# 海量数据三角网格生成算法

李 旭 高 峰

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

**摘 要**: 对海量数据散乱密集难以自动得到邻近点间正确拓扑连接关系的问题,给出了一种用于海量数据的基于增量网格扩展的三角剖分方法.该方法以 $k$ 阶最近邻域算法快速搜寻边界点的最近邻域,以增量算法的边界环为基础向外生成三角形,实现点云数据点之间合理的三角剖分网格建立.对最佳点的选择提出了 3 种需遵循的新准则,并根据最佳点的位置不同,详细给出了 3 种网格拓扑操作来构建新三角网格,可以准确的进行三角剖分.车身曲面测量点云的应用实例表明,该算法可以高效,稳定地直接构建出车身曲面三角网格.

**关 键 词**: 逆向工程; 海量数据; 三角剖分

**中图分类号**: TP 391.72

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)12-1473-04

## Triangular mesh generation algorithm of point clouds

Li Xu Gao Feng

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract**: The establishment of topological mesh problem in point clouds preprocessing was researched. To solve the problem obtaining the correct topological relations of the scattered point clouds, a sort of triangulation based on incremental growth was researched for point clouds. Searched the nearest neighbors of boundary points by using the algorithm of $k$-nearest neighbors quickly, it constructs triangles based on the boundary ring of incremental algorithm, and realizes the construction of topological mesh. Three new criteria were presented for the selection of the optimal points, and three operations of mesh topology based on the different position of the optimal points was given out to construct new triangular mesh, which the triangulation could be proceeded precisely. The overlapping , pore as well as long and narrow triangles were eliminated. The application for the point clouds of auto body indicates that triangulation mesh of body surface can be constructed effectively and steadily.

**Key words**: reverse engineering; point clouds; triangulation

逆向工程技术的主要任务是将原始物理模型转化为工程设计概念或产品数字化模型,可以通过测量设备,获取实物外形坐标点,继而重建出实物的三维几何模型.近几年来,逆向工程得到了迅速发展,已广泛的应用于模具、汽车[1]、航空航天等制造领域.特别在表面由很多复杂的自由曲面组成的车身设计中,已经成为主要技术手段.

当前通过扫描测量方法获得的车身测量点云数据是密集散乱数据,数据量极大,而且测点数据之间没有相应的、显式的几何拓扑关系,所以必须按照一定的规则将这些数据组织起来,建立数据的拓扑关系,使得每个数据点将归属到拓扑结构中的一个曲面.

对点云数据三角剖分方法的要求,主要体现在下面几个方面:

1) 鲁棒性:鲁棒性是采用方法的最重要的性

**收稿日期**: 2008-01-25

**基金项目**: 山东省自然科学基金资助项目(2003ZX06); 山东理工大学校基金资助项目(2005KJM12)

**作者简介**: 李 旭(1970— ),女,山东淄博人,博士生,wz1995@163.com.

质. 算法应该知道缺失的样点,错误的样点,及其边界点等.

2) 自动性:最好不需要提供额外的参数,只要求输入点集.

3) 内存大小的要求:因为输入数据点集可能是非常大的,计算平台或重建算法必须为如此大的数据点集做准备. 因为内存大小对当前机器仍有限制,算法必须有能力通过并行处理过程或其它方式处理非常大的数据.

4) 速度:三角剖分方法通常是一个脱离主机单独工作的程序,因此速度是剖分方法次重要的需求之一.

散乱点云数据点的三维重建可以按照很多标准分类,其中最重要的分类方法是按照初始网格剖分方式不同来进行分类的:①雕刻算法,从初始三角剖分中选择输出的三角网格,基于 Delaunay 三角剖分或者它的二重 Voronoi 图表,例如 Boissonnat 雕刻算法[2]. 这些方法的主要缺点是它们对噪音和异点的敏感度,以及它们的计算复杂度;②体积测定法,用进一步处理过的点云来生成一个体积测定表示法,Hugues Hoppe 算法[3]便是其中典型之一;但在某些情况下容易引起细节的丢失;③增量算法,是从初始三角形网格(点,边或三角形)开始增量构建三角形网格,比较典型的如文献[4]的算法;优点是低复杂度和内存需求,可以很容易处理大量数据集,但输入数据集需要进行前处理;④变形算法,原始面沿着输入点变形,原始三角剖分应该已经捕获拓扑结构,如文献[5]. 这些方法不需要用户定义参数,但它们依赖合适的原始网格,需要由用户提供,或者在重建之前以某种方式从输入数据集中提取出来.

本文采用的是基于增量算法[6]的三角剖分方法,该方法可以针对海量散乱点云,并且允许数据点集的分布具有一定的不均匀性,非常适用于车身曲面测量的海量数据点的三角网格构建.

# 1 算法的描述

## 1.1 基本概念

根据三角形网格从无到有,从网格前沿向未划分区域扩展的思想,先给出增量算法几个相关的基本概念:

1) 自由点:尚未进行三角剖分的数据点为自由点,自由点标记为 0,如图 1 所示,$P_0$ 与周围的白点即为自由点.

2)内部点:已剖分区域的数据点为内部点,点的标记为$-1$,如图 2 所示,剖分区域内的 $P$ 便为内部点.

3) 最佳点:同时位于当前边界边两端点的公共邻域内,且是公共邻近点与当前边界边两端点所形成的角度中最大者(即所谓的边张角),而且其余弦值要小于预设定的值,如图 1 所示,$P_1$ 即为边界边 2 的最佳点.

4) 边界边:三角划分过程中,位于已划分区域和未划分区域之间的三角形边为边界边.

5) 边界环:三角划分过程中,由边界边按逆时针或者顺时针方向首尾相连排列构成的循环边界边. 起始边界边与结束边界边共结点,即边界环是一条闭环,把逆时针的旋转方向规定为边界环的方向,如图 2 所示.

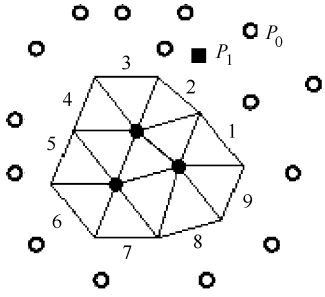



图 1 自由点与最佳点

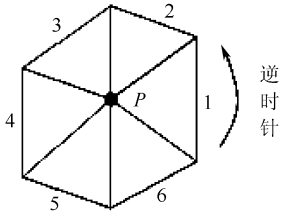



图 2 边界边与边界环

## 1.2 数据结构

1) 点表:三角剖分过程中不需要对数据点进行插入和删除操作,且主要的操作是迅速检索任一数据点所在的立方栅格和任一立方栅格所包含的数据点,所以根据散乱数据空间划分方法,采用单向链表的形式来存储散乱数据点集. 存储结构中主要包括:数据点的标记,点的序号以及点的三维坐标值.

2) 三角形表:因为要用到三角形的各个顶点以及法向量来判断两个相邻三角形之间的夹角大小. 所以三角形链表的存储结构主要包括:创建三角形的三角形序号,指向三角形 3 个有序顶点的点指针,以及创建的三角形的法向量. 其中:所创建的法向量与邻近三角形的法向量夹角不能大于 90°.

3) 边界边表:暂存三角划分过程中的所有边界边. 表中边界边依序构成边界环,即一个边界环

对应一个边界表，在三角划分的过程中，边界边表总是在动态变化的. 当三角划分过程结束时，边界边表为空.

4) 边界环表：三角划分过程中可能生成多个边界环，放入边界环表，顺序处理. 当三角划分过程结束时，边界环表为空.

## 2　算法的实现

本文提出的三角剖分算法的核心思想便是边界边的扩展. 首先，把创建出初始的三角形存入三角形表中，并把三角形的 3 条边依序存入边界边表中，，然后通过查找每条边界边两端点的最佳邻近点，来依次向三角形表中添加新创建的三角形，从而使三角网格向外扩展，整个过程就是边界边逐渐向外推进的过程，主要包括：预处理，初始三角形的创建以及三角形的生长 3 大部分.

### 2.1　预处理

将散乱数据点看成一个大的数据包围盒，计算包含所有散乱数据点的最小长方体空间，计算子立方体空间的边长，然后根据一定的准则划分成若干个小的立方体，并将数据点归入到子立方体空间中，以便在这些小立方体里通过 $K$ 邻域的快速搜索算法来搜索各散乱点的邻近点.

### 2.2　初始三角形的创建

选择 $z$ 坐标值最大的一个点作为初始三角形的第 1 个顶点，然后选择距离第 1 个顶点最近的一个邻近点作为第 2 个点，把这个点作为三角形的一个边，搜寻距离两个顶点邻近点的公共邻近点，并将该点作为初始三角形的第 3 个顶点，如图 3 所示. 同时，三角形的法矢与边界环的旋向都遵循右手定则.

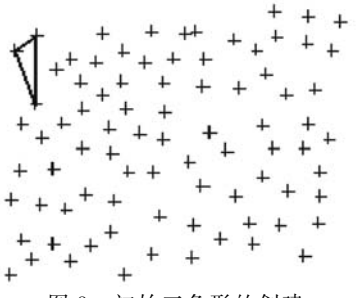


图 3　初始三角形的创建

### 2.3　三角形的生长

散乱数据的三角剖分过程便是当前边界边两端点的最佳邻近点与该边界边两端点相连形成新三角形的过程，如图 4 和图 5 所示. 其中，最佳邻近点的选择尤为重要，直接决定了生成的三角网格的质量.

最佳点的选择需要遵循一定的准则：

1) 最佳点必须是边界边的两端点的公共邻域内的公共邻近点.

2) 最佳点必须是非饱和点，这样可以保证新生成的三角形不与已有三角面片发生重叠的现象，又能使边界边不断向外快速扩展. 是否为非饱和点可从点的边界环是否封闭判断得出. 若为封闭边界环则为饱和点，否则为非饱和点.

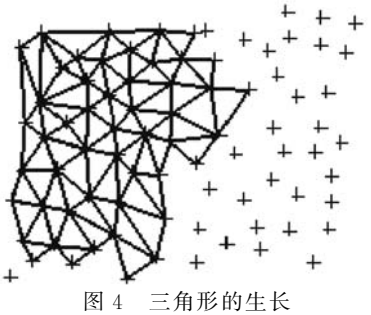


图 4　三角形的生长

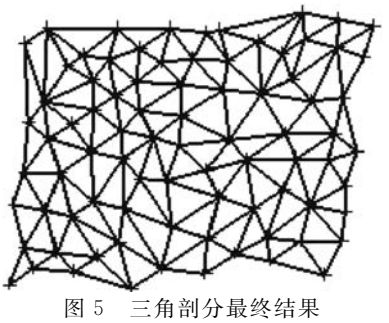


图 5　三角剖分最终结果

3) 最佳点的边张角是所有的公共邻近点中所形成的最大边张角. 最大边张角是通过邻近点边张角的余弦值的绝对值来判定的，假设公共邻近点的边张角为 $\gamma$，那么便通过 $\cos\gamma$ 的大小来选取最佳点. 理论上来说，所形成的 $\cos\gamma$ 的绝对值越大越好，但是如果该余弦值太大的话，容易使形成的三角形比较狭长，影响了三角网格的生成质量，所以经过反复的测试，余弦值绝对值的最大值设定为 0.9，可以有效地避免狭长三角形的产生.

依据最佳点的位置，可以通过 3 种拓扑操作来构建三角形.

1) 最佳点为自由点. 该操作是把一个新点加入到三角形网格中，会在边界上产生两条新边界边，如图 6 所示，其中 $P$ 为最佳点，$E$ 为当前边界边.

2) 最佳点为邻近边上的端点. 这种情况又可以分成两种：① 最佳点为后一相邻边的端点如图 7a；② 最佳点是前一相邻边的端点，如图 7b. 该拓扑操作创建的三角形只添加一条新边而已.

3) 最佳点为边界边上的点，但并不是邻近边上的端点. 这种情况将会发生边界环的分裂，边界

环一分为二,将新形成的两个边界环放进边界环表中,并删除以前的边界环,如图8所示.

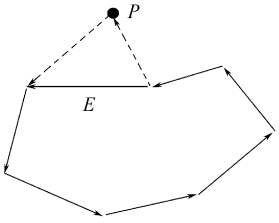
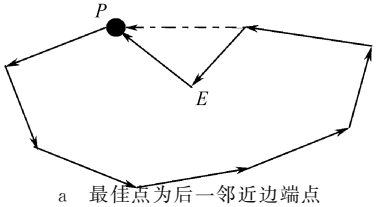
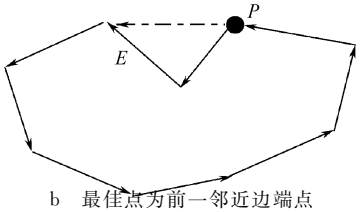



图6 最佳点为自由点




a 最佳点为后一邻近边端点




b 最佳点为前一邻近边端点

图7 最佳点为相邻边端点

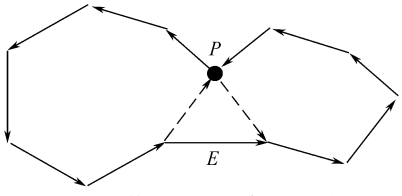



图8 最佳点为非相邻边的端点

### 2.4 实验结果

本文算法已通过Visual C++ 6.0编程实现,并且在UG平台上进行了二次开发,以便用于散乱数据三角剖分的结果显示.如图9和图10所示,对某轿车顶盖以及部分A立柱点云进行了测试.

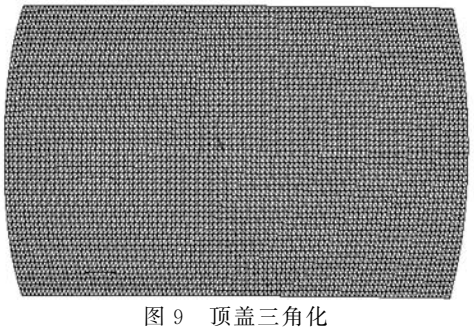


图9 顶盖三角化

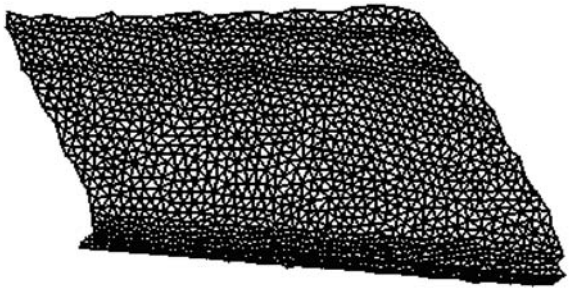


图10 部分A立柱三角化

实验结果表明:用本算法剖分的散乱数据点所形成的三角剖分网格没有出现大量重叠和空洞现象,并且没有产生尖锐的三角形.

## 3 结 论

本算法能高效地处理三角剖分数据较大的散乱数据点,不需要对散乱数据点集所对应的曲面进行分片,可以直接生成三角网格,且可以针对有很大曲率变化的点云数据,能够满足逆向工程中曲面重构的要求,为以后的曲面光顺等打下坚实的基础.

### 参考文献(References)

[1] 李旭,高峰,杨宪武,等.车身曲面逆向设计投影法参数化方法的应用[J].汽车设计,2007,5:23-24
Li Xu, Gao Feng, Yang Xianwu, et al. Application of messy points clouds parameterization based on reverse designing of an automobile body curve surface[J]. Automobile Technology, 2007, 5: 23-24(in Chinese)

[2] Algorri M E, Schmitt F. Surface reconstruction from unstructured 3D data[J]. Computer Graphics Forum, 1996, 15(1): 47-60

[3] Boissonnat J D. Geometric structures for three-dimensional shape reconstruction[J]. ACM Transaction on Graphics, 1984, 3(4): 266-286

[4] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, et al. Surface reconstruction from unorganized point clouds [J]. Computer Graphics, 1992, 26(2): 71-78

[5] Huang J, Menq C H. Combinatorial manifold mesh reconstruction and optimization from unorganized points with arbitrary topology[J]. Computer Aided Design, 2002, 34(2): 149-165

[6] 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
Wang Qing, , Wang Rongqing, , Bao Hujun, et al. A fast progressive surface reconstruction algorithm for unorganized points[J]. Journal of Software, 2000, 11(9): 1221-1227(in Chinese)

(责任编辑:张 嵘)