

基于顶点删除算法的连续多分辨率模型表示*

张建保 杨涛 孙济洲

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要 提出了一种基于顶点删除算法的多分辨率模型表示。该方法充分利用了相邻细节层之间的连贯性,每一细节层只存储与上一细节层不同的部分,从而节约了空间,方便了查询与网上传输。这种多分辨率模型既可以设置成连续分辨率,也可以设置成离散分辨率。适于 LOD 显示、增量式网络传输以及网格压缩等应用。

关键词 图形显示 LOD 多分辨率模型

0 引言

在可交互的虚拟环境中,绘制程序要实时地绘制非常复杂的场景,如高地数据、城市、建筑物等。这些复杂场景可能要包含上百万个几何图元(多边形),即使是高档的工作站也难以达到实时性。然而在飞行训练模拟、建筑巡游等应用中,可交互的帧频率是衡量系统的重要标准,因此许多算法被用来加速显示过程,例如可见性预处理、多分辨率模型、图象插值等。对于用单分辨率表示的物体,当视点离模型远时,显示细节相对丰富,当视点离模型近时,显示细节却相对缺乏,这是不合理的。采用多分辨率模型,即具有多种细节层次的模型(Multi-level of detail)表示时,可根据某种判断条件,适当的选择某个细节层次进行显示。此外,在网络上传输时,可以进行增量式的传输,先传输最低分辨率的模型,再传输细化记录;在网格压缩时,根据需要,可以输出任意一级分辨率。这些均使图形的显示、传输、处理的效率得以提高。然而,为了节约存储空间,传统的多分辨率模型的细节层次不会太多,属于离散多分辨率模型,供选择的细节层数不仅是固定的,而且当在不同层之间变化时,图象有跳动,需要进行插值处理。

为了解决上述问题,我们提出了一种基于顶点删除操作的多分辨率模型。这种多分辨率模型既可

以是连续分辨率,也可以是离散分辨率。与传统的多分辨率模型相比,它能提供远远多于离散多分辨率模型的细节层数,且细节层的数目可以动态调整,因而不会引起跳跃,而且所占用空间相对来说远远小于具有同样层数的离散多分辨率模型。

1 多分辨率模型

多分辨率模型(Multiple Resolution Model)的几何和表面属性用多种细节层次来表示,绘制程序就可以根据需求选择相应的细节层进行显示,这样就避免了因绘制那些意义相对不大的细节而造成的时间上的浪费。

James Clark 的关于层次几何模型的论文最早论述了在图象显示时使用模型的多种细节表示的优点^[1]。Crow 利用这种思想,用手工方式创建了物体的高、中、低 3 种细节表示^[2]。但 Crow 指出,这种创建物体的多细节表示的过程应该是自动的。多分辨率模型的创建通常是非常困难的,大多依赖于手工方式,这显然是一件费时费力的事。近几年众多学者纷纷把目光集中到这个题目上,产生了许多自动产生模型细节层次的方法,统称为多边形简化算法。其中一些算法已得到广泛应用。Hamann^[3]提出的一个适用于三角形网格的简化方案属于几何去除算法。它根据局部曲率来计算原始模型的三角形的权重,曲率低的地方简化的多,曲率高的地方简化的

* 本文研究得到国家 863/CIMS 主题项目(No. 863-511-707-002)与天津市自然科学基金资助
收稿日期:1998-08-11;收到修改稿日期:1998-09-23

少。Turk^[4]提出了一种采样和几何去除相结合的算法,比较适用于曲面,但不适合于具有棱边和角的模型。Schroeder^[5]算法的主要特点是简化后模型的顶点是原始模型顶点的子集,是一种顶点去除算法,但它的缺点是每一步顶点去除都是针对上一次简化后的结果。Lounsbery^[6]提出一种利用小波变换来构造网格的多分辨率模型表示的算法。它包括一个简单的基础网格并附以一系列局部修正项,即小波系数,用于捕捉物体在不同分辨率下的细节特征。但该方法有一个严重的缺陷,即对网格的拓扑有严格的限制。

利用多边形简化算法可以得到多边形网格的一个简化版本。如果一个模型同时用多个简化版本表示,即是一个多分辨率模型。通常这些简化版本之间互不相关,分别存储,这样就增加了存储系统的负载;在网络中传输这种模型时,每个简化版本分别传输,又增加了网络的负载。这就促使我们产生了设计一个连续分辨率模型的想法。连续分辨率模型充分利用模型的相邻细节层之间的连贯性,低级的细节层只存储与高级的细节层之间的差异,而不是存储整个模型。Progressive Meshes^[7]就是这样一种模型。它是一种基于边崩溃的网格简化算法,给定一个原始网格,利用能量函数进行边崩溃简化,每次都记录下操作的内容,最后得到一个最简模型。在这个模型的基础上,利用简化记录能恢复到任意一步。本文介绍的连续多分辨率模型与此不同,是一种基于顶点删除算法的多分辨率模型,与 Progressive Meshes 模型相比,前者具有实现更为简单,灵活性强,可以任意设置层数等优点。

2 基于顶点删除算法的连续分辨率模型表示

2.1 构建 CRM 的基本方法

本文提出的连续分辨率模型(CRM)的构建是通过顶点去除多边形简化算法实现的。顶点去除的过程实质是用数量较少的大三角形来取代较多较小的三角形,从而可获得不同复杂层次的同一场景模型的多边形网格描述。如果在顶点删除过程中并不是按传统的方法将每次删除后的现场全部记录下来,而是将每次被删除的顶点、三角形和新增加的三角形等信息保留下来,那么,当需要时,利用不同简化层间的相关性,同样可使网格恢复到任何一个时刻

的状态。其描述如下。

对一个原始的网格 M_0 ,删除第一个可满足删除条件的顶点及其周围的三角形,然后对留下的空洞进行局部三角化处理,即用更大的三角形补上,得到网格 M_1 。 M_1 的顶点数目只比 M_0 少一个。然后再以 M_1 作为输入网格,对其进行一次顶点删除操作和三角化处理,得到 M_2 。一直进行下去,直到某个终止条件满足,得到最终网格 M_n 。在这个过程中共删除了 n 个顶点。在算法进行过程中,每删除一个顶点及其周围的三角形,均记录下顶点的标号、被删除三角形的标号和新增加三角形的标号,同时将新增加的三角形加入到网格的三角形链表中。整个过程没有新的顶点产生。这样每进行一次顶点删除操作,就会得到一条记录,称为简化记录(Simplification Record)。这些记录实际上是记录下了每一步操作后的“现场”。对任一细节“现场”的恢复是上述过程的逆过程。从 M_n 出发,根据与其相应的简化记录 S_n ,先去掉新增加的三角形,再恢复被删除的三角形,得到网格 M_{n-1} ;再处理简化记录 S_{n-1} ,可得到 M_{n-2} ;...直至所需要的细节网格层。由于从 M_0 到 M_n 每两个相临层之间只差一个顶点,故可称其为连续分辨率模型。实际上,如果不考虑网格所表征的形状,这种顶点删除操作可以一直进行下去,直到整个网格只变成一个四面体。如果将一条线段和一个点都看作是退化了的三角形,那么这种操作可以进行到只剩下一个顶点。这样从原始模型 M_0 出发,每删除一个顶点就得到一个网格层,直到最后只剩下一个顶点,这就构成一个完整的模型金字塔。它类似于 William 的纹理金字塔,但不是纹理滤波,而是一种细节滤波。

2.2 CRM 的数据结构

CRM 的数据结构中至少应该包括 3 部分信息:顶点数据,三角形,简化记录。

每一个顶点被一个 Id 唯一定义,且都放到一个顶点数组中。在三角形的定义中存储三角形 3 个顶点的标号。每一个三角形也有一个唯一 Id 。所有的三角形定义,包括原始模型的三角形定义和在三角化过程中产生的新的三角形的定义都被存放到一个数组中。简化记录由下列三部分组成:被删除顶点的 Id 、该顶点周围被删除的三角形的 Id 、新增加的三角形的 Id 。由于被删除和增加的三角形的数目不止一个,所以将他们分别放到 2 个数组中。另外

还需要2个域分别记录被删除和增加的三角形的数目。所有的简化记录将被放到一个数组中,根据简化记录就可以在CRM的任意两层之间做转换,所以在CRM中不仅要存放顶点、三角形、简化记录的定义及数目,还要有一个域记录CRM所处的当前层。在三角形的定义中还应该有一个字段标识该三角形是否处于被删除态。

2.3 顶点删除算法

一般来说,任何一种多边形简化算法均可被用来创建多分辨率场景模型。但大多数简化算法,如文献[4]、[8]由于包含重采样过程,使得相邻细节层之间毫不相关,不适用于生成CRM模型。而顶点删除算法是一种几何去除算法,可以利用相邻层之间的相关性。

顶点删除法算法的原则是首先选择位于物体表面曲率最小处的顶点予以删除。在每一遍扫描三角形网格的过程中,如果某个顶点满足去除条件,则该顶点以及所有使用该顶点的三角形将被去除。产生的空洞通过局部三角化算法补上。适当修改去除条件值,然后重复上述过程,直到满足某些终止条件。整个算法可以概括为3个步骤:

(1) 识别顶点的几何和拓扑特征

实验中我们借用了Schroeder^[5]的顶点识别和去除判断条件。按其顶点的分类,除了复杂顶点(以其为端点的边没有被两个三角形所共享,或者该顶点被一个没有在三角形环中的三角形使用)不能被删除外,其余顶点都可以成为候选删除顶点。

(2) 求出顶点的去除条件值

对于简单顶点(正好被一个完整的三角形环所包围,每一个以该顶点为端点的边被两个三角形所共享),将其与一个平均平面的距离作为去除条件。平均平面的构造方法如下:

$$N = \frac{\sum n_i A_i}{\sum A_i}, \quad n = \frac{N}{N}, \quad x = \frac{\sum x_i A_i}{\sum A_i}$$

其中, n_i 、 A_i 、 x_i 分别为顶点周围第 i 个三角形的平均平面单位法向量、面积和平均平面的中心点。顶点 v 到平均平面的距离为 $d = |n_i \cdot (v - x)|$ 。如果距离小于某个预先定义的值,则该顶点可能被去除。对于在三角形网格边界上的顶点,以其到某一直线的距离 d 做为简化标准,这一直线是通过连接两个产生边界的顶点所形成的。

(3) 三角化顶点删除后留下的洞

如果删除了一个顶点以及与该顶点相关的三角形,那么由与该顶点相关的有序顶点环(或半环)所形成的多边形区域必须进行三角化。在实验中我们采用了文献[8]提出的一种简单易行的局部三角化算法。其基本思想是:对和简单顶点相关的有序顶点环,通过投影到平均平面上,把三维三角化问题转化为一个二维带约束的局部三角化问题。

算法步骤是:

① 求出有序顶点环中每一顶点在平均平面上的正交投影,并用循环单向链表保存顶点,顺序连接投影点得到一平面多边形,转②;

② 如果该多边形是非自交的,转③,否则,表示该环不能三角化,那么产生该环的候选顶点不能删除,转⑥;

③ 判断多边形顶点的凸凹性。在链表中顺序取出3个顶点 P 、 Q 、 R ,若 Q 为凸点,并且由 P 、 Q 、 R 对应的顶点所构成的三角形不包含多边形上其它顶点,那么保存该三角形,并从链表中删除 Q 顶点。否则转③;

④ 若链表中还存在三个以上的顶点,转③。否则转⑤;

⑤ 由链表中最后三个顶点构成一个三角形;

⑥ 结束。

3 连续多分辨率模型的应用

CRM可应用于LOD(Level of Details)显示。根据某种判断准则,可选择任一适当的细节层做为绘制的对象,从而在不损失太多视觉信息的前提下,减少绘制的多边形数目。判断准则可以是视点离被显示对象的远近,也可以是物体的最终图象在屏幕上的大小,或是根据机器的性能。在进行LOD显示时,为了避免大量存储简化记录而造成的空间耗费,也常常根据需要限定细节层数,希望将CRM转化为只含有用户指定的细节层数的离散的分分辨率模型(DRM)。CRM模型可以很方便地实现这一点,只须将相邻的细节层平均成一个细节层,将相应于每层的简化记录合并为一个。由于每个细节层都是由删除一个顶点及其相邻三角形而得到,所以将几个相邻细节层合并成一个细节层的实质是顺序删除几个顶点。

在广域网中,由于传输速度较慢,如果直接传输模型的最精细定义,客户端在接收到模型的完整定义之前,不能显示模型的图象,屏幕将长时间是一片

空白。如果能够增量式地传输模型的定义,服务器(Server)端先传输模型的最粗糙的细节层,客户端可以先显示模型的大致模样,然后在用户浏览过程中,再逐渐地传输模型的精细定义。CRM模型和由CRM转化来的DRM模型都可以应用到增量式网络传输中。实现时首先将模型当前细节层设置为最简单的模型,将该细节层的三角形列表传输到客户端,然后再依次传输简化记录,同时将简化记录中被删除和新增加的三角形标号转换为完整的定义并传输到客户端。客户端在收到这些简化记录和三角形定义后,不断地修改模型,并重新显示。

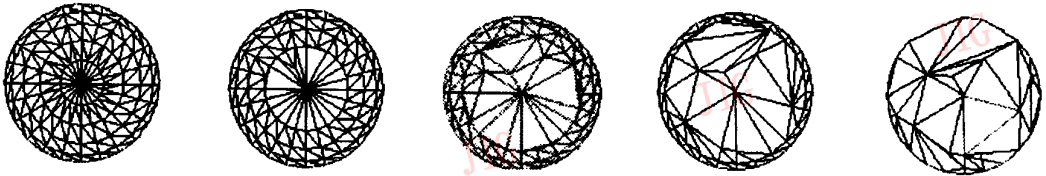


图1 球体 DRM 模型的几个细节层

图1是一个简单球体的DRM模型的几个细节层。网格文件用Pro/E软件输出,图象用OpenGL在Windows NT上绘制。下面是有关球体CRM和DRM模型的一些统计数据。

CRM模型共有242个顶点,181个简化记录,1033个三角形。由于原始模型有480个三角形,所以新增加了553个三角形。181个简化记录对应182个细节层。如果用传统的多分辨率模型,则182个细节层共需大约68000个三角形。

DRM模型的一些统计数据如表1所示。

表1 DRM模型的数据统计

细节层	三角形个数	删除的三角形个数	增加的三角形个数
0	480		
1	400	133	53
2	320	143	63
3	240	145	65
4	160	153	67

从表1中的数据可以看出,DRM模型共有4个简化记录,728个三角形,5个细节层。原始模型共480个三角形,所以DRM模型比原始模型增加248个三角形。传统的多分辨率模型则需要1600个三角形。所以共节约了大约872个三角形所占用的空间。

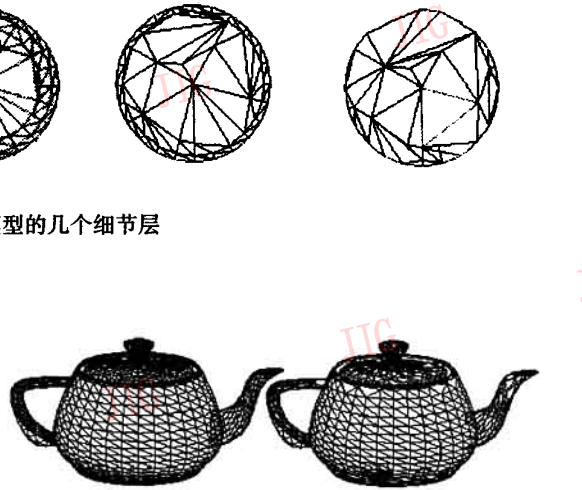
(2) 茶壶

原始模型有2078个顶点,4026个三角形。CRM

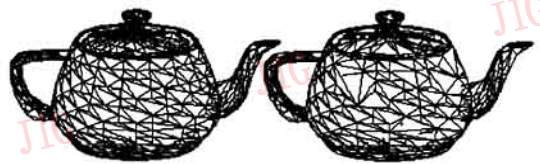
网格压缩和网格简化的含义是一样的。由于从造型系统和扫描系统获得的网格模型往往没有经过优化处理,许多多边形都是共面的,模型占用的存储空间较大,所以希望对这些原始的网格压缩后再进行存储。CRM模型可以输出任意一级分辨率,用户根据存储空间的大小和模型精度的要求,适当选择一级分辨率输出,作为最终的网格进行存储。

4 实验结果

(1) 球体



(a) 2078个顶点,4026个三角形 (b) 1678个顶点,3241个三角形



(c) 1378个顶点,2645个三角形 (d) 1102个顶点,2095个三角形

图2

模型共有976个简化记录,7689个三角形。由于原始模型有4026个三角形,所以新增加了3663个三角形。976个简化记录对应于976个细节层。

参考文献

- 1 Clark J H. Hierarchical geometric models for visible surface algorithms. Communications of the ACM, 19(10):547~554.
- 2 Franklin C C. A more flexible image generation environment. Computer Graphics, 1982,16(3):9~18.
- 3 Hamann B. A data reduction scheme for triangulated surface. Computer Aided Geometry Design,11(2):197~214.

- 4 Greg T. Re-tiling polygonal surfaces. *Computer Graphics*, 26(2):55 ~ 64.
- 5 Schroeder W J, Zarge A, Lorensen W E. Decimation of triangle meshes. *Computer Graphics*, 1992, 26(SIGGRAPH'92): 65 ~ 70.
- 6 Matthias E, DeRose T, Duchamp T *et al.* Multiresolution analysis of arbitrary meshes. *Computer Graphics*, August 1995, (SIGGRAPH'95 Proceedings):173 ~ 182.
- 7 Hugues H. Progressive meshes. *Computer Graphics*, 1996, 30(SIGGRAPH'96):99 ~ 108.

- 8 潘志庚,马小虎,石教英. 虚拟环境中多细节层次模型自动生成算法. *软件学报*,1996,7(9).



张建保 天津大学电子信息工程学院计算机系硕士研究生。主要研究方向为计算机图形显示算法、纹理映射技术等。



孙济洲 博士,教授。1985年在天津大学计算机科学与工程系获硕士学位,1993年在英国 Sussex 大学获博士学位。现任天津大学电子信息工程学院副院长。主要研究方向为计算机图形算法与系统结构、分布式计算机网络、多媒体信息技术等。

杨涛 硕士研究生。1997年7月本科毕业于天津大学计算机系,现继续在天津大学攻读硕士学位。目前的主要研究方向是分布式虚拟现实系统及其虚拟巡游中图形的加速显示算法。

A Vertex Removal Based Continuous Resolution Model

Zhang Jianbao, Yang Tao and Sun Jizhou

(School of Electrical Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract In this paper, a vertex removal algorithm based multiple-resolution model representation is presented, which effectively utilises the coherence of adjacent levels of detail and only records the differences between these levels, leading to an economical storage mechanism. It can be used for LOD display, incremental transmission over a network and mesh compression.

Keywords Graphics display, LOD, Multiple-resolution model