

# IFS 树木随风摇曳的方法研究

赵鹏飞 张志毅

(西北农林科技大学信息工程学院 陕西 杨凌 712100)

**摘要** 为了更好地模拟自然环境中三维树木摇曳的效果,基于迭代函数系统(IFS)方法并利用高斯函数产生随机因子,对三维树木进行建模。采用 $1/f^\beta$ 噪声技术产生虚拟风场,运用力学知识对树木进行受力分析,模拟树木随风摇曳的运动状态。实验结果表明,该方法能够有效地模拟自然树木的形态,树木具有较好的逼真度,并能快速真实地模拟树木摇曳效果。

**关键词** 树木 迭代函数系统 风场 噪声

中图分类号 TP391.9 文献标识码 A DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2013.08.027

## RESEARCH ON MEANS OF TREES SWAYING WITH THE WIND BASED ON IFS

Zhao Pengfei Zhang Zhiyi

(College of Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract** To better simulate the effect of three-dimensional trees swaying in natural environment, in this paper we model the 3-D trees based on iterated function systems (IFS) and using Gaussian random function to generate random factors. The  $1/f^\beta$  noise technique is employed to generate virtual wind, the mechanics knowledge is used to carry out the stress analysis on the trees and to simulate the motion state of trees swaying with the wind. Experimental result shows that the method can effectively simulate the form of natural trees, the trees have quite good fidelity, and the method can quickly and really simulate the swaying effect of trees.

**Keywords** Tree Iterated function system Wind Noise

## 0 引言

虚拟植物是在三维空间内植物结构及个体生长的计算机模拟。随着计算机软件、虚拟现实技术的发展,人们对植物的真实性要求也日益增高。对树木的模拟,人们不仅需要形象的真实感,也需要运动的真实感。目前,树木在风中的动态模拟主要有两类方法:过程式方法和基于物理的方法。对于树木的动态模拟,人们已经进行了一些研究。Shin<sup>[1]</sup>等人提出了一种基于噪声的运动模拟方法,应用傅里叶变换产生噪声模拟风场,并通过弹簧单元来实现枝条的运动,由于弹簧模型的局限性,模拟出来的结果比较粗糙。Reffye<sup>[2]</sup>采用L-系统对三维树木进行建模,并基于数据场结构计算风的衰减,根据模型的形变来计算树枝的变形。在国内,柳有权<sup>[3]</sup>等人通过抽取树木的骨架构建树木模型,通过高斯分布建立虚拟风场模型,并采用非线性力学方程组对枝干进行积分计算,从而模拟树枝的变形效果。冯金辉<sup>[4]</sup>等人提出利用深度优先的树枝积分遍历算法,求得整棵树协调一致的位移,较好地表现了树的整体动感。王春华<sup>[5]</sup>等人对树的基本模型进行抽象表示,并选用向量表示风和节间,通过向量的运算定型模拟树枝受力引起的运动。该方法三维树木形态逼真度较差,且没有考虑树叶的随风摇曳状态。

本文在文献[5]的基础上,运用IFS方法构建逼真的三维树木模型,并加入噪声因子,随机化树木形态。在虚拟噪声风场中,结合力学知识,对树木和树叶进行受力分析,模拟树木随风

摇曳的效果。

## 1 三维树木建模

### 1.1 迭代函数系统

至今,对自然景物的模拟主要有以下三种方法:L-系统、粒子系统、迭代函数系统(IFS)等。其中,L-系统和粒子系统两种方法主要研究如何绘制自然景物的形态,并不过多的研究通过景物的真实三维信息构建景物形态的方法,景物的逼真度不强,方法受到很大的限制。以自相似为基础的迭代函数系统能够提取景物的真实结构信息,并能很好地模拟部分与整体相似的特征,在描述非规则的自然景物上,具有很好的通用性和实用性。迭代函数系统(IFS)是分形理论的重要分支。它将待生成的图形看成是由许多与整体相似或经过一定变化与整体相似的小块拼贴而成<sup>[6]</sup>。

三维迭代函数系统3D-IFS:度量空间 $R^3$ 与定义在其上的一个有限个压缩映射族 $\omega_i: R^3 \rightarrow R^3$ ,组成一迭代函数系统,即3D-IFS,记为 $\{R^3; \omega_i, i=1, 2, \dots, N\}$ ;如果 $\omega_i$ 对应的压缩比为 $C_i$ ,则称 $0 < C = \max\{C_i, i=1, 2, \dots, N\} < 1$ 为此IFS的压缩比。

三维空间上的仿射变换可表示成如下形式:

收稿日期:2012-08-13。教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(K314020901)。赵鹏飞,硕士生,主研领域:计算机图形学。张志毅,副教授。

$$\omega_i \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ai1 & bi1 & ci1 \\ ai2 & bi2 & ci2 \\ ai3 & bi3 & ci3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix}$$

简写成  $\omega(X) = A(X) + M$ 。A 是一个复合变换矩阵,它包含基本的仿射变换,如旋转变换、比例变换, M 为平移变换矩阵<sup>[7]</sup>。

### 1.2 树枝建模

植物的分枝形态千变万化,体现了植物生长结构的不规则性。树木的生长离不开枝芽,根据枝芽的性质不同,植物可以有不同的分枝模式,可归结为三大类:单轴分枝、合轴分枝、假二叉分枝。

为了更好地建立树枝模型,对每一层的树枝赋予了相应的属性,例如树枝的长度、树枝底端面的半径大小、树枝顶端面的半径大小、树枝的扭转角度。因此每层枝段可用以下数据结构来描述:

Struct Branch { Length ,T. Radius ,B. Radius ,Twist};

其中,Length 为分枝的长度,T. Radius 为分枝顶端半径大小,B. Radius 为分枝底端半径大小,Twist 为分枝扭转的角度。

自然环境中,单轴分枝植物居多,本文采用单轴分枝模式构建三维树木骨架。用圆柱体相互连接构成树木的骨架,通过改变树枝的基本属性以及旋转变换矩阵,得到真实三维树木的骨架。

在三维坐标系中,树枝可以通过 glRotatef() 旋转变换矩阵,得到不同方向的分叉树枝,从而建立真实的分叉树枝模型。坐标系中任意一点绕 X, Y, Z 轴的旋转变换矩阵为  $R_x(\theta)$ ,  $R_y(\beta)$ ,  $R_z(\gamma)$ 。如图 1 所示。

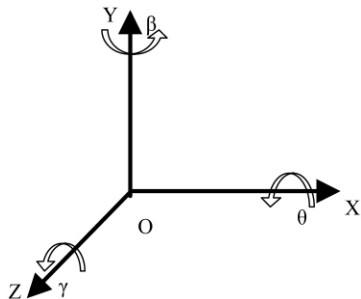


图 1 坐标旋转变换

$$\text{绕 X 轴旋转 } R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\text{绕 Y 轴旋转 } R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$\text{绕 Z 轴旋转 } R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 1.3 树叶建模

树木包含大量的树叶,而且每片树叶的形态各不相同。为了满足快速绘制树木的要求,节省计算机资源,不对每片树叶进行单独的模拟。因此,为了更好地模拟树叶形态,使用抽象的树叶图元来代替。通过对树叶赋予相应的属性,更加逼真地模拟树叶模型,例如树叶的大小、树叶的扭转角度。因此树叶可用以下数据结构来描述:

Struct Leaf{ Size ,Rotate};

其中,Size 为树叶的大小;Rotate 为树叶的旋转角度。本文通过调用 glScalef() 函数对树叶大小进行缩放,glRotatef() 函数来调整树叶的旋转角度,这样可以生成不同形态大小和角度的树叶

模型,并通过纹理渲染和 Alpha 通道测试对树叶图元进行处理,达到真实树叶的效果。

在三维坐标系中,树叶可以通过缩放矩阵来改变大小,且缩放矩阵  $S(r_x, r_y, r_z)$  如下:

$$S(r_x, r_y, r_z) = \begin{bmatrix} r_x & 0 & 0 \\ 0 & r_y & 0 \\ 0 & 0 & r_z \end{bmatrix}$$

### 1.4 高斯随机函数

在自然界中,树木具有各种各样的形态,不是严格地按照固定的生长规则进行生长,例如,树枝与树枝的夹角大小、各层树枝的粗细和长短程度。为了更好地模拟三维树木的不规则性,在树木的各属性间加入高斯噪声产生的随机因子,来提高树木形态的随机性。

高斯噪声是指它的概率密度函数服从高斯分布(即正态分布)的一类噪声。一个高斯随机变量  $z$  的  $P(z)$  可表示为:

$$P(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

其中  $z$  代表灰度,  $\mu$  是  $z$  的均值,  $\sigma$  是  $z$  的标准差。高斯噪声的灰度值多集中在均值附近。

通过在树枝的旋转角度以及树叶的扭转角度中,加入高斯噪声函数产生的随机因子,不规则化树木形态,提高树木的随机性。

在基于迭代函数系统构建的树木中,加入高斯随机函数产生的噪声因子,并通过着色处理和纹理渲染,较好地模拟三维树木形态,树木真实自然。如图 2 所示为迭代  $N$  次,构建的  $N$  层三维树木形态。



(a) 3层树木形态 (b) 4层树木形态



(c) 5层树木形态

图 2 N 层树木形态

## 2 虚拟风场建模

自然界的大部分物体不是有序的、平衡的、稳定的和确定性

的,而是处于无序的、不稳定的、非平衡的和随机的状态之中,它存在着无数的非线性过程,也就是说,宇宙充满了分形。自然界中不存在绝对静止的事物,一切事物必定随着时间或空间的推移而发生波动,这些波动具有如下特性:在时域或空域上有自相似性的相关性;在频域上,其功率频谱密度在一定频率范围内基本符合  $1/f^\beta$  的多项式衰减规律。自然界中的噪声通常可以划分为 3 类:白噪声、 $1/f$  噪声和布朗噪声  $1/f^2$ 。其中,分形布朗运动(布朗噪声)模型具有自相似性、非平稳性两个重要性质,能够有效表达自然界许多非线性现象,是许多自然现象和社会现象的内在特性,应用最为广泛。因此,本文采用分形布朗运动来模拟树在风场中的运动<sup>[8]</sup>。

本文采用随机中点位移法来实现分形布朗运动。随机中点位移法是对线段的中点赋予随机高度值,将分割的线段再次细分出中点,再次对中点进行高度位移,如此反复,直至达到预定的迭代层数。设  $X(t)$  为空间上的随机过程,对于任意自变量  $t_1, t_2$ ,该过程的增量  $\Delta X(t) = X(t_1) - X(t_2)$  属于高斯分布,迭代第一步的计算概括为:

$$X\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} [X(0) + X(1)] + \Delta_1$$

则第  $n$  步为:

$$X\left(\frac{1}{2^n}\right) = \frac{1}{2} \left[ X(0) + X\left(\frac{1}{2^{n-1}}\right) \right] + \Delta_n$$

式中:  $X(t)$ —某一均值为 0,方差为  $\sigma^2$  的随机变量样本;  $\Delta_1, \Delta_n$ —高斯随机扰动,即中点偏移量<sup>[9]</sup>。

### 3 力学模型

#### 3.1 树枝受力分析

在建立的三维树木模型中,由于各层树枝的属性各不相同,在虚拟风场中,树枝的运动情况也是不同的。在真实环境中,树枝具有一定弹性,因此,各层树枝的运动可以看作是悬臂梁在力的作用下,发生形变,并绕固定端点进行扭转。

为了更好地计算树枝的扭转角度,对树枝建立了局部坐标系,如图 3 所示。

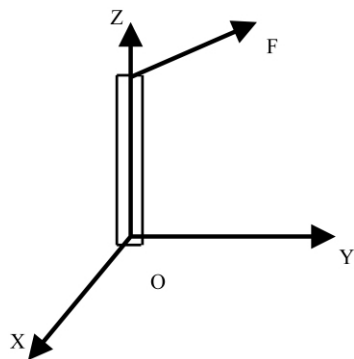


图3 树枝坐标系

树枝的末端作为坐标原点,树枝的生长方向与Z轴平行,与X、Y轴垂直。在风场中,风力的大小和方向都不确定,风力并不是全部作用在树枝上。由此,力  $F$  可以分解为  $F_z, F_y$ 。由于分量  $F_z$  与树枝垂直,并不引起树枝形变,因此,使树枝发生扭转变形的是分量  $F_y$ 。

运用力学知识对树枝进行受力分析,得出树枝的受力情况如图 4 所示。由图可知,树枝的顶端受到风力  $F_{wind}$  和树枝形变

产生的阻力  $F_{resist}$  以及轴向衰减力  $F_w$ <sup>[10]</sup>。

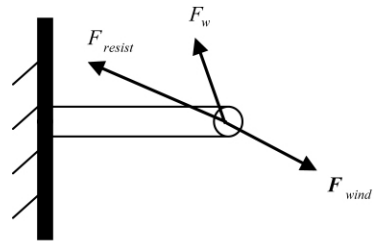


图4 树枝受力分析

树木枝条随风摆动的过程中,轴向衰减力会抑制这种摆动的效果,使枝条恢复原始状态。在动力学模拟方法中,轴向衰减力大小与风的速率的平方成比例,表达式为:

$$F_w = \delta \cdot w^2$$

式中  $\delta$  是阻尼系数,  $w$  是枝条运动的角速度。

因此,树枝所受风力  $F$  可表示为:

$$F(t) = F_{wind} + F_{resist} + F_w$$

树枝旋转的角度  $\theta$  大小为:

$$\theta = M/EI$$

其中  $M$  为树枝受到的力矩;  $E$  是表征材料强度的杨氏模量;  $I$  为树枝的轴惯性矩。

由于树枝是由圆柱体近似模拟,则:

$$I = \pi r^4 / 4$$

其中  $r$  是树枝截面半径。

作用在树枝上的力矩  $M$  为:

$$M = F(t) \times l$$

其中  $F$  为垂直树枝方向的风力;  $l$  表示树枝的长度。

因此,在风场作用下,树枝的扭转角度  $\theta$  为<sup>[5]</sup>:

$$\theta = 4F(t) \times l / (E\pi r^4)$$

#### 3.2 树叶受力分析

在风场中,树叶会随风飘动。由于树叶和树枝自身属性的不同,树叶会随着树枝的摆动而运动,而且比树枝的运动更剧烈。为实现树叶随风飘动的效果,将叶片的运动分解为叶片绕 X、Y、Z 坐标轴旋转 3 种情况。

在风场作用下,树叶会绕着坐标轴发生旋转。因此,树叶在坐标轴方向的旋转角度可通过以下函数方程来实现。具体描述如下:

设  $\theta_x(t), \theta_y(t)$  分别为  $t$  时刻 X、Y 方向的旋转角度。则  $\theta_x(t), \theta_y(t)$  可表示为:

$$\theta_x(t) = W_x \text{Noise}_x(t)$$

$$\theta_y(t) = W_y \text{Noise}_y(t)$$

式中:  $W_x, W_y$ —分别为 X、Y 方向的最大旋转角;  $\text{Noise}_x(t), \text{Noise}_y(t)$ —分别为  $t$  时刻的  $1/f^\beta$  噪声值。

而叶片绕 Z 轴即叶柄的旋转运动  $\theta_z(t)$  可以表示为:

$$\theta_z(t) = W_z \text{Noise}_z(t)$$

式中:  $W_z$  为 Z 轴方向最大旋转角,  $\text{Noise}_z(t)$ — $t$  时刻的  $1/f^\beta$  噪声值<sup>[10]</sup>。

## 4 实验结果

根据上述方法的描述,本文在 VC++ 6.0 平台上,利用图形开发包 OpenGL 实现了三维树在风吹动下摇曳的模拟。图 5 是树木原始形态,图 6 是树木在风速大小为 6.5 m/s 情况下,不同时刻树木摇曳的运动状态。从图可知,本文基于 IFS 方法,通过对树木进行着色处理以及通道测试,在  $1/f^\beta$  噪声函数的虚拟

风场中,对树木进行受力分析,较逼真地模拟树枝和树叶随风摇曳的状态,真实感较强。本文与文献[5]相比较,模拟速度为 55 帧/s,模拟速度更快,能逼真模拟三维树木随风摇曳效果,并考虑了树木的着色处理和树叶自身随风摇曳效果,以及树叶随树枝摆动而摇曳的状态,达到树木整体的真实摇曳效果。



图 5 原始树木形态



图 6 树木摇曳效果

## 5 结 语

本文通过材料力学知识,在基于  $1/f^\beta$  噪声的虚拟风场中,对分形树木进行受力分析,模拟树木随风摇曳的运动状态。该方法能够快速、真实地模拟树枝和树叶在风力作用下发生扭转的效果,很好地模拟了风吹树动的状态。算法计算量小、效果自然真实、满足快速绘制场景的要求。今后我们将研究基于重力场的树枝枝条的弯曲以及树根的趋地性,更逼真、更真实地模拟树木形态,并考虑树叶和树枝之间遮挡以及碰撞检测,更快、更真实地模拟树木的摇曳。

### 参 考 文 献

[1] Ota S, Fujimoto T, Tamura M, et al. A hybrid method for real-time animation of trees swaying in wind fields[J]. The Visual Computer, 2004, 20(10): 613-623.

[2] Reffye P, Edelin C, Francon J, et al. Plant models faithful to botanical structure and development[J]. Proceedings of SIGGRAPH'88, 1998, 22(4): 151-158.

[3] 柳有权, 王文成, 吴恩华. 快速真实地生成树的自然摇曳[J]. 计算机学报, 2005, 28(7): 1185-1191.

[4] 冯金辉, 严涛, 陈彦云, 等. 树木的整体性运动及树内部风场的研究[J]. 软件学报, 2000, 11(3): 363-367.

[5] 王春华, 韩栋, 张洪飞. 一种风吹树动模拟的新方法[J]. 计算机应

用研究, 2009, 26(7): 2757-2759.

[6] 孙永香, 刘彤, 郑永果. 虚拟植物的建模方法[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 263-265.

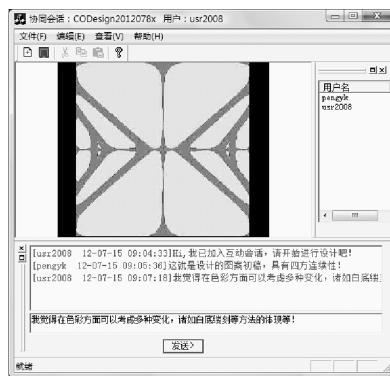
[7] 张莹. 基于迭代函数系统的分形变形方法研究[D]. 陕西: 西北工业大学, 2006.

[8] 李强, 江巨浪. 小波域上分形噪声的一种自适应 Wiener 滤波方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(22): 63-66.

[9] 梁俊, 王琪, 刘坤亮, 等. 基于随机中点位移法的三维地形模拟[J]. 计算机仿真, 2005, 22(1): 213-216.

[10] Li Zhanli, Norishig Chiba. Research on Real-time Animation of trees Swaying in Wind[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(8): 2085-2090.

(上接第 80 页)



(b) 互动设计客户端

图 5 陶瓷图案互动设计过程

## 5 结 语

陶瓷产品是艺术与产品制造工艺相结合的产物,陶瓷图案对提升陶瓷产品的价值有重要作用。陶瓷图案互动设计模型的研究与应用,为提高图案设计的效率及用户对图案的满意率提供了一种信息支持工具与手段。

本文讨论提出了一种陶瓷图案互动设计的原理及模型,研究基于 P2P 技术的陶瓷图案互动设计技术,提出互动会话组件的概念与架构,并从组件架构、互动设计会话实例创建及互动设计的时序分析等方面具体研究了架构实现的关键技术,最终实现并在陶瓷图案设计系统中应用了该架构。

### 参 考 文 献

[1] 余建荣, 张朝辉. 论陶瓷产品的设计美学特征[J]. 中国陶瓷, 2005, 41(1): 68-70.

[2] 施敏, 鲁东明, 潘云鹤. 计算机支持的多用户协同图案设计系统模型[J]. 中国图象图形学报, 2001(8): 739-745.

[3] Palmer J D, Fields N A. Guest editor's introduction: computer supported cooperative work [J]. Computer (Special Issue: CSCW), 1994, 27(5): 15-17.

[4] Rodden Tom, Blair G S. Distributed systems support for computer supported cooperative work [J]. Computer Communications, 1992, 15(8): 527-538.

[5] 於光灿, 卢正鼎, 李瑞轩, 等. 基于 P2P 的协同设计系统访问控制研究[J]. 计算机工程与科学, 2007(7): 34-36.

[6] Zhu Haibin. From WYSIWIS to WYSINWIS: Role-Based Collaboration [C]//Proc of IEEE Int'l Conf on System, Man and Cybernetics, 2004-10: 5441-5446.