

# 快速模拟 IFS 树木动态摇曳的方法研究

赵鹏飞, 张志毅

ZHAO Pengfei, ZHANG Zhiyi

西北农林科技大学 信息工程学院, 陕西 杨凌 712100

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

ZHAO Pengfei, ZHANG Zhiyi. Research on fast dynamic simulation of IFS trees swaying. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(14): 160-163.

**Abstract:** To better simulate the three-dimensional trees and the effect of dynamic swaying, this paper proposes a way of using the Perlin noise to generate a mathematical model of the virtual wind, and using the Iterated Function Systems (IFS) to build the 3-D trees model. Then this method uses dynamical equation to calculate the amplitude of swaying trees, the rotation angle and offset size of the branches and leaves. Experimental result shows that the method can better simulate the natural form of trees and real effects of dynamic swaying.

**Key words:** Perlin noise; Iterated Function Systems (IFS); wind filed; trees

**摘要:**为了更好地模拟三维树木动态摇曳的效果,根据真实风场的变化规律,利用 Perlin 噪声技术产生虚拟风场的数学模型,采用迭代函数系统(IFS)方法构建三维树木模型,并运用动力学知识进行受力分析,计算树木的摇曳幅度以及树枝和树叶的旋转角度和偏移大小。实验结果表明,该方法能够较好地模拟自然树木的形态以及树木的真实摇曳效果。

**关键词:** Perlin 噪声; 迭代函数系统(IFS); 风场; 树木

**文献标志码:** A **中图分类号:** TP391 **doi:** 10.3778/j.issn.1002-8331.1111-0290

## 1 引言

随着虚拟现实技术在虚拟植物研究中的应用,虚拟植物的研究已发展到一个新阶段。植物形态的静态模拟已不能满足场景绘制的要求,对植物受自然界外力影响而摆动的模拟成为新的研究热点。现有的动态模拟工作主要分为两类,即基于过程的模拟和基于物理的模拟。基于过程的方法往往采用递归算法对树进行建模,并且也多采用过程函数来描述风场,尽管这些方法简单易用,但需要进行大量的参数调整,不便于处理复杂树的模型。在基于物理的方法中,Shinya<sup>[1]</sup>等人构造了一个随机风场,基于模态分析方法模拟了树在风中摇曳。Stam<sup>[2]</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。另外,树木摇曳运动的研究还有很多:Wejchert 和 Haumann<sup>[3]</sup>通过四种简单流体单元均匀流、汇、源以及涡的叠加来设计和控制风的流动,模拟了树叶在风中的飘舞。柳有权<sup>[4]</sup>等人抽取图片中树木的骨架,来构造三维树木的模型,并用高斯分布来模拟实际风力,来获取树枝的变形效果;然而该方法的计算开销很大,难以对多模型进

行实时计算。胡潇毅<sup>[5]</sup>等人建立了阔叶树在风中摇曳的有限元模型,并考虑了风场和树之间流固耦合效应,讨论了由平均风压和旋涡脱落引起的不同的振动模式,模拟了不同风力等级下树的晃动;该方法的有限元模拟代价太大,不能满足实时生成动画的要求。李占利<sup>[6]</sup>等人在力学分析的基础上,对树叶和树枝受力分析,并结合  $1/f^\beta$  噪音技术,计算风吹效果,从而实现树木在风中摆动的效果;该方法在  $1/f^\beta$  噪音技术模拟的虚拟风场中,树木的摇曳效果逼真度不强。

本文采用能较好反应自然风场效果的 Perlin 噪声函数,利用不同的频率和振幅的特征噪声函数构建虚拟风场,并采用 IFS 方法生成逼真的三维树木,通过受力分析,得到树木的受力效果,从而进行三维树木的摇曳模拟。

## 2 迭代函数系统建模

### 2.1 迭代函数系统

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的(自相似)或经过

**作者简介:** 赵鹏飞(1987—),男,硕士研究生,研究领域:计算机图形学;张志毅(1974—),男,副教授,研究领域:计算机辅助设计与图形学。

E-mail: zmdzpf@126.com

**收稿日期:** 2011-11-16 **修回日期:** 2012-02-03 **文章编号:** 1002-8331(2013)14-0160-04

**CNKI 出版日期:** 2012-04-25 <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20120425.1720.049.html>

一定变化与整体相似的(自仿射)小块拼贴而成。

**定义 1** 设  $\omega: X \rightarrow X$  是基本空间  $(X, d)$  上的一个映射。如果存在一个正的常数  $c < 1$ , 使  $d(\omega(x), \omega(y)) \leq c \cdot d(x, y)$  则称  $\omega$  为  $(X, d)$  上的压缩映射,  $c$  称为压缩因子。

**定义 2** 完备的度量空间  $(X, d)$  以及  $n$  个压缩映射  $\omega_i: X \rightarrow X$  (其压缩因子分别为  $c_1, c_2, \dots, c_n$ ) 一起, 就组成一个迭代函数系统(IFS), 记作  $\{X; \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ 。  $c = \max(c_1, c_2, \dots, c_n)$  称为 IFS 的压缩因子。

$n$  维欧式空间  $R^n$  中的仿射变换  $\omega: R^n \rightarrow R^n$  具有下面的形式:

$$\omega(x) = A(x) + b, x \in R^n$$

其中  $A$  是  $R^n$  上的线性变化,  $b$  是  $R^n$  中的一个矢量。仿射变换是一类重要的变换, 是平移、旋转、伸缩以及反射的组合<sup>[7]</sup>。

## 2.2 三维树木建模

三维树木建模中, 最常用的两种方法是 L 系统和迭代函数系统(IFS)。L 系统在模拟植物形态时, 没有考虑植物各组成部分存在的自相似性。因此, 绘制的植物形态与自然植物相比, 缺乏质地感或纹理感, 难于控制树木的全局特性。而 IFS 方法能够快速模拟植物各组成部分的自相似性特征, 树木纹理结构丰富, 程序实现简单易行。因此, 本文采用 IFS 方法构建三维树木模型。

### 2.2.1 树枝建模

植物外部形态上呈现出的千姿百态, 是其内部某种深刻的形态控制机制的反映, 是植物组织基本规律的外在表现, 这种表现可以由树木的分枝模式来描述。植物的分枝模式有很多种, 但可归结为三大类:

(1) 单轴分枝。主茎上的顶芽活动始终占优势, 因而形成具有明显、笔直的主干的分枝方式。在这种分枝型式中, 主干即主轴, 由顶芽不断地向上伸展而成, 以裸子植物为最多。

(2) 合轴分枝。主干的顶芽生长一个时期后, 生长迟缓、死亡或分化为花芽, 而由近顶芽的腋芽代替原有顶芽继续生长, 发育成新枝, 逐渐形成了由多个轴联合成的具曲折主干的分枝方式。

(3) 假二叉分枝。具有对生叶的植物, 在顶芽停止生长或分化为花芽时, 由其下方两侧的腋芽同时发育形成二叉状分枝的分枝方式。从外表看这种分枝与二叉分枝相似, 因此叫假二叉分枝<sup>[8]</sup>。

在自然环境中, 裸子植物是很重要的林木, 森林中 80% 以上的植物都是裸子植物。因此, 本文采用单轴分枝模式作为三维树木的分枝模式, 用近似树枝的圆柱体相互连接构成树木的骨架, 通过控制树枝的参数属性, 如树枝的分叉角度、粗细程度、长度及位置等, 建立真实的树枝模型。如图 1, 是 3 层结构的树枝模型。

### 2.2.2 树叶建模

在真实环境中, 树叶的种类万千, 而每片树叶也拥有各自的大小、颜色及形状等特性。为了满足实时快速地构造树木模型, 本文采用相同的树叶模型, 如图 2, 并通过纹

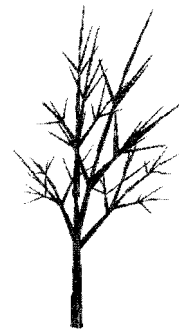


图1 3层树枝模型图

理映射方法和 Alpha 通道测试对模型进行渲染, 来达到真实的效果。在编程实现的过程中, 通过 OPENGL 调用底层图形库的 `glScalef()` 函数来改变树叶的大小, 并通过 `glRotatef()` 函数来调整树叶的旋转角度, 这样可以使树木生成不同类型的树叶, 增强真实感。

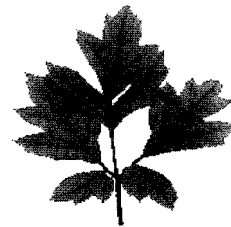


图2 树叶模型

## 3 数学虚拟风场建模以及受力分析

### 3.1 基于 perlin 噪声值的风场

现实生活中, 风场是随机改变的, 并且有很多不确定因素。如: 风场的风向、大小、强度等。为了更好地模拟风场, 对已有的风场模型进行改进, 在线性风场中加入随机数, 通过随机因子来影响风速的变化, 从而实现风场的随机性。Perlin 噪声是几个 coherent noise 的叠加, 这几个 coherent noise 间的关系是: 频率递增、振幅递减。Perlin 噪声函数实际上是一个种子随机发生器。需要一个整数作为参数, 然后根据这个参数返回一个随机数。但是与普通的随机函数不同的是, 如果两次都传同一个参数进来, 就会产生两个相同的数。由多个 coherent noise 组成一个 Perlin 噪声, 每一个 coherent noise 就称为一个 octave。octave 越多, Perlin 噪声就越细致, 但计算时间也越长<sup>[9]</sup>。

图 3 是一定范围内产生的离散噪声值, 在  $x$  轴上  $[0, 20]$  的每个点对应一个 0 到 1 范围内的随机噪声值。通过将每个离散的噪声值进行平滑插值, 得到一个平滑的连续函数, 如图 4, 该连续函数就是 Perlin 噪声函数。

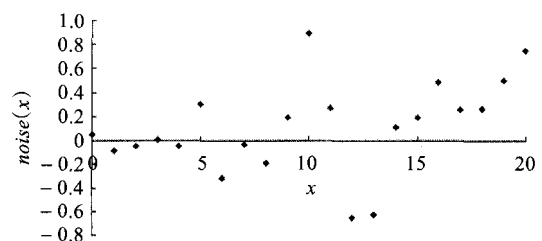


图3 离散噪声值

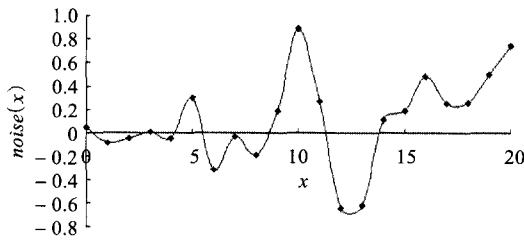


图4 平滑插值后的噪声值

根据产生的 Perlin 噪声值, 虚拟风场数学模型可以表示为:

$$V = V_0 + V_0 \times \sin(\omega t + \alpha) + \varepsilon \times \text{PerlinNoise}(t)$$

由此可知, 风场模型是以时间  $t$  为变量的函数,  $V_0, \omega, \alpha, \varepsilon$  都是给定的常量, 其中  $\omega = 3.14/120, \alpha = 0, \varepsilon = 4, \text{PerlinNoise}(t)$  是以  $t$  为参数产生的噪声值。

风场模型确定后, 根据动力学和材料力学的相关知识, 可以算出作用在物体上的风力。因此, 作用在树枝或树叶上的风力可以由阻力  $F_d$  和浮力  $F_l$  组成, 阻力和浮力公式可由式(1)和式(2)计算:

$$F_d = \frac{1}{2} C_D \rho_a v^2 S \quad (1)$$

$$F_l = \frac{1}{2} C_L \rho_a v^2 S \quad (2)$$

其中  $C_L, C_D$  分别为浮力和阻力系数,  $C_L = 0.75, C_D = 0.013, \rho_a$  为空气密度,  $\rho_a = 2.37 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3, v$  是建立的风场模型得到的风速,  $S$  是树枝或树叶迎风面积<sup>[6]</sup>。

### 3.2 树枝受力分析

解决树枝弯曲的运动有两种方法: 一种方法是求解微分方程来计算树枝上每个质点的移动位置; 另外一个采用通过计算直杆的旋转角度来近似逼近的方法。为了快速地模拟树枝运动, 本文采用计算旋转角近似逼近的方法来求得树枝的弯曲运动。

在建立的树枝模型中, 每段树枝可以看作是一个悬臂梁, 把树枝的一端作为固定点, 另外一端作为自由端点, 树枝在受力的情况下, 自由端点绕固定点做摇摆运动, 导致树枝在风力的作用下发生形变和偏移。

结合材料力学中杆件运动的典型结论, 可以得出树枝的受力分析情况如图5。在风场中的树枝, 自由端受到风力  $F_1$  和树枝形变产生的阻力  $F_2$  以及轴向衰减力  $F_w$ 。

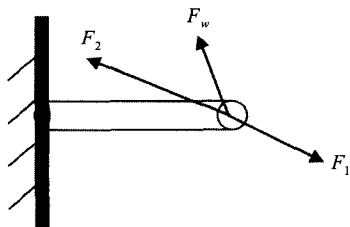


图5 树枝受力分析

在风场作用下的树枝会随风摆动并发生偏移, 但树枝是有弹性的, 它会随着风力的变化, 偏移程度也会发生变化, 甚至恢复到原始状态。在树枝发生偏移的时候, 抑制

这种运动的力就会产生。这些力包括轴向衰减力和复原力。在模拟树枝运动的时候, 树枝与树枝之间存在很强的约束力, 远大于空气阻力, 此时只考虑轴向衰减力的作用。在这里, 轴向衰减力的大小与树枝转动的角速度的平方成比例。表达式为:

$$F_w = k \cdot \omega^2$$

式中,  $k$  是阻尼系数,  $\omega$  是树枝运动的角速度。

当树枝在风力的作用下会发生形变, 由于树枝具有弹性, 会产生一个阻止树枝形变的力, 即复原力。复原力是使树枝条恢复到原始位置的力, 其大小与树枝在上一时刻受到的风力有关。表达式为<sup>[10]</sup>:

$$F_2 = -kF(t-1)$$

因此, 树枝所受力  $F$  可表示为:

$$F(t) = F_1 + F_2 + F_w$$

由于风力的方向不确定, 所以力  $F$  并不是全部作用在树枝上, 使树枝产生形变的力是力  $F$  在某个方向的分解力。在每段树枝的局部坐标系中, 每段树枝都是在  $Z$  轴方向上生长的, 设定风力  $F$  与  $X$  轴垂直, 与  $Y$  轴平行, 根据受力分析, 风力  $F$  会在  $Y$  轴和  $Z$  轴分解为  $F_Y$  和  $F_Z$ 。但是,  $F_Z$  不会使树枝产生形变, 因此只考虑  $Y$  轴方向上的作用力。在  $Y$  轴方向上的力  $F_Y$  导致树枝产生形变, 形变大小为  $\delta$ , 从而树枝会发生偏转一定的角度  $\theta$ , 如图6。形变大小和偏转角度可由式(3)和(4)求得:

$$\delta = \frac{4F_Y L^3}{3\pi E R^3} \quad (3)$$

$$\theta = \arcsin(\delta/L) \quad (4)$$

式中  $F_Y$  表示树枝受到的风力,  $E$  表示弹性模量,  $L$  表示树枝的长度,  $R$  表示树枝的半径<sup>[6]</sup>。

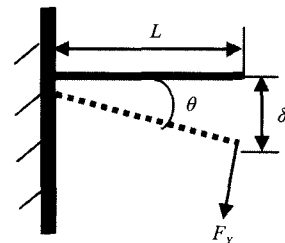


图6 树枝受力偏转

现实中, 树枝的摆动不是以分段为单位单独摆动, 而是作为一个整体运动。为了得到树枝整体的运动, 需要把前段树枝的自由端点作为下段树枝的固定点, 然后计算下段树枝的偏移大小, 通过不断的平移坐标系进行整合, 来求得整段树枝的偏移大小, 如图7。

### 3.3 树叶受力分析

树叶的运动不同于树枝, 因为树叶不但自身会在风场受力运动, 也会随着所在的枝段摆动而摇曳。由于树叶的自身重量比树枝的重量轻得多, 在风力的吹动下, 会比树枝的摆动更剧烈。

通过建立的树叶模型, 可知道树叶的初始位置和初始角度。通过受力分析, 树叶在风力的作用下, 会产生一定



(a)树枝初始状态 (b)分段树枝偏移 (c)合成后树枝状态  
图7 树枝偏移效果

的形变和偏转,为了快速地模拟树叶的运动,这里只考虑树叶的偏转运动,不考虑形变大小。通过受力分析,可知在风力的作用下,树叶分别绕着三个坐标轴旋转,旋转角度分别为  $\theta_x(t)$ ,  $\theta_y(t)$ , 和  $\theta_z(t)$ 。  $\theta_x(t)$ ,  $\theta_y(t)$ , 和  $\theta_z(t)$  是关于时间  $t$  的函数,分别由下列方程表示:

$$\begin{aligned} \theta_x(t) &= M_x \text{PerlinNoise}_x(t) \\ \theta_y(t) &= M_y \text{PerlinNoise}_y(t) \\ \theta_z(t) &= M_z \text{PerlinNoise}_z(t) + \lambda \theta_x(t) \end{aligned}$$

其中  $M_x$  和  $M_y$  分别是关于  $X$  和  $Y$  轴的最大旋转角度,这里以弧度计算,  $M_z$  是  $Z$  轴对应的最大旋转角度<sup>[6]</sup>。  $\text{PerlinNoise}_x(t)$ ,  $\text{PerlinNoise}_y(t)$  和  $\text{PerlinNoise}_z(t)$  是 Perlin 噪音函数在  $t$  时刻产生的噪声值,  $\lambda$  是一个常数,可以通过模拟效果进行确定。图 8 是一片树叶绕三个轴旋转的效果图,图 8(a)是树叶绕  $X$  轴旋转效果,图 8(b)是树叶绕  $Y$  轴旋转效果,图 8(c)是树叶绕  $Z$  轴旋转效果。



(a)树叶绕X轴旋转 (b)树叶绕Y轴旋转 (c)树叶绕Z轴旋转  
图8 树叶摇曳效果

#### 4 场景建模

目前,地形生成与仿真技术大致可归纳为三类:基于真实地形数据的地形生成及实时显示技术;基于分形技术的地景仿真技术;基于数据拟合的地形仿真技术。

在分形地景建模方法中,中点位移法应用最为广泛,它的特点是简洁而快速。在中点位移法中,Diamond-square 是一种较为经典的方法。这种算法最初是由 Fourniew, Fussell 和 Carpenter 提出的。这种算法是从种子点组成的正方形开始,通过采用若干次随机中点位移方法,不断地细分,最后获得逼真的三维地形仿真图。

Diamond-Square 算法总体分为两步:

Diamond 步:在正方形中点生成一个随机,中点为两对角线交点,中点的值是平均四个顶点的值再加上一个随机量计算得到的。这样就得到了一个棱锥。当网格上分布

着多个正方形时有点像钻石。

Square 步:取相邻的四点的棱锥,在棱锥的中心生成一个随机值。平均顶点值加上与 Diamond 步相似的随机量,计算每条边中点值,这样又得到一个正方形<sup>[11]</sup>。

如图 9 是运用该 Diamond-Square 算法生成的地形形态。

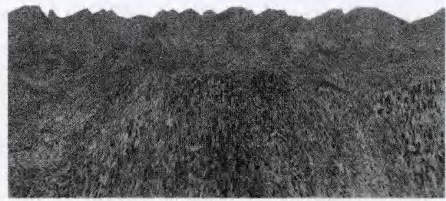


图9 Diamond-Square 地形

#### 5 实验结果

根据上述方法的描述,本文在 VC++ 6.0 平台上实现了三维树在风吹动下摇曳的方法。该方法在基于 Perlin 噪声值的风场模型中,动画的模拟速度为 61 帧/s。而且,三维树木模型逼真度较高。而文献[6]在基于  $1/f^\beta$  噪声值的风场模型中,动画的模拟速度为 24 帧/s。图 10 是三维树在不同时刻风力作用下的运动状态。图 10(a)为树木的原始状态,图 10(b)为树木在强风  $V_0 = 10 \text{ m/s}$  作用下的状态,图 10(c)为树木在微风  $V_0 = 3.5 \text{ m/s}$  作用下的状态。为了使模型场景更加逼真,加入雾效处理,随着视点的远近,树木形态清晰度会随着发生变化,并通过控制视点的旋转,在不同角度观察树木的摇曳效果。从图可知,该方法构造的三维树木模型具有较好的逼真度,而且树木摇曳的效果更具真实性。



(a)树木原始状态 (b)强风作用下的树木 (c)微风作用下的树木

图10 树木摇曳效果

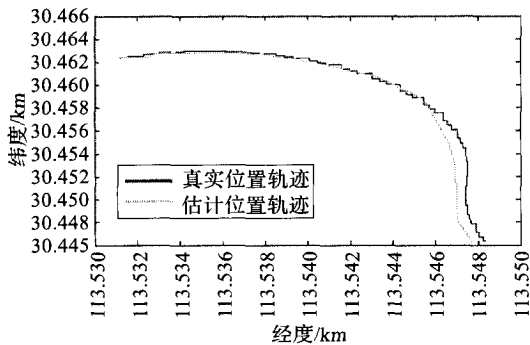
#### 6 结束语

本文在 Perlin 噪声函数产生的随机风场模型下,利用 IFS 绘制三维树木模型,根据材料力学知识,模拟树木的摇曳运动。该方法与文献[6]相比较,本文能逼真地模拟三维树木模型,并能快速地模拟树木摇曳的效果。而且,可以通过改变树木参数构造不同形态结构的模型,在不同风场强度作用下,得到树木摇曳的效果。算法能快速逼真地模拟树木摇曳,可以满足森林场景、计算机辅助园林和景观设计以及城市仿真系统的需求。今后将研究树叶和树枝之间遮挡以及碰撞检测,并在 GPU 上实现树木运动的并行技术,能够更快、更逼真地实时模拟树木的摇曳。

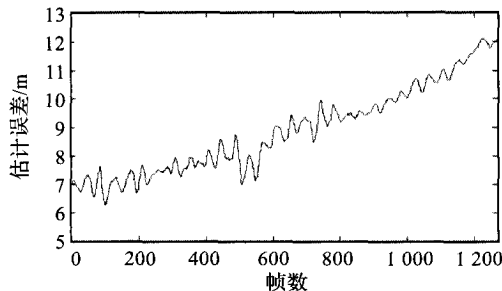
(下转 169 页)

导航提供了有效的定位方法。

图 11 显示了测试序列 II 的位置估计实验结果。和测试序列 I 不同的是, 位置估计得到的平均位置误差为 8 m, 那是由于测试序列 II 是河流、道路较多的区域, 且飞行时天气晴朗、无风。位置估计的最大误差分别是 12 m, 这表明在特征明显的区域, 估计误差会大大减小。测试序列 II 的实验同样证明了通过本文所提位置估计方法有效性, 可以预见, 在特征明显的区域本文的位置估计精度将接近 GPS, 如果预先设置地面控制点, 位置估计将更精确、更鲁棒。



(a) 位置估计轨迹



(b) 位置估计误差

图 11 测试序列 II 位置估计结果

## 5 总结

本文使用航空图像序列提出了一种基于 SURF 特征的位置估计算法, 计算出实时图与基准图的 SURF 特征描述子之后, 用 Hessian 矩阵迹完成特征点的匹配。利用

RANSAC 的局部参数估计剔除出格点, 实现航空图像序列的精确位置估计。实验采用航空图像序列实测数据, 从平均误差和最大误差出发, 验证了本文算法可行与有效。下一步将对算法深入优化设计, 着重在实时性方面提高性能, 并计划将优化后的算法在 DSP 处理器上应用。

## 参考文献:

- [1] Brown M, Lowe D G. Automatic panoramic image stitching using invariant features[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(1): 59-73.
- [2] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1615-1630.
- [3] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [4] Mikolajczyk K, Tuytelaars T, Schmid C, et al. A comparison of affine region detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 65(1): 43-72.
- [5] Chandrasekhar V, Makar M, Takacs G, et al. Survey of SIFT compression schemes[C]// Proceedings of International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Istanbul, Turkey, 2010.
- [6] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-Up Robust Features (SURF)[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 7(3): 346-359.
- [7] Oconaire C, Blighe M, Oconno N. SenseCam image localisation using hierarchical SURF trees[C]// MMM'09, 2009: 15-26.
- [8] Gossow D, Pellenz J, Paulus D. Danger sign detection using color histograms and SURF matching[C]// IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics. Tohoku, Japanese: IEEE, 2008, 3(1): 13-18.
- [9] Zhang Zhanyu, Huang Yalou, Li Chao, et al. Monocular vision simultaneous localization and mapping using SURF[C]// World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, 2008, 5(11): 1651-1656.

(上接 163 页)

## 参考文献:

- [1] Shinya M, Fournier A. Stochastic motion-motion under the influence of wind[J]. Computer Graphics Forum, 1992, 11(3): 119-128.
- [2] Stam J. Stochastic dynamics simulating the effects of turbulence on flexible structures[J]. Computer Graphics, 1997, 16(3): 159-164.
- [3] Wejchert J, Haumann D. Animation aerodynamics[J]. Computer Graphics, 1991, 25(4): 19-22.
- [4] 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): 1185-1187.
- [5] 胡潇毅, 李华锋, 郭乙木, 等. 基于动力学有限元的树在风中摇曳动画[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(9): 1166-1169.
- [6] Li Zhan-li, Chiba N. Research on real-time animation of trees swaying in wind[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(8): 2085-2090.
- [7] 陈守吉, 张立明. 分形与图像压缩[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1998: 9-20.
- [8] 林艳梅. 三维树木形态结构及风吹效果虚拟技术研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [9] Perlin K. An image synthesizer[C]// Proceedings of SIGGRAPH'85. San Francisco, California, USA: ACM Press, 1985: 287-296.
- [10] 于洪海. L 系统分形树的真实感构造与树在风中的摇曳[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.
- [11] 齐敏, 郝重阳, 佟明安. 三维地形生成及实时显示技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(4): 269-275.