

一种基于直径变化率的树木模拟方法

刘小丹 董 格 孙红岩

(辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连 116081)

摘 要 给出了一种基于直径变化率的树木模拟方法。以 L 系统为基础,将局部枝干直径变化率融入趋向性力学模型,运用参数控制树枝的局部形状及空间位置,不同的树木形态取决于力的参数及直径变化率之间的关系配置。该方法可更好地控制树木生长的最终形态,生成的图形较生动逼真。

关键词 树木模拟, L 系统, 直径变化率, 趋向性力学

中图法分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Tree Simulation Method Based on Diameter Variety Rate

LIU Xiao-dan DONG Ge SUN Hong-yan

(Department of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116081, China)

Abstract Proposed a trees simulation method with diameter variety rate. Based on L system, incorporated diameter variety rate of tree's branches and trunks into the tropism mechanics model, applied parameters to control branch's part shape and space location. The different species depend on the relation between the parameter and diameter variety rate. The method can control the tree's final shape conveniently, and generate the graphs which are more idyllic.

Keywords Tree simulation, L-system, Diameter variety rate, Tropism

1 引言

虚拟植物就是通过多种技术建立植物生长的数学模型,进而在计算机上形成逼真的可视化三维模型。作为虚拟植物的重要组成部分,树木的模拟得到了广泛的重视。随着人们对虚拟现实逼真性要求的不断提高,树的模拟已广泛应用于动画工业的三维场景中,因此获得较真实的树木的形态已成为图形学研究的重要目标。自然界中树木的形态不同,一个重要形态特征就是树枝的弯曲变形。我们通过改进力学模型,获得了更逼真的树木形态。

运用基于直径变化率的树木建模方法,一定程度上提高了树木建模的逼真性和灵活性。分析树木自然结构,对趋向性力学模型进行了改进,根据不同环境中力的参数表达式分别得出不同枝干形态,结合 L 系统数学方法和基于直径变化率的趋向性力学方法对树枝弯曲角度求解,得到树木枝干的生长位置,实现了树木在自然环境中的形态结构模拟。实验结果表明,该方法改善了树木模型的模拟效果。

2 相关研究工作

J. C. Hart 等人通过计算树木分枝的质量及估算光合作用来仿效树木的平衡机制^[1]。2005 年, Lam Zhuming 等人基于树木的内部特性和外部环境条件,运用 L 系统模拟树木^[2]。2006 年, M. Renton 等人将马尔可夫链模型与 L 系统相结合,

模拟苹果树的结构形态^[3]。Fabricio 等人将素描方法与参数 L 系统相结合,实现作物结构的模拟^[4]。L 系统作为模拟树木的常规语言,得到了广泛应用,其为模拟自然环境中树木的生长形态提供了一种有效的方式。为了获得更真实的树木形状,从力学角度模拟环境因素对树木形态的影响得到深入研究。Jirasek 提出反映重力和趋向性力的植物生长轴的生物学模型,用于模拟植物枝干结构。2005 年, Julia 在 Jirasek 生物学模型的基础上进行了扩展,模拟了树木在重力和光照影响下真实的树木形态^[5]。

趋向性力学模型作为生物学模型的一种,用于模拟树木枝条的形态结构的存在优势,它从植物学和力学角度进行树木模拟,但作为以模拟树木结构形态真实性为目的的建模方法,趋向性力学模型仍存在不足,即模拟树木形态时针对不同结构的树枝在等力作用下,无法表现不同形状。我们以 L 系统为基础,加入直径变化率,改进原有生物学模型,改变枝条的弯曲度和生长方向,最终得到一个更接近自然景物中的树木形态,提高了 L 系统模拟树木的灵活性和逼真性。

3 基于直径变化率的趋向性力学模型

3.1 趋向性力学模型

树枝呈圆柱状,树枝的形态受其内部因素和自然环境的影响,生长方向不断改变,最终形成形态各异的树木。例如,由于外界环境的影响,使树枝的生长向某个方向偏重;建筑或

到稿日期:2010-01-26 返修日期:2010-04-23 本文受国家自然科学基金项目(60873110),辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(2008 11833)资助。

刘小丹(1957—),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为图像处理、计算机图形学、数字化印刷, E-mail: xdlu@lnnu.edu.cn;董 格(1985—),女,硕士生,主要研究方向为计算机图形学;孙红岩(1968—),女,副教授,主要研究方向为计算机图形学。

风使整棵树或树的部分枝干朝某个固定方向弯曲,即树的生长朝某个方向汇集。单纯的L系统和概率选择实现类似的构造是很困难的^[9],因此引入了趋向性力学模型,通过控制力可直观地控制树木形态。

一般地,力的作用能影响整个树枝结构,每个枝干都会在其周围环境的作用下向最适应的方向生长,即枝干和每一个轴都会寻求同一个方向生长。设力 F 作用于枝干 L ,枝干的初始生长方向为向性运动方向,力 F 与枝干的夹角是 θ_0 。在力的作用下,枝条生长方向改变,枝干发生弯曲变形,即发生角度的偏转,偏转后, F 与枝干的夹角为 θ' ,偏转角度是 θ_1 ,则力矩 $\Gamma_1 = F L \sin\theta'$,同时枝干绕其端点旋转产生一转矩 $\Gamma_2 = -\kappa\theta_1$ 。当其处于平衡状态时,力矩之和是0,则 θ_0 与 θ_1 的关系可通过式(1)得到, θ_1 与 F 相关。树枝在力的作用下,沿着力的方向生长,假设树生长过程中枝条受的力包括光照产生的力和风力,有风或无风,光照强或弱,这些都会影响力的变化,因此

$$\theta_1 = \theta_0 - 2\arctan\left(\left(\tan\frac{\theta_0}{2}\right)e^{-\frac{LF}{\kappa}}\right) \quad (1)$$

为了表现树木生长过程中力的变化性,绘制更真实的树木,我们使用参数控制力,如式(2)所示。其中 $F(x, y, z)$ 表示力的方向,包括3个分量 x, y, z , pt 表示树生长层数, f_1, f_2, f_3 表示函数。

$$F(x, y, z) = F(f_1(pt), f_2(pt), f_3(pt)) \quad (2)$$

3.2 直径变化率对 θ_1 的影响

趋向性力学模型能较好地模拟树枝弯曲的效果,但用此模型模拟树木形状仍显粗糙。如图1所示的两种不同直径变化率的枝干, S 表示枝干原生长方向, S' 表示在力 F 作用下枝干的生长方向, θ 是枝干偏转角度。当受同样大小力的作用时,根据趋向性力学模型,两种枝干发生偏转的角度 θ 是相同的,这与自然规律不符。我们提出了基于直径变化率的树木模拟方法,即在同等力作用下,不同的枝干结构得到力的作用结果是不同的。基于直径变化率的趋向性力学模型中,偏转角度如式(3)所示。其中 $f(i)$ 表示为式(4), R_i 表示当前层枝干的直径, R_{i-1} 表示它的前一层枝干的直径, i 表示当前枝干的层数。顶层枝干的生长方向不仅受外力的作用,依据力的传递性,顶层枝干也受前 m 层枝干的力作用, m 为影响层数且 $m \neq 0$ 。 $l(i)$ 表示枝干的长度,角度 α 控制枝干的形状,因此引入 $l(i)/R_{i-1}-R_i$ 。图1中右边枝干直径缩减率 $\gamma=1$,这种绝对情况不作考虑。理论上 γ 的取值范围是 $\gamma \in (0, 1)$ 。

$$\theta_1 = f(i) \cdot \left(\theta_0 - 2\arctan\left(\left(\tan\frac{\theta_0}{2}\right)e^{-\frac{LF}{\kappa}}\right)\right) \quad (3)$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos\varphi + (1 - \cos\varphi)r_x^2 & (1 - \cos\varphi)r_x r_y - r_z \sin\varphi & (1 - \cos\varphi)r_x r_z + r_y \sin\varphi & 0 \\ (1 - \cos\varphi)r_x r_y + r_z \sin\varphi & \cos\varphi + (1 - \cos\varphi)r_y^2 & (1 - \cos\varphi)r_y r_z - r_x \sin\varphi & 0 \\ (1 - \cos\varphi)r_x r_z - r_y \sin\varphi & (1 - \cos\varphi)r_y r_z + r_x \sin\varphi & \cos\varphi + (1 - \cos\varphi)r_z^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

计算偏转的四元组表示为 $NewQuater(r, \varphi)$:

$$DrawQuater = DrawQuater \times NewQuater$$

r 表示旋转轴, φ 表示是旋转角度。 r 由式(6)计算, F 表示枝干所受力的合力, L_B 表示枝干向量。

$$r = \frac{L_B \times F}{|L_B \times F|} \quad (6)$$

则分枝端点坐标由式(7)计算, $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$ 表示上一层枝干的端点坐标, Dr 表示 $DrawQuater$ 中控制竖直方向上的一组向量, $l(i)$ 表示枝干的长度。

$$f(i) = \frac{1}{\pi} \sum_{N=i-m}^i \arctan \frac{l(N)}{R_{N-1} - R_N} \left(1 - \frac{1}{N-i+m+1}\right) \quad (4)$$

图2(a)是融入趋向性力学模型的生成树,直径缩减率 $\gamma=0.73$ 。图2(b)是基于直径变化率的树木模拟方法生成的树结构,直径缩减率 $\gamma=0.73$ 。图2(c)是直径缩减率 $\gamma=0.66$ 时融入趋向性力学模型的生成树。图2(d)是基于直径变化率的树木模拟方法生成的树结构,直径缩减率 $\gamma=0.66$ 。从图2得出,融入趋向性力学模型模拟的树木在直径缩减率改变的情况下,融入趋向性力学模型模拟的树木弯曲形状不发生变化,而我们提出的基于直径变化率的模拟方法,改善了这种现象,使树木模拟更逼真。

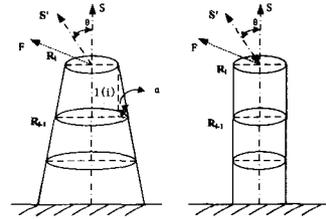


图1 直径变化率不同的枝干

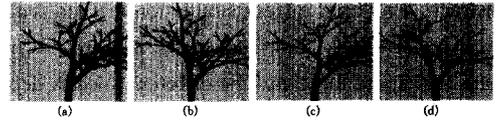


图2 不同直径缩减率条件下的树木对比

3.3 实现算法

模拟树木首先要建立树木的拓扑结构,即各个基本组成部分之间的空间关系。L系统是树形态建模的常规方法,本文通过L系统建立树木基本的拓扑关系,如分枝策略、半径、长度、分叉角度等。模拟树枝在力作用下的扭曲与弯折,需要大量的旋转计算。为便于计算和绘制,在实现旋转过程中,采用四元组的形式,即定义一四元组,并初始化为单位矩阵。按照L系统中分枝生长方向定义的惯例,按“+,-”,“&”,“/,\”的顺序分别产生的偏转用四元组^[5]表示为 $DrawQuater(H, \pm angle)$; $DrawQuater(U, \pm angle)$; $DrawQuater(L, \pm angle)$ 。

近似地认为力 F 作用在每个枝干的顶端,每个枝干的顶端都有个局部参考坐标系,所以模拟枝条的弯曲可通过旋转局部参考坐标系来实现。枝干的端点在参考系的原点,当枝干发生偏转时,旋转并移动局部坐标系,旋转矩阵如式(5)所示。

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Dr_x \\ Dr_y \\ Dr_z \end{pmatrix} \cdot l(i) \quad (7)$$

在模拟树枝时,当枝干发生偏转 β 角度时,如图3中 S' 所示,虽发生偏转,但枝干模型没有弯曲,必须经过若干个枝段组合成枝条后才能得到弯曲的效果,对于长势均匀且整齐的树,这种方式可达到模拟效果。但模拟枝条生长变化大且弯曲程度高的树种较困难。而 S'' 更接近自然界枝干发生偏转

弯曲的形态,为达到这种效果,将作用于枝干的力细分到局部,即将长度为 L 的枝干平均分成 L/n 段,每段偏转角度是 $\delta = \beta'/n$,树枝终端半径变为 $R_{i-1} - (R_{i-1} - R_i)/n$,则用四元组表示为 $NewQuarter(r, \delta)$ 。

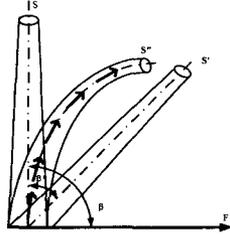


图3 树枝偏转弯曲效果

具体算法过程描述如下:

步骤1 用 L 系统建立树木基本拓扑结构,包括分枝角度、根部直径、直径缩减率以及生长周期;

步骤2 当枝干受力作用时,根据树结构关系计算枝干的位置 S_i 和 S_{i-1} 及枝干向量 $L_B = S_{i-1} - S_i$;

步骤3 用式(6)计算力作用时树枝偏转轴 r ;

步骤4 结合基于直径变化率的树木模拟方法,计算受力作用后树枝偏转的角度 β' ;

步骤5 将力作用缩小到局部微段,求解离散微段的偏转矩阵,输出枝干的位置并绘制;

步骤6 重复进行步骤2—步骤4,直到树木绘制完成。

3.4 实验结果分析

以 OpenGL 图形库和 VC++ 为实验平台,模拟树木的不同形态。自然界中树木因受周围环境影响,树枝生长方向不断改变,形成或直或弯的各种形态,最后生成形态各异的树木。加入了基于直径变化率的趋向性力学模型的树木建模,树木的拓扑结构不变,只改变其几何特性使其表现出不同的形态,因此在产生规则不变的前提下,运用本方法能模拟各种不同的效果。

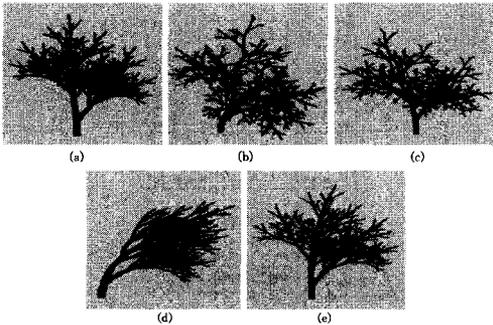


图4 直径缩减率 $\gamma = 0.85$ 时树木比较

图4是在直径缩减率 $\gamma = 0.85$ 时影响层数相同条件下生成的树木形状。图4(a)是 L 系统生成的树,图4(b),图4(c)是同等力的作用下生成的树木。其中图4(b)是融入趋向性力学模型生成的树木,树木各部分枝干弯曲角度相同,主干易产生过度弯曲现象;图4(c)是融入基于直径变化率力学模型生成的树木,将枝干的粗细变化加入其中,一定程度上改善主干易弯曲现象。图4(d)、图4(e)是持续风作用下,分别加入趋向性力学模型和基于直径变化率力学模型情况下生成的树木。由于没有考虑树枝的半径变化,在相同风力强度作用下,图4(d)枝干产生过度弯曲现象,而图4(e)在融入直径变化率力学模型的模拟方法后,一定程度上克服了枝干过度弯曲的现象。

力具有传递性。图5是在向上力的作用下,直径缩减率 $\gamma = 0.75$ 时,加入基于直径变化率的力学模型建模方法后,根据力影响层数不同生成的树。图5(a)是加入基于直径变化率的力学模型, $m = 1$ 时生成的树。图5(b)是加入基于直径变化率的力学模型, $m = 3$ 时生成的树。图5(c)是加入基于直径变化率的力学模型后, $m = 4$ 时生成的树。从图5中可得出,力的影响层数不同,生成的树木形态就不同。当影响层数达到一定值时,树木形状不发生变化。

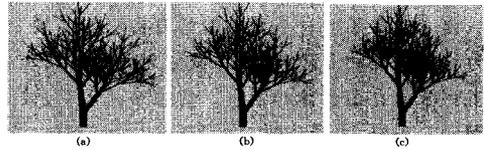


图5 力影响层数不同时的树木比较

结束语 本文提出的基于直径变化率的树木模拟方法,是树木结构自然规律表现同力学模型相结合的产物,在同等力的作用下,根据枝干的不同结构、力作用影响层数,给出不同偏转角度的求解公式。结合 L 系统,将基于直径变化率的模拟方法融入树木建模过程中,树木拓扑结构不变,通过修改力方向参数体现力的变化作用,最终实现不同形态的树木造型。实验证明,基于直径变化率的树木模拟方法可较好地刻画树木的局部细节及控制树木的整体形态。

用计算机模拟树木,以得自然逼真的效果,是人们追求的最终目标,树木建模相对于自然界的树木只是一种近似造型。我们从宏观力作用角度对树木建模进行研究,力作用的概念与真正树木所受自然环境中力的作用存在差异。将宏观力的作用细分成自然环境中存在的不同外力作用并组合,会获得更精确的局部枝干及整体树木模型,这还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Hart J C, Baker B, Michaelraj J. Structural simulation of tree growth and response[J]. The Visual Computer, 2003(19):151-163
- [2] Lam Zhuming, King S A, Ltd A P, et al. Simulating tree growth based on internal and environmental factors[J]. The Association for Computing Machinery, 2005;99-107
- [3] Renton M, Costes E, Guedon Y, et al. Integrating Markov Chain Models and L -systems to Simulate the Architectural Development of Apple Trees[C]// International Symposium on Computer Modeling in Fruit Research and Orchard, 2006
- [4] Anastacio F, Prusinkiewicz P, Souza M C. Sketch-based Parameterization of L -systems Using Illustration-inspired Construction Lines[C]// Proceedings of the EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling, 2008
- [5] Taylor-Hell J. Incorporating Biomechanics into Architectural Tree Models[C]// IEEE Computer Society, 2005;299-306
- [6] Runions A, Lane B, Prusinkiewicz P. Modeling Tree with a Space Colonization Algorithm[C]// the Eurographics Association, 2007;63-70
- [7] Allen M, Prusinkiewicz P, Theodorc. Using L -systems for Modeling the Architecture and Physiology of Growing Trees; The L -PEACH Model[C]// Proceedings of the 4th International Workshop on Functional-structural Plant Models, 2007;220-225
- [8] 曾兰玲,王琰. 基于分形的三维植物建模算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(1)
- [9] 范菁,董天阳,孙思昂. 支持森林场景动态生成的树木生长模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(11)