

逆向工程中复杂拓扑关系的三角网格构造*

陈志杨¹, 潘如刚², 叶修梓²

(1. 浙江工业大学 信息学院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江大学 计算机科学与技术学院 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 三角网格构造是逆向工程 CAD 建模技术中的一个重要步骤。提出了一种针对扫描线点云数据的三角网格构造方法, 该方法的核心思想是合并同层的扫描线, 并且标记合并后扫描线的间断点, 以便三角网格构造和拓扑结构建立。该方法解决了对于包含分叉和内孔特征的三角网格的构造问题。

关键词: 三角化; 点云; 扫描线; CAD; 逆向工程

中图分类号: TP391. 72 文献标识码: A 文章编号: 1001-3695(2005)01-0232-03

Construction of Triangular Mesh with Complex Topology in Reverse Engineering

CHEN Zhi-yang¹, PAN Ru-gang², YE Xiu-zi²

(1. College of Information, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310014, China; 2. State Key Laboratory of CAD&CG, College of Computer Science, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: Triangulation is an important step in reverse engineering. In this paper, an approach of triangulation for scan lines is proposed. The kernel of the approach is merging the scan lines located in the same layer and marking discontinuous points on the merged scan lines to facilitate triangulation and construction of topology. The approach get over the difficulty in triangulation with crotch and hole character.

Key words: Triangulation; Point Cloud; Scan Line; CAD; Reverse Engineering

逆向工程 CAD 建模技术是目前 CAD 领域应用和研究的热点之一, 它是“与将产品样件转换为 CAD 模型的相关数字化技术和几何模型重建技术的总称”^[1, 2]。其应用领域主要体现在: 工程图纸丢失而需要制造备件时、艺术模型需要 CAD 数据时、在开发周期中设计几经变更导致初始设计数据作废时等常规 CAD 工程无法完成或很难完成的场合^[3]。实物原型表面数据的获取是逆向工程 CAD 建模中的第一个关键步骤, 可以使用接触型或非接触型的扫描测量设备获取数据。扫描数据是由大量仅包含三维坐标值的数据点构成的, 因此直接从原始数据获取零件的几何信息是极其困难的, 一般需要利用拟合或网格化等手段来提取诸如法矢、曲率等几何信息。一旦得到这些几何信息, 我们就可以进行数据压缩、数据分块、曲面建模等其他应用。目前对于特征识别、曲线、曲面重构等逆向工程建模技术的研究较多^[4, 5], 而对于三角网格构造等问题的研究相对较少, 尤其是针对实际应用问题的解决方案比较缺乏。一般情况下, 我们可以采用 Delaunay 三角化方法来计算三角网格。但对于像扫描线数据此类具有一定结构化的数据, 可以根据其数据特点使用其他相应的构造方法得到三角网格。

如图 1 所示, 一条扫描线由若干位于同一层扫描平面内的数据点组成, 对此类数据使用相邻两扫描线来构造三角网格。当同一层扫描平面内有多条扫描线时(如有分叉或有孔洞物体得到的扫描数据), 那么不管所有扫描线如何排序, 两两相

邻扫描线构造三角网格时, 都会产生三角网格重叠、狭长三角形、连接混乱等此类不期望的结果。为解决这些问题, 可以对扫描线进行分块处理, 如图 2 所示。主要分块方法有两种: 由用户在计算机屏幕上人工拾取分块^[6]; 采用算法自动分块, 即根据距离(如两扫描线对应起点距离值和对应终点距离值中的最小值)来找某条扫描线的最近扫描线, 从第一条扫描线开始查找最近扫描线, 当距离大于一个给定的值, 此分块结束, 再在剩余的扫描线中继续分块。第一种方法无疑加大了用户的工作量, 而且分块后的网格还需要进行二次拼合; 第二种算法的缺陷在于要连接分块, 连接分块时会造成分叉处的三角网格重叠问题。

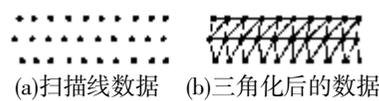


图 1 扫描线结构化数据的三角网格化



图 2 扫描线点云数据分块

1 算法思想

当同一层扫描平面上有多条扫描线时, 为了能够构造规整完好的三角网格而又不需要分块处理, 那么要合并同一层上的所有扫描线, 本文提出的三角网格构造方法正是基于这个思想。同时为确保整个三角网格在分叉和内孔处不生成三角形, 需要对扫描线的端点进行标记, 以确定合并后新扫描线的间断点(即连接两条原始扫描线的两个端点)。在三角网格构造过程中根据间断点信息来决定三角形生成与否。利用端点、间断点信息也可以在网格拓扑关系构造过程中快速识别内外边界

收稿日期: 2004-03-19; 修返日期: 2004-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60073026, 60273060); 国家‘863’高技术研究发展计划资助项目(2002AA411043)

环。该算法的整个处理过程如图 3 所示。

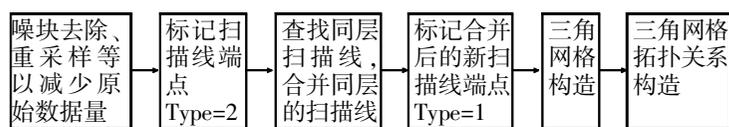


图 3 三角网格构造主要处理过程

2 数据预处理

为了提高后序数据处理、应用的效率,对来自测量设备直接获得的原始数据一般需要噪声去除、数据光滑、数据压缩等处理,我们一般将这个过程称为数据预处理。数据预处理是逆向工程建模过程中非常重要的一步。由于原始数据一般包含大量数据,为了获得适当的数据量构造三角网格,我们拟采用扫描线数据重采样方法以减少数据量。扫描线重采样可以用均匀弦长采样、弦高差采样或这两种方法的结合。在对数据完成这些基本处理以后,我们需要针对本文所提出的算法进行特殊的处理,为下一步构造网格作准备。具体过程如下:

(1) 对所有 m 条扫描线排序,使排序后的扫描线按照某一个方向单调递增(减)。具体方法可以沿空间某坐标方向或屏幕某方向对扫描线进行排序,排序方向应大致垂直于扫描线所在平面。

(2) 对每条扫描线上的数据点进行排序。若扫描线只有两个数据点,则在中间再插入一个数据点,确保每条扫描线有三个或三个以上的数据点,以便后序网格生成。排序后就得到了有序数据点的扫描线,数据点 $P(i, j)$ 就代表第 i 条扫描线上的第 j 个点。如图 4(a) 所示,先把所有扫描线的端点类型值设为 2(即设定数据点类型: $Type = 2$),注意在初始状态时的所有数据点的默认类型值为 0(即设定数据点类型: $Type = 0$)。

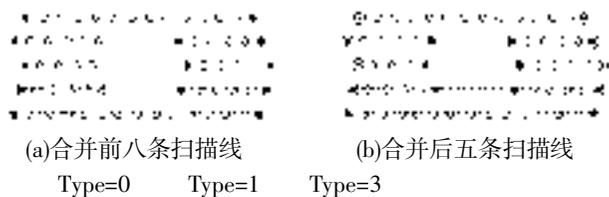


图 4 数据点类型值的标记

(3) 确定一个平行扫描线的参考平面 $RefPlane$ 。可以取某条扫描线上的三点建立一个平面方程,取得平面参数。

(4) 计算所有扫描线到参考平面 $RefPlane$ 的距离。以扫描线的起点坐标计算离参考平面的有向距离 $d(i)$, $d(i)$ 表示第 i 条扫描线与参考平面的有向距离。

(5) 确定同层扫描线。从第一条和第二条扫描线开始依次两两比较相邻扫描线的有向距离差,当 $|d(i+1) - d(i)| < \epsilon$ 时,就认为这两条扫描线是位于同一扫描平面上的。一旦遇到条件 $|d(i+1) - d(i)| < \epsilon$ 不满足时,就合并前面记录的同层扫描线。其中 ϵ 为确定相邻两扫描线为同层扫描线的带宽值,可以根据测量参数确定。

(6) 合并同层扫描线。取出所有同层扫描线上的数据点,重新排序,合并成一条扫描线。完成后回到步骤(5),继续往下查找,直至处理完所有 m 条扫描线。最后得到新的 n 条有序扫描线。至此,扫描线合并排序过程完成。

(7) 方向一致化。使所有合并后的扫描线的方向一致,即确保所有扫描线的起始方向一致。

(8) 将合并后的扫描线端点类型值设为 1(即设定数据点类型: $Type = 1$)。如图 4(b) 所示,类型值依然为 2 的数据点就

是合并后新扫描线上的间断点。数据点类型值是后序三角网格生成的判断条件之一,同时也是建立网格拓扑关系的基础。

通过以上步骤,我们合并了同层扫描线,而且得到了扫描线上的间断点 ($Type = 2$)、端点 ($Type = 1$) 以及常规点 ($Type = 0$)。至此我们所做的预处理工作结束,接下来将根据这些扫描线构造三角网格。

3 三角网格的构造

对经过上述步骤处理后得到的 n 条扫描线,从第一条和第二条开始依次两两连接三角形。总体来讲,三角网格的建立过程是数据点逐次比较并优化的过程。具体算法说明如下:

首先,计算扫描线 $Line(i)$ 上每个数据点在扫描线 $Line(i+1)$ 上相应的距离最近点。假设 $Line(i)$ 上共有 k 个数据点,则从第 $(1, 2)$ 对数据点到第 $(k-1, k)$ 对数据点依次与 $Line(i+1)$ 上的点连接三角形。如图 5(a) 所示, $Line(i)$ 上有一点对 $(P(i, j), P(i, j+1))$, $P(i, j), P(i, j+1)$ 在 $Line(i+1)$ 上的最近点分别是 $P(i+1, s), P(i+1, t)$ 。确保 $t > s$ 条件满足,若 $t < s$,交换两值。计算出两值的平均值 $mid = [(s + t) / 2]$ (向下取整)。以下是算法的程序性描述:

```
for ( u 从 s 到 mid - 1 ) // 循环, u 为整数
{ 连接三角形 ( P(i+1, u+1), P(i+1, u), P(i, j) ); }
连接三角形 ( P(i, j), P(i, j+1), P(i+1, mid) );
for ( u 从 mid 到 t - 1 )
{ 连接三角形 ( P(i+1, u+1), P(i+1, u), P(i, j+1) ); }
```

可以看出,所有三角形的其中两个顶点是位于一条扫描线上的相邻两点,第三个顶点位于另一条扫描线上。图 5(b) ~ 图 5(d) 分别给出了 $t = s, t = s + 1, t = s + 2$ 三种条件下的三角形连接情况。

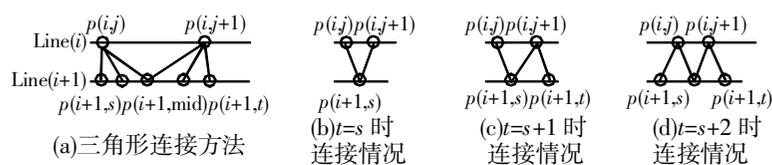


图 5 连接三角形

另外,考虑起点 $P(i, 1)$ 和终点 $P(i, k)$ 处连接三角形的特殊情况,假设 $P(i, 1), P(i, k)$ 在 $line(i+1)$ 上的最近点分别是 $P(i+1, \mathcal{L}), P(i+1, \mathcal{R})$, $Line(i+1)$ 上共有 k_2 个数据点。算法的程序性描述如下:

```
for ( u 从 1 到 \mathcal{L} - 1 )
{ 连接三角形 ( P(i+1, u+1), P(i+1, u), P(i, 1) ); }
for ( u 从 \mathcal{R} 到 k_2 - 1 )
{ 连接三角形 ( P(i+1, u+1), P(i+1, u), P(i, k) ); }
```

我们已经知道了三角形的连接方法,在网格构造过程中要根据第 2 节所得出的数据点类型值来判断是否要生成某个三角形,这是本文所述三角网格构造方法的关键之处。

准则 1: 如果构成三角形的三个顶点中位于同一条扫描线上的两个顶点类型值同时为 2,则不生成此三角形。

如图 6 所示,当得到某个三角形的三个顶点 $P(i, j), P(i, j+1), P(i+1, u)$, 其中位于同一条扫描线上的两个顶点 $P(i, j), P(i, j+1)$ 的类型值同时为 2,根据准则 1 不生成该三角形,因为这两个顶点都是间断点。这样在分叉和内孔处就不会生成三角网格,这也是第 2 节设置数据点类型值的作用之一。

在实际应用中我们注意到,在网格模型的边界处容易生成狭长三角形。这种狭长三角形会使求交计算、有限元分析等基于网格模型的高级应用程序出现不稳定。因此,在实际应用

中,我们希望网格模型中的三角形比较均匀,即希望得到较好的网格品质。为此,我们可以利用准则 2 来提高网格生成过程中模型的品质。

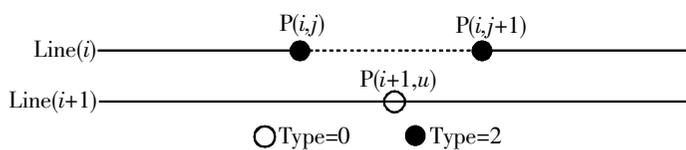


图 6 准则 1 的应用

准则 2: 如果构成三角形的三个顶点中两两距离满足条件, $c/(a+b) >$, 则不生成此三角形。其中 a, b, c 为三角形顶点的两两距离值, c 为值最大的一个。

准则 2 中 α 为三角形形状参数, 其取值可以根据扫描线上的点密度和扫描线间距确定, 通常取值范围为 (0.85, 1.00)。

取值越大, 出现狭长三角形的机会就越大; 反之, 生成网格的品质就越好。这里需要指出, α 值越小, 则得到的网格模型中间有可能出现空洞。因此, 在实际应用中需要根据实际需要确定合适的取值。

4 三角网格拓扑关系的构造

三角网格拓扑关系包括边所属的三角形、顶点所属的三角形、网格内外边界的标志等内容。三角形拓扑关系的建立, 对网格数据压缩、网格多分辨率模型构造、网格求交等高级网格计算是至关重要的部分。对于包含分叉或内孔的三角网格, 自动识别网格模型的内外边界是我们尤为关心的。根据扫描线上数据点的类型值, 我们可以很快构造出网格模型的内外边界。

在第 3 节中, 我们同时也建立了一个不重复的数据点序列及一个三角形序列, 三角形序列的每个元素只包含三个指向数据点序列的索引值。在此基础上, 我们首先构造出数据点与三角形、边与三角形的基本拓扑关系。

假设已知一数据点 P , 我们可以找到以点 P 为端点的所有 n 条边 $E(i), i=1, \dots, n$; 已知一条边 E , 可以找到包含该边的所有三角形。因此, 如果某条边只有一个相邻的三角形, 则这条边为边界边, 否则该边为内部边。此时我们仅仅识别了内部边和边界边, 对于有内孔结构的网格模型, 我们还需要识别出哪些边是属于外边界的, 哪些边是属于内边界的。

下面我们首先确定外边界环(图 7)。由于在前面步骤中我们已经标志了数据点的类型和基本的的数据点/边/三角形关系, 因此这里我们就根据这些信息作为识别内外边界边的依据。具体步骤如下: 取任一数据点类型值为 1 的点(即边界上的数据点) $P(1)$, 找到点 $P(1)$ 的所有邻边, 这些邻边中只有两条是边界边; 取两边界边中的任一边界边 $E(1)$, 以 $E(1)$ 的另一端点 $P(2)$, 继续找下一条边界边 $E(2)$ 。如此重复, 直至找回端点 $P(1)$, 这样就形成了一个环, 即外边界环。

接下来我们识别内边界环, 内边界环的识别方法与识别外边界环类似, 不同的是第一步要以数据点类型值为 2 的点作为起始点。同样方法确定了边界环, 当找到一个边界环后, 如果还有类型值为 2 的数据点不在边界环中, 则继续找第二个边界环, 直至所有的类型值为 2 的数据点都已在相应的环中。这个过程完成后我们可能得到一个或多个边界环。需要特别注意的是, 这里得到的边界环并不一定都是内边界环, 还需根据准

则 3 来进一步判别。

准则 3: 如果边界环上没有出现类型值为 1 的数据点, 则此边界环视为内边界环, 否则视为外边界环。

图 7(a) 和图 7(b) 所示分别为外边界环和内边界环。内边界环上不会出现类型值为 1 的数据点; 而外边界环上有可能出现类型值为 2 的数据点。通过该方法可以简单有效地构造出网格模型的内外边界。至此, 我们已经完成了构造三角网格模型需要的全部工作, 得到了包含拓扑结构的完整网格模型, 为后序的曲线/曲面模型重构作好了准备。

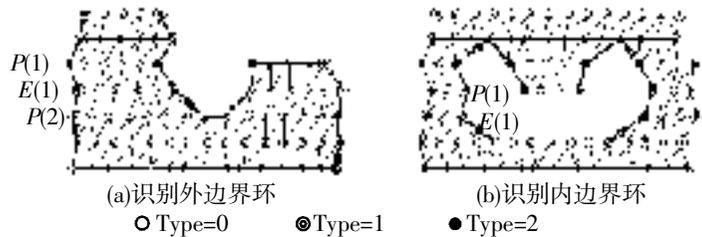
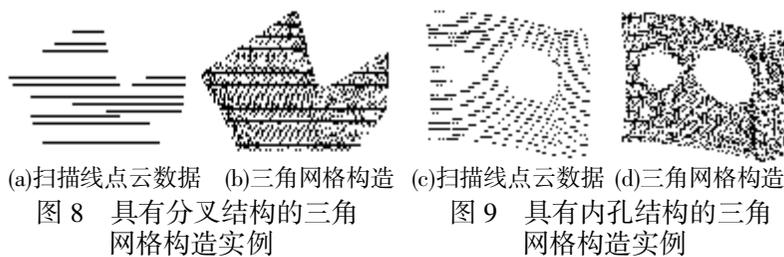


图 7 确定边界环

5 实例与结论

图 8 和图 9 分别是具有分叉结构和内孔结构的扫描线数据的网格构造。从图中可以看到, 利用本文提出的方法所构造出的三角网格具有良好的品质, 三角形连接规整完好, 完全满足了逆向工程 CAD 建模中后序处理的需要。



本文所述对于扫描线点云数据的三角网格构造方法的核心思想合并同层扫描线, 标记间断点, 根据间断点来判别生成三角形的条件以及确定内外边界环。此方法解决了具有分叉或内孔特征的扫描线数据在构造三角网格模型过程中出现不期望结果的问题, 对逆向工程中的扫描线点云数据三角网格构造有重大应用价值。下一步我们将在算法效率以及网格形状优化方面进一步深入研究, 以提高网格生成速度和网格品质。

参考文献:

[1] 张曙. 先进制造技术讲座(第一讲): 走向 21 世纪的制造业(上) [J]. 机电一体化, 1996, (3): 25-29.
 [2] 田晓东, 史桂容, 阮雪榆. 复杂曲面实物的逆向工程及其关键技术 [J]. 机械设计与制造工程, 2000, 29(4): 1-3.
 [3] H Woo E Kang, Semyung Wang, et al. A New Segmentation Method for Point Cloud Data [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42: 167-178.
 [4] 陈志杨. 基于三角曲面原型的 B 样条曲面重构理论及其在反求工程中的应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
 [5] P Benko, R R Martin, T Varady. Algorithms for Reverse Engineering Boundary Representation Models [J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(11): 839-851.
 [6] 李江雄. 复杂曲面反求工程 CAD 建模技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 1998.

作者简介:

陈志杨 (1971-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为 CAD、逆向工程、图形图像技术; 潘如刚 (1975-), 男, 硕士, 主要研究方向为计算机图形学、CAD; 叶修梓 (1966-), 男, 长江学者奖励计划特聘教授, 博士生导师, 主要研究方向为 CAD、计算机辅助几何设计。