum_{i=0}^k 1 \right]^T。$$

根据目标函数解出曲面方程的各系数,得到拟合的二次曲面。

1.3 曲率和法向量计算

任意点 p_i 曲面拟合完成后,根据曲面方程,计算该点平均曲率 H 和法向量 NV 。

$$NV = \frac{z_x \times z_y}{|z_x \times z_y|} \quad (3)$$

式中, z_x 、 z_y 为曲面的一阶偏导数。

$$H = \frac{(1+q^2)r - 2pqs + (1+p^2)t}{2(1+q^2+p^2)^{3/2}} \quad (4)$$

式中: $p = \frac{\partial z}{\partial x} = 2ax_i + by_i + d$; $q = \frac{\partial z}{\partial y} = bx_i + 2cy_i + e$;

$$r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 2a; s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = b; t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 2c。$$

2 点云精简算法

三维点云数据中每个数据点都有一个 K 邻域,也都被包含到其他数据点的 K 邻域中;而每个 K 邻域所拟合曲面的曲率变化和平坦程度都不同,单纯从数据点的曲率判断该邻域的曲面变化,不能准确区分平坦区域和变化大的复杂区域;因此,从局部区域的曲率标准差和法向量夹角同时判断区域的复杂度,针对不同复杂度设置不同的精简率,同时统计数据点在所有被计算次数中被保留的次数比例,即以保留概率作为该数据点最后精简的标准,其基本流程如图 1 所示。其中数据点保留概率的计算子流程如图 2 所示。

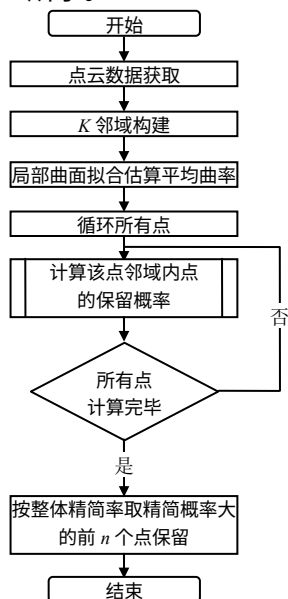


图 1 曲率精简算法流程

Fig.1 Flow of curvature reduction algorithm

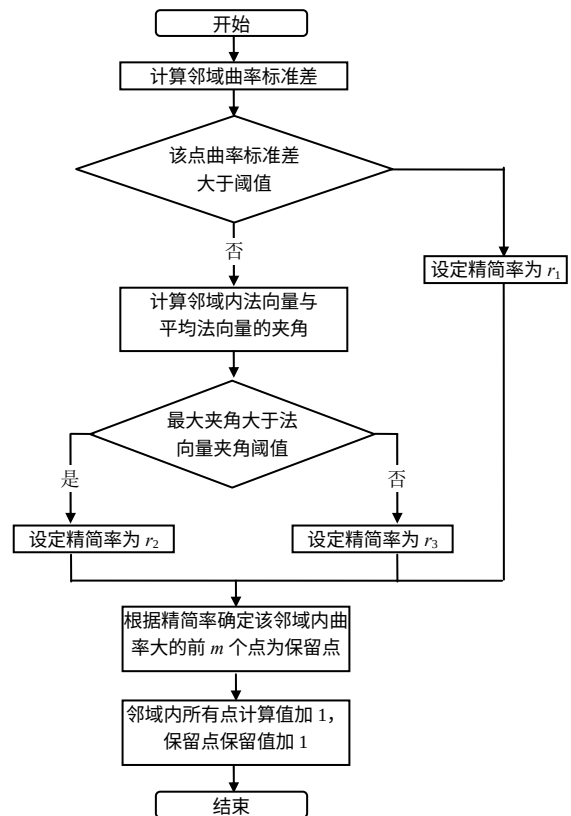


图 2 数据点保留概率计算流程

Fig.2 Calculation procedure of retention probability of data points

1) 对点云数据进行包围盒法划分,构建数据点的 K 邻域。

2) 对数据点进行邻域内局部曲面拟合,估算平均曲率和法向量,并设置局部曲率标准差阈值 σ 和法向量夹角阈值 g_0 。

3) 对于每个数据点的 K 邻域计算其局部曲率标准差 σ_i 。

4) 若 $\sigma_i > \sigma$, 则该邻域是复杂区域,设置较小精简率 r_1 , 若 $\sigma_i < \sigma$, 则计算邻域内数据点法向量与平均法向量之间的夹角,取最大夹角 g_i 。

5) 若 $g_i > g_0$, 则该邻域是比较复杂区域,设定中级精简率 r_2 , 若 $g_i < g_0$, 则该邻域是平坦区域,设定较大精简率 r_3 。

6) 根据由邻域类型设定的局部精简率,保留区域内曲率较大的点,将所有邻域点的计算次数加 1 次,保留点的保留次数加 1 次。

7) 所有邻域计算完毕后,将保留次数除以计算次数作为数据点的保留概率。

8) 根据整体精简率,将保留概率较大的点保留,完成三维点云的精简。

3 试验验证

点云精简效果的度量标准从精简率、特征点保留和精简速度 3 方面来衡量。通过 Matlab 语言编程,实现所提出的精简算法,并进行效果验证,分别采用通过三维扫描仪扫描得到的绿萝、红掌三维点云数据进行试验,并与包围盒精简算法、曲率精简算法^[14]的精简效果进行比较。

绿萝、红掌点云数据的精简结果分别如图 3 和图 4 所示。在局部曲率误差-法向量夹角精简法试

验中使用的 3 个精简率参数分别为 $r_1=40\%$, $r_2=80\%$, $r_3=90\%$, 整体精简率取 85%, 3 种方法的精简率都控制在 85%左右。同时为了验证算法对于植物点云精简的效果,采用 Geomagic Studio 将使用 3 种方法精简后的绿萝三维点云经过同样的步骤进行封装建模,与原始点云数据进行偏差分析,取标准偏差值代表不同精简方法的误差,其结果对比如表 1 所示。

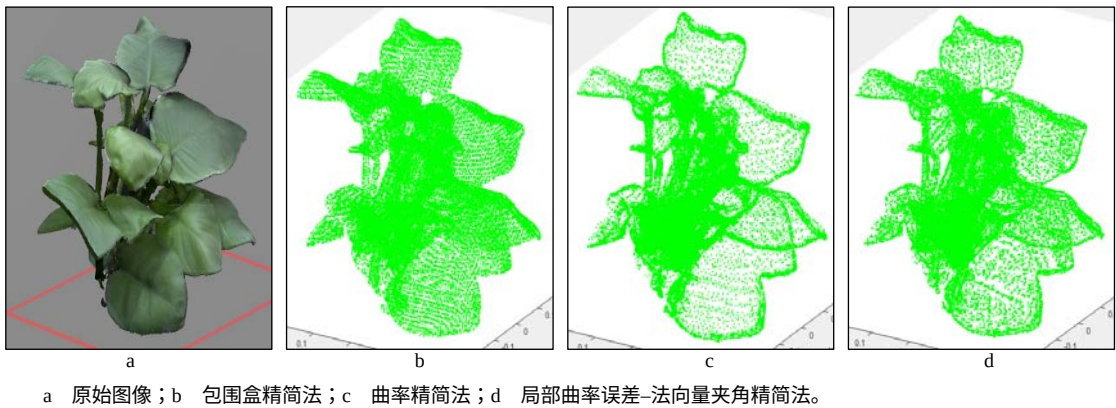


图 3 不同算法绿萝点云的精简效果

Fig.3 Simplification effect of different algorithms for scindapsus point cloud

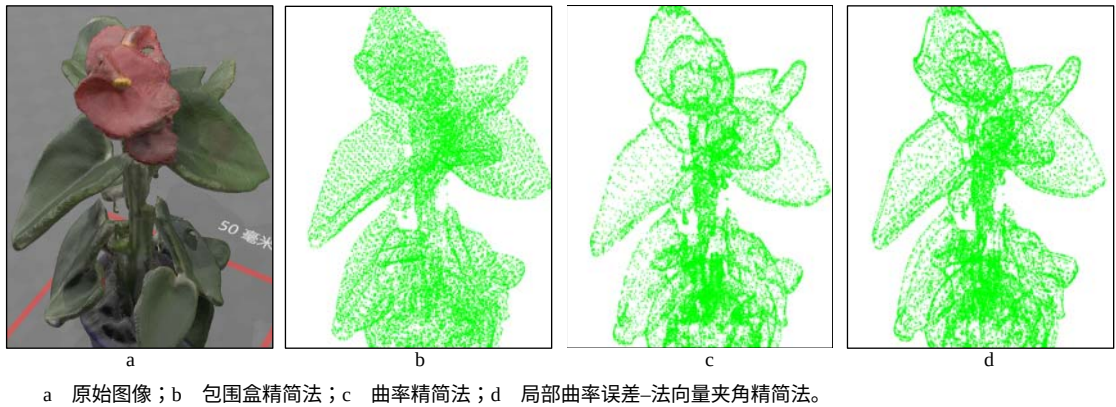


图 4 不同算法红掌点云的精简效果

Fig.4 Simplification effect of different algorithms for anthurium andraeanum point cloud

表 1 3 种方法精简后植物点云的标准偏差

Table 1 Deviation analysis of three methods for plants point cloud simplification

植物	精简方法	原始点数/个	精简后点数/个	精简率/%	标准偏差/mm
绿萝	包围盒精简算法	335 713	46 367	86.1	0.08
	曲率精简算法	335 713	53 520	84.1	0.09
	改进精简算法	335 713	50 357	85.0	0.06
红掌	包围盒精简算法	222 869	31 201	86.0	0.07
	曲率精简算法	222 869	32 984	85.2	0.07
	改进精简算法	222 869	33 431	85.0	0.04

从图 3 和图 4 可以看出,对于植物点云,包围盒法精简时,边缘特征丢失严重,在精简率相差不多的情况下,改进算法的叶片表面、叶脉保留特征信息较多,细节部分特征也能较好地保留;曲率精简法虽然保留了边缘点特征,但对叶片的保留点过少,叶脉的信息丢失也较多。从偏差分析的对比结果(表 1)可以看出,在精简率相近时,改进算法精简后点云重构与原模型的偏差更小,减少了 25%以上,表明改进的算法对于植物点云精简后的误差更小。对于植物这种三维形状更加复杂的点云来说,边缘点和细节部分信息都非常重要,因此,与一般基于曲率的精简算法相比,改进的结合曲率误差和法向量夹角判断特征信息,并以保留概率作为精简标准的算法更适合植物的三维点云精简。

参考文献:

- [1] 苏伟,刘睿,闫安,等.植物三维建模研究现状[J].农业网络信息,2013(9):17-20.
- [2] 刘丹,诸叶平,刘海龙,等.植物三维可视化研究进展[J].中国农业科技导报,2015(1):23-31.
- [3] 陈璋雯,达飞鹏.基于模糊熵迭代的三维点云精简算法[J].光学学报,2013(8):153-159.
- [4] 杨明珠.基于三维激光扫描点云数据特征点提取及建筑物重建[D].昆明:昆明理工大学,2017.
- [5] 李青蒙.激光扫描点云处理技术研究[D].大连:大连海事大学,2013.
- [6] FU J, JOSHI S B, SIMPSON T W. Shape differentiation of freeform surfaces using a similarity measure based on an integral of *Gaussian curvature*[J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(3): 311-323.
- [7] 李谦.基于曲率特征信息的点云数据处理[D].扬州:扬州大学,2014.
- [8] 王莹莹.基于方向矢量曲率估算的点云精简研究[J].信息技术,2015(6):23-26.
- [9] 姜吕.三维激光扫描点云数据精简算法研究[D].昆明:昆明理工大学,2017.
- [10] 刘文锋.基于两级模糊模式识别模型的点云精简算法研究[D].南昌:南昌大学,2016.
- [11] 姚亚盼.三维重建中的点云精简研究[D].太原:中北大学,2015.
- [12] 麻卫峰,周兴华,徐文学,等.一种基于局部曲率特征点云精简算法[J].测绘工程,2015,24(11):17-20.
- [13] HUANG J, MENG C H. Automatic data segmentation for feomeric feature extraction from unorganized 3D coordinate points[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automatic, 2001, 7(3): 268-279.
- [14] 侯洪臻.点云数据的预处理与曲面重建[D].北京:北京建筑工程学院,2010.

责任编辑:罗慧敏

英文编辑:吴志立