

虚拟树木风中运动可视化模拟*

唐丽玉 邹杰 林定 陈崇成

(福州大学福建省空间信息工程研究中心, 福州 350002)

【摘要】 根据树木在风中运动仿真的思路和方法,引入随机因子的过程函数模拟风场脉动特性;采用悬臂梁作为树枝材料力学分析的基本物理单元,并根据风工程理论和梁单元理论计算枝段在风力下的变形;采用力传递和运动合成求解整棵树木的枝干在风中的运动。最后设计了风对树木影响模拟软件功能模块,并将其集成于参数化单树建模原型系统。以毛竹为例,模拟了在不同风速条件下不同弹性模量的树木在风中形态变形,仿真结果从视觉效果上符合现实情况。

关键词: 虚拟植物 风动 三维模型 模拟

中图分类号: TP391.9; S718.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)01-0165-05

Visual Simulating Virtual Tree Movement in Wind

Tang Liyu Zou Jie Lin Ding Chen Chongcheng

(Spatial Information Research Center of Fujian, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract

In order to better understand the wind affects the tree architecture deformation intuitively, an efficient modeling strategy of virtual tree swaying in wind was proposed based on the analysis of the existing thought and methods to simulate the tree movement in wind. The method used procedure function with stochastic factor to simulate the wind field; and the cantilever beam was used to simulate a segment of a stem as the mechanical analysis unit, the deformation of the beam in wind force based on the theory of wind projection and beam element was computed. Then the force transmission and movement compounding method was used to solve the whole tree movement in wind. Furthermore, some software function modules, which integrated with the parametric tree modeling prototype system, were developed. Taking *Phyllostachys pubescens* as an example, the tree swaying was simulated in different wind velocities and with different modulus of elasticity. The result is in accordance with the practical visual effects.

Key words Virtual plant, Movement in wind, 3-D model, Simulation

引言

风对植物的生长、形态以及森林生态有重要的影响,特别是大风对植物的破坏作用^[1~2]。树木抗折断的能力与胸径、树高呈正相关外,而断裂系数因树种、木材质地、弹性系统的不同而不同^[3~4]。随着计算机技术的不断发展,人们已把计算机模拟和数学模拟相结合,来评估树木、森林抗风能力,比较有影响力的模型有 HWIND、GALES 和 FOREOLE^[5]。

目前在林学和生态学等领域,风对树木影响模拟的结果较少用逼真可视化方式表达。而虚拟植物是农业信息化研究的核心问题,已成为该领域研究热点,同时在理论和技术上已取得一定的成果^[6~9],此外,目前所建立的模型大多缺乏与环境因子的动态交互,要想使虚拟植物在现实应用中发挥充分的作用,需要在虚拟冠层中寻找树与环境因子之间机理性的交互作用。为此,本文在交互式参数化建模工具^[10~13]基础上,采用过程化的函数模拟随机风场,

收稿日期: 2011-03-29 修回日期: 2011-05-03

* 国家自然科学基金资助项目(30972299、41001203)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)前期研究专项资助项目(2009CB426310)、欧盟第七框架资助项目(FP7-2009-People-IRSES, 247608)和福建省自然科学基金资助项目(2010J01203)

作者简介: 唐丽玉,副研究员,主要从事地学可视化与虚拟地理环境、虚拟植物研究,E-mail: tangly@fzu.edu.cn

研究树木在风环境中运动规律的模拟,旨在丰富场景的同时为今后分析和评估树木在风害(如台风等)中的受损情况做准备,为理解风与林木的空气动力学关系、森林风害的评估提供新的方法。

1 树木的几何形态建模

将树木抽象为3个主要组成构件:主干、枝条和树叶,其中主干和枝条统称为枝干。考虑到树木普遍存在自相似性和分层特点,枝条又可以分为多个层次(主干可以视为第0层),这种分层表达的思路便于数据结构的组织和模型的迭代生成。各枝干用形态结构特征参数来调节其几何外形^[10~13]。由于树叶数目繁多,为简化现有条件下的模型表达,采用Billboard技术构建叶簇模型,再映射相应的纹理形成模型,保证真实感的同时也减小了数据量。枝干空间拓扑关系如图1所示。

如图1a所示,每根枝干由若干首尾相连的枝段(segment)组成,每根枝段由一个广义的圆台来表达,相连枝段之间的中轴线形成一定的角度关系,从而产生枝条的弯曲生长。每个枝段的主要描述参数有长度,首尾两端的半径等。图1b表现了相连父-子枝条之间的拓扑关系,定义拓扑关系的特征参数有相对生长位置、起始生长角。

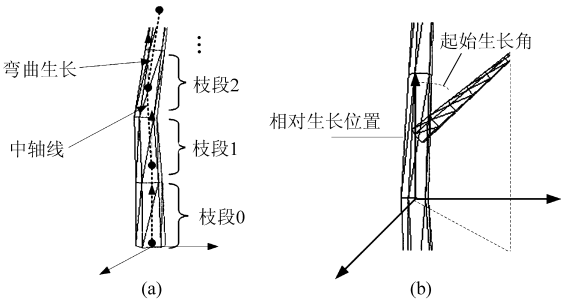


图1 枝干的局部几何模型
Fig.1 Geometrical model of part of stem
(a) 单根枝干的几何结构 (b) 父-子枝条的拓扑关系

2 风场建模

树在风中的运动是一个典型的流-固耦合问题,风的流体性运动对树产生作用力,引起枝条和树叶的运动,同时树的运动又会改变局部风场的速度分布,这是一个很复杂问题。本文只模拟近地风,风中湍流由3个相互垂直的分量(u_1, u_2, u_3)表示,再加上时间分量(t),水平风速可以模型化为一个四维随机场^[14~15]。

$$U(u_1, u_2, u_3; t) = U_a(u_1, u_2, u_3; t) + U_p(u_1, u_2, u_3; t)$$

(1)

式中 U ——瞬时风速

U_a ——平均风速,衡量风速的整体水平,大小稳定

U_p ——湍流分量,随时间随机变化

为简化模拟,假设在局部范围内风场是均匀分布的,因此风速只与时间相关。风场建模的关键是对脉动风的模拟。沿风向的水平湍流分量可以视为一个零均值的平稳随机过程^[14]。

采用一个简单随机样本函数作为脉动风的随机因子

$$X(t) = A \cos(\omega t + \phi)$$

(2)

振幅 A 和频率 ω 为常数,相位角 ϕ 为 $[0, 2\pi)$ 内均匀分布的独立随机相位角。

设脉动风随时间的变化为

$$U_p(t) = \sigma U_a \cos(\omega t + \text{RAND}[0, 2\pi))$$

(3)

式中 σ ——脉动强度 ω ——脉动频率

$\text{RAND}[0, 2\pi)$ 表示取 $[0, 2\pi)$ 间的随机数,该随机数由计算机的随机数发生器产生。结合式(1),瞬时风速可表达为

$$U(t) = U_a + \sigma U_a \cos(\omega t + \text{RAND}[0, 2\pi))$$

(4)

3 树木运动的物理建模

3.1 树枝的材料力学模型

目前,已有很多学者研究了树在风中运动的动力学行为,发展了不同的模型,较常见的有弹簧模型^[15~16]、梁单元模型^[17]。本文将树木几何形态建模中树木的一枝段作为基本的受力分析单元。对每一枝段而言,其长度往往远大于半径,并且具有一定的刚度,根据材料力学的原理,这种结构可以采用悬臂梁来模拟,如图2所示。

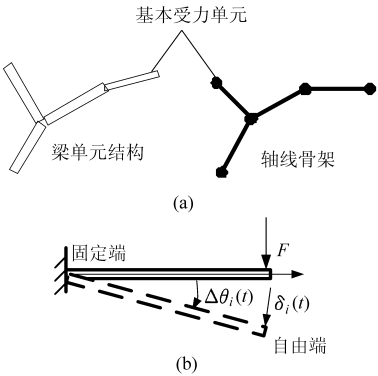


图2 枝条受力分析的梁单元模型
Fig.2 Cantilever beam unit model of stems
force added analysis
(a) 枝条的受力分析单元 (b) 悬臂梁模型

3.2 受力分析与计算

考察一根枝条中作为受力分析单元的第*i*枝段在*t*时刻的受力情况:外力荷载为风力,各首尾相连枝段构成了连续的枝条整体,所以用力传递的概念

近似恢复枝条的整体力学性质。考虑各枝段之间的力传递关系,存在

$$\mathbf{F}^i(t) = \mathbf{F}_w^i(t) + \mathbf{F}_T^i(t) \quad (5)$$

第 i 枝段所受力 $\mathbf{F}^i(t)$ 是风力 $\mathbf{F}_w^i(t)$ 与附属枝条传递过来的力 $\mathbf{F}_T^i(t)$ 的合力。

风在运动过程中受到结构体阻碍时,将会产生顺向风力 $\mathbf{F}_D$ 、横向风力 $\mathbf{F}_L$ 、轴向力 $\mathbf{F}_Z$ 和扭转风力矩 $M^{[14]}$ 。由于枝条的抗拉伸和抗扭转模量远大于抗弯曲模量,扭转和拉伸形变比较微弱,所以在模拟中,只考虑横向风力和顺向风力。

$$\begin{cases} \mathbf{F}_D = \frac{1}{2} \mu_d \rho_a U^2(t) B \\ \mathbf{F}_L = \frac{1}{2} \mu_l \rho_a U^2(t) B \end{cases} \quad (6)$$

式中 μ_d ——阻力系数
 μ_l ——横向系数
 ρ_a ——空气密度
 B ——迎风面积

第 i 节在 t 时刻所受风力 $\mathbf{F}_w^i(t)$ 的公式为

$$\mathbf{F}_w^i(t) = \mathbf{F}_D^i(t) + \mathbf{F}_L^i(t) \quad (7)$$

以上分析了单个枝段所受的风力,实际情况中,上枝段的弯曲变形必定会引起与其相连的下枝段的变形,这是由梁的内力造成的,但枝条分枝段表达的思想破坏了其内力的连续性,没有考虑枝段与枝段之间的影响。为了弥补分段表达所带来的材料力学分析上的弊端,假设在相连的节之间存在风力传递,传递的方向是从枝条的末端到根部(图 3)。枝条内部力的传递有以下 3 种情形:

(1) 没长子枝的力传递:枝段不含有下级枝条,计算该枝段的传递力时只考虑从上枝段传递下来的力。如图 3 中,第 $i-1$ 、 $i+1$ 节都属于此类枝段。

(2) 带子枝条的力传递:该枝段是下级枝条的着生节,计算该枝段的传递力时,除了考虑从上面传递下来的力外,还需要考虑由子枝条传递的力。如图 3 中,第 i 节枝段就属于此类型的枝段。

(3) 不计力传递的枝段:末梢枝段,没有传递来的力,如图 3 中第 $i+2$ 节枝段。

第 i 枝段所受的传递力由式(5)和式(7)推得

$$\mathbf{F}_T^i(t) = \mathbf{F}^{i+1}(t) = \mathbf{F}_w^{i+1}(t) + \mathbf{F}_T^{i+1}(t) = \sum_{j=i}^n \mathbf{F}_w^{j+1}(t) + \sum_{k=0}^m \mathbf{F}_c^k(t) \quad (8)$$

式中 n ——枝条总的枝段数

m ——从第 i 节到第 n 节枝段所有节包含的子枝条的数量

$\mathbf{F}_c^k(t)$ ——第 k 个子枝条传递给相应节的力

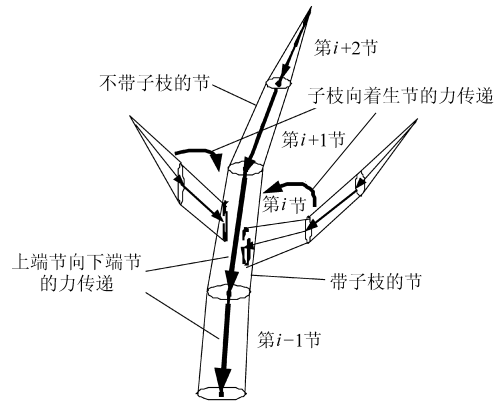


图 3 力的传递示意图

Fig. 3 Transmission of force added to branches

3.3 形变计算与运动合成

上述枝条材料力学模型的假设,可以通过计算悬臂梁自由端的位移来近似获得每个梁单元的变形。对于均匀分布在枝段上的风荷载,其挠度方程 $y^i(x)$ 、最大挠度 $y_{\max}$ 、自由端部转角 θ_{fp} 分别为

$$y^i(x) = \frac{q_i x^2}{24 E_i I_i} (x^2 + 6 l_i^2 - 4 l_i x) \quad (9)$$

$$y_{\max} = \frac{q_i l_i^4}{8 E_i I_i} \quad (10)$$

$$\theta_{fp} = \frac{q_i l_i^3}{6 E_i I_i} \quad (11)$$

$$\text{其中 } q_i = \frac{\mathbf{F}^i(t)}{l_i} \quad (12)$$

式中 E_i ——该节的弹性模量

I_i ——惯性矩

l_i ——该节的长度

q_i ——均布荷载集度,指单位长度上荷载

前一节的自由端为后一节的固定端,故还存在着位移的传递现象。图 4 表明了位移的传递现象,由图 4 可知,若不考虑位移传递,则枝条运动时会出现“脱节”现象。为了避免此现象发生,下端枝条的位移都要累加到上端枝条的位移,形成全局坐标下的位移。

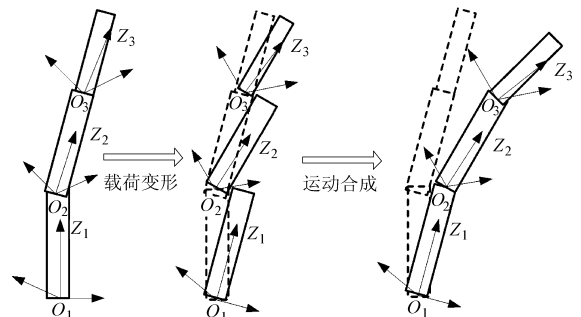


图 4 运动合成示意图

Fig. 4 Sketch of movement synthesis

3.4 简化的树叶运动模拟

考虑到实时绘制的要求,假设树叶的运动由悬挂点随树枝的移动、绕悬挂点的转动以及周期性振动3个运动分量组成,如图5所示。

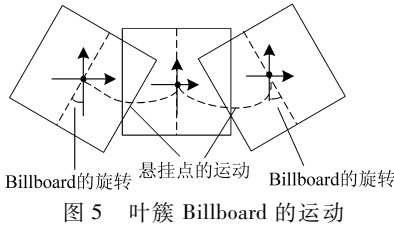


图5 叶簇 Billboard 的运动

Fig. 5 Sketch of the movement of a cluster of leaves with Billboard

Billboard 的旋转角度和方向与风速相关,振动的周期与脉动风相关。

假设在 t 时刻绕悬挂点的转动角度为 $\Delta\phi$,绕 Z 轴的转动角度(幅度)为 $\Delta\psi$,有

$$\begin{cases} \Delta\phi = \lambda_1 U(t) \\ \Delta\psi = \lambda_2 U(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中 λ_1 、 λ_2 分别是绕悬挂点的转动角度和绕 Z 轴的转动角度与风速的比例关系。本文模拟风动过程中,这2个参数没有实验数据,则通过交互式调整,至基本满足视觉效果为止。

4 建模实现与模拟示例

根据前文所述的模型,枝条受力分析的基本单元即枝段,与枝条三维建模的几何单元一致,这是风场模型、树木运动物理模型与树木形态结构模型耦合的基础。设计了相应的软件功能模块,包括:风场参数模块、材料特性参数控制模块、受力与形变计算模块,并在 Visual Studio 2005 环境下,使用 VC++ 语言,OpenGL 图形标准实现了软件功能模块与参数化单树建模原型系统 ParaTree^[13] 的紧密集成。风场模型与树木三维模型耦合的逻辑过程为:首先用风场模型和树木的材料特性计算每节枝段风荷载,并根据力的传递假设原理,计算合成后的每节枝段受力,然后根据形变计算公式计算每节的变形量,从而改变枝段三维模型的几何参数,最后用 ParaTree 的绘制引擎进行渲染。

以毛竹为例,根据野外调查测量获取的毛竹形态特征参数,利用 ParaTree 建立毛竹的三维模型。选取风速条件和毛竹的弹性模量特性作为考虑因素,给出模拟示范,模拟结果图均为某个时刻的静态图。

毛竹弹性模量一般在 8 000 ~ 14 000 MPa^[18]。如图6所示,模拟示例1、2为同一棵毛竹,形态特征参数一致,且各部分弹性模量值均为10 000 MPa。模

拟示例1的风速为10 m/s,模拟示例2的风速为15 m/s,风场的其他各参数相同。

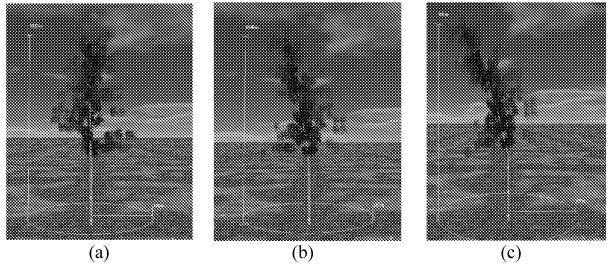


图6 不同风速条件下的毛竹模拟示例

Fig. 6 Screenshots of bamboo bending versus different wind velocity effects

(a) 模拟前的毛竹静态模型 (b) 模拟示例1 (c) 模拟示例2

如图7所示,模拟示例3、4也为同一棵毛竹,风场各参数相同(风速为12 m/s)。模拟示例3的主干弹性模量整体值为10 000 MPa,而模拟示例4的主干弹性模量整体值为8 000 MPa。

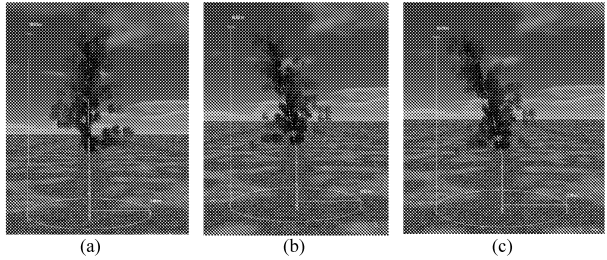


图7 不同弹性模量参数下的毛竹模拟示例

Fig. 7 Screenshots of bamboo bending versus different modulus of elasticity

(a) 模拟前的毛竹静态模型 (b) 模拟示例3 (c) 模拟示例4

图6、7中白色竖线为树高的标高,树梢越靠近竖线,弯曲幅度越大。通过模拟示例1、2的对比可知,在其他同等条件下,风速越大,树木在风中的形变幅度也越大;从模拟示例3、4的对比表明,弹性模量越大,树木的抗弯效果也越好。模拟结果符合树木在风中运动的经验规律,证明了模拟模型的有效性。

5 结束语

采用了一种简化的基于过程函数的风场模拟模型,同时使用悬臂梁作为树木枝段受力分析的物理原型单元,计算了其在风力下的运动位移,进而使用力的传递和运动合成方案求解整棵树木在风中的运动,实现了虚拟树木在风场中的运动模拟。以毛竹为例,模拟了不同风速条件和毛竹的弹性模量对毛竹在风中运动的影响,其中毛竹的弯曲变形幅度基本能反映现实风吹树动的情况,可用于辅助理解一定风场条件对不同树木材料特性的影响机理。

参 考 文 献

- 1 Peltola H, Ikonen V P, Gregow H, et al. Impacts of climate change on timber production and regional risks of wind-induced damage to forests in Finland [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(5):833 ~ 845.
- 2 Zhu Jiaojun, Liu Zugen, Li Xiufen, et al. Review: effects of wind on trees [J]. *Journal of Forestry Research*, 2004, 15(2):153 ~ 160.
- 3 Ancelin P, Courbaud B, Fourcaud T. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands [J]. *Forest Ecology Management*, 2004, 203(1 ~ 3): 101 ~ 121.
- 4 Sellier D, Fourcaud T. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds [J]. *American Journal of Botany*, 2009, 96(5): 885 ~ 896.
- 5 Gardiner B, Peltola H, Kellomäki S. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees [J]. *Ecological Modeling*, 2000, 129(1):1 ~ 23.
- 6 Hu B G, De Reffye P, Zhao X, et al. Green lab: towards a new methodology of plant structural-functional model-structural aspect [C] // Hu B G, Jaeger M. *Plant growth modeling and applications*, International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Their Applications, LIAMA, Beijing: Tsinghua University Press, 2003:21 ~ 35.
- 7 Prusinkiewicz P. Modeling plant growth and development [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2004, 7(1):79 ~ 83.
- 8 Lopez G, Favreau R R, Smith C, et al. Integrating simulation of architectural development and source-sink behavior of peach trees by incorporating Markov chains and physiological organ function sub-models into L-PEACH [J]. *Functional Plant Biology*, 2008, 35(9 ~ 10):761 ~ 771.
- 9 唐卫东,朱平,郭晨,等. 温室植物生长数字化模型构建技术[J]. *农业机械学报*, 2010,41(1):159 ~ 162,166.
Tang Weidong, Zhu Ping, Guo Chen, et al. Digital construction of plant growth model in greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(1):159 ~ 162,166. (in Chinese)
- 10 陈崇成,唐丽玉,权兵,等. 基于信息管理的一种虚拟森林景观构建及应用探讨[J]. *应用生态学报*,2005,16(11): 2 047 ~ 2 052.
Chen Chongcheng, Tang Liyu, Quan Bing, et al. Construction of information management-based virtual forest landscape and its application [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2 047 ~ 2 052. (in Chinese)
- 11 唐丽玉,陈崇成,王钦敏,等. 马尾松的形态结构分析与三维可视化[J]. *系统仿真学报*, 2006,18(增刊): 315 ~ 318.
Tang Liyu, Chen Chongcheng, Wang Qinmin, et al. *Pinus massoniana* morphological architecture analysis and 3D visualization[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(Supp.):315 ~ 318. (in Chinese)
- 12 Lin Ding, Chen Chongcheng, Tang Liyu, et al. Geometrical shapes and swaying movements of realistic tree: design and implementation [C]//The Association for Computing Machinery, Proc. of the 8th ACM SIGGRAPH, International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry. Yokohama, Tokyo, Japan. New York: ACM 295 ~ 302.
- 13 许文强. 简化条件下树木在风中运动和向光性生长的三维模拟[D]. 福州: 福州大学, 2010.
Xu Wenqiang. 3D simulation on tree movement in wind and phototropic growth under simplified conditions [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010. (in Chinese)
- 14 朱位秋. 随机振动[M]. 北京: 科学出版社,1998:81 ~ 82.
- 15 宋成芳,谈奇峰,张龙,等. 风场作用下的动态森林场景的实时仿真[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(3):323 ~ 328.
Song Chengfang, Tan Qifeng, Zhang Long, et al. Real-time simulation of dynamic forest scene in the wind [J]. *Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(3): 323 ~ 328. (in Chinese)
- 16 Baker C J. The development of a theoretical model for the wind throw of plants [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1995, 175(3): 355 ~ 372.
- 17 Saunderson S E T, England A H, Baker C J. A dynamic model of the behavior of Sitka spruce in high winds [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1999, 200(3): 249 ~ 259.
- 18 程秀才,张晓冬,张齐生,等. 四大竹乡产毛竹弯曲力学性能的比较研究[J]. *竹子研究汇刊*,2009,28(2): 34 ~ 39.
Cheng Xiucui, Zhang Xiaodong, Zhang Qisheng, et al. A comparative study on binding performance of Moso bamboo from four hometowns of bamboo [J]. *Journal of Bamboo Research*, 2009, 28(2): 34 ~ 39. (in Chinese)