

基于参数曲线的虚拟植物形态控制方法

姜 林

(东华理工大学软件学院, 南昌 330013)

【摘要】 提出一种利用 L 系统建立植物拓扑结构原型,利用规则曲线、三次样条曲线、B 样条曲线对植物参数进行控制的虚拟植物形态控制方法,以达到直观虚拟植物控制形态的目的。重点分析了参数曲线与植物参数的关系,建立了植物长度类参数、角度类参数、颜色类参数与参数曲线的关联模型。试验表明,该方法简单直观,生成的图形真实感强,适用于虚拟植物的模拟研究。

关键词: 植物形态 虚拟植物 L 系统 参数曲线

中图分类号: TP391; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0177-05

Control Method of Virtual Plant Morphology Using Parameter Curve

Jiang Lin

(Software College, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract

A simple control method for virtual plant morphology was presented. The topology structure of plant was obtained from L-system. In L-system, the value of plant parameters was controlled by regular curve, cubic spline curve and B-spline curve. The plant morphology was varied by the modified parameters curve shape, the hypotaxis was determined by using correlation model with both plant parameters and curves. The results showed that the length parameters, angle, and color could be represented by B-spline curve, cubic spline curve and regular curve respectively, and the plant morphology was similar with curve shapes. The method is helpful in future plant modeling.

Key words Plant morphology, Virtual plant, L-system, Parameter curve

引言

植物形态的计算机模型分为形态发生模型和生长过程模型。植物的形态发生模型用于生成从视觉上近似于植物的计算机图形,注重视觉效果的逼真性^[1]。文献[2]利用 L 系统得到了各种植物的建模算法;文献[3]从空间繁殖的角度对分形树建模;文献[4~5]利用生长函数及环境因素进行虚拟植物的构建;文献[6]从植物学和物理学原理,引入双层结构模型表达叶子的力学结构,较好地模拟出了不同植物叶子的形状。上述各种建模算法多以植物与生长环境的联系或植物内部物理特性来模拟植物的各种形态结构,注重的是植物内部,也就是植物的微观层面,而对于植物外观形态结构,即宏观角度涉及

较少。本文从宏观角度出发,根据植物形态结构,采用 L 系统构造植物基本形态,通过参数曲线来控制植物局部和整体外观形态结构,拟解决对虚拟植物宏观造型的控制。文中只涉及植物的形态发生模型,不涉及生长过程模型。

1 植物形态结构

植物的形态结构主要由茎组成,茎的基本形态由顶芽、侧芽、节与节间组成,而茎上长有叶、花和果实,其中长有叶和芽的茎称为枝条,并把生叶和芽的位置叫节,两节之间的部分称为节间(图 1a)。虚拟植物形态结构根据其生长方式分为“顶端生长”和“居间生长”^[7],对应分枝方式为单轴分枝(图 1b)

和合轴分枝^[8](图 1c)。单轴分枝的形态结构顶芽生长优势明显,因而主轴占主导优势,形态结构较为单一;合轴分枝由于顶芽在生长一段时间后会死亡或生长缓慢,因而侧芽会充分生长,形成展开状态。虚拟植物的形态结构在宏观造型上主要取决于茎在各生长阶段的长度,偏转角度,叶子的长度、宽度,植物各器官的颜色变换等因素。

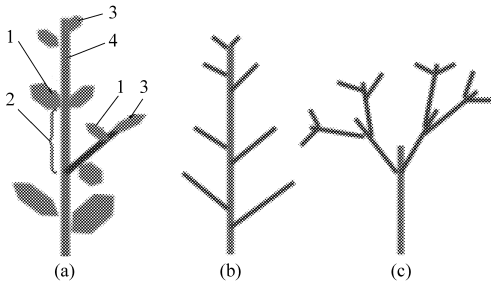


图 1 植物形态结构

Fig.1 Plant morphology

1. 侧芽 2. 节间 3. 顶芽 4. 节

2 虚拟植物的 L 系统

虚拟植物的形态结构模拟包括植物拓扑结构及各器官的绘制。各器官的绘制一般采用基本曲线、曲面进行各种变形得到^[2,4,6-7],而拓扑结构可通过 L 系统描述。L 系统是一种将形式语言应用到生物学形成的并行重写系统^[2]。它侧重于植物拓扑结构的知识表达,可使用抽象出来的规则描述植物形态及生长规律,具有定义简洁、结构化程度高、易于实现的特点,是描述生物体生长发育过程的数学理论^[1]。L 系统一般包括确定性 L 系统、参数 L 系统、Open-L 系统。

确定性 L 系统(DOL 系统)是一个三元组 $G = \langle V, \omega, P \rangle$,其中 V 是符号的有限集合,称为字母表; $\omega \in V^+$,称为公理; P 是形如 $\alpha\beta \rightarrow \beta$ 的一组规则组,又称为产生式,且 $P \subset V \times V^+$ 。其中 $a, b \in V \times g, \alpha \in V, \beta \in V^+$,对于当前串中如果满足形如 $\alpha\beta$ 的上下文环境,则 α 由 β 重写。参数 L 系统在 DOL 系统中引入形参集合 Σ 构造一个四元组 $G = \langle V, \Sigma, \omega, P \rangle$ 。Open-L 系统引入函数式 $E(x_1, x_2, \dots, x_n)$,建立植物与外部环境之间的信息交互,从而形成了一个六元组 $G = \langle V, \Sigma, \Pi, E, \omega, P \rangle$,其中 Π 为随机概念作用函数集合,表示各个产生式 P 被应用的概率,其函数值之和为 1; E 为信息传递函数。图 2 为例 1 在不同参数下生成的实例。

例 1:Open-L 系统示例

```
#define n //迭代次数
#define α //分枝夹角
ω: A(n)
```

$$p_1: A(n) \rightarrow A(n-1)$$

$$p_2: A(n): \text{if } n > 0 \text{ B}(1) [+ (\alpha) C] [- (\alpha) C] B (1) C$$

$$p_3: B(t) \dashrightarrow F(2 * t) // F \text{ 表示画 } t \text{ 个单位长线段}$$

$$p_4: C \dashrightarrow ; F // \text{分号表示颜色递减}$$

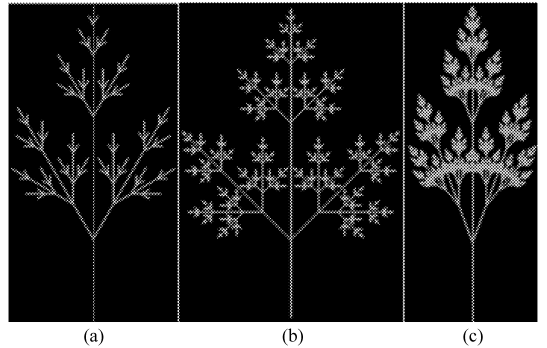


图 2 不同迭代次数的效果图

Fig.2 Results of recursions

(a) $n=4, \alpha=30^\circ$ (b) $n=6, \alpha=45^\circ$ (c) $n=8, \alpha=20^\circ$

3 虚拟植物中的参数曲线模型

L 系统可以描述虚拟植物的形态结构原型,通过控制 L 系统中的参数值变化就可以得到形态各异的植物形态。参数值的控制是虚拟植物形态的关键。本文采用参数曲线来控制其值的变化,参数曲线由植物实际形态观测数据拟合得到。不同的参数曲线控制不同的植物参数。本文所用到的参数曲线有规则参数曲线、三次样条曲线和 B 样条曲线。

3.1 规则参数曲线

在三维坐标系 $Oxyz$ 中,一般曲线的参数方程为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (t \in [0, 1]) \quad (1)$$

可以将其表示成矢量形式 $P = P(t), t \in [0, 1]$ 。用一些规则参数曲线方程来表示虚拟植物的形态,如直线参数方程

$$P = P_0 + (P_1 - P_0)t \quad (t \in [0, 1])$$

其中 $t = (x - x_0) / (x_1 - x_0)$, P_0 表示茎的起点坐标, P_1 表示茎的终点坐标, P 表示茎的长度。

又如抛物线参数方程

$$\begin{cases} x = 2pt^2 \\ y = 2pt \end{cases} \quad (2)$$

其中 t 为参数,其几何意义为动径 OM 与 x 轴正向夹角的余切值(图 3)。可采用该参数曲线方程表示植物茎的弯曲程度,曲线为茎的绘制轨迹。

3.2 三次样条曲线

常用参数曲线虽可描述参数值的变化,但由于其规则性,难以控制非规则的植物形态变换,而自

由曲线更能控制形态各异的植物形态。三次样条曲线是一条三次曲线, 由一个三次多项式来描述。设参变量为 t , 则两个数据点间的分段三次样条曲线表达式为 $S(t) = At^3 + Bt^2 + Ct + D, t \in [0, t_m]$, 通过变形推导可得任一段由 P_i 和 P_{i+1} 确定的三次样条曲线表达式为

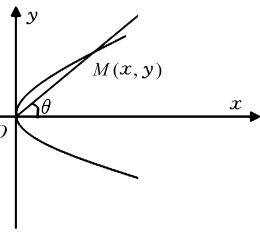


图 3 抛物线参数方程的几何意义

Fig.3 Geometry of parabola parameter equation

$$S_i(t) = P_i + P'_i t + \left[\frac{3(P_{i+1} - P_i)}{t_{i+1}^2} + \frac{2P'_i}{t_{i+1}} - \frac{P'_{i+1}}{t_{i+1}} \right] t^2 + \left[\frac{2(P_i - P_{i+1})}{t_{i+1}^3} + \frac{P'_i}{t_{i+1}^2} + \frac{P'_{i+1}}{t_{i+1}^2} \right] t^3$$

$$(t \in [0, t_{i+1}], i \in [1, 2, \dots, n-1]) \quad (3)$$

其中, P'_i 和 P'_{i+1} 为 P_i 和 P_{i+1} 的切矢。

三次样条曲线能通过所有给出的型值点, 可以靠端点切矢的方向和大小来控制其形状。当虚拟植物中的参数需要通过型值点时可采用三次样条曲线控制, 如植物的节间距。

3.3 B 样条曲线

由于三次样条曲线缺乏灵活性与直观性, 难以控制对植物外观形态影响较大的 L 系统参数。Bezier 曲线采用逼近原理, 用 N 根折线 ($N+1$ 个顶点) 定义一条 N 阶曲线, 具有直观和设计简单的优点。但 Bezier 曲线在次数较高时不稳定, 不能进行局部修改, 缺乏灵活性。B 样条曲线保持了 Bezier 曲线的优点, 且在局部性, 逼近精度方面优于 Bezier 曲线。B 样条曲线由若干样条曲线光滑连接而成, 用 $m+n+1$ 个顶点 $P_i (i=0, 1, \dots, m+n)$ 定义的 $m+1$ 段 n 次参数曲线表示, 即

$$P_{i,n}(t) = \sum_{k=0}^m P_{i+k} F_{k,n}(t) \quad (0 \leq t \leq 1)$$

其中, $F_{k,n}(t)$ 为 n 次 B 样条基函数, 其形式为

$$F_{k,n}(t) = \frac{1}{n!} \sum_{j=0}^{n-k} (-1)^j C_{n+1}^j (t+n-k-j)^n$$

$$(t \in [0, 1]; k=0, 1, \dots, n)$$

当 $n=3, k=0, 1, 2, 3$ 时, 得到三次 B 样条曲线的基函数形式为

$$\begin{cases} F_{0,3}(t) = (-t^3 + 3t^2 - 3t + 1)/6 \\ F_{1,3}(t) = (3t^3 - 6t^2 + 4)/6 \\ F_{2,3}(t) = (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1)/6 \\ F_{3,3}(t) = t^3/6 \end{cases}$$

则三次 B 样条曲线表示为

$$P(t) = F_{0,3}(t)P_0 + F_{1,3}(t)P_1 + F_{2,3}(t)P_2 + F_{3,3}(t)P_3 \quad (t \in [0, 1]) \quad (4)$$

因此对于植物外观形态影响较大的 L 系统参数 (如叶子长度, 叶子宽度参数等), 可以在 B 样条曲线控制下得到。

4 植物形态参数与参数曲线的关联模型

在上述的参数曲线模型中, 需要与 L 系统中的参数建立关联。通过控制参数曲线的变化来改变 L 系统中的参数, 从而实现对植物形态的控制。植物的形态参数很多, 包括节间距、叶长、叶宽、颜色、分枝角度等。在控制植物形态时需建立参数与参数曲线的关联模型。

4.1 度类参数的关联

对于长度类的参数 (如节间距离、叶长、叶宽) 可采用求曲线上的空间距离与之关联。空间两点间的距离可表示为

$$|P_0 P_i| = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} \quad (5)$$

即从曲线开始点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 到曲线上任一点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 的空间距离表示其参数值 (图 4a)。

4.2 角度类参数的关联

对于角度类的参数 (如分枝偏转角度、旋转角度) 可由曲线上某点 $M(x, y, z)$ 引直线至坐标原点, 直线 OM 在坐标原点处与垂直坐标轴的夹角作为植物参数角度 (图 4b)。

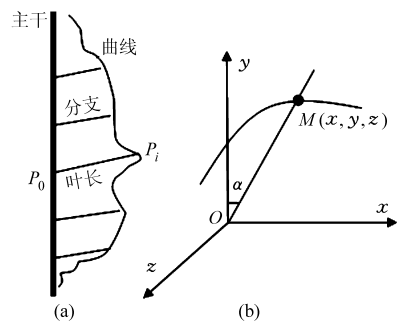


图 4 形态参数与参数曲线的关联
Fig.4 Hypotaxis model

4.3 渐变类参数的关联

对于渐变类参数 (如颜色), 则可选取曲线上坐标分量与之关联。图形学中的颜色包括 RGB 模型、CMY 模型、YIQ 模型和 HSV 模型, 前 3 种与硬件相关, HSV 模型则面向用户, 在对二维植物图形绘制时, 可采用 RGB 模型, 对于三维图形可采用 HSV 模型。在与曲线关联时, 可采用颜色模型的 3 个参数 (RGB 中为 R, G, B , HSV 模型中为 H, S, V) 分别与曲线上点 $P(x, y, z)$ 的坐标分量 x, y, z 分别对应, 由于颜色模型取值具有范围, 可以加入比例因子, 即

$$\begin{cases} R = rx \\ H = hx \\ G = gy \\ S = sy \\ B = bz \\ V = vz \end{cases} \quad (6)$$

```
[ - (alpha) L (leafSize) ] //使用参数绘制左叶
A (t, n + 1)
A (t, n) : { t = t - Delay ; } t > 0 && n > = N - - >
//绘制条件
I (IntSize) L (LeafSize) //绘制茎和叶
homomorphism
I (t, x) - - > F (x * 0.5) //绘制茎
L (t, n, x) - - > ; ~ l (x * 0.6) //绘制叶
```

5 控制方法验证与分析

以 VB 6.0 软件为开发平台,并利用 OpenGL 提供的核心函数库与实用库函数,开发了一个虚拟植物重建系统以验证控制方法的可行性及有效性。系统分为两大部分,左边编辑参数曲线,右边绘制植物图形,菜单调用控制曲线(图 5)。植物器官由函数绘制,建模时只需调用即可,本文中只用到了叶和茎。

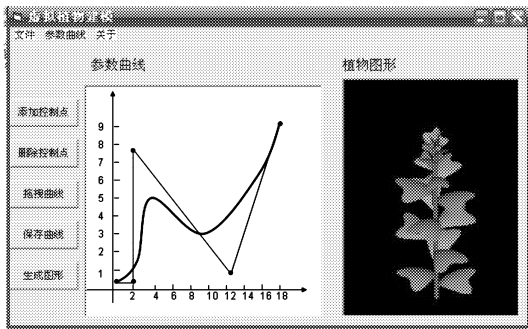


图 5 虚拟植物重建系统界面
Fig.5 Virtual plant model system

以蕨类植物为例说明控制方法的应用。蕨类植物的形态主要体现在茎叶变化,其茎叶为羽状复叶,在重建时先采用 Open-L 系统给出其基本形态,然后将参数曲线函数替代形态参数,通过变化参数曲线改变蕨类茎叶的形状。

例 2:蕨类植物的 Open-L 系统实例

```
#define delta 0.1 //迭代增量
#define delay 1.5 //分支生长期变化
#define N 15 //叶片总数
#define alpha 30 //分支角度
#define IntSize 0.5 //节间距离
#define LeafSize 2.0 //叶片大小
Axiom : A (0, 0)
A (t, n) - - > A (t + delta, n) //公理递归
I (t, x) - - > I (t + delta, x) //递归绘制茎
L (t, n, x) - - > L (t + delta, n, x) //递归绘制叶
decomposition
A (t, n) : { t = t - delay ; } t > 0 && n < N - - > //
绘制条件
I (IntSize) //使用参数绘制茎
[ + (alpha) L (LeafSize) ] //使用参数绘制右叶
```

实例中形态主要受节间距 IntSize 和叶长度 LeafSize 控制,在经典 L 系统中,其参数值一般取不同常量得到不同植物形态,其变化较少(图 6a 为常量下的形态)。通过引入参数曲线函数替代上述参数变化,令 $IntSize = f_1(n)$, $LeafSize = f_2(n)$, f_1 和 f_2 为两个 B 样条曲线函数,由式(4)确定,其值表示式(5)中的 $|P_0P_i|$ 值,在绘制中通过该值及前一点坐标可以得出下一绘制点坐标 (x_i, y_i, z_i) ,效果如图 6b、6c 所示。

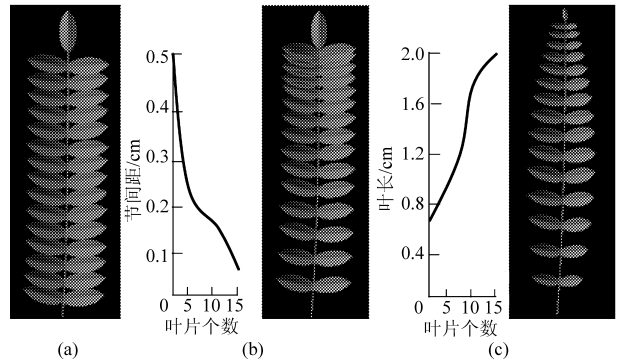


图 6 蕨类植物控制过程

Fig.6 Control process of fern posture

(a) 常量控制的形态,叶间距为 0.5 cm,叶长为 2 cm (b) B 样条曲线控制节间距离的形态 (c) B 样条曲线控制叶长度的形态

采用该控制方法对棉株生长过程进行重建。模拟中各参数曲线为三次样条曲线和 B 样条曲线,并采用生长日期(20d)为自变量,其曲线值代表各具体形态参数值。由于生长过程为渐进序列(图 7a ~ 7d),各参数在棉株生长初期其值较小,随着时间推移,各参数值越来越大,因此,各参数曲线呈递增变化(图 7e ~ 7i),其中叶片颜色控制采用预定义颜色,各颜色带有索引值(索引值采用 HSV 中 3 个分量合成,见式(6)),其颜色曲线值为索引值,在绘制中,先得到索引值,再根据索引值找到各预定义颜色。此处索引值越大,颜色越深,在棉叶绘制中,随着生长期延长,其棉株下层的叶片颜色越来越深,以符合植物生长规律。

通过该控制方法可以模拟更加复杂的植物,其控制中需要选取好形态参数与之匹配的参数曲线,并对参数曲线进行变形,其变形需反复实验,直至达

到理想的虚拟植物重建图形。虽然实验需要耗费一定时间,但该控制方法得到的植物形态比经典 L 系

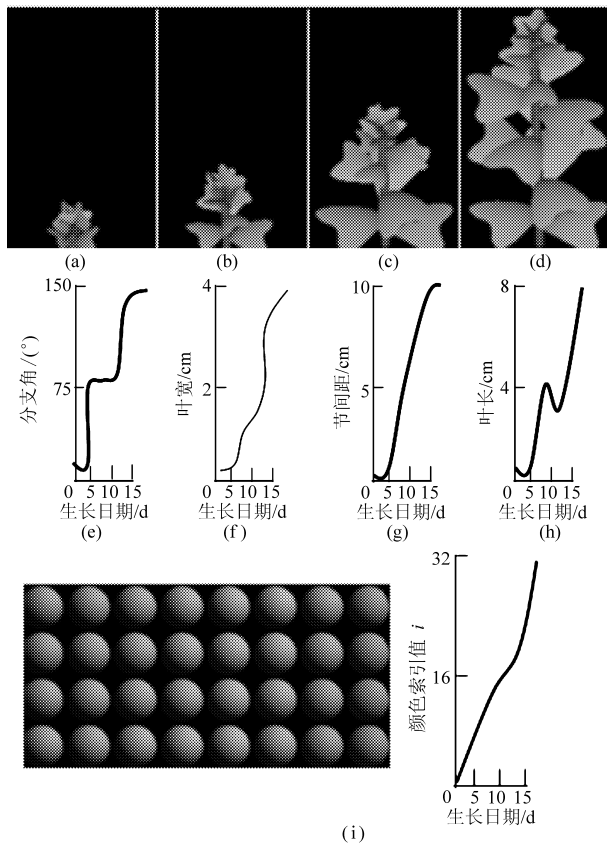


图 7 棉株生长过程

Fig. 7 Cotton plant grown process

(a) 5 d (b) 10 d (c) 15 d (d) 20 d (e) 分支角曲线
(f) 叶宽曲线 (g) 节间距曲线 (h) 叶长曲线 (i) 预定义颜色及曲线

统下的植物形态要丰富得多,且实验中的不同植物形态只需拖拽参数曲线即可。图 8 为通过该控制方法下的花楸、枫树、剑麻、辣椒植株的重建效果。

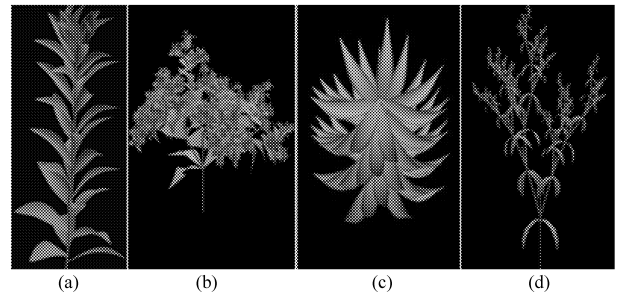


图 8 各类植物控制效果图

Fig. 8 Various plant posture results

(a) 花楸 (b) 枫树 (c) 剑麻 (d) 辣椒植株

6 结束语

本文着重探讨了植物形态结构的控制方法,提出通过 L 系统构造植物形态原型,然后采用参数曲线控制植物宏观形态结构。通过规则曲线、三次样条曲线、B 样条曲线控制不同类别的植物参数,并建立了它们之间的关联模型。该方法与其他虚拟植物形态构造相比,能根据参数曲线变化直观地控制植物宏观结构形态,并且比其他模拟方法参数少,更加简单实用。实验表明,本方法操作简单且能较好地直观表现出虚拟植物的形态结构。该方法可应用于虚拟植物建模及形态控制,尤其适用于植物生长过程及虚拟景观植物。

参 考 文 献

- 郭武,李文辉,关菁华,等. 基于动态贝叶斯网络的虚拟盆景仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 103 ~ 107.
Guo Wu, Li Wenhui, Guan Jinghua, et al. DBN-based simulation of virtual plant bonsai[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20 (1): 103 ~ 107. (in Chinese)
- Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. The algorithmic beauty of plants[M]. New York: Springer Verlag, 1990.
- Adam Runions, Brendan Lane, Przemyslaw Prusinkiewicz. Modeling trees with a space colonization algorithm [C] // Proceedings of Eurographics Workshop on Natural Phenomena, 2007: 63 ~ 70.
- Streit L, Federl P, Sousa M C. Modeling plant variation through growth[J]. Computer Graphics Forum, 2005, 24(3): 497 ~ 506.
- 唐卫东,刘昌鑫,李萍萍,等. 基于 Open-L 系统及递归表示的虚拟植物模型[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 167 ~ 170.
Tang Weidong, Liu Changxin, Li Pingping, et al. Virtual plant model based on Open-L system and recursive expression[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40 (1): 167 ~ 170. (in Chinese)
- 迟小羽,盛斌,陈彦云,等. 基于物理的植物叶子形态变化过程仿真造型[J]. 计算机学报, 2009, 32(2): 221 ~ 230.
Chi Xiaoyu, Sheng Bin, Chen Yanyun, et al. Physically based simulation of weathering plant leaves[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32 (2): 221 ~ 230. (in Chinese)
- Dean T, Kanazawa K. A model for reasoning about persistence and causation[J]. Computational Intelligence, 1989, 5(3): 142 ~ 150.
- 周云龙. 植物生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- Abelson H, Disessa A A. Turtle geometry[M]. Cambridge: M. I. T. Press, 1982.