

面向虚拟现实环境的任意形状模型的开发

赵 昭

徐 彤

(中国科学技术大学研究生院, 北京 100039)

(日本伊藤忠商事株式会社)

摘 要 提出了一种基于网格数据结构的对存在于计算机中任意形状模型进行直接变形操作的方法。用多层分辨率方法解决了不同变形范围的问题,并提出了此方法所需的接触判断的高速算法和变形算法,通过实验证实了此方法的有效性,支持了虚拟空间的三维形体创造活动。

关键词 虚拟环境 任意形状模型 多层分辨率

0 引 言

形状模型是指不考虑功能和性质等因素,只对非规则物体外观进行的模型设计。以往的设计者多用图解或实物模型来进行这种型式的设计。

伴随着计算机系统的发展,模型加工的自动化成为可能,并且在机械设计和建筑设计等领域三维计算机辅助设计(CAD)也进入了实用化。但是在以往的三维CAD模型加工中所使用的输入设备多为以鼠标器和键盘等为代表的二维输入或数值输入等间接输入设备,这样的作业环境基本上可以应付机械、建筑中比较规则的形状,却难以支持象雕塑这样自由度很高的艺术创造活动。因此有必要在计算机设计环境中提供对三维模型的直接输入和修整手段,以利于发挥出设计者更高的创造性才能。

另一方面,近年来随着三维计算机图形技术和

输入输出设备的发展,在众多应用领域中建立一种只存在于计算机系统内部的虚拟空间的技术已成为可能。运用这种技术,可以直接对存在于计算机内部的物体模型进行操作,设计者利用直感的操作可以对三维物体进行模型化加工。

一般认为网格型数据结构可以很好地表达任意形状的物体。而在三角形网格、四边形网格和多边形网格中又以三角形网格为最具一般性的数据结构。但是用网格来表现任意形状模型的方法存在以下的困难^[1,2]。

(1) 广域变形和局域变形

为了高效率地进行意向中的变形,一般将设计中的变形操作分为大范围变形(广域变形)和细节变形(局域变形),如图1。为此必须提供广域变形和局域变形2方面的变形方法的支持。但是在使用通常的网格数据结构的场合,同时实现广域变形和局域变形比较困难。

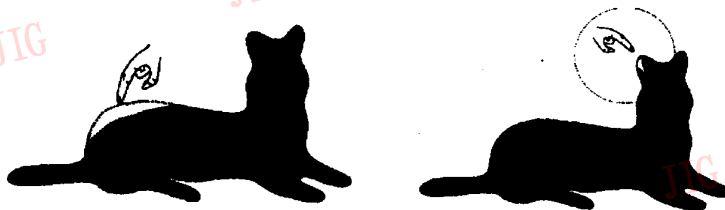


图1 广域变形与局域变形

(2) 实时的直接操作

当设计者用手(三维鼠标的操作点)对以网格型数据表示的三维任意形状模型进行直接变形操作时,为了决定需要变形的位

置,有必要判定手和被操作物体是否有接触,进而检测出发生接触的位置。但是对于拥有大量顶点的网格型数据,对所有的顶点逐个地进行接触与否的判断需要大量的计算时间而难以进行实时处理。

为此有必要研究开发高效率的数据结构以及建立在这种数据结构基础上的高速的接触判定和模型变形的算法。本论文为了克服上述困难,提出了一种新的网格型数据结构以及在此基础上的接触判定与模型变形算法,并开发了基于三角形网格数据结构的任意形状的模型化系统。

虽然具有多层分辨率的网格型数据结构在文献[4]、[5]中已经有所研究,但因为其研究的着眼点在于图象显示的高速化和数据结构的通用性,这些数据结构并不适合于实现对具有高分辨率的模型进行广域变形。

1 多层分辨率的三维任意形状的生成方法与数据结构

1.1 多层分辨率的生成方法

(1) 定义

分辨率 K : 网格的顶点数为 K 。

合并变换: 一条边的两个端点合并为一个顶点的变换称为合并变换。

图 2 中给出了合并变换的例子。顶点 V_7 和 V_8 合并变换为 V 。在这里边的两端点的中心点将作为合并变换后新产生的顶点。

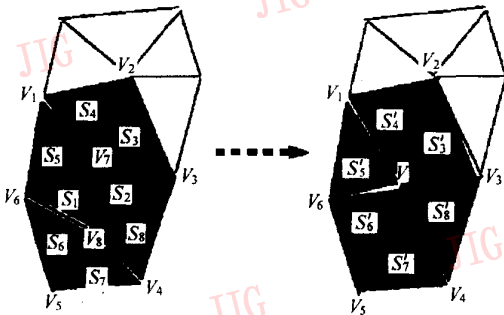


图 2 合并变换

(2) 生成步骤

对于一个任意形状模型的网格数据,检索长度最小的边并对其进行合并变换。每进行一次合并变换就生成该任意形状模型的一种分辨率的网格数据。而该分辨率的网格数据又成为下一个分辨率的网格数据的生成基础。以下是多层分辨率网格数据的生成算法:

- ① 输入分辨率为 K 的三维模型初始值;
- ② 找出长度最短的边,对其进行合并变换;

- ③ 生成分辨率 $K=K-1$ 的数据;
- ④ 如果 $K=1$ 则结束,否则转到②。

1.2 多层分辨率网格的数据结构

1.2.1 基本数据结构

(1) 全部分辨率的网格顶点集合: V_1, V_2, \dots, V_n 。

对于某一次合并变换生成的顶点 $V_i, V_i = (x_i, y_i, z_i) | (n_{i0}) | (n_{i1}, n_{i2})$, 其中下标 i 为顶点标号。这里 n_{i1}, n_{i2} 为合并变换前的两顶点的标号, n_{i0} 为合并变换所产生的顶点的标号, (x_i, y_i, z_i) 为 V_i 的坐标值。如图 3 所示, 一个具有 8 个顶点的模型经过一系列的合并变换后, 顶点 V_{10} 的附加信息: $n_{i0}=11, n_{i1}=1, n_{i2}=2$ 。

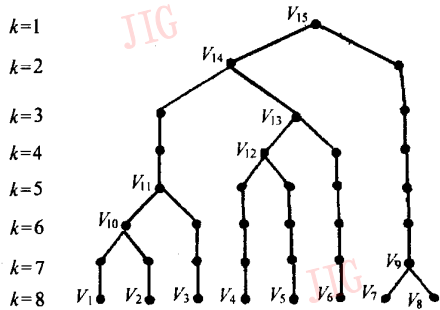


图 3 顶点的二叉树数据结构

(2) 某一分辨率 k 下的三角形(贴面)集合: $S_1^k, S_2^k, \dots, S_m^k$, 其中 $S_i = (V_{i1}, V_{i2}, V_{i3})$ 。

1.2.2 高效的数据记录方式

原始模型具有大量顶点时,多层分辨率的数据量将是非常大的,因此必须寻求一种高效率的数据记录方法。

(1) 三角形的数据记录的重复

如图 2 中所示的将边 V_7, V_8 进行合并变换的情况下,三角形的数目减少 2 个,而三角形的数据中只有与顶点 V_7, V_8 相接的阴影部分的三角形发生变化。由此可见不同分辨率的记录中存在着大量相互重复的三角形。

(2) 三角形数据的高效记录方法

为了更有效地表达三角形数据,在组织数据时并不是根据分辨率的不同来组织,而是将所有分辨率的数据统合起来,如下的方式加以表达: S_1, S_2, \dots, S_m , 且 $S_i = (V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}) | (K_{i1}, K_{i2})$ 。这里 (K_{i1}, K_{i2}) 表示三角形 S_i 在分辨率 K_{i1} 到 K_{i2} 之间一直存在。

(3) 讨论

由一次合并变换所引起的三角形减少的数目在

绝大部分的情况下为 2 (被变换的边为边界线时为 1), 所以如果令最高分辨率时的三角形数为 n , 最低分辨率时的三角形数为 0, 则一般的数据记述方法为表示所有分辨率的三角形总数正比于 n^2 , 而采用本文所述的数据记述方法则正比于 n , 可见其节省存储量的效果非常明显。

2 任意形状模型的模型化系统

2.1 系统构成

本系统由图形工作站(SGI Indigo2)、立体视眼镜、3 维鼠标器组成, 其中 3 维鼠标器是读取设计者操作的输入设备, 设计者通过立体视眼镜来观察图形工作站的 3 维图形输出。

2.2 系统操作过程

对于虚拟环境中存在的某个网格数据所表示的模型, 设计者在本系统中可以通过 3 维鼠标器直接对其进行变形操作。

2.3 接触的高速检测方法

当设计者对任意形状模型进行直接变形操作时, 由于操作点经常在移动, 所以有必要实时地判定操作点与任意形状模型的接触。为进行接触判定, 需要检测出任意形状模型中与操作点距离最近的点或者面。

在检索过程中最消耗计算时间的是操作点和各三角形顶点之间距离的计算。利用图 3 所示的二叉树型的顶点的数据结构, 我们可以以较少次数的距离计算检测出接触点的位置。这时接触的判定过程就转化成了二叉树的检索。对于分辨率 $K=n$ 的任意形状模型进行操作时具体的判定过程如下:

(1) 从分辨率 $K=k$ 的全部顶点中 ($k < n$) 计算与操作点距离最近的顶点(二叉树的节点) V_k ;

(2) 在 V_k 的子节点中计算与操作点距离最近的节点 V_{k+1} , 且令 $k=k+1, V_k=V_{k+1}$;

(3) 重复(2)的操作直到 $k=n$ 。

下面讨论一下该方法的计算量。首先在分辨率 $K=k$ 时为了判定与操作点距离最近的节点需要进行 k 次距离计算。另外因为从分辨率 $K=k$ 到 $K=n$ 的二叉树的平均深度为 $\log_2 n - \log_2 k$, 所以从分辨率 $K=k$ 到 $K=n$ 的检索中需要计算距离的次数近似

地为 $2 \times (\log_2 n - \log_2 k)$ 。也就是说总的距离计算的平均次数为:

$$M \cong k + 2 \times (\log_2 n - \log_2 k) \quad (1)$$

反之, 如果不利用二叉树结构, 为了从 n 个节点中找出与操作点最近的顶点需要进行 n 次距离计算。显而易见, 在 $k \ll n$ 且 n 充分大的情况下, 我们所采用的方法所需的计算量要小得多。

2.4 变形的传播方法

正如在二维制图中可以选择不同的线宽和线种一样, 在三维模型操作(雕塑)时也可以选择不同尺寸和形状的“雕刻刀”或“贴块”。在进行变形时首先根据所要进行的变形是广域变形还是局域变形来选择分辨率。然后从多种变形方式中任意选择一种所需的变形方式进行操作。

以 2 种变形方式为例说明数据传播的方法。

(1) 突变方式(方形雕刻刀)

① 现行分辨率下的数据的变形: 利用 2.3 节所述的接触判定方法找出与操作点距离最近的顶点, 移动其位置, 且所移动的距离等于操作点的移动量。

② 下层节点的变形传播: 对被移动的节点的全部子节点进行移动量相等的移位变形。

③ 向上层节点的变形传播: 变形移动量以每一层减少 1/2 的原则向上层节点传播。

(2) 渐变方式(三角形雕刻刀)

① 以最高分辨率检测需要变形的区域: 利用 2.3 节所述的接触判定方法找出与操作点距离最近的顶点 V 。在 V 的最下层的子节点(最高分辨率的下的节点)中检测出与 V 距离最远的节点, 并将其到 V 的距离 L 设为变形传播半径。

② 最下层的子节点的变形: 对 V 的最下层各子节点进行变形操作。变形的移动量由其到节点 V 的距离决定。例如有 V 移动量为 x , V 的某最下层子节点 V_1 距 V 的距离为 L' , 则有 V_1 移动量 $P = (1 - L'/L)x$ 。

③ 最下层子节点向节点 V 的变形传播: 最下层子节点到节点 V 之间的节点的移动是由下向上传播的。每个中间节点将移动到其 2 个子节点之连线的中点。

④ 节点 V 的上层节点的变形的传播: 变形移动量以每一层减少 1/2 的原则向上层节点传播。

以上是对 2 种变形传播方法操作的具体说明。这些变形的传播处理可以保证以下 2 点: (a) 如果对广域构造进行变形操作, 局域构造也将受到相应的变形

影响。(b) 合并变换所生成的顶点与原 2 顶点的位置关系保持不变(多层分辨率的二叉树不变)。

3 实验与讨论

(1) 实验所使用的数据

作为实验的初始状态,我们用计算机生成了球状模型的数据。考虑到从实际的模型采集数据的情况,在生成的模型的各个顶点中附加了随机误差。

(2) 基于二叉树法的接触检测实验

对于(1)的球状模型数据,在分辨率 $k=1000$ 下进行了接触位置的检测实验。具体而言,作为模拟的操作点的位置,我们在球面的附近随机地生成了 1600 个点,并在分辨率 $k=1000$ 的条件下检测与操作点距离最近的球状模型的顶点。表 1 给出了实验的结果。

表 1 检测结果

起始分辨率	误检测次数	距离计算的平均次数		
1000	0	1000		
800	8	802.7		
600	12	400	40	404.7
400	40	404.7		

根据实验的结果可以看出,距离计算的平均次数正如式(1)所示的那样大体上等于起始分辨率 k 。但是在利用二叉树方法对多层分辨率的模型数据进行接触检测时会产生误检测的问题。为减少误检测的发生,可以考虑采用下述的基于 Beam Search 法的改良方法。

为减少误检测的接触判定方法的改良:在接触检测的起始分辨率 k 下,首先检测出与操作点距离最近的 i 个节点。进而对其各个下层节点也检测出 i 个距离最近的子节点,通过进行比较计算是有可能减少误检测次数的。

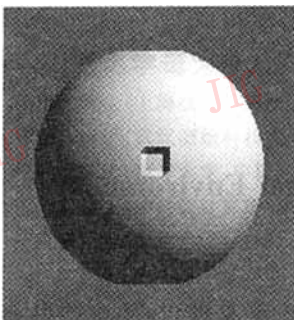
(3) 不同分辨率下的变形操作实验

在不同分辨率下的变形操作实验中,我们在各分辨率的球的相同位置施加相同大小的变形量。变形操作结果如图 4 所示。

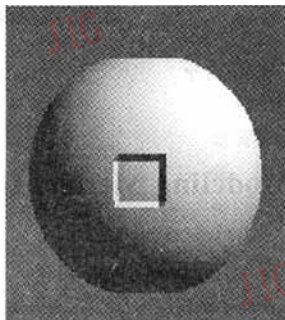
(4) 任意形状模型的模型化实验

从球的初始状态开始,经过数个分辨率下的变形操作,产生了如图 5 所示的任意形状模型。

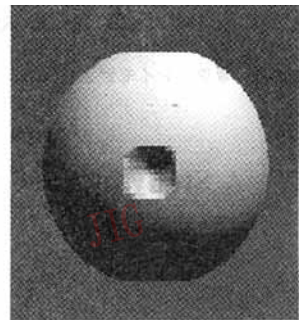
在实验中,我们利用本文所提出的多层分辨率三角形网格数据结构以及以此为基础的接触判定和变形方法,成功地由初始模型生成了一个任意形状模型。



(a) 局域变形(突变)

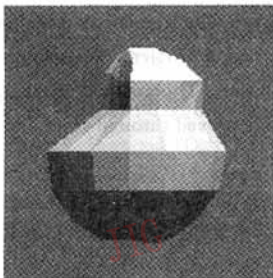


(b) 广域变形(突变)

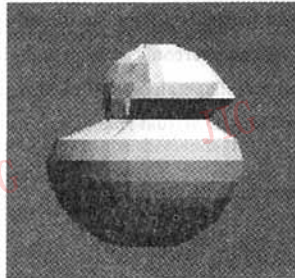


(c) 渐变

图 4 变形操作



(a) 变形的中间结果
(分辨率=100)



(b) 变形的中间结果
(分辨率=400)



(c) 操作结束后的模型
(分辨率=2156)

图 5 模型化

4 结论

本文提出了一种基于网格数据结构的对存在于计算机中的任意形状模型进行直接操作(变形)的方法,并完成了实验系统的制作。该系统由以下的3个算法为核心:

(1) 为了克服文中所述的用三角形网格表现任意形状模型时所遇到的困难而提出的具有多层分辨率的三角形网格数据结构及其生成算法;

(2) 基于多层分辨率三角形网格数据结构的接触判定的高速算法;

(3) 基于多层分辨率三角形网格数据结构的任意形状模型的变形算法。

通过本文所述的具体实验验证了这些算法的有效性。

作为今后的研究课题,我们考虑利用基于第3节中的(3)说明的 Beam Search 法对接触判定算法进行进一步的改进,并进行具体的验证实验。另外,希望结合新型的三维空间位置、力觉信息输入接口装置及三维视觉、触觉信息输出装置,为设计者提供一种感性而高效率的虚拟设计空间。

参考文献

1. 金井理. 仮想クレイモデラ (vcms). 产业用パーソナルリア

リティ展・IVR94,1994,98~108.

2. 太田宏树. 自由形状モデリングのための仮想環境の開発[修士論文]. 东京工业大学,2 1997.
3. 沼崎俊一等. 空間インタフェース装置 spidarを用いて回転形状をモデリング. 信学技报,10 1991,91(298).
4. Stuetzle W, Hoppe H. Surface reconstruction from unorganized points. Computer Graphics, 1992,26(2):71~77.
5. 王生进,佐藤诚. キューブ分割による3次元計測データの再標本化. 信学技报,电子情报通信学会,12 1994.
6. Laurendeau M, Soucy D. Multi-resolution surface modeling from multiple range images. IEEE Conference on Computer Vision and Parttern Recognition, 1992,348~353.
7. Levoy M, Turk G. Zippered polygon meshes from range images. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series. SIGGRAPH, 1994.
8. 北村喜文,竹村治雄. アフジヤナレンドラ,岸野文郎. Octreeと多面体を用いた三次元物体間の衝突面検出. 日本ロボット学会志,7 1996,14(5):121~130.



赵昭 1972年出生。1994年毕业于北京工业大学计算机学院计算机应用专业,获学士学位,同年进入中国科学技术大学电子学部通信与信号处理专业攻读硕士学位,现在美国UGA公司R&D部工作。主要研究方向为图象处理。

A Study of Free-Shape Modeling Method for Virtual Environment

Zhao Zhao

(Graduate School at Beijing USTC, Beijing 100039)

Xu Tong

(Japan Itochu Shouji, Ltd.)

Abstract In this paper, we propose a mesh-based method, which can directly operate(reshape) the free-shape-model stored in the computer database. By multi-resolution, we can overcome of local and global reshape region problem. We also propose a high-speed interference detection algorithm and a reshape algorithm needed in multi-resolution. This method enhances the creativeness and production of the 3D modeling within 3D virtual space, and its effectiveness is proved through several experiments.

Keywords Virtual environment, Free-shape modeling, Multi-resolution