

# 三维树木随风运动真实感模拟

李峰 顾文晓 曾兰玲

(江苏大学计算机科学与通信工程学院 镇江 212013)

**摘要** 提出了一种真实感较强的模拟树在风中摇曳的方法。该方法采用L系统建立树的有限元模型。引入Perlin噪声函数建立具有自然风的 $1/f$ 波动特性的风速模型;采用材料力学中梁的运动模型模拟枝干受风力弯曲。详细分析了树对风的遮挡:枝干遮挡和叶子遮挡,即风场与树之间的“流固耦合”现象,特别是在处理枝干遮挡过程中,采用了流体力学中的圆柱绕流模型。实验结果表明,该方法模拟的风吹树动效果逼真,可以达到实时显示的效果。

**关键词** 树,  $1/f$ 波动, 风速模型, 流固耦合, 圆柱绕流

**中图分类号** TP391.9 **文献标识码** A

## Realistic Simulation of Three-dimensional Trees Swaying in the Wind

LI Feng GU Wen-xiao ZENG Lan-ling

(College of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract** This paper presented a highly realistic simulation of the tree swaying in the wind method. The method uses L-system to build the finite element model of tree. Perlin noise function was introduced to establish wind model which has natural wind's  $1/f$  fluctuation characteristics. Mechanics of materials beam motion model was used to simulate branches bent by the wind. This paper analysed in detail the trees block to wind; branch block and leaf block, that is “fluid-structure interaction” phenomenon between wind and tree, especially in dealing with the process of branch block, using flow around circular cylinder in the model. The results show that this method gets realistic effects on a tree swaying in the wind, and the effect of real-time display can be achieved.

**Keywords** Tree,  $1/f$  fluctuations, Wind model, Fluid-structure interaction, Flow around circular cylinder

## 1 引言

随着虚拟现实理论和技术的不断发展,风中摇曳的树的模拟越来越受到人们的关注,已成为图形学中一个很有挑战性的问题。风吹则树动,树反过来又影响风的变化,这是一个相当复杂的“流固耦合”<sup>[1]</sup>问题,并且树木本身具有形态的多样性和结构的高度复杂性,所以快速、真实地模拟风吹树动的效果是一件很复杂的工作。

近年来,越来越多的计算机学者和植物学家致力于该领域<sup>[2-8]</sup>的研究:柳有权等<sup>[2]</sup>用基于统计数据的高斯分布来近似逼近实际风力,对于振幅大的末梢枝条采用Newmark逐步积分法求解其振动方程;然而,其只考虑了枝干的运动,并没有考虑叶子的运动。冯金辉等<sup>[3]</sup>根据树木结构的物理性质可将其分为固定枝条、可动枝条以及波动枝条,树的波动枝条采用波动理论模型,但是,基于波动理论的模型只适合模拟像柳树这种“软”枝条树。Stam等<sup>[4]</sup>通过在频域空间对白噪声进行滤波得到湍流效果,然后采用有限元模态分析的方法来计算枝条的自振频率,从而得到风力作用下枝条的振动效果;该方法较好地模拟了各种类型的树,但是白噪声滤波模拟风力模型很难真实地反映自然风特性。Shin等<sup>[5]</sup>通过了 $1/f^{\beta}$ 噪声函数模拟风场,采用弹簧模型模拟枝干运动,将树叶看作刚

体,其运动是平动与旋动的矢量和,该方法较好地模拟了风场,但是弹簧模型与刚体运动自由度较少,模拟出的效果粗糙。Akagi等<sup>[6]</sup>通过Navier-Stokes方程模拟风力模型,采用“边界条件图”方法分析枝叶对风的遮挡;该方法首次提出了树对风的遮挡情况,但是“边界条件图”方法的分析较为简单,未考虑风与树之间的“流固耦合”问题。

以上模型普遍具有以下两方面的不足:(1)风力模型、树的受力分析过于简单,不能真实反映实际特征;(2)基本没有考虑枝叶对风的遮挡情况,更没有考虑“流固耦合”。为此,本文提出了一种真实感很强的模拟树在风中摇曳的方法,探讨了自然风的 $1/f$ 波动特性,引入Perlin噪声函数来模拟风速模型,并采用材料力学中梁的运动模型来模拟枝干受风力弯曲,同时考虑了风场与树之间的“流固耦合”现象,详细分析了树对风的遮挡,即枝干遮挡和叶子遮挡。

基于上述考虑,本文第2节介绍基于L系统的树模型;第3节研究风的 $1/f$ 特性并建立风速模型;第4节采用材料力学中梁的受力运动分析枝干;第5节介绍树木对风的遮挡分析;第6节是实验与讨论;最后是全文的结束语。

## 2 基于L系统的树模型

树结构的建模是整个真实感模拟的基础,目前树的建模

到稿日期:2012-01-10 返修日期:2012-04-01

李峰(1968-),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机图形学、图像处理,E-mail:guwx07@gmail.com;顾文晓(1986-),男,硕士,主要研究方向为计算机图形学、植物建模;曾兰玲(1973-),女,博士,副教授,主要研究方向为植物建模。

方法众多,主要有分形方法、L系统、粒子系统、函数迭代系统和图像方法等。L系统由于其简洁的表达式,可以交互地改变树的结构与形状已经被业界广泛采用,故笔者沿用以前在这方面的作品<sup>[9,10]</sup>。

### 2.1 L系统建模

概括来说,L系统用一个三元式  $G=(V,\omega,P)$  来表示所构造的树。其中, $V$  是字符集; $\omega$  是起始字符元,描述树模型的初始状态; $P$  是产生式,是树木生长的规则集。

特定树的L系统描述是树建模的重点,因为它的好坏直接影响着树木的真实感。由于三维字符与某些特殊字符的引入,使得生成三维树木变得简单,下面是某三维树木的L系统三元式:

```

 $\omega:A$ 
 $P1:A \rightarrow [&FL! A]///// [&FL! A]//////// [&FL! A]$ 
 $P2:F \rightarrow S/////F$ 
 $P3:S \rightarrow FL$ 
 $P4:L \rightarrow [{}^m \wedge \{-f+f+f-|-f+f+f\}]$ 
 $\delta=22.5^\circ$ 
 $N=7$ 

```

其中, $P1,P2,P3,P4$  为树木生长的不同阶段。3维坐标系的3个轴  $H,U$  和  $L$  分别表示向前、向上和向左方向,+为左转  $\delta$  度;-为右转  $\delta$  度,& 为绕  $L$  轴向下转  $\delta$  度;^ 为绕  $L$  轴向上转  $\delta$  度;/ 为绕  $H$  轴向左滚动  $\delta$  度;\ 为绕  $H$  轴向右滚动  $\delta$  度;| 为绕  $U$  轴向后旋转 180 度; $\delta$  为旋转的角度;[,],{,},',! 表示控制字符; $N$  为迭代的次数。

### 2.2 形态建模

树木是由枝、叶、花、果实等器官组成的,而在模拟树木时,枝干和叶片是必不可缺的。所以只有对枝干和树叶进行合理的数学建模,才能在程序设计中对其进行细节控制和绘制。

#### 2.2.1 枝干建模

为了方便建模,一般都将枝干进行分类,即主干为 0 级枝干,它没有前驱,主干的直接后继为 1 级枝干,1 级枝干的直接后继为 2 级枝干,依次类推,直到末梢枝干。

所以枝干是树木形态结构的基本单元,它的数学模型好坏直接影响到最终树木渲染的结果。通过观察,枝干一般具有如下规律:

- 1) 父枝干总比子枝干的半径大;
- 2) 同一枝干根部半径总比顶部半径大;
- 3) 枝干具有一定的弯曲。

因此可以将枝干分解为若干段枝干单元,枝干单元是树木模型的最小单位。枝干单元之间相互连接,它们呈圆台形,各枝干单元相互之间的不同位置关系组成了具有一定弯曲程度的枝干。圆台的绘制是一种无限逼近法,用正  $n$  棱台表示,如图 1 所示。

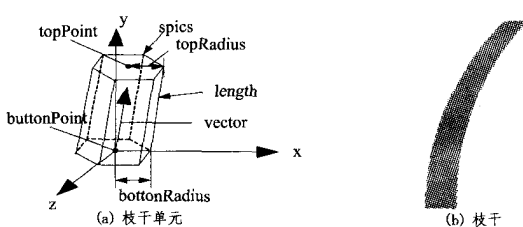


图 1 枝干模型

枝干单元模型是由一个多边形棱柱构成,有 7 个控制参数。通过叠加算法可以将若干个枝干单元组合成一个枝干,通过调整各枝干单元的参数值生成不同的结果。图 1(b) 所示为一根渲染后的枝干。

#### 2.2.2 树叶建模

树叶是树木的主要形态特征,其数量众多,但是同一棵树上的叶子大都长得类似,只是大小不同、颜色有出入,因此只需要建立几种树叶的模型。

常见的叶子建模方法有基于图形和基于图像的。图形方法是用多个多边形面片去拟合出一片叶子,但是一棵树木的叶子数量繁多,叶片边缘信息丰富,用少量的多边形面片去拟合很难达到逼真的效果。所以对于形状复杂、边缘信息丰富的叶片采用图像方法,即 Billboard 技术,它不仅可以提高生成速度,而且可以保留叶片的边缘信息和颜色信息,其真实感较强。

实际树叶并不是平面状的,而是具有一定程度的曲面性,在动画模拟中曲面由于具有众多各方向的法向量,光照后的效果更佳,但是它的计算效率要比平面树叶方法低得多。Bézier 曲面是一种常用的用来展示植物器官形态的方法。其定义如下<sup>[11]</sup>: 设空间中的  $(n+1) \times (m+1)$  个点为  $P_{i,j}$  ( $i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m$ ), 则可用下列张量积形式来表示参数曲面为  $n \times m$  次的 Bézier 曲面:

$$P(u,v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} B_i^n(u) B_j^m(v), (u,v \in [0,1]) \quad (1)$$

式中, $P_{i,j}$  是  $P(u,v)$  的控制点,  $B_i^n(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i}$ , 另外  $P_{i,0} P_{i,1} \dots P_{i,m}$  ( $i=0, 1, \dots, n$ ) 和  $P_{0,j} P_{1,j} \dots P_{n,j}$  ( $j=0, 1, \dots, m$ ) 组成了  $P(u,v)$  的控制网络。本文的 Bézier 曲面是采用 OpenGL 中集成的相关方法生成的,并在曲面上贴上了纹理。

最终本系统采用平面与 Bézier 曲面两种方法生成树叶的空间结构。图 2 为结合 L 系统和枝干建模生成的树木,图 2(a) 为平面树叶树,图 2(b) 为曲面树叶树。通过对比发现,采用 Bézier 曲面生成树叶的树木真实感更强。



(a) 平面树叶树



(b) 曲面树叶树

图 2 渲染的树

### 3 风速模型

树在风中的千姿百态来源于风的变幻无穷,因此要获得真实的动画效果,必须给出一个能很好反映自然风规律的风速模型。

常用的风速模型如平均风速模型、随机数生成函数模型等,它们生成的风场往往比较机械,不能真实再现自然风的特征。关于自然风的风速脉动特征,研究者们早在 20 世纪 80 年代就发现其具有  $1/f$  波动特性。 $1/f$  波动特性是其频谱密度函数  $S(f)$  与频率  $f$  的关系近似于:  $S(f) \propto 1/f$ , 它是广泛存在于大自然的随机过程,像蜡烛的火焰、海面上的波浪、小溪流水、风甚至人体的心律等都存在  $1/f$  波动。

结合自然风的  $1/f$  波动特性,本文采用具有此特性的 Perlin 噪声函数来建立风速模型。Perlin 噪声是指由 Ken Perlin 发明的自然噪声生成算法,它是将不同频率下的噪声叠加在一起形成的噪声函数。Perlin 噪声的基本表达式如下:

$$\text{PerlinNoise}(x) = \sum_{i=0}^{N-1} a^i \cdot \text{Noise}(b^i x) \quad (2)$$

式中,  $\text{Noise}(x)$  为噪声生成函数,  $b$  为频率系数,  $b$  通常取值为 2,  $a^i$  为振幅系数,  $a$  称为持续度 (persistence),  $N$  为叠加次数,通常为 6~10 次。由式(2)可以看出 Perlin 噪声是  $1/f^b$  噪声。

了解了 Perlin 噪声函数的实现原理,但如何使它模拟出来的噪声具有  $1/f$  波动特性呢? 还需要通过相关的设置。这里对持续度作相应设置,它是表示振幅与频率之间的关系。表示如果频率增加一倍,振幅降为其自身乘以持续度。例如,

$$\text{frequency}^* = 2^i$$

$$\text{amplitude} = \text{persistence}^i$$

通过分析,发现当  $\text{persistence} = 1/2$  时, Perlin 噪声函数的 amplitude 与 frequency 成反比,即符合  $1/f$  波动特性。由它生成的噪声函数模拟的风场具有自然真实的效果。同样的道理,当  $\text{persistence} = 1$  时,生成的噪声函数即为白噪声;当  $\text{persistence} = 1/4$  时,生成的噪声函数即为布朗噪声。

所以 Perlin 噪声模拟的  $1/f$  风场是持续度为  $1/2$  的噪声函数,即两倍的频率和二分之一振幅,如图 3(a)所示,具体需用多少倍频率叠加在一起,这取决于所要求的精确程度。最终,生成的噪声函数如图 3(b)所示,它可以用来模拟风场。

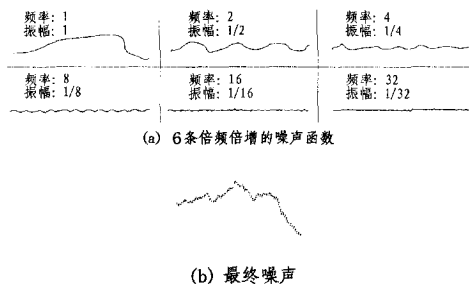


图3 Perlin 噪声的构造

在近地面层,风速随高度有显著的变化,这需要加以考虑。关于风速随高度变化的经验公式很多,通常采用指数公式,即

$$u = u_1 \left(\frac{Z}{Z_1}\right)^\alpha \quad (3)$$

式中,  $u$  表示距地面高度  $Z$  处的风速,单位为  $m/s$ ;  $u_1$  表示高度在  $Z_1$  处的风速,单位为  $m/s$ ; 粗糙度  $\alpha$  表示风速随高度变化的系数,它的变化与地面粗糙程度有关,其值一般为  $1/8 \sim 1/2$ 。

最终,由式(2)和式(3),风速模型可以表示为:

$$u = 2u_1 \cdot \text{PerlinNoise}(x) \cdot \left(\frac{Z}{Z_1}\right)^\alpha \\ = 2u_1 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{1}{2}\right)^i \cdot \text{Noise}(2^i x) \cdot \left(\frac{Z}{Z_1}\right)^\alpha \quad (4)$$

### 4 运动分析

要获得真实的风吹树动的运动效果,必须给出一个能很好反映树木运动规律的分析方法,故笔者对树木变形进行了详细分析。

#### 4.1 有限元分析树木

采用 L 系统生成的字符串只是树的整体结构,因此还要对每条枝干、每片树叶进行建模。对枝干、叶子的外形建模可以采用有限元方法,有限元方法是一种将连续体离散化为若干个有限大小的单元体的集合,以求解连续体力学问题的数值方法。如图 4 所示,采用有限元方法将枝干和叶子离散为若干控制节点,这些节点可以有效地控制枝干和叶子的外形。

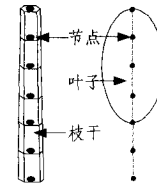


图4 有限元划分节点

同时这些节点还控制了树的物理属性,如单元重量、阻力系数、杨氏模量等。杨氏模量是树木有限元模型的一个很重要的参数,它的大小标志了材料的刚性,杨氏模量越大,越不容易发生形变。

树是一种复杂的自相似结构,从树根到树叶,其物理性质特别是杨氏模量变化极其剧烈,已经从线性过度到非线性,这给树的动态模拟带来了极大的困难。针对这种情况,可以将树分为 4 个不同部分:主枝干、枝条、末梢枝条和叶片,并分别采用不同数量级的杨氏模量。美国农业部给出了上百种不同树木杨氏模量数据<sup>[12]</sup>。表 1 列举了典型树木的杨氏模量取值范围及其直径范围,同时列举了树的有限元模型的其他参数,如树高、木材密度、材料阻尼系数等。

表1 典型树木有限元模型各参数取值范围

参数	取值	单位
主枝干直径	10~100	cm
大枝条直径	5~10	cm
小枝条直径	0.5~5	cm
叶柄与叶脉直径	0.2~5	cm
主枝干杨氏模量	5~12	GPa
大枝条杨氏模量	1~5	GPa
末梢枝条杨氏模量	0.5~1	GPa
叶柄与叶脉杨氏模量	50~500	MPa
树高	1~10	m
木材密度	0.35~0.6	kg/m <sup>3</sup>
每条枝干的节点数	15	/
材料阻尼系数	0.05	/

## 4.2 树木变形分析

单纯就一根树枝而言,均为一端生长在其母干上,另一端自由,它在风力作用下的运动可以抽象为材料力学中梁的运动。又由于有限元方法,可以对梁的每个单元进行受力分析,这里假设一段树枝由  $n$  段梁单元组成。

图 5(a)所示为一段梁单元,两端的控制节点  $A$  称固定端, $B$  称自由端,假设考虑其分支的存在,那么  $B$  端可能存在侧枝  $L'$ 。梁单元的弯曲是树枝所受方向风力的大小决定的,风力  $F$  由式(5)表示:

$$\left. \begin{aligned} F &= F_d + F_l \\ F_d &= \frac{1}{2} C_d \rho V^2 S \\ F_l &= \frac{1}{2} C_l \rho V^2 S \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中,  $C_d$  表示阻力系数,  $C_l$  表示升力系数,  $\rho$  表示空气密度,  $V$  表示风速,  $F_d$  表示该梁单元所受阻力,  $F_l$  表示该梁单元所受拖曳力。

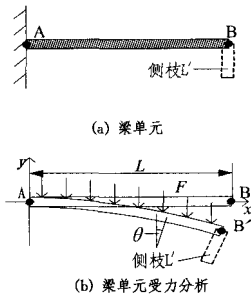


图 5

如图 5(b)所示,假设  $A$  端固定,  $B$  端受力,考虑分支的存在,那么梁单元的力矩  $M$  可表示为:

$$M = F \times L + \sum_{i=1}^n F_i' \times L_i' \quad (6)$$

式中,  $L$  表示梁单元的长度,  $F'$  表示侧枝受到的风力,  $L'$  表示侧枝的长度。分析图 5(b)可知,梁单元在  $B$  端受到力矩  $M$  作用后发生弯曲,故梁单元的旋转角度  $\theta$  可表示为:

$$\theta = \frac{M}{EI} = \frac{4M}{E\pi r^4} \quad (7)$$

式中,  $E$  表示该枝干的杨氏模量,  $I$  表示轴惯性矩,  $r$  表示梁横截面半径。

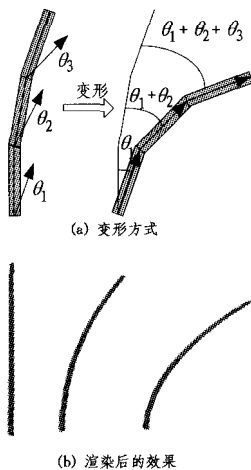


图 6 整段梁变形过程

最终,结合式(7)可以求得该树枝所有  $n$  段梁单元受风力偏转的角度,逐个将后一段单元的固定端平移至前一段单元的自由端,即可以获得整段树枝的运动位置。

这样得到了单个梁单元的旋转角度  $\theta$ ,  $\theta$  为矢量,那么整段枝干的变形就是这些梁单元旋转角度的叠加。假设如图 6(a)所示,某一枝干可以分为 3 段,从底部到顶部每个梁单元依次旋转  $\theta_1, \theta_2$  和  $\theta_3$ ,那么就可以通过依次叠加它们之间的相对位置得到变形后的枝干。图 6(b)为一段梁渲染效果,表示它在受不同大小风力下的弯曲程度。

有了枝干间力的传递和枝干变形的的方法后,就可以生成树木在风中运动的动画。其中每帧动画的具体步骤如下:

- 1) 清除树上所有分段的力;
- 2) 从叶子到主干,采用后序遍历法,计算每一段梁单元所受的力以及传递过来的力;
- 3) 从枝干到叶子,计算每段枝干的旋转值;
- 4) 渲染此时的树木。

## 5 遮挡分析

风对树的作用可以造成树的变形,而树对风的遮挡可以影响风的方向。所以风对树作用的同时,树对风也存在遮挡,然而目前的研究基本上只考虑了风对树的作用,很少考虑树对风的遮挡,因此难于真实地模拟风吹树动的效果。其实风与树之间的交互是一种流固耦合现象,遮挡情况是这种流固耦合效应的结果。实际流体都有粘性,在大雷诺数的绕流中,由于流体惯性力远大于作用于流体的黏性力,因此黏性力相对于惯性力可忽略不计,将流体视为理想流体。由理想流体的流动理论求解流场中的速度分布。但在靠近物体的空间中,由于存在强烈的剪切流动,黏性力与惯性力处于相同的数量级,从而不能忽略。本文将树对风的遮挡分为两类:枝干遮挡和叶子遮挡,通过引入有限元方法进行量化分析。

### 5.1 体素化空间

由于树木枝叶的前后遮挡、风速变化等情况,同一棵树木的不同位置、不同时刻所受到的作用力是不同的,这就需要对整棵树木具体分析。4.1 节介绍了有限元方法,这里同样可以采用这种方法来分析。

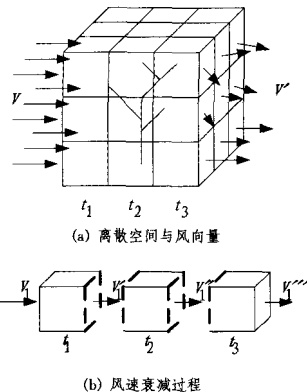


图 7

风场主要有两个特征:风随时间变化、风随空间变化。风随时间变化就是前面介绍的风场模型。而风随空间的变化就需要采用有限元方法离散风力,同时离散树空间。将树木的空间离散为  $n \times n \times n$  个体素(小空间),每个体素内有若干枝

干和树叶,分析每个体素内枝干和树叶对风的遮挡影响。模型如图 7(a)所示,假设整棵树垂直于风速  $V$  方向划分为  $3 \times 3 \times 3$  个体素,风速离散为  $3 \times 3$  个子向量,风从源向至去向依次吹过,随时间  $t$  依次作用于树空间。划分间距可大可小,依具体情况而定,划分的越小,遮挡效果越明显,但计算机开销就越大。风速的衰减过程如图 7(b)所示。

## 5.2 圆柱绕流与枝干遮挡

对图 7 中离散的体素进行分析,假设某体素中有且仅有一段枝干,风对其作用如图 8(a)所示,风速  $V$  吹过该体素后衰减为  $V'$ , $V$  可分解为垂直于枝干的  $V_1$  和平行于枝干的  $V_2$ 。对该体素进一步分析,枝干可近似地看成是圆柱状的,风吹过枝干时是一个经典的圆柱绕流问题,如图 8(b)所示,故需建立合适的圆柱绕流模型。设  $V_1$  为一均匀流,从与圆柱体垂直的方向绕过一半径为  $r_0$  的无限长圆柱体,这样的流动看成是平面流动。均匀流绕过圆柱体时,由于受到圆柱的阻挡,绕过柱体附近的流体质点受到扰动,使其偏离原来的直线路径,而离柱体越远,扰动越小。

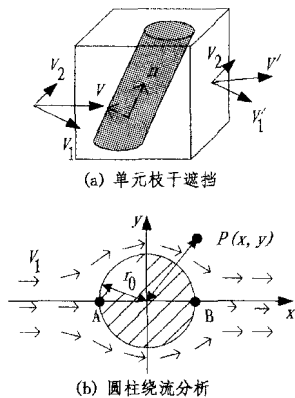


图 8

这样,圆柱体绕流可以简化地看作是由均匀流和偶极子流叠加而成的平面流动。均匀流和偶极子流的复势分别为:

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= V_1 r (\cos\theta + i \sin\theta) \\ W_2 &= \frac{M}{2\pi r} (\cos\theta - i \sin\theta) \end{aligned} \right\} (r \geq r_0) \quad (8)$$

式中, $W$  为复势, $M$  为偶极矩, $r$  为流场中任意位置  $P(x, y)$  到坐标原点的距离。根据势流叠加原理,均匀流和偶极子流叠加形成的新流动的复势  $W$  为:

$$W = W_1 + W_2 = \left( V_1 + \frac{M}{2\pi r^2} \right) r \cos\theta + i \left( V_1 - \frac{M}{2\pi r^2} \right) r \sin\theta, (r \geq r_0) \quad (9)$$

那么在极坐标系下速度势函数  $\Phi$  和流函数  $\Psi$  分别为:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= V_1 x + \frac{M}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2} \\ \Psi &= V_1 y - \frac{M}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由式(10)且偶极矩  $M = 2\pi r_0^2 V_1$ , 可求得流场中任意一点  $P(x, y)$  的速度分量:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{\partial \Phi}{\partial x} = V_1 \left[ 1 - \frac{r_0^2 (x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \right] \\ v_y &= \frac{\partial \Phi}{\partial y} = -V_1 \frac{2xyr_0^2}{(x^2 + y^2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

最终由式(11)计算出图 8(a)中衰减后的速度  $V_1'$ , 合并  $V_1'$  与  $V_2$  得到流出小空间的风速  $V'$ , 同时  $V'$  作为下一小空间

的流入风速。

## 5.3 叶子遮挡

不同于枝干的刚性,叶子其实是一种柔性材质,风场与叶子的交互由于叶子的柔性特征而产生诸多不确定性,过程相当复杂,流体力学中的平板绕流模型已经不能真实地模拟出此特点。而且不同树叶之间因形状、大小、质地等千差万别,所以试图真实地模拟其物理特性非常困难。

叶子数目众多,一棵树上可能存在上万甚至十万片叶子,在既要追求效果又要追求效率的情况下,本文采用了一个可以近似反映实际运动特性的简化模型。如同枝干遮挡,叶子遮挡亦采用体素进行分析,如图 9(a)所示。图 9(b)为体素中风平行方向上的二维投影,流入风速  $V$  与叶片相互作用,夹角为  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq \pi/2$ ),流出的风速  $V'$  可表示为:

$$\begin{aligned} V' &= (1 - \sin\theta \frac{S_{leaf}}{S_{space}}) V + k \sin\theta \frac{S_{leaf}}{S_{space}} V, 0 < k < 1 \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $S_{leaf}$  表示叶片的面积, $S_{space}$  表示体素的投影面积,常数  $k$  是一个与叶片属性有关的参数,速度  $V'$  作为下一体素的流入风速。

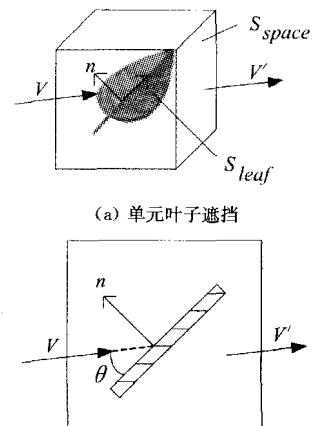


图 9

## 5.4 体素处理

对于遮挡情况,前面体素化风场的三维空间,假设每个体素内有且仅有一段枝干,再在每个体素内计算风力遮挡情况。然而,事实上空间的划分也导致了一些不良结果,例如体素的处理方式、真实感、运行时间等,所以应该对其作进一步的优化处理。

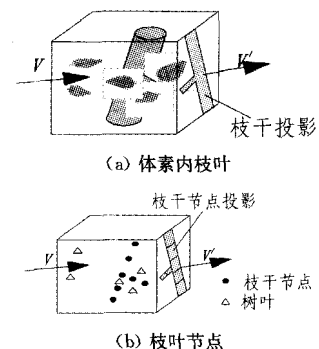


图 10

在实际处理体素的过程中,并不是一个体素内有且仅有

一根枝干或者一片树叶,而是可能有若干枝干和若干树叶,甚至有半截枝干的情况,具体的枝叶分布可能如图 10(a)所示。4.1 节已经将一个枝干离散为若干节点,枝干节点可以看成一小段枝干,同样可以用圆柱绕流进行分析;同时树叶也可以看成一个节点,将体素内枝叶离散为节点,如图 10(b)所示。

下面将用离散后得到的各物理节点来计算体素内流出的速度  $V'$ 。计算枝干遮挡时,假设风速  $V$  经过一段枝干节点后在其投影区域内平均风速降为  $V'$ ,  $V'$  可以通过式(11)计算得到。现在假设体素内含有  $n$  片树叶、 $m$  节枝干节点,再结合式(12),最终流出的速度  $V'$  可表示为:

$$V' = (1 - \sum_{i=0}^n \sin\theta_i \frac{S_{leaf_i}}{S_{space}} - \sum_{i=0}^m \frac{S_{branch_i}}{S_{space}}) V + k \sum_{i=0}^n \sin\theta_i \frac{S_{leaf_i}}{S_{space}} V + \sum_{i=0}^m \frac{S_{branch_i}}{S_{space}} \bar{V}'_i, 0 < k < 1 \quad (13)$$

式中,  $S_{branch}$  为枝干节点投影的面积。

### 5.5 防抖动技术

如图 11 所示,当一个节点在相邻两体素边界区域运动时,可能来回运动于两区域,由于遮挡导致两体素风速不同,节点所受到的风速起伏变化大,从而引起枝干抖动,丧失真实感。

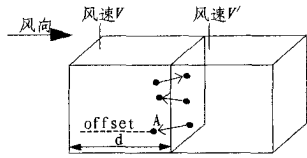


图 11 防抖动技术

解决方法是采用插值方法,求出两区域的风速差,再按照节点在体素内的位置求出该节点处的风速, A 点的风速可表示为:

$$V_A = V - \frac{offset}{d} (V - V') \quad (14)$$

## 6 实验与讨论

基于本文所提出的方法,笔者在 Windows 环境下,利用 VC++ 和 OpenGL 实现了树在风吹情况下的运动。该程序在一台配置了 Intel 2.1GHz CPU, 1G 内存, 256MB 显存的 NVIDIA GeForce3 图形卡机器上运行。同时还对生成的实验进行了讨论和分析,并作了相应的优化处理。

### 6.1 空间效率分析

本文将树木的空间离散为  $n * n * n$  个体素,每个体素内的处理过程都结合枝干遮挡和叶子遮挡采用 5.4 节的式(13)进行。原则上体素划分的数量越多越精确,但是究竟采用多大体素数量比较合适呢? 本文生成了一棵树木,其共有 47034 个多边形面片,对它进行效率分析得到表 2 所列数据。

表 2 空间效率分析

体素数量	每帧耗时(s)	平均每个体素内节点数
1	0.0378	8298
5 <sup>3</sup>	0.0446	66.384
10 <sup>3</sup>	0.0543	8.298
20 <sup>3</sup>	0.0769	1.037
30 <sup>3</sup>	0.0986	0.307
40 <sup>3</sup>	0.1228	0.130
50 <sup>3</sup>	0.1750	0.066

从表 2 数据可以发现,随着体素数量呈指数增加,生成动画的每帧耗时不断增加;当体素数量超过 20<sup>3</sup> 时,平均每个体素内节点小于 1,当体素数量超过到 40<sup>3</sup> 时,平均每十个体素内才会有一个节点。

所以当体素数量较多时,大量体素内实际没有节点,但是系统还是要对它进行划分和分析,这样势必造成资源的浪费。对该种状况进行优化,较好的方法是将大量空体素合并为若干较大的体素。又由于树木的大多数节点基本集中在一起,因此本文引入了八叉树结构划分树空间。

八叉树<sup>[13]</sup>是一种表示三维空间的树状数据结构,它的每个节点表示一个正方体的体素,每个节点有八个子节点,这八个子节点所表示的体素的体积加在一起就是父节点的体积,如图 12 所示。树木的八叉树划分,体素数量为  $n^3$  个,那么八叉树的深度为  $\lceil \log_2 n \rceil + 1$ 。

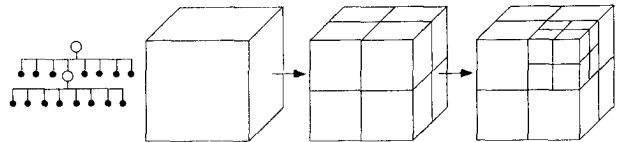


图 12 八叉树

### 6.2 帧率分析

由于该系统中树木的建模和处理分析会消耗很大系统的资源,因此最后生成的动画的帧率会与树木的复杂程度有关。这里对不同复杂程度的树木的帧率进行测试,笔者在相同的环境下,统一将树木划分为 10<sup>3</sup> 个体素,结果如表 3 所列。

表 3 帧率

树木多边形面片数量	帧率(f/s)
134782	6.5
90558	10.3
49304	17.5
20124	37.8
12328	67.5
5038	143.6

该表说明,树木的多边形面片数量越大时,动画的帧率就越低。当多边形面片大于 90000 时,帧率小于 10;当多边形面片小于 12000 时,帧率大于 60。

但是帧率过大或过小会使运动动画太快或者太慢,最终影响树木的真实感。所以这里需要做的就是规定的时间内完成动画运动,无论帧速的快慢如何。假设风速的周期为  $T$  (s),此时动画的帧率为  $a$  (f/s),那么第 3 节中具有  $1/f$  波动特性的 Perlin 噪声函数的频率  $frequency = 1/(T * a)$ ,最终按照频率  $frequency$  生成风力模型。

### 6.3 相关方法比较

本方法与近些年现有方法做了比较,如表 4 所列。表中数据显示,本方法在保证渲染细节、帧率、基于物理等前提下,还对遮挡、风的  $1/f$  特征做了新的探索。从流体力学的角度考虑了树对风的遮挡情况;并在 Perlin 噪声函数的基础上引入了具有  $1/f$  波动特性的风场模型。

表 4 相关方法对比

方法	基于物理	帧率	遮挡	渲染细节	风的 1/f 特性
柳有权 <sup>[2]</sup>	是	慢	无	高	无
Shin <sup>[5]</sup>	是	中	无	中	无
Akagi <sup>[6]</sup>	是	中	有	中	无
Ralf <sup>[7]</sup>	否	中	无	中	无
Daniel <sup>[8]</sup>	是	快	无	高	无
本方法	是	中	有(物理)	中	有

## 6.4 渲染效果

最终渲染后的遮挡效果如图 13 所示,从图 13 可以看出,迎风面区域 A 运动幅度大,而背风面区域 B 运动幅度小,遮挡效果较逼真。

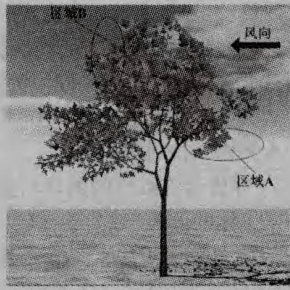


图 13 遮挡效果

树在不同风速下的效果如图 14 所示,依次为同一棵树在 0m/s, 5m/s, 10m/s, 15m/s 风速下的形态。同时制作了一段长度为 1min 左右的视频,可以访问 <http://www.cnblogs.com/jsucg/articles/2314284.html> 观看,从图像和视频可以看出,树在风中的运动可以很好地反映其自然特性,遮挡效果逼真。

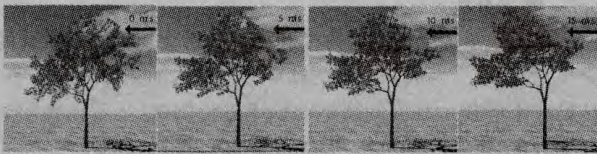


图 14 同一棵树在不同风速下的效果图

**结束语** 要提高动画的真实感,树对风的遮挡情况是不能回避的课题,然而在以往的研究中很少考虑该情况, Akagi<sup>[6]</sup>也只是采用了简单的“边界条件图”来处理,并没上升到物理学的角度分析。本文分别详细地分析了枝干遮挡与叶子遮挡,特别是在处理枝干遮挡过程中,采用了流体力学中的圆柱绕流模型。同时,为了提高枝叶运动的真实感,本文还探讨了自然风的  $1/f$  波动特性,建立了一个能很好反映自然风规

律的风力模型。实验表明,该方法实现的风吹树动效果逼真,符合自然特性。

## 参考文献

- [1] Teixeira, Awruch. Numerical simulation of fluid—structure interaction using the finite element method[J]. Computers and Fluids, 2005, 34(2): 249-273
- [2] 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
- [3] 冯金辉, 陈艳云, 严涛, 等. 树在风中摇曳——基于动力学的计算机动画[J]. 计算机学报, 1998, 21(9): 769-773
- [4] Stam J. Stochastic Dynamics; Simulating the Effects of Turbulence on Flexible Structures[J]. Computer Graphics Forum, 1997, 16(3): 159-164
- [5] Ota S, Tamura M, Fujita K. A hybrid method for real-time animation of trees swaying in wind fields[J]. The Visual Computer, 2004, 20(10): 613-623
- [6] Akagi Y, Kitajima K. Computer animation of swaying trees based on physical simulation[J]. Computers and Graphics, 2006, 30(4): 529-539
- [7] Wesslén D, Seipel S. Real-time visualization of animated trees[J]. The Visual Computer, 2005, 21(6): 397-405
- [8] Habel R, Kusternig A, Wimmer M. Physically guided animation of trees[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(2): 523-532
- [9] Lindenmayer A. Physically guided animation of trees[J]. Journal of Theoretical Biology, 1968, 18: 280-315
- [10] Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. The algorithmic beauty of plants[M]. New York: Springer-Verlag, 1990: 40-50
- [11] 焦永和. 计算机图形学教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001
- [12] Laboratory F P. Wood handbook—wood as an engineering material[D]. Madison Wis: United States Department of Agriculture, 1999
- [13] 吴晓军, 刘伟军, 王天然. 基于八叉树的三维网格模型体素化方法[J]. 工程图学学报, 2005, 4: 1-7

(上接第 245 页)

目  $n_1$ , 查询返回的图像数目  $n_2$ , 根据查准率  $= n_1/n_2$ , 得到 4 种算法的查准率比较, 如表 1 所列。表 2 给出针对花卉图像检索运行的时间。

由表 1 和表 2 可知, 本文提出的算法与其它方法相比, 检索时间没有显著地增加, 但查准率明显得到提高。

**结束语** 在基于内容的图像检索中, 颜色是最重要的特征。本文提出的基于等面积的矩形环的累加颜色直方图检索方法, 不但克服了传统直方图容易出现零点的瑕疵, 而且提出的分块方法简单, 比较符合图像的分布特点, 突出了图像的主体部分, 在一定程度上克服了传统均匀分块直方图对图像伸缩、旋转等变化敏感的缺点。

实验结果表明, 该算法在保持较高检索精度的同时, 大大降低了颜色特征空间的维数, 提高了检索性能, 取得了理想的检索效果。但是单一的颜色特征只能表达图像的部分属性, 往往不能满足用户的视觉需求。纹理特征也是图像的一个重要全局特征, 因此, 下一步的工作是融入纹理特征, 将纹理特征和颜色特征进行综合, 以进一步提高检索精度。

## 参考文献

- [1] 孙君顶, 原芳. 基于内容的图像检索技术[J]. 计算机系统应用, 2011, 20(8): 240-243
- [2] Swain M J, Ballard D H. Color Indexing [J]. International Journal of Computer Vision, 1991, 7(1): 11-32
- [3] Li Xiao, Wang Wei-lan, Yang Wei. Improved local accumulate histogram-based Thangka Image Retrieval[C]//Image Analysis and Signal Processing (IASP). 2010, 6: 318-321
- [4] Chen Xu-feng, Meng Xiang-fang. Image retrieval based on optimal matching with block histogram[C]// Information Science and Engineering (ICISE). 2010, 5: 5135-5138
- [5] Riaz M, Kang G, Kim Y, et al. Efficient Image Retrieval Using Adaptive Segmentation of HSV Color Space[C]//Computational Sciences and Its Applications. 2008, 7: 491-496
- [6] 李秋蓉. 基于颜色和相关反馈的图像检索技术研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2010, 4: 34-35
- [7] 常哲, 侯榆青, 李明俐, 等. 综合颜色和纹理特征的图像检索[J]. 小微型计算机系统, 2011, 1(32): 161-164