

基于多策略的三角网格面快速重构算法

倪小军, 姜晓峰, 葛 亮

(苏州大学 计算机科学与技术学院, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 针对三维散乱点云模型, 设计了一种基于多策略的三角网格面快速重构算法. 该算法首先利用自适应策略寻找自适应 k 邻, 将其进行投影后在局部区域利用相交不可见策略建立顶点连接关系, 在此基础上利用角度阈值策略和 Delaunay 准则变换策略对顶点关系进行优化, 最后将此顶点关系逆映射到三维空间, 得到三维点之间的连接关系, 从而达到三角网格面快速重构的目的. 实验结果表明此算法简单高效, 处理速度快, 重构效果好, 并且对点云数据均匀性要求相对不高.

关键词: 快速重构; 散乱点云; 多策略; 三角网格

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)01-0074-04

A Fast Surface Reconstruction Algorithm Based on Muti-strategies

NI Xiao-jun, JIANG Xiao-feng, GE Liang

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: In this paper, according to some available researches, a fast surface reconstruction algorithm based on multi-strategies is presented for three-dimensional scattered points. In this algorithm, we search the k -neighbor points by using adaptive search strategy and project these points onto local tangent planes at first, then we establish the connection relationships by the strategy of intersection is not visible. After that, we can optimize the relationship of points by angle threshold strategy and Delaunay criterion exchange strategy. At last, the connection of these points is mapped directly to 3-dimensional space, and we obtain the relationships of the points to reconstruct the surface quickly. Experiments show that the algorithm is easy and effective, and it can efficiently reconstruct the 3D surface with a faster speed.

Key words: fast reconstruction; scattered points; muti-strategies; triangle mesh

1 引言

无规则散乱点云模型的表面重构在逆向工程、计算机视觉、虚拟仿真和计算机辅助设计等领域有着广泛的应用前景. 而随着三维扫描和信息获取技术的发展, 所获得点云模型的数据量越来越大, 因此在保证精度的条件下的点云模型快速重构算法一直是研究的热点之一.

近年来, 相继提出了多种点云模型的重构算法. 一般可以分为三类: 细分法、距离函数法和区域扩张

法. 细分法又称为雕刻法, 由 Boissonnat 首先提出, 包括 Crust 算法、CoCone 算法以及衍生而来的 Power-Crust 算法等. 距离函数法首先构造点到物体表面的(有向)距离场, 然后计算距离场的零等值面, 即为重构曲面. 典型代表是由 Hoopé^[1]提出的近似切平面逼近法. 而区域扩张法是从种子点、种子边或种子网格出发进行表面增长构造的算法. 其中 Bernardini 提出了 ball-pivoting 算法, M. Gopi 和 Krishnan^[2]提出了基于投影的三角化技术, M. Gopi 的方法是以边界顶点做为种子点进行表面增长的算

法.文献[3-5]在基本思想不变的情况下改进了重构算法中的一些具体步骤以达到更好的效果.

通过分析发现,细分法的适用范围非常有限;而距离函数法涉及复杂的等值面抽取和法向一致性检查,重构非常耗时;区域扩张算法则适用于复杂的曲面采样,并且对大规模的点云数据的曲面重构有着很好的速度优势.但是区域扩张算法对于采样点有一定的要求,包括需要采样点结构均衡、有层次性以及曲面相对光滑等.本文针对一般增量算法由于对点云均匀性要求高而适用范围小的问题进行了改进,并且改进了网格生成的质量,提出了一种基于多策略的快速曲面重构方法.

2 算法描述

2.1 基本概念

(1) 最小包围盒和栅格:最小包围盒是指一个沿坐标轴方向且包含散乱数据点集的体积最小的长方体;栅格则是指建立某点的 k 个最近邻域时,对最小包围盒进行空间划分产生的小立方体.

(2) 自由点、活动点、边界点和确定点:在三角化过程中,还未经过任何处理的点称为自由点,它是孤立的,没有任何相邻三角形;活动点指参与过三角化过程,但不确定是否完成所有可能的三角化过程的点;边界点是指位于曲面 S 的边缘或者采样空洞边缘的点,这种点完成了周围所有三角化过程,但与周围邻接点形成的边不一定属于两个相邻三角形;确定点则是指参与了所有可能的三角化过程,并且与邻接点形成的边都属于两个相邻三角形的点.

(3) 边界边、内部边、边界顶点链表和内部顶点链表:在三角化过程中,如果点和邻接点的连线边只属于一个三角形,则称该边为边界边;如果点和邻接点的连线边属于两个相邻三角形,则称该边为内部边.而用来存放点的所有边界边对应邻接点的链表称为边界顶点链表;存放点的所有内部边对应邻接点的链表称为内部顶点链表.

2.2 算法基本流程

算法的基本流程见图1.值得强调的是邻接点的选择是本算法的关键,也是本文所研究的重点.

2.2.1 k -邻域搜索

由于空间散乱点云模型中不存在拓扑信息,需要首先为其建立一个松散的邻域结构.设点云模型中的测点集合 $Cloud = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} p_i \in R^3$,任一测点 $p \in Cloud$,则与测点 p 距离最近的 k 个点,称为 p 的 k -邻域,记作 $N(p)$.为了提高搜索的效

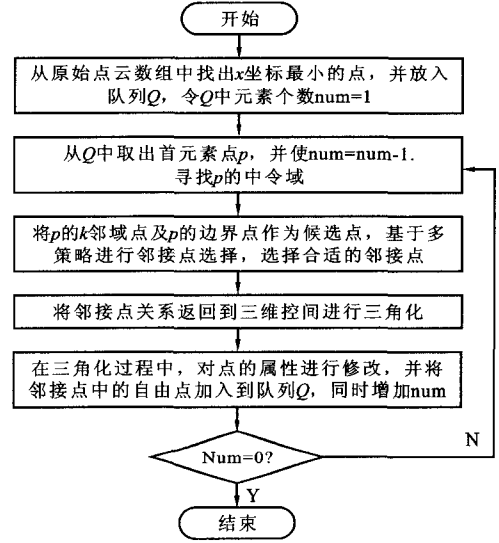


图1 流程

率,本文采用了如下近似最佳搜索的二次栅格的方法寻找 k 邻:

(1) 首先参照熊邦书^[6]的方法,根据点云数据点的最小包围盒的体积大小、点的总数 N 和邻近点的数目 k ,计算出栅格的边长 L' ,把最小包围盒分成大小相同的栅格.

$$L' = \alpha_1 * \sqrt[3]{k * L_x * L_y * L_z / N} \quad (1)$$

式中, α_1 为控制因子,用于调节栅格边长的大小,本算法取值0.35; L_x, L_y, L_z 分别是点云最小包围盒在 X, Y, Z 轴的长度.

(2) 然后根据非空栅格数、首次划分的边长 L' 和数据点个数来估算平均点距 d_{avg} ,再采用此平均点距进行二次栅格化,计算出最终栅格边长 L ,在此基础上将各数据点归入相应栅格内.

$$L = \frac{1}{3} * \sqrt{k} * d_{avg} \quad (2)$$

(3) 在当前栅格搜索 p 的最近 k 邻点,按距离增序排列;如果在当前栅格内候选点的 k 邻已找到,并且距离都小于点 p 到栅格六个面的最短距离,则候选点的 k 个最近邻域搜索结束;否则栅格向外扩张一圈,继续按此规则搜索.

该基于二次栅格的搜索算法使得 K 近邻搜索算法的搜索范围大大缩小,搜索速度明显提高.

2.2.2 切平面估算

设点云模型中的测点集合为 $Cloud = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} p_i \in R^3$,任一测点 $p \in Cloud$ 的 k -邻域为 $N(p)$,采用最小二乘法在 $N(p)$ 内构造的平面称为点 p 在邻域 $N(p)$ 上的切平面,记作 $T(p)$. $T(p)$ 的单位法矢就是点 p 处的单位法矢 n .

2.2.3 邻接点选择

邻接点的选择是本算法中的核心,与其他算法不同的是本文采用了通过多策略寻找邻接点并进行优化选择.采用自适应均衡策略对 k 邻进行处理,克服固定 k 值影响重构效果的缺点,同时降低对点云均衡性的要求;采用相交不可见策略来避免生成三角形的边交叉;采用角度阈值策略减少生成非常狭长的三角形,并有效检测空洞和边界;采用Delaunay 准则变换策略改善生成三角网格的质量.

(1) 自适应策略

2.2.1 节中给出了顶点 p 的 k 邻点集 $N(p)$ 求取方法,其中 k 值的选择是一个值得思考的问题.当 k 值较小时,重构质量相对较好,但易形成空洞;而 k 值较大则会容易形成狭长三角形且增加计算时间.一般算法中对 k 值的处理是采用人为选定固定值的方法,而在本文算法中采用了下面所述的自适应策略来进行处理.

由于顶点 p 周围27个栅格(含自身栅格)中点的数目可以近似反映采样点的局部密度,可以依据此来动态决定 k ,使得 k 的数值能够自适应于采样点的密度,即根据各局部密度插值划分,使其所取 k 值分别8~12,密度最小的地方取12,密度最大的地方取8,从而实现了 k 值的自适应选取,降低了对点云均衡性的要求,并且提高了重构质量.

(2) 投影坐标变换

按照本文2.2.2节中所述方法计算出顶点 p 处的切平面 $T(p)$ 后,即可将顶点 p 及其自适应 k 邻域点 $N(p)$ 投影到切平面 $T(p)$,记为点集 $W(p)$.在 $T(p)$ 上建立局部坐标系,以参考点 p 为原点, p 和第一个邻域点 p_1 的投影点 p'_1 的连线作为 X 轴,将点集 $W(p)$ 逆时针排序.再将点 p 的边界点链表 $Blist(p)$ 和内点链表 $Ilist(p)$ 进行相同投影,投影结果点集经排序后分别记为 $Blist'(p)$ 和 $Ilist'(p)$.所有投影下来的点都作为候选邻接点.

(3) 角度阈值策略优化候选邻接点

① 设置最小角度阈值 $\alpha_{\min}$,对上一步排序后的点集 $W(p)$ 中的点按照角度准则进行删减,即如果相邻点之间的角度小于阈值 $\alpha_{\min}$,则只保留到参考点 p 距离最近的点.

② 对删减后的点集 $W(p)$ 中点 p_i 继续处理,比较它与点 p 投影后的边界链表 $Blist'(p)$ 中的点的夹角,如果小于 $\alpha_{\min}$,则删除 p_i ,否则保留.

③ 再将 p 的边界链表中的点加入点集 $W(p)$ 中,也作为候选邻接点.

④ 由于内点无法再形成三角形,所以还需要在 $W(p)$ 中删除 p 的内点链表 $Ilist'(p)$ 中的点.

(4) 相交不可见策略优化候选邻接点

对点 p 邻接点进行选择时,为避免 p 与临界点确定的边与其他边出现交叉,必须进行可见性判断.传统的可见性判断一般是判断相连两点是否处于对方的可见区域以及是否通视,本文算法中通过相交不可见策略来进行判断:

① 判断该点和候选邻接点的连线与所有邻接点的边界边是否相交;

② 判断该点和候选邻接点的连线与所有邻接点的内部边是否相交;

③ 判断该点和候选邻接点的连线与该点的内部顶点的边界边是否相交;

④ 判断该点和候选邻接点的连线与该点的内部顶点的内部边是否相交;

若满足上面任何一个相交条件,则认为该候选邻接点与参考点不可见,从 $W(p)$ 中删除该候选邻接点.

(5) Delaunay 准则变换策略优化网格

使用Delaunay 准则对邻接点进行网格优化,能够显著改善三角化过程中的三角网格质量.如图2所示.

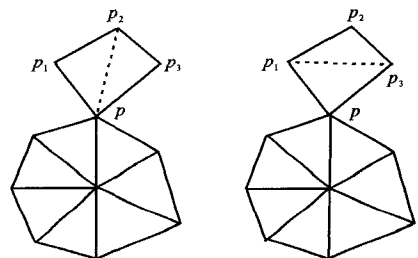


图2 利用Delaunay 准则变换策略进行优化

本文算法根据最大角最小化原则对初始三角网进行调整,使得生成的网格符合Delaunay 准则.如图2所示,首先计算 $\angle p_3 p p_1$ 、 $\angle p_3 p_2 p_1$ 、 $\angle p p_3 p_2$ 、 $\angle p p_1 p_2$ 这4个角,若最大值是 $\angle p_3 p p_1$ 或 $\angle p_3 p_2 p_1$,则按左图方法进行三角化,若最大值是 $\angle p p_3 p_2$ 或 $\angle p p_1 p_2$ 则按右图方法进行三角化.

2.2.4 三角化

经过前面2.2.3节所示方法的处理,邻接点集 $W(p)$ 已经按照逆时针顺序排列,一般情况下只需将相邻点与参考点依次组成三角形.但在构成三角形的过程中,若两邻接点之间的连线与点的内部边相交则无法构成三角形.如图3所示,边 pq 为 p 的内部边,而在三角化过程中,邻接点 p_1, p_2 连线与内部

边 pq 相交,此时应避免 p_1p_2 连线.

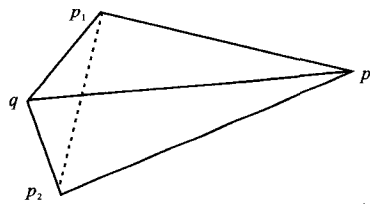


图 3 相邻邻接点和参考点无法形成三角形

为了优化三角形并且检测物体的边界以及空洞,使用角度阈值策略,设置最大角度阈值,只有当相邻邻接点和参考点形成的夹角小于 α_{max} 时,才能形成三角形.

在满足条件并可以形成三角形时,进行以下操作:

- (1) 生成三角形并将其加入三角形链表中;
- (2) 判断相邻点和参考点是否在对方的边界顶点链表中.若不是就将对方加入到各自边界顶点链表中;若是则将该点从对方的边界顶点链表中删除,然后加入到对方的内部顶点链表.
- (3) 修改参考点及邻接点的属性.将邻接点中的自由点改为活动点.并加入到队列 Q 尾部.如果邻接点已经是活动点或边界点,判断它是否已经成为了确定点.对于 p ,如果和它相连的三角形全部找出并形成闭合三角面,则将其修改为确定点,否则其为边界点.

3 实验结果与分析

为验证本文算法的有效性,对以下 3 种典型的散乱点云模型数据进行了实验验证.实验在 VC++6.0 和 OpenGL2.0 软件环境下进行,硬件平台为处理器 2.80 Hz,1024 MB 内存.

三种点云模型的原始参数及按照本文算法重构所需时间的统计结果如表 1 所示.从表 1 中数据可以看出,与同类的林^[4]算法相比较,本文算法运行效率较高,重构速度较快.图 4、图 5 分别为三维圆环、鞋楦的点云重构后的三角网格模型图及光照效果图,可以看出本算法的重构效果不错.

表 1 不同点云模型重构数据表

点云模型	Di 点云 数据量/ 个	生成三角 网格数目/ 个	本算法整体 重构时间/ s	林 ^[4] 算法 整体重构 时间/s
三维圆环	15 841	31 685	12.63	14.39
鞋楦	26 383	52 670	21.65	28.81
兔子	40 256	77 037	33.84	62.76

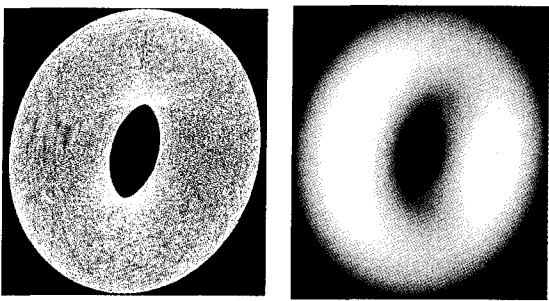


图 4 三维圆环点云重构后的三角网格图与光照效果图

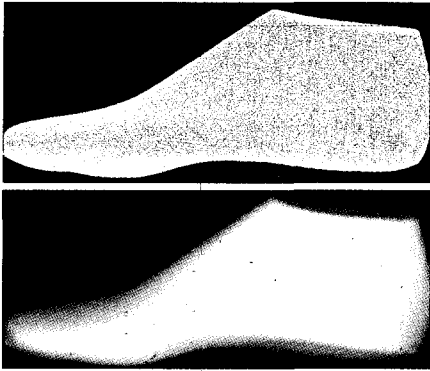


图 5 鞋楦点云重构后的三角网格图与光照效果图

4 结束语

本文针对散乱点云数据设计了一种基于多策略的快速重构算法.该方法能够根据散乱点云的局部密集程度动态选择 k 值,使之动态适应均匀程度不等的散乱点集;整个重构过程速度快,高效率地构造出优良的网格模型,很好地保持了原始物体的特征,并且能够自动检测空洞和边界.不过某些空洞和边缘的判断并不完全正确,需要人工干预,今后将针对具体实现中的某些人工交互以及参数阈值设定等人工干预做进一步的研究,以取得更好的算法处理效果.

参考文献:

[1] Hoope H, DeRose, Duchamp T, et al. Surface reconstruction from unorganized points[C]// Cunningham S. Proceeding of SIGGRAPH'92. Danvers: ACM, 1992: 71-78.

[2] Gopi M, Shankar Krishnan. A fast and efficient projection-based approach for surface reconstruction [C]// Proceedings of the XV Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing. Washington DC, EUA, 2002: 179-186.

(下转第 82 页)

也是非常大的。

5 结束语

本文算法将数据立方技术和 FP 算法有机地结合在一起,既利用了数据立方能够有效处理多维数值度量的优点,又保持了 FP 算法的可扩展性.使用该算法能够挖掘维间关联规则,而且能够挖掘混合维关联规则.下一步的工作是对本文的算法进行改进,使其用于多个抽象层的多维关联规则挖掘,还可以将数据方技术与其他关联规则挖掘结合.

参考文献:

- [1] Han Jiawei, Kamber M. Data mining concepts and techniques[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
 - [2] 芦洁,刘志镜.挖掘关联规则中对 Apriori 算法的一个改进[J].微电子学与计算机,2006,23(2):10-12.
 - [3] 黄勇.关系数据库中多维关联规则挖掘的新算法[J].计算机应用与软件,2007,24(10):60-61.
 - [4] 李立羽,施鹏飞.OLAP 关联规则挖掘[J].计算机工程与应用,2002,38(3):128-130.
 - [5] 颜石专,李战怀.基于数据仓库和 OLAP 的商务决策系统[J].微电子学与计算机,2006,23(2):64-67.
 - [6] 党运峰.多维关联规则的研究与应用[D].广州:中山大学,2008.
 - [7] 赵孝敏,何松华,李贤鹏.一种改进的 FP-Growth 算法及其在业务关联中的应用[J].计算机工程,2008(9):28-30.
-
- (上接第 77 页)
- [3] 王青,王融清,鲍虎军,等.散乱数据点的增量快速曲面重建算法[J].软件学报,2000,11(9):1221-1227.
 - [4] 林志浩,姜晓峰,王鹏远.一种改进的区域扩张三角网格面逆向重构算法[J].小型微型计算机系统,2006,27(8):1570-1573.
 - [5] 田庆国,葛宝臻,郁道银,等.一种基于投影的散乱数据表面增量重建算法[J].中国图象图形学报,2006,11(10):1409-1413.
 - [6] 熊邦书,何明一,俞华.三维散乱数据的 k 个最近邻域快速搜索算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(7):909-917.

作者简介:

彭 硕 女,(1985-),硕士.研究方向为数据仓库与数据挖掘.

吴 昊 男,(1970-),博士后,副教授.研究方向为人工智能与数据挖掘.

作者简介:

倪小军 男,硕士研究生.研究方向为计算机图形学、数字几何处理.

姜晓峰 男,副教授,硕士生导师.研究方向为计算机图形学、虚拟现实、数字几何处理.

葛 亮 男,硕士研究生.研究方向为计算机图形学、虚拟现实.