

# 计算机图形学的热门课题及其发展趋势

张全伙 陈晓峰

[计算机科学(电脑)系]

**摘要** 作为当前计算机图形学较热门的研究课题之一,本文介绍了一个拓扑模型和一个忠实于植物学原理的植物模型,并简要介绍了碎片模型和粒子系统,论述了对“自然曲面”模型的研究将是计算图形学的一个研究方向。

**关键词** 拓扑, 模型, 植物学, 植物, 粒子

## 0 引言

伴随着计算机和图形设备的发展,计算机图形学自60年代初问世以来,发展迅猛,並显示了其广阔和诱人的应用前景。许多研究课题正吸引着计算机科学工作者的兴趣和注意。

体素造型是国际上近年来引起广泛重视的一个有关计算机应用研究的课题,也是计算机辅助设计和制造(CAD/CAM)系统中的核心技术。它是通过定义几个形状简单而又基本的体素,如圆柱、圆锥、球、长方体等等,经过交、並等集合运算,构造出各种复杂的三维物体,並在图形设备上显示(输出)其各种视图。目前,国际上已陆续出现了几个较有影响的体素造型系统,正从试验阶段逐步转入商品化。这些系统主要应用于工程和零件的CAD/CAM,人体动作模拟和人工智能等方面。

世界间物体的形状千奇百怪,有的有固定的形状,如房子、机械零件等;有的则无固定的形状,如植物、树木、山脉、烟雾、火焰等。对于有固定形状的物体,人们已能精确地建立它们的几何模型,用各种方法去描述和模拟。对于没有固定形状的物体,我们把它们统称为“自然曲面”。对于自然曲面,人们通常是建立它们的拓扑模型,然后加以研究。

近年来,人们在植物和树的图象合成方面进行了大量的努力,並取得若干可喜的成果。这当中的某些算法是基于物体的不规则及模糊状态,而采用碎片、移植或粒子系统;而另一些算法则集中研究突出形态学,树型分支模型。

动画的研究也是近年来引起人们兴趣的一个课题。它主要探讨运动的物体与周围环境的相互作用问题,如风吹动下的旗子,从高空飘落的布触物时的情景等等。要模拟这些运动,就涉及到物理学的知识了。

随着计算机图形学的发展,计算机的动态模拟正在並将进一步取代许多复杂的实验。物

理学家可以编出程序,用计算机演示基本粒子与其自身所产生的电场之间的相互作用,从而形象地了解微观粒子的量子化行为.有机化学家可以创建一个分子的模型并显示出来,然后利用一定的程序,在空白的屏幕上把分子模型组合起来,逐步合成他所希望得到的物质.医学家可以从屏幕上观察血液在动脉中流动的情况,用计算机模拟动态的变化,从而研究血管中产生旋涡的位置,找出动脉粥样硬化的起因.宇航员可以在仿真设备上飞行训练,大型的屏幕代替驾驶员的瞭望窗.屏幕上有飞行器所在环境的图象,诸如云雾、烟尘、夜晚的灯光以及其它飞行器的形状和大小,这一切都随时间而变化,也随着驾驶员操纵飞行器的动作各自按一定的规律而变化.凡此种种,过去听来简直是神话,然而今天已经或正在变为现实.计算机在动态模拟方面的意义如此深远,因此,可以断言,对“自然曲面”模型的研究,将是计算机图形学软件的一个发展趋势.

## 1 组合图

这里所说的组合图就是一种拓扑模型.它是用来描述自然曲面的.常规图的基本元素是点、边和面.而在组合图中的基本元素是dart,称为“臂”.它是一个“tie”所分开的两个特殊的半边,如图1所示.

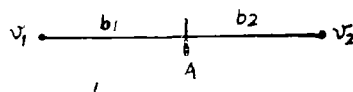


图1 dart 示意图

在常规图中, $v_1, v_2$ 两点间是一个边 $A$ ,而在组合图中它是 $b_1$ 和 $b_2$ 两个臂.这样,可以在臂的集合上定义函数,从而由臂出发定义“点”、“边”、“面”和“体”等.

我们定义组合图 $G$ 为:

$$G = (B, \alpha, \sigma),$$

其中, $B$ 是一个有限、非空的臂集,即存在 $v_b \in B$ ,称为dart;  $\alpha$ 是一个 $B \rightarrow B$ 的函数, $v_b \in B, \alpha(b)$ (可记为 $b\alpha$ ),有 $\alpha(b) = b\alpha \neq b$ ,而 $\alpha^2(b) = b\alpha^2 = b$ ;  $\sigma$ 是一个 $B \rightarrow B$ 的函数.

以图2为例说明组合图的定义.

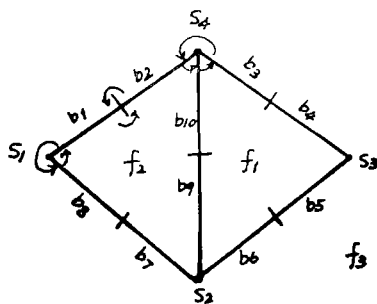


图2 组合图示意图

从图2中有

$$\begin{aligned} B &= \{b_1, b_2, \dots, b_{10}\}, \\ \alpha &= \{(b_1, b_2), (b_3, b_4), (b_5, b_6), (b_7, b_8), (b_9, b_{10})\}, \\ \sigma &= \{(b_1, b_8), (b_2, b_{10}), (b_3, b_5), (b_4, b_9), (b_6, b_7)\}. \end{aligned}$$

可见 $S_1$ 可由 $b_1 b_8$ 表示为

$$S_1 = b_1 \sigma^* (= b_1 \sigma^0, b_1 \sigma^1, \dots).$$

即顶点 $S = b\sigma^*$ ,而边 $A = b\alpha^*$ ,例如有 $b_3\alpha = b_4$ ,而 $b_3$ 与 $b_4$ 组成一条边等等.而面可由 $b(\alpha\sigma^{-1})^*$ 或 $b(\alpha^{-1}\sigma)^*$ 来表示.如面 $f_1$ 可表示为

$$f_1 = b_3 \rightarrow b_4 \rightarrow b_{10} \rightarrow b_6,$$

而  $b_3, b_4, b_5, b_8, b_9, b_{10}$  组成一个面等等.

这个模型可以描述任何有向的闭合曲面. 以图 2 为例,  $f_3$  是存在的, 因为除  $f_1$  和  $f_2$  外都是  $f_3$ . 它的特点在于通过使用奇特的“臂”, 定义了不同元素的拓扑(边界、顶点、边、面等等), 这些臂是以严密和明显的方式建立的. 只要有了一个臂及  $\alpha$  和  $\sigma$ , 就可以找到整个连通分量, 而且, 组合图中的不同元素之间的邻接和关联关系能清楚地表示出来, 其数据结构也能从组合图的定义中直接推导出来.

可以为组合图设计一种语言, 例如以“原子”为基础对自然曲面进行描述. 设原子模型如图 3 所示. 只要  $b$  已知, 就可以找到所有原子中的臂, 如  $ba, b\sigma$  等; 而如果赋以边  $b \leftarrow b^a$  以描述性参数, 如顶点  $S_i$  在空间中的位置(它可由  $b-b^a$  的长度和角度决定), 以及两个面  $f_1$  和  $f_2$  的颜色等, 一个物体曲面就可以由这种原子“生长”而成. 图 4 所示是该原子的一种生长过程.

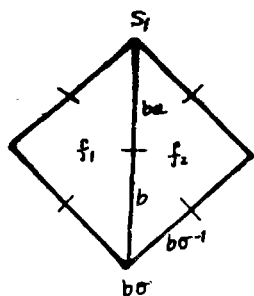


图 3 原子模型

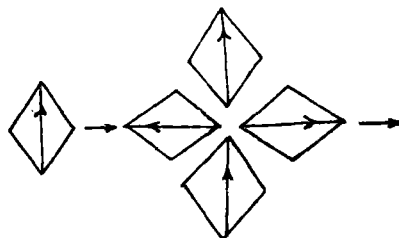


图 4 物体曲面的生长

通过控制参数(几何的、颜色的、结构的等), 就可以自己生成各种形状的自然曲面. 例如, 我们以  $b \leftarrow ba$  一条边为原子可以生成如图 5 所示的树. 如果以一个面为原子模型, 就可以是一片叶子, 这样生成的树就更加形象逼真了.

## 2 忠实于植物构造和生长的植物模型

这个模型综合了树的结构和植物学知识. 比如, 树如何生长, 它的空间位置, 如何确定树叶、花果的位置等. 这个模型的主要优点是具有广泛的适应性, 即以同样的方法和步骤可以生成大量互不相同的植物, 如冷杉树、白杨等. 它的另一个优点是考虑时间过程, 从而可以看到一棵树在不同时间的各种图形, 精确模拟树叶掉落和分枝. 由于模型易于综合各物理参数, 如风、昆虫袭击、施肥等, 而且由于本模型是定量的, 而植物学和农艺学的传统研究方法是定性的. 因此, 它将成为植物学和农艺学的有力研究工具.

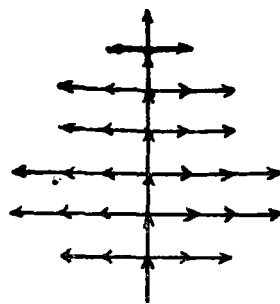


图 5 一棵生成树

这里,要生成的植物和树的图象应符合植物学的本质,並尽可能考虑植物及其环境的知识,如植物年龄、生长条件、分枝物理学(如树枝被重量、风强度折弯等)。本模型的重点不在于几何模型,而是拓扑模型及其与植物学和物理学的关系。

这个模型的基本思路是模拟芽在不同阶段的活动性,一个芽在给定的时钟信号可能:

- 或者开花並死去(消失)
- 或者休眠
- 产生分枝
- 死去(並消失)。

各种可能性的发生取决于各植物类型相应的随机特征规律和几何参数,如节的长度和直径,树枝的角度等。

## 2.1 几个简单的植物学概念

植物的生长是由于某些细胞组织(芽的内部)进化的结果,所以称为分裂组织。一个芽在一个给定时刻,可能不再产生任何东西,也可能开花,或者花序(然后死去),或者产生新枝。小树枝构造的基本元素是顶上的芽,称为顶芽生长的结果,由一系列节组成,每个节是梗的一部分,梗上有一片或几片树叶。两个节之间有一个节点,节点上生长叶子和芽,每个节点至少有一片叶子,每个叶子的轴线上有一个腋芽。这些概念均示于图6。

每个梗既可立即生长,亦可有些延迟。

本模型的一个中心概念是“生长单位”,它是由前一节点顶芽生长的一系列节和节点。另一个重要概念是轴线的阶(图7)。植物的各阶轴线都是通过生长单位长出的,而每个生长单位来源于前一个生长单位的顶芽。第一阶轴线由植物的种子长出,第 $i$ 阶轴线( $i>1$ )由第 $i-1$ 阶轴线上的腋芽生长而来,称为支承轴线。



图6 单枝

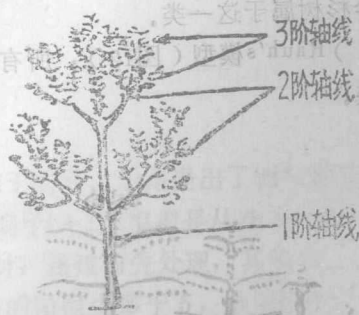


图7 轴线的阶

对于特定的植物,分枝的类型(有连续分枝、部分分枝和扩散分枝三种类型)是轴线的阶的函数。单倍体是指具有单一的一阶轴线和有限个高阶轴线的分枝系统。

相对于前一阶轴线,轴线的几何生长方向也是一个重要概念。通常按整体趋向来区分:

若轴线的后部是水平的,就称为斜长的;若是竖直的,就称为直长的(图8)。第一阶轴线一般是直长的。生长方向往往影响到分裂组织。

有些植物并不象单倍体那样生长:当第 $i$ 阶轴线的顶芽死去,前一节点的腋芽长出新轴线,该轴线的性质属于 $i$ 阶而非 $i+1$ 阶,它类似于树枝修剪的现象,该现象称损伤性重复。另一现象见于“老”树的形状,称重复。这个概念在植物中也是很难理解的。

尽管植物和树的种类繁多,但其生长和形成空间形状的方式却大致相同,一共只有23种不同的结构模型。其分类取决于是否有拼生和连续分枝,以及生长方向是直长还是斜长。下面简单地描述一下最常见的四种情况。

(1) Corner's模型(图9):只有一阶轴线,没有分枝,属于单倍体。椰子树属于这一类。

(2) Leeuwenberg's模型(图10):顶芽经过一个生长单位以后有规律地死去,因此是拼生的。槲寄生属属于这一类。

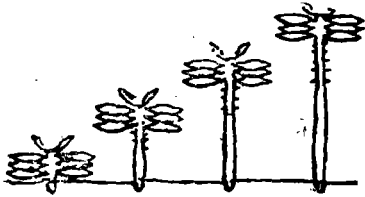


图9 Corner's 模型

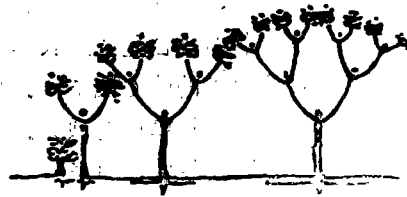


图10 Leeuwenberg's 模型

(3) Massart's模型(图11):一阶轴线是直长的,其余均为斜长,属于部分分枝的单倍体。冷杉树属于这一类。

(4) Rauh's模型(图12):所有轴线都是直长的,也属于部分分枝的单倍体。白杨属于这一类。

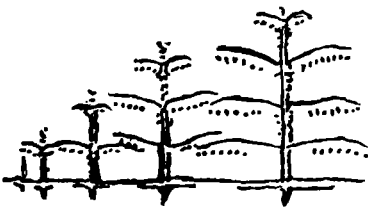


图11 Massart's 模型

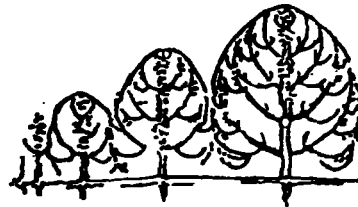


图12 Rauh's 模型

## 2.2 生长模型

本方法的基础是用数学模型模拟植物构造模型,从植物学的角度精确地模拟分支组织。

有三个重要现象反映了分支组织的功能，它们是：

- 生长
- 分枝
- 死亡率。

植物构造模型必须逐一研究生长、分枝、死亡各个阶段。在模型中，离散的时间单位取作一个“生长单位”，在给定的某阶轴线上，时间长度假定为常数。此外，每个芽被认为只有两种可能性（模型的随机参数）：夭折或中断。

我们根据模型的时钟把一个节点或一个芽的年龄称为“出生日期”，种子开始发芽时定为时间零，一个节点或芽的年龄是相对于自身的轴线的生日而言。为了得到的图象忠实于自然，重要参数和实验手段的选择必须格外小心。模拟过程走过从植物出生到给定年龄的每个时间间隔。下面给出假代码表示的模拟过程。

```
for 每个时钟信号 do
  for 每个活芽 do
    { 芽的阶、年龄、尺寸、位置等均为已知 }
    if 芽不枯萎 then
      if 芽不暂停 then
        建立节
          { 具有空间位置 }
        建立顶芽
        for 每个可能的芽 do
          if 分枝 then
            建立腋芽
              { 具有年龄、阶和尺寸 }
          end for
        end if
      end if
    end for
  end for
```

这种时间模拟，由于内存空间的关系，算法尚难于实现。于是提出了树的预先交叉法：对各阶轴线的结点腋芽进行编号 $1, 2, \dots, k$ ，顶芽编号 $k+1$ 。模拟是从芽 $i$  ( $i=1, 2, \dots, k$ ) 长出的树的一个预先交叉系列。当交叉访问某芽时，通过预先处理，其年龄、尺寸、阶等结构参数以及位置均为已知。由于自然界中，轴线的阶很少多于5，故用预先交叉模拟栈的大小是合适的。

### 3 碎片模型

本模型的基本思想是采用同样的模式在不同级别上的重复，以生成形象的自然曲面。例如，一座山是由许多小山组成的，而每座小山又是由更小的小山所组成。这些小山都是同一

模式,例如可以是一个小四面体。这样,在模拟中,只要输入几个固定参数控制基本模型,並输入重复系数,让它自行“生长”。在一定的级别上,如果千百次的重复,就可以生成一个很复杂、很自然的形状。例如一座城市,从高空看是一个方块。对它施行放大,是由各个区组成的,各个区也是一个方块;靠近(缩短观察点距离)並放大看各个区……经过足够多次的放大,总能看到同样的东西,只是规模越来越小罢了。这同样的东西就是模式。

#### 4 粒子系统

Bill Reeves 为生成树编写了一个程序,它能输出形象逼真的白杨、云杉、草地等图象。他在形成这些复杂和丰富多彩的自然景物时,涉及到粒子系统。粒子系统是应用成千上万个随机控制的基本“粒子”,通过变化对粒子“生命过程”的控制,以生成复杂多样的图象。在生成一幅图象的过程中,可以有粒子“出生”,有粒子“生长变化”,也可以有粒子“死亡消失”,或者“冬眠”。例如,在生成一棵树时,需要许多控制参数,诸如重量、高度、分枝角度和数目、弯曲系数、颜色等等。由这些参数控制着生成树的随机过程。

#### 参 考 文 献

- [1] 罗杰斯, D. F. (梁有栋等译), 计算机图形学的算法基础, 科学出版社, (1987).
- [2] Harrington, S. (高福文等译), 计算机图形学, 北京师范大学出版社, (1985).
- [3] Smith, A. R., Plants, Fractals and Formal Language, *Computer Graphics*, 18, 3 (1984).
- [4] Reeves, W. T., Partical Systems—A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects, *ACM Transactions on Graphics* 2, 2 (1983).
- [5] Reffye, (de)P., Plants Modes Faithful to Botanical Structure and Development, *Computer Graphics*, 22, 4 (1988).
- [6] Weiler, K., Edge-based Data Structures for Solid Modeling in Curved—Surface Environments, *Computer Graphics and Applications*, 5, 1 (1985).

### Computer Graphics at Present: Topics in Great Demand and Trends of Development

Zhang Quanhuo      Chen Xiaofeng

(Department fo Computer Science)

**Abstract** A detail account is given to a topological model and a botanical model faithful to the principle of botany, while a brief account is given to a composite model and a particle system. All these are topics of computer graphics in great demand. The study on “natural curved surface” is proved to be a trend in the application software of computer graphics.

**Key words** topology, models, botany, plant, particle