

# 形态结构特征约束下的树木参数化建模研究

石松, 陈崇成, 王钦敏, 唐铭

(福州大学空间信息工程研究中心空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350002)

**摘要:** 树木建模是构建虚拟森林景观的主要环节, 也是三维林业地理信息系统的基础。该文提出一种形态结构特征约束下的树木参数化建模方法, 通过引进 Bezier 曲线控制树干以及树枝形状, 并以荔枝树和马尾松为例对该方法进行设计与实现。实验结果表明, 该方法能有效提高树木建模过程中的交互能力, 较好地突出了树木的形态结构特征。

**关键词:** 树模型; Bezier 曲线; 林业地理信息系统; 树木形态结构特征

## Research on Tree Parameterized Modeling under Constraint of Morphological Characters

SHI Song, CHEN Chong-cheng, WANG Qin-ming, TANG Min

(Key Lab of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, Spatial Information Research Center, Fuzhou University, Fuzhou 350002)

**【Abstract】** Tree modeling is the key work of constructing the virtual forest landscape, and is also the basic of 3D forestry Geographic Information System(GIS). A tree parameterized modeling method under constraint of morphological characters is presented, in which the shape of trunk and branch is controlled by introducing Bezier curve. This modeling method is designed and implemented in the case of lichee tree and redpine. Experimental results show this modeling method can improve the interactive ability in the process of tree modeling effectively, and reflect the morphological characters of trees better.

**【Key words】** tree model; Bezier curve; forestry Geographic Information System(GIS); tree morphological characters

### 1 概述

近年来, 以森林景观为研究对象的计算机建模和可视化技术正成为生态学、森林经济学、自然地理学和树木学等领域的研究热点。计算机图形学和三维地理信息系统(3D Geographic Information System, 3D GIS)等相关技术的发展更是为林业部门在更高层面上从事森林的生产经营与管理提供了有力的技术支持。构建虚拟森林景观是林业三维 GIS 的主要环节。树木是森林的基本要素, 但由于其种类繁多、形状各异, 在建模与绘制过程中存在较大困难, 因此成为当今计算机图形学领域的热点课题。树木的形态结构包括两部分: (1)组成结构, 如主干、分枝、叶, 花, 果实等基本元素, 这些元素分别具有各自的几何特征, 如生长位置、长度、粗细、纹理等; (2)拓扑结构, 描述上述基本元素间的关系, 包括分布、密度、空间关系和从属关系。树木建模过程必须同时兼顾这两个方面。对于前者, 应强调灵活的交互式控制, 给用户充分的操作自由度, 以使其对树的组成结构(如主干、枝条)进行调整, 从而生成千姿百态的树形。对于后者, 应通过对具体树种拓扑结构的分析, 提取出形态结构特征并融入到树模型中。

树木建模是项极具挑战性的工作, 至今已有不少学者对其进行了较为深入的研究。文献[1]提出的L系统是早期著名的树模型描述, 通过对植物生产规则的抽象和概括, 生成字符发展序列以表现植物的拓扑结构。文献[2]在基于 0 阶L系统 - DOL的基础上开展了植物仿真以及生物量的计算工作。Reeves W T于 1983 年提出利用粒子系统构建树模型, 但该方法

难以体现个体植物的拓扑及其形态, 只能较宏观地模拟森林、草丛等景观<sup>[3]</sup>。在树木的几何建模中, 树干及树枝的表达具有突出意义, 在这方面Prusinkiewicz P等人做了具有开创性的研究工作, 他们把树枝及树干细分为各个片段, 并把各片段的局部矢量和整颗树的趋势性矢量后进行叉积运算, 得到最终矢量<sup>[4]</sup>。文献[5]使用一组参数来描述树木的形态与结构, 但该参数是人为给定的, 在参数调整方面显得不够灵活。文献[6]通过定义各级枝条的偏转角度、锥度、螺旋状扭曲等来表现分形树木造型, 但计算量较大, 且很难体现出树木的形态结构特征。

综上所述, 树木模型的构造既要做到交互性好, 使用户能灵活快速地构建千姿百态、形状各异的树模型, 又必须能呈现出特定植物的特定形态, 因此, 本文在前人研究工作的基础上提出一种形态结构特征约束下的树木参数化建模方法, 通过引进 Bezier 这种基于控制点的自由曲线来描述树木中的树干以及树枝形状。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“基于本体的协同式虚拟森林环境研究”(30671680); 国家“973”计划基金资助项目(2004CCA07200); 福建省自然科学基金资助项目(D0510010); 福建省科技计划基金资助重点项目(2006H0022)

**作者简介:** 石松(1976-), 男, 博士研究生, 主研方向: 综合自然环境仿真, 协同虚拟环境, 人机交互技术; 陈崇成, 教授、博士; 王钦敏, 研究员、博士; 唐铭, 硕士研究生

**收稿日期:** 2008-04-30 **E-mail:** shisong8793@sina.com

## 2 基于 Bezier 曲线的树木参数化描述

### 2.1 树木模型的主要要素及其属性定义

主干、分枝和树叶决定了一颗树的宏观形态。枝条是树木形态结构的主要构件，枝条在树干上的分枝角度、分枝长度、枝条分枝级数等是决定分枝空间格局以及树冠形态的关键因素。枝条形态结构以分层规律进行分枝，由主干分生第 1 层分枝，再由第 1 层分枝分生第 2 层分枝，如此一层层分生下去直至树叶节点，树木在生长发展过程中其形态就是这样不断地在前一层基础上复制与其相似的组织结构，呈现出一定的自相似的分形特征。图 1 给出了树的基本形态结构。

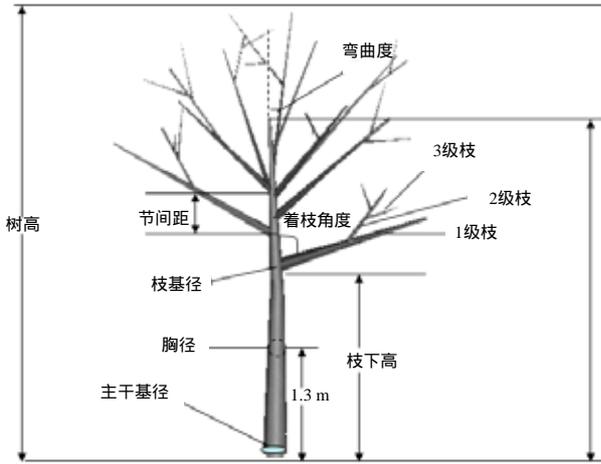


图 1 树的结构模型及主要特征部位定义

在图 1 中，把主干、枝条和树叶作为组成树模型的 3 大要素，这 3 大要素都包含了若干子属性，例如，主干包括基径、树高、半径变化等。由于树主干和枝条决定了树的基本形态，因此先将主干和枝条及其子属性进行如下定义：

- <树> ::= <主干><枝条><叶子>
- <主干> ::= <主干类型><形数><树高><胸径><冠幅><冠长><树皮><主干分段数>
- <树皮> ::= <纹理路径> // 采用纹理表示树皮的外观
- <几何数据> ::= <主干节点位置序号><节点位置><节点直径>
- <节点位置> ::= <x 坐标><y 坐标><z 坐标>
- <枝条> ::= <层数序号><分枝长度变化><枝条直径变化><初始分枝角度><枝条角度变化><枝条分段数><横截面的多边形边数><枝条分布密度><下一层枝条或叶片分布范围>
- <分枝长度变化> ::= <长度最大值><长度最小值>
- <沿主枝的枝条基径变化> ::= <基径最大值><基径最小值>
- <枝条直径变化> ::= <基径><末径>
- <初始分枝角度> ::= <角度最大值><角度最小值>
- <枝条角度变化> ::= <角度最大值><角度最小值>
- <下一层枝条分布范围> ::= <下一层分枝起点><下一层分枝终点>
- <几何数据> ::= <主枝条序号><枝条形状>
- <枝条形状> ::= <枝条序号><节点位置><节点直径>
- <节点位置> ::= <x 坐标><y 坐标><z 坐标>

### 2.2 Bezier 曲线的数学描述

Bezier 曲线是种外形可以构成控制多边形的曲线。通过控制点的移动，能够改变曲线形状。以下是 Bezier 曲线的数学表述：

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t)q_i \quad (1)$$

$$B_{i,n}(t) = C_n^i(1-t)^{n-i}t^i, \quad (2)$$

其中， $C_n^i$  是二项式系数  $\frac{n!}{i!(n-i)!}$ ； $B_{i,n}(t)$  为伯恩斯坦基底函数(Bernstein)，且满足

$$\sum_{i=0}^n B_{i,n}(t) = [(1-t) + t]^n = 1 \quad (3)$$

由式(3)可以得出贝塞尔曲线满足的权函数之和为 1。

Bezier 曲线具有若干重要性质，在树木参数建模过程中主要用到以下 2 个性质：

(1)凸包性。Bezier 曲线各点均落在控制多边形各顶点构成的凸包中。凸包是指包含所有顶点的最小凸多边形。这个性质保证了曲线将随控制点平稳地前进而不发生振荡。它是基于 Bezier 曲线的树木参数化方法可行性的重要保证。

(2)几何不变性。Bezier 曲线的形状仅与控制多边形各顶点的相对位置有关，与坐标系的选择无关，即具有几何不变性。该性质为实现数值计算以及结果显示分离提供了保证，简化了编程工作量。

### 2.3 基于 Bezier 曲线的树参数化建模流程

#### 2.3.1 描述枝干的广义圆柱体

利用 Bezier 曲线描述植物形态的变化趋势。控制范围包括树干的粗细控制、树干倾斜的角度、树枝的长度、半径、起始角度以及树枝受重力作用产生的弯曲等。鉴于 Bezier 曲线在树木建模过程中使用的频繁程度，按微软提出的 ActiveX 标准，将有关 Bezier 计算过程以及基于控制点曲线移动及曲线输入/输出等外部接口封装成控件。现以树干为例，具体说明其建模流程。

在本文中树干是用广义圆柱体来定义的。广义圆柱体是以三维空间曲线为轴的立体，在轴上等距地设定若干个特征点，以每个特征点为圆心生成一系列封闭的圆截面，为生成绘制枝干所需要的三角形条带(Strip)，定义一系列沿枝干轴的横截面，每个横截面都包含确定数量点的多边形。由若干段直径不同的圆柱体去逼近和模拟树干的基本形态，对于其他树枝均可这样定义。图 2 为采用三角形条带构造的广义圆柱体。

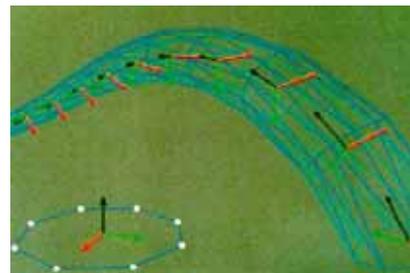


图 2 采用三角形条带构造的广义圆柱体

#### 2.3.2 Bezier 曲线定义的形态特征

以荔枝树建模为例，设定某棵荔枝树的主干半径变化的 Bezier 曲线描述，如图 3 所示。

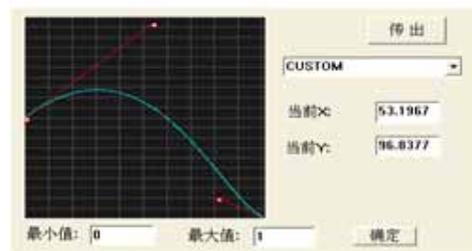


图 3 Bezier 曲线表述的荔枝树的主干半径变化

图3描述了一支由4个控制点生成的Bezier曲线,其变化趋势是先增大后减小。树的主干采用广义圆柱体来定义,即该树主干的基本形态是其广义圆柱体沿轴向分布的半径先增大后减小(树根作为起始点)。在绘制主干时,先定义圆柱体的分段数和横截面的多边形数,计算出该树干的最底面和最顶面的广义圆半径,用内插的方法求得分段截面的半径,最后将这些分段圆柱体连接起来加以绘制即生成树的主干。对树枝也采用同样的方法进行绘制,最终生成的荔枝树模型如图4所示,其中,绘制采用的图形引擎是OpenGL;底层开发平台是Visual C++ 6.0。

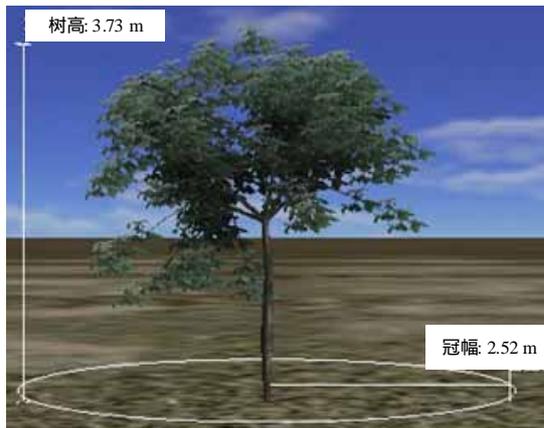


图4 荔枝树的建模结果

## 2.4 带有特殊形态结构特征的树木建模

### 2.4.1 马尾松的形态结构特征分析

在我国,马尾松是分布最广、数量最多的主要用材树种之一,也是特有的主要造林树种。图5列出了马尾松的枝干形态特征。

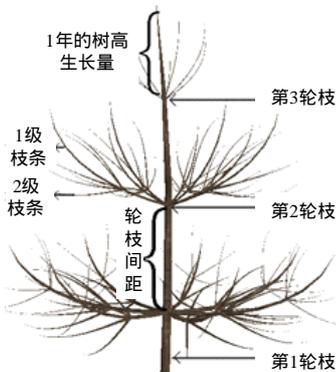


图5 马尾松的枝干形态特征

马尾松的轮枝和枝条突出体现了其层式的形态结构特征:(1)轮枝。由于马尾松每年生长一轮,因此几年生的马尾松在形态上就有几轮枝条。根据树的年龄获得相应的轮枝数。(2)枝条。成年后的马尾松冠幅度随其枝条年龄的增大,其体积和生物量也增大,所受重力的影响也越大,枝条受重力影响逐渐下垂,从而表现出分枝角度逐渐由 $60^\circ$ 向 $90^\circ$ 左右的转变。从图5可以看出,马尾松的形态拓扑是种典型的层式结构。因此,本文为突出这种层式的形态特征,在建模时引入了分层绘制方法。

### 2.4.2 基于Bezier曲线的马尾松的分层绘制

鉴于马尾松自身具有的层式拓扑结构,在对其绘制过程中也采用分级层次拓扑绘制方法。以树干、树枝、树叶部分为树木的1级拓扑结构,并在此之上进一步划分出2级拓扑结构。最上层是主干层,按主干上的枝条逐级展开,直到叶子层,层与层之间通过指针关系形成位置上的关联。用户通过改变每层的控制参数来统一定制该层的形态。图6是通过分级层次拓扑的参数化建模方法绘制而成的马尾松模型。

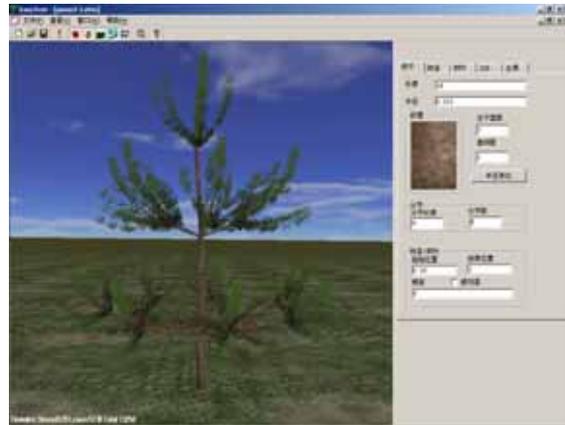


图6 分级层次拓扑方法绘制的马尾松

## 3 结束语

本文提出一种形态结构特征下的树木参数化建模方法,该方法具有较强的交互能力,能方便地再现树的形态结构特征,具有一定真实感。但植物的生长是个动态变化的过程,这种动态变化的结果必然导致树干、树枝等器官的变化。

采用基于控制点变化的Bezier曲线能较好地模拟植物弯曲的情况,具有较大的便捷性,但该方法只是单纯地模拟了树干以及树枝的外部表现,并未反映树木内的应力分布情况以及与植物生产过程的相应关系。下一步工作将结合树木生长的内部变化模型,以更好地反映树木的生产机理。

## 参考文献

- [1] Lindenmayer A. Mathematical Models for Cellular Interaction in Development[J]. Journal of Theoretical Biology, 1968, 18(3): 280-315.
- [2] 魏琼, 蒋湘宁. 基于DOL系统的树木三维可视化模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(3): 64-67.
- [3] Reeves W T. Particle Systems—A Technology for Modeling a Class of Fuzzy Objects[J]. Computer Graphics, 1983, 17(3): 359-376.
- [4] Prusinkiewicz P, Hammel M, Mjolsness E. Animation of Plant Development[J]. Computer Graphics, 1993, 27(3): 336-349.
- [5] Weber J. Creation and Rendering Realistic Trees[C]//Proc. of Computer Graphics Annual Conf. Series. Los Angeles, California, USA: [s. n.], 1995.
- [6] Oppenheimer P E. Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees[C]//Proc. of the 13th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques. [S. l.]: ACM Press, 1986.