

文章编号 1004 924X(2002)02 0226 05

细分造型技术在 CAD 系统中的应用研究

邓军民, 宾鸿赞, 区士颀, 梁伟文

(华中科技大学 机械学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在现有 CAD 系统中通用的 NURBS 造型对于非规则拓扑关系的曲面的表示存在着拼接、剪裁困难、表达难以准确等缺点,而在实际工程应用中形体轮廓复杂、难以通过基本体素复合且要求光滑的实体又普遍存在。细分造型计算简单,可以表达任意拓扑关系,在图形学中已得到广泛研究。本文阐述了细分造型的原理和方法,提出了在现有 CAD 系统中应用细分造型的方案,对细分造型中的网格生成、边界限定、法线控制、NURBS 补片转换等关键技术进行了研究,初步构造了细分造型的原型系统,可极大地缩短复杂曲面形体的造型时间,取得了良好的实践效果。

关键词: 计算机辅助设计; 细分曲面; NURBS 补片; 边界控制

中图分类号: TP391.72 **文献标识码:** A

1 引言

NURBS 尽管早已被国际标准化组织作为定义工业产品数据交换的 STEP 标准,在工业造型和动画制作中得到了广泛的应用,但仍然存在着一些固有的缺陷。单一的 NURBS 曲面与其他参数曲面一样,仅限于表示在拓扑上等价于一张纸、一张圆柱面或一张圆环面的曲面,不能表示如人的头、手,自然花卉等复杂的任意拓扑结构的曲面。如果使用补片的形式来实现复杂光滑曲面的构造,则又带来了 NURBS 的修剪和拼接缝合问题。这种修剪和拼接的计算是非常昂贵的,而且有数值误差,要在曲面的接缝处保持光滑,即使是近似的光滑也是困难的。如果模型是活动的,则情况更是如此。

而以网格细分(Subdivision)为特征的离散造型与传统的连续造型相比,大有后来居上的创新之势。细分造型有潜力克服以上两个困难,它们将传统的样条补片推广为任意拓扑的结构,无须

修剪和拼接,活动模型的平滑度被自动地保证。而且,由于细分是基于递归的结构,可以非常自然的实现分级渲染和误差范围内的逼近,特别适于多辨识分析。同时它还具有有限元分析所要求的良好特性,适于 3D 曲面的数据重建,以及计算简单高效等优点^[1]。目前,各大涉及造型的软件公司甚至包括 Microsoft, Intel, IBM 等都对细分造型给予了非常高的重视,细分造型的原理已经在高端动画软件和许多商业造型软件如 Maya, Mirai, 3D Studio Max, LightWave 等软件中使用。

由于细分造型的诸多优点,在现有 CAD 系统中引用细分造型的方法将能克服 NURBS 的缺陷,在雕塑曲面等复杂形体的造型方面给用户带来非常大的方便,和 NURBS 相辅相成,给 CAD 系统带来更为强大的功能。目前,细分造型的理论虽然经过了很大的发展,但仍未完全成熟,还未在 CAD 系统中得到真正的应用。本文试图在细分造型和现有 CAD 系统的结合上探索一条可行的道路。

2 B 样条曲线和细分曲线

三维空间内, 对于样条曲线 $y(t), t \in [0, 1]$ 可以表示为:

$$y(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^m B_i^l(t) P_i, \quad (1)$$

其中 $P_i \in (P_0, P_1, P_2, \dots, P_m)$, $B_i^l(t)$ 是对应于顶点 P_i 的基函数。同时对于 $B_i^l(t)$, 有箱函数:

$$B^0(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 1 \\ 0, & t \notin [0, 1] \end{cases}$$

且 $B^1(t) = B^0(t) \otimes B^0(t)$,

又 $B^0(t) = B^0(2t) + B^0(2t - 1)$, 则

$$B^l(t) = \underset{i=0}{\overset{l}{\otimes}} B^0(t) = \frac{1}{2^l} \sum_{k=0}^{l+1} \binom{l+1}{k} B^l(2t - k), \quad (2)$$

对于式(1)若定义

$$B_i(t) = B(t - i), t \in [i, i + m];$$

$$P^0 = (P_0, P_1, P_2, \dots, P_m)^T;$$

$$B(t) = [\dots, B^l(t - 1), B^l(t), B^l(t + 1), \dots]$$

则式(1)可记为 $y_i(t) = B(t)P^0$ 。

由式(2)可知,

$$B(t) = B(2t)S.$$

$$S_{2i+k, i} = S_k = \frac{1}{2^l} \binom{l+1}{k}.$$

故

$$\begin{aligned} y(t) &= B(t)P^0 \\ &= B(2t)P^1 = B(2t)SP^0 \\ &= B(2^j t)P^j = B(2^j t)S^j P^0, \end{aligned} \quad (3)$$

可以看出, 曲线仍然是同样的曲线, B 样条的密度加大了一倍基函数由 $B(t)$ 变成了 $B(2t)$, 控制点也由 P 变成了 SP 。可以定义不同层次间控制点的关系为

$$P^{j+1} = SP^j, \quad (4)$$

其中 S 即为细分矩阵。

经过对控制点进行不断的细分, 最后这些控制点就会收敛到实际的样条曲线上。细分的思想也就是通过绘制控制多边形(即分段线性曲线)来取代曲线的绘制, 利用细分矩阵产生一系列分段线性曲线, 逼近样条曲线本身, 如图 1 所示。



图 1 平面内细分曲线实例

Fig. 1 Examples of subdivision for curves in the plane.

3 CAD 中细分造型技术的应用方案

目前 CAD 系统在对规则拓扑关系的曲面的造型功能是非常强大的。细分造型则对于复杂拓扑关系的曲面的造型展现了其强大的优越性。如果在现有 CAD 系统中运用细分造型技术, 将能博采众长、扬长避短, 给 CAD 造型带来更加丰富完善的功能, 这也将是 CAD 系统突破创新的一个重要方向。据此, 作者提出了一种在现有的 CAD 系统中运用细分造型技术的方案。该方案运用现有 CAD 系统如 AutoCAD 创建初始网格, 再利用细分处理得到复杂光滑曲面, 再将该曲面和 CAD 系统中其它模型进行融合, 直至得到满意的效果。其框架如图 2 所示。

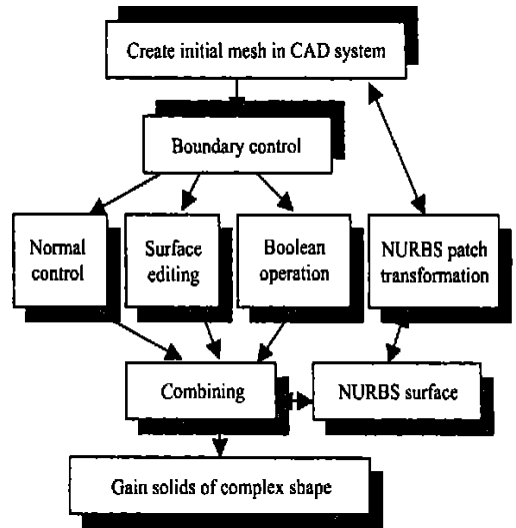


图 2 CAD 系统中细分造型的应用框图

Fig. 2 Framework of applications of subdivision modeling in a CAD system.

3.1 初始控制网格的创建

目前细分造型的初始网格多是使用激光测量仪从手工模型上取得, 再对数据点进行曲面重建, 过程非常麻烦。

针对 CAD 系统的用户更习惯于从基本形体

出发,逐步产生更加复杂的曲面或实体,作者提出了一种更为简单网格构建方法:首先用一些基本形体如简单面片,四方体、三棱锥等来确定目标形体的大致形状,通过对基本形体进行一系列的布尔运算等操作,产生一些较为复杂的粗糙形体,然后再由这种粗糙形体产生出细分造型所需要的初始网格,最后通过一定层次的细分运算即可得到所要求精度的光滑曲面。如图 3 是利用 AutoCAD 系统产生的初始网格,逐步细分出光滑的手套模型。

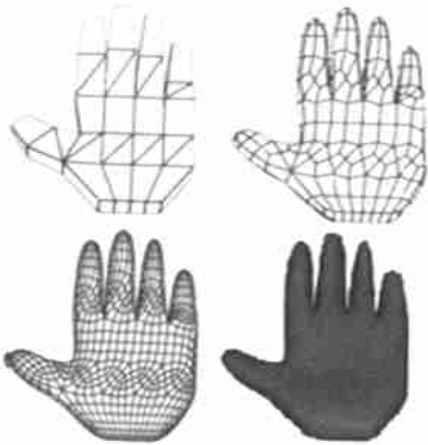


图 3 在 AutoCAD 中创建初始网格并对之细分的实例

Fig. 3 Examples of subdivision surface from an initial mesh created in AutoCAD.

另外,国外还有人提出了利用输入电脑的照片,在其上进行网格的编辑,然后通过多个角度的照片信息产生出三维网格的方法,这也是细分网格产生的一种很好的方法。如图 4 为在一张狗的图片上进行网格定义。



图 4 从图像上创建初始网格

Fig. 4 The example of creating initial mesh from a photo.

总的来说,在对复杂拓扑关系实体造型时,如果对于曲面的准确性要求不是非常严格情况下,如雕塑曲面、艺术造型时,产生细分初始网格的操作要比定义 NURBS 曲面要简单容易的多。

3.2 边界控制

在机械产品等造型中,有很多情况对于边界曲线的准确性要求比对于曲面的要求要高。如何控制网格在细分过程中,严格保证边界曲线,在组合细分方案(Combined subdivision schemes)给出了一个很好的解决。它可以让细分曲面的边界为任意给定的曲线。这就给细分造型和其他造型方式产生的形体的融合提供了良好的条件。组合细分方案是在以前的细分方案基础上加入了一些处理边界附近的点的新规则。如图 5 为两个简单形体在对边界形状进行控制后进行细分处理得到的曲面。

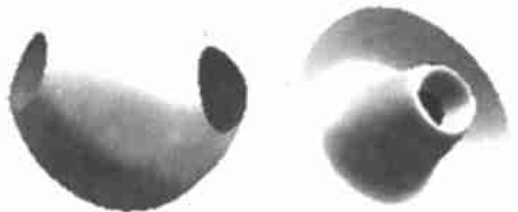


图 5 边界控制后的细分结果

Fig. 5 Gain inquired shape by boundary control.

3.3 细分曲面的修改与编辑

对于复杂曲面,在构造初始网格后往往还需要作进一步的修改和完善,逐步实现复杂的细节。细分曲面的修改和编辑主要运用以下几点关键技术:

3.3.1 法线控制

在实际的曲面拼接中,仅保证边界的重合还是不够的。有时还需要保证拼接后新曲面的连续性要求,两个面片如果在公共边处的法线方向不一致,就会形成一条尖锐的边界^[2]。利用法线控制的方法可以得到曲面边界处的任意控制。法线的控制方法通常是通过改变边界点细分规则中的权的大小来实现的。如图 6 为边界角点处取不同权值得到的细分曲面。

3.3.2 NURBS 补片转换

细分方法和 NURBS 方法各有优缺点,如果在其中得到它们的互换方法,将会给实际 CAD 工作带来更大的方便。细分方法的逐级精化网格,

给生成 NURBS 补片提供了很好的条件。

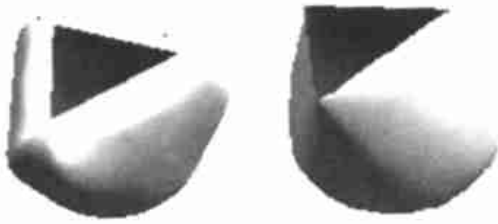


图 6 法线控制

Fig. 6 Normal interpolation.

一个四次 NURBS 补片 $Q(u, v) \in R^3$ 可由 $k + 4$ 个 u 和 v (节点向量) 以及 k^2 个控制点来定义。把控制点按顺序连接起来, 就组成了补片的控制网格。在节点之间进行插入并不会改变 NURBS 的图形。因此在细分网格中, 对部分单元格集进行一定的插入操作即可得到 NURBS 补片的控制网格。

3.3.3 细分曲面的布尔运算

布尔运算是表达复杂形体通常而必要的方法。一般的 B-Rep 实体可以看作是一个修剪后的有共同边界的样条补片的集合, 单个补片的边界都是近似的, 要在不同的参数域进行曲线的修剪已经是很困难的, 要对大量的曲面进行修剪并要保持光滑、避免出现狭缝, 那更是很困难的。在目前的 CAD 系统中, 布尔操作都是非常缓慢, 运算昂贵的。

细分曲面是多边形网格来表示的, 其基本布尔运算较为简单。但由于其低阶网格一般比较粗糙, 故需要对各部分初始网格进行一定的细分, 达到一定准确度后得到其截交曲线, 确定控制点后, 再返回到初始网格中来^[4]。可由以下步骤实现:

- 1) 计算逼近的截交曲线, 找出它在原始曲面参数域的图;
- 2) 从结果中构建连续的控制网格;
- 3) 优化初始域中结果的参数;
- 4) 用分级适应的方法决定结果控制点的图形位置。

3.4 文件格式与类型转换

细分造型方法主要数据是多边形网格, 因此在其数据类型进行定义时主要内容是点坐标和面关系。因此在程序开发时, 作者采用了 VRML 的文件格式(*.wrl)。其格式如下:

Separator{

```
Coordinate3{ point[... ] }
IndexedFaceSet { coordIndex [... ] }
DEF creaseEdge
  IndexedLineSet
    { coordIndex[... ] }
CornerVertex{... }
CreaseVertex {... }
DartVertex {... }
Sector {fields[...].... }
}
```

其中 Coordinate3, IndexedFaceSet 是传统的点和面定义, CornerVertex, CreaseVertex, DartVertex 标出了点的类型, IndexedLineSet 用来定义边界线。Sector 设定了角点处的标签标定及法线控制等。WRL 文件格式简洁明了, 可以很方便地和 DXF 文件进行互换, 同时它也受到很多造型软件的支持, 较小的体积也使它在网络上得到非常广泛的应用。

4 综合应用实例

细分曲面是目前国外研究曲面表示的一个热点问题。由于 NURBS 曲面固有的缺点, 细分造

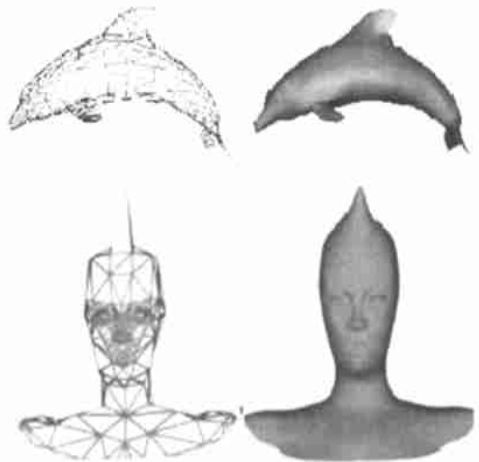


图 7 细分造型的应用实例(左图为由 CAD 系统创建的初始网格; 右图 of 细分 4 次后的结果)。

Fig. 7 Examples of application of surface subdivision modeling(On the left is an initial mesh created by CAD system, and on the right is the mesh subdivided four times).

型方法会逐渐成为一种对于任意拓扑形体造型的

新方法。本文提出了在现有 CAD 系统中运用细分造型的基本方案,能够对复杂拓扑曲面进行快速的造型和编辑,能够保证曲面的光滑,并具有文件存储量小、处理简单、显示迅速、支持网络传输和多辨识分析等优点,很好的解决了传统 CAD 系统中复杂实体造型困难,运算耗费大等缺点。在

作者基于 OpenGL 三维图形库和 VRML 解析器所开发的原型系统中取得了很好的实验效果。如图 7 为应用实例:一为海豚模型,另一个为长角的人头像。其中人头像上的角是在原人头像网格上的编辑。

参考文献:

- [1] Zorin D, Schroder P, *et al.* Subdivision for modeling and animation[A]. *Acm Siggraph, Siggraph 2000 Course Notes*[C]. 2000.
- [2] Biermann H, Levin A, Zorin D. Piecewise smooth subdivision surfaces with normal control[A]. *Acm Siggraph, Proceeding of SIGGRAPH 2000*[C]. 2000, 113-120.
- [3] Schweitzer J. Analysis and applications of subdivision surfaces[D]. *PhD thesis, Washington: University of Washington*, 1996.
- [4] Biermann H, Kristjansson D, Zorin D. Approximate Boolean Operations on Free-From Solids[A]. *Acm Siggraph, SIGGRAPH 2001*[C]. 2001.
- [5] 郭云,山口泰. 基于小波理论的多重分辨的曲面构造[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(3): 204-212.

Research on the application of subdivision modeling in CAD systems

DENG Jun_min, BIN Hong_zan, OU Shi_qi, LIANG Wei_wen

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In existing CAD systems, classical NURBS patch method is used to build solids of irregular topology with some drawbacks: difficult patching_up and trimming, expensive computing and hard exact representing. However, in practical engineering application, there are many solids with complex shape, which require smooth ness and are difficult to be combined with basic elements. Subdivision modeling is a new and easily computing method, and can represent arbitrary topology, which has been widely researched in CAD. In this paper, the principles and methods of surface subdivision are described, and the kernel technologies for subdivision including mesh creation, boundary control, normal control, transformation from subdivision mesh to NURBS patch, Boolean calculation, etc., are studied. A scheme of using subdivision modeling in existing CAD system is presented, and a prototyping system of subdivision modeling is constructed. The experiment proves that by using this scheme, the modeling time is shortened and the efficiency is improved.

Key words: computer aided testing; subdivision surface; NURBS patches; boundary control

作者简介: 邓军民(1976-),男,河南确山人,华中科技大学机械学院硕士,主要研究方向:计算机辅助设计与制造; 宾鸿赞(1940-),男,湖南衡阳人,华中科技大学机械学院 CAM 研究室教授,博士研究生导师。E_mail: junminden@263.net