

基于参数 L 系统的梨树枝干模型三维可视化^①

胡秀珍^{1,2}, 张 建¹, 李 淼¹, 袁 媛¹

¹(中国科学院合肥智能机械研究所 智能农业实验室, 合肥 230031)

²(中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230027)

摘 要: 为了真实的模拟果树枝干形态, 提出形态特征信息和参数 L 系统相结合的果树枝干可视化方法。以梨树的树体结构为研究对象, 提炼其相关的形态结构特征以及生态生理等特性变化; 应用 L 系统建模方法对梨树建立包含树枝的粗细、分叉角度等细节信息的模型; 最后使用 OpenGL 三维建模技术将梨树生长几何信息转化为直观的三维可视化图形信息, 模拟出梨树常见树形(自然开心形、主干疏层形、小冠疏层形)的基本形态结构, 为开发梨树整形修剪计算机仿真系统奠定基础。

关键词: 虚拟果树; L 系统; 梨树枝干; 三维可视化; OpenGL

3D Visualization of Trunk and Branch Model of Pear Tree Based on Parametric L-System

HU Xiu-Zhen^{1,2}, ZHANG Jian¹, LI Miao¹, YUAN Yuan¹

¹(Laboratory of Intelligent Agriculture, Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

²(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The visualization method of fruit tree branches that combines morphological information and parametric L-system is presented. Based on studying on the structures of pear tree, morphological characteristics, characteristics of ecological change and so on are extracted, then L-System model of pear tree including the thickness of the branches, bifurcation angle etc. are established, and geometric information of plant growth are transformed into intuitive graphical information and visual output through 3D modeling algorithm basing on OpenGL. Finally, we simulate basic forms of common pear tree (natural open center type, sparse layer of the main crown shape, small crown layer shape), which lays a foundation for developing the computer simulation system of pruning pear tree.

Key words: virtual fruit tree; L-System; branch and trunk of pear tree; 3D visualization; OpenGL

虚拟植物建模是指以植物个体或群体的形态结构为研究对象, 应用虚拟现实技术, 在计算机上再现植物在三维空间的生长过程, 它可以在几秒钟之内模拟整株甚至成群植物的整个生命周期, 不必用很长的时间实地种植作物, 节省了时间、人力, 也节省了费用, 植物的可视化仿真为植物生长研究提供了一种直观、迅捷的科学研究方法^[1]。而 L 系统因其对真实植物的形态结构具有强大的模拟能力, 已是虚拟植物的重要工具。与其他方法相比, L-系统能够实现不同类型植物的模拟, 其形式语言方法具有坚实的数学理论基础^[2]。

作为植物生态系统中一个重要组成部分的果树,

其表达也是虚拟建模系统中一个主要研究内容。自上世纪下半叶, 研究者构建了多种树木枝干模型, 他们主要采用一些简单的线面等几何体绘制出树木的模型, 因而模型缺乏三维空间, 仅仅使用基于二维平面的图像, 没有包含各种树木的特征和生长要素。近年来, 国内外学者在 L 系统基础上, 对树木模型及可视化进行了相关的研究, 成为虚拟农业研究的一个重要部分。Aono 和 Kunii^[3]参考 L 系统的原始定义, 第一个将 L 系统应用于产生树状植物模型^[4]; 郝小英等^[5]较早地在树木可视化方面进行了开创性的工作; 李庆忠、韩金姝^[6]用 L 系统与 IFS 结合的方法能够快捷地

① 基金项目:国家科技支撑项目(2009BAD4B02)

收稿时间:2010-12-02;收到修改稿时间:2011-02-22

得到树木模型, Mitch A^[7]等使用 L 系统建模理论对桃树枝进行了创建; 吴瑞姣^[8]等将较全面的生物学形态结构特征融入 L 系统, 作为树木的形态建成方法, 对芒果树进行了建模及可视化显示; 刘阁^[9]以开心形苹果树的树体结构为基础, 使用 L 系统理论建立果树枝干模型, 使用虚拟植物模拟软件 L-studio 动态地模拟出开心形苹果树在不同生长阶段的三维形态。但针对果树不同树形的结构目前并没有进行深入研究。

本文以梨树为研究对象, 采用参数 L 系统方法实现了其不同树形枝干模型的可视化, 旨在建立虚拟梨树平台, 为梨树的整形修剪计算机仿真系统开发奠定基础。

1 模型方法及梨树形态结构

1.1 L 系统

L 系统是生物学家 Aristid LinderMayer 于 1968 年提出的有关生长发展中的细胞交互作用的数学模型^[10], 尤其被广泛应用于植物生长过程的研究。L 系统的本质是一个符号重写系统, 即用一个重写规则或产生式集合对简单的初始目标中的部分进行连续置换来定义负责目标的技术。它从一个起始字符串, 即公理出发, 通过对植物对象生长过程的经验式概括和抽象, 初始状态与描述规则, 进行有限次迭代, 生成字符发展序列以表现植物的拓扑结构, 并对产生的字符串进行几何解释, 最终生成植物形态。例如对于二叉树的文法描述为: $F \rightarrow F[+F][-F]$, 其中的符号含义为:

- F : 当前方向向前走一步;
- $[$: 将系统的当前状态压栈保存;
- $]$: 将栈中状态弹出, 即恢复系统的原来状态;
- $+$: 由当前方向顺时针转 δ 角;
- $-$: 由当前方向逆时针转 δ 角。



图 1 L 系统得到的二叉树

对于二叉树文法 $V = \{F, +, -, [,]\}$, 描述该二叉

树 L 系统的原表达式为 $G = \langle V, \omega, P \rangle$, 其中 V 是字符集, 这里 ω 是起始生成元, 用以确定字符串的初始状态, 且此处 $\omega \in V, \omega = F, \delta$ 定义为 20 度, P 为该类植物的生成规则集, 这里 $P = F \rightarrow F[+F][-F]$ 。在生成规则中, 通过对该字符串的迭代展开可以得到如图 1 所示的一棵二叉树。显然这样的仿真程度远不能满足需要。因此, 为了使仿真效果更加真实, 必须在此基础上进行改进起初 L 系统。本文采用的是根据 Abelson 和 diSessa^[11]的思想, 被推广到三维空间的龟形解释的参数 L 系统。

1.1.1 龟形解释的几何三维模型

海龟解释的基本思想如下: (平面上) 海龟的当前状态由一个三元数组 (x, y, z) 来定义, 其中笛卡尔坐标 (x, y) 表示海龟的位置, 角度 α 称为前进方向, 可以解释为海龟面对的方向。给出步长 d 和角度的增量 δ , 海龟根据以下的符号所代表的命令做出反应。如图 2 为一个字符串的平面海龟解释。

F : 向前移动一个步长 d , 海龟的位置变成 (x', y', α) , 其中, $x' = x + d \cos \alpha, y' = y + d \sin \alpha$, 在点 (x, y) 和 (x', y') 之间画一条线段。

f : 向前移动一个步长 d , 不画线段。

$+$: 向左转角度 δ , 海龟的下一个状态为 $(x, y, \alpha + \delta)$, 角的正方向为逆时针方向。

$-$: 向右转角度 δ , 海龟的下一状态为 $(x, y, \alpha - \delta)$ 。

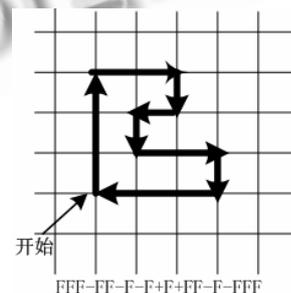


图 2 一个字符串的平面海龟解释
(角的增量 $\delta = 90^\circ$, 开始时海龟方向朝上)

L 系统的海龟几何解释推广到三维空间, 其关键的概念是海龟在空间的当前位置是由三个向量 $[H, L, U]$ 表示的, 它们分别表示海龟前进方向、向左方向、和向上的方向, 方向向量是相互垂直的单位向量, 即满足方程 $H \times L = U$ 。海龟的旋转可由下面方

程完成:

$$[H'L'U'] = [HLU]R \quad (1)$$

这里 R 是 3×3 的旋转矩阵。当旋转角为 α 时, 绕向量 H, L, U 的旋转矩阵表示为:

$$R_U(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_L(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

$$R_H(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

控制海龟在空间方位的符号如下(图3): + 向左转角度 δ , 应用旋转矩阵 $R_U(\delta)$; - 向右转角度 δ , 应用旋转矩阵 $R_U(-\delta)$; & 向左转角度 δ , 应用旋转矩阵 $R_L(\delta)$; ^ 向左转角度, 应用旋转矩阵 $R_L(-\delta)$; / 向左转角度 δ , 应用旋转矩阵 $R_H(\delta)$; \ 向左转角度 δ , 应用旋转矩阵 $R_H(-\delta)$; | 掉头, 应用旋转矩阵 $R_U(180^\circ)$ 。

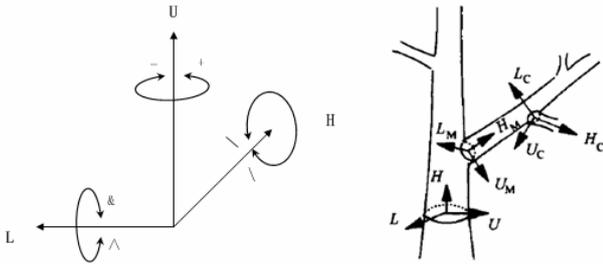


图3 三维空间的海龟状态表示

1.1.2 参数 L 系统

从抽象的分形到模拟植物的分枝结构, 尽管具有海龟解释的 L 系统使得产生多种多样有趣的目标成为可能, 但它们的模拟能力还是相当有限的, 表现在一些生长函数的连续性表示的困难, 因此提出把数字参数与 L 系统的符号结合使用, 即参数 L 系统^[12]。在植物形态建模中, 参数化 L 系统是一种常用的形态发生模型。

参数 L 系统是对参数字符串进行操作, 其中, 含

参数的字符串是由与参数相关的字母组成的字符串模块。一个参数 L 系统定义为一个有序的四元组 $G = \langle V, \Sigma, \omega, P \rangle$, 这里:

- V 是系统的字母表;
- Σ 为形式参数的集合;
- $\omega \in (V \times \mathbb{R}^*)^+$ 是非空的参数字符串, 称为起始字符串;
- $P \subset (V \times \Sigma) \times C(\Sigma) \times (V \times \varepsilon(\Sigma))$ 是产生式的有限集。

符号: 和 \rightarrow 用来区分开产生式的三个组成部分: 前驱、条件和后继。例如一个产生式前驱为 $A(t)$, 条件 $t > 5$ 和后继 $B(t+1)CD(t \wedge 0.5, t-2)$ 写为

$$A(t) : t > 5 \rightarrow B(t+1)CD(t \wedge 0.5, t-2) \quad (2)$$

推导: 一个产生式与一个参数字符串中的模块相匹配, 如果满足以下条件: 模块中的字母和产生式的前驱中的字母相同; 模块中实际参数的数目与产生式的前驱中形式参数的数目相等; 若果产生式中形式参数置换实际参数, 条件值为真。一个匹配的产生式就可以应用于模块, 生成由产生式后继指定的一串模块, 实际参数值由形式参数根据它们的位置进行置换。

如果一个或多个参数与海龟解释的符号相联系, 则第一个参数的值控制海龟的状态。如果符号后面没有任何参数, 那么默认值与非参数系统情形相同, 受参数影响的基本的符号集合如下:

$F(a)$: 向前移动一个步长 $a > 0$, 海龟的位置变为 (x', y', z') , 其中, $x' = x + aH_x$, $y' = y + aH_y$, $z' = z + aH_z$, 在点 (x, y, z) 和点 (x', y', z') 之间画线段。

$f(a)$: 向前移动一个步长 $a > 0$, 不画线。

$+(\alpha)$: 绕 U 转动一个角度 α , 若 α 为正则向左转, 如果 α 为负的则向右转 (-, &, ^, /, \ 的参数解释类推)。

1.2 梨树枝干模型的形态特征分析

树形指树体的总体结构模式, 有利于早果、丰产、优质、延寿的树形都是良好的树形。由梨树的文献资料^[13]结合相关农业专家提供的知识, 梨树几种常见树形的形态结构如下。

1.2.1 主干疏层形

树高小于 5 米, 主干高 60~70 厘米, 有中心干, 主枝 6 个 (第一层 3 个, 第二层 2 个, 第三层 1 个)。

第一二层间距 100 厘米,第二三层间距约 60 厘米,第一层层内距 40 厘米。第一层每个主枝上配 2~3 个侧枝,第二、三层每个主枝上配 1~2 个侧枝。

1.2.2 小冠疏层形

树高 3.5~4 米,主干高 60~70 厘米,有中心干,五个主枝分二层排列,第一层 3 个主枝,其中一主枝顺行向延伸。第二层 2 个主枝,插空向行间延伸,主枝角度。60 度。层间距 100 厘米以上,主枝上不配侧枝,成形后落头开心。

1.2.3 自然开心形

无明显的中心干,在主干上分生 3~4 个主枝,主枝上各分生侧枝 6~8 个,侧枝上再分结果枝组,树冠中心开心透光。三主枝的基角为 45~50 度,主枝 1 米以外角度应逐渐缩小,即腰角应为 30 度。主枝先端的角度,即梢角宜近于直立,植株高约 4 米。

结合梨树的形态结构知识,将树枝的粗细、分叉角度等细节信息引入到规则中,作为其参数控制,我们就可建立适合梨树不同树形的规则模型。

2 梨树枝干模型构建与三维实现

本文借鉴 Aono 和 Kunii 的树模型^[3]的思想再结合梨树具体的形态结构特征,使用具有海龟解释的参数 L 系统引入对树干、树枝的粗细、长短以及树生长过程中的分叉角度等信息并加入树干颜色信息的细节控制,并将细节控制过程拓展至三维空间,实现树枝干模型的三维建模。

2.1 梨树枝干模型 L 系统文法

通过对梨树各种树形结构观测分析,总结归纳出可以模拟其形态结构的参数化 L 系统的迭代公理和产生式。通过设定模型的初值以确定被模拟植物茎干的粗细、分枝角度的大小、分枝类型、枝干长度等重要形态指标,将具体植物实测数据拟合到模式植物的结构参数中,结合各种实际植物的形态结构与分枝特点,就可以使得每一种树形模型都有相应的迭代公理和产生式与之相对应,从而模拟生成不同形态结构的植物模型。模型构建用的主要是前面提到的参数 L 系统的算法。下面为梨树某一树形(以小冠疏层型树形为例)的参数 L 系统规则描述。

基本参数定义:

```
#define r1 2          /*压缩率 1*/
#define r2 0.7        /*压缩率 2*/
```

```
#define a0 60         /*分枝角 1*/
#define a2 40         /*分枝角 2*/
#define d 160         /*扩散角*/
#define wr 0.707      /*宽度缩减率*/
```

其中 $wr=0.707$ 满足 Leonardo da Vinci^[11]基本条件。其它参数根据具体树形的形态结构特征设定。

```
@A(1,0.06)
```

```
A(l,w)-->!(w)F(l)[&(a0)B(l*r2,w*wr)]/(d)[&(a0)B(l*r2,w*wr)]/(d)F(l*0.5)[&(a2)B(l*r2,w*wr)]/(180)D(l*r1,w*wr)
```

```
B(l,w)-->!(w)F(l)[&(a2)C(l*r2,w*wr)]E(l,w*wr)
```

```
C(l,w)-->!(w)F(l)
```

```
E(l,w)-->!(w)F(l)[^(a2)C(l,w*wr)]!(w*0.9)F(l)
```

```
D(l,w)-->!(w)F(l)[&(a2)C(l*r2,w*wr)]/(180)F(l*0.4)[&(a2)C(l*r2,w*wr)]!(w*0.5)F(l*0.2)
```

A(l,w)生成长度为 l,宽度为 w 的树木主干,“[“和”]”内的代表树木分枝结构。值得一提的是,除了龟形解译涉及到的基本符号外,本文梨树枝干规则建模中还添加了其他符号,!表示节半径大小。

2.2 模型三维实现结果

梨树枝干模型对应的参数 L 系统规则通过替换派生出的符号集可用海龟几何三维模型来解释,然后结合 OpenGL 代码编程来实现抽象符号具像化过程,就可以得到较为形象的树木主分枝结构形态。

我们根据梨树自然开心形,主干疏层形以及小冠疏层形的形态特征编写其对应的参数 L 系统规则,然后以 Visual C++为开发平台,通过 OpenGL 三维建模最终得到对应树形结构实验结果分别如图 4、图 5、图 6 所示。

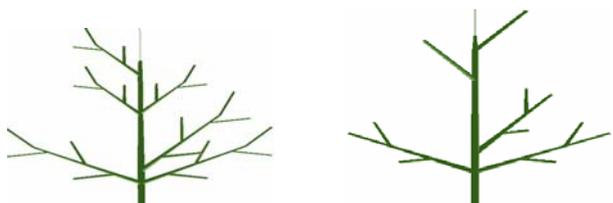


图 4 主干疏层形图

5 小冠疏层形

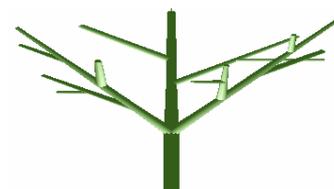


图 6 自然开心形

3 结论

本文以梨树的树体结构为基础,将较全面的生物学形态结构特征融入L系统,在详细观测梨树及查阅相关文献的基础上,提炼相关的形态结构特征,并将其融入梨树的L系统文法规则中,建立果树枝干模型,然后在VC++6.0和OpenGL平台上进行L系统规则的解析,再对生成的最终字符串序列中的每个特定的字符进行几何解释,在计算机上将树木模型进行三维可视化显示。通过模拟可知,使用L系统构建果树枝干模型可以取得良好的效果。

参考文献

- 1 胡包钢,赵星,严红平,等.植物生长建造模与可视化—回顾与展望.自动化学报,2001,27(6):816-835.
- 2 廖桂平,李锦卫,欧中斌,等.基于参数L-系统的油菜花朵与花序生长可视化研究.农业工程学报,2009,25(4):150-156.
- 3 Aono M, Kunni TL. Botanical tree image generation. IEEE Computer Graphics and Application, 1984,4(5):10-34.
- 4 Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. The algorithmic beauty of plants. Springer-Verlag New York, Inc., 1990.
- 5 郝小琴.森林景物的三维迭代函数系统建模技术的研究.计算机学报,1999,22(7):768-773.
- 6 李庆忠,韩金妹.一种L系统与IFS相互融合的植物模拟方法.工程图学学报,2005,26(6):135-139.
- 7 Mitch A, Przemyslaw P, Theodore D. Using L-systems for modeling source-sink interactions, architecture and physiology of growing trees: the L-PEACH model. New Phytologist, 2005,166: 869-880.
- 8 吴瑞姣,陈崇成,等.基于形态特征的芒果树L系统建模及其可视化.系统仿真学报,2008,9(20):344-351.
- 9 刘阁,周国民,等.基于L系统的开心形苹果树枝干模型.安徽农业科学,2009,37(16):7795-7796.
- 10 Lindenmayer. Mathematical models for cellular interaction in development. Journal of Theoretical Biology, 1968,18: 230-315.
- 11 Abelson H, diSessa AA. Turtle geometry. Cambridge: M.I.T Press, 1982.
- 12 Prusinkiewicz P, Hanan J. Visualization of botanical structures and processes using parametric L-systems. In: Thalmann D, ed. Scientific Visualization and Graphics Simulation. J. Wiley & Sons, 1990. 183-201.
- 13 朱家穗.简评梨树的九种树形.西南园艺,2005,33(1):20-2.

(上接第26页)

工作流程数据呈现接口,可以统一处理存在相关性的数据,而且取得数据的方式与提供数据的应用间的耦合性被降低了。

4) 多应用交互,本系统基于服务的体系架构便于系统扩展、减少重复开发以及对不同系统的兼容性等,不同的应用通过暴露服务来实现应用之间的交互,甚至这些服务可以组织成新的有价值的应用,可以实现快速变更业务流程。

5) 对体系的运行以PDCA的信息化的方法组织工作和收集质量证据,便于系统的资源共享、工作协调、过程监控和单位整体质量管理体系运行情况跟踪、掌握和数据分析,能有效协助质量管理体系的运行,并能为体系的持续改进提供数据支持。该系统正在试

运行,在质量条款和质量证据对应方面,应进一步优化,便于高效的查找、整理和归档。

参考文献

- 1 GJB 9001A—2001 质量管理体系要求.http://www.5ixue.com: 5-6.
- 2 贾庭彰.基于SOA架构的BPM平台系统分析与设计[硕士学位论文].大连:大连海事大学,2008.11-15.
- 3 Fielding RT. Architectural styles and the design of network-based software architectures [Ph.D. Thesis]. University of California, 2000.32-38.
- 4 Bukovics B. Pro WF: Windows Workflow in .Net3.5. NY. U.S.A.: Apress Press, 2008.33-40.